

TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-R-00186-26



Tutkimusraportti: JÄTTI

Kirjoittaja: Timo Kananen

Luottamuksellisuus: VTT Public

Versio: 1.6.2026

Raportin nimi Tutkimusraportti: JÄTTI	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite
Projektin nimi Jääkiekkoteknologian tutkimus-, kehitys ja innovaatioympäristö	Projektin numero/lyhytnimi JÄTTI
Raportin laatija(t) Timo Kananen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 18/29
Avainsanat Voimanmittauslaite, kaukalopikaluistelu, venymäliuska, short-track	Raportin numero VTT-R-00186-26
Tiivistelmä Raportissa kuvataan EAKR-rahoitteisen JÄTTI-hankkeen (Jääkiekkoteknologian tutkimus-, kehitys ja innovaatioympäristö) työpaketti 4:n toteutusta. Raportissa keskitytään kaukalopikaluistelun (short-track) voimanmittausanturoinnin suunnitteluun, toteutukseen ja testaukseen. Anturointi perustuu venymäliuskoihin, joilla mitataan luistelijan tuottamat pysty- ja sivusuuntaiset voimat aidossa käyttöolosuhteessa jäähallissa. Suunnittelussa hyödynnettiin 3D-mallinnusta ja FEM-simulointeja. Pystyvoima mitataan teräripustukseen syntyvästä leikkausvoimasta ja sivuvoima teräripustukseen 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 ja pilotoitiin hankkeen aikana Vuokatissa kahteen otteeseen joulukuussa 2025 ja tammikuussa 2026.	
Luottamuksellisuus	VTT Public
Kajaanissa 1.6.2026 Laatija Timo Kananen, Tutkija Tarkastaja 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:

2.6.2026

Allekirjoitus:

Högström
Richard
912901706

Digitally signed by Högström Richard
912901706
DN: cn=Högström Richard 912901706,
c=FI, o=Teknologian tutkimuskeskus
VTT
Reason: I am approving this document
Date: 2026.06.02 12:13:45 +03'00'

Nimi:

Richard Högström

Asema:

Research Team Leader

Sisällysluettelo

1. Johdanto	4
2. Vaatimusmäärittely	4
3. Suunnittelu	4
3.1 Voimanmittaus	4
3.1.1 Pystyvoima	5
3.1.2 Sivuvoima	7
3.2 Luisteltavuus	9
4. Toteutus	9
5. Testaus	10
5.1 Kalibrointivasteet	11
5.1.1 Pystyvoima	11
5.1.2 Sivuvoima	12
6. Tulokset	13
7. Yhteenveto	16
Lähdeviitteet	17
Liitteet	18

1. Johdanto

Tutkimusraportissa esitetty työ toteutettiin EAKR-rahoitteisessa hankkeessa ”Jääkiekkoteknologian tutkimus-, kehitys ja innovaatioympäristö” (JÄTTI). Diaarinumero EURA 2021/403801/09 02 01 01/2024/Kainuu. JÄTTI-hankkeeseen osallistuivat VTT:n lisäksi koordinaattorina toiminut Jyväskylän Yliopisto ja Kajaanin ammattikorkeakoulu Oy.

VTT:n työ keskittyi hankesuunnitelman työpakettiin 4: ”Luistelun biomekaanisten analyyysien kehittäminen”. Tutkimusraportti kuvaa työpaketissa suunnitellun, toteutetun, testatun ja pilotoidun kaukalopikaluistimen voimanmittausanturoinnin. Anturointi on venymäliuskapohjainen voimanmittauslaite, jolla voidaan mitata kaukalopikaluistelijan tuottamat pysty- ja sivusuuntaiset voimat todellisissa käyttöolosuhteissa.

2. Vaatimusmäärittely

Toteutettavan anturoinnin tuli mitata luistelijan tuottamat pysty- ja sivusuuntaiset voimat. Nimellisvoimana pystysuuntaan 1600 N sekä sivusuuntaan 400 N per teräripustus. Pysty- ja sivusuuntaisten voimien mittaus toteutettiin sekä etu- että takaripustukseen, tällöin voidaan tasapainopiste määrittää. Suunnittelun pohjaksi Jyväskylän yliopisto lainasi Evo Futuro terällä varustettuja kaukalopikaluistimia.

3. Suunnittelu

3.1 Voimanmittaus

Voimanmittauslaite perustuu venymäliuskoihin. Kun rakenne kokee sisäisen muodonmuutoksen (venymä, puristuma) vaikuttavan kuormituksen takia, muuttuu rakenteeseen liimatun venymäliuskan resistanssi. Hyvin pieni resistanssin muutos voidaan mitata hyödyntäen Wheatstone-siltakytkentää. Mittauskanavien siltakytkennät ovat toteutettu täyssiltoina, jolloin saavutetaan hyvä herkkyys ja pieni lämpötilariippuvuus. Alla on esitetty yhtälö, jonka täyssiltakytkentä 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 venymäliuskerroin, 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.



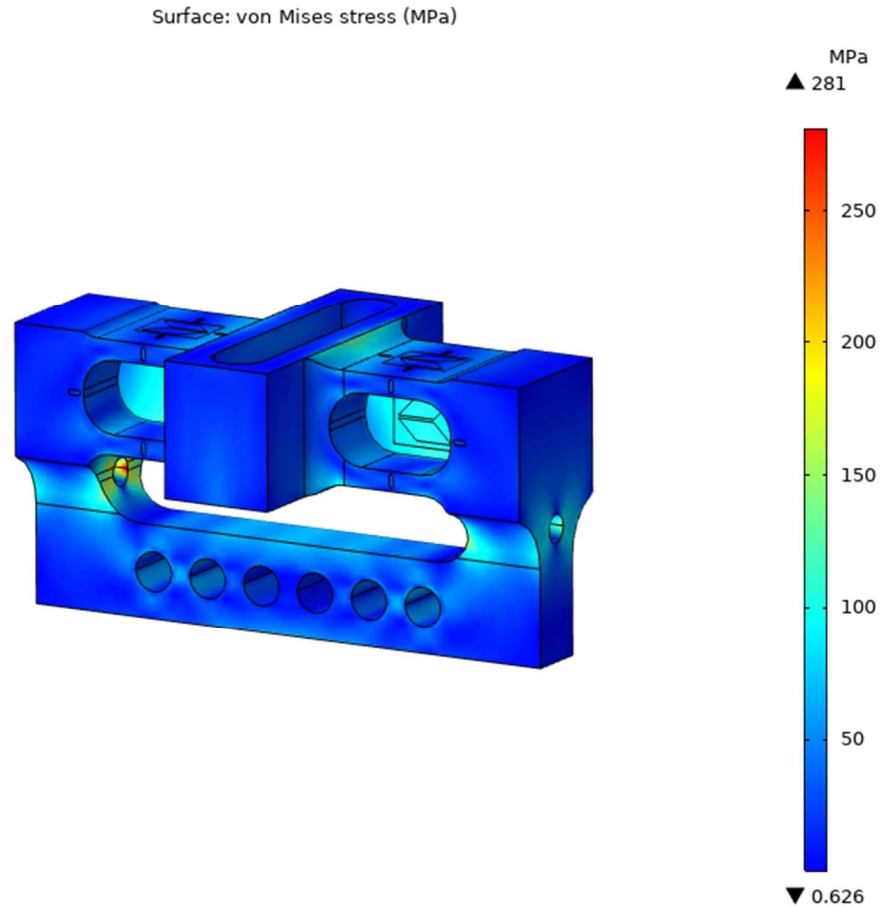
Kuva 1. FEM-simulointien iteraatioprosessi.

Useiden suunnitteluvaiheiden jälkeen päädyttiin ratkaisuun, jossa luistelijan tuottama pystyvoima mitataan teräripustukseen syntyvästä leikkausvoimasta ja sivuvoima mitataan epäsuorasti teräripustukseen kohdistuvasta momentista. Kun voiman varsi on tunnettu, voidaan momentista johtaa luistelijan tuottama sivuvoima.

Suunnitelluille rakenteille mitoitettiin varmuuskertoimeksi vähintään 1,6. Turvallisen kuormituksen rajaksi määriteltiin 110 % sivusuunnan nimellisvoimasta.

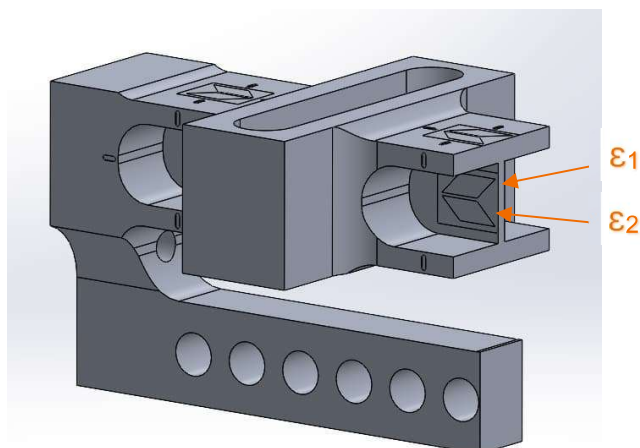
3.1.1 Pystyvoima

Teräripustusrakenteen 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 toteutetun teräripustuksen jännitystarkastelu.



Kuva 2. Eturipustuksen jännitystarkastelu pystyvoiman osalta.

Hankkeessa toteutetut teräripustukset mittaavat luistelijan tuottaman pystyvoiman teräripustukseen kohdistuvan leikkausvoiman avulla. Leikkausvoima mitataan etu- ja takaripustuksesta kirjallisuudessa yleisesti tunnetulla leikkausvoimaa mittaavalla joustoelementtirakenteella [2]. Teräripustuksessa käytetty rakenne on esitetty tarkemmin alla olevassa kuvassa 3. Mitattaessa pystyvoimaa etu- ja takateräripustuksesta, voidaan pystyvoiman tasapainopiste määrittää luistimen terän pituussuunnassa.



Kuva 3. Pystyvoimaa mittaavan joustoelementtirakenteen poikkileikkaus.

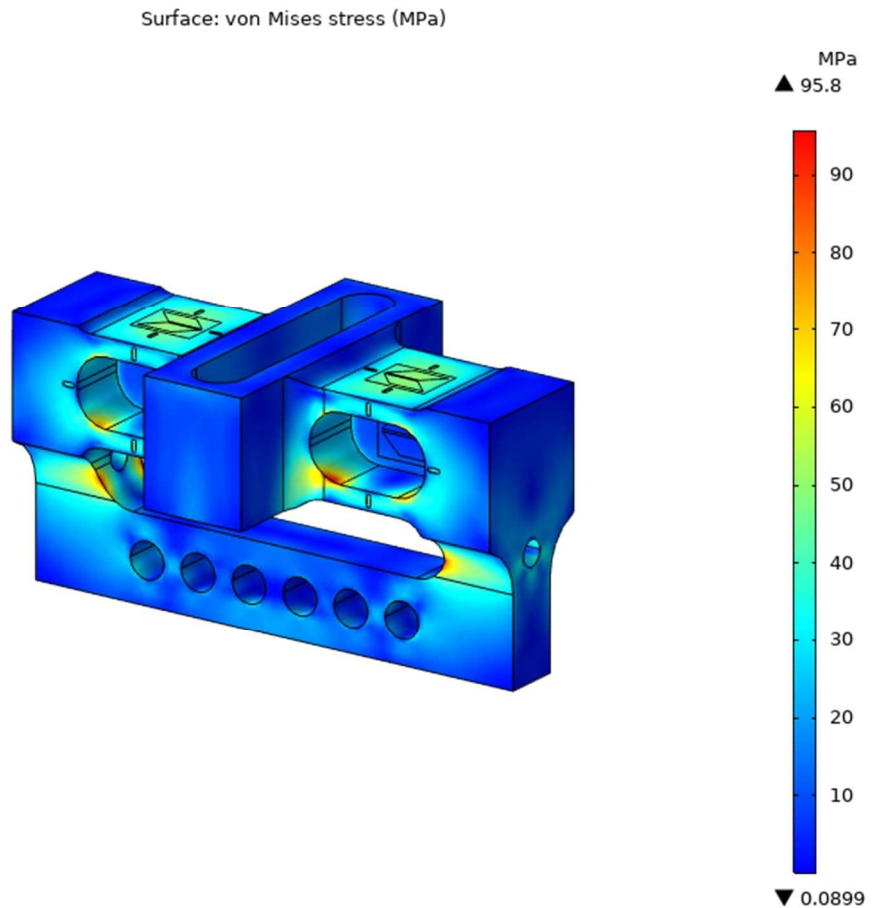
Pystyvoiman aiheuttama leikkausvoima mitataan kuvassa 3 esiintyvän teräripustusrakenteen poikkileikkauksen ohuesta pystyseinämästä. Kuvassa 3 venymäliuska ε_1 mittaa rakenteeseen muodostuvaa venymää ja venymäliuska ε_2 mittaa rakenteeseen syntyvää puristumaa. Venymäliuska ovat sijoitettu vastaavasti pystyseinämän toiselle puolelle teräripustuksen toiseen päähän, jossa ε_1 vastaa ε_3 ja ε_2 vastaa ε_4 . Venymäliuskojen paikoitus on identtinen etu- ja takateräripustuksessa. Rakenteen tarkemmat mitoitukset ovat esitetty liitteissä 1 ja 2.

3.1.2 Sivuvoima

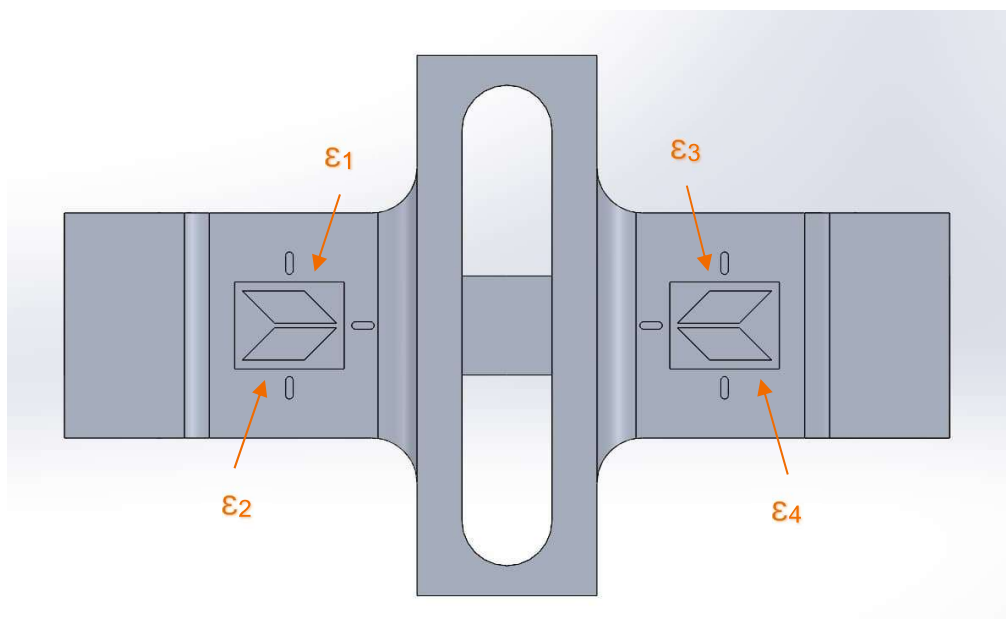
Sivuvoima mitataan epäsuorasti teräripustukseen aiheutuvan momentin kautta. Teräripustuksen mallina käytetyssä Evo Futuro terän teräripustuksessa teräripustuksen dimensioista määräytyy momentin varren pituus. Suunniteltujen teräripustuksen voiman varret, kun teräripustuksiin on kiinnitetty Evo Futuro terä ovat eturipustuksen osalta 68,3 mm ja takaripustuksen osalta 76,3 mm. Momentti muodostuu yhtälön 2 mukaisesti.

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

missä M on vääntömomentti, F on kuormittava voima ja r on voiman varsi. Alla olevassa kuvassa 4 on esitetty toteutetun eturipustuksen jännitystarkastelu sivuvoiman osalta.



Kuva 4. Eturipustuksen jännitystarkastelu sivuvoiman osalta.



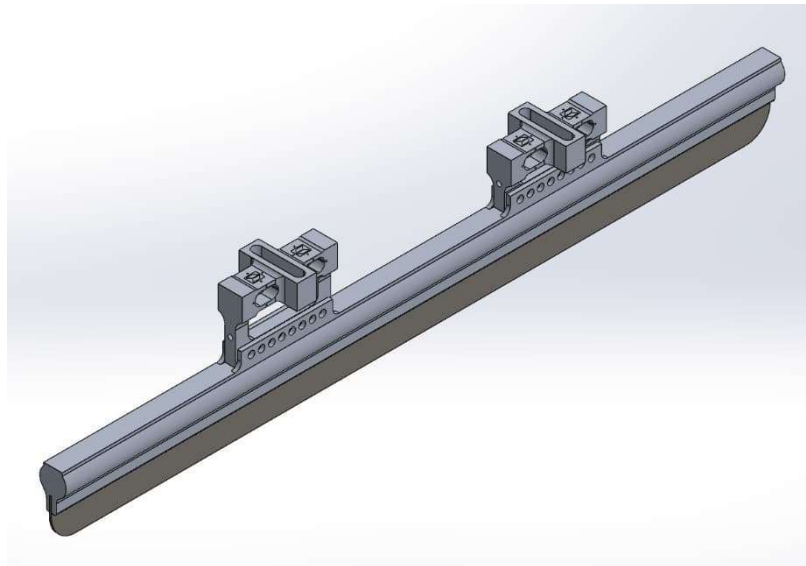
Kuva 5. Etuakseli ja venymäliuskat 3D-mallissa.

3.2 Luisteltavuus

Eräs vaatimusmäärittelyn suunnittelukriteeri oli saavuttaa hyvä luisteltavuus toteutettavalle anturoinnille. Suunnittelun lähtökohtana käytettiin Evo Futuro (Valmistaja Evo malli Futuro) kaukalopikaluistin terää ja siihen liittyviä teräripustuksia. Alla olevassa taulukossa 1 on vertailtu mallina käytetyn Evo Futuro teräripustuksen ja hankkeessa toteutettujen teräripustusten rakennetta. Teräripustusten paino ei sisällä käytettyä venymäliuskaesivahvistinta, kaapelointia ja venymäliuskoja. Kuvassa 6 on esitetty suunnitellut teräripustukset ja Evo Futuro terä.

Taulukko 1. Vertailu toteutettujen teräripustusten ja Evo Futuro teräripustusten välillä

Ominaisuus	Teräripustus	Evo Futuro
Eturipustus - Paino (g)	39,5	34,0
Eturipustus - Korkeus (mm)	31,2	31,0
Takaripustus – Paino (g)	42,8	38,0
Takaripustus – Korkeus (mm)	41,0	41,0



Kuva 6. Suunnitellut teräripustukset ja Evo Futuro terä.

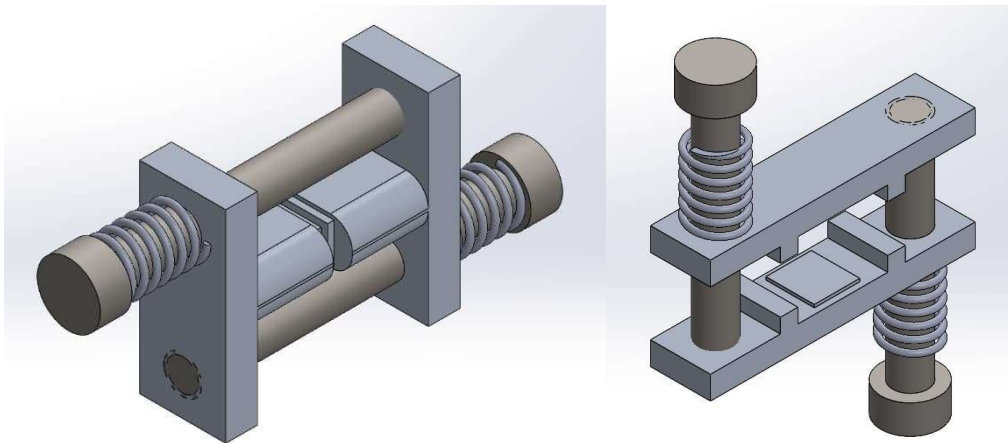
4. Toteutus

FEM-simulointien perusteella laadittiin etu- ja takaripustuksista mittakuvat. Teräripustukset valmistettiin alumiiniseoksesta (7075). Alumiiniseoksen myötölujuus on 500 MPa.

Luistelijan tuottaman pystyvoiman teräripustukseen aiheuttama leikkausvoima sekä luistelijan tuottaman sivuvoiman aiheuttama momentti, mitataan samaa venymäliuskamallia hyödyntäen (HBM 1-XU11S2/350_W). Käytetyn venymäliuskan lämpötilakerroin on täsmätty teräkselle, mutta koska

käytetään mittaussiltana täyssiltakytkentää, voidaan lämpötilan vaikutusta mittaukseen pitää tässä tapauksessa merkityksettömänä. Koneistuksen yhteydessä teräripustuksiin tehtiin koneistamalla kohdistusmerkit venymäliuskojen paikoitusta varten. Kun osat olivat koneistettu, suoritettiin tarvittavat venymäliuskojen liimaukset, uunitukset ja johdotukset. Venymäliuskojen liimaus työvaiheineen on esitetty liitteen 3 työselosteessa.

Suunnitteluvaiheessa tunnistettiin haasteet, joita liittyy venymäliuskojen liimaukseen (mm. syvennykset). 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 pysty- ja sivuvoiman mittaukseen tarkoitetuille venymäliuskoille.



Kuva 7. Liimauspuristimet venymäliuskoille.

Venymäliuskat suojattiin kahdella erityyppisellä silikonikumilla (HBM SG250) mekaaniselta kulumiselta ja ympäristöolosuhteiden vaihtelulta.

5. Testaus

Testaus on esitetty liitteessä 4 "Short-track luistimien teräripustusten testausraportti – talvi 2026". Toteutetut teräripustukset testattiin VTT MIKES Kajaanin voima- ja vääntömomenttilaboratoriossa. Pysty- ja sivuvoima testattiin voimanormaali N01:ssä. Testaustilanne on staattinen, kun taas todellinen käyttötilanne on dynaaminen.

Testauksessa mittausvahvistimena oli Kajaanin ammattikorkeakoulun suunnittelema venymäliuskaesivahvistin (6 ch ver.3.1). Vahvistin on DC-vahvistin, joka mittaussiltaan antama syöttöjännite on 1,9 V. Vahvistimen DC-vahvistukset on esitetty taulukossa 2. Kyseistä venymäliuskaesivahvistinta käytetään sekä testauksessa että todellisessa käyttötilanteessa. Koteloitu venymäliuskaesivahvistin on sijoitettu luistelijan sääreen, josta on kaapelointi teräripustuksille.

Taulukko 2. DC-vahvistukset

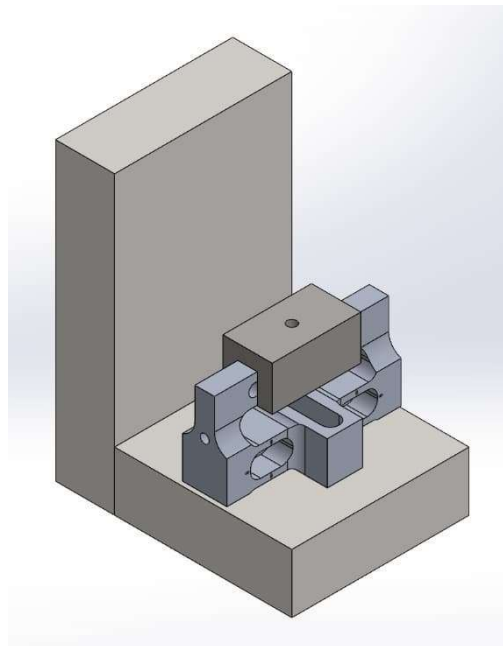
Mittaussilta	DC-vahvistus
Takaripustus pystyvoima	894
Takaripustus sivuvoima	501
Eturipustus pystyvoima	894
Eturipustus sivuvoima	736

5.1 Kalibrointivasteet

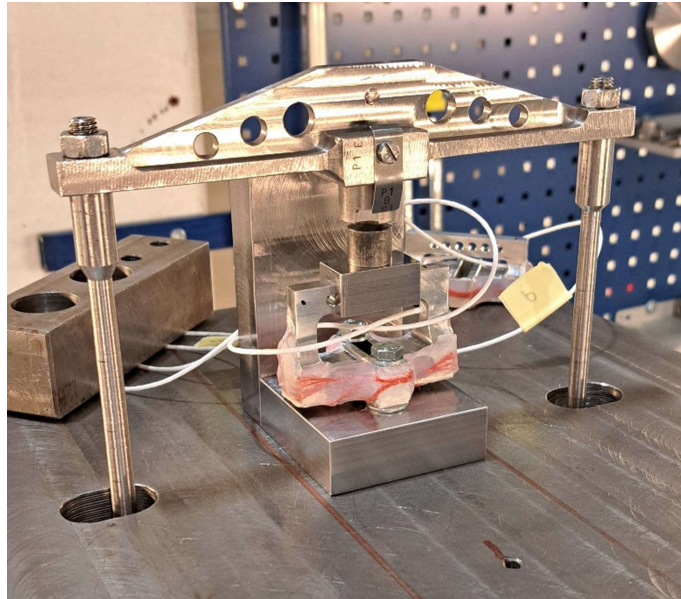
Testausta varten suunniteltiin ja toteutettiin tarvittavat kalibrointivasteet testauksen suorittamiseksi VTT MIKES Kajaanin voima- ja vääntömomenttilaboratorion mittanormaalissa.

5.1.1 Pystyvoima

Pystyvoiman testausta varten suunniteltiin tarvittavat kalibrointivasteet. Pystyvoiman kalibrointiosien 3D-malli esitetty alla olevassa kuvassa 8 ja pystyvoiman kalibrointi voimanormaalissa kuvassa 9.



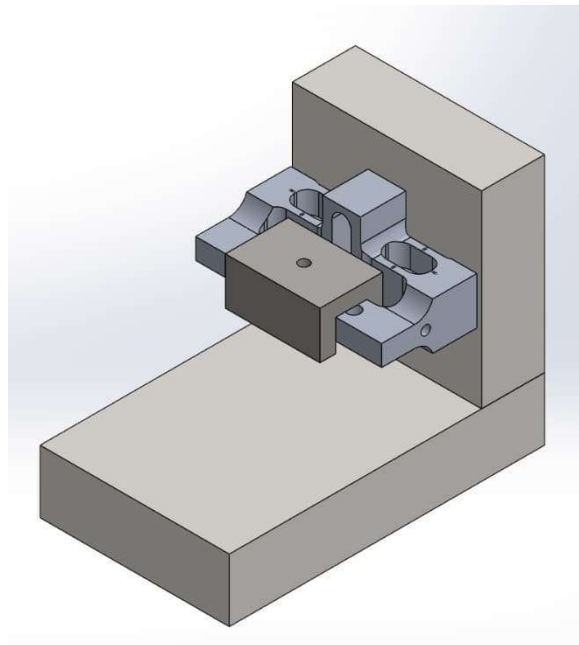
Kuva 8. Pystyvoiman kalibrointiosien kokoonpano.



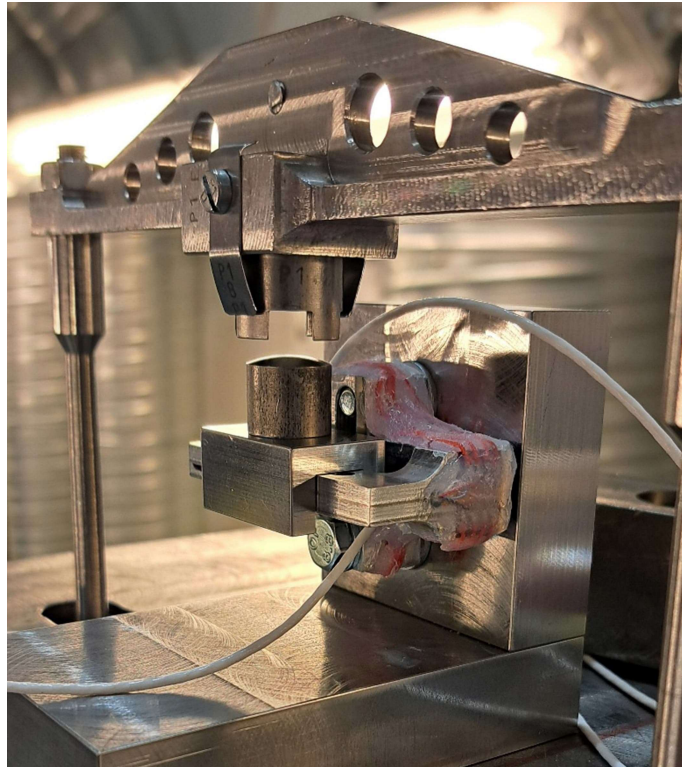
Kuva 9. Pystyvoiman kalibrointi voimanormaalissa N01.

5.1.2 Sivuvoima

Sivuvoiman testausta varten suunniteltiin tarvittavat kalibrintivasteet. Sivuvoiman kalibrintiosien 3D-malli esitetty alla olevassa kuvassa 10 ja sivuvoiman kalibrointi voimanormaalissa kuvassa 11.



Kuva 10. Sivuvoiman kalibrintiosien kokoonpano.



Kuva 11. Sivuvoiman kalibrointi voimanormaalissa N01.

6. Tulokset

Testauksen tulokset ovat esitetty liitteessä 4 ”Short-track luistimien teräripustusten testausraportti – talvi 2026”. Taulukossa 3 on esitetty rakennetun anturoinnin toteutunut suorituskky. Herkkyyskertoimet eri mittauskanaville löytyvät liitteen 4 testausraportista. Anturin tarkkuus on laskettu suhteuttamalla kunkin voimaaportaan ja sitä vastaavan yhdistetyn laajennetun suhteellisen mittausepävarmuuden tulo, päätearvoon. Tarkkuus on pyöristetty ylöspäin yhden desimaalin tarkkuuteen.

Taulukko 3. Short-track luistimien teräripustusten toteutunut suorituskky

Ominaisuus	Yksikkö	Arvo
Nimellispystyvoima F_z	N	1600
Nimellissivuvoima F_y eturipustus/takaripustus	N	340/400
Herkkyys pystyvoima F_z	mV/V	2,2
Herkkyys sivuvoima F_y eturipustus/takaripustus	mV/V	2,9/3,7
Tarkkuus	%	$\pm 1,2$
Turvallisen kuormituksen raja nimellisvoimasta	%	110
Paino eturipustus/takaripustus	g	39,5/42,8

On hyvä huomioida, ettei venymäliuskaesivahvistimen lähtöä kuormiteta saturaatioon, koska tällöin suurimmista rakenteeseen vaikuttavista voimista ei ole käsitystä venymäliuskaesivahvistimen lähdön leikkaantuessa. Mittausepävarmuudessa pystyvoiman sekä sivuvoiman osalta ylikuuluvuus dominoi. Alla olevissa taulukoissa 4 ja 5 Taulukko 5 on esitetty, miten yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus jakautuu eri mittausepävarmuuskomponenttien kesken. Alla olevat taulukot ovat esitetty oikean jalan takateräripustuksen osalta. Testaustilanteessa vasemman jalan teräripustusten mittausepävarmuus ei poikkea merkittävästi oikean jalan takateräripustuksesta. Ylikuuluminen on kompensoitu hyödyntäen käänteismatriisia [3]. Käänteismatriisit on esitetty liitteen 4 testausraportissa. Ilman matriisikompensointia ylikuuluvuus on huomattavasti suurempaa.

Taulukko 4. Laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin mittausepävarmuuskomponentille, oikean jalan takateräripustus pystyvoima 0,1 kN. Huom! pyöristys yhden desimaalin tarkkuuteen.

Mittausepävarmuuskomponentti	(%) (k=2)
Kalibroitivoima	0,1
Toistettavuus	0,2
Resoluutio	0,7
Ryömintä	0,2
Nollapistepalautuvuus	0,1
Hystereesi	1
Interpolointi	0,6
Ylikuuluvuus	5,7

Taulukko 5. Laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin mittausepävarmuuskomponentille, oikean jalan takateräripustus momentti 2,9 Nm. Huom! pyöristys yhden desimaalin tarkkuuteen.

Mittausepävarmuuskomponentti	(%) (k=2)
Kalibroitivoima	0,8
Toistettavuus	0,1
Resoluutio	0,1
Ryömintä	0,1
Nollapistepalautuvuus	0,1
Hystereesi	0,3
Interpolointi	1,7
Ylikuuluvuus	6,2

Mittausepävarmuuslaskelmissa pystyvoiman ja sivuvoiman ylikuuluminen on suhteutettu kullekin testatulle kuormitusportaalille, joka edustaa pahinta mahdollista tilannetta. Alla olevissa taulukoissa 6 ja 7 on esitetty oikean jalan takateräripustuksesta mittausepävarmuus, kun ylikuuluvuus on suhteutettu voimaportaalille vs. päätearvoon.

Taulukko 6. Sivuvoiman aiheuttaman momentin ylikuuluvuus pystyvoimaan suhteutettuna voimaportaalille vs. päätearvoon

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

Taulukko 7. Pystyvoiman ylikuuluvuus sivuvoimaan suhteutettuna sivuvoiman momenttiportaalle vs. päätearvoon

Yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus W (%) (k=2)		
Momentti (Nm)	Momenttiportaalle	Päätearvoon
2,9	6,4	2
5,7	3,7	2,1
8,6	2,7	2
11,4	2,1	1,6
14,3	1,8	1,5
17,2	1,5	1,3
20,0	1,4	1,3
22,9	1,3	1,3

7. Yhteenveto

Hankkeessa onnistuttiin suunnittelemaan ja toteuttamaan vaatimusmäärittelyn mukainen ratkaisu kaukalopikaluistelijan tuottamien pysty- ja sivuvoimien mittaamiseksi kaukalopikaluistimien teräripustuksista. Testauksen perusteella sekä pysty- että sivuvoiman mittauskanaville saavutettiin hyvä herkkyys ja pieni ylikuuluvuus mittauskanavien välillä.

Toteutettua anturointia pilotoitiin kahdesti hankkeen aikana. 1. pilotti oli 15.12.2025, jolloin testiluistelijana ei ollut lajin harrastaja. 1. pilotin perusteella pystyvoimakannan DC-vahvistusta pienennettiin, jotta mittausaluetta pystyvoiman osalta saatiin laajennettua. 2. pilotti järjestettiin Vuokatissa 21.1.2026, tällöin testiluistelijana oli lajin erikoismies. Testien perusteella todettiin, että toteutettu anturointi ei vaikuta negatiivisesti luistelijan suoritukseen. Luistelijalla oli toiveena käyttää omia teriä, mutta koska terien kiinnitys poikkesi nyt suunnitellusta, oli testaus suoritettava teräripustukseen kiinnitetyillä terillä.

Lähdeviitteet

- [1] Van der Krug, E., Reijne, MM., de Laat, B., Veeger D. (2018) Push-off forces in elite short-track speed skating. Sports Biomechanics, 18(5), 527-538
- [2] The Technical Staff of Measurements Group, Inc.: Strain Gage Based Transducers: Their Design and Construction
- [3] Schrand D. Cross-talk compensation using matrix methods. Sensor & Transducers, Volume 79, Issue 5, May 2007

Liitteet

Liite 1. 250053 - Eturipustus

Liite 2. 250052 - Takaripustus

Liite 3. Luistinanturit työselostus JÄTTI

Liite 4. Short-track luistimien teräripustusten testausraportti – talvi 2026

12

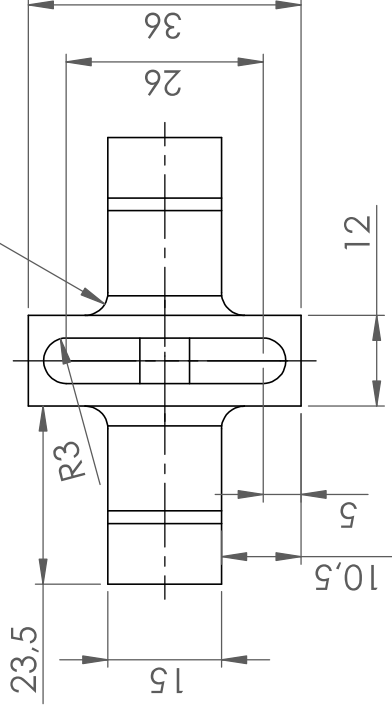
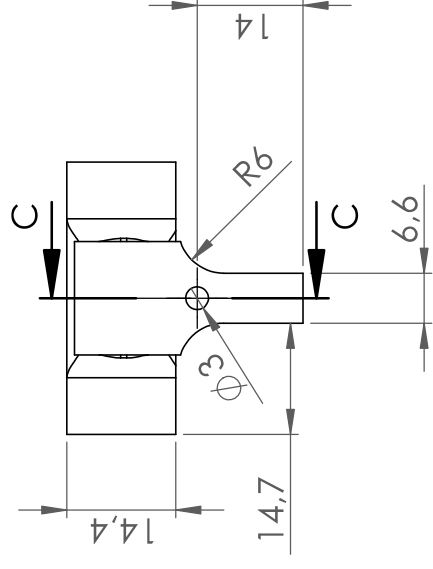
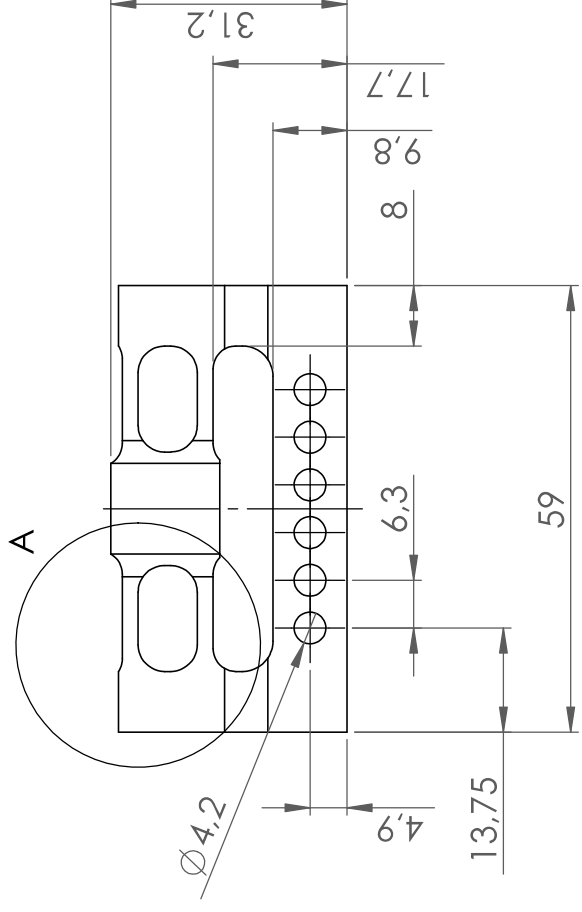
$2,1 \begin{pmatrix} +0,1 \\ -0,1 \end{pmatrix}$

7

8

14

B



3

4

5

6

7

8

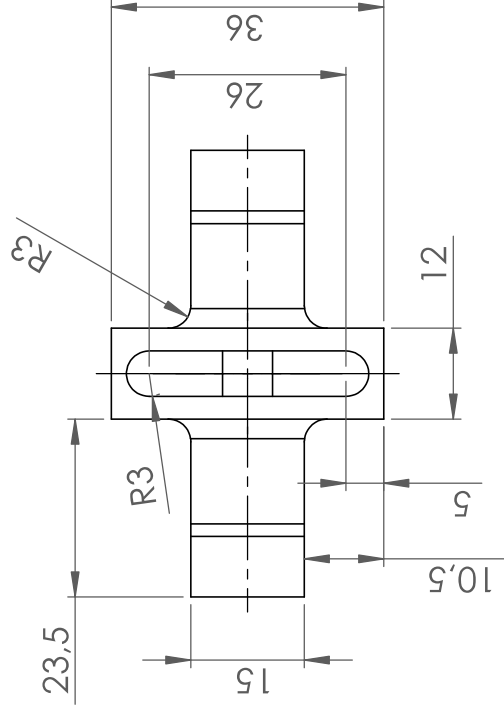
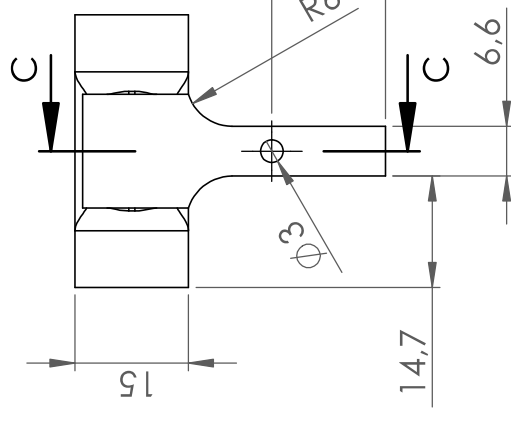
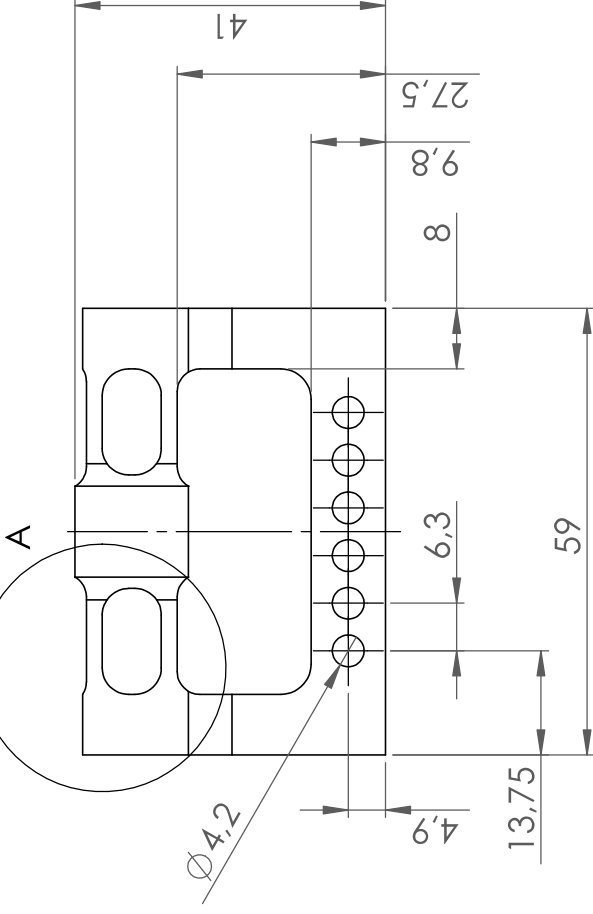
F

E

D

C

12
 $\begin{pmatrix} +0,1 \\ -0,1 \end{pmatrix}$



F

E

D

C

3

4

5

6

7

8

Projektin nimi Jääkiekkoteknologian tutkimus-, kehitys ja innovaatioympäristö		Projektin hankenumero
Projektin kesto (ajanjakso) Joulukuu 2025	Henkilöstö: Kari Kyllönen, VTT MIKES	Projektin nimilyhenne JÄTTI

Tilaaja: -

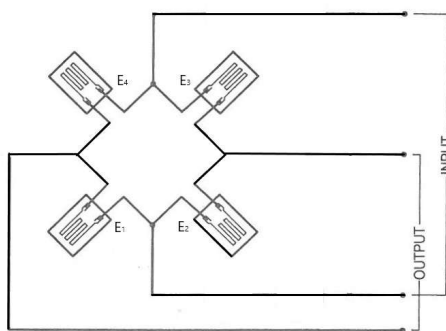
Tilaus: -

Tehtävä: Venymäliuskojen asennus kaukalopikaluistimen teräripustuksiin.

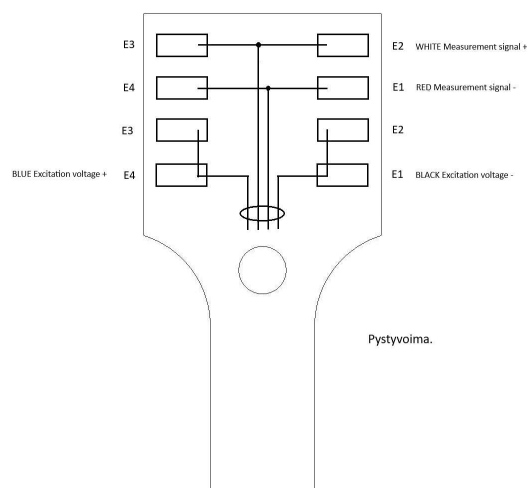
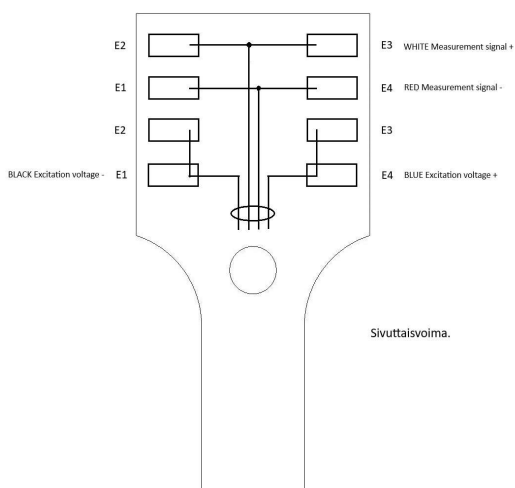
Työn suoritus ja materiaalit:

- venymäliuskojen liimaus kohdat teräripustuksissa hiottu lasikuituharjalla
- venymäliuskojen paikat peity asetonilla
- liuskojen asennuskohtaan teräripustuksessa ohut kerros liimaa
Liima: HBM hot curing 2-comp. adhesive EP310N
- venymäliuskat kohdistettu tahmeapintaiseen liimaan
Liuskat: HBM Soldering terminals 2/350 XU11S
- liuskat painettu liimaan puristimella käsin. Puristimen leuoissa kumimatto ja tarttumisen estävä kalvo.
- tarkista liuskojen kohdistus
- liuskat kiinnitetty anturiin jousikuormitteisilla puristimilla. Puristimen leuoissa kumimatto ja tarttumisen estävä kalvo.
- liiman kuivatus uunissa. Lämmön nousu 20-150 °C keskimäärin 4°C/min (tavoite 2-10°C/min).
Kuivatus 150°C kolme tuntia.
- liuskojen ja juotosteminaalien kytkentä.
johdin: HBM PVC-insulated very flexibel stranded wire 0,04 mm². Tuotenumero 1-SLI01
juotospinnat puhdistettu Fluxi kynällä. HBM Tuotenumero 1-FS01
juotospintoihin ja johtimiin esitinaus
- venymäliuskojen suojaus kerroksella silikonikumi,
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 SR180

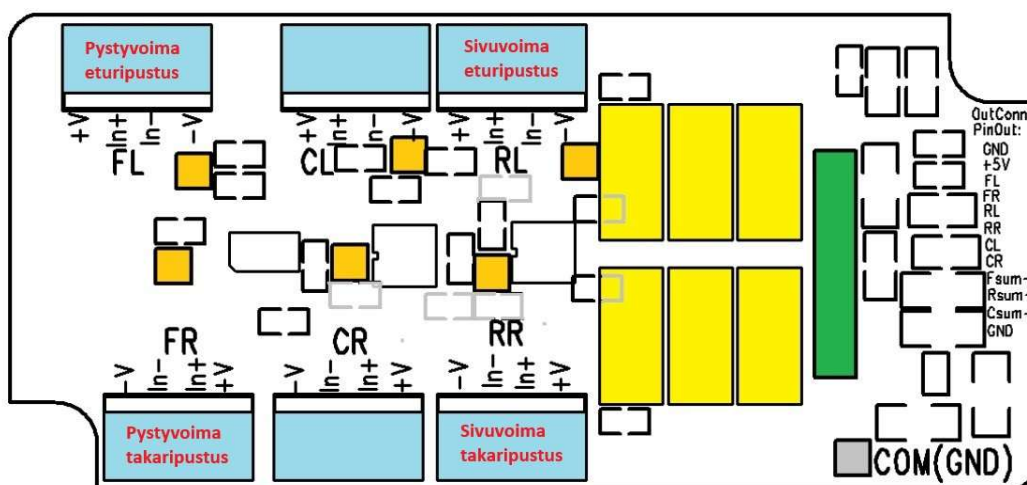
Venymäliuskojen kytkentäkaavio.



Venymäliuskojen kytkentä piste.



Venymäliuskaesivahvistin kytkentä.





Short-track luistimien teräripustusten testausraportti – talvi 2026

Kirjoittajat: Timo Kananen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Versiohistoria:

Versio	Päivämäärä	Laatija	Huomio
1.0.0	14.01.2026	Timo Kananen	Testausraportin 1. versio

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	2
1. Johdanto.....	3
2. Testausmenettely	4
2.1 Oikea teräripustus.....	6
2.1.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z).....	6
2.1.2 Summavoiman paikka pystyvoimalle.....	7
2.1.1 Yhtälö momentille	8
2.1.1 Sivuvoima momentista (X)	9
2.1.1 Summavoiman yhtälö sivuvoimalle (X).....	9
2.1.2 Summavoiman paikka sivuvoimalle	10
2.1.3 Mittausepävarmuus.....	11
2.2 Vasen teräripustus.....	14
2.2.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z).....	14
2.2.2 Voiman paikka pystyvoimalle	15
2.2.1 Yhtälö momentille	16
2.2.1 Sivuvoima momentista (-X)	17
2.2.1 Summavoiman yhtälö sivuvoimalle (-X)	17
2.2.2 Summavoima paikka sivuvoimalle	18
2.2.3 Mittausepävarmuus.....	19
3. Lähdeviitteet	22
4. Liitteet.....	23

1. Johdanto

Tämä dokumentti sisältää short-track luistimien teräripustusten testausmenettelyn ja testaustulokset.

Short-track luistimien voimanmittauslaitteisto koostuu oikean ja vasemman jalan etu- ja takaripustuksesta, venymäliuskoista ja venymäliuskaesivahvistimista.

2. Testausmenettely

Short-track luistinten teräripustukset testattiin pystyvoiman ja sivuvoiman osalta voimanormaali N01:ssä. Sivuvoiman teräripustukseen kohdistumasta momentista johdettiin voiman varren avulla teräripustukseen kohdistunut voima. Teräripustukset testattiin pystyvoiman osalta voimilla 0 – 800 N ja momentin osalta eturipustus momentilla 0 – 15,04 Nm ja takaripustus momentilla 22,88 N,. Testauksessa käytettiin molempien voimasuuntien osalta 1 kN massasarjaa ja voimaportaana 100 N. Venymäliuskaesivahvistinta luettiin Agilentin 34970A digitaalivolttimittarilla. Mittausalue ± 10 VDC lukutarkkuudella 0,0001 VDC. Digitaalivolttimittarilta luettiin kanavat 1-4. Venymäliuskaesivahvistimelle syötettiin käyttöjännite 5 VDC Keithley 2230G-30-1 tasavirtajännitelähteellä. Voimanormaali, sekä Agilentin digitaalivolttimittari ovat jäljitettävissä SI-järjestelmään. Momentin tuottamisen osalta mittausepävarmuus on arvio, koska testauksessa käytetyllä vipuvarrella ei ole jäljitettävyyttä SI-järjestelmään.

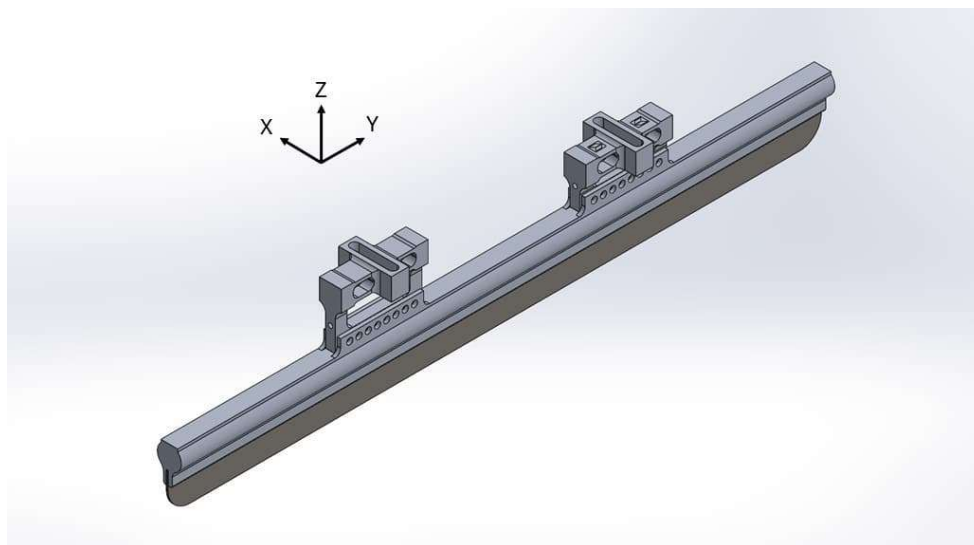
Teräripustusten kuormitusvasteet sekä pystyvoiman että sivuvoiman osalta oli mittatilaustyönä valmistettu.

Teräripustuksille suoritettiin kolme eri tyyppistä testiä, molemmille voimanmittaussuunnille. Kolme testiä olivat ylöskuormaustesti, signaali-kohinatesti ja ryömintätesti.

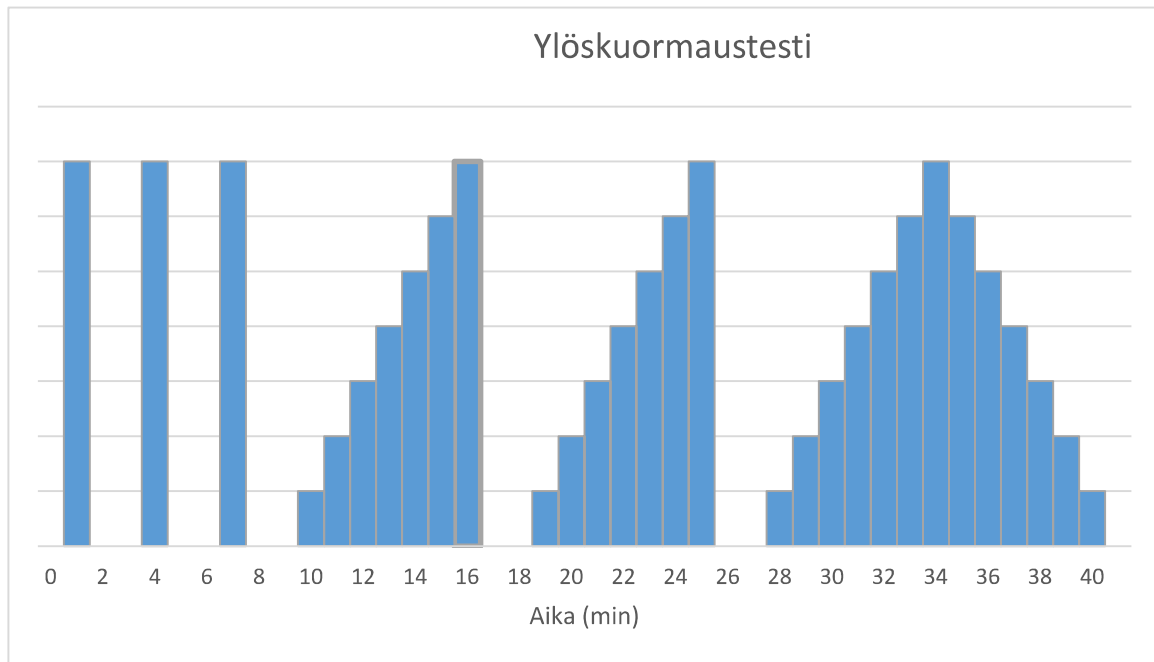
Yksittäinen ylöskuormaustesti koostui 3 esikuormauksesta sekä 3 portaittaisesta ylöskuormauksesta, jossa viimeinen ylöskuormausta sisälsi myös portaittaisen alaskuormauksen. Kuormitus sykli oli 60 sekuntia. Ylöskuormaustesti on esitetty graafisesti kuvassa 2.

Signaali-kohinatestissä molemmat teräripustukset mitattiin ilman kuormaa. Mittausaika 180 sekuntia. Näytteistystaajuus 0,5 Hz.

Ryömintätestissä teräripustuksia kuormitettiin keskeltä. Kuormitus sykli 180 sekuntia. Ylöskuormausta suoraan nominaalikuormaan ja alaskuormausta suoraan nollaan. Toistettiin 3 kertaa. Näytteistystaajuus 0,5 Hz. Testeissä mitattiin oikean ja vasemman luistimen etu- ja takaripustukset.



Kuva 1. Mittauskoordinaatisto



Kuva 2. Ylöskuormaustesti.

Sekä etu- että takaripustusta (vasen ja oikea luistin) kuormitettiin yhdestä pisteestä teräripustuksen teräkoteloon kiinnittyvän osan keskeltä. Kuormituskohdat mitattiin työntömitan avulla.

Etu- ja takaripustukset sekä oikeasta että vasemmasta luistimesta testattiin erikseen. Testaajana Timo Kananen.

2.1 Oikea teräripustus

2.1.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z)

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

F_{SUM} = summavoima [kN]

F_{FL} = kanavan FL pystyvoima [kN], eturipustus

F_{FR} = kanavan FR pystyvoima [kN], takaripustus

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. Eri kanaville määritellyt herkkyyskertoimet pystyvoiman osalta ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri kanavien herkkyyskertoimet pystyvoiman osalta oikean jalan teräripustuksessa

Kanava	Herkkyyskerroin [kN/V]
FL	-0,433401361
FR	0,430476701

2.1.2 Summavoiman 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 luistimen terän pituussuunnassa keskelle. Koordinaatiston origo voidaan valita vapaasti, tällöin kanavien sijainnit origoon nähden muuttuvat vastaavasti.

Taulukko 2. Kanavan anturien sijainnit tasokoordinaatistossa (Origo terän keskellä pituussuunnassa). Testissä terä Evo Futuro pituus 420 mm. Etu- ja takaripustukset kiinnitetty teräkotelossa mahdollisimman taakse.

Kanava	Y-koordinaatti [mm]
FL	75
FR	-90

2.1.1 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]

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

M_{RR} = kanavan RR momentti [Nm]

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

U_{RR} = kanavan RR jännite [V]

Herkkyyskertoimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Kanaville RL ja RR määritellyt herkkyyskerroin on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kanavien RL ja RR herkkyyskerroin oikean jalan teräripustuksessa

Kanava	Herkkyyskerroin [Nm/V]
RL	5,841194444
RR	8,538731318

2.1.1 Sivuvoima momentista (X)

$$F_{RL} = M_{RL} / x_{ETU}$$

F_{RL} = Kanavan RL voima [N]

M_{RL} = Kanavan RL momentti [Nm]

x_{ETU} = voiman varren pituus eturipustuksessa [m]

$$F_{RR} = M_{RR} / x_{TAKA}$$

F_{RR} = Kanavan RR voima [N]

M_{RR} = Kanavan RR momentti [Nm]

x_{TAKA} = voiman varren pituus takaripustuksessa [m]

Taulukko 4. Voiman varsien pituudet etu- ja takaripustuksessa.

x_{ETU}	18,8 mm
x_{TAKA}	26,8 mm

Taulukko 5. Voiman varsien pituudet etu- ja takaripustuksessa kun teräripustuksiin on kiinnitetty Evo Futuro terä.

x_{ETU}	68,3 mm
x_{TAKA}	76,3 mm

Huom! Voiman varsien pituuden liittyvä epävarmuus on määritelty koneistuksessa käytetyn yleistoleranssin mukaisesti (ISO-2768-mK). Voiman varren pituuteen liittyvä epävarmuus on huomioitu epävarmuuslaskelmissa.

2.1.1 Summavoiman yhtälö sivuvoimalle (X)

$$F_{SUM} = F_{RL} + F_{RR}$$

F_{SUM} = summavoima [Nm]

F_{RL} = kanavan RL sivuvoima [N], eturipustus

F_{RR} = kanavan RR sivuvoima [N], takaripustus

2.1.2 Summavoiman paikka sivuvoimalle

$$Y_{F_{SUM}} = \frac{\sum((a_i * U_i)/x * Y_i)}{\sum((a_i * U_i)/x)}$$

$Y_{F_{SUM}}$ = voiman y-koordinaatti [mm]

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

U_i = kanavan i jännite [V]

x = voiman varren pituus [m]

Y_i = kanavan i anturin y-koordinaatti [mm]

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

Taulukko 6. Kanavan anturien sijainnit tasokoordinaatistossa (Origo terän keskellä pituussuunnassa). Testissä terä Evo Futuro pituus 420 mm. Etu- ja takaripustukset kiinnitetty teräkotelossa mahdollisimman taakse.

Kanava	Y-koordinaatti [mm]
RL	75
RR	-90

2.1.3 Mittausepävarmuus

Testausmenettelelyyn liittyvä mittausepävarmuustarkastelu sisältää kahdeksan komponenttia.

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

Huom! Epävarmuuskomponenteista ylikuuluvuus dominoi pystyvoiman ja momentin osalta, kuten alla olevista taulukoista 7 ja 8 voidaan nähdä.

Taulukko 7. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

	Pystyvoima	Oikean jalan teräripustus	
	Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Eturipustus	Maksimi (%)	5,1	1,5
Eturipustus	Minimi (%)	0,7	0,4
Takaripustus	Maksimi (%)	5,8	1,3
Takaripustus	Minimi (%)	0,9	0,4

Taulukko 8. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioit

	Momentti	Oikea jalan teräripustus	
	Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Eturipustus	Maksimi (%)	9,3	1,4
Eturipustus	Minimi (%)	1,7	1,3
Takaripustus	Maksimi (%)	6,4	2
Takaripustus	Minimi (%)	1,3	1

Seuraavalla sivulla olevissa taulukoissa 9 ja 10 on esitetty pystyvoimalle suhteellinen lasketun voiman virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus etu- ja takaripustukselle. Taulukoissa 11 ja 12 on esitetty momentille suhteellinen lasketun momentin virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus etu- ja takaripustukselle.

Taulukko 9. Pystyvoiman suhteellinen lasketun voiman virhe ja pystyvoiman yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusvoimalle. Kuormitussuunta -Z. Oikean jalan eturipustus.

Voima (kN)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
0,1	-0,23	5,1
0,2	-0,23	2,7
0,3	-0,14	1,8
0,4	-0,19	1,5
0,5	-0,03	1,1
0,6	0,12	1,1
0,7	0,00	0,8
0,8	0,03	0,7

Taulukko 10. Pystyvoiman suhteellinen lasketun voiman virhe ja pystyvoiman yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusvoimalle. Kuormitussuunta -Z. Oikean jalan takaripustus.

Voima (kN)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
0,1	-0,28	5,8
0,2	-0,17	3,0
0,3	-0,13	2,0
0,4	-0,06	1,7
0,5	-0,08	1,3
0,6	0,00	1,0
0,7	0,06	0,9
0,8	0,04	0,9

Huom! Sivuvoiman ylikuuluvuudessa pystyvoimaan hyödynnetty ”Cross-talk compensation Using Matrix Methods” julkaisussa esitettyä menetelmää [1]. Ilman ylikuuluvuuden korjausta sivuvoiman ylikuuluvuus pystyvoimakanavaan on huomattavasti suurempaa. Korjaukseen tarvittavat testauksesta saadut käänteismatriisit ovat esitetty liitteessä 2.

Taulukko 11. Momentin suhteellinen lasketun momentin virhe ja momentin yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusmomentille. Oikean jalan eturipustus

Momentti (Nm)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
1,88	0,18	9,3
3,76	0,23	4,8
5,64	0,17	3,4
7,52	0,01	2,7
9,4	0,01	2,3
11,28	-0,10	2,0
13,16	-0,07	1,9
15,04	0,06	1,7

Taulukko 12. Momentin suhteellinen lasketun momentin virhe ja momentin yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusmomentille. Oikean jalan takaripustus

Momentti (Nm)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
2,86	0,81	6,4
5,72	0,87	3,7
8,58	0,63	2,7
11,44	0,37	2,1
14,30	0,22	1,8
17,16	0,10	1,5
20,02	-0,20	1,4
22,88	-0,24	1,3

2.2 Vasen teräripustus

2.2.1 Summavoiman yhtälö pystyvoimalle (-Z)

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

F_{SUM} = summavoima [kN]

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

F_{FR} = kanavan FR voima [kN], takaripustus

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]

Herkkyyskerroimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Eri kanaville määritellyt herkkyyskerroimet pystyvoiman osalta ovat esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Eri kanavien herkkyyskerroimet pystyvoiman osalta vasemman jalan teräripustuksessa

Kanava	Herkkyyskerroin [kN/V]
FL	-0,421801381
FR	0,413288806

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 luistimen terän pituussuunnassa keskelle. Koordinaatiston origo voidaan valita vapaasti, tällöin kanavien sijainnit origoon nähden muuttuvat vastaavasti.

Taulukko 14. Kanavan anturien sijainnit tasokoordinaatistossa (Origo terän keskellä pituussuunnassa). Testissä terä Evo Futuro pituus 420 mm. Etu- ja takaripustukset kiinnitetty teräkotelossa mahdollisimman taakse.

Kanava	Y-koordinaatti [mm]
FL	75
FR	-90

2.2.1 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]

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

M_{RR} = kanavan RR momentti [Nm]

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

U_{RR} = kanavan RR jännite [V]

Herkkyyskertoimia laskettaessa on käytetty lineaarista mallia. Kanaville RL & RR määritellyt herkkyyskerroin on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Kanavien RL ja RR herkkyyskerroin oikeassa rullasuksianturikokoonpanossa

Kanava	Herkkyyskerroin [Nm/V]
RL	5,761257679
RR	-8,194831476

2.2.1 Sivuvoima momentista (-X)

$$F_{RL} = M_{RL} / x_{ETU}$$

F_{RL} = Kanavan RL voima [N]

M_{RL} = Kanavan RL momentti [Nm]

x_{ETU} = voiman varren pituus eturipustuksessa [m]

$$F_{RR} = M_{RR} / x_{TAKA}$$

F_{RR} = Kanavan RR voima [N]

M_{RR} = Kanavan RR momentti [Nm]

x_{TAKA} = voiman varren pituus takaripustuksessa [m]

Taulukko 16. Voiman varsien pituudet etu- ja takaripustuksessa.

x_{ETU}	18,8 mm
x_{TAKA}	26,8 mm

Taulukko 17. Voiman varsien pituudet etu- ja takaripustuksessa kun teräripustuksiin on kiinnitetty Evo Futuro terä.

x_{ETU}	68,3 mm
x_{TAKA}	76,3 mm

Huom! Voiman varsien pituuden liittyvä epävarmuus on määritelty koneistuksessa käytetyn yleistoleranssin mukaisesti (ISO-2768-mK). Voiman varren pituuteen liittyvä epävarmuus on huomioitu epävarmuuslaskelmissa.

2.2.1 Summavoiman yhtälö sivuvoimalle (-X)

$$F_{SUM} = F_{RL} + F_{RR}$$

F_{SUM} = summavoima [N]

F_{RL} = kanavan RL sivuvoima [N], eturipustus

F_{RR} = kanavan RR sivuvoima [N], takaripustus

2.2.2 Summavoima paikka sivuvoimalle

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

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

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

U_i = kanavan i jännite [V]

x = voiman varren pituus [m]

Y_i = kanavan i anturin y-koordinaatti [mm]

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

Taulukko 18. Kanavan anturien sijainnit tasokoordinaatistossa (Origo terän keskellä pituussuunnassa). Testissä terä Evo Futuro pituus 420 mm. Etu- ja takaripustukset kiinnitetty teräkotelossa mahdollisimman taakse.

Kanava	Y-koordinaatti [mm]
RL	75
RR	-90

2.2.3 Mittausepävarmuus

Testausmenettelelyyn liittyvä mittausepävarmuustarkastelu sisältää kahdeksan komponenttia.

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

Huom! Epävarmuuskomponenteista ylikuuluvuus dominoi pystyvoiman ja hystereesi momentin osalta takaripustuksessa ja kalibroinnin epävarmuus eturipustuksessa, kuten alla olevista taulukoista 19 ja 20 voidaan nähdä.

Taulukko 19. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

	Pystyvoima	Vasen teräripustus	
	Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta
Eturipustus	Maksimi (%)	6,4	3,5
Eturipustus	Minimi (%)	0,9	0,4
Takaripustus	Maksimi (%)	6,6	2,2
Takaripustus	Minimi (%)	0,9	0,3

Taulukko 20. Epävarmuuslaskelmat kun ylikuuluvuus on huomioitu ja jätetty huomioimatta

	Momentti	Vasen teräripustus	
	Mittausepävarmuus	Ylikuuluvuus mukana	Ei ylikuuluvuutta.
Eturipustus	Maksimi (%)	8	1,7
Eturipustus	Minimi (%)	1,7	1,4
Takaripustus	Maksimi (%)	2,2	2,1
Takaripustus	Minimi (%)	0,9	0,9

Seuraavalla sivulla olevissa taulukoissa 21 ja 22 on esitetty pystyvoimalle suhteellinen lasketun voiman virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus. Taulukoissa 23 ja 24 on esitetty momentille suhteellinen lasketun momentin virhe ja yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus.

Taulukko 21. Pystyvoiman suhteellinen lasketun voiman virhe ja pystyvoiman yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusvoimalle. Kuormitussuunta -Z. Vasemman jalan eturipustus.

Voima (kN)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
0,1	-1,64	6,4
0,2	-0,94	3,4
0,3	-0,68	2,5
0,4	-0,30	1,6
0,5	-0,09	1,2
0,6	0,04	1,1
0,7	0,08	0,9
0,8	0,20	0,9

Taulukko 22. Pystyvoiman suhteellinen lasketun voiman virhe ja pystyvoiman yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusvoimalle. Kuormitussuunta -Z. Vasemman jalan takaripustus.

Voima (kN)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
0,1	-0,70	6,6
0,2	-0,54	3,5
0,3	-0,41	2,4
0,4	-0,14	1,7
0,5	-0,04	1,4
0,6	-0,01	1,1
0,7	0,03	1,0
0,8	0,13	0,9

Huom! Sivuvoiman ylikuuluvuudessa pystyvoimaan hyödynnetty ”Cross-talk compensation Using Matrix Methods” julkaisussa esitettyä menetelmää [1]. Ilman ylikuuluvuuden korjausta sivuvoiman ylikuuluvuus pystyvoimakanavaan on huomattavasti suurempaa. Korjaukseen tarvittavat testauksesta saadut käänteismatriisit ovat esitetty liitteessä 2.

Taulukko 23. Momentin suhteellinen lasketun momentin virhe ja momentin yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusmomentille. Vasemman jalan eturipustus.

Momentti (Nm)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
1,88	-0,27	8
3,76	-0,22	4,2
5,64	-0,12	3,1
7,52	0,05	2,6
9,4	-0,03	2,3
11,28	-0,03	2,2
13,16	-0,05	1,8
15,04	0,09	1,7

Taulukko 24. Momentin suhteellinen lasketun momentin virhe ja momentin yhdistetty laajennettu suhteellinen mittausepävarmuus kullekin kuormitusmomentille. Vasemman jalan takaripustus.

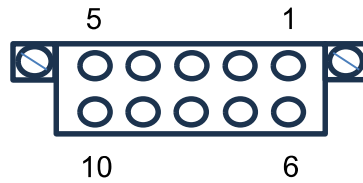
Momentti (Nm)	Virhe (%)	W (%) (k=2)
2,86	0,89	2,2
5,72	0,24	1,4
8,58	-0,01	1,4
11,44	-0,02	1,5
14,30	0,11	1,4
17,16	0,33	1,5
20,02	-0,12	1,0
22,88	-0,17	0,9

3. Lähdeviitteet

[1] Schrand D., Cross-talk Compensation Using Matrix Methods. Sensors & Transducers Journal, Vol.79, Issue 5 May 2007, pp. 1157-1163

4. Liitteet

Liite.1. Johdin kytkennät



Kuva 3. Molex-liitin.

Taulukko 25. Kanavat

Liitin pinni	Johdin*	Kanava	Kuvaus
1	--	+5V	Käyttöjännite
2	---	FL	Pystyvoima eturipustus
3			
4			
5			
6	-	GND	Maataso
7	----	FR	Pystyvoima takaripustus
8	-----	RL	Sivuvoima eturipustus
9	-----	RR	Sivuvoima takaripustus
10	-----	GND	Maataso

*mustat tussimerkinnot johtimissa

Liite.2.

Käänteismatriisit ylikuulumisen kompensointia varten

Taulukko 26. Käänteismatriisi K^{-1} vasemman jalan takaripustus

0,999821509	0,023515360
-0,007589057	0,999821509

Taulukko 27. Käänteismatriisi K^{-1} vasemman jalan eturipustus

1,000210573	0,031287763
0,006731612	1,000210573

Taulukko 28. Käänteismatriisi K^{-1} oikean jalan takaripustus

0,999724732	0,049517875
-0,005557436	0,999724732

Taulukko 29. Käänteismatriisi K^{-1} oikean jalan eturipustus

1,000003229	-0,000405873
-0,007954539	1,000003229