



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Elli Johansson

Voima-antureiden testauksen suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

27.5.2019

Tekijä Otsikko	Elli Johansson Voima-antureiden testauksen suunnittelu ja toteutus
Sivumäärä Aika	40 sivua + 3 liitettä 27.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneautomaatio
Ohjaajat	System Specialist Jere Knuutila Lehtori Antti Liljaniemi
<p>Miehittämätön maa-ajoneuvo eli UGV on nimensä mukaisesti miehittämätön, autonominen ja tavallisesti kauko-ohjattava ajoneuvo, jota voidaan käyttää esimerkiksi tavarankuljetukseen vaikeassa tai vaarallisessa maastossa. Autonominen ajoneuvo on itseohjautuva ja se pystyy ympäristöönsä havainnoimalla ajamaan ja navigoimaan itsenäisesti.</p> <p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa testilaitteisto Rakka UGV:n kuormanmittausjärjestelmän voima-antureille. Työssä tutkittiin voiman mittaamisen teoriaa ja tarkasteltiin erilaisia voiman mittaamiseen käytettäviä antureita. Testilaitteiston suunnittelun pohjana käytettiin olemassa olevia lähtötietoja syntyvien voimien suunnista ja suuruuksista.</p> <p>Suunnitellun testilaitteiston avulla tutkittiin voima-antureiden toimintaa ja selvitettiin, toimivatko anturit halutulla tavalla osana kuormanmittausjärjestelmää, vai onko tarpeen keksiä vaihtoehtoinen ratkaisu voima-antureiden tilalle.</p> <p>Lopputuotoksena saatiin kattava otanta voima-antureiden toiminnasta Excel-taulukon muodossa. Taulukko sisältää tietoa paitsi kohtisuoralla kuormituksella tehdyistä mittauksista, myös epäsuoralla kuormituksella saaduista testituloksista.</p>	
Avainsanat	UGV, anturi, voima-anturi, voimanmittaus

Author Title	Elli Johansson Testing of Force Sensors
Number of Pages Date	40 pages + 3 appendices 27 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Automation
Instructors	Jere Knuuttila, System Specialist Antti Liljaniemi, Senior Lecturer
<p>An Unmanned Ground Vehicle (UGV) is, as its name suggests, an unmanned, autonomous and typically tele-operated vehicle. An autonomous vehicle is capable of sensing its environment and moving with little or no human input.</p> <p>The objective of this thesis was to design and build a testing system for the force sensors used in the Rakka UGV weight measuring system. This thesis studies the theory of force measurement and different sensors used in force measuring. The basis for the design of the testing system was the existing information about the scale and direction of forces directed to the force sensors.</p> <p>The aim of the testing was to find out whether the sensors would work as desired as part of the weight measuring system or if an alternative solution to the force sensors needs to be discovered.</p> <p>As a result, an Excel table was created with comprehensive information about the operation and the test results of the chosen force sensors. The table contains information also about e.g. perpendicular and indirect loading of the force sensors.</p>	
Keywords	UGV, sensor, force sensor, force measurement

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Voiman mittaaminen	2
2.1	Venymäliuska-anturit	3
2.1.1	Venymäliuska	3
2.1.2	Venymäliuskaan perustuvat voima-anturit	5
2.2	Pietsosähköiset voima-anturit	7
2.3	Induktiiviset voima-anturit	9
3	Voima-antureiden testausjärjestelmä	10
3.1	Testipenkin suunnittelu	10
3.2	Käytettävät komponentit ja mittausohjelma	12
4	Mittausten suorittaminen	20
4.1	Antureiden BFRC1 – 4 vertailu kohtisuoralla kuormituksella	20
4.2	Kuormitus muuttuvalla kulmalla	21
5	Mittaustulokset	22
5.1	Kohtisuoraan kohdistuva kuormitus ja antureiden välinen vertailu	22
5.2	Ylikuorma	30
5.3	Kuormitus muuttuvalla kulmalla	32
5.4	Negatiivinen kuormitus	36
5.5	Virheiden arviointi	37
5.6	Tulosten luotettavuuden arviointi	38
6	Yhteenveto	39
6.1	Tulokset ja jatkokehitys	39
6.2	Pohdinta	39
	Lähteet	41

Liitteet (vain työn tilaajan käyttöön)

Liite 1. Jigin piirustukset

Liite 2. DataScaling – pääohjelma

Liite 3. SensorConfiguration – aliohjelma

Lyhenteet

A/D	<i>Analog/Digital</i> , analoginen ja digitaalinen
CAD	<i>Computer-aided Design</i> , tietokoneavusteinen suunnittelu
CAN	<i>Controller Area Network</i> , ajoneuvoissa, koneissa ja teollisuuslaitteissa käytettävä automaatioväylä
FBD	<i>Function Block Diagram</i> , funktiolohko-ohjelma
I/O	<i>Input/Output</i> , sisääntulo ja ulosmeno
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , ohjelmoitava logiikka
ST	<i>Structured Text</i> , strukturoitu teksti ohjelmointiympäristössä
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i> , miehittämätön maa-ajoneuvo

1 Johdanto

Tämän insinööriyön aiheena on suunnitella ja toteuttaa testipenkki Rakkatec Oy:n Rakka UGV:n kuormanmittausjärjestelmän 17-4PH 5T -voima-antureille. Tutkimuksen kohteena oleville voima-antureille tehdään erilaisia kuormitustestauksia, joiden tavoitteena on saada selville antureilta saatavan informaation luotettavuus. Mittausten suorittamiseen käytetään Rakkatec Oy:n tiloissa rakennettavaa testilaitteistoa. Informaation keräämistä ja tulkintaa varten tehdään mittausohjelma Codesys V3 SoftPLC:llä, josta tiedot siirretään Excel-taulukkoon jatkokäsittelyä varten.

Insinööriyön tavoitteena on voima-antureiden testaamisen lisäksi tutustua voiman mittaamiseen ja siihen liittyvään teoriaan tutkimalla erilaisia voiman mittaamiseen käytettäviä antureita.

Työ rajattiin siten, että tutkimuksen kohteena olevilta voima-antureilta saatavan tiedon tarkkuudeksi riittää tietojen yhdenmukaisuus, eli jokaiselta anturilta on saatava samalla kuormalla sama tieto. Yhdelle voima-anturille tehdään lisäksi tutkimuksia epäsuorasti kohdistuvan voiman vaikutuksesta saatuihin mittaustuloksiin. Lopputuotoksena on tarkoitus saada Excel-taulukko, jossa on tarkkaa tietoa valittujen voima-antureiden sopivuudesta haluttuun käyttötarkoitukseen. Tarvittaessa taulukko voi myös toimia tietolähteenä vaihtoehtoisten antureiden valinnassa.

2 Voiman mittaaminen

Fysiikassa *voima* -nimisen suureen avulla kuvataan ympäristön pyrkimystä muuttaa kappaleen liikettä. Voiman suunta ilmaisee, mihin ympäristön aiheuttama veto tai työntö kohdistuu; voima (\vec{F}) on siis vektorisuure. Voiman yhtälö on $F = ma$. Yhtälössä

F on voima (N)

m on massa (kg)

a on kiihtyvyys (m/s^2).

Voiman itseisarvo taas kuvaa vaikutuksen voimakkuutta. Voimasta puhuttaessa on aina ilmoitettava mihin kappaleeseen voima vaikuttaa ja mikä on voiman aiheuttaja. Kappaleeseen kohdistuvia voimatyyppejä on useita: on kosketusvoimia kuten tukivoima, jännitysvoima ja kitkavoima sekä etävoimia kuten gravitaatio- eli painovoima sekä sähkömagneettisia voimia. [1, s. 99 - 102.]

Erilaiset voimien mittaamiseen tarkoitetut anturit perustuvat venymäliuskojen, pietsosähköisten kiteiden tai induktiivisten antureiden käyttöön. Voima-antureita voidaan käyttää sekä staattisten että dynaamisten kuormien mittaamiseen. [2, s. 58.]

2.1 Venymäliuska-anturit

2.1.1 Venymäliuska

Venymäliuskat ovat vastuksia, joiden toiminta perustuu muodonmuutoksen aiheuttaman resistanssin muutokseen. Venymäliuskat kiinnitetään tutkittavaan kappaleeseen yleensä liimaamalla, ja kun liuska venyy kappaleen muodonmuutoksen seurauksena, muuttuu liuskan vastus R , joka lasketaan kaavalla $R = \rho * \frac{4*L}{\pi*D^2}$. Kaavassa

ρ on langan ominaisvastus

L on langan pituus

D on langan halkaisija. [3.]

Liuska voi olla ohut metallilanka, metallikalvo tai puolijohde. Metallikalvoliuska on edellä mainituista käytetyimpiä. [1, s. 58.]

Venymäliuskat tarvitsevat tavallisesti 5 – 15 V:n tasa- tai vaihtojännitesyötön. Koska ulostulojännite on tyypillisesti kymmeniä millivolteja, joudutaan signaalia yleensä vahvistamaan ennen jatkokäsittelyä. [1, s. 60.] Venymäliuskoja käytetään yleensä siltakytkenä, joista yleisimmin käytössä on Wheatstonen silta, jossa neljä vastusta on kytketty timanttimaiseen muotoon. Kun siltakytkeään syötetään jännite ja yhden vastuksen vastusarvoa muutetaan, muuttuu sillasta ulostulevan jännitteen suuruus. Mikäli yhden vastuksen paikalle kytketään venymäliuska (kuva 1), voidaan ulostulevan jännitteen muutoksen perusteella laskea liuskan vastusarvon muutos eli liuskan venymä. [4.]

Wheatstonen sillan erojännite eli mittaussignaali voidaan laskea kaavalla

$$U_A = U_E * \frac{k}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \text{ Kaavassa}$$

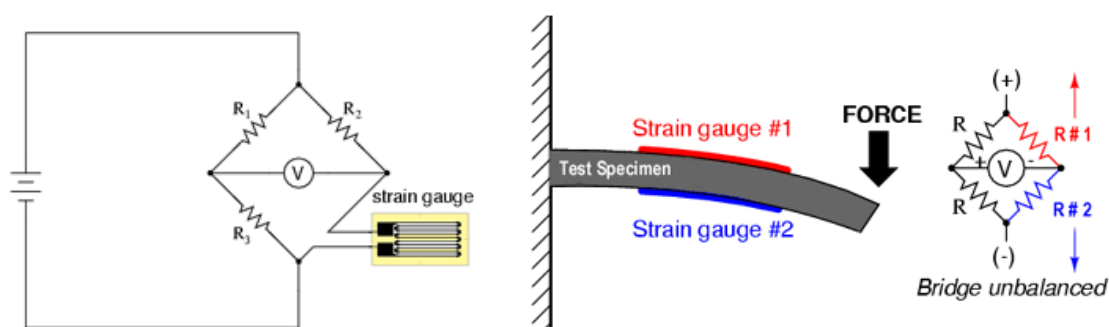
U_A on ulostulosignaali

U_E on syöttöjännite

k on venymäliuskaherkkyys (arvo vaihtelee metalleilla 1,5 – 2)

ε on liuskan venymä.

Ulostulosignaalin merkki riippuu kytkennästä, mutta yleensä pyritään siihen, että veto aiheuttaa positiivisen jännitteen ja puristus negatiivisen jännitteen. [5, s. 142.]



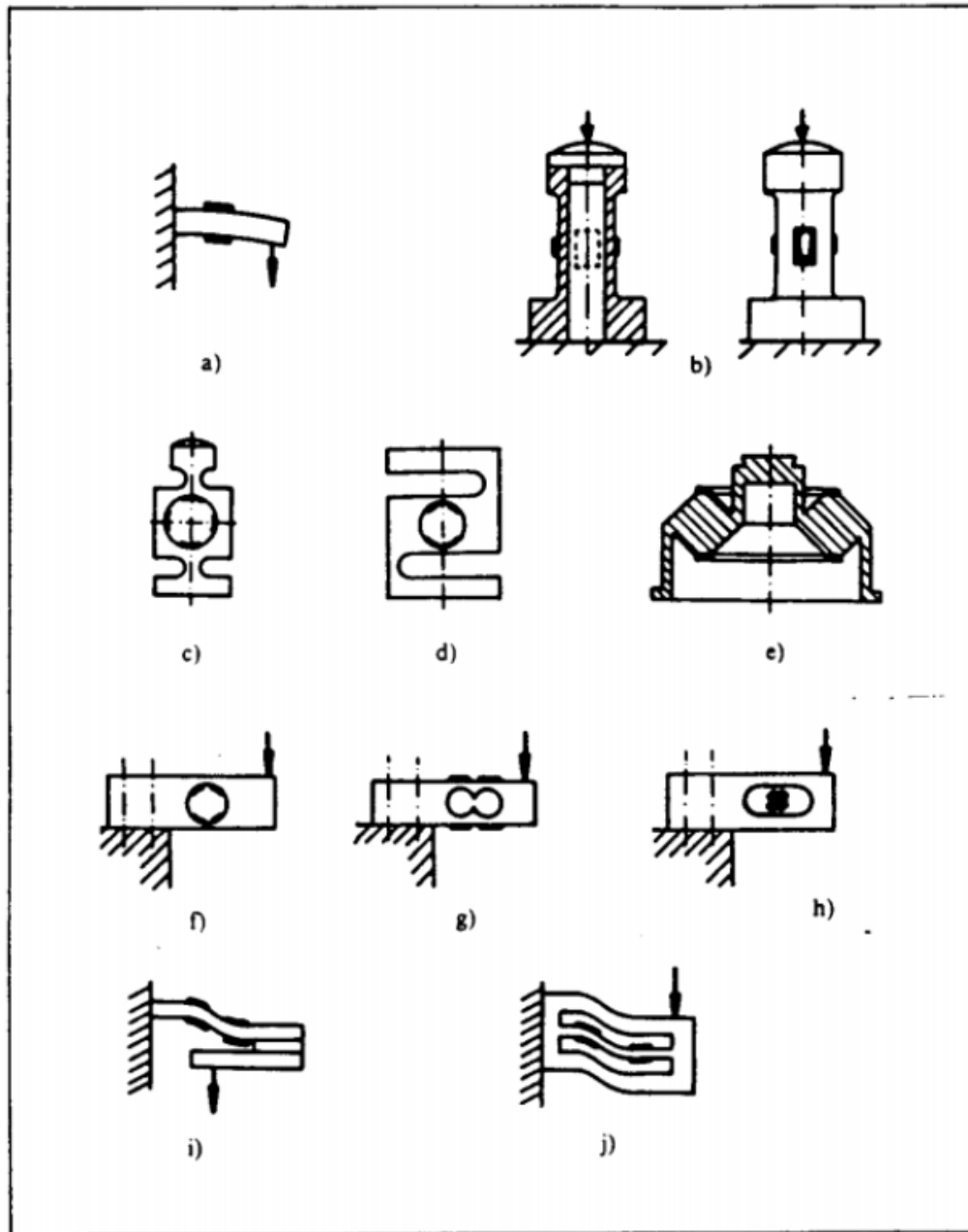
Kuva 1. Wheatstonen silta, jossa yksi venymäliuska sekä havainnekuva venymäliuskan käytöstä ja Wheatstonen sillan merkityksestä ulostulevan jännitteen muutoksessa [6].

Siltaan voidaan kytkeä venymäliuska myös useamman vastuksen tilalle, jolloin voidaan havainnoida erittäin pieniä kohdemateriaalin muodonmuutoksia. Wheatstonen sillan avulla venymän aiheuttaman vastuksen muutosta voidaan myös vahvistaa. Koska silta-kytkennästä ulostuleva jännitteen muutos on kuitenkin edelleen tyypillisesti vain millivoltteja, voidaan ulostulevaa jännitettä vahvistaa kaupallisilla venymäliuska-anturin vahvistimilla. [4.]

2.1.2 Venymäliuskaan perustuvat voima-anturit

Venymäliuskaan perustuva anturi on materiaalin venymisen ja puristumisen mittaamiseen tarkoitettu anturi. Liuskat ovat joko yhden suunnan mittaavia yksihilaisia liuskoja tai monihilaisia useamman suunnan mittaavia ruusukkeita. Liuskat kiinnitetään yleensä mitattavaan kohteeseen liimaamalla ja ne kytketään toisiinsa Wheatstonen siltakytkennällä. [7, s. 205.]

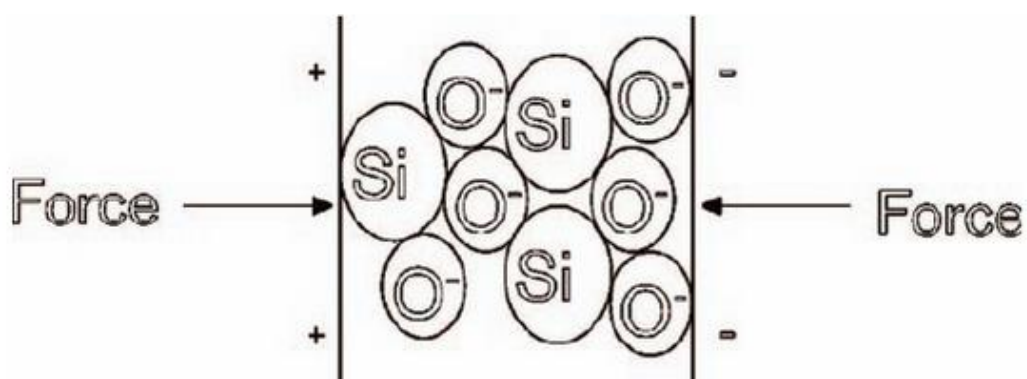
Kuvasta 2 selviää, että venymäliuskavoima-anturit voivat olla rakenteeltaan hyvinkin erilaisia: sauvamaisia antureita (b) käytetään yleensä suurien voimien mittaamiseen, kun taas pienille voimille soveltuvat paremmin rengasmaiset rakenteet (c, d). Matalaa rakennetta haluttaessa voidaan käyttää palkkimaista anturia (f – h), joka onkin useimmiten käytännöllisin asentamisen helppouden ja saavutetun tilansäästön vuoksi. [2, s. 60.]



Kuva 2. Vastusvenymäliuska-antureiden rakennemalleja [2, s. 62].

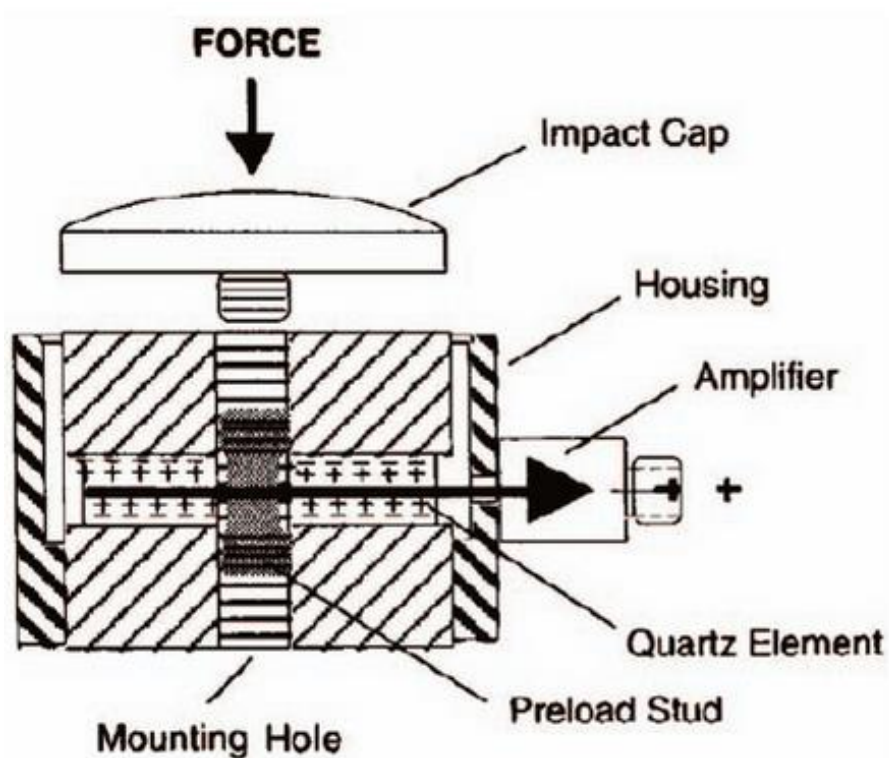
2.2 Pietsosähköiset voima-anturit

Pietsosähköisen voima-anturin toiminta perustuu muuttuvaan kuormitukseen (kuva 3): anturin pietsosähköiset kiteet synnyttävät sähköstaattisen varauksen vain, kun niihin kohdistetaan voimaa tai voiman vaikutus heikkenee. Mikäli pietsosähköiseen anturiin kohdistaa staattista voimaa, sen sähköstaattinen varaus heikkenee ja laskee lopulta nol- laan. [8, s. 255.] Tästä syystä pietsosähköinen voima-anturi soveltuu vain dynaamisten voimien mittaukseen.



Kuva 3. Pietsosähköinen ilmiö [8, s. 255].

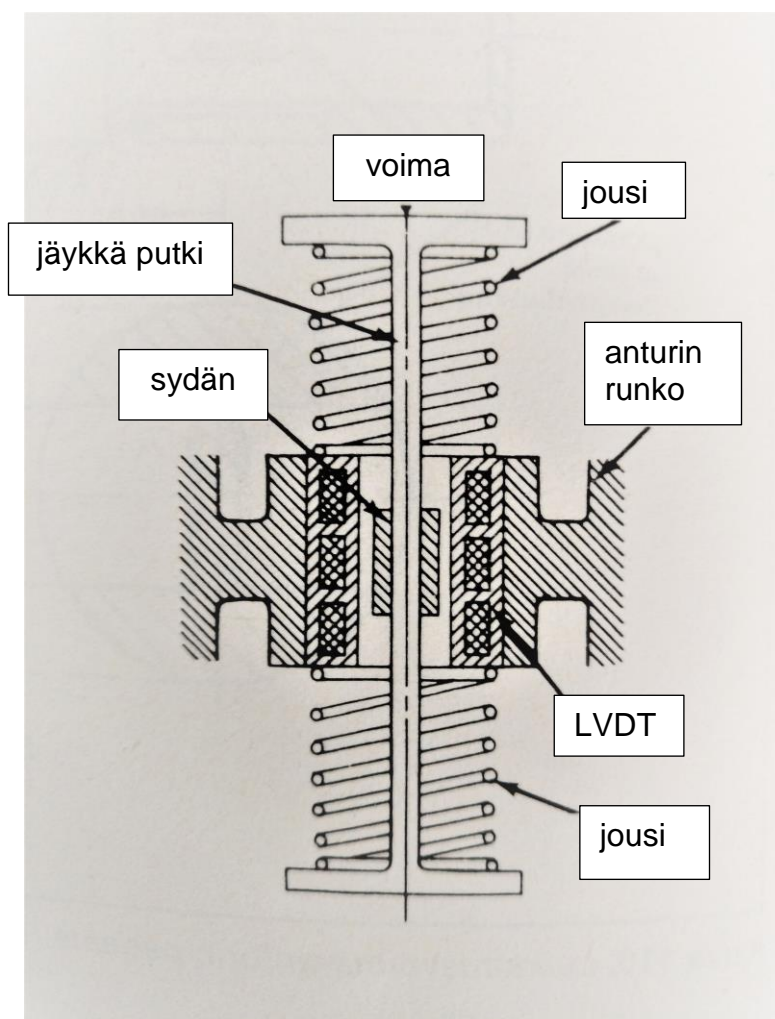
Pietsosähköinen voima-anturi rakentuu tyypillisesti ohuista kidekiekoista, jotka leivotaan kahden aluslaatan väliin. Kuvassa 4 on havainnollistettu pietsosähköisen anturin rakennetta ja voiman kohdistumista anturiin. [8, s. 258.] Pietsosähköisen voima-anturin haittapuolena venymäliuska-anturiin verrattuna on sen heikompi tarkkuus, huonohko pitkäaikaisstabiilius sekä varausvahvistimen tarve [2, s. 63].



Kuva 4. Havainnekuva pietsosähköisen anturin rakenteesta [8, s. 258].

2.3 Induktiiviset voima-anturit

Induktiivisissa voima-antureissa (kuva 5) voima muutetaan esimerkiksi jousen avulla liikkeeksi, joka taas muutetaan sähköiseksi viestiksi tavallisesti joko differentiaalimuuntajalla tai differentiaali-induktanssianturilla. Induktiivisten antureiden mittausalue vaihtelee tyypillisesti alueella 10 N – 1 kN ja niitä käytetäänkin yleensä pienten voimien mittaamiseen. [2, s. 64.]



Kuva 5. Induktiivinen voima-anturi [2, s. 64].

3 Voima-antureiden testausjärjestelmä

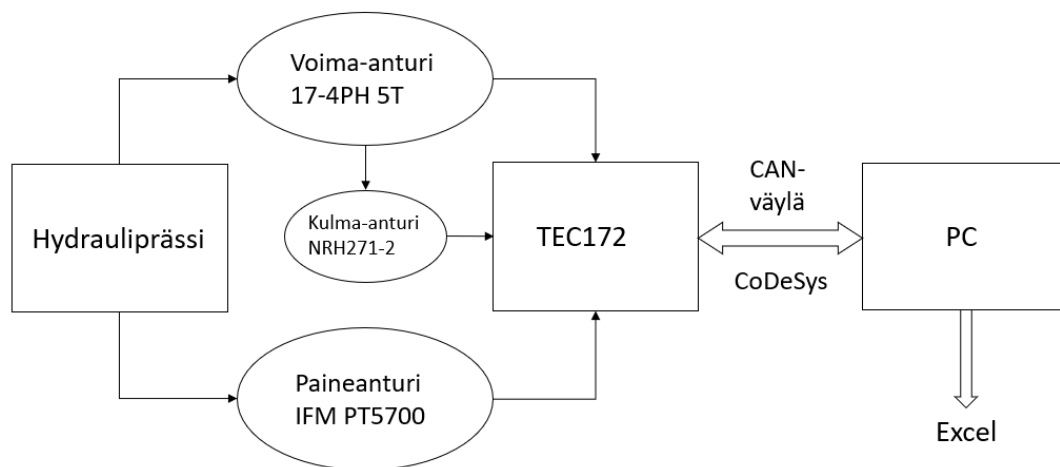
3.1 Testipenkin suunnittelu

Tutkimuksen kohteena oleville 17-4PH 5T -voima-antureille oli tarkoitus suorittaa testimittauksia erisuuruisilla ja -suuntaisilla kuormilla. Testaamista varten suunniteltiin ja toteutettiin testipenkki.

Testipenkin rungoksi valittiin hydrauliprässi, sillä sen avulla voima-antureita on mahdollista kuormittaa hallitusti ja suurienkin kuormavoimien tuottamiseen riittää käsikäyttöinen, melko kompakti prässi. Prässiin lisättiin paineanturi IFM PT5700, jotta voima-anturiin kohdistuneen kuormavoiman ja paineen välinen suhde voidaan laskea. Paineen ja voiman välisen suhteen laskemisen tarkoituksena oli selvittää, onko voima-antureiden välillä suuriakin eroja kuorman mittaamisessa.

Muun kuin anturin suunnitellun mittaussuunnan kuormitusta varten testipenkkiin lisättiin myös kulma-anturi NRH271-2, jotta voima-anturin asennon muutos saatiin mitattua luotettavasti. Kulma-anturille rakennettiin oma irrallinen teline ja asennon mittaamisessa käytettävä magneetti kiinnitettiin suoraan voima-anturiin.

Kuvassa 6 on testipenkin lohkokaavio, jossa näkyvät käytetty laitteisto sekä testi- ja tiedonkäsittelyohjelmat.

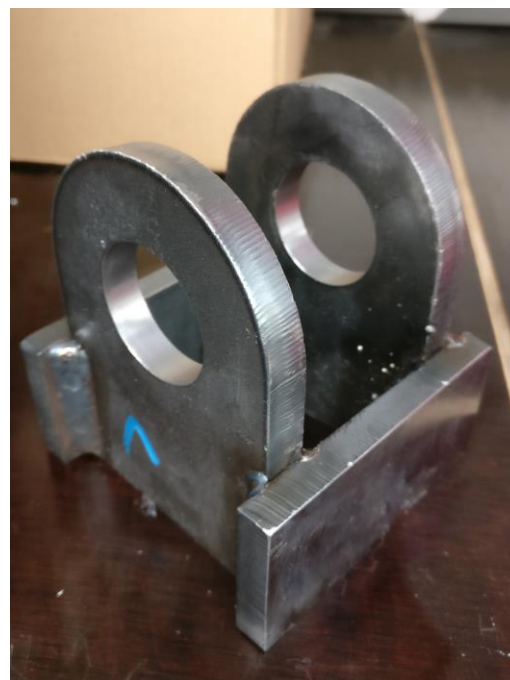
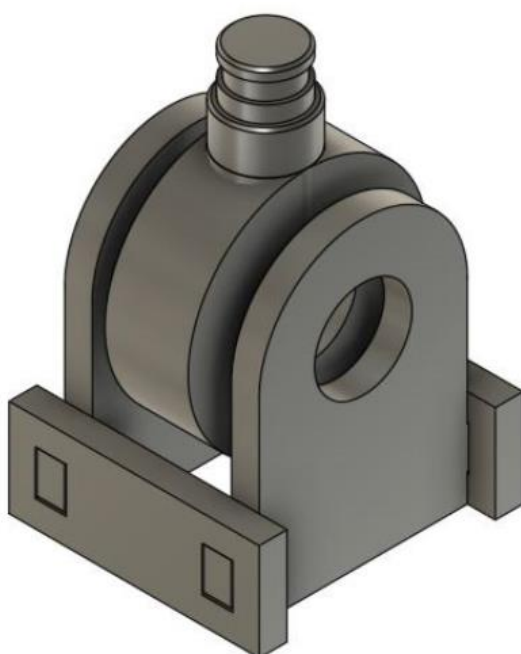


Kuva 6. Testipenkin lohkokaavio.

3.2 Käytettävät komponentit ja mittausohjelma

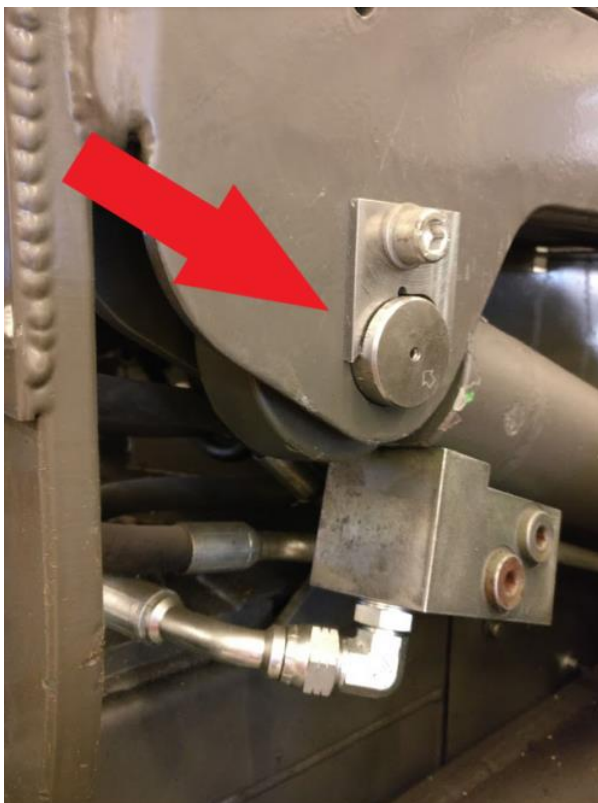
Jigi

Voima-anturin testaamista varten tarvittiin jigi, johon anturi pystytettäisiin tilapäisesti asentamaan kuormitusmittauksia varten. Aluksi jigi pyrittiin suunnittelemaan olemassa olevista kaupallisista osista, kuten putkiteräksestä ja reikälevyistä. Koska sopivien komponenttien löytäminen kuitenkin osoittautui mahdottomaksi, päädyttiin jigi tekemään kokonaan mittatilaustyönä. Jigi (kuva 7) ja sen osat suunniteltiin Autodesk Fusion 360 -CAD-ohjelmalla.



Kuva 7. Autodesk Fusionilla tehty kokoonpanokuva jigistä sekä valmis jigirunko.

Jigi suunniteltiin muistuttamaan tuki- ja kuormituspisteiltään UGV:n kuormanmittausjärjestelmän osan rakennetta (kuva 8), jonka tarkoituksena oli saada mittaustulokset korreloimaan mahdollisimman tarkasti todellisen kuormituksen kanssa. Jigin valmistusmateriaalina käytettiin 10 mm:n vahvuista S355 -rakenneterästä, sillä jigin oli kestettävä suuria voimia hajoamatta osiin. Jigin rakennepalat (liite 1) teetettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa Koskelon tuotekehityshallissa.

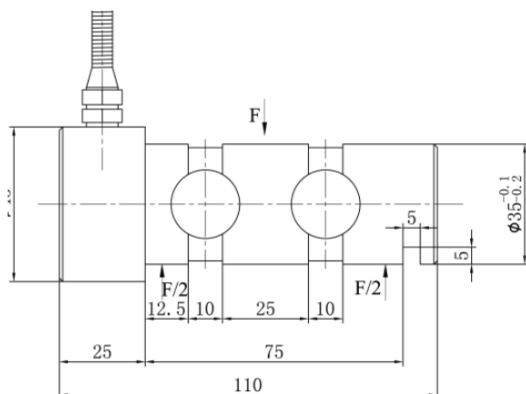


Kuva 8. Voima-anturi Rakka UGV:ssä.

Koska kuormitus voima-anturille voi todellisuudessa tulla useista eri kulmista, oli anturin myös oltava liikuteltavissa. Voima-anturille varattu reikä suunniteltiin hiukan anturin halkaisijaa suuremmaksi, jotta anturin asettaminen ja asennon muuttaminen jigissä tapahtuisi mahdollisimman helposti ilman voimankäyttöä. Reiän mitoituksessa käytettiin apuna ISO-toleransseja reikäkannan ja akselikannan osalta.

Voima-anturi

Tutkimuksen kohteena oli 17-4PH 5T -voima-anturi (kuvat 9 ja 10). Anturin mittausalueeksi valmistaja on ilmoittanut 0 – 50 kN. Kyseessä on analoginen venymäliuska-anturi, jonka ulostulosignaali on 4 – 20 mA. Testaus suoritettiin kaikille neljälle UGV:ssä olevalle voima-anturille. Anturit nimettiin BFRC1 – 4 niiden alustassa olevan sijainnin mukaisesti.



Kuva 9. 17-4PH 5T -voima-anturi [9].

Rated Load	KN	50
Sensitivity	mV/V	1.0±0.1
Total Error	%F.S	±0.5
Creep(30min)	%F.S	±0.1
Zero Balance	%F.S	±1
TC0	%F.S/10°C	±0.1
TC SPAN	%F.S/10°C	±0.1
Input Resistance	Ω	750±50
Output Resistance	Ω	702±3
Insulation Resistance	MΩ	≥5000
Operating Temp Range	°C	-30~+70
Safe Load Limit	%F.S	150
Lateral Load Limit	%F.S	250
Recommend Excitation	VDC	10~12
Maximum Excitation	VDC	15
Protection Class	IP67	

Kuva 10. Data Sheet [9].

Paineanturi

Testipenkissä käytettiin paineenmittaukseen IFM PT5700 -painelähetintä (kuva 11). Sen käyttöjännite on 8 – 32 VDC ja analogivirtalähtö 4 – 20 mA. Anturin mittausalue on 0 – 400 bar ja se on suunniteltu ajoneuvokäyttöön mm. työkonesovelluksissa. [10.] Anturi kytkettiin prässin oman mittarin rinnalle testipenkkiin (kuva 12).



Kuva 11. IFM PT5700 -painelähetin [10].



Kuva 12. Prässi, johon on lisätty paineanturi.

Kulma-anturi

Kulman mittauksessa käytettiin Curtiss-Wright NRH271 -kulma-anturia (kuva 13), jonka toiminta perustuu Hall-ilmioon eli magneettikentän mittaamiseen sähkövirran avulla. Anturin mittausalue on 0 – 90 astetta. Anturin käyttöjännite on 9 – 30 VDC ja ulostulosignaali 0,5 – 4,5 V. [11.] Anturille rakennettiin erillinen teline kulmanmuutoksen mittausta varten.



Kuva 13. NRH271-2 Rotary Position Sensor [11].

Ohjausyksikkö

Ohjausyksikkönä antureiden testaamisessa käytettiin Technionin TEC172-ohjausyksikköä, sillä samanlainen on myös käytössä Rakka UGV:ssä. TEC172 on suunniteltu käytettäväksi mm. sellaisten työkoneiden ohjaukseen, joissa vaaditaan hyvää suorituskykyä ja laajaa I/O- rajapintaa. Ohjausyksikköä käytetään Codesys V3 - ohjelmointiympäristöllä. [12.] TEC172-ohjausyksikkö kytkettiin 24 V:n virransyöttöjärjestelmään ja se yhdistettiin kannettavaan tietokoneeseen CAN-väylällä mittausten suorittamista varten (kuva 14).



Kuva 14. Technion TEC172 Alpha Hardware, mittauskytkennät.

Ohjelmointi

Mittausohjelma kirjoitettiin Codesys V3 -ohjelmointiympäristöllä. Ohjelmointi toteutettiin ST- ja FBD-ohjelmointikielillä, missä käytettiin apuna myös Technion Oy:n omaa ohjelmakirjastoa. Testiohjelman (liite 2) avulla analogisilta antureilta saatu signaali muutettiin luettavaan eli digitaaliseen muotoon A/D -muunnoksen avulla ja tallennettiin tekstitiedostoon, josta tiedot voitiin poimia Excel-taulukkoon jatkokäsittelyä varten.

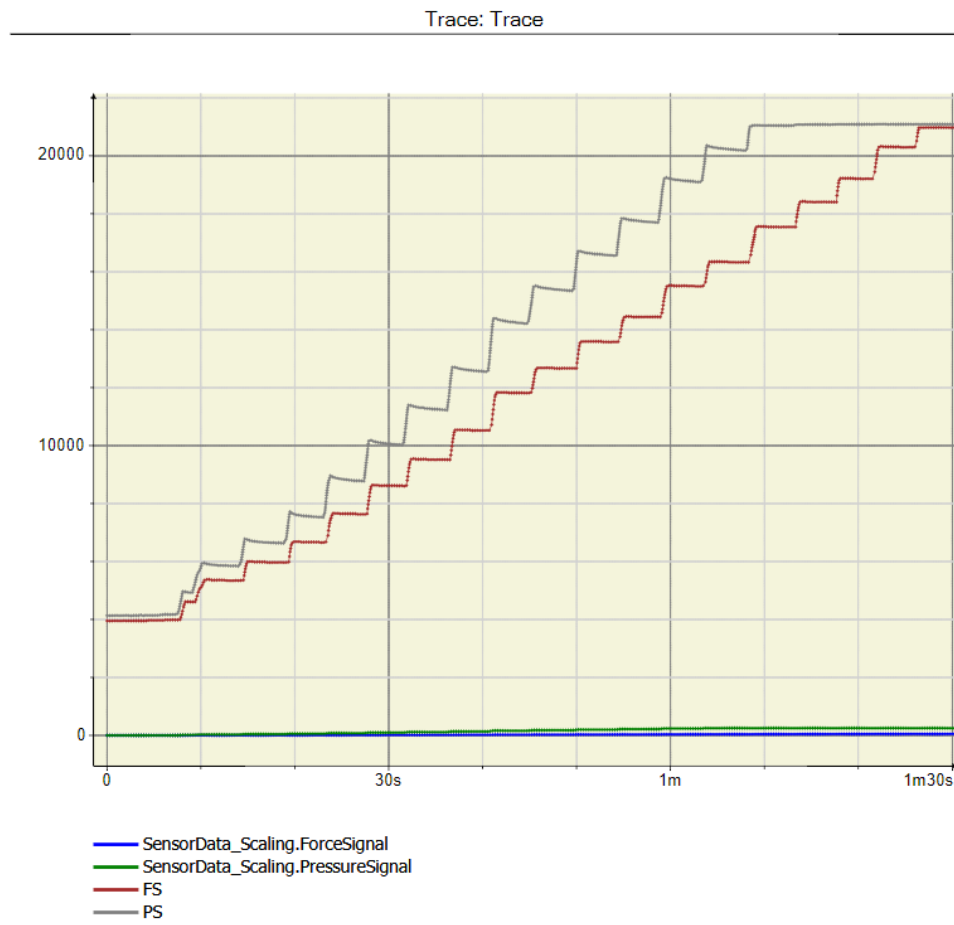
Kaikille kolmelle mittauksessa käytettävälle anturityypille (voima-, paine- ja kulma-anturi) määriteltiin osoitteet ohjausyksikössä omassa aliohjelmassa (liite 3). Lisäksi ohjelmassa ilmoitettiin luettavan viestin muoto, jännite tai virta, sekä antureille syötettävä jännite, tässä tapauksessa 12 V.

Muunnos anturin antamasta virta- ja jänniteviestistä luettavaan muotoon tehtiin Codesysin LIN_TRAFO -toimintalohkolla, jossa lohkon sisääntuleva numeerinen viesti skaalataan haluttuun muotoon. Esimerkiksi voima-anturilta saatava viesti tuli mikroampeeriviestinä 4 000 – 20 000 μ A, ja se skaalattiin toimintalohkon avulla luettavaan muotoon 0 – 50 kN. Koska muutos on lineaarinen, muunnoksen voisi laskea myös matemaattisesti kaavalla $P_V = \frac{P_{V_{high}} - P_{V_{low}}}{I_{high} - I_{low}} (I - I_{low}) + P_{V_{low}}$. Kaavassa

I on virta

P_V on fysikaalinen arvo.

Antureilta saatava mittausdata saatiin tallennettua Codesysin trace -toiminnolla. Trace-toiminto teki mittausdatasta kuvaajan (kuva 15), josta tiedot saatiin tallennettua tekstitiedostoon ja edelleen Excel-taulukkoon.



Kuva 15. Esimerkki Trace-kuvaajasta.

4 Mittausten suorittaminen

4.1 Antureiden BFRC1 – 4 vertailu kohtisuoralla kuormituksella

Voima-antureiden, jotka on nimetty BFRC1, BFRC2, BFRC3 ja BFRC4 testaus aloitettiin siten, että jokaiselle tehtiin testimittaukset kasvavalla kuormalla eri porrastusvälein: ensimmäinen mittaussarja tehtiin tonnin välein, toinen 1/2 tonnin välein ja kolmas 1/3 tonnin välein. Rinnakkaisia mittauksia tehtiin jokaiselle anturille yhteensä kolme, jotta tuloksia voitaisiin vertailla keskenään. Porrastusvälin mittauksessa käytettiin hydrauliprässin omaa mittaria (kuva 16).



Kuva 16. Hydrauliprässin mittari.

Kaikille neljälle voima-anturille suoritettiin testimittaukset myös negatiivisella kuormituksella. Mikäli anturilta saadaan signaalia negatiivisella kuormituksella, voidaan sitä hyödyntää, kun pyritään selvittämään esimerkiksi, onko jokin ajoneuvon pyöristä noussut ilmaan. Antureiden kykyä mitata negatiivista kuormaa ei ollut aikaisemmin testattu, mutta oletuksena oli, että anturilta saataisiin jonkinlainen virtasignaali. Sallittu negatiivinen maksimikuormitus tutkittaville voima-anturille on noin 500 kg.

Yhdelle anturille tehtiin lisäksi signaalin lineaarisuutta seuraava mittaus. Mittaus suoritettiin laskevalla kuormalla, jossa anturille asetettiin sen maksimimittauskykyä vastaava kuorma prässillä, minkä jälkeen paineen annettiin laskea hiljalleen nolnaan.

4.2 Kuormitus muuttuvalla kulmalla

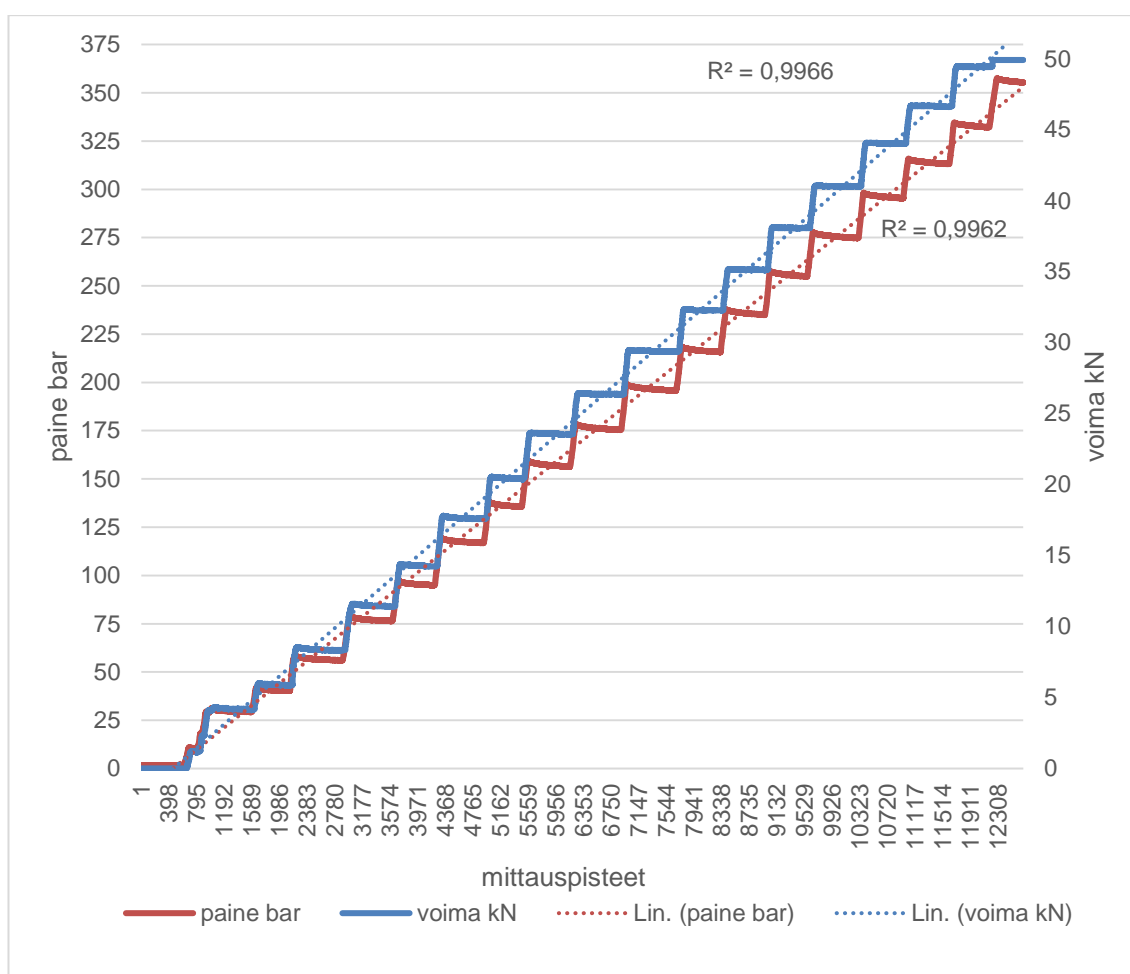
Yhdelle voima-anturille tehtiin testimittauksia muulla kuin anturin suunnitellun mittaus-suunnan kuormituksella eli tässä tapauksessa muuttuvalla kulma-asteella. Testimittaukset tehtiin vain yhdelle anturille, sillä kulman muutoksen mittauksessa käytettävä magneetti jouduttiin kiinnittämään kuumaliimalla voima-anturin toiseen pätyyn kiinni. Magneetin kiinnittäminen tismalleen samaan kohtaan jokaisen voima-anturin kohdalla ei siis ollut käytännössä mahdollista, mutta oletusarvona on, että voima-anturit toimivat samalla tavalla, kun niitä kuormitetaan poikkeavasta mittaussuunnasta.

Mittaukset suoritettiin siten, että voima-anturin asentoa muutettiin 5 asteen portaissa aina 30 asteeseen saakka. Tämän lisäksi suoritettiin myös yksi tarkempi mittaussarja yhdellä painetasolla (185 bar) 2 asteen välein alueella 0 – 30 astetta. Kuormittamalla voima-anturia eri asennoissa tutkittiin, tapahtuiko muutos kosinifunktion mukaisesti, kuten oli oletuksena. Kulman muutoksen mittauksen perimmäisenä tarkoituksena oli siis selvittää asennonmuutoksen aiheuttama virhe anturin antamassa signaalissa. Kun kulman muutoksen aiheuttama virhe on saatu selville, voidaan se kompensoida ohjelmallisesti.

5 Mittaustulokset

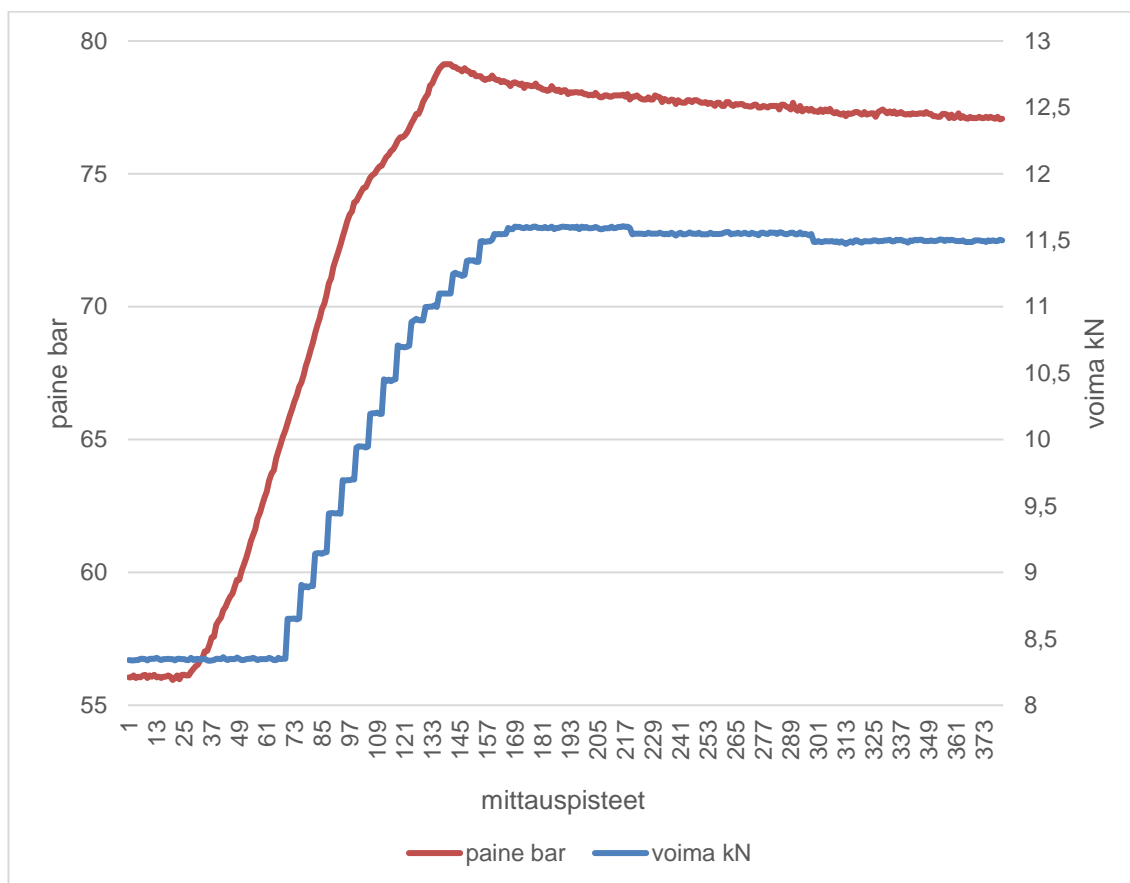
5.1 Kohtisuoraan kohdistuva kuormitus ja antureiden välinen vertailu

Mittaukset aloitettiin vertaamalla voima-antureilta saatavia mittasignaaleita toisiinsa. Antureita verrattiin toisiinsa tekemällä rinnakkaisia mittauksia hydraulipressin painetta nostamalla (kuva 17). Vastaavia mittauksia tehtiin jokaiselle anturille yhteensä yhdeksän (3x3), jotta tuloksista saataisiin kattava otanta. Kaikissa mittaussarjoissa molempien antureiden mittaussignaalien trendiviivojen korrelaatiokerroin R^2 on vain hiukan alle yksi.



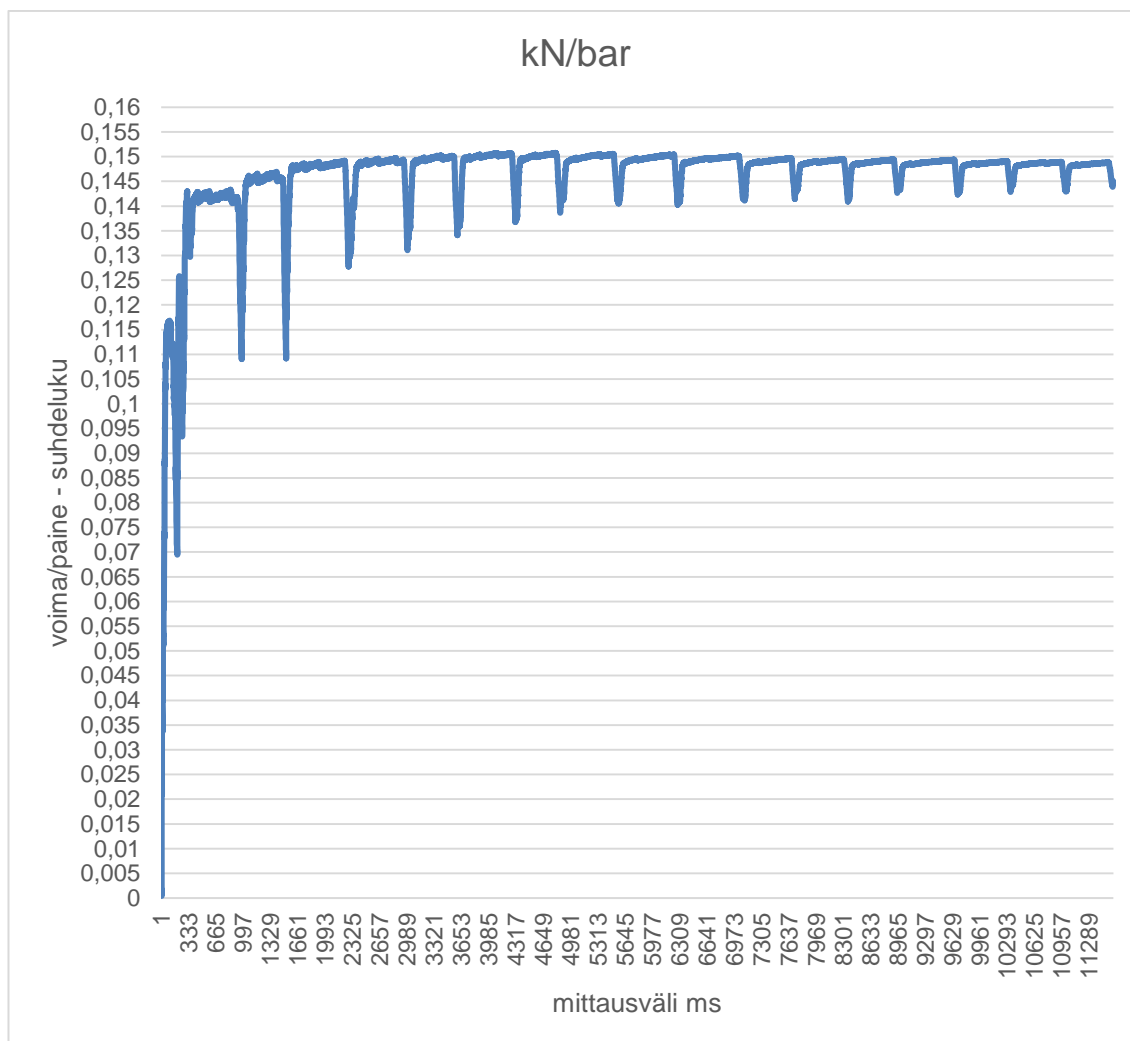
Kuva 17. Yhden anturin yksi mittaussarja painetta nostamalla.

Paine- ja voima-antureilta saatujen mittaustulosten lähempi tarkastelu osoittaa, että voima-anturi reagoi paineen nousuun vasta paineanturin jälkeen (kuva 18). Lisäksi voima-anturin signaali ei nouse yhtä tasaisesti kuin paineanturin signaali, mikä voi johtua mm. voima-anturin vahvistimen A/D -muuntimen tarkkuudesta.



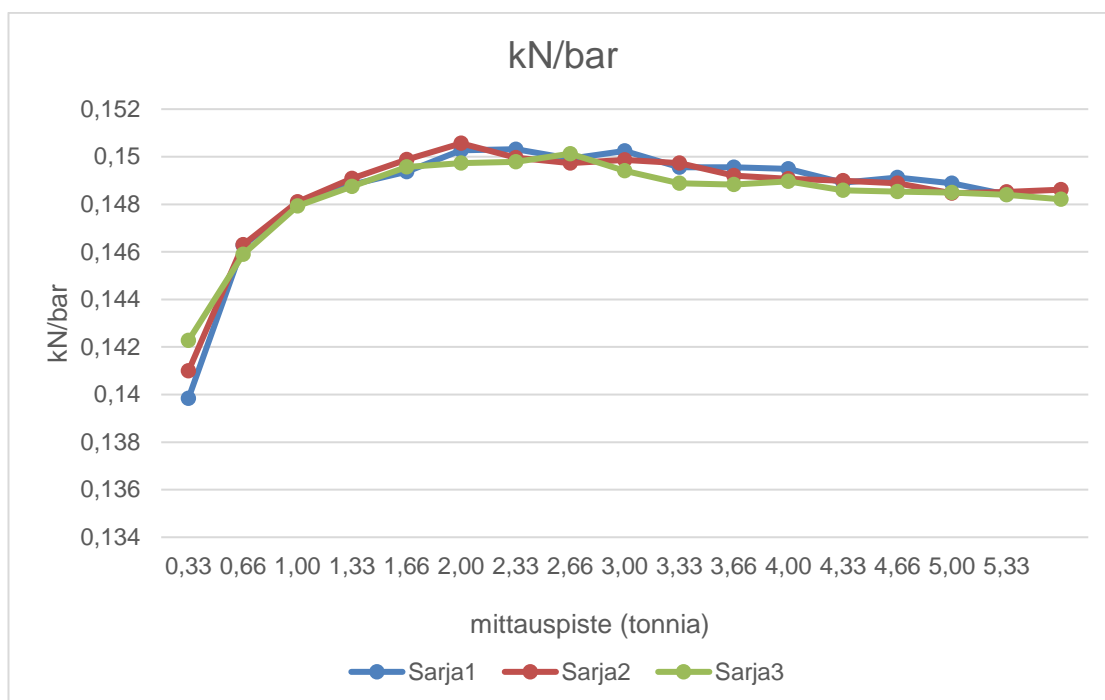
Kuva 18. Paine- ja voimasignaalin lähempi tarkastelu.

Voima-anturin ja paineanturin välistä suhdelukua käytettiin antureiden välisessä vertailussa (kuva 19). Yleiseen vertailuun mittauspisteet pyrittiin valitsemaan alueelta, jossa paine oli vakiintunut ja voima-anturin signaali pysyi mahdollisimman tasaisena.



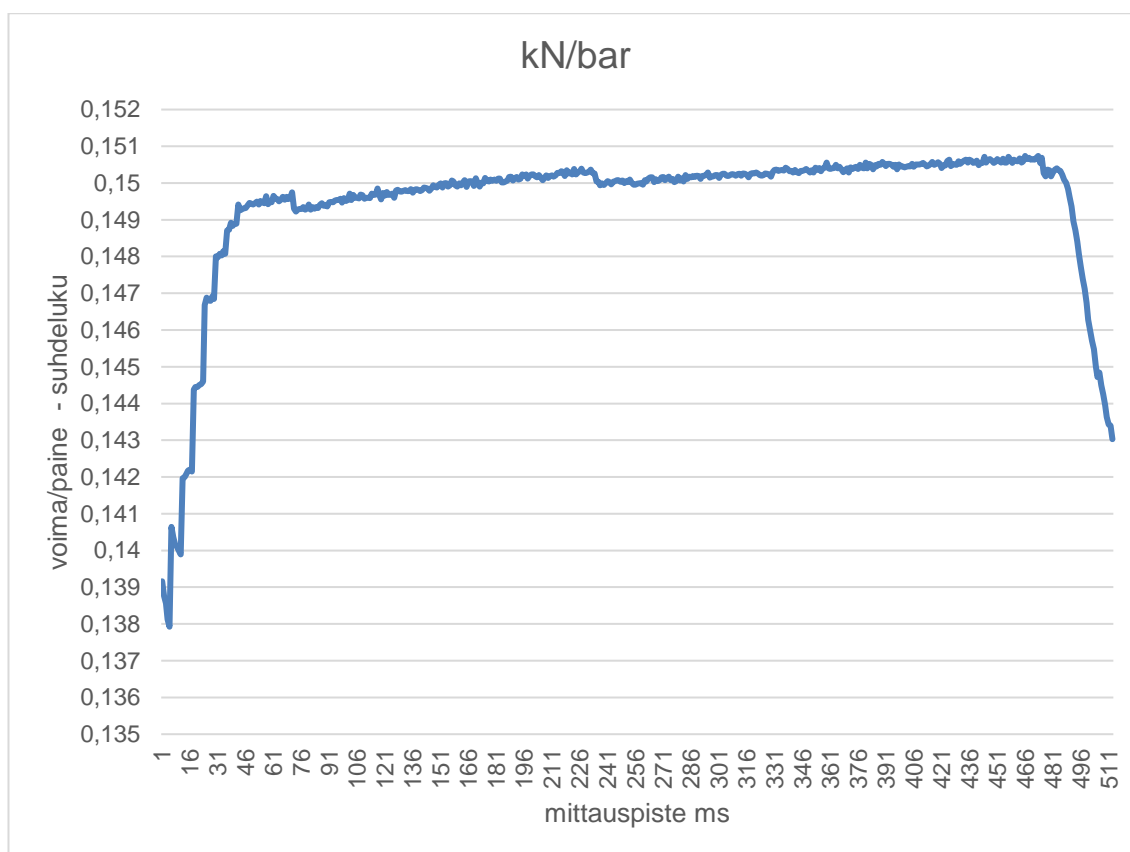
Kuva 19. Voima/paine -suhde kuvan 17 voima- ja paineanturin signaaleista. Tasaisissa kohdissa paine pysyy vakiona ja laskukohdissa (piikeissä) painetta nostetaan nopeasti.

Jokaisen anturin kohdalla lasketussa voima/paine (kN/bar) -suhteessa ilmeni vaihtelua, mikä viittaa siihen, että voima- tai paineanturi ei anna lineaarista signaalia. Kuvassa 20 näkyy yhden voima-anturin kolmen erillisen mittaussarjan laskettu voima/paine -suhde. Pienemmillä voimilla ja paineilla laskettu antureiden välinen suhdeluku poikkeaa selkeästi suuremmilla kuormilla saaduista tuloksista, mikä viittaa signaalin epälineaariseen nousuun voima- tai paineanturin osalta.



Kuva 20. Kolme rinnakkaista voima/paine - mittaussarjaa.

Kuvassa 21 näkyy, että myös paineen pysyessä tasaisena ilmenee jonkin verran muu-
tosta voiman ja paineen välisessä suhdeluvussa, vaihteluvälin suuruus on hiukan alle
0,002. Tämä vaihtelu voi johtua mittausten aikana ilmenneestä prässin hydraulinesteen
vuodosta ja/tai voima- tai paineanturin signaalin tarkkuudesta. Myöskään voima- tai pai-
neanturin signaalin värähtelyä ei voida sulkea pois.



Kuva 21. Yhden portaan voima/paine -suhde. Tasainen osuus kuvaa aluetta, jossa paine tasaantuu. Kuopissa painetta nostetaan nopeasti.

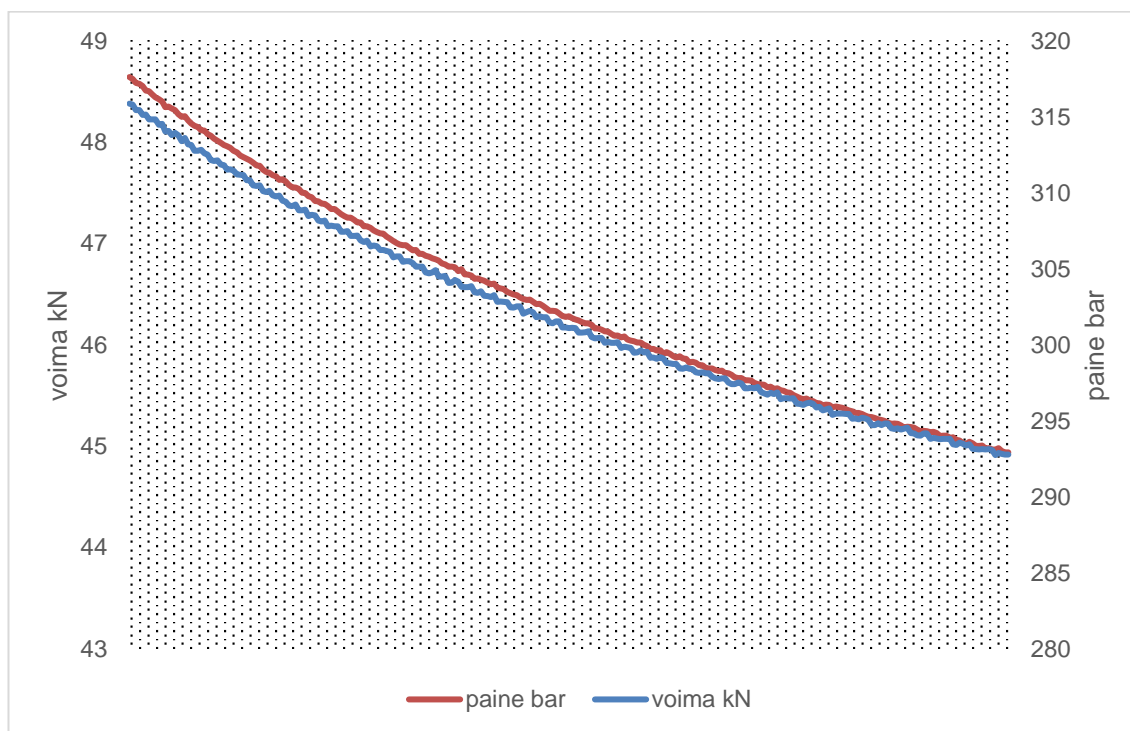
Mittaustulosten perusteella voima-antureiden välillä on jonkin verran eroa; keskimääräinen ero kahden anturin välisissä mittaustuloksissa oli noin 3,25 %. Toki eroa ei esiintynyt jokaisen anturin kohdalla, vaan kaksi antureista antoi samalla kuormalla hiukan korkeampia arvoja ja kaksi muuta antoi pienempiä arvoja. Samansuuntaisia tuloksia antavien antureiden mittaustulosten välinen ero oli taas alle 1 %. Antureita verrattiin toisiinsa jakamalla voima-antureilta saatujen mittaustulosten keskiarvo paineanturilta saatujen mittaustulosten keskiarvoon (taulukko 1).

Taulukko 1. Voima-antureiden laskennallinen voima/paine (kN/bar) -suhde (keskiarvoistettu).

Anturi	keskiarvot
BFRC1	0,154
BFRC2	0,149
BFRC3	0,154
BFRC4	0,149

Antureiden väliset erot selittynevät ainakin osittain sillä, että asennon saaminen jokaisen anturin kohdalla täysin samanlaiseksi oli käytännössä mahdotonta. Lisäksi voiman kohdistuminen kohtisuorassa anturin mittausalueeseen jouduttiin määrittämään silmämääräisesti, mikä lisää virheen mahdollisuutta.

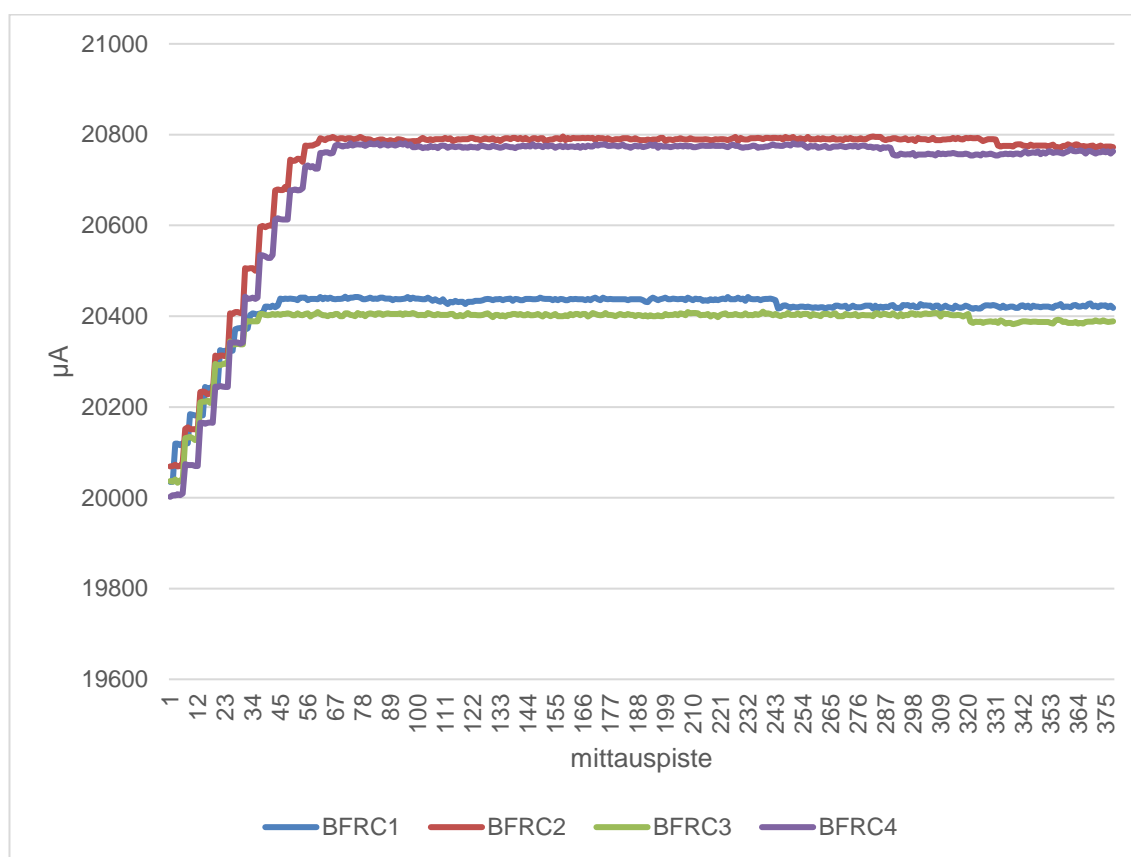
Portaittain nostettavan kuormituksen lisäksi tutkittiin, miten hidas paineen laskeminen vaikuttaa voima- ja paineanturilta saatavaan signaaliin (kuva 22). Sekä paine- että voima-anturin signaalit näyttävät melko tasaisilta ja vaikuttavat laskevan samassa suhteessa.



Kuva 22. Hidas paineenlasku välillä 48 – 45 kN.

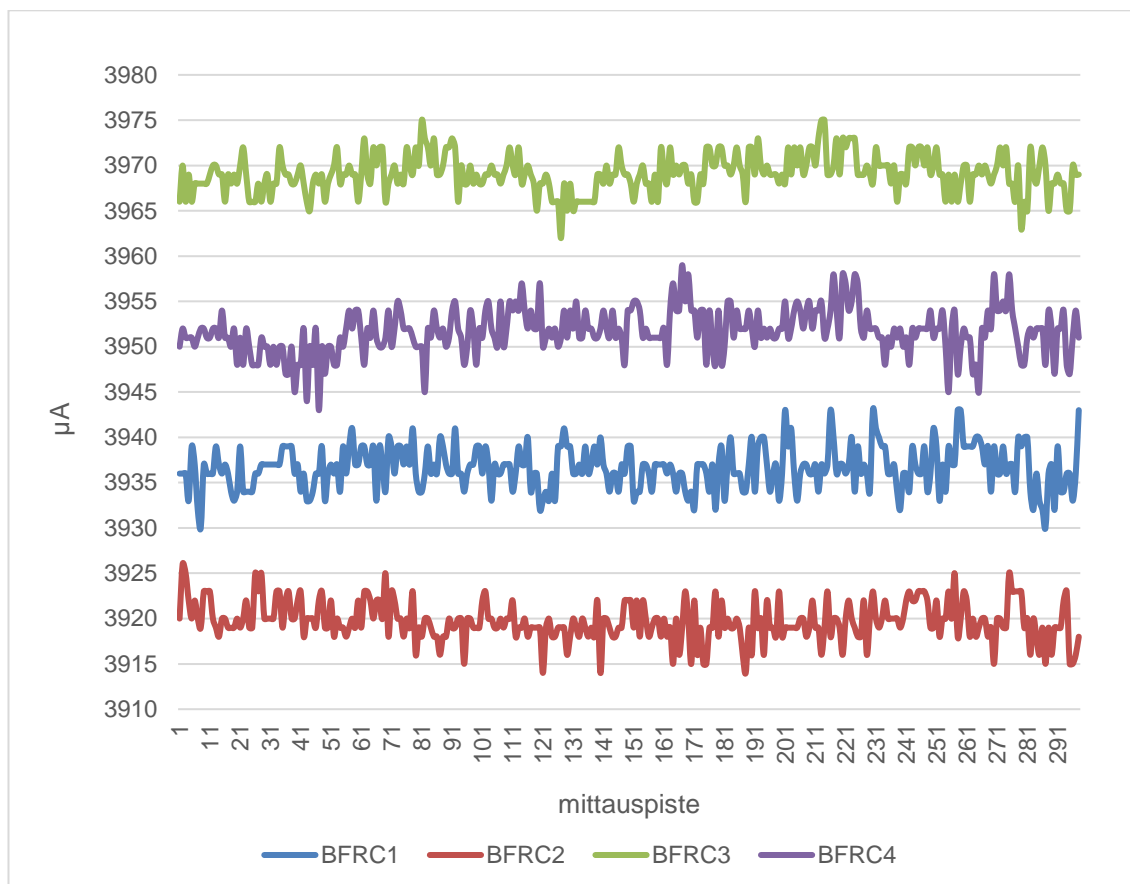
5.2 Ylikuorma

Ylikuormitusvaiheessa eli kun prässillä tuotettu kuorma ylitti 346 bar, voima-antureilta saatava virtasignaali nousi yli mittausalueen eli yli 20 000 μA . Kaksi antureista nousi lähelle 21 000 μA , kun toiset jäivät lähemmäs 20 000 μA (kuva 24). Tämän perusteella mitään tuloksia, jotka ylittävät 20 000 μA , ei voida pitää luotettavina, sillä tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Toisaalta virtasignaali pysyy kuitenkin tasaisena eikä heittele 4 000 – 20 000 μA välillä. Samat tulokset toistuivat jokaisella mittauskerralla, vaikka kuormituksen suuruutta kasvatettiin aina 355 bariin asti.



Kuva 24. Virtasignaali ylikuormitustilanteessa.

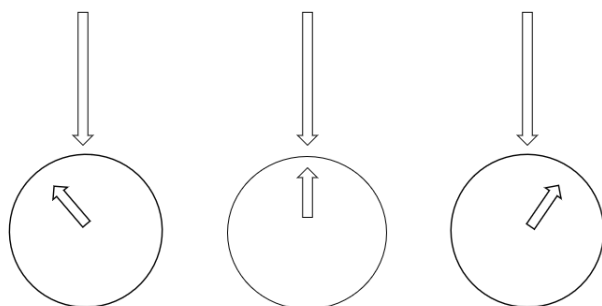
Jo lähtötilanteessa, ennen kuin voima-antureille asetettiin testikuormaa, olivat virtasignaalit toisistaan poikkeavat (kuva 25). Jälleen tulokset pysyivät samana mittauskerrasta riippumatta.



Kuva 25. Lähtötilanne ilman kuormaa.

5.3 Kuormitus muuttuvalla kulmalla

Anturiin kohdistuvan kuormituksen kulman muuttaminen (kuva 26) vaikutti odotetusti saatuihin mittaustuloksiin laskevasti. Oletuksena ennen mittausten aloittamista oli, että tuloksien perusteella saatava kuvaaja olisi verrattavissa kosinifunktiolla saatavaan käyrään. Kosinifunktio lasketaan Excel-ohjelmassa kaavalla $\text{COS}(x * \frac{\pi}{180})$. Mittauskulman muutos toteutettiin kääntämällä anturia 5 asteen portaissa.

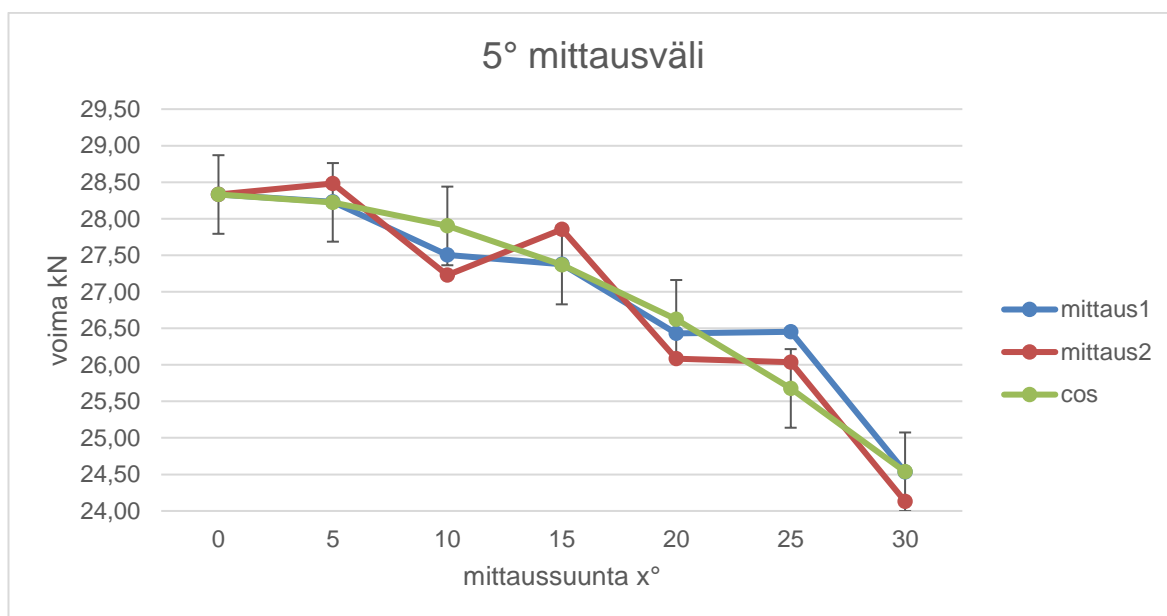


Kuva 26. Anturin asennon muutos testipenkissä. Anturin sisällä oleva nuoli kuvaa optimaalista mitaussuuntaa ja yläpuolella oleva nuoli kuormitussuuntaa. Vasemmanpuoleinen kuva osoittaa mittauksen 1 mitaussuunnan ja oikeanpuoleinen mittauksen 2 mitaussuunnan.

Taulukossa 2 on ilmoitettu saadut mittaustulokset sekä kosinifunktiolla lasketut tulokset. Mittaukset 1 ja 2 tehtiin kääntämällä anturia toisiinsa nähden vastakkaisiin suuntiin. Taulukon 2 kuvaajat näkyvät kuvassa 27.

Taulukko 2. Mittaustulokset 0 – 30 astetta ja kosinifunktio. Arvot ovat kN.

Anturin asento (x°)	Mittaus1	Mittaus2	cos
0	28,3316	28,3316	28,3316
5	28,2311	28,4817	28,2238
10	27,5028	27,2271	27,9012
15	27,3760	27,8544	27,3662
20	26,4294	26,0824	26,6230
25	26,4531	26,0357	25,6772
30	24,5339	24,1307	24,5359



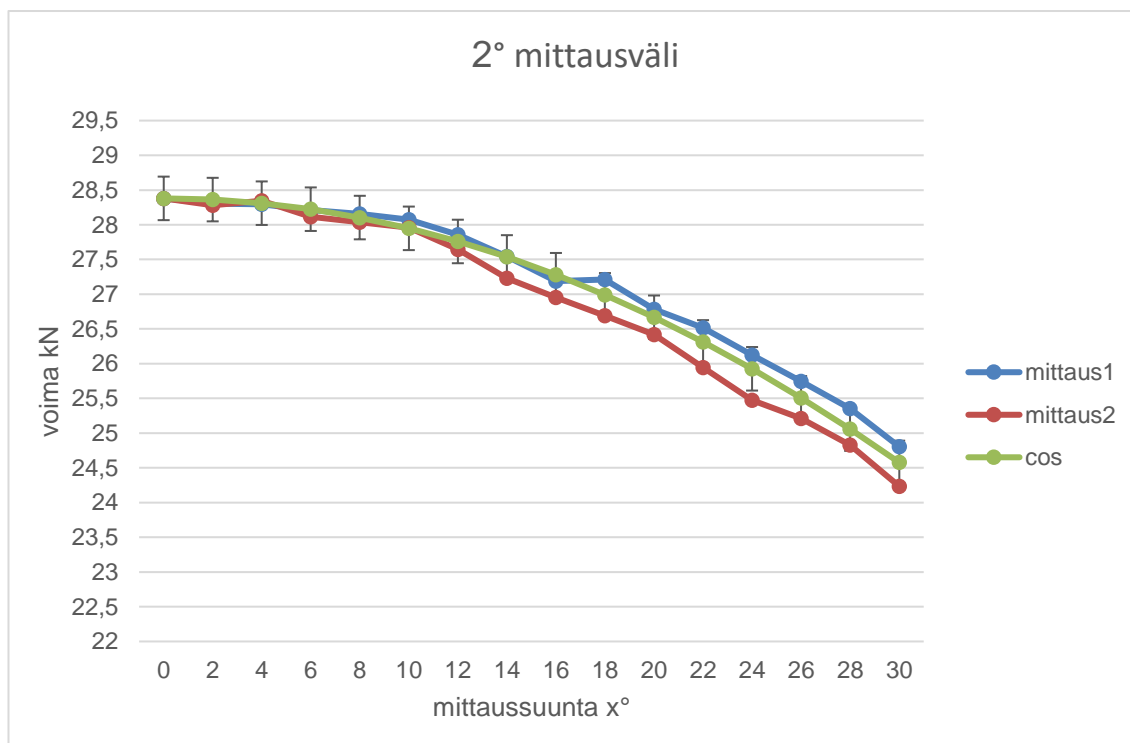
Kuva 27. Taulukon 2 mittaustulokset ja kosinifunktio. Kuormitus paineella 185 bar.

Koska edellä kuvatulla mittaustavalla ei vielä voitu varmuudella todeta, muuttuuko signaali oletetulla (kosinifunktio) tavalla, tehtiin vielä yksi mittaussarja. Tällä kertaa mittausväli oli 2 astetta ja jokaiselle mittausvälille tehtiin kolme rinnakkaista mittausta, ja saaduista tuloksista laskettiin keskiarvo. Saatuja tuloksia verrattiin jälleen kosinifunktiolla laskettuihin arvoihin (taulukko 3).

Taulukko 3. Mittaustulokset 0 – 30 astetta sekä kosinifunktio. Lasketut arvot ovat kN.

Anturin asento (x°)	Mittaus1	Mittaus2	cos
0	28,3797828	28,3797828	28,3797828
2	28,3032886	28,2799479	28,3624946
4	28,2946353	28,3445603	28,3106511
6	28,2131101	28,1165218	28,2243154
8	28,1578774	28,0385584	28,1035927
10	28,0734025	27,9562754	27,9486301
12	27,8571189	27,6439674	27,7596165
14	27,54449	27,2291573	27,536782
16	27,1882476	26,9554559	27,2803982
18	27,2095093	26,6913145	26,9907774
20	26,7809328	26,4186814	26,6682725
22	26,5142104	25,9463446	26,3132764
24	26,1218661	25,4732125	25,9262217
26	25,7466562	25,2107243	25,5075798
28	25,3548159	24,8279384	25,0578609
30	24,8051054	24,2349296	24,5776129

Kuvan 28 perusteella voidaan todeta mittaustulosten korreloivan kosinifunktion kanssa melko hyvin. Poikkeamat voidaan mahdollisesti selittää sekä virheellisen nollakulman valinnalla että keskiarvon perusteella lasketuista mittaustuloksista.



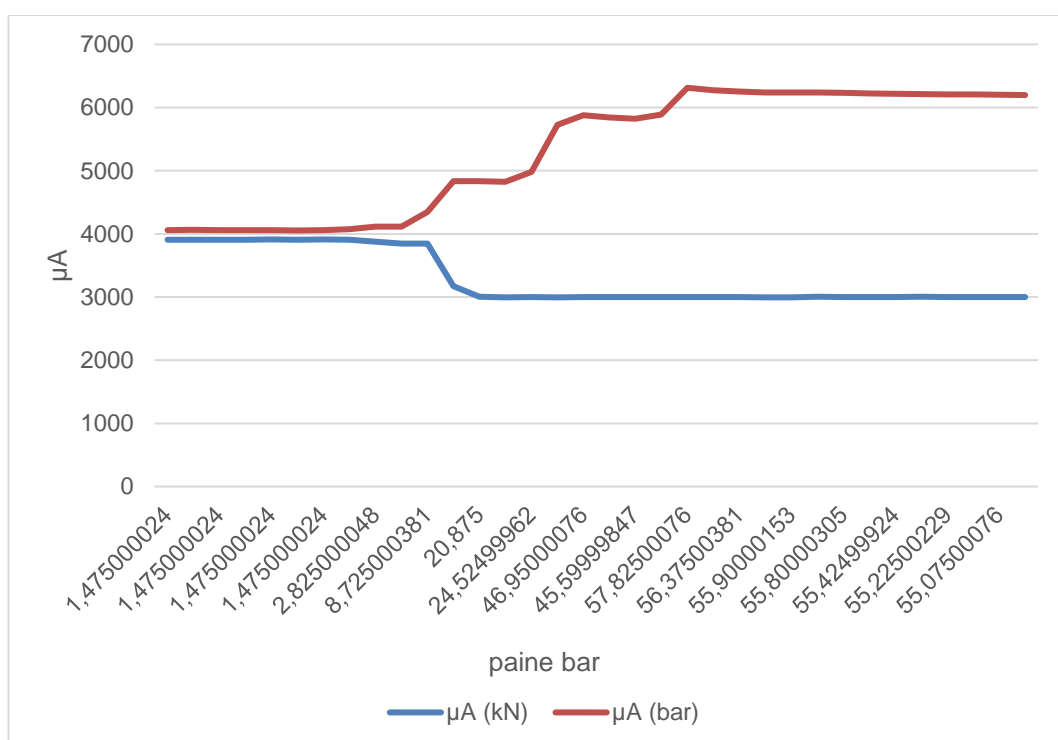
Kuva 28. Taulukon 3 mittaustulokset ja kosinifunktio. Kuormitus paineella 185 bar.

5.4 Negatiivinen kuormitus

Lopuksi jokaiselle voima-anturille tehtiin vielä testimittaus negatiivisesta kuormitussuunnasta eli anturia käännettiin 180 astetta ja sitä kuormitettiin prässillä noin 50 bariin asti. Tarkoituksena oli tutkia, saadaanko voima-anturilta virtaviestiä, kun siihen kohdistuu negatiivista kuormaa.

Mittausten perusteella jokaiselta neljältä voima-anturilta saatava virtaviesti laskee alle mittausalueen eli 4 000 μA :sta noin 3 000 μA :iin, kun niihin kohdistetaan negatiivista kuormaa. Kuvassa 29 näkyy, että voima-anturin virtaviesti saavutti 3 000 μA noin 21 bar kuormituksella ja pysyi muuttumattomana, vaikka kuormitusta kasvatettiin.

Mitattu voima-anturin virtaviestien muutos negatiivisella kuormituksella ei ole vertailukelpoinen muutokseen positiivisella kuormalla, sillä muutos ei ole saman suuruinen. Muutos positiivisella puolella on noin 600 μA ja negatiivisella 1 000 μA , kun verrataan mittaustuloksia paineella 21 bar.

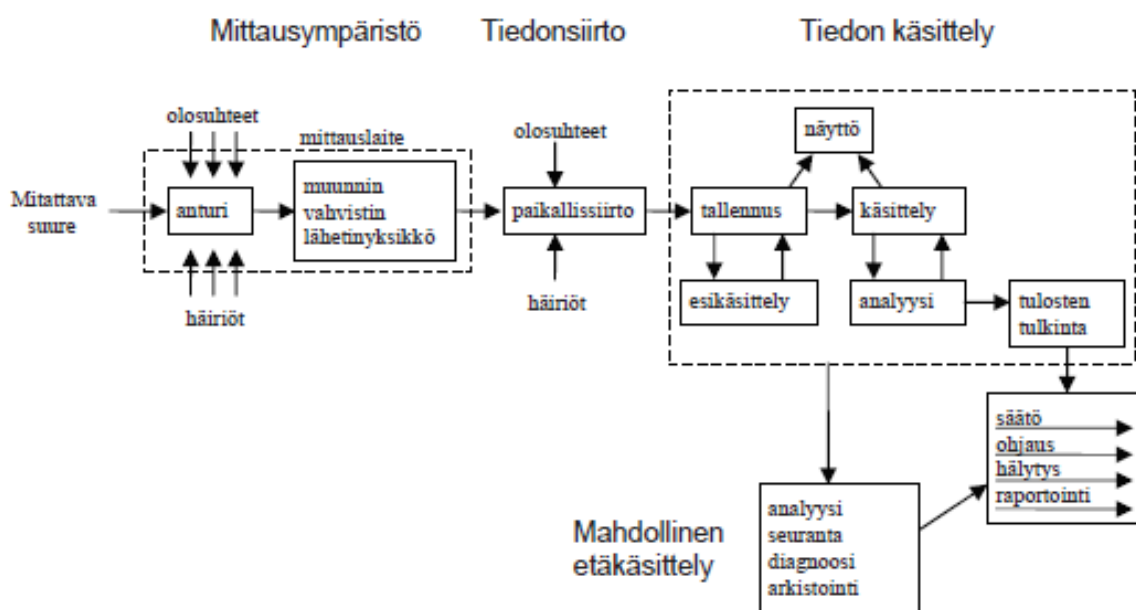


Kuva 29. Anturin BFRC1 ja paineanturin virtaviestit negatiivisella kuormalla (180 astetta).

5.5 Virheiden arviointi

Mittaustuloksiin vaikuttivat mittauksen aikana voima-anturin asento testipenkissä, ympäristöstä aiheutunut värinä sekä prässin männän liikkeestä syntynyt kitka. Voima-anturin asentoa testipenkissä oli käytännössä mahdoton vakioida, sillä anturia ei voitu asentaa testipenkkiin kiinteästi, joten pienet variaatiot eri antureiden kohdalla olivat väistämättömiä. Tämä ongelma olisi voitu välttää jigin paremmalla suunnittelulla.

Mittausympäristö sijaitsi maan alla runsaan liikenteen alueella, joten on mahdollista, että esimerkiksi ohikulkeva raitiovaunu on synnyttänyt värinää, joka ilmenee satunnaisesti joissakin mittaustuloksissa signaalin poikkeavana käytöksenä. Myös testipenkinä toimivan prässin männän liikkeistä aiheutunut kitka on voinut vaikuttaa mittaustuloksiin, joissa se mahdollisesti ilmenee viiveenä mitatun paineen ja voiman muutoksen välillä. Kuvassa 30 on esitetty myös muita mahdollisia virhelähteitä ja mittausepävarmuutta aiheuttavia tekijöitä.



Kuva 30. Mittausepävarmuuteen vaikuttavat tekijät [13, s. 34].

Myös anturilta saatava mittaustulos on vain likiarvo eli se jo itsessään aiheuttaa mittausepävarmuutta. Tutkimuksen kohteena olevalle voima-anturille mittausepävarmuudeksi on ilmoitettu $\pm 0,5$ % maksimikuormasta eli 50 kN. Lisäksi voima-anturin herkkyys vaikuttaa mittaustulosten tarkkuuteen.

5.6 Tulosten luotettavuuden arviointi

Mittaukset suoritettiin manuaalisella hydrauliprässillä, jonka kyky ylläpitää asetettua painetta vaihteli paineen suuruuden mukaan. Suuremmilla paineilla ilmeni jonkin verran enemmän hydraulinesteen vuotoa kuin kevyemmillä painetasoilla. Hydrauliprässin nesteen vuodon aiheuttaman paineenaleneman vuoksi staattisten kuormavoiman mittauksien tekeminen oli haastavaa. Voima-anturilta tulevan signaalin tasoittumista ei siis voitu luotettavasti testata aiotulla tavalla, joten vaihtoehtoisesti signaalin käyttäytymistä tutkittiin usealla limittäisellä mittauksella, joissa painetta pyrittiin laskemaan manuaalisesti mahdollisimman tasaisesti.

Manuaalisen käyttötavan vuoksi vakioidun kuorman asettaminen oli myös haasteellista useamman kerran toistettavissa mittauksissa. Tästä johtuen toisiinsa verrattavissa olevien mittaustulosten saaminen tismalleen samoilla kuormilla osoittautui erittäin haastavaksi.

6 Yhteenveto

6.1 Tulokset ja jatkokehitys

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia 17-4PH 5T -voima-antureiden soveltuvuutta osana kuormanmittausjärjestelmää. Testaus toteutettiin suunnittelemalla voima-antureiden testaamiseen soveltuva testipenkki ja kuormittamalla antureita kohtisuorasti, muuttuvalla kulmalla sekä negatiivisella kuormalla. Antureilta saatuja mittaustuloksia verrattiin sekä keskenään että oletettuihin mittaustuloksiin.

Testauksissa havaittiin, että antureilta saatavat mittaustulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Lisäksi mittaussuunnan muutos vaikutti odotetusti tuloksiin kosinifunktion mukaisesti ja negatiivinen kuormitus vaikutti anturilta saatavaan virtaviestiin laskevasti. Testauksessa havaittiin myös, että voima- ja paineanturin välisessä laskennallisessa suhteessa (kN/bar) ilmeni odottamattomia poikkeamia, mikä viittaa mitatun virtaviestin epälinearisuuteen voima- tai paineanturin osalta.

Voima-antureiden testausta tullaan jatkamaan erilaisilla testikuormilla ja muuttuvissa maasto-olosuhteissa, kun ne on asennettu takaisin osaksi Rakka UGV:n kuormanmittausjärjestelmää. Tästä työstä jouduttiin ajoneuvolla suoritettavat testimittaukset rajamaan ulkopuolelle rajallisen käytettävissä olleen ajan vuoksi.

6.2 Pohdinta

Voima-antureiden testaamiseen tehdyn jigin suunnittelu sujui melko hyvin, joskin muutama testiversio oli tehtävä ennen varsinaisen suunnitelman valmistumista. Jigin suunnitteluun ja valmistumiseen meni kuitenkin hiukan pidempään kuin oli suunniteltu.

Testiohjelman kirjoittaminen Codesysllä oli aluksi hankalaa, sillä työn tekijällä oli hyvin rajallisesti kokemusta kyseisen PLC-ohjelman käytöstä ja ohjelmoinnista yleensä. Aluksi oli tutustuttava ohjelman luonteeseen ja tehtävä yksinkertaisia ohjelmointiharjoituksia,

jotta ohjelman toimintaa voisi ymmärtää paremmin. Testiohjelman kirjoittamiseen oli kuitenkin varattu riittävästi aikaa, ja näin ollen se valmistui aikataulussa.

Testimittaukset olivat yllättävän aikaa vieviä eikä niihin tämän vuoksi varattu riittävästi aikaa. Testien suorittamiseen valittu hydrauliprässi aiheutti jonkin verran haasteita, sillä prässin laatu ja siten luotettavuus osoittautuivat jokseenkin kyseenalaisiksi, ja siten vaikuttivat paitsi mittausten suorittamiseen myös saatuihin mittaustuloksiin. Myös saatujen mittaustulosten käsittely ja analysointi olivat haasteellisia, sillä oli vaikea hahmottaa, mikä tieto on tarpeellista ja mikä taas merkityksetöntä halutun käyttötarkoituksen kannalta.

Todellista voima-anturiin kohdistuvaa kuormavoimaa ei myöskään voitu laskea, sillä prässin männän tehollista pinta-alaa ei tunnettu. Tehollinen pinta-ala saadaan selville vain purkamalla prässi osiin. Tehollisen pinta-alan mittausta ei tehty tämän insinööriyön puitteissa, sillä prässiä ei voitu purkaa ja uudelleen koota vaikuttamatta prässin luotettavuuteen.

Kaiken kaikkiaan työtä voidaan kuitenkin pitää onnistuneena, sillä tavoitteeseen päästiin ja voima-antureilta saatiin paljon hyödyllistä mittaustietoa, joka auttaa Rakka UGV:n kuormantasausjärjestelmän jatkokehittämisessä.

Lähteet

- 1 Suvanto, Kari. 2015. Tekniikan fysiikka 1. – 6. painos. Keuruu: Edita.
- 2 Anturit koneautomaatiassa. 1986. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- 3 Venymäliuskat. 2010. Verkkodokumentti. <<https://wiki.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pagelid=23203724>>. Luettu 24.4.2019.
- 4 Venymäliuska. 2007. Verkkodokumentti. <<https://www oulu.fi/teknokas/tehtavakortit/venymaliuska.pdf>>. Luettu 9.3.2019.
- 5 Fonselius, Jaakko; Laitinen, Esko; Pekkola, Kari; Sampo, Arto & Välimaa, Taisto. 1988. Koneautomaatio anturit. Helsinki: Valtion painatuskeskus.
- 6 The Strain Gauge. 2007. Verkkodokumentti. <http://web.deu.edu.tr/mechatronics/old/TUR/strain_gauge.htm>. Luettu 10.3.2019.
- 7 Keinänen, Toimi; Kärkkäinen, Pentti; Lähetkangas, Markku; Sumujärvi, Matti. 2010. Automaatiojärjestelmien logiikat ja ohjaustekniikat. Helsinki: WSOYpro OY.
- 8 Wilson, Jon S. 2004. Sensor Technology Handbook. E-kirja. <<https://ebookcentral.proquest.com/lib/metropolia-ebooks/reader.action?docID=226781>>. Luettu 9.3.2019.
- 9 Voima-anturin tiedot. Janhunen, Veli-Matti. AG-ME Oy. Sähköposti. Luettu 11.2.2019.
- 10 IFM Electronic. 2019. Verkkodokumentti. <<https://www.ifm.com/fi/fi/product/PT5700>>. Luettu 7.4.2019.
- 11 NRH271-2 Technical Information. 2015. Verkkodokumentti. <https://www.dimed.eu/downloads/dl/file/id/475/product/366/nrh271_2_technical_information_11_17.pdf>. Luettu 2.3.2019.
- 12 Technion. 2019. Ohjausyksiköt. Verkkodokumentti. <<https://technion.fi/fi/ohjausyksikot>> Luettu 18.2.2019.
- 13 Hiltunen, Erkki; Linko, Linnea; Hemminki, Sari; Hägg, Margareta; Järvenpää, Eila; Saarinen, Pertti; Simonen, Seppo & Kärhä, Petri. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>>. Luettu 1.4.2019.