

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Metalli

Konstruktiotekniikka

**Miikka Leppänen**

**Kalsinaattorin siirtymien ja teräskuoren murtumien tutkiminen**

**Diplomityö**

Työn 1. tarkastajana ja 2. ohjaajana on toiminut prof. Timo Björk

Työn 2. tarkastajana on toiminut TkT Tapani Halme

Työn 1. ohjaajana on toiminut ins. Timo Hänninen

Lappeenranta, elokuu 2011

## **Tiivistelmä**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Metalli  
Konstruktiotekniikka

Miikka Leppänen

## **Kalsinaattorin siirtymien ja teräskuoren murtumien tutkiminen**

Diplomityö

2011

77 sivua, 52 kuvaa, 4 taulukkoa, 4 liitettä

Työn tarkastajat: Professori Timo Björk  
TkT Tapani Halme

Hakusanat: Kalsinaattori, esilämmitysjärjestelmä, terminen jännitys, eriste, liikuntapalje  
Keywords: Calsiner, Preheater system, Thermal stress, Liner, Expansion joint

Sementti on yksi eniten maailmassa käytetty rakennusmateriaali ja Suomessa sementin valmistuksesta vastaa Finnsementti Oy kahden tehtaan voimin. Lappeenrannan tehtaalle investoitiin uusi uunilinja vuonna 2007, joka on aikansa kehittyneintä tekniikkaa. Järjestelmän esilämmitysvaiheen laitteissa, erityisesti kalsinaattorissa, on esiintynyt luvattoman paljon plastisoitumista ja murtumia. Tässä työssä tutkittiin lämpötilan ja sen vaihtelun vaikutusta järjestelmässä syntyneisiin siirtymiin ja murtumiin.

Työn alussa luotiin katsaus erilaisiin murtumisilmiöihin ja niiden syntyyn. Vuorauksessa käytettyihin tiilien käyttäytymistä tutkittiin myös, koska ne ovat olennainen osa esilämmitysjärjestelmää. Työn kokeellisessa osuudessa aluksi määriteltiin järjestelmässä käytetyille teräkselle lujuusominaisuudet tutkimalla mikrorakennetta sekä suorittamalla veto- että kovuuskokeet materiaalille. Toisessa osiossa mitattiin järjestelmän alasajon aikana tapahtuneet siirtymät. Laskennallisessa osuudessa tutkittiin väsymismurtuman mahdollisuutta sekä määriteltiin kuoressa esiintyvän särön vaikutusta puhkeamis- ja murtumiskuormitukseen.

FEM- analyysissä tarkasteltiin lämpötilan vaikutusta siirtymien suuruuksiin ja pyrittiin löytämään perusteluita, miksi rakenne on todellisuudessa siirtynyt eri suuntiin kuin alun perin oli tarkoitettu. Lisäksi analysoitiin FEM- mallit tiilihyllystä ja kalsinaattorin kuoren tukikehästä, joista tutkittiin lämpökuorman aiheuttamia jännityksiä.

Materiaalin osalta selvisi, että kyseessä oli hyvin yleinen rakenneteräs S235 tai sitä vastaava teräslaatu. Teräs ei ominaisuuksiltaan sovellu kuumiin olosuhteisiin, jonka vuoksi järjestelmässä käytettävän eristevuorauksen kunto on erityisen tärkeä rakenteen käyttöiän kannalta. Vuorauksen kunnosta riippuu, kuinka suuren lämpökuorman teräskuori saa. Väsymismurtuman mahdollisuus jäi minimaalisen pieneksi lämpötilan muutoksen vaikutuksesta. Analysoinnin tulosten perusteella voitiin todeta, että lämpötilan hitaasti mutta kohtalaisen suurella vaihteluvälillä sekä tiilien turpoamisen vaikutuksella on erittäin suuri merkitys järjestelmässä esiintyviin murtumiin.

## **Abstract**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme in Mechanical Engineering

Miikka Leppänen

## **Investigation of Calsiner's Displacements and Steel Shell Cracks**

Master's Thesis

2011

77 pages, 52 figures, 4 tables, 4 appendices

Examiners:           Professor Timo Björk  
                              DSc (Tech) Tapani Halme

Keywords: Calsiner, Preheater system, Thermal stress, Liner, Expansion joint

Cement is one of the most used building materials in the world and Finnsementti produce the cement for Finnish markets and it has two factories in Finland. Lappeenranta factory was invested in the new kiln line in 2007, which was the most advanced technology in the world. During operations of the new kiln plastic deformations and fracture was observed in the system pre-heater devices, especially in the caliner. The aim of this work was investigate system's temperature effects on the steel structure, which can be the reason for existing displacements and fracture on the caliner's steel shell.

In the beginning a review of various fractures phenomena and their creation is introduced. Bricks used in the lining of the caliner, especially their behavior under high temperatures, was also investigated as they are an integral part of the preheat system. In the experimental section of the work steel strength properties were analyzed by examining the microstructure as well as by performing tensile tests and investigating the hardness on the material. In the second phase the displacements were measured during the system shut-down. Computational part investigated the possibility of fatigue failure and determined the occurrence of steel distortion effect of bursting and fracture load.

Finite element method was used to analyze temperature's effect on displacements and to find reasons why the structure is actually moving into a different direction than originally intended in the design. Additionally, FEM models were created from the brick rack and the caliner shell support ring to investigate the stresses due to temperature change.

The material used in the steel structure was found to be common structural steel S235, or its equivalent grade of steel. The steel is not suitable for properties in high temperatures, which makes the insulation system, i.e. the brick lining, particularly important in ensuring the design life of the structure as the amount of heat load the steel shell may receive depends on the conditions of the lining. The possibility of fatigue failure was minimal due to small changes in the temperature during production phase. Analysis of the results showed that a slow temperature change but moderately high value between extreme ends as well as the effect of swelling of the bricks have a very important role in development of cracks in the material.

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on tehty Finnsementti Oy Lappeenrannan tehtaalla. Kokeellisesta osuudesta tehtiin osa Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa ja osa Finnsementin Lappeenrannan tehtaalla.

Suurkiitokset professori Timo Björkille diplomityöni ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Lisäksi haluan kiittää Timoa tarjoamistaan teräslaboratorion ja erityisesti FEMAP- ohjelman antamisesta käyttöön. Timon järjestämistä teräsrakenteiden kursseista oli todella suuri apu työn tekemisessä.

Suurkiitokset myös Tapani Halmeelle työni tarkastamisesta ja kommentoinnista. Tapanin FE- kurssit olivat lähes edellytys työn onnistumiselle.

Suurkiitokset työni ohjaajalle Timo Hänniselle, joka on tarjonnut loistavat puitteet työn tekemiselle ja antanut tarvittavat työkalut työn tilaajan puolelta.

Suurkiitokset myös avovaimolleni Sannalle ja kahdelle pojalleni, jotka ovat jaksaneet tukea ja kannustaa minua niin opintojen aikana kuin aina muulloinkin.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä niin Finnsementillä kuin muuallakin, jotka ovat auttaneet ja antaneet oman panoksensa työn toteutukselle ja valmistumiselle.

Lappeenranta 2011

Miikka Leppänen

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>Kuvat</b>	<b>3</b>
<b>Käytetyt symbolit</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>7</b>
1.1 Yritysesittely .....	7
1.2 Taustaa .....	8
1.3 Tutkimuksen kohde .....	9
1.4 Tavoitteet.....	9
1.5 Tutkimusmenetelmät.....	10
1.6 Rajaukset.....	10
<b>2 TYÖN TEORIAA .....</b>	<b>11</b>
2.1 Termisen kuormituksen vaikutus teräkseen .....	11
2.2 Termisen kuormituksen huomioiminen 3D -palkkielementtimallissa.....	14
2.3 Sylinterimäisessä rakenteessa esiintyvät jännitykset.....	15
2.4 Murtumismekanismit .....	16
2.4.1 Plastinen muodonmuutos .....	16
2.4.2 Hauras- ja sitkeämurtuma .....	17
2.4.3 Virumismurtuma .....	18
2.4.4 Väsymismurtuma .....	19
2.4.5 Jännityskorroosio .....	20
2.5 Kemiallinen korroosio teräksessä.....	21
2.6 Puhkeamiskuorman määrittäminen .....	22
2.7 Murtumiskuormituksen määrittäminen .....	24
<b>3 KALSINAATTORIN TERÄSKUOREN MATERIAALIN</b>	
<b>TARKASTELU .....</b>	<b>27</b>
3.1 Kalsinaattorin teräskuori .....	27
3.2 Koejärjestelyt .....	27
3.3 Koetulokset.....	28

<b>4 KALSINAATTORIN SIIRTYSIEN EMPIIRINEN</b>	
<b>TUTKIMINEN .....</b>	<b>35</b>
4.1 Koejärjestelyt .....	36
4.2 Mitatut siirtymät ja tulokset .....	36
<b>5 ANALYYTTINEN TARKASTELU.....</b>	<b>38</b>
5.1 Katsaus RefraTechnik:n tutkimukseen tiilestä .....	38
5.2 Rakennetta rasittavat kuormitukset .....	39
5.3 Kalsinaattorijärjestelmän siirtymien ja jännityksien tarkastelu.....	42
5.3.1 Lämpötilan muutoksen vaikutus .....	44
5.4 Kalsinaattorin kuoren murtokuormituksen määrittäminen .....	48
5.5 Kemiallisen korroosion vaikutus kuoren murtumiseen .....	55
<b>6 FEM- MALLINNUS .....</b>	<b>57</b>
6.1 Siirtymät .....	58
6.2 Tiilihylly .....	62
6.3 Tukirengas .....	65
<b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>70</b>
<b>LÄHDELUETTELO</b>	<b>76</b>
<b>LIITTEET</b>	<b>78</b>

## Kuvat

1.1	Työssä tarkasteltavat alueet syklonitornissa .....	10
2.1	Rakenneteräksen myötörajan ja lämpötilan riippuvuus .....	12
2.2	Rikkihapon ja lämpötilan yhteys korroosionopeuteen .....	22
2.3	Puolielliptinen pintasärö .....	23
2.4	Hasegawan malli särön alueella vaikuttavien jännityksien jakautumisesta ....	23
2.5	Putken poikkipinnalle syntyvä särö .....	26
3.1	Jännitys- venymä käyrät .....	29
3.2	Ramberg-Osgood menetelmällä määritetyt jännitys- venymä käyrät .....	31
3.3	Murtuneet vetokoesauvat .....	32
3.4	Makrokuva koemateriaalista .....	33
3.5	Mikrokuva koemateriaalista.....	34
4.1	Kalsinaattorin siirtymisestä aiheutunut vaurio .....	35
5.1	Alkalien esiintyminen uunijärjestelmässä .....	39
5.2	Kalsinaattorin vauriokohta .....	40
5.3	Lämpökamerakuva kalsinaattorista .....	40
5.4	Jännityksen ja lämpötilan keskeinen yhteys.....	43
5.5	Tiilen ja teräskuoren suhteet normaalivoimiin nähden .....	44
5.6	Lämpötilan vaihtelut uunijärjestelmässä .....	45
5.7	Lämpötilan vaikutus teräksen lämmönjohtavuuteen .....	46
5.8	Eristemateriaalin paksuuden vaikutus pintalämpötilaan .....	46
5.9	Väsymiskestävyys FAT- alueella 36- 160 .....	47
5.10	Väsymiskestävyys FAT- alueella 0- 20 .....	47
5.11	Murtuma kalsinaattorissa .....	49
5.12	Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun $\Delta T$ ollessa 30 °C .....	50
5.13	Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun $\Delta T$ ollessa 50 °C .....	50
5.14	Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun $\Delta T$ ollessa 70 °C .....	51
5.15	Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun $\Delta T$ ollessa 90 °C .....	51
5.16	Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun $\Delta T$ ollessa 120 °C .....	51
5.17	Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun $\Delta T$ ollessa 150 °C .....	52
5.18	Särönsyvyyden vaikutus särönmurtumislevyyteen $\Delta T$ ollessa 77 °C .....	53

5.19	Särönsyvyyden vaikutus särön murtumislevyteen $\Delta T$ ollessa 80,5 °C .....	53
5.20	Särönsyvyyden vaikutus särön murtumislevyteen $\Delta T$ ollessa 84 °C .....	54
5.21	Särönsyvyyden vaikutus särön murtumislevyteen $\Delta T$ ollessa 89,3 °C .....	54
5.22	Kemiallisen korroosion vaikutukset kalsinaattorissa .....	55
6.1	Tiilihyllyn FEM- malli .....	57
6.2	Laskuputken hitsattu alatuenta .....	58
6.3	Tukisauva laskuputkessa .....	59
6.4	FEM- malli järjestelmän siirtymien analysoimiseksi .....	60
6.5	Siirtymät joutsenkaulan suunnassa .....	60
6.6	Siirtymät uuniputken suunnassa .....	61
6.7	Siirtymät vertikaalisuunnassa .....	61
6.8	Liikuntapalkkeiden kompensaaion vaikutus vertikaalisuuntaisiin siirtymiin	62
6.9	Rakennekuva tiilihyllystä .....	63
6.10	Plastisoituneita kohtia kalsinaattorissa .....	63
6.11	Tiilihyllyn analysoitu FEM –malli .....	64
6.12	Jännityksien esiintyminen tiilihyllässä .....	65
6.13	Murtuma kalsinaattorin tukikehässä .....	66
6.14	Tukirenkaan FEM –malli .....	67
6.15	Jännitykset tukikehän yläosassa .....	67
6.16	Jännitykset tukikehän ulkokehällä .....	68
6.17	Jännitykset tukikehän sisäkehällä .....	68
6.18	Jännitykset tukikehän alaosassa .....	69



## Käytetyt symbolit

### Latinalaiset

$A$	Pinta-ala [ $\text{mm}^2$ ]
$A_c$	Särön pinta-ala [ $\text{mm}^2$ ]
$A_L$	Särön kannakkeen pinta-ala [ $\text{mm}^2$ ]
$A_s$	Ehyen alueen pinta-ala särön molemmin puolin [ $\text{mm}^2$ ]
$A_{\text{sylinteri}}$	Sylinterin poikkipinta-ala [ $\text{mm}^2$ ]
$a$	Särön syvyys [mm]
$a_{\text{ekv}}$	Ekvivalentti särön syvyys [mm]
$b$	Kaaren pituus [mm]
$D$	Sylinterin ulkohalkaisija [mm]
$d$	Sylinterin sisähalkaisija [mm]
$E$	Materiaalin kimmomoduuli [MPa]
$f$	Funktio
$\mathbf{F}$	Voimavektori [N]
$F_{\text{aks}}$	Aksiaalivoima [N]
$F_p$	Sisäisestä paineesta aiheutuva sisäinen voima [N]
$F_T$	Terminen kuorma [N]
$G$	Leikkausjännityskerroin [MPa]
$h$	Konvektio lämmönsiirtokerroin [ $\frac{W}{m^2K}$ ]
$I_{ij}$	Elementin taivutusneliömomentti [ $\text{mm}^4$ ]
$\mathbf{K}$	Globaali jäykkyysmatriisi
$k_{x,y,z}$	Lämmönjohtumiskerroin [ $\frac{W}{mK}$ ]
$k_{1,2}$	Murtokuormituksen määrittämisessä käytettävät parametrit
$l$	Pituus [mm]
$l_0$	Alkupituus [mm]
$L$	Elementin pituus [mm]
$M$	Momentti [Nmm]
$m$	Massa [kg]
$N$	Virumisen määrittämiseen käytettävä ainevakio
$N_f$	Väsymismurtumaan johtavien kuormituskertojen lukumäärä
$n$	Virumisessa käytettävä jännityksen eksponentti
$P_L$	Puhkeamiskuorma [N]
$p$	Paine [MPa]
$q$	Lämmönsiirto [W]
$q''$	Lämpövirta [ $\frac{W}{m^2}$ ]
$R_{\text{kok}}$	Kokonaisterminen resistanssi [ $\frac{W}{m}$ ]
$R_{t,\text{kond}}$	Konduktiolämmönsiirrossa syntyvä termien resistanssi [ $\frac{W}{m}$ ]
$R_{t,\text{konv}}$	Konvektiolämmönsiirrossa syntyvä termien resistanssi [ $\frac{W}{m}$ ]
$r$	Ympyrän säde [mm]
$s$	Aika [sekunti]
$T$	Lämpötila [K tai °C]
$T_{\infty,1}$	Kappaleen kuumen puolen pintalämpötila [K tai °C]
$T_{\infty,2}$	Kappaleen kylmän puolen pintalämpötila [K tai °C]
$t$	Materiaalin paksuus [mm]
$U$	Kokonaislämmönsiirtokerroin [ $\frac{W}{m^2K}$ ]

$\mathbf{u}$	Siirtymävektori [mm]
$u_{ijk}$	Solmun siirtymät [mm]
$\nu$	Poissonin vakio
$W$	Särön tarkastelualueen leveys [mm]
$W_{syl}$	Sylinterin sisäinen kuormitus [N]

#### Kreikkalaiset

$\alpha$	Pituuden lämpötilakerroin $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$
$\beta$	Neutraaliakselin paikka
$\gamma$	Särön syvyyden ja materiaalin paksuuden suhde
$\delta_T$	Pituuden muutos kappaleessa [mm]
$\Delta$	Delta
$\Delta\sigma_i$	Väsyttävän kuormituksen jännitysvaihtelu [MPa]
$\varepsilon$	Suhteellinen venymä pituussuunnassa
$\varepsilon_i$	Venymävektori
$\varepsilon_{\perp}$	Poikki-pinnan venymä
$\varepsilon$	Virumisnopeus
$\eta$	Kerroin, joka huomioi muodonmuutosten estymisen
$\lambda$	Särön syvyyden ja leveyden suhde
$\theta$	Murtumaan johtavan särön leveys asteina [ $^{\circ}$ ]
$\theta^*$	Kriittinen särönleveys asteina putkessa [ $^{\circ}$ ]
$\theta_{ijk}$	Solmun kiertymät [Rad]
$\sigma$	Jännitys [MPa]
$\sigma_o$	Jännitysvektori [MPa]
$\sigma_{1,2}$	Ramberg-Osgood:n kaavassa käytettävät vertailujännitykset [MPa]
$\sigma_{\perp}$	Kohtisuoraan laskettu jännitys [MPa]
$\sigma_{aksiaali}$	Aksiaalisuuntainen jännitys [MPa]
$\sigma_B$	Kokonaispoikki-pintaa kohti laskettu murtumisjännitys [MPa]
$\sigma_b$	Taivutusjännitys [MPa]
$\sigma_{ef}$	Efektiiivinen jännitys [MPa]
$\sigma_{i,j,k}$	Aksiaaliset jännitykset [MPa]
$\sigma_{kehä}$	Kehäsuuntainen jännitys [MPa]
$\sigma_L$	Puhkeamisjännitys [MPa]
$\sigma_{nB}$	Murtumisjännitys [MPa]
$\sigma_{red}$	Redusoitu myötölujuus [MPa]
$\sigma_t$	Vetojännitys [MPa]
$\sigma_u$	Murtolujuus [MPa]
$\sigma_y$	Myötölujuus [MPa]
$\Sigma$	Summa

## 1 JOHDANTO

Sementin valmistuksessa itse prosessi ei ole muuttunut paljoakaan muuttunut viimeisten vuosikymmenten aikana. Suomessa prosessin osalta suurin muutos tapahtui, kun siirryttiin klinkkerin valmistuksessa märkäpoltosta kuivapolttoprosessiin. Prosessilaitteiden osalta kehitys on ollut nopeampaa. Erityisesti esilämmityslaitteiden tehokkuutta on lisätty ja samalla pyritään vähentämään energiankulutusta. Laitteiden kehittyminen ei aina tarkoita suoraan parempaa ja toimivampaa järjestelmää, vaan yleensä tilalle ilmestyy uudenlaisia ongelmia. Ennen kalsinoivia esilämmitysjärjestelmiä koko polttoprosessi suoritettiin uuniputkella, jolloin lämpötilan vaikutus kosketti pääasiassa vain uuniputkea. Nykyisissä järjestelmissä lämpöä jakautuu enemmän myös esilämmitysjärjestelmään, jolloin myös se joutuu suuremman lämpörasituksen alaiseksi. Lisäksi järjestelmässä on havaittavissa myös eri lämpötila-alueet, joka aiheuttaa myös omanlaisensa haasteensa laitteiston toiminnalle ja kunnossapidolle.

### 1.1 Yritysesittely

Diplomityö tehdään Finnsementti Oy:n Lappeenrannan tehtaalle. Finnsementti on kuulunut kansainväliseen rakennusmateriaalikonserniin CRH vuodesta 1999. CRH on perustettu vuonna 1970 ja pääkonttori sijaitsee Irlannissa. Toimintaa on 35 maassa ja se on markkina-arvoltaan maailman kuudenneksi suurin rakennusmateriaalien tuottaja. Finnsementti kuuluu CRH Europe materials –ryhmään. [1]

Finnsementti tuottaa ja markkinoi pääasiassa Suomen alueella sideainejärjestelmiä betonteollisuuden tarpeisiin. Sementtejä valmistetaan Lappeenrannan ja Paraisten tehtailla sekä kuonajauhe valmistetaan Raahessa. Liikevaihtoa kertyi noin 117 miljoonaa euroa ja Finnsementin palveluksessa on yhteensä 198 työntekijää vuonna 2010. [1]

Lappeenrannan tehtaalla on tuotettu sementtiä vuodesta 1938. Uusin uunilinja 7 on otettu käyttöön vuonna 2007 ja tällä hetkellä uuni edustaa maailman moderneinta sementti-uunijärjestelmää. Jauhatuspiirejä on yhteensä kolme ja yhdessä uuden uunilinjan kanssa tuotantokapasiteetti sementin osalta on noin 700 000 tonnia vuodessa. Tehtaalla työskentelee toimihenkilöitä noin 20, päivä- ja vuorotyöntekijöinä noin 40. [1]

## 1.2 Taustaa

Uunijärjestelmä on tanskalaisen FLSmidth suunnittelema ja toimittama. 2007 Lappeenrannan tehtaalla käyttöönotettu uusi uunijärjestelmä on koko olemassaolonsa aikana ollut jatkuvan kehityksen kohteena. Uunin toiminnan kannalta tarkoituksena olisi ajaa uunijärjestelmää optimaalisella tasolla ja yhdestä kahteen kertaan vuodessa pitää suunniteltu huoltoseisokki. Sekä prosessista että rakenteesta johtuvia ongelmia tulee viikoittain, jotka johtavat usein uunin hetkittäiseen alasajoon. Nämä ongelmat aiheuttavat suoran vaikutuksen tuotannon tasoon ja sitä kautta suoraan myös taloudellisiin menetyksiin. Finnsementin asettamat arvot menestystekijöilleen, kuten toimintavarmuus ja järjestelmän tehokkuus, eivät uuden uunijärjestelmän osalta toteudu vielä halutulla tasolla.

Sementtiteollisuuden uunien laitteet ovat lähes yksinomaan kehitetty palvelemaan kyseistä toimialaa ja tuotantoprosessin mukaisesti, laitteiston kokoluokka vaihtelee suuresti eri tehtaiden tuotantokapasiteettien mukaisesti. Sementtiuunijärjestelmä joutuu käytön aikana suurien termisten, mekaanisten ja kemiallisten rasitusten alaiseksi. Liikuteltavat massavirrat jauheenmuodossa ovat suuria, samoin kuin käytettävät lämpötilat. Uusi uunijärjestelmä on kallis investointi ja sen oletetaan palvelevan useita vuosikymmeniä.

Uunijärjestelmä koostuu neljästä osa-alueesta, jossa jokaisella on oma tehtävänsä. Ensimmäisessä vaiheessa kalsiumkarbonaatti ( $\text{CaCO}_3$ ) eli uunijauhe kuivatetaan ja lämmitetään sykloneissa. Kerroksittain sijaitsevissa sykloneissa lämmitys tapahtuu kalsinaattorista ja uunista tulevilla palokaasuilla. Esilämmitysvaiheen jälkeen tulee kalsinointivaihe, jossa kalsiumkarbonaatti kalsinoidaan irrottamalla hiilidioksidi endotermisessä reaktiossa kalsiumkarbonaatista, minkä jälkeen saadaan kalsiumoksidia ( $\text{CaO}$ ). Kalsinointivaihe tapahtuu kalsinaattorissa, johon kuuluvat myös joutsenkaula ja laskuputki. Joutsenkaulan ja laskuputken tarkoituksena on erotella savukaasu jauheesta. Kalsinointivaiheen jälkeen kalsiumoksidi johdetaan sementtiuuniin, jossa jauhe sulatetaan ja sintrataan pieniksi klinkkeripalloiksi noin  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa. Viimeisenä vaiheena on sulan materiaalin nopea jäähdytys noin  $200\text{ }^\circ\text{C}$ :seen arinajähdyttimellä. Kalsinaattorissa käytetään polttoainetta jauhettua hiiltä ja kierrätyspolttoainetta (REF), uunissa käytetään hiilestä ja petrokoksista jauhettua sekoitusta. [2]

### 1.3 Tutkimuksen kohde

Suuret lämpötilanvaihtelut aiheuttavat teräsrakenteisiin suuria ongelmia, jos lämmön aiheuttamia vaikutuksia ei ole otettu huomioon. Käyttökohteeseen soveltumaton teräsmateriaali saattaa aiheuttaa rakenteen ennenaikaisen rikkoutumisen. Kuumien olosuhteiden ja tulen kanssa kosketuksissa oleville rakenteille on kehitetty näihin käyttökohteisiin soveltuvia materiaaleja ja teräslaatuja. Lämpötilan muutoksen suuruudesta ja materiaaliominaisuuksista määräytyy syntyvien venymien suuruus. Jos lämpölaajenemista ei ole otettu huomioon oikein, saattaa rakenne pahimmassa tapauksessa rikkoontua.

Tässä työssä tutkitaan kalsinointivaiheen rakenteita eli kalsinaattoria, joutsenkaulaa ja laskuputkea. Näissä kohteissa on käytössäolon aikana havaittu eniten palautumattomia siirtymiä ja murtumia rakenteen teräskuoressa. Lisäksi kalsinaattorin ja laskuputken teräskuorissa on havaittavissa useita plastisoituneita kohtia. Teräskuoren paksuus on 6 mm ja lieriömäistä rakennetta on vahvistettu tukirenkailla. Rakenne on tuettu syklonitornin tasoille ja tuentakohdat kannattelevat teräskuoren välityksellä myös kuoren sisäpuoleisen tiili- ja eristevuorauksen.

Tiilien ja eristeen tarkoituksena on estää sisäpuolella vaikuttavaa lämpöä johtumasta suoraan teräskuoreen. Eristeellä on lämmönjohtavuuden kannalta suurempi merkitys kuin tiilillä, mutta tiilien tarkoituksena on myös estää alkalien pääsy tiilien ja teräsvaipan väliin sekä estää liekin suora kosketus teräsvaipan ja eristeen kanssa. Tiilien on havaittu myös imevän itseensä alkaleja, minkä seurauksena tiilien tilavuudet ovat kasvaneet pysyvästi.

### 1.4 Tavoitteet

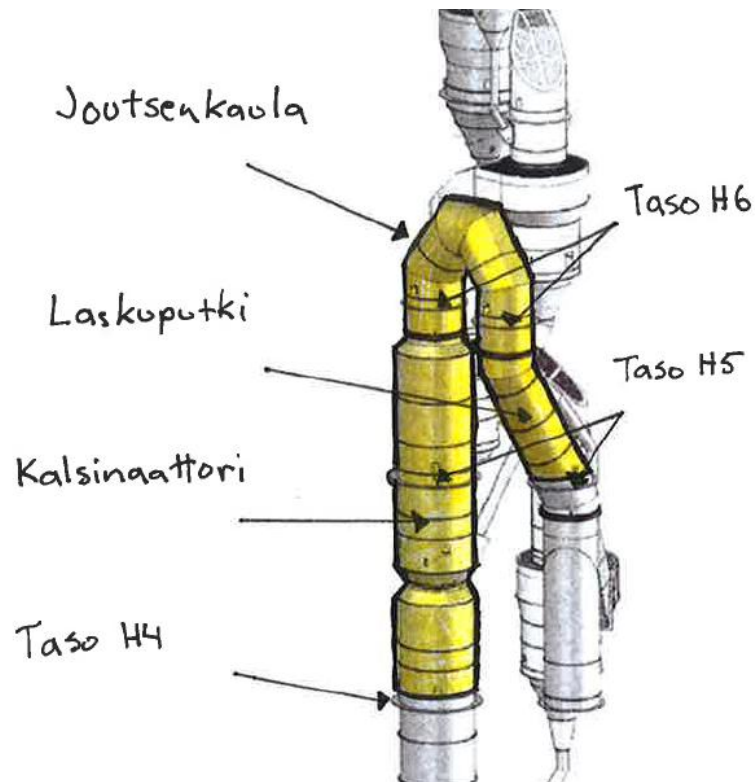
Työn tarkoituksena on selvittää, aiheuttaako kalsinaattorin, joutsenkaulan ja laskuputken lämpölaajeneminen rakenteiden siirtymiset sekä syntyneiden muodonmuutosten ja murtumien yhteys siirtymiin. Lisäksi selvitetään kemiallisen korroosion vaikutusta kuoren murtumiseen. Lopuksi pyritään löytämään ratkaisuja, joilla vähennetään edellä mainituissa kohdissa syntyviä haitallisia vaikutuksia.

## 1.5 Tutkimusmenetelmät

Siirtyminen ja murtumien tarkasteluissa hyödynnetään sekä FEM -analyysiä että numeerisia laskentamenetelmiä. Siirtymät tullaan seuraamaan ja mittaamaan uunin alasajon aikana, jotta tiedetään, paljonko rakenteessa tapahtuu palautumista siirtymien osalta. Kalsinaattorissa käytetyn teräksen materiaaliominaisuudet määritetään lujuus- ja kovuusominaisuuksien sekä teräksen mikrorakenteen perusteella. Kuormituksien määrittämisessä hyödynnetään valmistajalta saatuja tuotetietoja tiilestä. Lämpötilan muutokset teräskuoressa määritetään sekä numeerisesti että mittaamalla pyrometrillä teräskuoren pintalämpötiloja eri kohdista rakennetta käytön aikana.

## 1.6 Rajaukset

Työ rajataan siten, että kalsinaattorin tarkastelu aloitetaan tasolta H4 eli kalsinaattorin alemman puoliskon tuennasta. Tarkasteltava alue päättyy laskuputken alemmaan tukipisteeseen tasolle H5 (kuva 1.1). Kuvaan 1.1 on merkitty värillä tarkasteltava alue keltaisella. Kalsinaattorin alemman osan alemmaa puoliskoa ei ole syytä tässä työssä tarkastella, koska kyseisessä osassa ei ole havaittu vastaavia ongelmia kuin ylemmissä osissa.



Kuva 1.1. Työssä tarkasteltavat alueet syklonitornissa.

## 2 TYÖN TEORIAA

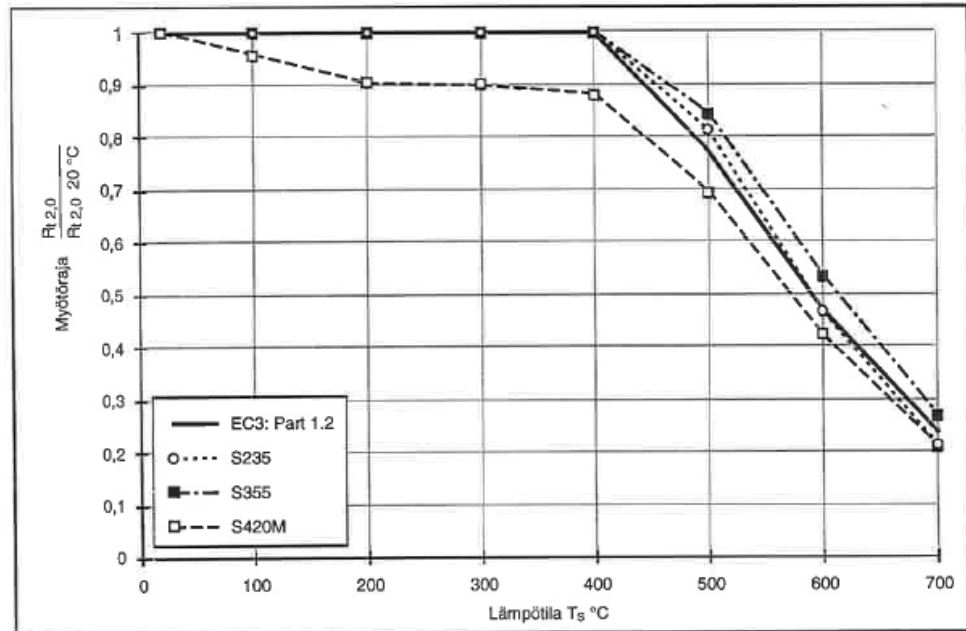
Tässä kappaleessa käsitellään lämpökuormituksen vaikutusta teräkseen sekä miten lämpökuorma otetaan huomioon FEM -mallinnuksessa. Teräksien lujuusominaisuudet muuttuvat suurissa lämpötiloissa, mikä asettaa suunnittelijoille suuren haasteen kyetä estämään suurista lämpötilan muutoksista aiheutuvia ongelmia. Kaikkien materiaalien tilavuus on riippuvainen lämpötilasta. Pienissä rakenteissa tilavuuden muutokset eivät näy niin selkeästi kuin suurissa rakenteissa. Varsinkin pitkissä rakenteissa laajentuminen näkyy selkeimmin suurina siirtyminä. Sekä kuumat että kylmät olosuhteet aiheuttavat erityyppisiä ongelmia, jotka näkyvät rakenteessa plastisnoitumisina tai pahimmillaan jopa murtumisina.

### 2.1 Termisen kuormituksen vaikutus teräkseen

Teräksen lujuusominaisuudet heikkenevät lämpötilan noustessa. Seostamattomien teräksien myötölujuus heikkenee hieman jo 100 °C:ssa huonelämpötilaan verrattuna. Teräksen jännitys-venymä käyttäytyminen muuttuu epälineaariseksi yli 200 °C:ssa, minkä seurauksena myötörajan määrittäminen ei ole enää yksikäsitteistä korkeissa lämpötiloissa. Matalalujuisten teräksien osalta käytetään suunnitteluperusteina myötörajan kriteerinä 0,2 %:n pysyvää venymää vastaavaa arvoa. Kuvasta 2.1 on nähtävillä Ruukin valmistamille rakenneteräksille määritetyt lämpötilariippuvuudet, jos myötörajan kriteerinä käytetään 0,2 %:n kokonaisvenymän arvoa. Kuvasta 2.1 voidaan todeta matalalujuisten rakenneteräksien säilyttävän myötölujuuden stabiilina 400 °C:ssa paremmin kuin korkeamman lujuuden omaavat rakenneteräkset, mutta myötölujuus pysyy silti korkeampana kuin S235 teräksellä. Kimmokerroin alkaa myös pienentyä lämpötilan kasvaessa, mutta merkittävä muutos alkaa vasta 250 °C:en yläpuolisissa lämpötiloissa. [3]

Normaalit rakenneteräkset ovat hyvin alttiita hilseilylle ja grafitoitumiselle. Teräksen joutuessa korkeaan lämpötilaan alkaa teräksen pinnalle muodostua oksidikerros, joka paksuntuu hapen diffundoituessa oksidikerroksen lävitse teräksen pintaan. Niukkaseosteisten terästen hilseilylämpötilan alaraja on noin 540 °C:ta. Kyseisen lämpötilan alapuolella hilseilyn vaikutukset jäävät pienemmiksi. Teräksen pintaan syntynyt hilsekerroksen lämpölaajentumiskerroin ei ole sama kuin teräksellä, mikä aiheuttaa lämpötilan vaihtelussa leikkausjännityksiä hilsekerroksen ja teräksen välille, joka saa hilsekerroksen irtoamaan ja paljastaa teräksen puhtaan pinnan. Uudelle pinnalle oksidikerroksen muodostuminen

on nopeaa. Teräksen hilseilykestävyyttä voidaan parantaa seostamalla kromia perusaineseen. [3]



Kuva 2.1. Ruukin rakenneterästen 0,2 %:n kokonaisvenymäärään perustuvan myötörajan lämpötilariippuvuus [3].

Teräksen käyttöolosuhteet määrittelevät suurelta osin hilseilykestävyysvaatimukset. Jos teräs on korkeassa happi-, vesihöyry- tai erityisesti rikkipitoisessa olosuhteessa, hilseily on voimakkaampaa. Kuumat savukaasut aiheuttavat hilseilyn nopeutumista, joka johtuu useimmiten polttoaineen rikkipitoisuudesta sekä vesihöyrystä [3].

Lähes kaikkien kiinteiden kappaleiden tilavuudet muuttuvat suhteessa lämpötilan muutokseen. Eri materiaaleille on määritetty pituuden lämpötilakerroimet  $\alpha$ , jonka arvo määräytyy lämpötilasta. Yleensä kerroin  $\alpha$  oletetaan vakioksi tietylle lämpötila-alueelle, mutta todellisuudessa kerroin muuttuu hieman lämpötilan muuttuessa. Kerroin voidaan kuitenkin riittävällä tarkkuudella olettaa vakioksi. Pituuden lämpötilakerroin määrittää, paljonko materiaalin pituus muuttuu yhden lämpötila-asteen muutoksesta. Hiiliteräkselle pituuden lämpötilakerroin vaihtelee  $11...13 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . [4] Kerroin  $\alpha$  voidaan määrittää materiaalille myös kokeellisesti kaavalla (2.1). [5]

$$\alpha = \frac{1}{l_0} * \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (2.1)$$



Teräksen kyky johtaa lämpöä on varsin hyvä. Teräksen ollessa lämmönlähteen vaikutuksen alaisena, johtuu lämpö nopeasti lämmön vaikutuspisteestä ympäri kappaletta. Jokaiselle materiaalille voidaan kokeellisesti määrittää materiaalikohtainen lämmönjohtumiskerroin  $k$ , joka lämpötilasta. Hiiliterästen lämmönjohtumiskerroin pienenee lämpötilan noustessa yli 300 K. Lämmönjohtumiskertoimen määrittämiseen on johdettu kaava (2.2), joka saadaan suoraan Fourier -lain lämmönjohtumisen kaavasta (2.3). Kaava (2.3) kuvastaa yksi dimensionaalisen lämmönjohtumisen tapausta, mutta lämmönjohtuminen voidaan samalla periaatteella toteuttaa myös muiden akseleiden suuntaan eli  $k_x = k_y = k_z \equiv k$  oletetaan pysyvän vakiona kaikkiin suuntiin homogeenisessä materiaalissa. [6]

$$k_x \equiv -\frac{q_x''}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \quad (2.2)$$

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}. \quad (2.3)$$

Monikerros tapauksissa materiaalista löytyy sarjassa erilaisia lämpöresistansseja. Tällä tarkoitetaan tilannetta, jossa lämpövirta johtuu eri materiaalien läpi, jolloin jokainen materiaali vastustaa lämpövirran kulkua ja alentaa johtuvaa lämpötilaa monikerroskappaleen eri tarkastelukohdissa. Kyseisten tapausten ongelma voidaan ratkaista käyttämällä terminen piirin sovellusta, missä sovelletaan sähkötekniikasta tuttua sähkövastuksen laskentaa. Lämmönsiirrossa voidaan käyttää seuraavaa kaavaa (2.4) laskettaessa kappaleen läpi johtuvan lämmön arvoa  $q_x$  [6],

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_t}, \quad (2.4)$$

missä terminen resistanssi  $R$  voidaan kirjoittaa sekä konvektio- että konduktio- tapauksille seuraavien kaavojen (2.5, 2.6) mukaisesti. Kaavassa (2.5)  $h$  tarkoittaa konvektion lämmönsiirtokerrointa

$$R_{t,\text{konv}} = \frac{1}{hA} \quad (2.5)$$

$$R_{t,\text{kond}} = \frac{L}{kA}. \quad (2.6)$$

Kappaleen läpi johtuvan lämmön arvo  $q_x$  voidaan määrittää seuraavan kaavan (2.7) avulla, missä  $U$  voidaan määrittää kaavalla (2.8).

$$q_x = UA\Delta T \quad (2.7)$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{kok},A}} \quad (2.8)$$

## 2.2 Termisen kuormituksen huomioiminen 3D -palkkielementtimallissa

Elementtimallinnuksessa palkkielementti voidaan mallintaa 3D -elementtinä, jolloin Cook kutsuu sitä kirjassaan myös avaruuspalkki- elementiksi (*Space beam*). 3D -palkilla täytyy olla jokaisella solmulla yhteensä kuusi vapausastetta, kolme translaatio ja kolme rotaatio, jolloin yhdelle elementille muodostuu  $12 \times 12$  jäykkyyismatriisi. Huomioon on otettava tuolloin se, että palkilla on oma paikallinen koordinaatisto, joka sijaitsee globaalissa koordinaatistossa. Palkkimallista saadaan yhtälö (2.9), jossa mallin jäykkyyismatriisin  $\mathbf{K}$ , siirtymävektorin  $\mathbf{u}$  ja voimavektorin  $\mathbf{F}$  avulla voidaan määrittää mallin solmukohdissa syntyvät siirtymät  $u_{ijk}$  ja kiertymät  $\theta_{ijk}$ . Siirtymien, kiertymien ja reunaehtojen avulla voidaan määrittää rakenteeseen syntyvät jännitykset. [7]

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{F}, \quad (2.9)$$

Materiaaliominaisuudet otetaan huomioon jäykkyyismatriisissa  $\mathbf{K}$ , jossa poikkipinta-alan  $A$ , kimmomoduulin  $E$ , materiaalin taivutusneliömomentin  $I_{ij}$  ja leikkausjännityskertoimen  $G$  avulla muodostetaan elementille jäykkyysominaisuudet palkin muodon mukaisesti. 3D- elementille jäykkyyismatriisia luotaessa tulee ottaa huomioon palkin poikkipinnan epäsymmetrisyys, koska taivutusvastus ei ole välttämättä sama poikkipinnan akselien suhteen. [8]

Terminen kuormitus  $F_T$  asetetaan aina isotrooppiselle ja elastiselle materiaalille vaikuttamaan solmukohdissa voimavektoriin. Lämpötilan muutos aiheuttaa joko laajentumista tai supistumista, jolloin pituuden lämpölaajenemiskertoimen kaavan (2.1) ja lämpölaajenemisen kaavan (2.10) avulla voidaan johtaa voimalle  $F_T$  seuraavanlainen kaava (2.11). [9] Voiman yhtälöä on hankala soveltaa tarkasteltaessa kolmiulotteista laajentumista

geometrisesti monimutkaisessa kappaleessa, mutta laajentamalla kaavaa (2.11) kolmiulotteiselle tapaukselle, saadaan kaava (2.12). [10]

$$\delta_T = \int_0^L \alpha \Delta T L \quad (2.10)$$

$$F_T = \alpha A E \Delta T \quad (2.11)$$

$$\sigma = E \varepsilon_i + \sigma_0 \quad (2.12)$$

Jotta rakenteeseen syntyy jännityksiä tai siirtymiä, täytyy rakennetta rasittaa vähintään yhteen suuntaan ja estää kappaleen siirtymä jossain pisteessä kappaletta. Lämpötilan aiheuttama jännitystila kasvaa sitä suuremmaksi, mitä suurempi lämpötilaero rakenteelle aiheutetaan.

### 2.3 Sylinterimäisessä rakenteessa esiintyvät jännitykset

Sylinterimäisiä rakenteita käytetään hyvin yleisesti teollisuuden eri kohteissa, jolloin suunnittelijan on hyvä tuntea yksinkertaiset analysointikeinot yhdistettyjen voimien aiheuttamien jännitysten määrittämiseen. Kappaleeseen vaikuttavat rasitukset voivat olla normaali- ja leikkausvoima, taivutusmomentti, vääntö sekä lämpökuormasta aiheutuvat tilavuuden muutokset. Rakenne määritellään ohutseinämäiseksi, jos sylinterin säteen ja seinämän paksuuden suhde on suurempi kuin 10. Edellä mainitun tyyppisten rakenteiden seinämiin aiheutuvaa jännitystilaa voidaan analysoida olettamalla materiaalin olevan homogeeninen ja käyttäytyvän lineaaris-elastisesti. [11]

Ohutseinämäisessä sylinterirakenteessa voidaan numeerisesti määrittää sekä kehäjännitys että aksiaalinen jännitys. Ohutseinämäisissä rakenteissa oletetaan, että jännitystila rakenteen seinämän paksuussuunnassa on vakio. Harvoin rakennetta kuormittaa ainoastaan yksi voima. Tuolloin rakenteeseen vaikuttavien jännityksien analysoinnissa voidaan hyödyntää yhdistettyjen voimien laskentaa. Tämä vaatii sen, että rakennetta rasittavat sisäiset voimat täytyy määrittää ennen laskennan alkua. Saatujen voimien avulla määritetään rakenteessa vaikuttava lineaarinen jännitystila. Aksiaalisen jännityksen määrittämiseen käytetään kaavaa (2.13) ja kehäsuuntaisen jännityksen määrittämiseen kaavaa (2.14). [11]

$$\sigma_{\text{akssiaali}} = \frac{W_{\text{sy1}}}{A_{\text{sy1}}}, \quad (2.13)$$

missä  $W_{\text{sy1}}$  on rakenteeseen vaikuttava sisäinen voima, joka sisältää paineen aiheuttaman kuorman.

$$\sigma_{\text{kehä}} = \frac{pr}{t} \quad (2.14)$$

## 2.4 Murtumismekanismit

Suunnittelijan on hyvä tietää, mitä rakenteessa tapahtuu murtumishetkellä, jotta murtumismekaanisen menetelmän soveltuvuus voidaan osoittaa. Seuraavissa kappaleissa käsitellään tämän työn kannalta tärkeimmät murtumismekanismit, jotta ymmärrys murtumisen fysikaalisista taustoista selkeytyisi. Rakenteisiin syntyvien murtumien tunteminen ja tunnistaminen on tärkeää, jotta rakenteelle voidaan suorittaa oikeanlaiset korjaustoimenpiteet sekä suunnitella uudet rakenteet paremmiksi.

Ehjä materiaali murtuu, kun siihen kohdistettu jännitys saavuttaa materiaalin murtorajan. Materiaalissa olevat mikrosäröt pienentävät murtumiseen tarvittavaa jännityksen suuruutta, koska särön eteen syntyy jännityshuippu ja tuolloin kappale murtuu selvästi alle murtorajan. Lineaarisen teorian mukaan jännitys särön kärjessä on äärettömän suuri, mutta plastisoitumisesta ja muokkauslujittumisesta johtuen jännitys jää materiaalin myötö- ja murtojännityksen välille. [12]

### 2.4.1 Plastinen muodonmuutos

Metallit pystyvät vastustamaan plastisen muodonmuutoksen tapahtumista aina tiettyyn rajaan asti. Tuota rajaa kutsutaan myötörajaksi, jonka suuruuteen vaikuttaa erityisesti teräksen materiaaliominaisuudet. Kiteet muovautuvat plastisesti pääasiassa siten, että niiden eri osat liukuvat toisiinsa nähden liukupintoja pitkin tiettyyn suuntaa. Ilmiötä sanotaan siirrosliukumiseksi. Atomitasojen liukuminen alkaa, kun liukupinnan leikkausjännitys kasvaa yli kriittisen arvon eli leikkausjännitys saavuttaa leikkauslujuuden arvon. Metallin kiderakenne muodostuu useasta mahdollisesta liukutasosta, jonka seurauksena liukuminen alkaa siinä tasossa, jossa leikkausjännitys on suurimmillaan. Muut liukusysteemit seuraavat vasta, kun niiden leikkausjännityksen arvo kasvaa yli kriittisen arvon. Kun

kuormitusta jatketaan, on hyvin todennäköistä, että aluksi toimiva liukusysteemi tulee epäedullisemmaksi kuin toinen liukusysteemi. Plastinen muodonmuutos jatkuu tuolloin uudella liukutasolla ja – suunnassa. Ilmiötä kutsutaan monikertaiseksi liukusysteemiksi ja on tärkeä mekanismi muokkauslujittumisessa. Jotta plastinen muodonmuutos on mahdollinen, täytyy metallirakeiden mukautua viereisen kiteen muodonmuutoksiin. Koska leikkausjännitys synnyttää plastisen muodonmuutoksen, voidaan yleensä olettaa, että plastisessa muodonmuutoksessa tilavuus ei muutu. [12]

Plastinen muodonmuutos täytyy tapahtua aina leikkausvoimaa pienemmillä arvoilla. Myötöehto on tärkeä ymmärtää metallin plastisoitumisen kannalta, koska kappaleeseen kohdistettu jännitystilä on yleensä moniaksaalinen. Tästä johtuen kappaleesta ei voida todeta suoraan tiettyä jännityksen arvoa, jonka ylittämisen jälkeen kappale myötää. Myötöehto on funktio kaikista pääjännityskomponenteista, joten funktio voidaan isotrooppisessa tapauksessa ilmaista yhtälöllä (2.15). [13]

$$f(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k) = \text{vakio} \quad (2.15)$$

Kun funktio  $f$  saavuttaa suuremman arvon kuin materiaalista riippuva vakio, kappale myötää. Kokeellisten tulosten kanssa parhaiten on todettu sopivan Von Misesin ehdottama jännitysten erotusten neliösummiin perustuva funktio (2.16). Myötöehdon tulee olla voimassa kaikissa jännitystilöissa, jotta yhtälö (2.16) on voimassa. [13]

$$2f = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_i - \sigma_j)^2 + (\sigma_j - \sigma_k)^2 + (\sigma_k - \sigma_i)^2} = \text{vakio} \quad (2.16)$$

#### 2.4.2 Hauras- ja sitkeämurtuma

Materiaalin käyttäytymisen mukaan murtuminen voidaan jakaa kahteen erityyppiseen murtumaan, sitkeään ja hauraaseen. Haurasmurtuma on aina hyvin vaarallinen, koska murtuma etenee suurella nopeudella läpi rakenteen. Toisin sanottuna materiaali murtuu pienellä energiamäärällä ja murtuminen tapahtuu hyvin nopeasti. Metalleilla haurasmurtuma tapahtuu materiaalille ominaisen transitiolämpötilan alapuolella ja halkeama etsii reitin, joka on mikrorakenteen kannalta heikoin. Sitkeä murtuma eroaa hauraasta murtumasta siinä, ettei särö etene yhtä suurella nopeudella ja sitoo murtuessa paljon energiaa. Murtumaa ei voida koskaan ideaalisesti määrittää sitkeäksi tai hauraaksi, mutta sitkeän

murtumisen tunnistaa yleensä selvemmin, koska se sisältää aina sitkeän muodonmuutoskomponentin. [12]

Materiaalin hauraus syntyy, kun materiaalin rakenteessa on erilaisia kiteitä, joiden kiderakenne on monimutkainen ja joilta puuttuu plastisen muodonmuutoksen edellyttämät tiivispakkauksiset kidetasot. Metallin käyttäytyminen hauraasti, jos materiaalissa on paljon hauraita kiteitä tai ne ovat hajautuneet metallin rakenteeseen epäedullisella tavalla [13]. Hauras materiaali murtuu, kun atomien välisten koheesivoimien kiinnityskyky ylittyy. Syntyvä särö etenee jopa 1500 m/s nopeudella ja voi edetä pitkiä matkoja joko kidetasoja tai kiderajoja pitkin [14]. Ferriittisten terästen haurasmurtuma-alttius lisääntyy, kun lämpötila laskee ja kuormitusnopeus kasvaa. Lisäksi kolmiakselinen jännitystilä lisää taipumusta hauraaseen murtumaan [12].

Sitkeä murtuma eroaa oleellisesti hauraasta murtumasta. Sitkeässä murtumassa särön kärjen edessä tapahtuu voimakasta plastisoitumista, joka sitoo huomattavasti energiaa. Murtumistyyppin materiaalin mikrorakenteelle on ominaista, ettei särön etenemiselle löydy helppoa etenemistapaa, vaan murtopinnan muodostaminen vaatii voimakasta muokkausta. Kun terävää säröä kuormitetaan, syntyy sen kärkeen suuri jännityskeskittymä, jonka seurauksena särön kärki tylpistyy ja syntyy suuria venymiä. Jos kuormitusta lisätään, syntyy mikrorakenteessa olevien vikojen ympärille onkaloita, jotka kasvavat ja lopulta yhdistyvät lopulta särön kärkeen. Särön kärki tylpistyy ja lopulta syntyy uusi repeämä ja särön kasvu jatkuu. Särön eteneminen edellä mainitulla tavalla vaatii jatkuvaa systeemiin tehtyä työtä, joka sitoutuu uusien onkaloiden kasvuun tarvittavaan plastiseen muodonmuutokseen. Onkaloiden kasvunopeus on voimakkaasti riippuvainen jännitystilän kolmiakselisuudesta. Rakenteen ohentuessa myös jännitystilän kolmiakselisuus heikkenee, jolloin onkaloiden kasvu ja samalla myös särön kasvu hidastuu ja materiaalin voidaan katsoa sitkistyvän. [12]

#### 2.4.3 Virumismurtuma

Jos metalli altistetaan korkeille lämpötiloille, plastiset muodonmuutokset tapahtuvat jo hyvin pienillä jännitystasoilla. Tuolloin materiaalin sanotaan viruvan. Virumisella tarkoitetaan tällöin ajasta riippuvaa osaa jännityksen alaisena tapahtuvasta muodonmuutoksesta. Korkeissa lämpötiloissa on lähes mahdotonta välttää virumista ja hiiliteräksellä viru-

minen alkaa muodostua ongelmaksi yli 400 °C:n lämpötilassa. Virumismurtumassa materiaalissa ei yleensä havaita ollenkaan kuroutumista. [15]

Virumisen nopeus on olennaisesti riippuvainen jännityksestä ja erityisesti sekundaarinen vaihe määrittelee materiaalin käyttöiän. Viruminen jaetaan kolmeen eri vaiheeseen: primääriseen, sekundääriseen ja tertiääriseen vaiheeseen. Jännityksen ja lämpötilan suuruudesta riippuen virumisen eri vaiheiden kesto muuttuu jo pienillä muutoksilla hyvin paljon. Esimerkiksi lämpötilan nousu 30...40 °C:ta kasvattaa virumisnopeuden kymmenkertaiseksi. Sekundäärisen vaiheen kestoikää  $\varepsilon$  voidaan kuvata yleisesti Nortonin kaavalla (2.17). [15]

$$\varepsilon = N\sigma^n \quad (2.17)$$

#### 2.4.4 Väsymismurtuma

Väsymismurtuma syntyy kuormavaihteluiden seurauksena, jolloin särö ainakin osittain sulkeutuu. Murtuminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäisenä vaiheena on ydintymisvaihe. Jos rakenteessa ei ole riittävää alkusäröä, ydintymisvaihe kestää suurimman osan rakenteen eliniästä. Ydintymisvaiheen jälkeen tulee etenemisvaihe, jossa särö lähtee kasvamaan kiihtyvällä nopeudella, kunnes saavutetaan vaihe, jossa rakenne lopullisesti murtuu joko sitkeästi tai hauraasti. [16]

Ydintymisvaihe pitenee yleensä murtolujuuden kasvaessa. Yleensä terästen väsymislujuus on tiettyyn lujuustasoon saakka noin puolet murtolujuudesta. Väsymislujuudella tarkoitetaan materiaalin sitä arvoa, jolla teräs kestää tietyn suuruisen kuormitusamplitudin synnyttämättä väsymismurtumaa. Myötövanheneminen lujittaa materiaalia kasvattaen muun muassa murtolujuutta ja tämän seurauksena materiaalin ehjän osan väsymislujuus kasvaa. Mikäli kuormitusaste on kynnyсарvoa pienempi, ei jo olemassa oleva särö voi kasvaa. Väsymissärön etenemisessä ei tapahdu näkyvää plastisoitumista, jolloin sekä hauras että sitkeä materiaali käyttäytyy samantapaisesti. Väsymissärö etenee materiaalissa jokaisella kuormituskerralla ja yleensä vielä kiteiden läpi. Makroskooppisella tasolla särö kasvaa tasossa, joka on kohtisuorasti suurinta pääjännitystä vastaan. [16]

Vaihtelevan kuormituksen alaisen rakenteen väsymiskestävyyttä voidaan arvioida laske-  
malla, mikäli kuormitushistoria on tiedossa. Tarkastelussa voidaan käyttää Rainflow- me-

netelmää, jossa voidaan määrittää tietylle kuormitusjaksolle kuormituksen keskiarvo, esimerkiksi keskijännitys  $\sigma_{\text{mean}}$ . Tarkastelujaksolta kerätään kaikki samansuuruiset kuormanvaihtelut ja niiden kappalemäärät. Kerätyn datan perusteella lasketaan kuormitukselle keskiarvo. Saatua keskiarvoa käytetään laskennassa, jossa tarkoituksena on määrittää kuormituksen aiheuttamaan väsymismurtumaan johtavien kuormituskertojen määrä, jossa kuormituskerralla tarkoitetaan tarkasteltavaa kuormitusjaksoa, josta keskikuormitus laskettiin. Laskenta suoritetaan kaavan (2.18) avulla. [17]

$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{\Delta\sigma_i}{n} \quad (2.18)$$

Väsymismurtumaan johtavien kuormituskertojen lukumäärä voidaan määrittää Eurocode-3 mukaisella laskenta periaatteella, jossa laskentajännityksen ja FAT- luokan perusteella määritetään rakenteelle kestoikä. FAT- luokat ovat kansainvälisellä tasolla määriteltyjä väsymiskestävyysluokkia erilaisille tapauksille, missä väsymiskuormituksen rajana pidetään 2000000 kuormituskertaa. Kestoiän  $N_f$  laskennassa käytetään laskentakaavaa (2.19). [18]

$$N_f = \left( \frac{FAT}{\sigma_{\text{mean}}} \right)^3 * 2 * 10^6 \quad (2.19)$$

#### 2.4.5 Jännityskorroosio

Jännityskorroosion vaikutuksesta teräkseen ja erityisesti seostamattomiin teräksiin voi syntyä särömäisiä vikoja, jotka aikanaan johtavat murtumiin. Ongelma on kuitenkin pääsääntöisesti lujien terästen ongelma ja riippuvainen rakenteen vetojännitystilän suuruudesta, mikä voi olla ulkoisen kuormituksen tai jopa hitsauksen jäännösjännitystilasta johdettu. Kuitenkin kemikaalin väkevyys ja käyttölämpötila vaikuttavat myös suuresti jännityskorroosion syntyyn. Esimerkiksi seuraavat kemikaalit aiheuttavat jännityskorroosiossa kemiallisen rasituksen: ammoniakki, kaliumhydroksidi ja -karbonaatti, kalsiumnitraatti, rikkihappo sekä kloorivety. Halkeama etenee yleensä raerajoja pitkin ja vauriota ei yleensä huomata, koska normaalille korroosiolle tyypillisiä korroosiotuotteita ei kappaleen pinnalle muodostu. [19]



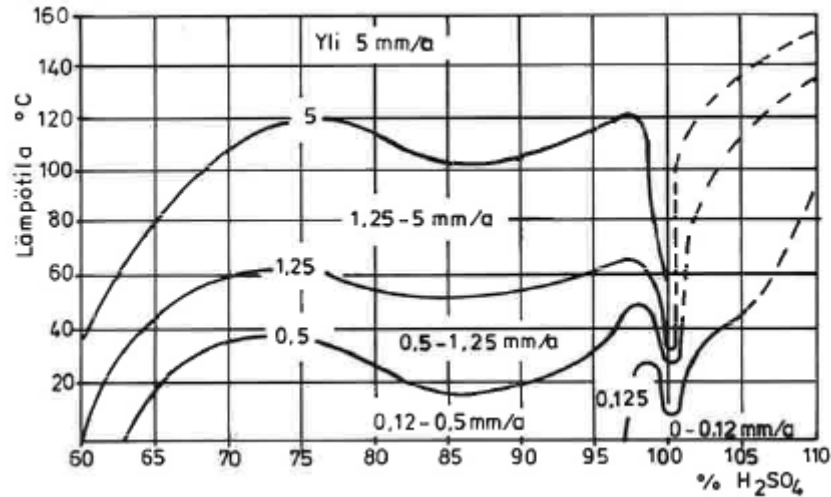
## 2.5 Kemiallinen korroosio teräksessä

Kemiallisen korroosion aiheuttama ongelma on yleensä materiaalin oheneminen, joka aiheuttaa rakenteiden murtumisia suunniteltua aikaisemmin, jos ohenemista ei ole otettu huomioon. Rikki on yksi suurimmista kemiallisen korroosion aiheuttajista teräksessä. Ongelma on yleinen esimerkiksi voimalaitosten savukaasukanavissa, missä käytetään rikkipitoisia polttoaineita. Sementtiteollisuudessa kalkkikiven poltossa käytetään yleisesti hiiltä ja petrokoksia, joissa varsinkin jälkimmäisessä on paljon rikkiä. Lisäksi savukaasuissa on myös muita alkaleja, kuten klooria ja kaliumia, jotka tulevat joko polttoaineesta tai raaka-aineista. Rikki kuitenkin on edellä mainituista alkuaineista haitallisin, koska rikin pitoisuudet savukaasuissa ovat yleensä muita korkeammat. Tietyissä lämpötilassa rikkiyhdistelmä muodostaa vesihöyryn kanssa rikkihappoa, joka on erityisen syövyttävä ja korroosiota aiheuttava yhdistelmä.

Polttoaineen palaessa rikki yhdistyy palamisreaktiossa hapen kanssa ja muodostaa rikki-dioksidia  $SO_2$ , mistä osa edelleen hapettuu edelleen rikki-trioksidiksi  $SO_3$ . Savukaasussa oleva vesi reagoi rikki-trioksidin kanssa muodostaen rikkihappoa  $H_2SO_4$ , joka kondensoituu tietyn lämpötilan alapuolella pinnoille, joihin rikkihappo on kosketuksessa. Kondensoitumislämpötilaa kutsutaan happokastepisteeksi, jonka yläpuolella rikkihappo esiintyy kaasuna. Kastepistelämpötila kasvaa  $SO_3$  ja vesihöyrypitoisuuden kasvaessa, mutta suurempi merkitys on kuitenkin rikki-trioksidilla.  $SO_3$  pitoisuutta kasvattaa erityisesti polttoaineen rikkipitoisuus, ilmaylimäärä ja polttimen kuormituksen kasvu. [20]

Savukaasujen lämpötilalla on suuri merkitys teräksen syöpymisnopeudelle. Alle  $60\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa teräksen pinnalle tiivistyy vettä, jolloin sekä tavalliset rakenneteräkset että sääkestävät teräkset syöpyvät voimakkaasti rikkipitoisessa ympäristössä. Yli  $60\text{ }^\circ\text{C}$ :en lämpötilassa alkaa rikkihapon aiheuttama syöpyminen vaikuttaa ja noin  $100\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa saavuttaa suurimman korroosionopeutensa. Rikkihapon väkevyys on tuolloin noin 70 %. Kuvasta 2.2 nähdään, miten lämpötila ja rikkihapon väkevyys vaikuttavat syöpymisnopeuteen teräksessä. On siis rakenteen syöpymättömyyden kannalta tärkeää, ettei rakenteiden pinnoille pääse muodostumaan rikkihappoa. Tämä edellyttää lämpötilan pitämistä rikkihapon kastepisteen yläpuolella, jolloin syöpymisvaikutus on hyvin paljon pienempi kuin sen alapuolella. Toinen vaihtoehto on, että kostuneet pinnat kuivatetaan tietyn väliajoin esimerkiksi savukaasun lämpötilaa nostamalla [21]. Materiaalivalinnalla voidaan hidastaa korroosionopeutta. Etenkin runsaasti nikkeliä seostetut teräslaadut on todettu toimivan hyvin rikkipitoisessa ympäristössä. Muita vaihtoehtoja hidastaa korroosionopeutta ovat

teräksen esihapettaminen sekä kromi-, alumiini-, pii- ja mangaaniseosteisia teräksien käyttö. [22]



Kuva 2.2. Rikkihapon väkevyyden ja lämpötilan yhteys korroosionopeuteen [22].

Polttoprosessissa syntyy savukaasuun myös kloorivetyä, joka kondensoituessaan muodostaa suolahappoa. Hiili- ja niukkaseosteiset teräkset soveltuvat huonosti suolahapon käsittelyyn. Pitoisuudeltaan yli 20 %:n suolahappo aiheuttaa teräksessä voimakasta korroosiota ja aiheuttaa rakenteen ennenaikaisen rikkoutumisen. Jos suolahapon pitoisuus saadaan pidettyä alle 10 %:ssa ja lämpötila alle 100 °C, teräksen korroosionopeutta voidaan hieinan hidastaa, mutta niukkaseosteisia teräksiä ei suositella käytettävän ollenkaan suolahapon kanssa. [22]

## 2.6 Puhkeamiskuorman määrittäminen

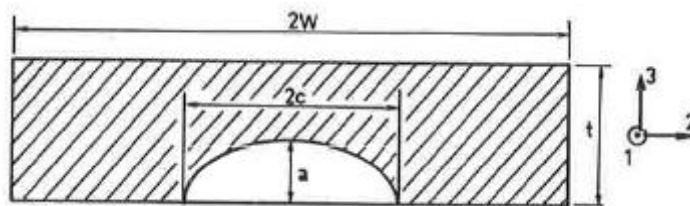
Plastista epästabiliutta tarkasteltaessa materiaali oletetaan usein ideaaloplastiseksi ja muokkauslujittuminen otetaan huomioon korvaamalla myötöraja myötämisjännityksellä. Puhkeamisjännityksellä tarkoitetaan sitä jännitystä, jolla särö alkaa edetä seinämän läpi. Pintasäröllisen levyn puhkeamisjännitystä voidaan arvioida kaavalla (2.20) [23]

$$\sigma_L = \eta \left(1 - \frac{a_{ekv}}{t}\right) \sigma_y \quad (2.20)$$

missä  $\sigma_y$  on materiaalin myötölujuus ja  $a_{ekv}$  on ekvivalentti särön syvyys, joka määritellään syvyydeksi, jonka jatkuva särö kappaleessa aiheuttaa saman puhkeamisjännityksen kuin todellinen särö. Ekvivalentti särön syvyys on pienempi kuin todellinen särön syvyys, koska äärellisen särön reunat tukevat toisiaan. Kerroin  $\eta$  ottaa huomioon muodonmuutos-

ten estymisen kannaksen alueella kuvan 2.3 merkityssä suunnassa 2; jännitys  $\sigma_3$  oletetaan nolllaksi. Jos venymää suunnassa 2 ei estetä, on  $\sigma_2 = 0$  eli jännitystila on aksiaalinen ja  $\eta = 1$ . Jos venymä suunnassa 2 estetään, saadaan plastisuusteorian mukaan  $\sigma_2 = \sigma_{\perp}/2$ . Tästä seuraa von Mises'n hypoteesin mukaan  $\sigma_{red} = \sigma_{\perp} \frac{\sqrt{3}}{2}$ , joten  $\eta = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,15$ . Harrisonin ehdotti ekvivalentille särön syvyydelle kaavaa (2.21). [23]

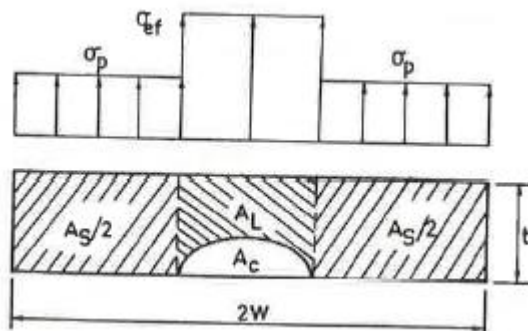
$$a_{ekv} = \frac{\pi}{2} \left(2 + \frac{\lambda}{\gamma}\right)^{-1} * a, \quad \lambda = a/c, \gamma = a/t \quad (2.21)$$



Kuva 2.3. Puolielliptinen pintasärö [23].

Hasegawa kehitti koetulosten perusteella hyvin toimivan mallin, jossa voidaan approksimoida poikkipinnan jännitystilaa kuvassa 2.4 esitetyllä jakaumalla. Puhkeamishetkellä kannaksen alueella vaikuttava jännitys oletetaan vetokokeessa määritetyn katkeamisjännityksen  $\sigma_{ef}$  suuruiseksi. Ehjässä poikkipinnassa vaikuttavalle jännitykselle  $\sigma_p$  saatiin pintasärölliselle levyllä kaava (2.22), joka ottaa huomioon muokkauslujittumisen. [23]

$$\sigma_p = \sigma_u - \sigma_u - \sigma_y * \frac{a}{t} \quad (2.22)$$



Kuva 2.4. Hasegawan malli särön alueella vallitsevien jännityksien jakautumisesta [23].

Kaava (2.22) tulkitaan siten, että säröttömässä levyssä murtuminen tapahtuu nimellisjännityksen saavuttaessa vetomurtolujuuden ja särön ollessa syvä, puhkeaminen alkaa nettójännityksen saavuttaessa myötölujuuden. Tuolloin puhkeamiskuormitus voidaan laskea kaavasta (2.23) [23]

$$P_L = \sigma_p * A_S + \sigma_{ef} * A_L \quad (2.23)$$

jossa  $A_L$  on kannaksen pinta-ala ja  $A_S$  ehyen poikkipinnan ala ( $A_S=2Wt-2ct$ ). Jos kaava (2.23) jaetaan kokonaispinta-alalla, saadaan puhkeamisjännitykselle kaava (2.24) [23].

$$\sigma_L = \sigma_p * \left(1 - \frac{c}{W}\right) + \sigma_{ef} * \frac{A_L}{2Wt} \quad (2.24)$$

Sitkeän materiaalin puhkeamisjännitys voidaan arvioida kohtuullisella tarkkuudella sekä Hasegawan että Harrisonin kaavoilla. Molemmat menetelmät soveltuvat erityisesti austeniittiselle ja ferriittiselle teräkselle. Hasegawan menetelmän avulla saadaan todennäköisemmin tarkempia arvoja puhkeamisjännitykselle. Laskennassa ei kuitenkaan oteta huomioon nettopinta-alan neutraaliakselin paikan muutosta ja siitä seuraavaa kuoren sekundaarista taivutusta. [23]

## 2.7 Murtumiskuormituksen määrittäminen

Murtumiskuormitus on riippuvainen särön alkusyvyvyydestä, kuten puhkeamiskuormituksen. Murtumiskuormituksen suuruutta voidaan arvioida rajakuromamenetelmällä, jonka mukaan nettopoikkipintaa kohti laskettu jännitys on murtumishetkellä vakio ja yhtä suuri kuin myötäämisjännitys. Kokonaispoikkipintaa kohti laskettu murtumisjännitys on siten kaavan (2.25) mukainen [23].

$$\sigma_B = 1 - \frac{A_C}{2Wt} * \sigma_y \quad (2.25)$$

missä  $A_C$  on särön pinta-ala.

Särön ja seinämän paksuuden syvyysuhteella on riippuvuus nettomurtumisjännityksen kanssa. Rajakuromamenetelmä antaa kuitenkin matalille säröille sekä syvyysuhteen ollessa alueella 0,6-0,8 hieman epäkonservatiivisia tuloksia. Kun särö läpäisee seinämän, alkaa se kasvaa pituussuunnassa kuormituksen ollessa lähellä murtumiskuormitusta. Sä-

rön syvyyden ollessa pieni ( $a/t < 0,1$ ) käyttäytyy levy kuin siinä ei olisi säröä ollenkaan, jolloin murtumisjännitys on vetomurtolujuuden suuruinen. Staattinen vetomurtolujuus on siis tunteeton pienille säröille. Hasegawa on johtanut koetulostensa perusteella kaavat (2.26) (2.27), joilla voidaan approksimoida murtumisjännityksen suuruutta [23].

$$\sigma_{nB} = \sigma_u, \quad a/t < 0,1 \quad (2.26)$$

$$\sigma_{nB} = \frac{(1-\frac{a}{t})^2}{0,9^2} * \sigma_u - \sigma_y + \sigma_y, \quad a/t > 0,1 \quad (2.27)$$

Kokonaispoikkipintaa kohti laskettu murtumisjännitys saadaan kaavoista (2.26) ja (2.27) kertomalla ne suhteella  $(2Wt-2ct)/2wt=(1-c-W)$ , jolloin saadaan kaavat (2.28) ja (2.29). [23]

$$\sigma_{nB} = \sigma_u * (1 - \frac{c}{W}), \quad a/t < 0,1 \quad (2.26)$$

$$\sigma_{nB} = \frac{(1-\frac{a}{t})^2}{0,9^2} * \sigma_u - \sigma_y + \sigma_y * (1 - \frac{c}{W}) \quad a/t > 0,1 \quad (2.27)$$

Putkipoikkipinta-ala on yleinen ja kuitenkin vaikeasti käsiteltävä geometria. Kantokuormamenetelmiin perustuva tarkastelu soveltuu paremmin putkistossa olevaan poikittaissä- rön kuin pitkittäissä- rön stabiliustarkasteluun, koska poikittaissä- rön kohdalla myötäävä pinta-ala on selvemmin rajoitettu kuin pitkittäissä- rön tapauksissa. Kantokuormamenetel- mää sovellettaessa poikkipinnassa vaikuttavalle aksiaalijännitykselle valitaan sopivat puhkeamis- ja murtumishetkeä vastaavat arvot. Sisäiset jännitykset kytketään ulkoisiin kuormituksiin (aksaalivoiman  $F_{aks}$ , momentin  $M$  ja sisäiseen paineeseen  $p$ ) momentti ja voimatasapaino ehdoilla (2.30). [23]

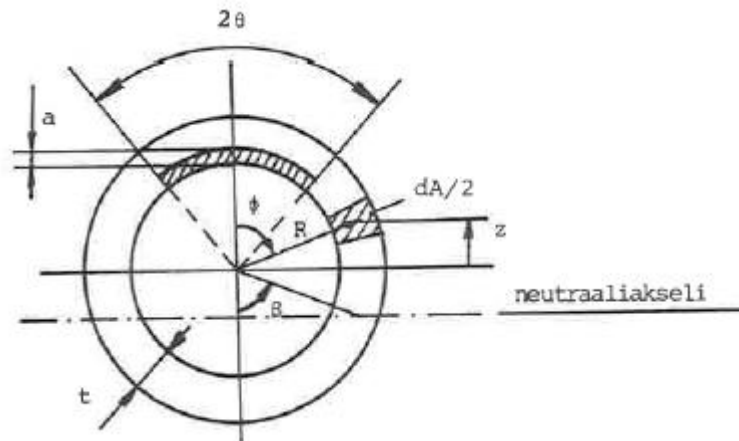
$$\begin{aligned} M &= \int_A^{\infty} \sigma z dA \\ F &= \int_a^{\infty} \sigma dA - F_p \end{aligned} \quad (2.30)$$

jossa  $F_p$  on sisäisestä paineesta johtuva aksiaalinen voima, mutta termillä voidaan myös kuvata termisestä laajentumisesta aiheutuva voima. Kuvan 2.5 mukaisessa tilanteessa voidaan kirjoittaa dimensiottomat yhtälöt (2.31) ja (2.32) veto- ja taivutusjännityksille,

jotka ovat lineaariteorian avulla laskettuja maksimijännityksiä. Yksityiskohtaisempi johdaminen on nähtävissä Ikosen ja Kantolan teoksesta. [23]

$$\sigma_t = \frac{F}{2\pi R t} + \frac{pR}{2t} = \frac{F+F_p}{2\pi R t} \quad (2.31)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{\pi R^2 t} \quad (2.32)$$



Kuva 2.5. Putkeen syntyvä poikkipintainen särö [23].

Ottamalla huomioon nämä nimellisjännitysten maksimiarvot saadaan tasapainoyhtälöiksi, joissa murtumishetken jännitystilaa voidaan arvioida kaavalla (2.34) ja puhkeamishetken tilaa kaavalla (2.33), joissa sekä veto- että taivutusjännityksen yhteisvaikutus huomioidaan. Parametrien  $k_1$  ja  $k_2$  arvot tulee valita sopiviksi tapauskohtaisesti [23].

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_y} = \frac{2}{\pi} \left[ 1 + k_2 \sin \beta + k_1 \left( 1 - \frac{a}{t} \right) \sin \theta - \sin \theta \right]$$

$$\beta = \frac{\pi - \theta}{1 + k_2} + \frac{k_1 \left( 1 - \frac{a}{t} \right) \theta}{1 + k_2} - \frac{\pi}{1 + k_2} * \frac{\sigma_t}{\sigma_y} \quad (2.33)$$

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_y} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1 + k_1}{2} * \frac{\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta}{1 + \cos \theta} - \frac{a}{t} \sin \theta \right]$$

$$1 + k_1 = \frac{\pi \left( 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_y} \right) \frac{a}{t} \theta}{(\pi - \theta) \cos \theta + \sin \theta} \quad (2.34)$$

### 3 KALSINAATTORIN TERÄSKUOREN MATERIAALIN TARKASTELU

Tässä luvussa selvitetään vetokokeiden, kovuusmittauksen ja mikrokuvien perusteella, onko rakenteen materiaalilla haurasmurtumavaaraa tai alttiutta sille, sekä pyritään päättämään, mitä lujuusominaisuuksia teräskuorella on. Tarkasteltava rakenne on olosuhteessa, jossa lämpötilat vaihtelevat aina ulkolämpötilasta - 40 °C käyttölämpötilaan 890 °C. Teräskuoren lämpötila ei saisi normaalissa tilanteessa, jossa tiili- ja eristevuoraus ovat kunnossa, nousta yli 50 °C. Pääasiallisesti vuosihuollot sijoittuvat talviaikaan, jolloin lämpötila saattaa laskea lähelle - 40 °C. Kalsinaattorin silmämääräisessä tarkastelussa vaurioituneiden osien murtopinnat antoivat aiheita epäillä haurasmurtuma-mahdollisuutta.

Teräksen ominaisuuksista ei ollut saatavilla valmistajan materiaalitietoja. Ainoastaan tiedossa oli teräksen alkuperämaa Turkki, jossa teräsosat ovat myös valmistettu. Kuoren korjaushitsauksessa on havaittu, että teräs sulaa pienellä lämmöntuonnilla. Uuden uunin käyttöönoton jälkeen kalsinaattorin valuvuorauksia irtosi kiinnitysankkureiden katkettua kemiallisen korroosion vaikutuksesta sekä osa tiilihylyistä hilseili pois liekin kosketuksesta.

#### 3.1 Kalsinaattorin teräskuori

Kalsinaattori, joutsenkaula ja laskuputki (kuva 1.1) ovat kaikki samaa rakennelmaa, mitkä on liitetty yhteen liikuntapalkeilla. Liitteestä 1 on nähtävillä kalsinaattorin ulkomitat ja liitteestä 2 joutsenkaulan ja laskuputken ulkomitat. Teräskuoren paksuus on kaikkialla 6 mm ja kuoren ympärillä on tukirenkaita epäsäännöllisin välimatkoin.

#### 3.2 Koejärjestelyt

Materiaalikokeiden tavoitteena oli tutkia materiaalin haurasmurtuma-alttiutta ja tunnistaa materiaali sekä sen lujuusominaisuudet. Koemenetelmäksi valittiin vetokoe, jossa vedot suoritettiin eri lämpötiloissa. Kovuuskoe sekä mikrokuvasta tehtiin samasta koekappaleesta. Kovuuskokeen tuloksia verrattiin vetokokeissa saatuihin tuloksiin. Mikrokuvasta haluttiin nähdä materiaalin mikrorakenne sekä mahdollisesti näkyvät seosaineet. Tarkempaa analyysiä materiaalin seosaineista ei suoritettu.

Vetokoesauvojen mitoituksessa ei voitu soveltaa standardin SFS EN 10002-1 mukaisia suhdeseauvan mitoitushjeita käytettävissä olleen koesauvan mittojen vuoksi. Mittaukses-

sa käytetyn siirtymäanturin pienin alkumittapituus oli 72mm ja mitta-alue noin 30 mm. Koesauvan 6 mm paksuus antaisi standardin mukaan suhdesauvan alkumittapituudelle 69 mm, joka oli liian pieni käytössä olevalle siirtymäanturille. Materiaalin mahdollinen matala myötöraja täytyi ottaa huomioon riittävän suurena alkumittapinta-alana, jottei koesauva katkea liian pienellä voimalla. Liian pieni pinta-ala murtuu liian pienellä voimalla, jonka seurauksena mittaustulokset eivät anna luotettavia arvoja. Tavoiteltava taso on mitaustarkkuuden vuoksi käytettävissä olevalle kalustolle 50 kN vetovoima. Sauvan alkumittapinta-alaksi määritettiin  $210 \text{ mm}^2$  ja alkumittapituudeksi 75 mm.

Koesauvoja valmistettiin neljä kappaletta. Kahdessa sauvassa haluttiin tarkastella hitsin vaikutusta vetolujuuteen. Materiaalin haurasmurtuma-alttius voidaan todeta selkeimmin vetämällä koesauvat reilusti miinusasteisessa lämpötilassa. Näin ollen  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa vedettiin yksi hitsillä varustettu koesauva ja perusainesauva poikki. Samanlaiset sauvat vedettiin myös vertailun vuoksi  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa.

### 3.3 Koetulokset

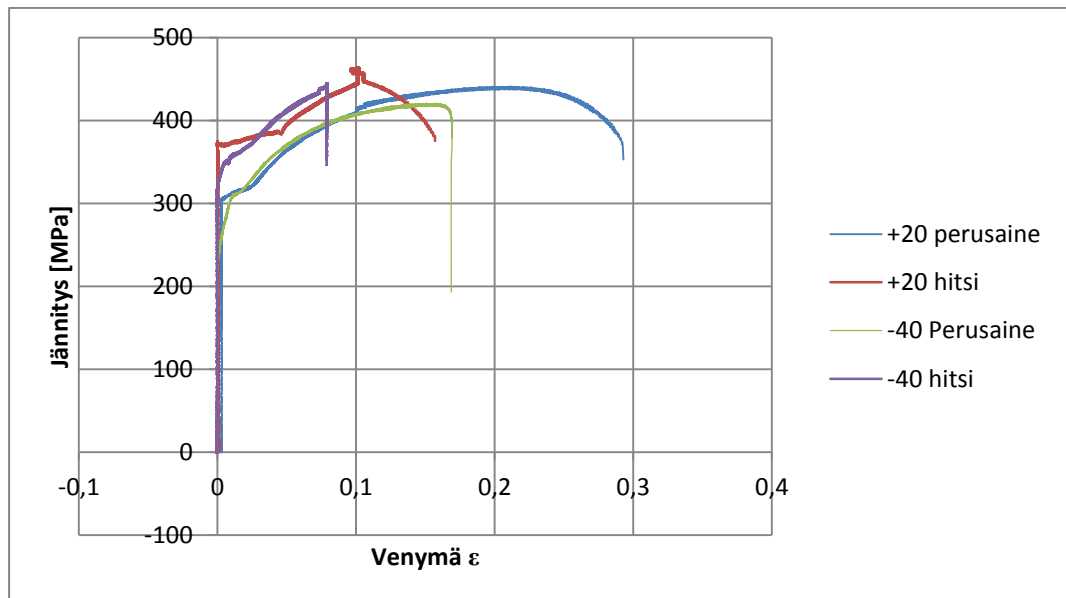
Vetokoetulokset saatiin voiman ja siirtymän arvoina, jotka muutettiin vastaamaan jännitys- ja venymäarvoja. Suhteellinen venymä  $\varepsilon$  pituussuunnassa saatiin kaavalla (3.1). Vetokoekappaleen murtokohdan poikkipinnan venymä  $\varepsilon_{\perp}$  määritettiin kaavalla (3.2). Teräksisille materiaaleille ominainen Poissonin vakio eli kuroutumiskerroin  $\nu$  vaihtelee teräksellä  $0,25 \dots 0,35$  [24]. Tuloksien analysoinnissa kuroutumiskertoimeksi  $\nu$  valittiin 0,3 ja jälkikäsitelyssä käytettiin Excel-ohjelmaa.

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon} = \varepsilon_{\perp} = \nu\varepsilon \quad (3.2)$$



Vetokokeesta saadut tulokset on nähtävissä kuvasta 3.1 sekä taulukosta 3.1. Kaavoilla lasketuilla tuloksista voidaan todeta myötölujuuden perusainekoekappaleilla olevan lähellä 250 MPa ja murtorajat noin 420 MPa luokkaa. Huomioitavaa kuitenkin on se, että kappaleiden todellinen murtoraja on paljon suurempi kuin laskemalla saadut tulokset antavat ymmärtää. Kuvassa 3.1 olevat tulokset vastaavat niin sanottua insinööri jännitys- venymä käyriä. Mitattaessa koessaiujen murtopintojen pinta-alat ja jaettaessa lasketulla pinta-alalla murtohetken voima, saadaan lähemmäksi todellisuutta oleva murtorajan arvo. Taulukosta 3.1 on nähtävillä lasketut murtorajat käyttämällä loppuvoimaa ja murtunutta pinta-alaa.



Kuva 3.1. Kuroutumisvakiolla määritetyt jännitys- venymä käyrät.

Taulukko 3.1. Murtovoimalla ja murtopinta-alalla lasketut murtorajat.

Koekappale	Pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]	Voima [kN]	Murtoraja [MPa]
+20 Perusaine	67,6	102	1508,9
-40 Perusaine	75,1	88	1171,8
+20 Hitsi	72,85	104	1427,6
-40 Hitsi	71,09	104	1462,9

Tarkemmat jännitys- venymä käyrät voidaan määrittää saatujen koetulosten perusteella käyttämällä Ramberg- Osgood:n määrittelemää kaavaa (3.3) [25]. Jotta kaavaa voidaan käyttää, täytyy materiaalikokeiden perusteella määrittää jännitykset  $\sigma_1$  ja  $\sigma_2$ . Nämä määritetään kokeellisesta jännitys- venymä käyrästä siten, että jännitykset  $\sigma_1$  ja  $\sigma_2$  vastaavat origosta kulmakertoimilla 0,7E ja 0,85E piirrettyjen sekanttien ja käyrän leikkauspisteiden jännityksen arvoja. Eksponentti n voidaan määrittää kokemusperäisesti määritellyllä kaavalla (3.4). [ 25]

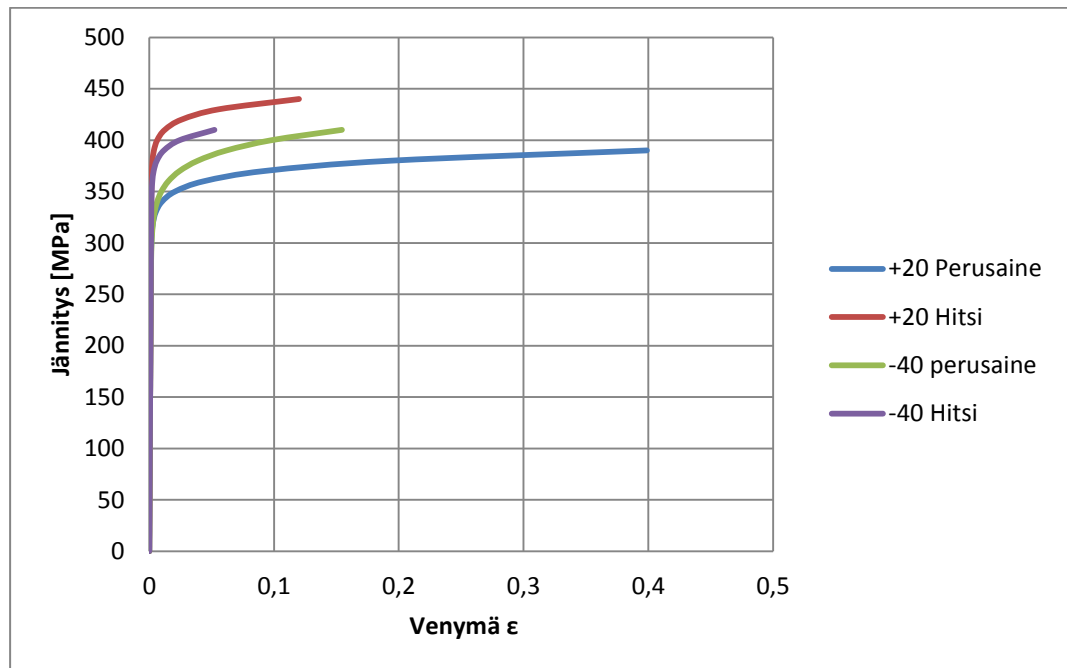
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{3}{7} * \frac{\sigma_1}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^n \quad (3.3)$$

$$n = \frac{0,8873}{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)} + 1 \quad (3.4)$$

Lasketaan vetokoesauvoille tarkemmat jännitys- venymä käyrät käyttämällä edellä mainittua kaavaa (3.3). Määritetään aluksi jokaiselle vetokoesauvalle jännitykset  $\sigma_1$  ja  $\sigma_2$  kuvasta 3.1 sekä lasketaan niiden avulla eksponentti n. Saadut jännitykset ja eksponentit näkyvät taulukosta 3.2. Taulukosta 3.1 saadaan vetokokeen murtumishetken jännityksen arvo, mutta materiaalin käyttäytyminen oli todella sitkeää, joten pinta-aloista ja loppuvoimista lasketuista murtumisjännityksestä tulee yli 10 -kertaiset venymät. Tämä ei voi pitää todellisuudessa paikkaansa. Ramberg- Osgood:n käyrien määrittämisessä murtumiskohdan murtumishetken jännitys saadaan laskemalla kappaleessa tapahtunut todellinen loppuvenymä.

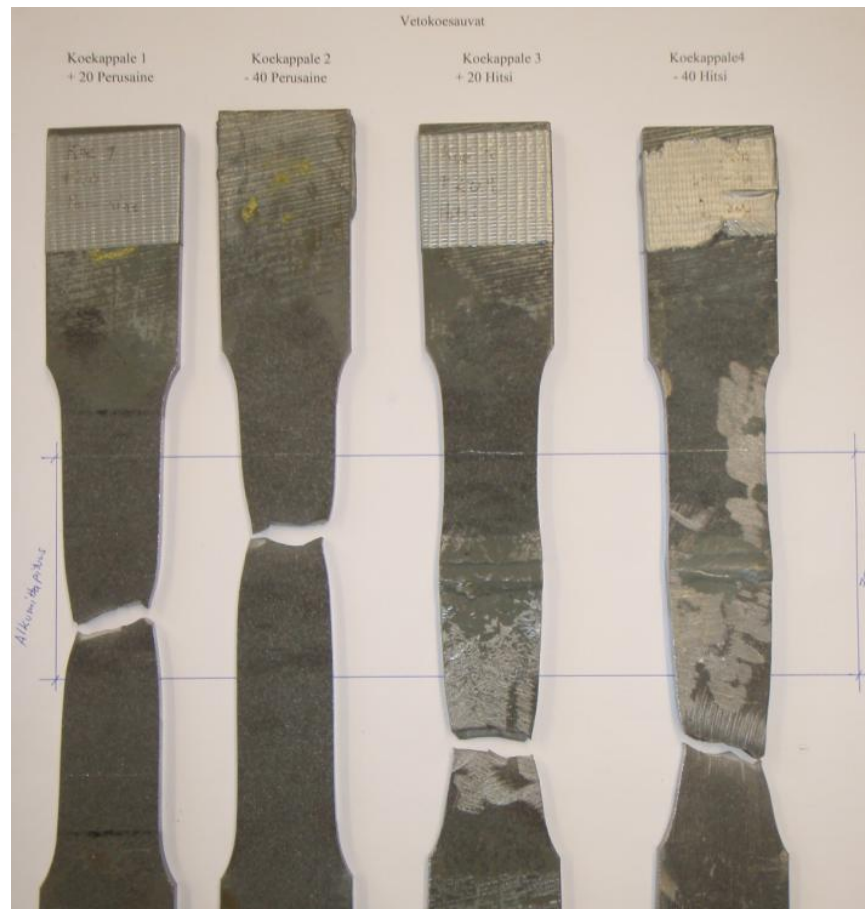
Taulukko 3.2. Ramberg- Osgood:n  $\sigma\varepsilon$ - käyrien määrittämisessä käytetyt arvot.

Vetokoesauva	Jännitys $\sigma_1$ [MPa]	Jännitys $\sigma_2$ [MPa]	n
+20°C perusaine	310	270	28,06
+20°C hitsi	380	370	34,27
-40°C perusaine	305	290	18,59
-40°C hitsi	360	350	32,49



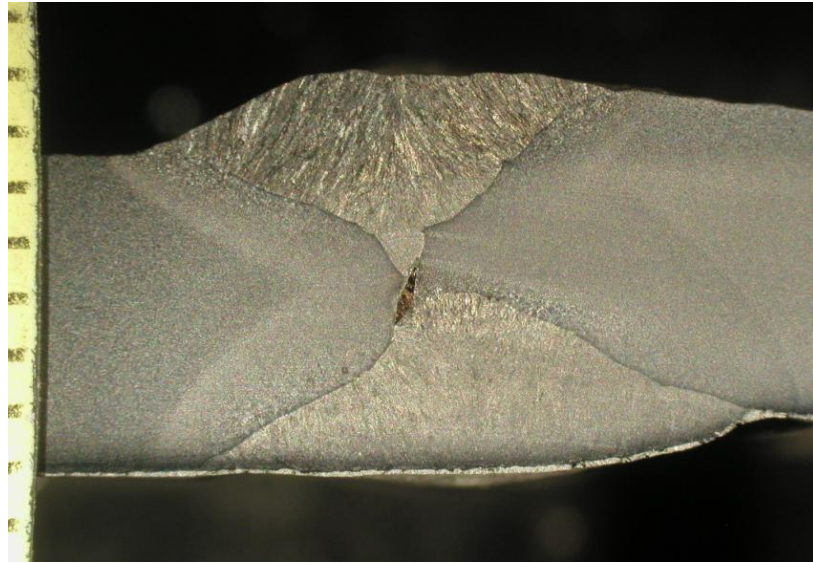
Kuva 3.2 Ramberg- Osgood:n kaavalla määritetyt jännitys- venymä käyrät tutkittavalle teräslaadulle.

Verrattuna kuroutumiskerroinvakioilla määritettyihin käyriin (kuva3.1) lähempänä todellisuutta oleviin murtorajoihin (kuva 3.2), voidaan todeta murtorajojen olevan hyvin lähellä toisiaan. Hitsattujen kappaleiden osalta tuloksien luotettavuus hieman kärsii, johtuen hitsin geometriasta, liitettyjen kappaleiden epäkeskeisyydestä sekä vetokoekappaleiden murtumisesta mittausalueen ulkopuolelta. Kuvasta 3.3 näkee selvästi hitsattujen kappaleiden katkenneen mittausalueen ulkopuolelta. Kuroutumisvakioilla lasketut jännitys- venymä arvot eivät pidä täysin paikkaansa, koska osa siirtymästä jäi laskennan ulkopuolelle. Kuitenkaan suurta eroa perusaineellisen ja hitsattujen kappaleiden välillä ei muodostunut. Murtorajat ovat hyvin lähellä toisiaan.



Kuva 3.3. Vedetyt vetokoesauvat, jossa näkyy sauvojen murtumiskohtat ja mitta-alue.

Kaikkien vetokoekappaleiden murtopinnat vastaavat sitkeälle murtumalle tyypillistä muotoa. Murtopinnat on nähtävissä kuvassa 3.3. Hitsattujen kappaleiden lopputarkastelussa havaittiin vajavuutta hitsin tunkeumassa ja sen seurauksena molemmissa hitsatuissa koesauvoissa on nähtävissä särön avautuminen. Kuvasta 3.4 näkee hitsin tunkeuman vajavuuden, lämpövyöhykkeen sekä särön alun ehjästä koesauvasta otetusta makrokuvasta. Havaittavaa oli myös nopea lämpötilan kasvu kuroutumisalueella.



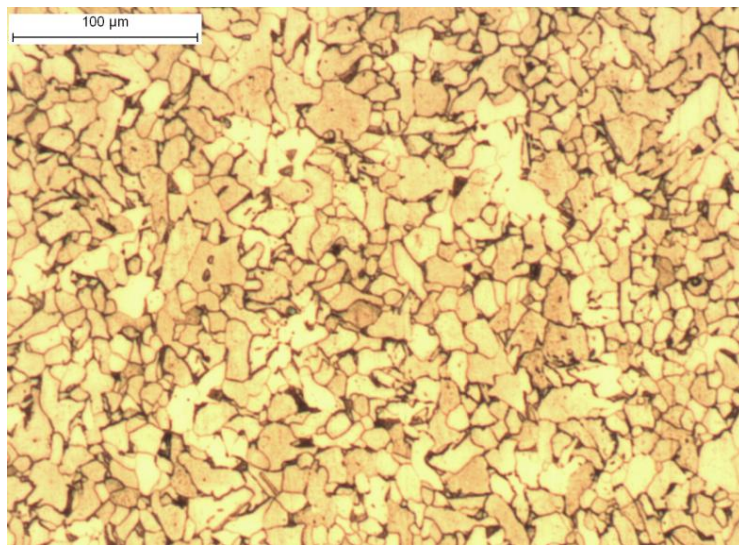
Kuva 3.4. Makrokuva hitsin poikkileikkauksesta.

Kovuuskoetulokset kerättiin kahdesta koepalasta, josta myös vetokoesauvat valmistettiin. Koepalat valittiin siten, että kovuudet mitataan sekä perusaineesta että hitsatusta kappaleesta. Kovuuskokeen tulokset on nähtävissä taulukosta 3.3. Kovuuskoetulokset antoivat perusaineelle pieniä kovuusarvoja ja hitsiaineelle saatiin hieman suurempi kovuusarvo. Perusaineen kovuudelle aritmeettinen keskiarvo oli 130,6 (HV5) ja hitsin kovuudeksi mitattiin 223 (HV5). Perusaineen osalta kovuus vastasi S235 rakenneteräksen kovuutta.

Taulukko 3.3. Kovuuskokeen tulokset kalsinaattorin teräskuoren materiaalista.

Koepala1					
Mittauspiste	Mitta 1	Mitta 2	Keskiarvo	Kovuus	
1	0,269	0,265	0,267	130	Perusaine
2	0,264	0,268	0,266	131	Perusaine
3	0,268	0,263	0,2655	131	Perusaine
Keskiarvo				130,6667	Perusaine
Koepala2					
Mittauspiste	Mitta 1	Mitta 2	Keskiarvo	Kovuus	
1	0,256	0,252	0,254	144	Perusaine
2	0,255	0,232	0,2435	178	HAZ
3	0,215	0,223	0,219	193	Hitsi
4	0,224	0,23	0,227	189	HAZ
5	0,256	0,256	0,256	142	Perusaine
Keskiarvo				154,6667	

Mikrokuvan perusteella (kuva 3.5) voitiin todeta materiaalin olevan niukkahiilinen. Kuvassa ei ole merkkejä muista seosaineista kuten kromista. Mikrorakenne on lähes kokonaan ferriittis- perliittinen. Mikrokuva vahvistaa sen mitä kovuus- ja vetokokeet jo osoittivat materiaalin lujuusominaisuuksista. Materiaalia voidaan pitää riittävän yksiselitteisesti S235 rakenneteräkseenä.

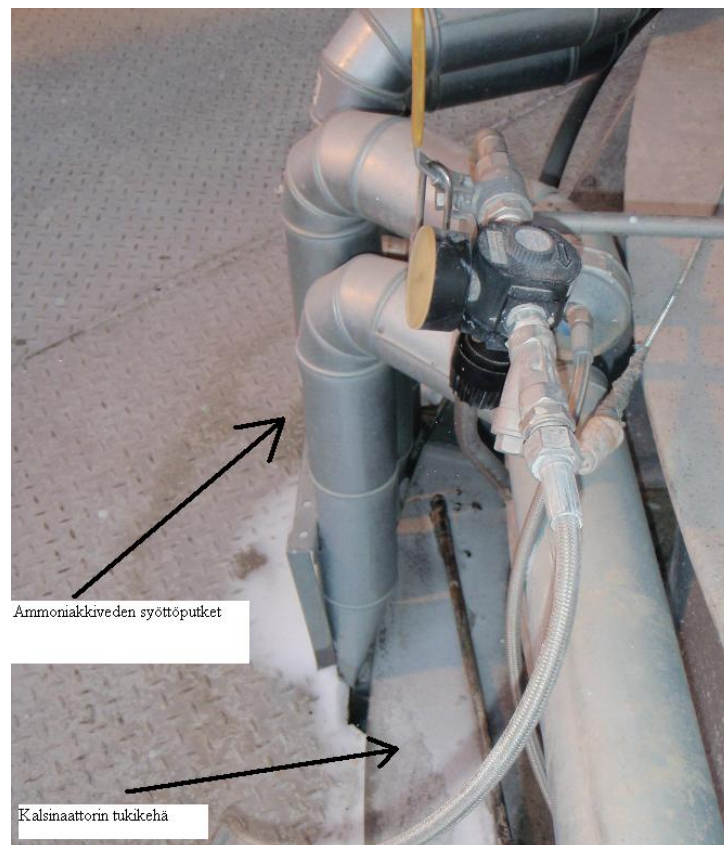


Kuva 3.5. Koepalan materiaalista otettu mikrokuva.

Seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen mikrorakenne on suurimmaksi osaksi ferriittiä, joka transitiolämpötila-alueella muuttua teräksen murtumiskäyttäytymisen sitkeästä hauraaksi. Kyseisillä teräksillä transitiolämpötila on tyypillisesti huoneenlämpötilan ja  $-100\text{ °C}$ :en välillä [26]. Materiaalin käyttäytyminen ei antanut merkkejä haurasmurtumavaarasta. Vetokokeen aikana materiaali käyttäytyi sitkeästi ja murtopinta on sitkeälle materiaalille ominainen. Lämpötilan nopea nousu murtoalueella viittaa suureen energiamäärään, joka vapautui suurelta osin lämpönä materiaalin pinnalta. Ilmiö viittaa materiaalin sitkeyteen.

#### 4 KALSINAATTORIN SIIRTUMIEN EMPIIRINEN TUTKIMINEN

Tiili- ja eristevuorauksen oheneminen aiheuttaa lämpötilan nousua kalsinaattorin teräs-kuoressa. Teräksen lämpölaajenemiskerroin on suurempi kuin tiilellä. Normaalisessa tilanteessa rakenteen tulisi palautua samaan tilavuuteen kuin ennen lämpökuormitusta. Näin ei tarkasteltavassa kohteessa ole tapahtunut. Rakenteen palautuminen on pysähtynyt eikä alkuperäiseen tilanteeseen ole päästy, vaikka lämpökuorman aiheuttamia laajenemisia on kompensoitu liikuntasaumoilla teräsosissa ja tiilivuorauksessa. Rakenne jatkaa kuitenkin laajentumistaan uuden lämpökuorman vaikutuksesta, mutta rakenteella ei ole enää paljoa varaa laajentua vapaasti. Kuvasta 4.1 näkee selvästi kalsinaattorin ja joutsenkaulan liikkuneen pois alkuperäisestä paikastaan lähes 150 mm:ä ja rikkoneen ammoniakkiveden syöttöputket. Rakenne on myös siirtynyt jo niin paljon, että se tukeutuu jo sellaisiin kohtiin syklonitornin rakenteissa, joihin rakenne ei saisi tukeutua.



Kuva 4.1. Kalsinaattori on siirtynyt ja puristanut ammoniakkiveden syöttöputket lähes poikki.

#### 4.1 Koejärjestelyt

Siirtymien tutkimisessa keskityttiin havainnoimaan, kuinka paljon kalsinaattori, joutsenkaula ja laskuputki palautuvat järjestelmän alasajon aikana. Alasajo suoritettiin vuosi- huoltoa varten. Koko uunijärjestelmän jäädyttäminen kestää kokonaisuudessaan kahdesta kolmeen päivään. Ensimmäisen vuorokauden aikana lämpötila saa kalsinaattorin sisäpuolella laskea noin  $30 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}}$ . Liian suurta jäähtymisnopeutta pyritään välttämään, koska liian nopea lämpötilan muutos rikkoo muuraukset ja tiilivuoraukset. [27]

Horisontaalisia siirtymiä tarkasteltiin asentamalla mitta-asteikot tasojen H4- H6 alueille siten, että siirtymää tutkittiin kalsinaattorin tukikehien kohdilta neljältä suunnalta. Vertikaalisia siirtymiä mitattiin kuoren tukirenkaiden väleistä laseretäisyysmittarilla. Liikuntapalkeiden vertikaalisiirtymät mitattiin länkiharpilla. Mitta-asteikkojen ja laseretäisyysmittarin lukematarkkuus oli yksi millimetri. Kaikki mittauspisteet näkyvät numeroituina liitteestä 3. Lähtötilanteen arvot mitattiin muutama päivää ennen alasajon alkua. Alasajon aikana tapahtuneiden siirtymien tulokset kerättiin viiden päivän kuluttua alasajon alkamisajankohdasta. Kalsinaattorin lämpötila oli tuolloin laskenut jo vallitsevan ulkolämpötilan  $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  mukaiseksi, joten rakenteen lämpökuormasta johtunut liike katsottiin pysähtyneen.

#### 4.2 Mitatut siirtymät ja tulokset

Mittauksissa ei havaittu suuria muutoksia alkuperäistilanteeseen verrattuna horisontaalisuunnissa, mikä on rakenteen kannalta epäedullista. Vertikaaliset siirtymät muuttuivat eniten liikuntapalkeissa, mutta teräskuoressa oli myös havaittavissa pientä palautumista jäähtymisen jälkeen. Suurilta osin rakenne ei palaudu alkuperäiseen tilaan, jolloin kalsinaattorin teräskuoreen syntyy jännitystiloja. Rakenne todennäköisesti jatkaa laajentumistaan uudelleen lämmityksessä. Rakenteen siirtymien muutokset tuotantolämpötilasta seisontalämpötilaan on nähtävissä taulukosta 4.1.



Taulukko 4.1. Kalsinaattorin, joutsenkaulan ja laskuputken mitatut siirtymän muutokset jäähtymisen jälkeen.

Mittaussuunta	Taso	Mittauspiste	Alkuperäinen mitta	$\Delta$ Siirtymä [mm]
Horisontaali	H4	1	0	0
Horisontaali	H4	2	0	0
Horisontaali	H4	3	0	0
Horisontaali	H4	4	0	0
Vertikaali	H4	20	1841	5
Vertikaali	H4	21	1836	4
Vertikaali	H4	22	1837	3
Vertikaali	H4	23	1836	2
Vertikaali	H4B	24	1426	0
Vertikaali	H4B	25	1427	0
Vertikaali	H4B	26	1434	1
Vertikaali	H4B	27	1433	1
Horisontaali	H5	5	0	0
Horisontaali	H5	6	0	1
Horisontaali	H5	7	0	1
Horisontaali	H5	8	0	0
Vertikaali	H5	28	1840	2
Vertikaali	H5	29	1845	4
Vertikaali	H5	30	1841	3
Vertikaali	H5	31	1855	3
Vertikaali	H5	40	3839	4
Vertikaali	H5	41	6343	2
Vertikaali	H5	42	9662	8
Vertikaali	H5B	32	439	6
Vertikaali	H5B	33	447	3
Vertikaali	H5B	34	465	6
Vertikaali	H5B	35	440	12
Vertikaali	H5B	36	434	2
Vertikaali	H5B	37	441	10
Vertikaali	H5B	38	478	8
Vertikaali	H5B	39	482	0
Horisontaali	H6	9	0	0
Horisontaali	H6	10	0	1
Horisontaali	H6	11	0	0
Horisontaali	H6	12	0	1
Horisontaali	H6	13	0	1
Horisontaali	H6	14	0	0
Horisontaali	H6	15	0	4
Horisontaali	H6	16	0	3

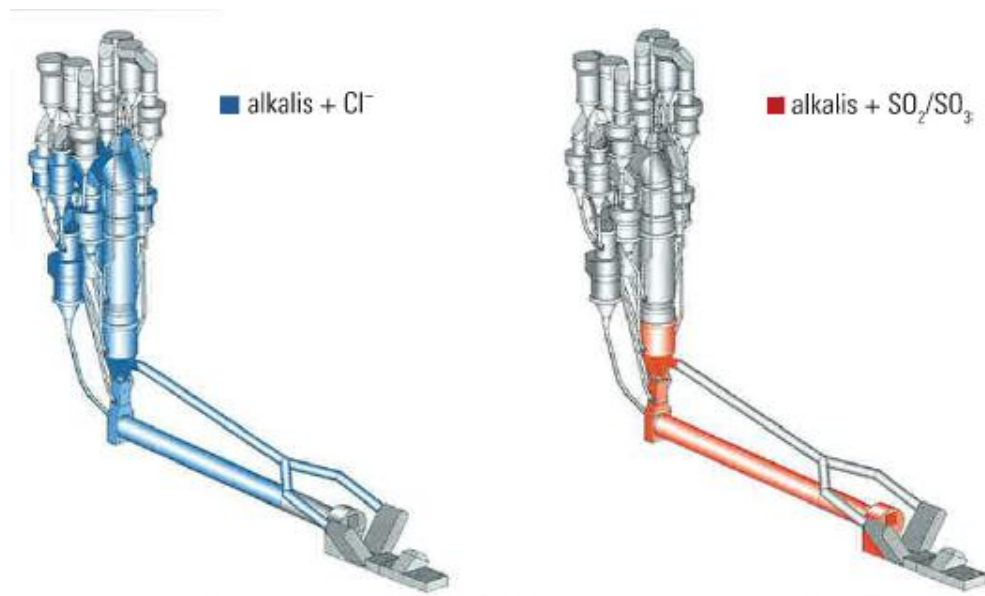
## 5 ANALYYTTINEN TARKASTELU

Vastaavan tyyppisiä sementtiuunijärjestelmiä ei ole maailmassa käytössä vielä montaa, minkä vuoksi tutkimuksia uunijärjestelmän rakenteellisista tutkimuksista ei ole tällä hetkellä saatavilla. Sen sijaan vuoraukseen käytettävistä tiilistä on tehty paljonkin tutkimustyötä, erityisesti niiden kulutuskestävyydestä. Tässä luvussa luodaan lyhyt katsaus uuni- vuorausmateriaalien tutkimuksiin. Sen jälkeen määritellään rakenteeseen vaikuttavat kuormitukset sekä määritetään analyyttiset mallit siirtymien ja jännityksien laskentaan.

### 5.1 Katsaus RefraTechnik:n tutkimukseen tiilestä

Koko uunijärjestelmän kestoikä perustuu kestäväan ja toimivaan vuoraukseen, jolla pyritään estämään alkalien pääsy teräskuoren kanssa kosketuksiin sekä estää lämmön johtuminen teräkseen. Tiililaadusta ja – materiaalista määräytyen alkalien imeytyminen aiheuttaa tiilissä jopa 30 % palautumattoman tilavuuden muutoksen. Lisäksi tiilien turpoaminen ei ole tasaista, vaan turpoaminen tapahtuu tiilen kuumalla puolella, jolloin tiilestä tulee lähes kiilamainen [28].

Alkaliin imeytymiseen vaikuttaa suuresti lämpötila, koska eri alkalien muodostumisalueet syntyvät eri lämpötiloissa. Klooria syntyy paljon alhaisemmassa lämpötilassa kuin rikkioksidit. Tästä johtuen klooria esiintyy sekä itse uuniputkessa että myös kalsinaattorin alaosissa. Rikkiyhdisteet vaativat suuremman lämpötilan muodostumiseen ja rikkioksideja esiintyy pääasiassa uuniputkessa sekä kalsinaattorin alaosissa. Kuvasta 5.1 voidaan nähdä periaatteellinen jaottelu eri alkalien esiintymiselle. Molempien alkalien vaikutukset ovat erittäin voimakkaita vuoraustiiliin. Yli 600 °C:n lämpötilassa molemmat alkaliyhdisteet ovat nestemäisessä muodossa, minkä seurauksena niiden läpäisykyky on huomattavasti voimakkaampaa. Tiilien korrosio kiihtyy ja niiden pinta alkaa hiljalleen murentua. Tästä seuraa, että tiilien vaurioituessa liiallisesti, alkalit pääsevät vuorauksen läpi aina teräskuoreen asti, missä ne aiheuttavat kuumakaasu- ja märkäkorrosiota sekä ruostumista, kun uuni on ajettu kylmäksi. Teräskuoreessa korrosio aiheuttaa materiaalin ohenemista, muurausankkureiden katkeilua ja pahimmassa tapauksessa teräskuoreen syntyy jopa reikiä. Esimerkiksi muurausankkureiden katkeilu aiheuttaa yleensä vuorauksen putoamisen suurelta alueelta, jolloin teräskuori ottaa suoraan vastaan koko termisen kuormituksen ilman tiilien ja eristeen lämpötilan johtumista vähentävää vaikutusta. [29]



Kuva 5.1. Haitallisten alkalien esiintyminen sementtiuunijärjestelmässä [29].

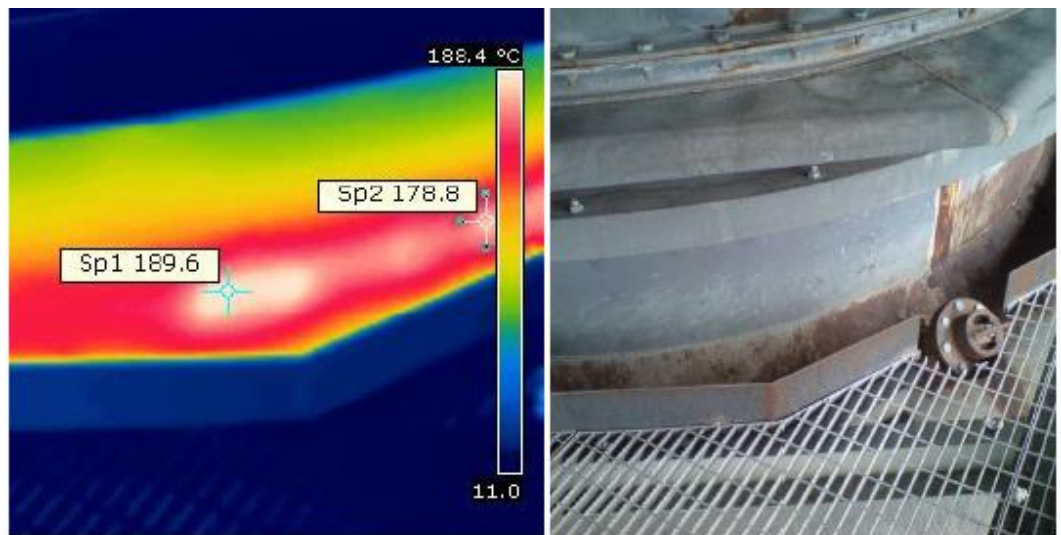
## 5.2 Rakennetta rasittavat kuormitukset

Lämpötilasta johtuva terminenkuormitus järjestelmän lämmityksen aikana voidaan olettaa staattiseksi kuormitukseksi. Lämpötilan muutokset ovat tuotannon aikana nopeita, mutta muutokset tapahtuvat pienellä lämpötila-alueella. Tästä johtuen väsyttävän kuormituksen vaikutus tulee kuitenkin myös tarkastella. Järjestelmän uudelleen lämmityksessä tuotantoa varten on usein pieniä käynnistysvaikeuksia, jolloin lämpötila saattaa nousta ja laskea hieman tavanomaista vaihtelua enemmän. Lämpötilan vaihteluita pyritään kuitenkin hallitsemaan polttoaineen syötöllä ja puhaltimien avulla, jotta lämpötilan muutokset eivät tapahtuisi liian nopeasti. Ongelmatilanteissa voi jäähtyminen olla hieman nopeampaa, mutta täydestä tuotannosta pysäytettynäkin koko uunijärjestelmän jäähtyminen kestää yli vuorokauden. Lämpötila kalsinaattorin, joutsenkaulan ja laskuputken sisällä on täyden tuotannon aikana noin 900 °C:ta. Eristeen ja tiilivuorauksen ollessa kunnossa teräskuoren lämpötila on noin 50 °C:ta. Lämpötila ja alkalit kuluttavat tiilenpintaa, jolloin eristekerroksen paksuus ohenee, joka näkyy teräskuorena kohonneena pintalämpötilana. Eristekerroksen vaurioituessa riittävästi pääsee lämpö johtumaan helpommin ja teräskuoreen muodostuu punahehkuinen alue (*Hot Spot*). Kuvasta 5.2 voidaan nähdä kalsinaattoriin ilmestyneen Hot Spot -alueen sekä sen, miten teräs on hiiltynyt ja kulunut pois sauman kohdasta. Tuolloin lämpölaajeneminen ei ole enää tasainen, vaan aiheuttaa toispuoleisen laajentumisen. Lämpökameralla otetuista kuvista on helppo havaita vuorausten ohenemisen, koska se näkyy suoraan pintalämpötilan nousuna. Lisäksi kuvista on helppo havaita

vaurioituneen alueen suuruus. Kuvassa 5.3 on lämpökameralla otettu kuva kalsinaattorin ja joutsenkaulan liitoskohdasta.



Kuva 5.2. Kalsinaattorissa oleva Hot Spot -alue, joka on jo vaurioittanut teräskuorta.



Kuva 5.3. Lämpökameralla otettu kuva kalsinaattorin ja joutsenkaulan liitoskohdasta.

Teräskuoren rakennetta kuormittaa lisäksi myös tiilivuoraus, jonka massaa on useita satoja tonneja koko rakenteen alueella. Joutsenkaulassa ja laskuputkessa on tiiliä, valuja ja eristettä yhteensä noin 126605 kg, kun materiaalit ovat uusia. Tarkasteltavassa kalsinaattorin osassa samoja materiaaleja on noin 153249 kg. Pelkästään vuorausten aiheuttama staattinen kuorma tarkasteltavalle osalle on yhteensä noin 2,75 MN, josta hieman yli puo-

let jakautuu kalsinaattorin pystysuoralle osuudelle. Vuorauksen rakenteeseen aiheuttama voima voidaan katsoa vaikuttavan tasaisesti koko rakenteen halkaisijan läpi suorilla osuuksilla. Kurveissa vuorauksen paksuus pysyy vakiona, jolloin ulkokurvissa on hieman enemmän vuorauksen aiheuttamaa massaa kuin sisäkurvissa.

Tiilissä tapahtuva tilavuudenmuutos aiheuttaa oman kuormituksensa tarkasteltavan rakenteen kuoreen. Tilavuudenmuutoksen aiheuttamat ongelmat ovat pahentuneet sen jälkeen, kun polttoaineena on alettu käyttää hiilen lisänä REF- polttoainetta. Suuret alkalipitoisuudet ovat pahentaneet tiilissä tapahtuvaa korroosiota ja eroosiota sekä lisäksi osa alkaleista imeytyy suoraan tiileen, jolloin tiilen tilavuus muuttuu suuremmaksi. Tiiliä kannattelevien hyllyjen väliin on suunniteltu jätettävän 20 mm:n lämpölaajenemisvara, joka on havaittu käyttövuosien aikana riittämättömiksi. Käytännössä teräskuori laajenee lämpötilan mukaan, mutta tiilet eivät palaudu samalla tavalla alkuperäiseen tilaan. Tuolloin käy joko niin, että teräskuori vetää väkisin tiilet kasaan ja mahdollisesti murtaa osan tiilistä tai tiilet kantaa lämpölaajenemisesta johtuvat palautumattomuudet teräskuoreessa, joka näkyy kuoreessa sekä aksiaalisenä että kehäsuuntaisena jännityksenä. Vapaassa laajentumisessa ei synny mitään jännityksiä, koska laajenemista ei estetä. Teräksen lämpölaajenemiskerroin muuttuu lämpötilan muutoksen myötä ja sen voidaan olettaa olevan vakio vain tietyillä lämpötila-alueilla.

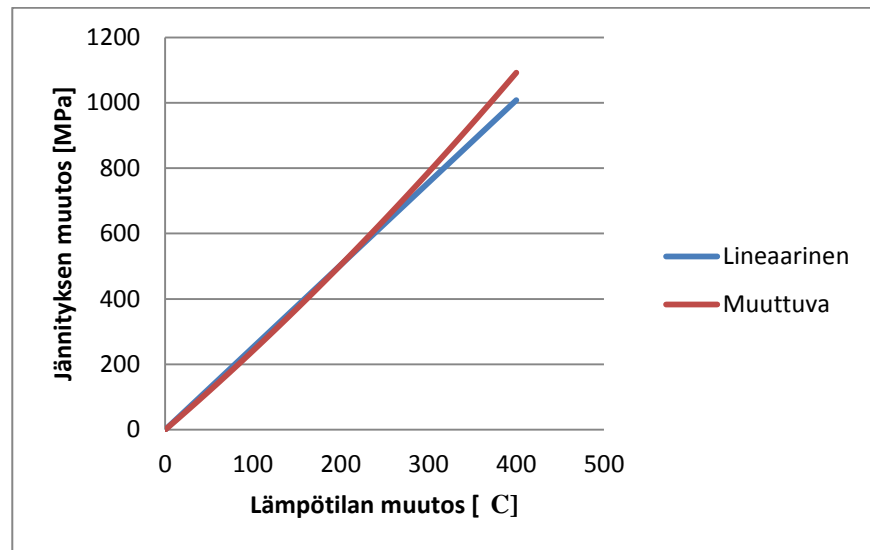
Vuoraukseen alkaa käytön aikana kerääntyä niin sanottuja kasvannaaisia, jotka ovat tiilien pintaan kiinnittyneitä ja kovettunutta raakajauhetta. Kasvannaisten sijoittuminen kalsinointijärjestelmässä vaihtelee hieman ja kasvannaisten syntymiseen vaikuttaa osaltaan alkalien runsas pitoisuus palokaasujen seassa. Vuonna 2011 helmikuun seisokissa otetussa näytteessä oli havaittavissa erittäin suuret kloridi- ja rikkipitoisuudet. Näytteen analysointi suoritettiin Lappeenrannan tehtaan omassa laboratoriossa. Tarkemmat tulokset analyysistä on nähtävissä liitteestä 4. Materiaalille määritettiin myös tiheys, jonka arvoksi saatiin noin  $980 \frac{kg}{m^3}$ . Kasvannaisten paksuudet vaihtelevat suuresti, eivätkä ne yleensä kasva tasaisesti koko seinämän alueella. Paksuus seinämällä voi kasvaa jopa metrin paksuiseksi. Tarttunut materiaali seinillä tarkoittaa lisäkuormitusta sekä tiilille että teräskuorelle. Materiaalin kertymisellä on myös myönteistä vaikutusta teräskuorelle, koska tarttunut materiaali vähentää lämmön johtumista teräskuoreen. Tuolloin lämmön aiheuttama vaikutus jää vähäisemmäksi. Haittavaikutuksena on kuitenkin jälleen epätasainen lämpölaajeneminen, koska rakenne ei ole samassa lämpötilassa joka paikasta. Tämä aiheuttaa toispuoleista laajentumista ja mahdollisesti suuria jännityskeskittymiä. Ennen helmikuun 2011 huoltoseisokkia joutsenkaulan alueelta mitatuissa pintalämpötiloissa oli yli 100 °C:n

ero teräskuoren samalla korkeudella, mutta eri puolella vaippaa. Syyksi tähän paljastui suuri kasvannainen, joka aiheutti paikallisen viileän alueen joutsenkaulan teräskuoressa, kun taas kuuma alue johtui tiilien paikallisesta ohenemisesta.

### 5.3 Kalsinaattorijärjestelmän siirtymien ja jännityksien tarkastelu

Koko tarkasteltava rakenne on määritelty ohutseinämäiseksi rakenteeksi, jolloin voidaan olettaa lämpötilan olevan teräksessä lähes vakio paksuus suunnassa. Siirtymien tarkastelussa huomiota kiinnitetään erityisesti rakenteen kannatuskohtiin, joissa todellisuudessa suurimmat siirtymät ovat syntyneet käytön aikana. Jännityksien tarkastelussa keskitytään määrittämään paikallisesti vaikuttavat jännityskeskittymät niissä kohteissa, joissa muodonmuutoksia ja murtumia on tapahtunut.

Määritetään teräskuoren jännityksen muutos lineaarisesti lämpötilan muutoksen mukaan kaavalla 2.1, missä oletetaan materiaalille ominaisen lämpölaajenemiskertoimen pysyvän vakiona  $12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  aina  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ :seen sekä siten, että lämpölaajenemiskerroin kasvaa  $11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  aina  $13 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  tasavälein lämpötilan noustessa  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  aina  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ :seen. Tuloksena saadaan seuraavanlaiset kuvaajat (kuva 5.4). Verrattaessa saatuja kuvaajia voidaan todeta jännityksen pysyvän molemmissa lähes samana aina  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ :seen. Lämpötilan noustessa yli  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ :een, alkaa lämpölaajenemiskertoimen muutos näkyä selvemmin. Kappaleen pituudella ei ole merkitystä syntyvän pituuden muutoksen aiheuttaman jännityksen suuruudessa. Tästä johtuen olisi erittäin tärkeää, että ympäristöönsä vaikuttava lämpö jakautuisi mahdollisimman tasaisesti, jotta välttyttäisiin paikallisilta jännityskeskittymiltä.

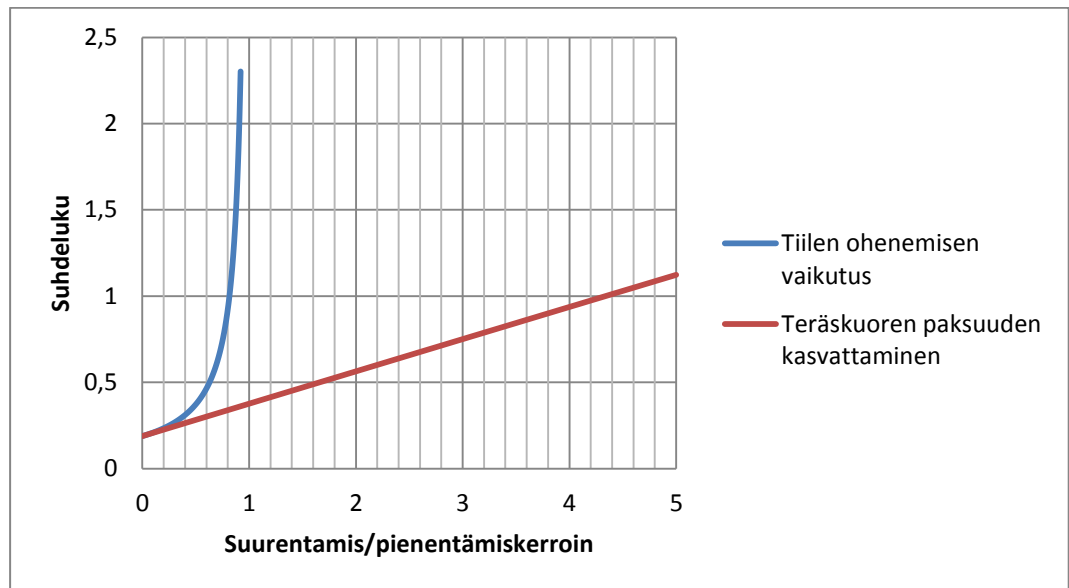


Kuva 5.4. Teräkseen syntyvän jännityksen suuruudet lämpötilan muutoksen suhteen lämpölaajenemiskertoimen pysyessä vakiona sekä siten, että lämpölaajenemiskerroin muuttuu lämpötilan mukaan.

Tarkastellaan seuraavaksi sekä tiilen että teräskuoren lämpölaajenemista yhdessä. RefraTechnik:n tekemässä tutkimuksessa havaittiin, että kalsinaattorissa olleet tiilet olivat paisuneet käytön aikana alkuperäisestä tilavuudestaan 30%:a ja suurin muutos oli tapahtunut tiilen kuumalla puolella. Tämä tarkoittaisi sitä, että tiilet turpoaisivat alkaliin vaikutuksesta. Oletetaan tilanne, jossa tiilet laajenevat lämpötilan ja alkaliin seurauksena teräskuoren kanssa samaan pituuteen, mutta lämpötilan laskiessa tiilet eivät supistu, vaan jäävät laajentuneeseen tilaan. Tarkastellaan tilannetta, jossa teräksen lämpötila muuttuu 200 °C:seen sekä niin, että puristus jakautuu tasaisesti koko poikkipinta-alalle. Tiilen puristuslujuus on noin 65 MPa ja teräksen myötölujuudeksi luvussa 3 määritettiin 235-250 MPa. Tarkastellaan tilannetta sekä tiilen että teräksen poikkipinta-alojen perusteella. Laskennassa käytetään seuraavia kaavoja (5.1) ja (5.2). Tuloksena saatiin seuraavanlaiset suhteet ohennettaessa tiilivuorausta tai kasvattamalla teräskuoren paksuutta, jotta keskinäiset voimasuhteet olisivat yhtä suuret (Kuva 5.5).

$$\sigma_y = N = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

$$A_{\text{sylinteri}} = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4} \quad (5.2)$$



Kuva 5.5. Tiilen ja teräskuoren aiheuttaman normaalivoimien suhteet ja kertoimet, joilla joko teräskuoren paksuutta pitää kasvattaa tai tiilivuorausta ohentaa, jotta kumotaan voimien vaikutukset keskenään.

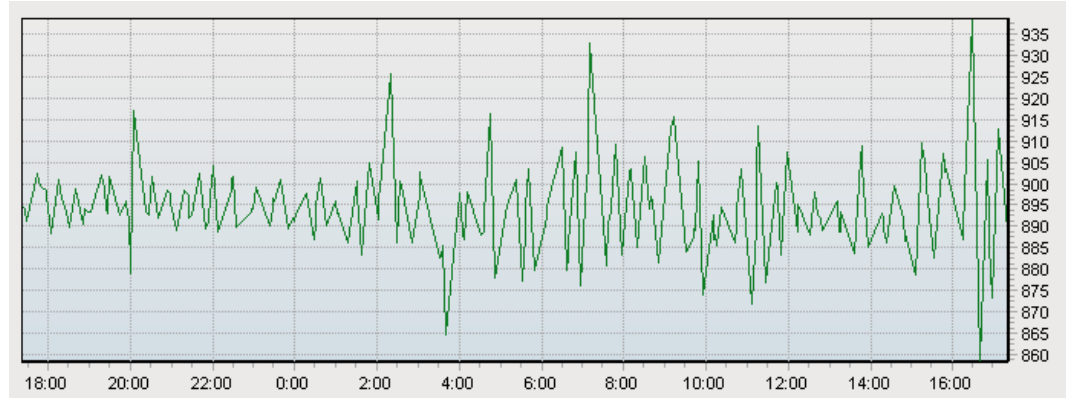
Kuvasta 5.5 nähdään selvästi, että teräksen ja tiilen aiheuttamat normaalivoimien suhde on 1/5 tiilen hyväksi tilanteessa, jossa sekä tiili että teräskuori ovat alkuperäisessä tilassa. Tämä tarkoittaa sitä, että tiilivuoraus jaksaa kantaa teräksen aiheuttaman normaalivoiman, jolloin teräskuoreen jää suoraan lämpötilan muutoksen suuruudesta määräytyvä normaali-jännitystila. Tiilivuorausta pitäisi ohentaa yli 80 %:a, jotta teräskuoren aiheuttama normaalivoima voittaisi tiilen normaalivoiman. Teräskuoren paksuutta pitäisi vastaavasti kasvattaa lähes 4,2 kertaa, jotta tiilien aiheuttama lämpölaajenemista vastustava voima saataisiin kumottua.

### 5.3.1 Lämpötilan muutoksen vaikutus

Lämpötilan muutokseen teräskuoren pinnalla vaikuttaa oleellisesti sekä eristeen että tiilen paksuudet. Lisäksi seinämiin kerääntyvällä raaka-ainemateriaalilla on vaikutuksensa teräskuoreen johtuvan lämmön määrässä. Määritetään laskemalla eri variaatiot tilanteista ja tarkastellaan niiden vaikutusta teräskuoren pintalämpötilaan. Kalsinaattorin sisälämpötilan tulisi olla lähellä 890 °C:ta, mutta tarkastelemalla kalsinaattorin ja joutsenkaulan liitoskohdan lämpötilan trendiä yhden tuotantovuorokauden ajalta (Kuva 5.6), voidaan havaita, että lämpötilassa on paljon hetkellistä laskua ja nousua. Tästä voidaan tehdä oletamus, että sisälämpötila pysyttelee keskimäärin noin 900 °C:ssa. Lämpötilansäätö suoritetaan kalsinaattoriin syötettävän hiilen avulla, mutta reagointinopeus lämpötilan muutok-



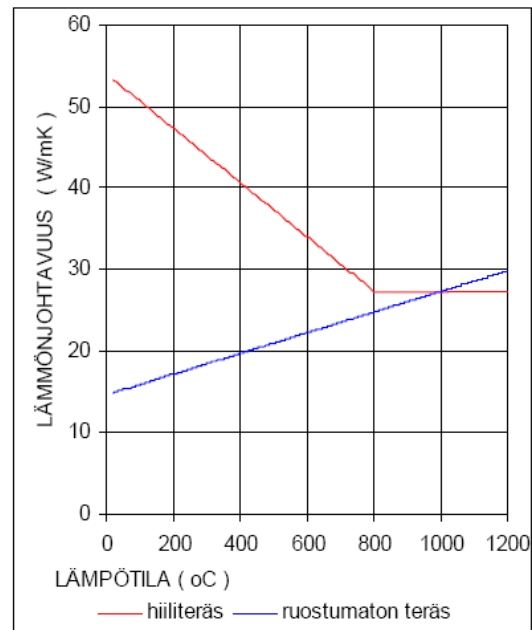
seen ei ole kovin hyvä. Suuret lämpötilan muutokset johtuvat pääosin REF- polttoaineen syötöstä, koska REF- lämpöarvo vaihtelee suuresti eikä REF:n syöttö pysy aina tasaisena.



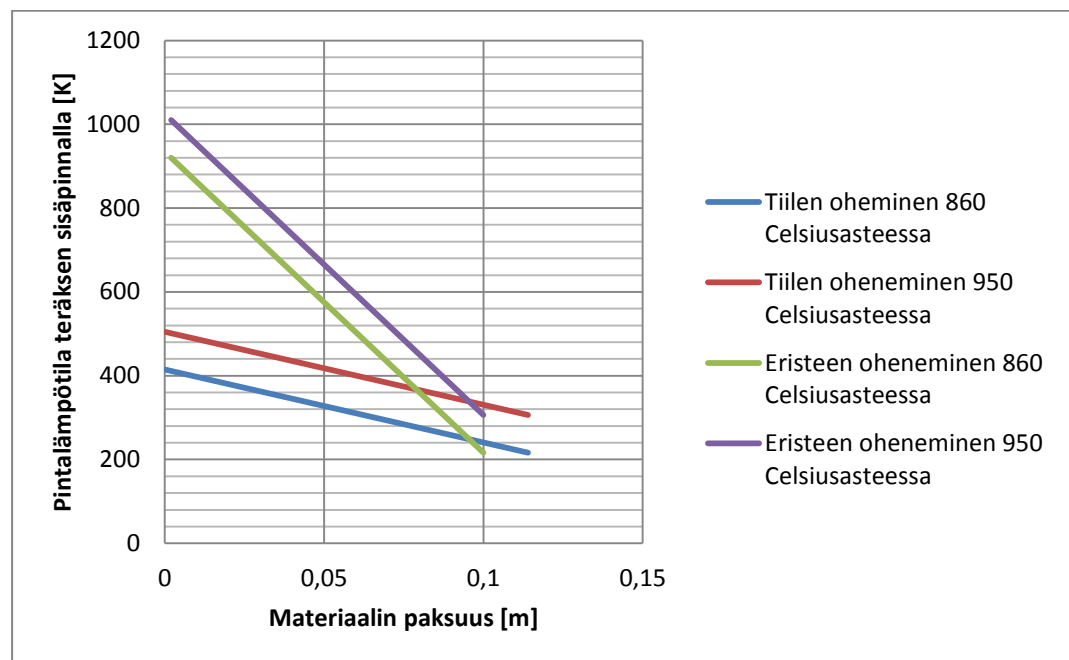
Kuva 5.6 Yhden tuotantovuorokauden aikana tapahtuneet lämpötilan muutokset kalasinaattorin ja joutsenkaulan liitoskohdassa.

Jatkuvat suuret ja pitkäaikaiset muutokset lämpötilassa rasittavat myös osaltaan rakennetta, mutta kuvassa näkyvällä tarkasteluvälillä lämpötilan muutokset ovat hyvin lyhytaikaisia. On siis tärkeätä tarkastella sisäpuoleisen lämpötilan vaikutus teräksen pintalämpötilaan tiilivuorauksen ja eristeen ohenemisen vaikutuksesta. Jos muutokset teräksen pintalämpötilassa ovat suuret, on syytä tarkastella myös väsymismurtuman mahdollisuus.

Tarkastellaan teräskuoren lämpötilan muutosta siten, että ohennetaan tiilivuorauksen paksuutta sekä eristekerroksen paksuutta. Ohennetaan vuorausta yhden millimetrin välein. Tarkastellaan tilanteita kahdella eri sisälämpötilalla. Uunin automaatiojärjestelmästä otetusta trendistä (Kuva 5.6) valitaan tarkasteltavat minimi- ja maksimilämpötilat, koska ne vastaavat todellisia tuotantolämpötiloja. Lisäksi valitaan yhdeksi tarkasteltavaksi lämpötilaksi 890 °C:ta, koska se vastaa optimaalista tilannetta. Hiiliteräksen lämmönjohtavuus laskee lämpötilan noustessa, mikä voidaan todeta kuvasta 5.7 [30]. Lämmönjohtavuudeksi 850 °C:ssa tiilelle  $1,45 \frac{W}{mK}$  ja eristeelle  $0,4 \frac{W}{mK}$  saadaan valmistajalta saatujen tietojen perusteella [31]. Lasketaan eri variaatiot käyttäen kaavoja (2.2- 2.9). Seinämän läpi menevän lämpövirran laskennassa käytetään annettuja ohjearvoja eli sisälämpötilan ollessa 890 °C:ta, teräksen pintalämpötilan saa olla maksimissaan 50 °C:ta. Laskennassa ei oteta huomioon ulkolämpötilan eikä tuulen vaikutusta. Lisäksi teräskuori on ohut, jolloin voidaan olettaa lämpötilan johtuvan teräskuoren paksuuden yli vakiona. Laskennan tuloksena saatiin seuraavanlaiset kuvaajat (kuva 5.8).



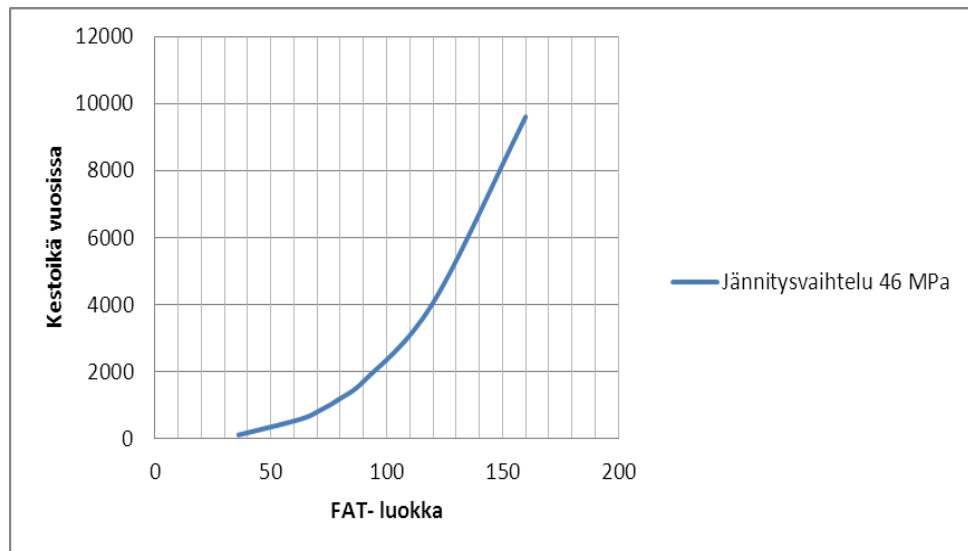
Kuva 5.7. Lämmönjohtavuuden muutos hiiliteräksessä lämpötilan mukaan [30].



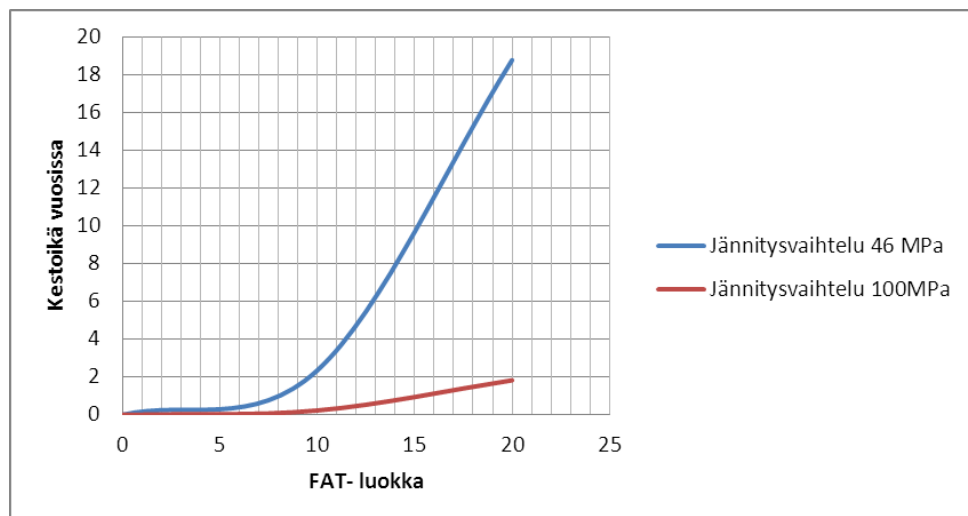
Kuva 5.8. Vuorausmateriaalien ohenemisen vaikutus teräksen pintalämpötilaan.

Kuvaajien (kuva 5.8) perusteella voidaan todeta, että lämpötila muuttuu lineaarisesti vuorauksen ohetessa, milloin sisäpuolella tapahtuva lämpötilan muutos esiintyy yhtä suurena muutoksena teräksen pinnalla. Havaittavaa on myös se, että eristeellä on suurempi vaikutus lämmön siirtymisessä vuorauksen läpi.

Väsyttävän kuormituksen tarkastelussa käytetään kalsinaattorin ja joutsenkaulan liitoskohdan lämpötilan muutoksia (kuva 5.5) laskettaessa kuormitusta tapauksessa, missä teräskuoren lämpölaajeneminen on estetty. Laskennassa käytetään kaavoja (2.18- 19) Tuolloin jännitystila on lineaarisesti riippuvainen lämpötilan muutoksesta. Määritetään lämpötilan muutoksien avulla rakenteeseen vaikuttava aksiaalisen jännityksen muutos. Tarkasteluajan jakso on kuvan 5.5 mukaisesti yksi vuorokausi. Rainflow- analyysin perusteella jännityksen keskiarvoksi saadaan noin 46 MPa. Määritetään seuraavaksi väsymiskestävyys eri FAT -arvoilla. Kuvaajista (kuva 5.9, 5.10) voi nähdä FAT -luokan vaikutuksen väsymiskestävyteen.



Kuva 5.9. FAT- luokan vaikutus kestoikään 46 MPa jännitysvaihtelulla.



Kuva 5.10. FAT- luokan vaikutus kestoikään 46 MPa ja 100 MPa jännitysvaihteluilla.

Kuvaajista (Kuvat 5.9 ja 5.10) voidaan todeta väsymismurtuman mahdollisuuden olevan häviävän pieni. Järjestelmä on ollut käytössä vuodesta 2007 ja ensimmäiset murtumat havaittiin vuonna 2009. Tämän perusteella rakenteessa pitäisi olla todella isoja rakenteellisia virheitä, jotta rakenne voitaisiin luokitella alle FAT 15. Lisäksi murtumat ovat tapahtuneet lähes poikkeuksetta joko kalsinaattorin kuoren ja tukirenkaiden hitsausliitosten läheisyydestä tai suoraan hitsiä pitkin. Jännitysvaihtelu pysyy normaalin tuotantokäynnin aikana melko matalana, vaikka lämpötilan vaihtelut voivat olla suuria. Suuria lämmönvaihteluita ei kuitenkaan ole niin paljon, että se nostaisi jännitysvaihtelun suuremmaksi. Kuvasta 5.10 voi nähdä, miten jännitysvaihtelun kasvu 100 MPa:iin aiheuttaa kestoajan laskun. Jotta 100 MPa jännitysvaihteluun päästäisiin, pitäisi lämpötilan vaihtelun keskiarvo olla jatkuvasti 40 °C:ta eli yli puolet suurempi kuin tarkasteltavasta kuvassa 5.5 laskettu lämpötilan vaihtelun keskiarvo 17,9 °C:ta.

#### 5.4 Kalsinaattorin kuoren murtokuormituksen määrittäminen

Rakennemateriaalit ovat lähes poikkeuksetta aina säröllisiä ja aiheuttavat täten murtumiskuormituksen alenemista. Tarkastellaan analyttisesti kalsinaattorin kuoren murtumiseen tarvittavaan minimikuormaa lämpötilan muutoksen vaikutuksesta. Lisäksi tarkastellaan lämpötilamuutoksen aiheuttamaa vaikutusta puhkeamiskuormitukseen sekä kriittiseen särökoon vaikutukseen. Kalsinaattorin kuoren murtumissuunta ja -kohta on nähtävissä kuvasta 5.11. Murtumissuunnasta päätellen kuoressa vaikuttava suurin pääjännitys olisi aksiaalisuunnassa. Lisäksi murtumiskohta on hitsausliitoksen sauman ja perusaineen välisellä osuudella.



Kuva 5.11. Kalsinaattorin kuoreen syntynyt kehäsuuntainen murtuma.

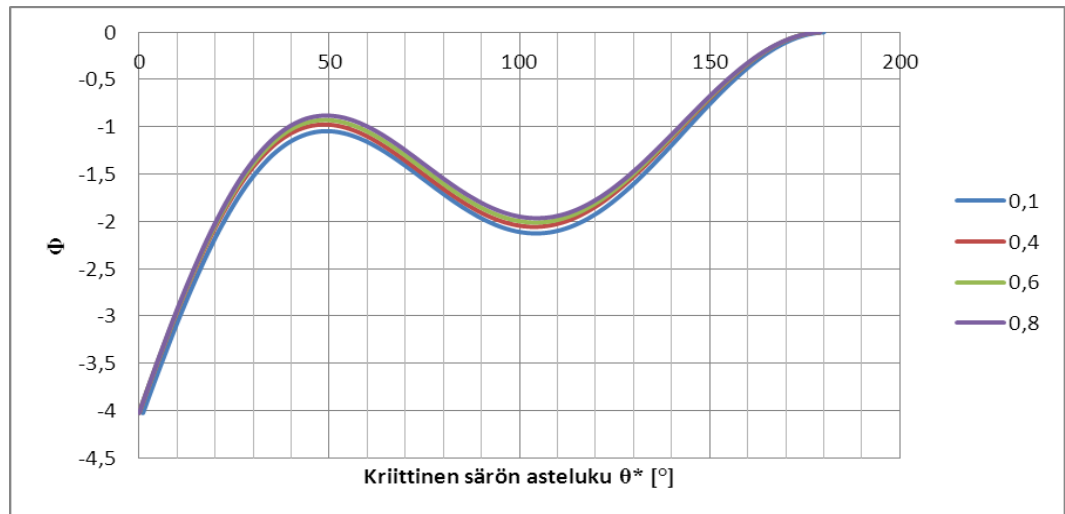
Laskennassa oletetaan materiaalikokeiden sekä kirjallisuudesta saatavien tietojen perusteella materiaaliominaisuudet tilanteeseen sopiviksi, jolloin tarkasteltavalle materiaalille oletetaan myötölujuudeksi 240 MPa. Täysin absoluuttisia tuloksia ei saada, mutta suuntaa antavia sekä tiettyjä raja-arvoja. Tarkastellaan materiaalin pinnassa olevan alkusärön vaikutusta sekä puhkeamis- että murtumiskuormitukseen eri lämpötiloissa. Puhkeamiskuormituksen tapauksessa tarkastellaan erityisesti kriittisen särökoon suuruutta sekä miten lämpötilan muutos vaikuttaa kriittiseen särökokoon.

Ensimmäinen stabiilius-kriteeri saadaan olettamalla jännitystila puhkeamishetkellä kaavan (2.34) mukaiseksi. Lisäksi olettamalla, ettei jännitystilaa voi ylittää puristuspuolella tehollista myötölujuutta ( $k_1 < 1$ ). Tuolloin puhkeamisjännitys on tiettyä  $\theta^*$  pienemmällä säröllä kaavan (2.34) mukainen. Raja-arvo  $\theta^*$  voidaan määrittää kaavasta (2.34) merkitsemällä  $1 + k_1 = 2$ , jolloin yhtälöstä (2.34) saadaan kaava (2.35). Yhtälöstä (2.35) ratkaisemalla nollakohdat, saadaan tarkasteltavalle tapaukselle määritettyä  $\theta^*$ . [32]

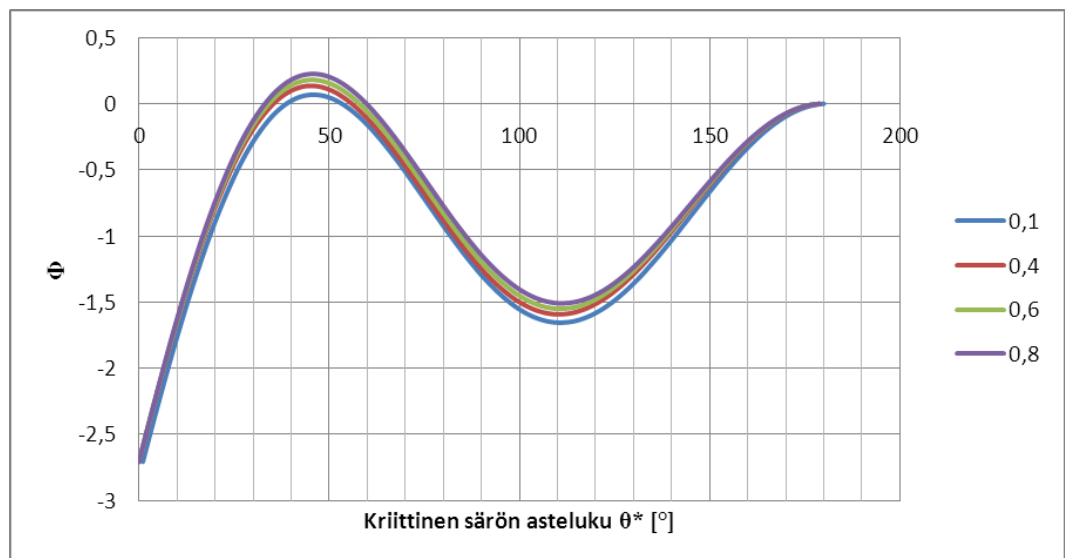
Kaikissa kaavoissa termissä  $\sigma_t$  otetaan huomioon tiilien aiheuttaman massan voimakomponentti sekä lämpötilan muutoksen aiheuttama maksimijännitystila eli toisin sanottuna lämpölaajeneminen on täysin estetty. Tilanne toimii myös niin päin, että lämpölaajenemisen jälkeen estetään palautuminen, joka kuvastaa todennäköisemmin kalsinaattorissa syntyvää tilaa. Varioidaan lämpötilaa alueella  $\Delta T = 30 \dots 150$  °C:ta. Tiilien aiheuttamaksi voimaksi määritettiin 1000 kN ja tähän on määritetty lähes puolet ylimääräistä, jotta tiilien aiheuttama vaikutus ei jää laskennassa liian pieneksi.

$$\Phi = 2[(\pi - \theta^*) \cos \theta^* \sin \theta^*] - [\pi(1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_y}) - \frac{a}{t}\theta^*](1 + \cos \theta^*) = 0 \quad (2.35)$$

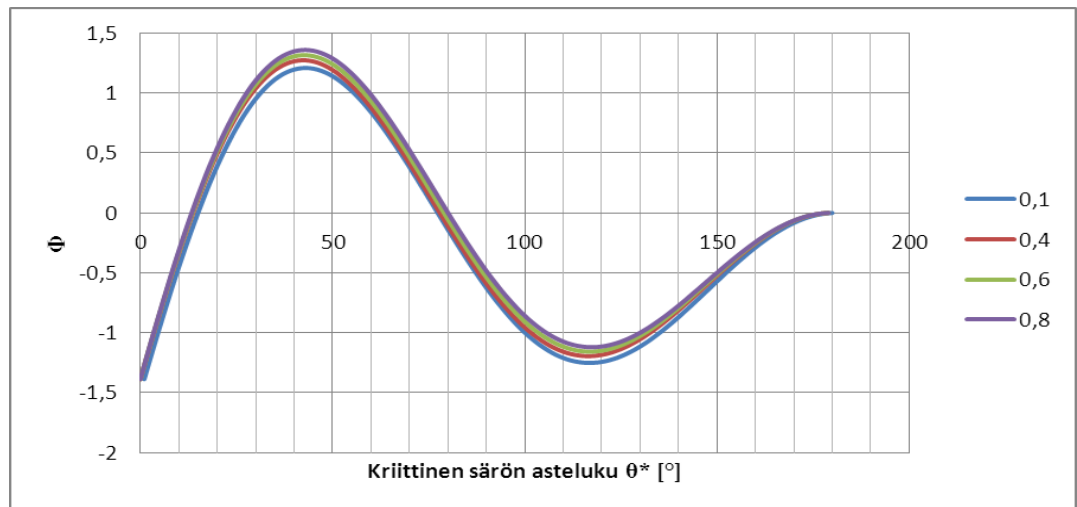
Laskennassa ja jälkikäsittelyssä käytettiin Excel- ohjelmaa ja tuloksina saatiin kriittiset särökoot, joista saatiin seuraavanlaiset kuvaajat (kuvat 5.12- 17) eri lämpötilavariaatiolle, missä pystyakselilla on funktion arvo ja vaaka-akselilla kriittisen särökoon leveys asteina.



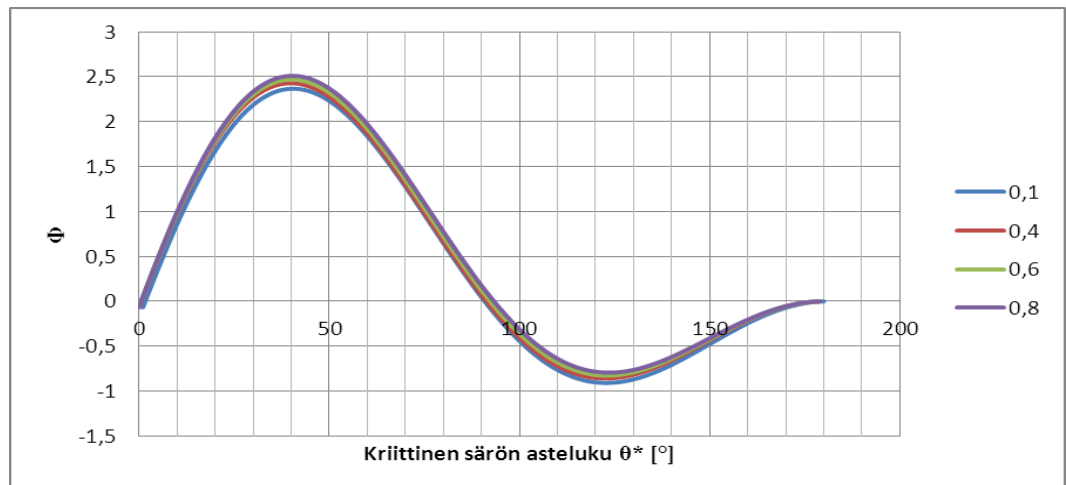
Kuva 5.12. Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa 30 °C.



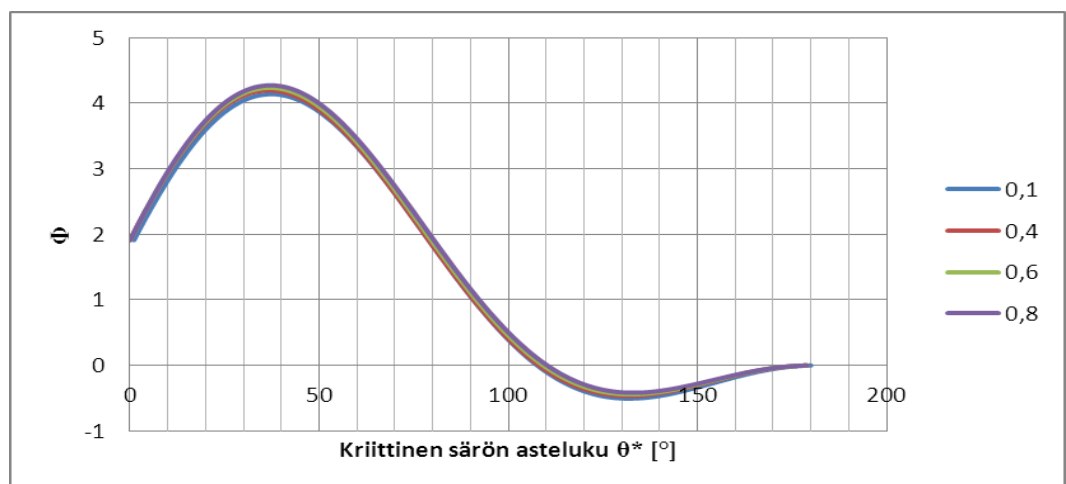
Kuva 5.13. Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa 50 °C.



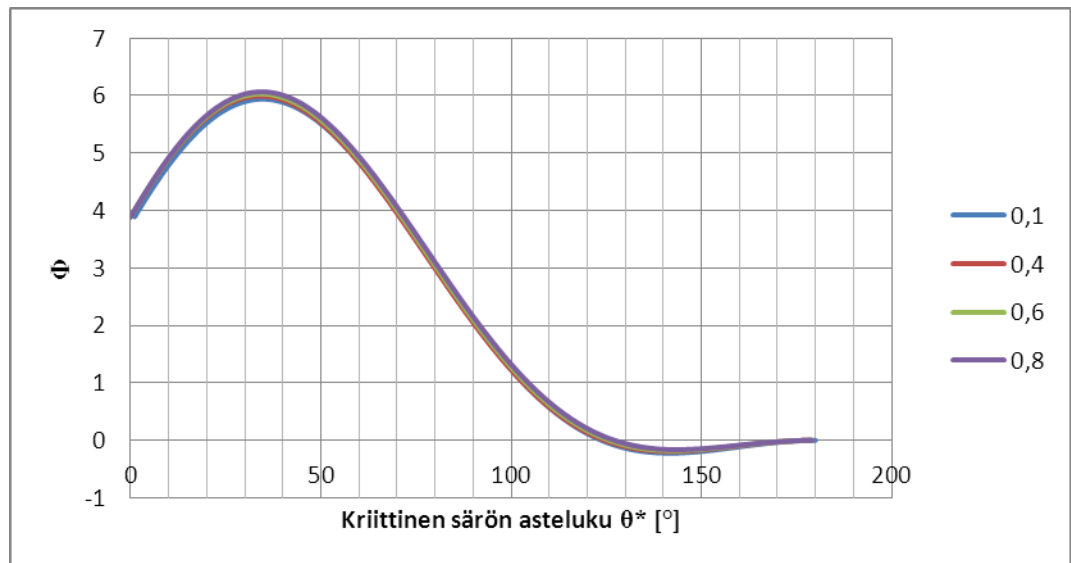
Kuva 5.14. Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa 70 °C.



Kuva 5.15. Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa 90 °C.



Kuva 5.16. Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa 120 °C.

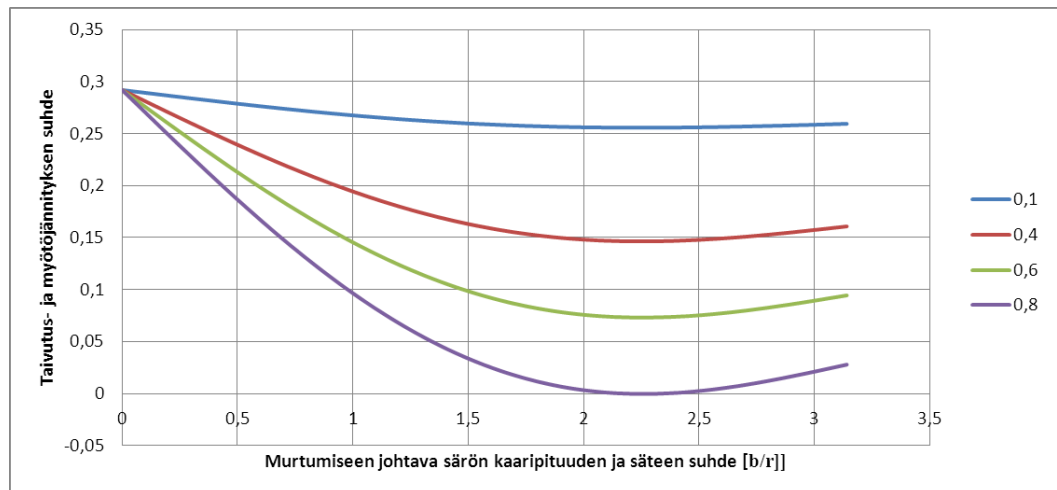


Kuva 5.17. Kriittinen särökoko lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa 150 °C.

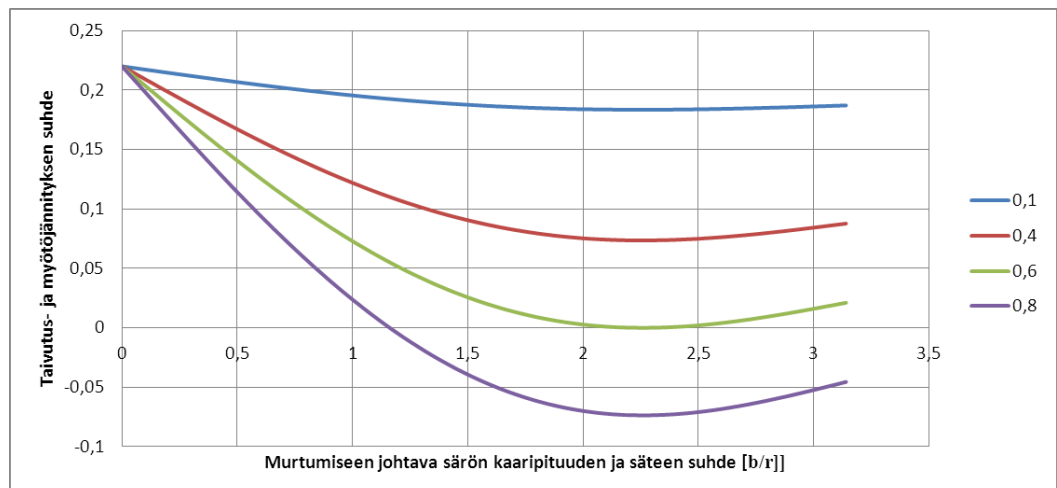
Laskennassa saatujen kuvaajien perusteella voidaan todeta lämpötilan muutoksen suuruudella olevan suora yhteys kriittisen särökoon pienenemiselle. Tarkasteltavassa tapauksessa kuvaajien perusteella alkusärön syvyydellä ei ole suurta merkitystä, vaan käyrät seuraavat toisiaan lähes päällekkäin. Lämpötilan muutoksessa kriittinen kohta löytyy 90 °C kohdalla, jossa särö saa olla vain muutamia asteita leveä, että rakenne kyseisellä jännitystasolla kestää puhkeamisen.  $\Delta T$  lähestyessä 90 °C ollaan lähellä materiaalille määriteltyä myötörajaa ja yli  $\Delta T$  90 °C säröllä ei saa laskennan mukaan olla yhtään leveyttä. Tämä kertoo sen, että puhkeamisjännityksen kannalta kriittinen kohta lämpötilan kannalta löytyy  $\Delta T$  90 °C. Lämpötilavaihtelun  $\Delta T$  ollessa alle 30 °C, särön leveydellä tai syvyydellä ei ole merkitystä ja rakenne kestää lämpötilan muutoksesta aiheutuvan jännityksen puhkeamatta. Havaittavaa oli myös se, ettei tiilien aiheuttama jännitys nouse kovinkaan merkittäväksi verrattuna lämpötilan aiheuttamaan jännitykseen. Tämä johtuu siitä, että kalsinaattorin poikkipinta-ala on kohtalaisen suuri ja syntyvä paino jakautuu tasaisesti ja aksiaalisesti koko kuoreen. Tiilien aiheuttama massa tarkasteltavassa kohteessa arvioitiin olevan noin 100 000 kg, jolloin tiilen aiheuttamaksi jännitykseksi saatiin noin 5,1 MPa.

Murtumishetken jännitystila voidaan määrittää kaavalla (2.33) siten, että parametrit  $k_1 = k_2 = 1$  [32]. Määritetään laskennallisesti tilanne, jossa tarkastellaan särön syvyyden vaikutusta murtumiskuormitukseen, millaisen särön leveyden kuormitus vaatii ja minkä suuruisella lämpötilan vaihtelulla murtuminen todennäköisesti tapahtuu. Materiaaliominaisuudet oletetaan samoiksi kuin puhkeamiskuormituksen laskennassa. Tuloksena saatiin seuraavanlaisia kuvaajia eri lämpötilan vaihteluille.

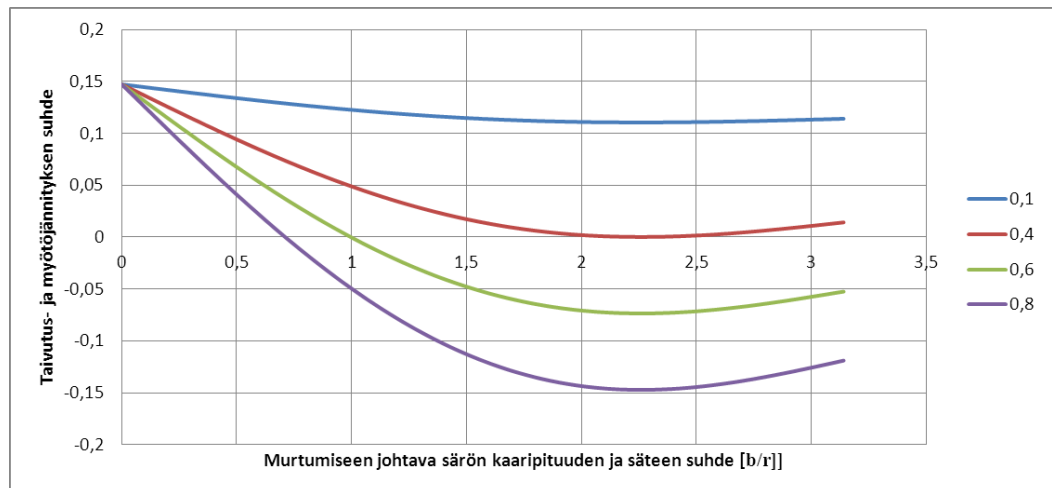




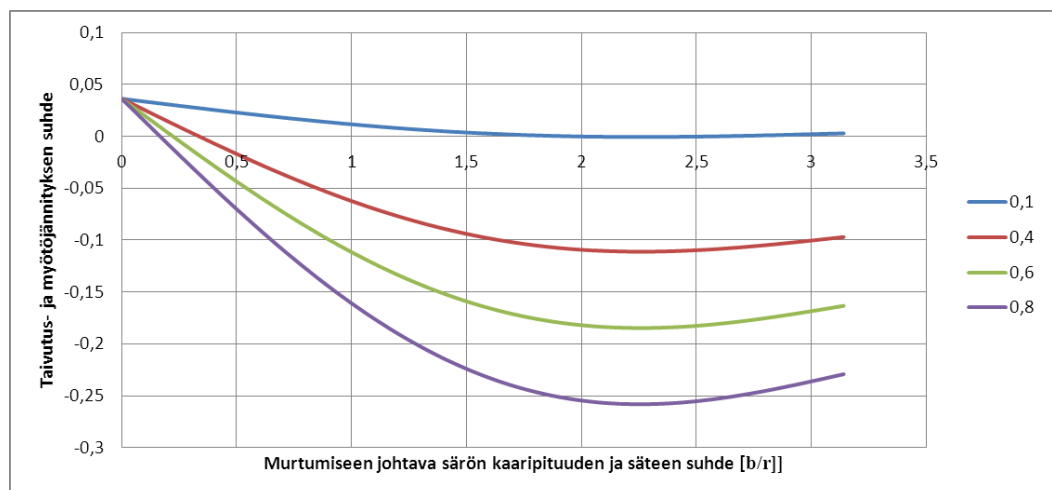
Kuva 5.18. Murtumiskuormituksen ja särön syvyyden vaikutus murtumiseen johtavan särön leveyteen lämpötilan vaihtelun  $\Delta T$  ollessa 77 °C.



Kuva 5.19. Murtumiskuormituksen ja särön syvyyden vaikutus murtumiseen johtavan särön leveyteen lämpötilan vaihtelun  $\Delta T$  ollessa 80,5 °C.



Kuva 5.20. Murtumiskuormituksen ja särönsyvyyden vaikutus murtumiseen johtavan särön leveyteen lämpötilan vaihtelun  $\Delta T$  ollessa 84 °C.



Kuva 5.21. Murtumiskuormituksen ja särönsyvyyden vaikutus murtumiseen johtavan särön leveyteen lämpötilan vaihtelun  $\Delta T$  ollessa 89,3 °C.

Särön syvyyden ja leveyden yhteys murtumiseen on nähtävissä selkeästi kuvista (5.18-21) ja kriittinen lämpötilanvaihtelu materiaalissa löytyy läheltä 90 °C:en. Särön syvyyden vaikutus alkaa näkyä  $\Delta T$ :n ollessa lähellä 77 °C:ta, jossa särön syvyyden ja materiaalivahvuuden suhde on 0,8. Suhteen ollessa 0,1 materiaali murtuisin vasta  $\Delta T$ :n ollessa yli 89,3 °C:ta ja tuolloin murtuma tapahtuisi särön leveyden saavuttaessa noin 120- 125 °. Havaittavaa on myös, että kaikilla leveys-syvyys suhteilla kriittinen särön leveys on lähes sama tilanteessa, jossa taivutus- ja myötöjännityksen suhde on nolla. Koska tiilien aiheuttama kuorma ei muutu, niin myös murtumiskuormituksessa lämpötilan aiheuttama kuormitus on merkittävämpi.

### 5.5 Kemiallisen korroosion vaikutus kuoren murtumiseen

Rakenteessa on havaittu kemiallista korroosiota, mutta korroosio kohteet ovat paikallisia. Savukaasujen mukana liikkuvat korroosiota aiheuttavat aineet, kuten rikki ja kloori, ovat pääasialliset korroosion aiheuttajat. Kuvasta (5.22) näkee selkeästi korroosion aiheuttamaa materiaalin ohenemista ja miten korroosiota aiheuttavat alkalit ovat päässeet tiilivuorauksesta läpi ja edenneet aina teräskuoren ja eristekerroksen väliin. Kuva (5.22) on otettu vuonna 2010 kalsinaattorin ylemmänpuoliskon alueelta läheltä kuvassa (5.11) näkyvää murtumaa. Teräksen pinnassa on havaittavissa merkkejä kaliumin ja kloorin yhdisteistä. Molemmilla aineilla on niukkaahiilisessä teräksessä voimakas korroosiovaikutus oikeanlaisessa lämpötilassa. Teräskuoren pintalämpötilat vaihtelevat alueittain suuresti, jolloin näiden alkuaineiden päästyä eristeen ja teräskuoren väliin, on suuri todennäköisyys korroosiota aiheuttavien happojen muodostumiselle. Kalsinaattorin sisäpuolelta otetussa näytteessä (liite 4) saatiin viitteitä kalsinaattorin sisäpuolelle kerääntyvästä kloorista sekä rikistä ja jonkin verran myös viitteitä kaliumista.



Kuva 5.22. Kalsinaattorin sisäpuolelta otettu kuva, jossa näkyy teräskuoren korroosiovaurioinen pinta tiilien ja eristeen poiston jälkeen.

Rikkiyhdisteiden muodostumiselle ja niistä edelleen rikkihapoksi muuttumiselle on järjestelmässä edellytykset. Pääasiassa Kalsinaattorin teräskuoren lämpötila vaihtelee tilanteessa vallitsevasta ulkolämpötilasta aina käyttölämpötilaan 50 °C:ta. Tiilien ja eristeen vaurioitumisesta lämpötilat saattavat olla huomattavasti suurempia. Järjestelmässä esiintyvän rikkihapon pitoisuutta ei ole voitu analysoida, mutta jonkin suuruista korroosiota teräskuoressa tapahtuu. Vetokokeeseen valitussa materiaalissa ei ollut havaittavissa suurta

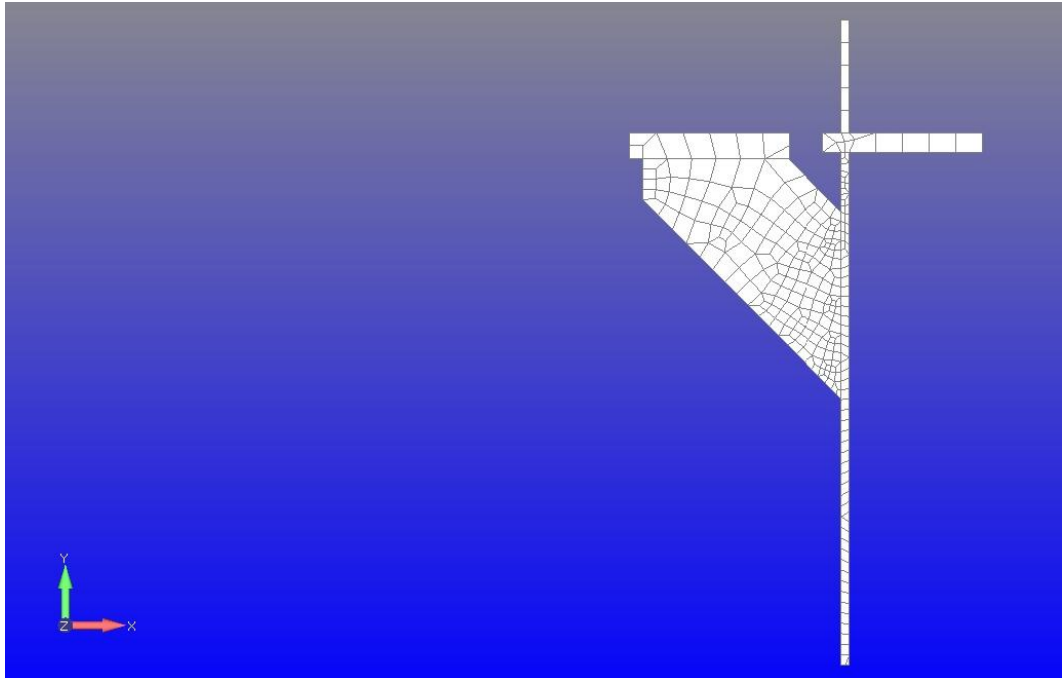
korroosiota, mutta siellä missä kalsinaattorin kuoressa on tapahtunut murtumia, on suuri todennäköisyys sille, että korroosionopeus on voinut olla jopa 2 mm vuodessa.

Mahdollisia reittejä korroosiota aiheuttavien aineiden kulkeutumiselle teräkuoreen asti ovat tiilivuorausten ja teräskannakkeiden saumakohdat sekä muurausten tai tiilien irtoaminen. Esilämmitysjärjestelmän sisäpuoleista tiilivuorausta on lähes mahdotonta saada nykyisillä menetelmillä saumattomaksi. Arkoja kohtia ovat tiilien teräskannakkeiden kohdat, joissa tiilen ja teräshyllyn väliin jäävä sauma on erityisen otollinen kohta alkalien imeytymiselle. Myös tiilien huono kunto ja alkalien imeytyminen suoraan tiiliin, heikentävät alkalien imeytymisen estoa.

## 6 FEM- MALLINNUS

Tässä luvussa tarkastellaan kalsinointijärjestelmässä esiintyneiden murtumien alueita mallintamalla tilanteet tietokoneen ja sopivan ohjelmiston avulla. Ohjelmistona käytettiin FEMAP 10.1 – ohjelmistoa sekä Nx-Nastran ratkaisijaa. Tulosten jälkikäsitelyssä on käytetty sekä Microsoftin Excel- ohjelmaa että FEMAP:n omaa jälkikäsitelyä.

Tiilihyllylle luotiin materiaalimalli (Kuva6.1), jossa materiaalille määritettiin Ramberg-Osgood mukainen jännitys- venymä käyrä. Materiaalille on käytetty samoja materiaaliominaisuuksia, joita on käytetty numeerisessa laskennassa luvussa 5. Tukirenkaalle luotiin lineaarinen malli. Tarkasteltavan kohteen mukaan tarkastelulämpötila valitaan siinä käytännössä ilmeneväksi lämpötilaksi. Tarkastelussa kiinnitetään erityisesti huomioita koko tarkasteltavan järjestelmän siirtymien tutkimiseen sekä paikallisten jännityshuippujen löytämiseen. Mallien elementtien valinnassa käytettiin tilanteeseen parhaiten soveltuvat. Tiilihyllyn mallinnuksessa käytettiin lineaarisia levy elementtejä ja tukirenkaan mallissa lineaarisia axissymmetrisiä elementtejä.



Kuva 6.1. Tiilihyllylle luotu levyelementtimalli verkotettuna.

## 6.1 Siirtymät

Tarkastelussa haluttiin tietää koko rakenteen siirtymä siten, että rakenteen liikettä ei estettä kuin kahdesta pisteestä. Tällöin nähdään, mihin suuntaan rakenne laajenee lämpötilan noustessa. Jäykät tuennat asetettiin mallissa sekä kalsinaattorin että laskuputken alimpaan solmuun. Todellisuudessa kalsinaattorin tuenta on toteutettu siten, että rakenteen tuentakohdista liike on rajoitettu vain alaspäin, muut liikesuunnat ovat vapaat. Tarkasteltavassa kohteessa ainoa täysin jäykkä tuenta on laskuputken alapää ja alkuperäisen suunnitelman mukaan rakenteen liike pitäisi olla myös estetty vain alaspäin. Rakennusvaiheessa on tehty päätös liittää laskuputken alapää syklonitornin teräsrakenteisiin hitsaamalla (kuva 6.2). Samalla on lisätty tuentasauva, joka on liitetty syklonitornin teräsrakenteista laskuputken ja joutsenkaulan välille (kuva 6.3). Nämä muutokset tehtiin siitä syystä, ettei laskuputken uskottu pysyvän suunnitellussa paikassa.

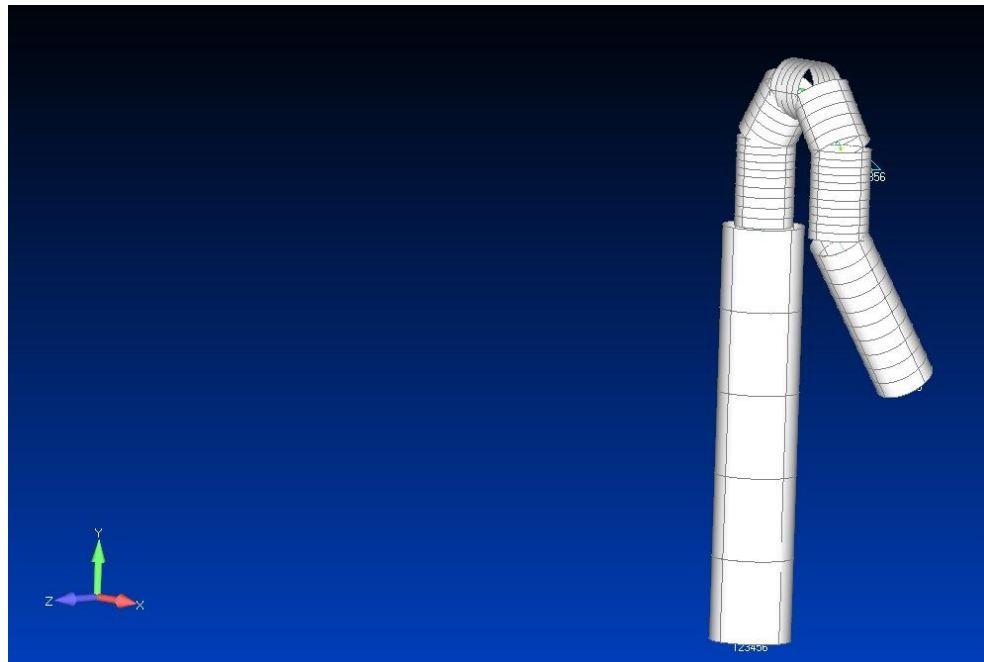


Kuva 6.2 Laskuputki on kiinnitetty hitsaamalla teräsrakenteisiin alkuperäisen suunnitelman vastaisesti.

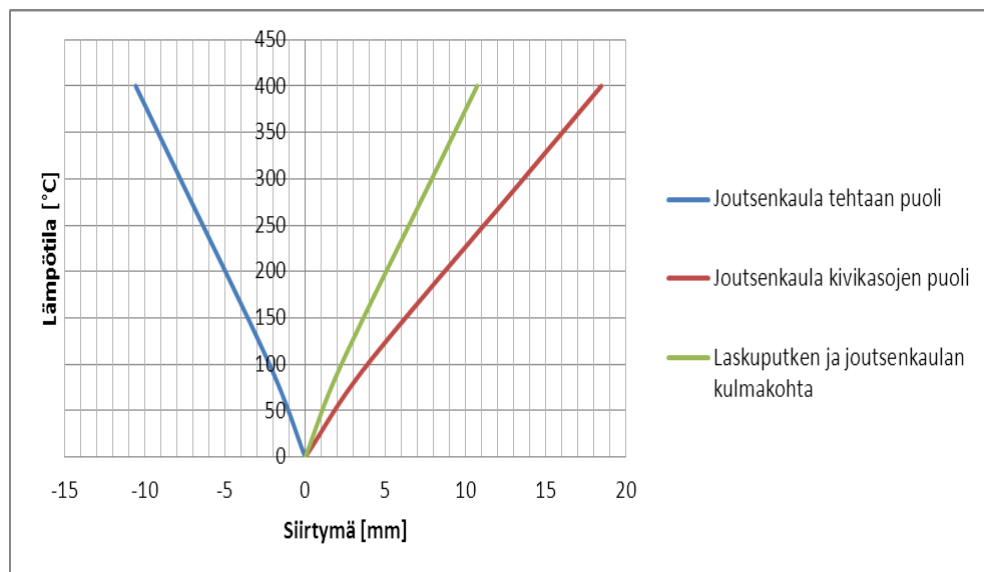


Kuva 6.3. Laskuputken ja joutsenkaulan tuentaan tehty vetosauva.

Siirtymien tarkastelussa luotiin lineaarinen palkkielementtimalli (kuva 6.4), jossa käytettiin elementtimuotona putkea. Verkotuksessa käytettiin kalsinaattorin osalta harvaa verkotusta, koska tarkoituksena oli tutkia vertikaalista siirtymää. Laskuputken ja joutsenkaulan verkotuksessa käytettiin tiheämpää verkotusta, koska kohteessa tarkasteltiin sekä vertikaalista että horisontaalista. Liikuntapalkeita ei mallinnettu, koska niiden sallima siirtymä on tiedossa ja se voidaan helposti ottaa huomioon tuloksissa. Jokainen liikuntapalje sallii noin 70 mm siirtymän yhteen suuntaan. Lämpötila asetetaan vaikuttamaan koko rakenteeseen. Tarkastelussa kiinnitetään huomiota vain joutsenkaulan ja laskuputken yläpäähän siirtymiin. Näissä kohteissa on todellisuudessa havaittu suuria siirtymiä. Kuvaajissa (kuvat 6.5-7) on nähtävillä mallinnuksen tulokset.

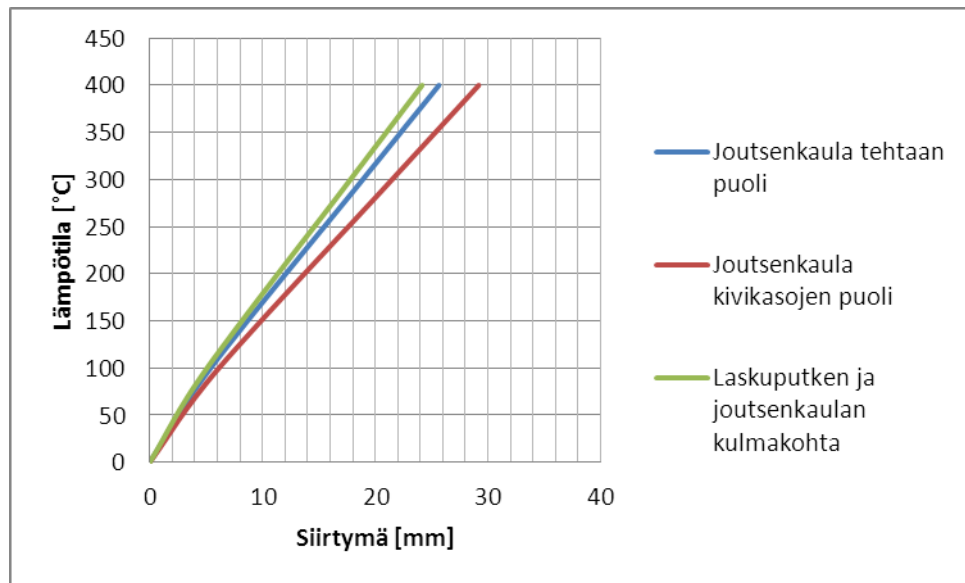


Kuva 6.4. Siirtymien tarkastelussa käytetty palkkielementtimalli.

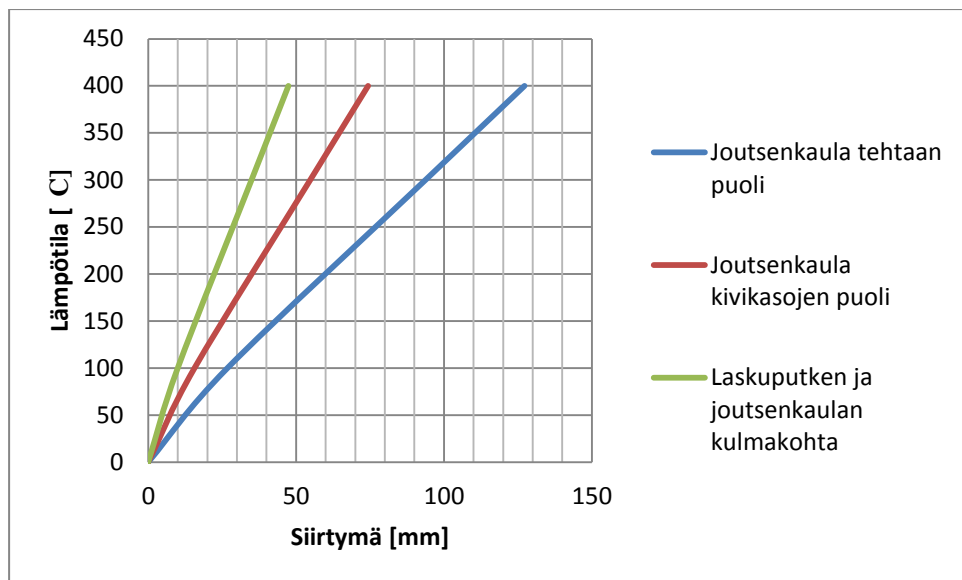


Kuva 6.5. Tarkasteltavien kohteiden siirtymät joutsenkaulan suuntaisesti.



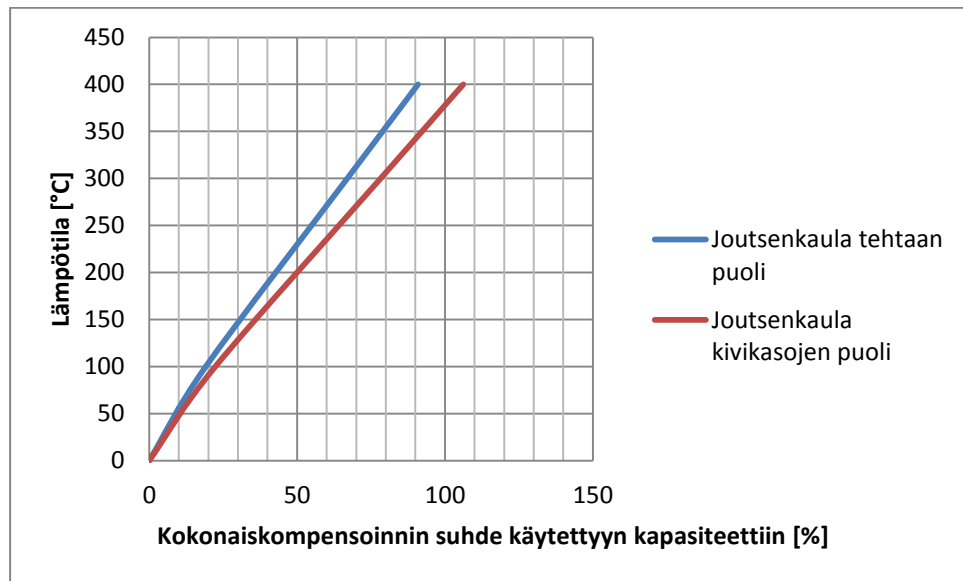


Kuva 6.6. Tarkasteltavien kohteiden siirtymät uuniputken suuntaisesti.



Kuva 6.7. Tarkasteltavien kohteiden siirtymät pystysuunnassa.

Liikuntapalkeiden kompensointi vaikuttaa vain pystysuuntaiseen siirtymään. Tarkasteltavassa kohteessa kalsinaattorin puoleisessa osassa on käytössä kaksi liikuntapaljetta, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 140 mm. Laskuputken puoleisessa osassa on yksi liikuntapalje, jonka kapasiteetti on 70 mm. Kuvassa 6.8 on nähtävillä liikuntapalkeiden kapasiteetin suhde käytettyyn kapasiteettiin lämpötilan muuttuessa.

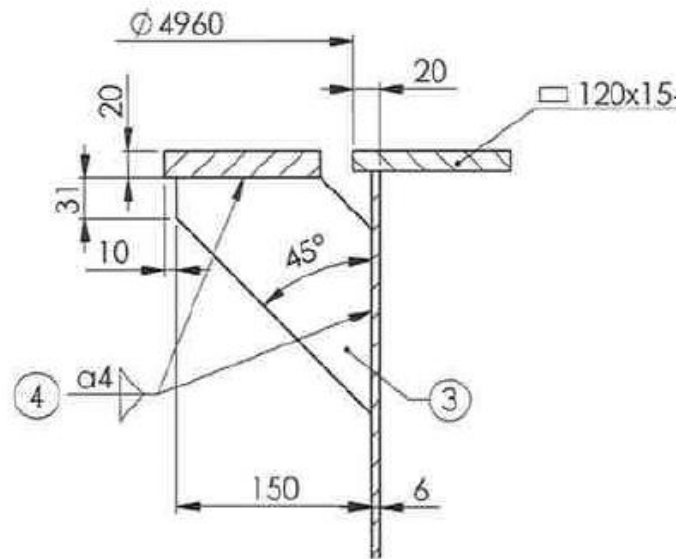


Kuva 6.8. Pystysuuntaisen siirtymän suhde käytössä olevaan kompensointiin.

Siirtymien osalta on nähtävissä selkeä yhteys todellisen tilanteen kanssa, koska FEM-analyysin siirtymät sekä rakenteen todelliset siirtymät vastaavat toisiaan. Poikkeuksena kuitenkin on se, ettei FEM-analyysissä saatu läheskään yhtä suuria siirtymiä kuin mitä rakenne on todellisuudessa siirtynyt, mutta siirtymien suunnat ovat lähes identtiset.

## 6.2 Tiilihyllä

Tiilihyllysten tarkastelussa pyrittiin etsimään mahdollisia jännityskeskittymiä tiilihyllysten tuennan ja kalsinaattorin kuoren väliseltä alueelta eri lämpötiloissa. Kalsinaattorissa tiilihyllyt on rakennettu 12 osasta, joissa jokaisessa on kaksi tuentakappaletta. Näiden kautta tiilikuorman aiheuttama voima on tuettu kalsinaattorin kuoreen. Tiilihylljä on asennettu kalsinaattorin sisälle tiettyjen kerrosten välein ja suurin väli on 3020 mm. Tuolloin nämä tiilihyllyt vastaanottavat suurimman staattisen kuorman jaettavaksi. Tukiosan ja kalsinaattorin kuoren välille syntyy myös taivutuksesta aiheutuvaa momenttia. Kuvassa 6.9 on nähtävillä tiilihyllyn rakenne.



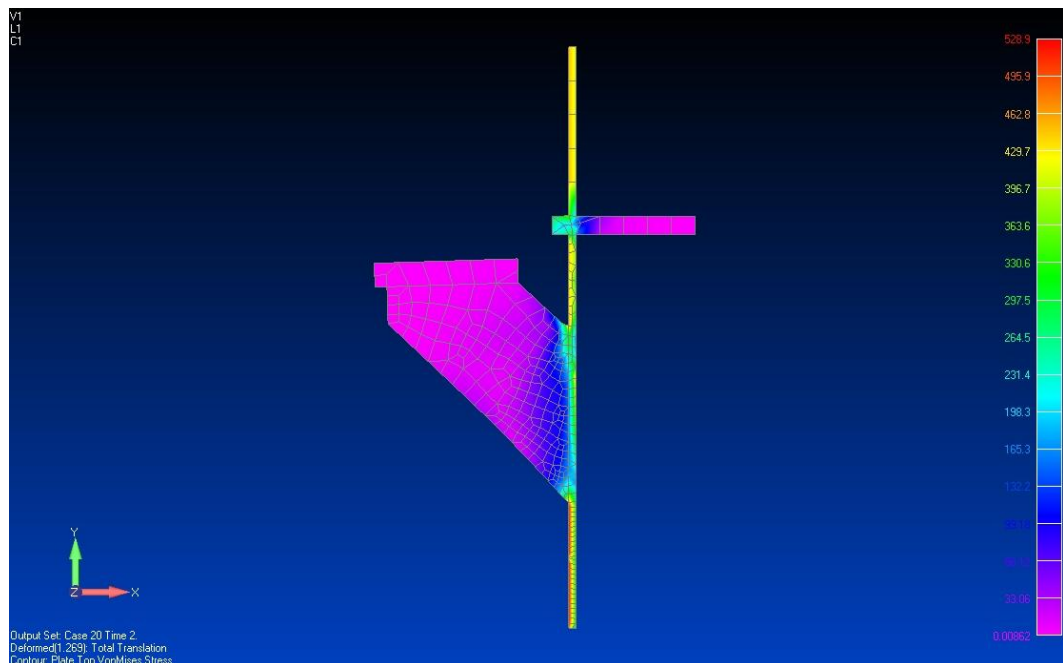
Kuva 6.9. Kalsinaattorin tiilihyllyn rakennekuva sivusta katsottuna.

Tiilihyllyt ovat sisäreunalta suoranaيسissa kosketuksessa liekin kanssa, jolloin lämmön johtuminen kalsinaattorin kuoreen on voimakkaampaa tiilihyllysten kiinnityskohtien alueella. Kuvasta 6.10 on helposti havaittavissa tiilihyllysten aiheuttama muodonmuutos kalsinaattorin kuoren ulkopinnassa. Kuvassa 6.10 vasemmalla näkyy pullistunut ja oikeanpuoleisessa läpi murtunut kuori.



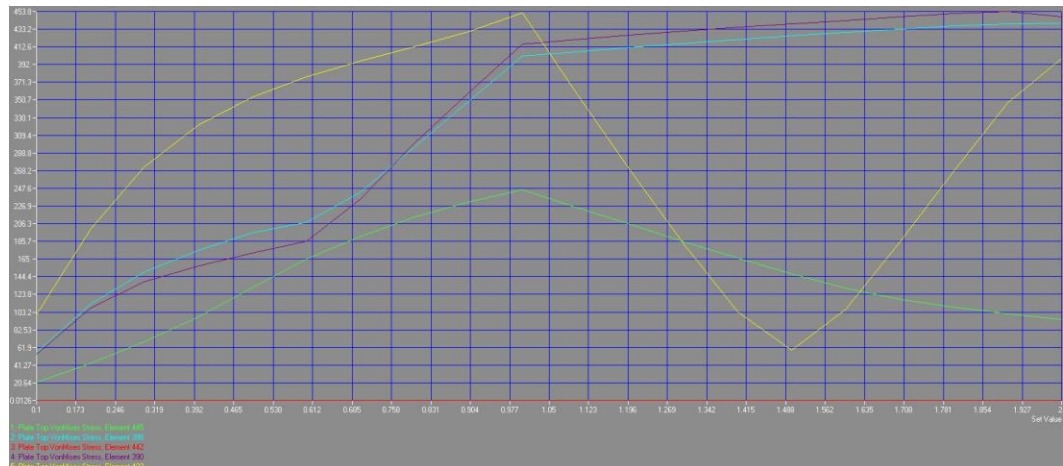
Kuva 6.10. Kuvassa näkyy tiilihyllyn kohdilla tapahtuneet muodonpuutokset ja murtumisen.

FEM- malli luotiin siten, että mallina käytettiin kuvan 6.9 mitoitusta. Mallia ei voinut luoda axisymmetrisillä elementeillä, koska rakenne ei ole kokonaan pyörähdysakselin suhteen symmetrinen. Malliin valittiin leveyelementit ja verkotuksessa käytettiin tiheämpää verkkoa tarkasteltavissa kohteissa, jotta laskentatarkkuus saadaan paremmaksi. Levyn paksuudeksi valittiin 10 mm, koska tiilihyllyn jalka on sen paksuinen. Lisäksi siksi, ettei rakenteen todellinen muoto pyörähdysakselin suhteen ei aiheuta virheellisiä tuloksia. Tiilihyllysten rakenne ei myöskään ole täysin symmetrinen pyörähdysakselin suhteen, koska ne eivät ole yhtä rakennetta, vaan niiden väliin on jätetty lämpölaajentumisvaraa. Reuna- ehtojen määrittämisessä otettiin huomioon kuoren ja tukirenkaan pyörähdyssymmetrisyys siten, että niiden liike estettiin x-akselin suunnassa. Lisäksi kuoren ylä- ja alareunan liike y-akselin suunnassa lukittiin, jolloin malliin saadaan otettua huomioon lämpölaajenemisen paikallinen vaikutus. Lämpökuorma asetettiin vaikuttamaan tiilihyllyn alueelle. Tiilien ja kasvannaisten aiheuttaman massan vaikutus arvioitiin olevan noin 500 N, joka asetettiin vaikuttamaan y-akselin suuntaisesti tasajakautuneena tiilihyllyn yläpinnalle. Luotu FEM -malli näyttää seuraavanlaisesta (kuva 6.4) ja analysoitu malli kuvan 6.11 mukaiselta.



Kuva 6.11. Kalsinaattorin tiilihyllystä luotu FEM -malli.

Lämpötilan muutoksen vaikutusta tarkasteltiin siten, että lämpötilan muutosta kasvatettiin lineaarisesti yhden sekunnin ajan aina 300 °C:een ja sen jälkeen palautetaan lämpötila takaisin alkutilaan. Tarkastelun kohteiksi valittiin tukirenkaan ulkoreuna sekä kuoren, tukirenkaan ja tiilihyllyn tuen liitoskohtien ylä- ja alareunat. Tuloksena saatiin seuraavanlaiset kuvaajat (kuva 6.12), missä Von Mises -jännityksen muutos näkyy ajan funktiona. Kuvassa 6.12 punaisen viivan tarkastelukohta on tukirenkaan ulkokärki, vihreä viiva tukirenkaan ja kuoren yläreunan liitoskohta, keltainen edustaa tukirenkaan ja kuoren liitoskohdan alareunaa, sininen viiva tiilihyllyn ja kuoren liitoskohdan yläreunaa ja violetti viiva tiilihyllyn ja kuoren liitoskohdan alareunaa. Jännityksen arvot vaihtelevat alkutilanteen 0 MPa aina 454 MPa. Tämän perusteella ollaan jo hyvin lähellä rakenteen teräksen murtorajaa. Lisäksi tiilihyllyn kannakkeen alueelle jää suuret jäännösjännitykset poistettaessa lämpökuorma.

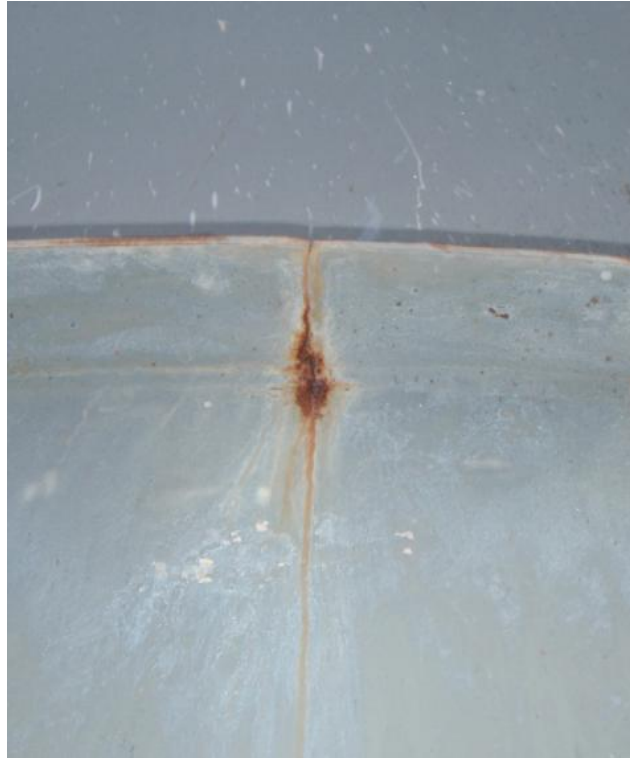


Kuva 6.12. Tiilihyllyn analysoinnin tulokset, missä näkyy jännityksen muutos ajan funktiona.

### 6.3 Tukirengas

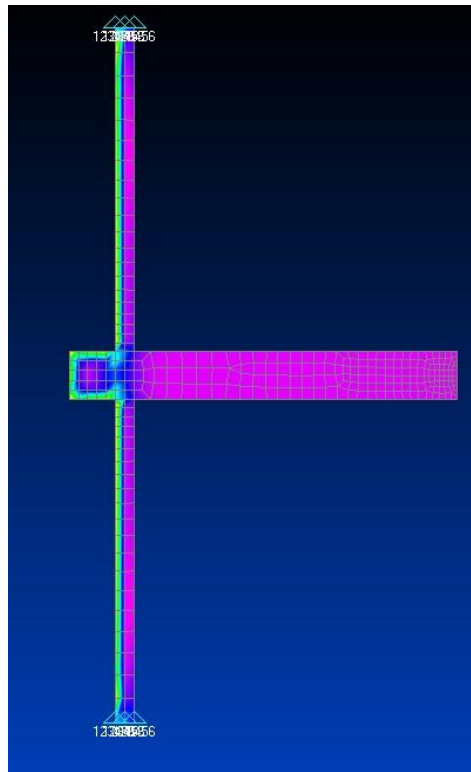
Kalsinaattorin kuoren tukirenkaissa on esiintynyt useissa kohdissa murtumia. Kuvassa 6.13 on nähtävillä yhteen tukirenkaaseen syntynyt murtuma. Murtumissuuntaa ei voi kuvan 6.13 perusteella vielä suoraan sanoa ja murtumaa tarkasteltaessa voidaan päätellä, että kehänsuuntainen jännitys on aiheuttanut murtumat. Tukirenkaisiin vaikuttaa normaalissa tilanteessa ainoastaan lämpökuorma. Vuoraustiilien turpoaminen käytön aikana kuitenkin todennäköisesti aiheuttaa sen, että poistettaessa lämpökuorma, tiilet eivät palaudu,

mutta teräs pyrkii palautumaan alkuperäiseen tilaan. Tiilien kyky kestää teräksen aiheuttaman kehäsuuntaisen jännityksen suuruuden hieman arveluttaa.



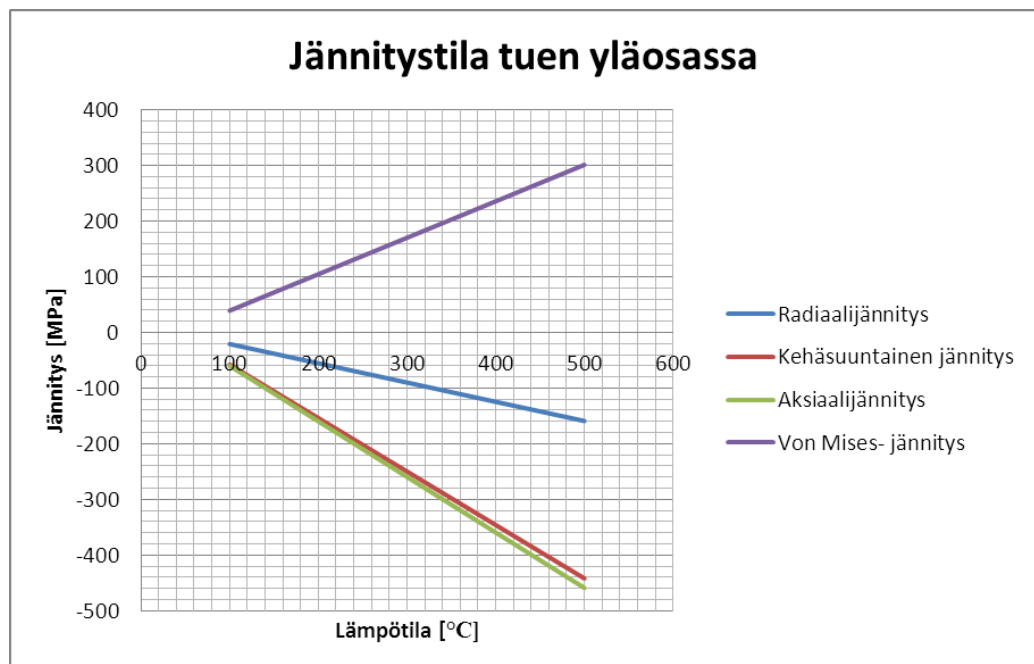
Kuva 6.13. Murtuma kalsinaattorin tukirenkaassa hitsisauman vieressä.

FEM -malli luotiin käyttämällä aksissymmetrisiä elementtejä, koska rakenne on symmetrinen pyörähdysakselin suhteen. Kuvassa 6.14 on nähtävillä analysoitu FEM- malli. Materiaaliominaisuuksina käytettiin samoja kuin edellisessä kappaleessa ja samalla oletetaan lämpölaajenemisen tapahtuvan lineaarisesti. Materiaaliominaisuudet tarvittiin lämpölaajenemisen analysoimiseksi, mutta materiaalin lujuusominaisuudet pidettiin lineaarisena. Verkotuksessa käytettiin tiheämpää verkkoa tarkastelualueilla, jotta laskentatarkkuus on kohteissa parempi. Reunaehtojen määrittämisessä sovellettiin tilannetta, jossa lämpölaajeneminen on estetty aksiaalissuunnassa eli mallissa z-akselin suuntaisesti. Lämpökuorma asetettiin vaikuttamaan kuoren sisäpinnalle ja erityisesti tarkasteltiin, miten lämpötila vaikuttaa syntyviin jännityksiin tukirenkaan ulkopinnassa. Tarkastelulämpötilat olivat 100, 200, 300, 400 ja 500 °C:ta. Teräksen kimmokerroin alkaa pienentyä lämpötilan ylitäessä 400 °C:ta, jolloin materiaalin myötölujuus alkaa samalla alentua.

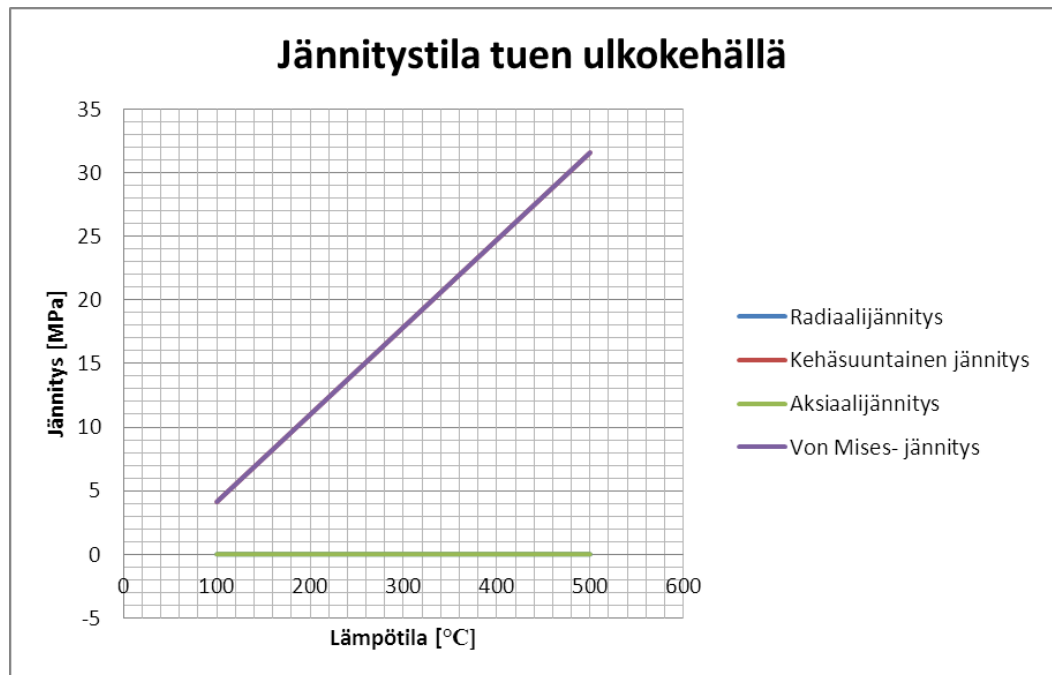


Kuva 6.14. Tukikehän FEM- malli verkotettuna ja analysoituna.

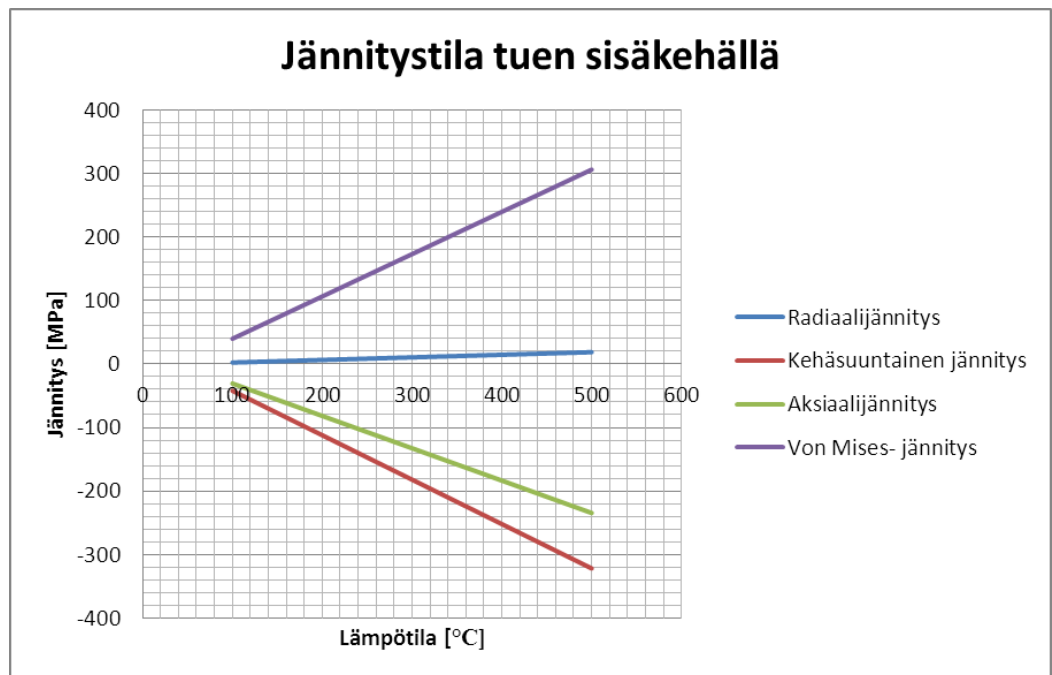
Analysoinnin avulla tutkittiin syntyviä jännitystiloja tuen alueella neljästä kohdasta: tuen sisä- ja ulkoreunat sekä tuen ylä- ja alaosista. Tuloksina saatiin seuraavanlaiset tulokset (kuvat 6.15- 18).



Kuva 6.15. Jännitystila tuen yläosassa.

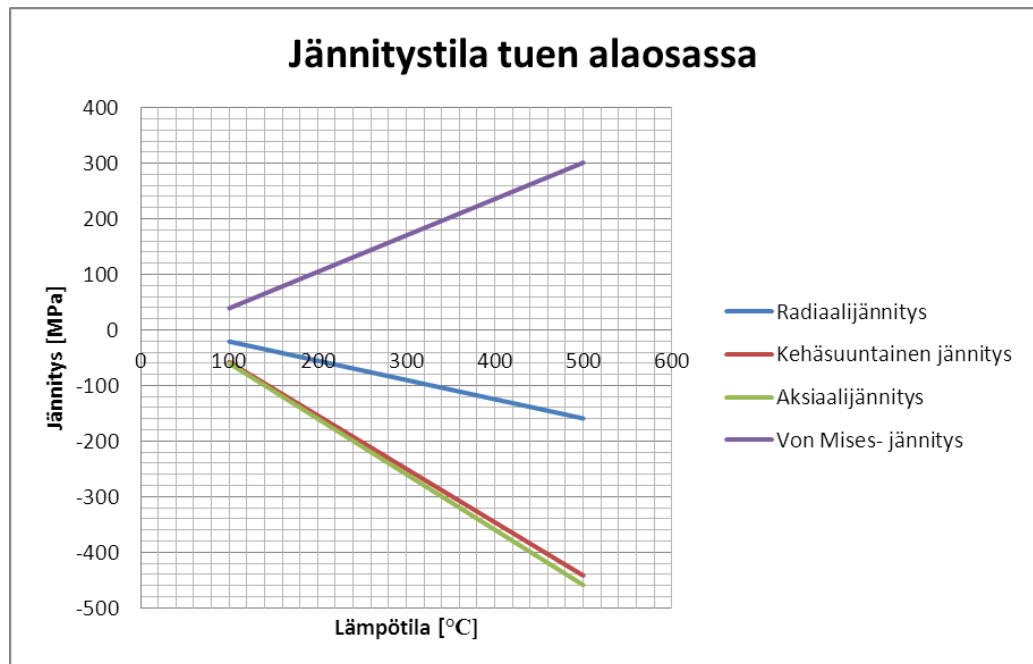


Kuva 6.16. Jännitystilat tuen ulkokehällä



Kuva 6.17. Jännitystilat tuen sisäkehällä.





Kuva 6.18. Jännitystila tuen alaosassa.

Tulosten perusteella murtuminen olisi alkanut sisäpinnalta ja edennyt sieltä ulkoreunaa kohti. Sisäpinnalle syntyy riittävän suuri puristava jännitys, joka voi aiheuttaa vähintään plastisoitumisen tilanteessa, jossa lämpölaajenemisen palautuminen estetään. Eli toisin sanottuna murtuma olisi tapahtunut uunin alasajon aikana. Tukikehän ulkopinnalle näyttäisi muodostuvan vain hyvin pieniä jännitystiloja, jotka eivät riitä murtamaan kehää ulkoapäin kohti sisäreunaa.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin lämpötilan aiheuttamia vaikutuksia sementtiuunin kalsinointijärjestelmässä esiintyneisiin muodonmuutoksiin ja murtumisiin. Teräksen käyttäytymisen ymmärtämiseksi kuumissa olosuhteissa luotiin kokonaisvaltainen kuvaus teräksen ominaisuuksista. Järjestelmästä tarkasteltiin vain aluetta, missä on havaittu eniten muodonmuutoksia ja murtumia. Tarkastelualueeseen kuuluivat kalsinaattorin yläpuolinen osa, joutsenkaula sekä laskuputki. Työn kokeellisessa osuudessa tehtiin veto- ja kovuuskokeita kalsinaattorin kuoresta otetusta koepalasta, jotta järjestelmässä käytetty teräs saatiin tunnistettua. Lisäksi tarkasteltavan alueen siirtymiä seurattiin järjestelmän alasajon aikana huoltoseisokkia varten.

Laskennallisessa osuudessa tutkittiin lämpötilakuorman vaikutusta järjestelmässä esiintyneisiin murtumiin teräskuoressa. FEM -malleja käytettiin erityisesti siirtymien tarkastelussa ja kalsinaattorin alueella esiintyneiden muodonmuutosten ja murtumien analysoinnissa. Siirtymien ja jännityksien tarkastelussa lämpötilan vaihteluväli määritettiin maksimissaan 500 °C:een, koska teräksen lujuusominaisuudet alkavat heiketä teräksen lämpötilan ylitettyä 400 °C:ta.

Vetokokeiden tulosten perusteella luotiin kahdella eri periaatteella jännitys-venymäkäyrät. Ensimmäisessä määritettiin niin sanotut insinöörikäyrät ja toisessa käytettiin Ramberg-Osgood:n määrittelemää sovitusta. Materiaaliksi saatiin hyvin yleisesti käytetty niukkahiilinen rakenneteräs, jonka myötöraja vaihtelee 220- 250 MPa:n välillä. Tulosta vahvistaa vielä materiaalille tehdyt kovuuskokeet sekä mikrokuvien analysointi. Näiden perusteella materiaali vastaa lujuusominaisuuksiltaan S235 rakenneterästä.

Haurasmurtuman vaaraa ei materiaalilla havaittu, vaikka tutkimuksen alussa suoritettussa silmäilyssä osa murtopinnoista antoi aihetta epäillä haurasmurtuma-alttiutta. Vetokokeet suoritettiin sekä -40 °C:ssa että +20 °C:ssa, mutta materiaali käyttäytyi molemmissa lämpötiloissa erittäin sitkeästi ja venymät olivat hyvin suuret. Hitsatut koesauvat katkesivat mittausalueen ulkopuolelta, jonka vuoksi niistä saadut tulokset eivät antaneet luotettavia tuloksia venymien suhteen. Koska murtuminen tapahtui hitsatuissa koesauvoissa perusaineessa, voidaan todeta koesauvojen hitsien olleen lujempia kuin perusaineen. Materiaalin sitkeys vetokokeen aikana oli selvästi havaittavissa myös murtokohdassa tapahtuvana nopeana lämpötilan kasvuna, mikä on tyypillinen ilmiö sitkeälle materiaalille. Vetokokeen jälkeen hitsausliitoksessa oli selkeästi havaittavissa, että hitsin tunkeuma oli vajaa,

vaikka hitsaus oli suoritettu molemmin puolin. Murtuminen vetokoesauvoissa ei tästä huolimatta tapahtunut hitsisauman alueella, vaan noin 20 mm päästä hitsin rajaviivasta. Hitsin vajaa tunkeuma kuitenkin antaa aiheita epäillä hitsaustyön laadun puutetta. Jos kyseessä olisi väsyttävä kuormitus, rakenne murtuisi paljon suunniteltua aikaisemmin. Tämän tyyppiset säröt ovat tyyppiltään hyvin vaarallisia, koska säröä ei voi silmin nähdä vaurion ilmenemistä levyn pintaan.

Järjestelmässä käytettävän eristevuoraustiilen merkitys teräsmateriaalin kestävyydelle on kriittinen. Tiilen ohentuminen ei vielä riitä aiheuttamaan näkyvää vauriota, ainoastaan pintalämpötila kasvaa hieman. Jos tiili ja vuoraus katoavat kokonaan, ei materiaalilla ole kykyä estää kuumuuden aiheuttamaa vaikutusta. Kalsinaattorissa sisälämpötila on lähellä 1000 °C:ta ja tuolloin normaali rakenneteräs hiiltyy todella nopeasti.

Uunijärjestelmässä esiintyvät alkalit aiheuttavat teräkselle myös voimakkaan korrosioilmion, joka on selkeästi nähtävissä kalsinaattorin teräskuoren sisäpinnalla, mihin on päässyt tiilien ja kannakkeiden väleistä rikkiä ja klooria. Molemmilla aineilla on suuri korrosiovaikutus teräkseen. Rakenne on suunniteltu siten, että teräksen pintalämpötila pysyttelisi noin +40 ja +50 °C välillä. Koska kyseessä on vain 6 mm:n teräslevy, on pintalämpötila sekä ulko- että sisäpinnalla hyvin lähellä toisiaan. Kyseinen lämpötila on erityisen otollinen korrosiovaikutukselle, missä sekä rikki että kloori ovat herkkiä muodostamaan yhdisteitä. Erityisesti rikki aiheuttaa kyseisellä lämpötila-alueella merkittävän korrosiovaikutuksen rikkipitoisuuden ollessa alle 65 %:a ja teräksen kulumisen saattaa olla jopa 5 mm:ä vuodessa.

Siirtymien suunnat ovat lähes identtiset sekä todellisen että analysoitujen tulosten kanssa. Siirtymien suuruuksia ei voida verrata tilanteeseen ennen järjestelmän käyttöönottoa, koska rakenteen paikoituksesta ei ole täysin tarkkoja tietoja. Selvää kuitenkin on, että siirtymät ovat poikkeuksetta yli 150 mm pahimmissa kohdissa ja siirtymät johtuvat suurella todennäköisyydellä lämpölaajenemisen vaikutuksesta. Lämpökuorman poiston jälkeen rakenne ei ole palautunut alkuperäiseen tilaan kokonaan. Eristyksessä ja vuorauksessa käytettyjen tiilien on havaittu keräävän itseensä polttoprosessissa syntyviä alkaleja. Uuden tiilen lämpölaajenemiskerroin on lähes puolet pienempi kuin teräksen. Tiilistä teetetyt tutkimuksen mukaan tiilen tilavuus oli kasvanut 30 %:a vajaassa kahdessa vuodessa. Tämän perusteella on erittäin todennäköistä, että rakenteen palautumattomuus alasajossa jää tapahtumatta. Tästä seuraa reaktio, missä siirtyminen jatkuu ja jossain vaiheessa joko

teräskuori tai tiili murtuu ja syntyneet jännitystilan osittain laukeavat. Tiilen ominaisuudet muuttuvat käytönaikana ja tiili ohenee alkaliin vaikutuksesta.

Normaalissa tilanteessa, missä tiilet ovat uudet ja rakenne on alkuperäisessä tilassa, liikuntapalkeissa oleva aksiaalinen liikevara riittää kompensoimaan koko tarkasteltavan järjestelmän aina 400 °C:een. Liikuntapalkeissa on kuitenkin rajallinen horisontaalsiirtymävara. Kalsinaattorissa horisontaalisen siirtymän kapasiteetin vähäisyys ei vaikuta niin paljoa kuin laskuputkessa ja joutsenkaulassa. Rakennusvaiheessa alkuperäisestä suunnitelmasta poikettiin ja laskuputken alapää hitsattiin kiinni tornin tukirakenteisiin, koska muussa tapauksessa laskuputki ei olisi pysynyt paikoillaan. Lisäksi asetettiin sara-noitu tukisauva estämään laskuputken yläpäähän taipumaa. Horisontaalisen siirtymän vähäinen kapasiteetin aiheuttama ongelma näkyy selvimmin laskuputken ja joutsenkaulan liikuntapalkeen kohdalla. Laskuputki voi laajentua ainoastaan yhteen suuntaan, jolloin horisontaalisen siirtymän puute aiheuttaa sen, että se työntää joutsenkaulaa samalla ylöspäin ja kohti uuniputkea. Laskuputken yläpäähän asennettu tukisauva, ei kykene pitämään rakennetta paikoillaan. Tukisauva on liitetty syklonitornin tukirakenteisiin tukipalkin välityksellä ja koko lisätukiosa on aiheuttanut vääntöä syklonitornin ulokepalkissa laskuputken lämpölaajentumisen seurauksena.

Edellä mainituista syistä johtuen lämpölaajentumisesta aiheutuvat siirtymät kohdistuvat pääasiassa joutsenkaulan alueelle. Ketjureaktiosta syntyy uudessa järjestelmässä seuraavanlainen: Kalsinaattorin liikuntapalkeet kompensoivat kokonaan lämpölaajentumisesta johtuvat siirtymät. Laskuputki työntyy ylöspäin ja siirtää samalla joutsenkaulaa uuniputken suuntaan. Joutsenkaula pyrkii laajentumaan kohtisuorasti uuniputkea vasten, jolloin laskuputken ja joutsenkaulan yhteisvaikutuksesta joutsenkaulan ja laskuputken liitoskohta siirtyy pois alkuperäisestä asemasta. Koska laskuputken ja joutsenkaulan liikuntapalkeissa ei ole otettu huomioon riittävästi horisontaalista siirtymäkapasiteettia, aiheuttaa se samalla ilmiön, jossa joutsenkaula nousee ylöspäin. Tämä johtuu siitä, että liikuntapalje ei pääse kompensoimaan riittävästi siirtymää, vaan tietyssä vaiheessa laajentumista palje lukkiutuu eikä enää toimi oikealla tavalla.

Tiilissä tapahtuva turpoaminen pahentaa tilannetta, minkä seurauksena siirtymät jatkavat kasvuaan ja samalla aiheutuu uudentyyppisiä ongelmia. Järjestelmän liikuntapalkeista loppuu kompensointikapasiteetti ja sen seurauksena kalsinaattori ja joutsenkaula alkavat nousta niistä kohdista, joista kalsinointijärjestelmä on tuettu syklonitornin rakenteisiin. Tämä aiheuttaa sen, että järjestelmä ei ole enää tuettu suunnitelluista kohdista. Kalsinaat-

torin osalta pystysuuntainen laajentuminen pysähtyy, kun kalsinaattorin kattokartio osuu syklonitornin rakenteisiin. Silloin ollaan tilanteessa, jossa lämpölaajentuminen on estetty vertikaalisuunnassa. Sama ilmiö toistuu myös laskuputkessa, missä se on siirtänyt joutsenkaulaa niin paljon syklonitornin rakenteita kohti, ettei siirtymistä enää voi tapahtua kuin vertikaalisuunnassa. Tuolloin voidaan katsoa myös laskuputken pituussuuntainen lämpölaajentuminen estetyksi.

Lämpötilan muutoksesta ei synny jännitystiloja, jos rakenteeseen ei kohdisteta mitään voimaa tai estetä minkään akselin liikesuuntaa. Työn yhtenä osana oli tarkastella lämpötilan muutoksesta aiheutuvia jännitystiloja ja voiko ne selittää kalsinaattorin teräskuoressa tapahtuneet murtumat. Jännitystiloja syntyy erityisesti silloin, kun tiilien turpoamien on alkanut ja lämpölaajentumisesta johtuvat venymät eivät pääse palautumaan alkuperäiseen tilaan. Materiaalista ja venymästä johtuen alkaa rakenteessa näkyä myös muodonmuutoksia ja lopulta tämä johtaa rakenteen murtumaan.

Kalsinaattorin kuoressa murtumiseen johtava lämpötilanvaihtelu saa olla laskelmien mukaan noin 90 °C:ta tilanteessa, jossa laajentuminen on estetty. Jos kuoressa on alkusärö, niin sallittu lämpötilan vaihtelu jää pienemmäksi. Jos laajentuminen tapahtuu vapaasti, voi lämpötilan vaihtelu olla hieman suurempi, mutta sallittujen siirtymien rajoissa. Tiilien kunto ja tiilivuoraukseen jätettävien laajentumisvälien riittävät varat ovat erittäin tärkeässä osassa murtumien kannalta, koska tiilet voivat estää teräskuoren palautumisen lämpölaajentumisen jälkeen. Havaittavaa oli, ettei tiilien aiheuttamalla massalla ollut suurta merkitystä murtumiskuormitukseen vaikuttavana voimana.

Merkittävästä väsymiskuormituksesta ei voida tässä tapauksessa puhua, koska lämpötilan vaihtelut järjestelmässä ovat liian pienet. Laskennassa hyödynnettiin järjestelmästä saatavaa lämpötilatrendiä, jonka perusteella laskettuna keksimääräinen lämpötilan vaihtelu jää liian pieneksi, vaikka FAT -luokka olisi alle 36. Ensimmäiset murtumat oli havaittu pari vuotta käyttöönoton jälkeen. Laskelmien mukaan rakenteen FAT -luokka tulisi olla alle 10, jolloin lasketulla lämpötilan vaihtelulla voitaisiin rakenne murtaa väsyttävästi. Jos lämpötilan vaihtelusta johtuva jännitystila olisi 100 MPa, rakenteen FAT -luokka pitäisi olla alle 20, jotta rakenne murtuisi väsyttävästi.

Tiilihyllysten kohdalla lämpötilan johtumista ei ole estetty sisäpuolelta ollenkaan, jolloin sisäpuolen lämpötila pääsee johtumaan suoraan kuoreen. Tarkastelussa käytettiin maksimissaan 300 °C:ta vaihteluväliä. Tuolloin tiilien massan ja lämpölaajentumisen seurauk-

senä tiilihyllyn ja kalsinaattorin kuoren alapuoleiseen liitoskohtaan syntyy lähes 450 MPa:n jännitystila ja tuolloin ollaan jo rakenteessa käytetyn materiaalin myötörajan yläpuolella. On siis hyvin selkeitä viitteitä siitä, että tiilikuorman ja lämpölaajentumisen seurauksena tiilihyllyjen ja kuoren välisellä alueella tapahtuu plastisoitumista ja jopa murtumista. FEM- analyysin perusteella edellä mainitulle alueelle jää myös suuret jäännösjännitykset.

Kalsinaattorin tukikehän lämpölaajenemisesta johtuva jännitystila ei riitä murtamaan tukikehää ulkoreunasta, vaikka lämpötilan vaihtelu olisi jopa 500 °C:ta. Murtuminen on todennäköisesti edennyt sisäpinnalta kohti ulkopintaa. Murtumat ovat tapahtuneet hitsin vierestä, jolloin on hyvin todennäköistä, että hitsausliitokseen on mahdollisesti jäänyt vajausta hitsin tunkeumassa. Toinen mahdollisuus on, että tiilien turpoamisen seurauksena kehäsuuntainen palautumattomuus on useiden lämmitys- ja kylmennyskertojen jälkeen saanut aikaan tilanteen, jossa jännitystila kasvaa jokaisen lämmityskerran jälkeen. Tiilien kyky kestää kehäsuuntaista puristusta kuitenkin arveluttaa. Tiilien puristuskestävyys on noin 65 MPa eli noin neljännes teräksen myötölujuudesta, eikä puristuskestävyys juurikaan muutu lämpötilan kohotessa.

Rakenteen kestoikää parantavia toimenpiteitä voidaan luetella muutamia. Näistä tärkeimmiksi muodostuvat laskuputken ja joutsenkaulan liikuntapalkeen muutostyö sekä vuorauksessa käytettävien tiilien ja valujen kunnan seuranta sekä oikea-aikainen vaihtousiin. Laskuputkeen täytyisi asentaa oma liikuntapalje, joka kompensoi laskuputken pituussuuntaisen laajentumisen. Tällöin joutsenkaulan siirtymä pois alkuperäisestä asemasta voidaan estää kokonaan. Liikuntapaljetta ei voida suoraan installoida laskuputkeen, vaan samalla täytyy muuttaa laskuputken tuentaa erityyppiseksi.

Tiilien ja eristeen kunnolla on suuri merkitys sekä alkalien imeytymiseen että lämmön johtumiseen. Tiilen ja eristeen oheneminen aiheuttaa paikallisen pintalämpötilan nousun kalsinaattorin teräskuoressa, jolloin alueelle syntyy paikallinen jännityskeskittymä. Jos ohentuminen jatkuu edelleen, on lopputuloksena punahehkuinen alue ja tilanne etenee hyvin nopeasti puhkeamiseen. Tiilivuorausta ei saa päästää liian huonoon kuntoon. Korroosion kannalta vuorauksen tulee olla myös kunnossa, jotta korroosiota aiheuttavat alkaalit eivät pääse kosketukseen teräskuoren kanssa. Tiilien korvaaminen valumassalla saataisi vähentää korroosiovaikutusta, koska saumoja syntyy vähemmän. Toisaalta valujen kautta johtuu enemmän lämpöä teräskuoreen, koska valujen yhteydessä ei voida käyttää eristevillaa, vaan valumassa toimii itsessään eristemassana.

Materiaali soveltuu sitkeysominaisuuksiltaan hyvin kyseiseen rakenteeseen tilanteessa, missä vuoraukset ovat kunnossa, jolloin lämpötila ei aiheuta ongelmia. Jos tiilivuorauksessa tapahtuu ohentumista tai vuoraus puuttuu kokonaan, ei materiaalilla ole ominaisuuksia kestää kalsinaattorin sisäpuoleisen lämpötilan räsitusta. Sama tilanne on myös tiilihyllyjen osalta. Erityisesti tiilihyllyjen kohdalla materiaalivalintaan tulisi kiinnittää enemmän huomiota. Tilannetta voidaan joko parantaa muuttamalla tiilihyllyn rakennetta siten, että kalsinaattorin sisäpuolen lämpö ei johdu suoraan teräkseen tai tiilihyllyn sisäpuoleinen osa eristetään siten, että lämmön aiheuttama vaikutus jää pienemmäksi. Tiilihyllyjen materiaalina tulisi ehdottomasti käyttää tulenkestäviä teräslaatuja.

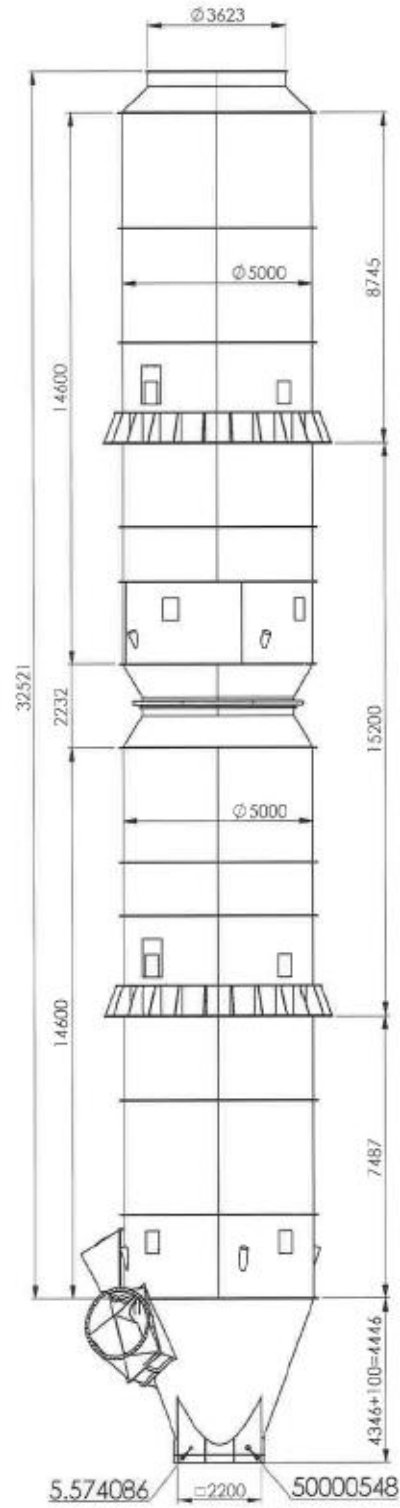
Korroosiovaikutus teräskuoressa voidaan estää käyttämällä joko erityyppistä teräslautaa tai pinnoittamalla teräskuoren sisäpinta. Alkaleilla on erityinen taipumus aiheuttaa korroosiota valuankkureissa, jotka on kiinnitetty hitsaamalla kuoren sisäpinnalle. Yhtenä vaihtoehtona on kasvattaa kuoren pintalämpötilaa hetkellisesti, jolloin teräksen pinnalle kondensoituva vesi saadaan haihdutettua. Tämä vaihtoehto on nykyisellä polttoprosessilla mahdotonta toteuttaa, koska lämpötila ei saa tuotannon aikana vaihdella suuresti. Toisaalta kuoren pintalämpötilan kasvattaminen onnistuu helpommin. Pintalämpötilan nousu saadaan aikaan ohentamalla eristekerroksen paksuutta, mutta rakenteen suunnittelussa ei ole huomioitu pintalämpötilan kasvattamista. Todennäköisesti lämpötilan nostosta aiheutuisi uudenlaisia jännitystilaongelmia, koska lämpötilaa täytyisi nostaa vähintään 50 °C:ta, jolloin pintalämpötila olisi lähellä 100 °C:ta, jotta vesi höyrystyy ja haihtuu nopeammin pois.

## LÄHDELUETTELO

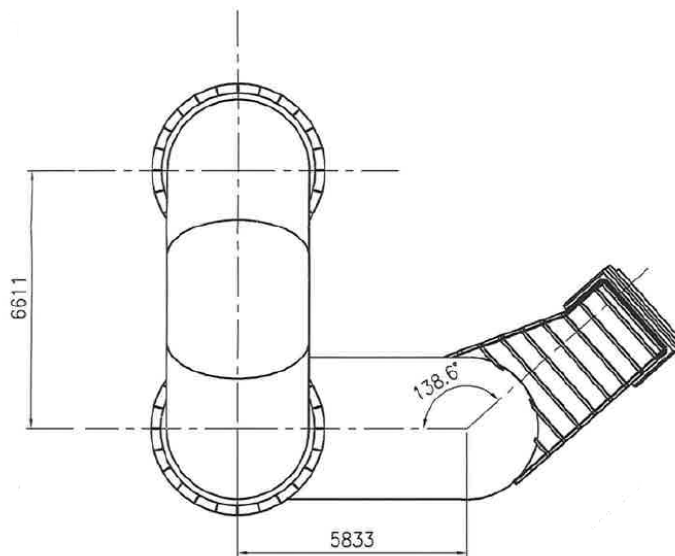
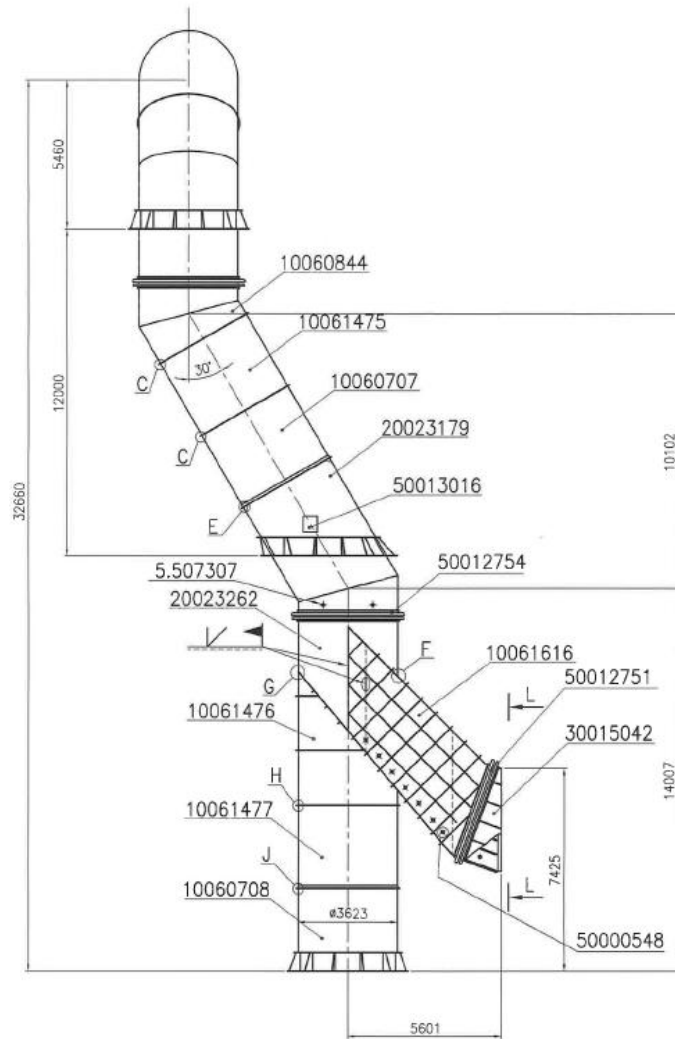
- [1] Finnsementti Oy. 2011. Yrityksen esittely materiaali, [Verkkodokumentti] [Viitattu 4.1.2011], saatavilla: <http://www.finnsementti.fi/index2.html>.
- [2] Finnsementti Oy:n Lappeenrannan tehtaan tuotantopäällikkö ja diplomi-insinööri Jarkko Riepposen haastattelu 10.1.2011.
- [3] Huhdankoski, E. 1999. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. Otava.
- [4] Kotilainen, H. & Rantanen, M. 1981 Materiaalin valinta- Yleisohjeet, Tekninen tiedotus 22/81. Metalliteollisuuden Kustannus.
- [5] Valtanen, E. 2008 Tekniikan taulukkirja. 16. painos. Gummerus.
- [6] Bergman, T., Dewitt, D., Incropera, F. & Lavine, A. 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6. painos, John Wiley & Sons.
- [7] Cook, R. D. 1995. Finite Element Modelling for Stress Analysis. John Wiley & Sons.
- [8] Niskanen, E. 1974. Lujuusoppi, sauvarakenteet 332. TKY/ Otapaino.
- [9] Hibbeler, R. C. 2005. Mechanics of Materials, 2. painos, s. 430. Prentice Hall.
- [10] Cook, R. D. 1995. Finite Element Modelling for Stress Analysis, s. 31. John Wiley & Sons.
- [11] Hibbeler, R. C. 2005. Mechanics of Materials, 2. painos, s. 154- 155. Prentice Hall.
- [12] Ikonen, K. & Kantola, K. 1986. Murtumismekaniikka 884. Kyriiri.
- [13] Kleemola, H. & Korhonen, A. 1981. Plastisuusteorian perusteet 806B, s 87- 88. Otapaino.
- [14] Salmi, T. & Virtanen, S. 2008. Materiaalien mekaniikka, s 292. Gummerus.
- [15] Huhdankoski, E. 1999. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. s 41. Otava.
- [16] Ikonen, K. & Kantola, K. 1986. Murtumismekaniikka 884. s 47-51. Kyriiri.
- [17] Dowling, N. E. 2007. Mechanical Behavior of Material, 3. painos, s 445-447, Pearson Education.
- [18] SFS EN 1993-1-9 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu, Osa 1-9: Teräsrakenteiden väsyminen. 1. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2006.
- [19] Huhdankoski, E. 1999. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. s 90. Otava.



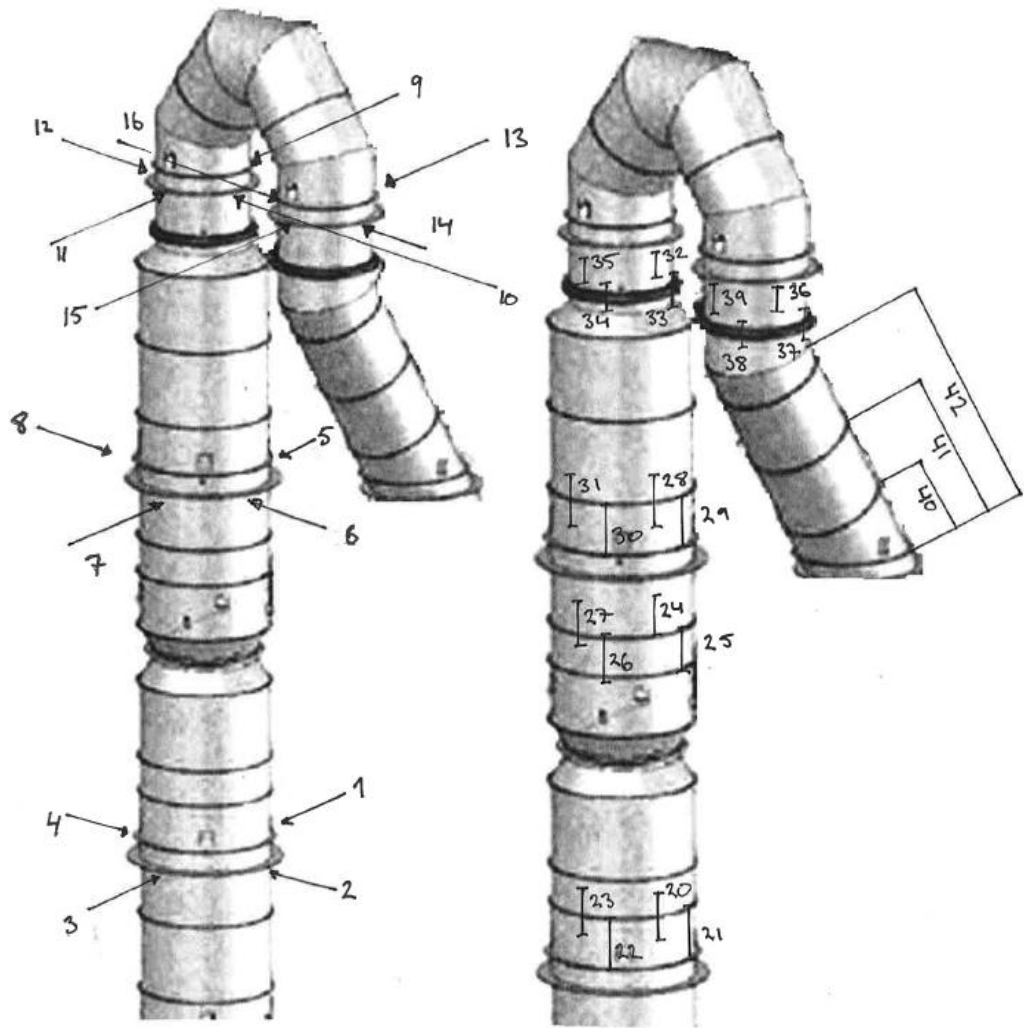
- [20] Tunturi, P. J (päätoim.) 1988. Korroosiokäsikirja. Suomen korroosioyhdistys (SKY ry). Julkaisuja n:o 6.
- [21] Huhdankoski, E. 1999. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. s 69- 70. Otava.
- [22] Tunturi, P. J (päätoim.) 1988. Korroosiokäsikirja. Suomen korroosioyhdistys (SKY ry). Julkaisuja n:o 6. s 471- 472.
- [23] Ikonen, K. & Kantola, K. 1986. Murtumismekaniikka 884. s 224- 237. Kyriiri.
- [24] Valtanen, E. 2008 Tekniikan taulukkokirja. 16. painos. Gummerus.
- [25] Dowling, N. E. 2007. Mechanical Behavior of Material, 3. painos, s 618-619, Pearson Education.
- [26] Salmi, T. & Virtanen, S. 2008. Materiaalien mekaniikka, s 291. Gummerus.
- [27] Finnsementti Oy:n Lappeenrannan tehtaan tuotantopäällikkö ja diplomi-insinööri Jarkko Riepposen haastattelu 27.1.2011.
- [28] RefraTechnik. 2010. Lappeenrannan uunilinja-7 kalsinaattorista otetun tiilen analysointiraportti. Raportti n:o 21/10.
- [29] RefraTechnik. 2008. The Cement Industry Meeting Point. Refra Kolloquium, Berlin, 3-6.6.2008. Göttingen. s 41- 45.
- [30] Kaitila, O., Kevarinmäki, A., Oksanen, T. & Yli-Koski, R. 2005. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). VTT Working Papers 29. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.3.2011]. Saatavilla <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W29.pdf>.
- [31] RefraTechnik. 2008. Shaped Refractory Products. Göttingen.
- [32] Ikonen, K. & Kantola, K. 1986. Murtumismekaniikka 884. s 233- 235. Kyriiri.

**LIITTEET****LIITE 1**

LIITE2



## LIITE 3



LIITE 4

25/01/2011 2:46:32 PM

Page 1

PANalytical  
Results on-line

Type:	Routine
Archive:	Hot Meal
Application:	Hot Meal
Sample:	U5/U7
Sum (%):	23,8919
Init weight:	1 g
Flux weight:	0 g
Final weight:	1 g

Compound	Value	Unit	Status
K <sub>2</sub> O	10,02	%	
Na <sub>2</sub> O	2,14	%	
SO <sub>3</sub>	1,13	%	
Cl	10,599	%	