

Joni Suontakanen

**ULTRA-PROTOTYYPPIAJONEUVON OHUTLEVYRUNGON  
MITTAUSJÄRJESTELMÄ**

# **ULTRA-PROTOTYYPPIAJONEUVON OHUTLEVYRUNGON MITTAUSJÄRJESTELMÄ**

Joni Suontakanen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2019  
Konetekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

---

Tekijä: Joni Suontakanen  
Opinnäytetyön nimi: Ultra-prototyyppiajoneuvon ohutlevyrungon mittausjärjestelmä  
Työn ohjaaja: Kai Jokinen  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2019  
Sivumäärä: 45 + 3 liitettä

---

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja valmistettiin prototyyppiajoneuvon runkoon kohdistuvia ajonaikaisia rasituksia mittaava mittausjärjestelmä. Tavoitteena oli selvittää, mitä runkoon kohdistuvia rasituksia voidaan mitata ja millä antureilla mittaukset voidaan tehdä. Lopullisena tavoitteena oli valmistaa antureista ajoneuvon sähköjärjestelmään kytketty ja ajamisen kestävä mittausjärjestelmä. Mittausjärjestelmän pilvitietokantaan ajetusta anturitiedosta voidaan tarkastella haluttuja suureita.

Työn teoriaosassa esitellään yleisesti voimia mittaavat anturit. Voimia voidaan mitata voima-antureilla, venymäliuskoilla ja kiihtyvyyssantureilla. Kiihtyvyyssantureiden käytössä täytyy tietää kiihtyvyyden aiheuttaman kappaleen massa. Mittaussuunnitelmassa esitellään työhön soveltuvat anturit. Anturit ja niiden toimittajat valittiin vaatimuslistojen avulla. Vaatimuslistoissa määriteltiin antureiden fyysiset vaatimukset, antureiden mittausalueet ja ajoneuvon sähköjärjestelmän asettamat vaatimukset. Vaatimuksia saatiin vastaavista mittauksista ja oletetuista arvoista. Mittausjärjestelmän antureiden valinnassa hyödynnettiin asiantuntijoiden apua. Mittausjärjestelmän valmistamisessa keskeistä olivat antureiden kalibrointi ja mekaaninen suojaus. Mittausjärjestelmän tekemisessä käytettiin MoTeCin valmistamia laitteita ja ohjelmia. Alkuperäisen suunnitelman mukaisia ajonaikaisia käytännön mittauksia ei suoritettu.

Rasitukset välittyvät tienpinnasta runkoon MacPherson-pyöräntuennassa alatukivarsien ja iskunvaimentimien kautta. Mittausjärjestelmän antureiksi valittiin venymäliuskoja, kiihtyvyyssantureita ja lineaaripotentiometrejä. Venymäliuskoilla mitattiin alatukivarsien ja lisäksi kahden runkopalkin puristus- ja vetojännitystä. Kiihtyvyyssantureilla ja lineaaripotentiometreillä mitattiin iskunvaimentimien kiihtyvyyksiä. Venymäliuskojen käytössä haasteita aiheutti niiden kalibrointi. Runkopalkkien venymäliuskoilla saatavia mittaustuloksia ei voida pitää luotettavina. Kiihtyvyyssanturit valmistettiin valmiin piirilevyn avulla ja niitä voidaan hyödyntää parhaiten seuraavassa prototyyppirungossa ja lopputuotteessa. Lineaaripotentiometriksen mekaaninen kestävyys jäi selvittämättä ajonaikaisien mittausten puuttuessa ja niiden käyttö mittaamiseen tarvitsee jatkokehitystä.

---

Asiasanat: kiihtyvyyssanturi, venymäliuska, potentiometri, alatukivarsi, iskunvaimennin

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Mechanical engineering, Automotive Engineering

---

Author: Joni Suontakanen

Title of thesis: Sheet Metal Frame Measurement System for Ultra Prototype Vehicle

Supervisor: Kai Jokinen

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2019

Pages: 45 + 3 appendices

---

In this thesis a measuring system was planned and manufactured to measure the stress placed on the frame of a prototype vehicle. The goal was to find out what stress forces can be measured and what kind of sensors can be used to perform the measurements. The definitive goal of the thesis was to create a durable system of measurement that is connected to the electric system of the vehicle. The sensor data collected in a cloud database could then be used to observe the desired measurements.

A general introduction to different sensor types was presented and sensors that were most suitable for this task were also introduced. A requirements list was made and used to select the sensors and suppliers that were best suited for the purpose of this thesis. Professional help, earlier similar measurements, calculated and hypothetical requirements were used to help the selection process of sensors. In creating the measurement system, the calibration and mechanical protection of sensors were essential. The devices and software used in creating the measurement system were provided by MoTeC. Practical measurements originally planned to be collected during the driving were not conducted.

In MacPherson suspension the forces generated during the driving are transferred from the surface of the road via control arms and shock absorbers. Strain gauges, accelerometers and linear potentiometers were selected as suitable sensors for the measurement system. The strain gauges were used to measure compression and tensile stress in the control arms and two frame bars. The accelerometers and linear potentiometers were used to measure acceleration in shock absorbers. Calibration of the strain gauges posed challenges in their use, and only the results from strain gauges placed on the control arms can be considered reliable. The accelerometers were produced using a pre-made circuit board, and they can be utilized best in the next version of the prototype frame and in the end product. The durability of the linear potentiometers was left unresolved in the absence of measurements during the driving, and their use in measuring requires further development.

---

Keywords: accelerometer, strain gauge, potentiometer, control arm, shock absorber

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 VOIMIA MITTAAVAT ANTURIT	9
2.1 Kiihtyvyysanturi	9
2.1.1 Pietsosähköinen kiihtyvyysanturi	9
2.1.2 Pietsoresistiivinen kiihtyvyysanturi	10
2.1.3 Kapasitiivinen kiihtyvyysanturi	11
2.1.4 Kiihtyvyyservoanturi	11
2.1.5 MEMS (Microelectromechanical systems)	12
2.2 Venymäliuska-anturi	12
2.2.1 Venymäliuskatyypit	13
2.2.2 Wheatstonen silta	14
2.2.3 Venymäliuskan valinta	15
2.2.4 Venymäliuskan asentaminen	16
2.3 Voima-anturi	17
2.3.1 Pietsosähköinen voima-anturi	17
2.3.2 Venymäliuskavoima-anturi	18
2.4 Asema-anturi	19
3 MITTAUSLAITTEISTO	20
3.1 C185	20
3.2 SVIM	20
4 MITTAUSSUUNNITELMA	21
4.1 Antureiden valinta	21
4.2 Kiihtyvyysanturit	21
4.3 Potentiometrit	22
4.4 Venymäliuskat	23
5 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTTAMINEN	25
5.1 Kiihtyvyysantureiden valmistaminen	25
5.2 Lineaaripotiometrit	28

5.3 Venymäliuskat	30
6 ANTUREIDEN TESTAAMINEN	37
7 YHTEENVETO	40
LÄHTEET	44
LIITTEET	
Liite 1 SVIM-laajennusosien kytkentäkaaviot	
Liite 2 Kiihtyvyyssanturin kotelon piirustus	
Liite 3 Lineaaripotentimetrin datalehti	

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaaja Ultra-hanke suunnittelee ja valmistaa nelipyöräisen ja nelivetoisen ajoneuvon tutkimus- ja testauskäyttöön. Ajoneuvossa on hybridivoimansiirtojärjestelmä. Ajoneuvon runko sisältää erikoislujia ohuita teräslevykennorakenteita. Runkoon toteutettavalla anturoinnilla mitataan runkoon kohdistuvia voimia. Anturoinnilla seurataan myös kuljettajan ajotapaa. Antureilta tuleva tieto kerätään langattomasti ja reaaliaikaisesti pilvitietokantaan analysoitavaksi. Hanke toteutetaan yhteistyössä Oulun ammattikorkeakoulun, Oulun yliopiston ja Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin kanssa. (1, linkit Tutkimus ja kehitys -> Hankkeet -> Ultra.)

Oulun yliopisto on yhdessä alan yritysten kanssa pilotoinut Ultra-hankkeessa ajoneuvorakenteiden keventämiseen tähtäävää DFMA-prosessia (Design for manufacturing and assembly). Prosessissa erikoisteräksistä valmistettavat, keveät ja kestävät runkorakenteet suunnitellaan valmistettavuus ja kokoonpano huomioiden. (1, linkit Tutkimus ja kehitys -> Hankkeet -> Ultra -> Runkorakenteet.) Hankkeen ensimmäinen prototyyppiajoneuvon runko suunniteltiin laskettujen teoreettisten ajon aikana ajoneuvoon kohdistuvien voimien perusteella. Prototyyppiajoneuvon runko on materiaaliltaan ja suunnittelultaan täysin uudenlainen, joten käytännön mittauksille on tarvetta.

Työssä suunnitellaan ja toteutetaan prototyyppiajoneuvon runkoon kohdistuvien ajon aikaisien voimien mittausjärjestelmä. Ajon aikaiset voimat välittyvät runkoon MacPherson-pyöräntuennan kautta, joka toteutetaan prototyyppiajoneuvossa kahdella alatukivarrella ja pystysuuntaisella jousijalalla. Mittaustuloksia hyödynnetään seuraavien prototyyppirunkojen suunnittelussa ja lopputuotteessa. Työ ei sisällä prototyyppiajoneuvon suunnittelua.

Työn päätavoitteina ovat mittaussuunnitelman tekeminen ja mittausjärjestelmän toteuttaminen. Tavoitteena on tehdä anturointi, joka kestää ajoneuvolla ajamisen ja antaa luotettavaa tietoa ajon aikaisista voimista. Mittaussuunnitelmassa esitetään prototyyppirungosta mitattavat voimat ja mittauspaikat. Mittaussuunnitelmassa esitetään vaatimuslista valituille anturityypeille fyysisten ja ajoneuvon sähköjärjestelmän asettamien rajoitteiden perusteella. Mittausjärjestelmän toteuttamisessa esitetään valitut anturit, niiden mekaaninen kiinnitys ja liittäminen ajoneuvon tiedonkeruujärjestelmään. Työn tuloksena syntyy

prototyyppijoneuvon rungon anturointi, jonka haluttuja suureita pystytään analysoimaan pilvitietokannasta.



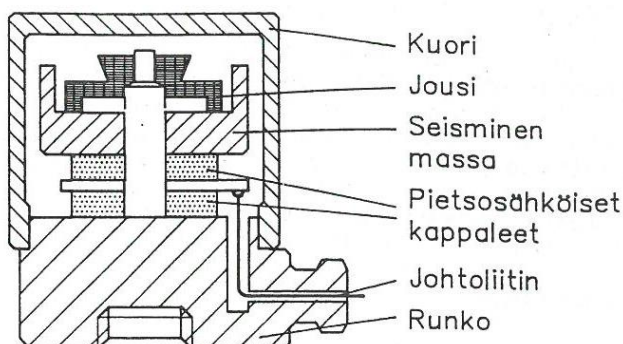
## 2 VOIMIA MITTAAVAT ANTURIT

### 2.1 Kiihtyvyysanturi

Kiihtyvyysantureilla mitataan kappaleen tärinää ja värähtelyä. Kiihtyvyysantureiden toiminta perustuu Newtonin toiseen lakiin  $F=ma$ . Anturi mittaa tunnettuun massaan kohdistuvan voiman, josta saadaan laskettua kiihtyvyys. (2, s. 135.) Kiihtyvyysantureita käytetään autoissa useisiin sovellutuksiin kuten turvatyynyjen laukaisemiseen, alustan ja jousituksen säätämiseen ja nakutusantureina (3, s. 143 - 144).

#### 2.1.1 Pietzosähköinen kiihtyvyysanturi

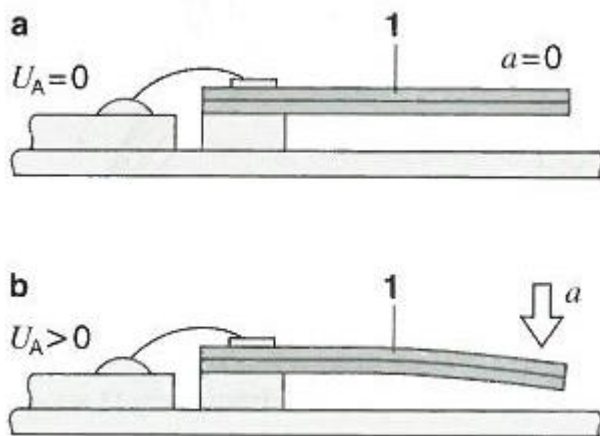
Pietzosähköinen kiihtyvyysanturi on yleisin tärinämittauksiin eli dynaamisiin mittauksiin käytettävä kiihtyvyysanturi. Pietzosähköinen kiihtyvyysanturi on esitetty kuvassa 1. Pietzosähköinen ilmiö tapahtuu joissakin puhtaissa kiteisissä aineissa kuten kvartsissa ja keinoitekoisessa lyijy-zirkonium-titanaatissa. Metallielektrodeilla saadaan ilmaistua ulkoisen voiman aiheuttamia kiteen pinnalle syntyneitä sähkövarauksia. Pietzosähköisen kiteen jänniteherkkyys on normaalisti 0,1 mV. Kiteellä pystytään mittaamaan jopa 100 000 m/s<sup>2</sup> kiihtyvyyksiä. Pietzosähköisessä kiihtyvyysanturissa on jousi-massasysteemi, jolla on tavallisesti 5 - 30 kHz resonanssitaajuus. Resonanssitaajuutta voidaan suurentaa vähentämällä anturin sisältämää massaa, mutta se heikentää anturin herkkyyttä. Ympäristön lämpötila vaikuttaa pietzosähköisen anturin ominaisuuksiin. Poikittainen kiihtyvyys aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin. (2, s. 136 - 137.)



KUVA 1. Pietzosähköinen kiihtyvyysanturi (2, s. 137)

Pietsosähköisissä kiihtyvyyssantureissa käytetään jännite- tai varausvahvistinta esivahvistimenä. Jännitevahvistin on sijoitettava anturin sisälle tai mahdollisimman lähelle anturia, koska kaapeleiden impedanssista aiheutuu virhettä mittaustuloksiin. Varausvahvistin muuttaa anturin tuottaman varauksen jännitteeksi. Varausvahvistin voidaan sijoittaa kauemmaksi anturista, koska sen käytössä ei synny kaapeleiden impedanssia. Pietsosähköisen kiihtyvyyssanturin taajuuskaista on suuri ja sisältää paljon tietoa, minkä takia yleensä siitä määritetään signaalin spektri. Spektrin tarkasteluun käytetään suodattimia ja tilastollisia menetelmiä, joilla havaitaan halutut asiat. Yksinkertaisimpia mittauksia ovat tehollisarvon mittaus ja spektrianalyysi. Nopeussignaali ja siirtymä saadaan integroimalla kiihtyvyyssignaalia. (2, s. 138.)

Pietsosähköisessä kiihtyvyyssanturissa, jossa on jousielementti, on liimattu kaksi vastakkaisnapaista pietsosähköistä kerrosta yhteen. Jousielementti on esitetty kuvassa 2, jossa kohdassa a jousielementti on levossa ja kohdassa b siihen kohdistuu kiihtyvyyttä. Ylemmän kerroksen syntyy vetojännitys ja alemman kerroksen puristusjännitys anturiin kohdistuvasta kiihtyvyydestä. Kerroksien ylä- ja alapinta toimivat elektrodeina, jolloin kiihtyvyyden aiheuttama jännite havaitaan ilman seismistä lisämassaa. Anturin jousielementti ja tarvittava elektroniikka on pakattu ilmatiiviiseen koteloon. Pietsosähköisellä kiihtyvyyssanturilla ei pystytä mittaamaan staattista signaalia. (3, s. 147.)



KUVA 2. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi, jossa on jousielementti (4, s. 1128)

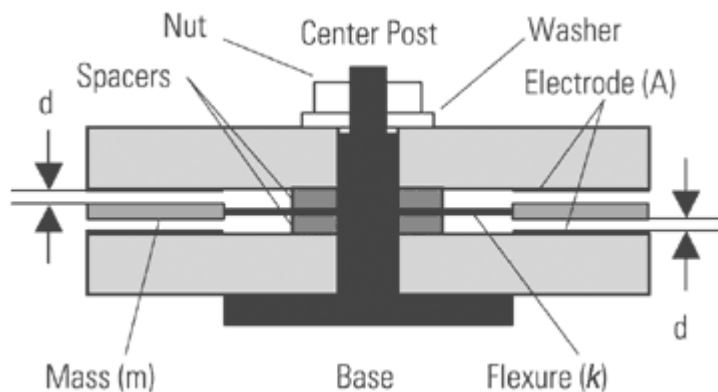
## 2.1.2 Pietsoresistiivinen kiihtyvyyssanturi

Pietsoresistiiviset kiihtyvyyssanturit on suunniteltu suurten taajuuksien ja kiihtyvyyssiskujen mittaamiseen. Niissä hyödynnetään pietsoresistiivisten materiaalien vastuksen muutosta

jännitteen tai kapasitanssin muutoksen sijaan. Suurin osa antureista on MEMS-tyyppisiä eli kaasuvaimennettuja. Pietsoresistiiviset kiihtyvyyssanturit voivat olla myös venymäliuskatyyppisiä eli nestevaimennettuja, jotka soveltuvat juuri suurten taajuuksien ja kiihtyvyyksien iskumittauksiin. (5, linkit [Click Here to See Our Products -> Acceleration-Vibration -> Piezoresistive.](#))

### 2.1.3 Kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi

Kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi mittaa resistanssin muutoksen sijaan kapasitanssin muutosta. Tunnistinsa koostuu kahdesta rinnakkaisesta eri tilassa toimivasta siltaan kytketystä kondensaattorista, jotka koostuvat kahdesta elektrodista ja jousen päässä olevasta massasta. Kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi on esitetty kuvassa 3. Anturiin kohdistuvasta kiihtyvyydestä jousen päässä oleva massa siirtyy lähemmäksi kondensaattorin toista elektrodia muuttaen kondensaattorin kapasitanssia. Antureissa voidaan hyödyntää useita kapasitiivisia ainesosia kuten alumiinioksidikondensaattorilevyjä. (6, s. 146.)



KUVA 3. Kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi (7)

### 2.1.4 Kiihtyvyysservoanturi

Kiihtyvyysservoanturit ovat tarkkoja ja vakaita tasasähkökäyttöisiä antureita, joissa on takaisinkytketty voimatasapainoon perustuva anturi. Niissä on laakeroidun akselin päähän kiinnitetty tunnettu massa, jonka siirtymää voidaan mitata asema-anturilla. Varren liikkeen vaikutetaan servovahvistinohjatulla momenttimoottorilla. Kiihtyvyyden aiheuttamaa massan siirtymää mitataan ja pyritään palauttamaan massa paikoilleen. Momenttimoot-

toriin syötetty virta aiheuttaa vastuksessa jännitehäviön, joka on verrannollinen kiihtyvyyteen. Kiihtyvyysservoantureilla voidaan mitata lineaarista kiihtyvyyttä ja kiihtyvyyden muutoksia, kun saatu signaali derivoidaan sähköisesti. (2, s. 135 - 136.)

### **2.1.5 MEMS (Microelectromechanical systems)**

MEMS eli mikroelettromekaaniset järjestelmät ovat pienikokoisia, sähköisen ja mekaanisen komponentin muodostamia järjestelmiä. Järjestelmän komponentit voivat olla jopa mikrometrin kokoisia. Komponentit valmistetaan yleensä piikiekolle. MEMS-kiihtyvyyssantureiden pieni koko ja erityisesti taloudellinen massatuotanto ovat lisänneet niiden käyttöä. MEMS-kiihtyvyyssanturit ovat suurelta osin syrjäyttäneet makroskooppiset pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit. MEMS-kiihtyvyyssantureita käytetään autoteollisuudessa esimerkiksi matkustajien turvallisuuden parantamiseen kolaritilanteissa ja ajoneuvon ajovakautusjärjestelmissä. (8, s. 1 - 2.)

Mikromekaanisia kiihtyvyyssantureita on kehitetty useita erilaisia. Tunnistusmekanismi voi olla kapasitiivinen, pietsoresistiivinen, pietsosähköinen, optinen tai tunnelointivirta. Suurin osa niistä sisältää tunnetusta massasta koostuvan mekaanisen tunnistuselementin, joka on kiinnitetty mekaanisella jousitusjärjestelmällä referenssikehykseen. Tunnetun massan siirtymää mitataan asemaa mittaavalla liitäntäpiirillä, joka muuttaa sen sähköiseksi signaaliksi. (9, s. 175 - 176.)

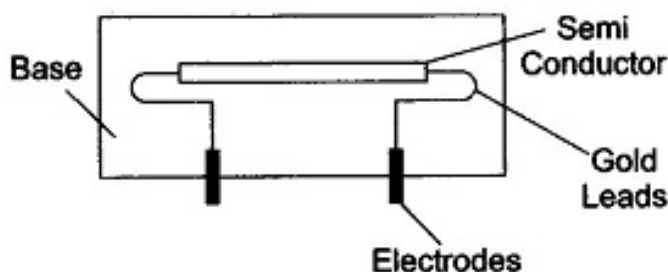
### **2.2 Venymäliuska-anturi**

Venymäliuskat ovat sähköisiä vastuksia virtapiirissä, joiden resistanssit muuttuvat liuskoihin kohdistuvista muodonmuutoksista. Vastuselementtinä voidaan käyttää metallilankaa, metallikalvoa tai puolijohdetta. Venymäliuskat kytketään Wheatstonen siltakytkentään. Mittaavia liuskoja on kytkennässä yksi, kaksi tai neljä. Kytkentä vaatii usein jännitevahvistimen, jolla havaitaan vastusten muutoksien aiheuttamat jännitevaihtelut. Venymäliuskat kiinnitetään tavallisesti mitattavaan kohteeseen valmistajan suosittelemalla liimalla. Venymäliuskojen rakenne on hyvin yksinkertainen, mutta ne ovat herkkiä lämpötilavaihtelulle ja epälineaarisia. (2, s. 141 - 142.)

Venymäliuskoilla voidaan mitata venymää, voimaa, painetta ja virtausnopeutta. Venymäliuskatekniikalla mitataan painetta muuttamalla paine voimaksi sopivalla muuntajalla. Virtausnopeutta mitataan käyttämällä paine-eron mittausta venymäliuskatekniikalla. (6, s. 511.)

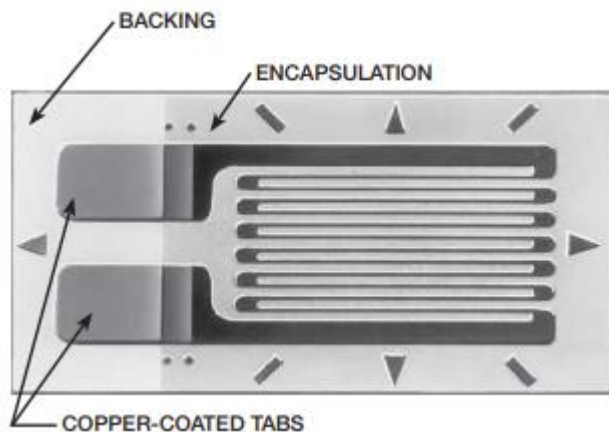
## 2.2.1 Venymäliuskatyypit

Pietsyresistiivisessä venymäliuskassa on puolijohdeena toimiva pietsyovastus. Puolijohdevenymäliuska on esitetty kuvassa 4. Suurimassa osassa materiaaleja on pietsyresistiivisen vaikutuksen kaksi komponenttia, geometrinen ja resistiivinen komponentti. Geometrinen komponentti on kuormitettava elementti, jonka poikkileikkauksen pinta-ala muuttuu sen pituuden kasvaessa. Nestemäinen venymäliuska on hyvä esimerkki geometrisestä komponentista. Nestemäisissä venymäliuskoissa ongelmana on nesteiden kokoonpuristuminen, mikä vääristää resistanssin muutosta. Elohopea on hyvä materiaali nestemäisiin venymäliuskoihin, koska se on lähes kokoonpuristumatonta. Nestemäisiä venymäliuskoja käytetään esimerkiksi sairaaloissa verenpaineen mittaamiseen. Myös metallilankaisia venymäliuskoja käytetään, koska metalli voidaan olettaa kokoonpuristumattomaksi. (6, s. 501 - 503.)



KUVA 4. Puolijohdevenymäliuska (10, linkit Transducers -> Strain gauge transducer types)

Ohutfilmivenymäliuska on yleisin venymäliuskatyyppi. Se koostuu metallilankakuviosta, joka on ensisijaisesti herkkä venymälle yhteen suuntaan. Ohutfilmivenymäliuska on esitetty kuvassa 5. Metallifilmikuviolle on olemassa satoja vaihtoehtoja erilaisilla herkkyyksillä ja tiettyihin suuntiin asennettavia. 2000-luvulla niitä on alettu valmistaa pääasiassa seostetusta piistä, jonka herkkyyteen vaikutetaan lisäaineiden määrällä. Suurta kehitystä on tuonut etsaustekniikka, jolla saadaan valmistettua mikromekaanisia rakenteita piikiekolle. (6, s. 505.)



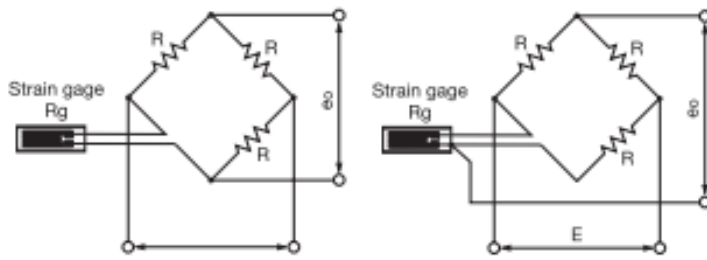
KUVA 5. Ohutfilmivenymäliuska (11)

Vanhin ja vieläkin käytössä oleva materiaali on kuparista ja nikkelistä seostettu konstantani, jolla on paras yhdistelmä tarvittavia ominaisuuksia venymäliuskojen käyttöön. Konstantaanilla on riittävän suuri venymäliuskaherkkyys, hyvä lämpötilanvaihtelujen kesto ja sopivuus pieniinkin filmikuvioihin. Dynaamisiin mittauksiin suositellaan isoelastista seosta, joka koostuu joustavasta ja vetävästä osasta. Isoelastinen seos kestää hyvin väsytyä ja sillä on korkea venymäliuskaherkkyys. (11.)

### 2.2.2 Wheatstonen silta

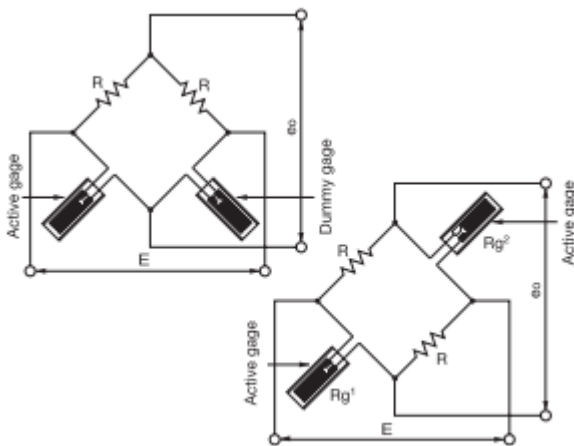
Venymäliuskat kytketään siltakytkentään ja niihin syötetään normaalisti 5 V tai 10 V tasavirtainen syöttöjännite. Ulostulosignaali vaatii vahvistimen, koska se on millivolttien tasoa. Liuskosten kytkemisessä pyritään siihen, että puristus tuottaa negatiivisen jännitteen ja veto positiivisen jännitteen. Ennen mittausta Wheatstonen silta tasapainotetaan vahvistimen avulla ja kalibroidaan. (2, s. 142.)

Neljäsosasillassa yhdelle sivulle on kytketty venymäliuska ja kolmelle muulle sivulle yhtä suurilla resistansseilla olevat vastukset kuvassa 6. Suuret lämpötilan vaihtelut ja pitkät johdot vääristävät neljäsosasillan mittaustuloksia, jolloin liuskalle käytetään kolmijohtokytkentää. Kolmas johto kytketään sillan toiselle puolelle komponenttiin, johon vastaava lämpötilan muutos vaikuttaa. Kolmas johto poistaa lämpötilan muutoksen vaikutuksen sillan ulostulosta. (12.)



KUVA 6. Neljäsosasiltakytkennät, joista oikean puoleisessa kolmijohtokytkentä (12)

Puolisiltakytkennässä kumpaakin kahta venymäliuskaa voidaan käyttää mittaamiseen kuvassa 7. Toinen vaihtoehtoista on käyttää niin sanottua tyhmää liuskaa, jolloin toinen venymäliuska on sillassa vain lämpötilan kompensointiin. Lämpötilankompensointiliuska liimataan erilliselle, mutta mitattavan kohteen kanssa samaa materiaalia olevalle alustalle, jolloin siihen ei vaikuta mikään kuormitus. Täyssiltakytkennässä kaikille neljälle silvulle on kytketty venymäliuska, milloin se antaa laajan ulostulon venymäliuskojen muunnajalle parantaen lämpötilakompensointia. (12.)



KUVA 7. Puolisiltakytkennät, joista vasemmalla ylhäällä on lämpötilankompensointiliuska kytkettynä (12)

### 2.2.3 Venymäliuskan valinta

Venymäliuskan valinta koostuu oikeanlaisen venymäliuskan löytämisestä ottaen huomioon ympäristöolosuhteet ja asennus- ja käyttörajoitukset. Toimintaa määrittävä osa on

venymäliuskan langan tai filmin seosmateriaali. Sen valinnassa otetaan huomioon venymäliuskan ensisijainen käyttötarkoitus, mitattava materiaali, lämpötila-alue, resistanssi, vaadittava tarkkuus, liuskan venymä- ja väsymisikä. (11.)

Liuskan pituus on usein merkittävä tekijä, koska venymäliuskamittaukset tehdään koneen osan tai rakenteen kriittisimmästä kohdasta, joka on myös usein suurimmin rasitettu kohta. Liuskan pituuden valintaan vaikuttaa mitattavan materiaalin ja mittauspinnan tasaisuus. Liuskan pituuden pitää olla pienempi kuin 0,1 kertaa reiän, kierteen tai kolon halkaisija tai vastaavan kuormitetun mitan. Todella lyhyissä kuormituspituuksissa edellä mainittu sääntö ei päde, koska hyvin pieni mittauspituus aiheuttaa ongelmia ja heikentää suorituskkyä. Venymäliuskojen valinnassa otetaan huomioon kytkettävien liuskojen määrä ja mittaushohteeseen asettelu. Liuskat voidaan kytkeä 90, 45 tai 60 asteen ruusukkeeseen. (11.)

#### **2.2.4 Venymäliuskan asentaminen**

Yleisin asennustapa ohutfilmivenymäliuskalle on käyttää huoneenlämpöistä kovetettua syanoakrylaattiliimaa, joka koostuu katalyytistä ja liimasta. Liimaamiseen tarvitaan vähiten työkaluja, tarvikkeita ja asennuskokemusta. Venymäliuska voidaan asentaa myös hitaamalla. (6, s. 523.)

Asennuspinta esikäsitellään joko kemiallisella pesulla tai hiomalla ja kemiallisella pesulla. Hiomista ei käytetä, jos mitattavaa pintaa ei saa muuttaa. Liuskan asetteluviivat on saatava kiiltävälle osalle menetelmällä, joka ei aiheuta kuoppia tai muita poikkeavuuksia liuskan alapuolelle asennuksen jälkeen. Katalyytti laitetaan venymäliuskan taakse ja liima mitattavalle pinnalle. Anturia painetaan peukalon voimalla valmistajan suositteleman ajan, joka on yleensä vähintään minuutti. (6, s. 523.)

Liiman kuivuttua voidaan kytkeä johdot anturiin. Usein venymäliuskoissa on valmiiksi juotetut johdot. Jos liimaa on levinnyt laajalle alueelle anturia painettaessa, voidaan se poistaa varovasti terällä tai hiekkapaperilla. Anturin johdolle tehdään vedonpoisto ja anturi peitetään päällysteellä. (12.)



## 2.3 Voima-anturi

Voima-anturit voivat olla venymäliuskoilla tai pietsosähköisellä kiteellä toteutettuja antureita tai induktiivisia antureita. Venymäliuskoista valmistetuilla voima-antureilla mitataan staattisia voimia ja pietsosähköisestä kiteestä valmistetuilla antureilla dynaamisia voimia. Pietsosähköisten antureiden etu on niiden pieni koko, mutta niiden tarkkuus on huonompi verrattuna venymäliuskoihin. Voima-antureilla voidaan mitata puristusvoimaa, vetovoimaa, taivutusvoimaa ja leikkausvoimaa. Erilaisilla voima-antureilla pystytään mittaamaan voimia vaihteluväliltä 1 N - 5 000 kN ja niiden epätarkkuus on 0,01 - 1 % maksimivoimasta. (2, s. 145 - 147.)

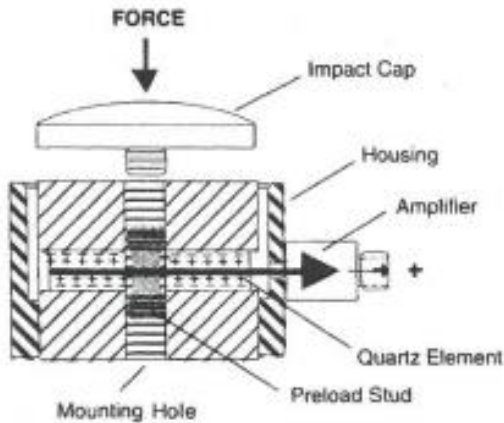
Voima-anturin tyypin valintaan vaikuttavat mitattavan voiman staattisuus tai dynaamisuus, mitattavan voiman suuruus, voiman tai voimien suunta ja anturin koon rajoitukset. Voima-anturin valintaan voi lisäksi vaikuttaa tarkkuus, taajuus, ympäristön olosuhteet ja mekaaninen yhteensopivuus. (6, s. 259 - 265.)

Induktiivisen voima-anturin rakenne on yksinkertainen, ja sitä käytetään pienien voimien mittaamiseen. Induktiivisessa voima-anturissa voima muutetaan jousella liikkeeksi, joka saadaan mitattua differentiaalimuuntajalla. (2, s. 145.)

### 2.3.1 Pietsosähköinen voima-anturi

Pietsosähköiset voima-anturit on suunniteltu mittaamaan dynaamisia värähteleviä voimia, iskuja tai nopeita puristusvoimia. Pietsosähköisessä anturissa mekaaninen rasitus muuttuu sähköstaattiseksi varaukseksi, joka kerääntyy anturissa olevan kvartsikiteen pinnalle. Kvartsikide tuottaa sähköstaattista voimaa ainoastaan, kun siihen kohdistuvaa voimaa kasvatetaan tai vähennetään. (6, s. 255.)

Pietsosähköinen voima-anturi on esitetty kuvassa 8, jossa anturissa on ohut kvartsilevy kahden pohjalevyn välissä. Elastinen berylliumkupari-nasta pitää pohjalevyjä paikallaan ja esikuormittaa kidettä. Kiteen esikuormittaminen varmistaa pohjalevyjen läheisen kontaktin kvartsikiteeseen turvaten hyvän kapasiteetin ja lineaarisuuden jännitteelle. Tämä tuntoelinrakenne on pakattu jäykkään, ruostumattomaan teräskoteloon. Teräskotelo on hitsattu ilmatiiviisti suojaan sisäiset komponentit. (6, s. 258.)



KUVA 8. Poikkileikkauskuva tyypillisestä voima-anturista (6, s. 258)

### 2.3.2 Venymäliuskavoima-anturi

Venymäliuskatekniikka voima-antureissa on suunniteltu staattisten painojen ja vähäisten dynaamisten kuormien ja voimien tarkkaan mittaamiseen. Venymäliuskatyyppisten voima-antureiden suunnittelussa keskitytään erityisesti rakenteeseen, jolla suoritetaan ennustettavia ja toistettavia mittauksia muuttuvalle voimalle tai kuormalle. Ne voidaan luokitella yleiskäyttöön, väsytykseen, uuvutukseen ja erikoissovellutuksiin. (6, s. 262 - 265.)

Puristus- ja vetovoimaa mitataan venymäliuskoilla toteutetuilla sauva- ja rengasantureilla. Sauva-antureissa venymäliuskat ovat pareittain vastakkaisilla puolilla, koska taivutusmomentti ei saa vaikuttaa mittaustuloksiin. Rengasanturissa on neljä venymäliuskaa renkaan sisäsivulla ja sen asennuksessa pyritään välttämään sivuttaisvoimien syntyminen. Leikkaus- ja taivutusvoima-anturit toteutetaan myös venymäliuskojen avulla ja niitä käytetään usein punnitustarkoituksiin. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertainen taivutusvoima-anturi. (2, s. 145 - 147.)



*KUVA 9. Futekin valmistama venymäliuskataivutusvoima-anturi (13, linkit Anturit -> Voima ja momenttianturit)*

## **2.4 Asema-anturi**

Asema-anturilla mitataan lineaarista asemaa tai kulma-asemaa kuten autoissa kaasupolkimen tai pyöränripustuksen asentoa. Autossa asema-antureina käytetään yleensä potentiometrejä, jotka käyttävät mittaukseen metallijohtimen pituuden vaikutusta niiden vastukseen. Asema-anturilta saatavaa tietoa voidaan käyttää myös nopeuden mittaamiseen, koska derivoimalla matka ajan suhteen saadaan nopeus. Derivoimalla nopeus ajan suhteen saadaan kiihtyvyys, jonka avulla voidaan laskea voima. (14, s. 155 - 156.)

### 3 MITTAUSLAITTEISTO

Mittauskohteena olevassa ralliauton prototyypissä on käytössä MoTeCin valmistama moottorinohjaus ja tiedonkeruujärjestelmä. Autossa on M182-moottorinohjain ja C185-näyttö kuljettajalle. Opinnäytetyön anturit kytketään prototyyppiajoneuvon sähköjärjestelmään SVIM-laajennusosien kautta. SVIM-laajennusosat on kytketty CAN-väylällä C185-näyttöön, josta anturitietoa pystytään reaaliaikaisesti ethernetin kautta analysoimaan tai lähettämään pilvitietokantaan.

#### 3.1 C185

C185 on tiedonkeruun sisältävä noin viiden tuuman värinäyttö. Näytössä on 250 Mt:n sisäinen muisti, 1 000 Hz:n näytteenottotaajuus ja MoTeCin i2-tietojenkäsittelyohjelmisto. Näytössä on neljä muunneltavaa CAN-väylää, kaksi RS323-porttia ja siihen liitetään 79 pinnin Autosport-liitin. Näytössä on 10 analogista jännitekanavaa antureille ja useita muita sisääntuloja. (15, linkit Products -> Displays -> C1 series -> C185.)

#### 3.2 SVIM

SVIM-laajennusosilla on lisätty C185-näytön analogisia anturikanavia ja sen avulla saadaan reaaliaikaista suuriresoluutioista tietoa antureilta. SVIM tukee useita erityyppisiä antureita. Laajennusosassa on kuusi 5 000 Hz:n analogista Fast-jännitekanavaa, kymmenen 1 000 Hz:n analogista High-jännitekanavaa ja kahdeksan 1 000 Hz:n analogista Differential-jännitekanavaa. Fast-kanavien resoluutio on 12 bit ja High- ja Differential-kanavien resoluutio 15 bit. SVIM on yhteydessä näyttöön 1 Mb/s kanavanopeuden CAN-väylällä. Anturit kytketään laajennusosaan 55 pinnin Autosport-liittimellä. Laajennusosaan tulee viiden pinnin Autosport-liitin, jossa on can low, can high, akun positiivinen jännite ja akun negatiivinen jännite. (15, linkit Products -> Expanders -> SVIM.)

## **4 MITTAUSSUUNNITELMA**

Tässä opinnäytetyössä saatavia tuloksia tultaisiin hyödyntämään Ultra-hankkeen ralliauton toisen prototyyppirungon suunnitteluun. Rungon suunnittelusta vastaavan Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat määritti, mitä mittauksia tehdään ja mistä kohti runkoa. Tehtävänä oli selvittää, millä antureilla mittaus suoritetaan ja miten se toteutetaan. Anturoinnilla oli tarkoitus mitata ajon aikana runkoon kohdistuvia voimia. Ajon aikana tulevat voimat välittyvät ajoradan pinnasta ajoneuvon runkoon alatukivarsien ja iskunvaimentimien kautta, joten ne olivat pääasialliset mittauskohteet.

### **4.1 Antureiden valinta**

Antureiden tuli sopia fyysisesti mittauskohteisiin ja niillä täytyi pystyä mittaamaan haluttuja suureita. Antureille täytyi myös suunnitella kiinnitykset, mekaaninen suojaus ja poistaa mahdolliset virhelähteet kuten lämpötilan vaihtelu. Antureiden valintaa varten tutkittiin aiemmin tehtyjä vastaavia mittauksia, jotta voitiin jo suunnitteluvaiheessa välttää useita virheitä ja ongelmia. Tarvittaville antureille tehtiin vaatimuslistat, joiden mukaan alettiin etsiä sopivia antureita ja niiden toimittajia. Yksi merkittävä kriteeri toimittajien valinnassa oli antureiden toimitusaika.

Mittauksissa käytettävät anturit kytkettiin SVIM-laajennusosiin, joten sen kanavat rajoittivat antureiden määrää. Kaikkien antureiden tuli toimia 5 V:n käyttöjännitteellä. Antureilta tuleva ulostulosignaali täytyi olla 0 - 5 V:n analoginen signaali, että se oli luettavissa tiedonkeruulla.

### **4.2 Kiihtyvyysanturit**

Vaatimuksena oli mitata kiihtyvyyksiä iskunvaimentimien yläpäästä ja mahdollisimman läheltä rengasta. Iskunvaimentimien yläpuolelle runkoon tulevat kiihtyvyysanturit pysyvät koko ajan kohtisuorassa maapalloon nähden, joten niillä mittaaminen on kannattavaa. Kiihtyvyysantureiden yksi akseleista kalibroitaisiin kohtisuoraan maapalloa kohti, milloin maapallon luonnollinen putoamiskiihtyvyys aiheuttaisi mittausvirhettä anturin poiketessa kalibroitiasemasta. Iskunvaimentimen alaosaan olka-akseliin tulevissa kiihtyvyysantu-

reissa on ollut ongelmana niiden paraabelin suuntainen liike, jolloin anturi ei pysy kohtisuorassa maapalloon nähden. Pyörännapaan tulevia kiihtyvyyssantureita päätettiin kuitenkin yrittää. Suunnitelmana oli yrittää laskea resultanttikiihtyvyyttä kiihtyvyyssanturin akselien välillä.

Kiihtyvyyssantureiden vaatimuksena oli kolmiakselisuus resultanttikiihtyvyyden määrittämisen takia, koska kiihtyvyys ei ole koko ajan mittausakselin suuntaista. Kiihtyvyyssantureilla mittaamiseen suunniteltiin SVIM-laajennusosan Fast-kanavia. Kolmeakselinen kiihtyvyyssanturi tarvitsee kolme kanavaa. Eteen ja taakse oli mahdollista sijoittaa kaksi anturia käytettäessä edessä ja takana molemmissa yhtä laajennusosaa. Antureiden tuli olla analogisia, koska silloin ei tarvitse käyttää ylimääräisiä mittaussignaalin muuntimia. Aikaisempien mittausten ja kokemusten perusteella iskunvaimentimen yläpuolelle tulevan anturin mittausalueeksi määritettiin  $\pm 20$  G ja pyörännapaan tulevan anturin mittausalueeksi  $\pm 50$  G. Antureiden tuli olla pulttikiinnityksellä, että ne pysyvät kunnolla kiinni ajon aikana eivätkä värähtele.

#### **4.3 Potentiometrit**

Iskunvaimentimien viereen päätettiin laittaa potentiometrit mittaamaan iskunvaimentimien kiihtyvyyttä. Potentiometriä antamaa kiihtyvyyttä tulee pystyä vertaamaan kiihtyvyyssantureiden arvoon, jolloin voidaan tutkia molempien systeemien toimivuutta. Potentiometrillä saatavan aseman muutoksen ja siihen käytetyn ajan avulla voidaan määrittää kiihtyvyys. Vaihtoehtoina oli sylinterimäinen lineaaripotentimetri ja lankapotentimetri. Lankapotentimetri olisi ollut edullisempi, mutta se ei olisi kestänyt niin suuria liikenopeuksia kuin lineaaripotentimetri. Lankapotentimetrin langan mekaaninen suojaaminen olisi ollut paljon hankalampaa. Lineaaripotentimetrejä suunniteltiin asentaa ajoneuvon jokaiseen neljään iskunvaimentimeen. Kiinnitykseen soveltuvin ratkaisu oli pallonivelkiinnitys anturin molemmissa päissä.

Potentiometrit suunniteltiin käyttävän SVIM-laajennusosan High-kanavia. Potentiimetrin suunniteltujen kiinnikkeiden etäisyys iskunvaimentimen äärimitassa oli noin 600 mm ja iskunvaimentimen liikematka noin 240 mm, joten potentiimetrin liikematkan tuli olla vähintään 300 mm. Potentiometriä oli kestävä suuria iskuja ja liikenopeuksia, jotta iskunvaimentimien normaali ajonaikainen liike ei riko niitä. Kosketuksettomalla mittauksella

olevat anturit kestävät suuremman liikenopeuden ja niillä on pitempi kestoikä kuin kosketuksellisilla. Lisäksi potentiometreille piti suunnitella mekaaninen suojaus, joka suojaa niitä ajon aikana tulevalta lialta. Suojausta suunniteltiin myös mahdollisen nurjahtamisen estämiseen.

#### **4.4 Venymäliuskat**

Rungon suunnittelijat halusivat ajoneuvon rungosta ja alustasta venymä- ja voimamittauksia, joilla nähdään ajon aikana runkoon tulevia voimia. Venymäliuskojen käyttö oli tähän tarkoitukseen sopivinta, koska ne on helppo asentaa rikkomatta asennuskohtaa, ne voidaan asentaa pieniinkin tiloihin ja niillä pystytään mittaamaan hyvinkin pieniä jännityksiä. Voima-antureiden käyttö olisi ollut vaikeaa, koska mittaushakojen rakennetta olisi joutunut rikkomaan.

Venymäliuskojen asennuspaikoiksi haluttiin pyöräntuennan alatukivarret, ikkunakehikon tukipalkki ja WRC-tukipalkki. Kuvassa 10 on prototyyppiajoneuvon runko, johon anturit asennettiin. Kuvassa näkyvät mustat etupään alatukivarret. Runkopalkkeista ikkunakehikon tukipalkki on katon etuosasta lähtevä etummainen palkki ja takimmainen on WRC-tukipalkki. Tukivarsista saadaan mitattua runkoon kohdistuvat kuormitusvoimat ajon aikana. Tukivarsiin kiinnitettävien venymäliuskojen asennuksessa täytyi ottaa huomioon kallistuksenvakaajien kiinnitys tukivarsiin, jotta venymäliuskat eivät mittaa kallistuksenvakaajan aiheuttamaa taipumaa. Runko oli symmetrinen, joten edessä ja takana oli riittävää asentaa vain toiselle puolelle runkoa venymäliuskat. Lisäksi SVIM-laajennusosan venymäliuskoille soveltuvat Differential-kanavat rajoittivat venymäliuskojen määrää. Venymäliuskat suunniteltiin asentaa ajoneuvon kuljettajan puoleisiin tukivarsiin ja palkkeihin, koska ne ovat lähempänä sinne suunniteltuja SVIM-laajennusosia.



*KUVA 10. Prototyyppiajoneuvon runko*

Venymäliuskojen valintaan kysyttiin apua Oulun yliopistolta. Tukivarsiin suunniteltiin kaksiakseliset liuskat, joissa on kaksi liuskaa päällekkäin 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Kaksiakselisilla venymäliuskoilla pystytään toteuttamaan lämpötilakompensointi. Ikkunakehikon tukipalkkiin ja WRC-palkkiin suunniteltiin tavalliset suorat venymäliuskat. Teräkselle tarkoitettujen venymäliuskojen resistanssin tuli olla  $120 \Omega$  ja pituuden 5 mm tai 6 mm riippuen valmistajasta. Suoriin venymäliuskoihin tarvittiin kahden metrin johto ja kaksiakselisiin venymäliuskoihin yhden metrin johto. Johtojen tuli olla valmiiksi juotettuja venymäliuskoihin.



## 5 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTTAMINEN

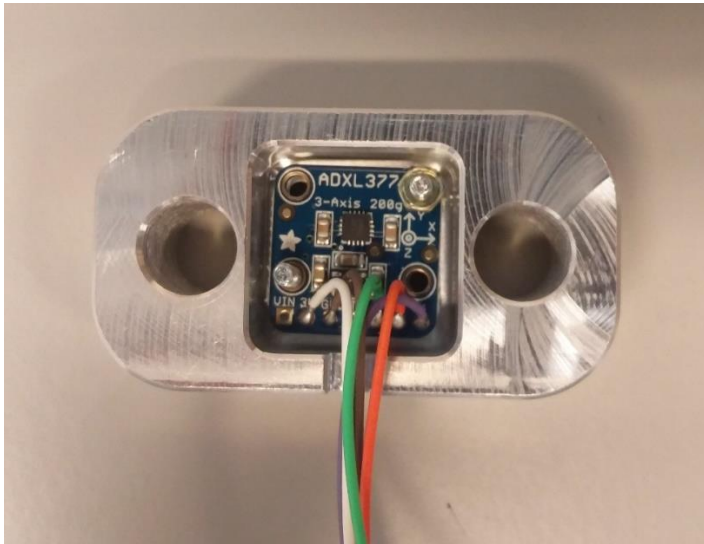
Mittaukset päätettiin toteuttaa kahdella SVIM-laajennusosalla, joista toinen on taka-akselilla oleville antureille ja toinen etuakselilla oleville antureille ja rungon venymäliuskoille. Etuakselin anturit asennettiin menosuuntaan vasemmalle puolelle. Taka-akselin anturit asennettiin menosuuntaan oikealle puolelle. Koska anturit ovat vastakkaisilla puolilla, saadaan mitattua tieherätteitä molemmilta puolilta autoa. Lisäksi saadaan samaan aikaan ulko- ja sisäkaarteiden voimia käännöksissä.

Alkuperäisistä suunnitelmista poiketen lineaaripotentiometrejä ei kytketty SVIM-laajennusosaan vaan suoraan näytölle. Kaikille antureille tehtiin Deutsch DTP -liittimet johtoihin, mikä helpottaa antureiden käsittelyä jatkossa. SVIM-laajennusosien kytkentäkaaviot on esitetty liitteessä 1.

### 5.1 Kiihtyvyysantureiden valmistaminen

Kiihtyvyysanturit päätettiin valmistaa itse valmiiden piirilevyjen avulla, koska vaatimusten mukaisia analogisella ulostulosignaaleilla olevia kiihtyvyysantureita oli vähän tarjolla ja ne olivat hinnaltaan kalliita. Kiihtyvyysanturin piirilevyksi valittiin Adafruit ADXL377, jolla voidaan mitata positiivista ja negatiivista kiihtyvyyttä 200 G kolmella akselilla. Kiihtyvyysanturi on MEMS-tyyppinen. Anturi toimii 3,3 V:n käyttöjännitteellä, jolloin 0 G on 1,65 V. Anturin herkkyys on 8,25 mV/G.

Kiihtyvyysanturin piirilevyille mallinnettiin kotelo SolidWorks-mallinnusohjelmalla. Kiihtyvyysanturin kotelon piirustus on esitetty liitteessä 2. Anturikotelon kiinnitysreiät suunniteltiin olka-akselissa oleviin valmiisiin M10-kierteisiin. Anturikotelo koneistettiin alumiinista Oulun ammattikorkeakoululla. Anturikotelon kansi vesileikattiin 5 mm:n paksuisesta pellistä. Piirilevy kiinnitettiin anturikoteloon kahdella M2,5 pultilla kuvassa 11, minkä jälkeen kotelo ja kansi tyhjiövalettiin yhteen EpoxAcast 690 -valuepoksilla. Kiihtyvyysantureiden piirilevyjen korkeus ja leveys olivat 0,75 tuumaa. Kiihtyvyysanturin äärimitoiksi tuli leveys 55 mm, korkeus 30 mm ja syvyys 25 mm.



*KUVA 11. Kiihtyvyyssanturin piirilevy ja anturikotelo*

Kiihtyvyyssanturin piirilevyyn juotettiin viisi johtoa: syöttöjännitteelle, maadoitukselle ja kolmelle kanavalle kullekin signaali johto. Kiihtyvyyssantureiden syöttöjännitteen johdot juotettiin vahingossa väärään pinniin piirilevyllä, joten anturikotelon ulkopuolelle johtoihin lisättiin Microchipin valmistamat MCP1702 TO-92 -regulaattorit. Regulaattorilla saadaan pienennettyä ohjainlaitteelta tuleva 5 V:n jännite kiihtyvyyssanturille sopivaksi 3,3 V:n jännitteeksi.

Kiihtyvyyssanturit kytkettiin suunnitelmista poiketen SVIM-laajennusosan High-kanaviin, koska niitä ei saatu toimimaan halutusti Fast-kanavissa. High-kanavissa on pienempi päivitystaajuus, mutta parempi resoluutio eli tuloksista saadaan tarkempia. Kiihtyvyyssanturin tarkkuudeksi saadaan 0,012 G jakamalla anturin mitta-alue  $\pm 200$  G Fast-kanavan resoluutiolla 15 bit, joka tarkoittaa  $2^{15}$  eli 32 768 tilaa.

Iskunvaimentimien yläpäähän runkoon kiinnitettyjen kiihtyvyyssantureiden Z-akseli on vertikaalisessa suunnassa positiivinen kiihtyvyys ylöspäin. Y-akseli mittaa pitkittäistä kiihtyvyyttä positiivinen kiihtyvyys eteenpäin. Z-akseli mittaa poikittaista kiihtyvyyttä positiivinen kiihtyvyys kulkusuuntaan oikealle. Olka-akseliin vetoakselin yläpuolelle kiinnitetyissä kiihtyvyyssantureissa X-akseli mittaa vertikaalista kiihtyvyyttä positiivinen kiihtyvyys ylöspäin. Y-akseli mittaa pitkittäistä kiihtyvyyttä positiivinen suunta eteenpäin. Z-akseli mittaa poikittaista kiihtyvyyttä positiivinen suunta kulkusuuntaan vasemmalle. Kiihtyvyyssanturin kiinnitys takana olka-akseliin on esitetty kuvassa 12.



*KUVA 12. Kiihtyvyysanturin kiinnitys olka-akseliin taka-akselilla*

Kiihtyvyysantureiden signaali oletettiin lineaarisiksi koko käyttöalueella, koska mitattavien kiihtyvyyksien suuruusluokka ei vaatinut erityistä tarkkuutta. Kiihtyvyysanturit kalibroitiin ajoneuvon sähköjärjestelmään kiinnitettynä asettamalla olka-akseleiden kiihtyvyysantureiden X-akselit ja rungon kiihtyvyysantureiden Z-akselit vesivaa'an avulla pystysuoraan maapalloon nähden. Olka-akseleiden X-akselit ja rungon Z-akselit asetettiin näyttämään 1 G ja muut akselit 0 G. Kiihtyvyysantureiden akseleiden kalibrointiarvot on esitetty taulukossa 1. Kalibrointi toteutettiin valmistajan ohjeiden mukaan.

*TAULUKKO 1. Kiihtyvyyssantureiden kalibrointiarvot*

		Jännite (mV)
Edessä	Olka-akselin X-akseli	1 648,5
	Olka-akselin Y-akseli	1 648,2
	Olka-akselin Z-akseli	1 648,5
	Rungon X-akseli	1 656,2
	Rungon Y-akseli	1 642,2
	Rungon Z-akseli	1 634,1
Takana	Olka-akselin X-akseli	1 648,0
	Olka-akselin Y-akseli	1 648,2
	Olka-akselin Z-akseli	1 643,1
	Rungon X-akseli	1 651,2
	Rungon Y-akseli	1 649,5
	Rungon Z-akseli	1 648,3

## 5.2 Lineaaripotentimetri

Lineaaripotentimetreiksi valittiin Opkonin valmistama SLPC 300 D 5K, jossa on 0 - 5 V analoginen ulostulosignaali ja 300 mm:n mittauspituus. Lineaaripotentimetrin datalehti on liitteessä 3. Lineaaripotentimetrit kiinnitettiin niiden pallonivelkiinnityksellä alatukivarsiin ja runkoon. Potentimetrin yläpää kiinnitettiin lähelle iskunvaimentimen yläpäästä 3 mm teräksestä valmistettuihin kiinnikkeisiin. Mittauskohteena olleeseen ensimmäiseen prototyyppiin ei tullut kallistuksenvakaajia, joten niille alatukivarsiin tehtyjä kiinnikkeitä hyödynnettiin potentimetrin kiinnitykseen. Kuvassa 13 näkyy lineaaripotentimetrille 1,5 mm seinämävahvuudelta olevasta huonekaluputkesta tehty suojaus. Metalliputki suojaaa sylinterin vartta lialta, kiveniskuilta ja nurjahtamiselta.



*KUVA 13. Lineaaripotentiometrin asennus ajoneuvon takapäässä*

Lineaaripotentiometrit kytkettiin suoraan C185-näytön analogisiin jännitekanaviin, koska näytöllä oli vapaita kanavia. Kanavien resoluutio oli 1,33 mV. Lineaaripotentiometrit kalibroitiin testaamalla iskunvaimentimien äärimitat jouset poistettuna. MoTeCin C185 Dash Manager -ohjelmalla tehtiin mittauskanavat potentiometreille. Ohjelmalla saatiin äärimittoja vastaavat jännitteet. Iskunvaimentimien liikematka mitattiin rullamitalla ja jännitteitä vastaavat pituudet syötettiin C185 Dash Manager -ohjelmaan. Äärimittoja vastaavat jännitteet on esitetty taulukossa 2. Etupään ja takapään alustageometriat ovat erilaiset, joten kalibrointiarvoissa on suuria eroja.

*TAULUKKO 2. Iskunvaimentimien äärimittoja vastaavat lineaaripotenttiometrien jännitteet.*

	Pituus (mm)	Jännite (V)
Etuiskunvaimennin	245	2,15
	0	4,16
Takaiskunvaimennin	240	1,60
	0	4,04

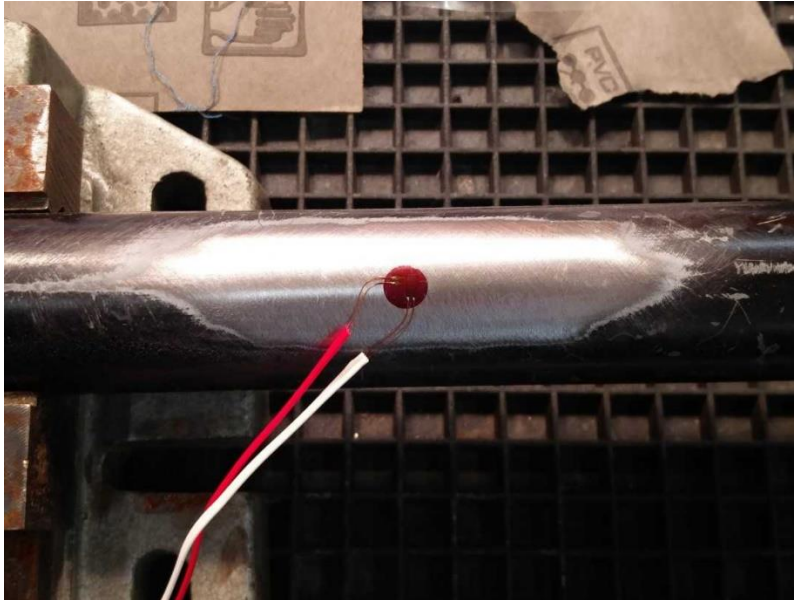
### 5.3 Venymäliuskat

Venymäliuskat tilattiin Kyowalta, jolla oli laajat valikoimat erilaisia liuskoja, nopeat toimitusajat ja niistä oli positiivisia kokemuksia aiemmista projekteista. Runkoon asennettavat suorat venymäliuskat olivat malliltaan KFGS-5-120-C1-11L3M3R. Tukivarsiin asennettavat kaksiakseliset liuskat olivat malliltaan KFGS-2-120-D16-11L1M2S. Molemmat venymäliuskat olivat resistanssiltaan 120  $\Omega$  ja yleiselle teräkselle tarkoitettuja. Suorat venymäliuskat olivat pituudeltaan 5 mm, ja niissä oli 3 m:n kolmejohtoinen kaapeli. Kaksiakseliset venymäliuskat olivat pituudeltaan 2 mm, ja niissä oli yhden metrin kaksijohtoiset kaapelit molemmissa liuskoissa.

Venymäliuskojen asennukseen ja kalibrointiin saatiin apua Oulun yliopistolta. Venymäliuskojen asennus tukivarsiin ja niiden ensimmäinen kalibrointi suoritettiin Oulun yliopiston laboratoriotiloissa. Venymäliuskojen asennus runkoon suoritettiin Oulun ammattikorkeakoulun autolaboratoriossa ja niille tehtiin ulkoinen kalibrointi vastaavalla metalliputkella Oulun yliopistolla.

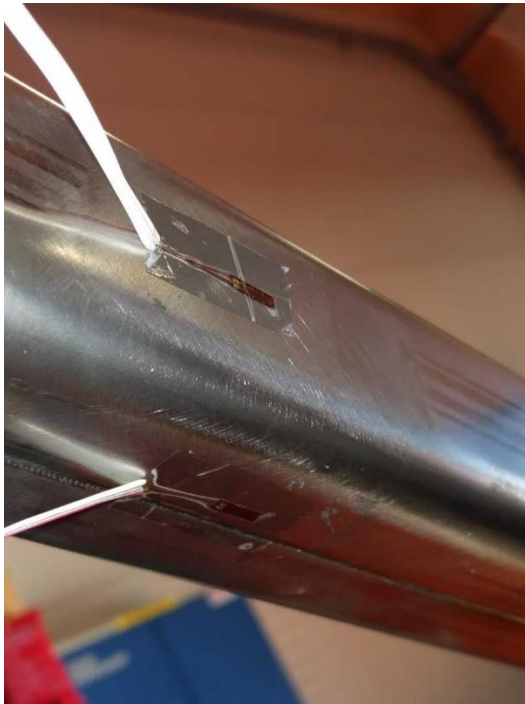
Venymäliuskojen asennus tehtiin liimaamalla, joka on yleisin venymäliuskojen asennustapa. Ensimmäisenä asennuspinta hiottiin tasaiseksi ja puhtaaksi maalista kulmahiomakoneella. Asennuspinta hiottiin vielä käsin 45° kulmaan liuskaan nähden 180 ja 240 karkeudella olevilla hiomapapereilla. Ennen liimaamista asennuspinta puhdistettiin etanolilla rasvasta ja muusta liasta. Liuskat liimattiin tukivarsien ja runkopalkkien suuntaisesti Kyowan CC-33A -venymäliuskapikaliimalla. Kuvassa 14 on kaksiakselinen venymäliuska

liimattuna tukivarteen, missä punaisella johdolla oleva liuska on mittaamiseen ja valkoisella johdolla oleva lämpötilakompensointiin. Liimauksen jälkeen venymäliuskojen päälle levitettiin elastista massaa, jolla liuska saatiin eristettyä ja suojattua mekaanisesti. Elastisen massan avulla saatiin myös tehtyä vedonpoisto johdoille. Lopuksi asennuskohdan ja elastisen massan päälle pyöritettiin lisäsuojaksi ilmastointiteippiä.



*KUVA 14. Kaksiakselinen venymäliuska tukivarteen liimattuna*

Prototyyppiajoneuvon runkoon liimattiin ikkunapalkkiin ja WRC-tukipalkkiin molempiin kaksi suoraa venymäliuskaa. Runkopalkit ovat profiililtaan neliöitä ja niissä on kahden vastakkaisen sivun keskellä sauma. Venymäliuskat liimattiin lähelle kattoa ja auton sisältä katsottuna takapuolelle ja sisäpuolelle. Takapuolella olevat venymäliuskat ovat palkin saumapinnalla. Kuvassa 15 on auton kuljettajan paikalta otettu kuva ikkunapalkista, jossa näkyvät siihen asennetut suorat venymäliuskat. Toinen venymäliuskoista on liimattu palkin sauman viereen.

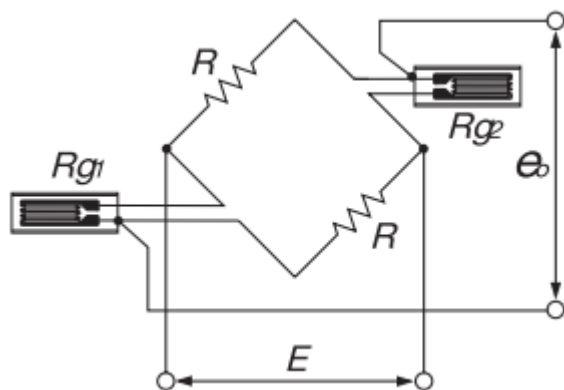


*KUVA 15. Ikkunapalkkiin asennetut suorat venymäliuskat.*

Venymäliuskat kytkettiin SVIM-laajennusosan Differential-kanaviin, jolloin auton etupäässä ja takapäässä oli käytössä molemmissa kahdeksan mittauskanavaa. Venymäliuskojen ja SVIM-laajennusosan välille tehtiin kahdeksannapaiset Deutsch DTP -liittimet, joiden yhteyteen tehtiin myös siltakytkennät  $120\ \Omega$ :n vastuksilla. Tukivarsien venymäliuskoille tehtiin kuvan 7 vasemman yläreunan mukainen puolisiltakytkentä, jossa venymäliuskat ovat samalla puolella siltaa ja toinen liuska on lämpötilakompensointiin. Tukivarsiin tulevat voimat oletettiin olevan puristus- ja vetojännitystä, jolloin tukivarren lämpötilakompensointivenymäliuskaan ei kohdistu jännitystä, mutta se lämpölaajentuu yhtä paljon kuin mittaava venymäliuska tasapainottaen siltakytkennän.

Runkopalkkien venymäliuskojen puolisiltakytkennät toteutettiin kuvan 16 mukaan, koska tilatut suorat venymäliuskat olivat kolmijohtoisia. Runkopalkkien venymäliuskat olivat kytkennässä eri puolilla siltaa, koska ne olivat molemmat mittaustarkoitukseen. Runkopalkkien venymäliuskoille ei tullut lämpötilakompensointia. Ilman lämpötilakompensointia venymäliuskoilla ei pystytä mittaamaan absoluuttista voiman määrää, mutta niillä saadaan mitattua voiman muutos runkopalkkeissa erilaisissa kuormitustilanteissa.





KUVA 16. Puolisiltakytkentä kolmijohtoisisille venymäliuskoille ilman lämpötilakompensointia. (12)

Venymäliuskat kalibroitiin liimauksen jälkeen Oulun yliopiston laboratoriossa roikuttamalla tukivarsissa ja metalliputkessa tunnettuja massoja, jotka olivat 20 kN:n voima-anturilla mitattuna 45 kg ja 138 kg. Metalliin liimatuista venymäliuskoista tehtiin kalibrointilaitteistolla 60 kN:n voima-antureita. Kalibrointilaitteistolla säädettiin 60 kN:n voima-anturi näyttämään samaa arvoa tunnetulle massalle 20 kN:n voima-anturin kanssa herkkyyttä muuttamalla. Kun säädetty herkkyys kerrotaan prototyyppiajoneuvon sähköjärjestelmän syöttöjännitteellä 5 V ja jaetaan voima-anturin lukemalla 60 kN, saadaan venymäliuskan herkkyys. Tukivarsien venymäliuskojen ja rungon venymäliuskojen ulkoisen kalibroinnin herkkyysarvot on esitetty taulukossa 3. Kaikille venymäliuskoille vetojännitys tuli positiivisena voimana ja puristusjännitys negatiivisena voimana.

TAULUKKO 3. Venymäliuskojen kalibrointi-arvot

Venymäliuskan sijainti		Herkkyys 60 kN:n voima-anturina (mV/V)	Venymäliuskan herkkyys (mV/N)
<b>Etuakselin tukivarret</b>	Etummainen	0,85	0,0000708
	Takimmainen	0,68	0,0000567
<b>Taka-akselin tukivarret</b>	Etummainen	0,96	0,0000767
	Takimmainen	0,92	0,0000800
<b>Ikkunapalkki ja WRC-tukipalkki</b>	Palkin tasainen pinta	0,51	0,0000425
	Palkin saumapinta	0,35	0,0000292

Alatukivarsien venymäliuskoja testattiin myöhemmin ajoneuvon sähköjärjestelmään kytkettynä kalibroinnissa käytetyllä tavalla. Testeissä huomattiin, että venymäliuskat eivät näytä oikeita tuloksia. Mittaustulokset olivat moninkertaisia oikeaan tulokseen verrattuna ja tulokset olivat eri alatukivarsilla eri suuria. Mittaustulosten virheellisyyden takia alatukivarsien venymäliuskoille päätettiin tehdä toinen kalibrointi vastaavalla tavalla kuin ensimmäinenkin.

Alatukivarret pääsivät roikkumaan vapaasti auton rungosta, kun ne irrotettiin toisistaan alapallonivelen päästä. Tunnettuja massoja oli kaksi, massaltaan 15 kg ja 63 kg. Alatukivarsien toisen kalibroinnin jännitteet ja voimat on esitetty taulukossa 4. Wheatstonen sillat tasapainotettiin ja nollakohdat asetettiin niihin jännitteisiin, jotka kytkennästä tulivat alatukivarsien ollessa kuormittamattomat. Kalibroinnissa käytettiin vain vetojännitystä, joka ha-

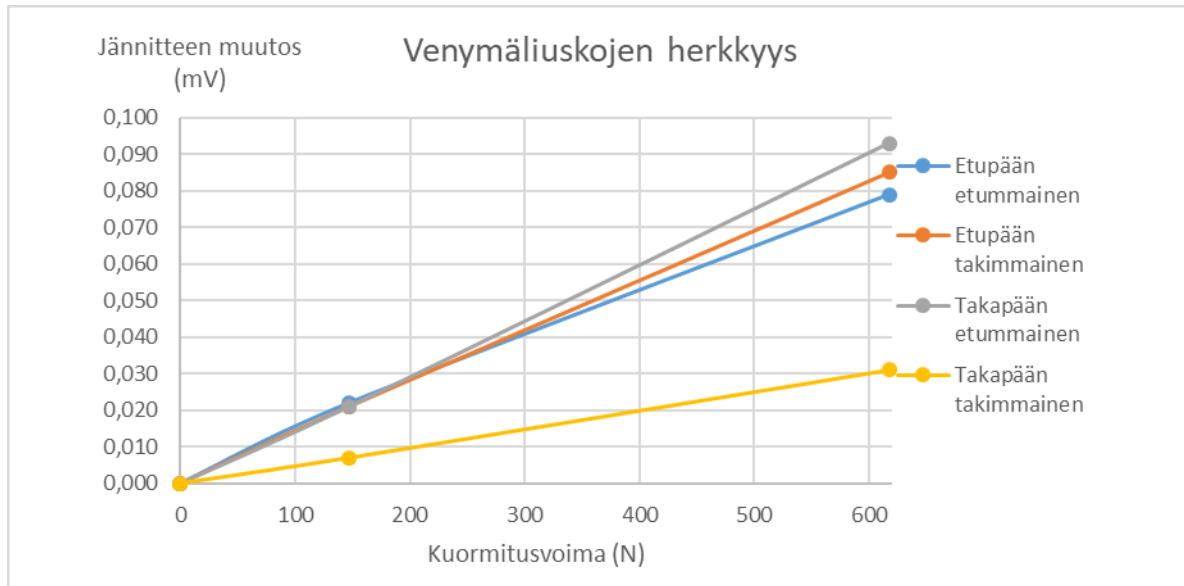
vaitaan taulukossa 4 jännitteen kasvaessa, kun voima lisääntyy. Venymäliuskojen oletetaan toimivan lineaarisesti veto- ja puristusjännityksen puolella. Herkkyyden oletetaan olevan sama koko mittausalueella.

*TAULUKKO 4. Alatukivarsien toisen kalibroinnin tulokset*

		<b>Jännite (mV)</b>	<b>Voima (N)</b>
Etupää	Etummainen	-3,381	0
		-3,359	147,15
		-3,302	618,03
	Takimmainen	-3,204	0
		-3,183	147,15
		-3,119	618,03
Takapää	Etummainen	-3,264	0
		-3,243	147,15
		-3,171	618,03
	Takimmainen	-4,559	0
		-4,552	147,15
		-4,528	618,03

Venymäliuskojen herkkyyden yksiköksi haluttiin mV/N, joka saatiin jakamalla jännitteen muutos käytetyllä voimalla. Kuvassa 17 on esitetty jännitteen muutos kuormitusvoiman funktiona. Alatukivarsien venymäliuskat olivat herkkyydeltään lähellä toisiaan paitsi takapään takimmaisen alatukivarren venymäliuska. Venymäliuskojen herkkyydet laskettiin kulmakertoimien keskiarvoista. Etupään etummaisen alatukivarren venymäliuskan herk-

kyydeksi tuli 0,000139 mV/N ja takimmaisena 0,000140 mV/N. Takapään etummaisena alatukivarren venymäliuskan herkkyydeksi tuli 0,000147 mV/N ja takimmaisena 0,000049 mV/N.



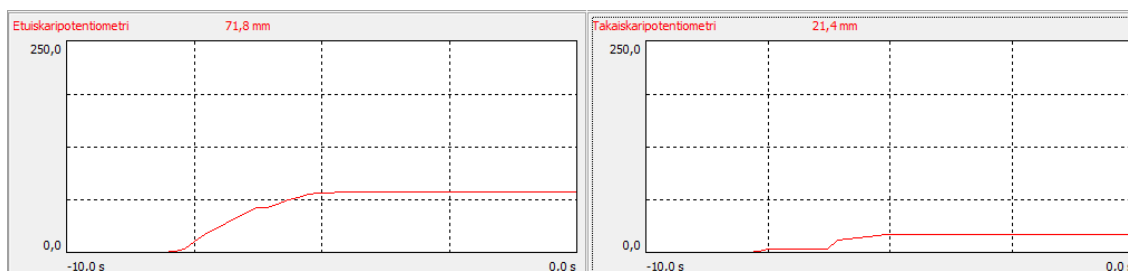
KUVA 17. Alatukivarsien kalibroinnin jännitteen muutos kuormitusvoiman funktiona

Venymäliuskojen Differential-kanavissa käytettiin suurinta mahdollista vahvistusta, jolla mittausväli oli  $-78$  mV:sta  $+78$  mV:iin ja resoluutio 0,00238 mV. Venymäliuskoille laskettiin suurin ja pienin tarkkuus jakamalla resoluutio suurimmalla ja pienimmällä herkkyydellä. Suurimmaksi tarkkuudeksi tuli 16,2 N ja pienimmäksi tarkkuudeksi 48,7 N. Alatukivarsien venymäliuskojen mittausalueeksi määritettiin 80 kN sekä veto- että puristusjännitystä. Vetojännityksen maksimia 80 kN vastaava jännite kanavan kalibrointiin saatiin lisäämällä venymäliuskan nollakohtaan jännitteeseen voiman ja herkkyyden tulo. Puristusjännityksen maksimia  $-80$  kN vastaava jännite saatiin kanavan kalibrointiin vähentämällä nollakohtaa vastaavasta jännitteestä voiman ja herkkyyden tulo. Ikkunapalkille ja WRC-tukipalkille tehtiin vastaavalla tavalla raja-arvot kanavalle, mutta niiden antamia tuloksia ei voida pitää luotettavina, koska niidenkin kalibrointi-arvojen voidaan olettaa olevan virheellisiä.

## 6 ANTUREIDEN TESTAAMINEN

Opinnäytetyön antureita ei päästy testaamaan ajokokeissa, joten niiden toimivuus tarkastettiin vain laboratoriossa. Antureista voitiin tarkastella kalibrointien ja kytkentöjen onnistumista. Antureiden signaaleja tarkasteltiin reaaliajassa MoTeCin C185 Dash Manager -ohjelmalla. Antureiden signaaleja ei päässyt analysoimaan varsinaisilla siihen tarkoitetuilla ohjelmilla, joten niitä ei pystynyt muuttamaan toiseen muotoon matemaattisilla kaavoilla.

Lineaaripotentiometrin toiminnan pystyi tarkastamaan helposti nostamalla ja keventämällä ajoneuvoa nelipilarinostimella tai kuormittamalla runkoa lisämassalla. Kuvassa 18 näkyy lineaaripotentiometrin toiminta, kun ajoneuvo on laskettu alas nelipilarinostimella. Vasemmalla puolella on etupään iskunvaimentimen lyheneminen 71,8 mm ja oikealla takapään iskunvaimentimen lyheneminen 21,4 mm, kun ajoneuvo on laskettu alas. Iskunvaimentimen pituuden kulmakertoimen avulla saadaan laskettua iskunvaimentimelle nopeus ja kiihtyvyys esimerkiksi MoTeCin i2 pro -ohjelmalla.



*KUVA 18. Näyttökuva C185 Dash Manager -ohjelmasta, kun ajoneuvo on laskettu nelipilarinostimella alas*

Kiihtyvyyssantureihin ei saatu suuria kiihtyvyyksiä laboratorio-olosuhteissa paikalleen kiinnitettynä. Kuvassa 19 on takapään rungon kiihtyvyyssanturin toiminta, kun sitä heilutettiin rungosta irrotettuna kädellä voimakkaasti. Kiihtyvyyssanturia heilautettiin kerran jokaisen mittausakselin suunnassa. Sininen käyrä oli Z-akselin, punainen käyrä X-akselin ja vihreä käyrä Y-akselin. Kuvassa mittausalue on  $-10\text{ G}$ :stä  $+10\text{ G}$ :hen, positiivinen kiihtyvyys ylöspäin ja negatiivinen kiihtyvyys alaspäin. Mittauksen alussa näkyy myös kalibrointi, jossa Z-akseli näyttää noin  $1\text{ G}$  ja muut akselit noin  $0\text{ G}$ . Rungossa kiihtyvyyssanturit ovat lähes kalibrointiasemassa.



*KUVA 19. Näyttökuva C185 Dash Manager -ohjelmasta kiihtyvyyssanturin toiminnasta*

Alatukivarsien venymäliuskoja testattiin vetämällä takarengasta taaksepäin. Kuvassa 20 näkyy venymäliuskojen toimintaa, missä ylemmässä kuvassa on etummainen tukivarsi ja alemmassa takimmainen tukivarsi. Kuvassa 20 mittausalue on  $-2\,000\text{ N}$ :sta  $+2\,000\text{ N}$ :iin, positiivinen voima ylöspäin ja negatiivinen voima alaspäin. Kun rengasta vedetään taaksepäin, etummaiseen tukivarteen tulee positiivista vetojännitystä ja takimmaiseen negatiivista puristusjännitystä. Takapäässä takimmaisessa alatukivarressa on alapallonivel ja etupäässä etummaisessa alatukivarressa on alapallonivel, joihin kohdistuu yleensä suurempi voima kuormitustilanteissa.



KUVA 20. Näyttökuva C185 Dash Manager -ohjelmasta takapään alatukivarsien venymäliuskojen toiminnasta

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja toteuttaa prototyyppiajoneuvon runkoon kohdistuvien ajonaikaisien voimien mittausjärjestelmä. Työn vaatimuksena olleet mittaussuunnitelma ja mittausjärjestelmä saatiin tehtyä, mutta runkopalkkien venymäliuskojen tuloksia ei voi pitää luotettavina. Työn piti alkuperäisen suunnitelman mukaan sisältää numeerisia arvoja kokeellisista mittauksista, mutta opinnäytetyön ennakoitua suurempi työmäärä mahdollisti tarpeeksi laajan opinnäytetyön suunniteltua suppeammalla sisällöllä. Opinnäytetyön suunniteltua työmäärää lisäsi kiihtyvyyssantureiden valmistaminen, kiihtyvyyssantureiden vianetsintä ja venymäliuskojen kalibroinnin haasteet. Koko projektin myöhässä oleva aikataulu esti kokeelliset mittaukset, koska prototyyppiajoneuvolla ei pystynyt vielä ajamaan.

Suunnitelmana oli myös laskea lineaaripotentimetrin matkasta kiihtyvyys ja resultanttikiihtyvyyksiä kiihtyvyyssantureiden akseleiden välillä. Resultanttikiihtyvyyksien ja lineaaripotentimetrin kiihtyvyyksien laskemista ei pystynyt suorittamaan reaaliaikaisesta näytöltä saatavasta anturitiedosta. Mittausjärjestelmän toimivuus testattiin vain laboratorioolosuhteissa. Kokeellisten mittausten puuttuessa tämän opinnäytetyön sisältöä ei pystytty hyödyntämään Ultran toisen prototyyppirungon suunnittelussa. Lisäksi toisen prototyyppirungon suunnitelma oli jo valmiina tämän opinnäytetyön valmistuessa.

Työn tuloksena saatu mittausjärjestelmä voidaan siirtää sellaisenaan toiseen prototyyppirunkoon tai tehdä siihen parannuksia tämän opinnäytetyö perusteella. Eniten kehitettävää on iskunvaimentimien kiihtyvyyksien mittaamisessa, joka toteutettiin lineaaripotentimetreillä. Kiihtyvyyssanturit on helppo siirtää toiseen prototyyppirunkoon, ja niillä on mahdollista saada luotettavia mittaustuloksia suurista runkoon kohdistuvista rasituksista. Kiihtyvyyssantureiden haasteena on saada laskettua resultanttikiihtyvyyksiä kolmen akselin väliltä, koska ilman kiihtyvyyden resultanttia kiihtyvyyden tulisi olla mittaavan akselin suuntaista luotettavan mittaustuloksen saamiseksi. Alatukivarsien venymäliuskat pystytään siirtämään alatukivarsien kanssa toiseen prototyyppirunkoon. Kaikkien antureiden liittimien suojausta ja johtovetoja täytyisi parantaa, jotta ne kestäisivät ajonaikaisen mekaanisen rasituksen, veden ja epäpuhtaudet.



Kiihtyvyyssantureiden käyttäminen mittauksiin oli suunniteltua työläämpää, mutta niiden valmistaminen oli taloudellisesti kannattavaa. Lisäksi kiihtyvyyssanturin kotelon valmistuksessa pääsi käyttämään 3D-mallinnusta, teknistä piirustusta ja erilaisia valmistusmenetelmiä. Kiihtyvyyssanturit olisivat voineet olla pienemmällä mittausalueella, koska mitattavat kiihtyvyydet arvioitiin olevan maksimissaan 50 G. Mittauksissa tarkasteltiin kuitenkin maksimikiihtyvyyksiä, joten kiihtyvyyssantureille ei olisi tarvinnut suurempaa tarkkuutta. Kiihtyvyyssantureita ei saatu toimimaan niille suunnitelluissa Fast-kanavissa, koska niissä kiihtyvyyssantureilta tuli levossakin 60 G:tä vastaava jännite. Selkeää syytä Fast-kanavien ongelmille ei löytynyt.

Opinnäytetyössä kiihtyvyyssantureiden mittausaluetta ei kalibroitu vaan se oletettiin lineaariseksi. Jos kiihtyvyyssantureiden mittaustarkkuutta olisi halunnut parantaa, niihin olisi mittaustarkkuudella aiheutettu tunnettuja kiihtyvyyksiä koko mittausalueelta ja kiihtyvyyksiä vastaavat jännitteet olisi mitattu. Kiihtyvyyssanturilta johtoveto laajennusosalle toteutettiin häiriösuojatulla kaapelilla, jossa muovikuoren alla on ohut metallikerros. Metallikerros maadoitetaan autoon, jolloin muista johdoista ja toimilaitteista ei aiheudu sähköisiä häiriöitä kiihtyvyyssanturin toimintaan. Opinnäytetyössä suojausta ei kuitenkaan toteutettu, koska antureita ei testattu ajon aikana.

Lineaaripotentiometrit olivat antureista helpoimmat toteuttaa, ja ne saatiin toimimaan ilman hankaluuksia. Niiden liikematkasta kiihtyvyyden laskeminen jäi toteuttamatta, koska tallennettua anturitietoa ei ajettu. Kiihtyvyys olisi laskettu tallennetusta anturitiedosta MoTeC:n i2pro-ohjelmalla, jossa pystyy muuttamaan mittaustuloksia eri muotoon matemaattisilla kaavoilla. Työn kannalta olisi ollut mielenkiintoista päästä vertailemaan lineaaripotentiometreiltä ja kiihtyvyyssantureilta saatuja kiihtyvyyksiä. Lisäksi olisi ollut mielenkiintoista päästä testaamaan lineaaripotentiometriä kestävyyden ajossa, koska niiden kestävyys oli ennakkoon jo hyvin epävarmaa.

Jatkokehityksessä iskunvaimentimen kiihtyvyyden mittaaminen täytyisi toteuttaa muulla tavalla, että se kestäisi varmasti toistuvia maksimikiihtyvyyksiä. Iskunvaimentimen sisälle sijoitettua anturointia täytyisi tutkia, mikä olisi onnistuessaan paras tapa mitata iskunvaimentimen kiihtyvyyttä. Potentiometriä käyttämällä voisi mitata esimerkiksi alatukivarren nivelten kiertymää tai käyttää lyhempää lineaaripotentiometriä mittaamaan alatukivar-

ren ja rungon välistä etäisyyttä. Lineaaripotentiometrin ollessa eri linjassa iskunvaimentimen kanssa syntyy aina pientä virhettä, koska niiden liikettä ei voi olettaa täysin lineaarisiksi keskenään. Myös opinnäytetyön lineaaripotentiometri ei ole täysin samassa linjassa iskunvaimentimen kanssa, joten siinä voidaan olettaa tulevan pieni mittausvirhe.

Venymäliuskojen käyttö mittauksissa oli erittäin perusteltua, koska ne soveltuvat parhaiten alatukivarsiin tulevien voimien mittaamiseen. Venymäliuskat ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, edullisia ja ne asennetaan rikkomatta asennuskohtaa. Venymäliuskoilla saadaan onnistuneella toteutuksella tärkeimmät mittaustulokset. Mittauspaikkoja suunniteltaessa alatukivarret nimettiin tärkeimmäksi mittaushaasteeksi. Runkopalkit otettiin mielenkiinnosta mukaan, että saadaan opinnäytetyöhön mahdollisimman paljon mittaavia antureita ja saadaan kalibroinnin kannalta haastavampi mittauskohde. Runkopalkkien venymäliuskojen tuloksia ei voi pitää luotettavina sekä ulkoisen kalibroinnin takia että kalibroinnin virheellisyyden takia. Ulkoisessa kalibroinnissa liimaus täytyisi onnistua identtisesti ja liimauksien identtisuuden toteaminen olisi ollut mahdotonta. Runkopalkkeille olisi tarvinnut luotettavaan kalibrointiin prototyyppiajoneuvon koria suuremman kuormituskehän, jolla runkopalkkeihin olisi voinut kohdistaa tunnettuja voimia.

Venymäliuskojen käyttö välillä erittäin dynaamisiin mittauksiin voi aiheuttaa haasteita. Venymäliuskat sopivat todella hyvin staattisiin mittauksiin kuten massan punnitsemiseen, mutta niillä ei välttämättä havaita ajonaikaisia hyvin nopeita maksimijännityksiä. Laboratoriotesteissä venymäliuskat reagoivat hyvin esimerkiksi renkaan tai tukivarren hitaaseen vetämiseen, mutta renkaan potkaisuun venymäliuskat eivät välillä reagoineet ollenkaan. Venymäliuskat mittaavat varmasti hyvin esimerkiksi käännoksissä alatukivarsiin tulevaa veto- ja puristusjännitystä, mutta erittäin nopeille yksittäisille rasituksille saattaa tulla liian pieni arvo.

Venymäliuskoja testattiin alkuperäisillä kalibrointiarvoilla roikottamalla niissä tunnettua massaa. Antureilta saadut tulokset poikkesivat tunnetun massan arvosta jopa 400 N. Lisäksi etu- ja takapään alatukivarsien venymäliuskoista saadut tulokset olivat erilaisia, koska takapään venymäliuskat näyttivät tunnetulle massalle selkeästi suurempi arvoja. Mittaustulosten selkeän virheellisyyden takia kalibrointi päätettiin tehdä uudelleen alatukivarsien venymäliuskoille ajoneuvon sähköjärjestelmään kytkettynä. Ajoneuvon johtosarjassa ja ensimmäisen kalibroinnin kalibrointilaitteistossa on erisuuriunen resistanssi,

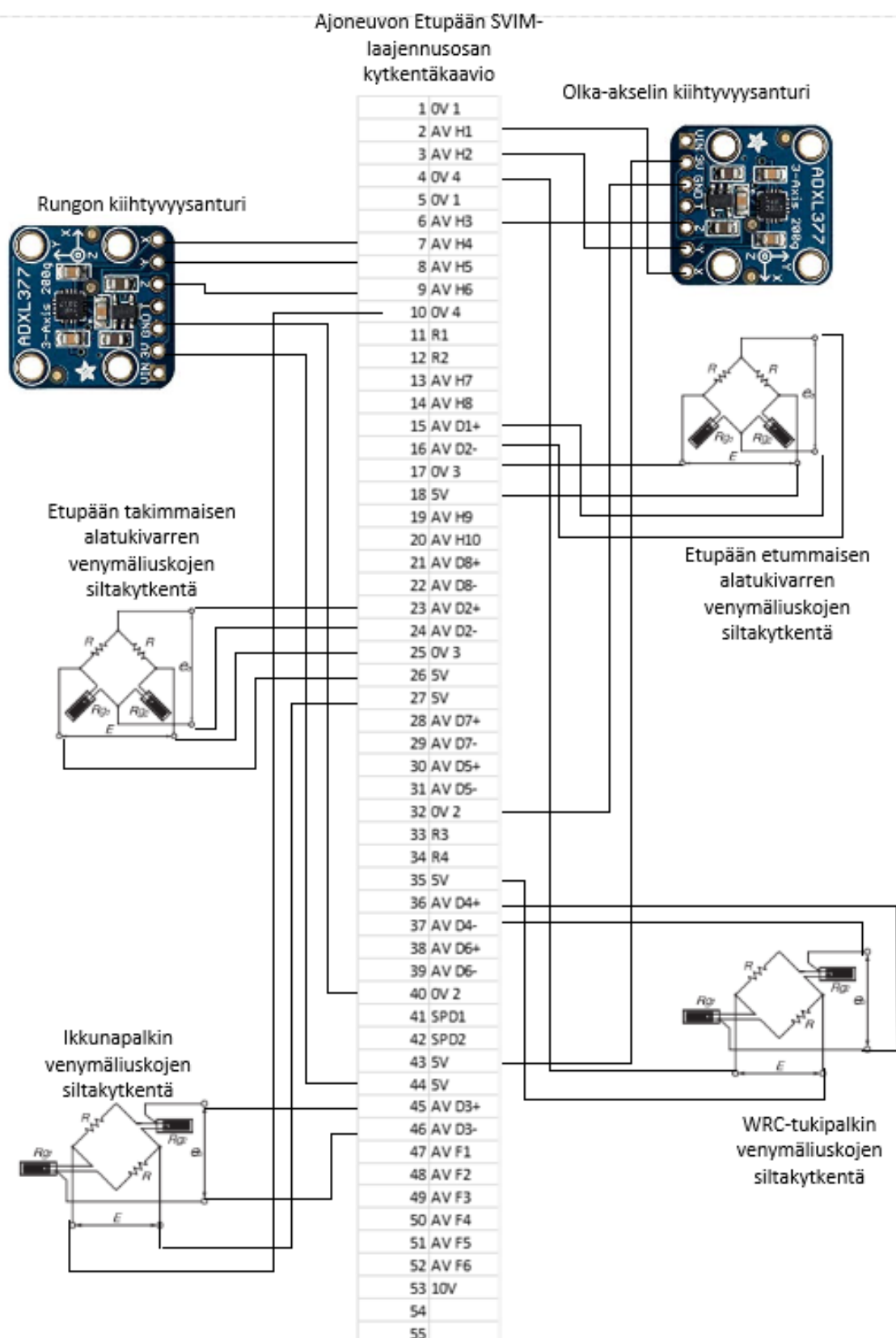
joka on todennäköisesti aiheuttanut ensimmäisen kalibroinnin epäonnistumisen. Mittauksissa tulleet jännitteet olivat suuruudeltaan alle 0,1 mV, joten ilman jännitevahvistinta pienikin ero kalibrointilaitteiston ja ajoneuvon johtosarjan välillä aiheuttaa virhettä tuloksiin. Ensimmäisessä kalibroinnissa ei voida olettaa olevan systemaattista virhettä, koska tulokset olivat keskenään erisuuruisia.

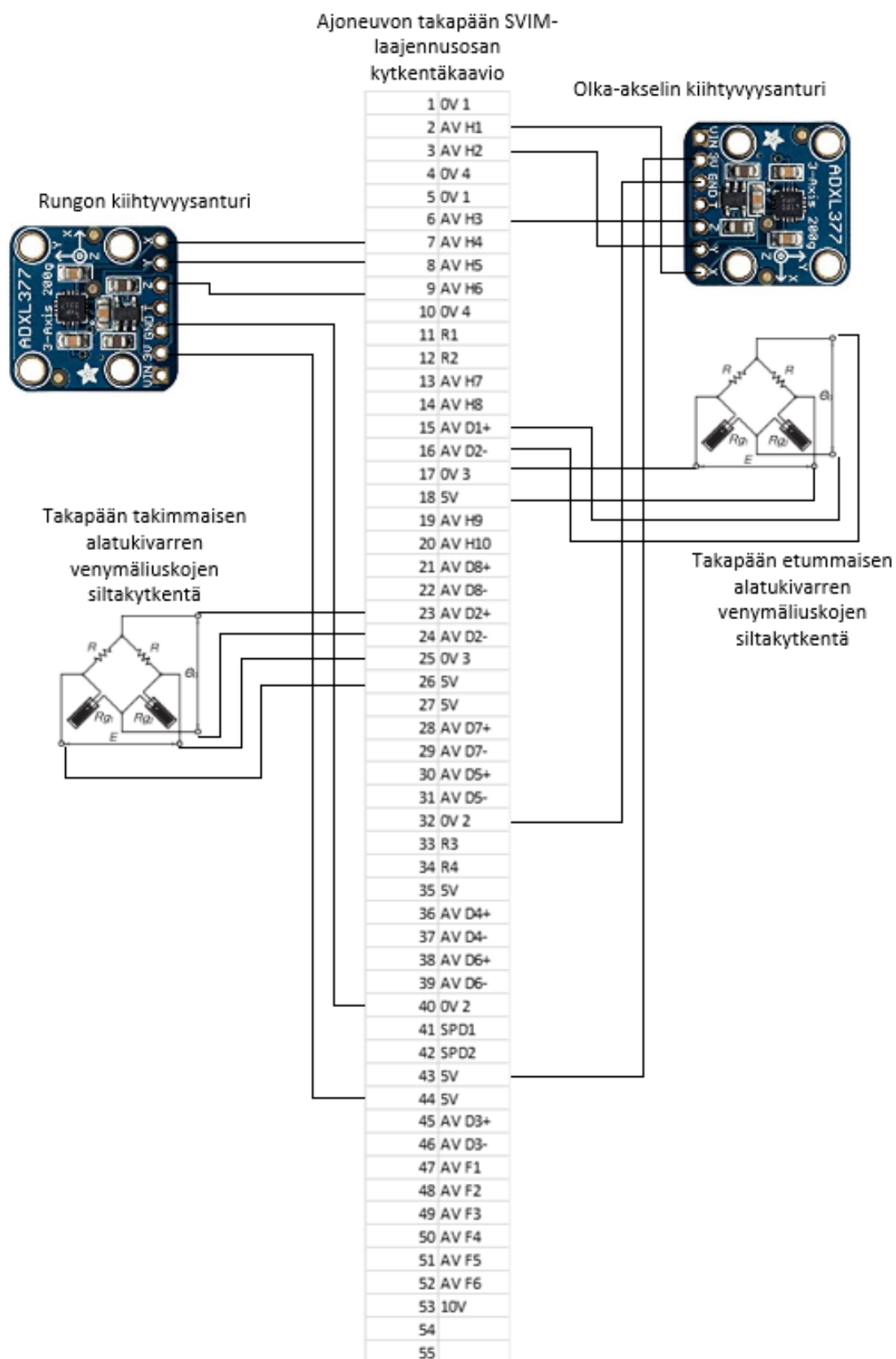
Venymäliuskojen kalibroinnissa olisi voinut käyttää enemmän erisuuruisia massoja ja etenkin suurempia massoja. Sillä olisi parannettu herkkyuden tarkkuutta ja pienennetty mittausvirhettä. Venymäliuskojen toiminta ei ole lineaarista, joten käyttämällä pienillä massoilla mitattua herkkyyttä mittausvirhe todennäköisesti kasvaa suuremmilla voimilla. Kalibroinnissa prototyyppiajoneuvo oli kaksipilarinostimella nostettuna ilmassa, joten useiden satojen kilojen massaa ei olisi voinut käyttää painopisteen liiallisen siirtymisen takia. Venymäliuskamittauksia olisi luultavasti helpottanut ulkoinen jännitevahvistin, jonka käyttöä mietittiin mittaussuunnitelmaa tehtäessä. Jännitevahvistinta ei kuitenkaan käytetty, koska SVIM-laajennusosan vahvistuksella uskottiin saatavan tarpeeksi tarkkoja tuloksia. Jännitevahvistimen käytöllä alatukivarsien venymäliuskat olisivat saattaneet toimia ensimmäisen kalibroinnin arvoilla. Jatkokehityksessä venymäliuskoille täytyisi olla jännitevahvistin. Lisäksi kalibrointia täytyisi parantaa mittausvirheiden pienentämiseksi. Venymäliuskat ovat teoriassa erittäin hyviä antureita voimien mittaamiseen, mutta ensimmäistä kertaa käytettäessä haasteellisia useiden virhelähteiden takia.

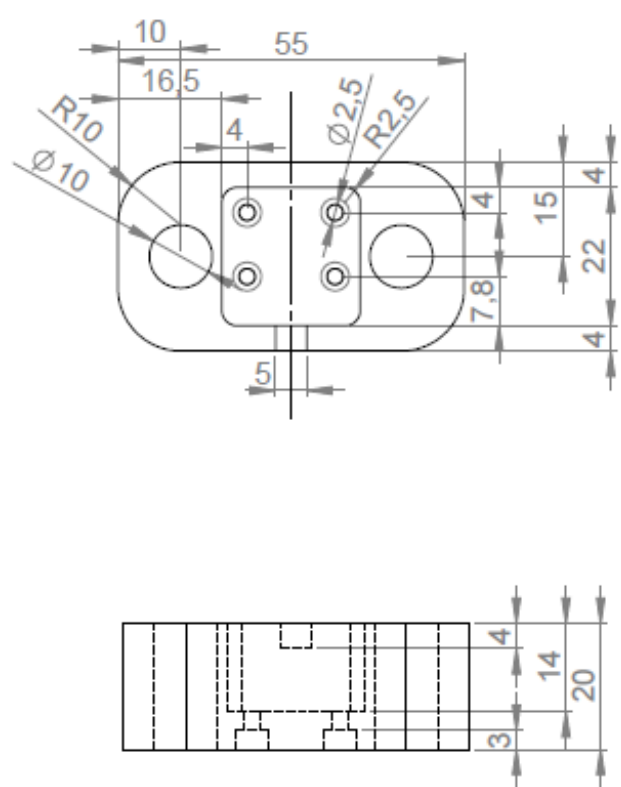
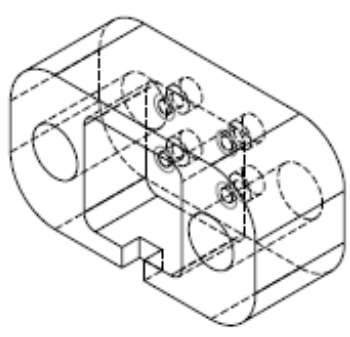
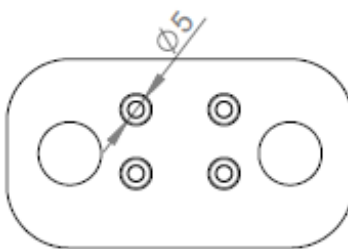

## LÄHTEET

1. Oamk. Saatavissa: <http://www.oamk.fi>. Hakupäivä 18.12.2018.
2. Fonselius, Jaakko – Laitinen, Esko – Pekkola, Kari – Sampo, Arto – Välimaa, Taisto 1988. Koneautomaatio. Anturit. Helsinki: Painatuskeskus.
3. Dietsche, Karl-Heinz 2009. Autojen anturit. Suom. Matti Juhala. Plochingen: Robert Bosch GmbH.
4. Dietsche, Karl-Heinz – Konrad, Reif 2011. Automotive Handbook. 8. painos. Plochingen: Robert Bosch GmbH.
5. Bestech. Saatavissa: <http://www.bestech.com.au/>. Hakupäivä 13.2.2018.
6. Wilson, Jon S. 2005. Sensor technology handbook. United States of America: Elsevier Inc.
7. The Principles of Acceleration, Shock and Vibration Sensors. 2005. Sensors Magazine. Saatavissa: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0505/14/main.shtml>. Hakupäivä 27.2.2018.
8. Kaajakari, Ville 2009. Practical MEMS. Small Gear Publishing.
9. Beeby, Stephen – Ensell, Graham – Kraft, Michael – White, Neil 2004. MEMS Mechanical Sensors. Norwood: Artech House Inc.
10. Eeeguide. Saatavissa: <http://www.eeeguide.com/>. Hakupäivä 27.2.2018.
11. Strain Gage Selection. 2017. Micro-measurements. Saatavissa: <http://www.vishaypg.com/docs/11055/tn505.pdf>. Hakupäivä 29.1.2018.
12. Strain gages. Kyowa. Saatavissa: [http://www.straintech.fi/pdf/2012Kyowastraingage\\_cat\\_e.pdf](http://www.straintech.fi/pdf/2012Kyowastraingage_cat_e.pdf). Hakupäivä 28.11.2018.
13. Elkome Web Shop. Saatavissa: <https://shop.elkome.com/>. Hakupäivä 27.2.2018.

14. Juhala, Matti – Lehtinen, Arto – Suominen, Matti – Tammi, Kari 2005. Moottorialan sähköoppi. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
15. MoTeC. Saatavissa: <http://www.motec.com/home>. Hakupäivä 4.4.2018.
16. Opkon. Saatavissa: <http://www.opkon.com.tr/>. Hakupäivä 29.11.2018.





Rev		Muutos		Pvm	Suunnittelija
<div><div></div><div></div><div></div></div>					
Yleistoleranssi		Mittoaste		Tuote	
ISO2768-X		1:1 A4		Kiihtyvyyssanturi	
Piirt	JS	27.07.18	<div></div>	Nimitys	
Suun	JS	27.07.18			
Tark	XXX	XX.XX.XX		Pirustusnumero	
Hyv	XXX	XX.XX.XX			
				Anturikotelo	
				X	



## SLPC

### Linear Potentiometer Slim Body Serie

- Measuring range 10 - 300 mm
- Long mechanical life
- Excellent repeatability <0.01 mm
- Infinite resolution



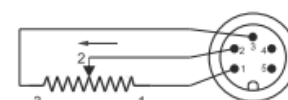
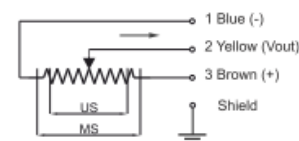
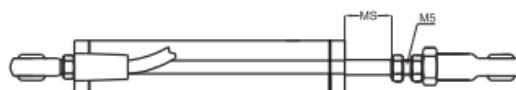
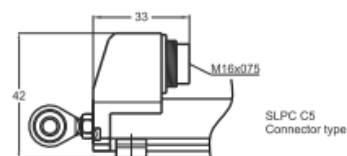
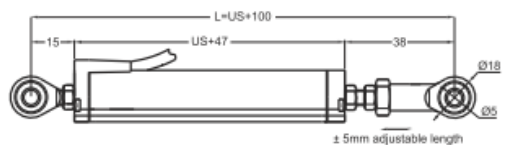
SLPC  
Cable type



SLPC  
Connector type

#### Technical specifications

Measurement stroke	10 to 300 mm
Linearity	± %0,05
Repeatability	< 0,01 mm
Resolution	Infinite
Resistance	5 KOhm or 10 KOhm (2KOhm for 10-25mm)
Resistance tolerance	± %20
Load resistance	100 KOhm min.
Recommended cursor current	<1 µA
Permissible applied voltage	28 VDC max.
Electrical connections	Cable or Connector output
Displacement speed	< 5 m/s
Mechanical life	100 million cycles
Case dimensions	Ø18 mm
Case material	Anodized aluminium
Rod material	Stainless steel
Rod diameter	Ø5 mm
Mechanical fixing	Ball joints on the both side
IP degree	IP 65
Operating temperature	-20°C ... +80°C
Storage temperature	-30°C ... +90°C



SLPC(mm)	10	25	50	75	100	125	150	175	200	250	300
US (Useful Stroke)	10	25	50	75	100	125	150	175	200	250	300
MS (Mechanical Stroke)	13	28	53	78	103	128	153	178	203	253	303
L (Total Length)	110	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400

Model	Measurement stroke (mm)	Linearity (%)	Resistance (KOhm)	Connector / Cable
(example) SLPC	175	D	5K	1M
SLPC	10 ... 300mm	D : ± %0,05 (standard)	2K : 2 KOhm (10-25mm) 5K : 5 KOhm 10K : 10 KOhm	1M : 1 meter cable (standard) 1M5 : 1,5 meter cable 2M : 2 meter cable C5 : Connector