

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Jesse Litmanen

Valokaariuunin jäähdytyspaneelin kuonatartunnan hitsausliitoksen analysointi

Diplomityö

2017

71 sivua, 37 kuvaa, 9 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk
DI Ville Fomkin

Hakusanat: Valokaariuuni, tehollisen loviännityksen menetelmä, lujuustekninen analysointi, sinihauraus, metallurgia

Tämän diplomityön tutkimuskohteena oli valokaariuunin jäähdytyspaneelien vauriosyyn selvittäminen. Työn tavoitteena oli selvittää, miksi Ovakon Imatran terästehtaan valokaariuunin jäähdytyspaneelit vaurioituivat lyhyen käytön jälkeen, eivätkä saavuttaneet vaadittua kestoikää. Tavoitteena on ollut luoda laskentamallit, millä pystyttäisiin tulkitsemaan jäähdytyspaneelin käyttäytymistä ja voitaisiin määrittää suurimmat jännityskeskittymät. Kun suurimmat jännityskeskittymät saatiin paikallistettua, voitiin määrittää vaurioitumiselle syy.

Kirjallisuustutkimuksessa kerättiin tutkimustuloksia, joiden perusteella voitiin tehdä laskentamallit ja analysoida eri tekijöiden teoreettista vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen. Mallien kohdalla tehdyt yksinkertaistamiset olivat tarpeellisia, muutoin mallintaminen menee liian työlääksi. Geometrista yksityiskohtaisempaa tarkastelua suoritettiin alimallissa. Tutkimukseen koottiin kohteeseen soveltuvia vauriomekanismeja ja tutkittiin niihin johtavia syitä, joita verrattiin lähtötietoihin ja laskentaan.

FEM-laskennan tulosten tarkastelun jälkeen voitiin rajata vauriomekanismeja pois, mitkä eivät olleet kriittisiä rakenteen kannalta. Lopulta todennäköisimmäksi vaurion aiheuttajaksi tuli sinihauraus.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jesse Litmanen

Structural analysis of a welded slag insert in a cooling panel of electric arc furnace

Master's thesis

2017

71 pages, 37 figures, 9 tables, 7 appendices

Examiners: Professor Timo Björk
M.Sc. (Tech.) Ville Fomkin

Keywords: Electric arc furnaces, effective notch stress method, structural analysis, blue brittleness, metallurgy

In this master's thesis purpose was made by structural analyze an electric arc furnace cooling panels. The goal was to find out the Ovako's Imatra steel factory, why the cooling panels were damaged after short period of use and don't achieved the required life time. By creating FEM-calculation models to finding out reason for the failure and localize the highest stress concentrations. After finding out the highest stress concentrations could be determined to damage the cause.

A literature review was collected research results which give some background among whom could be made basis of calculation models and understand the theory of the behavior of the structure. Simplifications were necessary when modelled real structure. Because all reality model would have been too hard to model and it would not give extra information. Geometric detail examination was carried out by sub-model. Eventually in this research were finding out critical failure, which based theory, FEM-calculations and initial data.

After FEM-analyze and -results could be determine the failure mechanisms, which were not critical of the structure. In the end failure to the review was a metallurgical view of the conditions of use will feed out failure mechanisms. The most likely cause of failure was blue brittleness.

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää professoria Timo Björk diplomityön ohjauksesta ja hyvistä neuvoista työn aikana. Kiitän toista ohjaaja Ville Fomkinia ohjauksesta ja siitä, että hän on mahdollistanut teollisuusvierailut, toimittanut taustatietoja ja näytepaloja paneelirakenteesta. Heli Mettäselle sekä muille tutkijoille ja diplomityöntekijöille haluan sanoa kiitokset neuvoista työn eri vaiheissa. Ovakon Imatran tehdasta kiitän siitä, että antoivat diplomityöhön haastavan aiheen.



Jesse Litmanen

Lappeenrannassa, 25.1.2017

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI -JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	10
1.1	Työn taustaa ja tavoitteet	10
1.2	Rajaukset.....	11
1.3	Tutkimuskysymys	11
1.4	Tutkimusmenetelmät	11
1.5	Teräksen valmistus kierrätysteräksestä.....	12
2	TEORIATUKIMUS	14
2.1	Lämmönsiirto.....	14
2.2	Termomekaaniset ominaisuudet teräksissä.....	16
2.2.1	Estetyn lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset	19
2.3	Kuumalujat teräkset	21
2.4	Kestoiän määritelmä	22
2.4.1	Nimellisen jännityksen menetelmä	22
2.4.2	Rakenteellisen jännityksen menetelmä.....	23
2.4.3	Tehollisen lovijännityksen menetelmä	23
2.4.4	Murtumismekaniikka	25
3	VAURIOMEKANISMI TARKASTELUT	27
3.1	Korkean lämpötilan korroosio	27
3.2	Jännityskorroosio	27
3.3	Korroosioväsyminen	28
3.4	Väsyminen	28
3.5	Viruminen	29
3.6	Sitkeä murtuma	30
3.7	Haurasmurtuma.....	30
3.8	Grafitoituminen ja hilseily	31

3.9	Teräksen vanheneminen	32
3.10	Sulametallihauraus	32
3.11	Päästöhaurautus	33
3.12	Sigmahauraus ja 475°-haurautus	33
3.13	Sinihaurautus	34
4	CASE JÄÄHDYTYSPANEELI.....	35
4.1	Materiaalit	36
4.2	Viat paneeleissa	39
4.3	Paneelien kestävyuden parantaminen	39
4.4	Kriittisiä ongelmia	40
5	METODIT	44
5.1	Kirjallisuusselvitys	44
5.2	Lämpökuorman mallinnus elementtimenetelmällä	44
5.3	Elementtimenetelmä	45
5.3.1	Reunaehto	46
5.3.2	Lämpötila-analyysi ja -kuormitus	47
5.3.3	Materiaalimalli ja steppi funktio	48
5.3.4	ENS-mallintaminen	49
5.3.5	Alimalli ja globaali malli	50
5.4	Analyttinen laskenta	52
5.5	Laboratoriotutkimukset	52
6	TULOKSET	53
6.1	Laboratoriotutkimukset	53
6.2	Analyttisen laskennan tulokset	53
6.3	FEM-laskennan tulokset	53
7	POHDINTA JA PARANNUSEHDOTUKSET	61
7.1	Tulosten analysointi	61
7.2	Tutkimuksen luotettavuus, mittausmenetelmien osuvuus ja virhetarkastelu	63
7.3	Johtopäätökset ja hyödynnettävyys	65
7.4	Parannusehdotukset	65
7.5	Jatkotutkimuskohteet	66
8	YHTEENVETO	67
	LÄHTEET	68

LIITTEET

Liite I: Analyyttinen energialaskenta.

Liite II: Putkimateriaalin kemiallinen koostumus.

Liite III: Mekaaniset ominaisuudet S355 teräkselle korotetuissa lämpötiloissa.

Liite IV: Perusaineen mikrorakennekuvat

Liite V: Murtopintakuvat

Liite VI: Materiaalin epälineaariset ominaisuudet FEM-laskennassa.

Liite VII: Väsymiskestävyys laskenta

SYMBOLI -JA LYHENNELUETTELO

A	Pinta-ala	[mm]
A_I	Materiaalivakio (viruminen)	
C	Särön kasvuvakio	[(mm/sykli)/MPa \sqrt{m}]m
d	Kolon syvyys	[mm]
da/dN	Särön kasvunopeus	[mm/sykli]
E	Kimmomoduuli	[MPa]
F	Kuormittava voima	[N]
f_x	Lämpövuoto pinta-alaa kohden	[W/m ²]
h	Konvektion lämmönsiirtokerroin	[W/Km ²]
K_{TT}	Materiaalin lämmönjohtavuusmatriisi	
k	Lämmönläpäisykerroin	[W/Km ²]
l	Kappaleen pituus	[mm]
m	Parisien särönkasvulainlain kulmakerroin	
mI	Kulmakerroin	
N_f	Kestoikä	
n	Materiaalivakio eksponentti (viruminen)	
Q	Lämpökuorma	
q	Siirtyvä lämpöenergia	[W]
R_1	Sisäsäde	[mm]
R_2	Ulkosäde	[mm]
R_k	Lämmönsiirtymisen ja -johtumisen kokonaisvastus	[m ² K/W]
r	Mallinnettu pyöristyssäde	[mm]
r_{ref}	Referenssipyöristyssäde	[mm]
r_{tod}	Todellinen lovi	
T_s	Pinnan lämpötila	[K]
T_∞	Väliaineen lämpötila	[K]
t	Levynpaksuus	[mm]
α	Lämpölaajenemiskerroin	[1/°C]
α_1	Lämmönsiirtymiskerroin	
α_2	Lämmönsiirtymiskerroin	

γ_m	Osavarmuusluku	
θ	Liittymiskulma	[°]
ΔK	Jännitysintensiiteettikertoimen vaihteluväli	[MPa \sqrt{m}]
Δl	Kappaleen pituuden muutos	[mm]
ΔT	Lämpötilan muutos	[°C]
$\Delta\sigma_{c,n}$	Lovijännityksen vertailuraja	[MPa]
$\Delta\sigma_{n,ekv}$	Ekvivalenttijännitys	[MPa]
$\dot{\epsilon}$	Virumisnopeus	
λ	Lämmönjohtavuus	[W/mK]
σ	Jännitys	[MPa]
σ_b	Taivutusjännitys	[MPa]
σ_m	Kalvojännitys	[MPa]
σ_{nl}	Epälineaarinen jännityspiikki	[MPa]
EC3	Eurokoodi 3	
ENS	Tehollisen lovijännityksen menetelmä, Effective Notch Stress	
FAT	Väsymislukka	
FEM	Elementtimenetelmä, Finite Element Method	
LEFM	Lineaarielastinen murtumismekaniikka, Linear Elastic Fracture Mechanics	
HV	Vickers-kovuus, Hardness of Vickers	
IIW	International Institute of Welding	
PL4	Poikkileikkausluokka 4	

1 JOHDANTO

Teollisuudessa on tärkeää, että koneet ja tuotantolaitteet ovat ajossa täydellä kapasiteetilla eivätkä hidasta muita prosesseja olemalla turhaan huoltoseisokissa. Terästuotannossa jatkuvavalumenetelmää käytettäessä on erityisen tärkeää, ettei prosessiin tule viivytyksiä ja sen myötä häiriöitä jatkotuotantoon. Tämä tutkimus tehtiin yhteistyössä Ovakon Imatran terästehtaan kanssa.

1.1 Työn taustaa ja tavoitteet

Valokaariuunia käytetään lajitellun kierrätysteräksen uudelleensulattamiseen. Tutkimus sai alkunsa, koska valokaariuunissa käytössä olleet jäähdytyspaneelit olivat halkeilleet hitsausliitosten läheisyydestä merkittävästi ennen kuin olivat saavuttaneet suunnitellun kestoajan. Tavoitteena on muodostaa käsitys, miksi paneeleihin oli tullut vaurio ja miten vaurion syntyä voidaan hidastaa tai voidaanko se ennaltaehkäistä. Lähtökohtaisena oletuksena oli, että rakenteen geometriseen epäjatkuvuuskohtaan syntyy suuri lovijännitys ja tämä aiheuttaa vaurion.

Ovakon Imatran terästehdas valmistaa kotimaisesta kierrätysteräksestä jatkuvavalumenetelmällä pyörö- ja neliötankoja jatkokäyttöön. Tällä hetkellä Ovako on pohjoismaiden teräsvalmistajista suurimpia, jotka käyttävät kierrätysterästä raaka-aineena. Suurin osa Ovakon tuotannosta on niukkaseosteisia terästuotteita, jotka jakautuvat viiteen tuoteperheeseen. (Fomkin 2016.)

Maailmassa noin 40 % terästeollisuuden tuotteista on valmistettu kierrätysteräksestä. Terästä voidaan kierrättää loputtomasti, jolloin voidaan säästää energiaa malmin louhimisessa. Koska kierrätysterästä ei ole saatavilla niin paljon, että sillä vastataan kaikkeen teräksen kysyntään, tarvitaan myös uuden teräksen valmistusta. (Teräksen kierrättäminen 2016). Materiaalivalintaprosessi on nykyään terästuotteilla viety niin pitkälle, että voidaan ottaa huomioon ympäristövaikutukset elinkaaren läpi (Abele, Anderl & Birkhofer 2005, s. 288). Teräksen materiaalivalinnassa huomioon otettu hiilijalanjälki voidaan määrittellä malmista uudelleensulatukseen saakka. Kierrätysteräksestä valmistetulle teräkselle vastaavasti hiilijalanjälki muodostuu sulatusten välillä.

1.2 Rajaukset

Tutkimuksessa tarkastellaan valokaariuunin jäähdytyspaneelien vaurioitumista lämpökuorasta. Kimmomoduuli on mallinnettu lämpötilasta riippuvaisena. Paneelin lämpötilana on käytetty analyttisillä yhtälöillä laskettua lämpötilaa. Hitsit on mallinnettu perusaineen materiaalimallilla. Hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset on jätetty tarkastelujen ulkopuolelle. Ympäristön aiheuttamat magneettivoimat ja niistä mahdollisesti aiheutuvat värähtelyt on jätetty huomioitta tarkasteluissa.

1.3 Tutkimuskysymys

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mitkä lämpötilan vaihtelusta ja korkeasta lämpötilasta johtuvat ilmiöt aiheuttavat vaurion syntymisen hitsatun kuonatartunnan rajaviivalle. Tutkimuksessa hyödynnetään numeerista mallinnusta. Tutkimuksessa pyritään hakemaan liitoksen toteuttamiselle ja muotoilulle vaihtoehtoja, jotta vaurion syntymistä voitaisiin hidastaa tai muita sellaisia muutoksia, joilla saavutettaisiin pitempi kestoikä. Näiden tavoitteiden perusteella muodostettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mitkä ovat syyt vaurion syntymiselle?
- Voidaanko vaurion syntyminen ehkäistä?
- Miten rakenteelle saavutettaisiin parempi kestoikä?

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä tässä tutkimuksessa käytettiin kirjallisuusselvitystä ja elementtimenetelmää (FEM, Finite Element Method). Näiden lisäksi vaurioituneille osille tehtiin materiaalitarkastelua ja selvitettiin vaurioiden esiintymistä liitoksista tehtyjen hiekappaleiden avulla. Kirjallisuusselvityksellä koottiin aineistoa aikaisemmista tutkimuksista, joissa oli tutkittu lämpötilasta riippuvaisia ilmiöitä, joita voitiin soveltavin menetelmin hyödyntää tässä tutkimuksessa. Kirjallisuustutkimuksessa kartoitettiin vaurioita synnyttäviä teorioita laajemmin ja tutkimuksen edetessä pyrittiin rajaamaan vauriosyitä.

FEM-laskennalla pyrittiin havaitsemaan suurimmat jännityshuiput ja pohtimaan mallinnettujen jännitys jakaumien syntymistä sekä niiden haitallisuutta kestävyydelle. FEM-laskennan oikeellisuutta pyrittiin arvioimaan pohtimalla muodonmuutoksen oikeellisuutta FEM-malleista ja mallien muuta käyttäytymistä.

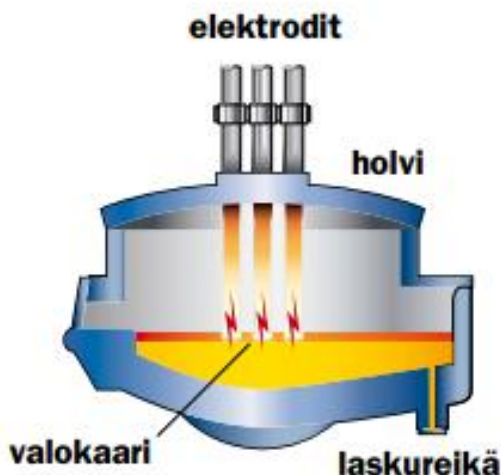
Laboratoriotutkimuksissa selvitettiin tutkimukseen toimitettujen näytepalojen koostumus. Koostumusmittauksessa selvitettiin teräksen seosaineiden osuus. Laboratoriotutkimuksessa pilkottiin liitoksia tutkien halkeamien yleisyyttä liitoksissa ja korjaustoimenpiteiden onnistumista vaurioituneissa kohdissa. Laboratoriotutkimuksessa tarkasteltiin näytekappaleiden murtopintoja visuaalisesti.

Tutkimuksessa hyödynnettiin menetelmätriangulaatiota. Triangulaatio on menetelmä, jossa käytetään kolmea toisistaan riippumatonta tutkimusmenetelmää. Triangulaation myötä tutkimuksen luotettavuutta saadaan parannettua, kun toisistaan riippumattomilla tutkimusmenetelmillä voidaan vahvistaa tutkimuksesta saatava tulos. Tutkimusmenetelmänä triangulaatio on työläs, mutta sillä on mahdollista sulkea vääriä olettamuksia pois johtopäätöksistä, verrattuna, että käytettäisiin vain yhtä tutkimusmenetelmää.

1.5 Teräksen valmistus kierrätysteräksestä

Kierrätyksessä tärkeässä roolissa on tuotteen elinkaari, joka jakautuu seuraavasti: materiaali-prosessit, tuotanto, tuotteen käyttö, hävittäminen ja uudelleen kierrätys (Abele et al. 2005, s. 4). Teräksen valmistus kierrätysteräksestä on toinen päämenetelmä valmistaa terästä mal-mipohjaisen valmistuksen lisäksi. Käytöstä poistettu kierrätysteräs toimitetaan tukkureilta terästehtaan pihalle uudelleensulatusta varten. Kierrätysteräksessä voi olla pinnoitettua ja maalattua raaka-ainetta (Fomkin 2016).

Sulatusvaiheessa selvitetään sulan koostumusanalyysi ja sulaan sekoitetaan seosaineita, jotta saadaan sulatuserälle haluttu koostumus. Kierrätysteräs panostetaan valokaariuuniin ja grafiitista valmistettujen elektrodien kautta johdetaan sähkövirtaa, jolloin kierrätysteräs-panoksen ja elektrodin välille muodostuu valokaari. Valokaaren aiheuttamalla lämmöllä saadaan sulatettua kierrätysteräs sulaksi. Sulatusvaiheessa on tavoitteena käyttää mahdollisimman vähän energiaa kierrätysteräksen sulattamiseksi ja kaatolämpötilan saavuttamiseksi (Väinölä 2008, s. 11). Valokaaren lämpötila on 4000–6000 °C. Uunien panostuskoko on 10–150 tonniin (Metallinjalostajat ry 2014, s. 36). Kuvassa 1 esitetään valokaariuunin periaatekuva.



Kuva 1. Valokaariuunin periaatekuva (Metallinjalostajat ry 2014, s. 36).

Kuvasta 1 käy ilmi, kuinka elektrodit tulevat holvista läpi. Valokaari muodostuu elektrodien kärkien ja sulan kierrätysteräksen välille. Tummempi kerros sulan teräksen pinnalla kuvastaa suojaavaa kuonakerrosta. Vaalean harmaa uunikammion seinissä kuvastaa tulenkestävää vuorausta ja jäähdytyspaneeleita. Elektrodit muodostavat kolmion ylhäältä päin katsottuna, jotta teho olisi sulatuksessa parempi.

Sulatusvaiheessa terässulaa mellotetaan eli hiili poistuu kuohuttaen ja kuplittaen kuonaa. Kuonaa sitoo epäpuhtauksia sulatetusta kierrätysterässpanoksesta. Kuonakerroksella sulan päällä on rakenteita suojaava vaikutus ja samalla kuonakerros suojaa terässulaa epäpuhtauksilta. Suojaava kuona vähentää tulenkestävän vuorauksen kulumista valokaariuunissa. Prosessista poistettu jähmettynyt kuona viedään jäähtymään, jonka jälkeen siitä erotellaan magneetilla uudelleensulatukseen kelpaava rautapitoinen aines. (Fomkin 2016.)

Käyttämällä kierrätysterästä ja sen uudelleensulatuksessa valokaariuunia, saadaan pienennettyä hiilidioksidipäästöjä. Koska valokaariuuniprosessissa ei itsessään synny hiilidioksidipäästöjä, niitä syntyy vain välillisesti. Välillisiin päästöihin otetaan huomioon sähköenergian tuotannossa syntyneet ja logistiikasta aiheutuneet päästöt. Malmipohjaisen teräksen valmistuksessa syntyy enemmän hiilidioksidipäästöjä, koska prosessissa joudutaan käyttämään hiilipitoisia raaka-aineita. Suomessa 94 % teräksestä saadaan kierrätettyä. (Metallinjalostajat ry 2014, s. 106–109.)

2 TEORIATUKIMUS

Kirjallisuuskatsauksessa haettiin lähteitä tieteellisistä julkaisuista ja kirjoista, painottaen lähdemateriaalin uutuutta ja hyödynnettävyyttä. Uutuutta haarukoitiin suosien lähdemateriaalia viimeiseltä kuluneelta kymmeneltä vuodelta, mutta käytettiin myös vanhempiakin aihepiiriin liittyviä perusteoksia, mikäli asia oli pysynyt muuttumattomana ja vastasi nykyisiä standardeja. Kirjallisuuskatsauksessa pyrittiin selvittämään, mitä tulisi tietää rakenteen vaurioitumisesta, mitoituksesta ja jäähdytyspaneelin käyttöolosuhteista, että saataisiin rakennettua FEM-malli.

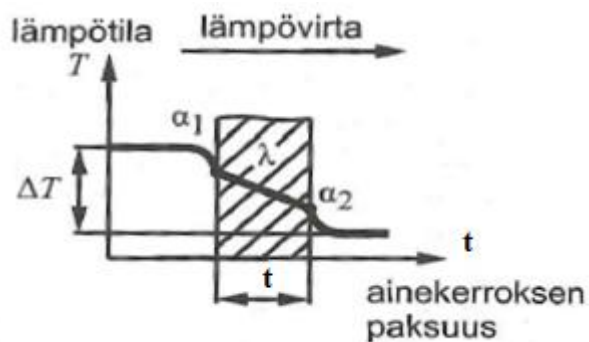
2.1 Lämmönsiirto

Lämmönsiirto jakautuu lämmönjohtumiseen, konvektioon ja säteilyyn, jotka ovat kolme erillistä tapaa siirtää lämpöä. Kiinteillä aineilla johtuminen koostuu molekyylien värähtelyistä hilarakenteessa ja energian kuljettamisesta vapaissa elektroneissa. Konvektio jakautuu vapaaseen ja pakotettuun konvektioon. (Vepsäläinen, Pitkänen & Hyppänen 2012, s. 1–5.)

Luonnollinen konvektio on kyseessä, jos se on syntynyt nostevoimasta, mikä on syntynyt lämpötilaerosta. Esimerkki pakotetusta konvektiosta on tilanne, missä virtaus on aiheutettu ulkopuolisella häiriöllä kuten puhaltimella, tuulella tai pumpulla. Konvektiolämmönsiirto tunnetaan yleisemmin Newtonin jäähtymislakina (Vepsäläinen et al. 2012, s. 4).

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Yhtälössä 1 saadaan selville siirtyvälämpöenergia q , pinta-ala A , konvektion lämmönsiirto-kerroin h , pinnan lämpötila T_s ja väliaineen lämpötila T_∞ (Vepsäläinen et al. 2012, s. 4). Konvektio lämmönsiirtokertoimen suuruuteen vaikuttaa kappaleen geometria, väliaineen käyttäytyminen liikkeessä ja väliaineen koostumus. Kuvassa 2 on esitetty lämmönsiirtyminen pinnan läpi. Kuvassa 2 ΔT on lämpötilan muutos, t on levynpaksuus, α_1 ja α_2 lämmönsiirtymiskertoimet aineesta toiseen.



Kuva 2. Lämmönsiirtyminen levynpaksuuden yli (Valtanen 2012, s. 242).

Lämmönsiirtymisessä tapahtuvia häviöitä voidaan kuvata vastusten kaltaisilla malleilla.

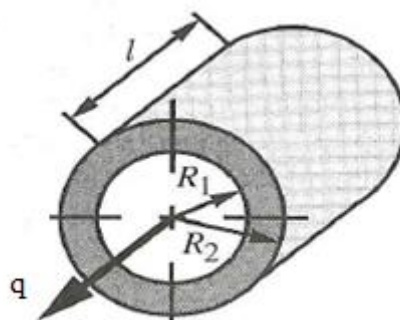
Vastusten mallintamiseen käytetään seuraavia lineaariyhtälöitä (Valtanen 2012, s. 242).

$$q = kA\Delta T \quad (2)$$

$$R_k = \frac{1}{k} \quad (3)$$

$$q = A \frac{\Delta T}{R_k} \quad (4)$$

Yhtälöissä 2–4 siirtyvää lämpöenergiaa kuvaa q , lämpötilan muutos ΔT , lämmönläpäisykerroin k ja lämmönsiirtymisen ja johtumisen kokonaisvastus R_k (Valtanen 2012, s. 242). Kuvassa 3 on näytetty esimerkki lämmönsiirtymisestä putken seinämän läpi. Kuvassa 3 R_1 on sisäsäde, R_2 on ulkosäde, l on pituus ja q siirtyvä lämpöenergia



Kuva 3. Lämmönsiirto putkessa (mukaillen: Valtanen 2012, s. 243).

Kuvan 3 mukaisesti lämmönjohtuminen putken sisältä ulospäin (Valtanen 2012, s. 243).

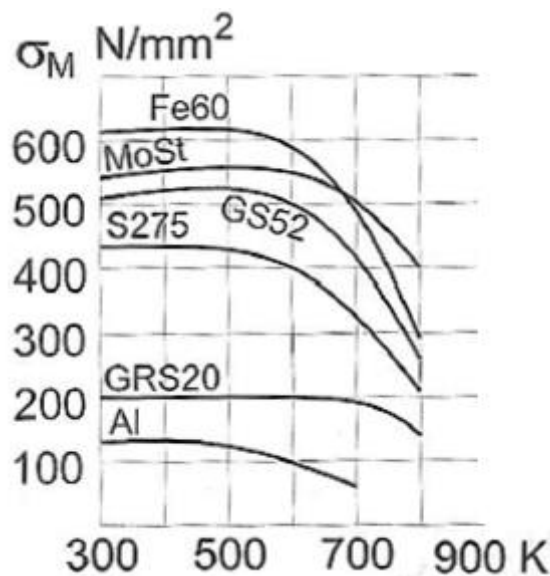
$$q = \lambda \frac{2\pi l \Delta T}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (5)$$

Yhtälössä 5 R_1 on sisäsäde, R_2 on ulkosäde, l on kappaleen pituus ja λ on lämmönjohtavuus (Valtanen 2012, s. 243).

2.2 Termomekaaniset ominaisuudet teräksissä

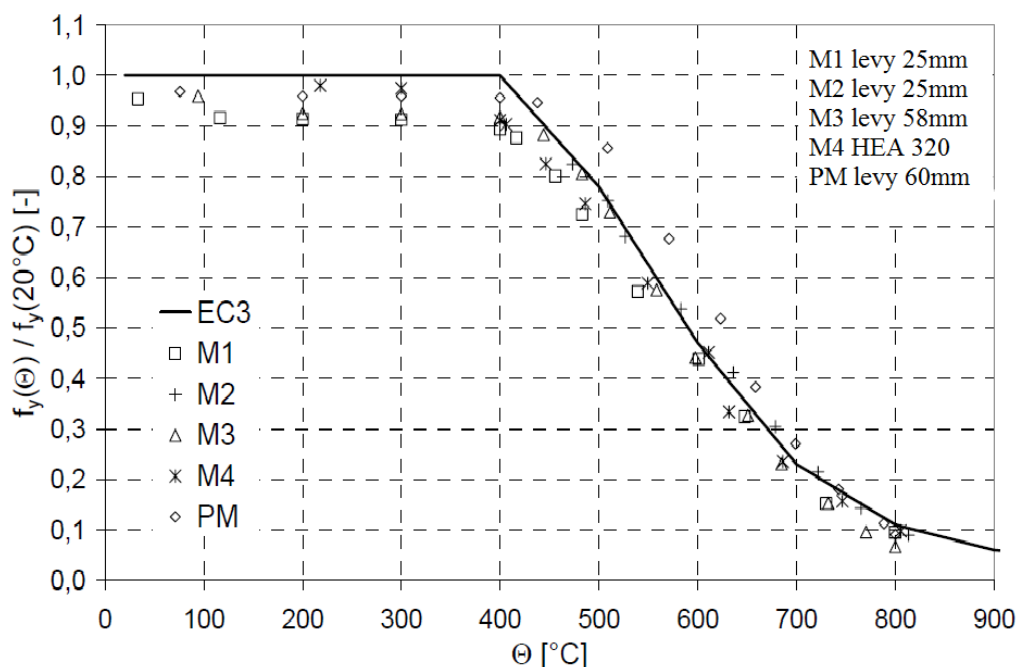
Korotetuissa lämpötiloissa teräksissä esiintyy fysikaalisia tekijöitä, kuten lujuuden aleneminen verrattuna kylmiin olosuhteisiin. Lujuuden aleneminen vaikuttaa rakenteen suunnitteluun ja sen kuormankantokykyyn sekä väsyttävällä, että staattisella kuormituksella. Lämpötilan noustessa yli 200 °C jännitys-venymä-malli on epälineaarinen (Huhdankoski 1999, s. 35). Kun lämpötila on noussut 700 °C, niin myötölujuus ja kimmokerroin on pienentynyt 15 % alkuperäisestä (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 22).

Kuvassa 4 on esitetty eri metallien lujuusarvoja lämpötilan funktiona. Mentäessä yli 500 K suuruisen lämpötilan, alkavat terästen lujuusominaisuudet heikentyä ja lämpötilasta riippuvaiset ilmiöt on otettava huomioon suunnittelussa.



Kuva 4. Metallien lujuusarvoja lämpötilan funktiona (Valtanen 2012, s. 506).

Kuva 5 esittää termomekaanisesti valssattujen terästen myötörajan muuttumista lämpötilan kasvun myötä suhteessa myötörajaan huoneenlämpötilassa. Kuvan testipisteet oli saatu aikaiseksi käyttämällä materiaalina S420 ja S460 rakenneterästä. PM-symbolilla on kuvassa esitetty S420 lujuusluokan terästä ja muut aihiot ovat S460 lujuusluokasta. Koesauvojen valmistusaihiot on ilmoitettu kuvan oikeassa yläreunassa. Testituloksissa on kuitenkin havainnollistettava, että suurin osa pisteistä on jäänyt eurokoodi 3:n (EC3) suositusten alapuolelle. Turvallinen käyttöalue, missä ei tarvitse vielä huolestua lujuusominaisuuksien merkittävästä heikentymisestä, on 400 °C saakka. (Schneider & Lange 2009, s. 207.)



Kuva 5. Teräksen myötölujuuden aleneminen lämpötilan funktiona (mukaillen: Schneider & Lange 2009, s. 207).

Taulukossa 1 on esitetty, kuinka kimmomoduuli ja myötölujuus muuttuvat lämpötilan kasvussa. Tästä taulukosta ja kuvasta 5 havaitaan teräsmateriaalin epälineaarinen käyttäytyminen korotetuissa lämpötiloissa. Hiiliteräksillä voidaan ottaa eduksi myötölujittuminen korotetuissa lämpötiloissa (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 42).

Taulukko 1. Teräksen kimmomoduulin lämpötilariippuvuus (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 22).

Teräksen lämpötila	Pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin f_y tai E_a		
	Tehollisen myötörajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon E_a) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

HUOM. Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarisesta interpolointia käyttäen.

Kuten edellisestä taulukosta havaitaan, materiaaliarvoissa tapahtuu voimakasta muutosta lujuusarvoissa 700 °C yläpuolella. Tällöin on saavuttu muutosvyöhykkeelle, missä teräksen mikrorakenteeseen alkaa nopeasti muodostumaan austeniittinen mikrorakenne (Lindroos, Sulonen & Veistinen 1986, s. 300). Hiiliteräksillä lämmönjohtavuus pienenee lineaarisesti huoneenlämpötilasta aina 800 °C saakka, jonka jälkeen se saavuttaa vakioarvon 27,3 W/mK. Liitteessä III on esitetty standardin SFS-EN1993-1-2 (2005) poikkileikkausluokan 4 (PL4) mukaiset arvot ja tutkimustulokset. Taulukoiduista tutkimustulosten arvoista liitteessä III havaitaan yhteneväisyys standardiarvoihin ja, mikäli käytetään laskennassa taulukon 1 arvoja, ollaan koetuloksiin verrattuna varmalla puolen. Lämmönjohtavuus teräkselle voidaan määrittää seuraavasti (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 25).

$$\lambda = 54 - 3,33 \times \Delta T \times 10^{-2} \quad (6)$$

Yhtälössä 6 on esitetty, kuinka teräksen lämmönjohtavuus muuttuu lineaarisesti lämpötilan funktiona välillä 20 – 800 °C (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 25).

2.2.1 Estetyn lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset

Estetyn lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan; rakenteen käytönaikaisiin ja valmistuksen seurauksena syntyviin jännityksiin. Esimerkiksi hitsauksen ja muiden valmistusprosessien seurauksena syntyvät vetojäännösjännitykset pienentävät rakenteen väsymiskestävyyttä (Hobbacher 2013, s. 11).

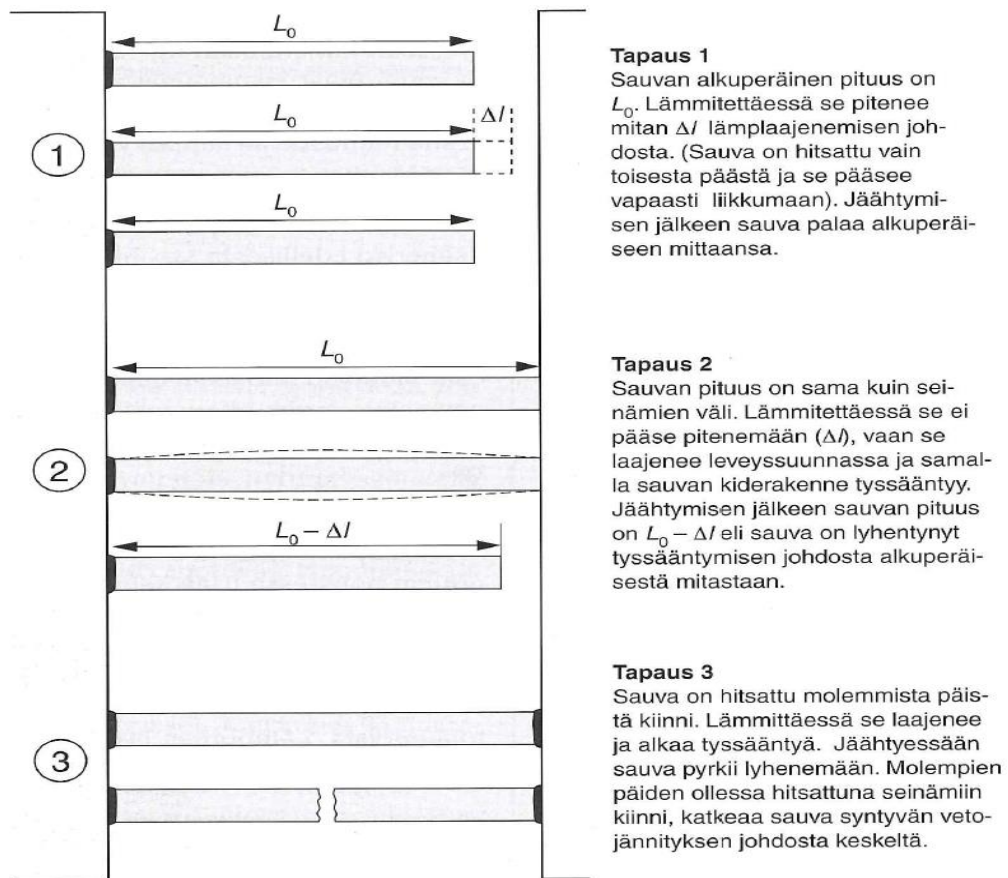
Lämpöjännitysten suuruus määräytyy materiaalin mekaanisista ominaisuuksista, systeemin kokoonpanosta ja kuormituksesta. Reunaehdot määrittelevät, kuinka lämpöjännitykset nousevat lämmityksen aikana (Shorr 2015, s. 10).

Kappaleeseen syntyviä lämpöjännityksiä voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata (Valtanen, 2012, s. 238):

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Yhtälössä 7 σ on normaalijännitys, E on kimmomoduuli ja yhtälössä 8 F on kuormittava voima ja A on rakenteen poikkipinta-ala (Valtanen, 2012, s. 238). On kuitenkin muistettava ottaa huomioon suhteellisuusraja, jonka ylityksen jälkeen kimmomoduuli muuttuu ja yhtälö ei kuvaa tilannetta oikein, kun saavutetaan myötöraja (Valtanen 2012, s. 506). Kuvassa 6 on esitetty kolme tapausta, miten rakenne käyttäytyy lämpölaajenemisessa. Kuvasta nähdään, miten sauvarakenteen käyttäytyminen muuttuu reunaehdon vaihtuessa. Kuvan tapauksissa lämpötilanmuutos oletetaan kaikissa yhtä suuriksi.



Kuva 6. Variaatiot lämpölaajenemiskäyttäytymiseen reunaehdon vaihdella (Lepola & Makkonen 2005, s. 354).

Lämpötilan vaihdella syntyy syklinen kuormitus rakenteisiin, koska materiaali reagoi lämpötilan muutokseen tilavuuden muutoksella tai yksinkertaisemmin pituuden muutoksella (Valtanen 2012. s. 237).

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \quad (9)$$

Yhtälössä 9 l on kappaleen pituus, α lämpölaajenemiskerroin, ΔT lämpötilan muutos ja Δl on pituuden muutos (Valtanen 2012. s. 237). Lämpölaajenemisyhtälö kuvaa pinta-alan muutoksen 2α ja tilavuuden 3α . Pituuden lämpölaajenemiskertoimen arvoja rakenneteräkselle, alumiinille ja ruostumattomalle teräkselle on esitetty taulukossa 2 (SFS-EN 1991-1-5+AC 2004. s. 62).

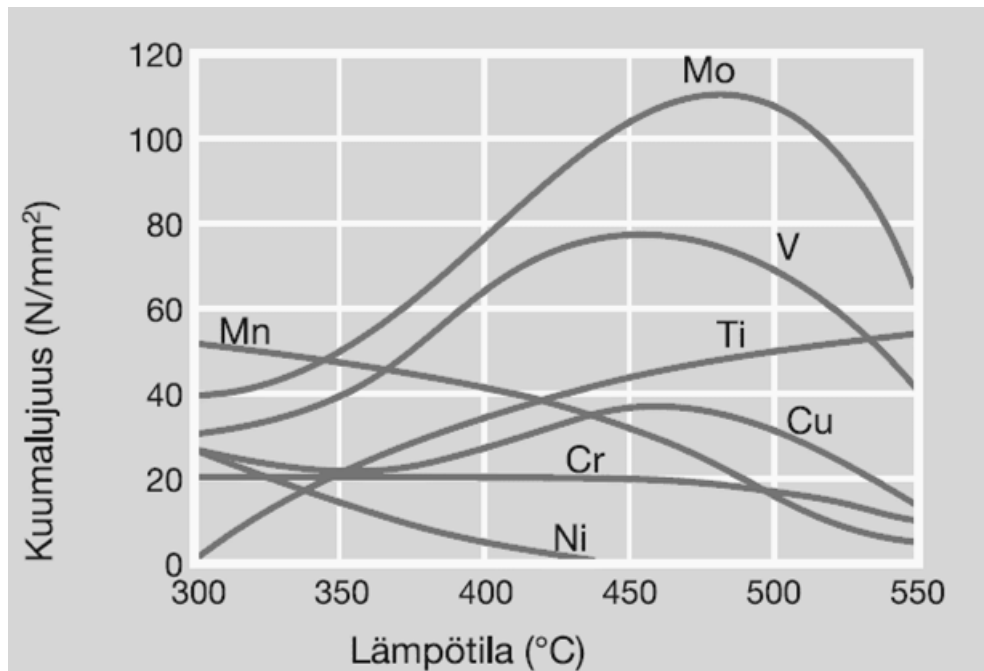
Taulukko 2. Lämpölaajenemiskertoimia (SFS-EN 1991-1-5+AC 2004. s. 62).

Materiaali	Alumiinit	Rakenneteräs	Ruostumaton teräs
α [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	24	12	16

2.3 Kuumalujat teräkset

Kuumalujat teräkset ovat nimensä mukaan korkeissa lämpötiloissa käytettyjä teräksiä, jotka soveltuvat kohteisiin, joiden lämpötila on alle 650 °C (Lukkari 2009, s. 4). Kuumalujien teräksien hitsauksessa syntyviä ongelmia, kuten halkeilua, joudutaan ehkäisemään eri menetelmillä. Kuumalujilla teräksillä tulee tarve tehdä lämpökäsittelyjä lämpötila-alueella 650–750°C martensiittisen mikrorakenteen pehmentämiseksi, jotta saadaan muokattua hitsausliitoksesta sitkeämpi. Myöstöllä saadaan tasoitettua rakenteeseen syntyneitä jäännösjännityksiä. Pitoaika on aina tapauskohtainen, kuitenkin 0,5–1,5 h. Lisäksi hitsaus tulee suorittaa korotetussa työlämpötilassa 300–350°C, mistä kappale jäähdytetään hitaasti. Korotettua työlämpötilaa voidaan joutua käyttämään, jos esiintyy riski teräksen ilmassa karkenemiselle. Valittaessa hitsauslisäainetta on otettava huomioon lisäaineen kuumalujuusominaisuudet ja riskit halkeiluihin. (Suomen hitsausteknillinen yhdistys 2014, s. 153–155.)

Kuva 7 kertoo seosaineiden merkityksen kuumalujilla teräksillä käyttölämpötilan kasvaessa. Kuvasta havaitaan, kuinka molybdeenin seostaminen teräkseen parantaa teräksen kuumalujuutta, muita seosaineita merkittävämmän (Lukkari 2009, s. 4).



Kuva 7. Seosaineiden vaikutus kuumalujuuteen (Lukkari, 2009 s.4).

2.4 Kestoiän määrittely

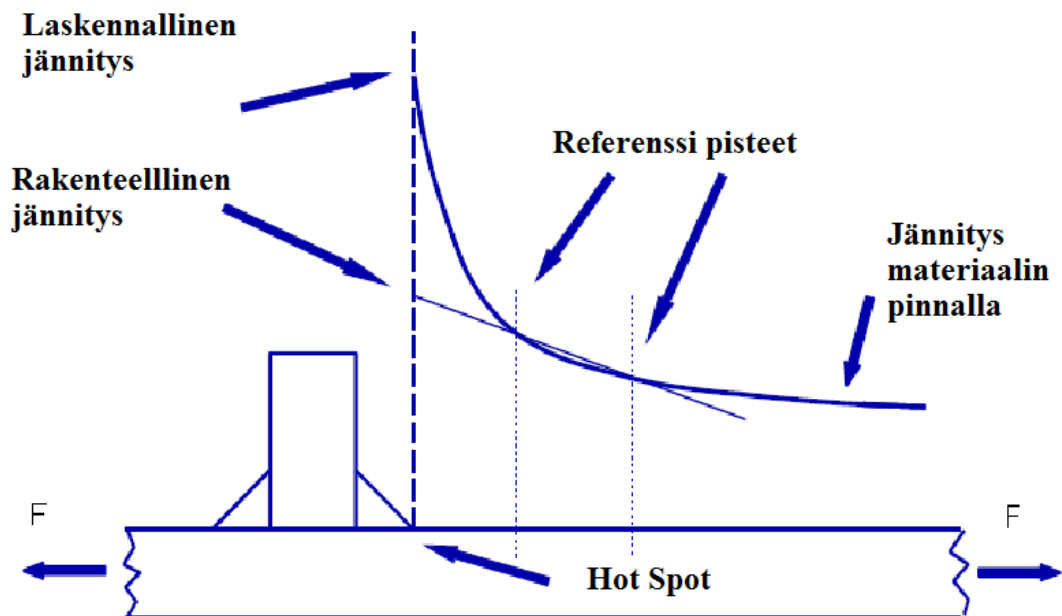
Rakenteen kestoikä määrittely vaihtelee tarkastelutavasta riippuen. Suunnitteluvaiheessa määritellään kriittisille rakenneosille kestoikä, joko staattisen kuormituksen tai väsyttävän kuormituksen mukaan. Kun rakenteeseen on syntynyt vaurio, joko kulumisen, korroosion mutta yleisimmin väsymisen seurauksena, voidaan joutua korjaustoimenpiteisiin (Hobbacher 2013, s. 127). Jotta korjauksessa onnistuttaisiin jatkamaan rakenteen käyttöä, on tunnettava vaurion synnyttänyt syy ja sitä edesauttavat olosuhteet. Tarkasteltaessa hitsattujen liitosten väsymiskestävyyttä jännitysten perusteella menetelmät jakaantuvat: nimellisen jännityksen menetelmään, rakenteellisen jännityksen menetelmään, tehollisen lovijännityksen menetelmään ja murtumismekaniikkaan (Hobbacher 2013, s. 8).

2.4.1 Nimellisen jännityksen menetelmä

Nimellisen jännityksen menetelmässä jännitystä tarkastellessa jätetään huomioonottamatta paikalliset jännityskeskittymän aiheuttajat, kuten hitsit ja epäjatkuvuuskohdat. Liitoksen epäkeskisyys tai geometrinen yksityiskohta, ripa, ovat esimerkkejä jännitystä korottavista epäjatkuvuuskohdista. Keskitytään tarkastelemaan kuormitusta, joka aiheuttaa kalvojännitystä. Nimellisen jännityksen menetelmä toimii elastisella alueella. (Hobbacher 2013, s. 15.)

2.4.2 Rakenteellisen jännityksen menetelmä

Yleisesti rakenteissa olevat epäjatkuvuuskohdat ja yksityiskohdat, kuten korvake, synnyttävät rakenteellisia Hot Spot -jännityksiä. Jännitysten selvittämiseksi tarvitaan FEM-laskentaa, koska analyttisiä menetelmiä voidaan soveltaa vain yksinkertaisiin tilanteisiin (Hobbacher 2013, s. 22). Kuva 8 esittää periaatteen, miten rakenteellinen jännitys eli Hot Spot -jännitys muodostetaan. Kuvassa 8 Hot Spot -jännitys on määritetty levyn pinnan suuntaisesti, mutta vaihtoehtoisessa tarkastelussa voidaan määrittää jännitys jakauma levynpaksuuden yli. Kuvassa on havainnollistettu, kuinka jännitys jakauma määritellään FEM-laskennasta. Jännitys jakauma voidaan määrittää myös venymäliuskamittauksella.

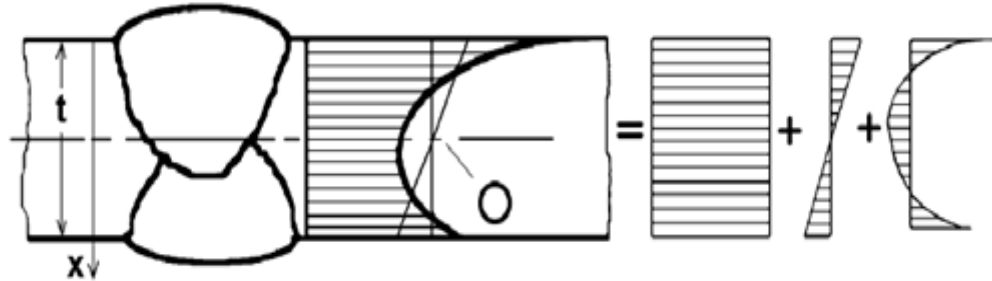


Kuva 8. Rakenteellisen jännityksen muodostaminen (mukaillen: Hobbacher 2013, s. 20).

2.4.3 Tehollisen lovijännityksen menetelmä

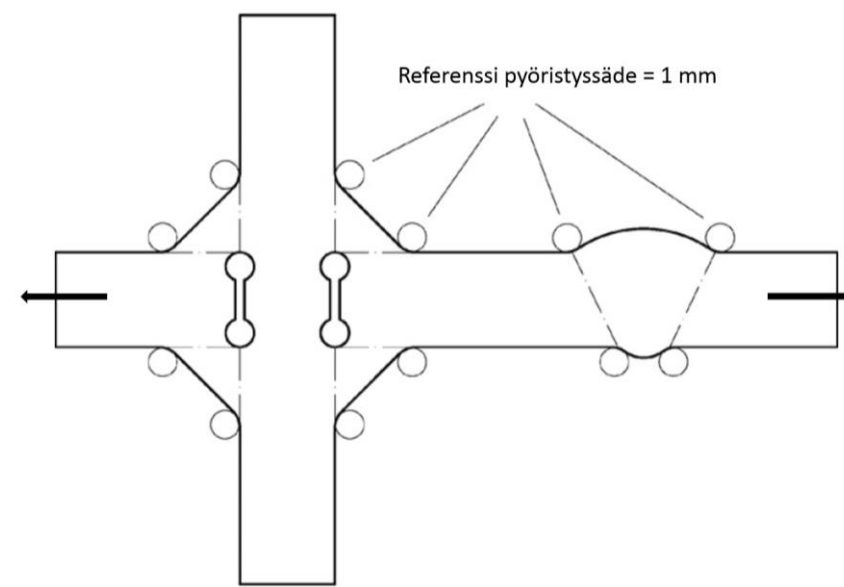
Tehollisen lovijännityksen menetelmässä otetaan huomioon tarkemmin jännityskomponenttien yhteisvaikutusta, koska siinä otetaan huomioon lovi vaikutuksen aiheuttama epälineaarinen jännityspiikki. Kuvassa 9 on esitetty, kuinka komponentteihin jaoteltu lovijännitys muodostuu. Kuvan jännitysten jaottelu on IIW:n (International institute of welding) mallin mukainen.

epälineaarinen jännitysjaakauma = $\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}$



Kuva 9. Epälineaarinen jännitysjaakauma komponentteihin jaettuna: σ_m kalvojännitys, σ_b taivutusjännitys ja σ_{nl} epälineaarinen jännityspiikki (mukaiillen: Hobbacher 2013, s. 14).

Tehollisen lovijännityksen käyttäytyminen (ENS, Effective Notch Stress) voidaan ottaa huomioon tarkemmin FEM-laskennassa. FEM-malliin mallinnetaan lovia vastaavat pyöritykset hitsien rajaviivoille ja hitsien juureen. Fiktiivisen loven pyörityssäteenä käytetään ohuilla levyillä $t < 5\text{ mm}$ $r_{ref} = 0,05\text{ mm}$ ja levynpaksuuden ollessa $t \geq 5\text{ mm}$ $r_{ref} = 1\text{ mm}$. Pienempää pyörityssädettä käytetään enemmän autoteollisuuden sovelluksissa ja ohutlevyrakenteita mallinnettaessa. (Sonsino et al. 2012, s. 2–3) Kuvassa 10 on havainnollistettu kuinka fiktii-viset pyöritykset sijoittuvat pienaliitoksen ja päittäisliitoksen malleihin hitsinrajaviivalle tai juureen.



Kuva 10 Tehollisen lovijännityksen referenssi-pyöritykset (Sonsino et al. 2012, s. 3).

Tehollisen lovijännityksen menetelmä ottaa huomioon, kumpi on ratkaisevampi: hitsin juuri vai rajaviiva. Tehollisen lovijännityksen menetelmän käyttö on nykyään suosittumpaa kuin rakenteellisen tai nimellisen jännityksen menetelmän soveltaminen, koska se ottaa huomioon vaurion juurenpuolella tai rajaviivalla (Baumgartner & Bruder 2013, s. 137). Edellä kuvatuilla pyöristyksillä pyritään mallintamaan jännityskeskittymiä ja selvittämään, mikä on lovi vaikutuksen suuruus rakenteeseen. Jännitystarkasteluissa käytetään joko von Mises -jännitystä tai pääjännitystä. (Sonsino et al. 2012, s. 1.)

Pahimmassa tapauksessa todellinen lovi on $r_{tod} = 0$ mm, joten se on otettu huomioon, kun $r_{ref} = r_{tod} + 1$ mm (Sonsino 2016). Jännitys on silloin suurin, kun r_{ref} on 1 mm, jolloin pyöristys on referenssipyöristys (Sonsino et al. 2012 s. 4). Mallintaessa pahinta tilannetta, todellisen särön pyöristyksen ollessa nolla, saavuttaa loven muotoluku suurimman arvon (Radaj, Sonsino & Fricke 2006, s. 127–128).

Liitoksen kestoikä saadaan määritettyä hyödyntämällä elementtimenetelmästä saatua lovi-jännitystä, mikä on määritetty suurimman pääjännityksen tai von Mises-jännityksen suhteen (Fricke 2013, s. 763–765).

$$N_f = \left[\frac{\Delta\sigma_{c,n}}{\gamma_m \Delta\sigma_{n,ekv}} \right]^m 2 \times 10^6 \quad (10)$$

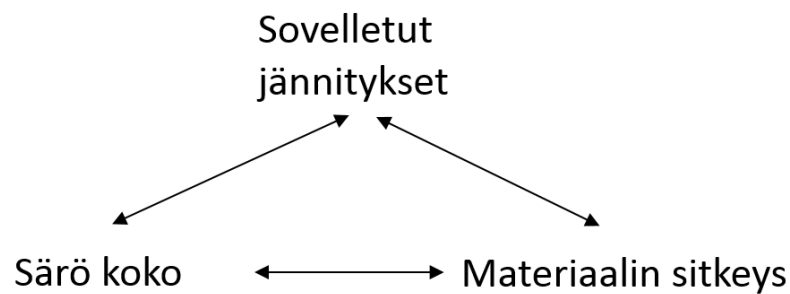
Yhtälössä $10 N_f$ on kestoikä, $\Delta\sigma_{c,n}$ on lovijännityksen vertailuraja pääjännitykselle väsymisluokka 225, kulmakerroin m on 3, γ_m on osavarmuusluku ja $\Delta\sigma_{n,ekv}$ on ekvivalenttiverailujännitys. (Fricke 2013, s. 763–765.)

2.4.4 Murtumismekaniikka

Lineariselastisessa murtumismekaniikassa (LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics) oletetaan, että materiaalissa on aina jonkin suuruinen alkuvika. Alkuvika voi olla valmistuksessa syntynyt lovi tai naarmu rakenteen pinnassa. Murtumismekaniikkaa voidaan soveltaa suunnittelulähtökohdaksi ottamalla huomioon materiaalin ominaisuudet, vaikuttavat jännitykset ja alkuvian koko. Parisin laki on tunnetuin murtumismekaniikkaa kuvaava yhtälö. Parisin laista integroimalla differentiaaliyhtälö saadaan selville kestoikä, kun muotokerroin pysyy vakiona (Anderson 2000, s. 541).

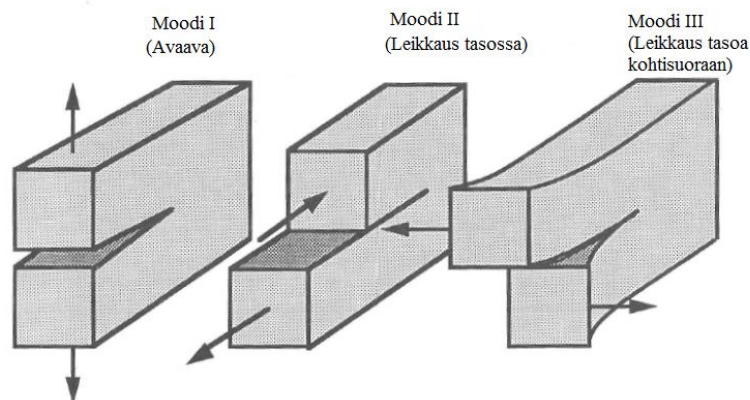
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (11)$$

Yhtälössä 11 m on Parisin särönkasvulain kulmakerroin *log-log*-asteikolla, ΔK on jännitys-intensiteettikertoimen vaihteluväli, C on särön kasvuvakio ja da/dN on särön kasvunopeus. Parisin lain perusteella voidaan tehdä arvioita mitoitusta varten, eli laskea, kuinka monta sykliä tarvitaan vaurioon. Murtumismekaniikassa jännitykset jaotellaan primäärisiin ja sekundäärisiin jännityksiin. Kokonaisjännitysintensiteetti saadaan, kun jännitykset summataan yhteen. (Dowling 2007, s. 539–540; Anderson 2000, s. 541–542.) Kuvassa 11 on esitetty murtumismekaanisen kestoajan määrittämiseen tarvittavat parametrit.



Kuva 11. Murtumisen ennustamiseen vaikuttavat tekijät (mukaiillen: Anderson 2000, s. 19).

Rakenteessa oleva särö kasvaa kolmella vaihtoehdoisella moodilla, rakenteen jännitystilasta määräytyen. Kuvassa 12 on esitetty moodit I–III ja kuinka eri moodissa kuormitus vaikuttaa.



Kuva 12. Moodit eri kuormitustilanteissa (mukaiillen: Anderson 2000, s. 64).

3 VAURIOMEKANISMI TARKASTELUT

Tässä kappaleessa on esitelty kriittisimpiä vauriomekanismeja tutkimuksen kannalta. Kaikki esitellyt vauriomekanismit eivät ole lämpötilasta riippuvaisia. Vauriomekanismeista on lyhyet kuvaukset, kuinka ne vaikuttavat kestävyYTEEN.

3.1 Korkean lämpötilan korroosio

Korkean lämpötila korroosiota esiintyy, kun metalli tai metalliseokset syöpyvät ilman vesiliuosta, lämpötilan ollessa korkea. Poikkeuksena savukaasuista voi putkistopinnoille tiivistyä vettä ja savukaasuista peräisin oleva rikki muodostaa veden kanssa metallia syövyttävän rikkihapon. Korkean lämpötilan korroosion sietokykyyn vaikuttaa se, kuinka metallin pinnalla oleva oksidikerros vastustaa ionien siirtymistä. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004 s. 127.)

Ruosteessa oleva teräs on kärsinyt yleisestä korroosiosta, mutta kyseessä on vielä hyvin hallittava ilmiö. Erilaisissa prosessilaitteissa ja rakenteissa esiintyy muitakin korroosioilmiöitä, kuten piilokorroosiota likakerroksen alla, rakokorroosiota tiivistepintojen välissä, pistekorroosiota, virtauslaitteissa eroosio- tai kavitaatiokorroosiota ja mekaanisten tekijöiden vaikutuksen edesauttamana jännityskorroosiota. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, s. 23.)

3.2 Jännityskorroosio

Korroosion vaikutus on syytä ottaa selville, jos rakenne altistuu pinnanlaatua muuttaville olosuhteille. Korroosion aiheuttama pinnanlaadun heikkeneminen ja ainevahvuuden pieneneminen laskevat merkittävästi rakenneosan suunniteltua kestoikää. IIW:n suosituksissa mainitaan, että korroosion voi huomioida väsymistarkasteluissa pienentämällä väsymisluokkaa (FAT-luokka) (Hobbacher 2013, s. 90). Vauriomekanismitarkasteluissa on otettu myös selvää lämpötilasta riippuvaisten ilmiöiden esiintymiseen.

Jännityskorroosiota esiintyy jännityskeskittymien läheisyydessä ja jännityskorroosio nopeutuu lämpötilan kohotessa (Kunnossapitoyhdistys 2004, s. 172). Jännityskorroosio on seurausta korroosiosta ja rakenteessa vaikuttavasta vetojännityksestä. Jännitys voi syntyä rakenteeseen kuormasta, värähtelyistä, muokkauksesta ja muovauksesta, hitausjännityksistä,

ruuviliitoksen kiristyksestä tai termisistä mittamuutoksista. Työstövaiheessa syntyneet materiaalin sisäiset jännitykset heikentävät jännityskorroosiokestävyyttä. Jännityskorroosiossa voi syntyä materiaaliin halkeamia myötöjännitystä pienemmissä jännityksissä. Näitä kapeita halkeamaa ei voida havaita ilman magneettijauhe- tai väriainetarkasteluja (Kunnossapitoyhdistys 2004, s. 172). Jännityskorroosiossa murtopintaa voidaan luulla hauraasti murtuneeksi, koska tehollisen poikkileikkauksen pienentyessä murtuminen muuttuu mekaaniseksi. Jännityskorroosiossa murtuma voi edetä rakeiden läpi tai raerajaa pitkin. Jännityskorroosiovauriot löytyvät yleisimmin hitsien läheisyydestä. (Huhdankoski, 1999, s. 90) Jännityskorroosiolle altistuminen määräytyy materiaalista ja ympäristöstä. Jännityskorroosiota esiintyy vesiliuoksien vaikutuksesta ja sulien metallien sekä -suolojen yhteydessä. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, s. 117–119.)

3.3 Korroosioväsyminen

Väsyminen kuvataan *S-N*-käyrän (Wöhler-käyrä) avulla. Käyrä ei ota huomioon korroosioista kärsinyttä materiaalia. FAT-luokan alentaminen korrodoivassa ympäristössä on aiheellista, kun otetaan huomioon amplitudispektri ja altistumisen kesto aika (Radaj, Sonsino & Fricke 2006, s. 27–28). Korroosio tekee rakenteesta herkemman väsymiselle, koska pienempi kuormanvaihtojen lukumäärä voi muodostua kriittiseksi. Korroosiovauriosta syntyy väsymistä esiintyy mm. painelaitteissa, venttiileissä ja putkistoissa. Vaurioihin johtaneita syitä ovat paineiskut, pumppujen ja puhaltimien aiheuttamat värähtelyt, lämpölaajeneminen prosessien alas- tai ylösajoissa. Akselit ja muut pyörivät komponentit voivat myös altistua korroosioväsymismurtumalle. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, s. 122–123.)

3.4 Väsyminen

Väsyminen on ilmiö, jota esiintyy, kun rakenteessa on vaihtuva kuormitus. Kuormituksen jännitysamplitudi voi olla positiivinen tai negatiivinen. Vaihtelevan kuormituksen lisäksi väsymiskestävyyteen vaikuttavat staattiset kuormitukset. Liitoksilla väsymiskestävyyttä ennustaa SN-käyrästä, mikä on saatu väsytykskokeiden perusteella. Nykytietämyksen ja -ajattelumaailman mukaan väsymisrajaa ei ole olemassa, vaan tapauskohtaisesti kaikki jännitysvaihtelut voivat mahdollisesti väsyttää rakennetta ja kasvattaa väsymissäröä. Epäjatkuvuuskohdat rakenteessa, kuten kiilaura, hitsi, kiinnitysreiät tai särö aiheuttaa jännitysintensiteetin, mitkä herkistävät väsymismurtumalle. Vetojännösjännitykset heikentävät väsymiskes-

tävyyttä, mutta puristusjäännitykset parantavat sitä. Väsymismurtumassa murtopinta on loppumurtumaa lukuun ottamatta lähes sileä, loppumurtuma syntyy, kun poikkileikkaus on pienentynyt ja kantokyky heikentynyt niin paljon, että rakenteen staattinen kuorma tai yhden väsytyssyklin kuorma murtaa rakenteen. Loppumurtuma voi olla haurasmurtuma tai sitkeä murtuma. (Lindroos et al. 1986, s. 765–769.)

Hitsatun teräsrakenteen kestoikä väsymisen suhteen määräytyy seuraavien osatekijöistä (Ongelin & Valkonen 2010, s. 427):

- Jännitysvaihteluiden lukumäärä
- Jännitysten vaihteluvälistä
- Jännityssuhde
- Alkusäröstä
- Rakenteen epäjatkuvuuskohdista
- Jäännösjännityksistä

Lujilla teräksillä väsymiskestävyydessä laadukkaan konepajatyön merkitys korostuu, kun alkusärökokoja saadaan mahdollisimman pieneksi, jolloin särön ydintymiseen kuuluva ajanjakso kasvaa. Riittävän laadukkaissa rakenteissa myös materiaaliominaisuudet vaikuttavat kestävyteen. Lujuuden lisääminen on aiheellista, jos staattiset kuormat sitä vaativat. (Ongelin & Valkonen 2010, s. 427; Huhdankoski 1999, s. 102.)

3.5 Viruminen

Kun lämpötilat rakenteen käyttöolosuhteissa ovat korkeampia kuin huoneenlämpötila 20 °C, niin on otettava huomioon mitoituksessa virumisvaurio. Korkeissa lämpötiloissa plastinen muodonmuutos voi syntyä pienillä jännityksillä (Suomen hitsausteknillinen yhdistys 2014, s. 152). Materiaalin virumismurtoraja määrittää ajan ja lämpötilan yhteyden, millä määritetään virumisvauriojännitys. Virumiselle alttiisiin olosuhteisiin valittavan teräksen kimmoiset ominaisuudet eivät ole mitoittavia, vaan on tärkeämpi tietää virumisominaisuudet (Suomen hitsausteknillinen yhdistys 2014, s. 152). Virumisnopeus voidaan määrittää Nortonin yhtälöllä, kun tiedetään materiaalivakiot (Huhdankoski 1999, s. 40).

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \quad (12)$$

Yhtälössä $12 \dot{\epsilon}$ on virumisnopeus, σ on jännitys, A_I ja n ovat materiaalivakioita, joista jälkimmäinen on yleensä teräksillä 3–5. Rakenteen virumiskestoikä voi puolittua, jos lämpötila nousee yli $12 \text{ }^\circ\text{C}$ suunnitellusta käyttölämpötilasta. Virumiskestävyyttä voidaan parantaa suorittamalla rakenteelle lämpökäsittelyjä, kuten päästö. Käytettävän teräksen mikrorakenne ja seostus vaikuttavat virumiskestävyyteen. Koska viruminen on raerajoilla tapahtuvaa plastista deformaatiota, suuri raekoko on virumiskestävyyttä lisäävä tekijä. (Huhdankoski 1999, s. 40–42.)

3.6 Sitkeä murtuma

Sitkeä murtuma voi saada alkunsa muovaavassa valmistuksessa, koska materiaaliin syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Pysyvät muodonmuutokset ovat seurausta myötörajan ylittämisestä ja voidien kasvusta. Rakennetta kuormittaessa sitkeään murtumaan tarvitaan energiaa enemmän kuin hauraaseen, jotta syntyvät siirtymät yhdistettynä plastiseen muodonmuutokseen saadaan aikaan (Huhdankoski 1999, s. 8). Rakenteen kuormituksen kasvaessa on ylitetty murtoraja ja kuroumaa on syntynyt, niin voidit yhdistyvät ja muodostavat makro-repeämiä. Kuormituksen kasvaessa vierekkäiset erilliset halkeamat yhdistyvät kookkaammaksi repeämiksi. Sitkeä murtuma koostuu siis kolmesta vaiheesta voidien ydintymisestä, voidien kasvusta ja voidien yhdistymisestä. (Chen & Butcher 2013, s. 1.)

Voidien yhdistymiseen vaikuttaa materiaaliparametrit, kuten kolmiakselinen jännitystila, lujittuminen, materiaalin huokoisuus ja voidien koko. Näiden yhteisvaikutuksesta muodostuu sitkeään murtuman murtopinta, josta ilmenee kurouman vaikutuksesta muuttunut poikkileikkauksen pinta-ala. Pinta-ala pienenee murtopinnassa sitkeässä murtumassa (Anderson 2000, s. 301). Sitkeässä murtumassa loppumurtuma voi tapahtua hauraana. (Chen & Butcher 2013, s. 11–12.)

3.7 Haurasmurtuma

Haurasmurtuma on murtuma, jossa kappaleen poikkileikkaus ei merkittävästi pienene. Haurasmurtuman alkuna voi toimia polttoleikattu reuna, hitsausvirhe tai väsymällä kasvanut särö myös materiaalin sisästä hauraista partikkeleista liikkeelle lähtenyt haurasmurtuma voi aiheuttaa kappaleen äkillisen vaurion ilman noita ulkoisia vikoja tai epätäydellisyyksiä. Haurasmurtuman aiheutumiseen vaikuttavia osatekijöitä ovat muun muassa (Ongelin & Valkonen 2010, s. 465):

- Sitkeys
- Teräksen lujuus
- Olosuhteet
- Kuormitus
- Lämpötila
- Geometria

Materiaalin paksuus ja alkuvikana toimiva lovi tai särö muodostavat komiaksiaalista jännitystilaa. Haurasmurtuman esiintymistä materiaaleissa kuvaavia materiaaliominaisuuksia ovat iskusitkeys ja transitiolämpötila. Haurasmurtuman edetessä särön kärki on terävä, mikä aiheuttaa jännitystilaa. Särön etenemisen aiheuttaa kasvava jännitysintensiivisyys. Haurasmurtuman murtopinnasta on tunnistettavissa jokikuvioita ja kiteinen murtopinta. Haurasmurtuman liikkeellelähtöä mitataan J-integraali-kokeilla ja materiaalille mitataan Charpy V-kokeella. (Ongelin & Valkonen 2010, s. 465; Huhdankoski 1999, s. 8–11.)

Haurasmurtuman ydintäjänä toimivat matriisissa olevat hauraat partikkelit, erkaumat tai sulkeumat. Ympäröivän materialain sitkeydestä määräytyy, rajoittuuko haurasmurtuma vitaaliseen hauraaseen komponenttiin. Jos murtuma etenee rakeen läpi, on oleellista rakeen koko ja ympäröivän rakeen sitkeys, eteneekö särö eteenpäin. Tämä on hyvin kriittistä haurasmurtuman etenemiselle. (Huhdankoski 1999, s. 8.)

3.8 Grafitoituminen ja hilseily

Pitkiä käyttöaikoja korkeissa lämpötiloissa olevassa ympäristössä teräksissä esiintyy grafitoitumista. Pitkillä käyttöajoilla tarkoitetaan tuhansia tai kymmeniä tuhansia tunteja ja lämpötilan vaihtelut johtuvat käyttöolosuhteista. Grafitoitumisessa sementtiin sitoutunut hiili muuttuu grafiitiksi. Grafitoitumista esiintyy herkemmin korkean hiilipitoisuuden teräksillä. Grafitoituminen saattaa aiheuttaa yllättävän murtuman hitsin läheisyyteen. Seostamalla kromia teräkseen 0,5–1 % voidaan ehkäistä taipumusta grafitoitumiseen (Huhdankoski 1999, s. 46). Teräkset, joissa on taipumusta grafitoitumiselle, on myös rakenteessa mahdollisuus haurastumiselle grafitoitumisen seurauksena. (Lindroos et al. 1986, s. 756.)

Hilseilyä tapahtuu teräksillä korkeissa lämpötiloissa. Niukkaseosteisilla teräksillä hilseilyä ei tapahdu alle 540 °C lämpötiloissa. Lämpötilan vaihdellessa syklistesti aiheutuu hilseen ja teräksen pintojen välille leikkausjännitys, jonka seurauksena hilse irtoa teräksen pinnasta. Teräksen hilseily on suurimmillaan savukaasukanavissa ja palotiloissa, koska korkea rikkipitoisuus, vesihöyryt ja korkea happipitoisuus vaikuttavat nopeuttavasti hilseilyyn. Hilseilyherkkyys pienenee, kun teräkseen seostetaan kromia. (Huhdankoski 1999, s. 46.)

3.9 Teräksen vanheneminen

Teräksen kylmämuokkauksesta voi syntyä muokkauslujittumista, mikäli teräs on muokkauslujittuva, mikä on seurasta mikrorakennetason dislokaatoruuhkista. Muokkauksen yhteydessä tapahtunutta vanhenemista kutsutaan myötövanhenemiseksi, ja toinen tunnettu vanheneminen on sammutusvanheneminen, jota esiintyy, kun teräs sammutetaan veteen (Lindroos et al. 1986, s. 704). Muokatun alueen kuumentaminen purkaa dislokaatoruuhkia ja samaan aikaan diffuusio kasvaa. Kun diffuusio on nopeutunut, vapaat typpiatomit ja hiiliatomit haakeutuvat dislokaatioihin. Typen indusoimaan vanhenemiseen riittää huoneenlämpötilassa varastointi, kun hiili tarvitsee vanhenemiseen 250 °C suuruisen lämpötilan. Vanhenemisen seurauksena teräksen iskutkeys alenee. Typen aiheuttamaa vanhenemista ehkäistään tiivistämällä terästä alumiinilla ja titaanilla, joka myös sitoo hiiltä stabiileiksi karbideiksi (Lindroos et al. 1986, s. 702; Huhdankoski 1999, s. 19.)

3.10 Sulametallihauraus

Sulametallihaurauden yhteydessä syntyy teräkseen halkeamia, koska teräkseen liuennut alemman sulamispisteen omaava metalli on liittämispörosessin tai käyttöolosuhteiden vaikutuksesta käynyt sulana ja jähmettyessään aiheuttaa halkeaman. Sulametalli tunkeutuu teräksen raerajoille, minkä seurauksena teräksen lujuusominaisuudet heikkenevät, koska mikro-ranteen sidokset katkeavat (Papavinasam 2013, s. 294). Jäähtymiseen yhdistetty vetojännitystila aiheuttaa rakenteeseen halkeaman. Sulametallihaurautta voidaan ennaltaehkäistä sopivalla seostuksella. Esimerkkinä sulametallihaurautta esiintyy teräksissä korkeilla kuparipitoisuuksilla. (Lindroos et al. 1986, s. 428–429.)

Sulametallihaurautta voidaan ehkäistä välttämällä kontaktia sulatilassa olevaan metalliin (Papavinasam 2013, s. 294). Kun joudutaan valmistamaan hitsausliitoksia, ei voida välttyä lii-

tosalueella sulalta liitokseen kuulumattomalta metallilta, mikäli sen sulamispiste on matalampi kuin teräksen. Ongelmallisena voi esimerkiksi olla kontakti elohopean kanssa, koska elohopea esiintyy huoneenlämmössä ja normaali-ilmanpaineessa sulana (Papavinasam 2013, s. 294). Teräksen pinta altistuu sulalle, ilman liittämiproessia, kun sitä päällystetään sulalla metallilla (Papavinasam 2013, s. 294). Kuumasinkityksen yhteydessä apuaineena käytetty lyijy, tina tai vismutti voi tunkeutua sinkkiä helpommin teräksen raerajoille ja johtaa sinkkipadan tai sinkittävän kappaleen haurastumiseen (Huhdankoski 1999, s. 48).

3.11 Päästöhaaraus

Päästöhaaraus on ilmiö, joka esiintyy lämpökäsittelyjen, kuten nuorrutuksen, yhteydessä. Nuorrutuksen yhteydessä tapahtunut hidas jäähtyminen kasvattaa alttiutta päästöhaurautteen, kun prosessilämpötilat ovat noin 450–650 °C. Seostetuilla teräksillä on alttius ylempään päästöhaurautteen. Päästöhaaraus ilmenee teräksessä reversiibelinä, joten päästöhaurautesta päästään eroon, kun teräs uudelleen hehkutetaan 600 °C korkeammalle ja sammutetaan veteen. (Lindroos et al. 1986, s. 725–726.)

Päästöhauraassa teräksessä murtuma etenee raerajoja pitkin ja teräksen transitiolämpötila on kohonnut. Päästöhaurastumisessa haurastuminen aiheutuu raerajasuotautumisesta ja murtuma etenee raerajoja pitkin (Huhdankoski 1999, s. 47). Muussa tapauksessa murtuma etenisi ferriittirakeiden läpi. Päästöhaurautta havaitaan voimakkaimmin martensiittisillä teräksillä (Huhdankoski 1999, s. 47). Alttiutta päästöhaurautteen kasvattavat seosaineet kuin kromi, mangaani ja nikkeli ja epäpuhtauksiin lukeutuvat fosfori sekä tina. Molybdeenin, titaanin ja zirkoniumin seostaminen teräkseen ehkäisevät päästöhaurautta. Ilmiön ennaltaehkäisemiseksi on seostettava terästä ja käytettävä vesisammutusta, mikäli se ei aiheuta muodonmuutoksia tai jäännösjännityksiä. (Lindroos et al. 1986, s. 726–729.)

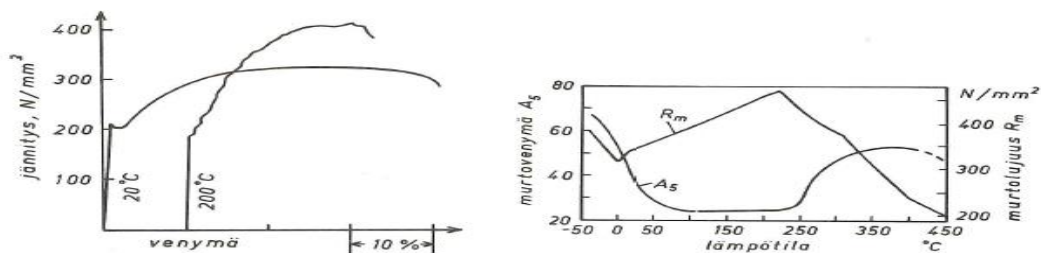
3.12 Sigmahauraus ja 475°-haaraus

Sigmahaurautta esiintyy korkean kromipitoisuuden sisältävillä teräksillä, joilla kromipitoisuus on yli 20 %. Alle 20 % kromipitoisuuksilla voi haurasta sigmafaasia esiintyä, jos materiaali sisältää piitä, molybdeeniä, alumiinia tai nikkeliä. Sigmafaasia muodostuu, kun teräksen lämpötila käy 650–800 °C välillä. Kuitenkin lämpökäsittelyissä sigmafaasista ei ole riskiä, kun lämpökäsittely suoritetaan yli 925 °C. (Lindroos et al. 1986, s. 448.)

Kromipitoisuuden ollessa 12–70 % esiintyy teräksillä 475°-haurautta. 475°-hauraus aiheuttaa kovuuden alenemista, iskutheyden heikkenemistä ja murtovenymän pienenemistä. Tämäkin lämpötilasta riippuvainen hauraus voidaan välttää suorittamalla lämpökäsittelyt korkeissa lämpötiloissa tai materiaalia valittaessa tyydyttävä alle 13 % kromia sisältäviin seostekeräisiin (Lindroos et al. 1986, s. 449–450.)

3.13 Sinihauraus

Sinihauraus havaitaan teräksillä lämpötilan ollessa 150–300 °C. Se ilmenee jännitysvenymäkäyrässä askelmaisena kulkuna, kun vetokoe suoritetaan korotetussa lämpötilassa. Kuvassa 13 on esitetty jännitysvenymäkäyrän askelmainen kulku ja murtovenymän käyttäytyminen sinihehkualueessa. Hiiliteräksillä tämän tyyppinen käyttäytyminen on havaittu siitä, että sinihaurasalueella lujuus kasvaa ja sitkeys pienenee. Ilmiö on selitettävissä dislokaatioiden liikkeen riippuvuudesta välitila-atomeihin. Välitila-atomina vuorovaikutuksen antaa typpi-atomit.



Kuva 13. Oikealla esitetty kuinka murtovenymä murtolujuus käyttäytyvät sinihehkualueessa. Vasemmalla esitettyä kuinka vetokokeen suorittaminen korotetussa lämpötilassa aiheuttaa jännitysvenymäkäyrään tykyttävän kulun. (Lindroos et al. 1986, s. 703.)

Forni, Chiaia ja Cadoni (2016) tutkimuksessa havaittiin lujuuden kasvu, kun samaan aikaan kokonaisvenymä väheni 550 °C lämpötilassa. Käyttäytymismalli on kuvattu dynaamisena venymäkäyttäytymisenä, mikä on samaa kuin myötövanheneminen. Sinihaurauden todeankin toimivan myötövanhenemisen kiihdyttäjänä, mutta se on kuitenkin eri ilmiö kuin sammutusvanheneminen (Dieter 1986, s. 203). Sinihauraus näyttäisi tutkimuksen mukaan vaikuttavan venymäenergiaan, kun sitä mitataan yksikkövenymällä. Sinihaurautta voidaan ehkäistä muuttamalla prosessilämpötilaa. Materiaalin typpipitoisuuden ollessa liian korkea herkistyy materiaali sinihauraudelle. (Lindroos et al. 1986, s. 702–704; Forni et al. 2016, s. 471.)

4 CASE JÄÄHDYTYSPANEELI

Tutkimuksessa konkreettinen tutkimuskohde oli valokaariuunin jäähdytyspaneelin vaurio-tarkastelu. Tarkastelussa haluttiin saada selville, miksi paneeliin oli syntynyt kriittisiä vaurioita varsin lyhyessä ajassa. Jäähdytyspaneeliin syntyneet säröt saavat aikaan veden vuotamisen, mikä voi aiheuttaa yllättäviä räjähdyksiä uunissa, mikä on työturvallisuudelle vaaraksi (Fomkin 2016). Kuva 1. Valokaariuunin periaatekuva (Metallinjalostajat ry 2014, s. 36).Kuvassa 14 on valokaariuunin jäähdytyspaneelit korjauksessa olevassa paneelirungossa. Kuvasta voidaan havainnoida, kuinka jähmettynyt kuona on pysynyt kiinni niissä paneeleissa, joihin on hitsattu kuonatartunnat. Niissä paneeleissa, joissa ei ole kuonatartuntoja, kuona on vastaavasti irronnut. Kun paneeliin on hitsattu kuonatartunnat ja on paneelit, joissa ei ole kuonatartuntoja, havaitaan kuvasta, kuinka kuona on irronnut paneeleista, joissa ei ole kuonatartuntoja.



Kuva 14. Valokaariuunin jäähdytyspaneelit. Harmaa-alue on jähmettynyttä kuonaa.

Jäähdytyspaneelit on valmistettu saumattomasta putkesta, joka on halkaisijaltaan 88,90 mm ja seinämävahvuudeltaan 10 mm. Kaikki hitsit on oltava vesitiiviitä ja kestettävä 600 kPa painetestausta. Kuonatartunnan tarkoituksena on saada jäähdytyspaneelin pintaan jäämään kiinni rakennetta suojaava ja eristävä kuonakerros, jolloin paneeliputken pintalämpötila ei

nouse niin korkeaksi kuin ilman kuonaa (Fomkin 2016). Kuonatartunnat on valmistettu halkaisijaltaan 60,3 mm putkesta sahaamalla putkesta pala ja halkaisemalla se kahtia. Kuvassa 15 on esitetty lähikuva hitsatusta kuonatartunnasta. Sulan teräksen kaatolämpötila on noin 1700 °C. Putken sisäpuolella jäähditysveden paluulämpötila vaihtelee 20–70 °C ja paluuveden lämpötilamittauksesta on olemassa mittausdataa. Sisään tulevan veden lämpötila on noin 1–20 °C määräytyen vuodenajasta.



Kuva 15. Jäähdytyspaneeliin hitsatut kuonatartunnat. Kuvassa punainen viiva esittää vauriokohdan hitsin rajaviivalla.

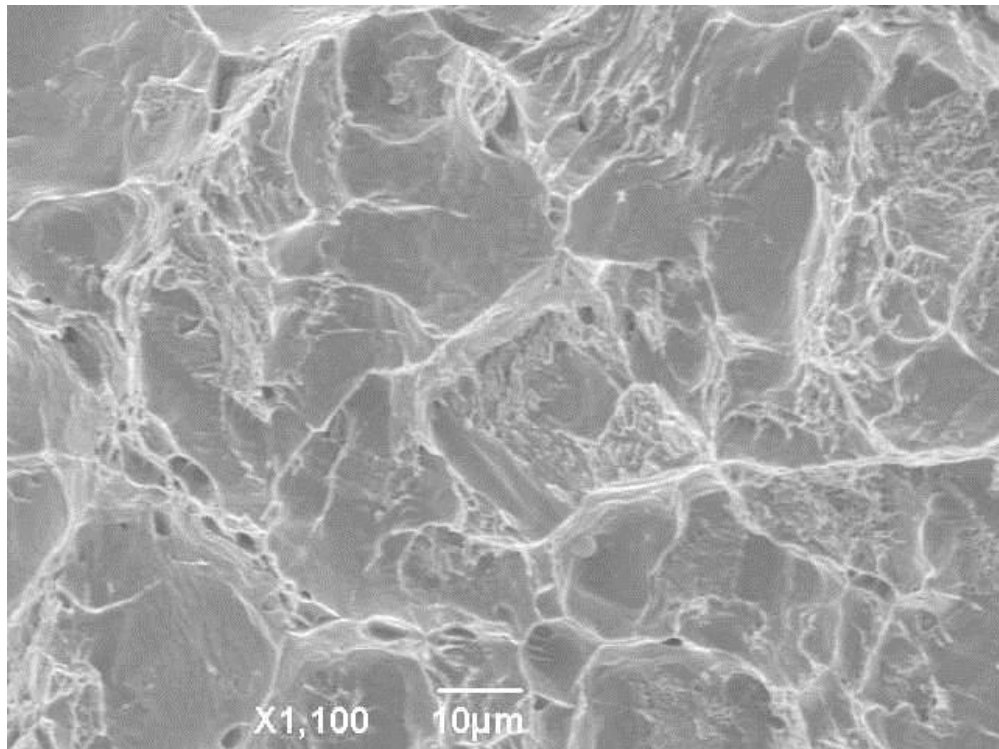
4.1 Materiaalit

Paneelimateriaalille on tehty materiaalianalyysi ja todettu sen olevan S235 lujuusluokan rakenneterästä vastaava materiaali. Piirustuksista löytyy materiaalivaatimus, mikä on määritetty St. 35,8 DIN 17175 mukainen materiaali. Putkimateriaalin materiaalitutkimuksen yhteydessä on tehty kuparipitoisuuden perusteella johtopäätös, että putki olisi mahdollisesti valmistettu kierrätysteräksestä. Materiaalitutkimuksessa on todettu putkimateriaalin ja kuonatartunnan olevan hyvin hitsattavaa. Taulukossa 3 on esitetty liitteen II kappalekoostumusanalyysin vertailu standardin SFS-EN 10216-2 (2014) mukaisiin sallittuihin pitoisuuksiin sulatusanalyysissä.

Taulukko 3. Materiaalin koostumuksen vertailu standardissa esitettyyn koostumukseen (SFS-EN 10216-2 2014, s. 28).

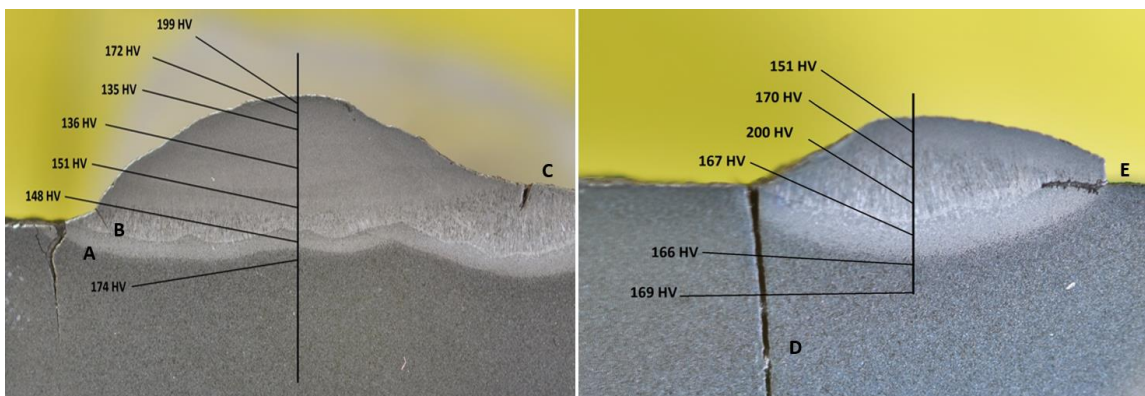
Alkuaine	Sulatusanalyysin raja-arvot paino- %	Kappaleanalyysissä sallittu poikkeama sulatusanalyysin raja-arvoista paino- %	Mitattu pitoisuus kappaleanalyysissä tutkittussa kappaleessa paino- %
C	≤ 0,29	± 0,02	0,112
Si	≤ 0,4	± 0,05	0,215
Mn	≤ 1	± 0,05	0,52
P	≤ 0,03	+ 0,10	alle 0,005
S	≤ 0,01	+ 0,003	alle 0,15
Al	≤ 0,06	± 0,005	0,016
B	≤ 0,007	+ 0,0005	alle 0,0010
Cr	≤ 1	± 0,05	0,125
Cu	≤ 0,8	± 0,05	0,201
Mo	≤ 0,35	± 0,03	0,014
N	≤ 0,07	± 0,01	0,103
Nb	≤ 0,1	± 0,005	alle 0,0010
Ni	≤ 0,35	± 0,05	0,098
Ti	≤ 0,06	+ 0,01	0,0014
V	≤ 0,1	+ 0,01	alle 0,0050
W	≤ 2	± 0,1	alle 0,010

Kuvassa 16 on esitetty elektronimikroskooppikuva murtopinnasta. Liitteessä V on esitetty murtopintakuvat. Murtopintakuvat ovat epäselviä liitteessä V, koska murtopinnoille oli kehittynyt ruostetta, joka häiritsee kuvissa. Makrokuvissa tulkintaa häiritsee toisesta murtopinnasta vastinpinnan hiominen liitteen V makro kuvassa 1. Makro kuvassa 2 on havaittavissa puolielliptinen tummunut alue. Pinnaltaan sileä tummunut alue hauraan murtopinnan vierellä antoi oletuksen väsymisvaurion mahdollisuudelle.



Kuva 16. Vauriokohdasta murtopintakuva (Haapasalmi 2015).

Kuvassa 17 on kovuusmittausten tulokset ilmoitettu Vickers-kovuutena (HV, Hardness of Vickers). Kovuusmittaustulosten lisäksi kuvasta voidaan havaita halkeamat ja niiden myötä syntyneet vauriot. Selväna vauriona kohdassa A, C, E ja D erottuu halkeama. Särö D kulkee putken seinämän läpi. Kovuusmittaustuloksista voidaan havaita muutosvyöhykkeelle syntynyt korkeampi kovuus verrattuna perusaineessa.



Kuva 17. Kuonatartunnan kovuusmittaustulos oikealla ja vasemmalla vertailukovuusmittaustulos toisesta kuonatartunnasta (Haapasalmi 2015, s. 7).

4.2 Viat paneeleissa

Taulukkoon 4 on koottu kriittisten säröjen syvyyksiä, mitkä on merkitty kirjaintunnuksilla kuvaan 17. Säröjen B, C ja D syvyydet oli ilmoitettu aikaisemmassa paneelitutkimuksessa. Tutkimustulosten perusteella on onnistuttu skaalaamaan särön E koko.

Taulukko 4. Säröjen syvyyksiä.

Särö	A	B	C	D	E
Syvyys	ei ilmoitettu	1,02051 mm	1,2927 mm	10 mm	1,650 m

Normaaleja vaurioitumisen syitä ovat panostusvaiheessa tapahtuvat iskumaiset kuormat, joita syntyy, kun kierrätysteräsranos tiputetaan uuniin romukorista. Romukorin purkuvaiheessa syntyviä vaurioita ei voida ennakoida. Uuniholvin jäähdytyspaneeliin voi syntyä vaurioita, jos pystyssä oleva pitkä kankimainen kappale on osunut holviin, kun sitä ollaan sulkemassa ja lävistää täten paneelin. On myös mahdollista, että valokaari karkaa sulatuksen aikana seinälle ja polttaa putkistoon reiän. Suuaukon paneelit voivat vaurioitua, jos happisuihkulla mellotusvaiheessa synnytetään niihin vaurio. Kun paneeliin on syntynyt vuotoja, niitä on jouduttu korjaamaan hitsaamalla tai vaihtamalla uusi paneeli rikkoutuneen tilalle. Tavanomaisella käytöllä paneelin kestoian odotusarvo vaihtelee puolentoista ja kahden vuoden välillä. Pahimmissa uunin lämpökuormitus paikoissa, elektrodien takana, tyydytään paneelien kestoikäodotteessa vuoteen.

4.3 Paneelien kestävyden parantaminen

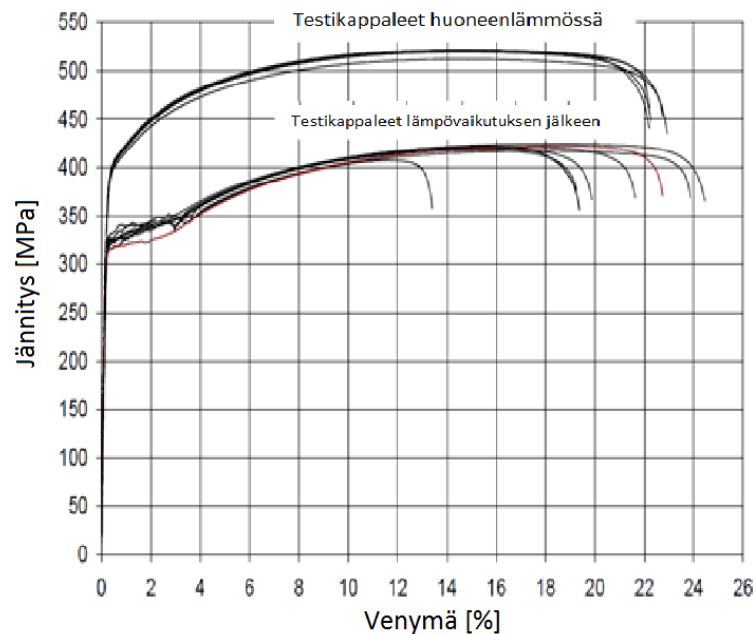
Parantaakseen paneelien kestävyttä ja mahdollisesti lisäten niiden kestoikää, on saatava vaurioiden syntymiseen vaikuttavia syitä selville. Kestoikä on monen osatekijän summa, joihin vaikuttamalla voidaan parantaa rakenteen kestävyttä. Rakenteen kestoikää voidaan lisätä, jos lovijännitystä tai rakenteellista jännitystä saadaan pienennettyä (Niemi 2003, s. 114):

- Hitsausparametrit
- Jälkikäsitteilyt
- Muotoilu
- Materiaalin koostumus
- Käyttölämpötila

Laadukkaan lopputuloksen saavuttamiseksi rakenteen suunnittelussa ja valmistuksessa on oltava huolellinen. Suunnittelussa määritetään parametrit ja valmistus toteuttaa suunnittelun vaatimukset.

4.4 Kriittisiä ongelmia

Korotetussa käyttölämpötilassa teräksen mekaaniset ominaisuudet ovat erilaiset kuin verrattuna huoneenlämpötilaan. Standardin SFS-EN 1993-1-2 (2005) mukaan myötölujuus säilyy vakiona 400 °C saakka. Käytännön testeissä on havaittu, että todellinen käyttäytyminen teräksellä muuttuu matalammissa lämpötiloissa (Outinen & Mäkeläinen 2002, s. 277). Kuvassa 18 on esitetty, kuinka materiaalinlujuusominaisuudet verrattuna venymään laskevat lämpötilan kasvaessa. Liitteessä III on esitetty, kuinka materiaalin myötölujuus alenee, kun teräs altistuu korotettuun lämpötilaan. Outisen & Mäkeläisen (2002) tekemä tutkimus oli suuntautunut rakenteiden palomitoitukseen, mutta samat lainalaisuudet pätevät korotetussa lämpötilassa jäähdyttimiin.



Kuva 18. S350GD+Z käyttäytyminen huoneenlämpötilassa ja korotetussa lämpötilassa suoritetuissa vetokokeista (mukaillen, Outinen & Mäkeläinen 2002, s. 279).

Korotetuissa lämpötiloissa on oltava selvillä perusmateriaalin seosaineista ja seostuksen vaikutuksesta perusmateriaaliin käyttöolosuhteisiin, koska vääränlainen seostus voi aiheuttaa

ongelmia, kuten lämpötilan noustessa lohkohaurautta tai sigmahaurautta. Kuitenkin nämä ilmiöt tapahtuvat pääsääntöisesti korkean kromipitoisuuden (yli 13 %) teräksillä (Lindroos et al. 1986, s. 447). Kuten liitteessä II ja taulukossa 3 olevasta perusmateriaalin koostumuksesta nähdään, käytetyn putkimateriaalin kromipitoisuus ei ole liian korkea. Materiaalin kromipitoisuus on 0,125 % mikä ei riitä, eliminoin sigma-haurauden riskitekijöistä.





Grafitoitumisesta on täysin huomioonotettava ongelma tutkittavan paneelin kohdalla. Olosuhteet, missä grafitoitumista tapahtuu, ovat samanlaiset kuin paneelirakenteen käytön aikaiset. Vauriot syntyvät korkeassa paineessa, korkeassa lämpötilassa ja hitsatun liitoksen läheisyydessä (Lindroos et al. 1986, s. 756). Sopiva kromipitoisuus 0,5–1 % pienentää teräksellä alttiutta grafitoitua (Lindroos et al. 1986, s. 757). Liitteen II perusmateriaalin koostumuksen kromipitoisuus ei riitä ehkäisemään grafitoitumista.

Kuitenkin on huomioitava, että teräkseen jää pieniä määriä epäpuhtauksia, joita ei ole siihen seostettu, jotka ympäristötekijöiden yhteisvaikutuksesta voivat koitua haitalliseksi (Lindroos et al. 1986, s. 794). Epäpuhtaudet teräksen koostumuksessa voivat aiheutua valmistuksen yhteydessä sinne tahattomasti, mutta niitä ei saada sieltä eroteltua poiskaan. Liitteessä II esitetyssä analyysissä havaittiin epäpuhtauksista typpipitoisuuden olevan koholla verrattuna standardin SFS-EN 10216-2 (2014) kappaleanalyysissä annettuihin arvoihin. Typpipitoisuuden ollessa koholla voi mahdollinen vauriomekanismi olla sinihauraus. Myös kuparipitoisuus oli koholla putkimateriaalissa. Kun valmistetaan terästä kierrätysteräksestä, niin teräksen kuparipitoisuus kohoaa, mikä voitiin havaita materiaalin koostumustutkimuksesta (Haapasalmi 2015, s. 2).

Kun kuparipitoisuus on 0,3 %, niin on todettu kasvavan kuumarepeämälttiuden teräksillä. Kuumarepeämiltä vältytään, jos pystytään työskentelemään kuparin sulamispisteen alapuolella (Lindroos et al. 1986, s. 428). Sulahitsausprosessissa käydään kuparin sulamispisteen (1084 °C) yläpuolella. Kun teräs sulaa noin 1500 °C määräytyen teräksen koostumuksesta. Sula kupari tunkeutuu raerajoille ja, kun teräkseen kohdistuu vetokuormitusta, syntyy raerajalle halkeama (Lindroos et al. 1986, s. 428). Ilmiö tunnetaan myös sulan metallin murtumana, missä sula seosaine tunkeutuu raerajalle aiheuttaen lujuuden alenemisen ja jännitystilän muuttuessa, voi johtaa raerajahaurasmurtumaan (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, s. 188).

Niukkahiilisillä teräksillä rikin, typen ja fosforin sekoittuminen epäpuhtautena teräkseen voi kasvattaa teräksen lohkomurtumakriittisyyttä (Lindroos et al. 1986, s. 388). Koska teräkseen jää epäpuhtauksia, on oltava tietoinen missä määrin epäpuhtaudet lisäävät vaurio herkkyyttä. Kuvassa 19 on kooste, kuinka seosaineet ja epäpuhtaudet vaikuttavat teräksen käyttäytymiseen.

H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F	Na		
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Ra	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U														

	HAURASTAVA ALKUAINEN		SUOTAUTUU YHDESSÄ EPÄPUHTAUDEN KANSSA
	LISÄÄ RAERAJAN KOHEESIOTA		EHKÄISEE (HIDASTAA) SUOTAUTUMISTA

Kuva 19. Terästen seosaineiden vaikutus epäpuhtauksien suotautumiseen (Lindroos et al. 1986, s. 797).

Kuten kuvasta 18 havaitaan, typellä, fosforilla rikillä, piillä, vedyllä ja muutamalla muulla alkuaineella on haurastuttava vaikutus teräkselle. Kuvassa 18 on koostettu hyvin alkuaineita, mitkä altistavat kappaleen 2.7 vaurioille. Taulukossa 5 esitellään kootusti, kuinka todennäköinen vauriomekanismin esiintyminen on paneelissa lyhyin perusteluin. Arvosteluna on käytetty (+++) erittäin todennäköinen, (++) todennäköinen, (+) mahdollinen ja (0) epätodennäköinen. Tämä arviointi on suoritettu kirjallisuustutkimuksen ja paneelin määritettyjen olosuhteiden perusteella. Paneeliin syntyy laskennallisesti 13500 kuormituskertaa kahden vuoden aikana.

Taulukko 5. Vauriomekanismien todennäköisyys paneelissa.

Vauriomekanismi	Todennäköisyys	Huomioita
Viruminen	(++)	Vaurioaika liian lyhyt mutta pidemmän käytön jälkeen todennäköisempi
Grafitoituminen	(+)	Mikrorakenne ei mahdollista
Korroosioväsyminen	(++)	Korrodoivat käyttöolosuhteet mutta lyhyt vaurio aika pienentää todennäköisyyttä.
Korkean lämpötilan korrosio	(0)	Ei rikkihapon vaikutusta
Jännityskorrosio	(+++)	Hitsien läheisyys, murtopinta, lämpöjännitykset ja värähtelyt kasvattavat todennäköisyyttä esiintymiselle
Väsyminen	(++)	jännitystasot alhaiset, kuormituskertoja liian vähän väsymisvauriolle
Haurasmurtuma	(++)	Murtopinta vastaa haurasta murtopintaa, lämpötila ei
Sitkeämurtuma	(+)	Murtopinta ei vastaa sitkeää murtumaa
Vanheneminen	(+)	kylmämuokkaus putken valmistuksessa altistaa
Sulametallihauraus	(+++)	Mahdollinen, jos kupari suotautuu raerajalle, murtopinnassa ei todisteita kuparista
Päästöhauraus	(++)	Lämpötila-alue
Sigmahauraus ja 475°-hauraus	(0)	Kromipitoisuus liian alhainen
Sinihauraus	(+++)	Lämpötila-alue, venymäkäyttäytyminen, muokkauslujittuminen ja koostumus

Taulukosta saatiin viisi todennäköisimmin esiintyvää vauriomekanismia viruminen, jännityskorrosio, väsyminen, sulametallihauraus ja sinihauraus. Näistä mekanismeista tai näiden kombinaatiosta löytyy paneelin vaurioon johtava ilmiö. Väsymisvaurion syntyminen puhtaasti jännitysten perusteella on esitetty liitteessä VII ja se vaatisi noin 1200 MPa:n suuruista jännitystä.

5 METODIT

Tutkimus toteutettiin menetelmätriangulaationa, joka koostuu kolmesta toisiaan tukevasta tutkimusmenetelmästä. Tutkimus toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, laboratoriotutkimuksena ja FEM-laskentana. Kirjallisuusselvityksessä pyrittiin hakemaan tietoa aikaisemmista tutkimuksista. FEM-laskennalla pyrittiin selvittämään paneelirakenteeseen syntyvät jännitykset ja deformaatiot, kun se altistuu lämpökuormitukselle. Laboratoriotutkimuksessa tutkittiin vaurioituneita jäähdytyspaneelien kuonatartuntoja ja niihin syntyneitä halkeamia.

5.1 Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuusselvitys oli työn teoriaosuus. Teoriaosuudessa perehdyttiin siihen, millaisia vaikutuksia teräksen käyttäytymisessä on, jos käyttöolosuhteissa on korotettu lämpötila. Teoriaa koottiin konetekniikan ja metallurgian perusteoksista, joita hyödynnettiin elementtimenetelmä mallin suunnittelussa. Haettiin uusia tutkimustuloksia, joista voitiin vahvistaa oletamusten paikkansapitävyys sekä saada tutkimukseen mukaan uusimpien tutkimusten tuomia vahvistuksia. Termomekaanisten ilmiöiden lisäksi selvitettiin ilmiöitä, joiden yhteisvaikutuksesta rakenteen kestävyys voi merkittävästi heikentyä, kuten korroosiovaikutus ja teräksen koostumuksen vaikutus käyttöolosuhteisiin. Kirjallisuuskatsauksessa määritettiin rakenteen kestävyteen vaikuttavia vauriomekanismeja, jotka voivat esiintyä tutkimuksessa tarkastellussa paneelirakenteessa.

5.2 Lämpökuorman mallinnus elementtimenetelmällä

Kun vaurioitumiseen vaikuttavia tekijöitä oli kerätty ja haettu kestävyteen vaikuttavista parametreista tietoa, perehdyttiin rakenteen mallintamiseen, jotta saataisiin laskentamalli käyttäytymään oikealla tavalla.

Elementtimenetelmässä pyritään tutkittava rakenneyksityiskohta mallintamaan pienemmiksi palasiksi eli elementeiksi. Elementtimenetelmän malleissa voidaan laskea siirtymäkenttää, jännityskenttää ja lämpötila-analysissä lämpövirtaa (Cook 1995, s. 1). FEM-laskennassa määritetään numeerisesti ratkaisua haluttuun ongelmaan, olipa se jännitys, siirtymä tai ominaisuus (Cook 1995, s. 205).

$$K_T T = Q \quad (13)$$

Yksinkertaistettuna tilanne on matemaattisesti aikariippuvaisena FE-yhtälössä 13, missä $K_T T$ on materiaalin lämmönjohtavuusmatriisi ja Q on lämpökuorma (Cook 1995, s. 205). Sekä jännitysanalyysissä että lämpötila-analyysissä on sama matriisimuoto FE-yhtälöillä, joten voidaan hyödyntää samanlaista verkotusta ja samoja elementtejä. Kun lämpösäteilyn vaikutus otetaan huomioon laskennassa, niin joudutaan käyttämään epälineaarista analyysia. Fourierin lämmönjohtavuuden mukaan lämpötilagradientti lokaaliin x-suuntaan on (Cook 1995, s. 206):

$$f_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

yhtälössä 14 f_x on lämpövuoto pinta-alaa kohden, k on lämmönläpäisykerroin (Cook 1995, s. 206). Yhtälö voidaan laajentaa koskemaan tilavuutta laajentamalla se matriisimuotoon ja lisäämällä siihen y- ja z-suuntaiset derivaatat.

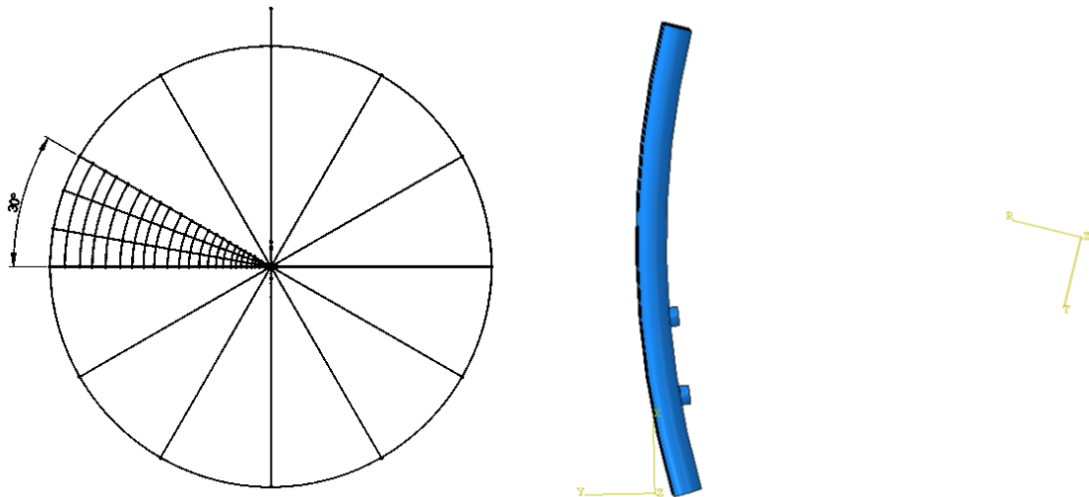
Lämpötilamallinnuksessa vähäinen lämpötilagradientti saattaa aiheuttaa korkean venymän lähelle reikiä, lovia tai muita rakenteen epäjatkuvuuskohtia. (Cook 1995, s. 214). Karteesisessa koordinaatistossa mallinnettu lineaarinen lämpökenttä aiheuttaa siirtymiä, mutta ei jännitystä. (Cook 1995, s. 214). Termomekaanisessa analyysissä solmulämpötilat korreloituvat solmusiirtymiin (Ferro, Berto & Borsato. 2016 s. 2373). Sylinterin kuorelle mallinnettu lineaarinen lämpökuorma, esimerkiksi putkessa, aiheuttaa jännityksiä. (Cook 1995, s. 214.)

5.3 Elementtimenetelmä

FEM-laskennalla pyrittiin määrittämään rakenteeseen syntyvät jännitykset, jotta voitaisiin määrittää rakenteen kestoikä ja vauriomekanismi. Laskentaa varten tilanteesta tehtiin karkea malli, mikä vastasi tilannetta, jossa jäähdytyspaneelit olisivat kiinnittyneet runkoon. Tämän karkean mallin avulla voidaan yksityiskohtaisempaa tarkastelua varten mallintaa rakenteesta vain haluttu yksityiskohta, alimallina ja sijoittaa siihen kuormitukset ja reunaehdot globaalisti mallista.

Koska mallinnettava paneelikokoonpano oli ympyrän kehän muotoinen osa, voitiin mallinnuksessa ottaa huomioon pistesymmetrisyys ja voitiin mallintaa siitä yksi sektori (Abaqus

2016). Kuvassa 20 on esitetty, kuinka jäähdytyspaneelit jakautuvat kehärunkoon. Yksi paneeli vastaa aina yhtä 30° sektoria ja yhdestä sektorista on luotu FEM-malli, joka vastaa puolikasta jäähdytyspaneelia.



Kuva 20. Rakenteelle määritetty symmetrisyys.

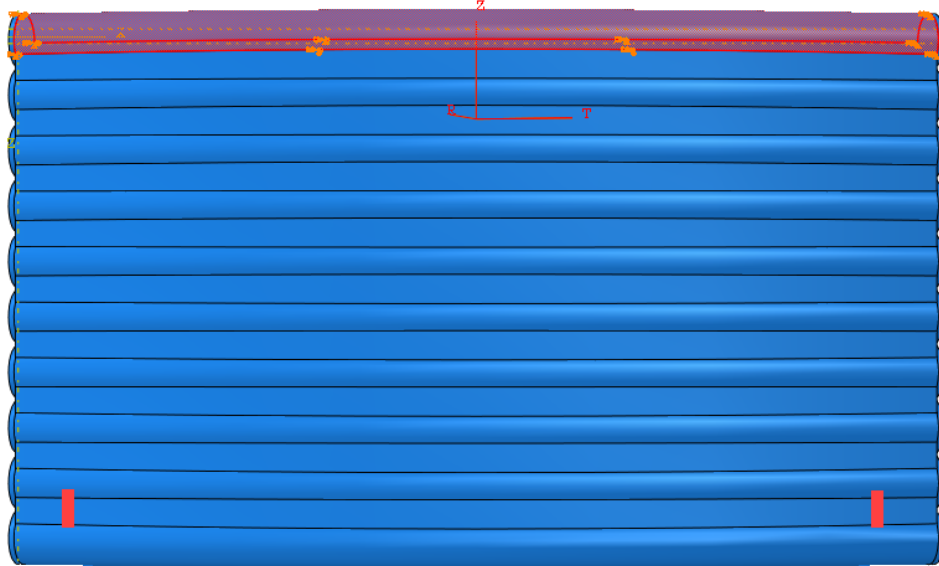
Alimallissa, johon siirretään globaalin mallin kuormitus reunaehtona, voidaan käyttää tiheämpää verkotusta kuin päämallissa. Näin voidaan lyhentää laskenta-aikaa. Koska käytettyjen elementtien määrä ei nouse liian suureksi, vaikka elementtien koko pienenee. Laskennassa saadaan samat tulokset, vaikka laskentatiedostojen koko pienenee, kun käytetään pienempiä malleja. FEM-laskenta suoritettiin Abaqus/standard 6.14-1-version ohjelmistolla. (Abaqus 2016.) Symmetrinen paneelirakenne toimii mallinnuksessa päämallina, josta saadaan reunaehdot tarkemmin verkotettua alimallia varten.

Alimalliksi valittiin jäähdytyspaneelin yhden putken puolikas. Näin saatiin riittävästi alkuperäistä geometriaa. Alimalliin voidaan tehdä muokkauksia, kunhan ei muokata pintoja, joista on yhteys globaaliin malliin (Abaqus 2016).

5.3.1 Reunaehto

Tutkimuksessa selvitettiin paneelin kiinnityksen vaikutusta sen käyttäytymiseen kuormitus-tilanteessa. Ylälaidassa ja alalaidassa on ruuvikiinnitys, millä paneeli on kiinnitetty runkoon määrittäen rakenteen reunaehdon. Laskenta-ajan nopeuttamiseksi paneelista mallinnettiin

puolikas globaaliin malliin. Kuvassa 21 on esitetty, kuinka reunaehdot asettuvat puolikkaan paneelin geometriaan.

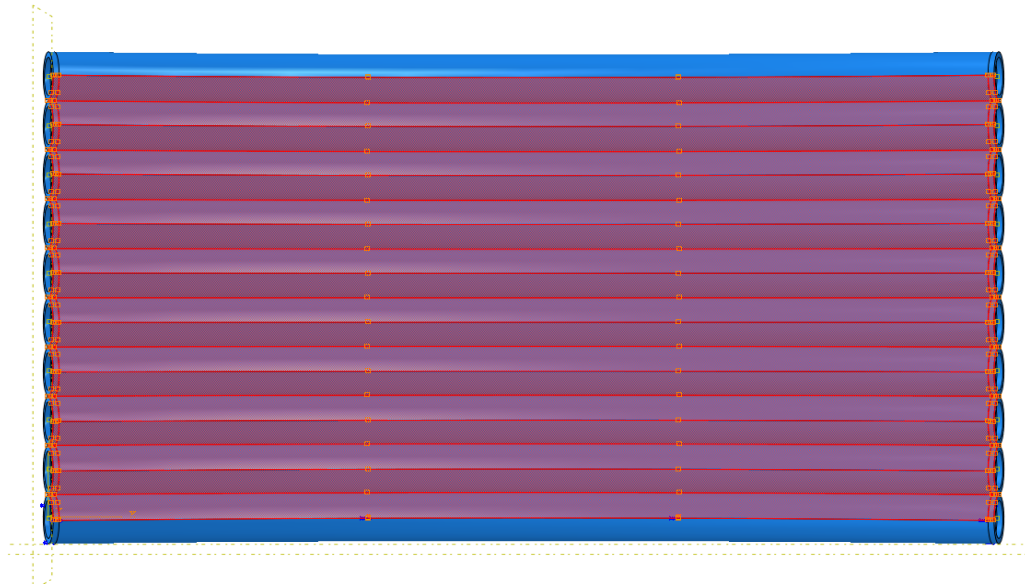


Kuva 21. Globaalin mallin reunaehdot määriteltynä sylinterikoordinaatistossa.

Alimalliin kuormitukset siirretään globaalista mallista siirtymäreunaehtona. Alimalli lukee lasketusta globaalistamallista siirtymät ja käyttää niitä alimallin kuormituksena, minkä seurauksena alimalli käyttäytyminen on osittain siirtymäohjattua.

5.3.2 Lämpötila-analyysi ja -kuormitus

Lämpötila-analyysinä käytettiin tasapainotilamallia (steady state). Tässä tasapainotilamallissa laskenta tapahtui siten, että määritetystä alkulämpötilasta siirryttiin ennalta määritettyyn loppulämpötilaan. Laskenta suoritettiin kasvattamalla lämpötila maksimiin ja jäähdyttämällä pinta alkulämpötilaan, jolloin saatiin todellinen lämpösykli mallinnettua. Kuvassa 22 on esitetty, miten lämpökuorma on sijoitettu globaaliin malliin. Jatkuvassa käytössä paneelisiin odotetaan kohdistuvan 6750 lämpökuormanvaihtoa vuodessa.



Kuva 22. Lämpökuorma globaalissa mallissa. Punainen väri indikoi lämpökuormitettua aluetta.

Muulla mallissa vallitsee alkulämpötila, jona käytettiin 20 °C ja loppulämpönä käytettiin 615 °C. Alkulämpötilaa määriteltessä globaalista mallista valittiin kaikki pinnat ja niille asetettiin kyseinen lämpötila. Kun loppulämpötila asetettiin kuvan 21 pinnoille, valituille pinnoille kohdistui lämpökuorma. Alimalliin kuormitus siirrettiin pakotettujen siirtymien muodossa ja reunaehdoista vapaille pinnoille asetettiin lämpökuorma.

5.3.3 Materiaalimalli ja steppi funktio

Taulukossa 6 on esitetty teräksen materiaaliparametreja, joita käytettiin laskennassa. Liitteeseen VI on laajennettu materiaaliparametrit epälineaarille materiaalimallille, jolla mallinnettiin materiaalin plastista käyttäytymistä ja lämpötilasta riippuvaista kimmomoduulia. Plastisella mallilla ja lämpötilariippuvaisella kimmomoduulilla haluttiin tarkentaa rakenteen käyttäytymistä.

Taulukko 6. Materiaaliparametrit teräkselle (Abaqus 2016; SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 25).

Kimmomoduuli	Poissonin vakio	Lämpölaajenemiskerroin	Lämmönjohtavuus
210 000 MPa	0,3	12×10^{-6}	43 W/mK

Tarkasteluissa myös laajennettiin laskentaa koskemaan rakenteen jäähtymistä, jotta voitiin tehdä havaintoja, mitä yhdessä lämpösyklissä tapahtuu. Lämpökuormitus nousee lineaarisena rampina maksimiin ja jäähtyy alkulämpötilaan, minkä seurauksena on saatu mallinnettua yksi lämpötilasykli. Laskenta on jaoteltu 20 askeleeseen, jotta lämpeneminen ja jäähtyminen saataisiin tarkemmin mallinnettua, kun ei vain tarkastella loppupistettä ja alkupistettä. Jos jäähtymistä ei otettaisi huomioon, niin mallinnettaisiin vain puolikasta kuormanvaihtoa. Lämmönjohtavuus oletettiin laskennassa vakioksi, koska sen muuttuminen lämpötilan funktiona ei tuonut merkittävää muutosta tuloksiin.

5.3.4 ENS-mallintaminen

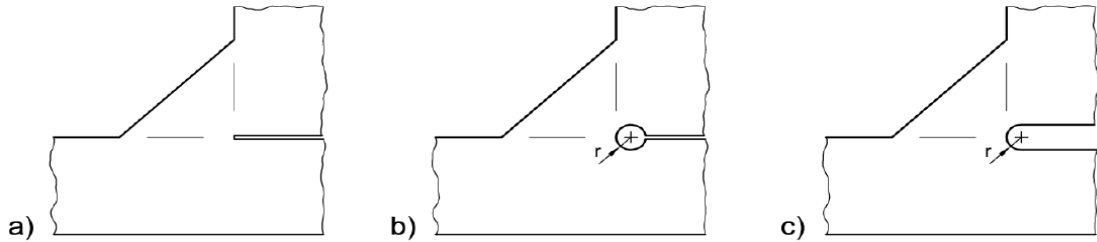
Tutkittaessa rakenteeseen syntyviä jännitys keskittymiä hyödynnettiin ENS-menetelmää. Joudutaan FEM-malliin tekemään pieniä muokkauksia, jotta elementtikoko saadaan riittävän pieneksi lovien läheisyydessä. Taulukossa 7 on kerrottu, minkälaisia vaatimuksia on asetettu elementeille, jotta arvioitu virhe pysyisi riittävän pienenä. Taulukossa 7 on havainnollistettu kuinka mallinnettava pyöristyssäde vaikuttaa verkotukseen.

Taulukko 7. Verkotus ohje ENS-menetelmälle (r on mallinnettu pyöristyssäde) (mukaillen: Fricke 2010, s. 10).

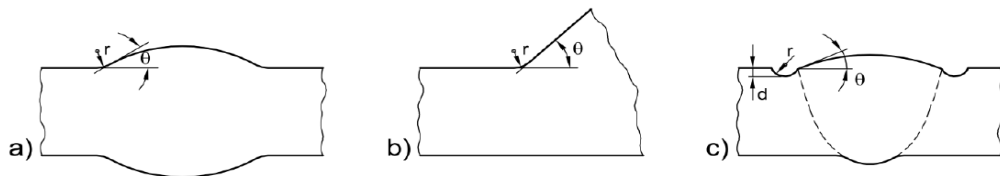
Elementin tyyppi	Suhteellinen koko	Koko kun, r = 1mm	Koko kun, r = 0,05mm	Elementtien lukumäärä ympyrän kaarella (360°)	Arvioitu virhe
Parabolinen	$\leq r/4$	$\leq 0,25\text{mm}$	$\leq 0,012\text{mm}$	≥ 24	$\approx 2 \%$
Lineaarinen	$\leq r/6$	$\leq 0,15\text{mm}$	$\leq 0,008\text{mm}$	≥ 40	$\approx 10 \%$

Baumgartnerin ja Bruderin (2013) tutkimuksen mukaan: ”Verkotuksen laatuun vaikuttaa voimakkaasti se, mitä algoritmia käytetään verkotukseen esikäsittelijässä ja kolmio- tai tetraelementtejä ei tulisi käyttää, koska elementtiverkkoa ei hallita riittävän hyvin loven läheisyydessä. Tämän vuoksi kolmio- ja tetra-elementeille ei ole verkotussuosituksia.” Mikäli elementtejä kierroksella käytetään 24 kpl, niin tällöin tulisi mallintaa kolme kehää (Baumgartner & Bruder 2013, s. 138). Kuvassa 23 on esitetty pienahitsin juurenpuolen mallinta-

miseen käytetyt vaihtoehdot ENS-menetelmällä. Kuvassa 24 on vertailtu sitä, kuinka fiktiivinen pyöristyssäde sijoittuu rakennemalliin. Kuvan tapauksissa on mallinnettu pienahitsit, joissa ei ole otettu huomioon tunkeumaa.



Kuva 23. Juurenpuolen ilmaraon mallintaminen (Fricke 2010, s. 7) a) hitsi rakenteessa ilmarako, b) avaimenreikä, c) u-muotoinen lovi.

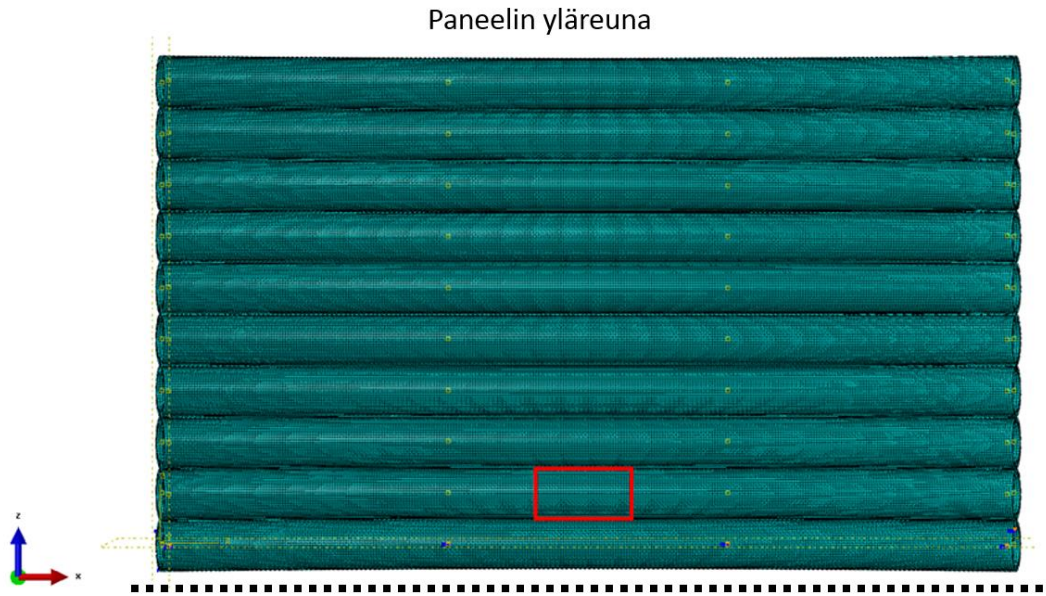


Kuva 24. Rajaviivan pyöristyssäteen mallintaminen a) päittäisliitos (pyöristetty), b) pienaaliitos (pyöristetty) ja c) päittäisliitos (lovettu) (Fricke 2010, s. 7).

Kuvassa 24 on havainnollistettu loven mallintaminen tutkittavan hitsin rajaviivalle. θ kuvaa hitsin ja perusaineen välisen liittymiskulman. Kohdassa c) d ilmaisee mallinnetun kolon syvyyttä.

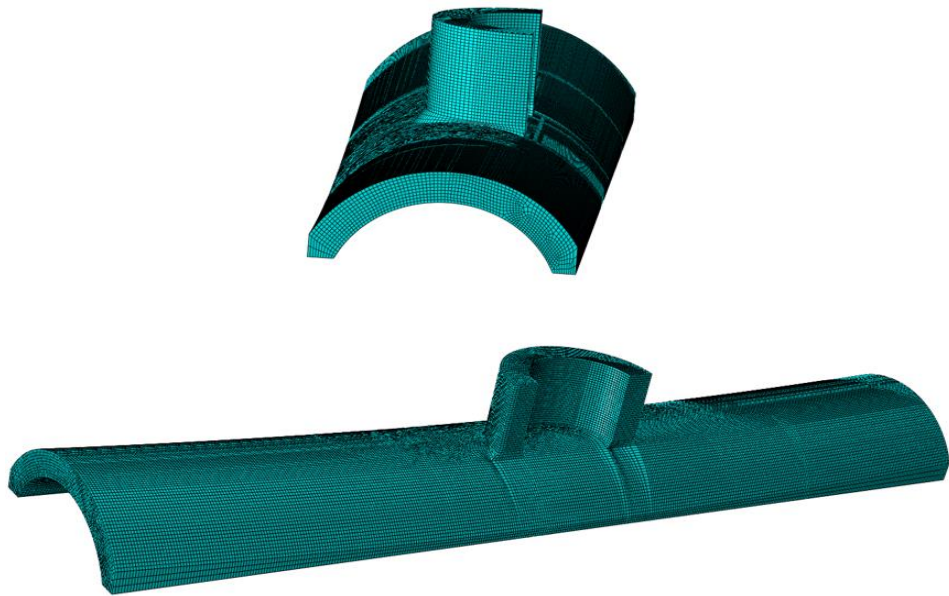
5.3.5 Alimalli ja globaali malli

Kuvassa 25 on esitetty, kuinka alimalli on sijoittunut globaaliin malliin. Alimallin paikka valikoitiin keskelle paneelia, koska sinne syntyy kuormitustilanteessa suurimmat siirtymät. Katkoviiva kuvassa on symmetrialinja.



Kuva 25. Globaali malli, josta leikataan alimalli.

Kuvassa 26 on esitetty verkotettu alimallin geometria, johon on lisätty tarkasteltava kuonatartunta. Kuvassa olevaa kuonatartuntaa ei ollut globaalissa mallissa. Alimallin reunaehdot ja kuormitukset asettuvat pinnoille, mitkä ovat yhteydessä globaaliin malliin. Alimallin reunaehdoista vapaille pinnoille asetettiin lämpökuorma.



Kuva 26. Alimalli, johon on lisätty kuonatartunta.

Alimalli ja globaali malli on verkotettu lineaarisella kahdeksansolmuoisella tiielementillä, joissa on käytetty alennettua integrointia laskentatehon parantamiseksi. Taulukossa 8 on esitetty elementtikokoa ja elementtien määrää selventävät tunnusluvut. Keskimääräisellä sivusuhteella kuvataan elementtien muotoa, koska mitä lähempänä arvoa yksi on sivusuhte, sitä laadukkaampi on elementin muoto. Sivusuhteen ollessa arvossa yksi ovat elementit neliöitä tai kuutioita. Elementti koon erosta johtuen voi syntyä pientä eroa globaalimallin ja alimallin tulosten välille, koska siirtymät interpoloidaan globaalista mallista ja leikkauspinoilla solmupisteet eivät kohtaa (Abaqus 2016).

Taulukko 8. Laskennassa käytettyjen elementtien tiedot.

	Elementti- tyyppi	Globaali ele- menttikoko	Sivusuhte elemen- teillä keski- määrin
Gloaalimalli	C3D8R	4	1,48
Alimalli	C3D8R	1	1,33

5.4 Analyttinen laskenta

Analyttisellä laskennalla haluttiin tehdä varmennushavaintoja ja verrata luonnonlakien toteutumista FEM-laskennassa. Analyttisessä laskennassa on käytetty apuna MathCad 15 -ohjelmistoa. Analyttinen laskenta on esitetty liitteessä I. Analyttisellä laskennalla haluttiin esittää, kuinka sulatukseen käytetyn energian kautta saatiin määriteltynä lämpötilat paneeliin. Millainen voisi olla lämpötila putken pinnalla, kun tiedetään putken sisällä olevan veden lämpötila.

5.5 Laboratoriotutkimukset

Putken vaurioitumattomasta kohdasta valmistettiin pala alkuaineanalyysiin hiomalla palasta korrodoituneet pinnat puhtaaksi siten, että tulos saatiin puhtaasta materiaalista. Alkuaineanalyysi toteutettiin mittalaitteistolla synnytetyn valokaaren spektriä analysoimalla. Samasta tutkimuskappaleesta otettiin mikrorakennekuvat, jotka on esitetty liitteessä IV. Liitteessä IV on esitetty myös makrokuva halkisahatusta kuluneesta kuonatartunnasta, mistä voitiin havaita käytössä syntyneitä halkeamia. Hitsaustyön laadun varmistamiseksi olisi ollut hyvä saada vertailukohde kuonatartunnasta, joka ei ole ollut prosessikäytössä.

6 TULOKSET

Tutkimustulokset on jaoteltu näytepaloista tehtyihin havaintoihin ja FEM-laskennan tuloksiin. Tuloksissa FEM-laskennan tulokset on esitetty jännitys jakaumakuvina. Tuloksissa on esitetty FEM-laskennassa määritetyt paneeliin syntyvät siirtymät.

6.1 Laboratoriotutkimukset

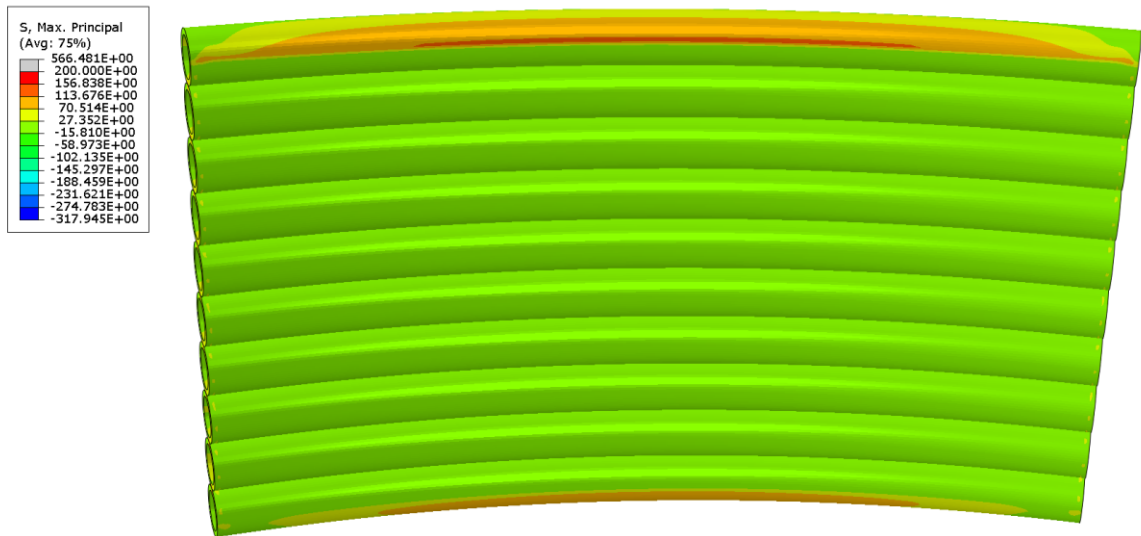
Tutkimuksessa saatiin selville analysoimalla näytepaloja, että jokaisen pois kuluneen kuonartartunnan hitsausliitoksen läheisyydessä oli havaittavissa halkeamia. Samalla saatiin korjattuja vauriokohtia auki ja havaittiin, että korjaushitsaus oli jäänyt vajaaksi. Koostumusanalyysissä, mikä on esitetty liitteessä II, havaittiin eroavaisuuksia standardin SFS-EN 10216-2 (2014) koostumuksessa tyypipitoisuuden kohdalla taulukossa 3 sivulla 37. Verrattuna standardin antamiin ohjearvoihin voitiin havaita materiaalin sisältäneen korkeampia pitoisuuksia rikkiä ja typpeä.

6.2 Analyttisen laskennan tulokset

Analyttisen laskennan tuloksena saatiin arvioitua jäähdityspaneelin pinnalle lämpökuorma FEM-laskentaan. FEM-laskennassa käytettäväksi lämpökuormaksi määritettiin 615 °C. Analyttisessä laskennassa ei otettu huomioon ilmiöiden epälineaarista vaikutusta kuten lämpösäteilyä.

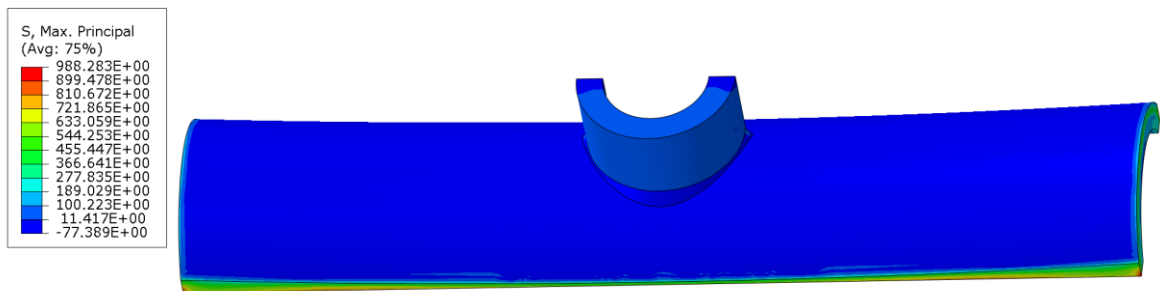
6.3 FEM-laskennan tulokset

FEM-laskennassa selvitettiin paneelirakenteen käyttäytyminen maksimilämpötilassa ja jäähtymisvaiheessa. Tulokset on esitetty jännitys jakaumakuvina. Jännitys jakaumissa on käytetty maksimipääjännitystä. Kuvassa 27 on esitetty maksimipääjännitykset puolikkaalle paneelille. Symmetriareunaehto aiheuttaa paneelin yläreunaan syntyvän jännityskeskittymän. Globaalin mallin maksimipääjännitykset ovat 2–10 MPa välillä määräytyen siitä, onko jännitys määritetty paneelin keskeltä vai paneelin reunasta lähellä tukea. Jännitys jakaumakuva on otettu, kun paneeliin kohdistuu suurin lämpökuorma.



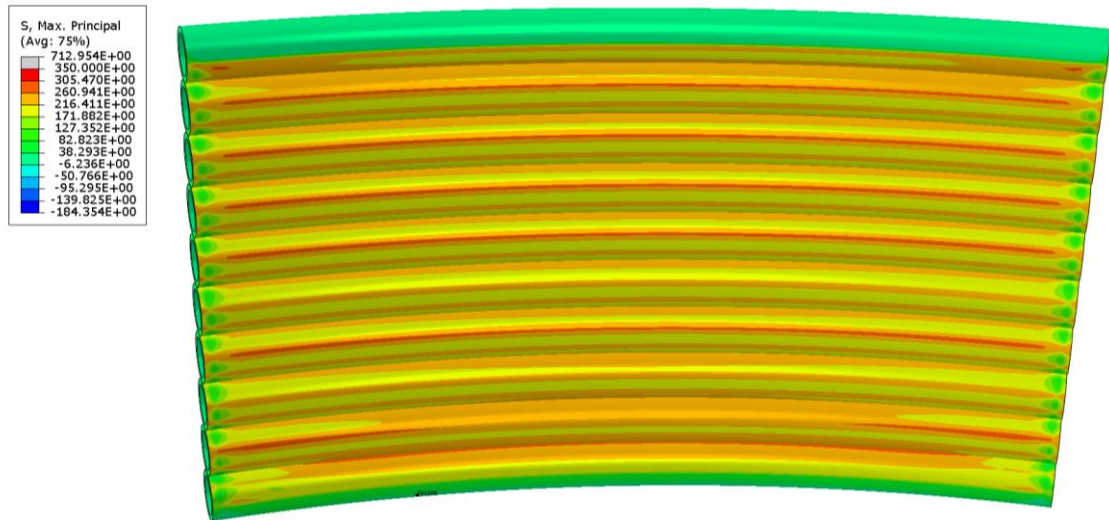
Kuva 27. Maksimipääjännitys-jännitys jakauma globaalista mallista maksimilämpötilassa.

Kuvassa 28 on esitetty alimallin maksimipääjännitykset suurimman lämpökuorman kohdalta. Kuvasta 28 havaitaan, ettei tässä vaiheessa kuonatartunnan ympäristöön synny kriittisiä jännityksiä. Suurimmat jännitykset syntyvät reunaehtopinnoille, mutta ne eivät ole merkitseviä. Jännitykset vaihtelevat alimallissa 2–3 MPa lämpökuormalle altistuvassa pinnassa.



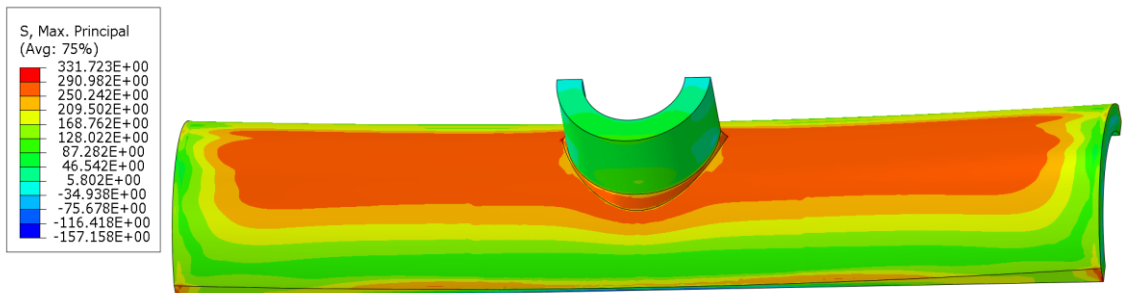
Kuva 28. Maksimipääjännitys-jännitys jakauma alimallista maksimilämpötilassa.

Kuvassa 29 on esitetty maksipääjännitykset sillä hetkellä, kun paneeli on jäähtynyt huoneenlämpötilaan. Paneeliin kohdistuu merkittävämpi maksimipääjännitys kuin verrattuna maksimilämpötilaan. Maksimipääjännitys vaihtelee 130–230 MPa lämpökuormitetussa pinnassa, kun paneeli on jäähtynyt huoneenlämpötilaan. Jännitysten suuruuteen mallinnetussa paneelissa vaikuttaa etäisyys tukipisteistä.



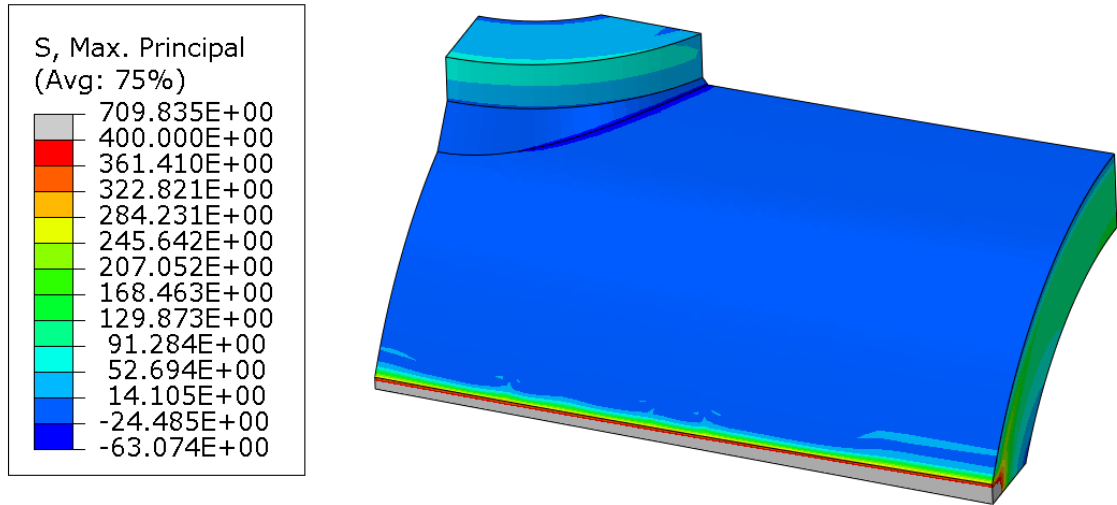
Kuva 29. Maksimipääjännitys-jännitys jakauma globaalista mallista jäähtyneenä huoneenlämpötilaan.

Kuvassa 30 on esitetty jännitys jakaumat alimallista, kun se on jäähtyneenä huoneenlämpötilaan. Jännitykset vaihtelevat alimallissa 120–275 MPa, kun tarkastellaan jäähtynyttä putken pintaa. Tulos on samankaltainen kuin globaalissa mallissa, mutta jännitykset ovat hieman korkeampia, koska hitsin läheisyyteen syntyy jännityskeskittymiä.



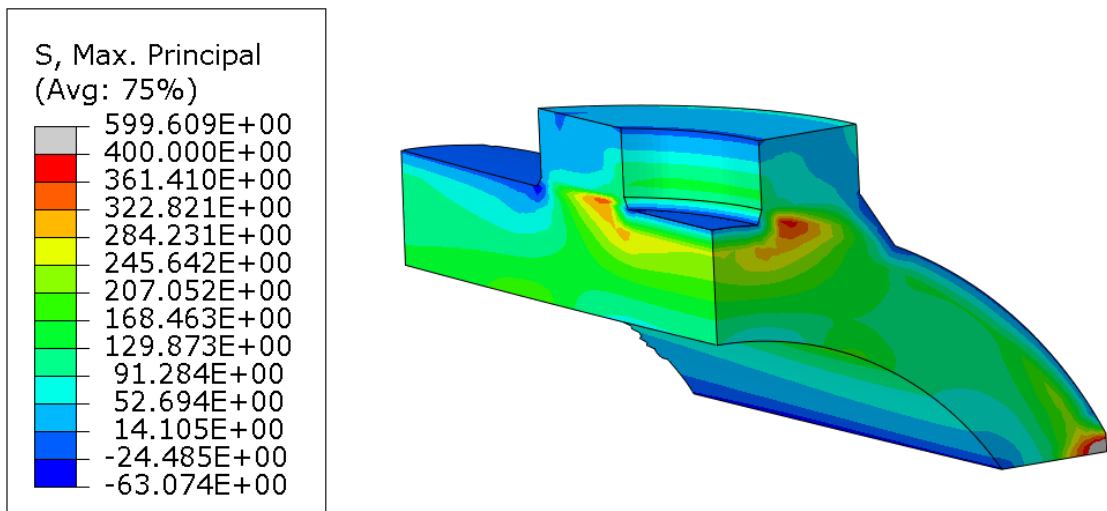
Kuva 30. Maksimipääjännitys-jännitys jakauma alimallista jäähtyneenä huoneenlämpötilaan.

Hitsin vaikutusta tutkittiin jännityskeskittymän aiheuttajana, joten kuvassa 31 on esitetty maksipääjännitys-jännitys jakauma maksimilämpötilassa. Kuva on aiemmin esitetystä alimallista, mutta esityksen selkeyttämiseksi alimallista on piilotettu elementtejä.



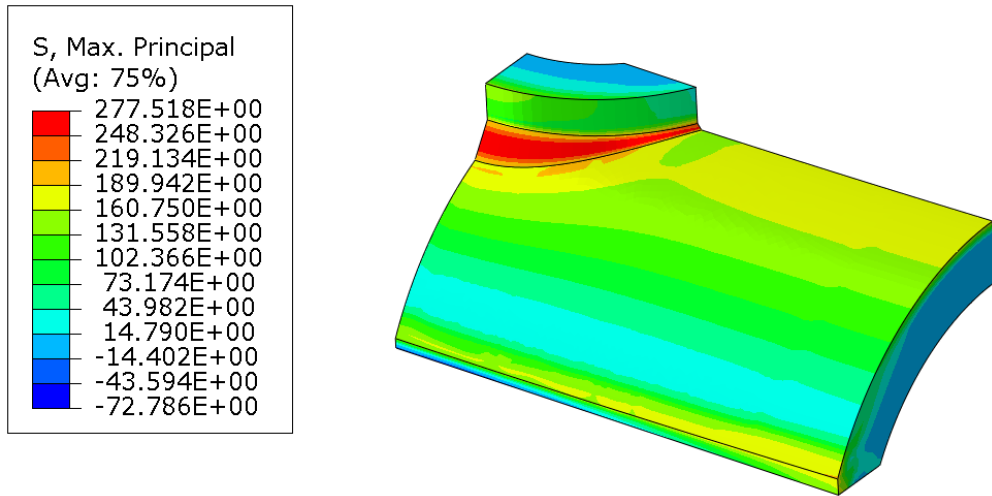
Kuva 31. Maksimilämpötilassa tarkennus hitsialueelle.

Kuvassa 32 pienennetty alimalli on käännetty ja siinä on esitetty maksimipääjännitykset putken seinämnpaksuuden yli. Kuvasta havaitaan, miten hitsattu kuonatartunta aiheuttaa jännityskeskittymiä. Kuvasta ilmenevät jännityskeskittymät jäävät korkeimman lämpökuorman kohdalla paikallisiksi.



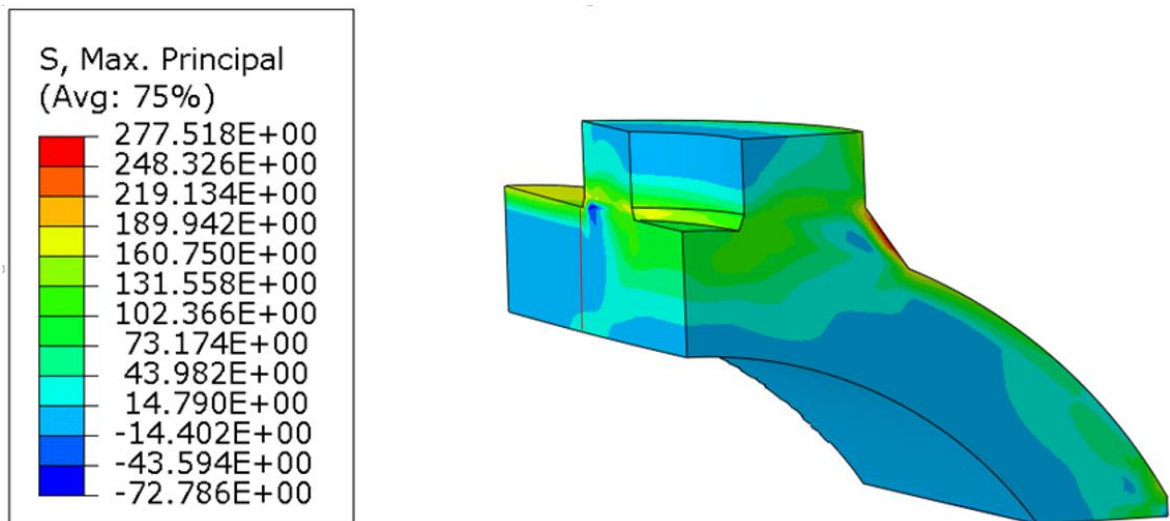
Kuva 32. Maksimilämpötilassa jännitysjaakauma putken paksuuden yli.

Kuvassa 33 on tarkasteltu lähemmin jäähtyneen rakenteen hitsausliitosaluetta. Kuvasta voidaan havaita, kuinka jäätyneestä rakenteesta hitsiin ja sen läheisyyteen syntyy korkeampia jännityksiä. Paikallisesti jännitykset ovat S235 teräksen myötörajan suuruisia.



Kuva 33. Tarkennettu kuva hitsialueelta, kun rakenne on jäähtynyt huoneenlämpötilaan.

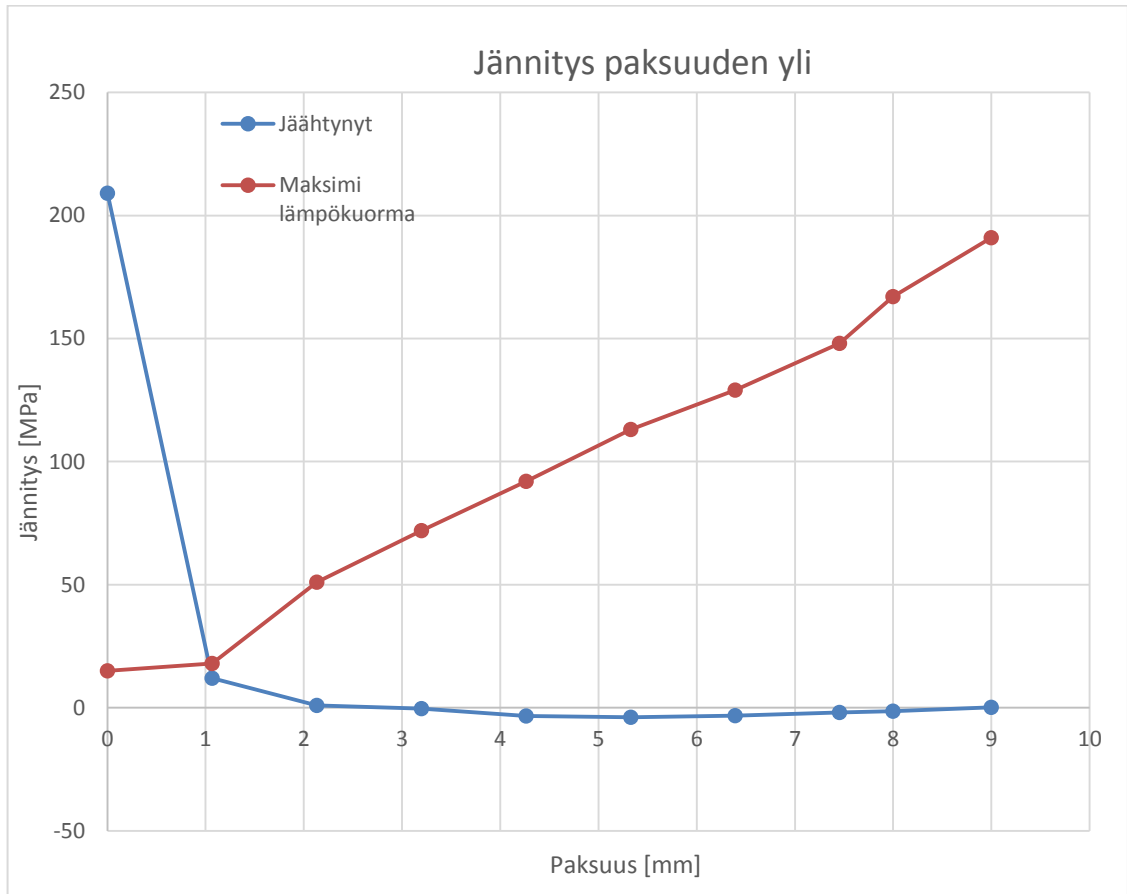
Kuvassa 34 jäähtyneestä geometriasta on esitetty jännitys jakauma putken paksuuden yli. Kuvia 34 ja 32 vertailemalla voidaan havaita, kuinka putken sisäpinnan jännitys muuttuu kuormituksen muuttuessa. Jännitys jakaumien ero syntyy rakenteen deformaation muutoksesta syntyvästä taivutuksesta.



Kuva 34. Tarkennettu kuva putken paksuuden yli, kun rakenne on jäähtynyt huoneenlämpötilaan.

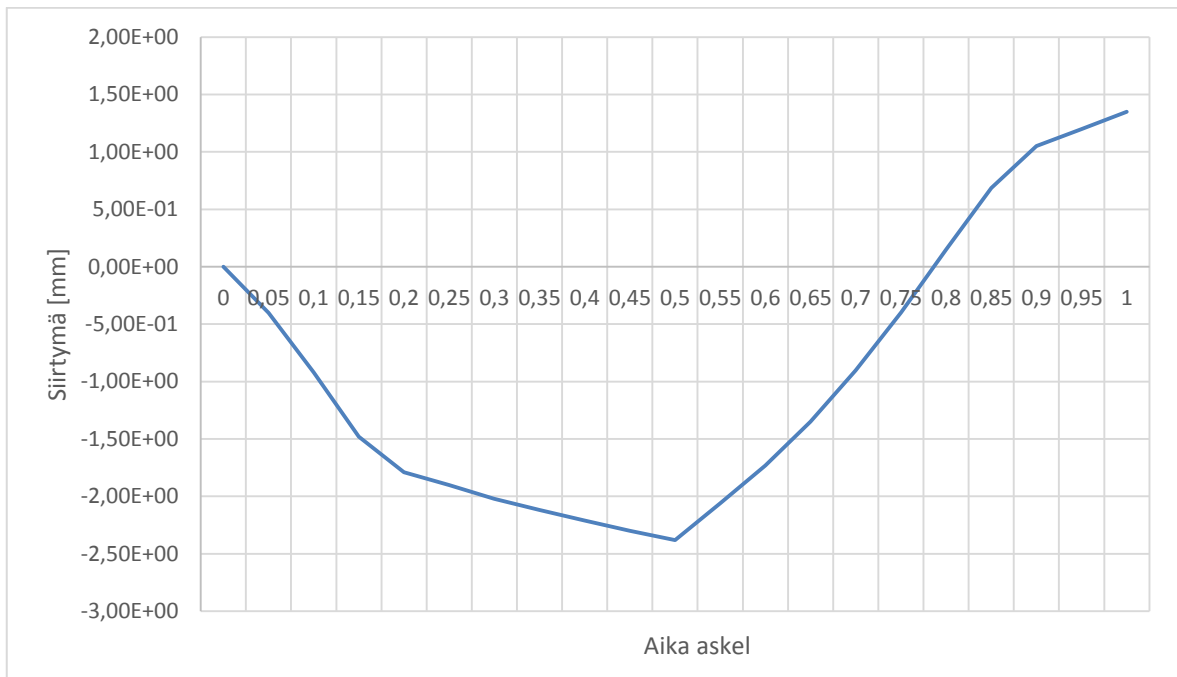
Kuvassa 35 on esitetty, kuinka jännitykset käyttäytyvät putken seinämän paksuuden yli mentäessä. Kuvaan 34 piirretyn linjan kohdalta on määritetty kuvan 35 jännitys jakaumat. Sinisellä pistekäyrällä on kuvattu jäähtyneeseen rakenteeseen syntyviä jännityksiä. Punaisella pistekäyrällä on kuvattu jännitys jakaumaa maksimilämpötilassa. Jäähtymisen seurauksena

jännitys tasaantuu nopeasti lähelle nolaa lukuun ottamatta hitsatun liitoskappaleen aiheuttamaa lovijännitystä. Jännitykset kuvaan 34 on määritetty alimallista hitsin rajaviivalta putken keskilinjasta. Nollapisteenä käytettiin putken ulkopintaa.



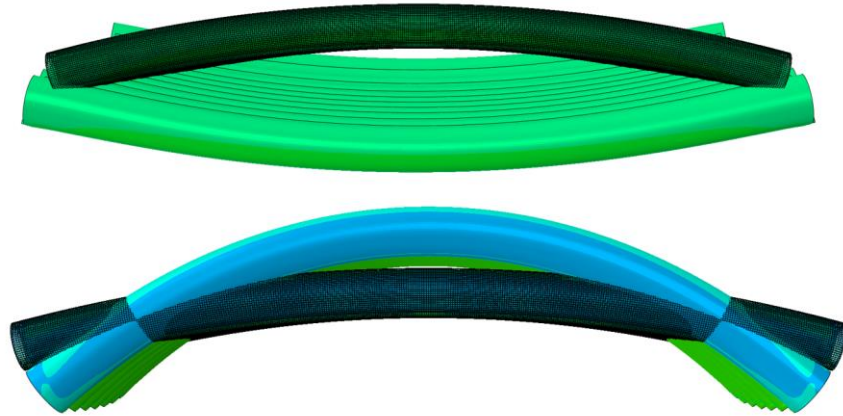
Kuva 35. Jännitys jakaumat mitattuna putken seinämän paksuuden yli hitsin rajaviivalta.

Kun tarkastellaan paneeliin syntyviä siirtymiä, jotka on esitetty kuvassa 36, niin havaitaan kuinka paneelin keskipiste siirtyy uunin säteen suunnassa ulospäin lämpösyklin aikana. Siirtymäkäyttäytyminen on samansuuntainen kuin mitä kuvien 32 ja 34 jännitys jakaumakuvaajat antoivat olettaa.



Kuva 36. Globaaliin malliin syntyvät siirtymät.

Ylempi deformaatio havainnollistaa ajanhetkeä 0,5 maksimilämmössä ja alempi ajanhetkellä 1 jäähtyneenä. Lämpölaajenemisen seurauksena ajanhetkellä 0,5 deformaatiomuoto on kohti uuninkeskipistettä ja jäähtymisen seurauksena lämpölaajentunutpinta kutistuu, jolloin deformaatiota syntyy uuninkeskipisteestä ulospäin. Tarkastelut deformaation suhteen on suoritettu paneelin keskipisteelle, koska siinä syntyvät suurimmat siirtymät. Kuvassa 37 on esitetty globaaliin malliin syntyvät siirtymät.



Kuva 37. Globaalin mallin siirtymät: ylempi deformaatiokuva on maksimilämpötilasta ja alemmassa jäähtyneen vaiheen siirtymät. Kuvassa on esitetty tummempi putki havainnollistaen lähtötilannetta.

7 POHDINTA JA PARANNUSEHDOTUKSET

Pohdinnassa mietittiin, sitä mitä uutta tietoa on saatu tulosten pohjalta. Mitä vaikutusta tuloksiin on tullut, kun ilmiöitä ja materiaalin käyttäytymistä on jouduttu yksinkertaistamaan. Parannusehdotuksiin on koottu ideoita ja ratkaisuja, joilla rakenne saataisiin luotettavammaksi. Luotettavuuden lisäämistä ja syy-seuraussuhteen tarkentamista on pohdittu jatkokutkimuskohteen kohdalla.

7.1 Tulosten analysointi

Analyttisellä laskennalla saatua tulosta voidaan pitää vain suuntaa-antavana, koska yhtälö toimii vain kimmoisesti käyttäytyvällä alueella. Analyttinen tulos antaa vain putkelle normaalijännityksen, eikä sisällä syntyvää momenttivaikutusta, minkä reunaehto ja siirtymä aiheuttavat. Lämmönjohtumisen seurauksena putkenpaksuuden yli jännitys ei ole vakio. Teoriaosuudessa esitetty analyttinen yhtälö lämpöjännityksille olettaa, että lämpötila on putken paksuuden yli vakio. Täten voidaan todeta, että FEM-laskenta on rakenteen kannalta välttämätöntä.

FEM-laskennassa määritettiin paneelin siirtymät ja deformaatiot, jotka ovat seurausta lämpökuormasta. Lämpölaajeneminen mahdollistaa rakenteessa suuremmat siirtymät verrattuna jännitykseen, kuin mitä jännitykset kohoaisivat siirtymäohjatussa vetokokeessa. Tämä havaittiin, kun alimallin siirtymäreunaehto määritettiin, eikä reunaehdoista vapaalle pinnalle asetettu lämpökuormaa. Vapaan pinnan lämpökuorman poistaminen kasvatti jännitykset noin kolme kertaa suuremmiksi alimallissa. Siirtymistä voitiin tulkita, kuinka rakenne käyttäytyy lämpösyklin alaisena ja varmistaa, että reunaehto on asetettu oikein. Tutkimuksen tulosten kannalta reunaehtoasettelu on oleellinen, koska rakenteeseen syntyy siirtymiä ja täten oikeanlainen ominaismuoto säilyy deformaatiossa.

Jännitys jakaumakuvat osoittavat, kuinka jännitykset keskittyvät ja jakautuvat rakenteeseen. Sivulla 60 kuvassa 35 on esitetty jännitys jakauma putken paksuuden yli maksimilämpötilassa ja jäähtyneenä huoneenlämpöön. Maksimilämpötilan jännitys jakaumasta voidaan havaita sen karkeasti koostuvan normaalijännityksestä ja taivutusjännityksestä. Jännitys jakau-

makuvista havaitaan, etteivät alimallissa jännitykset kasvaneet, kuin paikallisesti yli myötö-
rajan jäähtymisen yhteydessä. Globaalin mallin jännitys jakaumat eivät ole yhtä tarkkoja,
koska elementtejä on putken paksuudella vähemmän kuin alimallissa. Sivulla 60 kuvassa 35
esitetystä jännitys jakaumassa putken paksuuden yli havaitaan, kuinka voimakkaan lovi-
jännityksen hitsausliitos aiheuttaa jäähtymisen yhteydessä. Kuitenkin on otettava huomioon,
että prosessin aikana rakenne ei pääse jäähtymään huoneenlämpötilaan, vaan rakenteen läm-
pötila on korkeampi. Alimallissa syntyy jännityskeskittymiä kuonatartunnan läheisyyteen,
koska alimalli on rakenteena jäykempi kuin globaalimalli. Taulukossa 9 on vertailtu tutki-
muskohteen kannalta oleellisia vauriomekanismeja ja tarkasteltu, onko vauriomekanismi
kriittinen tutkitun paneelin vaurioitumisen kannalta. Kun FEM-laskennasta saatiin tulokset,
tarkasteltiin jännitysten kriittisyyttä vaurioitumiseen. Taulukossa 9 keskimmaisessä sarak-
keessa on koottu syitä, jotka edesauttavat vauriomekanismien esiintymistä. Kolmannessa sa-
rakkeessa on syitä, mitkä rajaavat vauriomekanismin esiintymisen todennäköisyyttä pienem-
mäksi.

Taulukko 9. Missä vauriomekanismit esiintyvät.

Vauriomekanismi	Mahdollistava syy vaurioon	Sulkee pois
Väsyminen	Lovijännitys, taivu- tusjännitys	Jännitykset alhaiset ja kuormituskertojen määrä vähäinen
Jännityskorroosio	Korroosio	Jännitykset alhaiset
Viruminen	Käyttöolosuhteet	Käyttöaika
Sulametallihauraus	Kuparipitoisuus	Mikrorakenne
Sinihauraus	Käyttölämpötila, koostumus	

FEM-laskennassa määritettiin rakenteen jännitykset, mitkä osoittautuivat käyttöolosuhteissa
alhaisiksi. Ainoastaan rajaviivalle syntyvä lovi-
jännitys jäähtyneessä rakenteessa oli hu-
mion arvoinen. Kuitenkin syntynyt lovi-
jännitys on rinnastettavissa hitsauksessa syntyneisiin
jäännös-
jännityksiin tässä tapauksessa. Alhaisten syklimäärien ja jännitysten perusteella voi-
daan väsymisvaurion osallisuus vaurioitumisessa olettaa pieneksi, vaikka aiemmin sitä pi-
dettiin todennäköisempänä. Jännityskorroosion suhteen jäävät myös jännitykset alhaisiksi,

mutta jännityskorroosion esiintyminen on mahdollista. Ihanteellisesti paneelin kahden vuoden käytönaikana kuormituksia tulisi 13 500 kpl. Jotta väsymisvaurio olisi kriittinen, jännitystasojen tulisi olla viisi kertaa suuremmat kuin mitä saatiin FEM-laskennassa osoitettu liitteessä VII, joten eliminoin väsymisvaurion vaurioitumissyynä. Vaikka murtopinta antoi viitteitä syntyvästä väsymisvauriosta, niin muita todisteita sen syntyyn ei ole mutta mittauksin voitaisiin asia varmentaa. Magneettivoimien ja värähtelyjen mukaan ottaminen laskentaan voisi nostaa jännitystasoja siten, että väsyminen tulisi todennäköisemmäksi pienemmällä syklimäärällä.

Virumisvauriolla tarkasteltavassa paneelirakenteessa on suotuisat olosuhteet, mutta virumisvaurion syntyyn tarvitaan tuhansien tuntien käyttöaikoja. Kuitenkin välillä paneeleja on hajonnut muutaman viikon käytön jälkeen. Mitä pidempään paneeli on ollut käytössä, sitä todennäköisemmäksi vauriomekanismiksi muodostuu viruminen.

Sulametallihauraus on todennäköinen murtumiseen johtava syy, jos putkimateriaalissa on seostuneena metalleja, joilla on alempi sulamispiste. Sulahitsausprosessin yhteydessä alemman sulamispisteen omaava metalli muuttuu sulaksi ja suotautuu raerajalle. Jäätymisen yhteydessä sulasta kiinteäksi muuttuessaan, suotautunut metalli aiheuttaa halkeaman. Vaurio on yhtä todennäköinen valmistuksessa kuin korjauksessa.

Sinihauraus on erittäin todennäköinen vaurion aiheuttaja, koska prosessin aikana lämpötilat käyvät sinihauraudelle suotuisissa lämpötiloissa. Putkimateriaalille suoritettussa koostumusanalyysissä havaittiin korkea typpipitoisuus. Näytepalojen murtopinnat silmämääräisessä tarkastelussa näyttivät haurailta. Sinihaurauden ehkäisemiseksi ei ole muita keinoja, kuin saada putkimateriaalin typpipitoisuus matalammaksi, koska prosessilämpötilaa ei voida muuttaa, jolloin korostuu oikeanlaisen materiaalin valinnan vaikutus.

7.2 Tutkimuksen luotettavuus, mittausmenetelmien osuvuus ja virhetarkastelu

Tässä tutkimuksessa kirjallisuuskatsauksen luotettavuus muodostui riittävän hyväksi, kun lähteeksi seulottiin julkaisuja ja kirjallisuutta, mitkä suurimmaksi osaksi on julkaistu 2000-luvulla. Tutkimuksessa pyrittiin käyttämään vertaisarvioituja lähteitä. Luotettavuutta lähdemateriaalille vahvistaa se, että osaa lähteistä on käytetty useissa julkaisuissa taustaselvitystä

tehdessä. Saksalaisten lähteiden luotettavuutta lisää myös tieto, että niiden julkaisujen pohjalta on täydennetty standardeja ja IIW:n ohjeita.

Geometrian perusteella analyyseihin syntyy virhettä, koska hitsille ei ollut tarkkoja mittoja, eikä näytepalojen perusteella onnistuttu määrittämään niitä. Aineodistuksen puuttuminen aiheutti sen, että teräksen lujuusominaisuudet jouduttiin määrittämään standardiarvojen perusteella. Täten ne voivat poiketa eksakteista materiaaliarvoista.

FEM-laskennassa syntyy virhettä, kun tulee ottaa huomioon alkuarvojen pieni poikkeavuus verrattuna materiaalin todellinen käyttäytyminen. Tarkkoihin materiaalin fysikaalisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin ei saada varmuutta, jos tutkittavan kohteen materiaalista ei ole aineodistusta. Kimmomoduulin voidaan olettaa olevan huoneenlämpötilassa 200000–210000 MPa. Jos käytetty kimmomoduuli on vaihteluvälin alarajalla ja todellinen onkin lähellä ylärajaa, niin syntyy 5 % virhettä elastiseen käyttäytymiseen. Kun epälineaarista ilmiötä mallinnetaan lineaarisella mallilla liian pitkälle, alkaa virhe kertaantua. Mittausmenetelmien osuvuuden kannalta on syytä tehdä tarkasteluja niillä alueilla, joilla yhtälöt tai mallit kuvaavat ilmiön riittävän tarkasti. Kimmomoduulin lämpötilariippuvainen käyttäytyminen oli standardoitu ja aiheesta oli tutkimustuloksia sekä eurokoodi on myös ohje jota tulisi noudattaa.

Tutkimustulosten virheiden pienentämiseksi FEM-laskennassa ei ole käytetty tetraelementtejä. Tetraelementeillä mallinnetusta rakenteesta ei saada vertailukelpoisia tuloksia mallien välillä. Elementtikoko vaikuttaa tuloksiin, kuten havaittiin globaalin mallin ja alimallin välillä. Pientä eroa syntyi globaalin mallin ja alimallin välille, koska globaalissa mallissa putken paksuuden yli oli karkeampi verkko, kuin alimallissa.

Alimallin ja globaalin mallin välistä eroavaisuutta aiheutti kuonatartunnan lisääminen alimallingeometriaan. Koska kuonatartunta lisäsi alimallin jäykkyyttä paikallisesti, voi siirtymä- ja venymäkäyttäytyminen poiketa globaalin mallin ja alimallin välillä. Jos globaali malli olisi mallinnettu täydellisenä kuonatartuntoineen, olisi se rakenteena ollut jäykempi.

7.3 Johtopäätökset ja hyödynnettävyys

Materiaalinvalinnassa on oltava tarkkana, kun materiaalia käytetään korotetuissa käyttölämpötiloissa. Teräksen seostus on oltava oikeanlainen, jotta yllätyksiltä vältyttäisiin. Korotetussa käyttölämpötilassa on huomioitava ilmiöitä, kuten sulametallihauraus, viruminen, väsyminen, sinihauraus, estetystä lämpölaajenemisesta syntyvät jännitykset ja ruostumattomilla teräksillä sigmahauraus. Kuten Outisen ja Mäkisen (2002) tekemästä vetokoe kuvasta havaittiin, niin korotettuun lämpötilaan altistettujen kappaleiden murtumisessa oli enemmän hajontaa siinä, kuinka paljon kappaleet kestivät, kuin tehdyssä vertailu sarjassa. Vertailukohteena olleet huoneenlämpötilassa vedetyt koekappaleet saavuttivat korkeamman myötörajan ja murtolujuuden kuin korotetussa lämpötilassa testatut samanlaiset koekappaleet. Kun olosuhteiden muutos kasvattaa hajontaa, on rakenteen käyttöikä vaikeampi ennustaa. Sinihaurauden yhteydessä ilmenevä murtovenymän heikkeneminen on yksi selittävä tekijä, miksi syntyy hajontaa korotetussa lämpötilassa.

Ongelmaa tutkiessa laskennallisin keinoin ja kuormituspektrin avulla voitiin sivuuttaa väsymisvauriotarkastelut vähemmälle huomiolle kuin oli tutkimuksen alussa suunniteltu. Kuormanvaihtojen vähäisyys oli määräävänä tekijänä ja jännitystasojen alhaisuus, miksi väsymisvaurio ei ole todennäköisin syy myös murtopinta viittasi haurasmurtumaan. Murtopintatarkasteluissa havaitut haurasmurtumakäyttäytymisen merkit antoivat aiheita tutkia materiaaliominaisuudet ja metallurgiset ominaisuudet vauriotarkasteluihin. Saatiin rajattua vauriomekanismeja olosuhteisiin sopiviksi ja niitä voitiin verrata vaurioon yhteensopivuuksia. Sinihaurauden kohdalla olosuhteet ovat suotuisat ja sinihaurautta on vaikea ehkäistä, jos ei voida prosessin lämpötila-aluetta muuttaa. Tuloksia voidaan tulevaisuudessa yleisesti soveltaa jäädyttimien yhteydessä tehtäviin vauriotarkasteluihin.

7.4 Parannusehdotukset

Tärkeänä havaintona olivat suoritetuista korjaushitsauksissa olleet puutteet, ettei syntyneitä halkeamia ollut avattu ja halkeama oli hitsautunut vain osalta seinämävahvuutta. Tähän suositellaan, jos korjaushitsaus suoritetaan, halkeamien avaamista, jolloin hitsautumissyvyyttä saavutetaan enemmän. Tällöin rakenteesta saadaan kestävämpi ja voitaisiin torjua mahdollisuus putken sisäpuolisesta korroosiosta halkeamakohdassa, kun halkeama on hitsattu läpi ja korrosio ei pääse heikentämään liitosta putken sisäpuolelta.

Koostumusanalyysi suositellaan suorittamaan rakenteille, joissa ilmenee samankaltaisia vaurioita. Kun vauriorakenteista selvitetäisiin koostumukset, niin mittauksen jälkeen selviäisi epäpuhtauksien pitoisuudet, niin voidaan varmistaa, onko murtumalla yhteyttä sinihaurauteen. Mikäli on, tällöin on suotavaa vaihtaa prosessissa käytettäviä lämpötiloja tai siten pyrittävä vaikuttamaan paneelien toimittajan käyttämään materiaaliin. Paneelien tilauksen yhteydessä tulisi määrittää tarkemmat raja-arvot vapaalle tyypelle perusmateriaalissa, koska se muodostuu ongelmaksi sinihaurauden yhteydessä.

7.5 Jatkotutkimuskohteet

Jatkotutkimusta olisi hyvä tutkia paneelia mitä ei ole käytetty prosessissa käytössä. Koska sitten voitaisiin tutkia paneelia ilman syntyneitä muutoksia, täten hitsauksessa toteutunut konepajalaatu saataisiin määritettyä ja tehdä havaintoja muista paneelin valmistuksellisista osatekijöistä. Tällaisista paneeleista voitaisiin ainetta rikkomattomalla koestuksella havainnoida hitsauksen aloitus- ja lopetuskohdan sijainti.

Jatkotutkimus olisi syytä keskittää enemmän metallurgisiin kysymyksiin, kuten hakea vertailukohteita materiaalitutkimuksista. Jatkotutkimuksessa voisi kartoittaa, onko ilmiöllä vaikutusta palomitoitukseen, koska korotetun lämpötilan mitoitukseen löytyy mitoitussäännöt palomitoituksesta. Jännösännitysten osalta voisi selvittää käytössä olleesta paneelistä, joka muuten ehjä, onko kuonatartuntojen läheisyyteen muodostunut jännösännitys.

8 YHTEENVETO

Tutkimuksen lähtökohtana oli analysoida lämpökuormituksesta syntyvien jännitysten alaiseksi joutuvan jäähdytyspaneelin vaurioitumista. Työssä keskityttiin jännitysten määrittämiseen FEM-laskennalla ja pyrittiin kirjallisuustutkimuksen avulla selvittämään mahdolliset vauriomekanismit. Tutkimuksessa määritettiin miten rakennetta tulisi kehittää, jotta vaurion syntyminen ei tapahtuisi rakenteen käyttöiän aikana.

On otettava huomioon, etteivät analyttiset yhtälöt kykene antamaan riittävän tarkkaa kuvausta, miten rakenne käyttäytyy, joten FEM-laskenta käytetään mitoituksessa apuvälineenä. Analyttinen laskenta antaa riittävän kuvauksen rakenneosalle, mutta ei pysty kokonpanoa mallintamaan riittävän tarkasti. Analyttisillä yhtälöillä pyrittiin määrittämään lämpökuorma jäähdytyspaneelille.

Materiaalille tehtiin mikrorakennetutkimusta, koostumusanalyysiä, rakenneanalyysiä ja tutkittiin murtopintoja. Aikaisemman tutkimuksen perusteella oli käytettävissä vertailuna mikrorakennekuvia, elektronimikroskooppikuvia, kovuusmittausanalyysi ja koostumusanalyysi. Murtopintatarkasteluissa todettiin, että kyseessä oli olosuhteiden aiheuttama haurasmurtuma. Teoriaosuudessa esiteltiin muutamia ilmiöitä, joiden myötävaikutuksesta hauraskäyttäytyminen on todennäköinen. Kappaleanalyysissä havaittiin, että kaikissa valituissa näytepaloissa on halkeamia hitsausliitosten läheisyydessä. Näytepaloista todettiin korjaushitsauksen laadun parantamisen olevan tarpeellista.

FEM-laskennan ja kirjallisuuteen pohjautuvien havaintojen perusteella metallurgiset tekijät tulivat vaurioitumisen kannalta merkittäviksi. Vaurioitumiseen voi vaikuttaa usean mekanismin yhdistelmä. Olosuhteet huomioiden ja tutkimuksen edetessä tehtyjen havaintojen perusteella sinihauraus johtaisi rakenteen kohdalla todennäköisimmin vaurioon.

LÄHTEET

Abaqus. 2016. Abaqus/CAE User's Guide. Dassault Systemes Simulia Corp.

Abele, E., Anderl, R. & Birkhofer, H. 2005. Environmentally-Friendly product development. Springer. 318 s.

Anderson, T. L. 2000. Fracture mechanics: fundamentals and applications. Boca Raton (FL): CRC Press, cop. 793 s.

Baumgartner, J. & Bruder, T. 2013. An Efficient Meshing Approach for the Calculation of Notch Stresses. *Welding in the World*, 57: 1. S. 137–145.

Chen, Z. & Butcher, C. 2013. Micromechanics Modelling of Ductile Fracture. Springer. 307 s.

Cook, R. 1995. Finite element modeling for stress analysis. New York: Wiley cop. 320 s.

Dieter, G. E. 1986. Mechanical Metallurgy. 3. painos. New York: McGraw-Hill. 751 s.

Dowling, N. 2007. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 912 s.

Ferro, P., Berto, F. & Borsato, T. 2016. Thermal load-induced notch stress intensity factors derived from averaged strain energy density. *Procedia Structural Integrity*, 2. S. 2367–2374

Forni, D., Chiaia, B. & Cadoni, E. 2016. High strain rate response of S355 at high temperatures. *Materials & Design*, 94. S. 467–478

Fricke, W. 2010. IIW Recommendations for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. 36 s.

- Fricke, W. 2013. IIW guideline for the assessment of weld root fatigue. *Welding in the World*, 57. S. 753–791
- Fomkin, V. 2016. Diplomi-insinööri. Ovako. Tehdasesittely. Imatra 6.6.2016
- Haapasalmi, J. 2015. Valokaariuunin paneelin materiaalitutkimukset. Ovako. 11 s.
- Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding IIW. 158 s.
- Huhdankoski, E. 1999. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. 2. painos Keuruu: Otava. 128 s.
- Kunnossapitoyhdistys ry. 2004. Korroosiokäsikirja. 4. painos. Helsinki: KP-Media Oy. 930 s.
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY. 429 s.
- Lindroos, V., Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekk-ojan Metallioppi. Helsinki: Otava. 841 s.
- Lukkari, J. 2009. Kuumalujaa hitsausta. *Hitsaus uutiset*, 43: 1. S. 4–10
- Metallinjalostajat ry. 2014. Teräskirja, 9 Painos. Helsinki: Bookwell Oy. 116 s.
- Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. *Tekninen tiedotus 2/2003*. Helsinki: Teknologiaeollisuus. 136 s.
- Ongelin, P & Valkonen, I. 2010, Hitsatut profiilit 1993-käsikirja. Keuruu: Rautaruukki Oyj. 608 s.

Outinen, J. & Mäkeläinen, P. 2002. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down. Second international workshop Structures in fire. S. 273–290

Papavinasam, S. 2013, Corrosion control in the oil and gas industry. Burlington: Elsevier Science. 992 s.

Radaj, D., Sonsino, C. M., Fricke, F. 2006. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. 2. painos. Cambridge: Woodhead. 639 s.

Schneider, R. & Lange, J. 2009 Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures. Nordic steel construction conference. S. 204–211

SFS-EN 10216-2. 2014 Saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket. Suomenstandarditoimistoliitto SFS. 75 s.

SFS-EN 1993-1-2. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Suomenstandarditoimistoliitto SFS. 81 s.

SFS-EN 1991-1-5+AC. 2004. Eurocode 1 Rakenteiden kuormat osa 1–5 yleiset kuormat lämpötilakuormat. Suomenstandarditoimistoliitto SFS. 68 s.

Shorr, B. 2015. Thermal Integrity in Mechanics and engineering. Springer Berlin Heidelberg. 410 s.

Sonsino, C. M., 2016. Overload effects on fatigue life of welded joints. Luento HRO-suunnittelufoorumi. Lappeenranta, 23–25.8.2016.

Sonsino, C. M., Fricke, W., De Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmmadi, A., Zhang, G. 2012. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints- Background and applications. International Journal of Fatigue, 34. S. 2–16.

Suomen hitsausteknillinen yhdistys. 2014. Hitsauksen materiaalioppi, 4. painos. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys. 304 s.

Teräksen kierrättäminen. 2016. [Teräsrakenneyhdistyksen www-sivuilla]. Päivitetty 6.6.2016 [Viitattu 15.6.2016]. Saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenneteollisuus/teras-materiaalina/kierratys/>

Valtanen, E. 2012. Tekniikan taulukkokirja. 19. painos. Jyväskylä: Genesis-Kirjat. 1194 s.

Vepsäläinen, A., Pitkänen, J. & Hyppänen, T. 2012. Fundamentals of heat transfer. Lappeenrannan Teknillinen yliopisto. Digipaino. 217 s.

Väinölä, R. 2008. Teräksen valmistus Imatralla. Ovako sisäinen PowerPoint esitys. 46 s.

Analyttinen energialaskenta.

$$\begin{aligned}
 E &:= 200000 \text{ MPa} & R1 &:= 34.45 \text{ mm} & l &:= 1494 \text{ mm} & \mu &:= 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} & T_{\text{melt}} &:= 200 \text{ K} \\
 \nu &:= 0.3 & R2 &:= 44.45 \text{ mm} & \rho &:= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & T_{\text{tot}} &:= 1500 \text{ K} \\
 \alpha &:= 12 \frac{10^{-6}}{\text{K}} & \Delta T &:= 2 \text{ K} & c_m &:= 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & t_s &:= (72-60) \text{ s} & c2 &:= 0.46 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\
 \lambda &:= 43 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} & A &:= \pi \cdot (R1)^2 = 3.728 \times 10^{-3} \text{ m}^2 & q_v &:= \frac{285 \text{ m}^3}{(3600-12) \text{ s}} = 6.597 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} & c_{\text{melt}} &:= 0.82 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\
 Pr &:= 6.62 & n &:= 0.4 & l_{\text{tot}} &:= 29880 \text{ mm} & A_2 &:= \pi \cdot (R2^2 - R1^2) = 2.479 \times 10^{-3} \text{ m}^2 & + \\
 T1 &:= 291 \text{ K} & T2 &:= 915 \text{ K} & s_{\text{tot}} &:= \frac{276000 \text{ J}}{\text{kg}} & \Delta l &:= \alpha \cdot l \cdot \Delta T = 0.036 \text{ mm} \\
 m_s &:= 80000 \text{ kg} & v &:= \frac{q_v}{A} = 1.769 \frac{\text{m}}{\text{s}} & \text{virtaus nopeus} & & \sigma &:= E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 4.8 \text{ MPa} \\
 & & q &:= \lambda \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta T}{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)} = 3.168 \times 10^3 \text{ W} & \text{lämpövirta} & & F_{\text{tot}} &:= A_2 \cdot \sigma = 11.898 \text{ kN} \\
 & & q_m &:= \rho \cdot q_v = 6.597 \frac{\text{kg}}{\text{s}} & \text{massa virta} & & C2 &:= c_{\text{melt}} \cdot m_s \cdot T_{\text{melt}} = 1.312 \times 10^{10} \text{ J} \\
 & & \Phi &:= q_m \cdot c \cdot \Delta T = 55.179 \text{ kW} & \text{lämpövirta} & & C_s &:= c2 \cdot m_s \cdot T_{\text{tot}} = 5.52 \times 10^{10} \text{ J} \\
 & & Re &:= \frac{\rho \cdot 2 \cdot R1 \cdot v}{\mu} = 1.217 \times 10^5 & \text{turbulentinen virtaus} & & Q_s &:= m_s \cdot s = 2.208 \times 10^{10} \text{ J} \\
 & & Nu &:= 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n = 573.084 & \text{Nusseltin luku} & & E_{\text{tot}} &:= \frac{(C + Q_s + C2)}{3.6 \cdot 10^6 \text{ J}} = 2.511 \times 10^4 \text{ kWh} \\
 & & h &:= \frac{Nu \cdot \lambda}{2 \cdot R1} = 3.577 \times 10^5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} & & & P &:= \frac{(C + Q_s + C2)}{t_s} = 20.926 \text{ MW} \\
 & & R_{\text{tot}} &:= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot L \cdot h} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} = 3.2 \times 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{W}} & & & & & \\
 & & q_{r2} &:= \frac{T2 - T1}{R_{\text{tot}}} = 19.499 \text{ MW} & & & & & \\
 & & \Delta T2 &:= \Phi \cdot R_{\text{tot}} + T1 = 292.766 \text{ K} & & & & &
 \end{aligned}$$

Putkimateriaalin kemiallinen koostumus

Sample Identification										
Quality	SampleNo					Customer				
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.112	0.218	0.527	<0.0050	<0.150	0.129	0.015	0.099	0.202	0.017
2.	0.120	0.214	0.526	<0.0050	<0.150	0.125	0.015	0.100	0.205	0.017
3.	0.109	0.227	0.533	<0.0050	<0.150	0.125	0.015	0.102	0.205	0.017
4.	0.107	0.202	0.514	<0.0050	<0.150	0.121	0.013	0.091	0.191	0.014
∅	0.112	0.215	0.525	<0.0050	<0.150	0.125	0.014	0.098	0.201	0.016
σ	0.0057	0.010	0.0080			0.0033	0.0012	0.0048	0.0067	0.0015
v	5.089	4.651	1.524			2.640	8.571	4.898	3.333	9.375
	As	B	Bi	Ce	Co	Mg	N	Nb	Pb	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.016	<0.0010	<0.010	<0.0050	0.0096	<0.0050	0.115	<0.0010	0.014	<0.010
2.	0.016	<0.0010	<0.010	<0.0050	0.0068	<0.0050	0.102	<0.0010	0.015	<0.010
3.	0.014	<0.0010	<0.010	<0.0050	0.0066	<0.0050	0.096	<0.0010	0.020	<0.010
4.	0.014	<0.0010	<0.010	<0.0050	0.0061	<0.0050	0.100	<0.0010	<0.010	<0.010
∅	0.015	<0.0010	<0.010	<0.0050	0.0073	<0.0050	0.103	<0.0010	0.015	<0.010
σ	0.0012				0.0016		0.0082		0.0041	
v	8.000				21.92		7.961		27.33	
	Sn	Ta	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.014	<0.030	0.0067	0.0014	<0.0050	<0.010	<0.0020	<0.0020	<0.0050	98.26
2.	0.014	<0.030	0.0067	0.0015	<0.0050	<0.010	<0.0020	<0.0020	<0.0050	98.27
3.	0.013	<0.030	0.0061	0.0015	<0.0050	<0.010	<0.0020	<0.0020	<0.0050	98.27
4.	0.012	<0.030	0.0052	0.0014	<0.0050	<0.010	<0.0020	<0.0020	<0.0050	98.36
∅	0.013	<0.030	0.0062	0.0014	<0.0050	<0.010	<0.0020	<0.0020	<0.0050	98.29
σ	0.0010		0.00071	0.00008						0.047
v	7.692		11.45	5.714						0.048

∅ keskiarvo

σ keskihajonta

v variaatiokerroin

Liite III

Mekaaniset ominaisuudet S355 teräksellä korotetuissa lämpötiloissa.

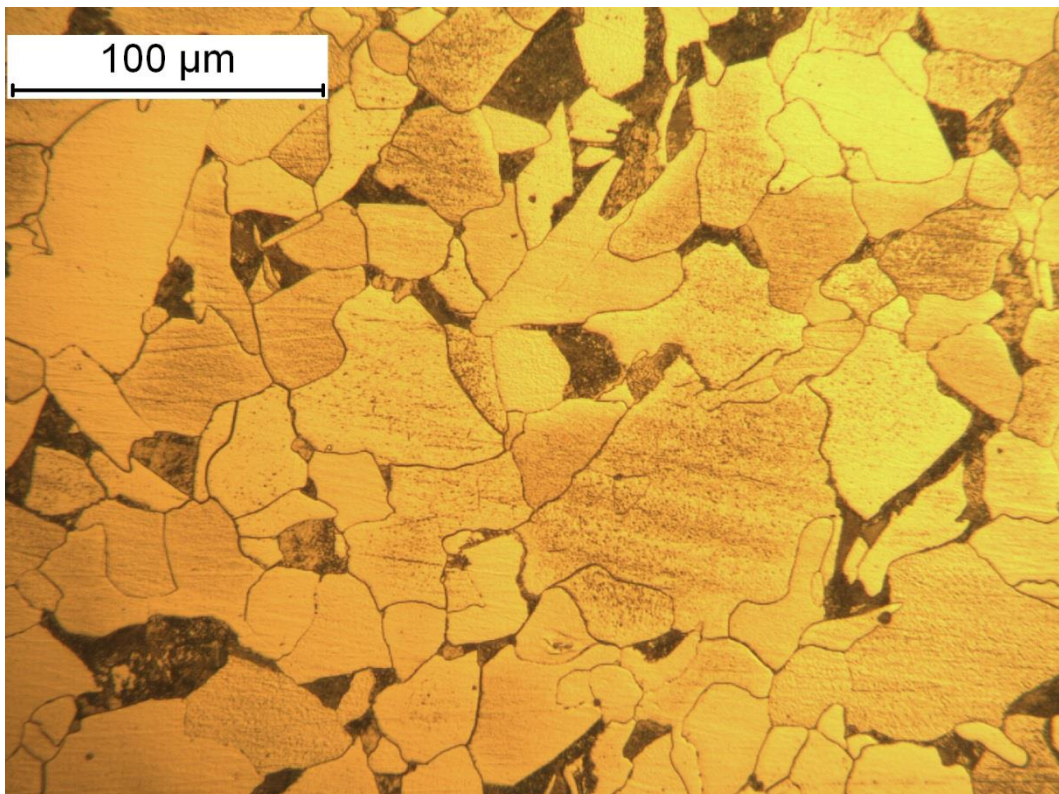
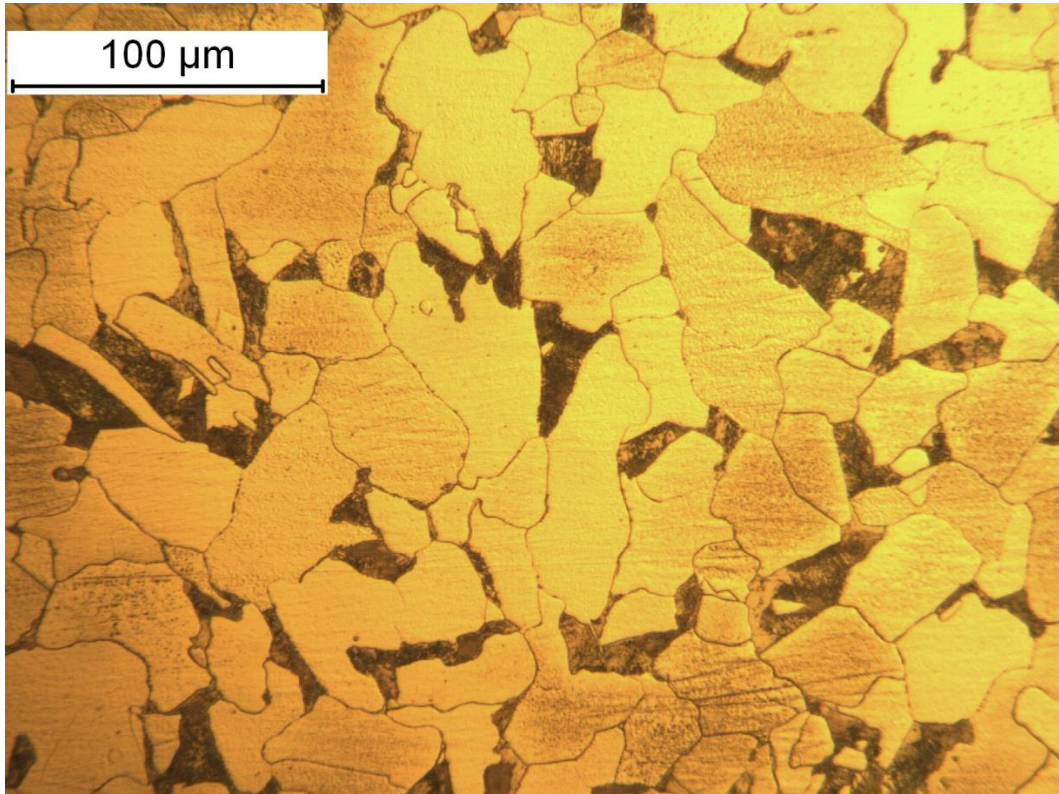
Taulukko 1. Koetulosten perusteella määritettyjä pienennyskertoimia.

Temp. [°C]	Modulus of Elasticity E [N/mm ²]	Proportional limit f_p [N/mm ²]	Yield strength f_y [N/mm ²]	Yield strength $R_{p0.2}$ [N/mm ²]	Yield strength $R_{t0.5}$ [N/mm ²]
20	210000	481.1	566	520	526
100	210000	481.1	566	520	526
200	189000	441.48	549.02	485	496
300	168000	367.9	537.7	439	455
400	147000	311.3	481.1	381	399
500	126000	169.8	367.9	255	280
600	65100	67.92	181.12	118	132
700	27300	39.62	101.88	66	72
750	23100	28.3	67.92	46	51
800	18900	19.81	42.45	29	33
850	16537.5	11.32	31.13	20	23
900	14175	6.792	22.64	13	17
950	11812.5	5.66	19.81	12	14
1000	9450	4.528	22.64	10	11
	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	$k_{p0.2,\theta} = f_{p0.2,\theta} / f_y$	$k_{t0.5,\theta} = f_{t0.5,\theta} / f_y$
20	1,000	0,850	1,000	0,919	0,929
100	1,000	0,850	1,000	0,919	0,929
200	0,900	0,780	0,970	0,867	0,876
300	0,800	0,650	0,950	0,795	0,804
400	0,700	0,550	0,850	0,693	0,705
500	0,600	0,300	0,650	0,468	0,495
600	0,310	0,120	0,320	0,217	0,233
700	0,130	0,070	0,180	0,124	0,127
750	0,110	0,050	0,120	0,088	0,090
800	0,090	0,035	0,075	0,053	0,058
850	0,079	0,020	0,055	0,039	0,041
900	0,068	0,012	0,040	0,025	0,030
950	0,056	0,010	0,035	0,021	0,025
1000	0,045	0,008	0,030	0,018	0,019

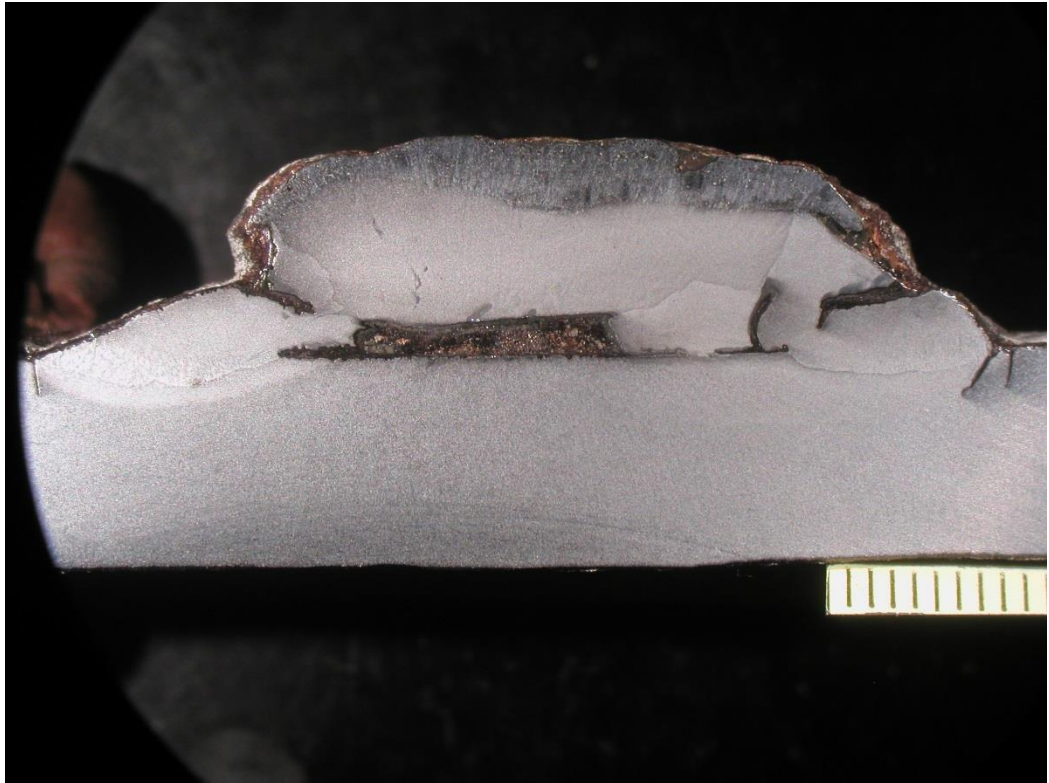
Taulukko 2. Hiiletysteräksen mitoituslujuuden arvoja PL4

Teräksen lämpötila θ_a	Mitoituslujuuden pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) kuumavalssatuille ja hitsatuille poikkileikkausluokan 4 poikkileikkauksille $k_{p0.2,\theta} = f_{p0.2,\theta} / f_y$	Mitoituslujuuden pienennystekijä (suhteessa arvoon f_{yb}) kylmämuovatuille poikkileikkausluokan 4 poikkileikkauksille $k_{p0.2,\theta} = f_{p0.2,\theta} / f_{yb}$
20 °C	1,00	
100 °C	1,00	
200 °C	0,89	
300 °C	0,78	
400 °C	0,65	
500 °C	0,53	
600 °C	0,30	
700 °C	0,13	
800 °C	0,07	
900 °C	0,05	
1000 °C	0,03	
1100 °C	0,02	
1200 °C	0,00	
HUOM. 1 Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarista interpolointia käyttäen.		
HUOM. 2 f_{yb} -n määritelmä on standardin EN 1993-1-3 mukainen.		

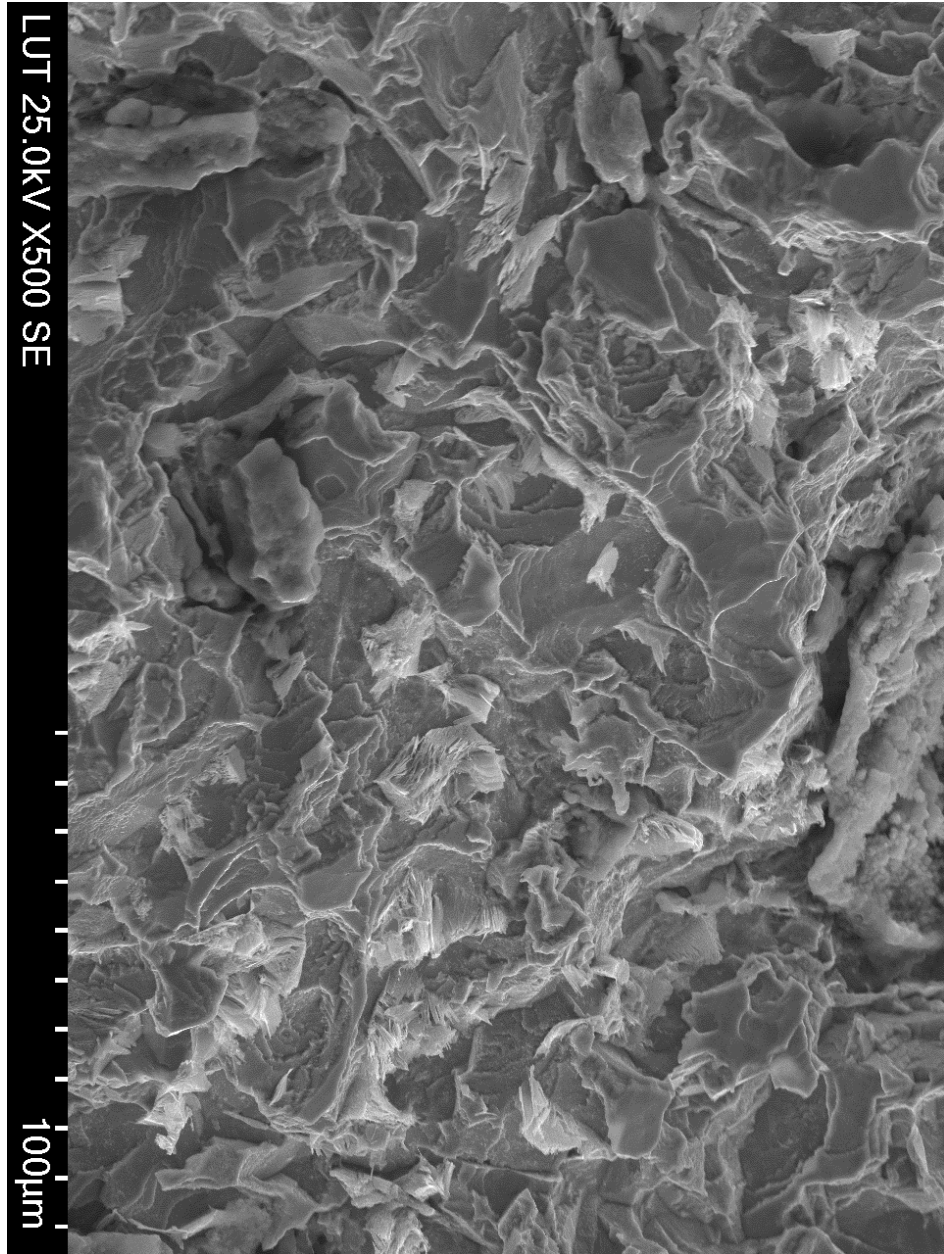
Perusaineen mikrorakennekuvat ja yksi makrokuva



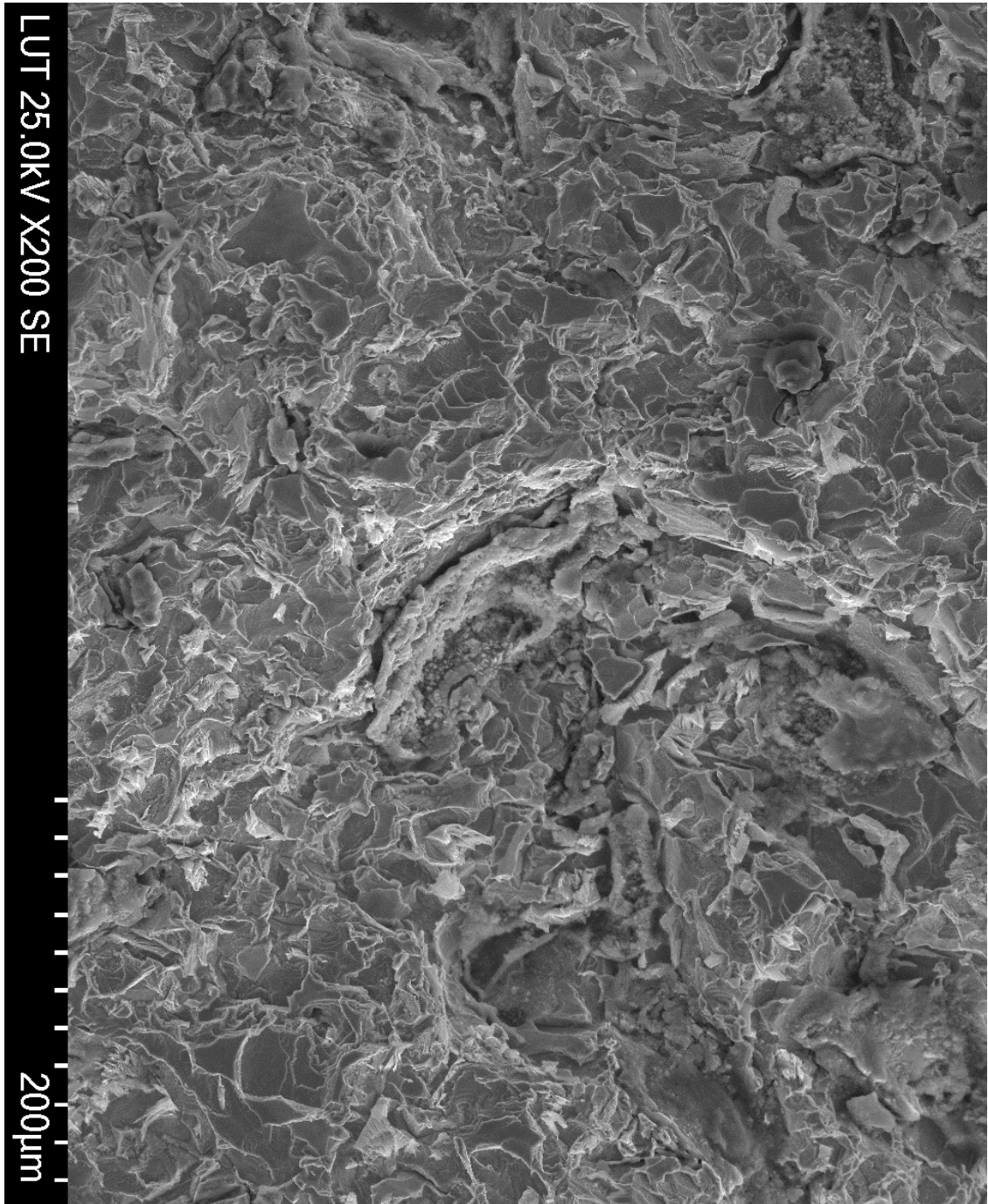
LIITE IV, 2



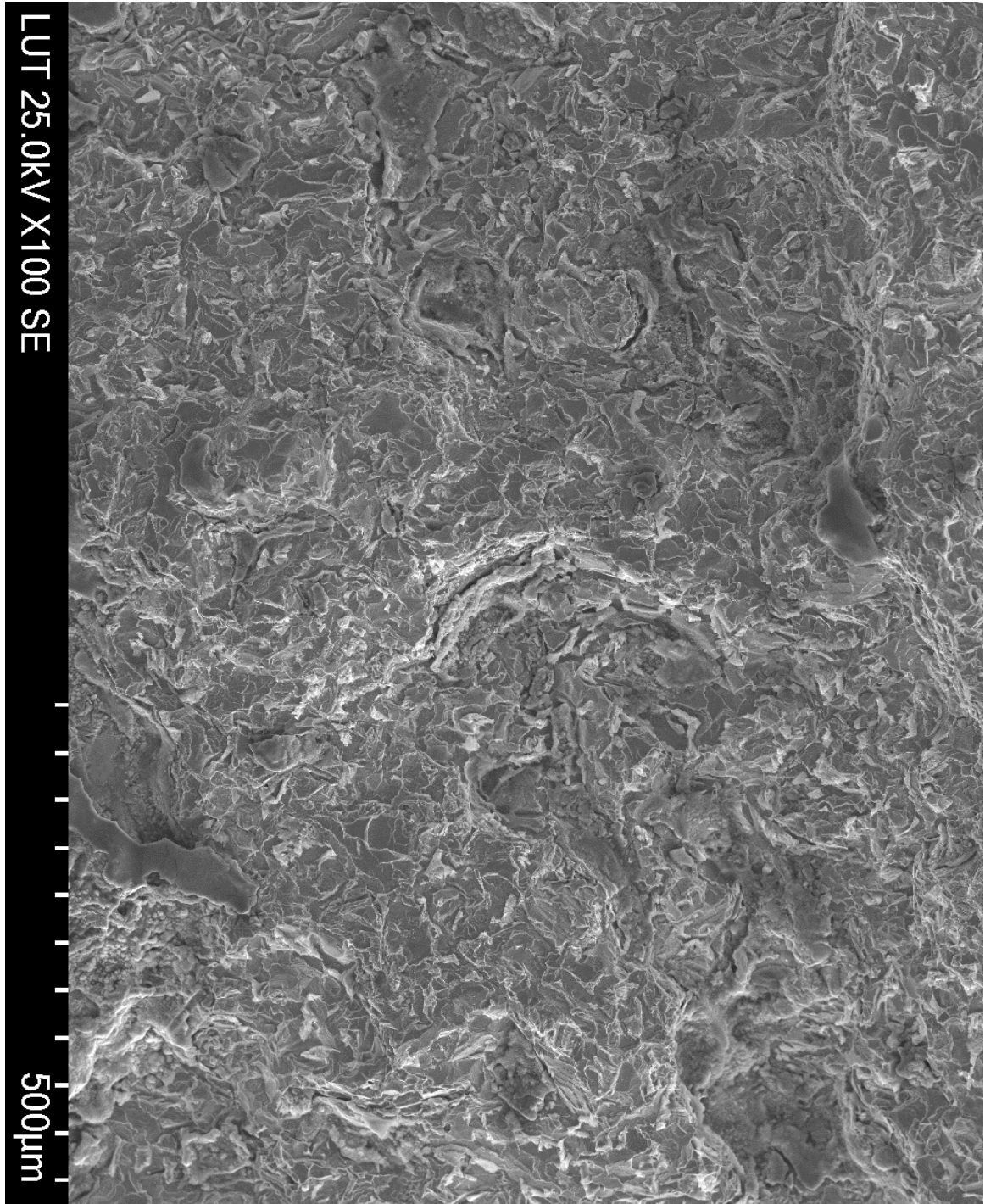
Murtopintakuvat



Elektronimikroskooppi 1.



Elektronimikroskooppi 2.



Elektronimikroskooppi 3.



Murtopinta makrokuva 1.



Murtopinta makrokuva 2.

LIITE VI

Materiaalin epälineaariset ominaisuudet FEM-laskennassa.

Muuttuva kimmomoduuli		Plastinen käyttäytyminen	
[MPa]	[°C]	[MPa]	[%]
210000	0	235	0
210000	100	437	0,25
126000	500		
27300	700		

Väsymiskestävyys laskenta

$$\begin{aligned} \gamma &:= 1 \\ \Delta\sigma_{\text{ekv}} &:= 235\text{MPa} \\ \underline{m} &:= 3 \\ \text{FAT} &:= 225\text{MPa} \end{aligned} \quad \sqrt[3]{\frac{(6750 \cdot 15^3) + ((6750 \cdot 235^3))}{6750}} = 235.02$$

$$\underline{N} := \left(\frac{\text{FAT}}{\gamma \cdot \Delta\sigma_{\text{ekv}}} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6$$

$$N = 1.755 \times 10^6$$

Laskettu FEM-jännitysten mukaan, että 1,755miljoonaa kuormanvaihtoa rakenteen tulisi kestää.

$$\underline{N} := 13500$$

$$\text{FAT} := 225\text{MPa} \quad \gamma_{\text{väs}} := 1$$

$$\Delta\sigma_{\text{ekv}} := \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{N}} \cdot \frac{\text{FAT}}{\gamma_{\text{väs}}} = 1.191 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

On laskettu, että paneelin odotetun käyttöajan kuormitusten vaatima ekvivalenttijännitys on 1190 MPa.