

Matti Penttinen

# Pinnantunnistusturin vikaantuminen MEMS elementtivalmistuksen sähköisessä karsintamittauksessa.

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

18.3.2015

<p>Tekijä(t) Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Matti Penttinen Pinnantunnistusanturin vikaantuminen elementtivalmistuksen sähköisessä karsintamittauksessa.</p> <p>44 sivua + 2 liitettä 6.4.2015</p>
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Prosessi-automaatiotekniikka
Ohjaaja(t)	Harri Viljakainen, Päällikkö, MEMS Testauskehitys Kari Vierinen Yliopettaja
<p>Työn tavoitteena oli tutkia Murata Electronics Oy yrityksessä käytettävien testauslaitteiden pinnantunnistusanturin aiheuttamia vikatilanteita MEMS antureiden sähköisessä karsintamittauksessa ja kehittää ratkaisu ongelmaan.</p> <p>Työssä tutkittiin anturin kytkimen vian aiheuttajaa eri menetelmin. Mikroskoopin ja elektronimikroskoopin kuvat paljastivat kontaktilla huomattavaa kulumista. EDS-mittauksilla saatiin lisätietoa kontaktin pinnalla tapahtuvasta ilmiöstä, kun löydettiin pinnalta hiilijäämiä ja oksideja. Tehtiin myös useita sähköisiä mittauksia, joilla nähtiin kontaktin erotusvaiheessa jännitehäiriöitä.</p> <p>Tutkimusjulkaisuja vertailemalla huomattiin, että kyse oli reletekniikassa tutusta kontaktieroosiosta. Kontaktien erotessa toisistaan syntyy kipinäointia. Tämä tuottaa lämpöä, joka tuotti pinnalta löydettyä oksidi- ja hiilijäänteet.</p> <p>Tämän tutkimuksen perusteella anturin kytkimelle löydettiin merkittäviä parannusehdotuksia. Helposti oksidoituva Volframi (W) kytkimen materiaalina voitaisiin vaihtaa pinnoittamalla se jalometallilla, joka ei oksidoidu. Myös Volframi-Rhenium (WRe) näytti lupaavalta. Anturin kytkimen erotusvaiheessa tapahtuvaan kipinäointiin löydettiin parannus kytkemällä sen rinnalle RC-piiri ja näin suodattamalla nopeat sähköpurkaukset pois.</p>	
Avainsanat	MEMS, EDS, RC-piiri

Author(s) Title  Number of Pages Date	Matti Penttinen Surface detecting probe malfunction in MEMS element manufacturing electrical qualifying measurement  44 pages + 2 appendices 6 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Automation Engineering
Specialisation option	Process engineering
Instructor(s)	Harri Viljakainen, Manager, MEMS Test Development Kari Vierinen, Principal Lecturer
<p>The purpose of this project was to study and find a solution for Murata Electronics Oy for their problem with malfunctioning surface detecting probes. These probes are used in MEMS manufacturing electrical qualifying measurement test devices.</p> <p>The root cause of the probes switching problem was studied in different ways. Microscopy and electron microscope images revealed significant erosion of the contacts. With further EDS measurements, more knowledge on the phenomenon happening on the surface was obtained by finding carbon residue and oxides. Electrical measurements were performed and they revealed voltage interference at the contact separation point.</p> <p>By comparing research publications it was found that the problem lies in contact erosion which is often the case in relay technology. At the contact separation an electrical arcing between the contacts occurs. This causes heat which was producing the carbon and oxide residue found on the surface of probes.</p> <p>As a result of this study, suggestions for significant improvements for the probes were introduced. Easily oxidized Tungsten (W) could be replaced with a coating of nobler metal to stop it from oxidizing. Tungsten-rhenium (WRe) also looked promising. Arcing found in the probe contacts was solved by attaching a RC-circuit network and filtering them away.</p>	
Keywords	MEMS, EDS, RC-circuit

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	4
2	Murata Electronics Oy	5
2.1	MEMS	6
2.1.1	Kiekkovalmistus	6
2.1.2	Anturivalmistus	7
2.2	Mittalaitejärjestelmä	8
2.2.1	Mittaneulakortti	9
2.2.2	Pinnantunnistusanteri	10
2.2.3	Optoerotin	12
2.2.4	Schmitt-liipaisin	12
3	Ongelman kuvaus	13
3.1	Vaikutukset tuotantoon	13
3.2	Nykyinen huoltotapa	15
4	Häiriön tutkiminen	17
4.1	Sähköiset mittaukset	17
4.2	Mittaukset anturin kytkimen toimintahäiriön ollessa päällä	20
4.2.1	Testi 1	21
4.2.2	Testi 2	22
4.2.3	Testi 3	23
4.2.4	Testi 4	24
4.2.5	Testi 5	25
4.3	Kontaktipinnan tutkiminen	26
4.3.1	SEM-kuvat	29
4.3.2	EDS-analyysi	30
4.4	Oksidoitumisen alkuperä	33
4.5	Materiaalin siirtyminen ja häviö	34
5	Ratkaisuehdotukset	35
5.1	Kytken materiaali	35

5.1.1	Volframi-Rhenium (Wre)	36
5.1.2	Paliney 7 <sup>®</sup> (Pd-Ag-Cu-Pt-Au)	36
5.1.1	Beryllium-kupari (BeCu)	36
5.1.2	NewTek	37
5.1.3	Volframi (W) ja Volframi-Rhenium (Wre) hopea pinnoituksella (Ag)	37
5.2	Kipinöinnin estäminen	37
5.3	Kytkenän simulointi	38
5.4	Koe-kytkentä laitteelle ja sähköiset mittaukset	40
5.5	Ehdotetut parannukset nykyiseen tilanteeseen	41
5.5.1	Mittauksen keskeytyminen	42
5.5.2	Kytken puhdistus	42
6	Loppupäätelmiä	42
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1. Kytken kontaktikohta SEM-kuvat	
	Liite 2. Optoerottimen kytkeytymisominaisuudet	

## Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

Pinnantunnistusanteri	On tässä sovelluksessa mekaaninen kytkin joka avautuu, kun se tekee kontaktin mitattavan elementin pinnan kanssa.
MEMS	(Micro Electro Mechanical System) Mikro Elektro Mekaaninen Systeemi
EDS	(Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) Energiadispersiivinen röntgenspektrometri
Fine Lift	Korkeus josta mittapöytä nousee mittaneuloille.
Overtravel	Tarkoittaa z-akselin ylimääräistä liikettä jotta mittaneuloille saadaan haluttu kontaktipaine mitattavalle pinnalle.
Murata	Murata Electronics Finland Oy
$C_{res}$	(Contact resistance) Anturin kytkimen kontaktin vastusarvo.
SPC	(Statistical process control) Tilastollinen prosessinohjaus
Golden Sample	Anturi, joka on todettu vastaavan sille määritellyä spesifi- kaatiota ja on mittausstandardina.

## 1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena on tutkia Murata Electronics Oy yrityksen tuotantolinjan MEMS elementtipuolen viimeistä lopputestausvaihetta ja siinä ajoittain tapahtuvaa pinnantunnistusanturin kytkimen toimintahäiriötä. Tavoitteena oli selvittää mistä kyseinen häiriö johtuu, selvittää nykyiset huoltotoimenpiteet ja kehittää ratkaisu häiriöistä eroon pääsemiseen.

Sähköinen karsintamittaus on valmiille MEMS-anturielementille tehtävä viimeinen tarkistus ennen kuin se päästetään tuotantolinjalta ulos. Mittauskapasiteetti on rajallinen ja tuotannon tehokkuuden kannalta on tärkeää saada kaikki tuotantoaika käyttöön. Mitataneulakortilla sijaitsevan anturin kytkimen toimintahäiriöllä on selkeä vaikutus tuotantomääriin, johtuen pitkän mittauksen epäonnistumisesta ja uusintatestauksesta. Tuotannossa on kymmeniä mittalaitteita jotka ovat tälle häiriölle alttiita. Laskennallisesti, jos häiriöstä päästään eroon, toisi se puolen vuoden kapasiteetin verran lisää mittausaikaa yhdelle laitteelle ja helpottaisi laite- ja testausryhmää.

Myös neulakorttien anturin kytkimen pintaa hiomalla tehtävät huoltotoimenpiteet voivat vain pahentaa asiaa. Korttien huoltaminen tämän kytkimen hajoamisen takia on yksi suurimpia syitä lähettää ne takaisin valmistajalle korjattavaksi.

Työssä tarkastellaan erilaisilla mittauksilla anturin kytkimen ominaisuuksia ja etsitään parannuksia materiaalivalinnoilla. Kytkimen toimintaa parantamaan löytyi myös ratkaisu sähköisen suojauspiirin muodossa.

## 2 Murata Electronics Oy

Jo yli 20 vuotta toiminut Murata Electronics Oy (Kuva 1) (entiseltä nimeltään VTI Technologies Oy) työllistää Vantaalla noin 850 henkilöä. Se on osa japanilaista maailman johtavaa keraamispohjaisten elektroniikkakomponenttien valmistajaa Murata Manufacturing -konsernia, joka työllistää globaalisti yli 48000 henkilöä.



Kuva 1. Murata Electronics Vantaan Martinlaaksossa

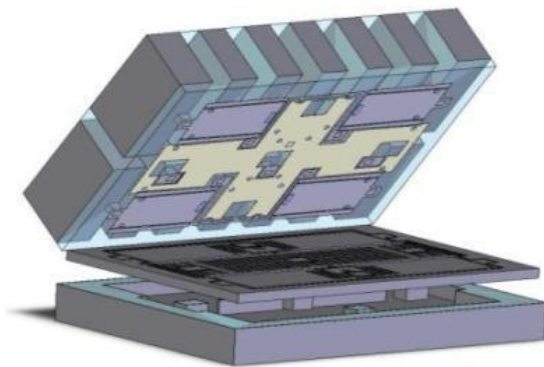
Yhtiö kehittää ja valmistaa piipohjaisia kapasitiivisiä kiihtyvyyss-, kallistus-, ja kulmanopeusantureita. Valmistusprosessissa hyödynnetään omaa MEMS (Mikro Elektro Mekaaninen Systemi) -teknologiaa. Sovellusalat ovat kiihtyvyyden, kallistuksen, törmäyksen, värinän, kulmanopeuden ja paineen mittaus sekä autoteollisuudelle että muille teollisuuden aloille maailmanlaajuisesti.

MFI tuottaa yli 35 miljoonaa anturia vuodessa. Tuotannosta 99 % menee vientiin. Autoteollisuuden asiakkaita ovat pääasiassa järjestelmätoimittajat. Loppuasiakkaista merkittävimpiä ovat muun muassa General Motors, Mercedes-Benz, Isuzu, Mitsubishi, Fiat, Ford, Volkswagen, Audi, Volvo ja Renault.



## 2.1 MEMS

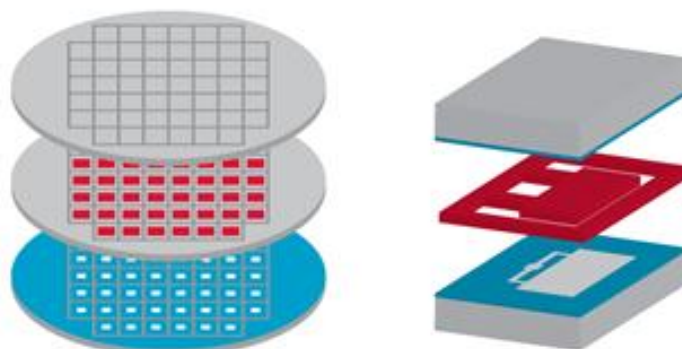
MEMS lyhenne tulee englannin kielestä (Micro Electro Mechanical System) ja suomenmennettuna Mikro Elektro Mekaaninen Systemi. MEMS-tuotteet ovat komponentteja, joissa mekaanisesta liikkeestä saadaan sähköinen signaali. Mikrosysteemien (Kuva 2) rakenteet on tehty piistä, lasista ja metallikerroksista ja ne valmistetaan puolijohdeteollisuuden menetelmiä käyttämällä.



Kuva 2. MEMS-anturin rakenteellinen halkaisukuva

### 2.1.1 Kiekkovalmistus

Muratalla anturielementin tuotanto alkaa puhtaista piikiekoista. Perustuotteisiin kuuluviiin sivukontaktoitaviin elementteihin (Kuva 3) tarvitaan kolme piikiekkoa, jotta saadaan muodostettua rakenteita anturin sisälle. Puhutaan kansi-, rakenne- ja pohjakiekoista.

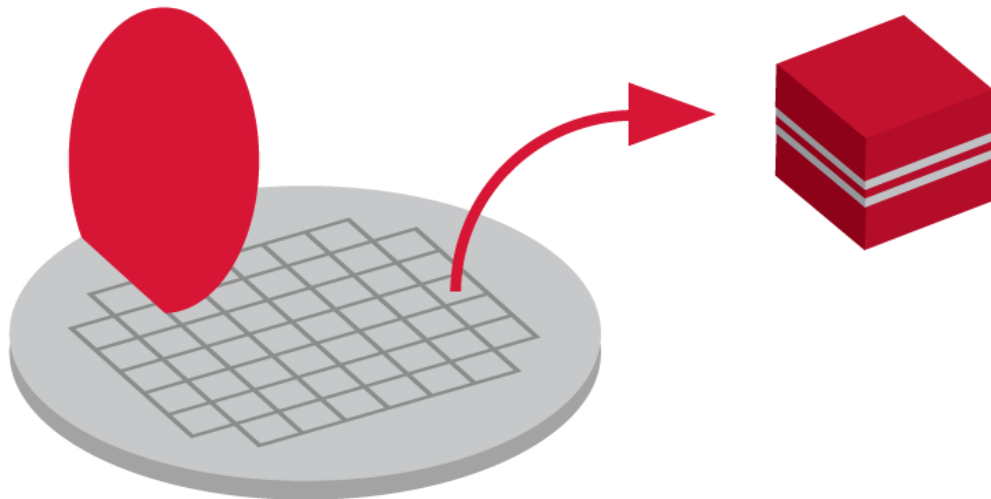


Kuva 3. Rakennekuva kansi-, rakenne- ja pohjakiekoista.

Kiekkovalmistuksessa kiekkoille tehdään lukuisia prosesseja, joihin kuuluvat oksidointi, litografia, metallointi sekä märkä- ja plasmaetsaus. Kun kiekot ovat rakenteellisesti valmiita, sulatetaan niihin lasia eristeeksi kerroksien välille ja hiotaan oikeisiin paksuuksiin. Sitten ne liitetään vielä yhteen anodisesti bondaamalla. Tämän jälkeen kiekkopaketti matkaa anturivalmistuksen puolelle.

### 2.1.2 Anturivalmistus

Anturivalmistus alkaa kun kansi-, pohja- ja rakennekiekko ovat liitetty yhteen ja niistä täytyy saada yksittäisiä antureita. Tähän käytetään timanttisahanterillä varustettuja sahoja. Kiekkopaketti sahataan pysty- ja vaakaviilloilla pieniksi anturin kokoisiksi elementeiksi, (Kuva 4) jonka jälkeen jokaiselle anturille höyrystetään kontaktipinnat. Tämän jälkeen anturielementti on käytännössä valmis. Puuttuu enää niiden toimivuuden testaus eli karsintamittaus. Tämä on valmiille anturielementeille tehtävä viimeinen testi, jossa anturin kyvykkyys varmistetaan sähköisesti. Testauksessa käytetään mittalaittejärjestelmän kanssa mittauspöytiä, jotka ajavat mittaneulat kontaktipinnoille. Järjestelmän ohjelmat ajavat sähköiset testit automaattisesti.

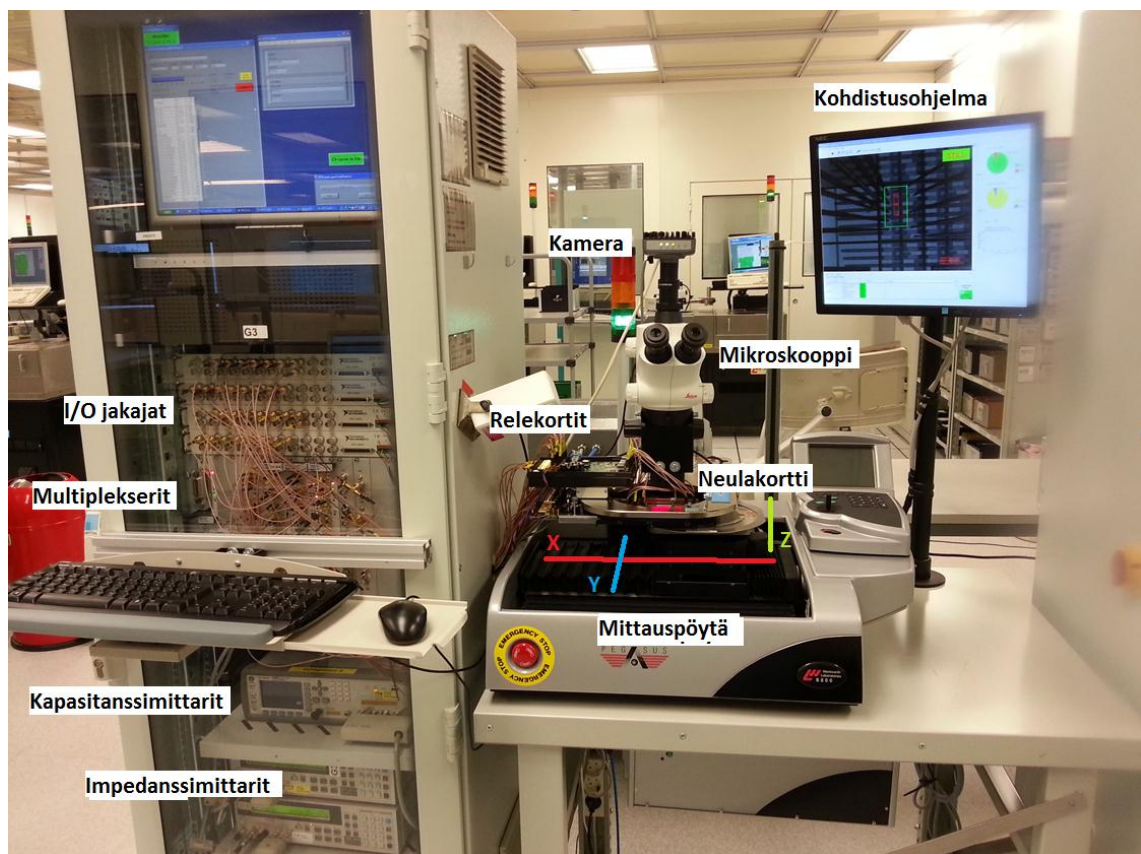


Kuva 4. Timanttisahauksella kiekkopaketista antureiksi

## 2.2 Mittalaitejärjestelmä

Mittalaitejärjestelmä (Kuva 5) koostuu mittapöydästä, joka siirtää antureita mittaneulojen alle sekä erillisestä mittalaitekaapista, josta kaikki mittauselektroniikka tuodaan mittaneulakortille. Mittalaitekaapissa on tietokone, jossa on käytössä testauksen ja kohdistuskameran ohjelmasovellus. Signaalit neulakortin välillä johdetaan relekortteille, josta ne matkaavat mittalaitakaappiin multipleksereille ja I/O jakajien kautta tietokoneen datankeräyskortteille. Mittausinformaatiota kerätään anturielementeistä kapasitanssi-, resistanssi-, ja impedanssimittareilla.

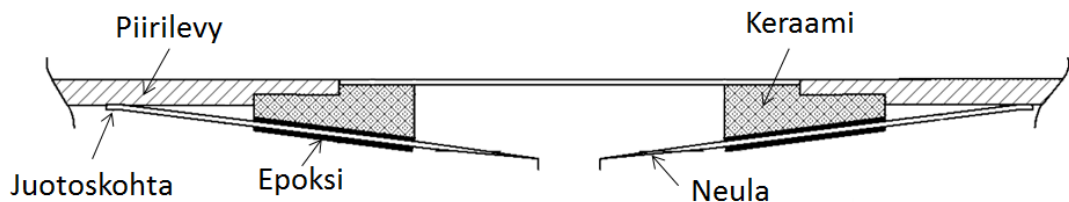
Yhden elementin tarkistus kestää tuotteesta riippuen keskimäärin 10 sekuntia. Kuvan 5 mittalaitejärjestelmä on varustettu kaksipaikkaisella neulakortilla ja sen takia mittalaitteitakin on tuplamäärä. Kamera varmistaa neulojen oikean sijainnin mitattaville pinnoille.



Kuva 5. Mittalaitejärjestelmässä oikealla testauslaitteet ja vasemmalla mittauspöytä

### 2.2.1 Mittaneulakortti

Mittaneulakortti (Kuva 6) on liitäntä mitattavan anturin ja sähköisen testausjärjestelmän välillä. Sen tarkoitus on luoda sähköinen kytkentä mitattavaan anturiin. Neulakortti koostuu piirilevystä, johon on kiinnitetty mittaneuloja haluttuun konfiguraatioon mekaanisen rakenteen avulla.

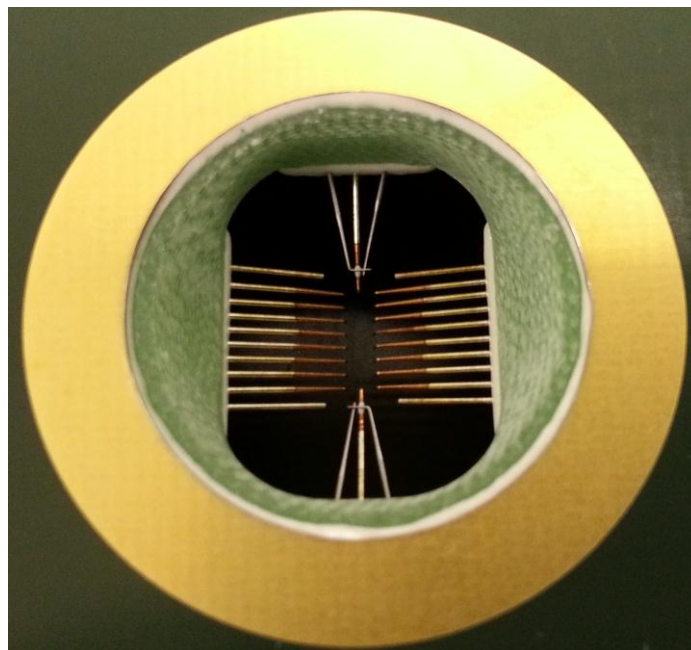


**Kuva 6. Neulakortin rakenne**

Muratan neulakorteissa yleisimmät neulojen materiaaleina käytettävät aineet ovat:

- Beryllium-Kupari (BeCu)
- Volframi (W)
- (Harvinaisempi) Volframi-Rhenium (WRe).

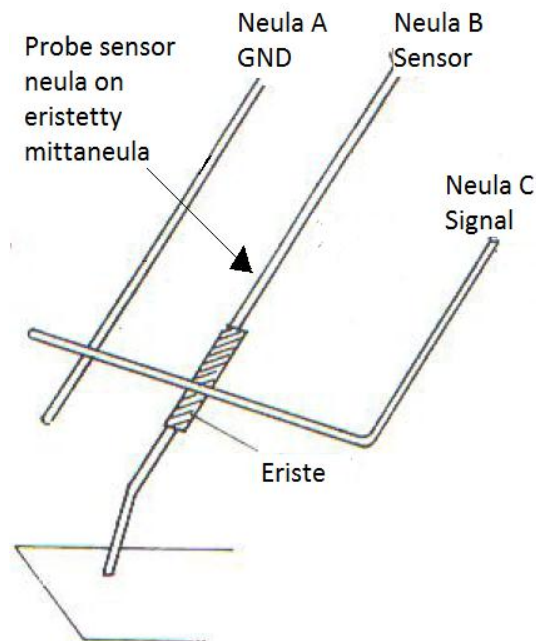
Yleisin neulakortti kombinaatio näistä on Beryllium-Kupari mittaneulat ja Volframi pinnantunnistusanurin kytkinneulat. (Kuva 7)



**Kuva 7. Beryllium-kupari mittaneulat ja volframi kytkin neulat**

### 2.2.2 Pinnantunnistusanturi

Pinnantunnistusanturi on yksinkertaisuudessaan neulakortin yhteen mittaneulaan integroitu mitattavan pinnan kontaktia tarkkaileva kytkin. Kun mittauksessa mittaneula B (Kuva 8) koskettaa anturin pintaa, tämä nostaa neulaa C keraamieristeellä. Kun taas C-neula nousee tarpeeksi korkealle, katkeaa sen kontakti neulaan A. Mittaava neula B on eristetty, jottei mittaustuloksiin ei tule häiriötä.



Kuva 8. Anturin kytkimen rakenne

Anturin kytkimelle on määritetty erilaisia ominaisuuksia neulakortin spesifikaatiossa. Materiaalina melkein kaikissa Muratalla käytetyistä neulakorteista kytkin on Volframia (W). Mittaneulojen materiaali neulakorteissa on Beryllium-Kupari (BeCu). (Taulukko 1)

Taulukko 1. Neulojen materiaalit TRIAX neulakortti

Neula	Nimi	Materiaali
A	GND (maadoitus)	Volframi (W)
B	Sensor	Beryllium-Kupari (BeCu)
C	Signal	Volframi (W)

Tämäntyyppinen kytkin, jossa pinnantunnistusanturi on mittaava ja eristetty on harvinaisen neulakorttitekniologia, jota ei löytynyt käytettävän muualla kuin Muratalla.



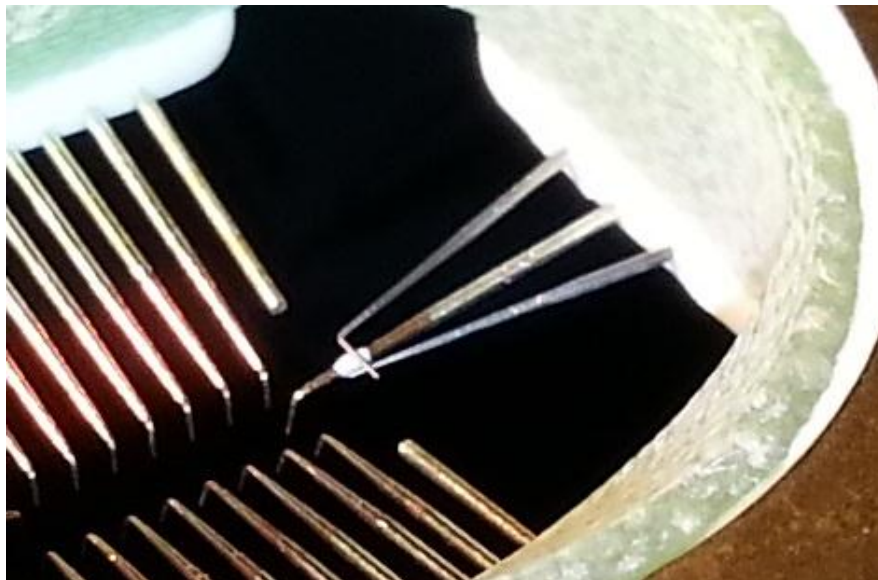
Kytkimen kontaktin aukaisemiseen tarvittava vertikaalinen liike, eli lepojännitys on z-suunnassa määritetty olevan  $30 \pm 2 \mu\text{m}$ . Tämä on se piste, josta laite tietää kytkimen olevan auki. Tähän lisätään vielä overtravel, eli ylimääräinen liike, jotta mittaneulat saavat hyvän kontaktin mitattavaan anturin pintaan. (Kuva 9)



**Kuva 9. Neuloja painetaan pintaan kiinni ajamalla kontaktikorkeudesta yli**

Overtravel on probereissa suuruudeltaan  $70 \mu\text{m}$ , joten kytkimen C-neula taipuu yhteensä  $100 \mu\text{m}$  z-suunnassa. Tämän takia sen materiaalin kovuus ja jäykkyys ovat tärkeitä.

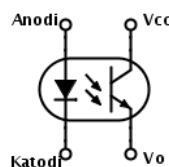
Mittalaitteita ajetaan tuotannossa ympäri vuorokauden. Tämä tarkoittaa sitä että kytkin (Kuva 10) aukeaa jokaista anturia mitatessa. Vuorokaudessa testataan antureita noin 8000 - 10 000 kpl yhtä testauslaitetta kohti. Kytkin siis joutuu kestäämään vuodessa noin 3 miljoonaa kontaktia. Tähän neulakortit eivät kuitenkaan pysty. Yleisin neulakortin korjaukseen ajava tekijä on kytkimen toimimattomuus vikaantumalla liian monta kertaa, jolloin se kuluu huoltotoimenpiteissä käyttökelvottomaksi.



**Kuva 10. Pinnantunnistusanturi neulakortilla**

### 2.2.3 Optoerotin

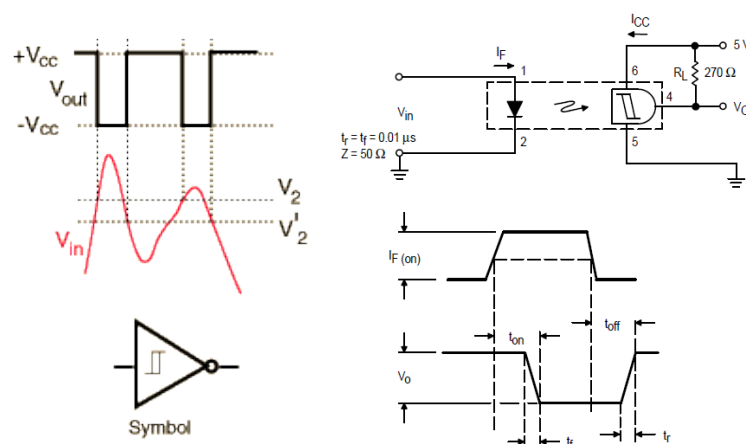
Kytkeyksen tunnistus on erotettu laitteen logiikalta optoeroittimella. (Kuva 11) Nämä elektronikan komponentit pystyvät liittämään ja eristämään erisuuruisia signaaleja toisistaan. Tällä tavalla voidaan toteuttaa ohjaavan ja ohjattavan signaalin välille galvaaninen erotus, siten voidaan eristää logiikan piirejä häiriöiltä. Komponenttina optoerotin sisältää infrapunaLEDin, fotodiodin ja transistorin. Se toimii seuraavasti. Kun ohjauspuolelta saatava jännite ylittää LEDin kynnysjännitteen, saa transistori fotodiodin kautta ohjauksen. Näin logiikka saa vain digitaalisessa muodossa olevaa signaalia ja se myös tekee optoeroittimesta digitaalisen komponentin. Kytkeyttäajat ovat nopeita, jopa alle mikrosekunnin luokkaa. Koska kynnysjännitteen tuntumassa voisi tapahtua nopeita tilanvaihdoksia, niin optoerotin toimii digitaalisena schmitt-liipaisimena.



Kuva 11. Optoeroittimen piirikaaviomerkki

### 2.2.4 Schmitt-liipaisin

Schmitt-liipaisin (Schmitt-trigger) osaa verrata kahden jännitteen tasoa toisiinsa. Se toimii komparaattorina ja kynnysjännitteen ylittäessään pyrkii säilyttämään uuden tilansa. Se on hyvä tapa poistaa kohinaa ja tehdä vaikka analogisesta siniaallosta kanttiaaltoja. Tässä sovelluksessa optoeroittimen liipaisin on invertoitu. Kuvassa 12 on selitetty toimintaperiaate ja liitteessä 2 sen kytkeytymisominaisuudet.



Kuva 12. Schmitt liipaisimen kytkeyttä kuvat [8]

### 3 Ongelman kuvaus

Ongelmana on mittalaittejärjestelmässä mittapöydän neulakortilla sijaitsevan kytkimen ajoittainen toimintahäiriö. Häiriön tapahtuessa laite menee vikatilaan, josta se ei pysty palautumaan ja mittaus keskeytyy. Ongelmaa esiintyy kaikilla laitteilla huolimatta siitä, että niissä on erilaisia neulakorttikonfiguraatioita. Jossain voidaan testata jopa neljää anturia samanaikaisesti, mutta yleisimmissä neulakorteissa vain kahta. Koska kytkin pitää olla aina tunnistamassa anturin pinta, niin kortilla voi olla jopa neljä kytkintä. Mittausjärjestelmiä on Muratalla kymmeniä. Näin ollen ongelmatilanteille alttiita kytkimiä on yli 100 kappaletta.

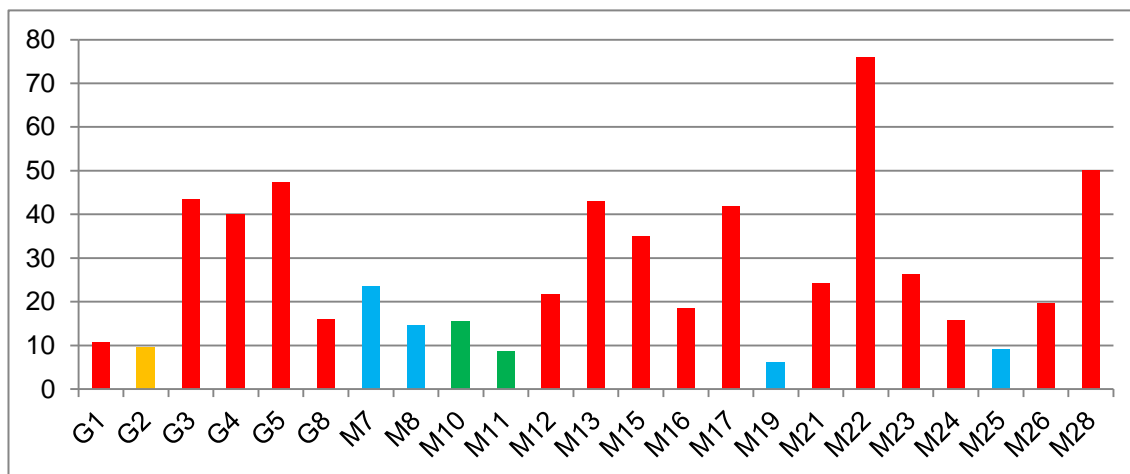
Ongelma esiintyy anturin mittauksen jälkeen mittapöydän askeltaessa seuraavalle anturille kun kytkin jää auki. Kytkimen neulojen välille ei enää tule hyvää sähköistä kontaktia vaikka ne fyysisesti ovatkin jännittyneinä toisiaan vasten. Kun Mittapöytä laskeutuu neulojen korkeudelta, luulee laitteen logiikka kytkimen kautta sen olevan vielä kontaktissa koska kontaktin sähköinen piiri ei ole sulkeutunut. Laite näkee tämän kriittisenä virheenä ja laskee mitattavat anturit turvalliselle tasolle. Sen jälkeen se antaa virheilmoituksen ja testaus keskeytyy.

#### 3.1 Vaikutukset tuotantoon

Vikaantumisella on tuotannollisia vaikutuksia johtuen testauksen keskeytymisestä ja sen uusiutumisesta. Muratan lopputestauksessa testataan eri tuotteita, joilla mittauksen ajat vaihtelevat neljästä tunnista 12 tuntiin. Kytkimen toimintahäiriön tapahtuessa pitkän mittauksen loppupuolella tarkoittaa sitä, että tämä tuotantoaika on menetetty. Myöskään uudelleen aloitusta mittaukselle ei voida aloittaa ennen huoltotoimenpiteiden ja SPC-testianturin (tilastollinen prosessinohjaus) mittausta. Mittauksen tulokset tulee vielä tarkistaa testausryhmän puolesta, jotta laite voidaan palauttaa tuotantoon.



Laitteiden vikalokitiedostoista kerättiin tietoa, josta käy ilmi vikojen ilmaantuminen vuosisatasolla jokaista testauslaitteistoa kohti. Kaaviosta kuvassa 13 käy ilmi muutamia kiinnostavia yksityiskohtia.



Kuva 13. Probereiden vikatiheys pyöristettynä kpl/vuosi

Probauslaitteistona käytettävästä Pegasus S200 mallista on neljä eri sukupolvea. Mark1 (Vihreä) ja Mark2 (Oranssi) (Kuva 13) sukupolvet erottuvat selkeästi edukseen vikojen vähyydessä. Mark3 ja Mark4 Näkyvät punaisella ja niissä on eniten vikoja. Valmistajalta saamien piirikaavioiden mukaan näissä onkin käytetty hieman erilaisia sähköisiä piirejä pinnantunnistusan turin kytkimelle. Kytkimen tunnistustapa on paljon enemmän häiriötä kestävämpi kuin uudemmissa malleissa. Vanhemmissa malleissa käytetään korkeampaa jännitettä ja kytkimen kontaktin sähköinen resistanssi saa olla kymmenen kertaa suurempi kuin uudemmissa malleissa. Mark3 sukupolvea lähtien piiri on suunniteltu uudelleen ja jännitettä on laskettu tasolle 5 V, kun vanhoissa se oli 15 V.

Muissa laitteissa (sininen väri) on vikoja vähemmän erilaisista syistä johtuen. Laitteistot M7, M8, M19 ja M25 ovat olleet vähemmällä käytöllä niiden tuotetypistä johtuen (Kuva 13). Mutta näissäkin kytkin vikaantuu tasaisin väliajoin ja eivät ole välttyneet ajoittaisilta huolloilta.

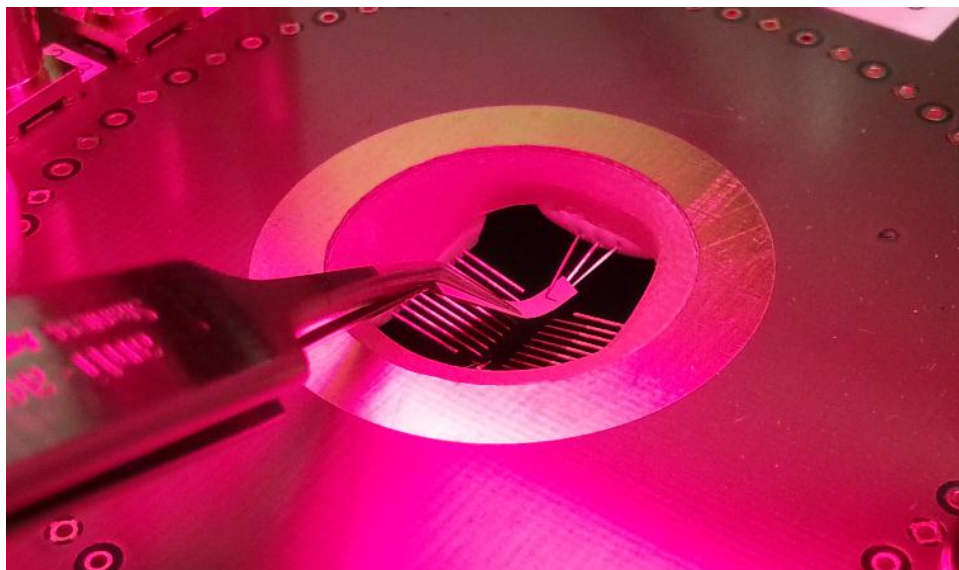
Tässä vaiheessa on hyvä tietää että laitevalmistaja ei ole vastuussa neulakorttien rakenteista ja ne tilataan erilliseltä neulakorttivalmistajalta omien spesifikaatioiden mukaan. Jokaisella laitteella itsessään on valmius neljälle kytkimelle ja liittimet tuodaan signaalikaapeleilla neulakortille laitteen takaa. Neulakortti ja mittalaite eivät ole siis osa samaa järjestelmää.

Neulakorttien rakenteet on suunniteltu yrityksen testauslaitteistojen elinkaaren alkuaikoina, kun tuotantoa on alettu ajaa ylös. Ongelma oli silloin harvinainen, koska ensimmäisen ja toisen sukupolven laitteet olivat vikasietoisempia. Kuitenkin neulakorttien kytkimen rakenteet ja materiaalit ovat pysyneet samoina ja eivät toimi hyvin uudempien laitteiden kanssa.

### 3.2 Nykyinen huoltotapa

Kun pinnantunnistusanturin kytkimen vika tapahtuu, testauslaite menee vikatilaan. Operaattorin huomattessa tilanteen heillä ei ole mitään muuta tehtävissä kuin soittaa laiteryhmä paikalle. Laiteryhmä aloittaa huollon kytkemällä yleismittari kytkimen molemmiin puoliin ja mittaa kontaktin resistanssin  $C_{res}$ . Hyvän kontaktin  $C_{res}$  arvo on 2 - 5  $\Omega$ . Yleensä, kun vika ilmaantuu, on mitattavissa oleva  $C_{res}$  arvosta 50  $\Omega$  ylöspäin. Usein kontakti voi olla jopa suuruusluokkaa kilo-ohmi. Kontakti täytyy siis puhdistaa tavalla tai toisella.

Kun yleismittari on kytketty tarkkailemaan kontaktin vastusta, voidaan alkaa puhdistaa kontaktipintoja. Tämä tapahtuu mittausslaitteiden neulakorttien puhdistukseen soveltuvalla 2  $\mu\text{m}$ :n paksuisella piikarbidi hiomapaperilla. Paperi on tarkoitettu pääasiassa neulojen kärkikontaktien puhdistamiseen. Kytkimen puhdistuskäyttöön tämä erikoishiomapaperi soveltuu niin, että leikataan pieni palanen ja hiotaan sillä varovasti kontaktinvälipintaa. (kuva 14)



Kuva 14. Kytkimen puhdistusta piikarbidi hiomapaperilla

Kytkimen puhdistus vaatii todella tarkkaa ja vakaata kättä. Pelkkä hiomapaperin ujutaminen kontaktin väliin voi viedä useita minuutteja. Hiomapaperi menee joskus kontaktin väliin liian helposti ja kontaktihäiriö voi johtua kytkimen heikosta lepojännityksestä. Huono lepojännitys on yleensä aiheutettu taivuttamalla neuloja juurikin huoltovaiheessa. Hionta tapahtuu hellävaroin ja tämän jälkeen tarkastetaan  $C_{res}$  yleismittarista. Kun sähköinen kontakti on hyvä 2 - 5  $\Omega$ , voidaan mittauslaitteisto käynnistää uudelleen. Tämän jälkeen ajetaan ns. SPC-testi.

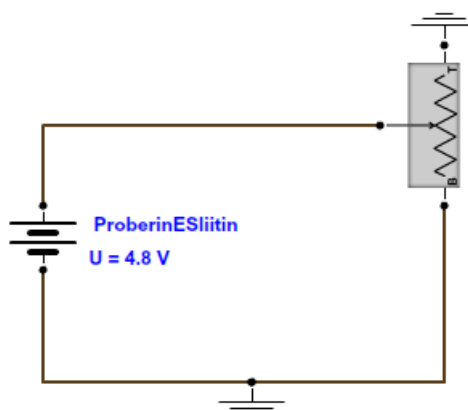
SPC-testillä varmistetaan, että mittalaitteen kyvykkyydessä ei ole tullut mitään muutoksia. Pinseteillä ja hiomapaperilla neuloihin koskeminen voi aiheuttaa häiriöitä ja tämä pitää varmistaa ennen uuden testausprosessin aloittamista. Testi ajetaan mittalaittejärjestelmälle myös päivittäin, jolloin pystytään varmistamaan mittauksen laatu. Testissä mitataan yhtä referenssianturia (Golden Sample) viisi kertaa peräkkäin ja katsotaan onko mittaustuloksissa eroa. SPC-testin tulokset pitää tämän jälkeen käydä varmistamassa mitta-analyysiohjelman avulla. Tällä kritisoidaan tiettyjä rajoja ja verrataan niitä edellisiin tuloksiin. Jos tuloksissa ei ole rajojen ylityksiä, voidaan laite palauttaa tuotantokäyttöön. Kokonaisuudessaan huoltotoimenpiteet kestävät yleensä 10–20 minuuttia riippuen siitä kuinka helposti kontaktipinnan puhdistus onnistui. Kokonaisuudessaan laitteisto on kuitenkin alhaalla pitempään. Siihen vaikuttavat operaattorin huomaavaisuus ja laiteryhmän kiireisyys.

Laitteisto ei anna varoitussignaalia vian tapahtuessa. Se vain pysähtyy ja sen valomajakkan vihreä valo muuttuu puna-keltaiseksi. Kun operaattori huomaa virheen on heidän otettava yhteys laiteryhmään, joka tulee paikalle puhdastilahuoneeseen kun kiireiltään ehtii. Kokonaisuudessaan keskivertoarvona kytkimen putsaus kestää siis 30 - 60 minuuttia.

## 4 Häiriön tutkiminen

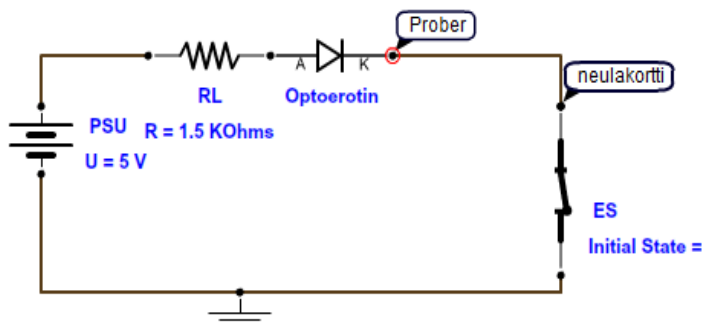
### 4.1 Sähköiset mittaukset

Sähköisissä mittauksissa tutkittiin ensin kuinka suuri kontaktiresistanssi ( $C_{res}$ ) kontaktien välillä täytyy olla, jotta piiri jää auki. Tutkittavaksi laitteeksi valittiin vikaherkkä malli Mark3. Tehtiin koekytkentä (kuva 15) jossa pinnantunnistusanturin kytkimen tilalle laitettiin säätövastus.



Kuva 15.  $C_{res}$  mittauksen kytkentä kaavio

Todettiin että noin 4 k $\Omega$  vastuksella proberin logiikka kertoo kytkennän olevan auki ja noin 3 k $\Omega$  vastuksella kiinni. Mittapiste on mahdollinen vasta optoerottimen ja sen etuvastuksen jälkeen proberin takaa. Tämän takia jännite mittapisteestä on vain 4.8 V. Näitä tuloksia tukee myös optoerottimen teknisten ominaisuuksien, [liite 2] sekä Proberin sisäisen piirin (kuva 16) kytkentämallinnus.



Kuva 16. Pinnantunnistusanturin piirin sisäinen kytkentä

Myös laskennallisesti ja vertaamalla optoerottimen kytkentäominaisuuksia [Liite 2] nähdään kynnysjännite, jolla proberi tunnistaa tilan. (Huom. optoerottimen kytkimen tulo on invertoitu)

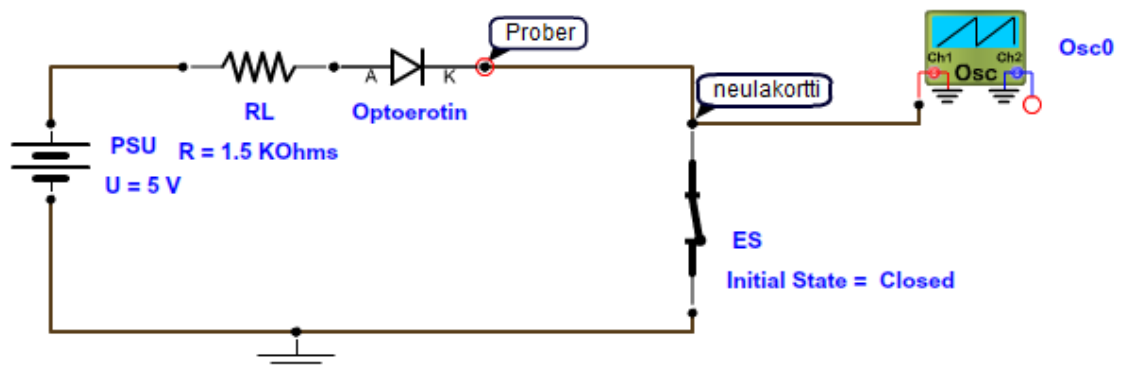
$$\mathbf{Off} = \frac{C_{res}}{R_L + C_{res}} \times U = \frac{4 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega + 4 \text{ k}\Omega} \times 4.8 = 3.5 \text{ V}$$

$$I = \frac{U}{C_{res}} = \frac{3.5 \text{ V}}{4 \text{ k}\Omega} = 0.85 \text{ mA}$$

$$\mathbf{On} = \frac{C_{res}}{R_L + C_{res}} \times U = \frac{3 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} \times 5 \text{ V} = 3.2 \text{ V}$$

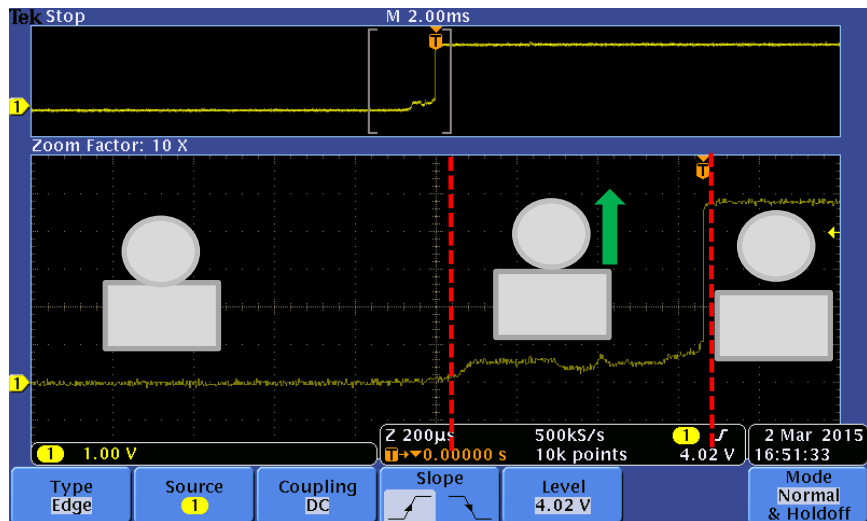
$$I = \frac{U}{C_{res}} = \frac{3.2 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 1.05 \text{ mA}$$

Oskilloskoopilla tehtiin mittauksia selvittääksemme kuinka nopea kytkentävaihe on. Oskilloskooppi laitettiin seuraamaan jännite eroa kytkimen yli koekytkentäkuvan (Kuva 17) mukaisesti.

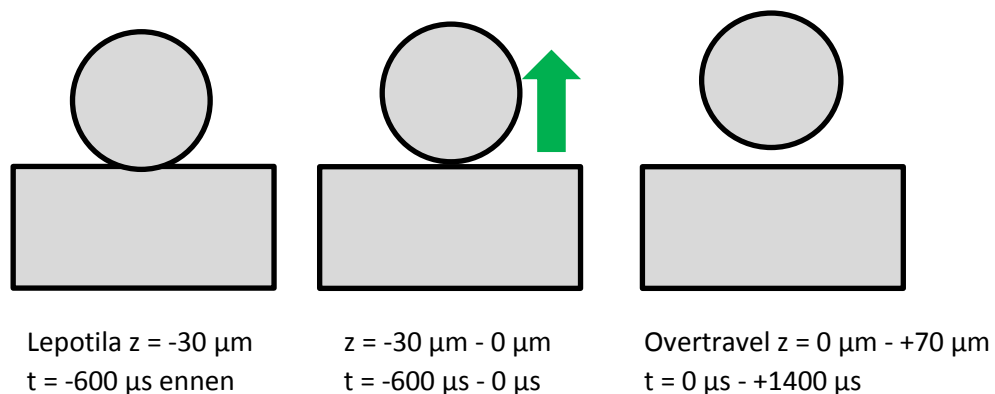


Kuva 17. Koekytkentä oskilloskooppimittauksessa

Mittauksessa (Kuva 18) laitteelle asetettiin normaali tuotantokiekko ja proberin neuloja ajettiin normaalilla z-akselin nopeudella mittauksen overtravel korkeuteen. Kytkimellä huomattiin kolme selkeää vaihetta. Sekvenssikuvasta 19 selitetään kytkimen vaiheet verrannollisesti kuvan 18 aikajanalle. Kytkimen vaihtotila kuvaa aikaa  $t = 0$ .



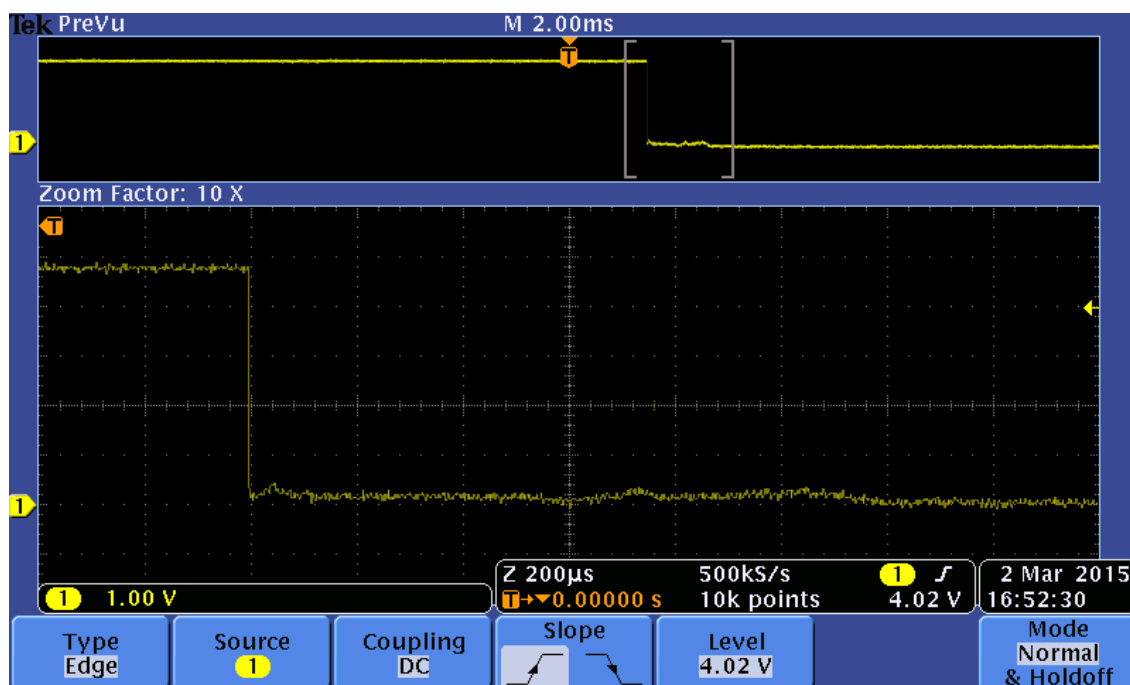
Kuva 18. Oskilloskooppimittaus kytkimen avautumisesta



Kuva 19. Sekvenssikuva neulojen kontaktin erotusvaiheesta

Ensimmäisessä vaiheessa kytkin on lepotilassa  $z = -30 \mu\text{m}$  @  $t < -600 \mu\text{s}$  ja jännite on 0 V koska neulat lepäävät lepojännityksellä toisiaan vasten. Vaiheessa kaksi:  $z = -30 \mu\text{m} - 0 \mu\text{m}$  @  $t = -600 \mu\text{s} - 0 \mu\text{s}$  neulat liikkuvat toisiaan vasten avautuessaan lepojännityksestä. Mitattava jännite kytkimen yli nousee koska resistanssi laskee hieman. Vaiheessa kolme kontaktit erkanevat ja kytkimen yli on mitattavissa piirin koko 4.8 V jännite.

Anturin kytkimen sulkeutuminen tapahtuu käänteisesti samassa järjestyksessä ja samat vaiheet pätevät myös tässä tilanteessa. (Kuva 20) Ensin kontaktipinnat kohtaavat, tila vaihtuu ja sen jälkeen ne asettuvat hetken lepoasentoon toisiaan vasten. Näitä sähköisiä mittauksia pystyttiin nyt käyttämään referenssinä vian tutkimiseen.



Kuva 20. Oskilloskooppimittaus kytkimen sulkeutumisesta

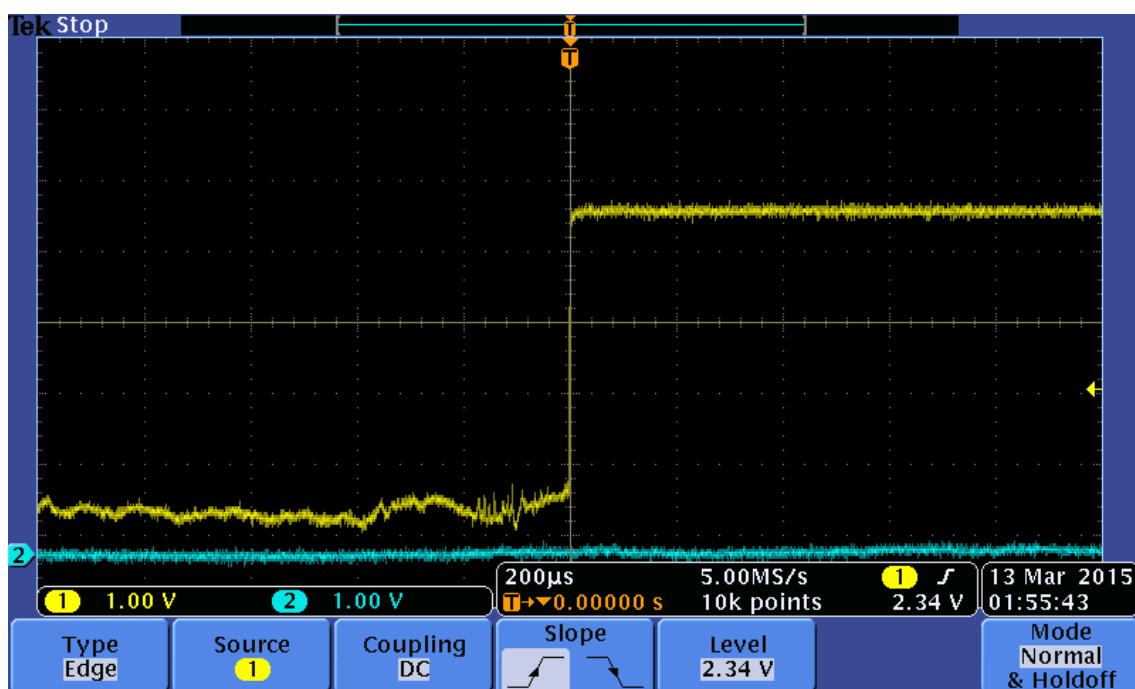
#### 4.2 Mittaukset anturin kytkimen toimintahäiriön ollessa päällä

Kun mittalaite oli pysähtynyt vian takia, päästiin mittaamaan millaiselta kytkentävaihe korkeilla  $C_{res}$  arvoilla näyttävät oskilloskoopilla. Käytettiin samaa koekytkentää, (kuva 17) joissa otettiin myös oskilloskoopin kanava Ch2, eli toinen kanava käyttöön mittaamaan kaksipaikkaisen neulakortin toista kytkintä samaan aikaan. Ensin mitattiin kummankin kytkimen  $C_{res}$  arvo joka oli S1 (Sininen)  $18 \Omega$  ja S2:lla (keltainen)  $23 \Omega$ . Kumpikaan näistä arvoista ei ole suoraan vastuullinen arvoiltaan viasta, mutta vikaloki kertoo että S2 oli jäänyt auki ja antanut vian.

Seuraavissa testeissä tehtiin kymmeniä kontaktin avaamisia ja sulkemisia, jotta nähtäisiin miten kytkimet käyttäytyvät korkeammilla  $C_{res}$  vastusarvoilla.

#### 4.2.1 Testi 1. Kytkimien avautumisen välinen aikaero

Ensimmäisestä testistä (Kuva 21) käy ilmi että samalla tarkkuudella kuin edelliset mitaukset eli 200  $\mu$ s/ruutu, ei saatu molempien kytkinten avautumista tallennettua samalle aikajanalle. Tämä johtuu siitä, että kytkimet eivät koskaan ole fyysisesti täysin samalla korkeudella. Kun proberi saa ensimmäiseltä kytkimeltä tiedon kosketuksesta se alkaa nostamaan mittapöytää overtravel korkeuteen hitaammalla tahdilla. Eli mittapöytä nousee vielä 70  $\mu$ m yli kontaktipisteen. Hitaampi vauhti ei vahingoita neuloja ja neulojen jäljet kontaktipinnalla pysyvät hallittuina.

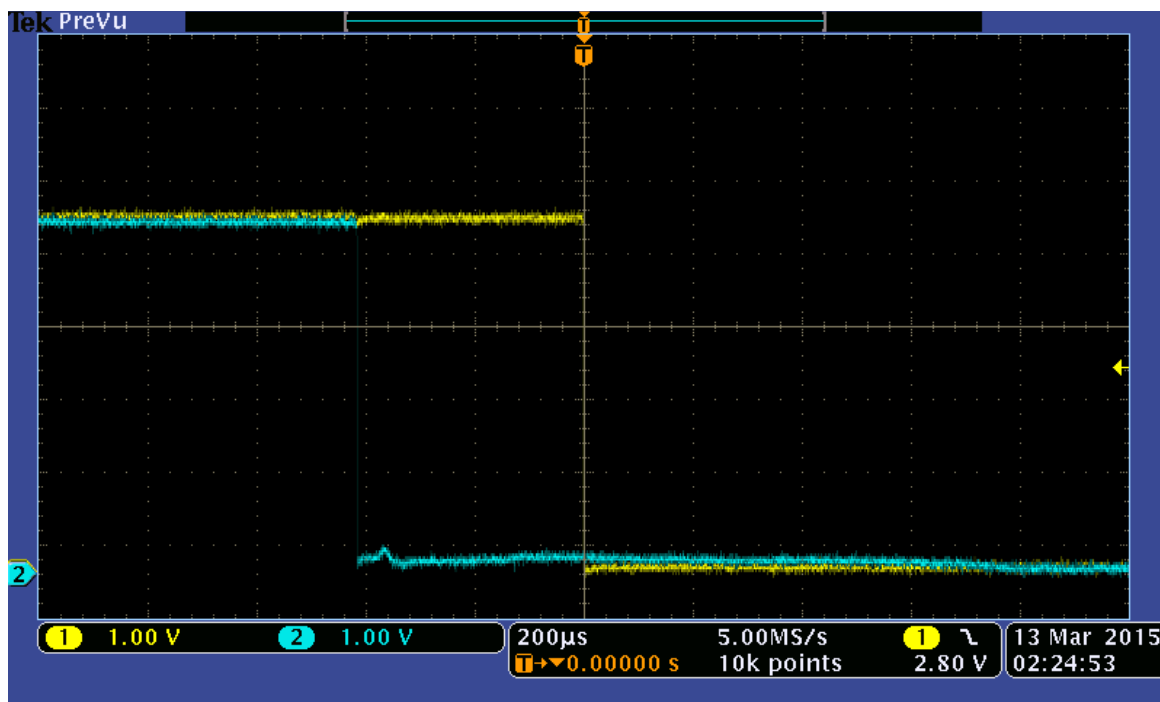


Kuva 21. S2 osuu ensin anturille ja S1:n kontakti ei mahdu kuvaan



#### 4.2.2 Testi 2. Kytkimien sulkeutuminen

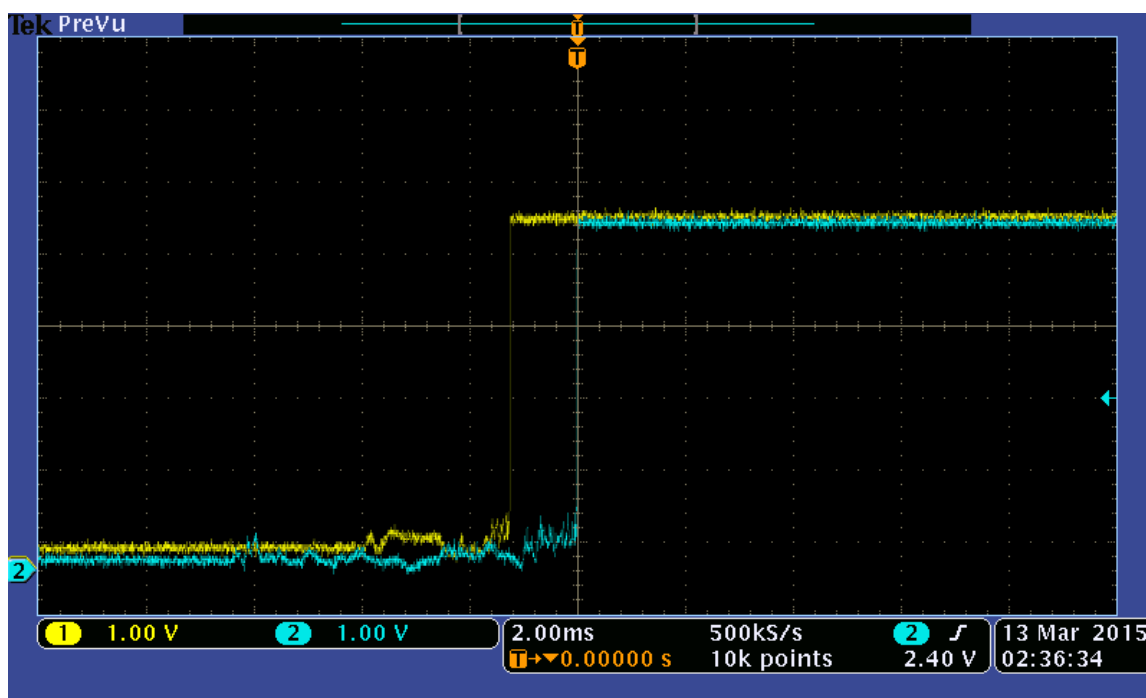
Seuraavassa testissä (Kuva 22) mittapöytä lasketaan takaisin alas neulojen korkeudelta. Tämä tapahtuu jarruttamatta ja z-akselin täydellä nopeudella ja näin ollen kummankin kytkimen sulkeutuminen taltioidaan tällä tarkkuudella. Tästä testistä myös huomaa että S1 eli sininen sulkeutuu ensin. Tämä myös vahvistaa sen että sen aukeamiskorkeus on ylempänä kuin S2 kytkimen.



Kuva 22. S1 ja S2 sulkeutuvat lähes samanaikaisesti

#### 4.2.3 Testi 3. Kytkimien avautumisen välinen viive

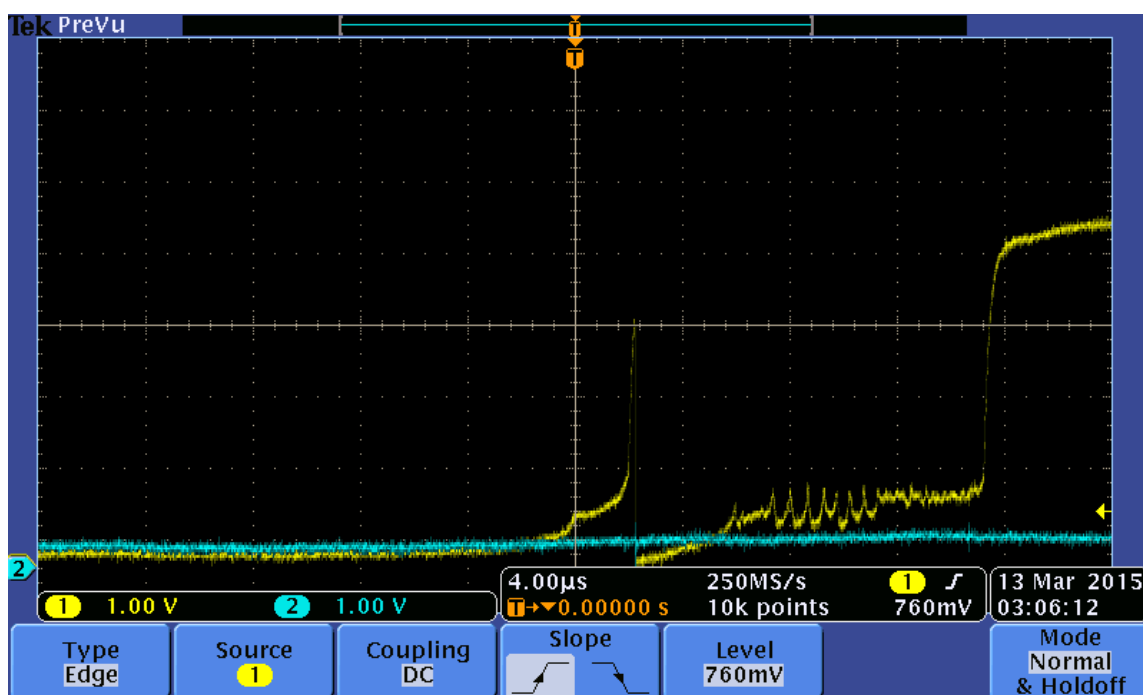
Seuraavassa testissä oskilloskoopin aikajanaa skaalataan suuremmaksi, nähdään molempien kytkinten avautuminen samassa kuvassa. (Kuva 23) Kuvassa on aikajanan pituus 2 ms/ruutu ja voimme todeta että S1 (Sininen) jää jälkeen yli millisekunnin S2 (keltainen) perässä. Tässä kuvassa myös näkyy että ennen avautumista on havaittavissa pientä häiriökäyttäytymistä.



Kuva 23. 2 ms/ruutu tarkkuus kytkimien aukaisussa

#### 4.2.4 Testi 4. Häiriökäyttäytymisen havainnointia avausvaiheessa

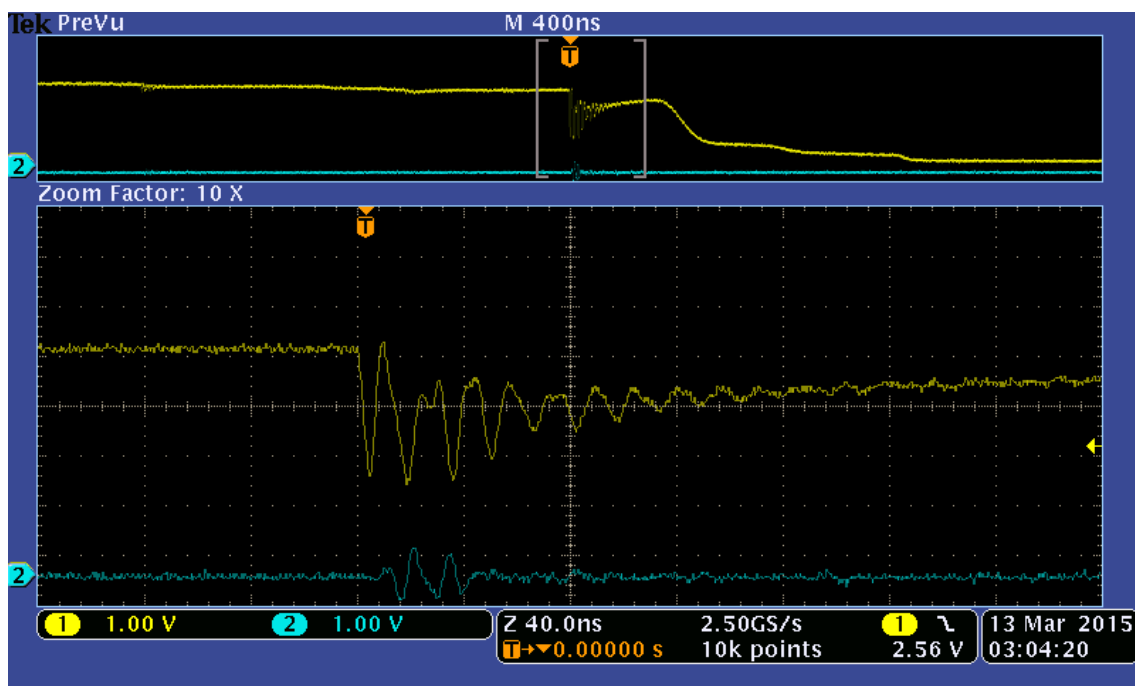
Seuraavaksi tehtiin toistuvia kytkinten aukaisuja ja sulkemisia. Tarkoituksena oli löytää referenssikuvista poikkeavaa käytöstä. Muutaman tilamuutoksen jälkeen olikin taltioitu erilaisia häiriökäyttäytymisiä. Näistä ensimmäisenä testi (Kuva 24) jossa S2:n (keltainen) avautumistilanteessa tapahtuu ensin piikki, jonka jälkeen se saa taas kontaktin. Tämän jälkeen se värähtelee hetken laskien kokoajan  $C_{res}$  arvoaan kunnes tapahtuu kontaktien erkaneminen. Myös kontaktien erkanemispisteessä ei nähdä referenssikuvan kaltaista suoraa transitiota vaan loiva nousu jännitteessä loppuvaiheessa. Samanlaisia mittauksia saatiin useita ja niiden perusteella voitaisiin päätellä että kontaktien erkanemisessa tapahtuu usein jännitepiikkejä ja häiriökäyttäytymistä.



Kuva 24. Häiriökäyttäytyminen S2 Aukaisutilanteessa

#### 4.2.5 Testi 5. Häiriökäyttäytymisen havainnointia sulkeutumisvaiheessa

Kontaktien sulkeutumisesta jossa virhetila tapahtuu, saatiin seuraavanlaisia mittaustuloksia. (Kuva 25) On hyvä esimerkki monesta samankaltaisesta mittauksesta. Tässä mittauksessa on aikajana skaalattu todella tarkaksi (40 ns/ruutu). S1 (Sininen) on tilanteessa sulkeutunut jo ennen kuvaa. S2 (keltainen) on sulkeutumassa mutta sulkeutumistilanteessa värähtelee ja vähitellen sulkeutuu kun mittapöytä liikkuu ylös ja kontaktipaine neulojen välillä paranee.



Kuva 25. Värähtelevä alkukontakti joka näkyy myös toisen kytkimen mittauksissa

Sähköisistä mittauksista voidaan päätellä että kontaktin tekeminen ja sen aukaiseminen tuottavat vaikeuksia. Eli pinnalla on kertynyt jotain ylimääraistä, joka estää hyvän kontaktin neulojen välille. Seuraava vaihe onkin tutkia kontaktipintojen kuntoa.

### 4.3 Kontaktipinnan tutkiminen

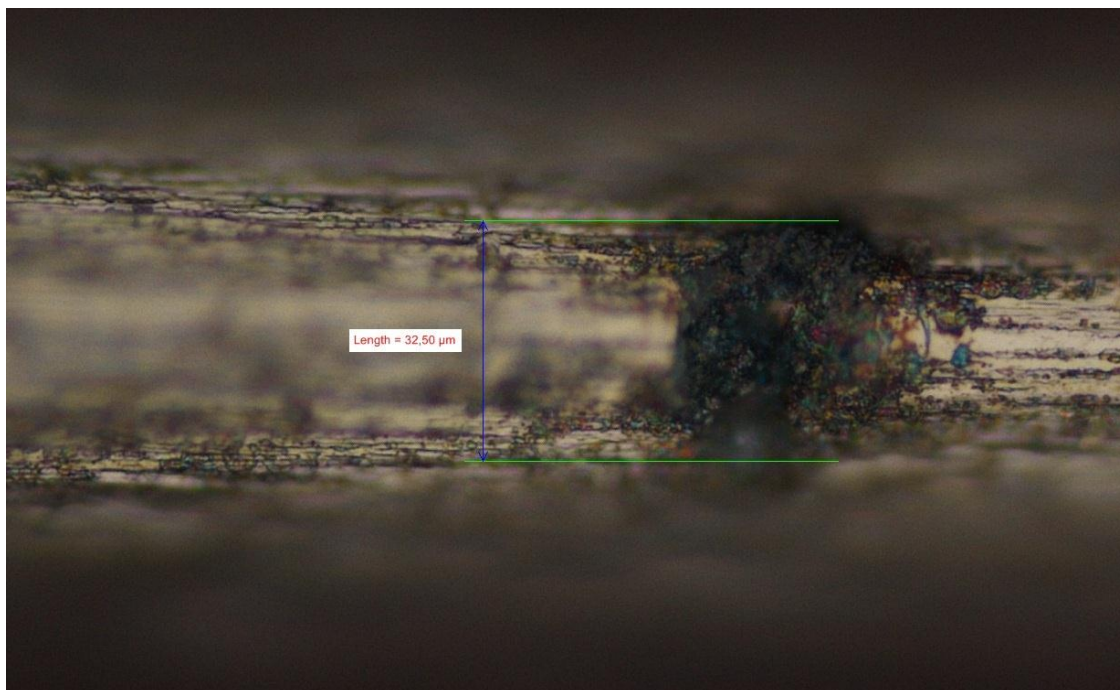
Kontaktipinnan tutkiminen oli haastavaa sille tehtävien huoltotoimenpiteiden takia. Oli vaikea löytää hyvää yksilöä jossa olisi kontaktipinta, jota ei olisi hiottu tasaiseksi. Kontaktipintaa ei pystynyt myös tutkimaan ehjästä neulakortista. Vaan oli odotettava neulakortin hajoamista, jotta siitä sai irrotettua pinnantunnistusan turin kytkimen neulat pihdeillä.

Tutkittavaksi neulakortiksi päätyi kesällä 7.8.2014 käyttöön otettu tuotanto neulakortti. Kortti päätettiin lähettää huoltoon 386532:n kontaktin jälkeen 11.11.2014, koska se oli kärsinyt lukuisista ongelmista. Tässä kortissa oli toinen anturin kytkin säästynyt puhdistuksilta ja toinen oli taas puhdistettu useaan kertaan. Eli täydellinen tutkimuksiin.

Kytken kontaktipinnassa suoralla neulalla on nähtävissä mikroskoopilla tummaa aluetta (Kuva 26 & s 27. Kuva 27). Tämä kyseinen neula tältä kortilta oli harvinainen tapaus. Se ei ollut vielä kertaakaan antanut virhettä ja näin ollen kuvasta näkee miten noin 400000 kontaktin kytkeytymistä jättää jälkensä neulaan. On selvää että lämpötila kontaktikohdalla on ollut ainakin hetkellisesti suuri koska kohta näyttää palaneelta.

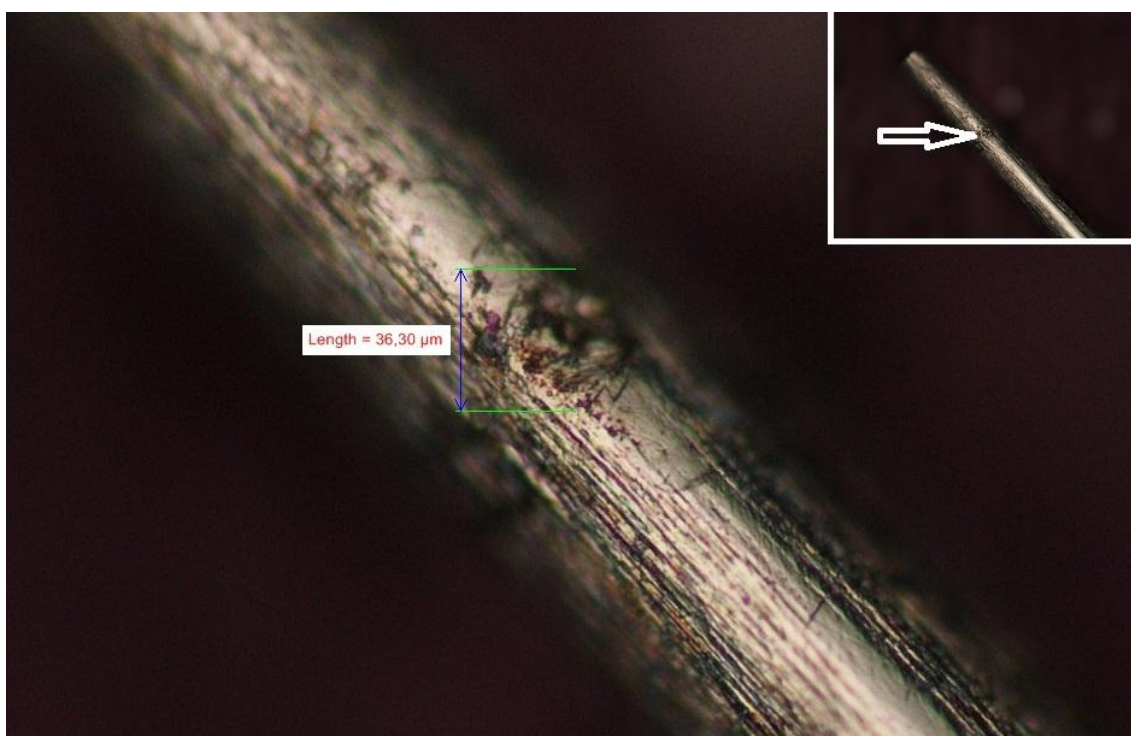


Kuva 26. Mikroskooppikuva 20x suurennos suora kytkimen neula 386532kpl kontakteja



Kuva 27. Mikroskooppikuva 50x suurennos suora kytkimen neula 386532kpl kontakteja

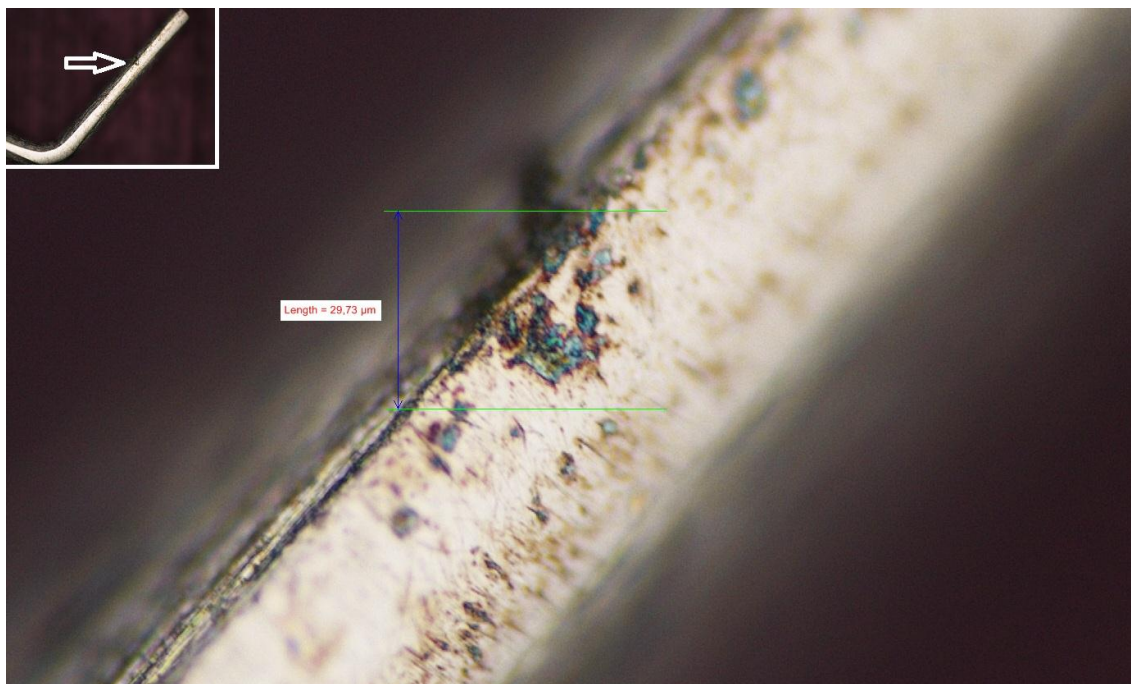
Myös saman kortin toiselta kytkimeltä (Kuva 28) löytyy samanlaisia tummentumia. Tämä kytkin oli vikaantunut monesti ja siinä näkyy jo selvästi mitä hionta huoltotyöt neulan pinnalle aiheuttavat.



Kuva 28. Mikroskooppikuva 20x Kytkimen suora neula huollettu useaan kertaan

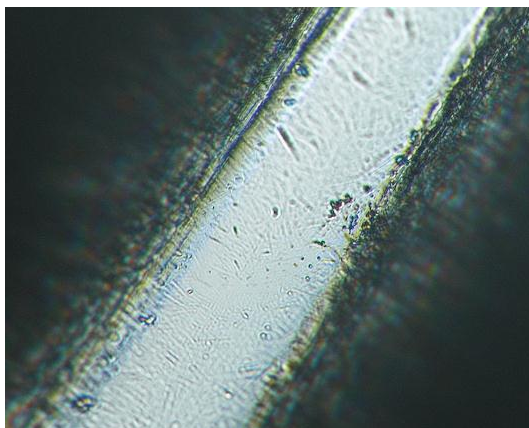


Neulan L muotoinen vastakappale (Kuva 29) on kuvassa muotoutunut jo litteäksi aggressiivisen hionnan tuloksena. Kuvasta näkyy kuitenkin selvästi kontaktin osumakohta hiotullakin pinnalla.



**Kuva 29. Mikroskooppikuva 20x L muotoinen neula huollettu useaan kertaan**

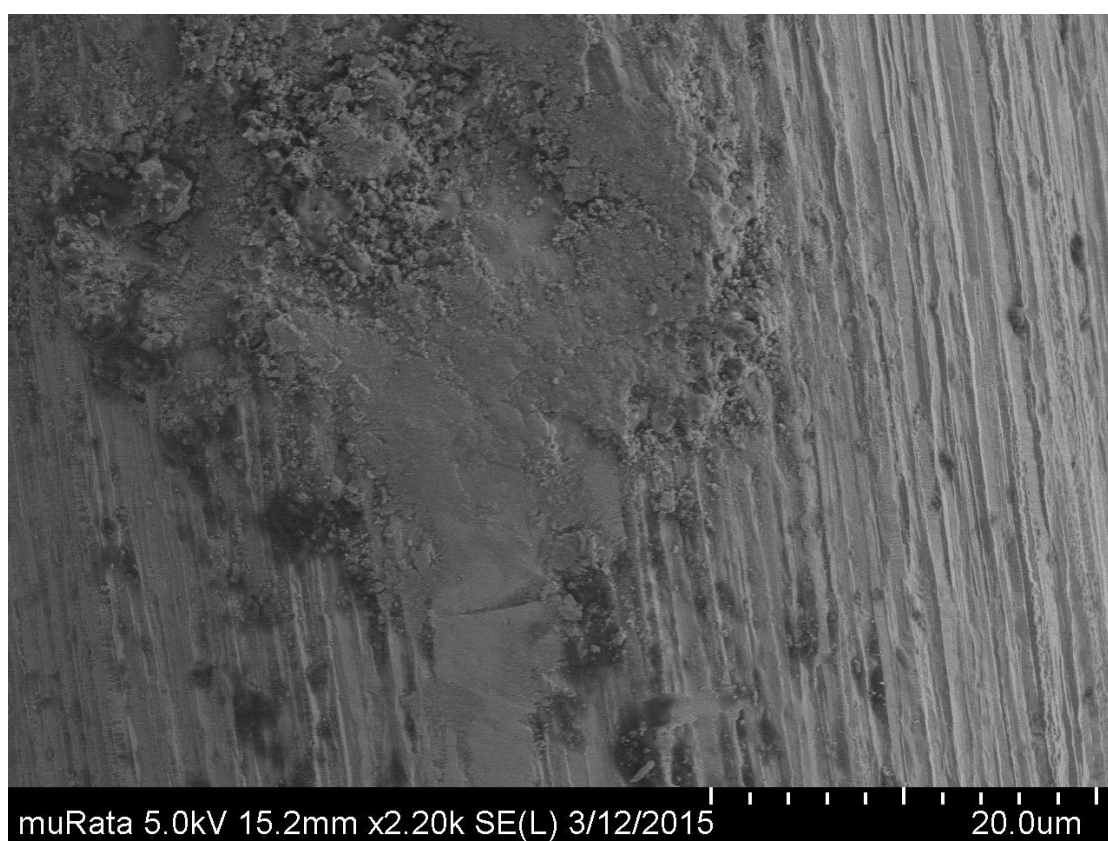
Kuvien perusteella on selvää että korkean kontakti resistanssin ( $C_{res}$ ) alkuperä löytyy ilmiöstä, joka tapahtuu neulojen kontaktissa tapahtuvasta fysikaalisesta ilmiöstä. Mikroskooppien kuvat eivät vielä kerro tarpeeksi ilmiöstä ja siihen tarvittiinkin tarkempia menetelmiä kuten elektroni-mikroskooppia ja röntgenspektrometri-analyysiä. Mikroskooppikuvista kuitenkin nähdään väri joka näyttää enemmän pronssilta kuin puhtaalta volframilta, joka on metallin harmaata. Tämän värin selittäisi oksidikerros neulalla. Volframi-oksidille ( $WO_2$ ) on ominaista juuri pronssinen väri. [7] Seuraavassa kuvassa 30 on vastahiottu neulan pinta. Volframin oma ominaisväri on helposti havaittavissa. Hapen kanssa reagoinut pinta on reunoilla pronssinen.



**Kuva 30. vasta hiottu volframineulan pinta**

#### 4.3.1 SEM-kuvat

Kontaktipinnassa tapahtuvan ilmiön alkuperää tutkittiin SEM (Scanning Electron Microscope) eli elektroni-mikroskoopilla. Näytteeksi valittiin kuvissa 26 & 27 esiintyvä suora neula. Kuvassa 31 on selvästi havaittavissa eroosiota kontaktipinnassa. Kuvasta voi päätellä että volframi ikään kuin räiskyy vasemman yläkulman kraatterimaisesta muodostumasta. Tämä kohta on se piste missä neulat ensin osuvat toisiinsa. Volframi näyttää räiskyneen tästä kraatterista, jonka pohjalla on tummempaa kokkaremaista materiaalia. Kuvasta myös näkee pientä pinnan hioitumista ja painautumista, jonka neulan vastakappale sille aiheuttaa kontaktipaineen takia.



Kuva 31. SEM kuva suoran neulan kontaktikohdasta

Kuvan 29 kraatteri ja sen ympäristö näyttivät erittäin mielenkiintoisilta, joten paikasta otettiin uudet tarkemmat kuvat. Kuvat ovat eri menetelmillä otetut samasta paikasta [Liite1]. Näyte on vain kääntynyt SEM-laitteen sisällä, koska kuvat on otettu eri testauspäivänä. Ensimmäisestä kuvasta näkyy kraatterin topografiset ominaisuudet ja toisesta kidemäinen rakenne alueella. Pelkkä antureiden välinen kontakti ei selitä tätä kulumisilmiötä. Kontaktipinnalle tehtiin seuraavaksi röntgenspektrometri-analyysi määrittämään sen pinnalla olevat alkuaineet.



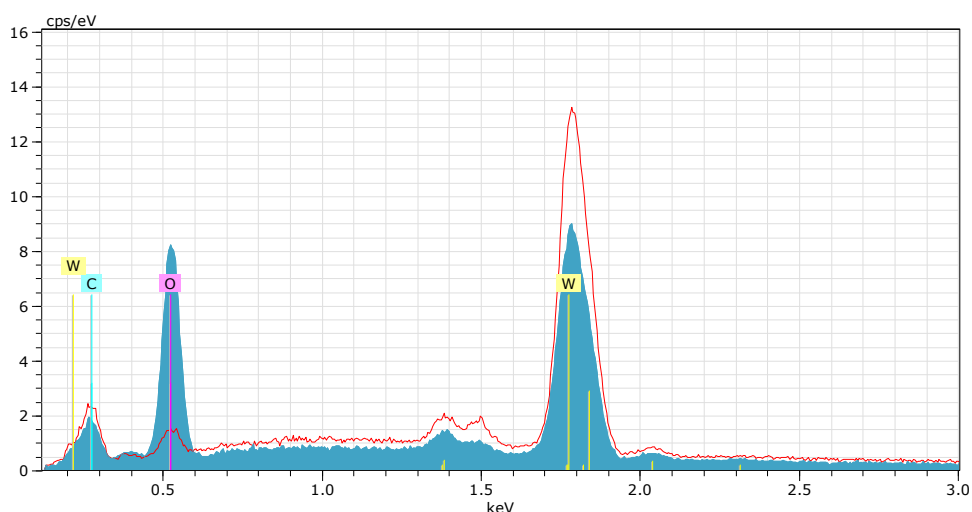
#### 4.3.2 EDS-analyysi

EDS-analyysin (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) eli energiadiispersiivisen röntgenspektrometri analyysin avulla pystyttiin määrittämään mitä alkuaineita neulan pinnalla oli. Neula itsessään on Volframia joten kaikki muu sen pinnalla on ylimääräistä materiaalia. Ensimmäinen mittaus (Kuva 32) tehtiin keskeltä painautuneen näköistä kohtaa. Keskimäinen neliö kuvaa mitattavaa neliötä ja sivulla oleva referenssi neliön pitäisi olla puhtaammalla volframipinnalla.



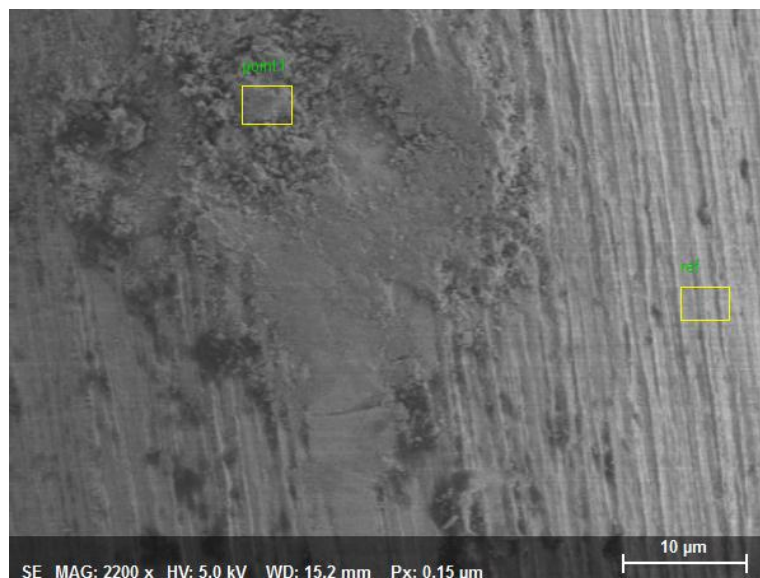
Kuva 32. EDS-analyysi mittapaikat keskikohdasta

Tuloksia (Kuva 33) tulkitaan niin että punainen äärioviiva on referenssineliön sisältä löytyvät alkuaineet ja sininen värillinen käyrä on Point1 mittapistestä löytyvät alkuaineet. Taustakohinaa ei oteta huomioon. Pelkät piikit tuloksissa voidaan tulkita alkuaineiksi.



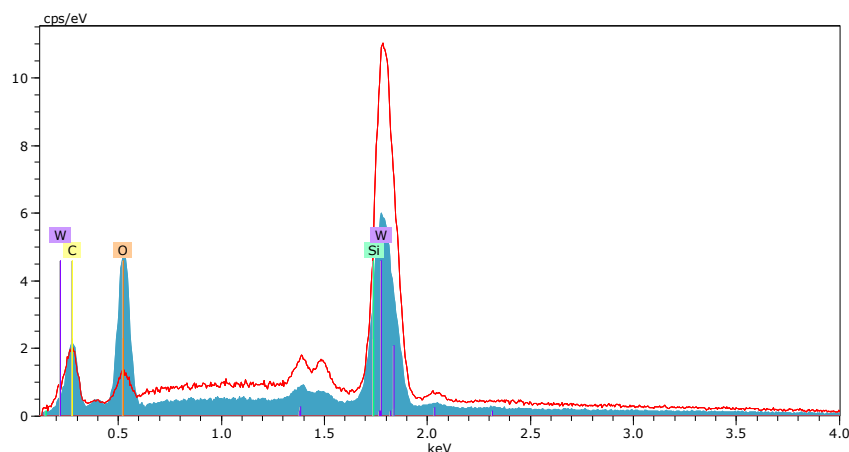
Kuva 33. EDS analyysi tulokset keskikohdasta

Ensimmäisestä EDS mittapisteestä käy jo ilmi että referenssiin verrattuna pisteessä on happea. Tämä tarkoittaa sitä että kohdassa on tapahtunut kemiallista reaktiota ja pinnalla on volframin lisäksi todennäköisesti oksidia. Seuraavassa mittauksessa (Kuva 34) otetaan toinen kiinnostava mittapiste, joka on kuvan yläladassa oleva kokkaremainen näköinen alue.



Kuva 34. Kokkaremaisen näköinen alue

Analyysin tulosten perusteella (Kuva 35) tämäkin alue on täynnä happea ja eli pinnalla on luultavasti Volframi oksideita. [4] Tämäkin tulos vahvistaa käsitystä että jokin kemiallinen reaktio tapahtuu kontaktipinnassa.



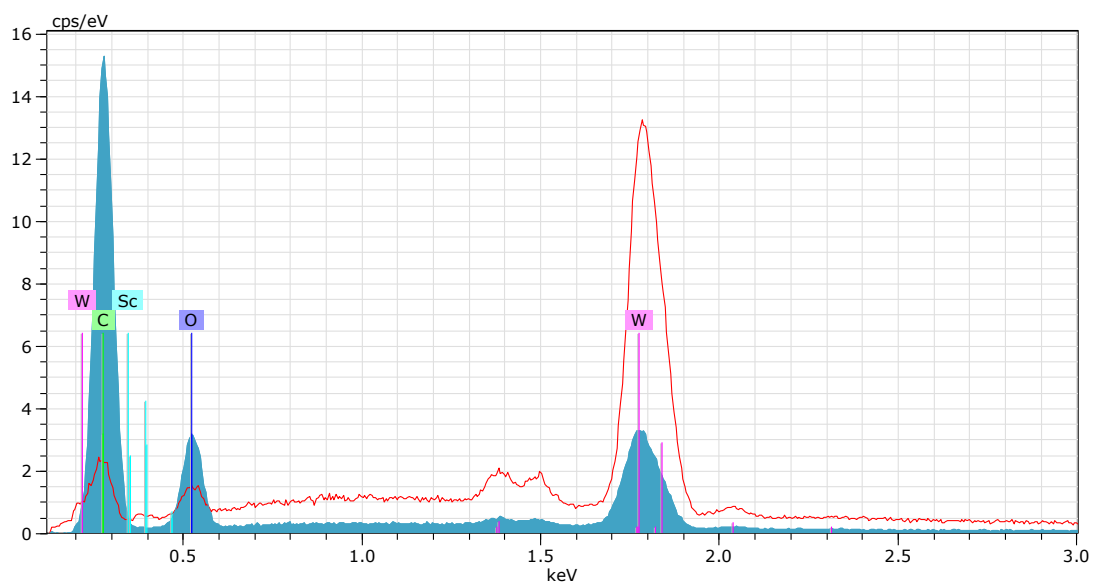
Kuva 35. Räiskymisen näköisen alueen EDS analyysi

Kolmas mittauspiste (Kuva 33) otettiin kraaterin pohjalta jossa on kokkaremaista muodustumaa ja tumma pinta. Tämä kohta on luultavasti neulojen kontaktin ensimmäinen ja viimeinen kontaktipiste.



Kuva 36. Kraatterimainan alue

Tuloksista (kuva 35) voidaan päätellä, että kohta on lähes kokonaan hiilikerroksen peittämä. Hiilen huono sähköinen johtavuus herättääkin epäilyksiä sen osallisuudesta  $C_{res}$  arvojen nousuun ja vian alkuperään. Oksidikerroksen alkuperän aiheuttamaa ilmiötä on siis tutkittava.

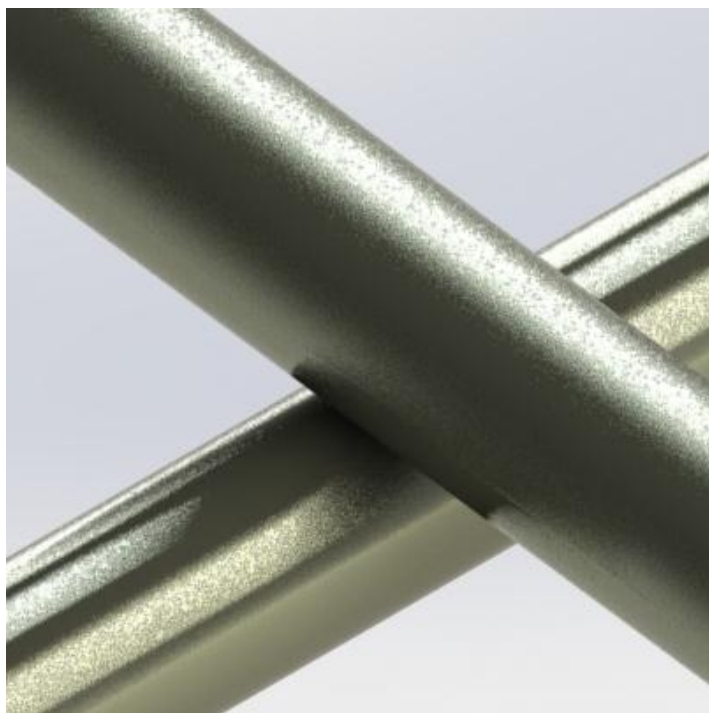


Kuva 37. Kraatterimainan alue EDS-analyysi

#### 4.4 Oksidoitumisen alkuperä

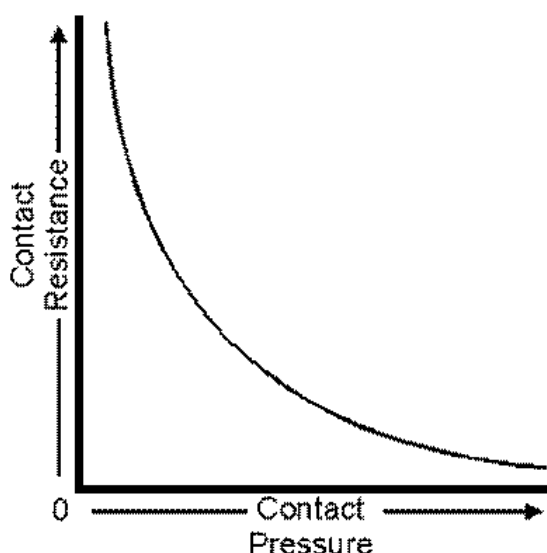
Tutkimuksista käy ilmi että kyse on releissä tavattavasta ilmiöstä eli kontaktieroosiosta. Eroosio on yhdistelmä kipinäointia, jota tapahtuu kontaktipinnan kytkennän erkaantues-  
sa sekä materiaalihäviöstä jota se tuottaa. Lisäksi releiden kontaktimateriaaleista teh-  
dyistä soveltamisohjeista [4 s.1] käy lisäksi ilmi, että volframi sekä anodina että katodi-  
na tasavirtapiirin kontaktissa tuottaa oksidikalvoa kontaktipinnalle. Tämäkin johtuu ki-  
pinöinnistä koska se tuottaa lämpöä, joka hapen kanssa reagoidessaan tuottaa resistii-  
visen oksidikalvon kontaktialueelle. Reaktiota tapahtuu jo huoneenlämmössä ja aina,  
kun kontaktit erkanevat, äkillinen lämpöpiikki ja sen jäähtyminen tekevät oksidikalvon  
alueelle. Tilanne kertaautuu ja pahenee jokaisen kontaktin jälkeen. [6]

Reletekniikassa on yleensä suuremmat kontaktipinnat ja voimat kuin tämän sovelluk-  
sen kytkimessä. Siksi tämä kytkin on erittäin herkkä tämänkaltaiselle ilmiölle. Jos kyt-  
kin luokiteltaisiin releeksi, niin se olisi ”Knife-edge” kategoriassa. Kytkimen neulojen  
läpimitta kontaktikohdalta on vain 70-100 µm. (Kuva 38)



Kuva 38. Neulojen osumakohta mallinnus

Kahden pyöreän neulan kohtaamis-pinta-ala on siis hyvin pieni. (Kuva 38) hyvä kontakti on siis merkittävä tekijä sen kyvykkyydelle johtaa sähköä. On hyvin tärkeää että sulkeutuessaan neulat taipuvat toisiaan vasten ja saadaan haluttu 30 µm vertikaalinen lepojännitys kytkimen neulojen välille.  $C_{res}$  arvo on näin ollen riippuvainen myös paineesta. (kuva 39) Hyvä kontaktipaine ei kuitenkaan auta oksidikalvoa vastaan loputtomiin.



Kuva 39.  $C_{res}$ /paine vaikutus

#### 4.5 Materiaalin siirtyminen ja häviö

Kun ES-kytkimen neulat alkavat erkanemaan toisistaan ja kontaktialue pienenee, niin se alkaa tuottamaan lämpöä kaavan  $P = I^2 R$  mukaan. Kuorman virta ajetaan läpi kokoajan kuristuvan alueen läpi ja alkaa tuottaa lämpöä joka ensin sulattaa neulan materiaalin ja sen jälkeen höyrystää (kiehuttaa) sen. Materiaalin häviö aiheutuu pääasiassa sulaneen ja höyrystyneen metallin roiskeista, kun kontaktit hankaavat ja kipinäivät toisissaan. Höyrystynyt metalli muodostaa vielä johtavan sillan hetkellisesti ennen kuin erkaantuvat toisistaan kauemmaksi. Nestemäisessä muodossa olevalla metallilla on näissä olosuhteissa tapana kerääntyä katodipuolelle kontaktia, koska se on viileämpi kuin anodi. Tasavirtapiireissä metallin siirtyminen on näin ollen hyvin ennakoitavissa. [6] Myös SEM-kuvista aiemmissa testeissä tämä reaktio on havaittavissa. [Liite 1] Valitettavasti katodipuolen neula eli tämän kontaktin vastakappale hävisi irrotusvaiheessa. Oletettavasti siinä olisi ollut havaittavissa volframikertymää osumakohdalla. Uutta näytettä ei saatu tämän työn aikarajoitteista johtuen.

## 5 Ratkaisuehdotukset

Vian tutkimuksista kävi ilmi että kytkimellä on samankaltaisia ongelmia, joita vastaan releiden parissa on taisteltu vuosia. Releiden kontakti-ikää ja elinkaarta on tutkittu laajasti ja näitä tutkimuksia ja sovelluksia voidaan hyödyntää myös tähän kytkimeen. On kuitenkin otettava huomioon kytkimen uniikit ominaisuudet näitä ratkaisuja sovellettaessa. Näitä ovat kontaktipinnan pieni koko, neulojen materiaali ominaisuudet, suhteellisen pieni tasajännite, hidas kontaktien erotus kytkentävaiheessa ja optoerottimen kytkentäominaisuudet.

### 5.1 Kytkimen materiaali

Kytken tarkasteleminen ja tutkimukset selvästi osoittavat että Volframi (W) ei ole ideaalinen tämän sovelluksen materiaalina. [6 s.2] Sitä suositellaankin enemmän korkeajännite AC-kytkennöissä. Tasajännitekytkennöissä sen on huomattu tuottavan haitallisia oksidikalvoja erityisesti kontaktipinnan anodille. Tutkimuksista voidaan päätellä, ettei nykyistä volframikytkintä voida käyttää tässä sen oksidoitumisen takia. On siis löydettävä toinen materiaali, jolla olisi volframin kaltaisia ominaisuuksia kestää taipumista, joka on ollut sen paras ominaisuus tässä sovelluksessa.

Taulukko 2 Neulamateriaalit

Ominaisuus	Volframi (W)	Volframirhenium (WRE)	Berylliumkupari (Becu)	paliney 7®	NewTek®	Hopeapäälystetty W ja WRe
Resistiivisyys @ 20°C (μΩ-cm)	5.59 - 5.86	9.15 - 9.65	6.10 - 7.93	30.9 - 34.9	55.1 - 58.2	1.6 - 3.2
Sulamispiste (°C)	3410	3410	870 - 980	1015	1300 - 1350	960 - 3410
Elastisuus (Gpa)	394.5±6.1	395.7±6.4	131.5±5.5	121.2±4.9	180±1	394.5±6.1
Vetolujuus (Gpa)	2.65 - 2.90	2.90 - 3.36	1.28 - 1.31	0.90 - 1.25	1.30 - 1.55	2.65 - 2.90
Vickers kovuus 100g kuorma (Kg/mm²)	665 - 738	745 - 887	228 - 384	320 - 357	382 - 438	665 - 738

### 5.1.1 Volframi-Rhenium (WRe)

Volframi-Rhenium on 97% volframia ja 3% rheniumia. Sillä on hyvin samankaltaiset ominaisuudet kuin Volframilla. Tämä materiaali olisi hyvä vaihtoehto, elleivät tutkimukset [7 s.1] osoita myös sen jakavan saman oksidoitumisherkkyyden. Myös W- ja WRe-materiaalien kuitumainen materiaalin pinta voi pahentaa ongelmaa.

Tuotannosta löytyi kuitenkin yksi neulakortti uudelle tuotteelle, jossa käytetään kytkimellä WRe-neuloja sekä kytkimenä että mittaneuloina. Tämän yksittäisen kortin probausmäärä oli noin 500000 kertaa. Kytkimen tämänhetkinen  $C_{res}$  arvo oli 2,3  $\Omega$  joka yllätti positiivisesti. Myös toisessa testaulaitteessa oli käytössä Wre neulat kytkimellä. Tässä neulakortissa oli 1.5 miljoonaa kontaktia takana eikä yhtään häiriötä.

Tämä havainnon perusteella ja koska siitä ei aiheutunut lisäkuluja toimittajalta. Vaihdoimme kahteen korjauksessa olevaan neulakortteihin myös Volframi-Rhenium kytkimet. Neulakortit eivät ole kuitenkaan vielä tuotantokäytössä, koska ne vaihdetaan vasta vanhojen mennessä rikki. Toimivuus on siis vain näiden havaintojen ja teorian varassa.

### 5.1.2 Paliney 7<sup>®</sup> (Pd-Ag-Cu-Pt-Au)

Paliney 7 on koostumukseltaan (Pd35%-Ag30%-Cu15%-Au10%-Pt10%) ja on palladiumia sisältävä metalliseos jota käytetään probausneulojen materiaalina. [9] Jalometallien takia se on oksidoitumatonta materiaalia. Johtavuus ei kuteinkaan ole samaa luokkaa volframin kanssa. Muita haittapuolia ja minkä takia se ei tähän sovellukseen sovi ovat sen elastisuus, lujuus ja hinta.

### 5.1.1 Beryllium-kupari (BeCu)

Beryllium-kupari käytetään probausneulojen ja kytkimen mittaneulan materiaalina. Taulukosta 2 voi päätellä, ettei myös tämäkään sovellu sen elastisuuden ja heikon kestävyiden takia kytkimen materiaaliksi. Sillä on myös ominaisuutena huoneenlämmössä oksidoituminen. Mittaneuloiksi se kuitenkin soveltuu hyvin.[6 s.1]

### 5.1.2 NewTek

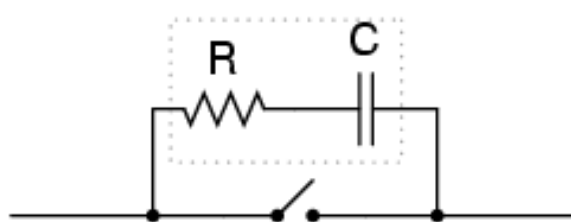
Newtek on metalliseos. Se on oksidoittumaton ja kovempaa kuin Be-Cu tai Paliney 7. Silti se ei vedä vertoja kytkimen Volframille vaikka mittaneulan materiaalina se voittaa kilpailijat. Tähän sovellukseen se saattaisi toimia ja voisi olla testin arvoinen. [3]

### 5.1.3 Volframi (W) ja Volframi-Rhenium (Wre) hopea pinnoituksella (Ag)

Volframin päällystäminen oksidoitumattomalla materiaalilla näyttäisi olevan turvallisinta tapa päästä eroon oksidikalvoista ja säilyttää sen muut hyvät ominaisuudet. [10] Myös erittäin hyvä hopean johtavuus tukee tätä valintaa kytkimen uudeksi materiaaliksi. Ainoksi haittapuoleksi voi koitua pinnoitteen kuluminen pois, jos kytkimen kipinöintiä tapahtuu. Materiaali voi hankautua pois myös pienen kontaktipaineen takia ajan myötä. Myös aggressiiviset huoltotoimenpiteet voisivat rikkoa pinnoituksen joten on siis estettävä ensisijaisesti kipinöinti.

## 5.2 Kipinöinnin estäminen

Kontaktin suojaamiselle on tehty paljon tutkimusta releiden parissa. Käytännössähän ES kytkin on rele ja näin ollen siihen pystyy soveltamaan jo hyväksi todettuja ratkaisuja reletekniikassa. Yksi ja kiinnostavin tapa estää kipinöinti on RC-piirin [2] liittäminen piiriin kytkimen rinnalle. (Kuva 40)



Kuva 40. RC-piiri kytkimen rinnalla

Juuri kun kontaktit irtoavat toisistaan saadaan kipinöintiä aiheuttavan kuorman virta siirrettyä kondensaattoriin sen sarjavastuksen läpi. Näin pystytään lyhentämään kipinöinnin kestoa ja materiaalin siirtymistä, antamalla kontaktille enemmän aikaa avautua. Sarjavastuksen tarkoitus piirissä on estää äkkinäinen kondensaattorin purkaus, joka vain lisäisi kipinöintipurkauksen voimakkuutta. Siksi se on tarpeellinen, mutta sen resistanssi pitää olla mahdollisimman pieni.

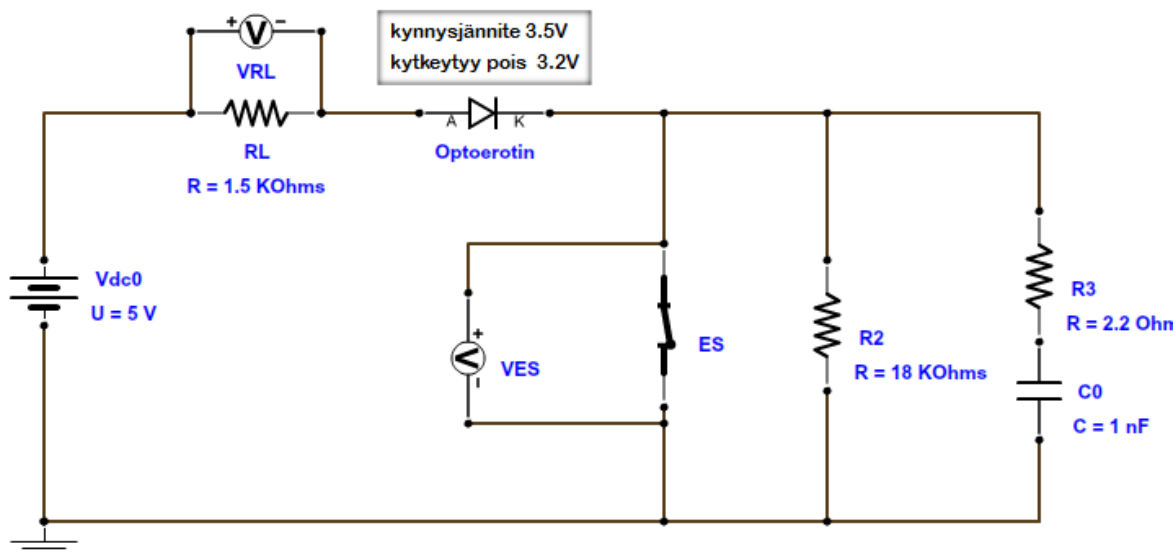


Kondensaattori RC-piirin tulisi valita seuraavalla tavalla. Jännite piirissä on  $U = 5 \text{ V}$ . Tiedämme Sähköisillä mittauksilla kontaktien eroavan nopeudella  $5 \text{ V}/1 \text{ } \mu\text{s}$ . (Kuva 39) Haluamme rajoittaa tätä jännitettä ohjaamalla osan siitä kondensaattoriin ja näin ollen kytkimen jännitteen tulisi olla puolet syöttöjännitteestä, eli  $e_c = 2,5 \text{ V}$  ajanhetkellä  $t = 1 \text{ } \mu\text{s}$ . Etuvastuksen tulee olla hyvin pieni, joten siihen valitaan  $R = 2 \text{ } \Omega$ .

$$C = \frac{-t}{\left[ \ln \left( 1 - \frac{e_c}{E} \right) \right] \times R} = 722 \text{ nF}$$

### 5.3 Kytkenän simulointi

Tässä sovelluksessa ei ole tarpeellista saada kytkintä täysin kiinni joten RC-piirin lisäksi voidaan kytkimen rinnalle lisätä tarpeeksi suuri vastus, jotta kontakti ei sulkeudu kokonaan. Koska jo kytkimen  $4 \text{ k}\Omega$   $C_{\text{res}}$  arvo riittää sulkemaan optoerottimen tilan, valittiin tarpeeksi suuri  $18 \text{ k}\Omega$  vastus simuloimaan sulkutilaa. Tämä myös muuttaa radikaalisti kondensaattorin arvoa. Simuloimalla piiriä (Kuva 41) ja analysoimalla tuloksia (Kuva 42) Saatiin lopulliseksi kondensaattorin arvoksi  $1 \text{ nF}$ .



Kuva 41. Piirikaavio ES kytkimen RC-piiristä

Simulaatiota (Kuva 42) tulkitaan seuraavasti. VRL kuvaa jännitettä etuvastuksen yli ja VES on Kytkimen yli mitattava jännite. Aikajana on kokonaisuudeltaan 50  $\mu\text{s}$  ja Jännite on aloitushetkellä 4.2 V. Kytkimen yli jännite on 0 V. ES kytkin on siis kiinni.

Ajanhetkellä 20  $\mu\text{s}$  kytkin avataan ja hitaasti 5  $\mu\text{s}$  aikana jännite purkautuu piiristä jättäen piirin 350 mV jännitteen 18 k $\Omega$  Vastuksen yli. Ajanhetkellä 40  $\mu\text{s}$  piiri taas suljetaan.

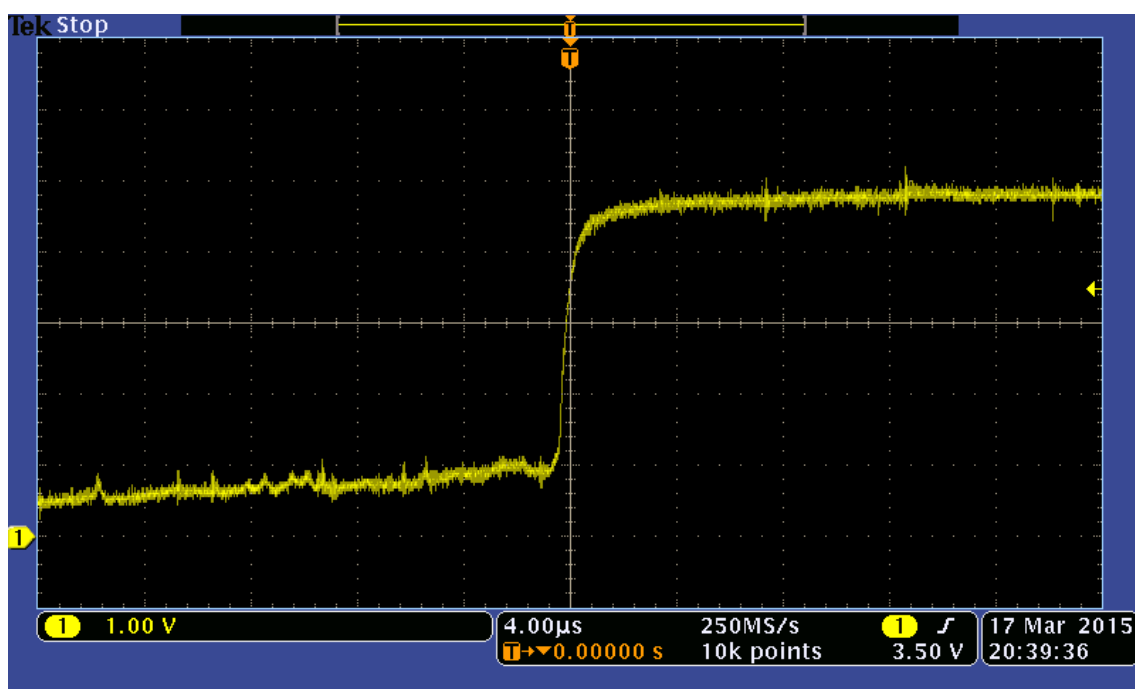


Kuva 42. Ulostulo Kuvan 39 simulointipiiristä

#### 5.4 Koekytkentä laitteelle ja sähköiset mittaukset

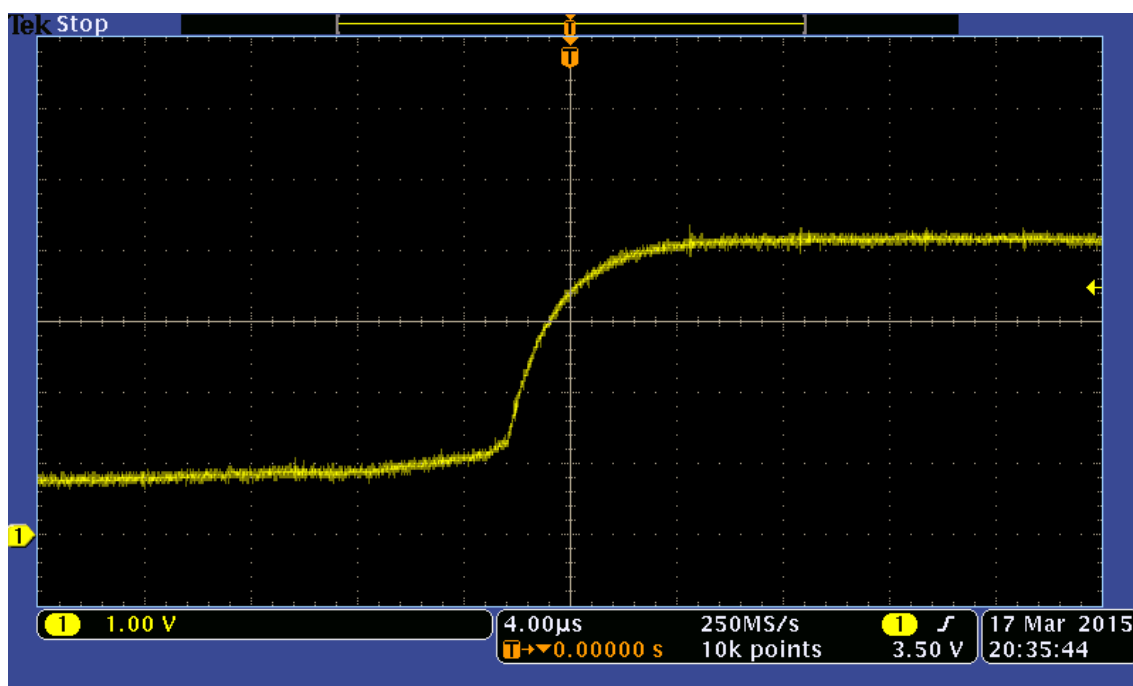
Simulaatiosta rakennettiin oikea koekytkentä laitteelle. Valittiin simulaatiosta saadut komponenttiarvot ja kytkentä tehtiin neulakortille saapuvien signaalikaapeleihin. Kytkenällä tehtiin mittauksia oskilloskoopin kanssa ja huomattiin sen toimivan juuri kuten simulaatio sen osoittaa.

Ensimmäisessä testissä otettiin tarkka mittaus kytkimen aukaisemisesta ilman RC-piiriä. (kuva 43) Kuvasta näkee kytkentävaiheen suhteellisen nopean tilavaihdon ja häiriötä jännitteessä. Huomioitavaa on myös jo melkein 1 V jännite ennen kuin itse kontaktien erkaantuminen tapahtuu. Tämä selittyy 30  $\mu\text{m}$  kontaktien lepojännitteen purkautumisesta ja on normaalia.



Kuva 43. Kytkimen aukaisuhetki ilman RC-piiriä

Seuraavaksi kytkimen rinnalle lisättiin RC-piiri. (Kuva 44) Testistä näkee saman efektin kuin simulaatiosta. Kondensaattori hidastaa jännitteen laskua piirissä. Se myös poistaa pientä kohinaa jännitteessä mittausten perusteella. Kaikesta päätellen voidaan olettaa että RC-piiri toimii halutulla tavalla ja voisi auttaa kontaktieroosion fysikaaliseen ilmiöön, eli kipinäintiin ja sitä kautta lämmön aiheuttamaan oksidoitumiseen. KytKentä on hyvin helppo tehdä ja sen komponentit ovat lähes ilmaisia.



Kuva 44. KytKimen aukaisuhetki RC-piirin kanssa

## 5.5 Ehdotetut parannukset nykyiseen tilanteeseen

Mekaaninen puhdistus hiomapaperilla on korvattava jollain muulla menetelmällä. Nykyinen tapa hiomalla kuluttaa kytkimen pinnan materiaalin pois sekä jättää pientä partikkelijäämää. Neulojen pinta kuluu menetelmällä tasaiseksi, joka ei olisi tarpeellista. Nykyinen huoltotoimenpide lyhentää myös huomattavasti neulakortin ikää, jonka takia huoltotoimenpidettä ei tehdä säännöllisesti. Mittauksen keskeytymiseen voitaisiin löytää ratkaisu, jottei testausta tarvitsisi aloittaa alusta.

### 5.5.1 Mittauksen keskeytyminen

Mittauksen keskeytyminen johtuu siitä, että kytkin jää auki tilaan mittapöydän laskiessa neulojen korkeudelta. Laite pitää tätä vaarana ja laskee pöydän turvalliseen korkeuteen. Se myös lähettää vikaviestin testausohjelmalle joka keskeytyy. Usein kuitenkin vika tulee tilapäisestä häiriöstä ja  $C_{res}$  arvo on vian ilmaantuessa alle  $100\ \Omega$ . Mittausta voisi teoriassa jatkaa loppuun ennen huoltotoimenpiteitä. Tämä on kuitenkin mittapöytälaitteen kiinteä ominaisuus ja sitä ei voida muuttaa ilman laitevalmistajan ohjelmamuutosta. Ohjelmamuutos voi olla kuitenkin mahdollinen ja tämän virheen sattuessa voisimme saada haluamamme valikon, josta voisimme vielä jatkaa mittausta jos  $C_{res}$  arvot sen sallivat.

### 5.5.2 Kytkimen puhdistus

Yksi tapa jota käytetään releiden kontaktipintojen putsamiseen, on tavallinen ohut kiiltäväpintainen paperi jota kostutetaan puhdistavalla aineella. Puhdistavana aineena käytettäisiin teollista elektroniikan kontakteihin käytettävää puhdistusainetta tai isopropanolia ( $\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$ ). Tämä ei vahingoittaisi neuloja ja voisi olla vaikka ajastettuna kuukausihuoltona.

## 6 Loppupäätelmiä

Kun tuotantoon 10 vuotta sitten hankittiin ensimmäinen mittapöytälaite ja neulakorttien ominaisuuksia tarkasteltiin, lyötiin lukkoon tiettyjä neulakortin ominaisuuksia, joita ei ole sittemmin muutettu. Volframi anturin kytkin materiaalina ei ollut ongelma laitteille alkuvuosina kolmen tekijän takia. Ensimmäinen oli se että tuotantomäärät probereilla olivat nykymääriin verrattuna pieniä. Toinen oli että neulakortit olivat vain yksipaikkaisia, joten kytkimiä oli suhteellisen vähän. Kolmas ja tärkein tekijä oli se että probauslaitteen Mark1 ja 2 version laitteen sisäinen kytkimen tunnistustapa oli paljon vikasietoisempi. Vasta Mark3 sukupolven malleissa kontaktiresistanssin pienikin muutos tuotti kytkimen häiriön.

Materiaalien tutkimisen kautta huomattiin että syypää vikaan on kytkimen materiaalivalinta. Volframin huono ominaisuus oksidoitua huoneenlämmössä ja kytkimen toimintaperiaate eivät toimi toivotusti tässä sovelluksessa. Paras vaihtoehto ongelmaan olisi vaihtaa neulat jalometallipäälystettyihin Volframineuloihin. Näin säilyisi materiaalin jäykät ominaisuudet ja johtavuus lisääntyisi. Hopea ei jalometallina oksidoiduisi. Ainoa haittapuoli voisi olla pinnoitteen kuluminen pois. Jalometallipinnoite on siis testattava käytännössä.

Myös Volframi-Rhenium kytkimen materiaalina vaikuttaa huomattavalta parannukselta nykyiseen tilanteeseen. Koska neulakorttien korjauksen yhteydessä kytkimen neulat voidaan vaihtaa tähän materiaaliin ilman lisäkuluja, on siis ainakin tämä parannus helppo ottaa käyttöön.

Elektroninen kipinäointi oli myös ongelma. kytkimelle oli pakko rakentaa RC-suojapiiri estämään tätä ilmiötä kontaktien erotusvaiheessa. Ratkaisuna ongelmaan, piiri on helppo rakentaa ja sen voi myös lisätä neulakortin piirilevyn suunnitelmaan. Pitkän ajan testit RC-piirin toimivuudesta voidaan aloittaa lisäämällä ne nykyisiin laitteisiin.

Mittauksen keskeytymiseen tulisi saada laitevalmistajan avustuksella ohjelmamuutos. Kun vika ilmaantuu, olisi hyvä saada mittausta ajettua loppuun ja sen jälkeen vasta tehdä huoltotoimenpiteitä.

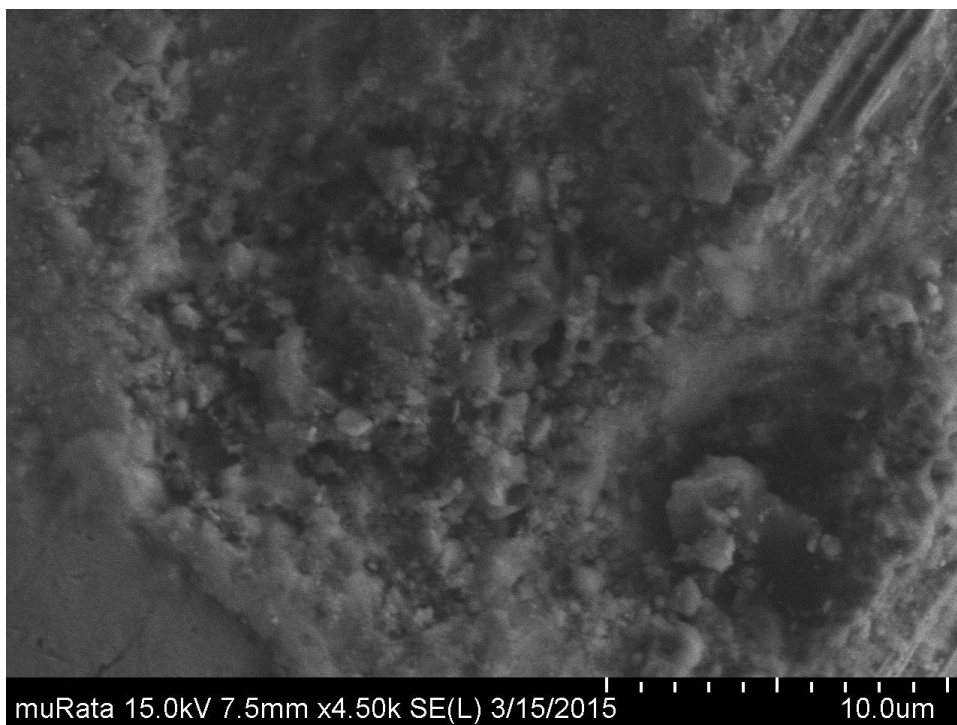
Huoltotapoihin myös on saatava muutos. Vaikka kytkimen kontaktin elämää voidaan pidentää, kontaktit kuitenkin kuluvat ajan myötä. Hiomapaperi todettiin aivan liian ras-  
kaaksi tavaksi puhdistaa kontaktit. Kokeilu mekaanisella määrällä tekniikalla tarvitsevat lisää tutkimusta.

## Lähteet

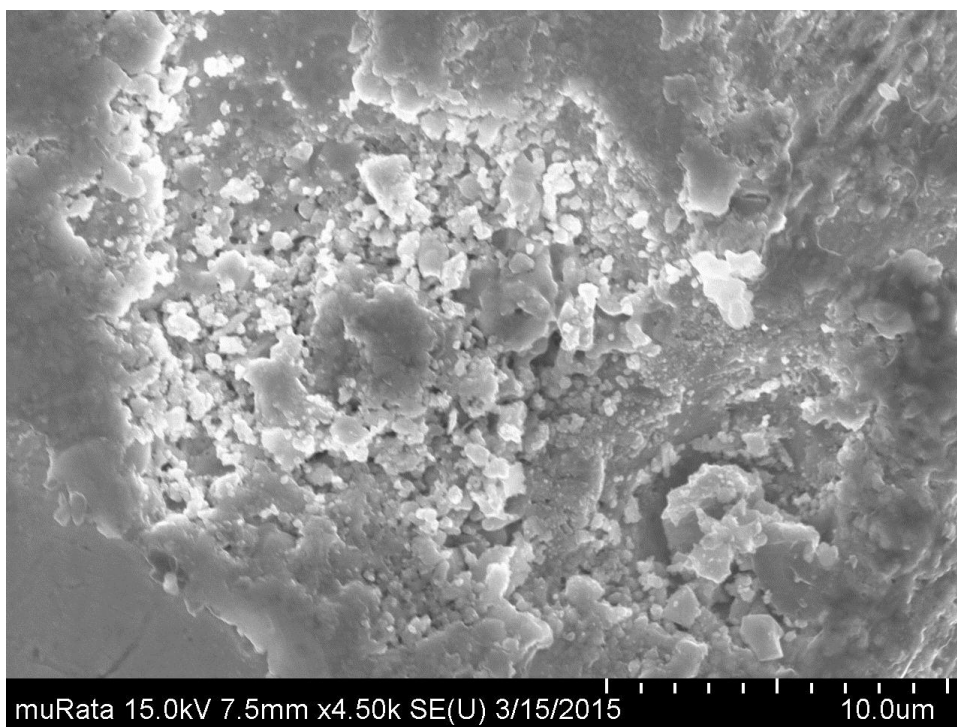
- 1 <http://www.futureelectronics.com/en/optoelectronics/optocouplers.aspx>  
Luettu (25.2.2015)
- 2 **Application Guide Snubber Capacitors.**  
[www.cde.com/resources/catalogs/igbtAPPguide.pdf](http://www.cde.com/resources/catalogs/igbtAPPguide.pdf) Luettu (25.2.2015)
- 3 <http://www.advancedprobing.com/newtek-probe-needle-material.html>  
**NewTek™ Press Release Download Newtek probe material .pdf**
- 4 [www.dinrelay.com/relaycare.pdf](http://www.dinrelay.com/relaycare.pdf) Yleistä reletekniikasta
- 5 <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon> Hiilen ominaisuuksia
- 6 [http://www.w8ji.com/relay\\_cleaning\\_and\\_life.htm](http://www.w8ji.com/relay_cleaning_and_life.htm)
- 7 **Probe contact resistance variations during elevated temperature wafer test** Jerry J. Broe, Ph.D. and Reynaldo M. Rinco  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=805761>
- 8 [www.promelec.ru/pdf/h1111.pdf](http://www.promelec.ru/pdf/h1111.pdf) Optoerotin ominaisuudet
- 9 <http://www.americanprobe.com/72p-palineya-7-probe.html>
- 10 [www.advancedprobing.com/pdfs/silver-plated-probes-dc.pdf](http://www.advancedprobing.com/pdfs/silver-plated-probes-dc.pdf)
- 11 **Tungsten : properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds** Erik Lassner; Wolf-Dieter Schubert New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers, ©1999



## Kytöimen kontaktikohta SEM kuvat



Kuva 43. SEM SE(L) kuva kontaktikohdasta



Kuva 44. SEM SE(U) kuva kontaktikohdasta

## Optoerottimen kytketymisominaisuudet

### H11L1 H11L2

#### TYPICAL CHARACTERISTICS

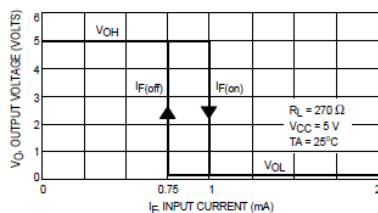


Figure 2. Transfer Characteristics for H11L1

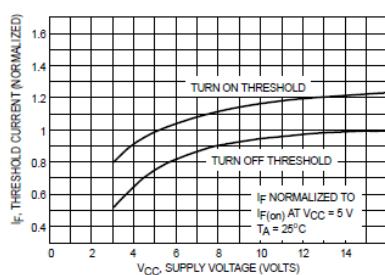


Figure 3. Threshold Current versus Supply Voltage

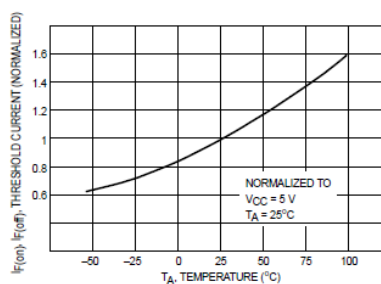


Figure 4. Threshold Current versus Temperature

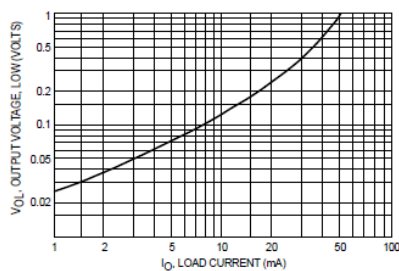


Figure 5. Output Voltage, Low versus Load Current

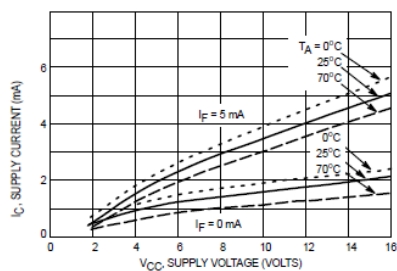


Figure 6. Supply Current versus Supply Voltage

Kuva 45. Optoerottimen kytketymisominaisuudet [8]