



## **HÖYRYLAIVAN KATTILAN KORJAUSHITSAUKSEN SUUNNITTELU**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2023

Elmeri Seppinen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

DI Esa Hiltunen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Elmeri Seppinen

### **Höyrylaivan kattilan korjaushitsauksen suunnittelu**

Konetekniikan diplomityö

2023

55 sivua, 15 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko ja DI Esa Hiltunen

Avainsanat: Korjaushitsaus, tulitorvikattila, hitsausohje, höyrylaiva

Tämän diplomityön tavoitteena oli laatia korjaussuunnitelma vanhan höyrylaivan kattilalle, sekä laatia ja hyväksyttää korjaustyössä tarvittava hitsausohje. Vanhoissa höyrykattiloissa käytettyjä materiaaleja ei ole valittu hitsattavuutta silmällä pitäen, mikä voi asettaa haasteita hitsaamalla suoritettaville korjaustöille. Tässä työssä esiteltiin korjaushitsauksen suunnitteluprosessia, ja otettiin huomioon vanhojen höyrykattiloiden korjaushitsaukselle tyypillisiä erityispiirteitä.

Työn kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin korjaushitsauksen työvaiheita, sekä hitsausohjeen hyväksyttämistä menetelmäkokeella. Lisäksi tutkittiin vanhan materiaalin kemiallisen koostumuksen vaikutusta hitsattavuuteen, sekä hitsauksen vaikutuksia ympäröivään rakentamiseen. Työssä esitettiin joitain huomioita jäännösjännitysten ja muodonmuutosten hallintaan ja perehdyttiin painelaitteiden valmistukseen ja korjaamiseen liittyviin turvallisuusvaatimuksiin. Työn kokeellisessa osiossa laadittiin kirjallisuuden perusteella alustava hitsausohje, mitä noudattaen valmistettiin koekappaleet, joille suoritettiin yliopiston laboratoriossa menetelmäkokeen mukaiset testit. Testien tuloksia tarkasteltiin, ja havaittujen vikojen ja virheiden syitä arvioitiin. Myöhemmin valmistettiin toinen sarja koekappaleita, joilla hitsausohje virallisesti hyväksyttiin.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Elmeri Seppinen

### **Planning the repair welding of a steam ship boiler**

Master's thesis

2023

55 pages, 15 figures, 7 tables and 2 appendices

Examiners: Associate Professor Tuomas Skriko and Esa Hiltunen, M.Sc. (Tech.)

Keywords: Repair welding, shell boiler, welding procedure specification, steam ship

The aim of this master's thesis was to create a repair plan for an old steam ship's boiler as well as to create and qualify the necessary welding procedure specification for the repair. The materials used in the boilers of old steam ships have usually not been selected with weldability in mind, which may pose some restrictions for their repairs. This thesis presents the planning process of repair welding and highlights typical issues for repair welding of old boilers.

The literature review of this thesis focuses on repair welding procedure and qualification of welding procedure specification using welding procedure test. The effect of base material's chemical composition on weldability and the effects of welding on the surrounding structure were investigated. Some notes on controlling and reducing welding induced residual stresses and deformations were discussed. Regulations regarding the fabrication and repair of pressure vessels and their conformity assessment were discussed. In the experimental part of the thesis a welding procedure specification was created based on literature, test pieces were fabricated according to it, and they were examined and tested in the university laboratory following the welding procedure test. The results were analyzed and reasons for defects and imperfections were considered. Later a second batch of test pieces was fabricated and used to officially qualify the welding procedure specification.

## KIITOKSET

Haluan kiittää Suomen Höyrypursiseuraa mahdollisuudesta tehdä diplomityö heille. Lisäksi haluan kiittää kaikkia hitsauslaboratorion henkilöitä, jotka auttoivat ja neuvoivat työssä tehtyjen kokeiden suorittamisessa ja tulosten tulkinnasta. Kiitos myös LUT-yliopistolle ja työn tarkastajille Tuomas Skrikolle ja Esa Hiltuselle.

Elmeri Seppinen

Kirkkonummi 18.11.2023

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Symbolit

$R_{eH}$	ohjeellinen pienin myötöraja	[MPa]
$t$	paksuus	[mm]

### Lyhenteet

CE	Hiilikvivalentti (Carbon Equivalent)
DT	Ainetta rikkova koe (Destructive Testing)
HAZ	Muutosvyöhyke (Heat Affected Zone)
HPS	Höyrypursiseura
IIW	International Institute of Welding
NDT	Ainetta rikkomaton koe (Non Destructive Testing)
PA	Jalkoasento
PC	Vaaka-asento
PED	Painelaitedirektiivi
PF	Pystyasento ylöspäin
pWPS	Alustava hitsausohje (Preliminary Welding Procedure Specification)
WPS	Hitsausohje (Welding Procedure Specification)
WPQR	Menetelmäkoepöytäkirja (Welding Procedure Qualification Record)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Työn tausta .....	10
1.2	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset.....	10
1.3	Tutkimuksen rajaus .....	11
1.4	Tutkimuksen toteutus .....	11
2	Korjaushitsauksen vaiheet .....	12
2.1	Korjaushitsauksen työvaiheet.....	12
2.2	Hitsaukseen liittyviä huomioita.....	16
2.3	Tapausta koskeva lainsäädäntö ja standardit.....	18
2.4	Laadunvarmistus ja dokumentaatio.....	20
2.5	Hitsausohje ja sen hyväksyttäminen menetelmäkokeella .....	22
3	Hitsausohjeen laatiminen ja hyväksyttäminen .....	30
3.1	Alustavan hitsausohjeen laatiminen .....	30
3.2	Koekappaleiden hitsaaminen .....	32
3.3	Koekappaleiden testaaminen.....	33
4	Menetelmäkokeen tulosten analysointi .....	38
5	Korjaussuunnitelma .....	41
5.1	Tilanteen kartoittaminen .....	41
5.2	Korjaustyö.....	47
5.3	Laadunvarmistus .....	49
6	Johtopäätökset ja yhteenveto .....	50
	Lähteet .....	52

## Liitteet

Liite 1. Yliopiston laboratoriossa tutkittavien liitosten alustavat hitsausohjeet

Liite 2. Yliopiston laboratoriossa tutkittujen liitosten valvontapöytäkirjat

# 1 Johdanto

Höyryhinaaja S/S Armas, alkuperäiseltä nimeltään ”Toinen” rakennettiin vuonna 1908 kuljettamaan puuta Saimaalle metsäteollisuuden tarpeisiin. Toisen maailmansodan jälkeen alus otettiin käyttöön Suomenlahdelle miinanraivaustehtäviin. Alus toimi ansioliikenteessä aina 1960-luvun lopulle, jonka jälkeen se siirtyi yksityisten omistajien haltuun. Vuosien saatossa aluksella on ollut useita eri omistajia, ja vuosina 1998 – 2020 alus toimi Suomenlahdella. Vuonna 2020 huonoon kuntoon päässyt alus myytiin nykyisille omistajilleen ja siirrettiin takaisin Saimaalle, missä alusta alettiin kunnostamaan. (Suomen Höyrypursiseura 2021; Suomen Laivahistoriallinen Yhdistys). Alus ja sen höyrykattila on esitetty kuvassa 1.

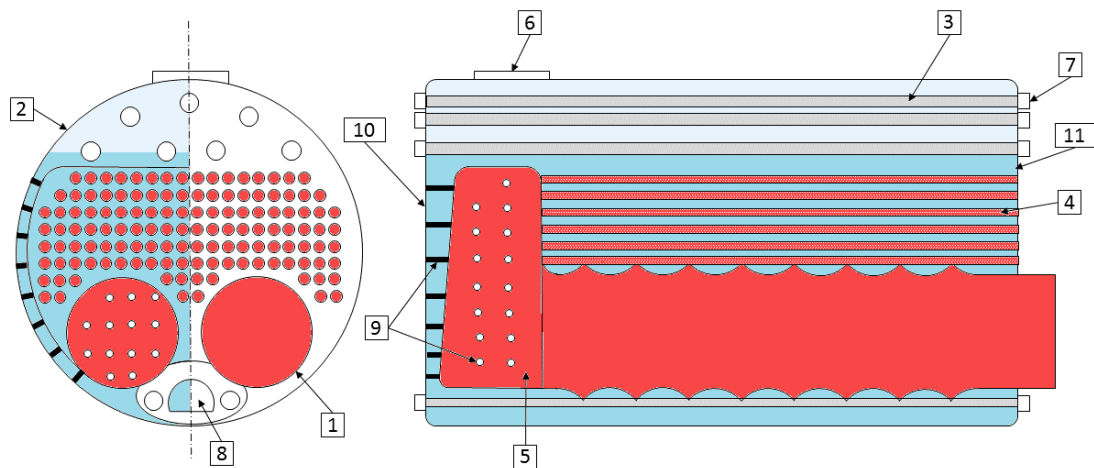


Kuva 1. Höyrylaiva Armas ja korjattava höyrykattila (Reunanen 2023).

Armaksen voimanlähteenä toimii kuvan 2 mukainen kaksitorvinen kaksivetoinen tulitorvikattila. Tulitorvikattila on lieriön muotoinen paineastia, jolla tuotetaan höyryä laivan höyrykoneelle. Polttoainetta – Armaksen tapauksessa halkoja – poltetaan kattilan alaosassa sijaitsevissa tulitorvissa arinalevyjen päällä. Puita lisätään kattilaan tulitorvien suuaukosta, josta



päästetään myös arinoiden alle ilmaa palamista varten. Tulitorvet muodostavat ensimmäisen niin sanotun ”vedon” kattilan läpi. Liekit ja savukaasut johdetaan tulitorvien perältä lieskauuniin, josta ne kulkeutuvat halkaisijaltaan pienehköjä tuliputkia myöten kattilan etuosaan ja ulos kattilasta tuliputkien suuaukkojen edessä olevaan nokikaappiin. Tuliputket muodostavat toisen ”vedon” kattilan lävitse. Nokikaapistav savukaasut ohjautuvat savupiippuun. Tulitorvet, lieskauuni ja tuliputket ovat tuettu kattilan ulkokuoresta eli vaipasta metallisilla tangoilla, eli sidepulteilla. Palamisessa syntyvä lämpö johtuu tulitorvien, lieskauunin ja tuliputkien seinämien lävitse kuumentaan ja höyrystää ympäröivässä vesitilassa olevaa vettä. (Juva 2018, s. 231–233; SFS-EN 12953-1, s. 10–12.) Kattilan käyttöpaineen ollessa 9 bar, veden ja vesihöyryn lämpötila on noin 175 °C (Suomen Höyrpursiseura ry). Kattilan etulaidassa, aivan kattilan pohjalla tulitorvien välissä on mutaluukku, josta kattilan pohjalle kertynyt sedimentti voidaan poistaa kattilan tyhjennyksen yhteydessä. Kattilan päällä on miesluukku, josta pääsee hivuttautumaan kattilan sisälle esimerkiksi kattilan tarkastusta varten. Lisäksi kattilan vaipassa ja päädyissä on erinäisiä liitäntöjä muun muassa venttiileille ja mittareille, sekä tarvittavia rakenteita, joilla kattila tuetaan laivassa paikalleen. (Juva 2018, s. 231–233.)



**Selite**

- 1) Tulitorvi
- 2) Vaippa
- 3) Sidetanko
- 4) Tuliputki

- 5) Lieskakammio
- 6) Miesluukku
- 7) Sidetangon mutteri
- 8) Mutaluukku

- 9) Sidepultti
- 10) Kattilan takalevy
- 11) Kattilan etulevy

Kuva 2. Kaksitorvisen kaksivetoisen tulitorvikattilan rakenne.

## 1.1 Työn tausta

Säännöllisen liikenteen päätyttyä aluksen kunnossapito on ollut vaihtelevaa ja aluksen kunto on laskenut vuosikymmenien saatossa huonoksi. Muun muassa höyrykattilan vaippa on syöpynyt pohjastaan, ohuimmillaan noin kolmannekseen alkuperäisestä paksuudestaan. Aluksen varustamo haluaa korjata laivan edustuskuntoiseksi, ja on saanut korjaustyöhön Museovirastolta rahoitusta.

Höyrypursiseuran rekisterissä on useita muita aluksia, joilla vastaavat höyrykattilan korjaustyöt alkavat olla ajankohtaisia. Höyrykattilat ovat painelaitteita, joiden paineenalaisten osien liitosten valmistamisessa täytyy käyttää hyväksytyä hitsausohjetta. HPS haluaa kehittää hitsausohjeen, jota voidaan hyödyntää sekä Armaksen että muiden pursiseuran rekisterissä olevien alusten kattiloiden korjaustöissä.

## 1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Höyrypursiseuran rekisterissä olevat alukset ovat vanhoja niissä on erinäisiä korjaustarpeita. Höyryhinaaja Armas, kuten moni muukin höyrypursiseuran rekisterissä oleva alus on valmistettu 1900-luvun alkupuolella ajan materiaaleja ja valmistustapoja käyttäen. Alusten kattiloiden korjaushitsaukseen liittyy useampi haastavuutta lisäävä tekijä. Käytetyt materiaalit eivät todennäköisesti vastaa nykypäivän standardeja, eivätkä niiden ominaisuudet ole välttämättä suotuisia hitsaamisen kannalta. Tästä syystä materiaalin hitsattavuutta on arvioitava. Kattilan paineenalaiset liitokset on valmistettu niittaamalla ja vastaavien liitosten tekeminen on nykypäivänä kallista, hidasta, eikä niiden valmistamiseen tarvittava osaaminen ole yleistä. Niitattujen liitosten säästäminen ja vaurioitumisen välttäminen on siksi tavoiteltavaa niin kustannusten kuin aikataulunkin kannalta. Niitattujen liitosten vaurioitumisen välttämiseksi on kiinnitettävä huomiota hitsauksesta aiheutuvien muodonmuutosten ja jäännösjännitysten muodostumiseen sekä niiden hallintaan.

Lisäksi höyrykattilat ovat painelaitteita, joiden valmistusta, korjaus- ja muutostöitä säännellään lainsäädännössä. Lainsäädännössä esitettyjen vaatimusten tavoitteena on varmistaa laitteen turvallisuus poistamalla riskejä, ja pienentämään jäljelle jäävien riski. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Miten hitsaustyöstä aiheutuvien muodonmuutosten ja jäännösjännitysten vaikutukset voidaan huomioida?
- Miten hitsausohje hyväksytetään?
- Mitä vaatimuksia höyrykattilan korjaamisessa täytyy noudattaa?

### 1.3 Tutkimuksen rajaus

Tässä työssä käsitellään höyrykattilan vaipan, sidetankojen ja sidepulttien korjaushitsauksen suunnitteluprosessia ja siihen liittyviä seikkoja. Työssä käsitellään ensisijaisesti korjaustyön suunnittelua sekä korjaustyössä tarvittavan hitsausohjeen hyväksyttämisen prosessia.

### 1.4 Tutkimuksen toteutus

Työssä perehdytään painelaitteiden korjaushitsausta koskevaan lainsäädäntöön ja standardeihin, hitsausohjeen laatimiseen ja sen hyväksyttämiseen menetelmäkokeella. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta laaditaan alustava hitsausohje, jonka mukaisesti valmistetaan tarvittavat koekappaleet. Koekappaleita valmistetaan kaksi sarjaa. Ensimmäisen sarjan koekappaleille suoritetaan yliopiston laboratoriossa menetelmäkoestandardin mukaiset testit, joiden kulku ja tulokset esitellään tässä työssä. Näillä pyritään kartoittamaan mahdollisia hitsaukseen liittyviä ongelmia. Toisen sarjan koekappaleilla hyväksytetään hitsausohje, ja näiden testaamisesta vastaa virallinen tarkastuslaitos.

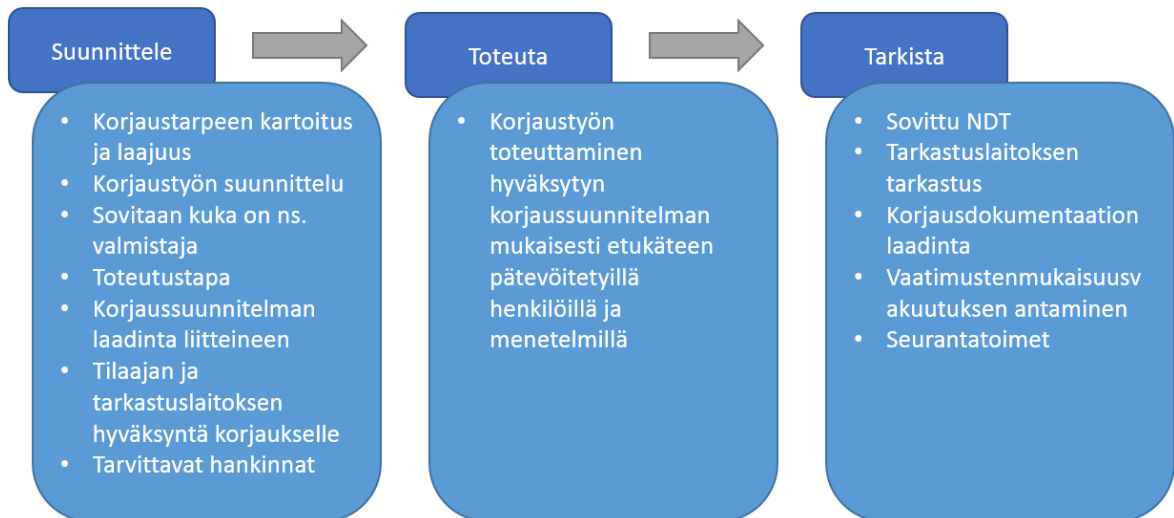
## 2 Korjaushitsauksen vaiheet

Korjaushitsauksen tavoitteena on pidentää rakenteen elinkaarta korjaamalla siihen valmistuksen tai käytön aikana syntynyt virhe tai vaurio. Jotta tavoitteeseen päästään, täytyy selvittää vaurion tai virheen syntymekanismi sekä miten vaurion uusiutumista voidaan estää tai hidastaa. Korjaustyön vaikutukset muuhun rakenteeseen on otettava huomioon. Työtavat ja menetelmät on valittava kohteen materiaalien, saavutettavuuden ja korjaustarpeen mukaan. Korjaustyöhön täytyy laatia suunnitelma, joka sisältää ohjeistuksen niin korjaustyön suorittamisesta, kuin myös työn valvonnasta ja laadunvarmistuksesta. Suunnitelman kattavuus ja laajuus riippuu kohteesta ja korjaustyön luonteesta. (Skriko 2022, s. 7–12; Virtanen 2021, s. 42.)

Tässä työssä korjaustyössä erityistä huomiota vaativia seikkoja ovat kattilan materiaali, kattilan valmistustapa, sekä painelaitteita koskeva lainsäädäntö ja standardit. Kattila on valmistettu 1900-luvun alussa, eikä materiaali todennäköisimmin ole nykyisten standardien mukainen. Kattila on valmistettu ajalleen tyypillisellä tavalla niittaamalla, ja materiaalin hitsattavuutta on arvioitava. Hitsaamisesta aiheutuvat muodonmuutokset ja jäännösjännitykset voivat pahimmillaan aiheuttaa vuotoja tai vaurioita niitatuissa liitoksissa. Näiden välttäminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta ylimääräisiltä työvaiheilta ja niistä aiheutuilta kustannuksilta vältytään. Kattilan koon ja paineen vuoksi korjaustyön on täytettävä lainsäädännön ja standardien vaatimukset ja korjaustyöstä on tuotettava ja tallennettava vaaditut dokumentit.

### 2.1 Korjaushitsauksen työvaiheet

Korjaustyön tekeminen voidaan jaotella kuvan 3 mukaisesti kolmeen päävaiheeseen: korjaustyön suunnitteluun, korjaustyön toteuttamiseen, ja työn laadun tarkastukseen.



Kuva 3. Painelaitteen korjaustyön vaiheet (mukaiillen Virtanen 2021, s. 42).

Korjaustyön suunnittelu alkaa tilanteen kartoittamisella. Tässä vaiheessa korjaustyön tarve on jo tunnistettu esimerkiksi laadunvalvonnassa, säännöllisessä tarkastuksessa tai käytön aikaisena toimintahäiriönä. Ennen varsinaisen suunnittelun aloittamista täytyy selvittää tarvittavia tietoja vaurioituneesta rakenteesta. Näihin tietoihin lukeutuvat muun muassa vaurion luonne, laajuus, syntymekanismi, sekä tarvittavat mitat ja materiaalitiedot. Tietoa voidaan kerätä esimerkiksi tutkimalla rakennetta ainetta rikkomattomilla (NDT) menetelmillä, tarkastelemalla rakenteeseen liittyviä piirustuksia ja muita dokumentteja, kyselyllä, sekä tarvittaessa ainetta rikkovin kokein. (Skriko 2022, s. 9–16.)

Vaurion laajuus on kartoitettava riittävää huolellisuutta käyttäen, jotta vältetään vaurioalueen suuruuden aliarvioimiselta. Rakennetta voi olla tarve tarkastella myös aluksi havaitun vaurioalueen ulkopuolelta, jos on syytä epäillä, että vaurion takia kuormitus on jakautunut muihin rakenteisiin ja mahdollisesti aiheuttanut jonkin toisen osan ylikuormituksen tai vaurioitumisen. (Skriko 2022, s. 10–15.) Vaurion luonteen ja laajuuden selvittämiseen voidaan käyttää kohteesta riippuen erinäisiä NDT menetelmiä, kuten visuaalista-, magneettijauhe-, tunkeumaneste- tai ultraäänitarkastusta (O'Brien 2011, s. 574–575).

Vaurion syntymekanismi on selvitetävä, jotta vaurion uusiutuminen korjaustyön jälkeen voidaan estää. Syntymekanismi voidaan selvittää yhdistelemällä tietoja rakenteen käyttöhistoriasta, suunnitelmista, sekä tarkastelemalla itse vauriota ja käyttöolosuhteita. Käyttöhistorian selvittämiseksi voidaan haastatella rakenteen käyttäjiä ja tutkia rakenteen aikaisempia tarkastuksia ja korjauksia koskevia dokumentteja. Halkeamille täytyy selvittää alkusärön sijainti, sekä särön kasvamisen aiheuttavat voimat. Korroosiovauriossa täytyy selvittää ympäristön, materiaalivalinnan ja kuormitusten vaikutus vaurion syntyyn täytyy selvittää. Jos vaurion perimmäisenä syynä on virheellinen käyttö, käyttöolosuhteet tai ylikuormitus, on aiheellista harkita rakenteen muuttamista vastaamaan paremmin käyttöolosuhteita ja kuormia. (O'Brien, 2011, s. 572–574.)

Korjaustyön suunnittelun kannalta on tärkeää selvittää korjattavan rakenteen materiaali. Jos käytetty materiaali ja sen mekaaniset ominaisuudet eivät selviä esimerkiksi rakenteen suunnitelmista, tulee vähintään materiaalin kemiallinen koostumus selvittää. Kemiallinen koostumus voidaan selvittää esimerkiksi irrottamalla rakenteesta pieni koekappale ja analysoida se spektrometrillä. Tarvittaessa myös materiaalin mekaanisia ominaisuuksia voidaan selvittää ainetta rikkovin kokein. (O'Brien, 2011, s. 569, 576.)

Tilanteen kartoittamisen jälkeen on tehtävä päätös, lähdetäänkö rakennetta tai sen osaa korjaamaan, vaihtamaan tai jatketaan rakenteen käyttöä sellaisenaan. Päätökseen vaikuttaa useita tekijöitä, kuten vaurion luonne, korjaustyön arvioidut kustannukset, aikataululliset seikat, rakenteen käytettävyyden ja elinkaari, sekä korjaustyön onnistumisen todennäköisyys. Eri vaihtoehtoja vertailemalla voidaan valita tarkoituksenmukaisin toimintatapa. Korjaustyö voi joissain tapauksissa olla liian kallista, tai toimivan korjauksen tekeminen voi olla mahdotonta. Toisaalta korjaustyö voi olla hyvin tehokas vaihtoehto, esimerkiksi jos varaosa on kallis tai sellaisen hankkimisessa kestää kauan. Joskus rakenteen käytön jatkaminen sellaisenaan voi olla tarkoituksenmukaista, mutta sille täytyy olla aina hyvä perustelu, ja tarvittaessa rakenteen käytölle on asetettava rajoitteita. (O'Brien, 2011, s. 567–568.)

Jos rakenne on päätetty korjata, siirrytään korjaustyön yksityiskohtaisempaan suunnitteluun. Painelaitteen korjaustyön suunnitelman tulee sisältää lainsäädännön ja soveltuvien

standardien vaatimat kohdat, sekä riittävät tiedot laadukkaan korjaustyön suorittamiseen. Suunnitelma tulee esittää hyväksytylle kansalliselle tarkastuslaitokselle ennen korjaustyön aloittamista. Suunnitelman laajuus vaihtelee kohteen mukaan, mutta siinä on hyvä esittää ainakin seuraavat asiat:

- valmistajatiedot
- suunnitteluarvot
- materiaalitiedot
- yksityiskohtainen kuvaus korjauksen toteutuksesta
- suunnitteluaineisto
- pysyvien liitosten ohjeet
- NDT-suunnitelma
- laadunvarmistussuunnitelma
- hitsaussuunnitelma
- rakennetarkastuksen toteutus
- aikataulu
- mahdolliset alihankkijat
- yhteyshenkilöt

(Virtanen 2021, s. 42.)

Valmistajalla tarkoitetaan painelaitedirektiivissä (PED) kuvattua luonnollista- tai oikeushenkilöä, joka valmistaa, suunnitteluttaa tai valmistuttaa painelaitteen tai laitekokonaisuuden ja markkinoi sitä omalla nimellään taikka tavaramerkillään, tai käyttää sitä omiin tarkoituksiinsa (2014/68/EU, s. 11). Valmistajalle määrätään lainsäädännössä ja standardeissa tiettyjä velvollisuuksia ja vastuita korjaustyöhön liittyen. Valmistaja muun muassa antaa vaatimustenmukaisuusvakuutuksen sekä ottaa vastuun painelaitteen säännösten mukaisuudesta ja siten myös turvallisuudesta. Korjaustyön sisältäessä paineenkeston vaikuttavien, tai niihin

suoraan kiinnitettyjen osien hitsaamista valmistaja vastaa hitsaajien ja hitsausmenetelmien pätevöinnistä myös silloin kun hitsausta sisältävät työvaiheet teetetään alihankkijoilla. Useimmiten korjaustyössä valmistaja on usein korjaustyön suorittava yritys, mutta se voi olla esimerkiksi myös painelaitteen omistaja tai haltija. Valmistajalle ei ole muodollisia pätevyysvaatimuksia, mutta valmistajan on kyettävä huolehtimaan lainsäädännössä ja standardeissa määritetyistä tehtävistä. (Virtanen 2021, s. 42)

## 2.2 Hitsaukseen liittyviä huomioita

Jos rakenne on alun perin valmistettu hitsaamalla, käytetyt materiaalit ovat todennäköisimmin hyvin hitsattavia. Hyvin hitsattavissa materiaaleissa on rajoitettu karkenemista lisäävien seosaineiden kuten hiilen, ja halkeilua aiheuttavien seosaineiden kuten rikin määrää. Hitsatuissa rakenteissa voidaan käyttää myös materiaaleja, joiden hitsattavuus on rajoittunut, mutta tällöinkin hitsattavuuden kannalta keskeisten seosaineiden pitoisuuksille on todennäköisesti asetettu joitain rajoitteita. Jos rakenne on sen sijaan valmistettu jollain muulla menetelmällä kuten niittaamalla tai valamalla, materiaalivalinnassa ei todennäköisesti ole huomioitu hitsattavuutta. Tällöin hitsattavuuden arviointi materiaalin kemiallisen koostumuksen perusteella on erityisen tärkeää. (O'Brien 2011, s. 577.)

Materiaalin hitsattavuutta voidaan arvioida hiiliequivivalentin (CE) avulla, joka on teräksen karkenemisen arviointiin käytetty työkalu. Seostamattomien, hienorakeisten ja niukkaseosteisten terästen hiiliequivivalentti voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

jossa CE on hiiliequivivalentti, ja alkuaineiden pitoisuudet on ilmoitettu prosentteina. Hiiliequivivalentin laskutapoja on useita, mutta esitetty IIW:n kaava on yleisimmin käytetty. (SFS-EN 1011-2, s. 24–26; Ovako 2020, s. 8.) Tärkein hiiliequivivalenttiin vaikuttava seosaine on hiili, jonka pitoisuus hyvin hitsattavissa teräksissä on tyypillisesti alle 0,25%. Muita karkenevuutta lisääviä seosaineita ovat muun muassa mangaani, kromi, molybdeeni



ja boori. Tyypillisesti teräksen hitsattavuutta pidetään hyvänä jos sen CE on alle 0,41, kohdallaisena jos CE on alle 0,45 ja rajoitettuna jos CE on tätä suurempi. Raja-arvot ovat suuntaa antavia, ja hitsattavuuteen vaikuttaa myös materiaalin paksuus. Korkea hiilipitoisuus tai hiiliekvivalentti kuitenkin viittaa siihen, että hitsauksessa voidaan joutua käyttämään esikuumennusta ja korotettua työlämpötilaa. (Ovako 2020, s. 8)

Esikuumennuksen ja korotetun työlämpötilan tarvetta voidaan arvioida metallisten materiaalien hitsausuusstandardin SFS-EN 1011-2 avulla. Standardissa korotettu työlämpötila määritetään graafisesti hiiliekvivalentin, yhdistetyn aineenpaksuuden, lisäaineen vetypitoisuuden ja lämmöntuonnin perusteella. Yhdistetyllä aineenpaksuudella tarkoitetaan liitettävien levyjen yhteenlaskettua paksuutta. Esimerkiksi kahden 12 mm levyn välisessä päittäisliitoksessa yhdistetty aineenpaksuus on 24 mm, ja 12 mm levyjen T-liitoksessa yhdistetty aineenpaksuus on 36 mm. Lisäaineen vetypitoisuuden perusteella valitaan käytettävä vetyasteikko. Vetyasteikkojen määrittäminen on esitetty taulukossa 1. MIG/MAG ja TIG hitsauksessa käytettävät umpilangat kuuluvat vetyasteikkoon D, ellei niiden ole erikseen arvioitu täyttävän asteikon E vaatimuksen. (SFS-EN 1011-2, s. 28–30.)

Taulukko 1. Lisäaineiden vetyasteikon määrittäminen (SFS-EN 1011-2, s. 28).

Hitsiaineen vetypitoisuus (ml/100 g)	Vetyasteikko
$>15$	A
$10 \leq 15$	B
$5 \leq 10$	C
$3 \leq 5$	D
$\leq 3$	E

Hitsauksen aikana materiaali kuumenee ja laajenee. Laajenemista kuitenkin rajoittaa ympäröivä rakenne. Jäähtyessään materiaali pyrkii kutistumaan aiheuttaen muodonmuutoksia ja verojännityksiä hitsiin ja sen lähiympäristöön. (Ovako 2020, s.16.) Ma (2022) on mallintanut jäännösjännityksien jakautumista joillekin tyypillisille hitsausliitoksille. 25 mm paksujen SUS 304 ruostumattomien teräslevyjen kahdelta puolelta usealla palolla hitsatussa

päittäisliitoksessa poikittaiset jäännösjännitykset tasaantuvat hieman alle 50 mm etäisyydellä railon keskilinjasta. Seinämäpaksuudeltaan 18,2 mm ja ulkohalkaisijaltaan 165,2 mm SUS 304 putkien yhdeltä puolelta hitsatussa päittäisliitoksessa poikittaiset jäännösjännitykset tasaantuvat noin 50 mm etäisyydellä liitoksen keskilinjasta. (Ma 2022, s. 162–171.)

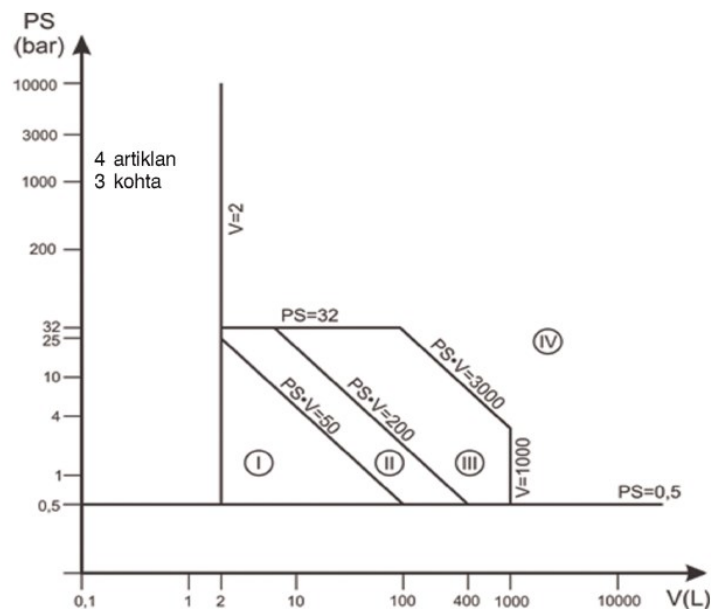
Jäännösjännitykset aiheuttavat hitsin suhteen pitkittäisiä ja poikittaisia muodonmuutoksia. Poikittaisia muodonmuutoksia ovat poikittaiskutistuma, kiertymä ja kulmavetäytyminen. Pitkittäisiä muodonmuutoksia ovat pituuskutistuma, kaareutuminen ja lommoutuminen. Kutistumia voidaan vähentää hitsaamalla useammalla palolla käyttäen pienempää lämmöntuontia ja silloittamalla kappale lyhyin siltahitsein. Palkojen määrää kasvattaessa on kuitenkin huomioitava, että suurempi palkomäärä saattaa aiheuttaa suuremman kiertymän. Kiertymän pienentämiseksi on suositeltavaa käyttää railoa, jossa pinta on kapea, ja hitsata kappale hyppelehtivällä hitsausjärjestyksellä, jolloin kappale jäykistyy tasaisesti hitsauksen edetessä, mikä vähentää muodonmuutoksia. (O'Brien 2011, s. 581–582; Ovako 2020, s. 16–17.)

### 2.3 Tapausta koskeva lainsäädäntö ja standardit

Painelaitteiden valmistusta ja korjausta sääntelevät painelaitelaki 1144/2016, painelaitedirektiiviin 2014/68/EU perustuva valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016 sekä valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta 1549/2016. Lisäksi aiheeseen liittyy standardisarja SFS-EN 12953 ”Tulitorvikattilat”.

SFS-EN 12953 ”Tulitorvikattilat” käsittelee tulitorvikattiloita, joiden tilavuus on yli 2 litraa, suurin sallittu paine yli 0,5 bar ja suurin lämpötila yli 110 °C. Standardisarjassa esitetään vaatimuksia, joilla pyritään minimoimaan kattiloiden käyttöön liittyvät vaarat, ja järjestämään jäljelle jääneiden vaarojen vaikutuksia vähentävät suojaukset. Standardisarjaa ei ole tarkoitettu sovellettavaksi liikkuviin kattiloihin kuten höyryveturien kattiloihin, mutta standardisarjan vaatimuksia on syytä noudattaa soveltuvin osin. (SFS-EN 12953-1, s. 6.)

Painelaitteet luokitellaan painelaitteasetuksen 1548/2016 mukaisesti luokkiin I, II, III ja IV niiden vaaran suuruuden perusteella. Luokitteluun käytetään painelaitedirektiivin 2014/68/EU liitteen II vaatimustenmukaisuuden arviointitaulukoita. Painelaitteen luokitus määrittelee käytettävän vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyn. Tässä työssä käsiteltävä höyrykattila on painelaitedirektiivin 4. artiklan 1. kohdan b alakohdassa tarkoitettu ”*Liekillä tai muulla tavoin lämmitetyt painelaitteet, joissa on ylikuumentumisen vaara ja jotka on tarkoitettu höyryn tai ylikuumentetun veden tuotantoon yli 110 C:n lämpötilassa, kun tilavuus on yli 2 L*” jolloin luokitteluun käytetään kuvassa 4 esitettyä graafia. (1548/2016; 2014/68/EU.)



Kuva 4. 2014/68/EU 4 artiklan 1 kohdan b alakohdassa tarkoitettujen lämmitettyjen höyryn tai ylikuumentetun veden tuotantoon tarkoitettujen painelaitteiden luokittelu (2014/68/EU).

Rekisteröitävien painelaitteiden korjaus- ja muutostyössä vaatimustenmukaisuuden arviointiin voidaan käyttää painelaitteasetuksen § 11 mainituista arviointimenettelyistä moduulia G, ja muille painelaitteille moduulia A2. Tarkastuslaitoksen suostumuksella voidaan tapauskohtaisesti käyttää myös muuta moduulia, jos se on työn ja kohteen kannalta tarkoituksenmukaista. Omataarkastuslaitos saa käyttää vain moduulia G. Korjaus- ja muutostyössä ei sovelleta painelaitelain 17§ vaatimuksia koskien CE-merkintää. (Tukes, 2018; 1549/2016.)

Painelaitedirektiivin liitteen I mukaan luokkiin II, III ja IV kuuluvien painelaitteiden pysyvien, painetta kantavien liitosten valmistamiseen käytettävät menetelmät ja henkilöt täytyy hyväksyttää kolmannella toimivaltaisella osapuolella, joko ilmoitetulla laitoksella tai artiklan 20 mukaisella kolmannen osapuolen organisaatiolla (2014/68/EU). Käytännössä siis kyseisten liitosten valmistamiseen käytettävän hitsausohjeen täytyy olla hyväksytetty edellä mainitulla organisaatiolla, ja hitsarilla täytyy olla voimassa oleva pätevyys kyseisen liitoksen hitsaamiseen. Luokkiin III ja IV kuuluvien painelaitteiden pysyvien liitosten NDT on suoritettava päteväintilaitoksen hyväksymällä henkilöstöllä (Tukes, 2018; 2014/68/EU).

#### 2.4 Laadunvarmistus ja dokumentaatio

Laadunvarmistuksella pyritään varmistamaan, että valmistettu tuote täyttää sille asetetut laatuvaatimukset. Laadunhallinta on laadun varmistamista ennalta määritetyn toimintatavan mukaisesti. Hitsaustuotannossa keskeisimmät laadunhallinnan työkalut ovat standardisarjat SFS-EN ISO 9000 ja SFS-EN ISO 3834, joista ensimmäinen luo perustan laadunhallintajärjestelmille ja niiden käytöllä, ja jälkimmäinen käsittelee metallien sulahitsauksen laatuvaatimuksia. Hitsaustyöhön liittyy myös muita laatustandardeja, mutta Virtasen (2021) mukaan korjaustyössä päästään jo pitkälle, kun työn toteutus hankitaan valmistajalta, jolla on SFS-EN ISO 9001 ja SFS-EN ISO 3834-2 sertifioitu laadunhallintajärjestelmä sekä kokemusta painelaitteiden valmistamisesta tai korjaamisesta (Virtanen 2021, s. 42–43).

Tulitorvikattiloiden paineenalaisten osien valmistusta käsitellään standardissa SFS-EN 12953-4 ja valmistuksen aikaisia tarkastuksia ja dokumentteja standardissa SFS-EN 12953-5. Kattilan valmistaja vastaa suorittamastaan tai alihankitusta hitsaustyöstä, ja valmistajan on nimettävä työhön hitsauskoordinoitistandardin EN ISO 14731 mukainen hitsausvalvoja. Painelaitedirektiivin luokkien II, III ja IV kattiloiden valmistamiseen saa ryhtyä vain, kun hitsaajat ja hitsausmenetelmät on pätevoidetty. Valmistajan on osoitettava hitsausten, paineenalaisten materiaalien ja tarkastuksien tunnistus ja jäljitettävyyys osien merkinnöillä tai dokumentoinnilla koko valmistusprosessin ajan. Jokaisen hitsin on oltava jäljitettävissä hitsaajaan. Hitsit voidaan merkitä esimerkiksi hitsaajan tunnusleimalla, tai jäljittämiseen voidaan soveltaa jotain asianmukaista dokumentointimenettelyä. (SFS-EN 12953-4, s. 6–7.)

Kaikille hitseille suoritetaan täydellinen silmämääräinen tarkastus siltä osin kuin se on mahdollista. Jos kattilalle sovelletaan lujuuskerrointa  $v = 0,7$  silmämääräinen tarkastus riittää, eikä muita NDT tarkastuksia vaadita. Käytetyn lujuuskertoimen ollessa  $v = 0,85$  tai  $v = 1$ , vaaditaan 100% silmämääräisen tarkastuksen lisäksi muita ainetta rikkomattomia tarkastuksia, tyypillisesti ultraäänitarkastusta. Käytettävä tarkastustekniikka ja sen laajuus riippuu liitoksen tyypistä, sijainnista ja käytetystä koepaineesta. Tarkemmat ohjeet ja vaatimukset ainetta rikkomattomille tarkastuksille esitetään standardin SFS-EN 12953-5 taulukossa 2. (SFS-EN 12953-5, s. 10–12.)

Jos tarkastusten aikana hitsissä havaitaan virhe, on suoritettava seuraavat lisätarkastukset ennen korjaustoimenpiteiden aloittamista: Jos hitsausvirhe havaitaan hitsien risteyskohdan alueella, on hitsit tarkistettava risteyskohdan molemmilta puolilta. Jos hitsausvirhe havaitaan kehä- tai pituushitsissä, tarkistus on suoritettava havaitun virheen molemmilta puolilta. Jos edellä mainittujen lisätarkastusten tulokset ovat hyväksyttäviä, hitsi on korjattava eikä muita lisätoimenpiteitä vaadita. Jos edellä mainituissa lisätarkastuksissa havaitaan lisää hitsausvirheitä, on kyseinen hitsi sekä kaikki muut saman hitsaajan samalla hitsausohjeella hitsaamat hitsit tarkastettava 100% laajuudelta. Kaikki hitsin korjaukset on dokumentoitava, ja korjatut alueet on tarkistettava täydellisesti kaikilla alkuperäiselle hitsille määrätyillä tekniikoilla. (SFS-EN 12953-5, s. 13–18.)

Moduulissa G toiminnanharjoittaja toimittaa valitsemalleen hyväksytylle tarkastuslaitokselle hakemuksen ja tarvittavat tekniset asiakirjat korjaustyöhön. Asiakirjojen sisältö voi vaihdella tapauskohtaisesti, mutta niiden tulee olla riittävän kattavat, jotta tarkastuslaitos pystyy niiden perusteella arvioimaan, täyttääkö korjaustyön suunnittelu ja rakenne painelaittedirektiivin liitteen I mukaiset olennaiset turvallisuusvaatimukset. Asiakirjoihin on mahdollisuuksien mukaan sisällytettävä yleinen kuvaus painelaitteesta, suunnittelupiirustukset ja kaaviot tarvittavine selitteineen ja kuvauksineen, pysyvien liitosten ohjeet (hitsausohje), sekä korjaussuunnitelma. (Tukes, 2018; 2014/68/EU.)

Tarkastuslaitos antaa hyväksymästään suunnitelmasta päätöksen tai lausunnon, johon perustuen toiminnanharjoittaja tekee tai teettää korjaustyön suunnitelman mukaisesti. Mikäli toteutunut korjaustyö poikkeaa huomattavasti alkuperäisestä suunnitelmasta, tulee

toiminnanharjoittajan laatia kirjallinen korjauskertomus muutosten osalta. Työn päätteeksi tarkastuslaitos tarkastaa työn sekä työn aikana kootut asiakirjat ja antaa näiden pohjalta vaatimustenmukaisuustodistuksen. Toiminnanharjoittaja puolestaan antaa vaatimustenmukaisuusvakuutuksen ja luovuttaa työhön liittyvät asiakirjat painelaitteen omistajalle. (Tukes, 2018.)

## 2.5 Hitsausohje ja sen hyväksyttäminen menetelmäkokeella

Hitsausohje eli WPS (Welding Procedure Specification) on dokumentti, jossa esitetään yksityiskohtaisesti tietyn hitsausliitoksen toistettavaan valmistamiseen tarvittavat tiedot ja muuttujat. Hitsausohje luo pohjan hitsaustyön laadulle, mutta se ei luonnollisestikaan takaa sitä. Laatujärjestelmästandardit ja lainsäädäntö voivat vaatia hyväksytyyn hitsausohjeeseen käyttöä. (Lukkari 2002, s. 55.)

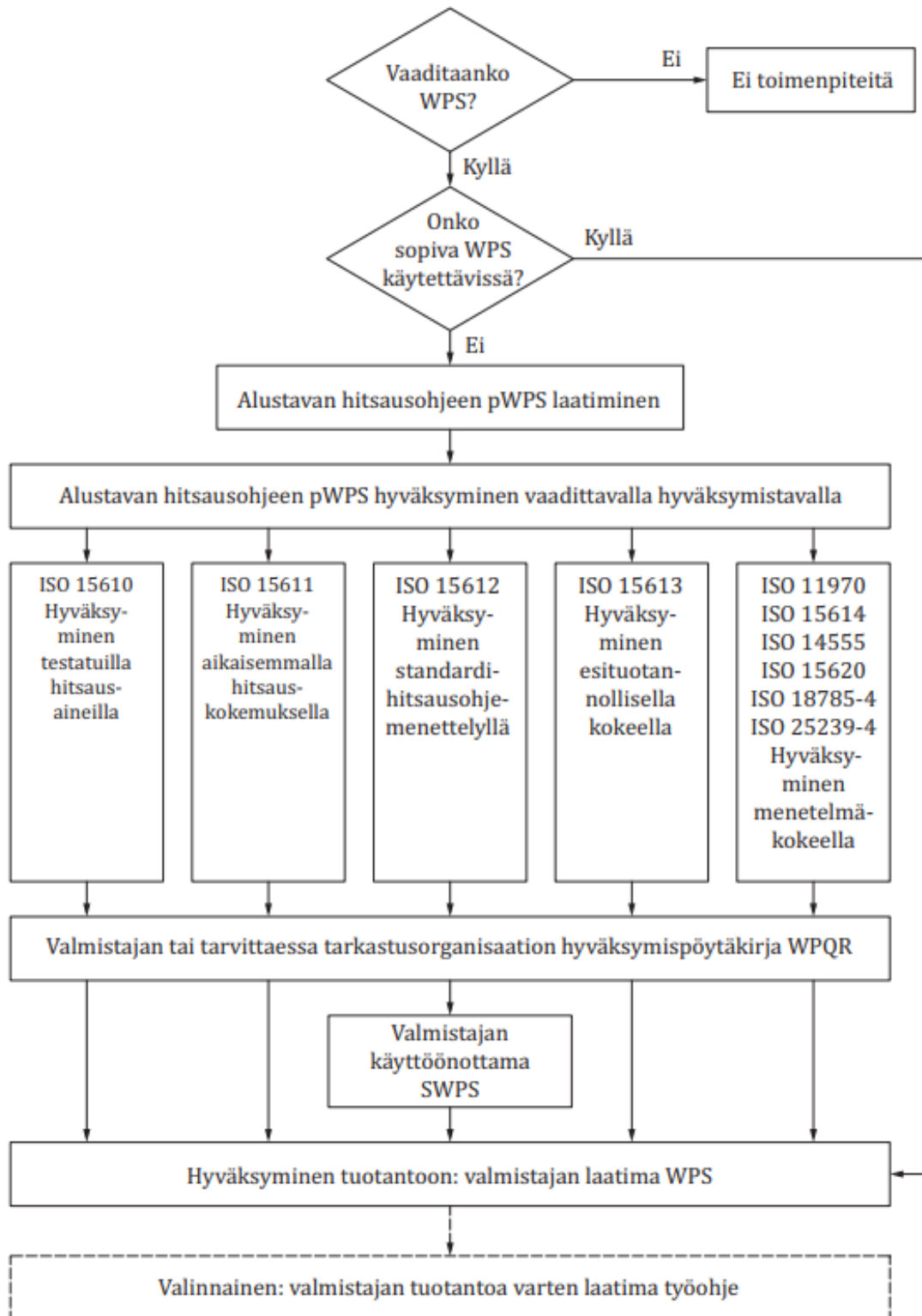
Hitsausohjeen tekninen sisältö kaarihitsausprosesseille määritetään standardissa SFS-EN ISO 15609-1. Hitsausohjeen sisältö voidaan jakaa valmistajakohtaisiin tietoihin, materiaaliin liittyviin tietoihin sekä hitsausmenetelmästä riippumattomiin ja riippuviin tietoihin. Valmistajakohtaiset tiedot sisältävät valmistajan nimen, hitsausohjeen tunnisteiden, sekä viittauksen hitsausohjeen hyväksymiseen käytettyyn menetelmäkoepöytäkirjaan (WPQR). Materiaalitiedot sisältävät perusaineiden merkinnät ja niiden viitestandardit, sekä hyväksytyt materiaalipaksuudet ja putkien tapauksessa myös hyväksytyt ulkohalkaisijat. (SFS-EN ISO 15609-1, s. 7.)

Hitsausmenetelmästä riippumattomia tietoja ovat muun muassa railon valmistukseen, hitsaussuoritukseen sekä hitsin jälkikäsittelyyn liittyvät tiedot. Railon valmistusta varten täytyy olla liitoksen kuva, josta selviää liitoksen yksityiskohdat kuten railomuoto ja mitat. Kuvassa on esitettävä myös palkojärjestys, jos sillä on oleellinen vaikutus hitsin ominaisuuksiin. Railon valmistukseen ja puhdistukseen liittyvät menetelmät sekä käytettävät kiinnitykset on mainittava tarvittaessa. Hitsaussuoritusta varten hitsausohjeeseen merkitään käytettävä hitsausprosessi ja -asennot, sekä soveltuvin osin käytettävät lisäaineet, suojakaasut,

hitsaustekniikkaan liittyvät ohjeet, juuren tuenta ja avaaminen, työlämpötilat, virtalaji ja -alue, sekä lämmöntuontialue. Hitsausprosessista riippuviin tietoihin kuuluu MIG/MAG-hitsauksessa suojakaasun virtausnopeus ja suuttimen halkaisija, vapaalangan pituus, käytettävien hitsauslankojen lukumäärä, aineensiirtymismuoto ja kaarijännitealue. (SFS-EN ISO 15609-1, s. 7–10.)

Hitsausohje täytyy hyväksyttää ennen sen käyttöä tuotannossa. Hitsausohje voidaan hyväksyttää usealla eri tavalla, tosin tuotestandardeissa voidaan vaatia jonkin tietyn hyväksymistavan käyttöä. Hitsausohjeen laatimis- ja hyväksymisprosessin kulku on esitetty kuvan 5 kaaviossa. (SFS-EN ISO 15607, s. 6–8.) Tulitorvikattilastandardi vaatii, että hitsausohje on hyväksytty menetelmäkokeella (SFS-EN 12953-4, s. 18).

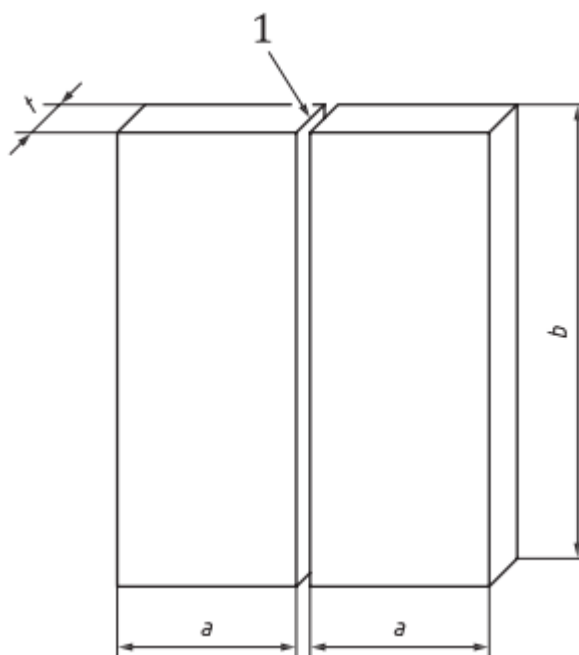
Menetelmäkoestandardissa mainitaan hyväksymisrajoille kaksi tasoa. Taso 1 pohjautuu ASME Section IX:n vaatimukseen ja taso 2 menetelmäkoestandardin aiempiin painoksiin. Tason 2 vaatimukset ovat tiukemmat ja pätevyysalue suppeampi, ja se kattaa automaattisesti tason 1 vaatimukset. Hitsien virheet ja viat esitetään standardissa SFS-EN ISO 6520-1 ja sallittujen virheiden raja-arvot laatuluokittain on esitetty hitsiluokkastandardissa SFS-EN ISO 5817. Menetelmäkoestandardin tasolla 2 virheiden hyväksymisrajoina käytetään pääosin B-luokan raja-arvoja, tosin tiettyjen virheiden osalta sallitaan C-luokan raja-arvojen käyttö. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 5–6; 20.) Tulitorvikattilastandardissa määritetyt hyväksymisrajat vastaavat osin hitsiluokkastandardin SFS-EN ISO 5817 luokkia B ja C, mutta tiettyjen pintavirheiden kohdalla standardissa on asetettu näistä poikkeavat raja-arvot, jotka vastaavat nykyistä eurooppalaista kattilanvalmistuskäytäntöä (SFS-EN 12953-5, s. 14–18).



Kuva 5. Hitsausohjeen laatimisen ja hyväksynnän kulkukaavio (SFS-EN ISO 15607, s. 14).



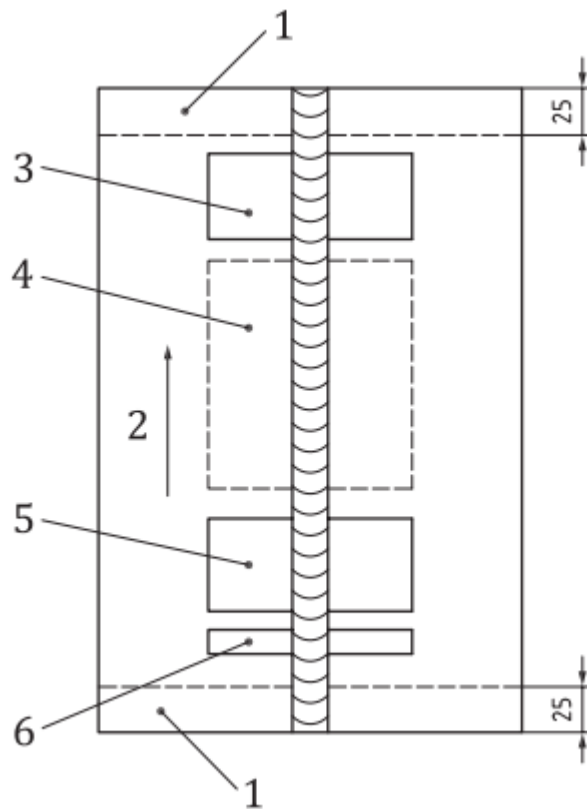
Päittäisliitoksen menetelmäkokeessa hitsataan yksi tai useampi kuvan 6 mukainen koekappale. Koekappaleiden määrä vaihtelee tavoiteltavan pätevyysalueen mukaan, niin materiaalin paksuuden, hitsausparametrien kuin hitsausasentojen suhteen. Koekappaleiden lukumäärän on oltava riittävä kaikkien tarvittavien testien suorittamiseksi. Tarvittaessa uusintakokeita varten voidaan valmistaa ylimääräisiä tai vähimmäisvaatimuksia pidempiä koekappaleita. Yksinkertaisimmillaan yksi koekappale riittää, mutta laajalla paksuuksien, asentojen ja parametrien skaalalla voi olla tarpeellista hitsata useita kappaleita. Kokeen valvoja tai tarkastusorganisaatio valvoo koekappaleiden hitsauksen ja täyttää hitsauksesta valvontapöytäkirjan, joka sisältää toteutuneet parametrit. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 9–10.)



Kuva 6. Läpihitsatun levyjen päittäisliitoksen koekappale. Selitykset: 1 railon valmistus ja sovitus pWPS mukaan. a vähimmäismitta 150 mm, b vähimmäismitta 350 mm, t aineenpaksuus. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 10.)

Läpihitsatulle päittäisliitokselle suoritetaan taulukon 2 mukaiset testit. Ainetta rikkovien testien koesauvat irrotetaan koekappaleesta kuvan 7 mukaisista kohdista. Koesauvojen irrotuksessa on sallittua välttää alueita, joilla on ainetta rikkomattomissa tarkastuksissa havaittu suuruudeltaan hyväksyttäviä hitsausvirheitä. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 14.) Kun

hitsausohjeelle tavoitellaan kaikkien hitsausasentojen hyväksyntää, täytyy hitsata vähintään kaksi koekappaletta. Tällöin iskukoesauvat otetaan suurimman lämmöntuonnin hitsausasennon hitsistä, joita ovat levyjen päittäisliitokselle tyypillisesti PA ja PF. Poikkeuksena perusaineryhmälle 10 iskukokeet tehdään sekä pienimmän että suurimman lämmöntuonnin hitsausasennoissa hitsatuille kappaleille. Kovuuskoesauvat on puolestaan otettava pienimmän lämmöntuonnin hitsausasennon hitsistä, joita ovat levyjen päittäisliitokselle tyypillisesti PC ja PE. Pystyasennossa hitsaus alaspäin on kuitenkin hyväksytettävä erillisellä koekappaleella. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 26–27.)



Kuva 7. Koesauvojen sijainti päittäishitsattujen levyjen koekappaleessa. Selitteet: 1. poistetaan 25 mm. 2. Hitsaussuunta. 3. Alue josta irrotetaan 1 vetokoesauva ja taivutussauvat. 4. Alue josta irrotetaan iskukoesauvat ja mahdollisesti vaadittavat lisäkoesauvat. 5. Alue josta irrotetaan 1 vetokoesauva ja taivutuskesauvat. 6. Alue josta irrotetaan makrohie ja kovuuksokoesauva. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 15.)

Suoritettujen kokeiden tulokset kirjataan ylös kunkin kokeen pöytäkirjaan, joka liitetään osaksi hyväksymispöytäkirjaa (WPQR). Menetelmäkokeen valvoja tai tarkastusorganisaatio vahvistaa allekirjoituksellaan ja päiväyksellä, että WPQR täyttää vaatimukset, jos hylkäämiseen johtavia tuloksia tai seikkoja ei ilmene. Jos koekappale ei täytä jotain näistä vaatimuksista hitsataan uusi koekappale. Jos tämäkään ei täytä NDT-menetelmien hyväksymisrajoja niin menetelmäkoe hylätään, ellei voida osoittaa, että vian juurisyy johtuu hitsaajan riittämättömästä taidosta eikä se liity käytettyyn menetelmään. Tällöin uutta koekappaletta ei tarvita mutta raportti todisteista lisätään osaksi pöytäkirjaa. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 20; 33.)

Taulukko 2. Koekappaleiden testaus läpihitsatulle päittäisliitokselle (Mukaillen SFS-EN ISO 15614-1, s. 14).

Testaus	Testauksen laajuus
Silmämääräinen tarkastus	100 %
Radiografia tai ultraäänitarkastus	100 % <sup>(1)</sup>
Pintahalkeamien tarkastus	100 % <sup>(2)</sup>
Poikittainen vetokoe	2 koesauvaa
Poikittainen taivutuskoe	4 koesauvaa <sup>(3)</sup>
Iskukoe	2 sarjaa <sup>(4)</sup>
Kovuuskoe	vaadittu <sup>(5)</sup>
Makrohietutkimus	1 hie

<sup>(1)</sup> Ultraäänitarkastusta ei saa suorittaa, kun  $t < 8$  mm eikä perusaineryhmille 8, 10, 41...48.

<sup>(2)</sup> Helppopääsisille hitsin pinnoille tunkeumanestetarkastus tai magneettijauh tarkastus. Epämagneettisille materiaaleille tunkeumanestetarkastus.

<sup>(3)</sup> Kun  $t < 12$  mm testataan kaksi juuritaivutussauvaa ja kaksi pintataivutussauvaa. Kun  $t \geq 12$  mm, voidaan juuri- ja pintataivutussauvojen sijaan käyttää neljää sivutaivutussauvaa.

<sup>(4)</sup> Yksi sarja hitsiaineesta, toinen muutosvyöhykkeeltä (HAZ)

<sup>(5)</sup> Ei vaadita perusaine alaryhmälle 1.1 tai ryhmille 8 ja 41...48

Ainetta rikkovien kokeiden hyväksymisrajat riippuvat testausmenetelmästä. Vetokokeessa myötö- ja murtolujuuden on ylitettävä perusaineelle asetetut vähimmäisarvot. Taivutuskokeessa koesauvoihin ei saa syntyä yli 3 mm suuruisia halkeamia. Makrohietutkimuksessa käytetään NDT-menetelmien hyväksymisrajoja. Iskukokeessa kolmen sauvan sarjan

keskiarvon on täytettävä perusaineen vaatimukset. Yksittäinen sauva saa alittaa perusaineen vaatimuksen, kunhan iskukokeen tulos on vähintään 70% vaaditusta arvosta, ja sarjan keskiarvo täyttää vaatimukset. Kovuuskoetuloksille asetetaan menetelmäkoestandardissa enimmäisarvot. Jos jokin koesauva ei täytä hyväksymisrajoja, voidaan kutakin hylättyä koesauvaa kohden irrottaa koekappaleesta kaksi uutta koesauvaa ja suorittaa näille samat kokeet. Jos molemmat lisäkoesauvat täyttävät niille asetetut vaatimukset, koe hyväksytään. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 18–21.)

Menetelmäkoeksessa hyväksytyt koekappaleet pätevöittävät hitsausohjeen tietyin ehdoin ja rajoituksin muille paksuuksille, materiaaleille ja liitosmuodoille. Materiaalin suhteen tarkemmat pätevyysalueet ilmoitetaan menetelmäkoestandardissa, mutta teräksillä testattu liitos kattaa usein saman ja alempien alaryhmien materiaalit. Metalliset materiaalit ryhmitellään teknisessä raportissa CEN ISO/TR 15608. Ryhmiin 1, 2, 3 ja 11 kuuluvilla koekappaleilla suoritettu menetelmäkoepätevöittää kaikille saman ryhmän materiaaleille, joiden myötölujuus ( $R_{eH}$ ) on pienempi tai yhtä suuri kuin käytetyn koekappaleen. Jos koekappaleen materiaalina on esimerkiksi ryhmään 1.2 kuuluva rakenneteräs S355, pätevöittää se ryhmien 1.1 ja 1.2 välisiin liitoksiin, kun  $R_{eH} \leq 355$  MPa. Eri materiaaliryhmien väliset liitokset pätevöittävät tietyin ehdoin myös muille eri materiaaliryhmien välisille liitoksille. Päittäisliitoksessa aineenpaksuuden kattavuus riippuu käytetystä palkojen määrästä ja koekappaleen aineenpaksuudesta. Kun koekappaleen paksuus  $t$  on monipalkohitsauksessa  $3 \text{ mm} < t \leq 12 \text{ mm}$ , on tason 2 kattavuusalue  $3 \dots 2t$ , ja jos paksuus  $t$  on  $12 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$ , on kattavuusalue  $0,5t \dots 2t$ . Kattavuusalueet esitetään tarkemmin taulukossa 3. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 21–25.)

Taulukko 3. Päittäisliitoksien hitsausohjeen hyväksyttämisaalue materiaalipaksuuden suhteen (SFS-EN ISO 15614-1, s. 25).

Thickness of test piece $t$	Range of qualification			Deposited weld metal thickness for each process $s$
	Level 1	Parent material thickness		
		Level 2		
		Single run	Multi-run	
$t \leq 3$	0,5 $t$ to 2 $t$			max. 2 $s$
$3 < t \leq 12$	1,5 to 2 $t$	0,5 $t$ (3 min) to 1,3 $t$	3 to 2 $t^a$	max. 2 $s^a$
$12 < t \leq 20$	5 to 2 $t$	0,5 $t$ to 1,1 $t$	0,5 $t$ to 2 $t$	max. 2 $s$
$20 < t \leq 40$	5 to 2 $t$	0,5 $t$ to 1,1 $t$	0,5 $t$ to 2 $t$	max. 2 $s$ when $s < 20$ max. 2 $t$ when $s \geq 20$
$40 < t \leq 100$	5 to 200	—	0,5 $t$ to 2 $t$	max. 2 $s$ when $s < 20$ max. 200 when $s \geq 20$
$100 < t \leq 150$	5 to 200	—	50 to 2 $t$	max. 2 $s$ when $s < 20$ max. 300 when $s \geq 20$
$t > 150$	5 to 1,33 $t$	—	50 to 2 $t$	max. 2 $s$ when $s < 20$ max. 1,33 $t$ when $s \geq 20$

<sup>a</sup> For level 2: when impact requirements are specified but impact tests have not been performed, the maximum thickness of qualification is limited to 12 mm.

Liitosmuotojen suhteen sallitaan pääsääntöisesti samankaltaiset mutta helpommat hitsilajit. Esimerkiksi tasolla 2 yhdeltä puolelta ilman juuritukea hitsattu päittäisliitos kattaa myös osittain läpi hitsatut päittäis- ja pienahitsit, kahdelta puolelta hitsatut päittäishitsit, juuritukea vastaan hitsatut päittäishitsit yhdeltä tai molemmilta puolilta, sekä täyttöhitsauksen. Monipalkohitsaus ei kuitenkaan kata yksipalkohitsausta yhdeltä tai molemmilta puolilta, jos iskusitkeyden tai kovuuden vaatimukset ovat voimassa. (SFS-EN ISO 15614-1, s. 27.)

### 3 Hitsausohjeen laatiminen ja hyväksyttäminen

Hitsausohjeet hyväksytetään tulitorvikattilastandardin vaatimalla standardin SFS-EN 15614-1 mukaisella menetelmäkokeella. Korjaustyössä tarvitaan hyväksytyt hitsausohjeet päittäisliitoksiin kahdella eri railomuodolla; V-railolla ja puoli-V-railolla. Molempien railomuotojen hitsausohjeet täytyy hyväksyttää vähintään kolmelle hitsausasennolle; jalkoasennolle (PA), vaaka-asennolle (PC) ja pystyasennolle ylöspäin (PF). V-railoa tarvitaan vaipan korjaustyöhön sekä vaipan ja sidepulttien välisiin liitoksiin. Liitokset voidaan valmistaa pääosin jalkoasennossa (PA), mutta PC ja PF asentoja hyödyntämällä voidaan välttyä tarpeettomalta kattilan kääntelyltä. Puoli-V-railoa käytetään vaipan ja sidetankojen välisiin liitoksiin, sillä sidetangon viistäminen päästään ei ole mahdollista johtuen tavoiteltavasta esteettisestä ilmeestä. Liitokset valmistetaan pääasiassa pysty- ja vaaka-asennoissa. Hitsausohjeen hyväksyttämisen ohessa myös hitsari pätevoidetään kyseisten liitosten valmistamiseen.

Menetelmäkoetta ja hitsarin pätevoidtämistä varten valmistetaan kaksi sarjaa koekappaleita. Ensimmäisen sarjan koekappaleet tutkitaan yliopiston laboratoriossa. Näillä ei voida virallisesti pätevoidtää hitsaria tai hyväksyttää hitsausohjetta, vaan sarjan tarkoituksena on selvittää mahdollisia hitsaukseen ja hitsaustekniikkaan liittyviä ongelmia. Toisen koesarjan kappaleet hyväksytetään virallisella tarkastuslaitoksella, ja niillä hyväksytään hitsausohje ja pätevoidtään hitsari

#### 3.1 Alustavan hitsausohjeen laatiminen

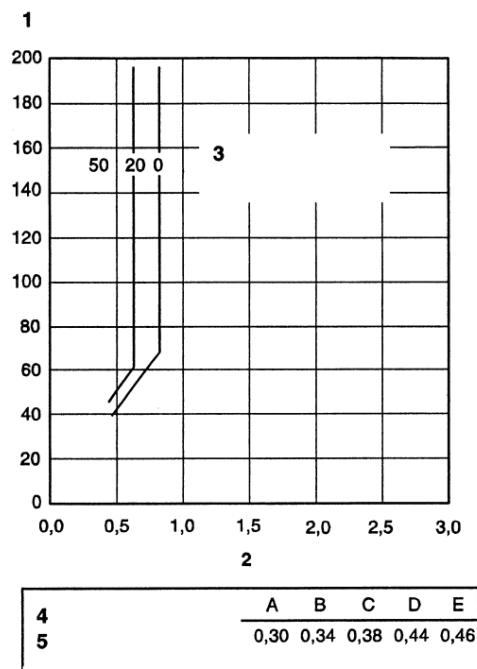
Alustavat hitsausohjeet laaditaan kirjallisuuden sekä hitsarin kokemuksen perusteella. Hitsausprosessiksi valitaan MAG (135) koska kattila on irrotettu laivasta ja korjaustyö voidaan suorittaa sisätiloissa. MAG hitsauksen tuottavuus on parempi ja huokosten riski pienempi kuin puikkohitsauksen (MMA), ja prosessi on käytössä korjaushitsauksen suorittavan tahon normaalissa tuotannossa.

Koekappaleiden materiaaliksi valitaan rakenneteräs S355K2. Tällöin hitsausohje pätevyityy korjaustyössä käytettäville materiaaliryhmään 1 kuuluville teräksille, joiden myötölujuuden vähimmäisarvo on yhtä suuri tai pienempi kuin 355 MPa. Tähän ryhmään kuuluvat muun muassa yleisimmät rakenneteräokset S235 ja S355, sekä yleisimmät painelaiteteräokset P235GH, P265GH ja P355GH. Koekappaleiden paksuudeksi valitaan 12 mm jolla hitsausohje saadaan pätevoidettyä paksuuksille 3 ... 24 mm. Tämä alue kattaa lähes kaikkien höyrypursiseuran rekisterissä olevien alusten kattiloiden vaipat (Reunanen, 2023).

Alustava hitsausohje (pWPS) laaditaan molemmille korjaustyössä käytettäville railomuodoille (liite 1). Hitsaus suoritetaan yhdeltä puolelta ilman juuritukea, koska kattilan rakenne ja korjaustyön luonne ei mahdollista näiden käyttämistä. Railon muoto ja mitat määritetään kirjallisuuden ja railomuotoja käsittelevän standardin SFS-EN ISO 9692-1 suositusten perusteella. Käytettäville materiaalipaksuuksille suositellaan käytettäväksi osaviistettyjä railoja. Railomuotostandardi suosittaa V-railossa käytettävän noin 60 asteen kulmaa, 1-4 mm ilmarakoa ja 2-4 mm juuripintaa (SFS-EN ISO 9692-1, s. 14). Lukkarin (2002, s. 224) mukaan jyrkempää 50 asteen kulmaa voitaisiin käyttää ainakin jalkoasennossa 12 mm ja sitä ohuemmille levyille. Jyrkempi railokulma on sinänsä tavoiteltavaa sillä se pienentää railon tilavuutta ja siten nopeuttaa hitsaamista. Lisäksi muodonmuutokset jäävät kapeammalla railolla todennäköisesti pienemmiksi. Jyrkempi railo voi kuitenkin tehdä hitsaamisesta hankalampaa etenkin suuremmilla aineenpaksuuksilla, ja siksi V-railon railokulmaksi valitaan 60 astetta. Puoli-v-railolle käytetään railomuotostandardin suosituksen mukaista railokulmaa 45 astetta, 2-4 mm ilmarakoa ja 1-2 mm juuripintaa (SFS-EN ISO 9692-1, s. 16).

Lisäaineeksi valikoituu ESAB:n suositusten mukaisesti OK Autrod 12.51 (ESAB). Lisäaineen halkaisijaksi valitaan 1,0 mm hitsaustyön suorittavan tahon suosituksesta. Suojakaasuna käytetään 18% CO<sub>2</sub> + 82% Ar seosta, mikä on muun muassa kaasutoimittajan suositus käytettäville materiaaleille (AGA, s. 12). Hitsaukseen käytetään pulssikaarta, jolla saadaan vähennettyä roiskeita, parannettua sulan hallittavuutta ja osaltaan pienennettyä lämmöntuontia. Alustavat hitsausparametrit määritetään kirjallisuuden perusteella, mutta hitsarille jätetään varsin vapaat kädet parametrien säätämisen suhteen.

Esikuumennuksen tarvetta ja välipalkolämpötilaa arvioidaan hiilielkvivalentin perusteella hyödyntäen standardia SFS-EN ISO 1011-2. Kattilan vaipalle on suoritettu alkuaineanalyysi, jonka tulosten pohjalta laskettu hiilielkvivalentin arvo on noin 0,34. Korjausta varten hankitun levyn hiilielkvivalentiksi on aineistodistukseen merkitty 0,36. Käytettävä lisäaine kuuluu vetyasteikkoon D ja yhdistetty aineenpaksuus on suurimmillaan noin 39 mm. Kuvassa 8 on esitetty tilannetta parhaiten kuvaava kaavio ja siitä voidaan arvioida, ettei käytettävillä aineenpaksuuksilla ja lisäaineilla ole tarvetta korotettuun työlämpötilaan.



Kuva 8. Esikuumennuslämpötilan arviointi graafisesti. Selitykset: 1. Yhdistetty aineen paksuus (mm), 2 lämmöntuonti (kJ/mm), 3. vähimmäisesikuumennuslämpötila (°C), 4. vetyasteikko, 5. hiilielkvivalentti enintään. (SFS-EN 1011-2, s. 36.)

### 3.2 Koekappaleiden hitsaaminen

Ensimmäisessä koekappaleiden sarjassa hitsataan kolme liitosta: Kattilan vanhan levyn ja korjauksessa käytettävän 20 mm paksun P265GH levyn välinen päittäisliitos V-railolla jalkoasennossa (PA), sekä kaksi kappaletta 12 mm paksujen S355K2 levyjen päittäisliitoksia puoli-V-railolla vaaka-asennossa (PC) ja pystyasennossa ylöspäin (PF). Kattilan vanhan levyn ja P265GH liitos on luonteeltaan esituotannollinen koe, jossa selvitetään vanhan levyn



hitsattavuutta, sekä muita mahdollisia ongelmakohtia. S355 levyjen liitoksilla puolestaan pyritään kehittämään alustavaa hitsausohjetta ennen virallista menetelmäkoetta. Kunkin koekappaleen hitsaamisesta täytetään valvontapöytäkirja (liite 2) ja koekappaleet testataan yliopiston laboratoriossa.

Toisen sarjan koekappaleet toimivat virallisina koekappaleina, joilla hyväksytetään hitsausohje ja pätevytetään hitsari. Näiden koekappaleiden valmistusta valvoo painelaitedirektiivin mukainen toimivaltainen kolmas osapuoli, käytännössä virallisen tarkastuslaitoksen edustaja. Jotta hitsausohje ja hitsari pätevytetään vaadituille hitsausasennoilta, täytyy molemmilla railomuodoilla valmistaa kaksi koekappaleta. Ensimmäinen koekappale valmistetaan suuren lämmöntuonnin aiheuttavassa hitsausasennossa PF, ja toinen koekappale pienen lämmöntuonnin aiheuttavassa hitsausasennossa PC. Näin hitsausohje saadaan hyväksytyä tietyin edellytyksin kaikille hitsausasennoilta pois lukien pystyasento alaspäin. Pohja- ja pintapalkoihin jätetään vähintään yksi aloitus-/lopetuskohta jotta hitsari saadaan samalla pätevytettyä työssä käytettäville asennoilta PA, PC ja PF. Palkojen päältä poistetaan kuona hioamalla hitsauksen valvojan luvalla. Pintapaloissa vain aloitus- ja lopetuskohdat saa hioa.

### 3.3 Koekappaleiden testaaminen

Ensimmäisen sarjan koekappaleille suoritetaan yliopistolla menetelmäkoestandardin SFS-EN ISO 15614-1 mukaiset testit. Toisin kuin virallisessa menetelmäkoeteossa, kaikki testit suoritetaan, vaikka jossain ilmenisi sallitut rajat ylittäviä virheitä. Toiselle koekappaleiden sarjalle menetelmäkoeteen testit suorittaa virallinen tarkastuslaitos. Hyväksymisrajaksi asetetaan hitsiluokka B, vaikkakin joidenkin virheiden osalta tulitorvikattilastandardissa SFS-EN 12953-5 hyväksymisrajana käytetään hitsiluokan C vaatimuksia, tai standardissa erikseen määritettyjä raja-arvoja.

Koekappaleille suoritettiin täydellinen visuaalinen- ja tunkeumanestetarkastus, sekä radiograafinen tutkimus. Visuaalisessa tarkastuksessa PF-asennossa hitsatussa puoli-V-rai-  
lossa kuvun ja juurikuvun korkeus sekä liittymäkulma olivat sallituissa rajoissa, eikä

kappaleessa havaittu muitakaan sallitut rajat ylittäviä virheitä. PC-asennossa hitsatussa puoli-V-railossa havaittiin luokkien B ja C rajat ylittävää korkeaa kupua, sekä vajaata juurta. Vanhan levyn ja 20 mm P265GH levyn liitoksessa ei havaittu sallittuja rajoja ylittäviä virheitä.

Tunkeumanestetarkastuksessa koekappaleissa ei havaittu sellaisia virheitä, jotka eivät ilmenneet jo visuaalisessa tarkastuksessa. Vanhan levyn koekappaleesta ei poistettu ruostetta esimerkiksi hiekkapuhaltamalla ennen tarkastusta, ja levyn ruosteisuus hankaloitti merkittävästi tarkastuksen tekemistä hitsin ja perusaineen välisestä liittymäkohdasta. Radiograafisessa tutkimuksessa PF-asennossa hitsatusta kappaleesta löytyi yksittäisiä huokosia. PC-asennossa hitsatusta kappaleesta havaittiin aiemmin kirjattujen virheiden lisäksi liitosvirhettä viistämättömän särmän puolelta. Vanhan ja P265GH levyn liitoksessa ilmeni myös vajaata hitsaussyvyyttä.

Vetokoe suoritettiin PF-asennossa hitsatulle puoli-V-railolle, sekä vanhan ja uuden levyn väliselle liitokselle. PC-asennossa hitsatulle kappaleelle vetokoetta ei suoritettu, koska menetelmäkoestandardi ei vaadi suorittamaan vetokokeita erikseen jokaiselle hitsausasennolle. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 4. PF asennossa hitsatun S355 levyjen puoli-V-railolla hitsatun liitoksen myötölujuuksiksi mitattiin 347,0 MPa ja 338,5 MPa, mikä on vähemmän kuin kappaleiden nimellinen myötölujuus. Mitattu murtolujuus puolestaan täytti materiaalin vaatimukset. Molemmat koekappaleet murtuivat perusaineesta, reilusti muutosvyöhykkeen ulkopuolelta. Vanhan levyn liitoksen myötölujuudeksi mitattiin hieman yli 200 MPa ja murtolujuudeksi yli 400 MPa. Koekappaleista ensimmäinen murtui hitsistä, vajaan hitsautumissyvyyden kohdalta, mutta toinen murtui perusaineesta vanhan levyn puolella, tosin vajaan hitsautumissyvyyden särö oli avautunut ja kasvanut kohtalaisesti vetokokeen aikana.

Taulukko 4. Vetokoetulokset puoli-V-railolla PF asennossa hitsattujen S355K2 levyjen ja V-railolla PA asennossa hitsatun P265GH levyn ja vanhan levyn liitoksille.

Koekappale	Murtolujuus (MPa)	Myötölujuus (MPa)	Venymä (%)	Murtokohta
PF (1)	541,2	347,0	35,6	Perusaine HAZ:n ulkopuolella
PF (2)	548,3	338,5	32,9	Perusaine HAZ:n ulkopuolella
Vanha (1)	406,5	206,7	16,7	Hitsi, alkaen vajaasta hitsaus- syvyydestä
Vanha (2)	428,3	211,2	22,5	Perusaine vanhan levyn puo- lelta, särö kasvanut hitsissä.

PF asennossa hitsatulle liitokselle suoritettiin taivutuskokeet juuri- ja pintataivutussauvoille, eikä näissä ilmennyt yli 3 mm säröjä. Vanhan levyn liitokselle taivutuskokeet suoritettiin poikittaisille taivutussauvoille, joissa vajaan hitsautumissyvyyden särö avautui yli 3 mm suuruiseksi, eli sauvat eivät läpäisseet taivutuskoeetta.

Iskukokeet suoritettiin PF asennossa hitsatulle liitokselle sekä vanhan levyn liitokselle. Kaikki kokeet suoritettiin 10 x 10 mm sauvoille -20 °C lämpötilassa 300 J iskuvasaralla. S355K2 iskukokeen vähimmäisvaatimus 40 J ylittyi selkeästi kaikilla sauvoilla, ja sauvat murtuivat sitkeästi. Hitsissä tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, mutta muutosvyöhykkeellä tuloksissa oli enemmän hajontaa. Vanhan levyn liitoksessa iskukokeet suoritettiin hitsistä, sekä molempien levyjen puolelta muutosvyöhykkeeltä. Hitsistä ja P265GH levyn puolelta muutosvyöhykkeeltä koesauvat täyttivät 27 J vaatimuksen iskusitkeydelle. Vanhan levyn puolella iskusitkeyden arvot jäivät kuitenkin hyvin alhaisiksi, ja murtuman tyyppi oli hauras. Iskukokeiden tulokset PF asennossa hitsatulle liitokselle on esitetty taulukossa 5 ja PA asennossa hitsatulle liitokselle taulukossa 6.

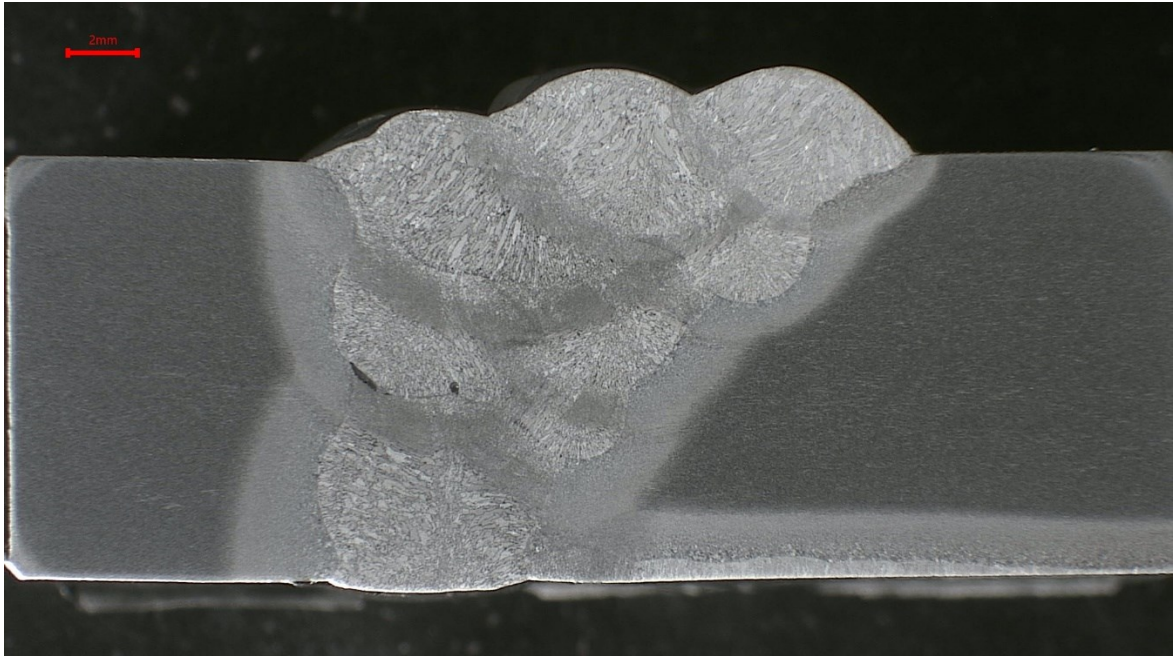
Taulukko 5. Iskukokeiden tulokset puoli-V-railolla PF asennossa hitsatulle S355 levyjen päittäisliitokselle.

Koesauva	Nimike	Iskusitkeys (J)	Murtuman sijainti	Murtuman tyyppi
PF1	VWT 0/1	128	Hitsi	Sitkeä
PF2	VWT 0/1	126	Hitsi	Sitkeä
PF3	VWT 0/1	137	Hitsi	Sitkeä
PF4	VHT 1/1	228	HAZ	Sitkeä
PF5	VHT 1/1	166	HAZ	Sitkeä
PF6	VHT 1/1	198	HAZ	Sitkeä

Taulukko 6. Iskukokeiden tulokset V-railolla PA asennossa hitsatulle vanhan vaipan ja P265GH levyn päittäisliitokselle.

Koesauva	Nimike	Iskusitkeys (J)	Murtuman sijainti	Murtuman tyyppi
PL1	VWT 0/3	138	Hitsi	Sitkeä
PL2	VWT 0/3	184	Hitsi	Sitkeä
PL3	VWT 0/3	156	Hitsi	Sitkeä
PL4	VHT 1/3	20	HAZ	Hauras
PL5	VHT 1/3	20	HAZ	Hauras
PL6	VHT 1/3	24	HAZ	Hauras
PL7	VHT 1/8	111	HAZ	Sitkeä
PL8	VHT 1/8	108	HAZ	Sitkeä
PL9	VHT 1/8	82	HAZ	Sitkeä

Makrohietutkimuksessa havaittiin PC asennossa hitsatussa liitoksessa jo röntgenkuvassa ilmennyt liitosvirhe. Liitoksen makrohie on esitetty kuvassa 9. Vanhan levyn liitoksessa vajaa hitsautumissyvyys näkyi selkeästi. PF asennossa hitsatusta koekappaleesta ei havaittu viikoja. Kaikille liitoksille suoritettiin yksi sarja kovuusmittauksia. Kovuusmittauksissa ei ilmennyt liiallista karkenemistä, ja tulokset olivat sallituissa rajoissa.



Kuva 9. PC asennossa hitsatun puoli-V-railon makrohie. Hitsin vasemmassa laidassa liitosvirhe.

## 4 Menetelmäkokeen tulosten analysointi

Yliopiston tiloissa suoritetuissa menetelmäkokeissa havaittiin useita eri vikoja. Vaaka-asennossa hitsatussa koekappaleessa vikoja oli kaikista eniten. Puoli-V-railo on käytettävistä railomuodoista hankalampi, sillä railo on kapeampi ja viistetty särmä sulaa hitsatessa huomattavasti nopeammin kuin viistämätön särmä. Vaaka-asennossa sulan hallitsemiseksi on käytettävä pienempää lämmöntuontia, mikä puolestaan pienentää tunkeumaa ja kasvattaa liitosvirheen riskiä. Railomuodosta ja hitsausasennosta johtuen erityisesti pohjapalon kohdistaminen voi olla haasteellista. Kohdistus on todennäköisesti merkittävin tekijä PC asennossa hitsatun kappaleen juuren ongelmiin.

Kuvun virheet ovat itse korjaustyötä ajatellen vähemmän haitallisia, sillä vajaan kuvun päälle voidaan hitsata uusi palko, ja korkea kupu voidaan korjata hiomalla. Hitsarin päteyttäminen kuitenkin vaatii, että kupu täyttää sille asetetut vaatimukset ilman hiomista. Kuvun korkeuteen saadaan vaikutettua muuttamalla kuljetusnopeutta suhteessa langansyöttöön.

Vanhan ja P265GH levyn liitoksessa vanhan levyn puoleinen särmä ei ollut sulanut juuresta, eli liitoksessa oli vajaa hitsautumissyvyys. Virhe oli yhtenäinen ja havaittavissa kaikissa kappaleesta valmistetuissa koeksuissa. Tämän on voinut mahdollisesti aiheuttaa railopinnan epäpuhtaudet. Railo itsessään oli puhdistettu hiomalla, mutta juuren puolella railon vieressä oli ruostetta, mikä myöhemmin hankaloitti tunkeumanestetarkastusta. Ruoste on voinut kappaleen käsittelyn yhteydessä liata railon pinnan. Virhe on voinut aiheutua myös väärästä poltinkulmasta, tai siitä että hitsisula on päässyt valumaan valokaaren edelle (Kemppi, 2021). Kaksi viimeksi mainittua syytä ovat mahdollisesti aiheuttaneet PC asennossa hitsatussa kappaleessa havaitun liitosvirheen.

Pystyasennossa ylöspäin hitsatussa kappaleessa olevat huokokset ovat voineet johtua esimerkiksi riittämättömästä kaasusuojuuksesta, railopintoihin jääneistä epäpuhtauksista tai liian pitkästä valokaaresta (Kemppi, 2021). Kaasusuojaus ja railopintojen puhdistus ovat olleet

samanlaiset kuin vaaka-asennossa hitsatussa kappaleessa. Jos ne olisivat huokosten syynä, olisi luonteva odottaa vaaka-asennossa hitsatusta kappaleesta löytyvän vastaavia huokosia. Näitä ei kuitenkaan havaittu, joten huokokset on todennäköisesti aiheuttanut jokin hitsaustekniikkaan liittyvä seikka. Huokokset olivat varsin paikallisia, eikä niissä ollut kyse systemaattisesta virheestä. Pystyasennossa hitsatessa käytettiin vaaputusta ja suurempaa lämmöntuontia. Todennäköisesti huokokset ovat aiheutuneet vaaputtaessa liian pitkäksi päässeestä valokaaresta.

Vanhan ja P265GH levyn liitoksille suoritettujen ainetta rikkovien kokeiden perusteella voidaan arvioida vanhan levyn myötölujuuden olevan vähintään 200 MPa. Myötölujuuden määrittämiseen liittyy epävarmuutta pinnan muhkuraisuuden ja vajaan hitsaussyvyuden särön takia. Vetokokeessa kuitenkin mitattiin yli 200 MPa myötölujuus vaikka sauvan todellinen poikkipinta-ala oli todennäköisesti hieman mitattua pienempi, ja vajaan hitsaussyvyuden särö avautui vetokokeen aikana. Iskukokeiden perusteella vanhan levyn iskusitkeys muutosvyöhykkeellä on varsin alhainen  $-20\text{ °C}$  lämpötilassa.

Havaitut hitsausvirheet johtunevat merkittävältä osin siitä, että hitsaria ei ole pätevoidetty kyseisten liitosten valmistamiseen, eikä hänellä ole merkittävää kokemusta vastaavien liitosten valmistamisesta. Tämä puolestaan ilmenee esimerkiksi kohdistukseen liittyvinä ongelmina. Huomion kiinnittäminen poltinkulmaan ja sulan hallitsemiseen voi ratkaista merkittävän osan ongelmista. Puoli-V-railossa juuripinnan korkeuden ja ilmaraon muutoksilla voi olla vaikutusta hitsaustapahtumaan. Korkeampi juuripinta hidastaa särmän sulamista, mutta voi vaatia suurempaa lämmöntuontia. Ilmarakoa pienentämällä voidaan kompensoida viistetyin särmän nopeampaa sulamista

Vanhan ja 20 mm P265GH levyn liitoksen visuaalisessa ja tunkeumanestetarkastuksessa ei havaittu juuren vajaata hitsautumissyvyyttä, jonka olisi pitänyt olla havaittavissa kyseisillä menetelmillä. Merkittävin syy tähän lienee se, että vanhasta levystä ei ollut poistettu ruostetta ennen tarkastusten tekemistä. Tämä hankaloitti erityisesti tunkeumanestetarkastusta, sillä väriainetta kertyi kauttaaltaan ruosteiseen laitaan. Tunkeumanestetarkastus onkin tarkoitettu käytettäväksi vain puhtaille ja ei-huukoille materiaaleille, ja levystä olisi pitänyt

poistaa ruoste ennen tarkastuksen tekemistä. Toinen syy siihen, miksi virheet jäivät tässä vaiheessa havaitsematta, oli tarkastusten tekijän kokemattomuus. Tämän takia hitsausohjeen hyväksyttämiseen ja hitsarin pätevöittämiseen käytettävät kokeet ja tarkastukset suorittaa virallinen tarkastuslaitos. Vajaa hitsautumissyvyys oli kuitenkin havaittavissa makrohietutkimuksessa, radiograafisessa tutkimuksessa sekä isku-, veto- ja taivutuskokeiden koesauvoista.



## 5 Korjaussuunnitelma

Korjaustyön lähtökohtana on se, että kattila on irrotettu laivasta ja kuljetettu korjaustyön suorittavan tahon tiloihin. Kattila on käännetty kuvan 10 mukaisesti kyljelleen ja sen pohjasta on leikattu lopullista vaihdettavaa alaa pienempi pala pois. Tästä aukosta on mahdollista tarkastella kattilan alaosia myös sisältä päin, vaikkakin tulitorvet ja tuliputket rajoittavat näkyvyyttä ylemmäs kattilaan.



Kuva 10. Kattila korjaustyön suorittavan yrityksen tiloissa. Kattila on käännetty kyljelleen, ja sen pohjasta on leikattu lopullista korjattavaa aluetta pienempi pala pois.

### 5.1 Tilanteen kartoittaminen

Korjattava kattila on höyryhinaaja Armaksen kaksitorvinen kaksivetoinen tulitorvikattila. Se on valmistettu vuonna 1907 ja se käyttää polttoaineenaan puuta. Kattilan käyttöpaine on 9 bar ja tilavuus useita tuhansia litroja, joten se kuuluu PED vaarallisuusluokkaan IV.

Kattilalle ei ole aiemmin tehty merkittäviä korjaustöitä. Kattilan vaipassa on joidenkin sidepulttien liitosten kohdalla jälkiä hitsaamalla suoritetusta sidepulttien vaihtamisesta tai liitosten vuotojen tukkimisesta. Piirustusten mukaan vaipan alkuperäinen paksuus on 18 mm ja päätylevyjen paksuus 19 mm.

Kattilan pohjan alueella sisäpinnoilla on merkittävää korroosiota. Kuvassa 11 näkyy, kuinka kattilan vaippa on ohentunut pohjalta merkittävästi enemmän kuin muualta. Vaippa vaikuttaa ohentuneen eniten kattilan etuosista, ja ohuimmillaan levyn paksuudeksi on mitattu noin 6-7 mm. Kuvassa 12 näkyy vaipan sisäpinnalla kattilan takaosassa vinotuen lähetyvillä olevan myös paikallista pistemäistä korroosiota, jossa aineenpaksuus paikoin alittaa 6 mm. Vaipan sisäpinta on yleisilmeeltään muhkuraisista ja kumpumaista, jossa muotojen halkaisija vaihtelee noin 10 mm ja 30 mm välillä, ja korkeuserot ovat useiden millimetrin suuruisia. Kattilan ulkopinnalla korrosio on sisäpintaan verrattuna vähäisempää ja tasaisempaa, korkeuserojen ollessa enimmillään noin millimetrin luokkaa. Ulkopinnan korrosio kattilan pohjalla hieman voimakkaampaa kuin muualla.



Kuva 11. Vaipan paksuus kattilan pohjalla. Kuva on otettu kattilan etuosasta, kattilan pohjaan leikatun aukon laidalta. Vaippa on pohjalta huomattavasti ohuempi kuin muualta.

Pohjassa aineenpaksuus on arviolta 6-8 mm, kuvatun alueen laidoilla noin 14-16 mm. Lähikuvan kohdalta on aiemmin leikattu irti pala kemiallista analyysiä varten.



Kuva 12. Kattilan vaipan paikallista ja pistemäistä korroosiota. Kuva on otettu kattilan takaosasta, vinotuen kohdalta pohjaan leikatun aukon laidalta. Vaipan pohjaan on syöpynyt pienehköjä monttuja, joista osa on syöpynyt lähes kokonaan vaipasta läpi. Levyn alkuperäinen paksuus on 18 mm.

Vaurioalueella kattilan takaosassa on kuvan 13 mukainen niittaamalla kiinnitetty vinotuki, joka pyritään mahdollisuuksien mukaan säilyttämään. Vaippa on alun perin valmistettu niittaamalla yhteen kaksi puoliympyrän muotoon taivutettua levyä. Niitatut liitokset sijaitsevat molemmin puolin kattilaa korkeussuunnassa kattilan keskivaiheilla ja vaihdettava ala rajoittuu viimeistään niihin.



Kuva 13. Kattilan takaosassa sijaitseva vinotuki.

Vaipan materiaalin kaupanimestä tai mekaanisista ominaisuuksista ei ole täyttä varmuutta, mutta kyseessä on todennäköisimmin jonkinlainen painelaiteteräs. Vaipalle on suoritettu alkuaineanalyysi, jota varten koepala on irrotettu pohjasta kattilan etuosasta. Vaipan kemiallinen koostumus on verrattain lähellä moderneja painelaiteteräksiä, mutta se ei kuitenkaan täysin vastaa nykyisten painelaiteterästen koostumusta. Merkittävimpinä eroina moderneihin painelaiteteräksiin, kattilassa on enemmän hiiltä, rikkiä ja fosforia, mutta vähemmän mangaania ja piitä. Alkuaineanalyysin perusteella laskettu hiiliekvivalentin arvo on melko alhainen, noin 0,34 ja materiaali kuuluu koostumuksensa puolesta teknisen raportin CEN ISO-TR 15608 ryhmään 1. Vaikka hiiltä ja rikkiä on vanhassa levyssä enemmän kuin moderneissa painelaiteteräksissä, on hiilipitoisuus alle 0,25 % ja CE alle 0,41, mikä viittaa materiaalin olevan hyvin hitsattavissa. Analyysitulokset sekä vertailut painelaiteteräksiin on esitetty taulukossa 7. Yliopistolla vanhan ja uuden levyn liitokselle suoritettujen kokeiden perusteella vanhan levyn murtolujuus on yli 200 MPa, ja sen iskutkeys muutosvyöhykkeellä on verrattain alhainen -20 °C lämpötilassa.

Taulukko 7. Alkuaineanalyysin tulokset, korjauksessa käytettävän levyn aineistodistuksen mukainen koostumus sekä P235GH ja P265GH kemiallisen koostumuksen raja-arvot.

	<b>Vanha levy</b>	<b>P265GH (aineistodistus)</b>	<b>P235GH</b>	<b>P265GH</b>
<b>C</b>	<b>0.242</b>	<b>0.172</b>	<b>≤ 0.16</b>	<b>≤ 0.20</b>
<b>Si</b>	<b>0.0036</b>	<b>0.20</b>	<b>≤ 0.35</b>	<b>≤ 0.40</b>
<b>Mn</b>	<b>0.466</b>	<b>1.06</b>	<b>0.60 ... 1.20</b>	<b>0.80 ... 1.40</b>
<b>P</b>	<b>0.0255</b>	<b>0.008</b>	<b>≤ 0.025</b>	<b>≤ 0.025</b>
<b>S</b>	<b>0.0172</b>	<b>0.007</b>	<b>≤ 0.010</b>	<b>≤ 0.010</b>
<b>Cr</b>	<b>0.0248</b>	<b>0.04</b>	<b>≤ 0.30</b>	<b>≤ 0.30</b>
<b>Mo</b>	<b>0.0122</b>	<b>0.002</b>	<b>≤ 0.08</b>	<b>≤ 0.08</b>
<b>Ni</b>	<b>0.0459</b>	<b>0.04</b>	<b>≤ 0.30</b>	<b>≤ 0.30</b>
<b>Cu</b>	<b>0.0861</b>	<b>0.017</b>	<b>≤ 0.30</b>	<b>≤ 0.30</b>
<b>V</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.006</b>	<b>≤ 0.02</b>	<b>≤ 0.02</b>

Kattilan yläosassa on yhteensä seitsemän kappaletta halkaisijaltaan 50 mm sidetankoja, ja kattilan alaosassa on kaksi kappaletta halkaisijaltaan 38 mm sidetankoja. Sidetangoissa on havaittavissa vastaavaa korroosiota kuin vaipan sisäpinnalla. Korroosio on voimakkainta kattilan yläosissa vesirajan lähetyvillä sijaitsevilla tangoissa. Alkuperäiset tangot on kiinnitetty kattilaan pulttiliitoksia. Kuvassa 14 näkyy joitain kattilan alaosassa sijaitsevia sidepultteja, joiden alkuperäinen halkaisija on ollut 25 mm. Sidepulteissa on havaittavissa vastaavaa korroosiota kuin vaipan pohjassa. Korroosio vaikuttaa olevan ainakin osassa pultteja voimakkaampaa sidepultin ja vaipan rajapinnalla, ja ainakin yksi sidepultti on syöpyntä vaipan rajapinnalta poikki.



Kuva 14. Sidepulttien korroosiota kattilan takaosasta, vinotuen lähetyviltä

Vaipan sisäpinnan korroosio on aiheutunut vuosien saatossa. Kun laiva on jäänyt pois kaupallisesta liikenteestä, sen huollon ja ylläpidon taso on ollut vaihtelevaa. Kattilan pohjan korroosiota on todennäköisesti vauhdittanut pohjalle kertynyt sakka, sekä kattilan pohjan puutteellinen puhdistus ja kuivaus kattilan tyhjentämisen yhteydessä. Tämä selittäisi miksi korroosio on pohjalla huomattavasti voimakkaampaa kuin muualla. Kattila on asemoitu laivassa siten, että kattilan etuosaa on hieman alempana kuin takaosa. Tämä selittäisi miksi korroosio on kattilan etuosassa voimakkaampaa kuin takaosassa. Kattilan takaosa on hankalampi puhdistaa, ja kostean kattilan takaosaan jääneet partikkelit voisivat selittää havaitun pistemäisen korroosion. Kattilan ulkopinnalla pohjan hieman voimakkaamman korroosion on todennäköisesti aiheuttanut kattilan pohjaa vasten olleet märät eristeet. Liikennöinti Suomenlahdella on saattanut myötävaikuttaa vaurioiden syntyyn.

Sidepulttien ja vaipan rajapinnassa voimakkaammalle korroosiolle voi olla ainakin kaksi syntymekanismia. Materiaalien välillä on voinut muodostua kemiallinen pari, joka on vauhdittanut sidepulttien korroosiota. Vaihtoehtoisesti vaipan ja sidepulttien liitoksiin on kertynyt partikkeleja, jotka ovat vauhdittaneet korroosiota vastaavalla tavalla kuin kattilan takaosissa pohjalla.

## 5.2 Korjaustyö

Tilanteen kartoittamisen jälkeen kattilasta on päätetty vaihtaa kattilan vaipan pohjaa vähintään merkittävästi syöpyneeltä alueelta, mutta materiaalin riittävyyden puitteissa niin laajalta alueelta kuin se on kohtalaisella työmäärällä mahdollista. Korkeussuunnassa korjattava alue rajautuu viimeistään kattilan puolivälissä sijaitseviin vaippalevyjen niitattuihin liitoksiin. Kattilan takaosassa kierretään vaipan ja takaseinän välinen vinotuki, jos se vain on mahdollista. Sidepultit vaihdetaan uuden levyn alueelta, sekä tarvittaessa myös muualta, jos pohjan laajemmassa avaamisessa siihen ilmenee tarvetta. Kaikki sidetangot vaihdetaan uusiin. Tähän ei rakenteellisesti olisi välttämättä tarvetta, mutta kun kattila on irrotettu laivasta ja siirretty sisätiloihin, jossa korjaustöiden tekeminen on verrattain helppoa, on kaikkien tankojen vaihtaminen katsottu järkeväksi.

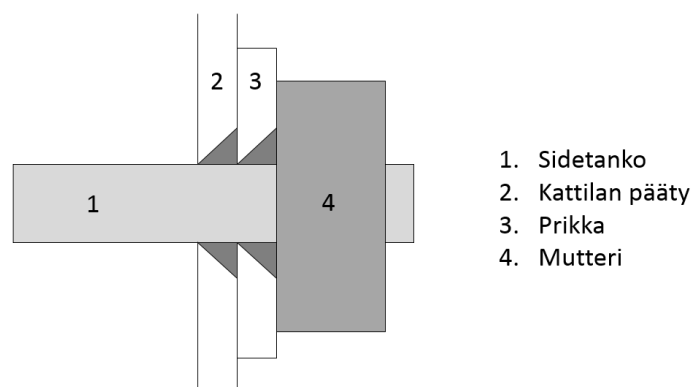
Vaipan korjaamiseen käytetään 20 mm paksua P265GH levyä, jonka koko on 2450 x 2560 mm. Ylempinä sidetankoina käytetään S355J2 tankoja, joiden halkaisija on 60 mm ja pituus noin 3000 mm. Kattilan alaosassa käytetään vastaavaa tankoa, jonka halkaisija on 45 mm. Sidepultteja varten hankitaan halkaisijaltaan 30 mm P250GN tankoa. Sidetankojen päähän asennetaan M60 ja vastaavasti M45 DIN 934 8 mutterit. Korjaustyössä käytettävien materiaalien aineenpaksuus on suurempi kuin alkuperäisen rakenteen. Käytettävien materiaalien myötölujuus on suurempi kuin alkuperäisen rakenteen, eikä korjattavan vaurion ole syytä epäillä aiheutuneen rakenteen alimitoituksesta. Tästä johtuen uusien lujuuslaskelmien tekemistä ei ole katsottu tarpeellisiksi.

Kattilan pohjaan leikataan korjattavan alueen kokoinen aukko. Nurkissa käytetään 100 mm pyöristyssädettä jännityskonsentraatioiden välttämiseksi. Aukon ja säästettävien niitattujen liitosten, kuten kattilan päädyn ja vinotuen liitosten väliin jätetään 50 mm tilaa, jotta pahimmat hitsauksesta syntyvät jäännösjännitykset tasoittuvat ennen niitattuja liitoksia.

Kattila hiekkapuhalletaan ulko- ja sisäpuolelta siltä osin kuin se on mahdollista tarpeettomasti kattilaa purkamatta. Kattilan halkaisijan mukaan mankeloidusta levystä leikataan

korjattavan alueen kokoinen ja muotoinen pala. V-railo valmistetaan laaditun hitsausohjeen mukaisesti. Uusi levy sovitetaan paikalleen ja silloitetaan hyppelehtien. Siltahitsien tekeminen aloitetaan nurkista, ja niitä lisätään tasaisesti kappaleen vastakkaisille puolille muodonmuutosten minimoimiseksi. Pohjapalkko hitsataan hyppelehtien koko liitoksen pituudelta ja se tarkastetaan laadunvarmistussuunnitelman mukaisesti visuaalisesti ja tunkeumanesteellä. Jos pohjapalossa havaitaan virheitä, suoritetaan lisätarkastukset ja korjaustoimenpiteet laadunvarmistussuunnitelman mukaisesti. Kun pohjapalkko on läpäissyt tarkastukset, hitsataan loput palot.

Vanhat sidetangot poistetaan avaamalla mutterit tai leikkaamalla ne irti. Sidetankoja irrottessa on huomioitava, että ne tukevat kattilan päätyä, ja kaikkien tankojen irrottaminen kerralla voi johtaa kattilan päädyn muodonmuutoksiin. Osa uusista tangoista on tarvittaessa asennettava ennen viimeisten tankojen irrottamista. Uusien sidetankojen päihin koneistetaan kierteet muttereille. Kattilan päätyyn valmistellaan puoli-V-railo hitsausohjeen mukaisesti. Tanko pujotetaan kattilan läpi ja hitsataan kiinni kattilan päätyihin. Jotta kattilan ulkonäkö vastaa mahdollisimman hyvin alkuperäistä, hitsataan sidetangon päähän kattilan päätyä vasten priikka puoli-V-railolla, ja lopuksi tangon päähän kierretään mutteri. Sidetangon kiinnitys kattilan päätylevyyn on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Sidetangon ja kattilan päädyn välinen liitos.



### 5.3 Laadunvarmistus

Ennen hitsaustyöhön ryhtymistä hitsausohje on hyväksytetty menetelmäkokeella ja samalla hitsari on pätevytetty käytettäville liitostyypeille. Korjaustyössä sovelletaan vaatimustenmukaisuuden arviointiin moduulia G. Ennen korjaustyön aloittamista korjaussuunnitelma on esitetty omatarkastuslaitokselle, joka on antanut hyväksymästään suunnitelmasta lausunnon tai päätöksen.

Käytettävistä materiaaleista ja hitsauslisäaineista on hankittu aineistodistukset, ja materiaalit on merkitty siten että ne ovat tunnistettavissa. Jokaisen hitsatun palon tulee olla jäljitettävissä hitsariin. Tässä tapauksessa jäljitettävyys toteutuu siten, että yksi hitsari valmistaa kaikki liitokset. Pohjapalolle suoritetaan 100% visuaalinen tarkastus Hörypursiseuran (HPS) toimesta, minkä lisäksi korjaustyön suorittava yritys tekee pohjapalolle tunkeumanestetarkastuksen. Loput palot hitsataan, kun pohjapalko on läpäissyt edellä mainitut tarkastukset. Hitsauksen jälkeen virallinen tarkastuslaitos suorittaa liitoksille visuaalisen-, ultraääni- ja magneettijauhetarkastuksen. Näiden tarkastusten jälkeen kattilalle tehdään vielä nestepainekoe, jonka valvoo HPS.

Lopuksi omatarkastuslaitos tarkastaa työn ja siitä kootut asiakirjat ja antaa valmistajalle vaatimustenmukaisuustodistuksen. Valmistaja puolestaan antaa vaatimustenmukaisuusvakuutuksen sekä luovuttaa omistajalle työtä koskevat asiakirjat.

## 6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Korjaushitsauksen tavoitteena on korjata rakenteeseen valmistuksen tai käytön aikana syntynyt vaurio. Korjaustyö voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen; suunnitteluun, toteutukseen ja laadunvarmistukseen. Suunnitteluvaiheessa tilanne kartoitetaan ja kartoituksen perusteella tehdään päätös rakenteelle suoritettavista toimenpiteistä. Jos rakenne päädytään korjaamaan, laaditaan korjaustyötä varten riittävän yksityiskohtainen suunnitelma, jonka korjaustyön suorittava taho kykenee toteuttamaan työn. Suunnitelmaan on liitettävä työn toteutuksen lisäksi laadunvarmistussuunnitelma sekä muut työhön liittyvät dokumentit. Kun suunnitelma on hyväksytty, korjaustyö tehdään ja tarkastetaan sen mukaisesti.

Painelaitteiden korjaustyössä on huomioitava lainsäädännön ja standardien asettamat vaatimukset työn suunnittelulle ja toteutukselle. Ennen korjaustyön aloittamista korjaussuunnitelmalle on haettava tarkastuslaitoksen hyväksyntä. Suunnitelman perusteella tarkastuslaitos antaa päätöksen tai lausunnon korjaustyöstä. Useimmissa painelaitteissa pysyvien liitosten valmistamiseen on käytettävä menetelmäkokeella hyväksytettyä hitsausohjetta, pätevoitettyjä hitsareita ja liitosten rikkomaton aineenkoetus tulee teettää hyväksytyillä henkilöillä. Korjaustyön päätteeksi tarkastuslaitos tarkastaa työn, ja antaa vaatimustenmukaisuustodistuksen työn valmistajalle, joka puolestaan antaa vaatimustenmukaisuusvakuutuksen sekä työhön liittyvät aineistot painelaitteen omistajalle.

Tämän diplomityön tärkeimpinä tavoitteina oli laatia ja hyväksyttää hitsausohje, joka soveltuu S/S Armaksen sekä mahdollisimman monen muun Suomen Höyrypursiseura ry:n rekisterissä olevan höyrylaivan höyrykattiloiden korjaustöihin, sekä laatia suunnitelma S/S Armaksen kattilan korjaushitsausta varten. Työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus painelaitteiden korjaustyön suunnitteluprosessin kulusta, sekä hitsausohjeen hyväksyttämistä menetelmäkokeella. Kirjallisuuden perusteella laadittiin alustava hitsausohje, jonka mukaisesti valmistettiin kolme koekappaleita, joille suoritettiin menetelmäkokeen mukaiset testit yliopiston laboratoriossa. Koekappaleiden tutkimisen tarkoituksena oli kartoittaa hitsaamiseen liittyviä ongelmia ja kehittää alustavaa hitsausohjetta havaintojen perusteella. Yliopistolla tutkittujen

koekappaleiden lisäksi valmistettiin neljä koekappaletta, joilla virallisesti hyväksyttiin hitsausohje ja pätevitettiin hitsari. Työssä laadittiin korjaussuunnitelma S/S Armaksen höyrykattilan korjaushitsausta varten.

Laadittu hitsausohje soveltuu useimmille höyrypursiseuran rekisterissä olevien alusten höyrykattiloiden korjaustöihin. Hitsausohje ei kuitenkaan ole yleispätevä, vaan se soveltuu vain materiaaliryhmän 1 teräksille, joiden myötölujuus on enintään 355 MPa. Hitsausohjeen soveltuvuus tulee arvioida tapauskohtaisesti. Työssä esitettyä korjaustyön kulkua ja laadittua korjaussuunnitelmaa voidaan käyttää ohjenuorana tulevissa korjaustöissä, mutta varsinainen suunnitelman sisältö täytyy aina mukauttaa tilannekohtaisesti.

## Lähteet

AGA. 2014. Käytännön ohjeita MIG/MAG hitsaukseen. 24 s. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.linde-gas.fi/fi/images/AGA%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%202014%20FI\\_tcm634-122347.pdf](https://www.linde-gas.fi/fi/images/AGA%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%202014%20FI_tcm634-122347.pdf)

ESAB. Autrod 12.51 tuote-esite. 2 s. [Verkkodokumentti]. Viitattu 17.1.2023. Saatavissa: [https://esab.com/fi/eur\\_fi/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-51/](https://esab.com/fi/eur_fi/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-autrod-12-51/)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/EU painelaitteiden asettamista saataville markkinoilla koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta. 2014. Euroopan unionin virallinen lehti L 189/164. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/68/oj>

Juva, Ari., 2018. Höyrylaivan ”sydän”. Höyrylaivojen suomi. Helsinki: Suomen Höyrypurjeseura ry. 230–235. ISBN 9789519728773.

Kemppi, 2021. Yleisimmät hitsausvirheet. [Verkkodokumentti]. Viitattu 18.11.2023. Saatavissa: [https://d3dbtvmfwwhlf2.cloudfront.net/pub/Products%20and%20Services/Educational%20materials/Posters/Welding%20defects/Lores/welding-defects-poster-600x900\\_lores\\_FI.pdf?fv=64a8](https://d3dbtvmfwwhlf2.cloudfront.net/pub/Products%20and%20Services/Educational%20materials/Posters/Welding%20defects/Lores/welding-defects-poster-600x900_lores_FI.pdf?fv=64a8)

Lukkari, J., 2002. Hitsaustekniikka: perusteet ja kaarihitsaus. 4. painos, tark. p. Helsinki: Opetushallitus. 292 s.

Ma, N., 2022. Welding deformation and residual stress prevention. 2. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann. 476 s.

O'Brien, A. 2011. Maintenance and Repair Welding. Welding Handbook, Volume 4 – Materials and Applications, Part 1. 9. painos. American Welding Society (AWS). s. 565–608.

Ovako. 2020. Ovakon terästen hitsaus. [Verkkodokumentti]. Viitattu 14.11.2023. Saatavissa: [https://metals.ovako.com/48e4ed/globalassets/metals/ovakon\\_terasten\\_hitsaus\\_2020-paiv-versio.pdf](https://metals.ovako.com/48e4ed/globalassets/metals/ovakon_terasten_hitsaus_2020-paiv-versio.pdf)

Reunanen, A., 2023. Armaksen pannuremontti. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon.

SFS-EN 1011-2. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 2. Ferriittisten terästen kaarihitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 113 s.

SFS-EN 12953-1. 2012. Tulitorvikattilat. Osa 1. Yleistä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 53 s.

SFS-EN 12953-4. 2018. Tulitorvikattilat. Osa 4. Kattilan paineenalaisten osien valmistus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 31 s.

SFS-EN 12953-5. 2020. Tulitorvikattilat. Osa 5. Tarkastukset valmistuksen aikana, dokumentaatio ja paineenalaisten osien tunnusmerkintä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 31 s.

SFS-EN ISO 15607. 2019. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Yleisohjeet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 29 s.

SFS-EN ISO 15609-1. 2019. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hitsausohjeet. Osa 1: Kaarihitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 23 s.

SFS-EN ISO 15614-1. 2017. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkelseosten kaarihitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 84s.

SFS-EN ISO 9692-1. 2013. Hitsaus ja sen lähiprosessit. Railomuodot. Osa 1: Terästen puikko-, metallikaasukaari-, kaasusädehitsaus, TIG- ja sädehitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 32 s.

Skriko, T., 2022. Repair welding. [Luentomateriaali]. BK20A2800. Lappeenranta: LUT-yliopisto.

Suomen Höyrypursiseura ry. 2021. S/S Armas. [Verkkosivusto]. Viitattu 14.11.2023. Saatavissa: <https://steamship.fi/kaikkilaivat/armas/>

Suomen Laivahistoriallinen Yhdistys ry. S/S Armas. [Verkkosivusto] Viitattu 14.11.2023. Saatavissa: <https://www.laiva.fi/ships/355/>

Tukes. 2018. Painelaitteiden korjaus- ja muutostyöt. [Verkkosivusto]. Viitattu 14.7.2023 Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteiden-korjaus-ja-muutostyot>

Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016. 2016. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161548>

Valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta 1549/2016. 2016. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161549>

Virtanen, J., 2021. Painelaitteen korjaustyö. Hitsaustekniikka. 5. Helsinki: Suomen Hitsaus-  
teknillinen Yhdistys ry. 42–43. ISSN 0437-6056.

## Liite 1. Yliopiston laboratoriossa tutkittavien liitosten alustavat hitsausohjeet.

<b>Alustava Hitsausohje</b>		<b>pWPS 135-BW-10</b>									
Perusaine	P265HG (1.0425)										
Aineenpaksuus	20 mm										
Putken ulkohalkaisija	-										
Hitsausprosessi	135 (MAG)										
Hitsausasento	PA										
Railon valmistus	Polttoleikkaus ja hionta										
Railon puhdistus	Hiomalla										
Kappaleen kiinnitys	-										
Silloitus	135										
Juuren avaus	ng										
Juurituki	nb										
Lisäaineet ja hitsauskaasut		Poltinkulma	10-25° (vetävä), 0-15° (työntävä)								
Lisäaineen luokittelumerkintä	EN ISO 14341-A : G 42 4 M21 3Si1 SFA/AWS A5.18 : ER70S-6	Kallistuskulma	0°								
		Etäisyys työkappaleesta	20 mm								
Työlämmitys											
Lisäaineen kaupan nimi	OK Autrod 12.51	Korotettu työlämpötila									
		Palkojen välinen lämpötila	max. 250 °C								
Jauhe	-	Esikuumennusmenetelmä									
Suojakaasu	18% CO2 + 82% Ar	Työlämpötilan mittaus	Lämpömittari								
Virtausnopeusalue	20 l/min	Jälkilämpökäsittely									
Plasmakaasu	-	Menetelmä	-								
Virtausnopeusalue	-	Kuumennusnopeus	-								
Juurikaasu	-	Pitölämpötila	-								
Virtausnopeusalue	-	Pitöaika	-								
Virtalaji	DC	Jäähdytysnopeus	-								
Napaisuus	+	Jälkikäsittely	-								
Huomautuksia: Juuren puolelta muhkurat hiottava tasaiseksi		Pvm ja laatija: 20.1.2023 Elmeri Seppinen									
Palko	Hitsausprosessi	Lisäaine Ø (mm)	Virta (A)	Jännite (V)	Hitsausnopeus alue (cm/min)	Langansyöttö alue (m/min)	Lämmöntuonti alue (kJ/mm)	Vapaalangan pituus (mm)	Vaaputustajuus (Hz)	Amplitudi (mm)	Huomi
1	135	1,0	120-160	18-20	10-18	2,5-5	1-1,5	10-15			
2..n	135	1,0	250-300	29-32	28-36	7,5-10	1-2,5	15			
3..n	135	1,0	250-300	29-32	28-36	7,5-10	1-2	15			
Asiakas		Hyväksytty									



## Alustava Hitsausohje

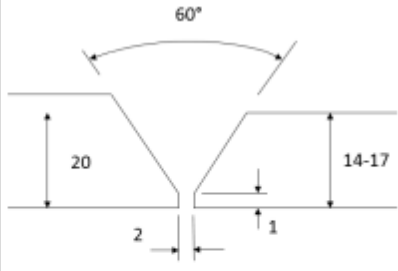

## pWPS 135-BW-02

Perusaine	S355K2 (1.0596)										
Aineenpaksuus	12 mm										
Putken ulkohalkaisija	-										
Hitsausprosessi	135 (MAG)										
Hitsausasento	PF & PC										
Railon valmistus	Polttoleikkaus ja hionta										
Railon puhdistus	Hiomalla										
Kappaleen kiinnitys	-										
Silloitus	135										
Juuren avaus	ng										
Juurituki	nb										
Lisäaineet ja hitsauskaasut		Poltinkulma			10-25° (vetävä), 0-15° (työntävä)						
Lisäaineen luokittelumerkintä	EN ISO 14341-A : G 42 4 M21 3Si1 SFA/AWS A5.18 : ER70S-6			Kallistuskulma		0°					
				Etäisyys työkappaleesta		20 mm					
Lisäaineen kaupp nimi		OK Autrod 12.51			Työlämmitys						
					Korotettu työlämpötila		-				
					Palkojen välinen lämpötila		max. 250 °C				
Jauhe	-				Esikuumennusmenetelmä		-				
Suojakaasu	18% CO <sub>2</sub> + 82% Ar				Työlämpötilan mittaus		Lämpömittari				
Virtausnopeusalue	20 l/min				Jälkilämpökäsittely						
Plasmakaasu	-				Menetelmä		-				
Virtausnopeusalue	-				Kuumennusnopeus		-				
Juurikaasu	-				Pitölämpötila		-				
Virtausnopeusalue	-				Pitöaika		-				
Virtalaji	DC				Jäähdytysnopeus		-				
Napaisuus	+				Jälkikäsitteily		-				
Huomautuksia:					Pvm ja laatija: 10.2.2023 Elmeri Seppinen						
Lämmöntuonnin laskeminen $Q = 0,8 * \frac{U \cdot l}{v}$											
Palko	Hitsausprosessi	Lisäaine Ø (mm)	Virta (A)	Jännite (V)	Hitsausnopeus alue (cm/min)	Langansyöttö alue (m/min)	Lämmöntuonti alue (kJ/mm)	Vapaa- langan pituus (mm)	Vaaputustaa- juus (Hz)	Amplitudi (mm)	Huom!
1	135	1,0	75-90	20-22	10-14	3-5	0,7-1,0	10-15	-	-	Pulssimig
2..n	135	1,0	120-160	24-26	16-26	5-8	0,7-1,5	15	-	-	Pulssimig
Asiakas					Hyväksytty						

## Liite 2. Yliopiston laboratoriossa tutkittujen liitosten valvontapöytäkirjat.



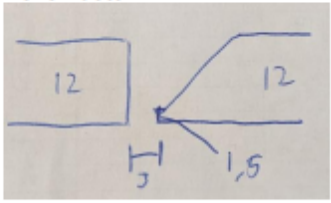
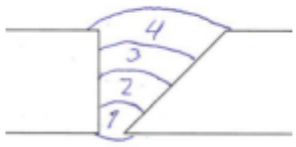
## Valvontapöytäkirja

		Merkintä						
pWPS	135-BW-10		Kuittaa oheisiin kohtiin ✓ merkinnällä, onko kyseinen asia tarkistettu					
Koekappaleet	P265GH + vanha levy							
	Laatu	x						
	Mitat	x						
	Valssaussuunta	x						
	Silloitus	x						
	Railomitat	x						
	Ilmarako	x						
Lisäaine	OK Autrod 12.51							
	Kauppamerkintä	x						
	Luokitus	x						
	Koko	x						
Suojakaasu	SK-18							
	Tyyppi	x						
Hitsaaja								
	Henkilöllisyys	x						
	Leimaus							
Valvoja	Elmeri Seppinen							
	Leimaus							
<b>Railomuoto</b> 		<b>Palkojärjestys</b> 						
Palkokohtaiset hitsausarvot (keskimääräiset tai vaihteluväli)								
Hitsausarvot			1.	2.	3.	4.	5.	6.
	Prosessi		135 (Pulssimig)					
	Lisäaine Ø	mm	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Suojakaasu	l/min	20	20	20	20	20	20
	Virtalaji ja napaisuus		DC+					
	Hitsausvirta	A	86	134	125	126	142	144
	Langansyöttönopeus	m/min	3,8	6,2	5,8	6,6	6,7	6,5
	Kaarijännite	V	21	24,2	23,6	26,3	24,2	23,4
	Kuljetusnopeus	mm/s	2,1	3,0	4,6	3,8	4,3	4,0
	Palon pituus	mm	350	350	350	350	350	350
	Aika	s	167	115	76	91	81	88
	Hitsausasento		PA					
	Virtasuuttimen etäisyys työkappaleeseen	mm	~20					

Hitsausarvot		7.	8.	9.	10.	11.	12.
Prosessi		135 (Pulssimig)					
Lisäaine Ø	mm	1,0	1,0	1,0			
Suojakaasu	l/min	20	20	20			
Virtalaji ja napaisuus		DC+					
Hitsausvirta	A	137	135	125			
Langansyöttönopeus	m/min	6,3	6,3	6,3			
Kaarijännite	V	24,0	23,7	25,2			
Kuljetusnopeus	mm/s	4,1	4,1	3,6			
Palon pituus	mm	350	350	350			
Aika	s	85	85	98			
Hitsausasento		PA					
Virtasuuttimen etäisyys työkappaleeseen	mm	~20					

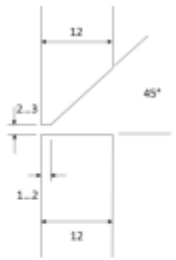
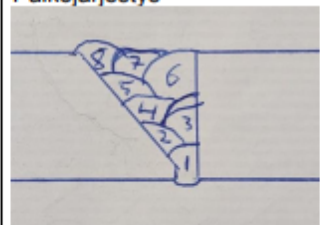
Pvm 27.1.2023Valvoja Elmeri Seppinen

**Valvontapöytäkirja**

pWPS	135-BW-02	Merkintä	Kuittaa oheisiin kohtiin ✓ merkinnällä, onko kyseinen asia tarkistettu					
Koekappaleet	S355K2							
	Laatu	x						
	Mitat	x						
	Valssaussuunta	x						
	Silloitus	x						
	Railomitat	x						
	Ilmarako	x						
Lisäaine	OK Autrod 12.51							
	Kauppamerkintä	x						
	Luokitus	x						
	Koko	x						
Suojakaasu	SK-18	x						
	Tyyppi	x						
Hitsaaja								
	Henkilöllisyys	x						
	Leimaus							
Valvoja	Elmeri Seppinen							
	Leimaus							
Railomuoto		Palkojärjestys						
								
Palkokohtaiset hitsausarvot (keskimääräiset tai vaihteluväli)								
Hitsausarvot			1.	2.	3.	4.	5.	6.
Prosessi			135					
Lisäaine Ø	mm		1,0	1,0	1,0	1,0		
Suojakaasu	l/min		20	20	20	20		
Virtalaji ja napaisuus			DC+	DC+	DC+	DC+		
Hitsausvirta	A		108	138	140	142		
Langansyöttönopeus	m/min		3,7	4,7	4,5	4,4		
Kaarijännite	V		16,9	17,6	17,4	17,1		
Kuljetusnopeus	mm/s		1,4	1,3	1,4	1,2		
Palon pituus	mm		350	350	350	350		
Aika	s		258	260	251	295		
Hitsausasento			PF					
Virtasuuttimen etäisyys työkappaleeseen			~15					

Pvm 28.2.2023 Valvoja Elmeri Seppinen

**Valvontapöytäkirja**

pWPS	135-BW-02	Merkintä	Kuittaa oheisiin kohtiin ✓ merkinnällä, onko kyseinen asia tarkistettu					
Koekappaleet	S355K2							
	Laatu	x						
	Mitat	x						
	Valssaussuunta	x						
	Silloitus	x						
	Railomitat	x						
	Ilmarako	x						
Lisäaine	OK Autrod 12.51							
	Kauppamerkintä	x						
	Luokitus	x						
	Koko	x						
Suojakaasu	SK-18							
	Tyyppi	x						
Hitsaaja								
	Henkilöllisyys	x						
Valvoja	Leimaus							
	Elmeri Seppinen	x						
	Leimaus							
Railomuoto			Palkojärjestys					
								
Palkokohtaiset hitsausarvot (keskimääräiset tai vaihteluväli)								
Hitsausarvot			1.	2.	3.	4.	5.	6.
	Prosessi		135 (pulssimig)					
	Lisäaine ø	mm	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Suojakaasu	l/min	20	20	20	20	20	20
	Virtalaji ja napaisuus		DC+					
	Hitsausvirta	A	104	143	136	142	138	136
	Langansyöttönopeus	m/min	3,2	4,3	4,4	4,4	4,2	4,2
	Kaarijännite	V	17,5	17,4	17,4	17,4	17,3	17,3
	Kuljetusnopeus	mm/s						
	Palon pituus	mm	350	350	350	350	350	350
	Aika	s	257	85	120	92	91	152
	Hitsausasento		PC					
	Virtasuuttimen etäisyys työkappaleeseen		15	15	15	15	15	15

Hitsausarvot		7.	8.	9.	10.	11.	12.
Prosessi		135 (pulssimig)					
Lisäaine ø	mm	1,0	1,0				
Suojakaasu	l/min	20	20				
Virtalaji ja napaisuus		DC+					
Hitsausvirta	A	135	137				
Langansyöttönopeus	m/min	4,1	4,2				
Kaarijännite	V	17,3	17,3				
Kuljetusnopeus	mm/s						
Palon pituus	mm	350	350				
Aika	s	114	67				
Hitsausasento		PC					
Virtasuuttimen etäisyys työkappaleeseen		15	15				

Pvm 28.2.2023 Valvoja Elmeri Seppinen