



# HITSAUSPARAMETRIEN OPTIMOINTI

Optimaalisen puristuspaineen määrittäminen suhteessa  
hitsaustehoon

Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Konetekniikka, insinööri (AMK)

Syksy, 2024

Jan Lundberg

---

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli optimoida hitsausparametreja SSAB:n Hämeenlinnan putkitehtaalla, keskittyen erityisesti puristuspuheen ja hitsaustehon suhteeseen korkeataajuushitsauksessa. Tutkimuksessa analysoitiin tuotantolinjan H4 parametreja, ja sen tärkeimpänä lähtökohtana oli tuotantoprosessin tehostaminen ja laadun parantaminen. Käytännössä tämä tarkoitti systemaattisten koeajojen suorittamista eri putkiprofiileille, joiden avulla etsittiin optimaalisia puristuspuheita. Näytteitä testattiin litistys- ja laajennuskokein sekä analysoimalla näytteistä otettuja hiekuvia.

Työssä perehdyttiin ensin putkituotantolinjan toimintaperiaatteisiin ja korkeataajuushitsauksen teoriaan. Tämän jälkeen tutkittiin tuotannossa käytössä olevia hitsausparametreja ja suoritettiin koeajot. Koeajojen tuloksia vertailtiin ja analysoitiin niiden vaikutusta hitsatun sauman laatuun.

Tutkimustulokset korostivat hitsausparametrien säädön merkitystä laadukkaan hitsaussauman tuottamisessa. Analyysin perusteella annettiin suosituksia parametrien säätämiseksi, mikä auttaa tehostamaan hitsausprosessia ja parantamaan lopputuotteiden laatua. Tutkimus osoitti myös, että nykyiset teoreettiset hitsausarvot eivät välttämättä sovellu kaikille tuotteille, ja puristuspuheen liiallinen käyttö voi jopa heikentää hitsaussauman laatua. Suositeltiin, että jokaiselle tuotteelle tai ainakin kullekin putkiryhmälle suoritetaan omat koeajot optimaalisten puristuspuheiden määrittämiseksi.

Tilajayrityksenä toimi SSAB Hämeenlinnan putkitehdas, joka valmistaa teräksestä paalu-, ohutseinä- ja rakenneputkia. Opinnäytetyön toteutusvaihe suoritettiin tuotannollisesti haastavana aikana, jolloin koeajojen laajuus jäi suunniteltua kapeammaksi. Siitä huolimatta opinnäytetyössä saatiin koottua ja analysoitua tärkeää dataa, jolla voidaan määrittää tuotekohtaiset ohjearvot. Jatkotoimenpiteenä ehdotettiin koeajojen suorittamista kaikille tuotteille, mikä mahdollistaisi tuotekohtaisten optimaalisten hitsausparametrien määrittämisen.

In this thesis, the goal was to optimize welding parameters at SSAB's Hämeenlinna tube factory, focusing on the relationship between compression pressure and welding power in high-frequency welding. The study analyzed parameters of production line H4, aiming to enhance the production process and improve quality. This involved systematic trial runs on different pipe profiles to find optimal compression pressures, testing samples through flattening, expansion tests, and microstructure analysis.

The work began with an overview of pipe production line operations and HF welding theory, followed by examining and conducting trials with current welding parameters. Results showed the importance of adjusting welding parameters for quality seams, suggesting parameter modifications to improve the welding process and product quality.

It was found that current theoretical welding values might not suit all products and that excessive compression pressure can reduce seam quality. Each product or pipe group should have individual trial runs for determining optimal pressure settings.

The client, SSAB Hämeenlinna tube factory, manufactures a variety of steel pipes. Despite challenging production conditions limiting trial scope, valuable data was gathered for setting product-specific guidelines. Future recommendations include conducting trials for all products to determine their optimal welding parameters.

Keywords Tube production, high-frequency welding, welding parameters  
Pages 19 pages and appendices 8 pages

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Putkituotanto .....	2
3	Korkeataajuushitsaus .....	3
3.1	Korkeataajuushitsauksen hyödyt .....	4
3.2	Korkeataajuushitsauksen toimintaperiaate .....	4
3.3	Korkeataajuushitsauksen parametrit .....	7
3.3.1	Induktiokela ja impederi .....	7
3.3.2	V-aukko .....	7
3.3.3	Puristusaine .....	9
3.3.4	Hitsausteho ja -nopeus .....	10
4	Esimuovaus .....	11
5	Koeajot ja testausmenetelmät .....	12
5.1	Testausmenetelmät .....	12
5.2	Koeajot .....	13
6	Tulokset .....	14
6.1	Vertailu .....	15
6.2	Johtopäätökset .....	17
7	Yhteenveto .....	18
	Lähteet .....	19

## Liitteet

Liite 1.	Näyte 1.1 90*90*5 S355J2H
Liite 2.	Näyte 1.2 90*90*5 S355J2H
Liite 3.	Näyte 1.3 90*90*5 S355J2H
Liite 4.	Näyte 2.1 80*80*5 S355J2H
Liite 5.	Näyte 2.2 80*80*5 S355J2H
Liite 6.	Näyte 2.3 80*80*5 S355J2H
Liite 7.	Näyte 3.1 80*80*6 S355J2H
Liite 8.	Näyte 3.2 80*80*6 S355J2H

# 1 Johdanto

SSAB:n Hämeenlinnan putkitehtaalla valmistetaan teräksestä paalu-, ohutseinä- ja rakenneputkia. Tehtaan neljästä tuotantolinjasta yhdellä (H4) valmistetaan paalu- ja rakenneputkia ja kolmella (H1-H3) ohutseinäputkia. Tehtaan valmistamien tuotteiden halkaisijat vaihtelevat 16–127 mm välillä ja seinämäpaksuudet 0.9–8 mm välillä.

Tuotantolinjoilla on mahdollista valmistaa useita erilaisia putkiprofiileja, pyöreistä aina monimutkaisimpiinkin profiileihin (Kuva 1). Tehtaan vuoden 2022 toimituksista tonneissa 53 % olivat paalu-, 39 % rakenne- ja 8 % ohutseinäputkia.

Putkitehtaalla on vuonna 2020 toteutettu kahden tuotantolinjan modernisointi, joista yksi oli paalu- ja rakenneputkilinja. Modernisoinnin myötä tuotantolinjan operaattoreiden käyttöön on saatu tarkempaa tietoa tuotantolinjan parametreista. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan paalu- ja rakenneputkilinjan H4 korkeataajuushitsauksen tärkeimpiä parametreja, puristuspainetta ja hitsaustehoa. Tällä hetkellä tuotannossa ei ole ohjeistusta eri tuotteilla käytettävistä puristuspainesta, vaan hitsauksen säädöt perustuvat operaattorin omaan ammattitaitoon. Määrittelemällä ohjeistus puristuspainesta, saadaan standardisoitua operaattoreiden työskentelytapoja, jonka myötä tuotteen tai laadun vaihtuessa, säätöajat lyhenevät ja myyntiin kelpaamattomien tonniin määrä vähenee.

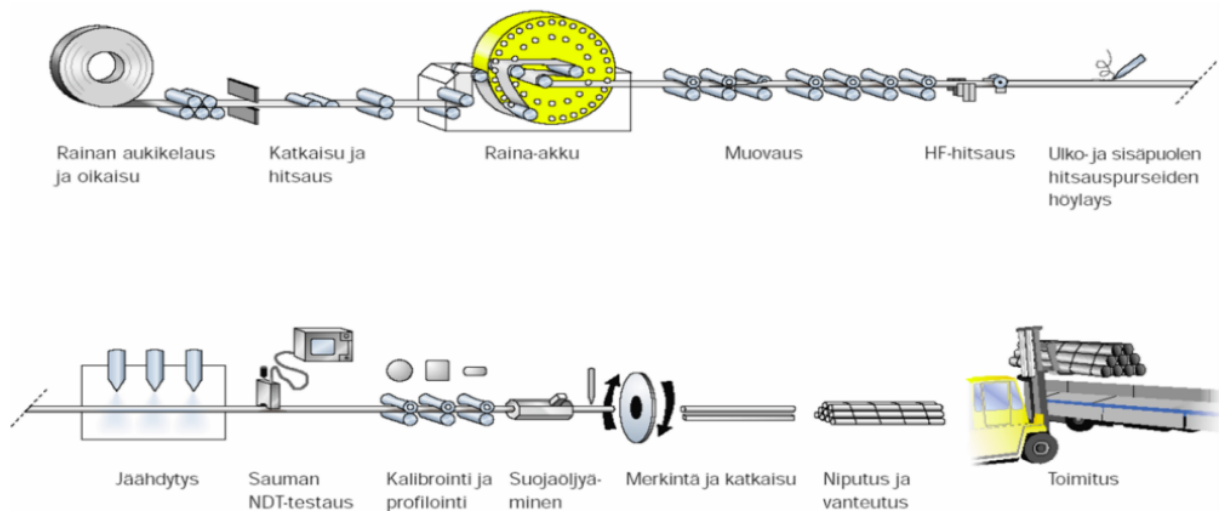
Optimaaliset tuotekohtaiset puristuspainet tullaan etsimään suorittamalla systemaattisia koeajoja. Koeajoja varten tarkastellaan aiempia tuotannossa käytössä olleita parametriarvoja (hitsausteho, puristusaine, hitsausnopeus), joista lasketaan keskiarvot tuotekohtaiset lähtöarvot koesarjoja varten. Koeajoissa tullaan nostamaan/laskemaan hitsauksen puristusainetta ja hitsaustehoa ja jokaisen parametrimuutoksen jälkeen putkesta otetaan näytepalat. Näytepaloille suoritetaan litistys- ja laajennuskokeet, sekä paloista otetaan hiekuvat, joita analysoimalla toimivimmat parametriarvot voidaan päätellä. Koeajot tullaan toteuttamaan H4-linjan pienimmällä, keskikokoisella ja suurimmalla putkihalkaisijapiirillä.

Työn alussa perehdytään putkituotantolinjan toimintaperiaatteeseen, sekä korkeataajuushitsauksen teoriaan. Tämän jälkeen selvitetään tuotannossa tällä hetkellä käytössä olevat hitsausparametrit, joiden perusteella koeajot voidaan aloittaa. Koeajojen jälkeen tuloksia tullaan vertaamaan keskenään sekä analysoimaan parametrimuutosten vaikutusta hitsattuun saumaan.

## 2 Putkituotanto

Tehtaan kaikkien neljän tuotantolinjan toimintaperiaate on sama (Kuva 1). Prosessi alkaa linjan alkupään kelauksesta, jossa valmiiksi leikatut rainat nostetaan linjaan. Kelauksessa raina kulkee raina-akun läpi, joka mahdollistaa linjan keskeytymättömän ajon varaamalla rainaa, jotta kelausoperaattori ehtii hitsaamaan rainan päät yhteen. Seuraavaksi raina kulkee muovauksen läpi, joka koostuu muovausrullastosta ja veitsirullastosta. Muovauksessa raina muovataan pyöreäksi riippumatta lopullisesta putkiprofiilista. Avoprofiiliksi muovattu putki kulkee korkeataajuushitsauksen läpi, jossa putken reunat lämmitetään ja liitetään yhteen puristamalla ne toisiaan vasten hitsausrullastolla. Hitsatun sauman päälipurse poistetaan höylämällä. Hitsauksesta ja höyläyksestä lämmennyt putki jäähdetään vesialtaassa huoneenlämpöön ennen putken kalibrointia ja profilointia. Kalibroinnilla ja profiloinnilla määritetään putken lopullinen geometria. Tuotantolinjoilla on käytössä lentävät sahat, jotka sahaavat putket määrämittäisiksi, putken kulkiessa linjan ajonopeutta. Katkaisun jälkeen putket kulkevat niputukseen, jossa putket kootaan työkohtaisten ohjeiden mukaisiin nippukokoihin.

Kuva 1. Prosessikaavio Hämeenlinnan putkituotantolinjasta (SSAB, n.d.).



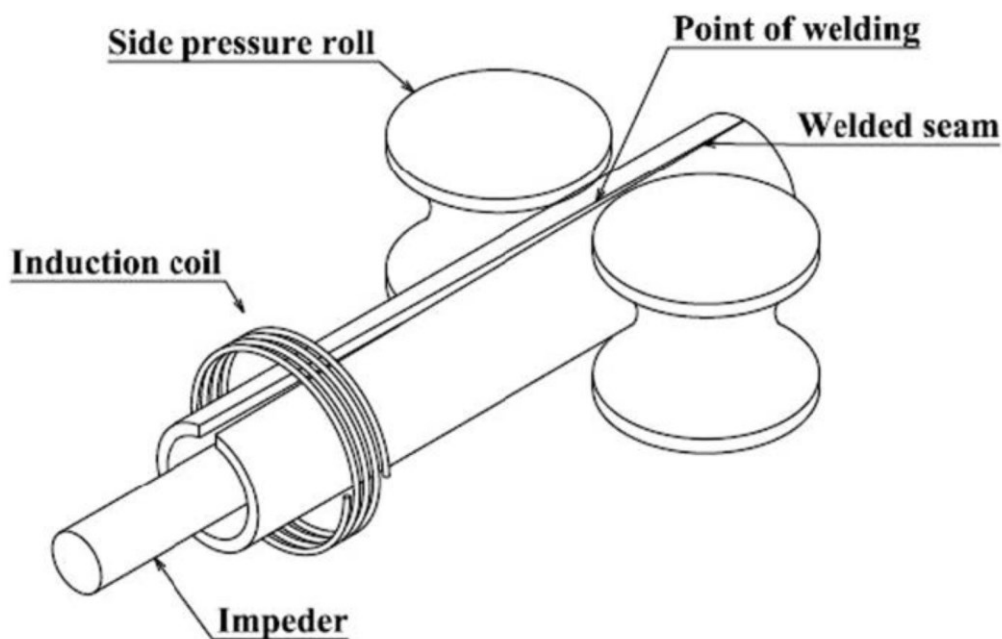
### 3 Korkeataajuushitsaus

Korkeataajuushitsaus on yleisin putkituotannossa käytetty hitsausmenetelmä.

Korkeataajuushitsauksessa virran tuonti voidaan toteuttaa kahdella tavalla, joko induktiivisella tai konduktiivisella menetelmällä. Hämeenlinna tehtaalla käytetään induktiivista korkeataajuushitsausmenetelmää. Korkeataajuushitsauksen suosiota selittää sen kyky tuottaa laadukasta hitsisaumaa useilla eri parametrisyöyhdistelmillä.

Korkeataajuushitsauksen joustavuuden vuoksi, onnistunutta hitsisaumaa ei voida pitää itsessään merkinä optimaalisista hitsausparametreista. Jotta optimaaliset hitsausparametrit voidaan määrittää, tulee korkeataajuushitsauksen toimintaperiaate ymmärtää. (Wright, 1997, s. 2). Korkeataajuushitsauksessa rainan reunat lämmitetään sulamispisteeseen, jonka jälkeen reunat painetaan vastakkain hitsausrullastolla (Kuva 2), sivurulla, (side pressure roll), hitsauspiste (point of welding), hitsisauma (welded seam), induktiokela (induction coil). Hitsausrullien puristusvoima puristaa hitsisaumasta sulan materiaalin ulos, näin liittäen rainan reunat toisiinsa. (Nichols, 1999, s. 4)

Kuva 2. Induktiivinen hitsausmenetelmä putkituotannossa (United technical, 2022).



### 3.1 Korkeataajuushitsauksen hyödyt

Korkeataajuushitsaus on merkittävästi muuttanut teräsputkituotannon kenttää tarjoamalla monia etuja verrattuna perinteisiin menetelmiin. Tämän tekniikan hyödyt voidaan jakaa neljään pääalueeseen: prosessin nopeus, kustannustehokkuus, hitsaussaumojen laatu sekä soveltuvuus eri terästyypeille.

Korkeataajuushitsauksen nopeus on huomattavasti suurempi kuin perinteisissä menetelmissä, mikä mahdollistaa tuotannon tehostamisen ja suurten tilausmäärien käsittelyn lyhyemmässä ajassa (Rajala, 1997, s. 11). Tämä nopeus ei ainoastaan lisää tuotantokapasiteettia, vaan myös mahdollistaa markkinoiden nopeamman palvelun, mikä on olennaista kilpailukyvyn kannalta, alalla, jossa voittomarginaalit ovat melko pienet (Wright, 1999, s. 4).

Korkeataajuushitsaus on kustannustehokas. Tehokkuuden lisääntyminen prosessin nopeuden myötä vähentää työvoimakustannuksia ja säästää aikaa. Parempi energiatehokkuus vähentää energiakustannuksia, mikä on tärkeää sekä taloudellisesta että ympäristöllisestä näkökulmasta. Korkeataajuushitsauksen avulla saavutetaan korkealaatuiset hitsaussaumot. Laadukkaat saumat ovat keskeisiä putkien lujuuden ja pitkäikäisyyden kannalta, erityisesti paineita ja mekaanista rasitusta kestävässä sovelluksissa. Tämän menetelmän avulla tuotetut saumat ovat tasaisia ja vahvoja, mikä parantaa tuotteen luotettavuutta. (Wright, 1999, s. 1)

Korkeataajuushitsaus on soveltuva useille eri terästyypeille, mikä tekee siitä joustavan valinnan monenlaisiin tuotantotarpeisiin. Tämä monipuolisuus mahdollistaa laajan valikoiman putkikokoja ja -muotoja, mikä on etu monipuolisten tuotevalikoimien valmistajille. (WorldAutoSteel, n.d.)

### 3.2 Korkeataajuushitsauksen toimintaperiaate

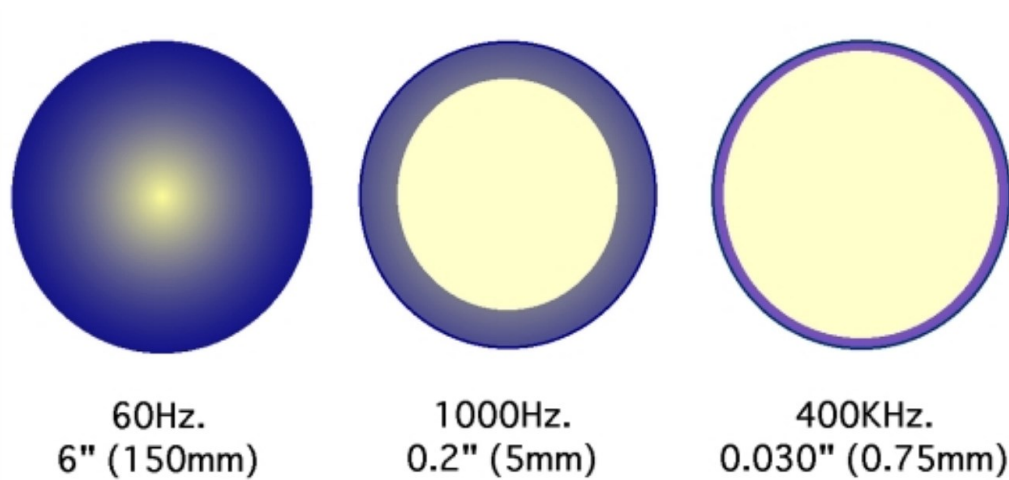
Korkeataajuushitsaus perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jossa putki kulkee induktiivisen kelan läpi. Korkeataajuushitsauksessa tavoitteena on tuoda sähkövirta rainan reunojen pintaan, jossa materiaalin ominaisresistanssi vastustaa indusoitavaa virtaa ja rainan reunat kuumenevat. (Wright, 1997, s. 2).

Korkeataajuuisen virran kulkiessa johtimien läpi, syntyy kaksi vaikutusta: pintavaikutus ja läheisyysvaikutus. Nämä vaikutukset ovat oleellinen osa onnistunutta hitsaustapahtumaa.



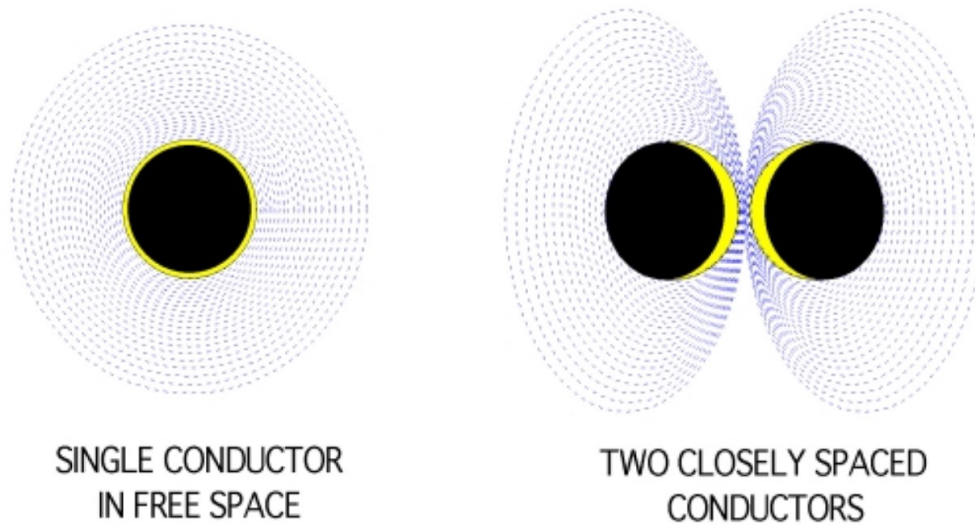
Pintavaikutus tarkoittaa ilmiötä, jossa korkeataajuusvirran kulkiessa johtimen läpi, virrantiheys ei jakaudu tasaisesti koko johtimeen, vaan se keskittyy pääasiassa johtimen pintaan. (Nichols, 1999, s. 1) Pintavaikutusta voidaan mitata virran tunkeutumissyvyydellä, mitä pienempi tunkeutumissyvyys, sitä voimakkaampi pintavaikutus. Tunkeutumissyvyyteen vaikuttaa virran taajuus, mitä korkeampi taajuus, sitä matalampi tunkeutumissyvyys (Kuva 3) (Scott, n.d. s. 1).

Kuva 3. Taajuuden vaikutus pintaefektin voimakkuuteen (Electronic Heating Equipment, 1999, s. 2).



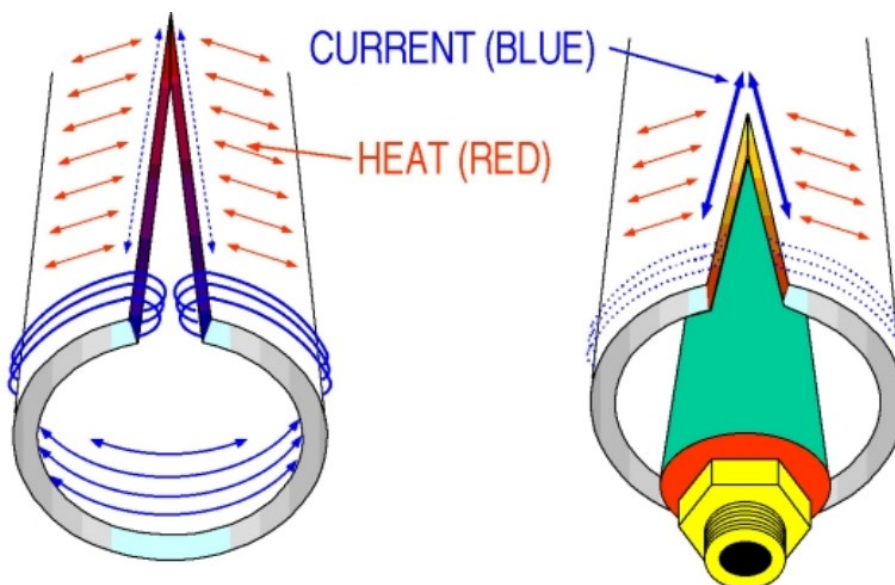
Läheisyysvaikutuksella tarkoitetaan tapahtumaa, joka syntyy johtimien ollessa lähellä toisiaan, korkeataajuusvirran kulkiessa vastakkaisiin suuntiin vierekkäisten johtimien välillä, virta kohdistuu johtimien reunoihin. Läheisyysvaikutus perustuu pääasiassa induktiiviseen reaktanssiin. Läheisyysvaikutuksen voimakkuuteen vaikuttaa johtimien etäisyyden lisäksi taajuus. Mitä lähempänä johtimet ovat toisiaan ja mitä korkeampi taajuus, sitä voimakkaampi läheisyysvaikutus (kuva 4) yksittäinen johdin vapaassa tilassa (single conductor in free space), kaksi lähekkäin asetettua johdinta (two closely spaced conductors) . (Wright, 1999 s. 1–2)

Kuva 4. Läheisysefektin vaikutus hitsattavaan kappaleeseen (Electronic Heating Equipment, 1999, s. 2).



Läheisyys- ja iho vaikutuksen lisäksi virran kulku johtimissa ohjataan impederin avulla. Impederi on magneettisesta materiaalista, kuten ferriitistä, valmistettu tanko, joka sijoitetaan putken sisään nostamaan putken sisäpinnan impedanssia (Kuva 5), virta (current), lämpö (heat). (Wright, 1999, s. 2) Impederin käyttö lisää huomattavasti hitsausprosessin tehokkuutta ja vakautta (Impeder Cores, 2018, s. 2).

Kuva 5. Impederin vaikutus virran kulkuun putken pinnalla (Electronic Heating Equipment, 1999, s. 2).



### 3.3 Korkeataajuushitsauksen parametrit

Korkeataajuushitsauksessa vain 20 % käytetystä energiasta kuluu hitsisauman muodostumiseen, loput energiasta muuttuu hukkalämmöksi lämmittäen impederiä, induktiokelaa ja hitsausrullaston rakenteita. Korkeataajuushitsauksen tehokkuuteen, sauman muodostumiseen sekä laatuun vaikuttaa monta eri tekijää. Koska korkeataajuushitsaus on hyvinkin joustava hitsaustapa, onnistuu hitsaussauman luominen jopa huonoilla parametriarvoilla. Optimoimalla hitsausparametrit saavutetaan merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa. (Wright, 1999, s. 1) Näistä parametreista keskeisimpiä ovat, V-aukon pituus ja kulma, induktiokelan ja impederin sijainti, hitsausteho sekä puristusaine.

#### 3.3.1 Induktiokela ja impederi

Ensisijainen syy korkeataajuushitsauksen alhaiseen hyötysuhteeseen on induktiokelan ja impederin väärä sijainti (Wright, 1999, s. 2). Induktiokela tulisi asettaa mahdollisimman lähelle hitsausrullia, ilman että induktio lämmittää hitsausrullia tai tukirakenteita. Impederin kärjen tulisi olla hitsausrullien keskilinjan kanssa samassa linjassa, jolloin saavutetaan impederin optimaalinen hyötysuhde. (Wright, 1997, s. 6)

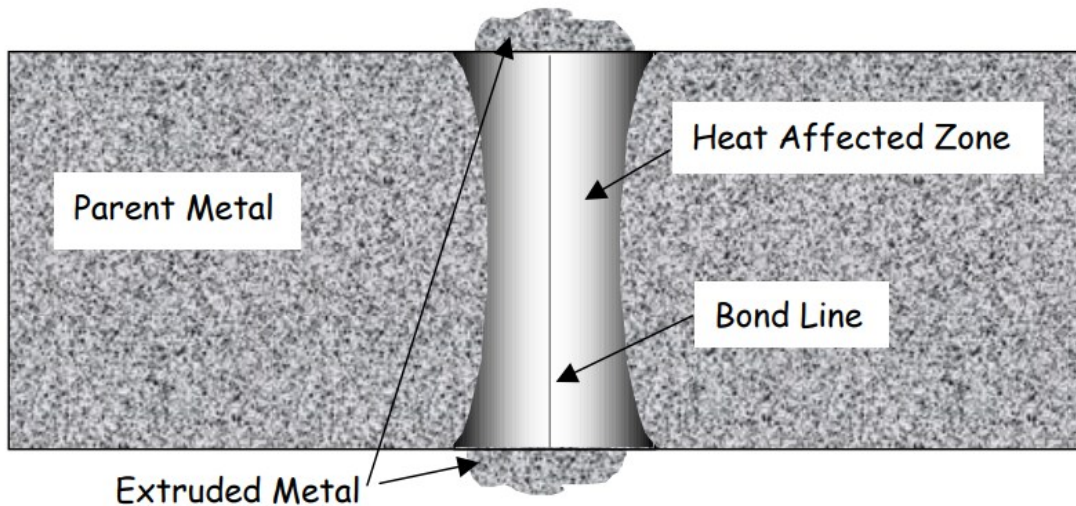
#### 3.3.2 V-aukko

V-aukolla tarkoitetaan V-mallista aukkoa rainan reunojen välillä, joka syntyy, kun rainan reunat painetaan yhteen hitsausrullilla (Kuva 7). V-aukon pituus ja kulma ovat merkittävässä roolissa hitsisauman onnistumisessa, sillä ne vaikuttavat sauman lämpövaikutusalueen (HAZ) muodostumiseen ja läheisyysvaikutuksen tehokkuuteen. (Grande & Wærstad & Runeborg, 2012, s. 1)

Lämpövaikutusalueella (HAZ, heat affected zone) tarkoitetaan sauman aluetta, jonka lämpötila on hitsauksen aikana noussut yli 650°C (Kuva 6), perusaine (parent metal), lämpövaikutusalue (heat affected zone), purse (extruded metal), sidosviiva (bond line), (Grande & Wærstad & Runeborg, 2012, s. 1). Tämän lämpötilan ylittävän teräksen materiaaliominaisuudet muuttuvat, ja lämpövaikutusalueen materiaali on kovempaa ja hauraampaa, kuin perusmateriaalin. Korkeataajuushitsauksessa pyritään saavuttamaan mahdollisimman kapea HAZ. HAZ:n leveyteen voidaan vaikuttaa hitsausteholla, puristusvoimalla, hitsaustaajuudella, V-aukon pituudella ja kulmalla. Optimaaliset parametriyhdistelmät tulee määritellä tuotekohtaisesti, sillä se mikä toimii hitsattaessa 2 mm

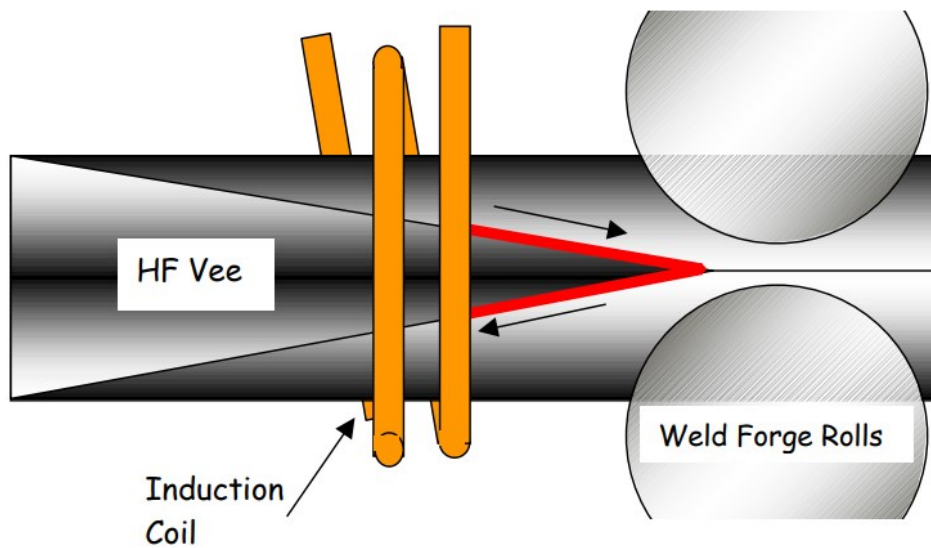
seinämänvahvuuksista putkea, ei ole optimaalinen hitsattaessa esimerkiksi 8 mm putkea. (Scott, 2003)

Kuva 6. Lämpövaikutusalue (Thermatool Corp, 1999, s. 2).



Teoreettisesti suurin hyötysuhde saavutettaisiin mahdollisimman lyhyellä V-aukolla, jolloin suurin osa indusoidusta virrasta saataisiin kohdistettua V-aukkoon. Käytännössä V-aukon pituuteen kuitenkin vaikuttaa useat eri tekijät, jotka tulee ottaa huomioon. Usein hitsausrullien halkaisija määrittää kuinka lähelle induktiokela saadaan hitsausrullien keskilinjaa, joka taas määrää V-aukon pituuden. Liian lyhyt V-aukko johtaa epätasaiseen reunojen lämpiämiseen, kun taas liian pitkä vaatii enemmän tehoa ja kasvattaa HAZ:n leveyttä. (Wright, J, 1997, s. 4) V-aukon tulisi olla noin 1–2 kertaa hitsattavan putken halkaisija ja V-aukon kulman tulisi olla noin 3–4 astetta, hitsattaessa hiiliteräksistä putkea. Liian leveä V-aukko heikentää läheisyysvaikutusta, kun taas liian kapea vaikeuttaa hitsauspisteen vakiinnuttamista. (WorldAutoSteel, n.d.)

Kuva 7. V-aukko induktiivisessa korkeataajuushitsauksessa (Thermatool Corp, 1999, s. 3).



### 3.3.3 Puristusaine

Puristusaine on yksi hitsausprosessin pääparametreista. Liian pieni puristusaine voi johtaa siihen, ettei hitsausreunoja paineta riittävästi yhteen, jolloin ylimääräinen sula aine ei puristu pois ja liitokseen jää hitsauksessa syntyneet oksidit, mikä heikentää hitsisauman lujuutta. (Rajala, 1997, s. 17). Toisaalta liian suuri puristusaine voi aiheuttaa vikoja, kuten vaurioita perusaineeseen, ja laskea hitsisauman lujuutta. Puristusaineen säätely on välttämätöntä, jotta hitsisaumasta saadaan riittävän vahva.

Putken paksuus ja materiaali ovat merkittäviä tekijöitä puristusaineen määräytymisessä. Eri seinämän paksuudet ja materiaalityypit vaativat erilaisia puristusaineita. Materiaalin koostumus ja mekaaniset ominaisuudet, kuten lujuus, määrittävät kuinka paljon painetta tarvitaan hitsausliitoksen muodostamiseen. (Scott, 2003)

Hitsausrullien asema on olennainen osa puristusaineen säätämistä. Rullien asema määrittää, kuinka voimakkaasti ne puristavat putkea, ja tämä vaikuttaa suoraan hitsauksen laatuun. Puristusaine voidaan määrittellä säätämällä hitsausrullien välistä etäisyyttä. (Wright, 1997, s. 3)

Hitsausnopeus ja lämpötila ovat myös tärkeitä tekijöitä puristusaineen määrittämisessä. Suuremmat hitsausnopeudet ja korkeammat lämpötilat vaativat erilaisia puristusaineasetuksia. Puristusaineen säätäminen on tärkeää hitsauksen tehokkuuden ja

laadun kannalta, ja näitä tekijöitä tulee huolellisesti säätää kuhunkin sovellukseen ja materiaaliin sopivaksi. (Scott, 2003)

Näiden tekijöiden huomioiminen ja niiden asianmukainen säätäminen on tärkeää korkeataajuushitsauksen tehokkuuden ja laadun kannalta. Tarkempi tieto ja syvällisempi ymmärrys puristuspaineen merkityksestä ja säätämisestä auttavat parantamaan hitsausprosessin laatua ja lopputuotteen kestävyyttä. (Link, 2001)

### **3.3.4 Hitsausteho ja -nopeus**

Hitsaustehon ja hitsausnopeuden välillä on merkittävä yhteys. Korkeampi teho mahdollistaa nopeamman hitsauksen, mikä on etu suurten putkimäärien tuotannossa. Kuitenkin tämän on tapahduttava ilman, että laatu kärsii. Tasapainon löytäminen näiden kahden välillä on keskeistä korkealaatuisen tuotannon varmistamiseksi.

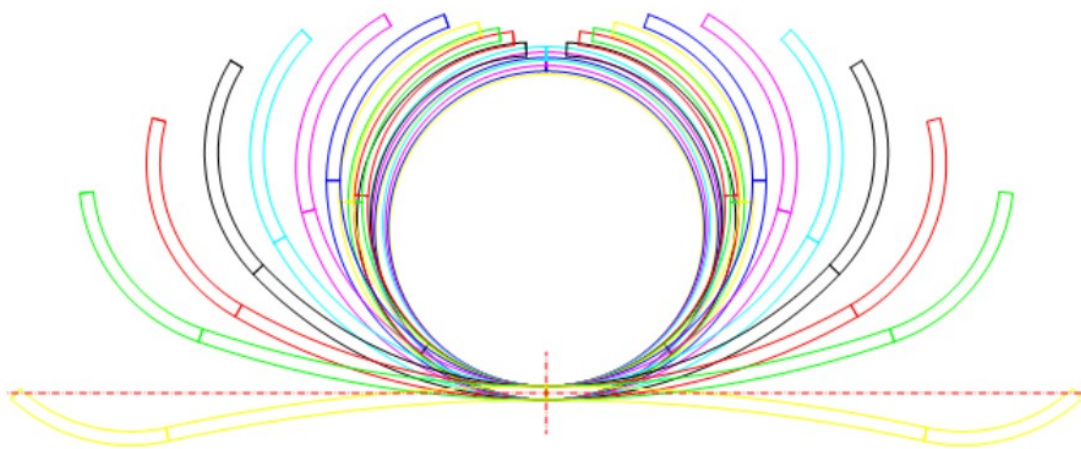
Hitsausteho on avainasemassa määriteltäessä korkeataajuushitsauksen tehokkuutta. Teho vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti ja tehokkaasti metallin reunat saadaan lämmitettyä hitsauspisteessä. Liian alhainen teho johtaa riittämättömään lämpöön, mikä voi estää metallin täydellisen sulamisen ja heikentää hitsisauman laatua. Toisaalta liiallinen teho voi aiheuttaa metallin ylihitsausta, mikä voi johtaa hitsausvirheisiin, kuten halkeamiin tai huokosiin hitsisaumassa.

Korkeataajuushitsauksen energiatehokkuus on tärkeää sekä kustannustehokkuuden että ympäristönäkökohtien kannalta. Tehon säätäminen optimaaliseksi minimoi tarpeettoman energiankulutuksen samalla kun varmistetaan laadukas hitsaus. Tämä on erityisen tärkeää suurten putkierien tuotannossa, jossa pienetkin tehon säätöjen parannukset voivat johtaa merkittäviin säästöihin.

## 4 Esimuovaus

Esimuovaus toteutetaan askelrullamuovauksella. Askelrullamuovauksessa raina muovataan vaiheittain muotoonsa rullapareilla (Kuva 8). Esimuovaus voidaan jakaa kahteen vaiheeseen, taivutusmuovaukseen ja viimeistelymuovaukseen. H4-linjalla muovauspään taivutusmuovaus koostuu viidestä, ja viimeistelymuovaus kolmesta, päällekkäin asetetusta rullaparista, joiden akselit ovat horisontaalitasossa. Muovausta tehostamassa kaikkien rullaparien välissä on pystysuuntaisilla akseleilla olevat sivurullat.

Kuva 8. Rainan muovautuminen esimuovauksessa. (SSAB esittelymateriaali n.d.).



Taivutusmuovauksen tehtävä on muovata litteä raina U:n malliseksi profiiliksi.

Taivutusmuovauksen ensimmäisen rullaparin tehtävä on muovata rainan reunat siten, että taivutuksen säde vastaa hitsattavan putken sädettä. (Pirttijoki, 1995, s. 16–42) Jos rainan reunojen muovaus ei onnistu, syntyy reunojen harjakattomainen kohtaaminen hitsauksessa, mikä vaikuttaa muodostuvaan läheisysefektiin. Harjakattomaisessa reunojen kohtaamisessa reunan sisänurkat ovat lähempänä toisiaan, joten läheisyysvaikutus on voimakkaampi kuin ulkonurkissa, joka johtaa epätasaiseen reunojen lämpiämiseen. (Rajala, 2016)

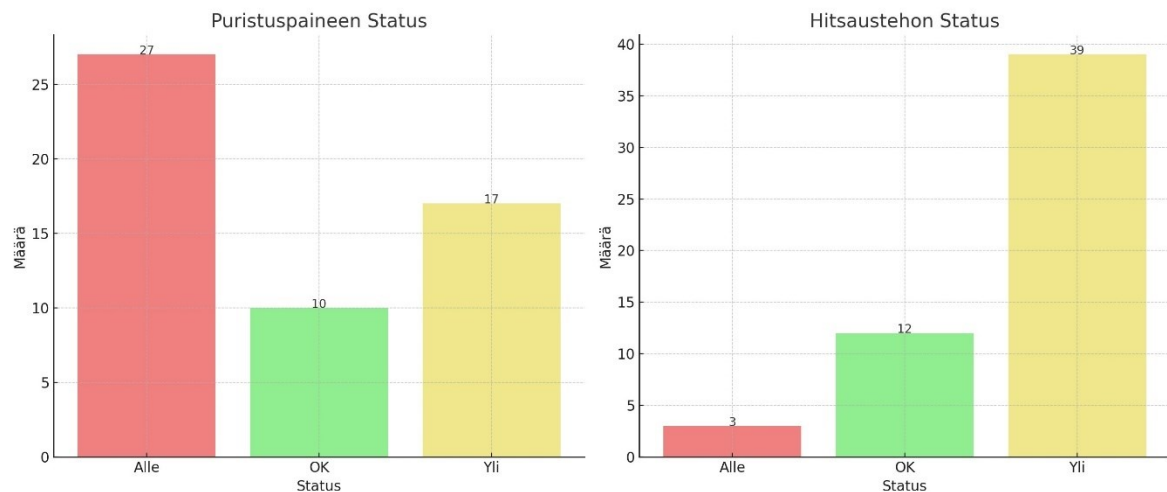
Viimeistelymuovauksessa U:n mallinen putki muovataan veitsirullastolla O:n malliseksi rakoputkeksi. Viimeistelymuovauksessa rainan reuna puristuu veitsirullaston veitsen pintaan, jolla haluttu pyöreä putki saavutetaan. Onnistuneella viimeistelymuovauksella varmistetaan mahdollisuus laadukkaaseen hitsisaumaan, sekä vähennetään kalibrointiosassa tehtävän työn määrää pyöreissä putkiprofileissa. (Pirttijoki, 1995, s. 16–42)



## 5 Koeajot ja testausmenetelmät

Tutkimuksissa käytiin läpi 13 eri piiriä, jotka sisälsivät yhteensä 83 eri tuotetta. Kaikista tuotteista kerätty data piti sisällään hitsauksen tärkeimpiä parametreja, joita ovat, hitsausteho, hitsausnopeus, puristuspaine, sekä viimeisen veitsirullaston aseman. Kerätystä tuotekohtaisesta datasta verrattiin käytettyä hitsaustehoa ja puristuspainetta teoreettisiin arvoihin. Teoreettisilla arvoilla tarkoitetaan laskettuja arvoja, joilla teoriassa tuotantolinjan tulisi tuottaa laadukkainta tuotetta. Teoreettisia arvoja ei voida julkaista salassapitosyistä. Vertailusta voitiin todeta lähtökohdaksi, että useimmilla tuotteilla käytettiin enemmän hitsausvirtaa ja vähemmän puristuspainetta, kuin mitä teoriassa tarvitsisi (Kaavio 1). Koeajoissa käytettävät tuotteet valittiin tuotantoaikataulujen mukaan.

Kaavio 1. Tuotteiden määrät, jotka alittavat, saavuttavat ja ylittävät teoreettiset arvot.

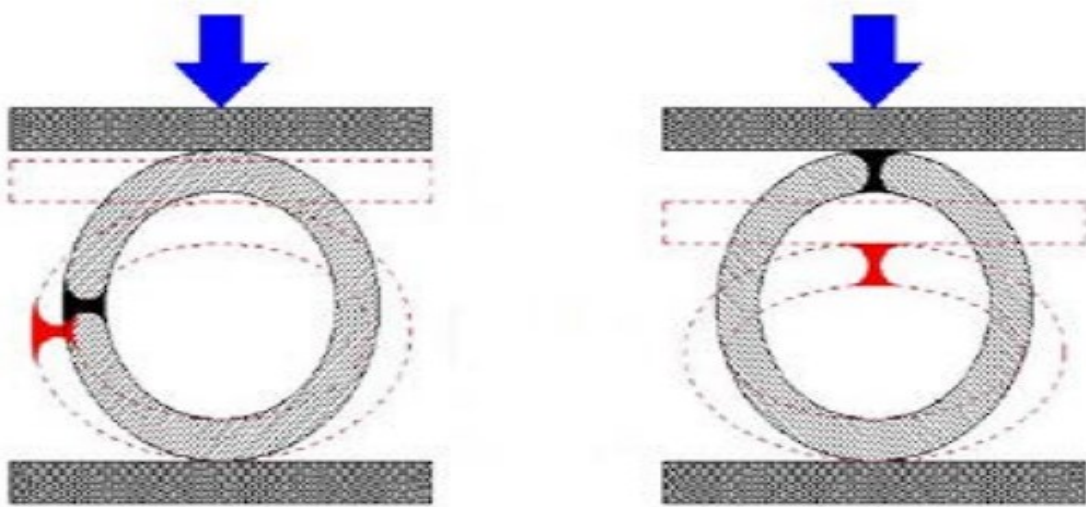


### 5.1 Testausmenetelmät

Koeajosta kerättyjä paloja testattiin tehtaalla käytössä olevalla litistyskokeella, jossa koepalat litistetään hydraulisella prässillä. Litistyskokeessa tarkastellaan hitsatun sauman kestävyyttä, puristamalla putkea sauman suhteen päältä ja kyljestä (Kuva 9). Tarkempi sauman tutkimus toteutettiin ottamalla jokaisesta koepalasta hiekuvat laboratorioissa, joista voitiin analysoida HAZ:n leveyttä ja muotoa, sidosviivan muodostumista, sekä riittävää sulan materiaalin ulos puristusta, eli purseen muodostumista.



Kuva 9. Mallikuva litistyskokeesta (State University of Tetova, 2016, s. 61).



## 5.2 Koeajot

Opinnäytetyössä käsitellään hitsausparametriarvot prosentuaalisina muutoksina laskettuihin teoreettisiin arvoihin, ja kattavampi raportti arvoista toimitetaan luottamuksellisena tilaajayritykselle.

Koeajotuotteiksi valittiin piirin 112 tuote 90\*90\*5 S355J2H, piirin 100 tuotteet 80\*80\*5, 80\*80\*6 S355J2H, Taulukosta yksi nähdään tuotannossa viimeisimpänä käytettyjen tuotekohtaisten parametriarvojen keskiarvot.

Taulukko 1. Viimeisimmät tuotannossa käytössä olleet parametrit.

Geometria / Materiaali	Puristusaine	Hitsausteho
90*90*5 S355J2H	-26 %	+5 %
80*80*5 S355J2H	-29 %	-15 %
80*80*6 S355J2H	-34 %	0 %

## 6 Tulokset

Tuloksista koottu taulukko (taulukko 2), jossa mainittu koeajojen näytekohtaiset geometriat, puristuspainet, hitsaustehot, purseiden paksuudet, sekä litistyskokeen tulos.

Näytteessä 1.1 puristuspainetta saatiin kasvatettua avaamalla veitsirullasto teoreettiseen asemaan. Veitsirullaston ollessa teoreettisessa asemassa, esimuovaus väheni, jolloin V-aukon kulma kasvoi liian suureksi ja reunojen kohtaaminen oli epätasainen. Sauma halkesi litistyskokeessa.

Näytteessä 1.2 veitsirullastoa kiristettiin, jolloin esimuovaus parani, mutta reunojen kohtaaminen edelleen epätasainen. Veitsirullaston kiristämisen takia puristusaine laski 2 %, mutta hitsaustehoa nostamalla 2 %, saatiin sauma kestämään.

Näytteessä 1.3 veitsirullastoa kiristettiin vielä lisää, jolloin puristusaine laski 18 % verrattuna edelliseen näytteeseen. Onnistuneen esimuovauksen, sekä reunojen hieman tasaisemman kohtaamisen vuoksi, sauma kesti litistyskokeessa huomattavasti pienemmällä purseella, verrattuna edelliseen näytteeseen.

Näytteessä 2.1 hitsausoperaattori oli säätänyt linjan hitsausparametrit oman ammattitaitonsa mukaan, jolloin puristusaine ja hitsausteho olivat huomattavasti teoreettisia arvoja alhaisemmat, tästä huolimatta sauma kesti litistyskokeen. Seuraavissa näytteissä pyrittiin lähemmäksi teoreettisia hitsausparametreja.

Näytteessä 2.2 puristusainetta nostettiin hyvin lähelle teoreettista arvoa kiristämällä hitsausrullia. Sauma kesti litistyskokeen.

Näytteessä 2.3 puristusainetta nostettiin edelleen kiristämällä hitsausrullia. Sauma kesti litistyskokeen.

Näytteessä 3.1 hitsausoperaattori oli säätänyt linjan hitsausparametrit oman ammattitaitonsa mukaan, jolloin puristusaine ja hitsausteho olivat huomattavasti teoreettisia arvoja alhaisemmat, tästä huolimatta sauma kesti litistyskokeen. Seuraavissa näytteissä pyrittiin lähemmäksi teoreettisia hitsausparametreja.

Näytteessä 3.2 puristuspainetta nostettiin kiristämällä hitsausrullia. Puristuspainetta ei voitu nostaa teoreettiseen arvoon, koska puristuspaineen lisäämisestä hitsausrullastolla syntyi putkeen epämuodostumia.

Taulukko 2. Näytteiden hitsausparametrit suhteessa teoreettisiin arvoihin, materiaali S355J2H.

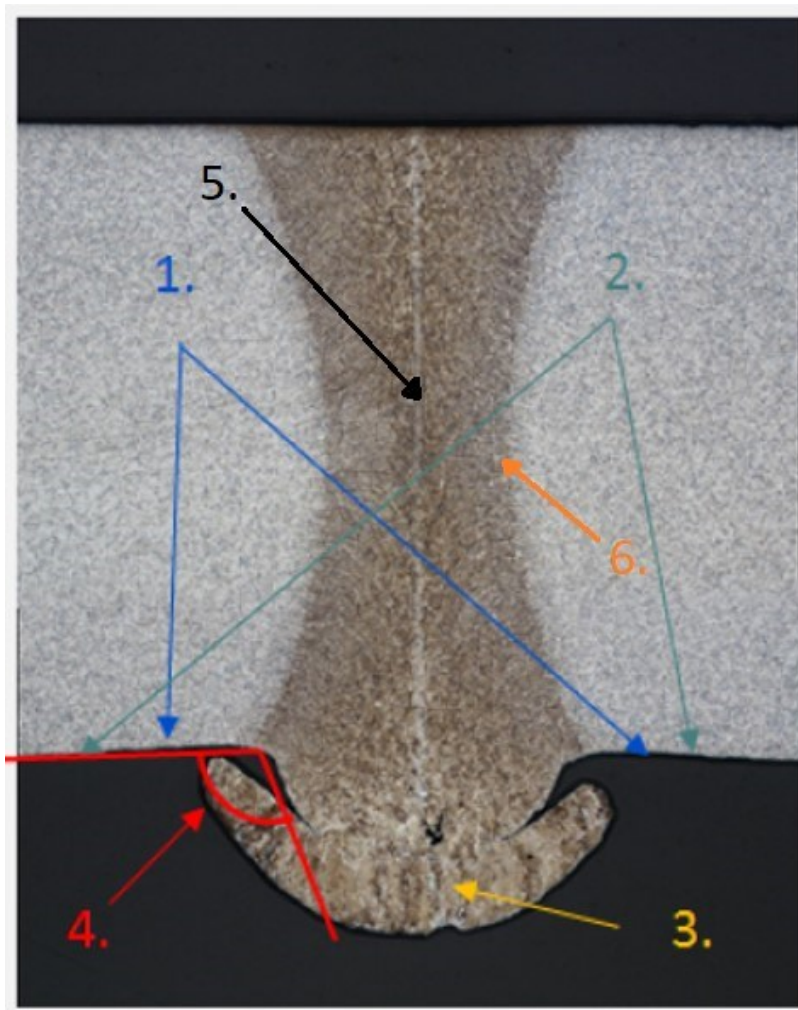
Näyte / Geometria	Puristuspain	Hitsausteho	Purse (mm)	Litistystesti (K/E)
1.1 / 90*90*5,0	+12 %	+5 %	1,73	E
1.2 / 90*90*5,0	+10 %	+7 %	1,77	K
1.3 / 90*90*5,0	-8 %	+7 %	1,19	K
2.1 / 80*80*5,0	-29 %	-15 %	1,30	K
2.2 / 80*80*5,0	-2 %	-15 %	1,56	K
2.3 / 80*80*5,0	9 %	-9 %	1,64	K
3.1 / 80*80*6,0	-20 %	-6 %	1,39	K
3.2 / 80*80*6,0	-6 %	-6 %	1,32	K

## 6.1 Vertailu

Jotta otettuja hiekuvia voidaan vertailla, tulee laadukkaan sauman ominaispiirteet tunnistaa. Näitä ominaispiirteitä voidaan nähdä kuvassa 10.

1. Alareunat samassa tasossa
2. Purseen vieressä ainepaksuus sama kuin kauempana perusaineessa, ohuempi viittaa harjakattomaiseen reunojen kohtaamiseen
3. Ulos työntyneen purseen tulisi näkyä selvästi
4. Ulos työntyneen purseen ja perusaineen välinen kulma vain vähän yli 90 astetta
5. Kuvasta on havaittavissa selkeä ja yhtenäinen liitosviiva
6. Lämpövaikutusalue tiimalasin mallinen, sekä lämpövaikutusalueen kapein kohta keskellä saumaa.

Kuva 10. Onnistunut hitsisauma (SSAB, n.d.).



Ensimmäinen koeajo epäonnistui, sillä rainan reunojen kohtaamisessa oli suurta tasoeroa. Tasoeron takia, on erittäin vaikeaa analysoida puristuspaineen vaikutusta sauman laatuun, samalla kun reunojen tasoero muuttuu näytteiden välillä. Näytteessä 1.1 on nähtävissä, kuinka sauman liitosviivalla on tasoerosta johtuva halkeama (Liite 1), vaikka näytteessä käytettiin eniten hitsaustehoa ja puristuspainetta ensimmäisen koeajon näytteistä. Näytteessä 1.2, kohtaaminen on edelleen epätasaista (Liite 2), mutta 2 % nostettu hitsausteho saa sauman kestämään. Näytteessä 1.3 kohtaaminen on jo huomattavasti parempi kuin edellisissä näytteissä, mutta laskettu puristusaine aiheuttaa leveämmän lämpövaikutusalueen ja loivemman kulman purseen ja perusaineen välille. Tässä koeajossa suurimmalla puristusaineella, ei saavutettu laadukkainta saumaa.

Toisen koeajon näytteistä nähdään selkeästi puristuspaineen vaikutus sauman laatuun. Näytteen 2.1 hiekuvasta (liite 4) voidaan nähdä lämpövaikutusalueen olevan leveä, sekä purseen ja lämpövaikutusalueen välisen kulman olevan loiva. Näytteeseen 2.2 lisättiin puristuspainetta 27 %, joka kavensi lämpövaikutusaluetta, sekä purseen ja perusaineen välinen kulma pieneni (liite 5). Toisen koeajon viimeiseen näytteeseen 2.3 lisättiin puristuspainetta vielä 11 % ja hitsaustehoa 6 %, joiden vaikutuksesta lämpövaikutusalue kaventui entisestään, purseen ja perusaineen välinen kulma pieneni, sekä sidosviiva erottuvuus vahvistui (liite 6). Tässä koeajossa puristuspaineen ja hitsaustehon lisäämine, paransi sauman laatua huomattavasti. Koeajon kaikki näytteet kestivät tuotannossa käytössä olevan litistyskokeen, siitä huolimatta, että näytteiden välillä oli hiekuvista nähtävissä selvä ero. Tästä voidaan päätellä, että tuotannossa käytettävää testausmenetelmää voitaisiin muuttaa sellaiseksi, että sillä voitaisiin todeta tuotannon tasolla ero näiden saumojen välillä.

Kolmannen koeajon näytteen 3.1 hiekuvasta voidaan todeta sauman olleen onnistunut. Sula materiaali on puristunut ulos, lämpövaikutusalue on tiimalasin mallinen, purseen ja perusaineen välinen kulma on hieman yli 90 astetta ja sauman liitosviiva on selkeästi havaittavissa (liite 7). Näytteeseen 3.2, puristuspainetta lisättiin 14 %. Vaikka puristuspainetta lisättiin, ei saumassa ole havaittavissa muita muutoksia, kuin ulos työntyneen purseen muoto (liite 8). Tässä koeajossa puristuspaineen lisäämistä ei voida pitää perusteltuna, verrattaessa koeajon näytteitä.

## 6.2 Johtopäätökset

Tutkimustulokset korostavat hitsausparametrien säädön merkitystä laadukkaan hitsaussauman tuottamisessa ja osoittavat, että prosessin optimointi voi huomattavasti parantaa hitsausprosessin tehokkuutta. Analyysin perusteella voidaan antaa konkreettisia suosituksia parametrien säätämiseksi, mikä edistää hitsausprosessin tehostamista ja parantaa lopputuotteiden laatua. Tutkimus tuo esiin myös sen, että nykyisten teoreettisten hitsausarvojen soveltuvuutta kaikille tuotteille ei voida pitää itsestäänselvyytenä. Puristuspaineen vaikutus sauman laatuun vaihtelee tuotekohtaisesti, ja liiallisen puristuspaineen käyttö voi johtaa kunnossapitokustannusten nousuun ilman positiivista vaikutusta sauman laatuun, ja pahimmillaan se voi jopa heikentää hitsaussauman laatua.

Tämän vuoksi on suositeltavaa, että jokaiselle tuotteelle, tai ainakin kullekin putkiryhmälle ja niiden eri seinämänpaksuuksille, suoritetaan omat koeajot. Näin voidaan määrittää optimaaliset puristuspainet, jotka takaavat parhaan mahdollisen laadun kunkin tuotteen

hitsausprosessissa. Yksilöllistetty lähestymistapa auttaa varmistamaan, että hitsausprosessi on sekä kustannustehokas että tuottaa korkealaatuisia tuloksia.

## 7 Yhteenveto

Opinnäytetyön toteutusvaihe suoritettiin tuotannollisesti katsoen erittäin huonoon aikaan. Tuotannollisista syistä koeajojen laajuus jäi huomattavasti suunniteltua kapeammaksi. Tavoitteena oli selvittää putkituotantolinjan hitsauksessa käytettävien puristuspainoiden optimaaliset arvot suhteessa hitsaustehoon ja saada kerättyä tietoa hitsausarvoista eri tuotteille.

Opinnäytetyötä voidaan pitää onnistuneena. Kaikkien tuotteiden optimaalisia hitsausarvoja ei kyetty määrittämään suppean koeajomahdollisuuden vuoksi. Tästä huolimatta opinnäytetyössä saatiin koottua ja analysoitua aiemmin tehtaalla käytettyä hitsausdataa, jolla kyetään määrittelemään tuotekohtaiset ohjearvot. Vaikka ohjearvoja ei voida pitää optimaalisina, ne mahdollistavat hitsausoperaattoreita vertaamaan käyttämiään hitsausarvoja, aiemmin onnistuneiden ajojen hitsausarvoihin.

Jatkotoimenpiteenä tilaajayritykselle on ehdotettu koeajojen suorittamista kaikille tuotteille, joka mahdollistaa tuotekohtaisten optimaalisten hitsausparametrien määrittämisen. Opinnäytetyön myötä koeajojen toteutuksen toimintamalli tuli tutuksi tehtaan henkilöstölle, joka helpottaa mahdollisia tulevia koeajoja.

## Lähteet

Grande, B & Wærstad, O & Runeborg, P. (2012). Weld setup, variable frequency and heat affected zones in highfrequency tube and pipe welding. EFD Induction.

Link, H. (2001). Boosting efficiency in solid state welders. The Tube and Pipe Journal. Haettu 8.10.2023 osoitteesta <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/boosting-efficiency-in-solid-state-welders>

Nichols, R. (1999). High frequency welding – The process and applications. Thermatool Corp. Haettu 10.11.2023 osoitteesta <http://www.sabahprofile.com/1.pdf>

Pirttijoki, J. (1995). HF-hitsatun ohutseinäputken muovausprosessin kehittäminen [diplomityö]. Konetekniikan osasto. Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Rajala, J. (2016). HF-hitsaus. PPT-esitys.

Rajala, J. (1997). Mikroosesteräputken HF-hitsin muodostumismekanismit [diplomityö]. Materiaalitekniikan osasto. Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Scott, P. (n.d.). Key Parameters of High Frequency Welding. Thermatool Corp. Retrieved from <https://atiravesh.com/wp-content/uploads/2021/01/KEY-PARAMETERS-OF-HIGH-FREQUENCY-WELDING.pdf>

Scott, P. (2003). Selecting welding frequency. The Tube and Pipe Journal. Retrieved on October 8, 2023, from <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipefabrication/selecting-a-welding-frequency>

WorldAutoSteel. (n.d). High frequency tube/pipe welding. Haettu 23.11.2023 osoitteesta. Haettu 25.10.2023 osoitteesta <https://ahssinsights.org/joining/solid-state-welding/high-frequency-tube-pipe-welding/>

Wright, J. (1997). Principles of high frequency induction tube welding. Electronic Heating Equipment, Inc.

Wright, J. (1999). Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes. Electronic Heating Equipment, Inc. – USA.



Liite 1. Näyte 1.1 90\*90\*5 S355J2H





Liite 2. Näyte 1.2 90\*90\*5 S355J2H





Liite 3. Näyte 1.3 90\*90\*5 S355J2H





Liite 4. Näyte 2.1 80\*80\*5 S355J2H



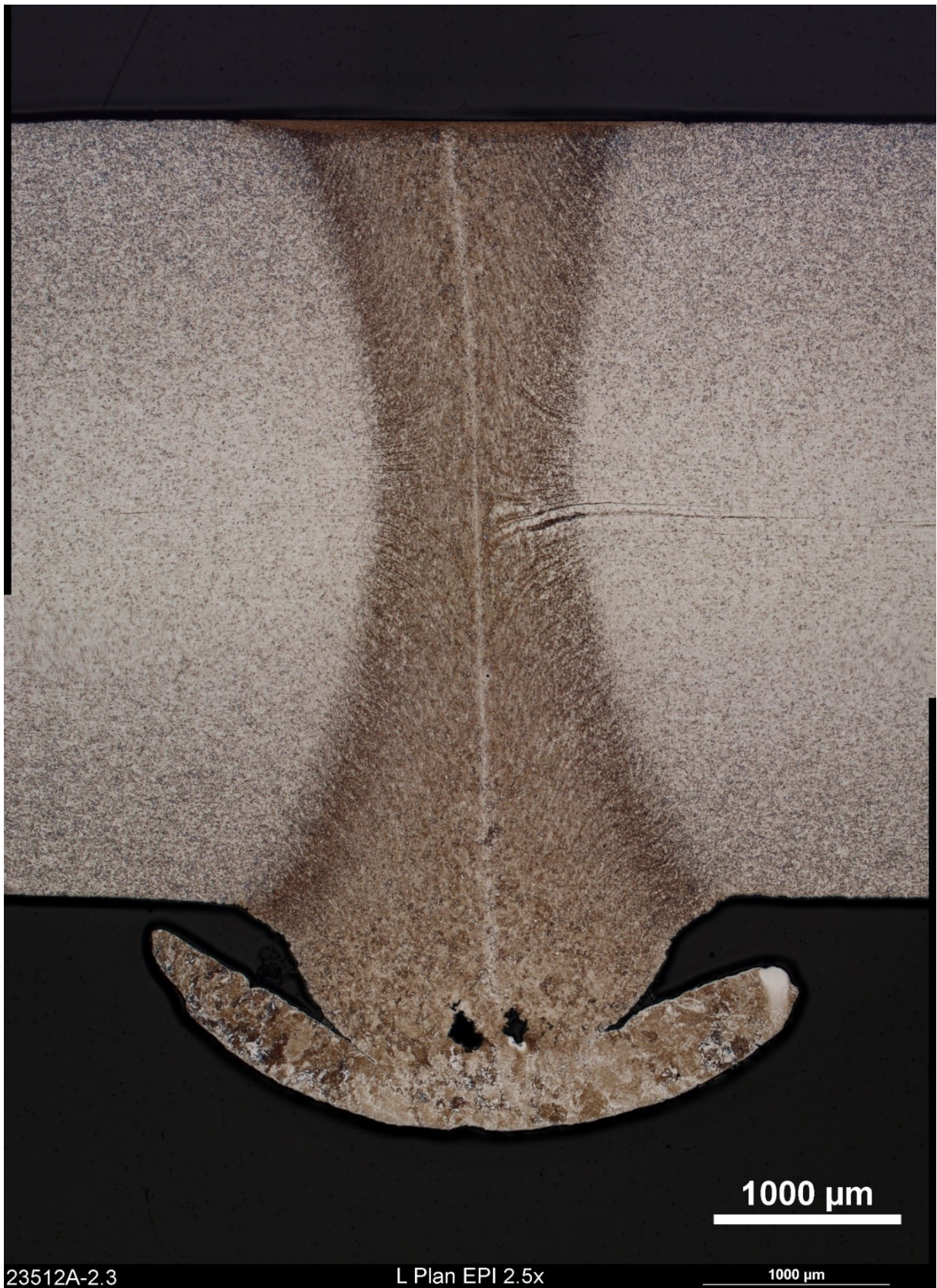


Liite 5. Näyte 2.2 80\*80\*5 S355J2H





Liite 6. Näyte 2.3 80\*80\*5 S355J2H





Liite 7. Näyte 3.1 80\*80\*6 S355J2H



Liite 8. Näyte 3.2 80\*80\*6 S355J2H

