

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# JUURISUOJATAHNOJEN KÄYTTÖ, TOIMINTA JA NIIDEN TUTKIMINEN

TEKIJÄ Sirja Rautiainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Sirja Rautiainen	
Työn nimi Juurisuojatahnojen käyttö, toiminta ja niiden tutkiminen	
Päiväys 22.2.2024	Sivumäärä/Liitteet 41/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Savonia-ammattikorkeakoulu	
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa kolmen juurisuojatahnan käyttöä, toimintaa ja ominaisuuksia kolmella erilaisella ruostumattomalla teräksellä. Tarkoituksena oli tutkia, mitä juurisuojatahnat sisältävät, ja kuinka ne käyttäytyvät hitsauksen aikana, sillä juurikaasun käyttö ei kaikissa tilanteissa ole mahdollista. Pääpaino tutkimuksessa oli hitsauksen aikaisen hapettumisen ehkäisyssä käyttäen juurisuojatahnoja.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkimusmenetelminä käytettiin juurisuojatahnojen ja hitsattujen tutkimuskappaleiden visuaalista analysointia ennen ja jälkeen hitsauksen. Tutkimusta täydennettiin tarkemmalla menetelmällä ja hitsattuja tutkimuskappaleista tehtiin kaksi hieettä. Hieettä tutkittiin mikroskoopilla, jotta voitiin analysoida juurisuojatahnojen mahdollisia vaikutuksia mikrorakenteeseen hitsauksen aikana.</p> <p>Hitsattujen tutkimuskappaleiden ja hieiden tutkimisen tuloksena voitiin sanoa, että juurisuojatahnoissa on eroja niin ennen hitsausta kuin hitsauksen aikana. Tämä luultavasti johtuu osaltaan juurisuojatahnojen kemiallisesta koostumuksesta. Juurikaasu on luotettavin tapa suojata juuri hapettumiselta. Juurisuojatahnojen avulla voidaan saada aikaan sellainen juuri, jolla ei ole kovinkaan suuria vaatimuksia, mutta se vaatii ehdottomasti jälkikäsitteilyä, kuten puhdistuksen ja passivoinnin, jotta juuren korroosiokestävyys voidaan palauttaa.</p>	
Avainsanat ruostumaton teräs, juurisuojatahna, juurensuojaus, hitsaus, hapettuminen, korroosiokestävyys	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering	
Author Sirja Rautiainen	
Title of Thesis Use, Operation and Research of Root Protection Pastes	
Date February 22, 2024	Pages/Appendices 41/0
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences	
<p><b>Abstract</b></p> <p>The objective of this thesis was to examine in collaboration with Savonia University of Applied Sciences three different types of root pastes on three different stainless steels. The goal was to examine what kind of ingredients there are in root pastes and how root pastes act during welding because it is not always possible to use root gas. The focus of this thesis was to examine whether root pastes give enough protection from oxidation during the welding process.</p> <p>The method of conducting this thesis was a visual analysis of the welded workpieces and root protection pastes before and after welding. This examination was replenished with a more accurate method and two microsections were made from the weldings. These microsections were examined with a microscope to analyze if the root pastes had affected the microstructures during the welding process.</p> <p>As a result of examining the welded pieces and microsections, it was possible to say based on the results that the root pastes have differences in behavior before and during welding, possibly because of the differing ingredients. The root gas is the most reliable method of protecting the root from oxidation but with root pastes, it is possible to achieve a root that does not have many requirements, but it still requires post-processing, such as cleaning and passivating to restore corrosion resistance.</p>	
<p><b>Keywords</b> stainless steel, root paste, root flux, root protection, welding, oxidation, corrosion resistance</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Opinnäytetyön tausta .....	6
1.2	Opinnäytetyön tarkoitus ja tavoitteet.....	6
1.3	Opinnäytetyön rajaus .....	6
2	RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET .....	7
2.1	Austeniittinen ruostumaton teräs .....	9
2.1.1	AISI 316 .....	9
2.1.2	AISI 904L.....	10
2.2	Ferriittinen ruostumaton teräs.....	11
2.3	Martensiittinen ruostumaton teräs.....	11
2.4	Erkautuskarkaistu ruostumaton teräs .....	12
2.5	Duplex-teräs.....	12
3	JUURISUOJATAHNAT .....	14
3.1	Yleistä.....	14
3.2	Juurisuojahtahnojen koostumus ja turvallisuus .....	14
3.3	ESAB Stainflux .....	16
3.4	Kjellberg Root Flux.....	17
3.5	Polar-Flux.....	18
4	TOTEUTUS.....	20
4.1	Harjoittelu .....	20
4.2	Tutkimuskappaleet.....	22
4.3	Hieet.....	23
5	TULOKSET .....	26
5.1	Juurisuojahtahnojen käyttöominaisuudet ennen hitsausta .....	27
5.1.1	ESAB Stainflux.....	27
5.1.2	Kjellberg Root Flux .....	28
5.1.3	Polar-Flux.....	30
5.2	Juurisuojahtahnojen käyttäytyminen hitsauksen aikana .....	30
5.3	Juurisuojahtahnojen käyttäytyminen hitsauksen jälkeen ja vaikutukset juurensuojaukseen.....	31
5.4	Mikrorakenteet.....	34
6	YHTEENVETO.....	37

LÄHTEET .....	39
KUNNAN KOKOUSPÖYTÄKIRJA	
Kuva 1. Passiivikalvon muodostuminen uudelleen (Crookes, 2004) .....	7
Kuva 2. Ruostumattoman teräksen passiivikalvon kaksikerrosmalli (Kauppi, 2022) .....	7
Kuva 3. 904L seostukset (Rautiainen, 2023) .....	10
Kuva 4. ESAB Stainflux -juurisuojatahna (Rautiainen, 2023).....	16
Kuva 5. Kjellberg Root Flux -juurisuojatahna (Rautiainen, 2023) .....	17
Kuva 6. Polar-Flux-juurisuojatahna (Rautiainen, 2023) .....	18
Kuva 7. Hitsaustuki (Rautiainen, 2023) .....	20
Kuva 8. Weld Assist -toiminnon tarjoamat parametrit 3 mm:n vahvuudelle (Rautiainen, 2023).....	21
Kuva 9. Weld Assist -toiminnon tarjoamat parametrit 5 mm:n vahvuudelle (Rautiainen, 2023).....	21
Kuva 10. Kuivumisraja (Rautiainen, 2023) .....	22
Kuva 11. Jaottelu, vasemmalta oikealle: 904L, Duplex ja 316, ylhäältä alas: Polar-Flux, Kjellberg Root Flux ja ESAB Stainflux (Rautiainen, 2023).....	24
Kuva 12. Valmiit hieet. (Rautiainen, 2024) .....	25
Kuva 13. AISI 316: 1. ilman juurikaasua, 2. juurikaasu argon 7 l/min, 3. juurikaasu argon 10 l/min (Rautiainen, 2024) .....	26
Kuva 14. ESAB Stainflux levitettyä (Rautiainen, 2023) .....	28
Kuva 15. ESAB Stainflux levitettyä suuremmalla liuotinmäärällä (Rautiainen, 2023) .....	28
Kuva 16. Kjellberg Root Flux kuivana ja juuri levitettyä (Rautiainen, 2023) .....	29
Kuva 17. Hitsauksen aikana irronnut tahna. (Rautiainen, 2023).....	30
Kuva 18. Juurisuojatahnat hitsauksen jälkeen: 1: ESAB Stainflux, 2: Kjellberg Root Flux, 3: Polar-Flux. (Rautiainen, 2024) .....	32
Kuva 19. Materiaali 316: 1. Ei tahnaa, 2. ESAB Stainflux, 3. Kjellberg Root Flux, 4. Polar-Flux. (Rautiainen, 2024).....	33
Kuva 20. Materiaali 904L: 1. ESAB Stainflux, 2. Kjellberg Root Flux, 3. Polar-Flux. (Rautiainen,2024) .....	33
Kuva 21. Materiaali 2507: 1. ESAB Stainflux, 2. Kjellberg Root Flux, 3. Polar-Flux. (Rautiainen, 2024) .....	34
Kuva 22. Materiaali 316: 1. Perusaine, 2. Hitsin raja-alue, 3. Hitsin keskellä, suurennokset x50 (Rautiainen, 2024).....	35
Kuva 23. Dendriittirakenteen muodostuminen. Muokattu lähteestä. (Dantzig, ei pvm) .....	36
Kuva 24. 10x suurennokset materiaalilla 316, vasemmalla ilman lisäainetta, oikealla lisäaine. (Rautiainen, 2024).....	36

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa. Savonia-ammattikorkeakoulun juuret juontavat vuoteen 1886, jolloin nimenä oli Kuopion teknillinen oppilaitos ja oli valtion ylläpitämä aina vuoteen 1995 saakka. Vuosina 1992–1998 oppilaitoksen nimenä oli Pohjois-Savon väliaikainen ammattikorkeakoulu, ja vuonna 1998 nimi muuttui Pohjois-Savon ammattikorkeakouluksi. Vasta vuonna 2004 nimi muuttui nykyiselleen. Savonia on yksi Suomen suurimmista ammattikorkeakouluista ja kampuksia löytyy kolmelta paikkakunnalta: Kuopiosta, Varkaudesta ja Iisalmesta. Savoniassa opiskelee yli 8000 opiskelijaa useilla eri aloilla. Vuonna 2023 Savonialla oli henkilökuntaa hieman yli 570.

Opinnäytetyön aihe löytyi kesällä 2023 työharjoittelun kautta Dekra Industrial Oy:n NDT-tarkastajalta, joka kertoi omista kokemuksistaan ja siitä, mitä työssään on vuosien varrella nähnyt ja kuullut. Työnsä puolesta aiheen ehdottaja on usein tekemisissä hitsaajien kanssa ja näin ollen aihetta voitiin pitää luotettavana. Aihe-ehdotus oli hyvinkin soveltuva konetekniikan alan opinnäytetyöksi ja ajatus jatkojalostui tutkimusopinnäytetyöksi.

## 1.2 Opinnäytetyön tarkoitus ja tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia kolmen erilaisen juurisuojatahnan käyttöä kolmella erilaisella materiaalilla TIG-hitsausmenetelmää käyttäen. Työssä tutkitaan ESAB Stainflux-, Kjellberg Root Flux- ja Polar-Flux -juurisuojatahnojen käyttöominaisuuksia materiaaleilla AISI 316, AISI 904L ja super-duplex 2507. Käytännön hitsauskokeiden tuloksia analysoidaan pääasiassa visuaalisesti, mutta myös pientä osaa tutkitaan mikroskooppisin menetelmin tutkimalla hitsatuista kappaleista tehtyjä hieitä.

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä juurisuojatahnoihin, ruostumattomien terästen hitsaukseen yleisesti ja materiaalien käyttäytymiseen hitsauksen aikana, etenkin juurisuojatahnaa käytettäessä. Lisäksi työssä selvitetään, saadaanko juurisuojatahnulla aikaan riittävä juuren suojaus eli hapettumisen ehkäiseminen tilanteissa, joissa juurikaasua ei voida käyttää.

## 1.3 Opinnäytetyön rajaus

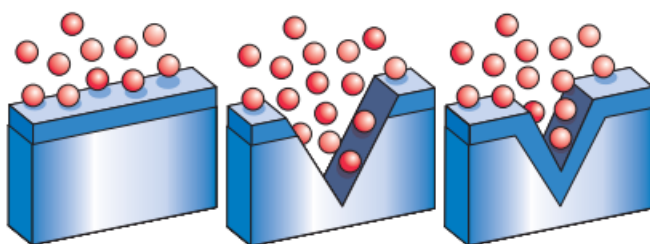
Työ on rajattu siten, että käytetään kolmea juurisuojatahnaa ja kolmea materiaalia. Materiaaliksi valittiin erilaisia ruostumattomia teräksiä, jotta voitaisiin jäljitellä olosuhteita, joissa juurisuojatahnan käyttöä tarvitaan.

Tarkoituksena on tutkia tuloksia eikä tässä työssä oteta kantaa siihen, millaisilla muutoksilla juurisuojatahnoista voitaisiin tehdä mahdollisesti toimivampia. Toisin sanoen työssä ei puututa juurisuojatahnojen kemiallisten ominaisuuksien kehittämiseen, vaikka tahnojen kemikaaleja käsitelläänkin tiiviisti. Työssä tutkitaan, havainnoidaan ja analysoidaan tuloksia.

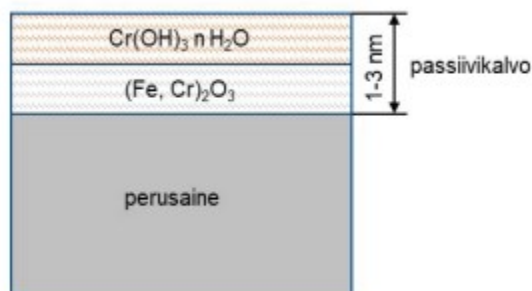
## 2 RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Ruostumattomat teräkset ovat runsasseosteisia teräksiä. Ruostumattomilla teräksillä tarkoitetaan suurta joukkoa erilaisia rautaseoksia, joiden tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluvat matala hiilipitoisuus, joka voi olla jopa 0,02 %, mutta enintään 1,2 %. Pääseosaineena on vähintään 10,5 % kromia. Kromin ja hiilen määrä ruostumattomissa teräksissä on määritelty standardissa SFS-EN 10020. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 172 (osa 2), s. 42 (osa 1)) (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2000)

Korroosiokestävyys ruostumattomissa teräksissä on pääasiassa kromin ansiota. Korroosiokestävyys perustuu ruostumattoman teräksen pinnan passivoitumiseen. Tämä tarkoittaa sitä, että teräksen pinnan reagoidessa ilmassa tai vedessä olevan hapen kanssa, syntyy kromioksidi- eli passiivikalvo, joka koostuu kromi- ja rautaoksidoista sekä hydroksidoista. Passiivikalvo on havainnollistettu kuvassa 2. Mikäli hapen määrä ympäristössä on riittävä, mekaanisesta pinnan vahingoittumisesta johtuva passiivikalvon rikkoutuminen korjaantuu itsekseen. Korjaantuminen on havainnollistettu kuvassa 1. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 184)



Kuva 1. Passiivikalvon muodostuminen uudelleen (Crookes, 2004)



Kuva 2. Ruostumattoman teräksen passiivikalvon kaksikerrosmalli (Kauppi, 2022)

Vaikka passiivikalvo vaatii hapetta muodostuakseen ja suojataksien teräksen pintaa, ei tätä hapettumisen muotoa tule sekoittaa haitalliseen hapettumiseen, jota tapahtuu esimerkiksi ruostumattomien terästen hitsaamisen yhteydessä. Lämpötilan kohotessa ja kromiseostuksen takia, ruostumattoman teräksen pinta alkaa hapettumaan korkeammissa lämpötiloissa (riippuen seosaineista). Korkeassa lämpötilassa syntyvä oksidikalvo ei ole paksu ja tiivis vaan enemmänkin karkea ja paksumpi hilsekerros. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 204)

Edellä mainittu hilse- eli oksidikalvo näkyy teräksen pinnassa päästöväreinä, joita ovat esimerkiksi haalean keltainen, oljenkeltainen, ruskea, tumman violetti, sininen ja tumman sininen. Haalean keltainen väri syntyy noin 290 asteen lämpötilassa, tumman sininen noin 600 asteessa ja muut värit näiden lämpötilojen väliltä. Väriasteikosta voidaan päätellä hapettumisen voimakkuutta. Oksidikalvo on paksumpi kuin passiivikalvo, eikä se suojaa korroosiolta. Oksidikalvon muodostumisen lisäksi sen alle saattaa muodostua kromiköyhä vyöhyke, joka on vielä heikompi suojaamaan korroosiolta. (Kauppi, 2022)

Lämpötila-alueella 600–900°C kromi ja hiili muodostavat helposti kromikarbideja, jotka hakeutuvat raerajoille. Raerajoilla diffuusio (eli atomien siirtyminen) on nopeinta ja karbidit pääsevät muodostumaan helpoimmin, minkä seurauksena syntyy kromiköyhä vyöhyke ja passiivikerros heikkenee. Tätä ilmiötä kutsutaan herkistymiseksi. Titaanin ja niobin seostuksella voidaan välttää herkistymistä, sillä ne yhdistyvät hiileen ja näin ollen stabiloivat terästä.

Kromiköyhän vyöhykkeen syntyyn vaikuttaa ruostumattoman teräksen hiilipitoisuus. Ilmiötä esiintyy etenkin austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä kuumennuksen, kuten esimerkiksi hitsauksen, aiheuttamana, jolloin kromikarbidit erkautuvat raerajoille ja erkaumien ympärille muodostuu kromiköyhä vyöhyke. Vyöhyke on alttiimpi raerajakorroosiolle. Austeniittisen ruostumattoman teräksen herkistymisen lämpötila-alue on 550–800°C. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 202) (Opetushallitus, ei pvm)

Herkistymisen kulku, joka johtuu kromikarbidien erkautumisesta, on riippuvainen ruostumattoman teräksen hiilipitoisuudesta. Kun hiilipitoisuus kasvaa, erkautumislämpötila-alue laajenee korkeampiin lämpötiloihin. Näin ollen matalahiilisisä ruostumattomien teräksien laaduissa (L-laadut, esimerkiksi 904L) kromiköyhän vyöhykkeen syntymistä ei tapahdu. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 114)

Fyysisiä ja kemiallisia ominaisuuksia voidaan muokata seosaineilla haluttuun suuntaan. Ruostumattomien terästen seosaineita ovat muun muassa kromi (Cr), nikkeli (Ni), molybdeeni (Mo), typpi (N), mangaani (Mn), titaani (Ti) ja niobi (Nb). Kromi on se seosaine, jolla saavutetaan pääosa ruostumattomuudesta. Nikkeli seosaineena vakauttaa austeniittista rakennetta, molybdeeni parantaa korroosionkestävyyttä ja luo teräksen haponkestävyyttä, typpi parantaa lujuutta ja parantaa korroosionkestävyyttä, mangaani muodostaa austeniittia ja helpottaa typen liukenemistä teräkseen, titaani ja niobi sitovat hiiltä karbideiksi ja estävät kromikarbidien muodostumista. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, ss. 173-174)

Ruostumattomat teräkset voidaan jakaa viiteen eri ryhmään niiden kiderakenteiden mukaan. Nämä viisi ryhmää ovat

- austeniittiset ruostumattomat teräkset
- ferriittiset ruostumattomat teräkset
- martensiittiset ruostumattomat teräkset
- erkautuskarkaistut ruostumattomat teräkset
- duplex-teräkset. (Damstahl, ei pvm)

## 2.1 Austeniittinen ruostumaton teräs

Austeniittisella ruostumattomalla teräksellä on korkea kromi- ja nikkelpitoisuus (Cr 16-25 % ja Ni 7-25 %), mutta alhainen hiilipitoisuus ( $\leq 0,08$  %). Usein siihen on lisätty myös molybdeeniä lisäämään korroosionkestävyyttä. Suurin osa käytetyistä ruostumattomista teräksistä kuuluvat tähän ryhmään, sillä niillä on erinomainen muovattavuus, hitsattavuus ja korroosiokestävyys. Austeniittiset ruostumattomat teräkset soveltuvat hyvin plastiseen muovailuun, minkä vuoksi niistä valmistetaan muun muassa keittiön altaita. Lisäksi materiaalista valmistetaan esimerkiksi panimoiden säiliöitä ja ovenkahvoja. (Damstahl, ei pvm)

Austeniittisten ruostumattomien teräksien ominaisuuksiin kuuluvat matala myötöraja (250–300 MPa) ja korkea murtoraja (700 MPa). Tällainen teräs pakkaskarkenee voimakkaasti, sillä se muun muassa kehittää muokkausmartensiittia, mutta toisaalta sillä on erittäin hyvä muokattavuus tai sitkeys, mutta muokkauslujittumisen vuoksi lastuava työstä on vaikeaa. Lisäksi austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on matala lämmönjohtokyky, korkea lämpölaajennuskerroin sekä se on hyvin hitsattavaa eikä karkene hitsauksen aikana. Toisaalta näiden ominaisuuksien vuoksi aiheutuu haasteellisia hitsausmuodonmuutoksia. Koska austeniitilla on pintakeskinen kuutiollinen kiderakenne, se ei altistu haurasmurtumille. Vaikka austeniittisella ruostumattomalla teräksellä on yleisesti hyvät korroosionkestävyysominaisuudet, voidaan molybdeenillä vielä parantaa tätä ominaisuutta. Lisäämällä 2–3 % molybdeeniä, saadaan niin kutsuttua haponkestävää terästä. Austeniittiset ruostumattomat teräkset voivat olla herkkiä raerajakorroosiolle ja jännityskorroosiolle. Jännityskorroosioherkkyyttä voidaan alentaa korkeammalla nikkelpitoisuudella. Korkeammassa lämpötiloissa tämä teräs on myös herkkä rikkikaasuille, mikä johtuu nimenomaan teräksen nikkelpitoisuudesta. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 176)

Austeniittiset ruostumattomat teräkset luokitellaan standardissa SFS-EN 1011-3 seuraavasti:

- austeniittiset ruostumattomat vakioteräkset
- täysin austeniittiset ruostumattomat teräkset
- muut austeniittiset ruostumattomat teräkset, joilla on erityisominaisuuksia. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2018)

### 2.1.1 AISI 316

Tutkimuksessa käytettiin ruostumatonta terästä AISI 316, jonka EN-standardin mukainen nimike on 1.4401. Materiaalista käytetään tässä työssä nimitystä 316.

316 on austeniittinen ja haponkestävä ruostumaton teräs. Haponkestävyys saadaan aikaan molybdeeniseostuksella, jota tässä materiaalissa on noin 2,1 %. Kromia on seostettu noin 17,2 % ja nikkeliä noin 10,2 %. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 175)

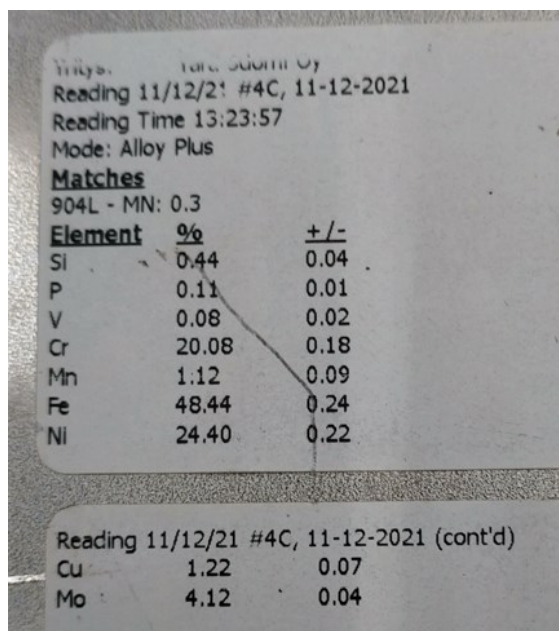
316 kuuluu luvussa 2.1. ryhmitellyistä ensimmäiseen eli austeniittisiin ruostumattomiin vakioteräksiin. Kromiseostuksen lisäksi austeniittiset ruostumattomat vakioteräkset sisältävät nikkeliä ja mangaania, jotka tasapainottavat mikrorakenteen huoneenlämpötilassa lähes kokonaan tai kokonaan pintakeskisen kuutiollisen kiderakenteen omaavaksi austeniitiksi. Kun kromipitoisuus on 16–18 % ja nikkelpitoisuus noin 6,5–12 %, on teräksen mikrorakenne niin kutsuttua metastabiilia austeniittia.

Tällainen austeniitti voi muokkauksen aikana muuttua martensiitiksi. Jähmettymisen tapahtuessa, esimerkiksi hitsauksessa, kyseiseen teräkseen jää deltaferriittiä (0–10 %), joka lähes tulkoon häviää valmistusprosessin aikana. Austeniittiset ruostumattomat vakioteräokset ovat selvästi eniten käytettyimpiä materiaaleja kaikista austeniittisistä ruostumattomista teräksistä. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 176)

### 2.1.2 AISI 904L

Tutkimuksessa käytettiin myös toista austeniittistä ruostumatonta terästä, AISI 904L, jonka EN-standardin mukainen nimike on 1.4539. Materiaalista käytetään tässä työssä nimeä 904L.

Kuvassa 3 on nähtävillä käytetyn materiaalin seostukset.



Reading 11/12/21 #4C, 11-12-2021		
Reading Time 13:23:57		
Mode: Alloy Plus		
<b>Matches</b>		
904L - MN: 0.3		
Element	%	+/-
Si	0.44	0.04
P	0.11	0.01
V	0.08	0.02
Cr	20.08	0.18
Mn	1.12	0.09
Fe	48.44	0.24
Ni	24.40	0.22
Reading 11/12/21 #4C, 11-12-2021 (cont'd)		
Cu	1.22	0.07
Mo	4.12	0.04

Kuva 3. 904L seostukset (Rautiainen, 2023)

904L -materiaalissa L tarkoittaa "low carbon" eli matalahiilinen. Hiilen osuus on noin 0,02 %, kun taas luvussa 2.1.1. käsitellyssä 316-materiaalissa hiilen osuus on noin 0,04 %. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 175)

Nikkeliä ja molybdeenä on seostettu tähän materiaaliin lähes kaksinkertainen määrä verrattuna 316-materiaaliin. Suuren nikkeliipitoisuuden vuoksi 904L luokitellaan täysin austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin ja molybdeeniseostuksella materiaali on hyvin korroosiokestävä. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 176)

904L on hyvin runsasseosteinen materiaali ja sen erittäin hyvän korroosiokestävyyden vuoksi sitä käytetään muun muassa kemianteollisuudessa, öljynjalostuksessa, lämmönvaihtimissa ja paineastioissa. (Asikainen, 2022)

## 2.2 Ferriittinen ruostumaton teräs

Ferriittiset ruostumattomat teräkset sisältävät tyypillisesti 12–18 % kromia, hieman nikkeliä ja hiiltä alle 0,12 %. Tällaisen matalan hiilipitoisuuden vuoksi ferriittisiä ruostumattomia teräksiä ei voi karkaista. Materiaalina se on melko pehmeää ja sitkeys on heikompaa kuin austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä. Matalan nikkelseostuksen vuoksi, ferriittinen ruostumaton teräs on melko halpaa. Sitä käytetään kohteissa, joissa tarvitaan magneettista ja siistiä ulkonäköä, kuten esimerkiksi jääkaapinovissa ja ovenkahvoissa. (Damstahl, ei pvm)

Standardin EN 10088-1 mukaan ferriittiset ruostumattomat teräkset sisältävät jopa 10,5–30 % kromia ja hiiltä 0,08 % saakka materiaalin mukaan, mikä poikkeaa materiaalille tyypillisistä kromi- ja hiiliarvoista. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2024)

Ferriittisten ruostumattomien terästen käyttöä lämpötila-alueella 300–550°C tulee välttää, sillä materiaali haurastuu. Tätä haurastumista kutsutaan 475°C-haurastumiseksi. Sitkeysominaisuudet voidaan kuitenkin palauttaa lämpökäsittelyllä korkeammassa lämpötilassa. Myös käyttö alle 0°C:ssa tulee välttää, mutta mikäli materiaali on nikkelseostettua, sitä voidaan käyttää myös 0°C:een alapuolella. Niukkaseosteisia ferriittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään esimerkiksi autojen pakoputkissa ja katalyysaattoreissa. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 177)

Ferriittisten ruostumattomien terästen ominaisuuksia ovat muun muassa hieman korkeampi myötöraja kuin austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä (250–300 MPa), karkearakeisuudesta johtuva hauraus hitsauksen jälkeen, ja kromikarbidiinien syntyminen korkean hiilipitoisuuden takia, mutta tämä voidaan stabiloida niobi- ja titaaniseostuksella. Materiaalilla on yleensä hyvä työstettävyyttä lastuavassa työstössä ja sillä on myös hyvä korroosio-ominaisuudet, esimerkiksi rikkipitoisia kaasuja vastaan. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 177)

Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat kokonaan tai lähes kokonaan tilakeskisen kuutiollisen kiderakenteen omaavia, ja ne voidaan jakaa seostuksensa suhteen kolmeen eri luokkaan seuraavasti:

- matalaseosteiset standarditeräkset
- keskiseosteiset standarditeräkset
- superferriitit. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 174)

## 2.3 Martensiittinen ruostumaton teräs

Martensiittinen ruostumaton teräs sisältää tyypillisesti 12–16 % kromia ja hieman nikkeliä, mutta suhteellisen paljon hiiltä (0,12–1,2 %). Molybdeeniä tässä materiaalissa on vain harvoin. Koska martensiittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan karkaista, siitä voidaan saada äärimmäisen kovaa, jolloin se soveltuu esimerkiksi keittiöveitsiin ja kirurgisiin välineisiin. Karkaisusta saavutetut ominaisuudet häviävät lämpökäsittelyjen myötä. Toisin kuin austeniittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan hitsata ja muovaila, martensiittisten ruostumattomien terästen hitsaus on huomattavasti vaativampaa. Martensiittiset ruostumattomat teräkset ovat magneettisia. Lisäksi niiden alhaisen kromipitoisuuden ja korkean hiilipitoisuuden vuoksi niiden korroosiokestävyys on heikko. (Damstahl, ei pvm)

Standardissa SFS-EN 10088-2 martensiittiset teräkset on jaettu kolmeen luokkaan seostuksensa suhteen seuraavasti:

- standarditeräkset (martensiittiset teräkset)
- erikoisteräkset (martensiittiset teräkset)
- erikoisteräkset (erkautumiskarkenevat). (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2015)

Martensiittisten ruostumattomien terästen ominaisuuksia ovat muun muassa pieni lämpölaajennuskerroin, suuri lämmönjohtokyky, kovuus ja hauraus sekä rajoitettu hitsattavuus, jolloin ne vaativat esilämmityksen. Nikkeliä ja molybdeeniä voidaan lisätä parantamaan heikkoa korroosiokestävyyttä. Lisäksi martensiittiset ruostumattomat teräkset toimitetaan usein pehmeäksi hehkutettuina ja käytetään karkaistuinä ja päästettyinä eli nuorutettuina. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 177)

#### 2.4 Erkautuskarkaistu ruostumaton teräs

Erkautuskarkaistu ruostumaton teräs kuuluu martensiittisten ruostumattomien teräksien joukkoon. Se on kaksifaasinen ja erittäin luja teräs. Tyypillisesti tämän teräksen kromipitoisuus on noin 15–17 % ja nikkelpitoisuus 4–8 %. Teräkseen saatetaan seostaa hieman molybdeeniä ja enintään 5 % kuparia. Erkautuskarkaisussa vieraat faasit erkautetaan toisistaan korkeissa lämpötiloissa, minkä seurauksena materiaali on lujaa, mutta omaavat heikon korroosiokestävyyden. Erkautuskarkaistu ruostumaton teräs on harvoin käytetty materiaali, mutta toisinaan sitä käytetään muun muassa golfmailojen ja ketjulenkkien valmistuksessa. (Damstahl, ei pvm)

Erkautuskarkaistujen ruostumattomien terästen lujuutta ja kulutuskestävyyttä voidaan parantaa erkauttamalla pieniä hiukkasia, kuten karbideja ja hiilinitridejä. Tällä tavoin käsitellyjä teräksiä voidaan käyttää paikoissa, joissa vaaditaan lujuutta korkeassa käyttölämpötilassa, esimerkiksi lentokoneissa, sillä materiaali kestää lujana jopa 315°C:een. Lisäksi erkautuskarkaistut ruostumattomat teräkset ovat hyvin hitsattavia. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 178)

#### 2.5 Duplex-teräs

Duplex-teräs on kaksifaasinen teräs. Tämä tarkoittaa, että teräksen mikrorakenne muodostuu kahdesta, ferriittisestä ja austeniittisestä teräksestä. (Damstahl, ei pvm)

Duplex-teräksiä on ferriittis-austeniittisten lisäksi olemassa myös ferriittis-martensiittisiä, martensiittis-austeniittisiä ja martensiittis-austeniittis-ferriittisiä. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 178)

Duplex-teräksissä ferriitin ja austeniitin suhde on tyypillisesti 50/50, mutta se voi vaihdella teräksen laadun mukaan. Seosaineina duplex-teräksissä käytetään samoja aineita kuin austeniittisissä teräksissä, mutta ferriittiä suosivien alkuaineiden määrä on suhteessa suurempi. Tästä syystä esimerkiksi kromipitoisuudet voivat olla korkeampia kuin austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä (>20 %). Lujuudeltaan duplex-teräkset ovat noin kaksinkertaisia austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, ss. 176-177)

Standardissa SFS-EN 1011-3 duplex-teräkset on jaettu kolmeen ryhmään seuraavasti:

- vähäseosteiset duplex-teräkset
- keskiseosteiset duplex-teräkset

- runsasseosteiset duplex-teräkset. ( (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2018)

Duplex-teräksien ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa suuri mekaaninen lujuus, suuri pintakovuus, hyvä jännityskorroosion vastustuskyky, hyvä hitsattavuus ja hitsausmuodonmuutokset ovat vähäisiä, pieni lämpölaajenemiskerroin sekä herkkyyys 475°C-haurastumiselle. Duplex-teräksillä on huonompi murtovenymä kuin austeniittisilla teräksillä, jonka vuoksi muokattavuuskin on heikompa. Mikäli terästä kylmämuokataan voimakkaasti, se täytyy myöstää. Duplex-teräksiä ei myöskään pidä altistaa yli 300°C:een lämpötilalla pidemmäksi aikaa ja sitä voidaan käyttää materiaalina paineastioissa, jotka altistuvat jopa -40°C:een lämpötilalle. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2004, s. 178)

Tutkimuksessa käytettiin super-duplex -terästä 2507, jonka EN-standardin mukainen nimike on 1.4410. Työssä käytetään materiaalista nimitystä 2507. 2507 kuuluu runsasseosteisten ruostumattomien duplex-terästen luokkaan, josta tulee myös nimitys super-duplex.

Taulukkoon yksi on listattu tutkimuksessa käytettyjen materiaalien tyypilliset painoprosentit. Taulukosta nähdään, että 2507 sisältää kromia huomattavasti muita materiaaleja enemmän sekä sisältää myös melko paljon nikkeliä. Näillä seosaineilla on taipumus suosia ferriittiä, mikä on yksi tyyppiominaisuus super-duplex -teräksissä. Voidaan huomata myös, että seosaineet ovat niin austeniittisilla kuin super-duplex -teräksellä hyvin samankaltaiset, mutta vain niiden suhteet vaihtelevat.

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien tyypilliset seosaineiden paino-%. Muokattu lähteestä. (Lukkari;Kyröläinen;& Kauppi, Hitsauksen materiaalioppi, 2016, s. 175)

	<b>EN</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
<b>316</b>	1.4401	0,04	17,2	10,2	2,1
<b>904L</b>	1.4539	0,02	20	24	4,5
<b>2507</b>	1.4410	0,02	25	7	4,0

### 3 JUURISUOJATAHNAT

#### 3.1 Yleistä

Juurisuojatahnan tehtävänä on toimia hitsauksen aikana juuren puolen suojana silloin, kun juuren puolelle ei ole asetettu suuria vaatimuksia. Juurisuojatahnat sekoitetaan liottimeen ja levitetään suojattavaan pintaan ennen sovituksia ja silloituksia. Kuumentuessaan ja sulaessaan juurisuojatahna muodostaa kuonaa muistuttavan suojan hitsausliitoksen juureen suojaten sitä ympäröivältä hapelta. (Lukkari, Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus, 2002, s. 268)

Juurisuojatahnat on tarkoitettu käytettäväksi niukkaseosteisten tai ruostumattomien terästen hitsauksen aikana, ja niitä käytetään etenkin erilaisten putkien hitsauksien yhteydessä. Juuren suojauksella pyritään estämään ruostumattomien teräksien hitsauksen aikana syntyvä hapettuminen. Hapettumista tapahtuu esimerkiksi, kun ruostumatonta terästä hitsataan ja lämpötila on korkea. Tästä kerrotaan luvussa 2.

Juurisuojatahnat eivät kuitenkaan voi korvata juurikaasua, sillä korroosionkestävyys jää tahnaa käytettäessä heikommaksi kuin juurikaasua käytettäessä, mutta antaa kuitenkin paremman suojan hapettumista vastaan kuin täysin suojaamaton juuri. (Lukkari, Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus, 2002, s. 268)

Myös juurisuojatahnat, kuten muutkin EU-alueella myytävät kemikaalit, on luokiteltu CLP-asetuksen mukaisesti. CLP tulee sanoista "Classification, Labeling and Packaging" eli "Luokitus, Merkinnät ja Pakkaaminen". Kemikaaleille on annettu niiden luokitusta vastaavat varoitusmerkinnät. Ne annetaan tarkkojen kriteerien perusteella ja ne kuvaavat kemikaalien keskeisimmät fysikaalis-kemialliset vaarat sekä terveys- ja ympäristövaarat. Vaaralausekkeet eli H-lausekkeet ovat avuksi vaarojen tunnistamisessa. Vaaralausekkeet on merkitty tuotteiden käyttöturvallisuustiedotteisiin. (Työterveyslaitos, ei pvm)

CLP-asetuksen rinnalla on myös REACH-asetus, joka on lyhenne sanoista "Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals" eli "Kemikaalien rekisteröinti, Arviointi, Lupamenettelyt ja Rajoitukset". REACH-asetus säätelee kemiallisten aineiden riskinhallintaa ja sen tavoitteena on antaa tietoa aineiden terveyteen ja turvallisuuteen kohdistuvista vaikutuksista sekä niiden turvallisuudesta käsittelystä. (Työsuojeluhallinto, ei pvm)

#### 3.2 Juurisuojatahnojen koostumus ja turvallisuus

Taulukkoon 2 on koottu tutkimuksessa käytettyjen juurisuojatahnojen ainesosat ja niiden ilmoitetut määrät tuotteissa.

Taulukko 2. Juurisuojatahnojen koostumukset (Rautiainen, 2024)

	<b>Ainesosien pitoisuudet (%)</b>		
<b>Ainesosa</b>	ESAB Stainflux	Kjellberg Root Flux	Polar-Flux
<b>piidioksidi (SiO<sub>2</sub>)</b>	35–45	2,5–10	-
<b>kalsiumhydroksidi (Ca(OH)<sub>2</sub>)</b>	25–35	-	-
<b>kalsiumfluoridi (CaF<sub>2</sub>)</b>	-	10–25	-
<b>titaanidioksidi (TiO<sub>2</sub>)</b>	10–20	2,5–10	-
<b>mangaanidioksidi (MnO<sub>2</sub>)</b>	9–10	2,5–10	3–5
<b>boorihappo (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)</b>	-	10–25	20–25

Pääasiassa juurisuojatahnat koostuvat piidioksidista (SiO<sub>2</sub>) eli kvartsista, kalsiumhydroksidista (Ca(OH)<sub>2</sub>), titaanidioksidista (TiO<sub>2</sub>) ja mangaanidioksidista (MnO<sub>2</sub>). Joissain tuotteissa on käytetty kalsiumhydroksidin tilalla kalsiumfluoridia (CaF<sub>2</sub>), kuten esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyssä Kjellberg Root Flux-juurisuojatahnassa. Lisäksi joissain tuotteissa on puhdistavan ominaisuuden omaavaa boorihappoa (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>).

Piidioksidi on hengitettynä haitallista keuhkoille ja voi aiheuttaa toistuvassa altistuksessa keuhkosairauksia, kuten esimerkiksi silikoosia. (Työterveyslaitos, ei pvm)

Kalsiumhydroksidi on voimakkaasti emäksinen ja siksi ärsyttävä aine, minkä vuoksi se voi aiheuttaa muun muassa ihon, silmien ja hengityselinten syöpymävammoja ilman asianmukaista suojausta. Kuumentuessaan kalsiumhydroksidi hajoaa ja muodostaa kalsiumoksidia. (International Labour Organization, 1997)

Titaanidioksidi on väritöntä tai valkoista jauhetta ja melko vaaraton aine. Se voi altistuksessa aiheuttaa silmille punoitusta ja suojavarusteiden käyttöä suositellaan. (International Labour Organization, 2019)

Mangaanidioksidi on mustanruskeaa jauhetta, joka hajoaa yli 535°C:ssa. Hajotessaan se muodostaa mangaanioksidia ja happea, minkä vuoksi palovaaran riski kasvaa. Mangaanidioksidi on voimakas hapetin ja se reagoi voimakkaasti palavien ja pelkistävien materiaalien kanssa. Hengitettynä mangaanidioksidi voi aiheuttaa yskää, ja nieltynä vatsakipua ja pahoinvointia. Altistumisen ollessa mahdollista, on käytettävä hengityssuojaimia, suojalaseja ja suojakäsineitä. (International Labour Organization, 2003)

Kalsiumfluoridi esiintyy värittöminä kiteinä tai valkoisena jauheena. Palaessaan kalsiumfluoridi muodostaa fluoria sisältäviä myrkyllisiä kaasuja, ja aiheuttaa nieltynä pahoinvointia ja oksentelua. Suojavarusteiden käyttö on suositeltavaa ainetta käsiteltäessä, etenkin jos aine on jauheena. (International Labour Organization, 1999)

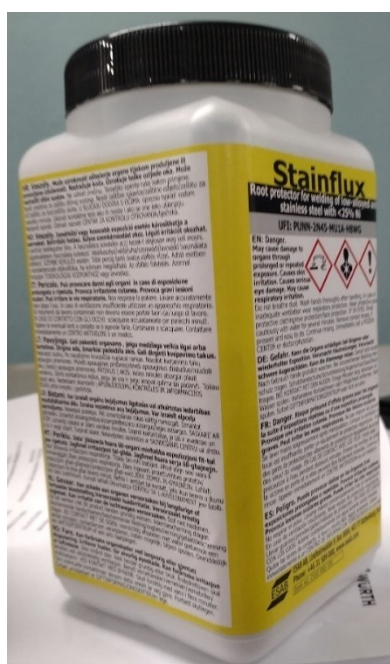
Boorihappo esiintyy värittöminä kiteinä tai valkoisena jauheena. Jo lyhyessä altistuksessa boorihappo on hengityselimiä ärsyttävää sekä voi aiheuttaa ärsytystä silmissä. Lisäksi boorihappo voi vaikuttaa keskushermostoon ja munuasiin, jolloin saattaa syntyä toimintavajetta. Palaessaan boorihappo vapauttaa myrkyllisiä kaasuja. Suojavarusteiksi suositellaan hengityssuojaimia, suojalaseja sekä suojakäsineitä. (International Labour Organization, 2014)

Suurin osa juurisuojatahnojen sisältämistä ainesosista ovat haitallisia, etenkin kun ne esiintyvät jauheena. Hengityksen suojaaminen ja riittävä ilmanpoisto jauheita käsiteltäessä on tarpeellista, sillä erityisesti hengitettynä aineet ovat vaarallisia. Lisäksi muutamissa ainesosissa on syövyttävä ominaisuus, joten ihon suojaaminen on tarpeen jauhetta käsiteltäessä. Myös käytettävän liuottimen turvallisuuseikat on hyvä huomioida.

Koska juurisuojatahnoja käytetään hitsauksen aikana, myös silloin hengityksen suojaaminen ja riittävästä ilmanvaihdesta huolehtiminen on tärkeää, sillä osa juurisuojatahnojen ainesosista synnyttää palaessaan myrkyllisiä kaasuja. Lisäksi hitsattava materiaali, etenkin ruostumattomat teräkset, päästävät ilmaan terveydelle haitallisia kaasuja, joilta on tarpeen suojautua. Tuotekohtaiset vaaralausekkeet on tuotu esiin luvuissa 3.3–3.5.

### 3.3 ESAB Stainflux

ESAB Stainflux on juurisuojatahna, joka on tarkoitettu erityisesti niukkaseosteisten ja ruostumattomien terästen TIG-hitsaukseen. Tuote näkyy kuvassa 4. Ruostumattomien terästen osalta tuote soveltuu etenkin silloin, kun hitsattavan materiaalin nikkelpitoisuus on enintään 25 %. ESAB:n verkkosivuilla kerrotaan, että tuotetta voidaan käyttää myös muissa hitsausmenetelmissä. Verkkosivujen mukaan tuote ”, jakaa lämmön tasaisesti hitsin alle ja kemiallisesti auttaa puhdistamaan sulan epäpuhtauksia”. estää oksidisulkeumat, suojaa juuripuolta hapettumiselta, estää huokosten muodostumisen, estää läpipalamisen. (ESAB, ei pvm)



Kuva 4. ESAB Stainflux -juurisuojatahna (Rautiainen, 2023)

Tuotteen käyttöturvallisuustiedotteen mukaan juurisuojatahnan koostumus on seuraava:

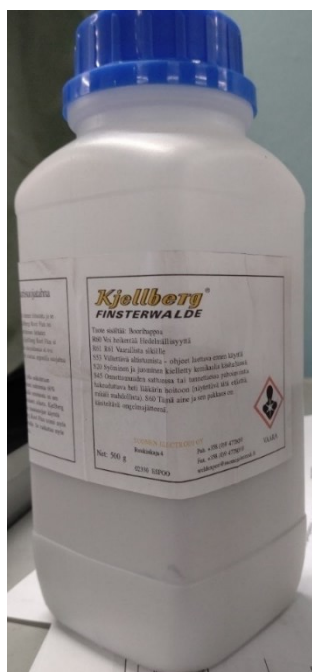
- piidioksidi (kvartsi) 35–45 %
- kalsiumhydroksidi 25–35 %
- titaanidioksidi 10–20 %
- mangaanidioksidi 9–10 %. (TA Chemistry AB, 2015)

Tämä tuote on luokiteltu ja merkitty asetuksen 1272/2008 (CLP) mukaan, ja seuraavat vaaralausekkeet on annettu käyttöturvallisuustiedotteessa:

- H373: Saattaa vahingoittaa elimiä pitkäaikaisessa tai toistuvassa altistumisessa.
- H315: Ärsyttää ihoa.
- H318: Vaurioittaa vakavasti silmiä.
- H335: Saattaa aiheuttaa hengitysteiden ärsytystä. (TA Chemistry AB, 2015)

### 3.4 Kjellberg Root Flux

Kjellberg Root Flux on juurisuojatahna, joka on tarkoitettu niukkaseosteisten ja ruostumattomien terästen TIG-hitsaukseen. Tuote näkyy kuvassa 5. Ruostumattomien terästen osalta tuote soveltuu etenkin silloin, kun hitsattavan materiaalin nikkeli-pitoisuus on enintään 20 %. Tuotteesta kerrotaan Würthin verkkosivuilla seuraavaa: "Ei korvaa juurisuojakaasua; käytetään silloin, kun suojakaasua ei voi käyttää. Suojaa juurenpuolta, muttei vastaa argonilla suojattua juurenpuolta. Poistaa oksidisulkeumia ja päästöoksiedeja hitsauksen aikana. Korvaa kaasusuojan (jos rakenne vaikeuttaa kaasusuojan käyttöä juuripuolella), teipin ja keraamisen juurituen. Toimii myös juuritukena jakamalla lämmön tasaisesti hitsin alapuolelle. Vaikuttaa myös kemiallisesti puhdistamalla hitsisulaa epäpuhtauksilta. Toimitetaan jauheena; sekoitetaan teollisuuspriihin (metanoli, etanoli) tai tislattuun veteen suhteessa 60 % jauhetta 40 % nestettä ennen hitsausta." (Würth, ei pvm)



Kuva 5. Kjellberg Root Flux -juurisuojatahna (Rautiainen, 2023)

Tuotteen käyttöturvallisuustiedotteen mukaan tuotteen koostumus on seuraava:

- boorihappo 10–25 %
- kalsiumfluoridi 10–25 %
- mangaanidioksidi 2,5–10 %
- piidioksidi 2,5–10 %
- titaanidioksidi 2,5–10 %. (Suomen Electrodi Oy, 2018)

Tämä tuote on luokiteltu ja merkitty asetuksen 1907/2006 mukaisesti, ja seuraavat vaaralausekkeet on annettu käyttöturvallisuustiedotteessa:

- H360FD: Saattaa heikentää hedelmällisyyttä. Voi vaurioittaa sikiötä.
- H332: Haitallista hengitettynä.
- H302: Haitallista nieltynä. (Suomen Electrodi Oy, 2018)

### 3.5 Polar-Flux

Polar-Flux -juurisuojarahna on ruostumattomille teräksille tarkoitettu tuote, ja näkyy kuvassa 6. Se soveltuu käytettäväksi silloin, kun hitsattavan materiaalin nikkelpitoisuus on enintään 20 %, ja hitsausmenetelmänä on joko TIG- tai MIG-hitsaus. Weldtec-verkkosivustolla kerrotaan, että ”Polar-Flux suojaa hitsisauman hapettumisen juuren puolelta, tukee hitsauksen aikana hitsaussulaa, antaa tasaisen lämmön ja hitaan jäähtymisen sekä estää haurastumista.” (Weldtec, ei pvm)



Kuva 6. Polar-Flux-juurisuojarahna (Rautiainen, 2023)

Tämän tuotteen käyttöturvallisuustiedotteessa on mainittu ainesosina vain boorihappo ja mangaanidioksidi. Edellä mainittujen ainesosien määriksi tuotteessa mainitaan boorihappoa 20–25 % ja mangaanidioksidia 3–5 %. (Somotec Oy, 2020) Muiden ainesosien määrien tietoja ei ole saatavilla.

Tämä tuote on luokiteltu ja merkitty asetuksen 1272/2008 mukaisesti, ja seuraavat vaaralausekkeet on annettu käyttöturvallisuustiedotteessa:

- H360FD: Saattaa heikentää hedelmällisyyttä. Voi vaurioittaa sikiötä.
- H332: Haitallista hengitettynä.
- H302: Haitallista nieltynä.
- H373: Saattaa vahingoittaa elimiä pitkäaikaisessa tai toistuvassa altistumisessa. (Somotec Oy, 2020)

## 4 TOTEUTUS

### 4.1 Harjoittelu

Opinnäytetyö aloitettiin harjoittelemalla ensin TIG-hitsausta, sillä opinnäytetyön tekijän kokemuk-  
tästä oli hyvin vähäinen. Harjoittelulla pyrittiin siihen, että tutkimuskappaleista saadaan mahdollisim-  
man tasalaatuisia ja vertailukelpoisia. Harjoituskappaleina käytettiin 3 millimetrin vahvuista hapon-  
kestävää ruostumatonta terästä (AISI 316), aivan kuten tutkimuskappaleissakin. Hitsausharjoituksia  
tehtiin ensin ilman lisäainelankaa ja melko nopeasti otettiin käyttöön myös lisäainelangat, sillä nämä  
olivat tarpeellisia myös tutkimuskappaleiden hitsaamisessa.

Harjoittelun yhteydessä etsittiin hitsauksen kannalta soveltuvimpia polttimen asentoja, soveltuvia  
hitsausparametreja ja testattiin hitsauskiinnittimen käyttöä kappaleiden paikallaan pitämiseksi. Hit-  
sauskiinnittimen avulla pystyttiin myös jonkin verran ehkäisemään hitsauksen aikana syntyviä muo-  
donmuutoksia sekä pitämään kappaleita paikoillaan hitsauksen aikana. Hitsauskiinnitin näkyy alla  
olevassa kuvassa 7.

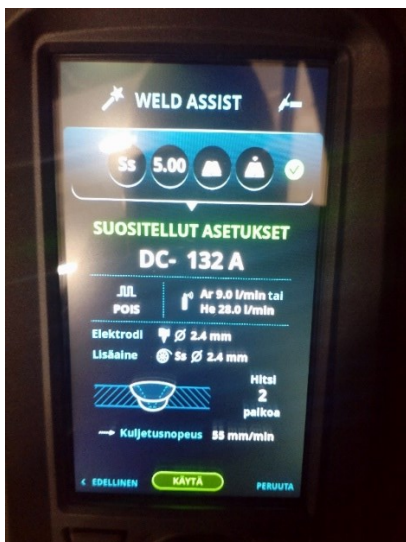


Kuva 7. Hitsauskiinnitin (Rautiainen, 2023)

Hitsausparametrien etsiminen osoittautui helpoksi, sillä TIG-hitsauskoneessa on toiminto (Weld As-  
sist), johon syöttämällä materiaalin, materiaalin vahvuuden sekä hitsausasennot, laskee kone auto-  
maattisesti soveltuvan virran määrän ja laskee sopivan kuljetusnopeuden sekä kertoo palkojen mää-  
rän kyseiselle vahvuudelle. Weld Assist -toiminnon antamat parametrit ovat nähtävissä kuvissa 8 ja  
9.



Kuva 8. Weld Assist -toiminnon tarjoamat parametrit 3 mm:n vahvuudelle (Rautiainen, 2023)



Kuva 9. Weld Assist -toiminnon tarjoamat parametrit 5 mm:n vahvuudelle (Rautiainen, 2023)

Vaikka kuvissa näkyviä arvoja voidaan hitsatessa käyttää muuttamatta niitä, päädyttiin muutamien hitsauskappaleiden jälkeen hieman nostamaan hitsausvirtaa 3 millimetrin vahvuuksilla 111 ampeerista 115 ampeeriin ja laskemaan 5 millimetrin vahvuuksilla 134 ampeerista 115 ampeeriin. Tätä 115 ampeerin virtaa käytettiin lopulta jokaisen tutkimuskappaleen hitsausvirtana, sillä kyseisellä virran määrällä saatiin sellainen hitsausjälki, joka vastasi tutkimuksen vaatimustasoa, ja oli työn toteuttajalle optimaalisin.

Palkojen määrä hitsauskoneen mukaan 3 millimetrin vahvuuksille oli yksi palko ja 5 millimetrin vahvuuksille kaksi palkoa. Koneen tarjoamista suosituksista poiketen myös 5 millimetrin vahvuiset tutkimuskappaleet hitsattiin vain yhdellä palolla, sillä jo yhdellä palolla saatiin riittävä läpisyövytys juuri-suojatahnan ominaisuuksien tutkimista varten.

## 4.2 Tutkimuskappaleet

Tutkimuskappaleiden hitsaus alkoi verrattain melko nopeasti, sillä harjoittelu tuotti hyviä tuloksia. Tutkimuksessa hitsattiin 3 millimetrin vahvuiset materiaalit päittäisliitoksella ilman ilmarakoa ja rai-  
loja, ja hitsattavien kappaleiden koot olivat noin 4 x 12 senttimetriä. Tutkimuskappaleiden koot vaih-  
telivat hieman riippuen leikkausmenetelmästä, mutta hitsattavien kappaleiden koko ei ollut tutki-  
muksen kannalta juurikaan merkittävä. Hitsattavaa pituutta kuitenkin oli oltava sen verran reilusti,  
että juurisuojatahnojen käyttäytyminen näkyy etenkin lämmön kasvaessa. Havaittiin, että kappaleen  
hitsattavan pituuden ollessa noin 10–15 senttimetriä, pituus on riittävä tutkimuksen tulosten analy-  
sointiin.

Jotta tutkimukseen saataisiin hyvä vertailupohja, hitsattiin ensin yksi hitsausliitos ilman minkään-  
laista juuren suojausta ja lisäksi tehtiin kaksi hitsausliitosta käyttäen juurikaasua (argon). Juurikaasua  
syötettiin toiseen juureen 7 litraa minuutissa ja toiseen 10 litraa minuutissa. Tuloksia analysoi-  
daan tarkemmin Tulokset-osiossa.

Ensimmäisenä materiaalina käytettiin 316:tta, lisäainelankana oli 316LSi ja juurisuojatahnan ESAB  
Stainfluxia. Tahnan käyttöä testattiin aluksi, jotta oikeanlainen koostumus löytyy. Mittasuhteita tah-  
nan jauheelle ja liuottimelle ei ole mainittu kaikissa tuotteissa, joten tahnan koostumusta etsittiin  
kokeilemalla. Ainoastaan Kjellberg Root Flux antaa tuotteessa sekoitussuhteen 60/40 prosenttia. Liu-  
ottimena käytettiin Würthin etanolipohjaista spritiä.

Juurisuojatahnojen kuivumisajoille ei ollut saatavilla ohjeita, joten kokeiltiin kolmea eri kuivumista-  
paa: huoneenlämmössä, kunnes tahnan pinta on vaihtanut värin vaaleaksi (liuotin haihtunut), kuu-  
mailmapuhaltimella nopeutettu kuivatus sekä ei kuivatusta lainkaan, vaan suoraan hitsaamaan. Tes-  
tin perusteella todettiin, että tuotteen on hyvä antaa kuivua huoneenlämmössä ainakin sen aikaa,  
että liuottimena käytetty sprii osin haihtuu ja juurisuojauksen pinta muuttuu kuivan ja matan nä-  
köiseksi. Tarkkaa aikaa ei kuivumiselle ollut ohjeistettu missään eikä tutkimuksen aikanakaan saatu  
mitään tarkkoja aikoja kuivumiselle hieman vaihtelevien paksuuksien vuoksi. Selkeä kuivumisraja  
kuitenkin oli nähtävissä tahnan pinnalla, kuten kuvassa 10 näkyy. Tämä visuaalinen havainto auttoi  
hahmottamaan hyvin tahnan kuivumista.



Kuva 10. Kuivumisraja (Rautiainen, 2023)

Samalla, kun juurisuojatahnojen kuivumista testattiin, pyrittiin toteuttamaan ohjeenmukaisesti myös tuotteen levittäminen juuripuolelle. Käyttöohjeet olivat kaikissa tämän tutkimuksen juurisuojatahnoissa lähes samanlaiset ja useimmissa tuotteissa kerrottiin, että tahnaa tulisi levittää noin 2 millimetrin paksuinen kerros, mutta suojattavan alueen laajuudesta ei mainittu erikseen. Lopulta päädyttiin suojaamaan juuren puoli tahnoilla aina noin 4 senttimetrin leveydeltä (2 senttimetriä liitoksesta molemmin puolin), jotta tahnan suojaus riittäisi kokonaan sille alueelle, jossa päästövärejä on nähtävissä. Toisin sanoen tavoitteena oli suojata alue, johon hitsauksen aikainen lämpö yltää.

Tutkimuskappaleita hitsattiin pääasiassa ensin käyttäen materiaalina 316:tta, sillä tätä oli helposti saatavilla, ja työn toteuttajan hieman lyhyen hitsauskokemuksen vuoksi helpoin materiaali hitsata. Juurisuojatahnoista oli aluksi käytettävissä ESAB Stainflux ja Kjellberg Root Flux, minkä vuoksi näiden materiaalien ja juurisuojatahnojen tutkittavat kappaleet tehtiin ensin.

Seuraavaksi hitsattavaksi materiaaliksi otettiin 904L, johon myös tehtiin tutkimuskappaleet käyttäen juurisuojatahnoina jo aiemmin mainittua kahta tuotetta. Lisäainelankana oli Avesta 904L. Harjoituskappaleita ei enää tästä materiaalista pystytty juurikaan tekemään, sillä materiaalin määrä oli hyvin rajallinen. Jokaisesta käytetystä materiaali-juurisuojatahna -yhdistelmästä pyrittiin kuitenkin tekemään vähintään kaksi tutkimuskappaletta, mikäli toinen jollain tapaa epäonnistuisi.

Tutkimuskappaleita syntyi hyvää vauhtia ja ilman suurempia haasteita, joten mukaan otettiin vielä kolmas suunniteltu materiaali: 2507 eli super-duplex. Tämän materiaalin hitsaaminen oli jo ennakkotietojen mukaan hieman haastavaa, ja tieto osoittautui todeksi. Materiaalin pienen määrän vuoksi juurikaan harjoituskappaleisiin ei ollut varaa, joten hitsaukset suoritettiin heti alusta alkaen juurisuojatahnojen kanssa. Lisäainelankana oli Thermanit 25/09. Super-duplex oli myös 5 millimetrin vahvuista, joten hitsausparametrit olivat lähtökohtaisesti hieman poikkeavat aiemmista materiaaleista. Kuitenkin, kuten jo aiemmin mainittiin, hitsauksen aikana käytettiin samaa hitsausvirtaa, ja suosituksesta poiketen hitsattiin vain yksi palko. Poikkeuksena aiempiin materiaaleihin, tämän kohdalla käytettiin V-railoa, jotta jo yhdellä palolla saadaan aikaan riittävän hyvä hitsausliitos. Muihin materiaaleihin verrattuna reilusti hitaammalla kuljetusnopeudella saatiin aikaan tutkimuksen kannalta riittävä läpikuluminen, joten tutkimusta jatkettiin näiden tietojen valossa.

Melko loppuvaiheessa edellisiä hitsauksia, saatiin käyttöön myös kolmas tutkimukseen kaavailtu juurisuojatahna, Polar-Flux. Viimeisenä vielä hitsattiin kyseisellä juurisuojatahnalla kaikkiin kolmeen materiaaliin.

#### 4.3 Hieet

Pelkkien hitsattujen tutkimuskappaleiden ohelle oli tarkoitus tehdä lisäksi hieitä, jotta voitaisiin tutkia myös mikrorakenteita. Tarkoituksena oli selvittää, vaikuttaako juurisuojatahna millään lailla mikrorakenteeseen.

Ensimmäiseksi hitsatut tutkimuskappaleet lajiteltiin materiaalin ja käytetyn juurisuojatahnan mukaan järjestykseen, minkä jälkeen valittiin sellaiset kappaleet, joista saataisiin hyvät näytepalat hieiden valmistukseen. Pääasiallisena edellytyksenä oli, että hitsausliitoksen on oltava sulanut ja tunkeuma on riittävä.



Kuva 11. Jaottelu, vasemmalta oikealle: 904L, Duplex ja 316, ylhäältä alas: Polar-Flux, Kjellberg Root Flux ja ESAB Stainflux (Rautiainen, 2023)

Kuvan 11 kappaleista leikattiin pieniä näytepaloja siten, että saatiin hieisiin sopivat kappaleet. Kuten kuvasta on nähtävissä, monista kappaleista piti leikata reunasta ensin pieni pala pois, sillä hitsausliitos ei yltänyt aivan reunaan saakka jokaisessa kappaleessa. Hieisiin käytettävien näytekappaleiden koko oli myös hieman rajoitettu, sillä näytekappaleen oli mahduttava laitteeseen, jossa itse hie valmistetaan. Näin ollen leikatut näytekappaleet olivat leveydeltään noin 1,5 senttimetriä ja pituudeltaan noin 3 senttimetriä.

Näytekappaleiksi valittiin ensimmäiseksi materiaalista 316 tehty tutkimuskappale, jossa ei ollut käytetty lainkaan juurisuojaa. Tämä valittiin siksi, että hieiden vertailun vuoksi sellainen kappale, jossa ei ole käytetty mitään juuren suojaa, olisi hyvä lähtökohta vertailulle. Toiseksi kappaleeksi valittiin samasta materiaalista tehty tutkimuskappale, mutta juurisuojana oli Kjellberg Root Flux.

Koska hieiden valmistus on hidas prosessi, päädyttiin aluksi tekemään vain kaksi näytettä, joiden analysoinnin jälkeen voitaisiin pohtia, onko lisähiellä tutkimukselle annettavanaan lisäarvoa.

Hieisiin soveltuvien näytepalojen leikkaamisen jälkeen, yksi näytepala asetettiin laitteeseen, Buehler SimpliMet 1000, jossa se puristettiin kirkkaan muovimassan sisään hyödyntäen painetta, joka laitteessa on jopa 275 baria. Valmistusaika laitteessa yhdelle hielelle oli tässä tapauksessa 18 minuuttia.

Kun näytepalat oli puristettu muovimassaan, hieiden pintaa hiottiin karkeammin tasohiomakoneella, jotta enimmäkseen muovimassat sekä näytepalojen leikkausjäljet saatiin poistettua. Tämän jälkeen hieet vesihiottiin noin 20 Newtonin voimalla Buehler Alpha -laitteella, jotta tutkittavan näytteen pinta saadaan naarmuttomaksi. Vesihionta suoritettiin tässä tapauksessa aloittaen vahvuudesta P240 ja aikaa tähän käytettiin noin 5 minuuttia. Seuraavaksi vesihiottiin P500 -vahvuudella noin 10 minuuttia, jotta

edellisen vaiheen jäljet saadaan varmasti hiottua pois. Kaksi viimeistä vesihiontaa suoritettiin P800- ja P1200 -vahvuuksilla, ja molempiin käytettiin aikaa noin 5 minuuttia. Viimeiseksi tehtiin vielä kiillotus P4000 -vahvuudella ja veden avustuksella noin 5 minuutin ajan.

Jotta tutkittava pinta saataisiin mahdollisimman puhtaaksi kaikista epäpuhtauksista, tehtiin näytekappaleille lopuksi syövytys. Syövytyksessä hieen pintaa liuotettiin syövytysnesteessä, joka sisältää vettä ( $H_2O$ ), kuparisulfaattia ( $CuSO_4$ ) ja suolahappoa ( $HCl$ ). Syövytysneste (etsausneste) on nimeltään Marble's Reagent. Kyseisellä liuksella oli jo aiemmin tehty Savonia-ammattikorkeakoulussa tutkimuksia nimenomaan ruostumattomien terästen syövytyksiin liittyen ja todettu liuoksen toimivan hyvin.

Syövytysnestettä kaadettiin matalaan lasiseen astiaan, jonka jälkeen näytekappaleen syövytettävää pintaa pidettiin liuoksessa noin 5–10 sekunnin ajan. Tämän jälkeen pinta kuivatettiin nopeasti hius-tenkuivaajan avulla. Syövytyksen jälkeen oli tärkeää, ettei syövytettyyn pintaan enää kosketa, jotta siihen ei tartu epäpuhtauksia, ja mikrorakenne näkyy selvästi mikroskoopissa. Lopulliset hieet näkyvät kuvassa 12.

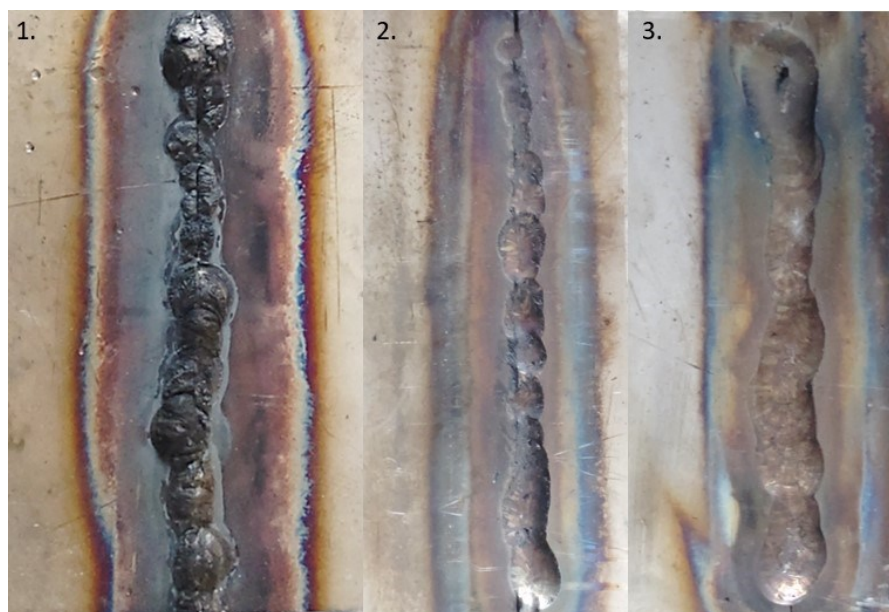


Kuva 12. Valmiit hieet. (Rautiainen, 2024)

## 5 TULOKSET

Juurisuojatahnoista on yleisesti melko vähän tietoa saatavilla. Hakukoneet eivät tuota juurikaan tuloksia aiheesta, ja tulokset ovat pääasiassa vain erilaisia juurisuojatahnojen myyntisivustoja. Tarkempaa tietoa tuotteiden käyttämisestä ja ominaisuuksista ei hauilla saa. Myöskään kyselyt muutama yrityksiin koskien juurisuojatahnojen käyttöä ei antanut lisätietoa, sillä yrityksissä, joihin otettiin yhteyttä aloitusvaiheessa, juurisuojatahnoja ei käytetä. Tämä voi johtua siitä, että usein yrityksissä toteutettavat ruostumattomien terästen hitsaukset voidaan suorittaa siten, että juuren puoli voidaan suojata kaasulla, sillä hitsattavat kohteet ovat irrallisia ja niitä on mahdollista liikuttaa. Teollisissa ympäristöissä tilanne on toinen, kun putkilinjat ovat jo kiinteästi paikoillaan ja/tai niihin tehdään korjaavia toimenpiteitä. Hitsattavat kohteet tällaisissa ympäristöissä voivat olla vaikeasti luokse päästäviä ja usein monen eri kokoisia ja vahvuisia, minkä vuoksi juuren suojaus voi vaatia onnistuakseen tilanteen mukaan valitun juurensuojausmenetelmän, joka voi olla esimerkiksi juuren kaasuttaminen, juurisuojatahna tai juurensuojateippi.

Tutkimuksen alkuvaiheessa suoritettiin hitsauksia materiaalille 316 ilman juurisuojatahnaa ja sen sijaan käytettiin juurikaasua. Tarkoituksena oli tutkia, millainen vaikutus juurikaasun käytöllä juurensuojauksena on, sekä verrata tuloksia myöhemmin juurisuojatahnoilla saatuihin tuloksiin. Kuvassa 13 näkyy tehtyjen hitsauksien tulokset.



Kuva 13. AISI 316: 1. ilman juurikaasua, 2. juurikaasu argon 7 l/min, 3. juurikaasu argon 10 l/min (Rautiainen, 2024)

Kuvassa 13 näkyvä ensimmäinen tutkimuskappale hitsattiin täysin ilman juurikaasua, jonka jälkeen juurikaasu otettiin käyttöön ensin syötöllä 7 litraa minuutissa, ja toiseksi 10 litraa minuutissa. Juurikaasulla havaitaan selvästi olevan vaikutusta juuren puolen laatuun. Ilman juurikaasua juuri jäi rosoiseksi ja tummaksi, sekä hapettuminen näkyi paljon voimakkaammin. Korroosion muodostuminen

tällaiseen pintaan alkaisi paljon todennäköisemmin kuin muissa tapauksissa. Juurikaasua käytettäessä hapettuminen oli päästövärien perusteella vähäisempää ja juuren pinta jäi selkeästi paremman laatuiseksi. Vaikka juuren pinta oli tasaisempi ja hapettuminen vähäisempää, tämä ei poissulje juuren jälkikäsitteilyn tarvetta.

## 5.1 Juurisuojatahnojen käyttöominaisuudet ennen hitsausta

Tutkimustyötä tehdessä havaittiin, että visuaalisesti tarkasteltuna kaikki kolme käytettyä juurisuojatahnaa, olivat melko samannäköisiä. Kaikki tuotteet olivat vaaleanharmaata jauhetta ja hyvin hienojakoista, mikä pystyttiin hyvin havaitsemaan herkästä pölyntyymisestä ilmaan tuotteiden sekoitusvaiheessa.

Koska tuotteet pölyntyvät helposti, oli huomioitava turvallisuusseikat, eli ennen sekoitusta varmistettiin ilmanvaihto sekoituspaikalla, joten sekoituksen aikana käytettiin kemikaalikaappia tai liikuteltavaa kohdeimuria. Lisäksi puettiin ihoa suojaava vaatetus, jotka tässä tapauksessa olivat käsineet ja pitkähihainen paita tai takki. Silmien suojaamiseksi käytettiin suojalaseja ja pidettiin tuotteet sekoitusvaiheessa riittävän kaukana kasvojen alueelta. Juurisuojatahnojen haittavaikutuksista ja turvallisuusriskeistä on kerrottu kohdassa 3.2.

Juurisuojatahnan jauheen ja spriin sekoittaminen pienissä määrissä oletettujen tai mainittujen sekoitussuhteiden (60/40) mukaan oli melko vaikeaa. Lisäksi haasteellista sekoittamisessa oli spriin haihtuminen jo sekoituksen aikana, joten sitä lisättiin jauheeseen pieniä määriä kerrallaan. Pieniä määriä lisäämällä tahnan koostumusta oli helppo seurata eikä liiallinen spriin määräkään ollut ongelma, sillä sen haihtuessa hiljalleen pois, tahnan koostumus muuttui jähmeämmäksi. Tämän perusteella voitaisiin päätellä, että ohjeistettu sekoitussuhde on vain suuntaa antava, ja kyseisellä sekoitussuhteella ollaan melko lähellä oikeaa juurisuojatahnan koostumusta. Koska sekoituksessa käytetty sprii haihtui, valmis tahna myös kuivui melko nopeasti. Mikäli tahnaa tarvittiin lisää, kokeiltiin tutkimusmielessä sekoittaa jo kuivuneeseen tahnaan spriitä, jolloin tahnasta sai huolellisen sekoittamisen jälkeen täysin käyttökelpoista. Tutkimuksen aikana ja tahnojen sekoitusvaiheessa ei käytetty mittavälineitä jo aiemmin mainittujen pienien määrien vuoksi. Tahnat sekoitettiin puhtaaseen spraymaalipullon korkkiin käyttäen apuna pitkää ruuvia. Ruuvin avulla kokkareistakin tahnaa voitiin painella korkin pohjaa vasten ja tahnasta saatiin tasaista.

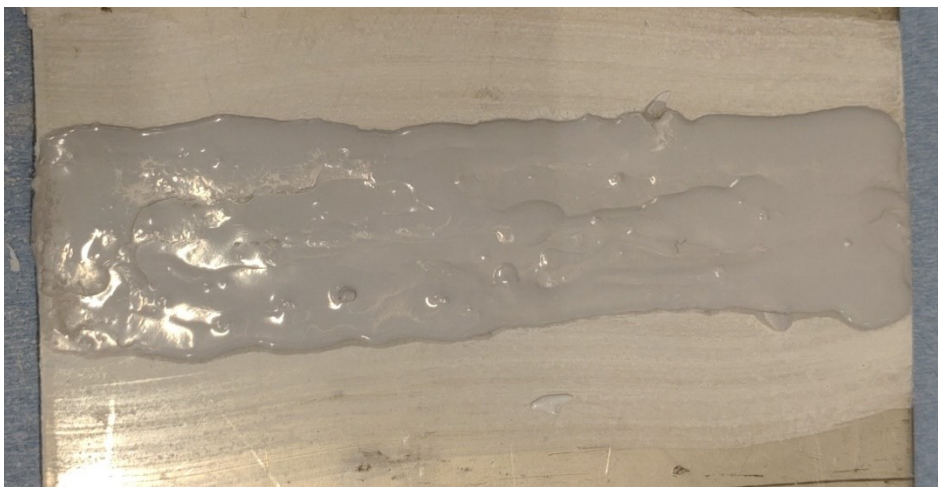
### 5.1.1 ESAB Stainflux

Levitysvaiheessa tuotteissa havaittiin eroja. ESAB Stainflux -juurisuojatahnaa levitettäessä sen koostumus osoittautui sellaiseksi, että tuotteen levittäminen juurisuojaksi oli melko haastavaa. Tuotetta levitettiin aluksi pensselin avulla, mutta tahna jäi enimmäkseen pensseliin kiinni eikä tarttunut helposti suojattavaan materiaaliin. Stainflux vaikutti olevan muihin käytettyihin verrattuna kaikkein hienojakoisin, mikä luultavasti osaltaan vaikutti myös sen käytettävyyteen. Tahnan lisääminen juurisuojattavaan kohteeseen oli vaikeaa, sillä uutta tahnaa lisättäessä edellinen laitettu tahna tuntui tarttuvan aina mukaan, jolloin niin uusi kuin vanhakin tahna irtosi kohteesta. Koska tämän tahnan levittäminen oli haastavaa, oli myös jälki ulkonäöllisesti heikkoa, kuten kuvasta 14 näkyy. Tahnan käsittävyyden vuoksi oikean määrän eli 2 millimetrin paksuuden saavuttaminen oli vaikeaa, ja paksuuteen tuli suuria eroja eri kohdissa. Tahnaan kokeiltiin lisätä hieman enemmän spriitä, jotta tahna

tasoittuisi levitettävälle pinnalle paremmin. Tämä tuotti hieman paremman käsiteltävyyden, mutta haittapuolena oli todella ohut ja juokseva tahna. Ulkonäöllisesti sekä leveyden osalta saatiin parempia tuloksia, kuten kuvasta 15 näkyy. Juurisuojatahnan suojaavaa aluetta pystyttiin hallitsemaan paremmin suuremman liuotinmäärän ansiosta, ja näin ollen saatiin tahnaa halutulle alueelle.



Kuva 14. ESAB Stainflux levitettyinä (Rautiainen, 2023)



Kuva 15. ESAB Stainflux levitettyinä suuremmalla liuotinmäärällä (Rautiainen, 2023)

### 5.1.2 Kjellberg Root Flux

Kjellberg Root Flux -juurisuojatahna oli visuaalisesti hyvin samanlainen kuin ESAB Stainflux. Väri oli vaaleanharmaa ja jauhe hienojakoista. Jauhe oli hieman karkeampaa kuin ESAB Stainflux ja jauheen seassa näkyi myös valkoista jauhetta, joka todennäköisesti oli boorihappoa, jota tässä tahnassa oli poiketen ESAB Stainflux -juurisuojatahnasta.

Oikeanlaisen koostumuksen löytäminen sekoitusvaiheessa oli huomattavasti helpompaa tämän juurisuojatahnan osalta. Vähitellen spritiä lisäämällä jauheen sekaan, voitiin jälleen hieman kokeilemalla

löytää sopiva koostumus, jotta tahnan levittäminen hitsattavan materiaalin pintaan olisi mahdollisimman helppoa. Sekoitussuhde 60/40 oli mainittu ainakin Würthin verkkosivuilla, mutta tarkan suhteen arvioiminen jälleen oli vaikeaa pienien määrien vuoksi.

Sekoitetun tahnan käyttäminen oli huomattavasti helpompaa kuin ESAB Stainflux -juurisuojatahnan ja rakenne vaikutti hieman karkeammalta. Valmis tahna oli helppo levittää hitsattavan materiaalin pintaan eikä tahnan lisääminen aiheuttanut ongelmia. Tahnaa lisätessä aiemmin levitetty tahna ei tarttunut mukaan, vaan tahnat liukenivat toisiinsa. Juurisuojatahnan levittäminen oli spriiin haihtumisen vuoksi suoritettava melko nopeasti, ettei tahna ehtinyt kuivua sekoitusastiaan tai materiaalin pintaan, mutta riittävällä nopeudella suoritettuna tahna levittyi ja asettui hyvin. Lisäksi tämäkin tahna pystyttiin elvyttämään sekoitusastiaan kuivuessaan spriiin avulla uudelleen tasaiseksi ja käyttökelpoiseksi tahnaksi. Juurisuojatahnan paksuuden hallinta onnistui helposti, sillä valmis tahna oli sen verran jäykkää, että jo yhden kerroksen levittämällä saatiin suoraan haluttu paksuus. Leveyden osalta tahnan hallinta oli myös helppoa jo aiemmin mainitun yhteen liukenemisen ansiosta.



Kuva 16. Kjellberg Root Flux kuivana ja juuri levitetynä (Rautiainen, 2023)

Kuivumisen osalta käytettiin samaa visuaalisen havainnoinnin keinoa, eli seurattiin spriiin haihtumista, pinnan muuttumista matakasi ja värin muuttumista vaaleammaksi. Väriero näkyy kuvassa 16. Poikkeuksena aiempaan juurisuojatahnaan, Root Flux alkoi kevyesti halkeilla kuivuessaan. Tämän vuoksi hitsattavien kappaleiden liikuttelun kanssa tuli olla hieman varovainen, ettei kuivunut tahna irtoa ennen hitsausta ja jätä juuren puolta suojaamatta. Tutkimuksen aikana kuitenkin havaittiin,

että kuivunut tahna pysyi hyvin paikoillaan liikuttelujen aikana halkeilusta huolimatta, mikäli tutkimuskappaleita ei kolhittu liiallisesti. Vielä kuivumisenkin jälkeen tutkimuskappaleet voitiin kiinnittää hitsaustukeen ja tahna vaikutti pysyvän hyvin kiinni materiaalin pinnassa.

### 5.1.3 Polar-Flux

Kolmas tutkimuksessa käytetty juurisuojatahna, Polar-Flux, oli visuaalisesti tarkasteltuna kahden edellisen kaltainen. Jauhe vaikutti hienojakoiselta ja oli väritään vaaleanharmaata, hieman vaaleampaa kuin Kjellberg Root Flux. Vaikka tässäkin tuotteessa oli mukana boorihappoa, ei tämä näkynyt jauheessa yhtä selkeästi kuin edellisessä tuotteessa, Kjellberg Root Flux -juurisuojatahnassa.

Polar-Flux-juurisuojatahnan levitys ja käyttö oli hyvin samanlaista kuin Kjellberg Root Flux -juurisuojatahnan. Valmis tahna oli helppo levittää halutulle alueelle, ja lisätessä tahnaa uusi tahna liukeni hyvin edelliseen levitettyyn tahnaan. Vaikka tahna oli melko juoksevaa, se tarttui materiaalin pintaan hyvin, eikä levinnyt liian laajalle alueelle. Paksuuden hallinta oli helppoa tämänkin tahnan kanssa, sillä yhdellä levityksellä päästiin haluttuun paksuuteen. Sekoitussuhde arvioitiin vain kokeilemalla eikä mittavälineitä käytetty.

Kuivuuksaan Polar-Flux muuttui vaaleamman sävyiseksi spriin haihtuessa ja kuivumista oli helppo seurata. Kuivunut tahna vaikutti pysyvän tiukasti kiinni materiaalin pinnassa liikuttelusta huolimatta.

## 5.2 Juurisuojatahnojen käyttäytyminen hitsauksen aikana

Juurisuojatahnoissa havaittiin hitsauksen aikana muutamia eroja. ESAB Stainflux -juurisuojatahnan kanssa oli ongelmia hitsauksen aikana, sillä tahna ei pysynyt kiinni ensimmäiseksi käytetyn materiaalin (316) pinnassa, vaan tippui osittain tai kokonaan pois. Irronneen tahnan voi nähdä kuvasta 17.



Kuva 17. Hitsauksen aikana irronnut tahna. (Rautiainen, 2023)

Kesken hitsauksen irronnut tahna herätti ajatuksia siitä, suojaako tahna juuren puolta riittävästi, koska se ei pysy kiinni materiaalissa hitsauksen aikana. Lämmön vaikutuksesta tahna ilmeisimmin kuivui ja erittäin hienojakoinen rakenne aiheutti sen, ettei tahna enää pysynyt kiinni materiaalin pinnassa.

Kjellberg Root Flux ja Polar-Flux vaikuttivat pysyvän kiinni materiaalin pinnassa hitsauksenkin aikana. Molemmissa tapahtui pientä tahnan murenemista, luultavasti korkean lämpötilan ja voimakkaan kuivumisen vuoksi, mutta edellisen tahnan tavoin ei kumpikaan näistä irronnut. Molemmissa jälkimmäisissä tahnoissa jo jauheen rakenne oli hieman erilainen verrattuna ESAB Stainflux -juurisuojatahnaan. Lisäksi tahnaksi sekoitettuna kaksi jälkimmäistä juurisuojatahnaa olivat erilaisia käyttä, kuten luvuissa 5.1.2. ja 5.1.3. kerrotaan.

Jo juurisuojatahnojen sekoitusvaiheessa huomattujen erojen vuoksi, voitiin odottaa hieman eroavaa käyttäytymistä myös hitsauksen aikana. Ensimmäiseksi käytetty ESAB Stainflux havaittiin helposti syttyväksi. Tahna vaikutti syttyvän melko herkästi ja paloi pienellä vihreän sävyisellä liekillä koko hitsauksen ajan. Taulukossa 2 esiteltiin aiemmin juurisuojatahnojen koostumuksia, ja näistä kyseinen tahna sisältää mangaanidioksidia, joka hajoaa jo 535 °C:ssa. Mangaaniyhdisteet palavat vihreällä liekillä, mihin tämäkin palo viittasi.

Tuotteen kuivumisella ei ollut suurta vaikutusta palamiseen. Vaikka levitetyn tahnan annettiin kuivua pitkään ja voitiin sen olettaa olevan täysin läpi kuivunut, siltikin palaminen havaittiin vähintään siinä vaiheessa, kun hitsausta oli jo suoritettu hetken aikaa. Voimakkaimmin palamista tapahtui, kun juurisuojatahnaa kokeiltiin hitsata suoraan levittämisen jälkeen, jolloin se oli vielä märkää.

Kjellberg Root Flux -juurisuojatahnan palamista selkeällä liekillä ei havaittu missään vaiheessa. Hitsauksen aikana syntyi kuitenkin voimakkaasti visuaalisesti havaittavaa kaasua, joka kemikaalitietojen perusteella oli haitallista. Ilmanvaihtoon piti kiinnittää erityistä huomiota tämän tuotteen kohdalla voimakkaan kaasun muodostumisen vuoksi.

Polar-Flux -juurisuojatahnan kohdalla selkeää palamista tapahtui myös. Liekin väri jäi havaitsematta, sillä tahnan palaminen loppui samaan aikaan, kun hitsaaminen lopetettiin. Hitsausmaskin takaa liekin väriä oli vaikea erottaa. Liekin pystyi kuitenkin tuntemaan hitsauskäsineiden läpi, sillä lämmön määrä oli paljon suurempi kuin pelkästään hitsaamisesta aiheutuva lämpö. Palaminen alkoi usein vasta puolessa välin hitsaamista ja loppui, mikäli hitsaaminenkin loppui. Kaasuja muodostui melko paljon myös tämän tuotteen käytön aikana.

### 5.3 Juurisuojatahnojen käyttäytyminen hitsauksen jälkeen ja vaikutukset juurensuojaukseen

Hitsauksen suorittamisen jälkeen tutkimuskappaleet voitiin irrottaa hitsauskiinnitimestä ja tarkastella, kuinka juurisuojatahnat ovat käyttäytyneet hitsauksen aikana sekä kuinka ne mahdollisesti käyttäytyvät vielä jäähtyessään.

Kuten jo aiemmin mainittiin, ESAB Stainflux -juurisuojatahna irtosi hitsauksen aikana, minkä vuoksi tämän juurisuojatahnan kohdalla tarkasteltavaa ei enää hitsauksen jälkeen ollut tahnan osalta. Kjellberg Root Flux ja Polar-Flux tarttuivat materiaalin pintaan todella tiukasti, ja hitsauksen jälkeen molemmissa tahnoissa oli havaittavissa rakeita. Kuivumisvaiheessa havaittu halkeilu näkyi Kjellberg Root Flux- juurisuojatahnan osalta vielä hitsauksen jälkeenkin, mutta halkeilulla ei havaittu olevan vaikutusta tahnan pysyvyyteen materiaalin pinnassa. Juurisuojatahnojen erot hitsauksen jälkeen näkyvät kuvassa 18.



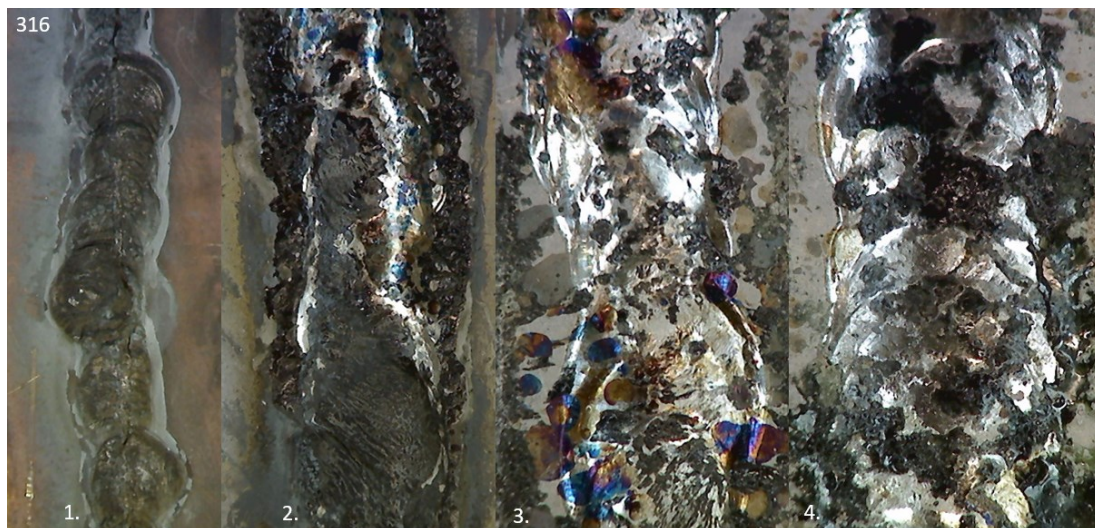
Kuva 18. Juurisuojatahnan hitsauksen jälkeen: 1: ESAB Stainflux, 2: Kjellberg Root Flux, 3: Polar-Flux. (Rautiainen, 2024)

Kuvan 18 perusteella nähdään, että tahnan levittämällä tarpeeksi leveälle alueelle, voidaan hieman hallita päästövärien syntymistä eli hapettumista. Näin ollen voidaan myös päätellä, että juurisuojatahnalla on positiivinen vaikutus hapettumisen ehkäisyssä, sillä se hillitsee oksidikerroksen muodostumista hitsauksen aikana.

Juuren puolta tutkittaessa hitsauksen jälkeen materiaalilla 316, havaittiin eroja myös itse juuripallossa. Koska ESAB Stainflux -juurisuojatähna pysyi heikosti paikallaan hitsauksen aikana, tutkimuskappaleissa havaittiin vastaavanlaista ulkonäköä kuin kokeessa, jossa hitsattiin ilman mitään juurisuojasta. Pinta jäi rosoiseksi eikä suojaus vaikuttanut olevan riittävä itse juuripalon kohdalla. Puolestaan Kjellberg Root Flux ja Polar-Flux tuottivat täysin erilaista jälkeä verrattuna edelliseen. Juuripalko oli peittynyt tummanvihreän, lähes mustan, kerroksen alle. Toisinaan juuripalko jäi jopa kokonaan juurisuojatahnan alle peittoon. Jäähtyessään juuripalon päällä ollut kerros alkoi halkeilla ja pieniä hippuja irtosi juuren pinnasta. Turvallisuuden vuoksi nämä tutkimuskappaleet piti jäähdyttää siten, että ne eivät aiheuttanut vaaraa ihmisille irti ponnahtelevien hippujen vuoksi.

Kun tutkimuskappaleet olivat jäähtyneet, juureen muodostunut tumma kerros irtosi osittain tai kokonaan, jonka jälkeen juuri oli hyvin nähtävillä. Voitiin havaita, että niiden juurien alla, joihin oli muodostunut tumma kerros, paljastui kirkas ja melko tasainen juuripalko. Tulokset olivat jo melko lähellä kaasulla aikaan saatujen juurien ulkonäköä. Erona näkyi kuitenkin pieniä epäpuhtauksia juuren pinnalla, jotka näkyivät erivärisinä pilkkuina juuren päällä. Kuvassa 19 näkyvät erot tahnoissa hitsauksen jälkeen: kohdissa 1 ja 2 on havaittavissa samannäköistä tummaa ja rosoista pintaa, mikä viittaa tahnan suojausten riittämättömyyteen, ja kohdissa 3 ja 4 näkyy paremmin suojautunut, kiiltävätkö juuri ja epäpuhtaudet.

Polar-Flux -juurisuojatähnaa käytettäessä epäpuhtauksien määrä oli hieman vähäisempi kuin Kjellberg Root Flux -juurisuojatähnaa käytettäessä. Lisäksi edellä mainituissa juurisuojatähnoissa on käytetty boorihappoa, joka on eräältä ominaisuudeltaan puhdistava ainesosa. Tämä voi osaltaan selittää juurien siistin ja kohtuullisen kirkkaan näköisen ulkomuodon sekä kuivuneen tahnan irtoamisen hitsauksen jälkeen.



Kuva 19. Materiaali 316: 1. Ei tahnaa, 2. ESAB Stainflux, 3. Kjellberg Root Flux, 4. Polar-Flux. (Rautiainen, 2024)



Kuva 20. Materiaali 904L: 1. ESAB Stainflux, 2. Kjellberg Root Flux, 3. Polar-Flux. (Rautiainen, 2024)

Kuvassa 20 voidaan nähdä hieman erilaisia tuloksia verrattuna materiaaliin 316. Materiaalilla 904L kaikki kolme tutkimuksessa käytettyä tahnaa ovat antaneet juuren puolelle kohtuullisen hyvän suojuksen. Myös ESAB Stainflux on toiminut tämän materiaalin kanssa melko hyvin, sillä juuren pinta on osittain kiiltävä eikä samanlaista rosoisuutta ja tummumaa ole havaittavissa, kuin aiemmassa materiaalissa. Epäpuhtauksien osuus on myös pienempi tällä materiaalilla, mutta Polar-Flux -juuri-

suojatahna on selkeästi tarttunut juuren pintaan kiinni hitsauksen aikana eikä ole kuivuessaan irronnut kokonaan. Jotta juuri saataisiin näkyviin, tulisi juuren pinta puhdistaa. Muutoin tahnoissa havaittiin vastaavanlaisia ominaisuuksia kuin edellisellä materiaalilla.



Kuva 21. Materiaali 2507: 1. ESAB Stainflux, 2. Kjellberg Root Flux, 3. Polar-Flux. (Rautiainen, 2024)

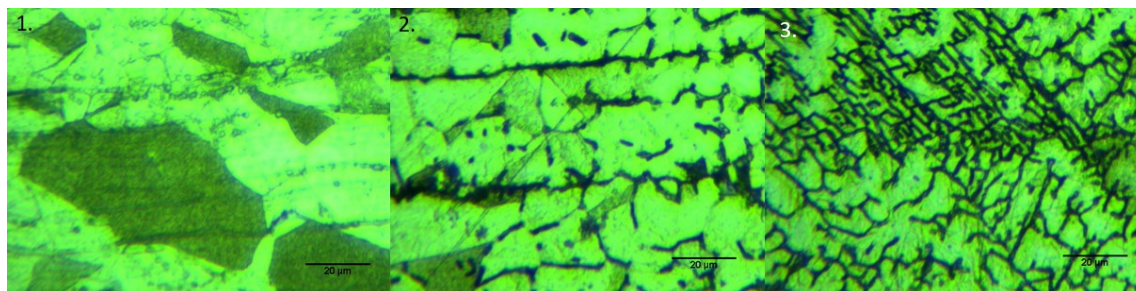
Materiaalilla 2507 tulokset hitsauksen jälkeen ovat nähtävissä kuvassa 21. ESAB Stainflux vaikuttaa jättäneen juurensuojauksen heikoksi, sillä pinta on rosainen ja hyvinkin tumma. Kjellberg Root Flux ja Polar-Flux puolestaan vaikuttavat suojanneen juuren puolta hieman paremmin, mutta tulosten arviointi tämän osalta on hieman haasteellista, sillä juuripalkoa ei juurikaan ole. Kuvasta 21 voidaan kuitenkin nähdä jälleen päästövärien puuttuminen kohdassa 3, joten juurisuojatahna on ainakin osittain toiminut tehtävänsä mukaisesti.

Juurisuojatahnojen toimivuuteen vaikuttaa tutkimuksen mukaan myös materiaali, jossa tahnaa käytetään. Tämä voitiin havaita etenkin ESAB Stainflux -juurisuojatahnan osalta, sillä materiaalisiin 316 tarttuvuus oli heikkoa, kun taas materiaaliin 904L, se vaikutti tarttuvan hyvin. Jotta juurisuojatahna voisi toimia, sen tarttuvuus on tärkeää, jottei suojaus katoa kesken hitsauksen. Lisäksi puhdistavalla boorihapolla vaikutti olevan tässä tutkimuksessa positiivinen vaikutus juuren pintaan.

#### 5.4 Mikrorakenteet

Tutkimuskappaleiden mikrorakenteiden tutkiminen aloitettiin ensin hieestä, jossa oli materiaalina 316, mutta tahnaa sekä lisäainelankaa ei ollut käytössä. Toiseksi tutkittiin hie, jossa materiaalina oli samainen 316, mutta juurensuojana oli käytetty Kjellberg Root Flux -juurisuojatahnaa sekä lisäainelankaa. Tutkimuksessa havaittiin, että juurisuojatahnan käyttöä ei voi havainnoida mikrorakenteesta. Myöskään pinnassa olevaa juurisuojatahnaa ei voinut saada näkyviin käytössä olevalla mikroskooppilla (Kern Optics), sillä hitsauksesta jäljelle jäävä tahnakkerros on niin ohut. Mikrorakenteessa ei näkynyt merkkejä juurisuojatahnasta, mutta hitsaukseen liittyviä mikrorakennemuutoksia sen sijaan voitiin tutkia.

Kuvassa 22 voidaan nähdä, kuinka mikrorakenne muuttuu tutkittaessa hitsausliitosta hieman eri kohdista. Kohdassa 1 nähdään materiaalin mikrorakenne perusaineen puolella, ja voidaan havaita austeniittikiteitä. Raekoko on melko suuri vielä perusaineen puolella, sillä lämmön vaikutus alueella on vähäisempää. Edettäessä kohtaan 2, havaitaan jo selkeämmin austeniitin hajaantumista ja dendriittien alkavaa muodostumista. Lisäksi havaitaan delta-ferriittiä, joka näkyy lähes mustana. Viimeisessä kohdassa 3 nähdään jo selkeämmin dendriittirakenne, jossa myös tummina näkyy delta-ferriittiä.



Kuva 22. Materiaali 316: 1. Perusaine, 2. Hitsin raja-alue, 3. Hitsin keskellä, suurennokset x50 (Rautiainen, 2024)

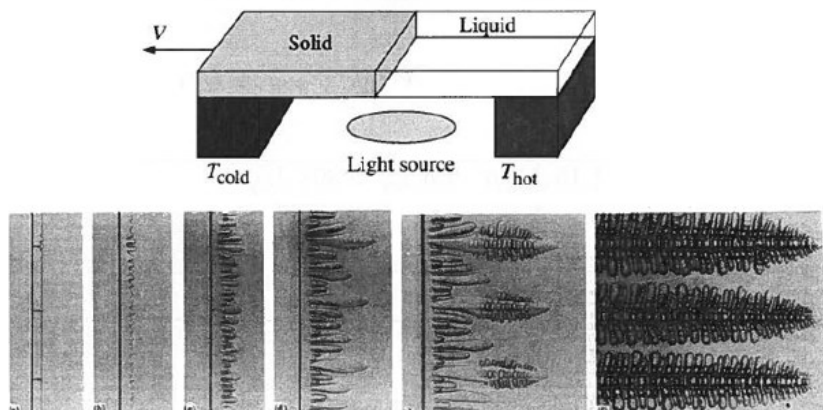
Ville Ritola kertoo diplomityössään alfa-ferriitin muodostumisesta seuraavaa: "Ferriitin muodostuminen austeniitista on erkautumisreaktio. Muodonmuutos tapahtuu korkeissa lämpötiloissa hitailla jäähdytysnopeuksilla austeniitin hajaantuessa. Ferriittikiteet ja -rakeet ydintyvät austeniitin raerajoille tai sulkeumien pinnoille heterogeenisena ydintymisenä." (Ritola, 2016)

Alfa-ferriitti muodostuu austeniitin hitaassa jäähtymisessä, kun taas delta-ferriitti on raudan korkean lämpötilan muoto, joka muodostuu jähmettyessään (matalan hiilipitoisuuden rauta-hiiliseoksissa) sulasta tilasta ennen muuttumista austeniitiksi. Joissain tapauksissa delta-ferriitti voi säilyä huoneenlämpötilaan saakka muuttumattomana. Tämä pätee runsasseosteisiin teräksiin. (TWI, ei pvm)

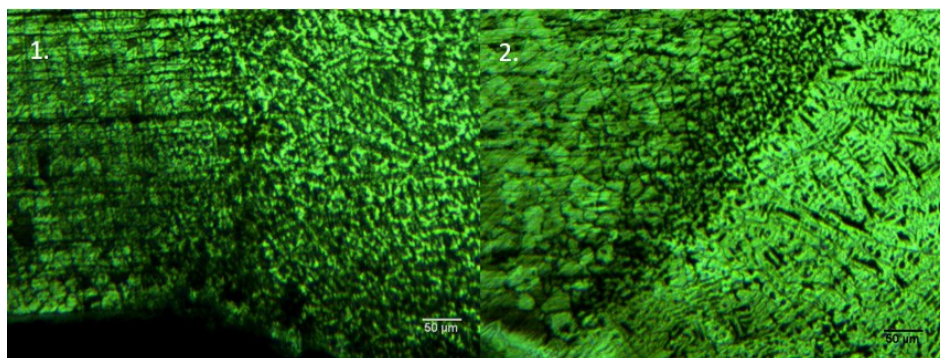
Outokummun Welding Handook -kirjassa kerrotaan, että useimmat austeniittiset ruostumattomat teräkset on suunniteltu siten, että ne jähmettyvät pääasiassa delta-ferriitiksi ja muuttuvat austeniitiksi jähmettymisen ja jäähtymisen jatkuessa. Lopullinen mikrorakenne sisältää normaalista muutamaa prosenttia delta-ferriittiä, mikä kertoo lujasta hitsausliitoksesta. Lisäksi hitsauksessa käytettävien suositeltujen lisäaineiden koostumus on usein muokattu sellaiseksi, että ne suosivat delta-ferriitin muodostumista, jotta hitsausliitoksessa välttyttäisiin murtumilta. Täysin austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä epäpuhtaudet saattavat keskittyä raerajoille, mikä altistaa hitsausliitoksen kuuma- halkeilulle. Kromikarbidiin kerääntyminen raerajoille ja sen myötä hitsausliitoksen hajoaminen austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä on sen sijaan nykyään harvinaista, sillä materiaalien ja lisäaineiden hiilipitoisuudet pidetään riittävän alhaisina ongelman välttämiseksi. (Outokumpu Oyj, 2010, ss. 18-19)

Dendriittirakenne muodostuu, kun sula jähmettyy ja sulan sekä jähmeän raja häiriintyy. Rajapinnalla tapahtuu joidenkin seosaineiden hylkimistä ja toisten suosimista, josta muodostuu dendriittimäinen mikrorakenne. Esimerkiksi nikkeli ja mangaani ovat sellaisia seosaineita, jotka suosivat austeniittia mikrorakenteessa. (Mäkinen, 2024)

Dendriittirakenteelle on ominaista, että se muodostuu kohti sulaa aluetta. Kuva 23 havainnollistaa tilannetta. Lisäksi tämä voidaan havaita kuvasta 24, jossa perusaine on vasemmalla ja hitsausliitos oikealla puolella. Kohdassa 2 näkyy selkeämmin raja, jossa hitsausliitosalkaa verrattuna kohtaan 1, jossa hitsaus suoritettiin ilman lisäainelankaa.



Kuva 23. Dendriittirakenteen muodostuminen. Muokattu lähteestä. (Dantzig, ei pvm)



Kuva 24. 10x suurennokset materiaalilla 316, vasemmalla ilman lisäainetta, oikealla lisäaine. (Rautiainen, 2024)

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön alkuvaiheessa oli paljon käytännön toteutusta. Vaikka työ aiheen varmistamisen jälkeen lähti käyntiin ripeästi, oli huomioitava työn toteutuksen kannalta tärkeä hitsaamisen harjoittelun osuus. Onneksi ohjaus oli laadukasta ja sitä oli saatavilla tarpeen tullen. Harjoittelu sujui hyvin, ja lähes huomaamatta olikin jo aika toteuttaa tutkimuskappaleita. Tutkimuksen kannalta oli tärkeää, että saatiin erilaisia vertailukappaleita, joten tämä tuli huomioida toteutuksen aikana. Vertailukappaleita tehtiin täysin ilman juurensuojausta ja lisäksi juurikaasua käyttäen. Vertailukappaleiksi tehtiin myös hitsauksia ilman lisäainelankoja, ja etsittiin vaihtoehtoisia juurisuojarahnojen kuivumismenetelmiä. Käytännön osuus vei aikaa, mutta toisaalta tämän työn pääpaino olikin nimenomaan tutkimuksen aikainen havainnointi ja analysointi.

Tutkimuksen aikana havaittiin eroja juurisuojarahnojen käyttäytymisessä niin ennen hitsausta kuin sen aikanakin. Juurisuojarahnojen jauheiden koostumuksia analysoimalla voidaan mahdollisesti selittää osaltaan erilainen käyttäytyminen. Opinnäytetyössä pohdittiin eri ainesosien vaikutusten osuutta käyttäytymiseen sekä pohdittiin myös turvallisuusseikkoja juurisuojarahnoja käytettäessä. Hitsauksen aikana tapahtuvien erojen kohdalla pohdittiin sitä, kuinka riittävä juurensuojaus lopulta kunkin tuotteen kohdalla on. Kuvien avulla on pyritty havainnollistamaan tutkimuksessa syntyneitä havaintoja ja selventämään lukijalle sen, mitä tutkimuksessa ilmeni.

Opinnäytetyön kirjoitusvaiheessa tukeuduttiin paljon lähteisiin. Monenlaisista hitsaustekniikkaan, materiaalitekniikkaan sekä kemiaan liittyvistä lähteistä haettiin faktatietoa tukemaan tutkimuksessa saatuja havaintoja sekä osaltaan selventämään tarkemmin analysointia. Etenkin mikrorakenteiden osalta lähteiden käyttö oli lähes välttämätöntä, jotta termit ja tieto tutkimuksen taustalla ovat oikein.

Aikataulullisesti työ pysyi melko hyvin alkuperäisessä suunnitelmassa, vaikka työn toteutusvaiheen ajanjaksolle osui lomakausi ja laboratorion ruuhkaisuus hidasti tutkimuskappaleiden tekemisen etenemistä. Kirjoitusosuudelle jäi suunnitelmassa aikaa melko vähän eikä asiaa helpottanut kirjoittajaa kohdannut jumiutuminen kirjoitustyön etenemisessä. Kun kirjoitusjumi viimein aukesi, teksti syntyi noin viikon sisällä jo alustavan tarkastuksen vaiheeseen. Sisältöä ja termejä korjailtiin vielä ohjaajien hyvien vinkkien avustuksella, jotta työstä saatiin viimeistelty, faktoihin perustuva ja asiallinen kokonaisuus.

Kun opinnäytetyötä suunniteltiin, oli mielessä ajatus mahdollisesta juurisuojarahnojen jatkojalostuksesta tai uudelleen kehittämisestä, mikäli tuotteissa havaitaan jotain ei-toivottuja ominaisuuksia tai käyttäytymistä. Kun tutkimustulokset ja lähdetiedot kertovat samaa tietoa siitä, että juurisuojarahna ei kykene suojaamaan juuren puolta hapettumiselta kaasun tavoin, olisi tutkimusta hyvä jatkaa perehtymällä kemiaan syvällisemmin ja pohtia mahdollisia ainesosia, joilla päästäisiin jopa kaasua vastaaviin lopputuloksiin juurensuojauksessa. Sillä juurisuojarahnan kyky suojata juuren puolta hapettumiselta on riittämätön, vaatii hitsausliitos lähes aina jälkikäsitteeksi esimerkiksi peittauksen, jolla pinnan korroosiokestävyys palautetaan. Poikkeuksena tilanteet, joissa hitsausliitokselle ei aseteta kovinkaan suuria vaatimuksia.

Opinnäytetyön aiheen vuoksi oppimista tapahtui läpi koko työn ajan, aivan ensimmäisistä hitsaus-harjoituksista opinnäytetyön kirjoituksen viimeisiin hetkiin saakka. Juurisuojarahnoista on alun alkaenkin ollut hyvin vähän tietoa saatavilla ja vaikutelmaksi on jäänyt, ettei se ole kovin yleisesti käytetty juurensuojausmenetelmä. Tästä johtuen aiheen opiskelu tapahtui pääasiassa oman tutkimustyön kautta. Opinnäytetyön aikana esiin nousseet metallurgiset seikat oli pitkälti opeteltava uudelleen ja syvennettävä tietoutta työn edetessä. Pätevän ja asiantuntevan ohjauksen ansiosta nämäkin seikat saatiin kohdalleen.

## LÄHTEET

- Alumeco Group. (ei pvm). *10 faktaa ruostumattomasta teräksestä*. Haettu 18. 12. 2023 osoitteesta Alumeco Group: <https://www.alumeco.se/fi/ruostumaton-teras/>
- Asikainen, J. (5. 9. 2022). Runsasseosteisten ruostumattomien terästen hitsaus. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta <https://www.savonia.fi/artikkelit/savonia-artikkeli-runsasseosteisten-ruostumattomien-terasten-hitsaus/>
- Crookes, R. (2004). Ruostumattoman teräksen peittäus ja passivointi. *Materiaalit ja niiden käyttösovellukset - sarja, Julkaisu 4*. Euro Inox. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/Passivating\\_Pickling\\_FI.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Passivating_Pickling_FI.pdf)
- Damstahl. (ei pvm). *Ruostumattoman teräksen seokset*. Haettu 12. 1. 2024 osoitteesta Damstahl: <https://damstahl.com/fi/tietoa-ruostumattomasta-teraeksesta/mitae-ruostumaton-teraes-on/ruostumattoman-teraeksen-seokset/>
- Dantzig, J. (ei pvm). Length Scales and Interface Balances in Solidification.
- ESAB. (ei pvm). *Stainflux*. Haettu 12. 1. 2024 osoitteesta ESAB: [https://esab.com/fi/eur\\_fi/products-solutions/product/accessories-and-consumables/general-supplies/chemical-aids/stainflux/](https://esab.com/fi/eur_fi/products-solutions/product/accessories-and-consumables/general-supplies/chemical-aids/stainflux/)
- International Labour Organization. (9. 1997). Kemikaalikortti: Kalsiumhydroksidi. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fi&p\\_card\\_id=0408&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0408&p_version=2)
- International Labour Organization. (3. 1999). Kemikaalikortti: Kalsiumfluoridi. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fi&p\\_card\\_id=1323&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=1323&p_version=2)
- International Labour Organization. (11. 2003). Kemikaalikortti: Mangaanidioksidi. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fi&p\\_card\\_id=0175&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0175&p_version=2)
- International Labour Organization. (4. 2014). Kemikaalikortti: Boorihappo. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fi&p\\_card\\_id=0991&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0991&p_version=2)
- International Labour Organization. (11. 2019). Kemikaalikortti: Titaanidioksidi. Haettu 22. 1. 2024 osoitteesta [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=fi&p\\_card\\_id=0338&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fi&p_card_id=0338&p_version=2)
- Kauppi, T. (2022). Käytännön hitsausmetallurgiaa osa 7 : Juurensuojaus ruostumattomien terästen hitsauksessa. *Hitsaustekniikka, 2022(4)*, 39-43.
- Lukkari, J. (2002). *Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus* (Neljäs painos p.). Helsinki.
- Lukkari, J.;Kyröläinen, A.;& Kauppi, T. (2016). *Hitsauksen materiaalioppi* (Osa/vuosik. Osa 1: Metallioopin perusteet, terästen luokittelu ja valmistus, rakenneterästen käyttäytyminen hitsauksessa, murtuminen ja korroosio). Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.
- Lukkari, J.;Kyröläinen, A.;& Kauppi, T. (2016). *Hitsauksen materiaalioppi* (Osa/vuosik. Osa 2: Metallit ja niiden hitsattavuus). Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.
- Mäkinen, M. (26. 1. 2024). Sähköpostikeskustelu mikrorakenteesta.

- Opetushallitus. (ei pvm). *2. Korroosionesto: Esiintymismuodot*. Haettu 22. 2. 2024 osoitteesta [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f2\\_korroosionesto\\_esiintymismuodot.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html)
- Outokumpu Oyj. (2010). *Welding Handbook*. Outokumpu Oyj.
- Ritola, V. (26. 4. 2016). Diplomityö. *Erikoisterästen aihio käsittelyt ja niiden vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin*. Oulun Yliopisto. Haettu 25. 1. 2024 osoitteesta <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201606022117.pdf>
- Somotec Oy. (2020). Käyttöturvallisuustiedote: Polar-Flux.
- Suomen Electrodi Oy. (12. 10. 2018). Käyttöturvallisuustiedote: Kjellberg Root Flux.
- Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. (2004). *Hitsauksen materiaalioppi* (4 p.). Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2. 10. 2000). SFS-EN 10020: Teräslajien määritelmät ja luokittelu. Haettu 19. 1. 2024
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2. 4. 2015). SFS-EN 10088-2: Ruostumattomat teräkset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitetut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot. Haettu 22. 1. 2024
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (21. 12. 2018). SFS-EN 1011-3: Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksat. Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus. Haettu 22. 1. 2024
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (5. 1. 2024). SFS-EN 10088-1: Stainless steels. Part 1: List of stainless steels. Haettu 22. 1. 2024
- TA Chemistry AB. (18. 4. 2015). Käyttöturvallisuustiedote: Stainflux.
- TWI. (ei pvm). *Austenite, martensite, bainite, pearlite and ferrite structures*. Haettu 25. 1. 2024 osoitteesta <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-microstructural-constituents-austenite-martensite-bainite-pearlite-and-ferrite>
- Työsuojeluhallinto. (ei pvm). *Työturvallisuuslainsäädäntö ja REACH*. Haettu 29. 1. 2024 osoitteesta <https://tyosuojelu.fi/tyoolot/kemialliset-tekijat/tyoturvallisuuslainsaadanto-ja-reach>
- Työterveyslaitos. (ei pvm). *Kemiallisten tekijöiden hallinta työpaikalla*. Haettu 29. 1. 2024 osoitteesta <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla>
- Työterveyslaitos. (ei pvm). *Kvartsi (kiteinen piidioksidi)*. Haettu 16. 1. 2024 osoitteesta Kemikaalit ja työ: Altistumistietosivusto: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/kvartsi-kiteinen-piidioksidi#toc--kvartsin-terveyshaitat>
- Weldtec. (ei pvm). *Juurensuojatähna Polar-Flux*. Haettu 13. 1. 2024 osoitteesta <https://weldtec.fi/product/568/juurensuojatähna-polarflux-075-kg>

Würth. (ei pvm). *Juurisuojarahna Kjellberg Root Flux*. Haettu 13. 1. 2024 osoitteesta Würth:  
<https://eshop.wurth.fi/Juurisuojarahna-Kjellberg-Root-Flux-JUURISUOJATAHNA-ROOT-FLUX-05KG/0893102190.sku/fi/FI/EUR/?CampaignName=CS026>