

TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-R-00490-25



Tutkimusraportti: CEMIS-UDDA

Kirjoittaja: Timo Kananen

Luottamuksellisuus: VTT Public

Versio: 31.10.2025

Raportin nimi Tutkimusraportti: CEMIS-UDDA	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite
Projektin nimi Urheilun data ja digitalisaatio: Uutta osaamista ja lisäarvoa Kainuuseen ja Vuokatin hiihtokeskittymälle	Projektin numero/lyhytnimi UDDA
Raportin laatija(t) Timo Kananen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 178/27
Avainsanat Voimamittauslaite, rullasuksi, venymäliuska, perinteinen tyyli	Raportin numero VTT-R-00490-25
Tiivistelmä Raportissa kuvataan EAKR-rahoitteisen UDDA-hankkeen (Urheilun data ja digitalisaatio: Uutta osaamista ja lisäarvoa Kainuuseen ja Vuokatin hiihtokeskittymälle) työpaketti 1:n toteutusta. Raportissa keskitytään perinteisen tyylin rullasuksianturoinnin suunnitteluun, toteutukseen ja testaukseen. Anturointi perustuu venymäliuskoihin, joilla mitataan hiihtäjän tuottamat pysty- ja pitkittäisvoimat laboratorio-olosuhteissa hiihtomatolla. Suunnittelussa hyödynnettiin 3D-mallinnusta ja FEM-simulointeja. Pystyvoima mitataan suksirunkoon syntyvästä leikkausvoimasta ja pitkittäisvoima etuakseliin kohdistuvasta momentista. Anturoinnit testattiin VTT MIKES Kajaanin voima- ja vääntömomenttilaboratoriossa. Toteutettu anturointi täytti vaatimusmäärittelyn ja saavutti hyvän herkkyyden sekä pienen ylikuuluvuuden mittauskanavien välillä. Anturi luovutettiin Jyväskylän yliopiston Vuokatin liikuntateknologian yksikölle, jossa se sai erinomaista palautetta hiihdettävyydestään.	
Luottamuksellisuus	VTT Public
Kajaanissa 31.10.2025 Laatija Timo Kananen, Tutkija	Tarkastaja Högström Richard 912901706 Richard Högström, Tutkimustiimin johtaja
VTT:n yhteystiedot timo.kananen@vtt.fi	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä:

Allekirjoitus:

Högström
Richard
912901706

Digitally signed by Högström Richard
912901706
DN: cn=Högström Richard 912901706,
o=Teknologian tutkimuskeskus VTT,
email=richard.hogstrom@vtt.fi
Reason: I am approving this document
Date: 2025.10.31 15:52:21 +02'00'

Nimi:

Asema:

Sisällysluettelo

1. Johdanto	4
2. Vaatimusmäärittely	4
3. Suunnittelu	4
3.1 Voimanmittaus	4
3.1.1 Pystyvoima	5
3.1.2 Pitkittäisvoima	7
3.2 Hiihdettävyyys	8
4. Toteutus	9
5. Testaus	10
5.1 Kalibrointivasteet	10
5.1.1 Pystyvoima	11
5.1.2 Momentti	12
6. Tulokset	13
7. Yhteenveto	15
Lähdeviitteet	16
Liitteet	17

1. Johdanto

Tutkimusraportissa esitetty työ toteutettiin EAKR-rahoitteisessa hankkeessa "Urheilun data ja digitalisaatio: Uutta osaamista ja lisäarvoa Kainuuseen ja Vuokatin hiihtokeskittymälle" (UDDA). Diaarinumero EURA 2021/400628/09. Hanke on osa CEMIS-kehittämishjelmaa. UDDA-hankkeeseen osallistuivat VTT:n lisäksi koordinaattorina toiminut Jyväskylän Yliopisto, Oulun yliopisto, Kajaanin ammattikorkeakoulu Oy sekä CSC- Tieteen tietotekniikan keskus Oy.

VTT:n työ keskittyi hankesuunnitelman työpakettiin 1: "Digitalisaatio: Urheilun langattomat testausteknologiat & mittaussuunnitelma". Tutkimusraportti kuvaa työpaketissa suunnitellun, toteutetun ja testatun perinteisen tyylin rullasuksianturoidin. Anturointi on venymäliuskapohjainen voimamittauslaite, jolla voidaan mitata hiihtäjän tuottamat pysty- ja pitkittäissuunnan voimat laboratorio-olosuhteissa hiihtomatolla hiihdettäessä.

Hankkeessa tehty työ on jatkoa UDDA-hanketta edeltäneelle HYTELI-hankkeelle. Diaarinumero EURA 2014/7592/09 02 01. HYTELI-hankkeessa kehitettiin vastaava ratkaisu vapaan tyylin rullasuksianturoidista.

2. Vaatimusmäärittely

Jyväskylän yliopisto laati toteutettavalle perinteisen tyylin rullasuksianturoidille vaatimusmäärittelyn sisältäen voimamittaussuunnat sekä nimellisvoimat. Toteutettavan anturoidin tuli mitata hiihtäjän tuottamat pysty- ja pitkittäissuuntaiset voimat. Nimellisvoima pystysuuntaan 1800 N sekä pitkittäissuuntaan 400 N per suksi. Suunnittelun pohjaksi Jyväskylän yliopisto lainasi Marwe XC-mallisen perinteisen tyylin rullasuksen.

3. Suunnittelu

3.1 Voimamittaus

Suunnittelun pohjaksi otettiin HYTELI-hankkeessa kehitetty rullasuksianturoidi vapaalle tyyliin. Voimamittauslaite perustuu venymäliuskoihin. Kun rakenne kokee sisäisen muodonmuutoksen (venymä, puristuma) vaikuttavan kuormituksen takia, muuttuu venymäliuskan resistanssi. Resistanssin muutos voidaan mitata hyödyntäen Wheatstone-siltakytkentää. Mittauskanavien siltakytkennät ovat toteutettu täyssiltoina, jolla saavutetaan hyvä herkkyys ja pieni lämpötilariippuvuus. Alla on esitetty yhtälö, jonka täyssilta kytkentä toteuttaa.

$$\frac{V_o}{V_e} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (1)$$

missä V_o on sillan lähtöjännite, V_e on syöttöjännite, k on venymäliuskakerroin, ε_1 ja ε_3 ovat positiivista venymää. ε_2 ja ε_4 ovat negatiivista venymää eli puristumaa. Suunnittelussa hyödynnettiin elementtimenetelmää (FEM, Comsol Multiphysics 6.2). Suunnitteluprosessi on kuvan 1 mukaisesti iteratiivinen prosessi. Suunnitteluprosessi on valmis, kun haluttu vaatimusmäärittely täyttyy.



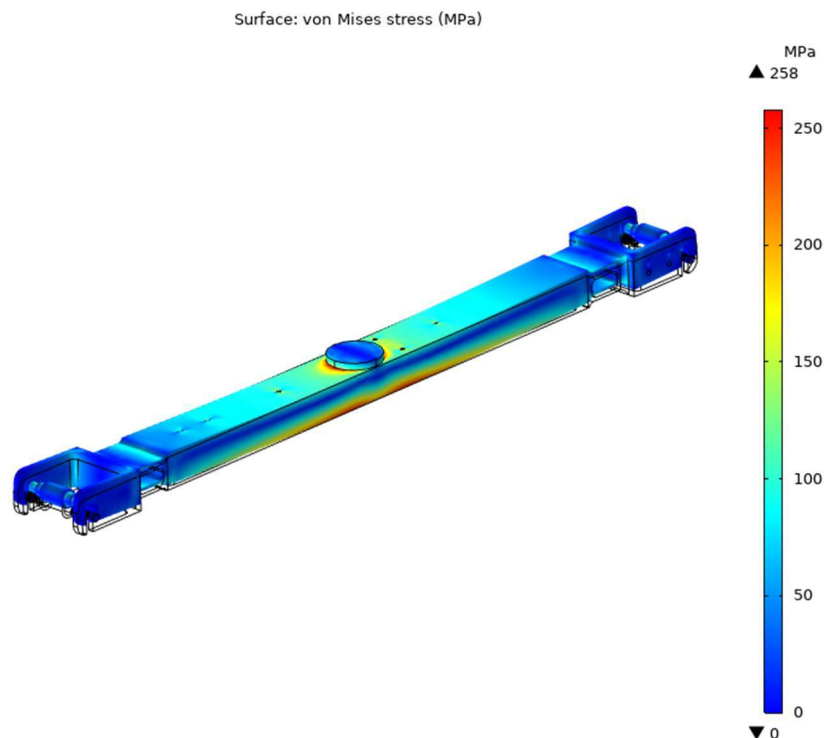
Kuva 1. FEM-simulointien iteraatioprosessi.

Useiden suunnitteluvaiheiden jälkeen päädyttiin ratkaisuun, jossa hiihtäjän tuottama pystyvoima mitataan rullasuksirunkoon syntyvästä leikkausvoimasta ja pitkittäisvoima mitataan epäsuorasti etuakseliin kohdistuvasta momentista. Kun etupyörän halkaisija on tunnettu, voidaan momentista johtaa hiihtäjän tuottama pitkittäisvoima.

Suunnitelluille rakenteille mitoitettiin varmuuskertoimeksi vähintään 2, kun kuormitus on suksen keskeltä. Turvallisen kuormituksen rajaksi määriteltiin 120 % pystysuunnan nimellisvoimasta. Simuloitaessa pystyvoimalla 2160 N on simuloinnin antama varmuuskerroin noin 1,6, kun kuormituskohta on 70 millimetriä suksen keskeltä taka-akselia kohti.

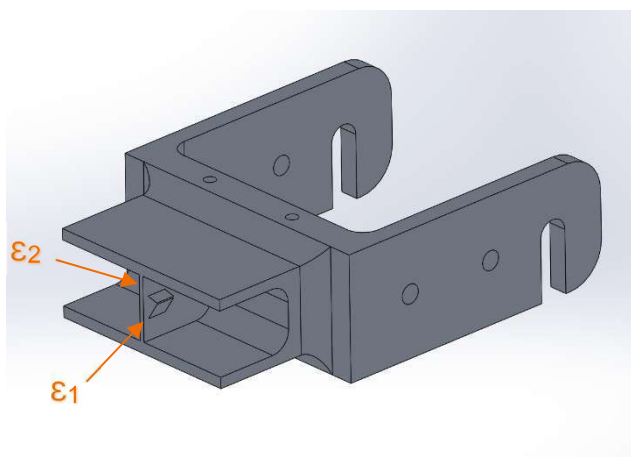
3.1.1 Pystyvoima

Rullasuksirunkorakenteen muoto ja mitoitus määritettiin FEM-simulointien perusteella. Simulointeja varten toteutettiin simuloitavan rakenteen 3D-malli (SolidWorks 2018), joka tuotiin simulointiohjelmaan (Comsol MultiPhysics 6.2). Hankkeen aikana mallinnettiin ja simuloitiin useita eri kirjallisuudesta löytyviä voimanmittausperiaatteita. Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty suksirungon jännitystarkastelu.



Kuva 2. Rullasuksirungon jännitystarkastelu.

Hankkeessa toteutettu perinteisen tyylin rullasuksianturointi mittaa hiihtäjän tuottaman pystyvoiman suksirunkoon kohdistuvan leikkausvoiman avulla. Leikkausvoima mitataan suksirungon etu- ja takaosasta kirjallisuudessa yleisesti tunnetulla leikkausvoimaa mittaavalla joustoelementtirakenteella [1],[2]. Rullasuksessa käytetty rakenne esitetty tarkemmin alla olevassa kuvassa 3. Mitattaessa pystyvoimaa läheltä etu- ja taka-akselia, voidaan pystyvoiman tasapainopiste määrittää suksirungon pituussuunnassa.



Kuva 3. Pystyvoimaa mittaavan joustoelementtirakenteen poikkileikkaus.

Pystyvoiman aiheuttama leikkausvoima mitataan kuvassa 3 esiintyvän suksirunkorakenteen poikkileikkauksen ohuesta pystyseinämästä. Kuvassa 3 voidaan venymäliuska ε_1 mitata rakenteeseen muodostuvaa venymää ja venymäliuska ε_2 mitata rakenteeseen syntyvää puristumaa. Venymäliuska ovat sijoitettu vastaavasti pystyseinämän toiselle puolelle, jossa ε_1 vastaa ε_3 ja ε_2

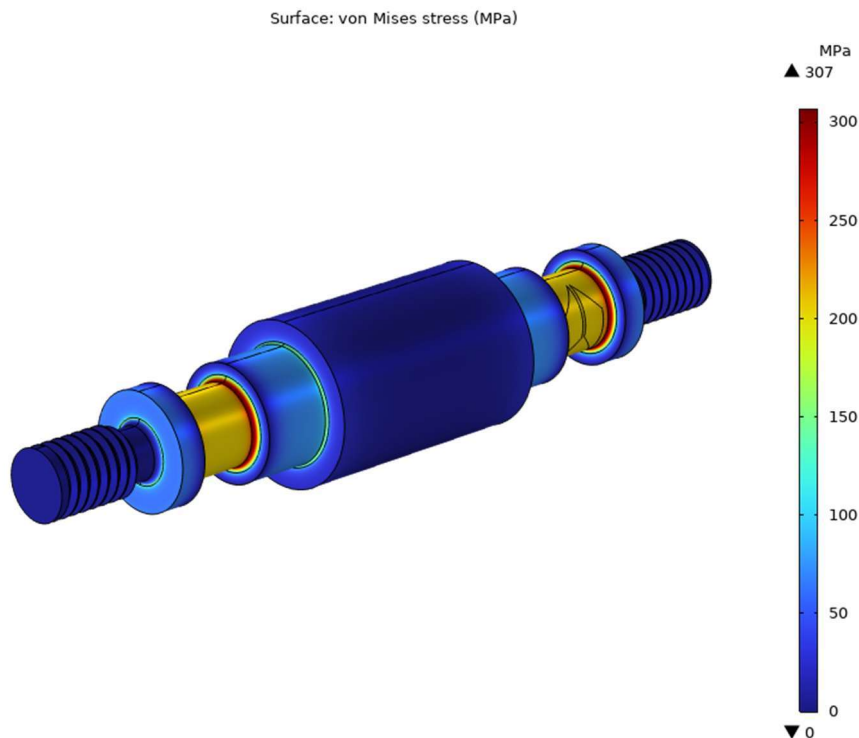
vastaa ε_4 . Venymäliuskojen paikoitus on identtinen suksirungon etu- takaosassa. Rakenteen etuna on pieni ylikuuluvuus sivu- ja pitkittäissuunnan voimille. Simuloinneissa pieni ylikuuluvuus esiintyy pitkittäisvoiman ylikuulumisena pystyvoimaan johtuen rakenteen epäsymmetriasta suksirungon ylä- ja alapintojen välillä. Rakenteen tarkempi mitoitus on esitetty liitteessä 1.

3.1.2 Pitkittäisvoima

Pitkittäisvoima mitataan epäsuorasti etuakseliin aiheutuvan momentin kautta. Rullasuksianturoinnin mallina käytetyssä Marwen XC suksessa suksen pito tuotetaan etupyörässä olevan yksisuuntaisen laakerin avulla (Schaeffler HF1416). Etupyörän halkaisija on 80 mm (säde 40 mm), kun etuakseliin kohdistuu 16 Nm vääntömomentti vastaa se 400 N pitkittäisvoimaa, kuten yhtälöstä 2 voidaan nähdä.

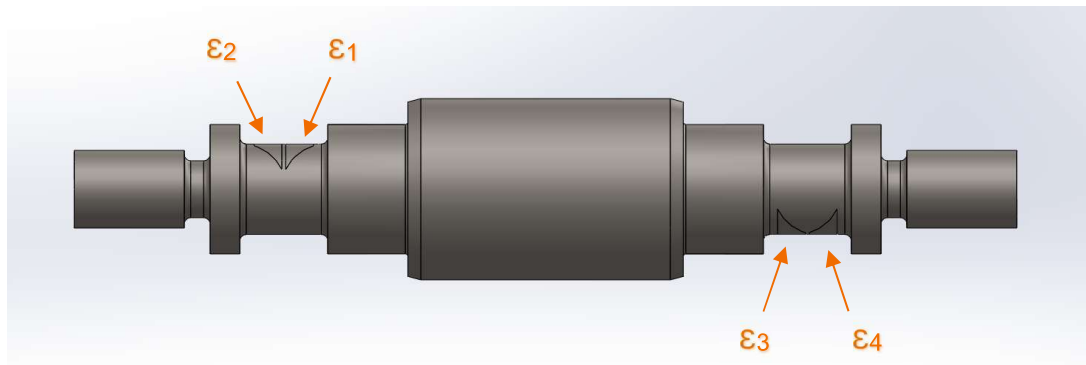
$$M = F * r \quad (2)$$

missä M on vääntömomentti, F on kuormittava voima ja r on voiman varsi. Akseli estyy kiertymästä rullasuksirungon etuhaarukassa kitkavoiman avulla. Etuakselin kiinnitysmutterit puristavat suksirungon etuhaarukan sisäpinnat akselin olaketta vasten. Syntyvä kitka estää akselia kääntymästä vaikuttavan momentin mukana. Akselimutterit ovat kiristetty 10 Nm. Akselimuttereina on käytetty M6 koon nyloc muttereita auki kiertymisen estämiseksi. Alla olevassa kuvassa 4 on esitetty etuakselin jännitystarkastelu. Etu- ja taka-akselien varmuuskerroin on 3.



Kuva 4. Etuakselin jännitystarkastelu.

Kun etuakselille sijoitetut venymäliuskat ovat vastakkaisella puolella akselia sekä akseliin vaikuttavat taivutusmomentit sekä akselin suuntaiset voimat kumoutuvat sähköisessä kytkennässä, eivätkä täten ylikuulu pitkittäisvoiman mittaukseen. Etuakselin rakenne esitetty liitteessä 2, jossa on esitetty etuakselin mittakuva.



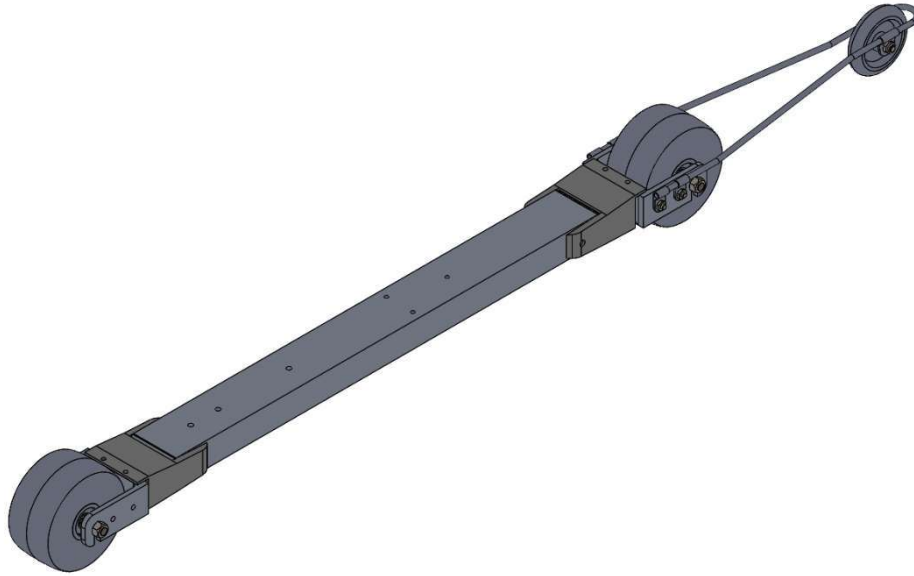
Kuva 5. Etuakseli ja venymäliuskat 3D-mallissa.

3.2 Hiihdettävyyys

Eräs vaatimusmäärittelyn suunnittelukriteeri oli saavuttaa hyvä hiihdettävyyys toteutettavalle anturille. Aikaisempaa kokemusta hyödyntäen voimanmittaus pyrittiin integroimaan mittaustilaustyönä valmistettavaan rullasuksirunkoon sekä akseleihin. Suunnittelun lähtökohtana käytettiin komposiittirungolla varustettua Marwen perinteisen tyylin rullasuksea. Alla olevassa taulukossa 1 on vertailtu mallina käytetyn rullasuksen ja hankkeessa toteutetun perinteisen tyylin rullasuksen rakennetta. Lisäksi suksen runkoon toteutettiin kantalapun siirto mahdollisuus, tällöin hiihtäjän monon koko voi vaihdella välillä 36–43. Monon kiinnityskohta on määritelty suksirungon tasapainopisteestä kohti etuakselia. Tasapainopiste on määritelty pelkälle suksirungolle, ilman pyöriä tai nokkapyörää. Perinteisen tyylin rullasuksianturin paino sisältää suksessa käytetyn venymäliuskaesivahvistimen. Suunnittelun perinteisen tyylin rullasuksianturin monon kiinnityskohdan määritteli Jyväskylän yliopisto. Kuvassa 6 on esitetty suunniteltu rullasuksikokoonpano ilma sidettä. Simulointien perusteella suksirungon pystysuuntainen taipuma oli nimellisvoimalla (1800 N) 7,2 mm ja sivusuuntainen taipuma nimellisvoimalla (400 N) 0,7 mm. Pystysuuntainen taipuma on noin puolet Marwen komposiittirungon taipumasta eli nyt suunniteltu rullasuksi on jäykkyydeltään kaksinkertainen mallina käytettyyn sukseen nähden.

Taulukko 1. Suksen rakenne

Ominaisuus	Marwe XC	Perinteisen tyylin rullasuksianturi
Paino (g)	1214	1460
Akseliväli (mm)	589	589
Hiihtokorkeus (mm)	50	50
Monon kiinnityskohta	51	60
Haarukan leveys (mm)	53	59,9
Akselin pituus (mm)	64	72,9



Kuva 6. Perinteisen tyylin rullasuksianturi ilman sidettä.

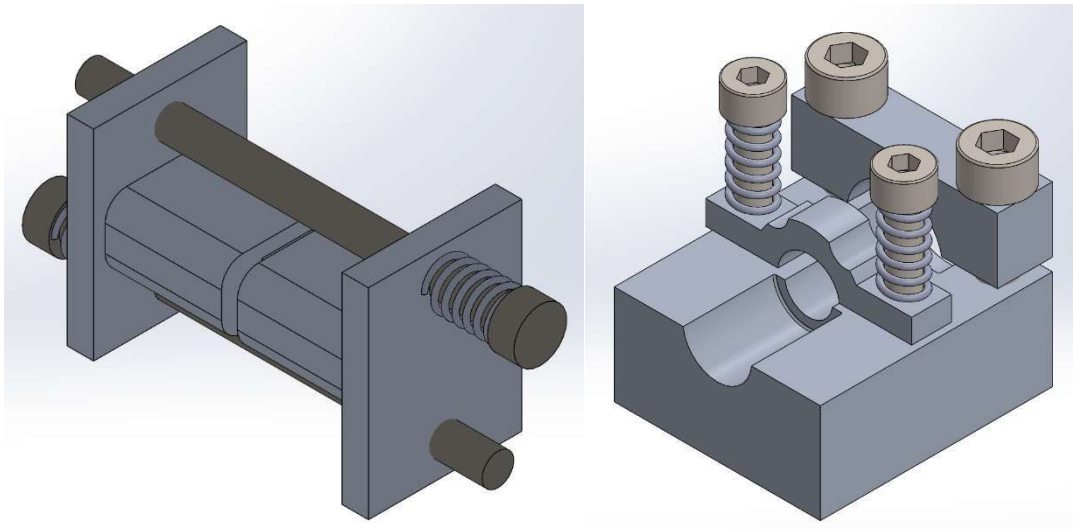
4. Toteutus

FEM-simulointien perusteella laadittiin rullasuksirungosta ja etu- sekä taka-akseleista mittakuvat. Suksirunko valmistettiin alumiiniseoksesta (7075) ja akselit suurlujuusteräksestä (34CrNiMo6). Alumiiniseoksen myötölujuus on 500 MPa ja suurlujuusteräksen 1000 MPa.

Sekä pystyvoiman suksirunkoon aiheuttama leikkausvoima sekä etuakseliin kohdistuva momentti, mitataan samaa venymäliuskamallia hyödyntäen (HBM 1-XU11S2/350_W). Käytetyn venymäliuskan lämpötilakerroin on täsmätty teräkselle, mutta koska käytetään mittaussiltana täyssiltakytkentää sekä käyttöolosuhde on laboratorioissa, voidaan lämpötilan vaikutusta mittaukseen pitää tässä tapauksessa merkityksettömänä. Koneistuksen yhteydessä rullasuksirunkoihin sekä akseliin tehtiin laserille kohdistusmerkit venymäliuskojen paikoitusta varten. Kun osat olivat koneistettu, suoritettiin tarvittavat venymäliuskojen liimaukset, uunitukset ja johdotukset. Venymäliuskojen liimaus työvaiheineen on esitetty liitteen 3 työselosteessa. Vain etuakseleihin liimattiin venymäliuskat vääntömomentin mittaamiseksi.

Jotta etuakselit saatiin kasattua, oli pyörissä käytettävät konelaakerit vaihdettava erilaisiin. Uusissa konelaakereissa sisähalkaisija kasvoi kahdeksasta millimetristä kymmeneen millimetriin. Muutos toi tarvittavan tilan vääntömomentin mittauksen toteuttamiseksi etuakseliin. Uusi laakerityyppi SKF 61900-2Z (10x22x6 mm). Laakerit puristettiin paikalleen kiertokarapuristimen (Holzmann DOP 1000) avulla sekä pyörän valsseihin että kalibrointiholkkeihin. Konelaakerit puristettiin myös ulos kalibrointiholkeista kiertokarapuristimen avulla.

Suunnitteluvaiheessa tunnistettiin haasteet, joita liittyy venymäliuskojen liimaukseen (syvennykset, kaarevat pinnat). Venymäliuskojen liimausta varten suunniteltiin liimauspuristimet, joilla voitiin tuottaa käytettävän liiman vaatima kontaktipaine. Käytettävä liima oli HBM EP310N, joka vaatii paistamisen uunissa. Kontaktipaine käytetylle liimalle on 0,1–0,5 N/mm². Suunnitelluissa liimauspuristimissa voima tuotetaan jousikuormitteisesti. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty suunnitellut venymäliuskapuristimet suksirungolle ja etuakselille.



Kuva 7. Liimauspuristimet venymäliuskoille.

Venymäliuskojen paistamista varten riittävän suuri uuni, johon rullasuksirungot sopivat, lainattiin Oulun yliopiston Mittaustekniikan yksiköstä. Lopuksi venymäliuskat suojattiin silikonikumilla (HBM SG250) mekaaniselta kulumiselta ja ympäristöolosuhteiden vaihtelulta. Lisäsuojaksi suunniteltiin venymäliuskoilla muoviset suojat, jotka suojaavat venymäliuskoja ja niiden johdotuksia suksen yläpuolelta tulevilta kontakteilta. Venymäliuskasuojat 3D-tulostettiin PA12 Grey- materiaalista. 3D-tulosteet tilattiin Materflow Oy:lta.

5. Testaus

Testaus on esitetty liitteessä 4 ”Rullasuksianturikokoonpanojen testausraportti - kesä 2025”. Toteutetut rullasuksianturoinnit testattiin VTT MIKES Kajaanin voima- ja vääntömomenttilaboratoriossa. Pystyvoima testattiin voimanormaali N01:ssä ja vääntömomentti testattiin momenttinormaali MN03:ssa. Testaustilanne on staattinen, kun taas rullasuksien käyttötilanne on dynaaminen.

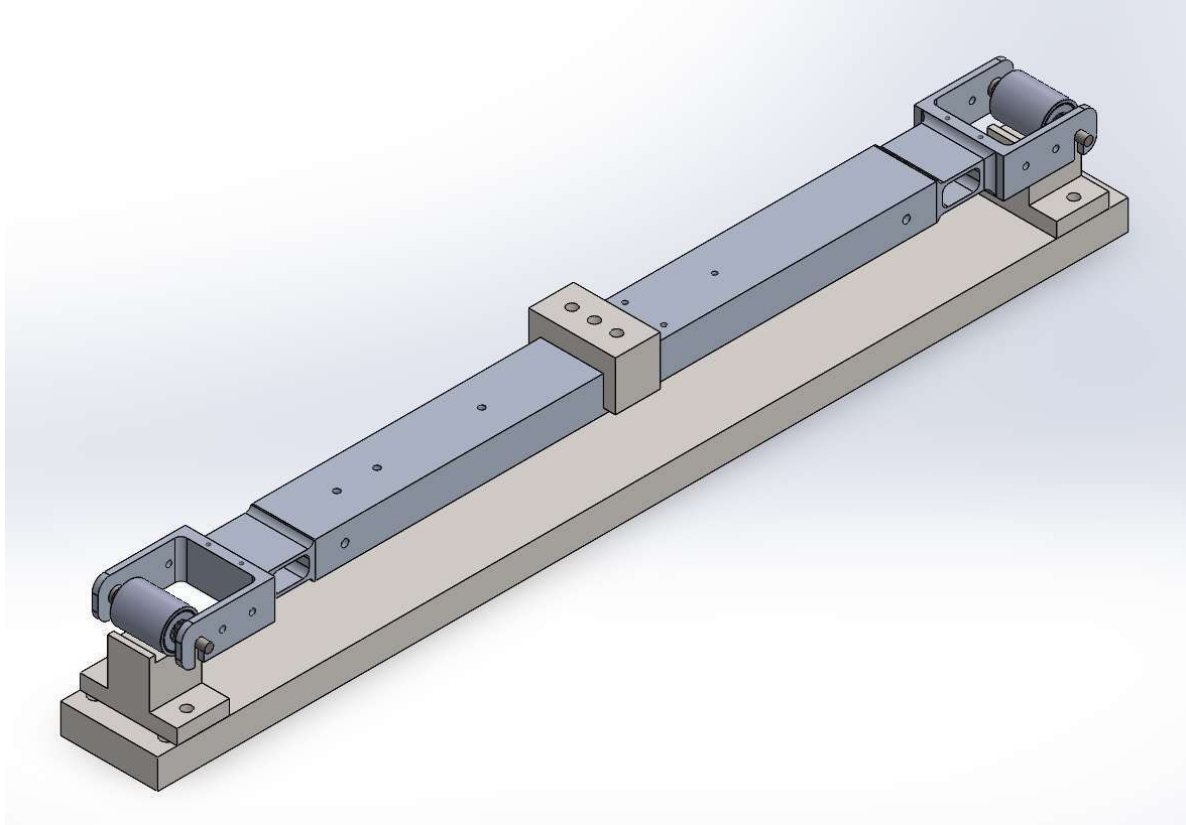
Testauksessa mittausvahvistimena oli Kajaanin ammattikorkeakoulun suunnittelema venymäliuskaesivahvistin (6 ch ver.3.1). Vahvistin on DC-vahvistin, joka mittaussiltan antama syöttöjännite on 1,9 V. Vahvistimen vahvistus on säädetty arvoon 1000. Kyseistä venymäliuskaesivahvistinta käytetään sekä testauksessa että todellisessa käyttötilanteessa. Venymäliuskaesivahvistin on sijoitettu suksen alapinnalle ja on kiinnitetty sukseen siihen suunnitellulla 3D-tulostetulla kiinnikkeellä.

5.1 Kalibrointivasteet

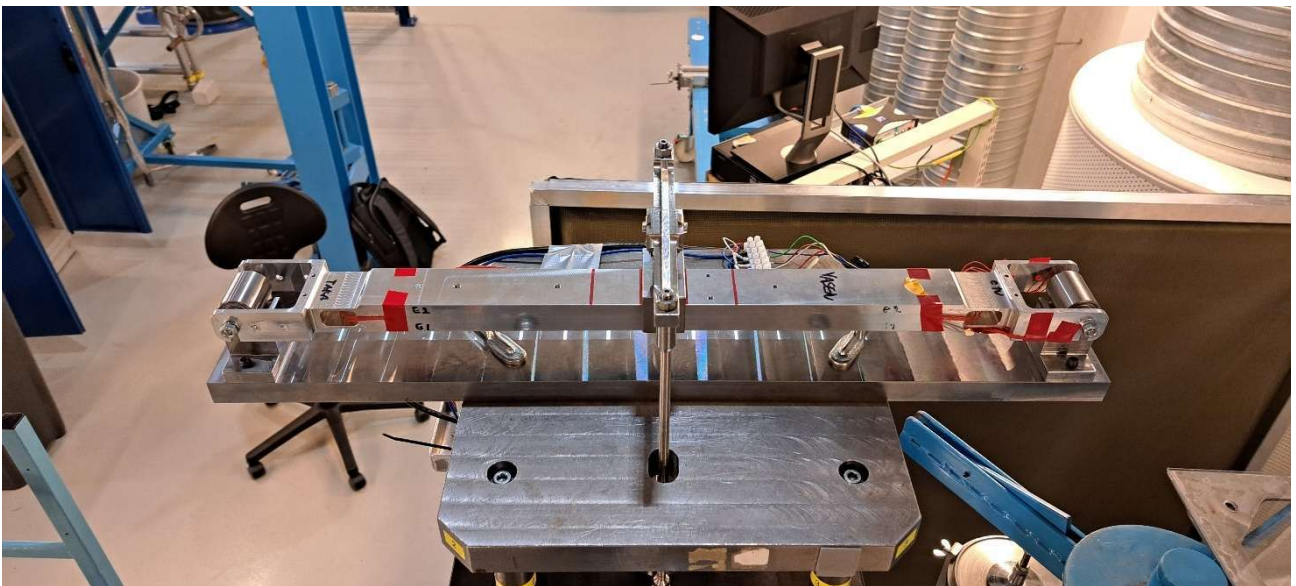
Testausta varten suunniteltiin ja toteutettiin tarvittavat kalibrointivasteet testauksen suorittamiseksi VTT MIKES Kajaanin voima- ja vääntömomenttilaboratorion mittanormaaleissa.

5.1.1 Pystyvoima

Pystyvoiman testauksessa hyödynnettiin vapaan tyylin rullasuksianturille suunniteltua kalibrointikehikkoa. Pystyvoiman kalibrointikehikon 3D-malli esitetty alla olevassa kuvassa 8 ja pystyvoiman kalibrointi voimanormaalissa kuvassa 9.



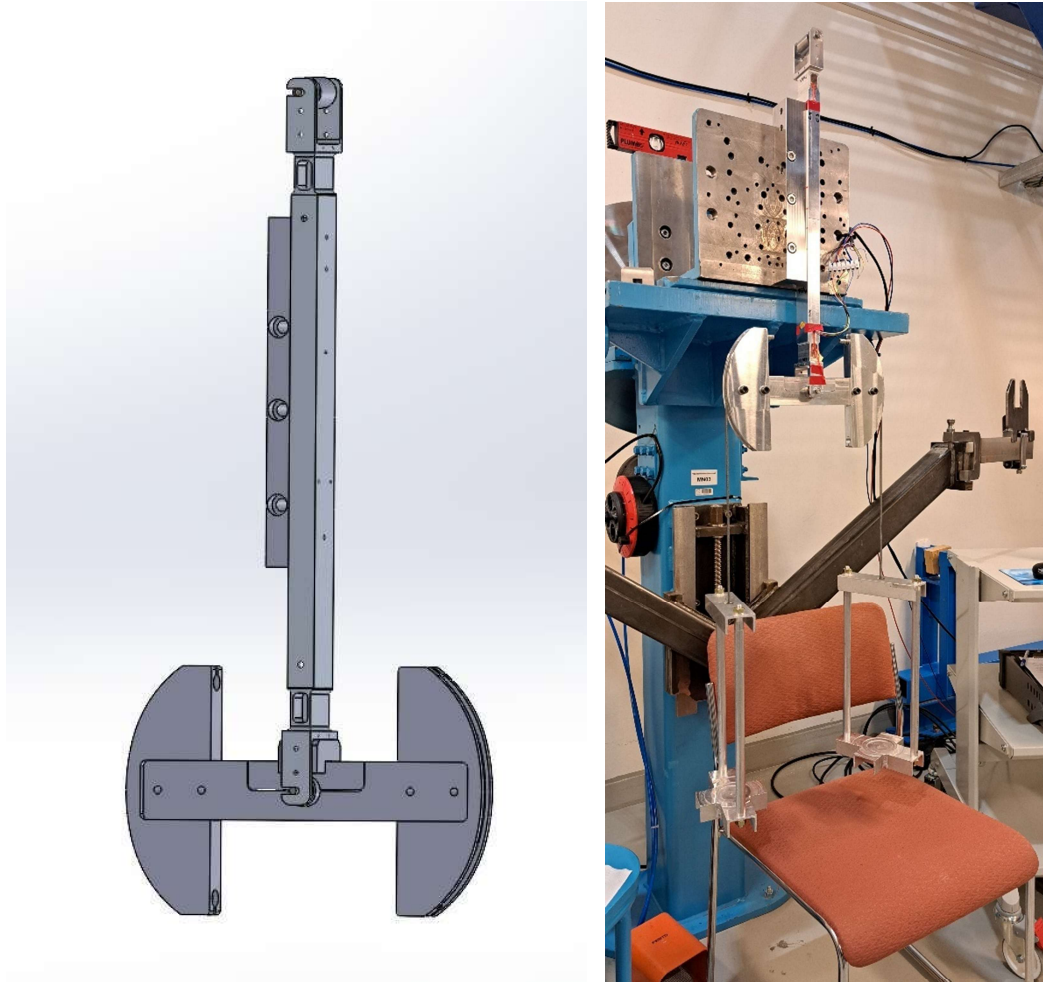
Kuva 8. Pystyvoiman kalibrointiosien kokoonpano.



Kuva 9. Pystyvoiman kalibrointi voimanormaalissa N01.

5.1.2 Momentti

Momentin testausta varten suunniteltiin tarvittavat kalibrointivasteet. Huom! kalibrointiaisalla ei ole jäljitettävyyttä SI-järjestelmään, koska aisan pituutta ei ole kalibroitu. Mittauksissa on käytetty työntömitalla mitattua pituutta. Testausjärjestely esitetty alla olevassa kuvassa 10.



Kuva 10. Momentin kalibrointivasteiden 3D-malli ja momentin testaus momenttinormaalissa MN03.

6. Tulokset

Testauksen tulokset ovat esitetty liitteessä 4 "Rullasuksianturikokoonpanojen testausraportti - kesä 2025". Taulukossa 2 on esitetty rakennetun anturoinnin toteutunut suorituskky. Herkkyyshkertoimet eri mittauskanaville lityvt liitteen 4 testausraportista. Anturin tarkkuus on laskettu suhteuttamalla kunkin voimaaportaan ja sit vstaavan yhdistetyn laajennetun suhteellisen mittausepvvarmuuden tulo, pteearvoon. Tarkkuus on pyristetty ylspain yhden desimaalin tarkkuuteen. Tarkkuuden rajoittaa vasemman suksen pystyvoima.

Taulukko 2. Perinteisen tyylin rullasuksianturin toteutunut suorituskky

Ominaisuus	Yksikk	Arvo
Nimellis pystyvoima F_z	N	1800
Nimellismomentti M_y	Nm	16
Herkkyy F_z	mV/V	1,7
Herkkyy M_y	mV/V	1,7
Tarkkuus	%	$\pm 0,7$
Turvallisen kuormituksen raja ($\%F_{z,nim.}$)	%	120
Paino	g	1460

Mittausepvvarmuudessa pystyvoiman sek momentin osalta ylikuuluvuus dominoi. Alla olevissa taulukoissa 3 ja 4 Taulukko 4 on esitetty, miten yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepvvarmuus jakautuu eri mittausepvvarmuuskomponenttien kesken. Alla olevat taulukot ovat esitetty oikean jalan suksen osalta. Testaustilanteessa vasemman jalan suksen mittausepvvarmuus ei poikkea merkittvsti oikean jalan suksesta.

Taulukko 3. Laajennettu suhteellinen mittausepvvarmuus kullekin mittausepvvarmuuskomponentille, pystyvoima 0,1 kN. Huom! pyristys yhden desimaalin tarkkuuteen.

Mittausepvvarmuuskomponentti	(%) (k=2)
Kalibroitivoima	0,1
Toistettavuus	0,1
Resoluutio	0,4
Ryomint	0,1
Nollapistepalautuvuus	0,1
Hystereesi	0,2
Interpolointi	0,2
Ylikuuluvuus	3,9

Taulukko 4. Laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin mittausepävarmuuskomponentille, momentti 1,6015 Nm. Huom! pyöristys yhden desimaalin tarkkuuteen.

Mittausepävarmuuskomponentti	(%) (k=2)
Kalibrointivoima	0,4
Toistettavuus	0,2
Resoluutio	0,4
Ryömintä	0,1
Nollapistepalautuvuus	0,1
Hystereesi	0,1
Interpolointi	0,8
Ylikuuluvuus	1,9

Mittausepävarmuuslaskelmissa pystyvoiman ja momentin ylikuuluminen on suhteutettu kullekin testatulle kuormitusportaalille, joka edustaa pahinta mahdollista tilannetta. Alla olevissa taulukoissa 5 ja 6 on esitetty oikean jalan suksesta (kuormituskohta 0 mm) mittausepävarmuus, kun ylikuuluvuus on suhteutettu voimaportaalille vs. päätearvoon. Ylikuuluvuus kaupallisissa moniaksaalisissa voimaanturissa (HBM MCS10) on suhteutettu päätearvoon $F_x \rightarrow M_z < 3 \%$ [3].

Taulukko 5. Momentin ylikuuluvuus pystyvoimaan suhteutettuna voimaportaalille vs. päätearvoon

Yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus W (%) (k=2)		
Voima (kN)	Voimaportaalille	Päätearvoon
0,1	4	0,7
0,2	2	0,6
0,3	1,4	0,5
0,4	1,1	0,5
0,5	0,8	0,5
0,6	0,7	0,5
0,7	0,6	0,5
0,8	0,5	0,5
0,9	0,5	0,5
1,0	0,5	0,5

Taulukko 6. Pystyvoiman ylikuuluvuus momenttiin suhteutettuna momenttiportaalle vs. päätearvoon

Yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus W (%) (k=2)		
Momentti (Nm)	Momenttiportaalle	Päätearvoon
1,6015	2,1	1,0
3,2030	1,2	0,8
4,8045	0,9	0,6
6,4060	0,7	0,6
8,0075	0,6	0,5
9,6090	0,6	0,5
11,2105	0,5	0,5
12,8120	0,5	0,5
14,4135	0,5	0,5
16,0150	0,5	0,5

Sivuvoiman ylikuuluvuutta pystyvoimaan sekä momenttiin tutkittiin simuloimalla. Simuloinneissa sivusuuntaan vaikuttava voima oli 400 N. Etu- ja taka-akselille kummallekin simuloitiin 200 N voimakomponentti. Sivuvoiman ylikuuluvuus pystyvoimaan < 0,2 % (< 3,6 N) ja sivuvoiman ylikuuluminen pitkittäisvoimaan < 3 % (< 12 N).

7. Yhteenveto

Hankkeessa onnistuttiin suunnittelemaan ja toteuttamaan vaatimusmäärittelyn mukainen ratkaisu hiihtäjän tuottamien pysty ja pitkittäisvoimien mittaamiseksi perinteisen tyylin rullasuksesta. Testauksen perusteella sekä pysty- että pitkittäisvoiman mittauskanaville saavutettiin hyvä herkkyys ja pieni ylikuuluvuus mittauskanavien välillä.

Anturin luovutettiin käyttöön Jyväskylän yliopiston Vuokatin liikuntateknologian yksikölle 13.6.2025. Luovutuksen yhteydessä tehdyssä hiihtomattotestissä toteutettu rullasuksianturointi sai erinomaista palautetta hiihdeharrastajista.

Lähdeviitteet

- [1] The Technical Staff of Measurements Group, Inc.: Strain Gage Based Transducers: Their Design and Construction
- [2] HBM: The Route to Measurement Transducers: A guide to the use of the HBM K Series foil strain gauges and accessories
- [3] HBM: MCS10 multicomponent sensor datasheet

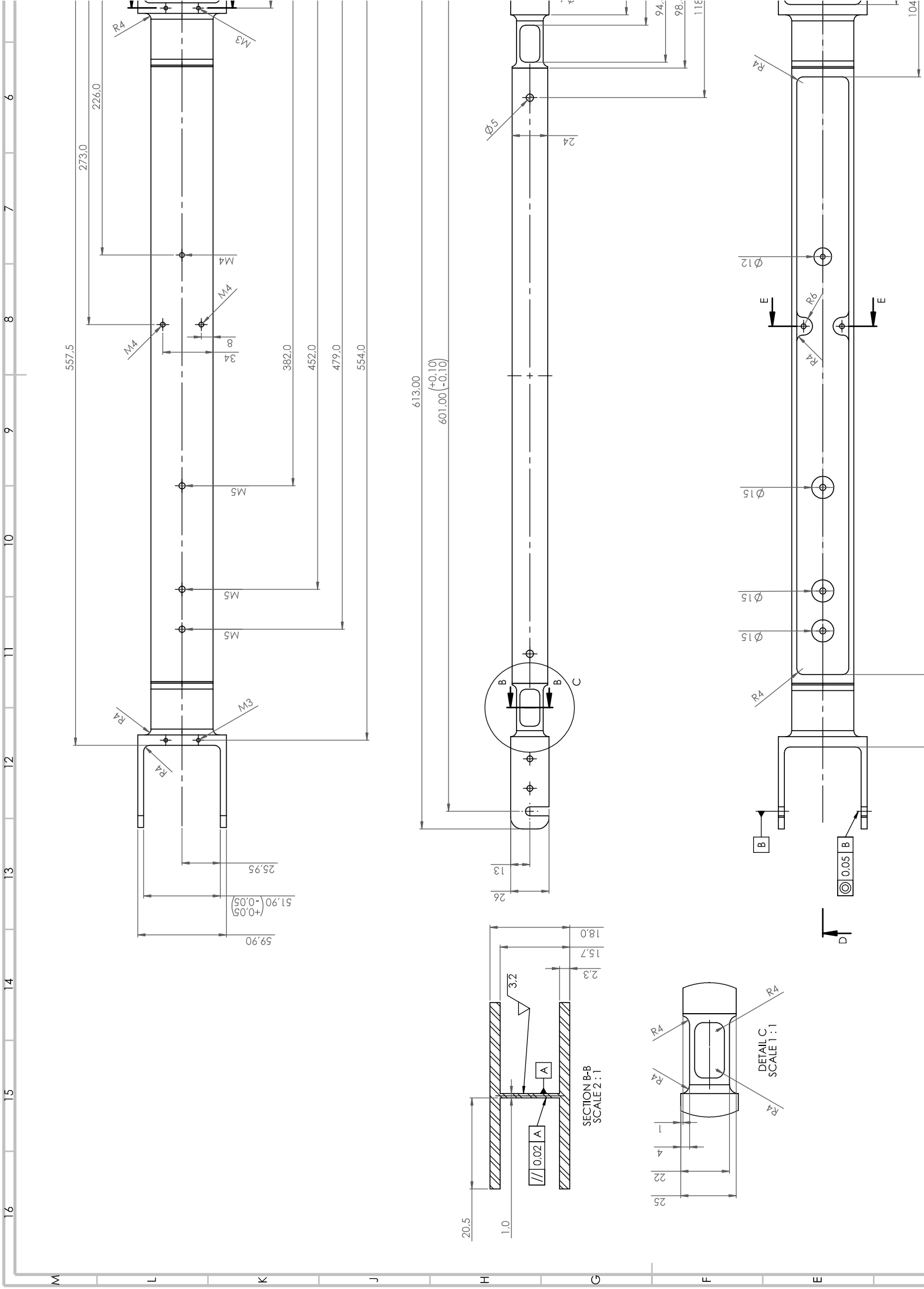
Liitteet

Liite 1. 250001 - Perinteisen tyylin suksianturin runko ver.12.0

Liite 2. 250007 - Vääntömomenttikappale v.7.0

Liite 3. Rullasuksianturit työselostus UDDA

Liite 4. Rullasuksianturikokoonpanojen testausraportti - kesä 2025



Päivämäärä 20.5.2025

Projektin nimi Urheilun data ja digitalisaatio: Uutta osaamista ja lisäarvoa Kainuuseen ja Vuokatin hiihtokeskittymälle		Projektin hankenumero
Projektin kesto (ajanjakso) Toukokuu 2025	Henkilöstö: Kari Kyllönen, VTT MIKES	Projektin nimilyhenne UDDA

Tilaaaja: -

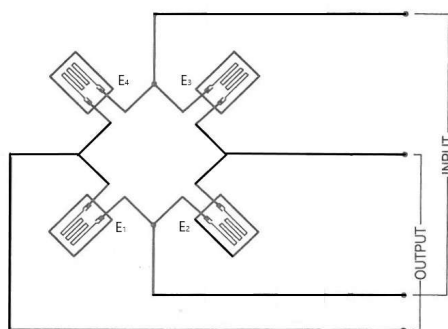
Tilaus: -

Tehtävä: Venymäliuskojen asennus perinteisen tyylin rullasukseen.

Työn suoritus ja materiaalit:

- venymäliuskojen liimaus paikat suksirungossa hiottu lasikuituharjalla
- venymäliuskojen paikat pesty asetonilla
- akselien venymäliuskat kohdistettu paikoilleen lämmönkestävällä teipillä ja rungon luiskat kohdistettu tahmeapintaiseen liimaan
Liuskat: HBM Soldering terminals 2/350 XU11S
- venymäliuskat ja juotostermiinit liimattu paikoilleen.
Liima: HBM hot curing 2-comp. adhesive EP310N
- liuskat kiinnitetty anturiin puristimilla. Puristimen leuoissa kumimatto ja tarttumisen estävä kalvo.
- liiman kuivatus uunissa. Lämmön nousu 18-150 °C keskimäärin 4°C/min (tavoite 2-10°C/min).
Kuivatus 150°C kolme tuntia.
- liuskojen ja juotostermiinit kytkeä.
johdin: HBM **PVC-insulated very flexibel stranded wire 0,04 mm²**. Tuotenumero 1-SLI01
juotospinnat puhdistettu Fluxi kynällä. HBM Tuotenumero1-FS01
- venymäliuskojen suojaus kerros silikonin kumia,
silikonikumi: HBM Silicone covering SG250
- anturit ja vahvistimet kaapeloitu toimiviksi.
kaapeli: HBM **Shielded measurement cable**
kaapeloinnin värit: Ev- / -V musta
Ms- / In- punainen
Ms+ / In+ valkea
Ev+ / +V sininen
- johtimet ja juotospisteet suojattu silikonikumilla HBM Silicone covering SG250

Venymäliuskojen kytkentäkaavio.



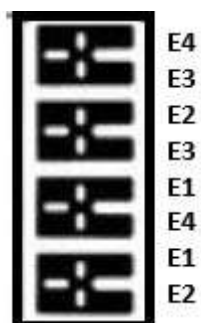
Venymäliuskojen kytkentä piste.

BLUE Excitation voltage +

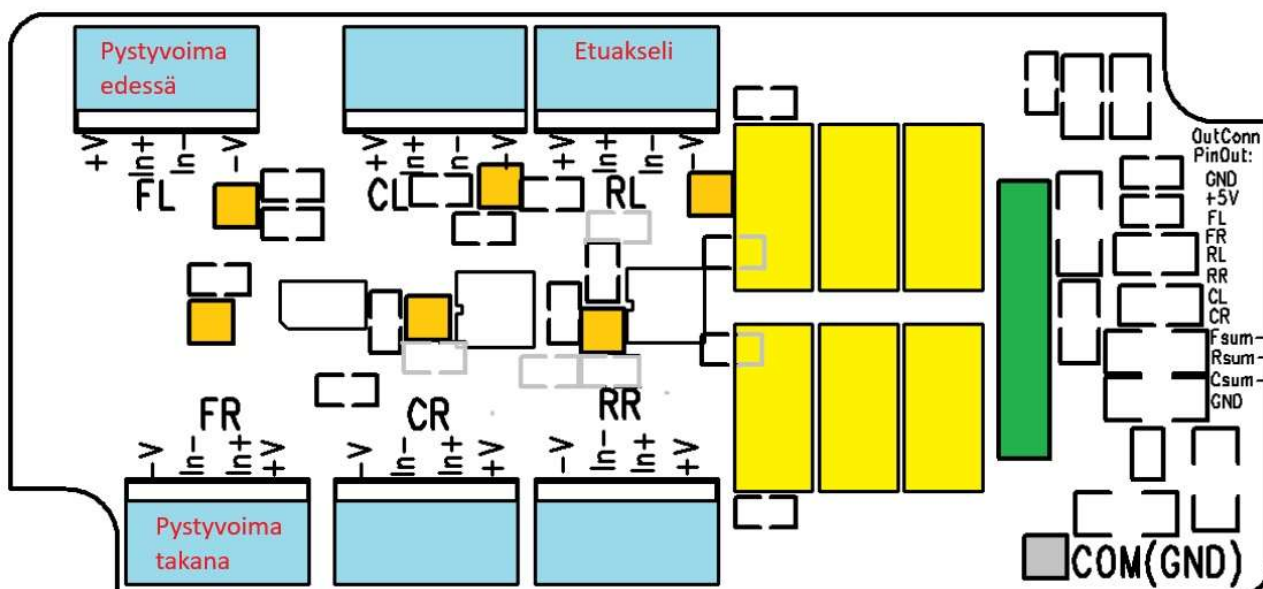
WHITE Measurement signal +

RED Measurement signal -

BLACK Excitation voltage -



Venymäliuskaesivahvistin kytkentä.





Rullasuksianturikokoonpanojen testausraportti – kesä 2025

Kirjoittajat: Jani Korhonen, Timo Kananen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Versiohistoria:

Versio	Päivämäärä	Laatija	Huomio
1.0.0	12.6.2025	Jani Korhonen, Timo Kananen	Testausraportin 1. versio

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	2
1. Johdanto.....	3
2. Testausmenettely	4
2.1 Oikea rullasuksianturikokoonpano	6
2.1.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z).....	6
2.1.2 Voiman paikka pystyvoimalle	7
2.1.3 Yhtälö momentille	8
2.1.4 Pitkittäisvoima momentista (-Y).....	9
2.1.5 Mittausepävarmuus.....	10
2.2 Vasen rullasuksianturikokoonpano	13
2.2.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z).....	13
2.2.2 Voiman paikka pystyvoimalle	14
2.2.3 Yhtälö momentille	15
2.2.4 Pitkittäisvoima momentista (-Y).....	16
2.2.5 Mittausepävarmuus.....	17
Liitteet	20

1. Johdanto

Tämä dokumentti sisältää perinteisen tyylin rullasuksianturikokoonpanojen testausmenettelyn ja testaustulokset.

Rullasuksianturikokoonpanot koostuvat rullasuksirungosta, akseleista, venymäliuskoista ja venymäliuskaesivahvistimesta.

2. Testausmenettely

Rullasuksianturikokoonpanot testattiin pystyvoiman osalta voimanormaali N01:ssä sekä etuakselin momentin osalta momenttinormaali MN03:ssa. Etuakseliin kohdistuneesta momentista johdettiin etupyörän halkaisijan avulla rullasukseen kohdistunut pitkittäisvoima. Rullasuksianturikokoonpanot testattiin pystyvoiman osalta voimilla 0 – 1,0 kN ja momentin osalta momenteilla 0 – 16,015 Nm. Testauksessa käytettiin pystyvoiman osalta 1 kN massasarjaa ja voimaportaana 0,1 kN sekä momentin tuottamiseen käytettiin 100 N massasarjaa ja vipuvartta jonka pituus oli 160,015 mm. Momenttiporras 1,6015 Nm. Venymäliuskaesivahvistinta luettiin Agilentin 34970A digitaalivolttimittarilla. Mittausalue ± 10 VDC lukutarkkuudella 0,0001 VDC. Digitaalivolttimittarilta luettiin kanavat 1-3. Venymäliuskaesivahvistimelle syötettiin käyttöjännite 5 VDC Keithley 2230G-30-1 tasavirtajännitelähteellä. Voimanormaali, sekä Agilentin digitaalivolttimittari ovat jäljitettävissä SI-järjestelmään. Momenttinormaalin osalta mittausepävarmuus on arvio, koska testauksessa käytettyä vipuvarrella ei ole jäljitettävyyttä SI-järjestelmään.

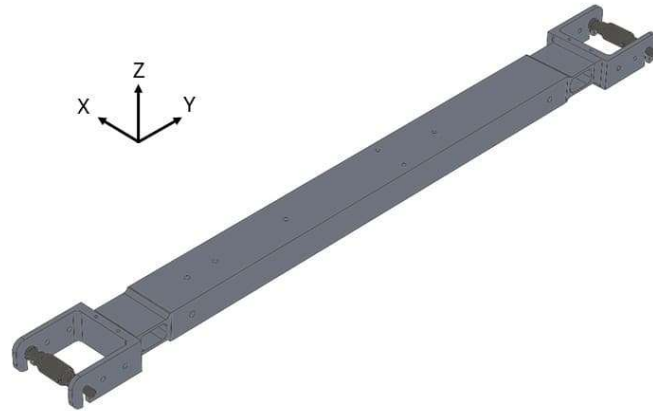
Rullasuksianturikokoonpanojen kuormitusvasteet sekä pystyvoiman että momentin osalta oli mittatilaustyönä valmistettu.

Molemmille rullasuksianturikokoonpanoille suoritettiin kolme eri tyyppistä testiä, molemmille voimanmittausuunnille. Kolme testiä olivat ylöskuormaustesti, signaali-kohinatesti ja ryömintätesti.

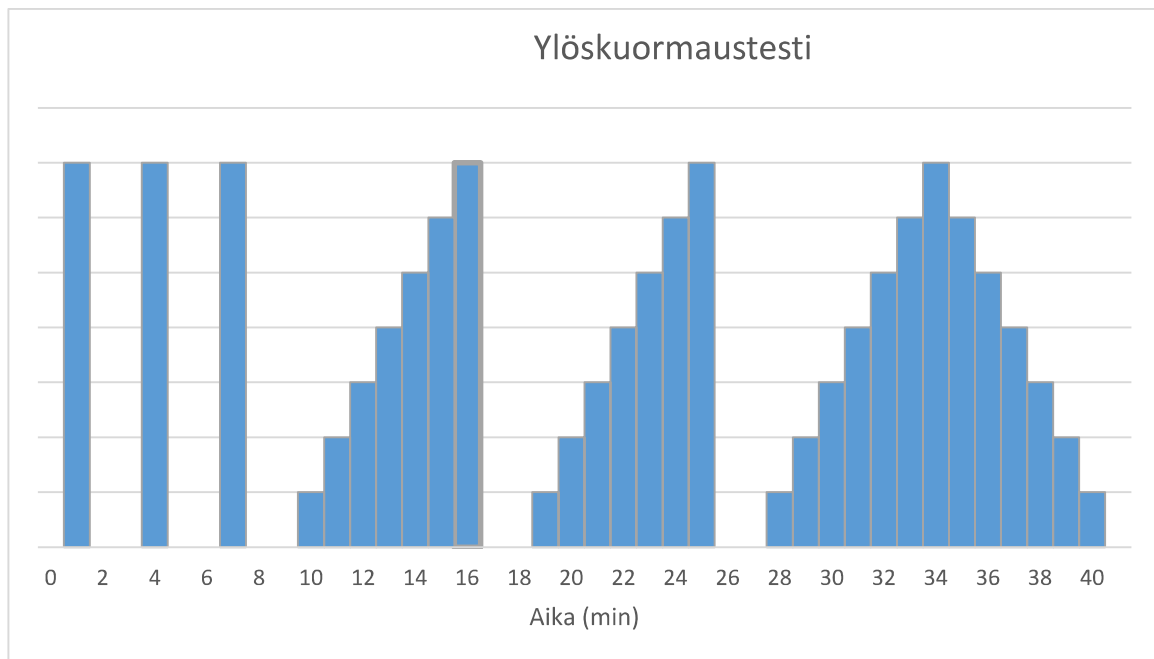
Yksittäinen ylöskuormaustesti koostui 3 esikuormauksesta sekä 3 portaittaisesta ylöskuormauksesta, jossa viimeinen ylöskuormausta sisälsi myös portaittaisen alaskuormauksen. Kuormitus sykli oli 60 sekuntia. Ylöskuormaustesti on esitetty graafisesti kuvassa 2.

Signaali-kohinatestissä molemmat sukset mitattiin ilman kuormaa. Mittausaika 180 sekuntia. Näyteistystaajuus 0,5 Hz.

Ryömintätestissä rullasuksikokoonpanoa kuormitettiin suksen keskeltä (0 mm). Kuormitus sykli 180 sekuntia. Ylöskuormausta suoraan nominaalikuormaan ja alaskuormausta suoraan nollaan. Toistettiin 3 kertaa. Näyteistystaajuus 0,5 Hz. Testeissä mitattiin oikea ja vasen rullasuksianturikokoonpano.



Kuva 1. Mittauskoordinaatisto



Kuva 2. Ylöskuormaustesti.

Kumpaakin rullasuksianturikokoonpanoa (vasen ja oikea suksi) kuormitettiin yhdestä pisteestä suksen pituussuunnassa. Kuormituskohdat mitattiin työntömitan avulla. Suksen pituus mitattuna etupyörän akselin keskeltä takapyörän akselin keskelle oli 589 mm. Liitteessä 1 on esitetty teoreettiset pystysuuntaiset kuormitusvoimat yksittäisille antureille eri kuormitustilanteissa.

Oikea ja vasen suksi testattiin erikseen. Testaajana Timo Kananen.

Testaustulokset

2.1 Oikea rullasuksianturikokoonpano

2.1.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z)

$$F_{SUM} = F_{FL} + F_{FR}$$

F_{SUM} = summavoima [kN]

F_{FL} = kanavan FL voima [kN], etuakseli

F_{FR} = kanavan FR voima [kN], taka-akseli

Yksittäisen kanavan voima

$$F_i = a_i * U_i$$

F_i = kanavan i voima [kN]

a_i = lineaarisen mallin kanavalle i määrittämä herkkyyskerroin [kN/V]

U_i = kanavan i jännite [V]

Herkkyyskertoimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Lineaarisen mallin lisäksi on kokeiltu toisen ja kolmannen asteen malleja. Virheet eivät pienene merkittävästi. Eri kanaville määritellyt herkkyyskertoimet pystyvoiman osalta ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri kanavien herkkyyskertoimet pystyvoiman osalta oikeassa rullasuksianturikokoonpanossa

Kanava	Herkkyyskerroin [kN/V]
FL	-0,2851555521
FR	-0,2948732142

2.1.2 Voiman paikka pystyvoimalle

$$Y_{FSUM} = \frac{\sum(a_i * U_i * Y_i)}{\sum(a_i * U_i)}$$

Y_{FSUM} = voiman y-koordinaatti [mm]

a_i = lineaarisen mallin kanavalle i määrittämä herkkyyskerroin [kN/V]

U_i = kanavan i jännite [V]

Y_i = kanavan i anturin y-koordinaatti [mm]

Huom! Koordinaatiston origo on määritetty suksen keskelle. Koordinaatiston origo voidaan valita vapaasti, tällöin kanavien sijainnit origoon nähden muuttuvat vastaavasti.

Taulukko 2. Kanavan anturien sijainnit tasokoordinaatistossa (Origo suksen keskellä)

Kanava	Y-koordinaatti [mm]
FL	294,5
FR	-294,5

Huom! Pystyvoiman osalta yksittäisten kanavien tuloksia tulisi käyttää vain voiman paikan laskentaan.

2.1.3 Yhtälö momentille

$$M_{RL} = a_{RL} * U_{RL}$$

M_{RL} = kanavan RL momentti [Nm]

a_{RL} = lineaarisen mallin kanavalle RL määrittämä herkkyyskerroin [Nm/V]

U_{RL} = kanavan RL jännite [V]

Herkkyyskertoimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Lineriaarisen mallin lisäksi on kokeiltu toisen ja kolmannen asteen malleja. Virheet eivät pienene merkittävästi. Kanavalle RL määritetty herkkyyskerroin on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kanavan RL herkkyyskerroin oikeassa rullasuksianturikokoonpanossa

Kanava	Herkkyyskerroin [Nm/V]
RL	-4,8751755127

2.1.4 Pitkittäisvoima momentista (-Y)

$$F_{RL} = M_{RL}/(d/2)$$

F_{RL} = Kanavan RL voima [N]

M_{RL} = Kanavan RL momentti [Nm]

d = etupyörän halkaisija [m]

2.1.5 Mittausepävarmuus

Testausmenettelelyyn liittyvä mittausepävarmuustarkastelu sisältää kahdeksan komponenttia.

- kalibrintivoima
- toistettavuus
- näyttölaitteen resoluutio
- mittalaitteen ryömintä
- nollapisteen huojuunta
- hystereesi
- interpolointivirhe
- ylikuuluvuus

Huom! Epävarmuuslaskelmat pitävät paikkansa pystyvoiman osalta summavoimille testitilanteen tapauksessa. Epävarmuuskomponenteista ylikuuluvuus dominoi pystyvoiman sekä momentin osalta, kuten alla olevista taulukoista 4 ja 5 voidaan nähdä.

Taulukko 4. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

Pystyvoima	Oikea suksi	
Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Maksimi (%)	4	0,5
Minimi (%)	0,5	0,1

Taulukko 5. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

Momentti	Oikea suksi	
Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Maksimi (%)	2,1	1
Minimi (%)	0,5	0,5

Seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 6 on esitetty pystyvoimalle suhteellinen lasketun voiman virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus. Taulukossa 7 on esitetty momentille suhteellinen lasketun momentin virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus.

Taulukko 6. Pystyvoiman suhteellinen lasketun voiman virhe ja pystyvoiman yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusvoimalle. Kuormitussuunta -Z

Voima (kN)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
0,1	-0,08	4
0,2	-0,09	2,0
0,3	-0,04	1,4
0,4	0,00	1,1
0,5	-0,03	0,8
0,6	0,04	0,7
0,7	-0,02	0,6
0,8	0,01	0,5
0,9	-0,01	0,5
1,0	0,01	0,5

Taulukko 7. Momentin suhteellinen lasketun momentin virhe ja momentin yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusmomentille.

Momentti (Nm)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
1,6015	-0,37	2,1
3,2030	-0,26	1,2
4,8045	-0,16	0,9
6,4060	-0,12	0,7
8,0075	-0,07	0,6
9,6090	-0,02	0,6
11,2105	0,00	0,5
12,8120	0,02	0,5
14,4135	0,01	0,5
16,0150	0,05	0,5

2.2 Vasen rullasuksianturikokoonpano

2.2.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z)

$$F_{SUM} = F_{FL} + F_{FR}$$

F_{SUM} = summavoima [kN]

F_{FL} = kanavan FL voima [kN], etuakseli

F_{FR} = kanavan FR voima [kN], taka-akseli

Yksittäisen kanavan voima

$$F_i = a_i * U_i$$

F_i = kanavan i voima [kN]

a_i = lineaarisen mallin kanavalle i määrittämä herkkyyskerroin [kN/V]

U_i = kanavan i jännite [V]

Herkkyyskertoimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Lineriaarisen mallin lisäksi on kokeiltu toisen ja kolmannen asteen malleja. Virheet eivät pienene merkittävästi. Eri kanaville määritellyt herkkyyskertoimet pystyvoiman osalta ovat esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Eri kanavien herkkyyskertoimet pystyvoiman osalta vasemmassa rullasuksianturikokoonpanossa

Kanava	Herkkyyskerroin [kN/V]
FL	-0,2843777017
FR	-0,2851690452

2.2.2 Voiman paikka pystyvoimalle

$$Y_{FSUM} = \frac{\sum(a_i * U_i * Y_i)}{\sum(a_i * U_i)}$$

Y_{FSUM} = voiman y-koordinaatti [mm]

a_i = lineaarisen mallin kanavalle i määrittämä herkkyyskerroin [kN/V]

U_i = kanavan i jännite [V]

Y_i = kanavan i anturin y-koordinaatti [mm]

Huom! Koordinaatiston origo on määritetty suksen keskelle. Koordinaatiston origo voidaan valita vapaasti, tällöin kanavien sijainnit origoon nähden muuttuvat vastaavasti.

Taulukko 9. Kanavan anturien sijainnit tasokoordinaatistossa (Origo suksen keskellä)

Kanava	Y-koordinaatti [mm]
FL	294,5
FR	-294,5

Huom! Pystyvoiman osalta yksittäisten kanavien tuloksia tulisi käyttää vain voiman paikan laskentaan.

2.2.3 Yhtälö momentille

$$M_{RL} = a_{RL} * U_{RL}$$

M_{RL} = kanavan RL momentti [Nm]

a_{RL} = lineaarisen mallin kanavalle RL määrittämä herkkyyskerroin [Nm/V]

U_{RL} = kanavan RL jännite [V]

Herkkyyskertoimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Lineriaarisen mallin lisäksi on kokeiltu toisen ja kolmannen asteen malleja. Virheet eivät pienene merkittävästi. Kanavalle RL määritetty herkkyyskerroin on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Kanavan RL herkkyyskerroin vasemmassa rullasuksianturikokoonpanossa

Kanava	Herkkyyskerroin [Nm/V]
RL	-4,8424790396

2.2.4 Pitkittäisvoima momentista (-Y)

$$F_{RL} = M_{RL}/(d/2)$$

F_{RL} = Kanavan RL voima [N]

M_{RL} = Kanavan RL momentti [Nm]

d = etupyörän halkaisija [m]

2.2.5 Mittausepävarmuus

Testausmenettelelyyn liittyvä mittausepävarmuustarkastelu sisältää kahdeksan komponenttia.

- kalibrointivoima
- toistettavuus
- näyttölaitteen resoluutio
- mittalaitteen ryömintä
- nollapisteen huojunta
- hystereesi
- interpolointivirhe
- ylikuuluvuus

Huom! Epävarmuuslaskelmat pitävät paikkansa summavoimille pystyvoiman osalta testitilanteen tapauksessa. Epävarmuuskomponenteista ylikuuluvuus dominoi pystyvoiman osalta sekä momentin osalta, kuten alla olevista taulukoista 11 ja 12 voidaan nähdä.

Taulukko 11. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

Pystyvoima	Vasen suksi	
Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Maksimi (%)	6,5	0,6
Minimi (%)	0,7	0,1

Taulukko 12. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

Momentti	Vasen suksi	
Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Maksimi (%)	1,8	1,1
Minimi (%)	0,5	0,5

Seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 13 on esitetty pystyvoimalle suhteellinen lasketun voiman virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus. Taulukossa 14 on esitetty momentille suhteellinen lasketun momentin virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus.

Taulukko 13. Pystyvoiman suhteellinen lasketun voiman virhe ja pystyvoiman yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusvoimalle. Kuormitussuunta -Z

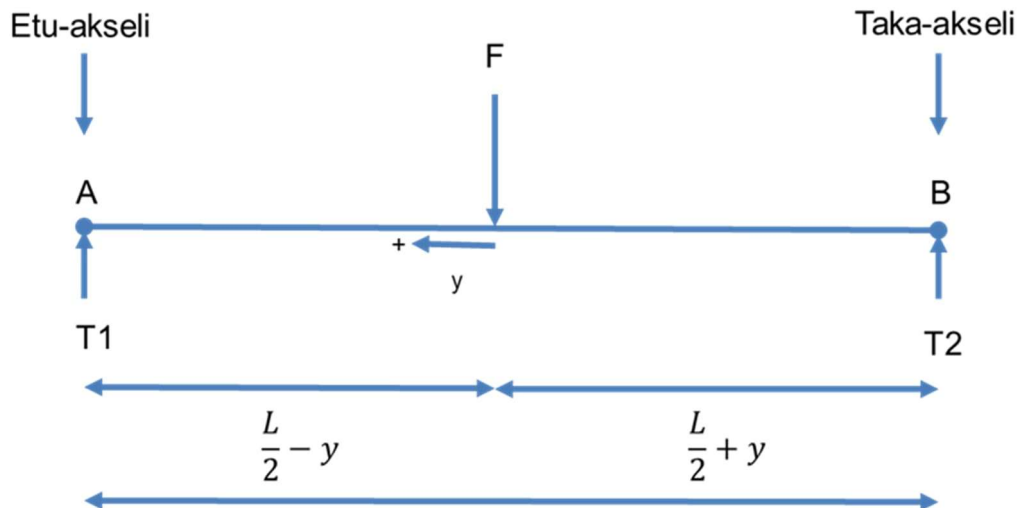
Voima (kN)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
0,1	-0,07	6,5
0,2	-0,03	3,3
0,3	-0,01	2,2
0,4	-0,02	1,7
0,5	0,01	1,4
0,6	-0,01	1,1
0,7	0,01	1,0
0,8	0,01	0,9
0,9	-0,01	0,8
1,0	0,01	0,7

Taulukko 14. Momentin suhteellinen lasketun momentin virhe ja momentin yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusmomentille.

Momentti (Nm)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
1,6015	0,14	1,8
3,2030	0,08	1,1
4,8045	0,05	0,8
6,4060	0,04	0,7
8,0075	0,02	0,6
9,6090	0,01	0,6
11,2105	0,00	0,5
12,8120	-0,01	0,5
14,4135	-0,03	0,5
16,0150	0,00	0,5

Liitteet

Liite.1. Teoreettiset kuormitusvoimat yksittäisille antureille eri kuormitustilanteissa



$$F - T_1 - T_2 = 0 \quad (1)$$

$$T_1 = F - \left(\frac{F \times \left(\frac{L}{2} - y \right)}{L} \right)$$

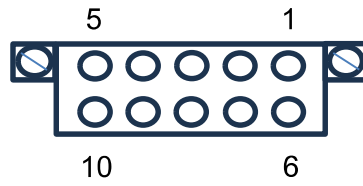
$$M_A = F \times \left(\frac{L}{2} - y \right) - (T_2 \times L) = 0 \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{F \times \left(\frac{L}{2} - y \right)}{L}$$

Taulukko 15. Teoreettiset pystyvoimat

F_{tot}	L	y	F_{front}	F_{rear}
kN	mm	mm	kN	kN
0,00	589	0	0,00	0,00
0,10	589	0	0,05	0,05
0,20	589	0	0,10	0,10
0,30	589	0	0,15	0,15
0,40	589	0	0,20	0,20
0,50	589	0	0,25	0,25
0,60	589	0	0,30	0,30
0,70	589	0	0,35	0,35
0,80	589	0	0,40	0,40
0,90	589	0	0,45	0,45
1,00	589	0	0,50	0,50

Liite.2. Johdin kytkennät



Kuva 3. Molex-liitin.

Taulukko 16. Kanavat

Liitin pinni	Johdin	Kanava	Kuvaus
1	Punainen	+5V	Käyttöjännite
2	Ruskea	FR	Pystyvoima taka-akseli
3			
4			
5			
6	Sininen	GND	Maataso
7	Valkoinen	FL	Pystyvoima etuakseli
8			
9	Vihreä	RL	Etuakselin momentti
10	Sininen	GND	Maataso