



Otto Laitinen

Vastusputken jännitteenkesto

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

15.11.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Otto Laitinen
Otsikko:	Vastusputken jännitteenkesto
Sivumäärä:	33 sivua + 1 liitettä
Aika:	15.11.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Koneensuunnittelu
Ohjaajat:	Suunnittelupäällikkö Jani-Pekka Ketolainen Yliopettaja Jyrki Kullaa

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Loval Oy:n tuotannossa käytettyjen vastusputkien jännitteenkeston rajat kolmella eri geometrialla. Jännitteenkeston muutosta vastuselementin muokkaamisen seurauksena ei oltu aiemmin tutkittu, eikä Lovalin suunnitteluosastolla ollut selkeää tietoa lukuarvoista, joten ne haluttiin selvittää. Tutkimuksen pohjalta suunniteltiin testimenettely, jonka avulla kerättiin mittadataa tuotannon prosessin ja koneiden seurantaan varten. Seurannalla voitiin selvittää prosessin ja koneiden muutosten vaikutusta vastusputkien jännitteenkestoan. Testattavat erät valmistettiin Loval Oy:n tuotannossa, ja koestukset tehtiin laadunvalvonnan avustuksella.

Työssä suunniteltiin testattavien putkien geometriat ja rakenteet kriittisimpien vaihtoehtojen näkökulmasta, jolloin jännitteenkeston arvot ovat matalimmat mahdolliset. Valmistuksen aikana mitattiin elementtien halkaisijoita, painoja ja pituuksia, joiden avulla laskettiin eristeen tiheydet ja putkielementin venymät. Tuloksia verrattiin teoreettisiin mittoihin, joiden avulla voitiin määrittää kriittisiä rajoja tuotannossa. Korkeajännitekoestuksessa jännitettä nostettiin läpilyöntiin, jolloin tuloksena saatiin korkein mahdollinen jännitteenkesto kyseisellä geometrialla.

Korkeajännitekoestuksen tulokset osoittivat Lovalin vastusten sähköisen läpilyöntikestävyyden olevan vaaditulla tasolla kaikilla testatuilla putkihalkaisijoilla ja muodoilla. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että Lovalin tuotantomenetelmillä valmistetut elementit täyttävät standardien määrittämät vaatimukset. Kosteuden aiheuttamat ongelmat tulee silti huomioida tuotannon läpiviennissä, koska jo yhden päivän aikana tiivistämätön elementti absorboi kosteutta.

Loval Oy:lle jäi opinnäytetyöstä testausohje sekä alustavaa mittadataa. Mittadataa voidaan jatkossa analysoida Exceliin tehdyn taulukon avulla, jossa näkyvät toleranssien ääriarvoilla lasketut rajat. Korkeajännitekoestuksen tulokset määrittävät suuntaa antavat raja-arvot Lovalin tuotantomenetelmillä tehdyille elementeille.

Avainsanat: läpilyönti, jännitteenkesto, vastusputki, eristys

Abstract

Author: Otto Laitinen
Title: Dielectric Strength of Tubular Heating Element
Number of Pages: 33 pages + 1 appendices
Date: 15.11.2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Mechanical Engineering
Professional Major: Mechanical Design
Supervisors: Design manager Jani-Pekka Ketolainen
Principal Lecturer Jyrki Kullaa

The objective of this Bachelor's thesis was to examine the dielectric strength of tubular heating element for Loval Oy. Experiments were conducted to three different sizes and geometries. A test procedure was developed to study the effects of changes of the process and machines. A test batch was manufactured according to normal production and high voltage test were carried out with cooperation of the quality department.

The most critical geometries of the heating elements were designed for the study. The amount of the insulation inside the tubular heating element was designed to be minimum to get the lowest limit for the dielectric strength for every geometry and size. During production, measurements were made to collect data for density calculations of the magnesium oxide. The results were compared to the theoretical minimum and maximum limits.

As a result, it was found that the heating elements met the electrical requirements. The electrical breakdown strength decreased about 40 % when heating element was bent. The data collected can be used as a reference in continuous testing. The calculator that was created to Excel can be used to analyse results in the future.

Effect of humidity, corrosion and testing at operating temperature should be inspected more closely in the future to get more specific results. These results represent the most used geometries and materials used in production.

Keywords: Tubular heating element, Dielectric strength, insulation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Loval Oy	1
3	Lämmitysvastus	2
3.1	Vastusputki	3
3.2	Magnesiumoksidi (MgO)	3
3.3	Vastuslanka	3
3.4	Kyt Kentätappi	4
3.5	Helmi	5
3.6	Tiivisteaine	6
3.7	Toimintaperiaate	6
4	Vastuselementin valmistus	6
4.1	Putken hitsaus	6
4.2	Vastuslangan käämintä ja kytkentätapin hitsaaminen	7
4.3	Vastusputken täyttö eristeellä	7
4.4	Valssaus	8
4.5	Taivuttaminen	9
5	Jännitteenkesto	10
5.1	Lämpilyönnin teoriaa	10
5.2	Vastuselementin jännitteenkestoon vaikuttavat tekijät	12
5.2.1	Magnesiumoksidin muutokset tuotannon aikana	12
5.2.2	Epäpuhtaudet	13
5.2.3	Eristysväli	13
5.2.4	Kosteus	14
5.2.5	Taivutusten vaikutus eristävyys	16
5.3	Koekappaleiden suunnittelu	16
5.3.1	Mitat	17
5.3.2	Muodot	17
5.4	Vastuselementin komponenttien valinta	18
5.4.1	Vastusputki	18

5.4.2	Magnesiumoksidi	18
5.4.3	Vastuslanka	18
5.4.4	KytKentätappi	19
6	Testimenettelyn suunnittelu	19
6.1	Tuotannon aikana tehtävät mittaukset	19
6.1.1	Pituus	19
6.1.2	Paino	20
6.1.3	Ulkohalkaisija	21
6.2	Vastusputkien leimaaminen	21
7	Mittausten analysointi	21
7.1	Tulosten analysointi	21
7.1.1	Ø4,2 mittaustulokset	23
7.1.2	Ø6,4 mittaustulokset	26
7.1.3	Ø8,5 mittaustulokset	28
7.1.4	Seinämävahvuuden muutos	30
7.2	Mittaepävarmuus	31
7.2.1	Mittaushaasteet	31
8	Yhteenveto	32
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1: Ohjeet tuotantoon	

Lyhenteet

MgO: Magnesiumoksidi, vastuselementin eriste spiraalilangan ja vaippa-putken välillä

NiCr: Nikkelikromi, vastuslangan materiaali

FeCrAl: Rautakromialumiini, vastuslangan materiaali

EN 1.4301: Ruostumaton teräs

EN 1.4404: Haponkestävä teräs

EN 1.4828: Tulenkestävä teräs

EN 2.4858: Incoloy 825, seosteräs

EN 1.4876: Incoloy 800, seosteräs

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Loval Oy:lla käytössä olevien vastusputkien jännitteenkestoa. Vastuselementin toiminta perustuu sen sisällä kulkevaan vastuslankaan johdetun virran aiheuttaman lämmön hyödyntämisestä. Lämpö säteilee ja johtuu magnesiumoksidin kautta vastusputkeen. Lämmitysvastuksia käytetään esimerkiksi ilmassa, vedessä, öljyssä tai valun sisällä. Tutkimuksen tarkoituksena on valmistaa koesarjat, joiden työvaiheiden välisiä halkaisijoita ja pituuksia seurataan mittaamalla. Tuloksia tarkastelemalla voidaan ymmärtää toleranssien rajoissa tapahtuvien muutosten vaikutusta putken venymään, magnesiumoksidin tiheyteen ja edelleen jännitteenkestoon. Testierän perusteella luodaan ohjeet jatkuvalla testaamiselle, jonka avulla voidaan seurata koneiden ja prosessin muutoksien vaikutusta jännitteenkestoon. Opinnäytetyö antaa Lovalin suunnittelulle kriittiset raja-arvot testisarjan mukaisille tuotteille.

Opinnäytetyön alussa esitellään yritys, konserni sekä yrityksen asema Euroopan lämmityselementtien valmistajana. Kolmannessa luvussa esitellään yleisimmän vastuselementtirakenteen osien sijainti ja tarkoitus. Valmistuksen vaiheet ja niiden vaikutuksia elementin muutoksiin kuvaillaan luvussa neljä. Viides luku on teoreettinen tarkastelu läpilyönnin mekanismeista ja siihen liittyvistä ilmiöistä. Lisäksi luvussa esitellään koesarjojen elementtien komponenttivalinnat ja geometriat. Kuudennessa luvussa esitellään testimenettelyn tavoitteet ja tarkoitus. Lisäksi perustellaan testauksen vaiheita ja mittausten toteuttamistapoja. Lopuksi luvussa seitsemän analysoidaan tuloksia ja niihin vaikuttaneita muuttujia.

2 Loval Oy

Loval Oy on Loviisassa vuonna 1960 perustettu yritys, jonka erityisosaamista ovat lämmitys- ja tyhjöuotosratkaisut. Lovalin liikevaihto vuonna 2021 oli noin 30,9 miljoonaa euroa, ja se on Suomen suurin ja yksi Euroopan merkittävimpiä lämmityselementtien valmistajia. Loval työllistää vuonna 2022 noin 400 työntekijää tuotanto ja konttori mukaan lukien. Tuotanto painottuu ulkomaan vientiin,

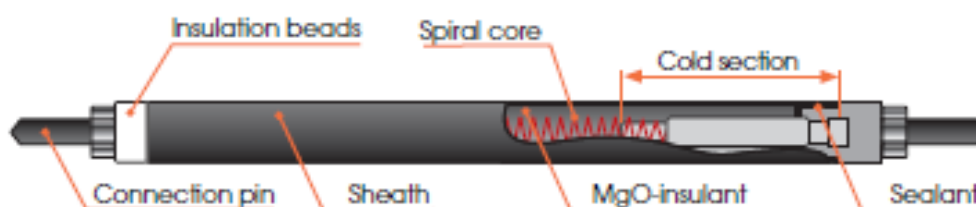
pääosin Eurooppaan, jonka osuus koko tuotannosta on noin 85 %. Euroopan lisäksi pieniä määriä tuotteita viedään Amerikkaan ja Aasiaan. Yleisimpiä käyttökohteita Lovalin tuotteille ovat lämpöpumput, teollisuuskeittiöt ja kahvilaitteet. Tuotteita valmistetaan myös raidekalustoon, energiantuotantoon, sekä moottoreihin ja generaattoreihin. (2.)

Loval on ollut vuodesta 1995 osa ruotsalaista Nibe industrier AB-konsernia. Niben pääkonttori sijaitsee Ruotsin Markarydissä. Konsernin liikevaihto vuonna 2021 oli noin 3 miljardia euroa, ja se työllisti maailmanlaajuisesti noin 18000 työntekijää. Nibe on listautunut Tukholman pörssiin. Nibe elements, Nibe stoves ja Nibe climate solutions ovat konsernin kolme pääjaosta, joiden alla on yli 120 yritystä. Loval kuuluu Nibe elements -jaokseen. (3.)

3 Lämmitysvastus

Vastuselementin rakenteelle asetetut lämmöntuottovaatimukset sekä sähkötekniset vaatimukset ohjaavat suunnittelua. Sähköisen eristyksen vaatimusten noudattaminen takaa vastuselementin turvallisen käytön ja lämmöntuottovaatimusten noudattaminen toimivan ratkaisun. Luvussa 3 esitellään vastuselementin komponentit, vaatimukset ja toimintaperiaate.

Vastuselementti rakentuu putkesta, jonka sisälle on venytetty käämitty spiraalilanka. Spiraalilangan päihin on hitsattu kytkentätaipit. Putki täytetään magnesiumoksidijauheella, joka toimii eristeenä ja lämmönjohtimena. Putken päät tiivistetään hartsilla tai silikonilla kosteuden imeytymisen estämiseksi.



Kuva 1. Vastuselementin osat (1, s.4)

3.1 Vastusputki

Vastusputki on lämmityselementin runko. Putken tarkoituksena on suojata lämmityselementin sähköosia. Lovallilla on käytössä putkia kolmella halkaisijalla. Putkien ulkohalkaisijat ovat 8,5 mm, 6,4 mm ja 4,2 mm. Vastusputken seinämävahvuudet vaihtelevat 0,3–0,6 mm välillä. Materiaaleja on käytössä useita, mutta eniten käytetyt ovat ruostumaton teräs, haponkestävä teräs sekä Incoloy 825 seosteräs. Vähemmän käytettyjä ovat tulenkestävä teräs ja Incoloy 800.

3.2 Magnesiumoksidi (MgO)

Magnesiumoksidi toimii putkivastuksessa sähköisenä eristeenä ja toisaalta lämmönjohtimena vastuslangan ja -putken välillä. Magnesiumoksidi on sähkösulattamalla valmistettua kiteistä jauhetta, jolla on pintakeskeinen kiderakenne. Lovallilla käytössä olevan A magnesiumoksidin enimmäisraekoko on 0,4 mm. Rae-koko vaikuttaa täyttötiheyteen ja juoksevuuteen. Käytössä on myös tyyppi AX, jota käytetään sovelluksissa, jotka vaativat parempaa eristävyttä tai lämmönjohtoa, sekä pienimmän putkihalkaisijan kanssa. AX-laadun erona on pienempi raekoko, jolloin eristekyky paranee raerajojen paremman kosketuksen ja jauheen suuremman tiheyden myötä. Erona ovat myös erilaiset silikaatit, jotka vaikuttavat eristeen juoksevuuteen putkea täytettäessä.

Standardin EN 60335-1 mukaan kiinteän suojausluokan 1. mukaisten laitteiden vuotovirta ei saa ylittää arvoa 5 mA. Eristeen kestävyttä testataan tuotannossa 1500 voltilla sekunnin ajan, jolloin vuotovirran määrän on jäätävä alle standardin määrittämän 5 mA. (4, s. 42.)

3.3 Vastuslanka

Vastuslangalla tarkoitetaan vastusputken sisällä kulkevaa jännitteistä lankaa, joka lämpenee, kun siihen johdetaan sähkövirtaa. Vastuslangoista yleisin on nikkelikromilanka (NiCr), joka kestää hyvin korkeita lämpötiloja. Nikkelikromilanka on sitkeä, joten se kestää vastusputken muokkausta venyttämällä ja

taivuttamalla. Toinen käytössä oleva lankamateriaali on rautakromialumiinilanka (FeCrAl), jossa on rautaa 68 %, 27 % kromia ja 5 % alumiinia. Rautakromialumiinilanka voi olla hauras venytyksissä, pistehitsauksissa ja hehkutuksissa, mutta toisaalta se on halvempi vaihtoehto nikkelikromilangalle. (1.)



Kuva 2. Käämitty NiCr-spiraalilanka

3.4 KytKentätappi

Vastuselementin kytKentätappien kautta elementtiin johdetaan sähkövirta. KytKentätapin toiseen päähän hitsataan vastuslanka kiinni. KytKentäjohdot voidaan liittää tappiin pistehitsaamalla tai vaihtoehtoisesti M4-kierteellä. KytKentätappi toimii myös tehottomana osuutena, koska se ei vastusta sähköän kulkua suuren poikkipinta-alansa takia toisin kuin vastuslanka. Tehottoman osan pituuden valinnalla voidaan vaikuttaa sähköisiin kytKentöihin kohdistuvan lämmön määrään ja varmistaa oikea lämmitysalue, jottei lämpöteho kohdistu esimerkiksi kiinnityslaipan väärälle puolelle.



Kuva 3. Kierteetön kytkentäppi

3.5 Helmi

Vastusputken päähän laitetaan steatiittihelmi tai keraaminen helmi, jonka tehtävä on pitää kytkentäppi suorassa ja toimia eristeenä jännitteellisen osan ja vastusputken välillä. Helmi kiinnittyy tiivisteaineella putken päähän.



Kuva 4. Tiivistetyt päät tulpattuna valkoisella helmellä

3.6 Tiivisteaine

Tiivisteaineen tarkoituksena on estää hygroskooppista magnesiumoksidia sitomasta kosteutta ilmasta. Tiivisteainetta laitetaan vastusputken päähän helmen alle. Lovalin tuotannossa käytetään yleisesti kahta erityyppistä tiivisteainetta, hartsia tai silikonია. Silikonin lämmönkesto on parempi, mutta se ei eristä kosteutta yhtä hyvin. Tämän opinnäytetyön testikappaleissa käytetään hartsipohjaista tiivisteainetta. Vastuselementit lämmitetään lämpökaapissa ennen tiivistämistä, jotta imeytynyt kosteus haihtuu pois putken päistä. Tiivistäminen on tärkeää tehdä mahdollisimman pian lämpökaapista ulos ottamisen jälkeen, jottei kosteus imeydy uudestaan elementtiin.

3.7 Toimintaperiaate

Vastusputken sisällä kulkevaan vastuslankaan johdetaan sähkövirta, jolloin syntyy lämpöä. Lämpö säteilee ja johtuu magnesiumoksidin kautta vastusputkeen. Lämmitysvastuksia käytetään esimerkiksi ilmassa, vedessä, öljyssä tai valun sisällä. Jokaisella käyttökohteella on omat vaatimuksensa pintatehon, korroosion keston ja käyttöiän suhteen.

4 Vastuselementin valmistus

Vastusputken valmistus tapahtuu kuudessa eri vaiheessa, joissa rakennetta muokataan sähköisiin vaatimuksiin, lämmitysvaatimuksiin sekä turvallisuusvaatimuksiin soveltuviksi. Laitteiden säätöjen optimointi on tärkeässä osassa laadukkaiden tuotteiden valmistuksessa.

4.1 Putken hitsaus

Vastusputken raakamateriaalina toimii vanteelle keritty metalliliuska. Putken aihio muodostetaan kylmämuokkaamalla metalliliuska putken muotoon ja hitsaamalla pitkittäissauma umpeen. Putken aihion poikkileikkaus on pisaran muotoinen hitsaussauman vuoksi. Muoto muuttuu pyöreäksi valssauksessa.

Hitsauslaitteen perässä on katkaisukone, joka katkaisee putken haluttuun pituuteen. Katkaisupituuden laskee Lovallilla erillinen ohjelma, joka huomioi valssauksessa tapahtuvan venymän.

4.2 Vastuslangan käämintä ja kytkentätapin hitsaaminen

Vastuslanka käämitään koneella, jossa lankaa syötetään käämintäautomaatissa olevan tapin ympärille. Kääminnälle valitaan sydänhalkaisija tarvittavan vastuslangan pituuden ja putken halkaisijan mukaan.

Kääminnän toiseen päähän kiinnitetään kytkentätappi pistehitsaamalla (kuva 5). Lovallilla on kaksi hitsausautomaattia, joiden lisäksi osa tapeista hitsataan käsin. Vastuslangan halkaisijat ovat 0,1–0,8 mm riippuen vaippaputken koosta ja halutuista lämmöntuotto-ominaisuuksista. Käytettyjä materiaaleja ovat teräs ja ruostumaton teräs.



Kuva 5. Kytchentäppi hitsattuna käämittäyn spiraalilankaan

4.3 Vastusputken täyttö eristeellä

Vastuselementin eristeaine täytetään putkeen täyttökoneilla. Täyttökoneeseen asetetaan 24–30 putkea vierekkäin pystysuuntaan. Putkien sisään laskeutuvat yläpuolelta täyttöputket, joiden läpi magnesiumoksidi valutetaan vastusputkiin.

Täyttökoneissa on täristimet, jotka parantavat eristeaineen juoksevuutta putken sisällä. Täytön ajaksi kytkentätappiin kiinnitetty täyttötulppa estää magnesiumoksidin valumisen ulos putken alapäästä (kuva 6). Täyttötulppa palaa pois hehkutuksen aikana.



Kuva 6. Täyttötulppa kytkentätappiin kiinnitettynä

4.4 Valssaus

Valssauksessa täytetty vastusputki kulkee valssirullien läpi. Rullapareja on 8–12 riippuen koneesta. Valssauksessa putken halkaisija muokataan lopulliseen halkaisijaansa. Valssin rullaparit puristavat putkea, jolloin halkaisijan pienentyessä putken pituus kasvaa. Putken sisällä olevat magnesiumoksidirakeet murskaantuvat, jonka jälkeen valssaus vaikuttaa putkeen pääosin venyttämällä. Murskaantuneiden rakeiden kosketuspinta-ala toisiinsa on suurempi, mikä osaltaan parantaa oksidin eristekykyä, sekä lämmönjohtavuutta eristeaineen läpi.

Valssauksessa tapahtuvat vaippaputken kiderakennemuutokset aiheuttavat vastuselementissä sisäisiä jännityksiä, joita vapautetaan hehkuttamalla. Hehkuttaminen tapahtuu uunissa, jonka lämpötila on noin 1060 °C, kun materiaalina on ruostumaton teräs. Hehkuttamalla vastusputken kiderakenne normalisoituu ja sisäiset jännitykset vapautuvat. Hehkuttamalla vaikutetaan myös pinnanlaatuun. Kaasuseoksen valinnalla voidaan tuottaa joko tumma tai kirkas

pinnanlaatu. Tumma pinta on käytössä ilmalämmittimissä oksidikerroksen korroosiosuojaominaisuuksien takia.

Lämmitysvastuksen sisällä oleva magnesiumoksidi on hygroskooppinen yhdiste, joka kostuessaan alkaa johtaa sähköä paremmin. Vastusputken läpilyöntikeston varmistamiseksi kosteuden määrä tulee minimoida eristeessä. Hehkutuksen (kuva 7) aikana kosteus poistuu avoimien putken päiden kautta. Hehkutuksen jälkeinen tiivistäminen on suoritettava mahdollisimman nopeasti, ettei kosteus absorboitu takaisin eristeeseen.



Kuva 7. Vastuselementit hehkutusuunin kuljettimella

4.5 Taivuttaminen

Suurin osa valmistetuista vastuselementeistä taivutetaan erilaisiin muotoihin. Yleisimmät muodot ovat U-taivutus ja sorvattu muoto. Taivutukset tehdään taivutusautomaateilla, käsin taivuttamalla tai robotin avulla. Robotin etuna on sen mahdollisuus tehdä kosteus-, läpilyönti- ja resistanssimittaukset taivutuksen jälkeen automaattisesti. Välihehkuttaminen mahdollistaa myös pienellä säteellä tehtyjen taivutusten toteuttamisen materiaaleilla, joilla on vaarana revetä.

Käytössä olevien materiaalien pienimmät mahdolliset taivutussäteet eri koneilla tehtynä on esitetty kuvassa 8.

MINIMI TAIVUTUSSÄTEET ERI PUTKIMATERIAALEILLE (MORMAALI LÄMPÖKÄSITTELY)			
TAIVUTUS SÄDE r/mm	FLEXO/LAPE	BACKERB./ENSTO	HUOMI
AISI 304 (0.5)	R8(8.5)	R7	
AISI 304 (0.4)	R9 (8.5) R5 (6.4)	R9 (8.5) R5 (6.4)	
AISI 304 (0.6)	R12 (8.5)	R12(8.5)	HEHKUTUS 860°C
INC800/826	R13 (8.5) R9 (6.4)	R13 (8.5) R9 (6.4)	
SMO	R13 (8.5) R9 (6.4)	R13 (8.5) R9 (6.4)	HEHKUTUS 1100°C
TITAANI	R12 (8.5)	R12 (8.5)	HEHKUTUS 760°C
Fe	yli R10 (8.5)	yli R10 (8.5)	HEHKUTUS 830°C
Fe	alle R10 (8.5)	alle R10 (8.5)	HEHKUTUS 880°C

Kuva 8. Minimitaivutussäteet Lovallilla käytössä oleville materiaaleille (6)

U-muoto on käytössä esimerkiksi laipallisissa lämmittimissä, joissa vastusputken molemmat päät tulevat samasta laipasta läpi. Muotoa voidaan jatkaa toisella U-taivutuksella, jos tarvitaan lisää pituutta esimerkiksi tehon takia. Sorvatussa muodossa suora elementti syötetään sorvissa kiinni olevan lestin ympärille, jolloin loppumuoto on spiraali. Sorvattu muoto on työläämpi sekä fyysisten muutosten takia heikompi kuin U-muotoon taivutettu.

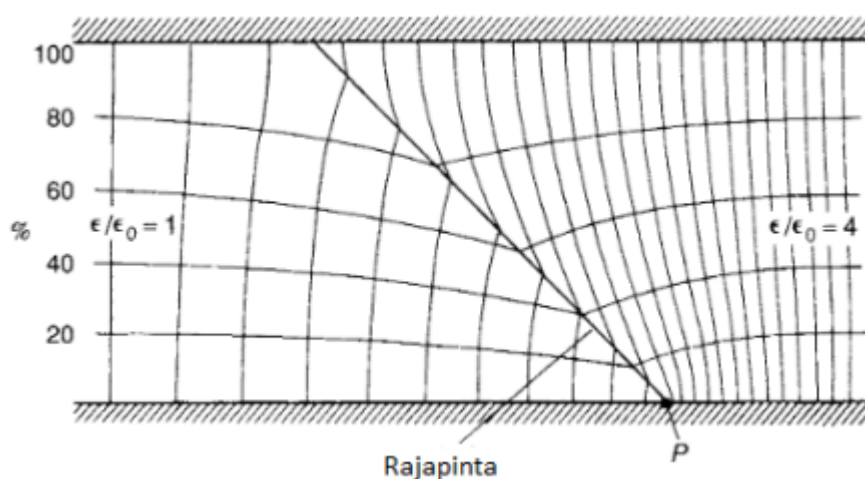
5 Jännitteenkesto

Läpilyönninkesto ja ominaisuuksien palautuminen läpilyönnin jälkeen on riippuvainen eristeen olomuodosta. Vastuselementissä käytetty eriste on kiinteää, joten tässä luvussa esitellään läpilyönti-ilmiö kiinteässä eristeessä.

5.1 Läpilyönnin teoriaa

Läpilyönnillä tarkoitetaan tilannetta, jossa jännitteen aiheuttama sähkökentän voimakkuus aiheuttaa purkauksen. Läpilyönti tapahtuu yleensä kahden eri aineen rajapinnassa, jossa sähkökenttään tulee tihentymä (kuva 9). Tihentymä syntyy, koska kahden aineen rajapinta taivuttaa sähkökenttää yleensä epäpuhtauden tai kosteuden aiheuttamana. Sähkökentän tihtymässä tapahtuva purkaus aiheuttaa eristeeseen paikallista eroosiota, minkä seurauksena seuraava

purkaus tapahtuu herkemmin. Usean pienen purkauksen jälkeen tapahtuu läpilyönti, jossa elektronit pääsevät kulkemaan vastuslangalta vaippaputkeen aiheuttaen valokaaren niiden väliin. Jännitteenkestoon vaikuttaa koestuskertojen määrä, pituus ja jännite. Läpilyönti voi tapahtua myös kerralla suuren jännitepiikin takia (7, s. 8.)



Kuva 9. Kahden aineen rajapinnassa tapahtuva sähkökentän taipuminen (7, s. 8)

Läpilyönti rikkoo vastuselementin eristeen, jolloin kiinteäeristeisistä elementeistä tulee käyttökeltottomia. Läpilyönnin aiheuttavan jännitteen suuruus riippuu kuormitustavasta. Maksimiarvo on sitä pienempi, mitä useamman testin samalle vastusputkelle suorittaa.

Sähköllä toimivat laitteet suunnitellaan nimelliselle käyttöjännitteelle, mutta sähköisen eristeen mitoittamisessa pitää huomioida hetkellinen ylijännite. Ylijännite voi olla moninkertainen nimellisjännitteeseen nähden, minkä takia myös vastuselementeille suoritetaan korkeajännitekoestuksia. Yleisin Lovalilla käytössä oleva koestusarvo on 1500 V/s. Koestuksen tarkoituksena on todentaa eristeen toimivuus sähköistä läpilyöntiä vastaan. Vastuselementeissä sähköisen läpilyönnin on todettu tapahtuvan magnesiumoksidin läpi eikä helmen tai tiivisten kohdalta. Tämän tiedon pohjalta testimenettelyssä keskitytään pääosin magnesiumoksidin eristävyteen.

5.2 Vastuselementin jännitteenkestoon vaikuttavat tekijät

Valmistusprosessin aikana tapahtuvat muokkaukset vaikuttavat vastuselementin jännitteenkestoon. Prosessin aiheuttama jännitteenkeston heikkeneminen huomioidaan vastuslankaa valittaessa. Lämpilyöntikeston vaikuttavat tekijät liittyvät magnesiumoksidin muutoksiin prosessin edetessä.

5.2.1 Magnesiumoksidin muutokset tuotannon aikana

Magnesiumoksidijauheen tiheys muuttuu tuotantoprosessin aikana. Jauheen tiheys pakkauksessa on noin $2,0 \text{ g/cm}^3$. Tiheyden muutos tapahtuu ensimmäisen kerran jo putken täytössä. Raekoon vaikutus näkyy tässä työvaiheessa: suuri raekoko ei juokse hyvin spiraalilangan kierrosten väleihin. Täytön aikana tapahtuu myös raekokojen lajittumista, jolloin isommat rakeet hakeutuvat täyttösäiliön reunoille. Lajittuminen aiheuttaa epätasaista laatua täytössä. Täytön jälkeen eristeen tiheys on Lovalin aikaisempien tutkimusten mukaan noin $2,4 \text{ g/cm}^3$.

Valssauksessa putken halkaisija pienenee ja pituus kasvaa. Magnesiumoksidirakeet murskaantuvat ja puristuvat valssauksen aikana, jolloin jauheen tiheys kasvaa arvoon $2,9\text{--}3,2 \text{ g/cm}^3$. Valssauksen aikana murskaantuneen jauheen raerajojen kosketuspinta-ala kasvaa, jolloin sähköinen eristävyys paranee. Tiheyden kasvun on todettu olevan suurinta lähellä putken sisäreunaa. Jauheen tiheys kasvaa tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen valssaus vaikuttaa vain venymään.

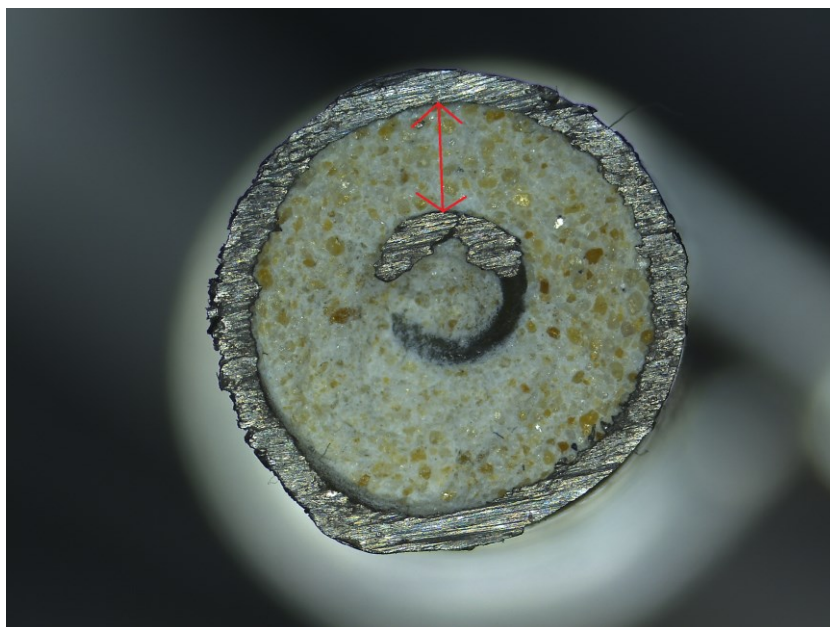
Hehkutuksessa putki kuljetetaan uunin läpi, jonka lämpötila ruostumattomalla teräksellä on noin 1060 astetta. Lämpötila vapauttaa valssauksessa syntyviä jännityksiä, jolloin putken halkaisija voi kasvaa. Halkaisijan kasvu lisää putken tilavuutta, jolloin tiheys pienenee. Todellisuudessa vaikutusta on vaikea todeta, koska vastusputken seinämävahvuuden muutoksia ei voida Lovalilla tarkastella kuin laskemalla keskiarvo tilavuuden avulla.

5.2.2 Epäpuhtaudet

Magnesiumoksidi koostuu Mg^{+2} ja O^{-2} -ioneista. Reagoidessaan keskenään happiatomi vastaanottaa magnesiumilta kaksi elektronia, jolloin molemmat saavuttavat oktetin. Oktetissa oleva yhdiste vaatii enemmän energiaa irrottaakseen elektroneja. Epäpuhtaudet kuitenkin aiheuttavat epävakautta rakenteeseen, minkä seurauksena läpilyönnin vaatimia elektroneja on saatavilla. (8.)

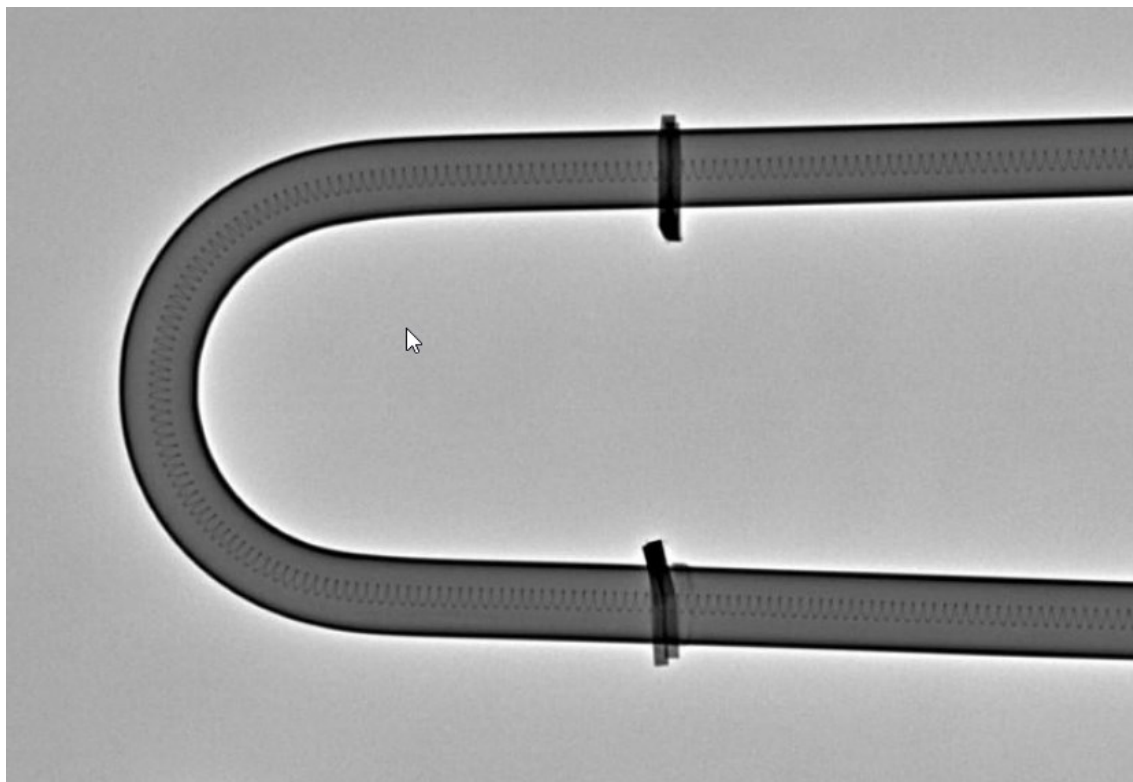
5.2.3 Eristysväli

Eristysvälillä tarkoitetaan eristeen määrää sähkölaitteen jännitteisen osan ja jännitteettömän osan välillä (kuva 10). Vastuselementissä magnesiumoksidi eristää vastuslangan vaippaputkesta. Jännitteenkesto on suoraan riippuvainen eristeen määrästä kahden eri potentiaalissa olevan osan välillä. Eristysväli muuttuu tuotannossa valssauksessa ja taivutuksissa. Valssauksessa eristysvälin pientymistä kompensoi eristeaineen tiivistyminen ja raerajojen parempi kosketus toisiinsa.



Kuva 10. Putken poikkileikkauksesta osoitettu eristysväli

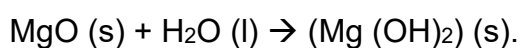
Taivutuksissa vastuslanka pyrkii vetäytymään taivutuksen sisäreunaa kohti, mutta se ei ole normaaleissa olosuhteissa kriittinen, koska eristeaineen tiiveys on siellä myös suurempi (kuva 11).



Kuva 11. Röntgenkuvattu vastuselementti, jossa taivutuksen kohdalla lanka on vetäytynyt sisäreunaa kohti

5.2.4 Kosteus

Magnesiumoksidi on hygroskooppinen yhdiste, joka reagoi veden kanssa muodostaen magnesiumhydroksidia seuraavasti:

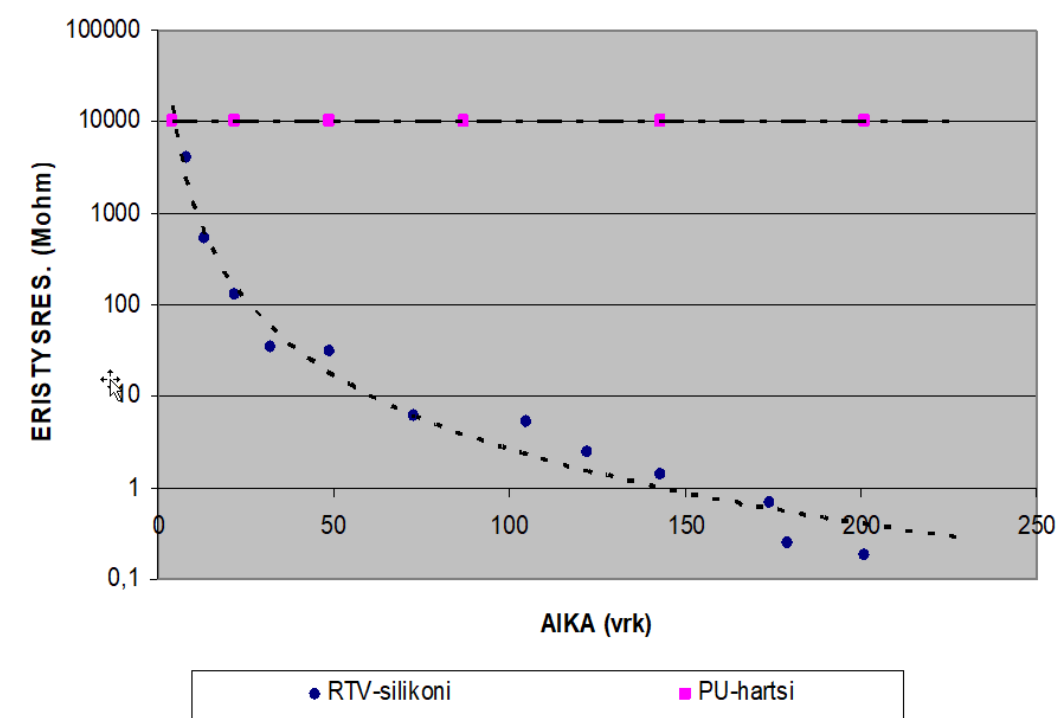


Magnesiumhydroksidi on hyvin kiteytyneenä hyvä eriste, mutta se alkaa hajoamaan jo 350 asteen jälkeen ja tuottaa siten ongelmia vastuselementissä. Kaikki kosteus ei kuitenkaan reagoi eristeaineen kanssa, ja sekaan jää

vesimolekyylejä. Kosteutta poistetaan lämpökaapeilla, joissa tuotteita kuivataan ennen mittauksia.

Vastusputken pään tiivisteaineen valinnalla voidaan vaikuttaa kosteuden imeytymiseen eristeeseen. Silikonipohjainen tiivisteaine ei eristä putken päätä kosteudelta yhtä hyvin kuin hartsipohjainen. Suurissa lämpötiloissa kuitenkin joudutaan valitsemaan silikoni, koska hartsin lämmönkesto on alhaisempi. Kosteus aiheuttaa ongelmia myös lämmityselementtien varastoinnissa. Kosteuden imeytymistä eristeeseen on tutkittu eristeen resistiivisyyden muutoksena ajan suhteen, jossa huomataan eristekyvyn huomattava heikentyminen jo kahden viikon varastoinnin jälkeen (kuva 12). Silikonilla tiivistetyt vastukset voidaan kuivattaa melko helposti lämmittämällä, jolloin kosteus poistuu vastuselementtien päistä tiivisteaineen läpi. Hartsitiivistyksen läpi kosteus ei pääse poistumaan, minkä takia kostuneen elementin kuivattaminen on erittäin vaikeaa.

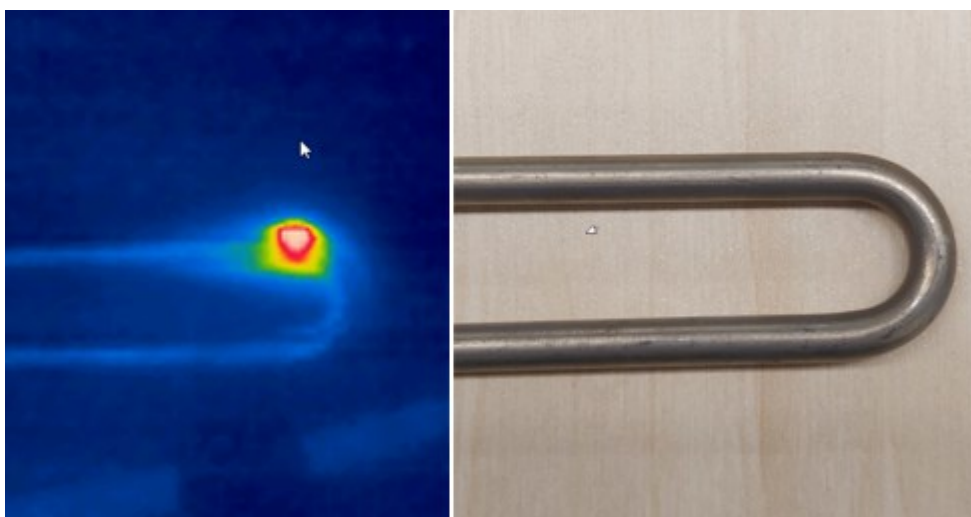
KOSTEUSKOE: RTV-SILIK. vs. PU-HARTSI



Kuva 12. Kosteuden aiheuttama eristysresistanssin muutos ajan kuluessa (9)

5.2.5 Taivutusten vaikutus eristävyyteen

Vastuselementin taivuttaminen saattaa aiheuttaa taivutuksen aloituskohdassa epäjatkuvuuskohdan. Epäjatkuvuuskohta syntyy, kun magnesiumoksidi sintraantuu valssauksen ja hehkutuksen aikana epäpuhtauksien, kuten boorin, takia. Boori laskee lämpötilaa, jossa sintraantuminen tapahtuu. Taivutuksen osuessa sintraantuneelle alueelle kovettunut eristeaine halkeaa ja eristeeseen tulee epäjatkuvuuskohta. Epäjatkuvuuden rajapintaa pitkin elektronit kulkevat helpommin vaippaputkeen aiheuttaen läpilyönnin (kuva 13). Suunnittelussa voidaan huomioida mahdollinen epäjatkuvuuskohdan syntyminen lisäämällä puristustyövaihe. Työvaiheen tarkoituksena on puristaa materiaalia kasaan taivutuksen ulkoreunasta, jolloin epäjatkuvuuskohta täyttyy magnesiumoksidilla ja läpilyöntikesto palautuu.



Kuva 13. Lämpökamerakuvassa läpilyöntipaikka hehkuu punaisena taivutuksen alussa

5.3 Koekappaleiden suunnittelu

Elementtejä suunniteltaessa lähtökohtana oli saada mahdollisimman kriittinen testikappale. Testit suunniteltiin tehtäviksi jännitteenkeston kannalta huonoimalla mahdollisella spiraalilangan mitoituksella ja tiukimmalla taivutussäteellä.

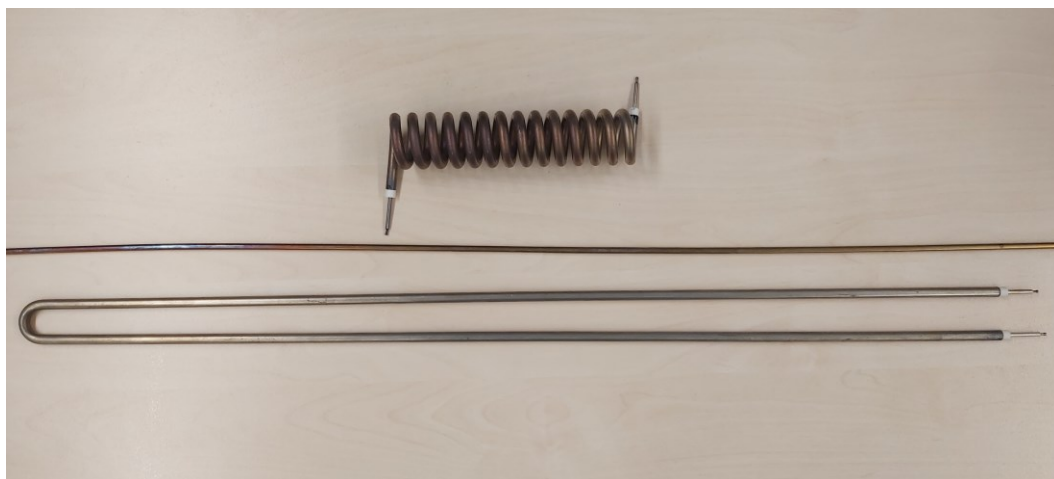
Testien tuloksena saadaan tällöin huonoimmat mahdolliset arvot, joita voidaan käyttää tuotannossa kyseisillä materiaaleilla.

5.3.1 Mitat

Koekappaleet suunniteltiin mitoiltaan valmistettavaksi mahdollisimman monella koneella ilman mittojen muokkaamista testierien välissä. Rajoittavaksi tekijäksi selvisi täyttökoneiden aiheuttama pituuden minimiarvo. Pituudeksi valittiin 1200 mm, koska se pystytään valmistamaan kaikilla täyttökoneilla lukuun ottamatta yhtä paksuimman sauvan täyttökoneetta.

5.3.2 Muodot

Vastusputken valmistuksessa käytetään kolmea eri muotoa: suora, U-muotoon taivutettu ja spiraalille sorvattu (kuva 14). Putket taivutettiin koesarjassa mahdollisimman pienellä säteellä, jotta taivuttamisen aiheuttamat muutokset saataisiin korostetusti esiin.



Kuva 14. Testisarjan elementtien muodot: sorvattu, suora ja U-taivutettu

5.4 Vastuselementin komponenttien valinta

Testattavien komponenttien valinnassa periaatteena oli valita huonoin vaihtoehto läpilyönninkeston kannalta. Komponenttien valinnassa käytettiin hyödyksi Lovalin aikaisempaa tietoa jännitteenkestosta, koska aikataulu ei olisi riittänyt tekemään useampaa kokeilua eri komponenteilla.

5.4.1 Vastusputki

Vastusputken materiaaliksi valittiin EN 1.4301 eli ruostumaton teräs. Materiaalivalintaan vaikutti merkittävästi kaksi syytä: Merkittävin syy oli ruostumattoman teräksen mekaaninen kestävyys taivutuksissa. Materiaalivalinnalla taivutuksissa päästään mahdollisimman pieniin taivutussäteisiin ilman vaippaputken repeämistä. Toinen syy oli ruostumattoman teräksen käytön laajuus ja siten tulosten laaja hyödynnettävyys.

5.4.2 Magnesiumoksidi

Koekappaleiden eristeaineeksi valikoitui tuotannossa laajasti käytetty versio A. Magnesiumoksidi A on käytössä noin 95 %:ssa tuotteista. Testierän tulokset ovat silloin vertailukelpoisia tuotteiden kestävyys.

5.4.3 Vastuslanka

Vastuslangan mitoituksessa haluttiin päästä tilanteeseen, jossa langan ulkoreunan ja putken sisäreunan väliin jäisi mahdollisimman vähän eristeainetta. Sähköinen jännitteenkesto on suoraan riippuvainen eristekerroksen paksuudesta, joten kriittisimmän tilanteen luomiseksi eristekerroksesta haluttiin mahdollisimman pieni. Vastuslanka käämittiin isoimmalle mahdolliselle sydänhalkaisijalle. Vastuslangan paksuus valittiin täyttökoneen rajoitusten mukaan paksumaksi, joka voidaan täyttää. Vastuslangan ja vaippaputken sisäreunan väliin tulee jäädä tilaa täyttöputkelle. Tämä tila on rajoittavana tekijänä paksua lankaa valittaessa.

5.4.4 KytKentätappi

KytKentätapilla ei tässä testissä ole läpilyönnin kannalta vaatimuksia. Tapit m-
toitettiin päättymään ennen sorvausmuodon alkua, jotta vältettiin sen mahdolli-
nen vaikutus jännitteenkestoon.

6 Testimenettelyn suunnittelu

Testimenettelyn tarkoituksena on saada mittaustuloksien avulla tietoa vastus-
putken jännitteenkestosta sekä luoda pohja jatkuvalla testaamiselle. Testierän
valmistuksen aikana saatava mittadata lisää tietoa työvaiheiden vaikutuksesta
vastusputken rakenteeseen ja jännitteenkestoon. Testimenettelyn tavoitteena
on saada tietoa vastusputken jännitteenkeston maksimirajasta. Toistuvalla tes-
taamisella voidaan seurata tuotannossa tapahtuvia muutoksia. Mittadatan poh-
jalta voidaan tarkastella, missä työvaiheessa muutoksia on tapahtunut ja rea-
goida korjaustoimenpiteillä.

6.1 Tuotannon aikana tehtävät mittaukset

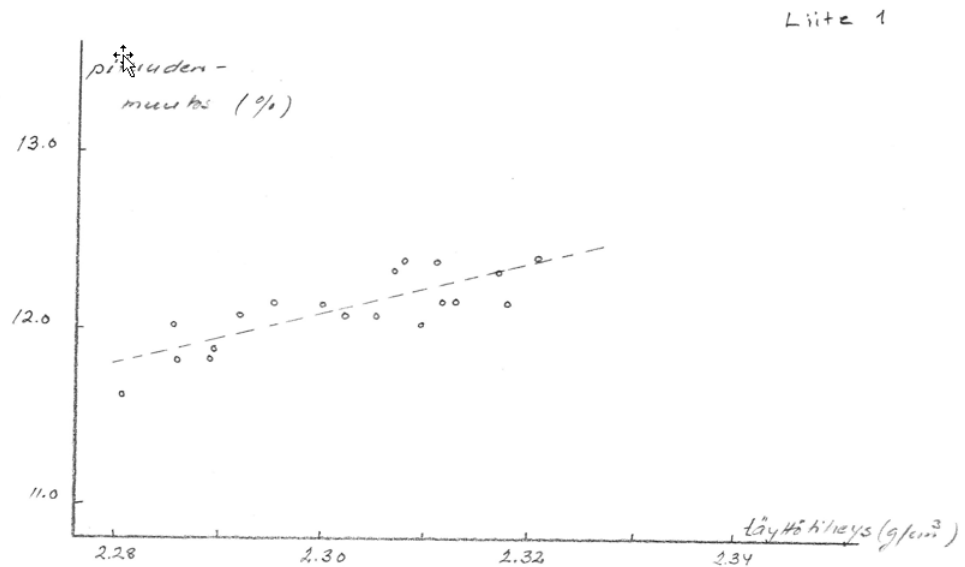
Testikappaleille tehdään paino-, pituus- ja halkaisijamittauksia, joiden avulla las-
ketaan magnesiumoksidin tiheys. Mittaukset tehdään erillisen ohjeen mukaan
tuotannon työvaiheiden välissä. Mittaukset kirjataan erilliseen mittatauluk-
koon. Mittausten vaatimukset on esitetty testaussuunnitelmassa (Liite 1).

6.1.1 Pituus

Vastusputkien pituusmitta mitataan tuotannossa kaksi kertaa, ennen ja jälkeen
valssauksen. Mittojen muutoksella lasketaan valssilla tapahtuva putken ve-
nymä. Venymä kertoo valssisillan kunnosta sekä säädöistä. Kunnossa ja sää-
döissä oleva valssi venyttää halkaisijalla 8,5 mm ja 6,4 mm olevia putkia noin
11–14,5 % ja 4,2 mm putkea noin 18–20 %. Venymä ei kuitenkaan ole edellytys
hyvälle tuotteelle, vaan kustannuskysymys. Täyttötiheyden vaikutusta pituusve-
nymään on tutkittu Lovalilla aikaisemmin, ja tulos on esitetty kuvassa 15. Liian

suuri venymä kuitenkin aiheuttaa tiheyden pientymistä. Venymää ei siis tule pitää liian tärkeänä tekijänä hyvän tuotteen saavuttamiseksi vaan pyrkiä optimoimaan täyttötiheys, johon venymää verrataan.

RSt-elementti: täyttötiheys vs. pituus



Kuva 1. AISI 321 -elementin pituudenmuutos valssauksessa täyttötiheyden funktiona.

Kuva 15. Täyttötiheyden vaikutus pituusvenymään (10)

6.1.2 Paino

Vastuselementin osien paino mitataan, jotta voidaan laskea magnesiumoksidin massan osuus kokonaismassasta. Katkaistu vastusputki sekä spiraalilanka kyt-kentätapit mukaan lukien punnitaan, jolloin valmiin vastussauvan magnesiumoksidin paino voidaan laskea loppupainosta. Painon avulla lasketaan tiheys valssauksen jälkeen.

6.1.3 Ulkohalkaisija

Katkotun putken ulkohalkaisija pienenee mitasta $10\pm 0,1$ mittaan $8,5\pm 0,1$ valssauksessa. Halkaisija mitataan kolme kertaa putken valmistuksen aikana. Ensimmäinen mittaus tehdään katkaisun jälkeen, jolloin tuloksen pitäisi olla $10\pm 0,1$. Toinen mittaus tapahtuu valssauksen jälkeen, jolloin halkaisijan tulisi olla lopullisessa $8,5\pm 0,1$ mitassa. Kolmas mittaus suoritetaan hehkuttamisen jälkeen. Tällä mittauksella halutaan saada tietoa hehkutuksessa tapahtuvasta rekrystallisaatiosta, joka saattaa aiheuttaa halkaisijan kasvua. Halkaisija merkataan ristimitan keskiarvona, koska hitsausseama tekee poikkileikkauksesta pisaran muotoisen. Mitattuja arvoja käytetään laskettaessa magnesiumoksidin tiheyttä. Kerättyjen tulosten pohjalta voidaan analysoida toleranssialueen vaikutusta putken venymään ja edelleen oksidin tiheyteen.

6.2 Vastusputkien leimaaminen

Vastusputket leimataan katkonnan jälkeen, koska mittaukset pitää merkata putkikohtaisesti. Leimaus tapahtuu putken katkonnan jälkeen kaivertamalla putken pintaan leimauskoodi. Koodi koostuu putken halkaisijasta, muodosta ja juoksevasta yksilönumerosta. Esimerkiksi U-muotoon taivutetun halkaisijaltaan 8,5 mm olevan putken leimaksi tulee 085U-xxx. Leiman avulla voidaan korkeajännitekoestuksen jälkeen vertailla mittaustuloksia saatuun jännitteenkeston arvoon.

7 Mittausten analysointi

Työvaiheiden välisissä mittauksissa kerättiin mittaustuloksia jatkuvaa seuranta varten. Arvoista laskettiin keskiarvot, joita voidaan seurata ja verrata jatkossa muiden testierien tuloksiin.

7.1 Tulosten analysointi

Vastuslankojen painot olivat odotetusti hyvin lähellä toisiaan kaikissa sarjoissa. Kun satunnaiset virheet jätetään huomiotta, kaikkien painot olivat $\pm 0,3$

gramman sisällä toisistaan. Putken katkonnassa päästiin kaikissa toleranssiin ± 1 mm, josta seurasi myös tasainen painojakauma putkien välillä. Halkaisijat mitattiin ristimitan avulla, koska putken pisaran muotoinen poikkileikkaus vääristää tulosta. Ennen valssausta halkaisijoiden hajonta on suurempaa, mutta valssauksen aikana tapahtuva putken pyöristyminen tasoittaa hajontaa.

Halkaisijan avulla lasketussa magnesiumoksidin tiheydessä on huomioitava mitaepätarkkuus. Magnesiumoksidin tiheys laskettiin ennen ja jälkeen valssauksen. Tiheys laskettiin oksidin massan ja sen käyttämän tilavuuden avulla. Tulokset tukivat aikaisempien tutkimusten tuloksia, joissa viitataan $2,4 \text{ g/cm}^3$ täyttötiheyteen. Teoreettisesti tarkasteltaessa täyttötiheyden tulee olla vähintään $2,3 \text{ g/cm}^3$, jotta päästään haluttuun 3 g/cm^3 lopputiheyteen valssin tuottamilla venymillä.

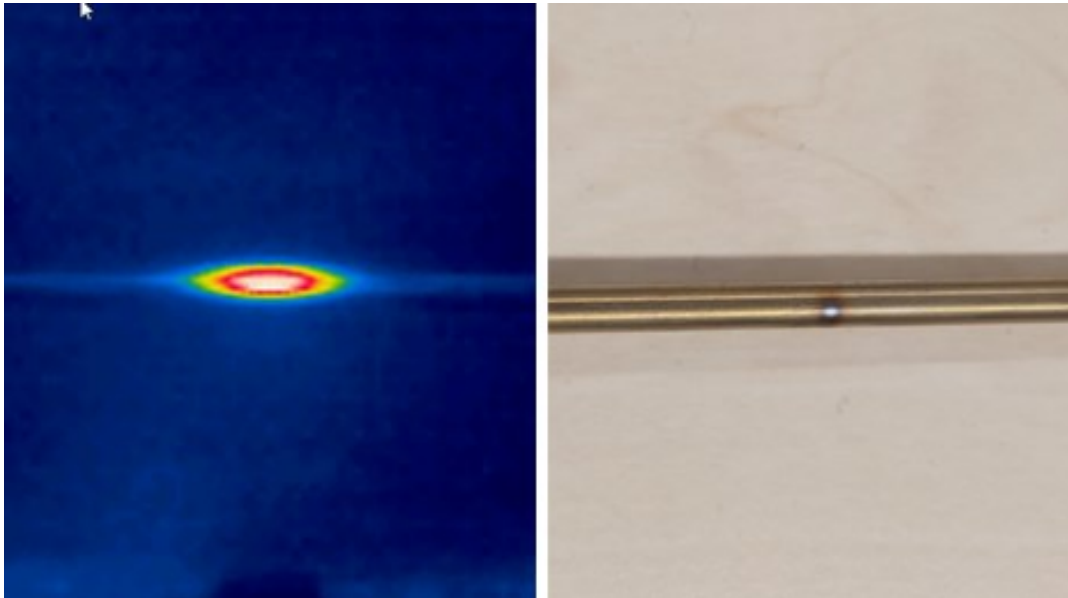
Kuvissa 17, 19 ja 21 esitellään putken halkaisijan vaihtelun vaikutus lopputiheyteen venymän suhteen. Toleranssialueella tapahtuva halkaisijan vaihtelu vaikuttaa magnesiumoksidin määrään ja valssauksen jälkeiseen tiheyteen. Harmaina pisteinä on merkattu tilanteet, joissa putken alkuhalkaisija on ylätoleranssissa ja valssattu halkaisija alatoleranssissa. Tällöin saadaan suurin muutos ja suurimmat tiheydet. Alempi harmaa kuvaa päinvastaista tilannetta, jossa halkaisijan muutos on pienin. Kuvissa esitellään tilannetta, jossa putken halkaisija muutetaan hitsatusta halkaisijasta valssattuun, jonka jälkeen putkea aletaan venyttämään. Tämän takia taulukon alle 10 % venymien tilanteisiin ei todellisuudessa päästä.

Valssatun tiheyden arvoksi Lovalin aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu $2,9\text{--}3,1 \text{ g/cm}^3$. Kaikissa testisarjoissa päästiin valssatussa tiheydessä yli 3 g/cm^3 arvoihin. Hyvä tiheys on seurausta täyttötiheydestä ja venymästä.

Korkeajännitekoestukset suoritettiin Lovalin laatuosastolla olevalla korkeajännitemittarilla. Koestus aloitettiin arvosta 0 V ja jännitettä nostettiin läpilyöntiin asti. Jos vuotovirta olisi noussut yli standardin EN 60335-1 määrittämän 5 mA, olisi senhetkinen jännite kirjattu ylös. Todellisuudessa 5 mA on niin iso vuotovirta,

että sitä ei tässä testissä saavutettu vaan aina tapahtui läpilyönti. Koestusmittariin säädettiin automaattinen jännitteen nosto. Ramppikulma, jolla jännitettä nostettiin, oli 100 V/s.

Suorissa ja sorvatuissa elementeissä läpilyönnit tapahtuivat pääosin satunnaisesta rakenteen heikoimmasta kohdasta. Virransyöttöä jatkettiin läpilyönnin jälkeen, jotta kohta saatiin lämpenemään. Läpilyönnin sijainti voitiin todeta lämpökameralla etsimällä hehkuva kohta (kuva 16). U-taivutetuissa elementeissä läpilyönnin sijainti oli taivutuksen alussa (kuva 13), kuten aikaisemmatkin Lovalin sisäiset tutkimukset ovat osoittaneet.



Kuva 16. Suoran elementin läpilyönti hehkuu lämpökameran kuvassa punaisena

7.1.1 Ø4,2 mittaustulokset

Pienimmän eli nanoputken pituusmuutoksen prosenttiluku ja täyttötiheyden keskiarvot jokaisesta sarjasta:

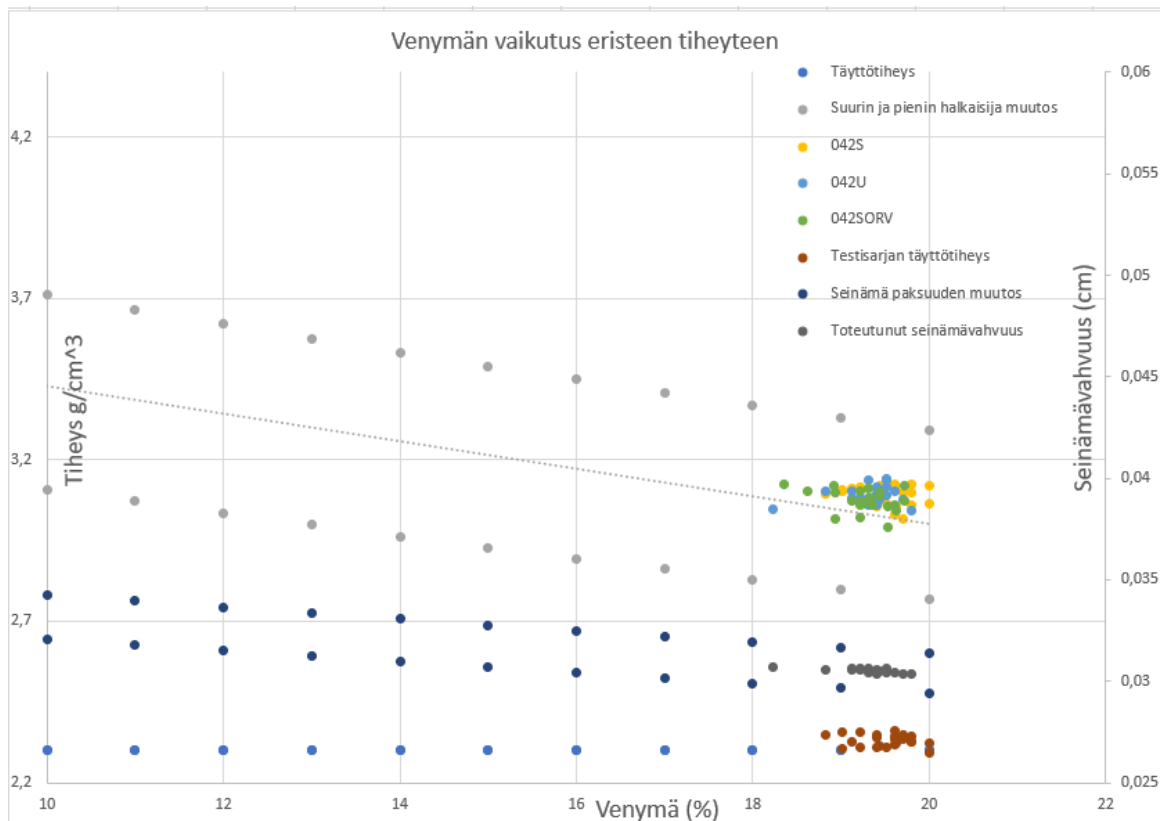
042SORV: Venymä 19,255 %, täyttötiheys 2,333 g/cm³

042S: Venymä 19,499 %, täyttötiheys 2,337 g/cm³

042U: Venymä 19,336 %, täyttötiheys 2,331 g/cm³

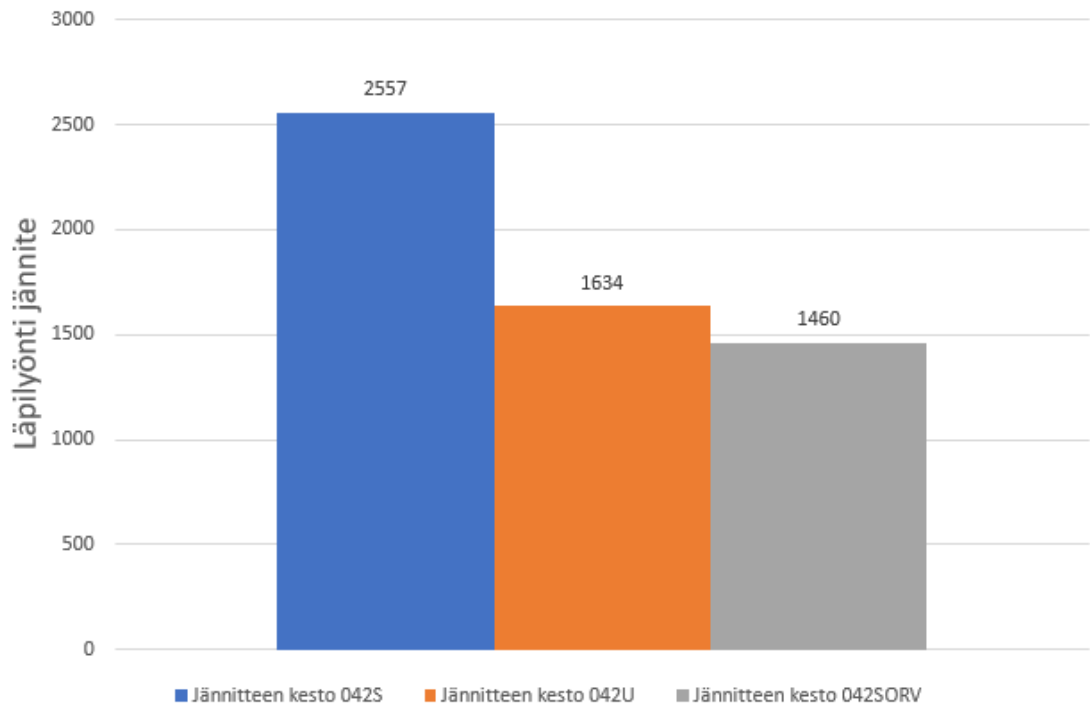
Nanoputken täyttötiheys tukee hyvän tuotteen valmistamista kustannustehokkaasti. Hyvän täyttötiheyden avulla voidaan venyttää sauvaa enemmän ilman ongelmia lämmönjohtavuuden ja sähköisen eristävyyden kanssa. Venyttämällä enemmän saadaan kustannussäästöä materiaalista, koska alkupituus putkelle voi olla lyhyempi.

Seinämävahvuus alittaa alkuperäisen seinämävahvuuden 0,3 mm, venymän ollessa noin 22 %, kun putken halkaisijan oletetaan olevan nominaalimitassa (kuva 17). Todellisuudessa normaalissa tuotannossa ei koskaan päädytä tilanteeseen, jossa seinämävahvuus laskisi keskiarvollisesti alle alkuperäisen. Täsmävalssauksen ja venytyksen aiheuttamat paikalliset muutokset seinämässä voivat laskea vahvuuden alle alkuperäiseen, jolloin korroosioilmiöt tulee huomioida.



Kuva 17. Tiheyden toleranssialue, mittaustulokset ja seinämvahvuusmuutos venymän suhteen välillä 0–20 %, putken halkaisijalla 4,2 mm

Suoran elementin jännitteenkesto oli noin 2550 V, U-taivutetun 1600 V ja sorvatun noin 1500 V. Naoelementtien korkeajännitetuloksista selvisi, että taivuttaminen alentaa jännitteenkestoja noin 40 % (kuva 18). Sorvatun ja U-taivutetun elementin välinen jännitteenkeston ero on huomattavan pieni. Testi osoittaa suoran elementin olevan huomattavasti parempi verrattuna taivutettuihin malleihin.



Kuva 18. Ø4,2 elementtien jännitteenkeston keskiarvot

Tuotannossa elementtejä testataan 1250 V suuruisella jännitteellä, joten tuloksista voidaan todeta jännitteenkeston olevan riittävällä tasolla myös kriittisimmällä mitoituksella.

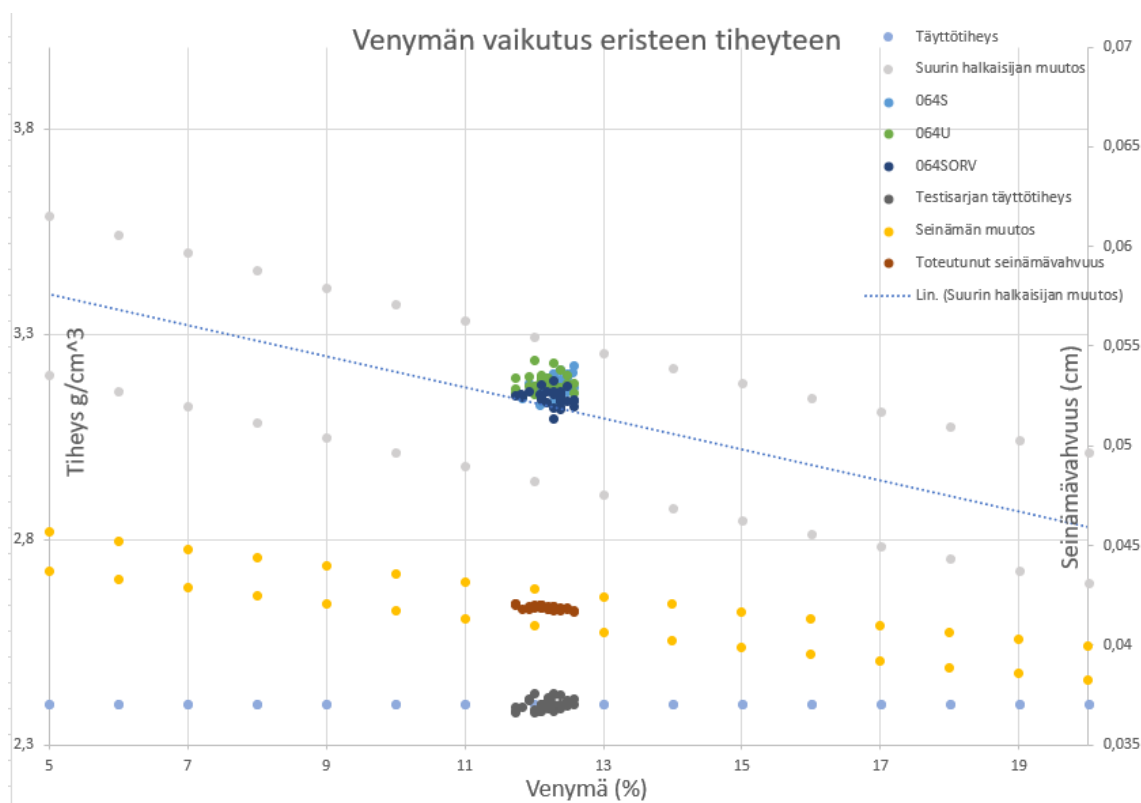
7.1.2 Ø6,4 mittaustulokset

Valssisilta vaihdettiin juuri ennen testisarjan valmistamista, joten tuloksia on vaikea verrata aikaisempiin tuloksiin. Kuitenkin venymän keskiarvo oli noin prosentin suurempi kuin vanhalla valssisillalla. Pituusmuutoksen prosenttiluku ja täyttötiheyden keskiarvot jokaisesta sarjasta:

064SORV: Venymä 12,268 %, täyttötiheys 2,401 g/cm³

064S: 12,272 %, täyttötiheys 2,399 g/cm³

064U: 12,156 %, täyttötiheys 2,398 g/cm³



Kuva 19. Tiheyden toleranssialue, mittaustulokset ja seinämävahvuusmuutos venymän suhteen putken halkaisijalla 6,4

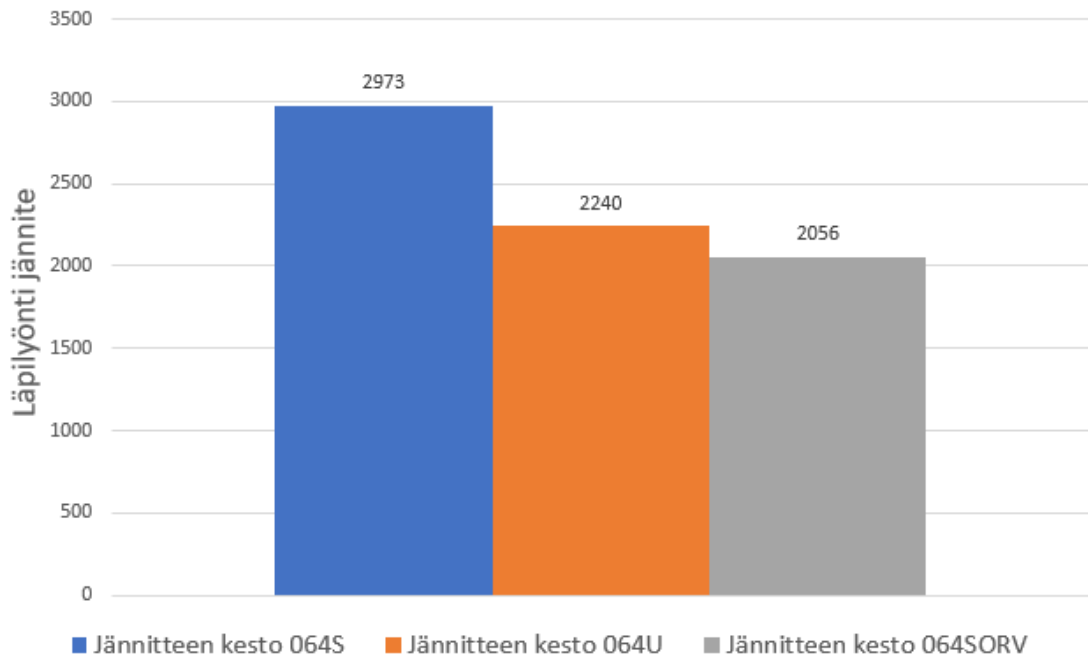
Valssattu tiheys on tässä putkikoossa nominaalimitoilla laskettua suurempi. Tuloksia tukevat putken halkaisijoiden mitat katkonnan ja valssauksen jälkeen. Katkaisun jälkeen halkaisijan keskiarvot olivat nominaalimitan yläpuolella, kun taas valssauksen jälkeen alapuolella. Magnesiumoksidia mahtuu katkaisun jälkeen enemmän putken sisään, ja sitä valssataan hieman laskennallista enemmän. Tällöin tiheys ja venymä paranevat.

Putken toteutunut seinämävahvuus venymän funktiona osoittaa seinämän olevan saaduilla venymillä alkuperäisen arvon yläpuolella. Seinämävahvuus laskee alle alkuperäiseen nominaalihalkaisijoilla, kun venymä on noin 17 %.

Elementin jännitteenkesto kasvaa huomattavasti verrattuna nanoelementtiin. Taivutettujen testikappaleiden jännitteenkesto oli noin 500 V parempi ja suoran elementin noin 400 V parempi kuin nanoputkella. Ero johtuu pääosin suuremmasta eristysvälistä, koska täyttötiheydet ovat lähes identtiset. Ero suoran ja

taivutettujen putkien jännitteenkestossa on noin 30 %. Elementtejä testataan tuotannossa 1500 V, joten saadut tulokset ovat riittäviä.

Korkeajännitekoestuksessa läpilyönti tapahtui keskimäärin seuraavissa arvoissa:



Kuva 20. Ø 6,4 elementtien jännitteenkeston keskiarvot

7.1.3 Ø8,5 mittaustulokset

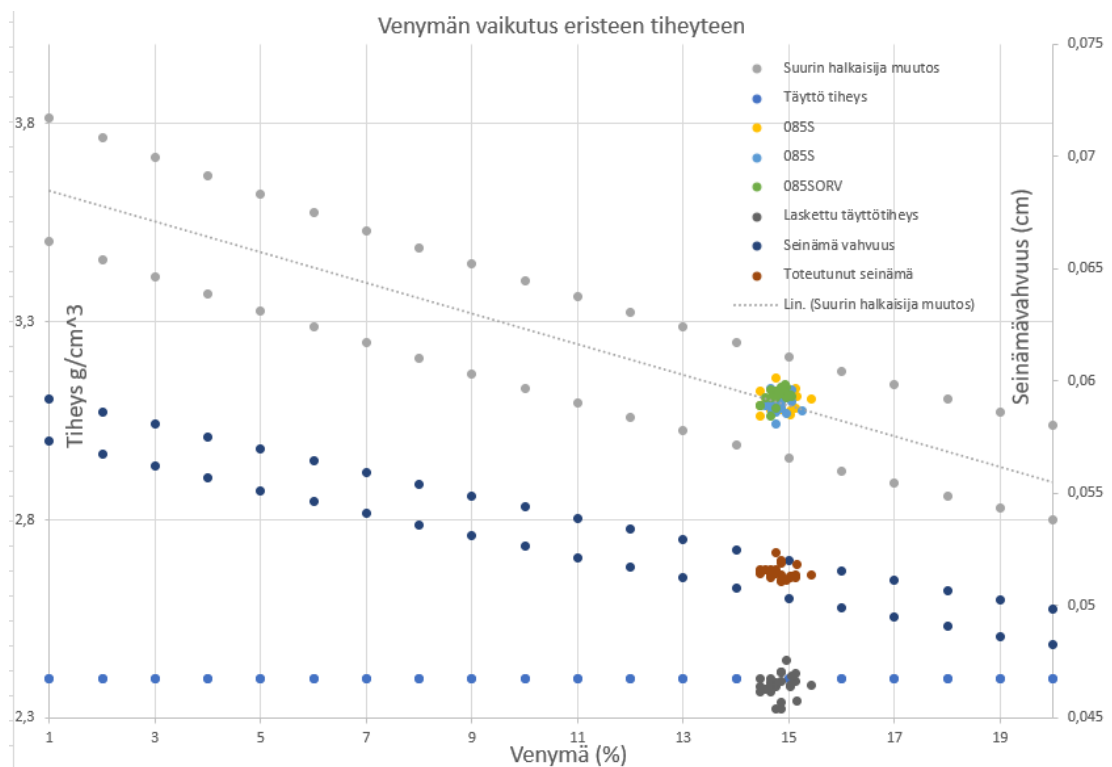
Paksuimman vastuselementin täyttötiheys ja venymäprosenttien keskiarvot:

085SORV: 14,803 %, täyttötiheys 2,284 g/cm³

085S: 14,794 %, täyttötiheys 2,387 g/cm³

085U: 14,831 %, täyttötiheys 2,383 g/cm³

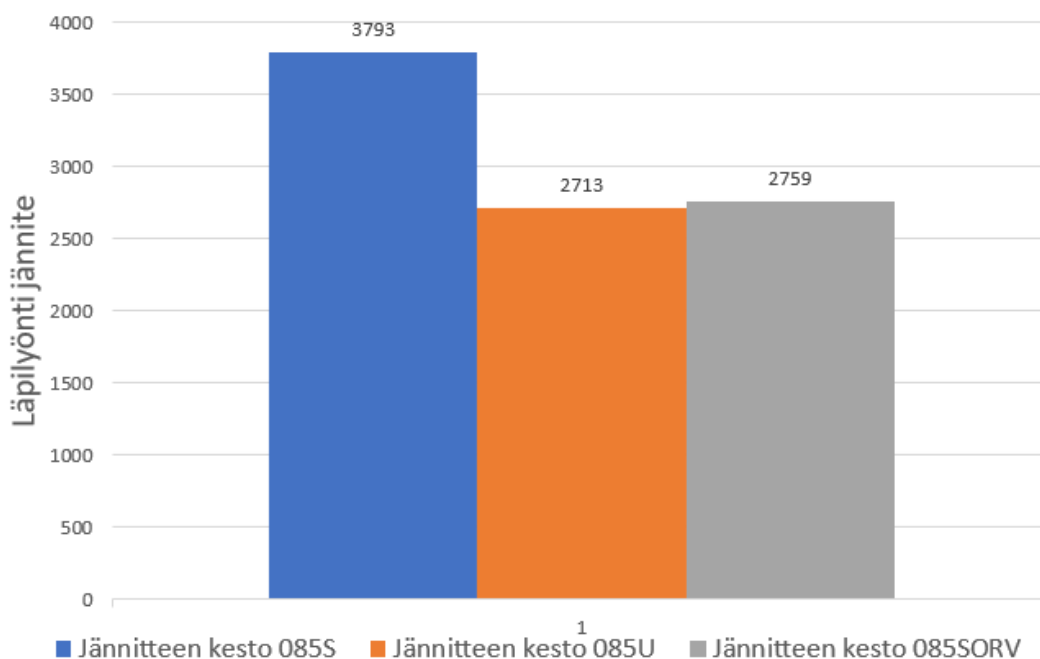
Halkaisijalla 8,5 mm olevassa putkessa venymän keskiarvo on hyvä. Suurempi venymä aiheuttaisi valssatun tiheyden tippumisen alle 3 g/cm^3 . Tiheyden arvo ei saisi olla matalampi, jotta pysytään laadukkaan tuotteen vaatimuksissa. Valsauksen jälkeinen tiheys on toleranssialueen keskellä, joten prosessi on säädetty oikein. Täyttötiheydessä on tässä putkikoossa suurin hajonta, jonka arvelaan johtuvan täyttökoneesta. Seinämävahvuus on tässä putkikoossa alkupe- räistä 0,5 mm paksumpi aina 18 % asti (kuva 21).



Kuva 21. Tiheyden toleranssialue, mittaustulokset ja seinämävahvuusmuutos venymän suhteen putken halkaisijalla 8,5

Eristevälin kasvu verrattuna pienempään putkikokoon kasvattaa jännitteenkestoa huomattavasti. Suoran elementin jännitteen keskiarvo 3,8 kilovolttia ei kuitenkaan anna oikeaa kuvaa kestävydestä. Suoralla elementillä läpilyönti tapahtui helmen alla kolmasosalla testatuista kappaleista. Kaikissa näissä läpilyöntijännite oli noin 3–3,2 kilovolttia. Läpilyönnin tapahtuminen helmen alla kertoo poikkeavuudesta rakenteesta. Mahdollisia syitä tälle voivat olla tiivistyksessä käytetyn hartsin ja koveteaineen väärä seossuhde, ilmakupla helmen alla tai

täyttötulpan poltosta syntynyt nokeentuminen. Tapahtuman selvittäminen vaatisi tiivistämisen tarkempaa tutkimista. Suorissa testielementeissä, joissa läpilyönti tapahtui sattumanvaraisesta kohdasta eristeen läpi, keskiarvo jännitteenkestolle oli noin 4,1 kilovoltia. Taivuttaminen alensi jännitteenkestoa tällä putkikoolla noin 30 %, jolloin se oli keskiarvallisesti 2750 voltia. (kuva 22).



Kuva 22. Ø8,5 elementtien jännitteenkeston keskiarvot

7.1.4 Seinämävahvuuden muutos

Valssatussa tiheydessä on huomioitava valssauksen aiheuttamat muutokset putken mitoissa. Halkaisijan ja pituuden muutosten lisäksi seinämävahvuus muuttuu valssauksen aikana. Valssauksen aikana putken seinämävahvuus muuttuu, mikä vaikuttaa putken sisällä olevaan tilavuuteen ja magnesiumoksidin tiheyteen. Seinämän muutokset on laskettu seuraavasti:

Kaava 1,

$$S_2 = \frac{L_1 * S_1 * d_1}{d_2 * L_2}$$

jossa L_1 ja L_2 ovat putken pituudet, d_1 ja d_2 halkaisijat sekä S_1 ja S_2 putken seinämävahvuudet ennen ja jälkeen valssauksen. Tuloksena saadaan putken koko pituudelta laskettu keskiarvo.

7.2 Mittaepävarmuus

Mittaepävarmuudella tarkoitetaan mittavälineistä, mittaajasta ja mittaamisolosuhteista aiheutunutta mitatun mitan ja todellisen mitan välistä eroa. Mittaepävarmuus tulee huomioida tuloksia analysoitaessa, jotta päästään testauksen kannalta järkevään lopputarkkuuteen. Mittaepävarmuus voidaan jakaa systemaattisiin, satunnaisiin ja karkeisiin virheisiin. Karkeat virheet ovat mittauksessa tapahtuvia yksittäisiä suuria virheitä. Systemaattisissa virheissä virhe toistuu läpi testierän. Esimerkiksi mittalaitteen kalibroinnista johtuva mittavirhe on systemaattinen ja toistuu jokaisessa mittauksessa. Satunnainen mittavirhe on epäsystemaattinen virhe todellisen mitan ja mitatun mitan välillä. Satunnainen virhe voi johtua esimerkiksi huonosta jäysteen poistosta, jolloin mittatulos vääristyy (12, s.35.)

7.2.1 Mittaushaasteet

Tässä opinnäytetyössä suurinta epävarmuutta aiheutti halkaisijoiden mittaaminen. Mittaamisen suurin haaste oli putken suoruus: Putki ei ole tarpeeksi suora, jotta sen voisi kiinnittää lasermittaan halkaisijan mittausta varten. Halkaisijat mitattiin kiinnittämällä putki sorviin, jolloin putken sai suoraksi kiristämällä se pakan ja karan väliin. Tapa oli hidas eikä sovi jatkuvan testaamisen mittaustavaksi. Jos jatkuvaa testaamista halutaan suorittaa mikrometrin tarkkuudella, on investoitava mittalaitteeseen.

8 Yhteenveto

Testimenettelyn suunnittelu tuotti Loval Oy:lle tavan seurata tuotannossa tapahtuvia muutoksia vastuselementin valmistuksen eri työvaiheissa. Jatkuvan seurannan aikana tehtävät mittaukset auttavat tarkentamaan eri työvaiheiden vaikutusta lopputulokseen. Korkeajännitekoestuksesta saadut mittatulokset antavat suunnittelulle raja-arvoja jännitteenkestolle eri sovelluksissa.

Tuotannon aikana tehdyt mittaukset osoittivat valssilla tapahtuvan venymän olevan sopivaa täyttötiheyteen nähden. Täyttötiheyden muutokset näkyvät venymässä, minkä avulla koneiden kuntoa voidaan arvioida. Taivutusten vaikutus maksimijännitteenkestoon on merkittävä ja laskee sitä 30–40 %. Jännitteenkesto kuitenkin täyttää standardien vaatimukset kriittisimmilläkin mitoituksilla.

Tuloksiin voidaan luottaa muutamin varauksin. Mittaepävarmuuden aiheuttamat tulosten vaihtelut, seinämävahvuuden paikalliset muutokset sekä läpilyönnin poikkeavuudet 085S-elementillä antavat kuitenkin aiheen olla kriittinen tulosten suhteen. Kosteuden ja käyttölämpötilan vaikutukset tulee huomioida, jos testausta halutaan tarkentaa.

Jatkossa testimenettelyä pitää kehittää eteenpäin mittaustapojen suhteen, koska päiviä kestävä mittaaminen ei sovi jatkuvaan testaamiseen. Testimenettelyä voitaisiinkin kehittää jatkossa lisätutkimuksien avulla sopivammaksi jatkuvalle testaamiselle.

Lähteet

- 1 Perustietoa. Sisäinen aineisto. Loval Oy. Luettu 21.10.2022.
- 2 Tietoa meistä. Verkkoaineisto. Loval Oy. <<https://www.loval.fi/fi/tietoa-meista>>. Luettu 15.10.2022.
- 3 Nibe tietoa. Verkkoaineisto. NIBE Group. <<https://www.nibe.com/nibe-group>> Luettu 27.10.2022.
- 4 SFS EN 60335-1, Kotitalouksiin ja vastaaviin käyttöihin tarkoitettut sähkölaitteet. 2013. Turvallisuus. Osa1: Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. s.42.
- 5 Perustietoa. Sisäinen aineisto. Loval Oy. Luettu 21.10.2022.
- 6 Taivutussäteet. Sisäinen aineisto. Loval Oy. Luettu 29.10.2022.
- 7 Rantanen, Tero. 2018. Sähkökentän taipuminen. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26376/Rantanen.pdf?sequence=4>>. s.8.
- 8 Ionisidos. Verkkoaineisto. <<https://peda.net/laukaa/sk/oppiaineet/1-yhteiset/kemia/8-ik/hejy/tk1:file/download/93e8044df979e52382bdb80446d1f8285683e912/Jaksollinen%20j%C3%A4rjestelm%C3%A4%20ja%20sidokset.pdf>>. Luettu 17.10.2022.
- 9 Eristysresistanssin heikentyminen ajan suhteen. Sisäinen aineisto. Loval Oy. Luettu 29.10.2022
- 10 Täyttötiheyden vaikutus venymään. Sisäinen aineisto. Loval Oy. Luettu 28.10.2022.
- 11 Teknistä tietoa. Sisäinen aineisto. Loval Oy. Luettu 22.10.22.
- 12 Mittaepävarmuus. VTT. 2011. <<https://publications.vtt.fi/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>>. s. 35

Ohjeistus testimenettelyn läpivientiin

Ohjeet läpilyönti koestukselle

Lisäohjeiden tarkoituksena on estää tuotannon jatkuminen ennen tarvittavia mittauksia. Mittaukset suorittaa testimenettelyä suorittava henkilö, ellei toisin sovita. Mittaustulokset kerätään mittatulostaulukkoon. HUOM, ei täsmävalssausta eikä venytystä!

1. HITS. + KATK. + POISTA JÄYSTE työvaiheen jälkeen ilmoitus testimenettelyä valvovalle henkilölle. Tuotanto ei voi jatkua putken osalta ennen erillistä lupaa.
Mittaukset putkelle:
 - Mittaa halkaisija ristimitalla, mikrometri tai muu vastaavan tarkkuuden omaava mittalaite
 - Paino
 - Pituus
 - Leimaus, Juoksevalla numerolla
2. Spiraalin valmistuttua ilmoitus testimenettelyä valvovalle henkilölle. Tuotanto ei voi jatkua spiraalin osalta ennen erillistä lupaa.
Mittaukset spiraalille:
 - Paino
 - Merkkää samalla leimalla, kun putken leiman numero
3. Ilmoitus testimenettelyä valvovalle henkilölle ennen täytön aloittamista. Täyttökoneella tulee putkeen valita spiraali, joka on merkattu samalla leimalla kuin putki. Lisäksi täyttöputken numero tulee olla sama kuin leimassa viimeisenä oleva kolminumeroinen luku; Esim. Putken leima on 0855-001-> spiraaliksi valitaan 001. Tämä asetetaan täyttökoneen putkelle kohtaan 1.
4. Valssauksen jälkeen ilmoitus testimenettelyä valvovalle henkilölle
Mittaukset:
 - Pituus, HUOM! Nano mittaus tulee tehdä ennen katkaisua
 - Halkaisija
 - Paino
5. Hehkutuksen jälkeen ilmoitus testimenettelyä valvovalle henkilölle. Ei taivutusta ennen erillistä lupaa.
Mittaukset:
 - Halkaisijan ristimita, mikrometri tai muu vastaavan tarkkuuden omaava mittalaite
6. Taivuta ja sorvaa muodot
7. Korkeajännitekoestus tehdään läpilyöntiin asti nostamalla jännitettä tasaisesti ramppikulmalla 100 V/s.
8. Kaikki mittaustulokset kirjataan Excelliin, joka laskee automaattisesti täyttötiheyden ja pituusvenymän. Tulokset tulee olla pienlaite direktiivin, ja muiden hyväksymislaitosten ohjearvot täytettäviä.