LIITE 1

Talousasiat

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Taloustilanne 2017

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

TULOT	Toteuma	Ennuste	Budjetti	
Jäsenmaksut ja muu säännöllinen tuki	**2017**	**2017**	**2 017**	Erotus
Kattilan käyttäjät	110 500	110 500	**220 000**	-19 500
Kattilan valmistajat	24 650	24 650	**29 000**	-4 350
If Vahinkovakuutus	5 950	59 50	**7 000**	-1 050
Pohjola	3 825	3 825	**4 500**	-675
FM Global	10 200	10 200	**12 000**	-1800
Caverion Industria	7 650	7 650	**9 000**	-1 350
Pöyry Finland	7 650	7 650	**9 000**	-1 350
Labtium	850	850	**1 000**	-650
Inspecta	7 650	7 650	**9 000**	-1 350
Replico	2 550	2 550	**3 000**	-450
NDT I&C	1 500	1 500	**3 000**	-450
Ulkojäsenet	3 600	3 600	**3 600**	0
Yhteensä	**187 625**	**187 625**	**220 100**	**-32 475**
Korkotuotot	0	0	**0**	0
Seminaarien osallistumismaksut				
Konemestaripäivä	25 545	25 545	**25 000**	545
Soodakattilapäivä	40 410	40 410	**35 000**	5 410
Operaattoripäivä	15 470	15 470	**20 000**	-4 530
Yhteensä	**81 425**	**81 425**	**80 000**	**1 425**
Tulot yhteensä	**269 050**	**269 050**	**300 100**	**-31 050**

MENOT	Toteuma	Ennuste	Budjetti	
VARSINAINEN TOIMINTA	2017	2017	2 017	Erotus
Seminaarikulut				
Konemestaripäivä (3010, 3011, 3012, 3013)	21 724	23 224	25 000	1 776
Soodakattilapäivä (3010, 3011, 3012, 3013)	36 347	36 347	40 000	3 653
Operaattoripäivä (3010, 3011, 3012, 3013)	21 598	22 098	20 000	- 2 098
Seminaarikulut yhteensä	79 668	81 668	85 000	3 332
MUU VARSINAINEN TOIMINTA				
Taloushallinto (3820, 3825)	2 328	4 828	7 000	2 172
Vuosikokous (3850, 3855, 3856, 3857)	9 358	9 358	8 000	-1 358
Pankin palvelumaksut (3810)	150	165	200	34
Opinnäytetyöapuraha (8000)	2 000	2 000	2 000	0
Kotisivu ylläpito (3865)	708	708	2 000	1 292
Muut ostokulut (3880,3881)	348	362	500	138
MUU VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	14 891	17 420	19 700	2 280
VARSINAINEN TOIMINTA YHTEENSÄ	94 560	99 089	104 700	5 611

VARAINHANKINTA	Toteuma	Ennuste	Budjetti	
Sihteeristötyö (5510,5515,5513,5515)	**2017**	**2017**	**2017**	Erotus
Sihteeristön työ	21 957	22 046	**21 000**	-1 957
Kansainvälinen toiminta	1 663	1 663	**3 000**	1 337
Sihteeristötyö yhteensä	**23 619**	**24 619**	**24 000**	**-619**
Hallitus ja työryhmät				
Hallitus (5520)	5 840	6 840	**8 000**	1 160
Kestoisuustyöryhmä (5530)	6 720	6 920	**6 000**	-920
Lipeätyöryhmä (5535)	6 080	6 380	**6 000**	-380
Ympäristötyöryhmä (5540)	7 992	7 992	**6 000**	-1 992
Automaatiotyöryhmä (5545)	1 040	1 040	**6 000**	4 960
Ohjelmatyöryhmä (5550)	3 043	3 043	**3 000**	-43
Hallitus ja työryhmät yhteensä	**30 716**	32 216	**35 000**	2 784
VARAINHANKINTA YHTEENSÄ	**54 335**	**56 835**	**59 000**	**2 165**
VARSINAINEN + VARAINHANKINTA	**148 895**	**155 924**	**163 700**	**7 776**
PROJEKTIT YHTEENSÄ	**164 136**	**191 636**	**206 250**	**14 614**

	Toteuma	Ennuste	Budjetti	
TULOS	**2017**	**2017**	**2 017**	Erotus
Tulot	269 050	269 050	300 100	-31 050
Menot	313 031	347 560	369 950	22 390
Tilikauden tulos	-43 981	-78 510	-69 850	-8 660
Ylijäämä vuodelta 2016		49 899		
Tilikauden tulos		-28 611		
Edellisten vuosien varaukset 55-juhlaa varten		109 468		
Varausta jäljellä vuonna 2018		**80 857**		

	Toteuma 2017	Ennuste 2017	Budjetti 2 017	Erotus
Kestoisuustyöryhmän tehtäväalue (5700)				
Sularänniohje	6 376	6 376	**3 000**	-3 376
Soodakattilan vuodonvalvontajärjestelmät, Varo	0	12 000	**12 000**	0
Hitsauspinnoitettujen putkien käyttö soodakattiloissa, OSA 2 (VTT)	9 700	9 700	**9 700**	0
Hitsauspinnoitettujen putkien käyttö soodakattiloissa, OSA 3 (VTT)	53 500	53 500	**53 500**	0
Selvitys sularännien toiminnasta vaihtelevalla kuormalla, LUT	12 000	12 000	**12 000**	0
Kestoisuustyöryhmän tehtäväalue yhteensä	**81 076**	93 076	**90 200**	- 2 876
Lipeätyöryhmän tehtäväalue (5710)				
Black liquor evaporation book (ÅA)	0	0	**14 750**	14 750
Understanding Low Temperature Corrosion in BL Combustion, Phase 3 (AÅ)	0	18 500	**18 500**	0
Lipeätyöryhmän tehtäväalue yhteensä	**0**	18 500	**33 250**	14 750
Ympäristötyöryhmän tehtäväalue (5720)				
Puun typpi ja sellutehtaan NOx-päästöt	0	9 000	**9 000**	0
Selvitys tyypillisistä savukaasuvirroista [m3/ADt] eri puulajeilla (LUT)	12 000	12 000	**12 000**	0
Hajukaasujärjestelmien turvallisuusauditointi, LUT	10 000	10 000	**10 000**	0
Ympäristötyöryhmän tehtäväalue yhteensä	**22 000**	31 000	**31 000**	0
Automaatiotyöryhmän tehtäväalue (5730)				
Soodakattilan päästömittausten menetelmät (2007) raportin päivitys	7 900	7 900	**16 800**	8 900
Automaatiotyöryhmän tehtäväalue yhteensä	**7 900**	7 900	**16 800**	8 900
Muut projektit				
SKY-historiikki (5740)	41 160	41 160	**35 000**	-6 160
Muut projektit yhteensä	**41 160**	41 160	**35 000**	-6 160
Työryhmien projektit yhteensä	**152 136**	191 636	**206 250**	14 614

LIITE 2

KTR: Varo Oy: Soodakattiloiden käynninaikaiset tiiveydenvalvontamenetelmät – raportti 20.12.2017

Sisällys

1 TIIVISTELMÄ 2

2 JOHDANTO 4

3 VUODOT JA TULIPESÄRÄJÄHDYKSET SOODAKATTILOISSA 6

4 PIENET JA SUURET VUODOT 13

5 PIENTEN VUOTOJEN VALVONTA 23

5.1 Massataseen seurantaan perustuvat järjestelmät 23
5.2 Kattilan höyrystinosan tiiveyden valvonta kattilaveden laadun seurannan avulla 26
5.3 Akustisen emission seurantaan perustuvat järjestelmät 34

6 SUURTEN VUOTOJEN VALVONTA 41

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 48

7.1 Lähteet 50

1 TIIVISTELMÄ

Suomalaisille soodakattiloiden käyttäjille tehdyn kyselyn mukaan lähes kaikkien soodakattiloiden tiiveyttä valvotaan nykyisin syöttövesi-höyryeroa seuraamalla. Osalla tehtaista on syöttövesi-höyryeron laskenta toteutettu niin, että eron kasvun perusteella voidaan havaita jo suhteellisen pienten säröjen aiheuttamat vuodot. Pienimmät syöttövesi-höyryeron kasvun perusteella tunnistetut vuodot ovat olleet n. 0,2 - 0,3 kg/s. Osassa tehtaista syöttövesi-höyryeron perusteella voidaan tunnistaa ainoastaan suuret vuodot, joissa vuodon koko on 3 – 9 kg/s tai suurempi.

Kun vuoto on kattilan höyrystinosassa (keittopinnassa, tulipesässä tai verhossa), karkaa vuodon mukana myös natriumia ja fosfaattia, kun kattilaveden pH säädetään natriumfosfaatilla. Tällaiset vuodot voidaan siten tunnistaa kattilaveden fosfaatti- tai natriumpitoisuuden laskun tai johtokyvyn alenemisen perusteella. Mittaamalla sekä kattilaan menevän fosfaatin määrää että kattilaveden fosfaattipitoisuutta voidaan kattilaveden fosfaattitaseesta ratkaista vuotovirtaus. Tällainen kattilavesivuodon valvonta on käytössä kolmella tehtaalla.

Vuonna 2001, kun selvitys suomalaisilla tehtailla käytettäviä soodakattiloiden tiiveydenvalvontajärjestelmiä selvitettiin edellisen kerran, käytössä oli myös akustisen emission seurantaan perustuvia järjestelmiä. Nämä järjestelmät ovat jääneet pois käytöstä. Suomen ulkopuolella akustisen emission seurantaan perustuvia vuodonvalvontajärjestelmiä on sen sijaan edelleen käytössä.

Soodakattilan tiiveydenvalvontajärjestelmiä on otettu käyttöön Pohjois-Amerikassa BLRBAC:n arvion mukaan noin puolessa soodakattiloista. Pohjois-Amerikassa on käytössä 188 soodakattilaa, joten tiiveydenvalvontajärjestelmiä on noin sadassa kattilassa. Useimmat käytössä olevat järjestelmät perustuvat syöttövesi-höyryeron seurantaan. Noin kolmessakymmenessä kattilassa on käytössä Nalcon toimittama järjestelmä, jossa tiiveyttä seurataan sekä syöttövesi-höyryeron että Nalcon oman merkkiaineen kattilavesipitoisuuden perusteella. Lisäksi noin kahdessakymmenessä kattilassa on käytössä akustisen emission seurantaan perustuvaa järjestelmää.

Kokemukset soodakattiloiden tiiveydenvalvontajärjestelmistä osoittavat, että järjestelmien avulla on mahdollista havaita pienet, vähitellen kasvavat vuodot niin aikaisessa vaiheessa, että kattila voidaan ajaa alas korjauksia varten ennen kuin vuoto saa aikaan laajempia vaurioita tai nostaa merkittävästi riskiä, että alasajon yhteydessä tapahtuisi tulipesäräjähdys. Ottaen huomioon miten vakavista riskeistä soodakattilavuodoissa voi olla kysymys, tuntuisi luonnolliselta, että tällaiset järjestelmät otettaisiin käyttöön kaikissa soodakattiloissa, varsinkin kun useimmissa tapauksissa parannukset vuotojen valvonnassa ovat tehtävissä suhteellisen vähäisin investoinnein.

Tiiveydenvalvontajärjestelmät eivät auta äkillisissä, suurissa vuodoissa, joita tapahtuu esim. tulipesän putkien ylikuumentuessa kiertohäiriön seurauksena tai verho- tai pohjaputkien vaurioituessa esim. suolakamin tai nuohoimen putoamisen takia. Näissä tilanteissa olisi ensiarvoisen tärkeää, että operaattorit tekevät viiveettä käyttöhenkilökunnan turvallisuuden kannalta tarpeelliset toimenpiteet, eli käynnistävät vaarahälytyksen kattilahuoneessa ja tekevät pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen.

Kokemukset suomalaisilla tehtailla tapahtuneista kattilavuodoista osoittavat, että operaattoreilla ei ole aina käytettävissään työkaluja, joiden avulla he voisivat selvitä tästä tehtävästä viiveettä ja virheettä. Käytännössä haasteena usein on, että vuodon seurauksena hälytyslistalle tulostuu nopeassa tahdissa kymmeniä tai jopa satoja hälytyksiä. Oikean tilannekuvan muodostaminen hälytysten perusteella on tällöin vaikeaa, jolloin tarvittavat toimenpiteet jäävät helposti tekemättä.

Tämä havaittiin Pölsin tehtaalla Itävallassa 2014, kun kattilaan tuli suurehko vuoto tulipesän seinäputkeen. Vuodosta ei aiheutunut välitöntä paukkumista, joten operaattorit eivät tehneet pikapysäytystä ja -tyhjennystä, vaan ainoastaan pysäyttivät lipeän polton. Yksi operaattoreista kävi ottamassa lipeäruiskut pois pesästä. Pian tämän jälkeen tapahtui tulipesässä voimakas räjähdys. Räjähdyksen aikaan kattilahuoneessa oli kaksi henkilöä, mutta vakavilta henkilövahingoilta vältyttiin.

Pölsin tehtaalla on soodakattilan käyttöturvallisuutta parannettu sittemmin laatimalla suurista vuodoista omat hälytyksensä, jotka tulostuvat omalle sivulleen kattilan automaatiojärjestelmässä, ja järjestämällä operaattoreille vuosittain simulaattorikoulutusta, jossa harjoitellaan myös suurten vuotojen tunnistusta.

On hyvin todennäköistä, että näillä toimenpiteillä voitaisiin parantaa käyttöturvallisuutta myös suomalaisilla tehtailla.

2 JOHDANTO

Tein vuonna 1999 Soodakattilayhdistykselle selvityksen otsikolla ”Kaasuräjähdykset soodakattiloissa vesivuotojen aikana”. Pontimena selvityksen tekoon oli tekemäni havainto, että BLRBAC:n raporteissa säännönmukaisesti räjähdykset luokiteltiin sulavesiräjähdyksiksi, jos räjähdys tapahtui kattilavuodon aikana. Osassa tapauksia vaurioiden sijainti ja paikallaolleiden havainnot viittasivat pikemminkin siihen, että räjähdyksen aiheuttajana oli voimakas kaasupalo.

Näin oli mm. Ruotsissa Vallvikin tehtaalla 1998 tapahtuneessa räjähdyksessä, jossa räjähdystä edelsi tulipesän seinäputken repeäminen. Kattilasuojan laukeamisen jälkeen operaattorit olettivat, että syynä häiriöön oli liian alhainen kuiva-ainepitoisuus, ja yksi operaattoreista meni kattilahuoneeseen ottamaan ruiskuja pois tulipesästä. Vauriosta laaditun raportin mukaan tapahtumat etenivät tämän jälkeen seuraavasti:

> ”Yksi operaattoreista oli alkanut ottaa pois lipeäruiskua länsipuolen seinällä, kun ensimmäinen räjähdys (kaasuräjähdys) tapahtui. Räjähdys suihkautti lipeää visiiriin, siinä kaikki. Operaattori kääntyi ja alkoi mennä portaita alas vanhaan valvomoon, ja suuri räjähdys tapahtui heti sen jälkeen. Räjähdys heitti hänet alas portaita, kattilahuoneessa tuli erittäin kuuma ja haisi palaneelle.”

Operaattorin tekemät havainnot viittaavat siihen, että kattilasuojan laukeamisen jälkeen tulipesään kertyi palavia kaasuja, joiden äkillinen palo sekoitti tulipesän pohjalla olleen sulan ja veden saaden aikaan voimakkaan sulavesiräjähdyksen.

Vuonna 1999 tehty selvitys osoittautui enteelliseksi, sillä vuonna 2001 Kotkassa tapahtui tulipesäräjähdys, joka vaurioiden sijainnin perusteella oli mitä todennäköisimmin kaasuräjähdys. Räjähdystä edelsi tulipesän seinäputken repeäminen kattilan ajaessa normaalia kuormaa ja kattilasuojan laukeaminen tulipesän ylipaineesta. Noin 20 min tämän jälkeen kuului ”isompi tössäys”, joka aukaisi heikon nurkan ja taivutti tulipesän seinät pulleiksi. Räjähdys ei vaurioittanut lainkaan kattilan pohjaa, mikäli olisi hyvin poikkeuksellista sulavesiräjähdykselle.

Vuonna 1999 laatimani selvityksen loppuun olen kirjannut suosituksenomaisesti, että:

> ”Kokemukset tapahtuneista tulipesäräjähdyksistä osoittavat, että käyttöturvallisuuden varmistamiseen vesivuototilanteissa ei ole kaikilta osin kiinnitetty riittävää huomiota. Vastaavien läheltä piti tilanteiden välttäminen jatkossa edellyttää, että operaattoreiden valmiuksia tunnistaa ja paikantaa kattilavuotoja kehitetään niin, että vuodot tulevat selvästi tunnistettua nykyistä aikaisemmin ja tarvittavista toimenpiteistä voidaan päättää ilman, että esim. vuodon paikkaa tarvitsee varmentaa kattilahuoneesta käsin. Mahdollisia keinoja ovat:

- massa-, energia- tai kemikaalitaseiden, vuodon aiheuttaman äänen tai tuhkan kosteuden seurantaan perustuvien vuodonvalvontamenetelmien käyttöönotto
- syöttövesi- ja höyryvirtauksen erosta, höyryvirtauksen laskusta ja/tai kattilan paineen laskusta tulevien hälytysten käyttöönotto
- kattilakohtaisten häiriö- ja suojaohjeiden laadinta.”

Soodakattilayhdistys tilasi minulta vuonna 2001 selvityksen tuolloin käytössä olleista kattilavuotojen valvontamenetelmistä (Kattilavuotojen valvonta ja ohjeistus, raportti 2/2001). Tuolloin Suomessa käytettyjä menetelmiä olivat syöttövesi-höyryeron seuranta ja akustisen emission seuranta. Syöttövesi-höyryerosta käytössä oli hälytys ainoastaan kahdeksassa kattilassa (22:sta). Akustisen emission seuranta oli käytössä yhdeksässä kattilassa. Ulkomailla oli käytössä myös kemikaalitaseen seurantaan perustuvia menetelmiä.

Vuonna 2001 tapahtuneen tulipesäräjähdyksen jälkeen päätettiin Kotkaan hankkia Suomen ensimmäinen erityisesti vuotojen valvontaan suunniteltu järjestelmä. Järjestelmän toimittajana oli allekirjoittanut ja se toimitettiin 2002. Kattilavahdiksi ristitty järjestelmä koostui erillisestä tietokoneesta, joka sai syöttövesi-höyryeron ja kattilaveden fosfaattitaseen seurantaan tarvittavien suureiden tiedot kattilan automaatiojärjestelmästä, ja valvomossa olleesta erillisestä näytöstä, jossa oli operaattoreiden nähtävissä syöttövesi-höyryeron ja kattilavesivuodon trendit ja hälytykset.

Kotkan Kattilavahdin käyttöönottoa seuranneina vuosina on useimmilla tehtailla tehostettu soodakattiloiden tiiveydenvalvontaa parantamalla syöttövesi-höyryeron ja kattilaveden laadun valvontaa. Osalla tehtaista on otettu käyttöön myös kattilaveden fosfaatti- tai silikaattitaseen perusteella toteutettu kattilavesivuodon valvonta.

Tehdyistä parannuksista huolimatta vaarallisia vuotoja, joita ei havaita niin aikaisessa vaiheessa kuin olisi mahdollista, esiintyy yhä. Viimeisin tällainen vuoto oli vuonna 2015 Heinolassa, kun vettä pääsi tulipesään tulipesän seinäputken vaurion seurauksena. Vuoto havaittiin vasta alasajon jälkeen, kun sularänneistä valui vettä. Tilanteesta selvittiin onnekkaasti ilman räjähdystä.

Kattavan kuvan saamiseksi suomalaisten soodakattiloiden tiiveydenvalvonnan nykytilanteesta päätti Soodakattilayhdistys teettää aiheesta kyselyn. Samalla yhdistys päätti selvityttää mitkä ovat tällä hetkellä parhaat käytössä olevat menetelmät Suomen ulkopuolella käytössä olevissa soodakattiloissa. Tähän raporttiin on dokumentoitu em. selvitysten tulokset.

Kiitän Soodakattilayhdistyksen yhdyshenkilöitä sekä Kari Auraa Andritz Oy:stä selvitystä tehdessäni saamastani avusta.

Helsingissä 19.9.2017

Timo Karjunen

3 VUODOT JA TULIPESÄRÄJÄHDYKSET SOODAKATTILOISSA

Mikäli kuuma suolasula ja vesi pääsevät kosketuksiin, voi tapahtua nk. sulavesiräjähdys, jossa vesi höyrystyy nopeasti saaden aikaan voimakkaan paineaallon. Tulipesään tai savukaasukanavaan purkautuva vesi voi myös höyrystyessään estää palavien kaasujen poistumisen tulipesästä. Vuodon seurauksena voi tulipesässä tai savukaasukanavassa tapahtua siten myös kaasuräjähdys tai voimakas palo.

Voimakkain Suomessa tapahtunut soodakattilaräjähdys tapahtui Äänekoskella 1965. Räjähdys tapahtui noin 15 min kattilan verhoputken repeämisen jälkeen. Räjähdyksessä kuolivat ylikonemestari Reino Rönneberg, lämmittäjät Erkki Kolu ja Edward Hyvärinen sekä pillimies Viljo Nieminen, jotka kaikki olivat räjähdyksen sattuessa kattilahuoneessa.

Äänekosken soodakattilaräjähdyksen jälkeen on soodakattiloiden turvallisuutta pyritty parantamaan mm. ottamalla käyttöön kestävämpiä materiaaleja ja tehostamalla kattiloiden kunnonvalvontaa. Pyrkimyksenä on ollut ensi sijassa estää veden pääsy tulipesään ehkäisemällä kattilavuodot, sillä yrityksistä huolimatta mitään varmaa keinoa estää räjähdykset tilanteessa, jossa vesi vuotaa tulipesään, ei ole keksitty. Kattilavuotojen taajuutta onkin saatu laskettua, mutta vuotoja – eikä myöskään tulipesäräjähdyksiä – ole pystytty täysin ehkäisemään.

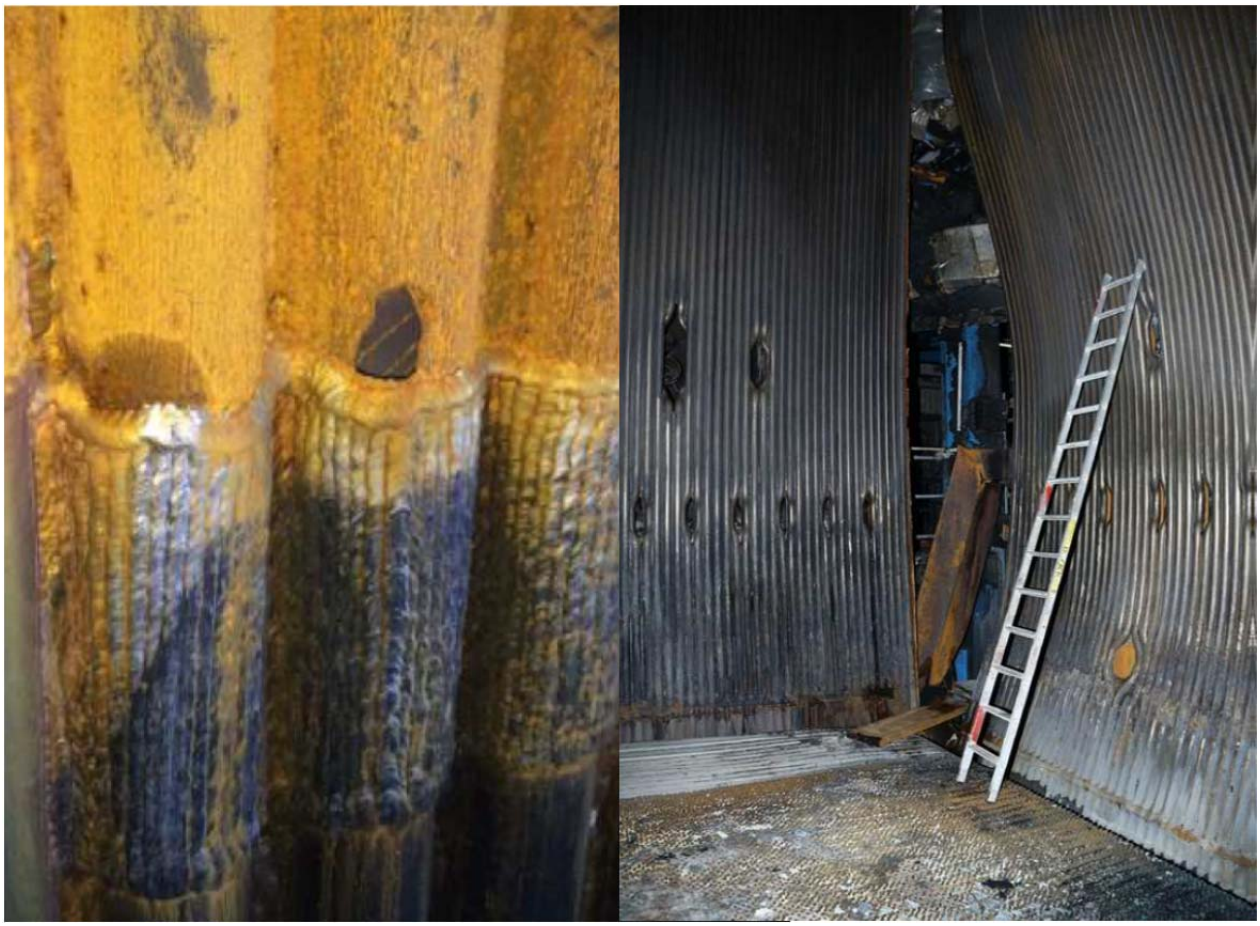
Viimeisimmät vakavat muistutukset soodakattiloiden käyttöön liittyvistä riskeistä saatiin 21.1.2014 Stora Enso Skoghallin tehtaalla Ruotsissa, 23.3.2014 Zellstoff Pölsin tehtaalla Itävallassa ja 26.7.2016 Natron Hayatin Maglajin tehtaalla Bosnia-Hertsegovinassa.

Skoghallin tehtaan soodakattilassa, jonka kapasiteetti on 2200 tKA/vrk, tapahtui voimakas räjähdys, kun kattilaa ajettiin noin 1500 tKA/vrk lipeäkuormassa. Räjähdys tapahtui kaksi tuntia liuottajan hönkäjärjestelmän pesun aloituksen jälkeen. Räjähdyksen seurauksena heikko nurkka aukesi, enimmillään noin 70 millimetriä. Seinien taipumat olivat enimmillään 96 mm. Räjähdyksen seurauksena kattilahuoneeseen purkautui palavia kaasuja niin voimallisesti, että myös osa kattilahuoneen ulkoseinää irtosi niin että osa kaasuista purkautui suoraan ulos (kuva 1). Onneksi räjähdyksen sattuessa ketään ei ollut kattilahuoneessa, joten henkilövahingoilta vältyttiin. Vaurioiden korjaus aiheutti 18 vuorokauden pituisen katkoksen tehtaan tuotannossa. Räjähdyksen syyksi todettiin myöhemmin liuottajan hönkäjärjestelmän tyhjennyslinjojen osittainen tukkeutuminen, jonka seurauksena pesuveden pinta järjestelmässä nousi niin ylös, että vettä kulkeutui tertiääri-ilmakanavan kautta tulipesään.



Kuva 1. Stora Enson Skoghallin tehtaan soodakattila räjähdyksen jälkeen

Zellstoff Pölsin tehtaalla käytössä olleessa soodakattilassa, jonka kapasiteetti oli 2200 tKA/vrk, repesi takaseinän seinäputki tertiääritason yläpuolelta (kuva 2).



Kuvat 2 ja 3. Zellstoff Pölsin tehtaan soodakattilan seinäputken repeämä ja soodakattila räjähdyksen jälkeen

Putken repeämän seurauksena vettä pääsi suoraan tulipesään saaden aikaan voimakkaan räjähdyksen. Räjähdyksen aikana kattilahuoneessa oli kaksi työntekijää, jotka onneksi selvisivät räjähdyksestä vähäisin vammoin. Kattila kärsi pahoja vaurioita. Tulipesän kaikki kulmat aukesivat useiden metrien matkalta, seinät taipuivat voimakkaasti varsinkin tulipesän alaosassa (kuva 3).

Vauriot todettiin niin vakaviksi, että kattila päätettiin rakentaa kokonaan uudelleen. Uusi kattila otettiin käyttöön joulukuussa 2015, joten uudelleenrakennus aiheutti 21 kk pituisen osittaisen käyttökatkon tehtaan toiminnassa. Tänä aikana tehdasta ajettiin käyttäen varalla ollutta pienempikapasiteettista soodakattilaa, jota käyttäen tehtaan tuotanto pystyttiin pitämään hieman alle puolessa aiemmasta selluntuotantokapasiteetista (400 000 t/a).

Natron-Hayatin Maglajin tehtaan soodakattilassa, jonka kapasiteetti oli 600 tKA/vrk, repesi seinäputki lähellä primääri-ilma-aukkoja saaden aikaan kattilasuojan laukeamisen. Pian tämän jälkeen tulipesässä tapahtui räjähdys, jonka seurauksena tulipesän kaksi kulmaa aukesivat. Räjähdyksessä kuoli lämmittäjä, joka räjähdyshetkellä oli katsomassa tulipesään tarkastusluukusta. Muut kattilahuoneessa olleet selvisivät palovammoilla ja ruhjeilla. Kattila vaurioitui räjähdyksessä niin, että kaikki seinät ja tulistimet vaihdettiin. Korjaustyöt aiheuttivat noin 5,5 kuukauden pituisen katkoksen tehtaan toiminnassa.

Yhteistä kaikille neljälle edellä kuvatulle tapaukselle on, että jokaisessa niissä vettä virtasi tulipesään huomattavan paljon.

Äänekoskella todettiin jälkeenpäin, että tulipesän oikeassa seinässä oli noin metrin levyinen kaista, jonka verhoputkesta purkautunut vesi oli pessyt puhtaaksi. Vettä on siten valunut pohjalle samaan tapaan kuin Skoghallissa, jossa vesi valui tertiääri-ilma-aukoista seinää pitkin.

Pölsin ja Maglajin räjähdyksissä vuodon koko on arvioitavissa karkeasti seinäputkiin tulleen aukon alan perusteella. Kuvasta 3 arvioiden Pölsissä repeämän ala oli noin 2,5 cm^2, ja Maglajissa repeämän kooksi arvioitiin 4,5 cm^2. Kokemukset muissa kattiloissa tapahtuneista vuodoista osoittavat, että tällaisissa tapauksissa vuoto tulipesään on huomattavasti yli 10 kg/s.

Nämä kokemukset viittaavat siihen, että voimakas tulipesäräjähdys edellyttää, että tulipesään vuotaa vettä vuolaasti, vähintään useita kiloja sekunnissa, joko putken repeämän tai muuta kautta.

Tätä olettamusta tukevat myös aiemmat kokemukset Pohjoismaissa tapahtuneista voimakkaista soodakattilaräjähdyksistä. Tällaisia räjähdyksiä on tapahtunut Vallvikissa Ruotsissa 1998 seinäputken repeytyessä puolen metrin matkalta, Stora Enson Oulun tehtaalla 1981 verhoputken katkeamisen takia ja Stora 2,Enso Kotkan tehtaalla 2001 seinäputken repeytyessä samaan tapaan kuin Pölsissä.

Vallvikissa räjähdyksen seurauksena kattila kärsi vakavia vaurioita, joiden korjaaminen aiheutti 4 kk pituisen seisokin. Myös Oulussa vauriot olivat huomattavat, etunurkat aukesivat 20 cm, sivuseinät ja sidepalkit taipuivat maksimissaan 25 cm ja kattilan pohjaputket taipuivat yhdeltä nurkalta alaspäin 20 cm. Räjähdys tapahtui 14 min putken katkeamisen jälkeen.

Eniten kokemuksia tulipesäräjähdyksistä on Pohjois-Amerikassa, ja niistä yhteenvedon esitti Tom Grace Soodakattilayhdistyksen 30-vuotisseminaarissa 1994. Esitys kattoi jaksolla 1970 – 1993 tapahtuneet räjähdykset. Esityksessä mm. listattiin räjähdyksen aiheuttaneiden vuotojen koot, sijainnit ja niistä seuranneet vahingot, ks. taulukko 1.

Taulukko 1. Pohjois-Amerikassa 1970 – 1993 tapahtuneiden soodakattilaräjähdysten, joiden syynä oli vuoto painerungossa, aiheuttaneiden vuotojen koot, sijainnit ja vahinkojen voimakkuus

Vuodon koko	Vuodon sijainti	Räjähdyksen voimakkuus		
		Suuri	Kohtalainen	Vähäinen
Suuri	Tulipesän pohja	1	2	0
	Tulipesän seinät	3	5	0
	Tulipesän katto	1	0	0
	Verhoputket	4	2	2
	Keittopinta	0	1	1
	Tulistin	1	0	0
	Yhteensä	**10**	**10**	**3**
Pieni	Tulipesän pohja	1	0	1
	Tulipesän seinät	0	0	4
	Tulipesän katto	0	0	0
	Verhoputket	0	0	0
	Keittopinta	0	0	0
	Tulistin	0	0	0
	Yhteensä	**1**	**0**	**5**

Suurten vuotojen aiheuttamia räjähdyksiä oli 23 ja pienten 6. Pienten vuotojen koot olivat seuraavat:

- pohjaputkivuodot: puolen tuuman särö ja pistemäinen reikä halkaisijaltaan alle 1 mm
- seinäputkivuodot: neulanpäävuoto, puolen tuuman särö, halkaisijaltaan 3 mm reikä ja 3 x 5 mm suuruinen reikä

Ainoa huomattavia vaurioita aiheuttanut pieni vuoto oli pohjaputken puolen tuuman särö. Poikkeuksellista ko. tapauksessa oli, että räjähdys tapahtui 3 h 15 min pikapysäytyksen jälkeen. Pohjalle on todennäköisesti kertynyt vuodon seurauksena vettä pikapysäytyksen jälkeen ja ”alkupanoksena” räjähdykselle on todennäköisesti ollut tulistimista pudonnut kami. Ko. tapauksessa ei kokonaan voida sulkea pois myöskään kaasuräjähdyksen mahdollisuutta.

Suurista vuodoista lähes kaikki olivat puolestaan putken katkoja tai repeämiä, joissa vuotovirtaus on ollut hyvin suuri, selvästi yli 10 kg/s. Tapauksia, joissa vuodon koko on saattanut rajoittaa veden virtaamista tulipesään, olivat ainoastaan seuraavat:

- verhoputkivuoto, ei vaurioita, vuodon koko 5 mm x 25 mm, aikaa kului hetkestä, kun vuoto tunnistettiin, pikapysäytyksen tekoon 25 min
- verhoputkivuoto, suuret vauriot, vuodon koko 10 mm x 37 mm, aikaa kului hetkestä, kun vuoto tunnistettiin, pikapysäytyksen tekoon 3 min
- pohjaputkivuoto, suuret vauriot, vuodon koko 6 mm x 25 mm, vuodon alusta ei tietoa (vuotoa ei tunnistettu eikä pikapysäytystä tehty ennen räjähdystä)

Vuotovirtaus em. tapauksissa on ollut arviolta 8 - 25 kg/s.

Suomessa on tapahtunut 2000-luvulla neljä kattilavuotoa, jotka aiheutuivat (suoraan tai välillisesti) tulipesäräjähdyksen:

- seinäputken repeämä Stora Enso Laminating Paper Oy:n tehtaalla Kotkassa 2001
- tulistinputken katko Metsä Fibren Kemin tehtaalla 2008
- verhoputken vuoto Metsä Fibren tehtaalla Raumalla 2011
- kattoputken repeämä Stora Enson Veitsiluodon tehtaalla 2014

Huomattavia vahinkoja aiheutui ainoastaan Kotkan räjähdyksestä (seisokkiaika 302 h). Kemissä, Raumalla ja Veitsiluodossa vauriot rajoittuivat pääosin heikon nurkan avautumiseen maksimissaan 100 mm ja seinien lievään taipumaan (seisokkiajat 117 h, 85 h ja 82 h).

Kemin tapaus oli poikkeuksellinen, koska räjähdys tapahtui tulistimien vesipesun aikaan noin 18 tuntia pikapysäytyksen jälkeen ja noin tunti tulistimien vesipesun aloituksen jälkeen. Muut tapaukset sitä vastoin vaikuttavat tyypillisiltä: yhteistä kaikille kolmelle vuodolle on, että vuodot olivat huomattavan suuria, luokkaa 20 kg/s tai enemmän.

Edellä esitetyt havainnot tukevat sitä luonnolliselta tuntuvaa oletusta, että vuodon koko ja sijainti vaikuttavat huomattavasti:

- todennäköisyyteen, että vuodosta seuraa räjähdys
- todennäköisyyteen, että räjähdys on tarpeeksi voimakas aiheuttaakseen huomattavia vahinkoja.

Vaarallisimpia ovat suuret vuodot tulipesän seinä-, verho- tai kattoputkissa sekä sellaiset suuret vuodot keittopinnassa, joissa vesi suihkuaa tulipesään. Lähes kaikki vakavia vahinkoja aiheuttaneet tulipesäräjähdykset olivat tällaisten vuotojen aiheuttamia.

Vaarallisista vuodoista ei aina seuraa tulipesäräjähdystä: suomalaisillakin tehtailla on kokemusta esim. suurista seinäputkivuodoista, joista on selvitty ilman vahinkoja.

Suomessa on 2000-luvulla tapahtunut ainakin yhdeksän vuotoa, joissa vettä pääsi tulipesään (taulukko 2). Neljässä tapauksessa kattilan käyttö pysäytettiin pian vuodon alun jälkeen joko operaattorin toimesta tai kattilasuojan laukeamisen takia. Pikatyhjennys tehtiin ainoastaan yhdessä tapauksessa.

Taulukko 2. Vaaralliset vuodot suomalaisissa soodakattiloissa 2000 - 2016

	Tehdas	Vuodon paikka	Pikapysäytys/kattilasuoja	Pikatyhjennys
2000	MF Kaskinen	Verho	Ei kumpaakaan	Ei
2001	Kotkamills	Seinä	Molemmat	Ei
2006	UPM Kaukas	Verho	Pikapysäytys	Kyllä
2007	UPM Tervasaari	Seinä	Ei kumpaakaan	Ei
2011	Stora Enso Imatra	Seinä	Molemmat	Ei
2011	MF Rauma	Verho	Ei kumpaakaan	Ei
2012	MF Rauma	Verho	Ei kumpaakaan	Ei
2014	Stora Enso Veitsiluoto	Katto	Pikapysäytys	Ei
2015	Stora Enso Heinola	Seinä	Ei kumpaakaan	Ei

Ko. jaksolla käyttövuosia kertyi noin 300, joten keskimäärin vaarallisia vuotoja näyttäisi tapahtuvan noin kerran 30 vuodessa.

Tulipesäräjähdys sattui Kotkassa, Raumalla ja Veitsiluodossa, joten räjähdyksiä tapahtui yhdessä tapauksessa kolmesta. Samansuuruiseen arvioon (30 %) räjähdyksen todennäköisyydestä tilanteessa, jossa vettä pääsee tulipesään, päätyi myös Tom Grace vuonna 1994 BLRBAC:n vaurio- ja räjähdystilastojen perusteella.

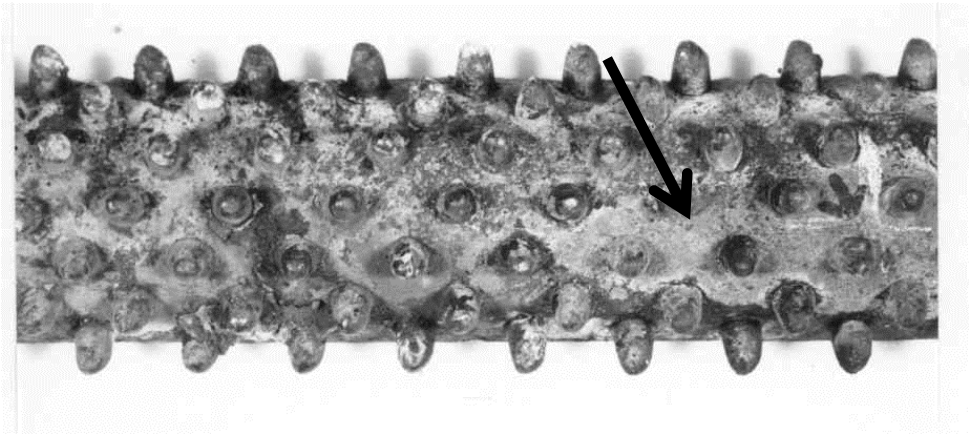
Pienet vuodot näyttäisivät aiheuttavan tulipesäräjähdyksiä sitä vastoin hyvin harvoin. Esim. Suomessa ei ole tapahtunut yhtään pienen vuodon aiheuttamaa tulipesäräjähdystä ainakaan viimeiseen 30 vuoteen.

Osaltaan tähän on myötävaikuttanut se, että Suomessa kattiloita on onnistuttu käyttämään niin, että pohjaputkivuotoja on ollut hyvin harvoin. Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannasta löytyi jaksolta 1986 - 2016 ainoastaan kolme raporttia pohjaputkivuodoista, Oulun B&W:n soodakattilasta vuodelta 1986, Sunilan T-9-kattilasta vuodelta 1987 ja Kaskisten soodakattilasta vuodelta 1997. Kaskisten vuoto havaittiin vesipainekokeen aikana. Oulun ja Sunilan pohjaputkivuodot tapahtuivat käynnin aikana, joten molemmissa tapauksissa kyse oli vaaratilanteesta.

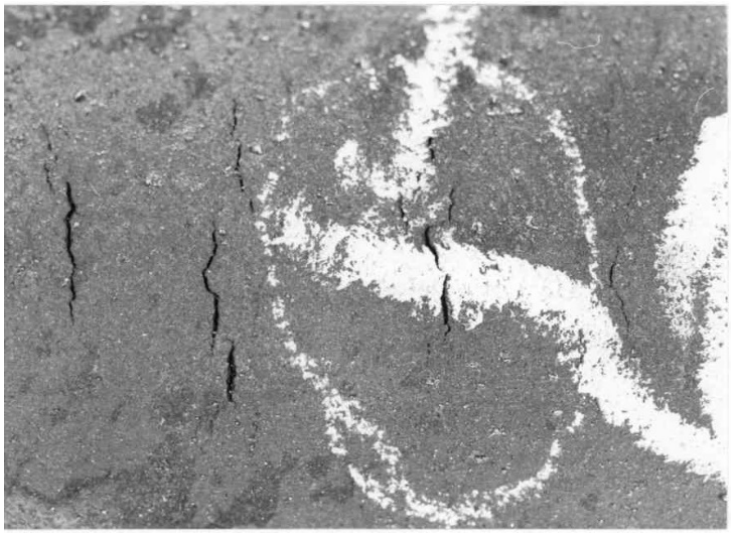
Oulun soodakattilan K-11681 vuodosta laaditussa raportissa on tilanteen kulku kuvattu seuraavasti:

> ”Kattilalta oli lipeänpoltto keskeytyksissä yövuoron alkupuolella 14.12.1986 tulistimien tukkeutumien poistamiseksi. Noin klo 3.50 kuului tulipesästä 2 – 3 jysähdystä ja pesä kävi hetkellisesti ylipaineen puolella. Ajoittain voitiin nähdä tarkastusluukun kohdalla sulan roiskuvan 20 - 30 cm korkealle. Ko. hetkellä oli päällä lipeänpolton lisäksi myös kaksi öljypoltinta. Vuorossa oleva käyttöhenkilökunta lopetti lipeän polton ja ilmoitti asiasta käytönvalvojalle. Äänihavaintojen jälkeen oli kattilalla kaikki olosuhteet normaalit, eikä tarkastuksen perusteella voitu mitään vuotoa siinä paikallistaa. Kattila päätettiin kuitenkin ajaa alas normaalisti perusteellista tarkastusta varten. Kattilan paine laskettiin nopeasti 60 Bar => 32 Bar, ja kun sulan muodostus oli enää vähäistä ja keko oli poltettu lähes pois, niin havaittiin kattilan pohjalta oikean sivuseinän läheltä tulevan pienen höyrysuihkun. Tämän jälkeen lopetettiin öljyn poltto ja siirryttiin hoitamaan paineenlaskua yms. kauko-ohjauspaikalta. Tulipesää jäähdytettiin primääri-ilmalla. Tulistimien ja tulipesän vesipesuun päästiin samana päivänä noin klo 15.30. Noin klo 22 lopetettiin nuohoimilla pesu, jolloin nähtiin hyvin pieni, noin puolen metrin korkeuteen nouseva (staattinen paine) vesisuihku kattilan pohjaputkesta.”

Vuodon syyksi paljastui pieni särö pohjaputkessa, ks. kuvat 4 ja 5.



Kuva 4. Oulun soodakattilan K-11681 pohjaputki vuonna 1986 (vuoto nuolen kohdalla)



Kuva 5. Oulun soodakattilan K-11681 pohjaputken sisäpinta vuonna 1986 (putken läpi edennyt särö kuvassa ympyröitynä)

Sunilan T-9-kattilan vuodosta laaditun raportin mukaan:

> ”12.1.1997 klo 12.20 vuoromestari soitti, että tulisin katsomaan T-9-kattilan takaseinän primääri-ilma-aukkoja kun keskellä seinää on kummallinen kova möykky, joka ei sula. Kattilassa sillä hetkellä ollut yksi lipeäsuutin otettiin ulos ja avattiin vasemmalla sivuseinällä sekundäärikerroksessa oleva kulkuluukku. Heti näkyi selvästi, että keskellä tulipesää takaseinästä eteenpäin m. 0,5 m oli ”tulivuoren” muotoinen n. 1000 - 1200 mm korkea jähmeästä sulasta ja lipeästä muodostunut katkaistu kartio, jonka aukon halkaisija oli noin 400 – 500 mm. Tämä muodostelma oli täynnä vettä, joka kiehui ja aaltoili erittäin voimakkaasti ja roiskui ympärilleen.
>
> Toteamuksen jälkeen heti klo 12.40 suoritettiin keskusvalvomosta käsin pikapysäytys ja kattilahuoneen eteläinen osa, joka katsottiin vaara-alueeksi, tyhjennettiin väestä.
>
> Syöttöveden pumppaus kattilaan keskeytettiin ja kattilan paine laskettiin suurinta sallittua nopeutta. Kattilan annettiin jäähtyä noin 10 tuntia. Tänä aikana vesipinta laski 22 metristä 17 metriin. ”Tulivuori” oli sulanut ja palanut pois ja pohjalla oli vain aukko, joka oli täynnä vettä. Vuoto oli noin 7 mm pitkä poikittainen särö noin 300 mm takaseinästä etuseinään päin.”

Molemmissa tapauksissa vuodon aiheuttaja oli pieni särö, joten voidaan olettaa, että myös vuotovirtaus on ollut pieni, alle 1 kg/s.

Mielenkiintoista edellä kuvatuissa tapauksissa on, että tilanteista selvittiin ilman räjähdystä, vaikka molemmat kattilat ajettiin alas normaaliin tapaan. Pohjois-Amerikassa on raportoitu räjähdys~~kun taas ainoastaan Pohjois-Amerikassa tapahtuneesta räjähdyksessä~~, joka aiheutui pienestä pohjaputken säröstä ja jossa vahinkoja kuvattiin ”laajoiksi”, räjähdys tapahtui yli 3 tuntia pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen aloituksen jälkeen. Toisesta Pohjois-Amerikassa tapahtuneesta pienen pohjaputkivuodon (reikä halkaisijaltaan alle 1 mm) aiheuttamasta räjähdyksestä ei aiheutunut lainkaan vaurioita, pikapysäytyksestä ja -tyhjennyksestä huolimatta.

Kokemukset pienistä pohjaputkivuodoista viittaavat ~~kokemukset~~ siihen, että pienet vuodot myös pohjaputkissa ovat suhteellisen vaarattomia. V~~v~~arsinkin, jos~~kun~~ kattila ajetaan alas normaalisti niin, että keko pysyy kuumana alasajon ajan aina niin kauan kun pohjalla on palavaa materiaalia, ja palamisen loputtua pohja jäähtyy nopeasti.

4 PIENET JA SUURET VUODOT

Edellä on käytetty termejä ”pieni vuoto” ja ”suuri vuoto” tarkentamatta mitä näillä termeillä tarkoitetaan. Tulipesäräjähdysriskin kannalta relevantti määrittely voisi olla seuraava:

- vuoto on pieni, kun vettä purkautuu tulipesään niin vähän, että se haihtuu kaasutilassa eikä sulavesiräjähdyksen vaaraa ole
- vuoto on suuri, kun vettä purkautuu tulipesään niin paljon, että osa siitä putoaa tulipesän pohjalle ja voi siten saada aikaan tulipesäräjähdyksen.

Tällaisen määrittelyn hankaluutena on, että käytännössä vuodon ”pienuus” ja ”suuruus” riippuisi sekä vuodon paikasta että kattilan käyttötilasta. Alhaalla tulipesässä jo 1 kg/s suuruinen vuoto voisi olla ”suuri” varsinkin sen jälkeen kun lipeänpoltto keskeytetään, koska tällöin vettä todennäköisesti pääsee pohjalle saakka. Toisaalta esim. 10 kg/s suuruinen vuoto kattilan yläosassa lipeänpolton aikana olisi ”pieni”, sillä vesi haihtuu matkalla eikä räjähdysvaaraa siten olisi niin kauan kun lipeän polttoa jatketaan.

On myös epäselvää, mitä käytännön hyötyä em. määrittelystä olisi, sillä operaattoreiden voi olla mahdotonta paikantaa vuotoa luotettavasti tulipesän alueella, jolloin edellä kuvatun kaltaista määrittelyä ei voitaisi useimmiten tehdä vuodon aikana.

Onkin selvempää määritellä ”pieni” ja ”suuri” vuoto yksinkertaisesti vuodon koon perusteella niin, että vuoto on ”pieni” kun vuodon aiheuttaa läpiseinän oleva särö tai pieni reikä, kun taas suuressa vuodossa putkessa on virtausalaltaan tyypillisesti useita neliösenttejä oleva repeämä tai aukko.

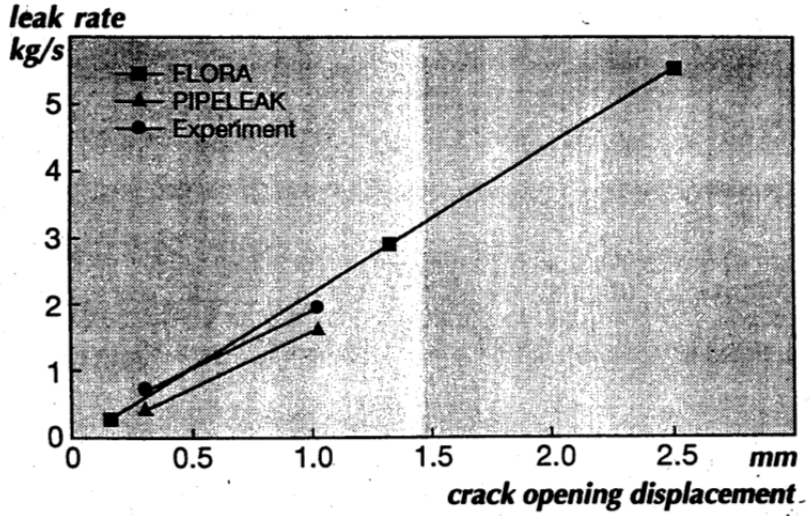
Säröjen aikaansaaman vuodon suuruuteen vaikuttavat monet seikat, kuten

- särön pituus
- särö aukeama
- särön muoto
- pinnan karheus

Luonnollisestikin vuoto on sitä suurempi, mitä suuremmasta säröstä on kysymys, mitä enemmän särö on auki ja mitä suorempia ja sileämpiä ovat särön synnyttämät metallipinnat, joiden välissä vesi virtaa.

Säröjen aikaansaamien vuotojen koon arviointiin on laadittu laskentaohjelmia, mutta tässä tapauksessa riittää, että ”pienelle vuodolle” määritetään realistinen yläraja. Tämä yläraja on määritettävissä kokeellisten tulosten perusteella.

Tarkoitukseen sopiva koe tehtiin 1990-luvun alussa Saksassa. Kokeessa mitattiin vuoto putkesta, jonka halkaisija oli 88,9 mm, seinämänpaksuus oli 5,6 mm ja paine oli 105 bar. Putkeen oli tehty poikittainen särö, jonka pituus oli 100 mm. Putken materiaali oli 1.4571. Materiaalia lukuun ottamatta koeolosuhteet vastasivat siten kohtalaisen hyvin soodakattilan tulipesän putken olosuhteita tilanteessa, jossa putkessa on koko kuuman puolen poikki ulottuva särö. Materiaalilla on vaikutusta lähinnä särön pinnan karheuteen, joka hiiliteräksellä on tavallisesti suurempi kuin austeniittisilla teräksillä. Koetulosta voidaan siten pitää yläarvona vastaavalle vuodolle hiiliteräsputkessa. Kokeessa putkea taivutettiin asteittain niin, että vuodon kokoa voitiin havainnoida sekä putken ollessa suorassa että taivutettuna. Tulokset (yhdessä laskentamallien tulosten kanssa) on esitetty kuvassa 4.



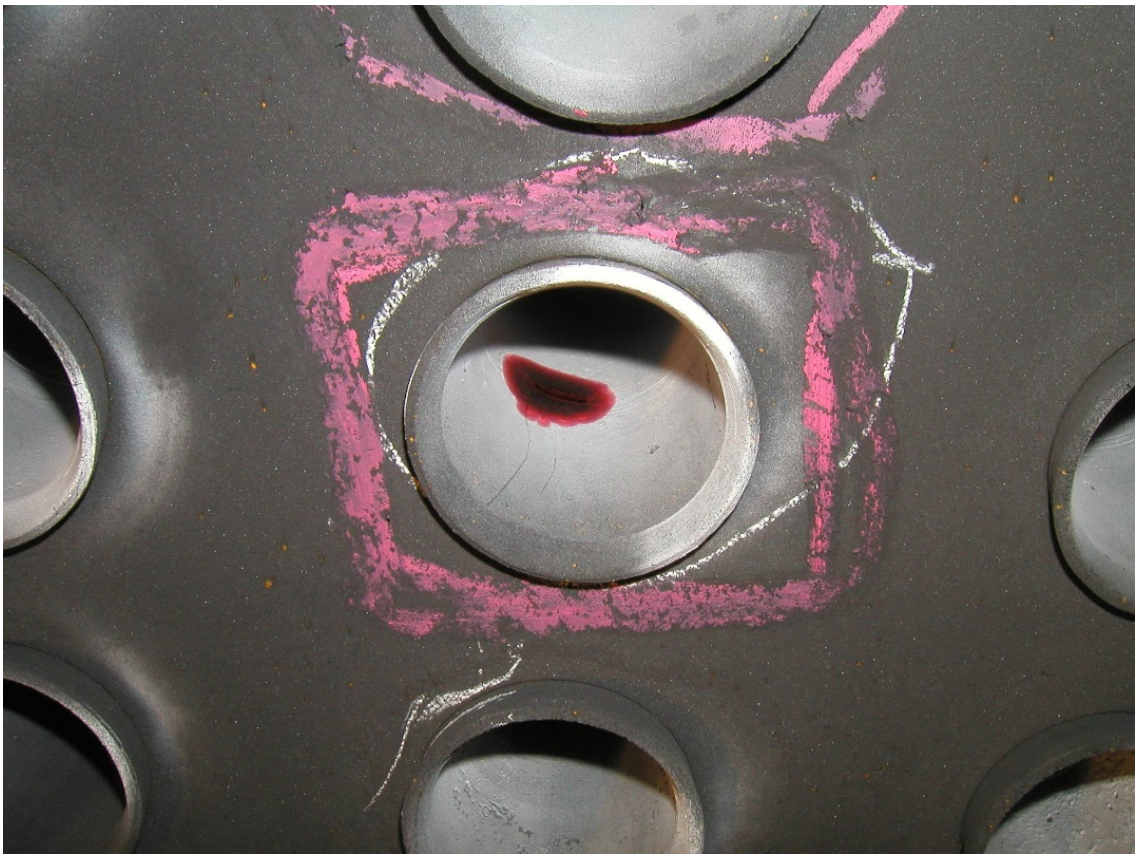
Kuva 6. Vuotovirtaus 88,9 x 5,6 mm putkesta, jossa oli 100 mm pitkä poikittainen särö ja jonka paine oli 105 bar, erilaisilla taivutuksilla [1].

Kuvan 6 tulosten mukaan särön aiheuttama vuoto on korkeintaan luokkaa 0,2 kg/s särön ollessa kiinni, mutta särön avautuessa vuoto kasvaa useisiin kiloihin sekunnissa.

Koetulokset vastaavat hyvin kokemuksia soodakattilavuodoista. Soodakattilayhdistyksen keräämissä vaurioraporteissa on kuvattu useita tilanteita, joissa vuotoa on alettu epäillä, kun syöttövesi-höyryero on 0,2 - 0,3 kg/s. Esimerkkinä tällaista vuodosta on Sunilan soodakattilassa SK10 2004 todettu vuoto, jota koskevan vaurioraportin teksti on seuraava:

> ”Ma 29.3.04 n. klo 07.00 havaittiin vesitasekäyrissä selkeää nousua alkaen su 28.3.04 n. klo 16.00 ollen luokkaa 0,2 - 0,3 kg/s. Kattila normaalilla kuormalla 8,5 l/s (KA 79,5%) höyrystys 33 kg/s. Kattilakierrokset eivät tuoneet esiin mitään vuotoon viittaavaa, toiminta normaalia. Tilannetta seurattiin puolille öin mm. tarkkailemalla suolan laatua kuljettimilla, ei poikkeavaa. Ti 30.3.04 aamulla tutkimuksia jatkettiin ja todettiin tasekäyrissä hienoista nousua ollen nyt luokkaa 0,4 kg/s. Polttoa pienennettiin, nuohous keskeytettiin ja pyrittiin kuuntelemaan miesluukuista mahdollista vuodon aiheuttamaa ääntä. Kohisevan äänen havaittiinkin tulevan jostakin lieriöiden väliltä keittopinnalta. Päätettiin ajaa kattila alas, suoritettiin tarvittavat viranomaisilmoitukset, pienennettiin polttoa edelleen ja suoritettiin pikapysäytys klo 10.54. Ylälieriöllä ja keittopintaputkissa havaittiin puhallusjälkiä mutta vuotokohtaa ei voitu paikantaa. N. klo 20.00 kattilan ollessa paineeton havaittiin alalieriön päällä valuvan vettä, vuotokohtaa ei voinut todeta. Ke 31.3.04 iltapäivällä telinetöiden jälkeen päästiin vuotokohteeseen. Kattilaa hetken täytettyä vettä tuli alalieriön vaipan/keittoputken välistä. Kattilan tyhjennyksen jälkeen alalieriöstä ei kuitenkaan voitu todeta vuotokohtaa. Alalieriön ulkopuolelle vuotoalueelle suihkutettiin purkillinen punaista tunkeumanestevärii, jolloin hetken kuluttua väri tuli läpi putkesta 39H. Vuoto oli ilmeisesti mankelointilaitteen rissan jättämän poikittaisen, terävähkön lopetusjäljen suuntainen n. 12 mm pitkä halkeama n. 10 mm vaipan ulkopinnasta. (Em. terävähköjä jälkiä lienee lähes kaikissa reikäkentän 980:ssä putkissa).”

Kuvassa 7 on ko. putki tunkeumavärin avulla tehdyn vuodon paikannuksen jälkeen.



Kuva 7. Pieni särö keittopinnan putkessa 29.3.2004 Sunilan soodakattilassa SK10

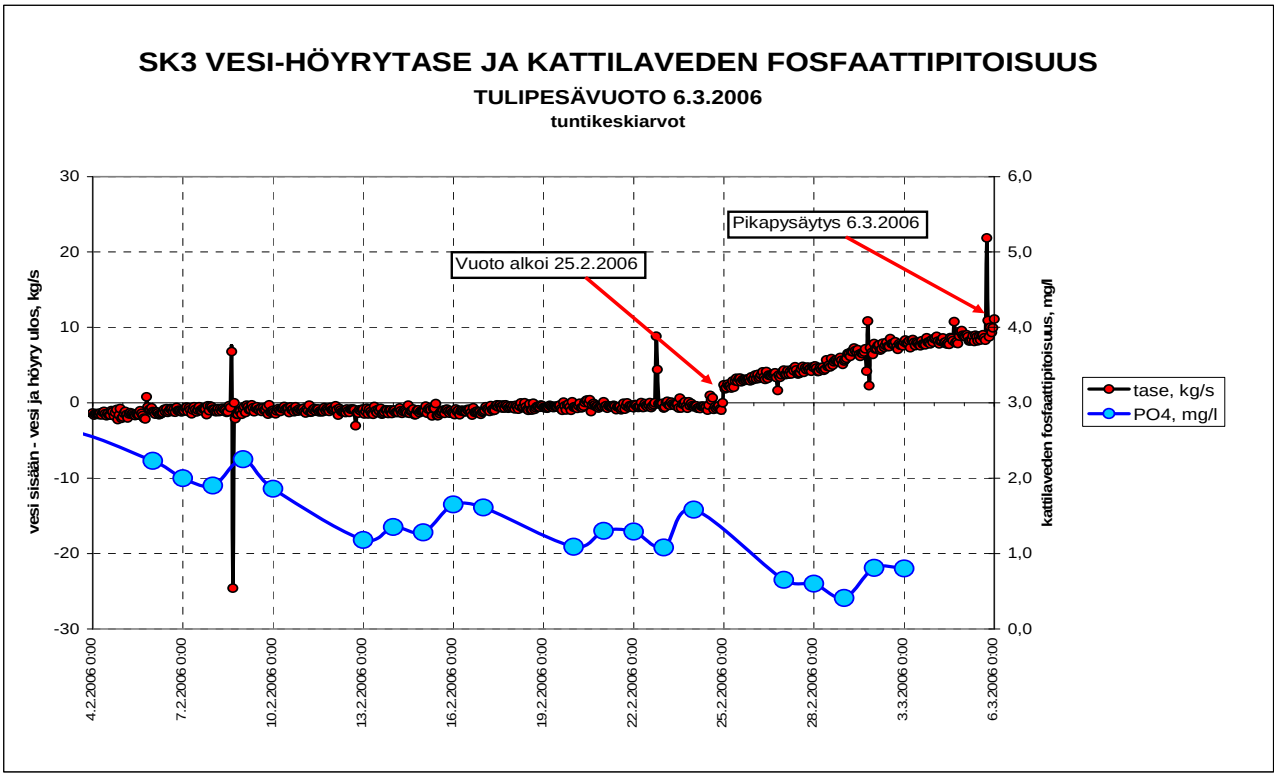
Edellä kuvattu Sunilan vaurio havainnollistaa hyvin miten pieniä vuotoja on mahdollista löytää yksinomaan syöttövesi-höyryeron seurannan perusteella, kun eron laskenta on toteutettu niin, että mittausten kohinan ja lieriön pinnan vaihtelun aiheuttama huojunta on suodatettu pois.

Mikäli Sunilan vuotoa ei olisi havaittu niin nopeasti kuin se ko. tapauksessa havaittiin, olisi vuoto vähitellen kasvanut ja saanut luultavasti aikaan myös vaurioita ympäröivissä putkissa.

Vastaava vaurio UPM Kymmenen Tervasaaren soodakattilassa 1992 johti viereisen putken ohentumiseen niin, että lopulta ko. putkeen repesi 10 x 25 mm suuruinen aukko. Putken repeämisen seurauksena syöttövesivirtaus kasvoi yli 17 kg/s (yli piirturin alueen), mutta lieriön pinta laski tästä huolimatta kattilasuojan laukaisurajan alle, joten kattilasuoja keskeytti lipeän syötön kattilaan. Myös polttoilmapuhaltimet pysähtyivät. Syöttövesipumppu pysäytettiin operaattoreiden toimesta. Tunti ja 15 min kattilasuojan laukeamisen jälkeen tulipesässä tapahtui kaasuräjähdys. Kaikki tulipesän neljä kulmaa aukenivat useiden metrien matkalta. Syynä kaasuräjähdykseen oli, että kattilan kuivakeittosuoja oli laadittu niin, että se esti polttoilmapuhaltimien käytön tulipesän tuulettamiseksi. Räjähdyksestä selvittiin ilman henkilövahinkoja.

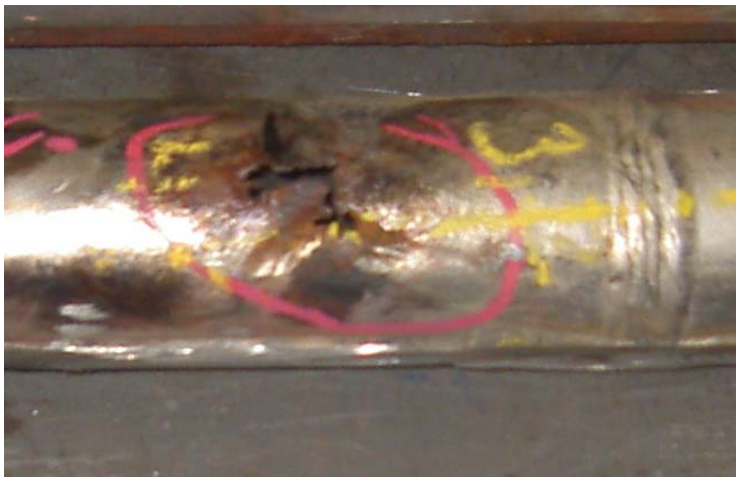
Soodakattilayhdistyksen keräämissä vaurioraporteissa ei yleensä ole kuvattu tarkasti, miten vuoto on kehittynyt, joten kovin selvää kuvaa siitä, miten nopeasti vuodot kasvavat ja miten nopeasti sekundäärisiä vaurioita syntyy, ei ole. Jonkinlainen käsitys on kuitenkin saatavissa tarkastelemalla muutamia yksittäistapauksia, joissa vuodon kehitys on suht tarkkaan tiedossa. Seuraavassa on kuvattu neljä tällaista tapausta.

Ensimmäinen esimerkki on tulipesän seinäputken vuoto UPM Kaukaan soodakattilassa vuonna 2006. Kuvassa 8 on esitetty syöttövesi-höyryeron ja kattilaveden fosfaattipitoisuuden trendit. Kuva on Jukka Savolaisen esitelmästä vuoden 2007 Konemestaripäiviltä.



Kuva 8. Syöttövesi-höyryero ja kattilaveden fosfaattipitoisuus UPM Kaukaalla 4.2. – 6.3.2006

Kuvan 8 tekstin mukaan vuoto alkoi 25.2., jolloin ero kasvoi hyppäyksellisesti noin 3 kg/s. Kuvassa näkyy syöttövesi-höyryerossa pienempi muutos kuitenkin jo 6.2.2006, jolloin syöttövesi-höyryero kasvoi noin 0,5 kg/s. Samaan aikaan myös kattilaveden fosfaattipitoisuus alkoi laskea, joten on todennäköistä, että muutos syöttövesi-höyryerossa on vuodon aikaansaama. Vuoto kasvoi hyvin hitaasti 25.2. saakka, jolloin syöttövesi-höyryeron trendissä näkyy selvä pompsahdus. Tämän jälkeen vuoto kasvoi huomattavasti nopeammin, noin 0,7 kg/s vuorokaudessa, reilun viikon ajan kunnes se oli noin 10 kg/s. Tässä vaiheessa vuoto sai aikaan niin vakavan kiertohäiriön ko. seinäputkessa, että putki ylikuumeni ja repesi compound- ja hiiliteräsputken sauman yläpuolelta (mustalta osalta) 6.3. Ensimmäisen vuodon aiheuttanut vaurio on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. UPM Kaukaan seinäputken alempi vaurio maaliskuussa 2006 (10 m pohjasta)

Ylikuumenemisen aiheuttama repeämä on puolestaan kuvassa 10.



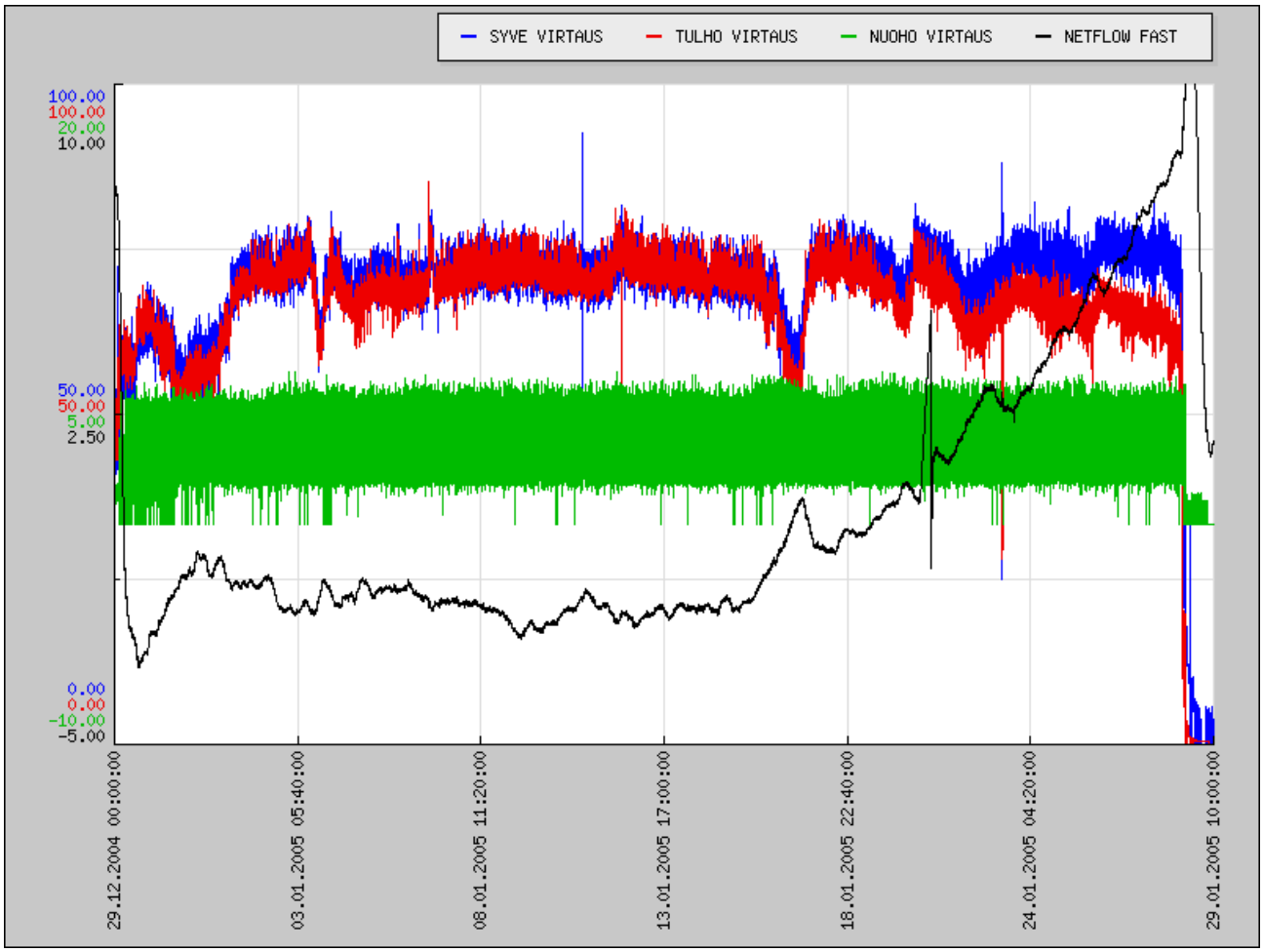
Kuva 10. UPM Kaukaan tulipesän seinäputkivaurio 6.3.2006 (22 m pohjasta)

Seuraava teksti on lainaus Jukka Savolaisen esityksestä Konemestaripäivillä:

> ”Kattilassa oli havaittu kattilaveden fosfaattipitoisuuden laskua ja savukaasupuhaltimien likaantumista muutaman päivän ajan maaliskuun ensimmäisellä viikolla 2006.
>
> Sunnuntaina 5.3.2006 kattilan vesi-höyrytaseen laskenta oli alkanut heitellä. Taselaskenta oli tuolloin reaaliaikainen. Nuohoushöyryn virtausmuutokset ja lieriön pinnansäätö-heilahtelut aiheuttavat taselaskentaan häiriötä niin, että hetkellinen tasearvo heiluu huomattavasti. Tämän vuoksi laskennan hälytysraja oli 10 kg/s. Tämä oli alkanut hälytellä sunnuntaina 5.3.2006 ja asiaa alettiin tutkia. Vuotoa ei oltu ehditty varmistaa, vaikka viimeiset tuntikeskiarvotkin osoittivat (jälkeenpäin tutkittuna) jo 10 kg/s:n eroa.
>
> Yöllä n. 00:55 kattilan vesipinta hävisi lieriöstä ja kattila pysähtyi alapintalukituksesta. Vesipintaa yritettiin ensin saada takaisin syöttövettä lisäämällä, mutta vesi-höyry-taseen eron kasvettua yli 100 kg/s:n ja kun kattilan tulipesästä alkoi kuulua jymähtelyä, tehtiin pikapysäytys ja pikatyhjennys. Kattila tyhjeni suunnitellusti noin 20 minuutissa päälaskuputkien pikatyhjennysputkien tasolle eli n. 2,5 metriin (pohjasta) asti. Kattilalta ei valvomoon asti kuulunut enää jymähtelyä. Kattilahuoneessa liikkumisesta pitäydyttiin 10 tuntia pikapysäytyksestä.”

Putken repeämisestä selvittiin Kaukaalla ilman tulipesäräjähdystä, joka olisi aiheuttanut merkittäviä vaurioita.

Toinen esimerkki vuodon kehittymisestä on Stora Enson Veitsiluodon tehtaalta tammikuusta 2005. Kuvassa 11 on esitetty syöttövesi-höyryeron, syöttöveden, höyryn ja nuohoushöyryn trendit 29.12.2004 – 29.1.2005.



Kuva 11. Syöttöveden, höyryn, nuohoushöyryn ja syöttövesi-höyryeron trendit Stora Enson Veitsiluodon tehtaan soodakattilassa 29.12.2004 – 29.1.2005

Syöttövesi-höyryeron trendin perusteella arvioiden vuoto alkoi 15. - 16.1., jolloin ero kasvoi noin 1,0 kg/s verran. Vuoto kasvoi 18. – 24.1. noin 0,8 kg/s vuorokaudessa, jonka jälkeen kasvu nopeutui ollen loppujakson noin 1,1 kg/s vuorokaudessa. Ennen alasajo vuoto oli noin 10 kg/s.

Vuoto paikannettiin 27.1. ekonomaiseriin tuhkan kosteuden perusteella, ja tämän jälkeen tehtiin päätös kattilan ajamisesta alas. Vuoto sijaitsi aivan ekonomaiserin yläosassa, joten tarvittiin huomattavan suuri vuoto, jotta edes osa vedestä selvisi haihtumatta tuhkakuljettimille saakka.

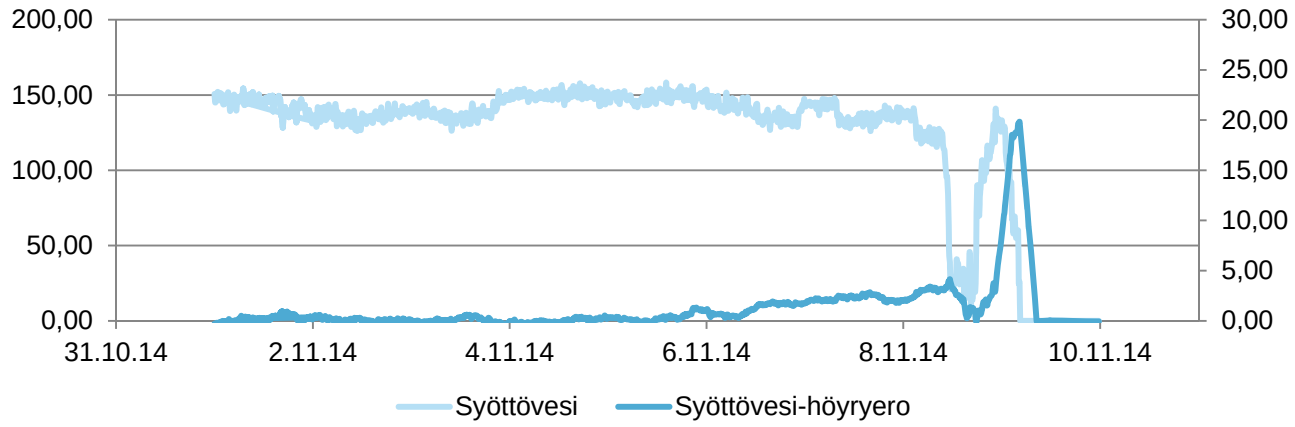
Kolmas esimerkki on suuresta vuodosta tulipesän seinäputkessa aasialaisessa soodakattilassa vuonna 2014, kuvat 12 ja 13. Seinäputkesta oli revennyt pala, kuten kuvasta 13 näkyy.





Kuvat 12 ja 13. Suuri vuoto aasialaisen soodakattilan seinäputkessa sekä lähikuva vaurioituneesta seinäputkesta

Vaikka kyse on putken repeämästä, on todennäköistä, että tässäkin tapauksessa repeämistä edelsi hitaasti kasvanut pieni vuoto. Tähän viittaa syöttövesi-höyryeron trendi vuotoa edeltäneeltä jaksolta, kuva 14.



Kuva 14. Syöttövesivirtaus (kg/s) ja syöttövesi-höyryero (kg/s) 31.10. – 10.11.2014 aasialaisessa soodakattilassa

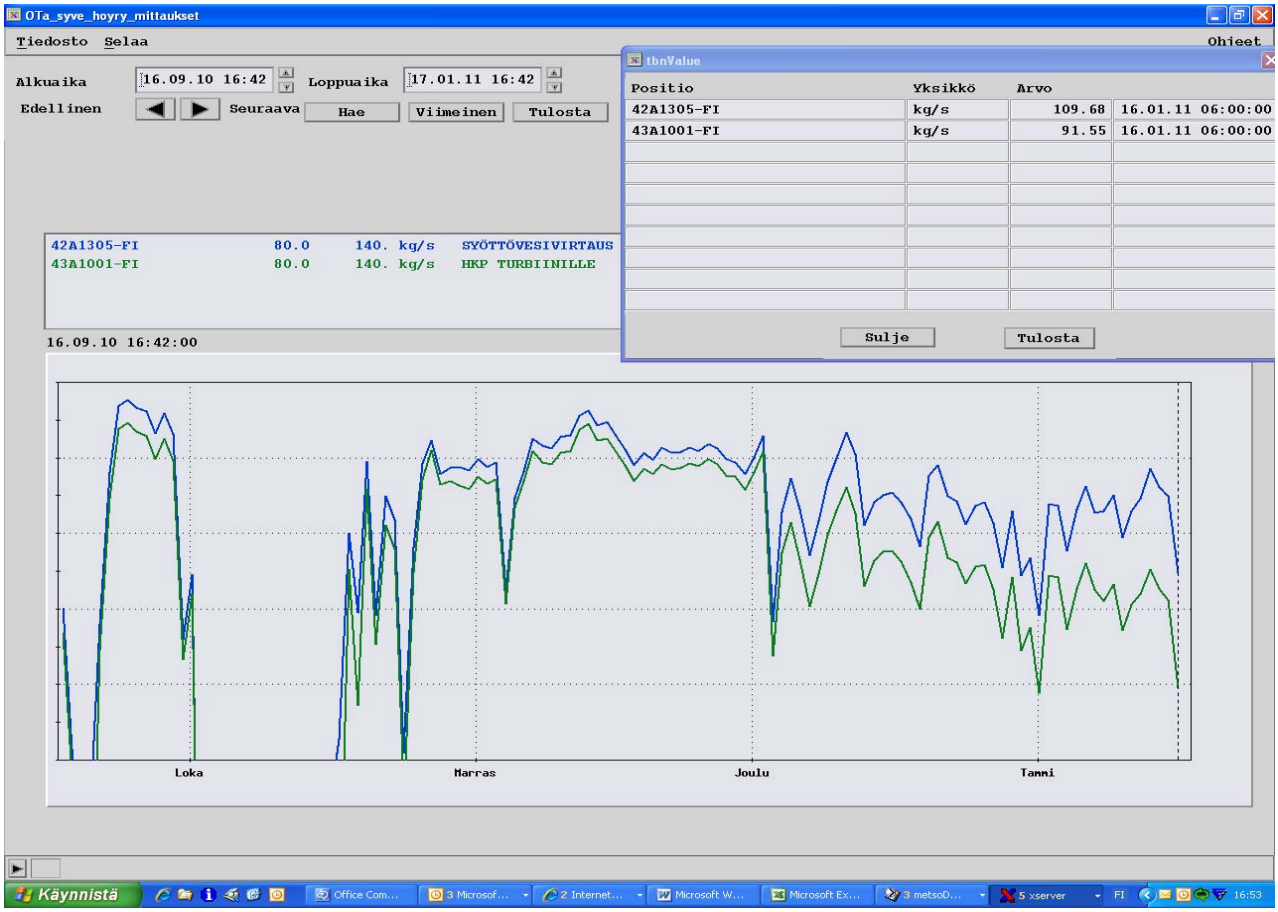
Syöttövesi-höyryeron mukaan kattilan seinäputkeen tuli pieni vuoto hieman ennen puoltapäivää 6.11., jolloin ero kasvoi noin 1,5 kg/s. Ero kasvoi kaksinkertaiseksi kahden seuraavan vuorokauden aikana. Kattilan kuorma laski 8.11. kun lipeän poltto katkaisiin noin kahdeksan tunnin ajaksi. Varsinainen repeämä tapahtui neljä tuntia sen jälkeen kun lipeän poltto oli aloitettu uudelleen ja kattila oli taas täydessä kuormassa. Repeämän seurauksena syöttövesi-höyryero kasvoi arvosta 3,3 kg/s arvoon 20 kg/s. Kattilassa oli siten pieni vuoto 2,5 vuorokauden ajan ennen repeämää.

Neljäs esimerkki on verhoputken vaurio MF Rauman soodakattilassa tammikuussa 2011, kuva 15. Vauriota koskeva raportti on päivätty 17.2.2011.



Kuva 15. Verhoputkivuoto MF Rauman soodakattilassa 2011

Syöttövesi- ja höyrytrendit jaksolta 16.9.2010 – 16.1.2011 esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Syöttöveden ja höyryn trendit MF Rauman soodakattilassa 16.9.2010 – 16.1.2011.

Trendien perusteella näyttäisi syöttövesi-höyryero olleen Raumalla ennen joulukuuta 2010 noin 2,5 kg/s, mutta joulukuun alussa tapahtuneen kuormanpudotuksen yhteydessä ero näyttää pompsahtavan arvoon 6,4 kg/s eli kasvua on noin 4 kg/s verran. Tämän jälkeen vuoto kasvoi tasaisesti lähes 1,5 kk ajan ollen 16.1. noin 15,6 kg/s. Vuoto kasvoi noin 0,35 kg/s vuorokaudessa.

Raumalla vuoto havaittiin, kun verhoputken vuoto suuntautui verhojen läpivientiin ja muurauksen syöpyessä vuoto näkyi kattilan ulkopuolella. Vaurion aiheuttaja oli kattoon ja tulistimiin muodostunut suolakami, joka pudotessaan rikkoi elementtien 15 ja 16 putkia. Elementin 15 ylimmässä putkessa alapuolinen evä oli painunut putken sisään ja aiheuttanut vuodon. Vuotosuihku oli osunut viereiseen elementtiin 14 kuluttaen reiän toiseksi ylimpään putkeen.

Kun kattila ajettiin alas, tapahtui noin 1,5 tuntia öljytulien sammuttamisen jälkeen tulipesäräjähdys, jonka seurauksena kattilan heikko nurkka aukesi. Valvomohenkilökunnan mukaan todennäköinen räjähdyksen aiheuttaja oli tulistimista pudonnut kami, joka rikkoi jäähtyneen suolapedin kuoren niin, että vesi ja kuuma sula pääsivät kosketuksiin. Tätä tukee se, että tulipesäkameran kuvassa näkyi kirkkaampia ”säkenöiviä palloja”.

Vauriomekanismit, jotka saivat aikaan vuodot em. tapauksissa, olivat huomattavan erilaisia. Kaukaalla ensimmäisen vuodon syynä oli sisäpuolinen korroosio ja toisen ylikuumenemisen aiheuttama viruminen. Veitsiluodossa vuodon syynä oli todennäköisesti väsymisen ja korroosion aiheuttama säröytyminen. Aasialaisessa soodakattilassa puolestaan syynä luultavasti oli, Kaukaan tapaan, sisäpuolinen korroosio, mutta Kaukaan tapauksesta poiketen korroosion aiheuttama vetyhaurastuminen oli niin voimakasta, että putkesta repesi pala. Raumalla puolestaan vaurion aiheutti mekaaninen isku putkeen ja putken painuminen kasaan. Erilaisista perussyistä huolimatta kaikki vuodot alkoivat säröinä, joiden aikaan saama vuoto oli 0,5 - 2,5 kg/s, eli juuri samaa luokkaa kuin vuotokokeessa.

Kuten olettaa sopii, nopeuteen, jolla särö kasvoi, vaikutti em. tapauksissa putken kunto. Särön eteneminen ja vuodon kasvu olivat nopeimpia aasialaisessa soodakattilassa, jossa putkimateriaali oli heikentynyt sisäpuolisen korroosion takia eniten. Tällöinkin vuodon kasvuun suureen vuotoon saakka aikaa kului muutamia päiviä.

Em. tapausten valossa näyttäisi siltä, että ainoat vauriomekanismit, jotka voi saada aikaiseksi äkillisen suuren vuodon, on putken puhkeaminen ylikuumenemisen aiheuttaman virumisen tai korroosion tai mekaanisen kulumisen aiheuttaman seinämän ohentumisen takia.

Muissa tapauksissa, joita voidaan olettaa olevan suurin osa kaikista vuodoista, vuoto alkaa pienenä särönä ja kestää useita päiviä tai jopa viikkoja tai kuukausia, ennen kuin vuoto kasvaa suureksi vuodoksi tai saa aikaiseksi suuren vuodon ko. putken tai naapuriputken repeämän takia.

Jonkinlainen käsitys siitä, miten suureen osaan vuodoista ja räjähdyksistä on mahdollista vaikuttaa kattiloiden tiiveydenvalvontaa tehostamalla, on saatavissa tarkastelemalla Tom Gracen tekemää yhteenvetoa Pohjois-Amerikassa 1970 – 93 tapahtuneista tulipesäräjähdysten syistä, taulukko 3.

Taulukko 3. Pohjois-Amerikassa vuosina 1970 – 93 tapahtuneiden soodakattilaräjähdysten aiheuttaneiden painerungon vuotojen syyt [2, 3]

Syy	Tapaukset	Osuus
Ylikuumeneminen – syy tuntematon/tukkeutuminen/matala pinta lieriössä	13	43 %
Puutteellinen hitsaus	7	23 %
Korroosio (irronnut pinnoite, jännityskorroosio, väsymiskorroosio, yms.)	5	17 %
Mekaaninen vaurio (suolakamin putoaminen tms.)	2	7 %
Pienen vuodon aiheuttama eroosio	1	3 %
Kylmän puolen korroosion aiheuttama murtuma	1	3 %
Nuohoimen aiheuttama eroosio/korroosio	1	3 %

Suurin osa, ellei kaikki, puutteellisen hitsauksen, korroosion ja pienen vuodon aiheuttamasta eroosiosta seurannaista vuodoista alkoivat todennäköisesti pienestä säröstä. Lisäksi osa

ylikuumenemisen tai mekaanisen vaurion aiheuttamista vuodoista on saattanut olla samanlaisia kuin Kaukaan 2006 seinäputkivaurio tai Rauman verhoputkivaurio, joissa molemmissa vuoto oli aluksi pieni. Voidaankin arvioida, että huomattava osuus, karkeasti arvioiden noin 50 %, 1970 – 93 tapahtuneista tulipesäräjähdyksistä olisi voinut olla estettävissä tehokkaalla vuodonvalvonnalla.

Suomessa äkillisiä vuotoja ovat taulukossa 2 esitetyistä tapauksista Sunilassa, Kotkassa ja Imatralla tapahtuneet vuodot, kun taas muissa tapauksissa vauriot etenivät suhteellisen hitaasti. Tehokkaasta vuotojen valvonnasta olisi siten voinut olla apua noin 70 % vaarallisista vuodoista.

Edellä kuvatut arviot ovat suuntaa-antavia, mutta suunta on selvä: huomattava osa suurista vuodoista, joita soodakattiloissa on vuosien saatossa tapahtunut, olisi voitu estää, jos vuodot olisi havaittu jo siinä vaiheessa, kun ne olivat pieniä. Kaikkia suuria vuotoja ei kuitenkaan voida estää ennalta edes tehokkaalla tiiveydenvalvonnalla, joten myös niihin on syytä varautua. Tämän vuoksi on seuraavissa kappaleissa käsitelty sekä pieniin että suuriin vuotoihin varautumista.

5 PIENTEN VUOTOJEN VALVONTA

Tulipesäräjähdyksistä saadut kokemukset viittaavat siihen, että tulipesäräjähdysten riskiä voidaan pienentää merkittävästi havaitsemalla vuodot, jotka ovat säröjen aiheuttamia, niin että kattilan alasajo voidaan toteuttaa 1 – 2 vuorokauden kuluessa vuodon alusta. Tällöin kattila ehditään todennäköisesti ajaa alas tilanteessa, jossa tulipesään vuotaa vettä vielä suhteellisen vähän, ja tilanne on tällöin huomattavasti vähemmän vaarallinen kuin jos alasajoon jouduttaisiin tilanteessa, jossa vuoto on jo edennyt suureen vuotoon saakka.

Seuraava kysymys kuuluu: onko tämä mahdollista?

Voidaanko soodakattilan tiiveyttä valvoa niin tarkasti, että säröjen aiheuttamat vesivuoto tulipesässä, verhoissa tai keittopinnassa ovat havaittavissa viimeistään vuorokauden kuluessa vuodon alusta?

Tähän kysymykseen haetaan vastausta tässä kappaleessa käymällä läpi kattiloiden tiiveydenvalvontaan kehitettyjä järjestelmiä ja niistä saatuja käyttökokemuksia.

5.1 Massataseen seurantaan perustuvat järjestelmät

Kattilan tiiveyden valvonta massataseen perusteella perustuu siihen yksinkertaiseen periaatteeseen, että tarpeeksi pitkällä aikajaksolla kattilaan syötetyn vesimäärän täytyy olla yhtä suuri kuin kattilasta poistuneen veden ja höyryn määrän, koska ainetta ei synny eikä häviä kattilassa. Sopivaa tarkastelujaksoa käytettäessä lieriön pinnan ja kattilan vesimäärän vaihtelut kumoavat toisensa, joten niitä ei tarvitse huomioida tasetarkastelussa. Mikäli tase osoittaa, että vettä kuitenkin häviää, on syytä epäillä vuotoa.

Vuotovirtaus saadaan massataseesta:

vuotovirtaus = syöttövesivirtaus - höyryvirtaus - nuohoushöyryvirtaus - ulospuhallus

Taseeseen saattaa kuulua myös esim. ruiskutusvesivirtaus.

Määräävät termit ovat yleensä syöttövesivirtaus ja höyryvirtaus, ja näin saatua vuotovirtausta kutsutaankin yleisesti syöttövesi-höyryeroksi.

Virtausmittaukset eivät yleensä ole absoluuttisen tarkkoja, joten em. yhtälön antama vuotovirtaus poikkeaa nollasta suodatuksen jälkeenkin usein silloinkin, kun kattila on tiivis. Ero voidaan sovittaa nollaksi käyttämällä sovitteena vuotovirtauksen pitkän ajankeskiarvoa.

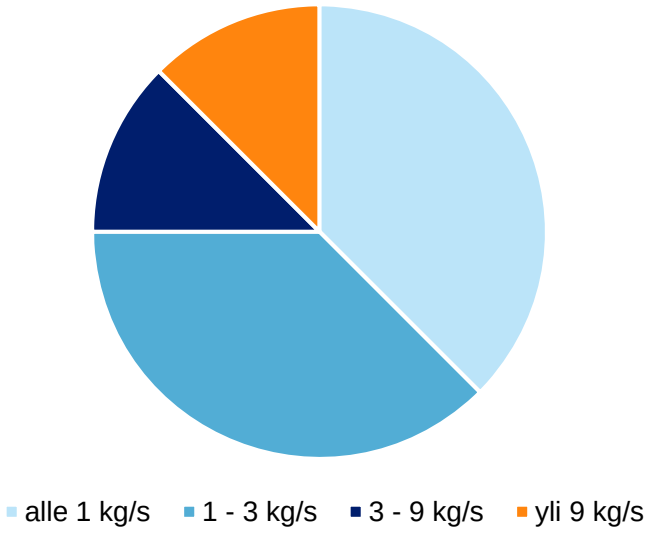
Koska vuotovirtaus lasketaan yhtälöstä, jossa ei yleensä ole mukana kattilan vesitilavuus, on vuotovirtauksella taipumus kasvaa kattilan kuorman pudotessa. Kuorman putoamisen seurauksena höyryntuotto kattilassa vähenee, jolloin höyryn määrä kattilassa kiertävässä virtauksessa pienenee. Tämän seurauksena lieriön pinta pyrkii laskemaan, ja pinnan säätö reagoi tähän lisäämällä syöttöveden virtausta. Syöttövesi-höyryero käy tässä tilanteessa normaalia suurempana, mutta palaa pian takaisin lähelle nollaa, kun kattilan kuorma tasaantuu, joten trendiä seuraamalla on helposti havaittavissa, että kyse ei ole vuodosta. Ajoittaiset hypähdykset ylöspäin ovat kuitenkin ei-toivottavia, sillä ne voivat aiheuttaa tarpeettomia hälytyksiä. Mikäli tällaisia hälytyksiä tapahtuu usein, kasvaa riski, että hälytys jää huomiotta myös silloin kun se aiheutuu todellisesta kattilavuodosta.

Kuorman muutosten aiheuttamaa syöttövesi-höyryeron huojuntaa voidaan hillitä huomioimalla laskennassa kuorman muutostilanteet ja/tai lisäämällä hälytyksiin viiveitä.

Syöttövesi-höyryeron laskentatapa vaihtelee tehtaittain. Yksinkertaisimmillaan laskenta on tehty käyttäen suoraan mittausdataa ja suodattamalla tulosta niin, että tulos vaihtelee esim. ± 5 kg/s verran. Lopputuloksena voi olla tällöin syöttövesi-höyryero, jonka suuruus normaalisti on keskimäärin + 8 kg/s, mutta joka huojuu jatkuvasti välillä 3 kg/s – 12 kg/s. Suuren huojunnan takia hälytysraja joudutaan asettamaan korkealle, esim. arvoon +18 kg/s, joten hälytys aktivoituu vasta kun vuoto on yli 10 kg/s. Hälytys toimii tällöin käytännössä suuren kattilavuodon hälytyksenä. Syöttövesi-höyryero ei tällöin indikoi pientä vuotoa (trendimuutokset jäävät suurella todennäköisyydellä havaitsematta) eikä se siten auta suurten vuotojen ennaltaehkäisyssä.

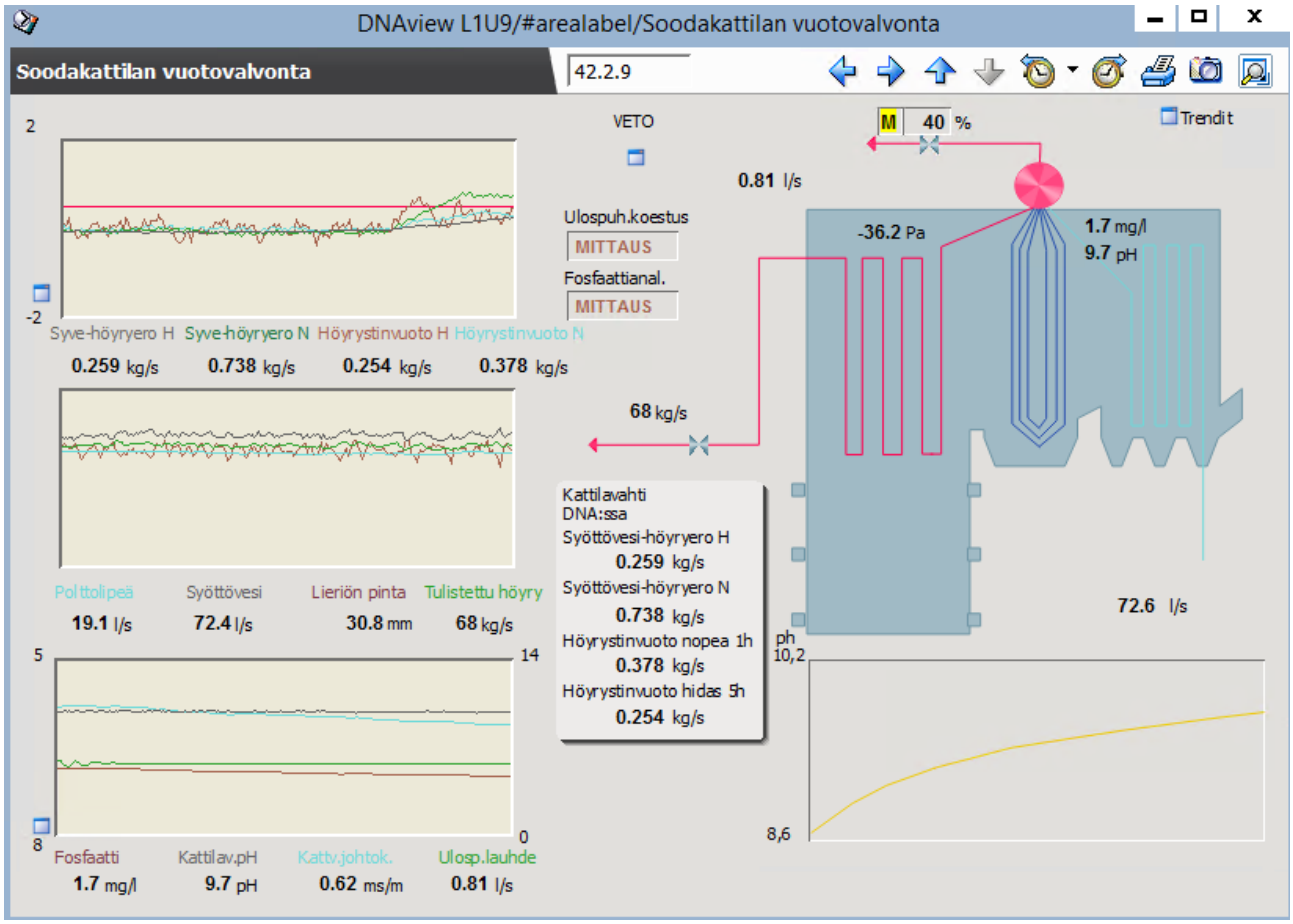
Osassa tehtaita syöttövesi-höyryeron laskenta on toteutettu niin, että ero on saatu asettumaan normaalitilanteessa lähelle 0 kg/s ja huojunta on niin vähäistä, että eron seurannan avulla voidaan havaita huomattavasti pienemmätkin vuodot.

Tehtaille lähetettyyn kyselyyn saatujen vastausten perusteella näin on tehty tätä nykyä suurimmassa osassa tehtaita. Vastausten mukaan 75 % tehtaista syöttövesi-höyryeron seurannan avulla voidaan havaita vuodot, jotka ovat alle 1 kg/s tai 1 – 3 kg/s, kuva 17.



Kuva 17. Syöttövesi-höyryeron avulla havaittavat vuodot Suomen soodakattiloilla

Esimerkiksi Veitsiluodon tehtaalla syöttövesi-höyryeron seuranta on järjestetty niin, että erosta saadaan hälytys, kun ero ylittää 0,5 kg/s. Hälytyksen toiminta on testattavissa jäädyttämällä ulospuhalluksen arvo automaatiojärjestelmässä ja avaamalla ulospuhalluksen säätöventtiili, jolloin ulospuhalluksen lisäyksen tulisi näkyä syöttövesi-höyryeron kasvuna. Kuvassa 18 on esitetty näin toteutetun testin tulokset.



Kuva 18. Syöttövesi-höyryeron testaus Veitsiluodon soodakattilassa (tilanne testin päätyttyä)

Verrattuna tilanteeseen vuonna 2001 on syöttövesi-höyryeron käytössä tapahtunut selvää edistystä.

Syöttövesi-höyryeron seurannan tarkkuus on parantunut huomattavasti. Vuonna 2001 ainoastaan muutamalla tehtaalla arvioitiin seurannan avulla voitavan tunnistaa 1 – 2 kg/s suuruiset vuodot. Osuus oli vain noin 10 % kaikista kattiloista. Nyt tähän tarkkuuteen arvioitiin päästävän yhdeksässä kattilassa eli yli puolessa kattiloista.

Vuonna 2001 jatkuva syöttövesi-höyryeron seuranta oli käytössä 16:ssa kattilassa 22:sta kattilasta, mutta hälytyksiä käytössä oli vain kahdeksassa kattilassa, kun nyt Soodakattilayhdistyksen yhteyshenkilöille tehdyn kyselyn perusteella seuranta ja hälytykset olivat käytössä yhtä vaille kaikissa.

Syöttövesi-höyryeron seuranta on tehtailla laadittu joko tehtaan automaatiosta vastaavien tai Valmet Automaation toimesta.

Valmetin laatimia seurantoja oli käytössä Veitsiluodon, Rauman ja Äänekosken tehtailla. Hälytysrajat ko. seurannoissa olivat 0,5 – 1 kg/s. Kaikissa järjestelmissä on järjestetty myös mahdollisuus eron testaukseen.

Erinomaiseen erotustarkkuuteen päästään myös Joutsenon, Sunilan ja Varkauden kattiloissa, joissa tehtaan henkilökunnan arvion mukaan havaittavissa ovat vuodot, joiden koko on selvästi alle 1 kg/s. Sunilassa seuranta perustuu trendien säännölliseen läpikäyntiin lähes päivittäin. Varkaudessa erotustarkkuutta ylläpidetään virtausmittausten säännöllisellä kalibroinnilla.

5.2 Kattilan höyrystinosan tiiveyden valvonta kattilaveden laadun seurannan avulla

Kattilavesivuodon valvonta kattilaveden fosfaattipitoisuuden tai johtokyvyn alarajahälytysten avulla

Kun syöttöveteen lisätä merkkiainetta, joka ei kulkeudu höyryn mukana, voidaan kattilan höyrystinosan (tulipesän, verhojen ja keittopinnan) tiiveyttä valvoa seuraamalla ko. merkkiaineen pitoisuutta kattilavedessä. Käytännössä merkkiaine voi olla esim. fosfaatti, jonka pitoisuutta kattilavedessä voidaan seurata jatkuvatoimisella analysaattorilla ja laboratoriomäärityksin.

Kattilavuotojen valvonta voidaan toteuttaa hyvin yksinkertaisin menetelmin, kun merkkiainetta annostellaan kattilaan aina suhteessa ulospuhallusvirtaukseen. Tällöin merkkiaineen pitoisuus kattilavedessä on likimain vakio, kun kattilan höyrystinosa on tiivis. Vuodolla esim. keittopinnassa on tällöin samanlainen vaikutus kuin ulospuhalluksen lisäykselle, eli se johtaa merkkiaineen pitoisuuden laskuun kattilavedessä. Jos esimerkiksi kattilan höyrystinosaan tulee yhtä suuri vuoto kuin kattilan ulospuhallus, kun fosfaatin annostelu ja ulospuhallus on sovitettu niin, että fosfaattipitoisuus on 3 mg/l ja kattilaveden johtokyky on noin 20 µS/cm, laskee fosfaattipitoisuus vuodon seurauksena arvoon 1,5 mg/l ja johtokyky arvoon 13 µS/cm (johtokyky ei laske puoleen, koska johtokykyyn vaikuttaa myös syöttövesikemikaalien pitoisuus, joka ei muutu ulospuhalluksen lisäyksen tai vuodon seurauksena yhtä paljon kuin esim. fosfaatin pitoisuus).

Kun merkkiaineena käytetään fosfaattia ja fosfaatin pitoisuutta kattilavedessä seurataan jatkuvatoimisella analysaattorilla tai päivittäin tehtävillä määrityksellä, voidaan kattilaveden fosfaattipitoisuudelle asettaa alarajahälytys. Kun fosfaattipitoisuus laskee alarajaan, on syytä epäillä vuotoa kattilan höyrystinosassa, jos annostelu toimii normaalisti eikä ulospuhallusta on lisätty normaalia suuremmaksi. Tällöin fosfaattipitoisuuden lasku kattilavedessä kielii vuodosta kattilan höyrystimessä, kuten esim. kuvassa 8.

Edellä kuvatun menetelmän etuna on yksinkertaisuus: mitään varsinaista laskentaa ei tarvita, vaan vuodon tunnistukseen riittää yksin kattilaveden johtokyvyn tai fosfaattipitoisuuden seuranta.

Haittapuolia on useita:

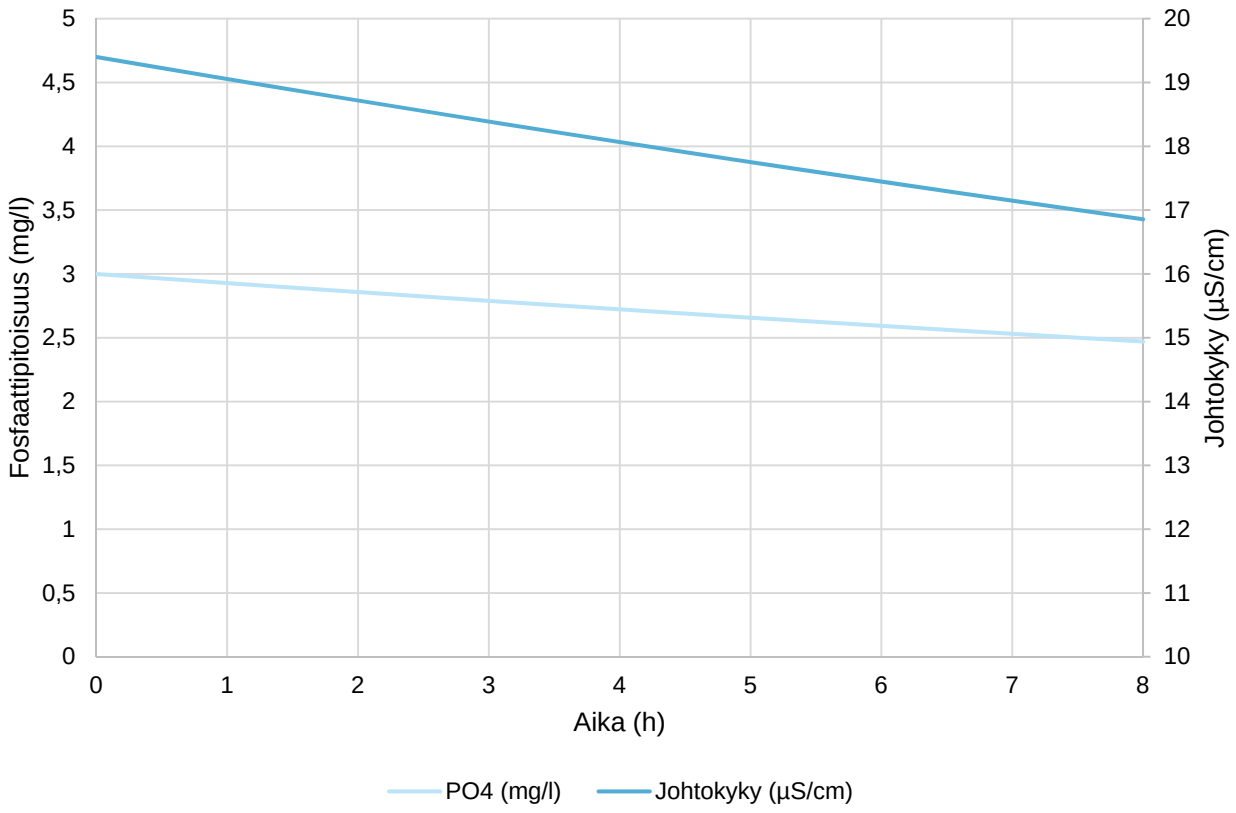
- Kun vuoto on suuri, esim. luokkaa 5 – 10 kg/s, ja kattilaveden fosfaattipitoisuutta valvotaan pelkästään laboratoriomäärityksin, voi vuodon tunnistus viivästyä 1 – 3 vuorokautta. Viive voi pahimmillaan johtaa siihen, että vuotoa ei tunnisteta tai paikanneta vaaralliseen osaan kattilaa ennen kuin vuoto saa aikaan putken repeämän ja/tai tulipesäräjähdyksen.
- Hälytys ei viittaa suoraan vuotoon. On siten mahdollista, että hälytystä ei tunnisteta merkiksi vuodosta, vaan tilanteeseen reagoidaan yksinomaan lisäämällä fosfaatin annostelua. Tällöin voi käydä niin, että vuotoa kattilassa aletaan epäillä vasta, kun kattilaveden fosfaattipitoisuutta ei saatu pidettyä hallinnassa edes maksimiannostelulla. Tähän voi kulua, tapauksesta riippuen, useita päiviä tai jopa viikkoja. Tänä aikana jo pienikin vuoto voi saada aikaan sekundäärisiä vaurioita läheisissä putkissa, ja johtaa siten putken repeämään ja siitä seuraavaan tulipesäräjähdykseen.
- Hälytys alhaisesta kattilaveden fosfaattipitoisuudesta tai johtokyvystä ei anna viitteitä vuodon koosta, joten tuloksia on vaikea verrata esim. syöttövesi-höyryeron muutoksiin. Tämä vaikeuttaa tilannekuvan muodostamista ja lisää riskiä, että päätös kattilan alasajosta lykkääntyy niin, että vuoto etenee putken repeämään ja siitä seuraavaan räjähdykseen asti.

Kyselyyn saatujen vastausten perusteella kattilaveden fosfaattipitoisuuden alarajahälytystä hyödynnetään kattilan tiiveyden valvonnassa Oulun ja Wisan tehtailla.

Käynninaikainen tiiveyskoe

Kattilaveden laadun seurannan avulla voidaan varmistaa kattilan höyrystinosan tiiveys normaalin käytön aikana. Varmistus on tehtävissä katkaisemalla fosfaatin annostelu ja sulkemalla ulospuhallus. Jos kattilaveden fosfaattipitoisuus ja johtokyky pysyvät muuttumattomina (sen jälkeen kun em. toimenpiteiden aikaan ekonomaisereissa ollut, fosfaattipitoinen vesi on virrannut kattilaan), voidaan todeta kattilan höyrystinosan olevan tiivis. Jos taas fosfaattipitoisuus ja johtokyky laskevat tasaisesti fosfaatin annostelun lopetuksen ja ulospuhalluksen sulkemisen jälkeen, on kattilan höyrystinosassa vuoto.

Jos esimerkiksi kattilassa, jonka höyrystimen vesitilavuus on 300 m^3 ja kattilaveden fosfaattipitoisuus tiiveyskokeen alussa on 3 mg/l ja johtokyky on 19,5 µS/cm, on 1 kg/s suuruinen vuoto tulipesässä, verhoissa tai keittopinnassa, laskevat kattilaveden fosfaattipitoisuus ja johtokyky tiiveyskokeen aikana kuten kuvassa 19 on esitetty. Jos taas kattilan höyrystinosa on tiivis, pysyvät kattilaveden fosfaattipitoisuus ja johtokyky tiiveyskokeen aikana likimain vakioina.



Kuva 19. Kattilaveden fosfaattipitoisuuden ja johtokyvyn muutokset 1 kg/s suuruisen vuodon aikana, kun vuoto on tulipesässä, verhossa tai keittopinnassa ja ulospuhallus ja fosfaatin annostelu on katkaistu (kattilan vesitilavuus on 300 m3)

Tiiveyskokeen aikana kattilaveden silikaattipitoisuus nousee, joten mikäli ulospuhallus pidettäisiin kiinni hyvin pitkään, nousisi kattilaveden silikaattipitoisuus niin korkeaksi, että silikaattia alkaisi karata höyryyn ohjearvoja ylittäviä määriä. Tavallisesti kuitenkin riittää, että tiiveyskoe tehdään suhteellisen lyhyenä niin, että ulospuhallus on keskeytetty esim. 4 – 8 tuntia. Tämä aikana kattilaveden silikaattipitoisuus ei yleensä vielä nouse merkittävästi ja vaikka nousisikin, jää

höyryyn kulkeutuvan silikaatin kokonaismäärä niin vähäiseksi, että sillä ei ole käytännön merkitystä esim. turbiinin likaantumiseen.

Edellä kuvattuun tapaan toteutettavan käynninaikaisen tiiveyskokeen etuna on yksinkertaisuus ja nopeus: tarvittavat toimenpiteet ovat helppoja toteuttaa ja tulos on nähtävissä nopeimmillaan muutamassa tunnissa.

Menettelyn ainoa heikkous on, että koetta ei voida tehdä tehtailla, joiden soodakattilassa kattilavesinäyte tulee ulospuhalluslinjasta, sillä ulospuhalluslinjan sulkeminen estää tällöin myös edustavan näytteen saamisen kattilavedestä.

Käytönaikainen tiiveyskoe ei ole käytössä vielä yhdelläkään tehtaalla.

Kattilavesivuodon seurantajärjestelmät

Kun syöttöveteen annosteltavan merkkiaineen annostelua ja pitoisuutta kattilavedessä seurataan reaaliaikaisesti, voidaan ko. merkkiaineelle laatia massatase, jossa ainoa tuntematon on kattilavesivuoto. Taseesta voidaan siten laskea (lähes) reaaliaikainen arvo kattilavesivuodolle.

Fosfaattianalysaattori antaa kattilaveden fosfaattipitoisuudelle uuden arvon tavallisesti noin joka 15. minuutti, joten taselaskelma voidaan päivittää samassa tahdissa. Perättäisten mittausten sijaan tase voidaan laatia esim. tunnin tai muutaman tunnin jaksolle, jolloin huojunta tuloksissa on vähäisempää. Näin toimien voidaan laskenta toteuttaa niin, että laskettu vuotovirtaus seuraa todellista vuotoa esimerkiksi neljän tunnin viiveellä.

Tällä tavoin toteutetun kattilan höyrystinosan tiiveydenvalvonnan etuja pelkästään kattilaveden fosfaattipitoisuuden tai johtokyvyn alarajahälytysten perusteella tapahtuvaan valvontaan on:

- kattilavesivuoto voidaan määritellä huomattavasti tarkemmin kuin yksin alarajahälytysten perusteella, joten jo pienetkin vuodot tulevat havaituiksi
- laskenta huomioi muutokset merkkiaineen annostelussa ja kattilan ulospuhalluksessa, joten kattilavesivuotoa ei aleta epäillä esim. tilanteessa, jossa kattilaveden fosfaattipitoisuus laskee alarajaan annostelussa tapahtuvan häiriön tai ulospuhalluksen lisäyksen takia
- laskenta reagoi vuotoon huomattavasti alarajahälytyksiä nopeammin, joten riski, että vuoto ehtisi saada aikaan sekundäärisiä vaurioita ennen vuodon havaitsemista, pienenee
- kattilavesivuoto ilmoitetaan samoissa yksiköissä kuin syöttövesi-höyryero (kg/s, t/h), joten tulosten perusteella on helppo päätellä onko kyseessä vuoto ja jos on, onko vuoto kattilan höyrystinosassa vai muualla (ekoissa tai tulistimissa). Päätös kattilan alasajosta on siten helpommin tehtävissä. Samalla riski, että päätös alasajosta lykkääntyy niin, että pieni vuoto saa aikaan suuren, pienenee.

Kemikaalitaseen perusteella tapahtuvan kattilavesivuodon laskennan haasteita ovat suuret vuodot, joiden hallinta vaatii operaattorilta nopeita toimenpiteitä. Kemikaalitaseen perusteella tapahtuvaan laskentaan liittyy väistämättä viiveitä. Vuodon aiheuttama kattilaveden laimeneminen on havaittavissa vasta:

- kun vuodon alun jälkeen kattilaveteen virrannut syöttövesi on sekoittunut koko kattilan vesitilavuuteen
- kun laimenneen veden näyte ehtii kattilavedestä analysaattorille
- kun merkkiaineen mittaava analysaattori saa analysoitua uuden näytteen

- kun näytteitä on analysoitu riittävän monta peräkkäin, jotta on varmaa, että merkkiaineen pitoisuuden muutos on kattilaveden laimenemisen aiheuttamaa eikä johdu esim. analysaattorin toimintahäiriöstä.

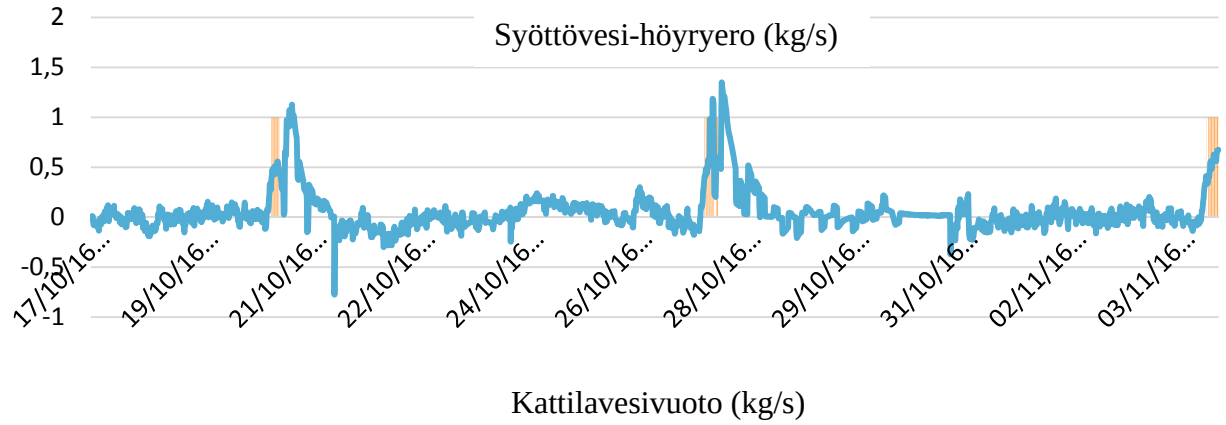
Käytännössä eniten viivettä aiheuttavat kattilaveden analysointi ja useamman kuin yhden näytteen analysointi. Esim. fosfaattianalysaattori tekee uuden määrityksen tavallisesti noin 15 minuutin välein. Kattilaveden laimeneminen kahden tai kolmen peräkkäisen näytteen perusteella vie siten vähintään 30 – 45 minuuttia. Viive on siten liian pitkä, jotta näin saadun kattilavesivuodon perustella voitaisiin tehdä päätöstä kattilan pikapysäytyksestä ja -tyhjennyksestä esim. tilanteessa, jossa keittopinnan putki katkeaa äkillisesti ja vuotovesi suihkuaa suoraan tulipesään.

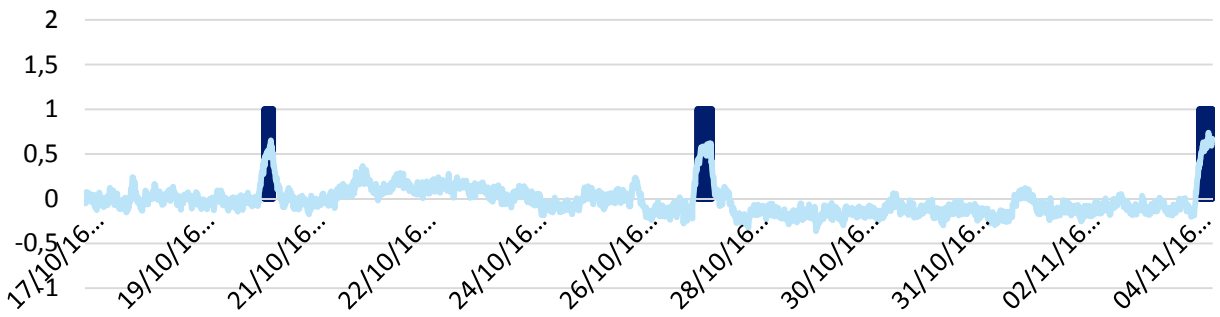
Kattilavesivuodon reaaliaikainen seuranta on tällä hetkellä käytössä neljällä suomalaisella tehtaalla: Joutsenossa, Veitsiluodossa, Raumalla ja Kaukaalla. Käytetyt hälytysrajat kattilavesivuodolle ovat Joutsenossa, Veitsiluodossa ja Raumalla 0,5 – 1 kg/s ja Kaukaalla 5 – 10 kg/s. Veitsiluodossa ja Raumalla kattilaveden vuoton laskenta on toteutettu Valmet Automaation toimesta. Joutsenossa ja Kaukaalla laskennat on toteutettu tehtaan toimesta. Kaikissa tapauksissa on merkkiaineena fosfaatti. Kaikki seurannat on otettu käyttöön vuoden 2001 jälkeen.

Vastaavia järjestelmiä on käytössä myös Suomen ulkopuolella. Tällaisia järjestelmiä toimittavat mm. Valmet Automaatio ja Pohjois-Amerikassa Nalco. Molemmissa järjestelmissä pyritään vuodot tunnistamaan sekä syöttövesi-höyryeroa että kattilaveden kemikaalitaseen perusteella.

Valmet Automaation Valmet Leak Detector käyttää merkkiaineena fosfaattia. Laskennassa tarvittavat mittaussuureet ovat annosteluliuoksen virtaus, kattilaveden fosfaattipitoisuus ja ulospuhallusvirtaus. Fosfaattitaseen ohella Valmetin järjestelmässä on myös syöttövesi-höyryeron laskenta, joka on toteutettu niin, että normaalitilanteessa syöttövesi-höyryero on lähellä 0 kg/s ja normaali heilahtelu on sen verran vähäistä, että hälytysraja voidaan asettaa alhaiseksi.

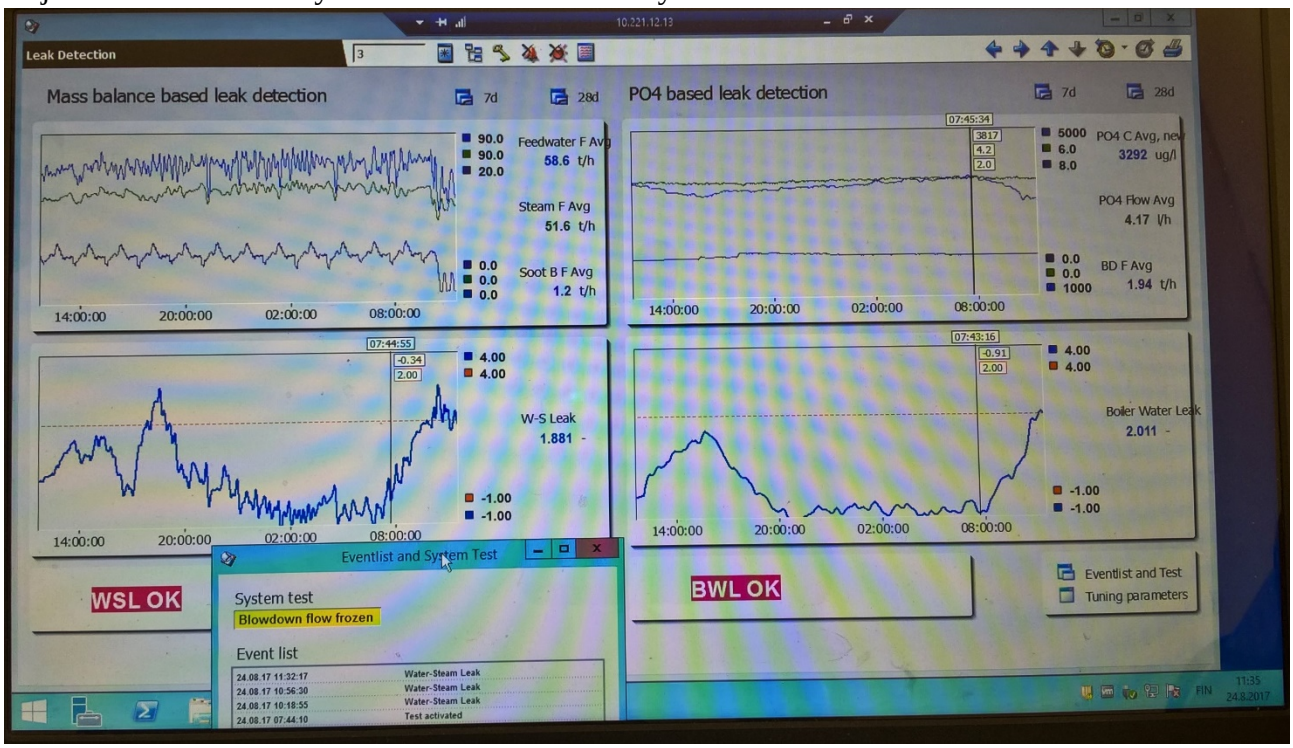
Valmetin tiiveydenvalvontajärjestelmä on rakennettu niin, että valvonta voidaan testata ja koestaa normaalin käynnin aikana. Testi tehdään jäädyttämällä ulospuhallusvirtauksen arvo Valmetin vuodonlaskennassa ja avaamalla tämän jälkeen ulospuhallusvirtausta säätävä venttiili täysin auki. Virtauksen lisäyksen tulisi tällöin näkyä sekä syöttövesi-höyryeron että kattilavesivuodon kasvuna. Esimerkki näin toteutettujen testien tuloksesta on ao. kuvassa.





Kuva 20. Valmetin tiiveydenvalvontajärjestelmän kattilavesivuoto ja syöttövesi-höyryero Stora Enson Veitsiluodon tehtaan soodakattilassa 17.10. – 4.11.2016 (jaksolla kolme testiä, hälytykset merkitty vahvennettuina)

Samanlainen Valmetin järjestelmä on otettu käyttöön myös Maglajin tehtaalla Bosniassa. Järjestelmän valvomonäyttö testin aikana on esitetty kuvassa 21.



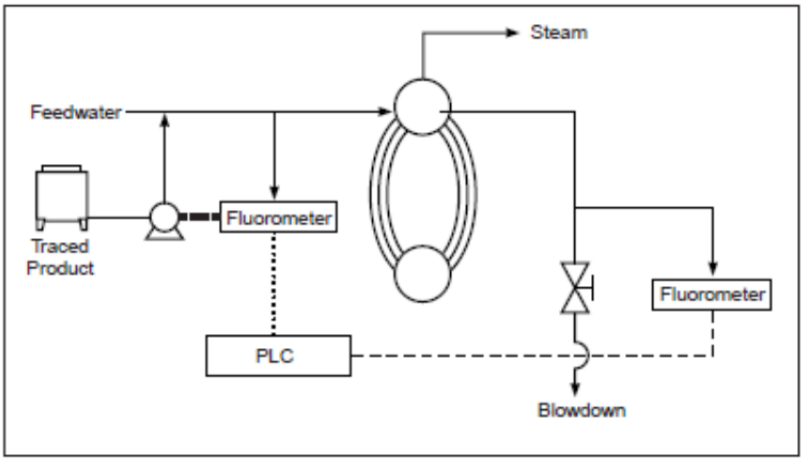
Kuva 21. Valmetin vuodonvalvontajärjestelmän näyttö Maglajin tehtaalla, vasemmalla puolella syöttövesi-höyryeron ja oikealla kattilavesivuodon trendit testin ajalta

Maglajin tehtaalle toimitetussa Valmetin vuodonvalvontajärjestelmässä on hälytysrajoiksi sekä vesi-höyryerolle että kattilavesivuodolle asetettu 2 t/h (= 0,56 kg/s).

Maglajin tehtaalla tiiveydenvalvonnan ja hälytysten toiminta testataan kuukausittain tehtävällä määräaikaistestillä, joka tehdään ulospuhallusta lisäämällä, kun ulospuhalluksen arvo on ensin jäädytetty Valmetin järjestelmässä.

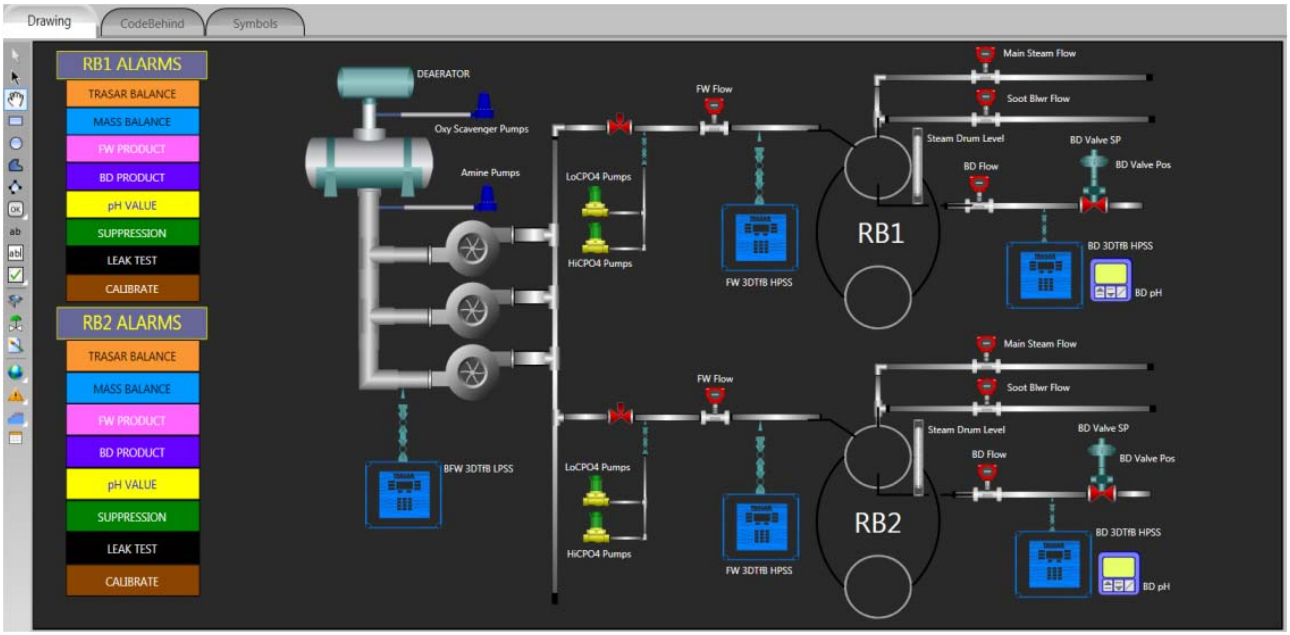
Nalcon toimittama ”Recovery Boiler Leak Indicator”-järjestelmä esiteltiin jo vuonna 2001 laaditussa raportissa, ja järjestelmä on pysynyt sekä toimintaperiaatteiltaan että tekniikaltaan samanlaisena. Vuonna 2001 järjestelmä oli käytössä kuudella tehtaalla Pohjois-Amerikassa. Nyt käytössä olevia järjestelmiä on Nalcon ilmoituksen mukaan 34 kappaletta. Uusia asennuksia on siten ollut keskimäärin kaksi kappaletta vuodessa. Nalco toimittaa järjestelmiä ainoastaan USA:han ja Kanadaan.

Nalcon järjestelmä perustuu oman merkkiaineen käyttöön ja analysointiin. Kattiloissa, joissa fosfaatti annostellaan suoraan lieriöön, merkkiaine annostellaan tavallisesti erillisellä annostelupumpulla syöttöveteen, ja merkkiaineen pitoisuutta mitataan sekä syöttövedestä että kattilavedestä erillisillä analysaattoreilla (ks kuva 22).



Kuva 22. Nalcon vuodonvalvontajärjestelmän rakenne ja käyttämät mittaukset kemikaalitaseen avulla tapahtuvan vuodonvalvonnan osalta

Merkkiaine voidaan ainakin osassa tapauksia annostella myös syöttöveteen annosteltavien kemikaalien mukana (kuva 23). Nalcon edustajan mukaan merkkiaine annostellaan yleensä kuitenkin erikseen, jos fosfaatti annostellaan ekojen jälkeen.



Kuva 23. Nalcon vuodonvalvontajärjestelmän toteutus kahdelle kattilalle, kun merkkiaine on lisätty syöttövesikemikaalien joukkoon (merkkiaineen pitoisuutta syöttövedessä ja kattilavedessä mitataan nyt yhteensä viidellä analysaattorilla)

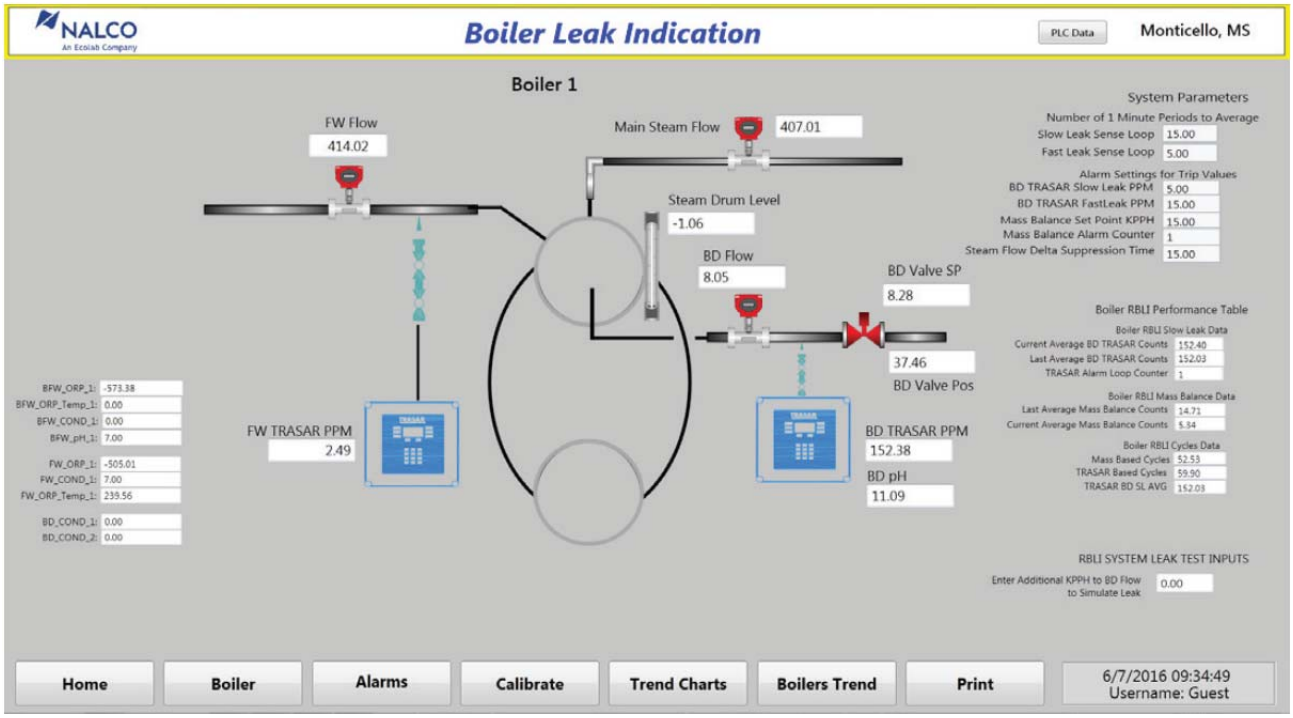
Syöttöveteen annosteltavan kemikaalin perusteella tehtävän vuotojen valvonnan toteutusta on kuvattu Nalcon esitteessä seuraavasti:

> ”Ensimmäisellä fluorometrillä mitataan merkkiaineen pitoisuutta syöttövedessä, jolloin sen pitoisuutta syöttövedessä voidaan myös kontrolloida tarkasti. Toisella fluorometrillä mitataan merkkiaineen pitoisuutta ulospuhalluksessa. Virtausmittausten tulosten perusteella

pidetään syöttöveden ja ulospuhalluksen suhdetta vakiona, ja merkkiaineen pitoisuutta ulospuhalluksessa valvotaan jatkuvasti. Merkkiaineen pitoisuuden lasku voidaan siten havaita. Laskunopeus analysoidaan statistisia menetelmiä käyttäen ja kun se todetaan merkittäväksi, järjestelmä hälyttää vuodosta kattilassa.”

Kuvauksen perusteella menetelmässä säädetään merkkiaineen annostelua ja ulospuhallusta niin, että merkkiaineetta menee koko ajan kattilaan sama määrä kuin sitä poistuu ulospuhalluksen mukana kattilasta ulos. Tilanne on tällöin sama, kun kattilaan annostellaan fosfaattia ja fosfaatin annostelupumpun tuotto ja ulospuhallusvirtaus pidetään muuttumattomina: kattilaveden fosfaattipitoisuus pysyttelee vakaana, jolloin fosfaattipitoisuuden lasku indikoi vuodosta kattilan höyrystinosassa.

Nalcon järjestelmässä ei vuotovirtausta lasketa, vaan vuoto havaitaan kattilaveden pitoisuuden laskun perusteella. Hälytysrajatkin on aseteltu kattilaveden kemikaalipitoisuuden perusteella, kuten kuvassa 24.



Kuva 24. Esimerkki Nalcon vuotojen valvontajärjestelmän valvomonäytöistä

Kuvan 24 esimerkki on Georgia-Pacificin Monticellon tehtaalla, jossa on kaksi soodakattilaa, joiden molempien kapasiteetti on 1100 tKA/vrk (2,5 Mlb/vrk).

Hälytysrajat asetetaan Nalcon järjestelmässä seuraavasti:

- Pienet vuodot (vuodon koko 0,3 – 1,0 l/s, 5 – 15 gpm)

  Merkkiaineen pitoisuudelle määritetään uusi arvo 15 minuutin välein, ja hälytys aktivoituu ensimmäisen kerran, kun seitsemästä peräkkäisestä arvosta kuusi on vähintään 0,35 mg/l verran edellistä pienempi. Toisen kerran hälytys aktivoituu, kun kahdeksasta peräkkäisesti arvosta seitsemän on vähintään 0,35 mg/l edellistä pienempi. Hälytyksen saantiin kuluu siten vähintään 1,5 tuntia vuodon alusta.

- Suuret vuoto (vuoto on suurempi kuin 1,0 kg/s = 15 gpm)

Merkkiaineen pitoisuudelle määritetään uusi arvo 5 minuutin välein, ja hälytys aktivoituu kahdesta peräkkäisestä arvosta jotka ovat vähintään 10 mg/l verran edellistä pienempiä. Hälytyksen saantiin kuluu siten vähintään 15 min vuodon alusta.

- Syöttövesi-höyryero

  Syöttövesi-höyryerolle hälytysraja asetetaan tavallisesti käyttäen yksikköä KHHP (1000 lb tunnissa). Esimerkiksi kuvan 24 tapauksessa syöttövesi-höyryeron hälytysraja on 15 KPPH = 1,9 kg/s.

Tiedossa ei ole, miten suurissa soodakattiloissa Nalcon järjestelmiä on käytössä ja miten järjestelmän tarkkuus vaihtelee kattilan koon ja virtausten mukaan. Yhdysvalloissa soodakattilan ovat kuitenkin keskimäärin pieniä, keskikapasiteetti on 1300 tKA/vrk, joten voidaan olettaa, että suurin osa käytössä olevista Nalcon järjestelmistä on käytössä kattiloissa, jotka ovat suurinta osaa suomalaisia kattiloita pienempiä.

BLRBAC:n syys- ja kevätkokousten pöytäkirjoissa 2007 – 2017 on 70 vaurioraporttia vuodoista kattiloissa, joissa oli vaurion aikaan käytössä Nalcon tiiveydenvalvontajärjestelmä. Näistä 31:ssä vuoto havaittiin tai sen olemassaolo voitiin varmentaa Nalcon järjestelmän avulla. Suurin osa ko. tapauksista oli vuotoja ekoissa (26), tulistimissa (12) tai muissa ei-vaarallisissa osissa kattilaa (2). Osa kattilan höyrystinosan vuodoista suuntautui kattilahuoneeseen tai oli tulipesän ulkopuolelle.

Kun em. 70 vuototapauksen joukosta poistetaan sekä ekoissa, tulistimissa ja muissa ei-vaarallisissa osissa kattilaa olleet vuodot että ne höyrystinosan vuodot, joissa vuoto suuntautui kattilahuoneeseen, jäi jäljelle 19 vuototapausta. Näistä Nalcon järjestelmä tunnisti 12 (63 %).

Seitsemässä vuototapauksessa, joissa Nalcon järjestelmä ei reagoinut vuotoon, vuoto oli joko niin pieni, että se jäi alla hälytysrajan (yhdessä tapauksessa vuodon kooksi arvioitiin jälkeenpäin 0,3 kg/s, muissa kahdessa tapauksessa vuodon aiheuttaja oli pieni särö tai kaksi pientä pistemäistä syöpymää) tai hyvin suuri ja äkillinen aiheuttaen välittömästi kattilasuojan laukeamisen (neljä tapausta).

Pienet vuodot, joita Nalcon järjestelmä ei havainnut, havaittiin vasta alasajon jälkeen joko vesipainekokeessa tai veden virratessa sulakouruun tunti alasajon jälkeen. Kahdessa tapauksessa alasajon syynä oli ylimääräinen kosteus tai höyry kattilahuoneessa, ja yhdessä alasajo tehtiin tehtaan tuotannon rajoittamiseksi.

Nalcon järjestelmä tunnisti siis 12 vuotoa, joissa vuoto oli tulipesässä, verhoissa tai keittopinnassa ja vesi vuosi tulipesään tai savukaasukanavaan. Näistä 10 tapauksessa ensimmäinen indikaatio vuodosta tuli Nalcon järjestelmästä. Kahdessa tapauksessa vuodon havaitsi operaattori joko keittopinnan tuhkan kosteuden tai kattilahuoneeseen tulleen kosteuden perusteella (vuoto alkoi kattilan katon yläpuolella mutta myöhemmin vettä tippui myös katon läpi tulipesään).

Vuonna 2001 myös Hercules toimitti kattilan kemikaalitaseen seurantaan perustuvia vuodonvalvontajärjestelmiä, joita tuolloin oli käytössä kymmenessä soodakattilassa Pohjois-Amerikassa. Yritysostojen myötä ko. järjestelmien toimittaja on vaihtunut ja on nykyisin Solenis, jolla on toimintaa myös Suomessa. Yrityksen Suomen edustajilla oli käytössä ainoastaan yksi järjestelmää kuvaava esite, jossa laitteisto esiteltiin lähinnä kemikaaliannostelulaitteistona. Kattilavuotojen valvontaan esitteessä ainoastaan viitataan kerran todeten, että sellaiseenkin laitteistoa voidaan käyttää. Toimittajalta ei ollut saatavissa yksityiskohtaisempaa aineistoa järjestelmästä.

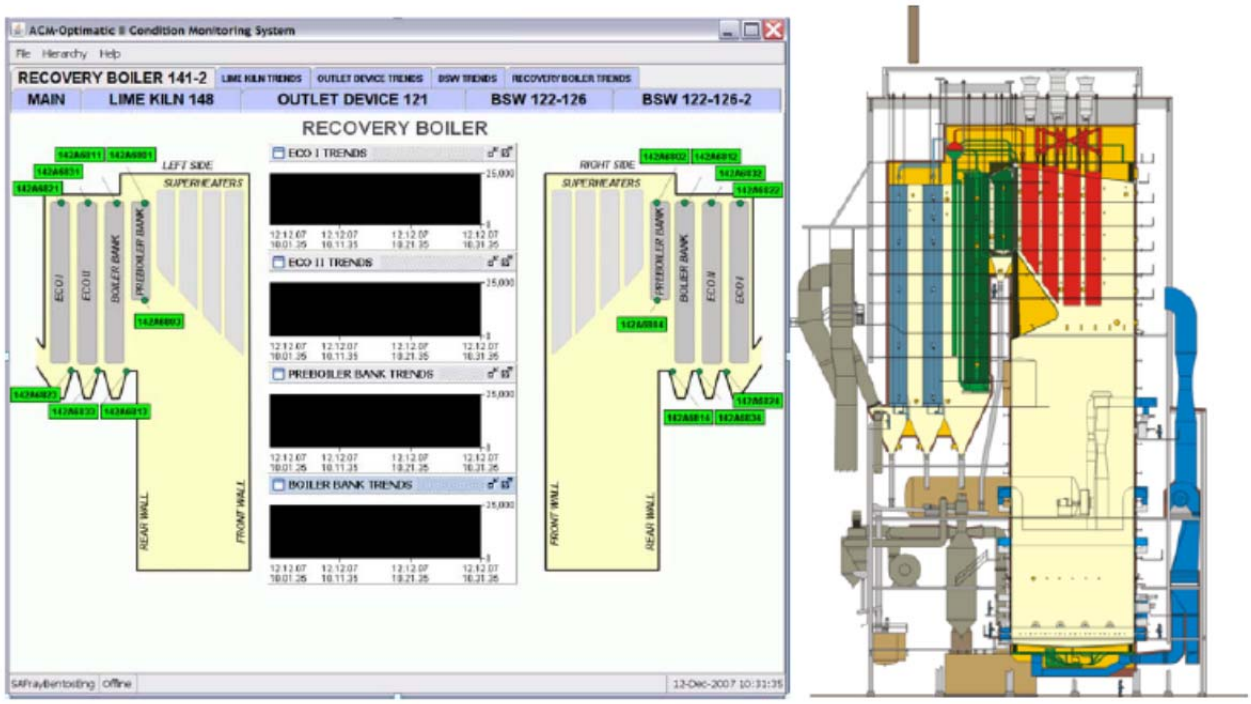
5.3 Akustisen emission seurantaan perustuvat järjestelmät

Vuonna 2001 akustisen emission seuranta oli käytössä Raumalla, Kotkassa, Veitsiluodossa, Varkaudessa, Kemissä, Uimaharjussa, Joutsenossa ja Kaskisissa. Akustisen emission seurantajärjestelmien toimittaja oli tuolloin Acutest, joka sittemmin siirtyi osaksi Andritzia.

Tällä hetkellä akustisen emission seurantaan perustuvia menetelmiä ei kyselyyn saatujen vastausten perusteella ole enää käytössä yhdelläkään tehtaalla Suomessa.

Andritzin mukaan akustisen emission seurantajärjestelmiä on asennettu 18 soodakattilaan 20 vuoden aikana [4].

Kuvassa 25 on esitetty esimerkki akustisen emission järjestelmästä Fray Bentosin tehtaalta Uruguaysta. Akustiset anturit on asennettu ekojen ja keittopinnan jakotukkien päihin.

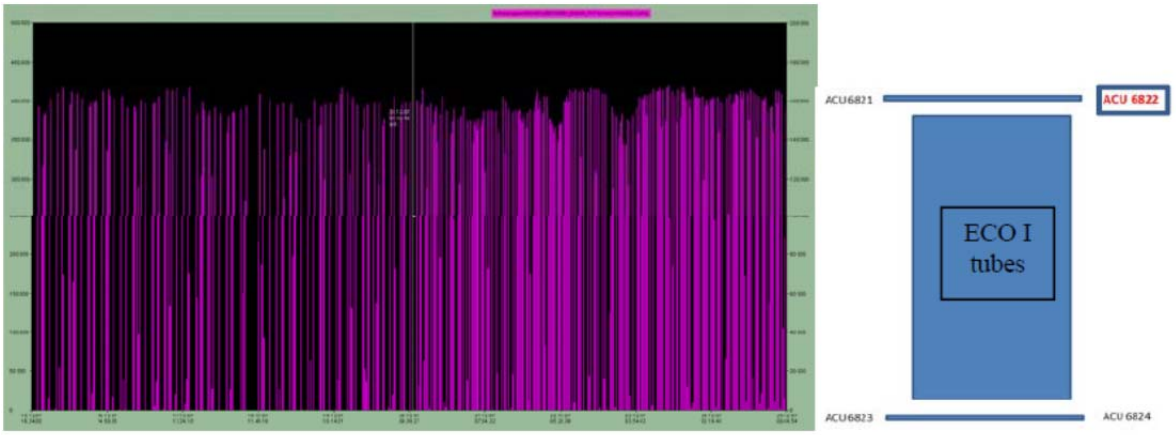


Kuva 25. Andritzin akustisen emission seurantajärjestelmän näyttökuva ja kattilakuva Fray Bentosin tehtaalta Uruguaysta [4]

Akustisen emission antureilla on voitu todeta ekonomaiserivuotoja. Seuraavassa on esitetty tarkemmin kaksi tällaista tapausta [4].

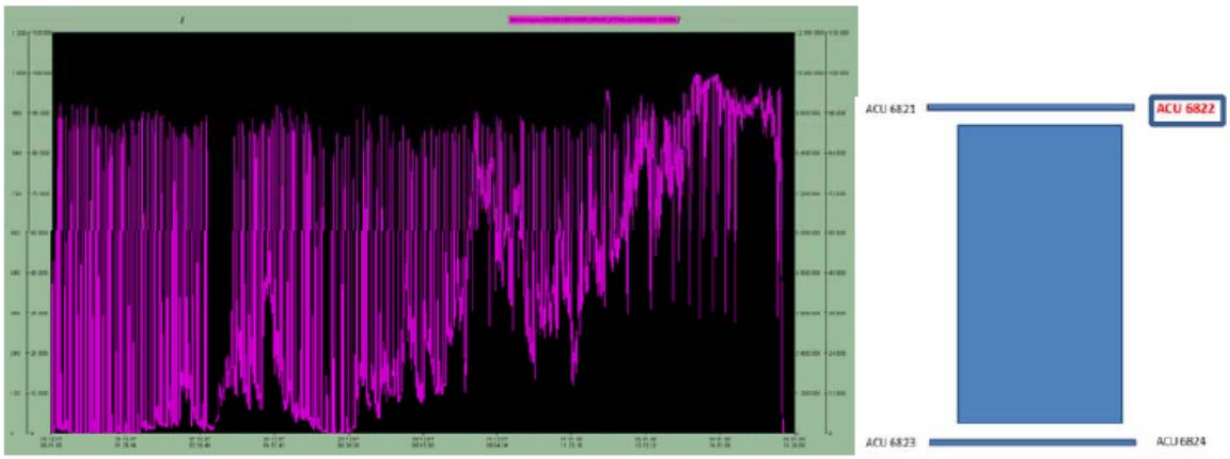
Tapaus 1. Vuoto 1-ekonomaiserissa 2007

Andritzin mukaan akustinen emissio indikoi ko. tapauksessa vauriosta viisi vuorokautta ennen varsinaisen vuodon alkua ja 15 vuorokautta ennen kuin vuoto oli havaittavissa tuhkan kosteutena Ko. anturin signaalien amplitudi kasvoi jo joulukuun 20. päivästä lähtien, ks. kuva 26. Signaalitaso ei tuolloin kuitenkaan ollut jatkuvasti korkea, joten kyse ei ollut vuodosta.



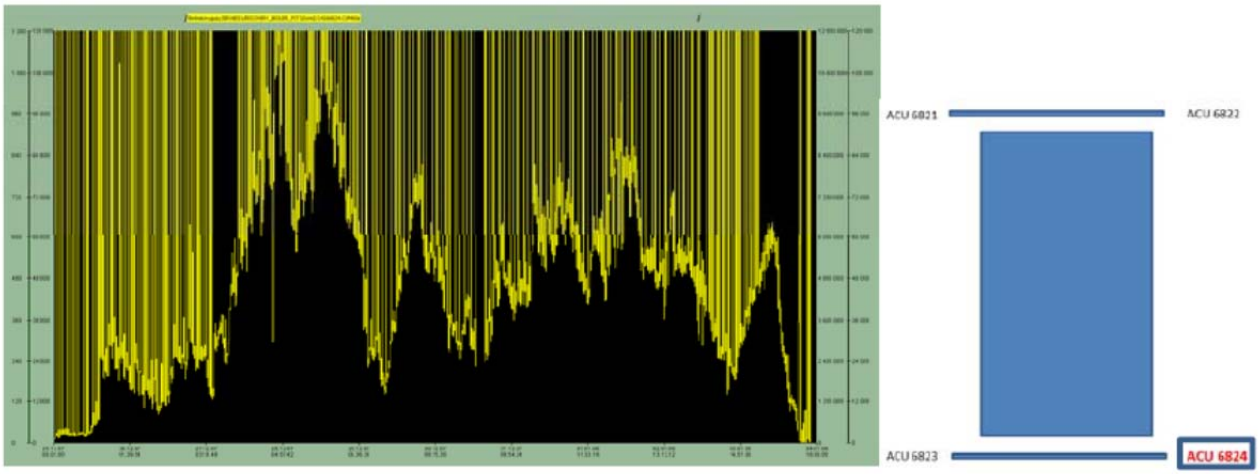
Kuva 26. Ekonomaiserin yläjakotukin oikeanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 15.12. – 25.12.

Jatkuvasti koholle signaalitaso jäi 26.12. lähtien, kuva 27., indikoiden vuodon alkamisesta.

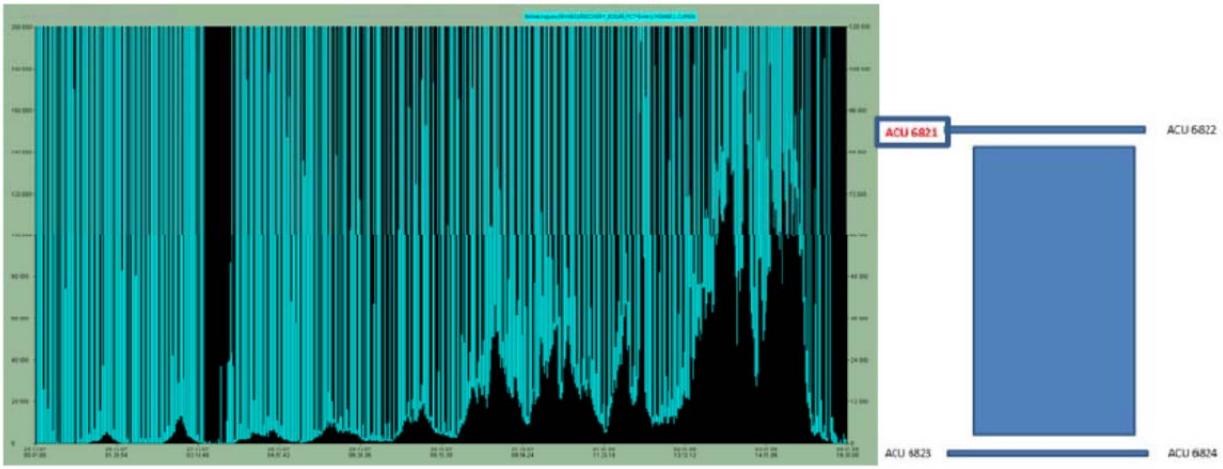


Kuva 27. Ekonomaiserin yläjakotukin oikeanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)

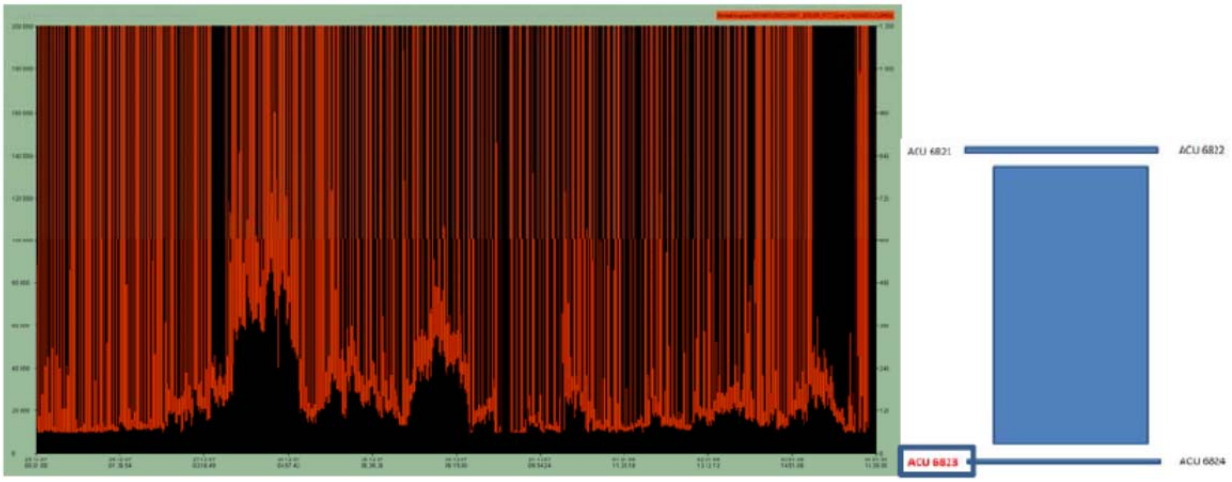
Vuodon aiheuttama akustinen emissio oli havaittavissa myös muilla antureilla, mutta niiden signaalitaso oli matalampi, joten tuloksista voitiin päätellä, että vuoto on lähinnä yläjakotukin oikeanpuolesta anturia.



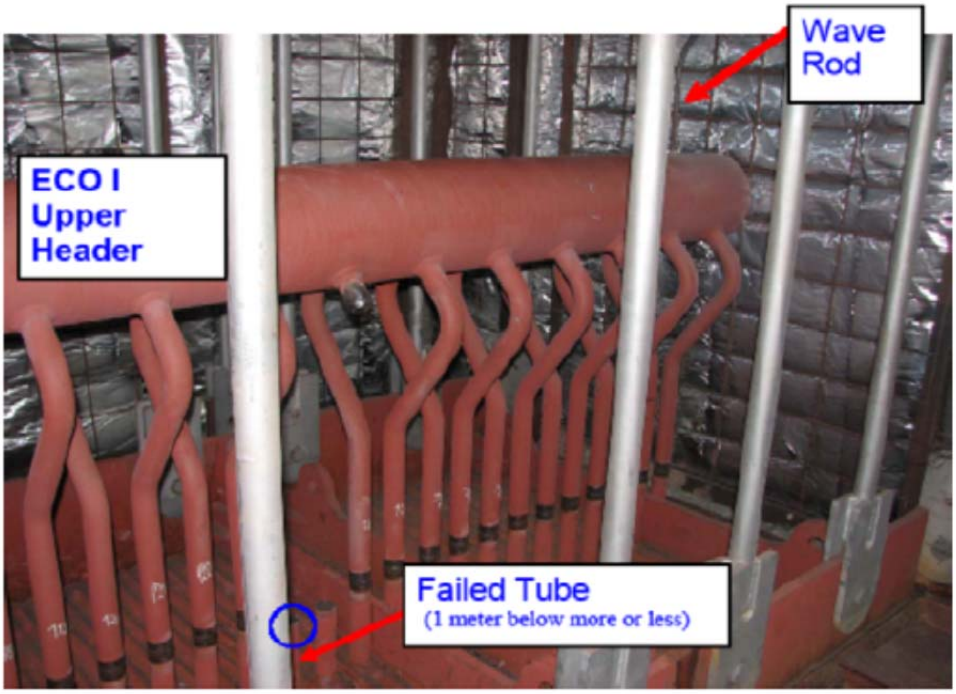
Kuva 28. Kuva B. Ekonomaiserin alajakotukin oikeanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)



Kuva 29. Ekonomaiserin yläjakotukin vasemmanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)



Kuva 30. Kuva B. Ekonomaiserin alajakotukin vasemmanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)

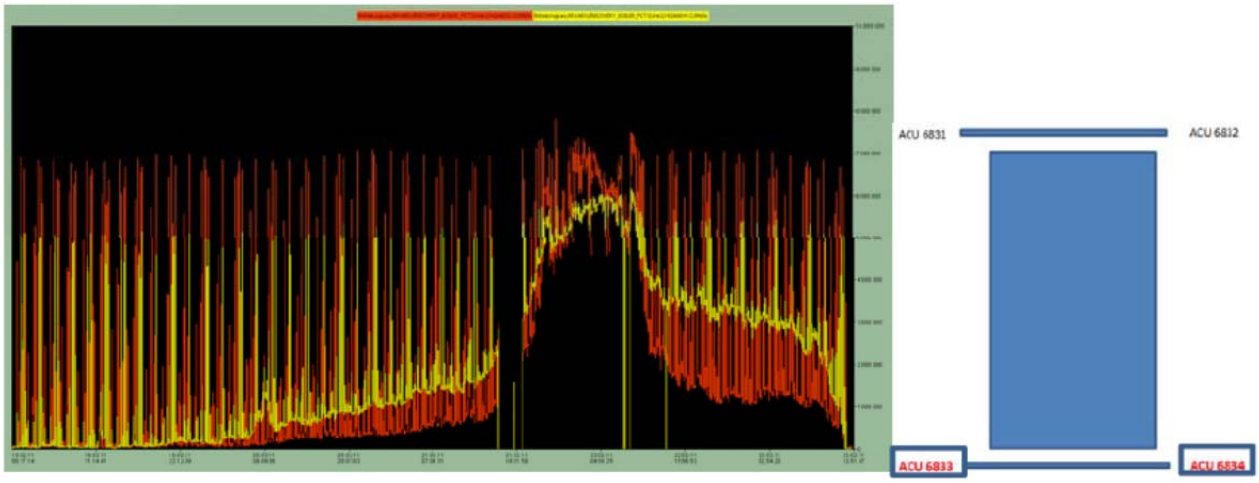


Kuva 31. Vuotanut putki 1-ekonomaiserissa

Vuotanut putki löytyi läheltä yläjakotukkia ja oikealta puolelta, kuten antureiden näyttämistä oli pääteltävissä. Koska vuoto oli suhteellisen ylhäällä, ei vuoto näkynyt alkuvaiheessa kosteutena tuhkassa, koska vuotovesi haihtui savukaasuihin vuodolle ollessa pieni.

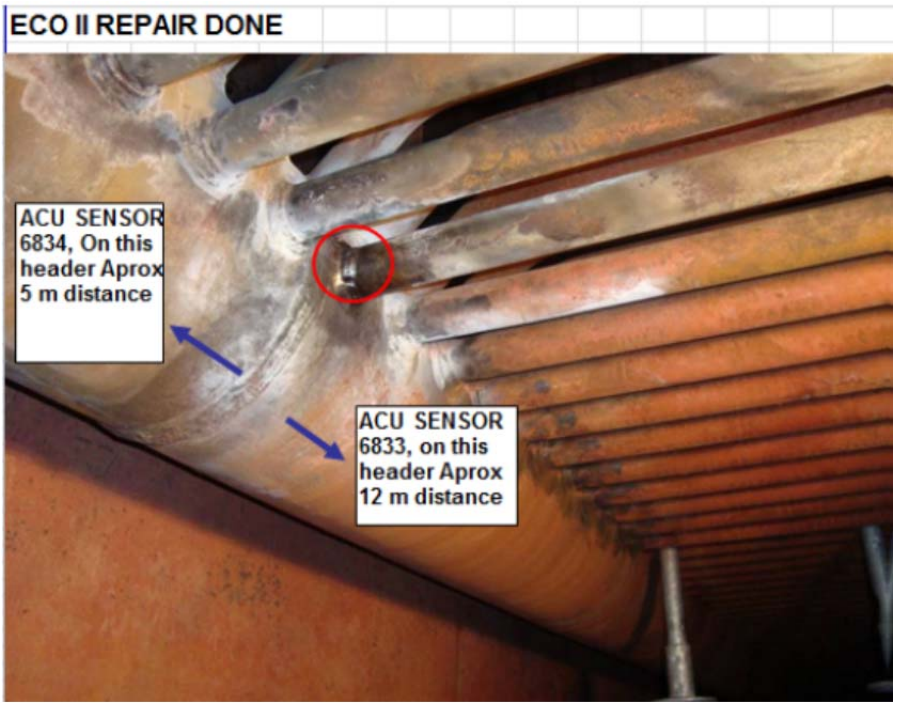
Tapaus 2. Vuoto 2-ekonomaiserissa helmikuussa 2011

Akustisen emission järjestelmän 2-ekon alajakotukin antureiden signaalitasoissa havaittiin 11.2. muutoksia, joiden perusteella tehdasta varoitettiin tulevasta vuodosta ekossa. Vuoto havaittiin yhdeksän päivää myöhemmin jatkuvasti koholla olleiden signaalien perusteella (ks kuva 32) ja päivä myöhemmin tuhkan kosteuden perusteella.



Kuva 32. Eko-2:n alajakotukin akustisen emission antureiden signaalit 19. – 23.2.2011

Yläjakotukin antureiden signaalitasoissa ei ollut havaittavissa yhtäjaksoista korkeaa signaalia, joten vuodon voitiin päätellä olevan lähellä alajakotukin antureita. Vuoto paikantui alajakotukkiin, ks. kuva alla.



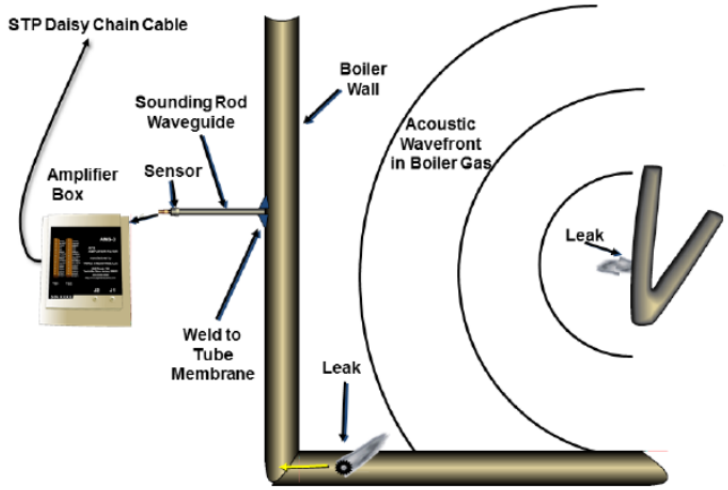
Kuva 33. Eko-2:n alajakotukki vuodon korjauksen jälkeen

Alajakotukin antureiden avulla on voitu havaita myös tyhjennyslinjan venttiilivuotoja. Ko. tapauksissa vuoto on ollut havaittavissa ainoastaan alajakotukin antureilla.

Vuonna 2001 Pohjois-Amerikassa on käytössä Triple 5:n toimittamia akustisen emission seurantajärjestelmiä. Järjestelmiä oli tuolloin käytössä 13 kattilassa. Nyt Triple 5:n järjestelmiä on

käytössä Pohjois-Amerikassa 16 kattilassa. Antureita on käytössä 16 - 48 kpl per kattila. Yhteensä antureita on käytössä 481 kpl, eli keskimäärin 30 kpl per kattila.

Triple 5:n anturit ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin Andritzin anturit, eli anturit on kiinnitetty metallitankoon, jonka toinen pää hitsataan kattilan painerunkoon. Antureiden mittaama taajuusalue on 2 – 11 kHz.



Kuva 34. Triple 5:n antureiden asennus

BLRBAC:n kevät- ja syyskokousten pöytäkirjoissa 2007 – 2017 oli 25 vaurioraporttia, joissa mainittiin vuodon tapahtuneen soodakattilassa, jossa oli käytössä Triple 5:n järjestelmä. Vuoto voitiin tunnistaa tai varmistaa akustisen emission perusteella 13 tapauksessa, eli noin puolessa kaikista tapauksista.

Kun tarkastellaan vuotojen tunnistusta vuodon paikan suhteen, olivat tulokset seuraavat:

- ekovuodot: 8 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 4 kpl
- keittopintavuodot: 1 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 0 kpl
- tulipesävuodot: 6 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 2 kpl
- verhovuodot: 6 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 4 kpl
- tulistinvuodot: 4 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 3 kpl

Luotettavimmin akustisen emission seurannan avulla näyttäisi siis löytyvät vuodot, jotka ovat verhoissa, ekoissa tai tulistimissa. Tähän viittaa sekin, että toimittajalta saadussa materiaalissa on esitelty tapaus, joissa järjestelmä on tunnistanut vuodon ekoissa.

Suurin osa ko. vuodoista oli ei-kriittisiä, eli vuotoihin ei liittynyt tulipesäräjähdyksen vaaraa. Vaarallisia vuotoja, joissa vettä vuosi tulipesään tai keittopinnalta, oli kahdeksan. Näistä akustisen emission avulla tunnistettiin tai paikannettiin neljä, eli tasan puolet. Merkille pantavaa on, että kaikissa neljässä tapauksessa, joissa kriittinen vuoto tunnistettiin akustisen emission avulla, ensimmäinen merkki vuodosta saatiin juuri akustisen emission järjestelmästä. Kolmessa tapauksessa kyse oli verhoputkivuodosta ja yhdessä seinäputkivuodosta.

Neljässä tapauksessa akustisen emission järjestelmä ei reagoinut kriittiseen vuotoon. Kaksi vuodoista oli verhoputkessa, yksi keittopinnassa ja yksi tulipesän seinäputkessa.

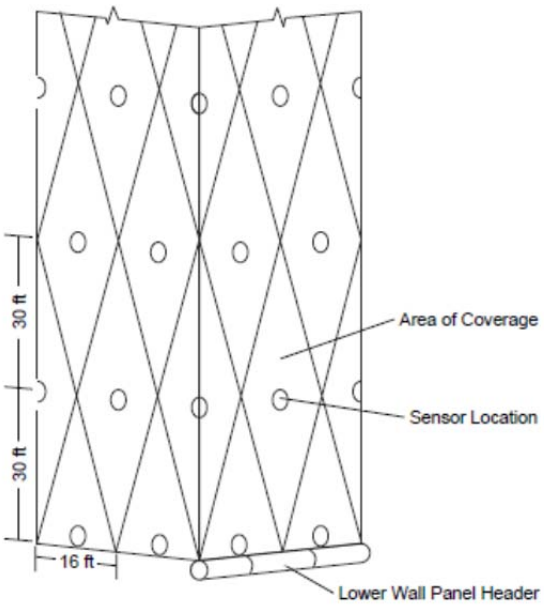
Keittopintavuodon löysi operaattori sattumalta tarkastaessaan savukaasukanavan tukkeutumia. Yksi verhoputkivuodoista oli suuri ja äkillinen aiheuttaen kattilasuojan laukeamisen, ja toisen löysi operaattori sattumalta tarkastaessaan kattilaa tulistimien puhdistamiseksi tehdyn lipeänpolttokatkon aikana.

Yhdessä tapauksessa vuodon syynä oli pohjaputken ylikuumenemisen aiheuttama vaurio, jonka seurauksena putkeen tuli kolme pistemäistä reikää. Vuoto sai aikaan paineiskuja tulipesässä, ja operaattori reagoi kolmanteen tössähdykseen tekemällä pikapysäytyksen. Kattilaveden johtokyky ja fosfaattipitoisuus olivat alkaneet laskea jo kuusi tuntia ennen pikapysäytystä, joten vuodot olisivat olleet todettavissa jo aiemmin syöttövesi-höyryeron ja kemikaalitaseen seurannan avulla, jos nämä menetelmät olisivat olleet ko. kattilassa käytössä.

BLRBAC:n vaurioraporteissa ei ole mainittu, oliko vuotojen lähellä Triple 5:n antureita eli oliko edes periaatteessa mahdollista, että järjestelmä olisi voinut havaita vuodot. Ko. tapausten perusteella ei siten voida arvioida akustisen emission soveltuvuutta vuotojen tunnistukseen puoleen eikä toiseen.

Tiettävästi kattavimmin akustisen emission soveltuvuutta soodakattiloiden tiiveyden valvontaan on selvittänyt B&W, joka tutki ja kokeili sekä ilmaa kuuntelevien että painerunkoon liitettyjen antureiden soveltuvuutta soodakattiloihin 1980 ja 90-luvuilla [5]. Suurin osa kokeista tehtiin painerunkoon liitetyillä antureilla. Selvityksissä ja kokeissa päädyttiin seuraaviin johtopäätöksiin:

- vuotosignaalit olivat kuultavissa tulipesän seinien jakotukkeihin asennetuilla antureilla ainoastaan lyhyeltä etäisyydeltä
- tulipesän seinäputkien tiiveyttä voidaan valvoa akustisen emission antureilla, kun anturit on asennettu sivusuunnassa korkeintaan 4,8 m ja korkeussuunnassa korkeintaan 10 m välein ao. kuvan tapaan
- on mahdollista, että pohjaputkien vuodot tuottavat akustista emissiota jaksoittaisina purkauksina yhtäjaksoisen ”sihinän” sijaan, joten tavanomainen vuotojen tunnistustekniikka ei luultavasti sovellu pohjaputkien vuotojen tunnistukseen



Kuva 35. B&W:n suositus akustisen emission antureiden sijoittamisesta tulipesän seiniin [5]

B&W:n raportissa mainitaan, että 1000 tKA/vrk soodakattilassa, jossa pohjan ala on 12 m x 10 m ja tulipesän korkeus on 36 m, tarvittaisiin antureita neljään tasoon, kahdeksan kappaletta kussakin tasossa, eli yhteensä 32 kpl. Suuressa soodakattilassa, jonka pohjan ala on esim. 14 m x 14 m ja korkeus 60 m, antureita tarvittaisiin vastaavasti 72 kpl.

6 SUURTEN VUOTOJEN VALVONTA

Suuret, äkilliset vuodot tulipesän tai keittopinnan alueella ovat – onneksi – suhteellisen harvinaisia. Esimerkiksi pohjoisamerikkalaisissa soodakattiloissa, joissa oli käytössä Nalcon tiiveydenvalvontajärjestelmä, tapahtui vuosina 2007 – 2017 yhteensä 19 vuotoa, joissa vettä saattoi päästä tulipesään. Näistä 15:ssa kyse oli pienestä vuodosta ja ainoastaan neljässä tapauksessa kyse oli putken äkillisestä repeämästä.

Suuria äkillisiä vuotojakin siis kuitenkin esiintyy, ja muuallakin kuin Pohjois-Amerikassa. Suomessa tapahtuneita suuria äkillisiä vuotoja on esitetty ao. taulukossa.

Taulukko 4. Äkillisiä suuria kattilavuotoja Suomessa 2000 - 2016

Tehdas	Ajankohta	Vuoto	Alasajo ja tehdyt suojaustoimet
MF Kaskinen	10/2000	Verhoputken vuoto	Normaali alasajo
Kotkamills	4/2001	Seinäputken repeämä	Kattilasuoja Pikapysäytys
UPM Kaukas	1/2005	Keittopinnan putken repeämä	Kattilasuoja
UPM Kaukas	3/2006	Seinäputken repeämä	Kattilasuoja Pikapysäytys Pikatyhjennys
MF Kemi	2/2008	Tulistinputken katko	Pikapysäytys
Stora Enso Imatra (SK5)	8/2011	Seinäputken repeämä	Kattilasuoja Pikapysäytys
Stora Enso Veitsiluoto	4/2014	Kattoputken repeämä	Pikapysäytys
Stora Enso Imatra (SK5)	4/2016	Tulistinputken katko	Normaali alasajo 10 päivää myöhemmin

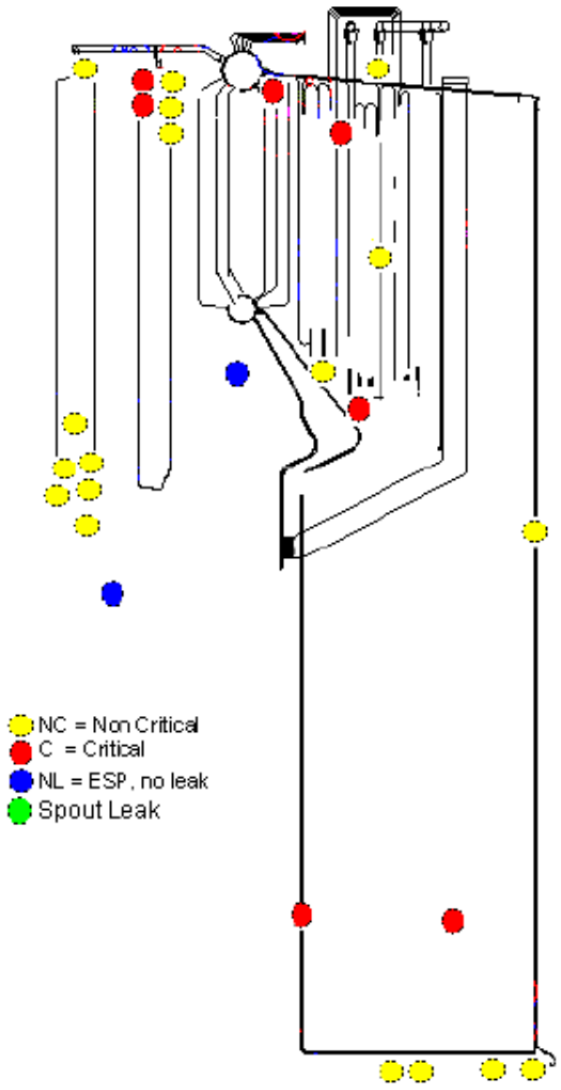
Taulukossa 4 on kolme seinäputkivuotoa ja yksi verhoputkivuoto, joissa vettä pääsi varmuudella tulipesään, ja yksi keittopinnan putken repeämä, josta vettä olisi voinut päästä tulipesään (näin ei nyt onneksi käynyt, repeämä oli nokan takana). Viidestä tapauksesta ainoastaan yhdessä operaattorit tekivät sekä pikapysäytyksen että pikatyhjennyksen.

Suomessa kynnys pikatyhjennyksen tekemiseen on ollut perinteisesti korkea, kuten em. tapauksetkin osoittavat. Pikatyhjennyksiä on tehty niin harvoin, että Soodakattilayhdistyksen tietokonnasta on vaikea löytää tapauksia, joissa pikatyhjennys olisi tehty. Haku pikatyhjennyksellä antaa ainoastaan kolme tapausta, joista kaksi on mahdollisesti väärin luokiteltu. Kaukaan seinäputken repeämä 2006 ei ole yksikään ko. tapauksista. Ainoa luotettavalta vaikuttava pikatyhjennystapaus, jonka haku antaa, on sekin Kaukaalta, on verhoputkivaurio vuodelta 1991.

Pohjois-Amerikassa pikatyhjennyksiä tehdään huomattavasti useammin. BLRBAC:n pöytäkirjojen mukaan vuosina 2010 – 2017 Pohjois-Amerikassa tehtiin 135 pikatyhjennystä. Syksyllä 2017

Pohjois-Amerikassa on käytössä 188 soodakattilaa. Olettaen, että pikatyhjennyksiä tehdään kaikissa kattiloissa likimain samaa tahtia, tarkoittaisi se, että pikatyhjennyksiä tehdään keskimäärin yhdeksän vuoden välien jokaisessa kattilassa.

BLRBAC pitää myös kirjaa siitä, ovatko pikatyhjennykset tehty aiheesta ja tarvetilanteessa. Aiheellisena pidetään pikatyhjennystä, joka tehdään kun kattilassa on vuoto, josta vettä pääsee tulipesään. Jokainen vuoto arvioidaan erikseen ja arvio vedenpääsystä tulipesään tehdään vuodon sijainnin ja suunnan perusteella. Näin ollen myös esim. ekonomaiserivuoto voi olla kriittinen, jos vuoto on tarpeeksi ylhäällä ja suuntautuu tulipesän (ks. kuva 36).



Kuva 36. Esimerkki BLRBAC:n tekemästä kattilavuotojen luokittelusta (syksyn 2017 kokouspöytäkirjasta)

Vuodon koolla ei sen sijaan ole merkitystä. Myös esim. vesipainekokeessa havaitut vuodot luokitellaan kriittisiksi, jos niiden sijainnin ja suunnan perusteella vettä on voinut päästä tulipesään ennen kattilan alasajoa tai vettä olisi voinut päästä tulipesään, jos vuotoa ei olisi huomattu vesipainekokeessa.

BLRBAC:n tilastojen mukaan pikatyhjennys tehdään keskimäärin 72 %:ssa kriittisistä vuodoista, jotka on havaittu kattilan käytön aikana (eikä esim. vesipainekokeessa).

Jos Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannan haun tulokset pitävät paikkansa, on Suomessa tehty ainoastaan yksi pikatyhjennys 2000 – 2016. Kriittisiä vuotoja, joissa vettä pääsee tulipesään, tapahtuu kuitenkin huomattavasti useammin. Esim. Soodakattilayhdistyksen tietokannasta löytyy haulla ”normaalikäyttö” ja ”vesivuoto tulipesään” 15 tällaista vuotoa. Tällä perusteella pikatyhjennys on tehty Suomessa alle 10 % kriittisistä vuodoista.

Syitä siihen, että pikatyhjennyksiä tehdään Suomessa harvoin, voi olla useita. Yksi ainakin on huoli kattilan vaurioitumisesta pikatyhjennyksen seurauksena. Voisi olettaa, että jos pikatyhjennykset aiheuttaisivat kattilavaurioita, olisi aihe noussut keskustelun piiriin Pohjois-Amerikassa, onhan todennäköistä, että käytössä on kattiloita, joissa on tehtyä useitakin pikatyhjennyksiä. Näin ei ole kuitenkaan käynyt, joten on luultavaa, että huoli kattilan vaurioitumisesta pikatyhjennyksen seurauksena on ylimitoitettu.

Toisaalta varsinkin tilanteessa, jossa kyse on suuresta vuodosta, josta vettä pääsee tulipesään, on vaurioriski konkreettinen ja käytännössä suureksi todettu. Suomalaisissa soodakattiloissa tapahtuneiden vahinkojen perusteella arvioiden tulipesäräjähdysriski on noin 30 %, kun tulipesään pääsee vettä suuresta vuodosta eikä pikatyhjennystä tehdä. Samansuuruiseen arvioon oli aiemmin päätynyt myös Tom Grace BLRBAC:n vaurioraporttien perusteella.

Kokemukset Pohjois-Amerikasta tukevat olettamusta, että pikatyhjennyksellä voidaan estää tulipesäräjähdyksiä ja vähentää niiden voimakkuutta.

Gracen mukaan vuosina 1970 – 93 Pohjois-Amerikassa tapahtuneista tulipesäräjähdyksistä, joiden syynä oli vuoto kattilan painerungossa, 66 % tapauksista räjähdys tapahtui pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen jälkeen, ja kolmasosassa räjähdys tapahtui ilman, että kattilassa tehtiin pikapysäytystä ja -tyhjennystä. Vaurioiden vakavuudessa on huomattava ero: vakavia vaurioita aiheutui ainoastaan noin joka viidennessä räjähdyksessä, joka tapahtui pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen jälkeen, kun taas puolessa niistä räjähdyksistä, jotka tapahtuivat ilman pikapysäytystä ja -tyhjennystä, vauriot olivat vakavia.

Toinen syy pikatyhjennyksen tekemättä jättämiseen on todennäköisesti se, että Suomessa pikatyhjennyksen teko vaatii erillistä päätöstä, kun taas Pohjois-Amerikassa pikatyhjennys seuraa automaattisesti pikapysäytyksestä.

Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannan mukaan pikapysäytys on tehty Suomessa 11 kertaa 2000 – 2016. Tasaisella vauhdilla pikapysäytyksiä tehtiin siten kerran noin 26:tta käyttövuotta kohden. Tahti on edelleen harvempi kuin Pohjois-Amerikassa, jossa pikapysäytyksiä tehtiin keskimäärin kerran yhdeksässä käyttövuodessa, mutta ero on huomattavasti pienempi kuin pikatyhjennysten suhteen.

Koska pikatyhjennyksen teko vaatii erillisen päätöksen, vaikuttaa yleinen käytäntö olevan, että päätös pikatyhjennyksestä tehdään vasta kun on havaittu, että vettä pääsee jatkuvasti tulipesään ja aina sulan joukkoon saakka. Tämä edellyttää, että veden pääsy on joko nähtävissä tai kuultavissa. Hyvä esimerkki tästä on ainoa tiedossa oleva tapaus tältä vuosituhannelta, jossa pikatyhjennys on tehty. Vaurioraportin mukaan tapahtumat etenivät seuraavasti:

> ”Kattilan lipeäkuorma oli 51 kg(ka)/s, höyrykuorma 125 kg/s. Kattilan tulipesän ja ekojen paine-erot alkoivat heittelehtiä sekä lieriön pinta hälyttämään alarajaa n. klo 00.58. Syöttövesivirtaus kasvoi yli 40 kg/s, joten operaattori painoi kattilasuoja-painiketta klo 01.04 ts. teki pikapysäytyksen. Voimakkaan suhinan ja epänormaalin töminän seurauksena painoi operaattori myös pikatyhjennyksen klo 01.29.”

Luultavaa on, että ilman ”voimakasta suhinaa ja epänormaalia töminää” pikatyhjennys olisi tässäkin tapauksessa jäänyt tekemättä, koska näin on käynyt ilmeisesti kaikissa niissä tapauksissa, joissa vettä on päässyt tulipesään, mutta pikatyhjennystä ei ole tehty.

Käytäntöä ei voida pitää erityisesti turvallisuutta korostavana, sillä voimakas räjähdys voi tapahtua ilman, että sitä edeltäisi ”voimakas suhina ja epänormaali töminä”. Esimerkiksi Vallvikin räjähdyksessä vuonna 1998 Ruotsissa operaattori oli juuri ennen räjähdystä lipeäruiskuilla, ja Ruotsin soodakattilayhdistyksen kokouspöytäkirjan mukaan:

> ”Operaattorin näkemyksen mukaan sen lyhyen aikaa, jonka hän oli lipeäruiskuilla, tulipesä oli täysin rauhallinen. Mikään ei viitannut siihen, että tulipesään on päässyt suuri määrä vettä, kuten on täytynyt tapahtua sen lyhyen ajan sisällä, mikä kului putken repeämisestä räjähdykseen. Mikään ei osoittanut, että tulipesässä oli putki revennyt”

Räjähdys, joka tapahtui, oli kuitenkin hyvin voimakas. Operaattori pelastui, koska hän selvisi paineiskusta loukkaantumatta ja pääsi kattilahuoneesta ulos turvaan nopeasti.

Suomessa vastaavista tilanteista ollaan selvitty lähinnä hyvällä onnella. Useimmissa tapauksissa, joissa vettä on päässyt tulipesään, työskentelyä kattilahuoneessa on jatkettu senkin jälkeen, kun vuoto on tunnistettu, mahdollisesti juuri sen selvittämiseksi, kuuluuko tai näkyykö merkkejä veden pääsystä sulan joukkoon ja onko siten tarpeen tehdä pikatyhjennys.

Käytännöstä on seurannut läheltä piti-tilanteita, joista onneksi ollaan selvitty ilman vakavia henkilövahinkoja.

Osaltaan em. toimintatapojen muodostumiseen on vaikuttanut luultavasti se, että operaattoreiden ei ole helppo havaita valvomosta käsin onko vuoto vaarallinen.

Erityisen vaikeaa tämä voi olla tilanteessa, jossa vuoto on niin suuri, että se aiheuttaa kattilasuojan laukeamisen, sillä kattilasuojan laukeamisen seurauksena aktivoituu niin suuri joukko hälytyksiä, että se vaikeuttaa varsinaisen alkusyyn selvittämistä.

Esim. Vallvikissa ensimmäisen 15 minuutin aikana putken repeämisen jälkeen hälytyksiä tuli 432 kpl. Kotkassa puolestaan hälytyksiä tuli putken repeämistä seuranneen 30 minuutin aikana lähes 200 kpl. Tämä on sama jakso, jolloin räjähdysriski on kaikkein suurin, ja välittömät toimenpiteet olisivat siten tarpeen.

Kun kattilasuoja on laadittu Soodakattilayhdistyksen Turva-automaatiosuosituksen mukaisesti, tapahtuu kattilasuojan lauetessa seuraavat seuraustoiminnot:

- lipeän syöttö kattilaan estetään
- apupolttoaineen syöttö pysähtyy
- hajukaasut käännetään pois kattilasta.

Kattilasuojan laukeaminen ei siten esim. katkaise syöttöveden pumppausta kattilaan tai käynnistä vaarahälytystä kattilahuoneessa, vaan niiden tekoon vaaditaan operaattorin toimenpiteitä. Operaattoreiden tulisi pystyä tekemään molemmat toimenpiteet vaaratilanteessa mahdollisimman pian kattilasuojan laukeamisen jälkeen.

Valitettavan usein tässä ei onnistuta, vaan operaattorit eivät tunnista tilannetta oikein ja esim. yrittävät pitää lieriössä pintaa nopeuttamalla syöttöveden säätöventtiilin avautumista. Samalla jää huomiotta, että olosuhteet kattilahuoneessa saattavat olla hyvin vaaralliset, ja työskentelyä kattilahuoneessa jatketaan normaaliin tapaan. Harvinaista ei ole myöskään se, että tilannekuvan

selventämiseksi osa operaattoreista lähtee tekemään kattilahuonekierrosta pian kattilasuojan laukeamisen jälkeen.

Tällaisessa tilanteessa on henkilövahinkojen vaara ilmeinen. Valitettavasti ainakaan kaikilla tehtailla tilanne ei ole tässä suhteessa parantunut merkittävästi sitten Äänekoskella vuonna 1965 tapahtuneen räjähdyksen: esim. Bosnian Maglajissa 2016 operaattorit menivät kattilasuojan lauettua kattilahuoneeseen pian kattilasuojan laukeamisen jälkeen ja olivat tarkastamassa kattilaa juuri kun tulipesässä räjähti.

Tämän puutteen on tunnistanut myös BLRBAC, jonka ohjeessa ”Recommended Good Practise Safe Firing of Black Liquor in Recovery Boilers” [6] todetaan:

> “Vaikka kattilan käyttö keskeytyy todennäköisesti korkean tulipesän paineen tai matalan lieriön pinnan takia, jos operaattori ei puutu asiaan, syöttöveden säätöventtiili ohjautuu täysin auki lieriön pinnan säädön pyrkiessä jatkuvasti palauttamaan lieriön pinnan mahdollistaen siten vuodon jatkumisen. BLRBAC:n tekemä vaurioraporttien katsaus osoittaa, että operaattorit eivät aina tunnista suurta vuotoa matalan lieriön pinnan ja korkean tulipesän paineen aiheuttajiksi eivätkä he siten aina tee pikapysäytystä ja –tyhjennystä[1].
>
> Tästä johtuen BLRBAC suosittaa suojauslogiikkaan lisäystä, joka sulkee syöttöveden säätöventtiilin ja kääntää säätöventtiilin ohjauksen tämän jälkeen käsiohjaukselle, kun kattilasuoja laukeaa sekä korkean tulipesän paineen että lieriön matalan pinnan takia ja
>
> - korkean tulipesän paineen raja-arvo tulee arvioida. Harkitse yhteyden ottoa kattilatoimittajaan ja vakuutusyhtiöön mikäli mitään viiveitä otetaan käyttöön.
> - lieriön matalan pinnan raja-arvo tulee arvioida. Harkitse yhteyden ottoa kattilatoimittajaan ja vakuutusyhtiöön mikäli mitään viiveitä otetaan käyttöön.
>
> Kun molemmat em. lukitusehdot tulevat voimaan korkeintaan 45 sekunnin viiveellä, syöttöveden säätöventtiili tulee ohjautua kiinni ja ohjaus tulee sen jälkeen kääntyä manuaaliseksi. Lisäksi hälytysnäytöille tulee tulostua viesti, että molemmat em. lukitusehdot ovat aktivoituneet ja tämä voi olla merkki suuresta vuodosta kattilassa.”

Suomessa vastaavaa suositusta suojauslogiikan muuttamiseksi ei ole tehty.

BLRBAC:n suositukseen koskien hälytysviestin lisäämisestä ko. tilanteessa voi suhtautua skeptisesti, sillä ilmeinen vaara on, että sekin jää operaattoreilta huomaamatta todellisessa tilanteessa. Tämän vuoksi tulisi selvittää, millä tavoin hälytys on ilmaistava, että se varmasti tulee havaituksi. Samalla tulisi harkita, olisiko syytä varmistaa vaarahälytyksen teko mahdollisimman nopeasti ko. tilanteessa siten, että vaarahälytys käynnistyisi automaattisesti.

Suuren vuodon hallinnan haasteet havaittiin konkreettisella tavalla myös Zellstoffin Pölsin tehtaalla Itävallassa 2014, kun kattilan tulipesän seinäputkeen repesi noin 2,5 cm^2 suuruinen reikä kattilan ajaessa normaalia kuormaa [7].

Putken repeämisen jälkeen syöttöveden virtaus nousi 2,5 minuutissa 80 t/h (22 kg/s) (virtaus oli 320 t/h ennen repeämistä ja enimmillään 400 t/h repeämisen jälkeen). Samaan aikaan höyryvirtaus laski 50 t/h (14 kg/s). Putken repeäminen sai myös aikaan tulipesän paineen nousun 1000 Pa (10 mbar) verran. Operaattori reagoi häiriöön pysäyttämällä lipeän syötön tulipesään ja jatkamalla tulipesän tuuletusta (kaikki puhaltimet olivat päällä) ja syöttöveden pumppausta tulipesään, Kiertomies otti lipeäruiskut pois käytöstä ja huomasi samalla, että tulipesän pohja näytti tummalta. Kiertomiehen mukaan olosuhteet tulipesässä olivat rauhalliset, mitään ylimääräistä ääntä ei kuulunut. Kun kiertomies palasi valvomoon noin 30 min seinäputken repeämisen jälkeen, tapahtui tulipesässä

voimakas räjähdys. Mahdollista on, että räjähdyksen sai tässä vaiheessa aikaiseksi tulistimista tippunut suolakami.

Operaattori ei siis Pölsissäkään tunnistanut tilannetta vaaralliseksi, koska tulipesässä kaikki vaikutti rauhalliselta eikä mitään selviä merkkejä (”suhinaa ja töminää”) veden pääsystä tulipesään ollut kuultavissa tai nähtävissä.

Pölsissä operaattori pystyi havaitsemaan oleelliset oireet, korkean tulipesän paineen, syöttövesi-höyryeron kasvun ja lieriön pinnan laskun heti vuodon alun yhteydessä, joten tarpeelliset tiedot tilanteen analysointiin olivat käytettävissä.

Oikeiden johtopäätösten teko jäi silti tekemättä, ja esim. syöttövesipumppuja ei pysäytetty eikä vaarahälytystä tai pikatyhjennystä tehty.

Pölsin tapauksessa tärkeimpiä syitä siihen, että operaattori ei kyennyt ko. tilanteessa toimimaan oikein, oli luultavasti kaksi:

- harjoituksen puute
- erityisesti kattilavuotoja koskevien hälytysten puute.

Vakavat kattilavuodot ovat – onneksi – niin harvinaisia, että kyse on todennäköisesti ainutkertaisesta tilanteesta vuorossa olevalle operaattorille. Useimmilla operaattoreilla ei ole kokemusta edes vaarattomista vuodoista, joten rutiinia erottaa vaaraton ja vaarallinen vuoto ei ole voinut kertyä käytännön myötä.

Pölsissä tätä puutetta on pyritty korjaamaan hankkimalla uuden kattilan hankinnan yhteydessä tehtaalla soodakattilasimulaattori ja edellyttämällä, että sekä uudet että jo työssä olevat operaattorit harjoittelevat erilaisten käyttö- ja häiriötilanteiden hallintaa vuosittain. Työssä olevien operaattoreiden vuosittaiseen koulutusohjelmaan kuuluu simulaattoriharjoittelua kahden vuoron verran vuosittain. Koulutusvaiheessa olevat operaattorikokelaat harjoittelevat jokaisen simulaattorille tehdystä 32 ajo- ja häiriötilanteesta vähintään kolme kertaa korkeintaan 14 kk kestävän koulutuksen aikana (kenttähoitajan koulutus on kokonaisuudessaan 650 tuntia enimmillään 8 kk aikana ja operaattorin 420 tuntia enimmillään 6 kk aikana). Häiriötilanteiden joukossa on kolme vuototilannetta, jotka kuvaavat suurta vuotoa kattilan höyrystinosassa, tulistimissa ja ekoissa.

Pölsissä oli räjähdyksen aikaan käytössä tavanomainen kattilan automaatio- ja suojausjärjestelmä, jossa on kyllä omat hälytyksensä useille oireille, jotka liittyvät suureen kattilavuotoon, kuten tulipesän paineelle, lieriön pinnalle ja korkealle syöttövesi-höyryerolle, mutta ko. hälytyksiä ei oltu järjestetty tai esitetty niin, että niiden liittyminen erityisesti kattilavuotoihin olisi ollut ilmeistä.

Tämän puutteen korjaamiseksi on Pölsissä valvomoon lisätty oma, pelkästään vuotojen tunnistamiseen tarkoitettu näyttö, johon on koottu 10 tärkeimmät parametrin arvot ja trendit sekä vuotoja koskevat hälytykset. Hälytyksiä on mm.

- suuresta syöttövesi-höyryerosta (hälytys, kun ero > 20 t/h = 5,5 kg/s)
- nopeasta lieriön paineen laskusta (hälytys, kun muutos > 0,4 bar minuutissa)
- savukaasupuhaltimien kierrosluvun nopeasta kasvusta (hälytys, kun kierrokset kasvavat > 4 % minuutissa)

Hälytysrajat on aseteltu 2014 tapahtuneen vuodon yhteydessä saatujen kokemusten pohjalta.

Hälytykset on esitetty ko. näytöllä niin, että operaattorin on helppo havaita niiden aktivoituminen. Koska ko. näyttö on varattu ainoastaan kattilavuotojen havaitsemiseen tarkoitetuille hälytyksille ja suureille, on operaattorin helppo tunnistaa häiriön syy hälytysten aktivoituessa.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Soodakattilan tiiveydenvalvonnalle haasteita asettavat sekä pienet, vähitellen kasvavat vuodot että suuret, äkilliset repeämät. Pieniä vuotoja syntyy mm. väsymisen ja hitsausvirheiden seurauksena, kun taas repeämiä saa aikaan esim. putkien oheneminen korroosion vaikutuksesta ja ylikuumeneminen kiertohäiriön tai pinnan säädön häiriön takia. Erilaiset vauriomekanismit voivat vaikuttaa myös samanaikaisesti esim. niin, että väsymisen tai hitsausvirheen aiheuttama pieni vuoto saa aikaan korroosiota ja kulumista ympäröivissä putkissa. Lopputuloksena voi tällöin olla suuri vuoto putken repeämisen seurauksena.

Lähes kaikki tiedossa olevat voimakkaat tulipesäräjähdykset, joiden aiheuttajana on ollut vuoto kattilan painerungossa, ovat aiheutuneet suurista vuodoista, joissa vettä on virrannut tulipesään putken repeämisen seurauksena tyypillisesti kymmeniä kiloja sekunnissa. Osassa tällaisia räjähdyksiä putken repeämää on edeltänyt särön tai pistemäisen syöpymän aiheuttama pieni vuoto, joka on voinut olla kattilassa viikkoja tai jopa kuukausia ennen putken repeämistä.

Soodakattiloiden tiiveydenvalvonnassa käytetään edelleen järjestelmiä, jotka perustuvat syöttövesi-höyryeron, kemikaalitaseen ja/tai akustisen emission seurantaan.

Verrattuna vuoteen 2001 käytetään Suomessa aiempaa useammalla tehtaalla syöttövesi-höyryeron ja kemikaalitaseen seurantaan perustuvia järjestelmiä, kun taas akustisen emission seurantajärjestelmistä on luovuttu kokonaan. Akustisen emission seurantaan perustuvia järjestelmiä, joita toimittavat mm. Andritz and Triple-5, on käytössä edelleen Suomen ulkopuolella.

Sekä Suomesta että Pohjois-Amerikasta saatujen kokemusten mukaan jo suhteellisen pienetkin vuodot voidaan tunnistaa syöttövesi-höyryeron perusteella, kun eron laskenta on toteutettu niin, että mittausvirheiden ja mittausten aiheuttaman kohinan aiheuttamat virheet ovat eliminoitu.

Myös vuotojen paikannus vaaralliseen/vaarattomaan osaan kattilaa on mahdollista sekä kattilaveden kemikaalitaseen seurannan että akustisen emission perusteella, kun vuoto on tarpeeksi suuri (mutta ei niin suuri että se aiheuttaa nopeasti kattilasuojan laukeamisen) ja akustisen emission anturit ovat tarpeeksi lähellä vuotokohtaa. Akustisen emission seurannalla on joissakin tapauksissa voitu jopa ennakoida vuodon syntymistä.

Parhaimpaan tulokseen tiiveydenvalvonnassa päästäisiin käyttämällä sekä syöttövesi-höyryeron, kattilaveden kemikaalitaseen että akustisen emission seurantaa samanaikaisesti. Tällaisilla järjestelmillä olisi mahdollista järjestää soodakattiloiden tiiveydenvalvonta niin, että pienet vuodot tulevat luotettavasti havaittua ja paikannettua jo siinä vaiheessa, kun riski, että vuoto aiheuttaisi sulavesiräjähdyksen, on pieni. Näin olisi voitu estää todennäköisesti suuri osa, mahdollisesti jopa yli puolet, tulipesäräjähdyksistä, joiden aiheuttajana on ollut painerungon vuoto.

Osa soodakattiloissa tapahtuneista vuodoista on aiheutunut putken äkillisestä repeämisestä paikallisen korroosion ja/tai ylikuumenemisen takia. Mikäli vuoto on riittävän suuri (ja kattila on riittävän pieni), aiheuttaa vuoto kattilasuojan laukeamisen tulipesän korkean paineen tai lieriön matalan pinnan takia. Toisinaan myös operaattori laukaisee ko. tilanteessa pikapysäytyksen ennen kuin kattilan suojausjärjestelmä ehtii laukaista kattilasuojan.

Aina ei käyttöhenkilökunta ole kuitenkaan tunnistanut tällaista tilannetta vaaralliseksi edes silloin, kun vettä on vuotanut suoraan tulipesään. Tämän vuoksi käyttöhenkilökunta ei aina ole ryhtynyt tarpeellisiin suojaustoimenpiteisiin, vaan esim. työskentelyä kattilahuoneessa on saatettu jatkaa vielä kattilasuojan laukeamisen jälkeenkin. Tällaisen virheen seurauksena yksi operaattori kuoli

bosnialaisella tehtaalla 2016. Kokemukset Suomessa tapahtuneista vaarallisista vuodoista viittaavat siihen, että henkilövahinkojen riskiä ei tällaisissa tilanteissa ole luotettavasti eliminoitu myöskään täkäläisillä tehtailla.

Vaaratilanne saattaa syntyä kattilavuodon seurauksena myös silloin, kun vuoto on suuri, mutta sen aiheuttama tulipesän paineen nousu tai lieriön pinnan lasku ei riitä laukaisemaan kattilasuojaa. Näin voi käydä varsinkin uusissa, suurissa soodakattiloissa, joissa äkillisen vuodon vaikutus tulipesän paineeseen ja lieriön pintaan on huomattavasti vähäisempi kuin samankokoisen vuodon vaikutus esim. kattilassa, jonka kapasiteetti on 1000 – 1500 tKA/vrk.

Kattilan käytön jatkaminen tilanteessa, jossa tulipesään vuotaa vettä, pidentää aikaa, jona voimakas tulipesäräjähdys on mahdollinen ja lisää siten vahinkoriskiä. Koska vuodosta ei tällöin seuraa ainakaan automaattisesti myöskään vaarahälytystä, kasvaa samalla henkilövahinkojen vaara.

Suurten, äkillisten kattilavuotojen, joissa vettä pääsee tulipesään, varalta tulisi soodakattilat varustaa hälytys- ja suojausjärjestelmillä, jotka

- varoittavat operaattoreita ja kattilahuoneessa olevia vaaratilanteesta jo ennen kattilasuojan laukeamista
- laukaisevat automaattisen suojauksen, kun kattilaan tulee suuri, äkillinen vesivuoto

Järjestelmät tulisi suunnitella niin, että ne toimivat vuototilanteessa luotettavasti ja niin, että operaattorit voivat niiden avulla tunnistaa vaaratilanteen ja huolehtia, että alasajo tapahtuu turvallisesti.

7.1 Lähteet

1. Experiences with leak rate calculation methods for LBB application, Grebner, H., Kastner, W., Höfler, A., Mausnser, G., Leak Before Break In Reactor Pipinf And Vessels, Specialist Meeting, Lyons, Ranska, 9. – 11.1.1995, NEA/CSNI//R(95)18, Vol II, Session 2: Issues In LBB Technology, 127 – 139.

2. Changing Perspectives on Recovery Boiler Explosions, Grace T., 30 Year Recovery Boiler Co-operation in Finland, Proceedings, s. 107 – 119, Soodakattilayhdistys 1994.

3. Recommended Good Practice Guidelines for Post-ESP Procedure for Black Liquor Recovery Boilers, The Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, October 2002.

4. Advanced Condition Diagnostic for Pulp and Paper Mills, Kari Aura, Steve Crotty, Andritz, esitelmä Tappi-seminaarissa

5. Recent Advances in the Application of Acoustic Leak Detection to Process Recovery Boilers, Kovecevich, J.J., Nuspl, S., Robertson, M., BR-1594, Tappi Engineering Conference, syyskuu 1995, Dallas, U.S.A.

6. Recommended Good Practice Safe Firing of Black Liquor in Black Liquor Recovery Boilers, The Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, April 2016.

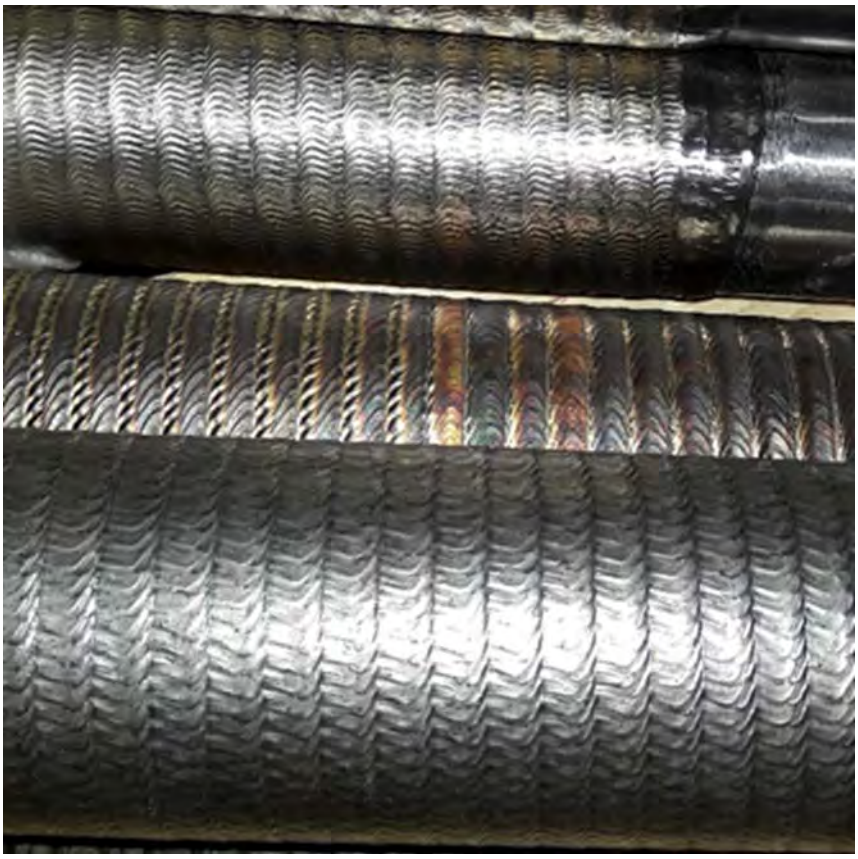
7. Recovery Boiler Incident and Learned Lessons, Duer, W. Recovery Boiler Safety Forum, Stendal, 24.5.2016.

LIITE 3

KTR: VTT: Hitsauspinnotettujen putkien käyttö soodakattiloissa – raportti 6.11.2017

TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-CR-03414-17



Hitsauspinnoitteet ja mikrorakennemuutokset vanhennushehkutuksissa

Kirjoittajat: Satu Tuurna, Pertti Auerkari, Sanni Yli-Olli

Luottamuksellisuus: luottamuksellinen

Raportin nimi

Hitsauspinnoitteet ja mikrorakennemuutokset vanhennushehkutuksissa

Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	**Asiakkaan viite**
Suomen Soodakattilayhdistys ry c/o Pöyry Finland Oy Markus Nieminen PL 4 01621 Vantaa	
Projektin nimi Hitsauspinnoitettujen putkien vanhennus	**Projektin numero/lyhytnimi** 151300
Raportin laatija(t) Satu Tuurna, Pertti Auerkari, Sanni Yli-Olli	**Sivujen/liitesivujen lukumäärä** 30 + liitteet
Avainsanat hitsauspinnoite, vanheneminen, mikrorakennemuutos, lämpökäsittely	**Raportin numero** VTT-CR-03414-17

Tiivistelmä

Raportti kokoaa hitsauspinnoitetuille putkille tehtyjen vanhennushehkutusten tulokset. Tuloksia voidaan hyödyntää selvitettäessä mikrorakennemuutosten perusteella käytössä olleisiin tai ylikuumentuneisiin komponentteihin kohdistuneita lämpörasituksia, ja jos käyttölämpötila tai-aika tunnetaan, voidaan näistä toinen määrittää.

Vanhennuskokeissa tarkasteltiin hitsauspinnoitteita 309L, IN625 ja IN825 kolmelta toimittajalta, AZZ, Uhlig ja Areva. Referenssimateriaaleina hitsauspinnoitetuille putkille koehehkutuksissa toimivat kompoundputket 304L, Sanicro 28 ja Sanicro 38.

Toimitustilaisten näytteiden muutosvyöhykkeiden kovuusvaihtelut tasoittuivat hehkutuksissa, jolloin korkein kovuus kehittyi pinnoitteen puolelle lähelle rajapintaa, mikä selittyy hiilettymisellä eli hiilen diffuusiolla pohjamateriaalista pinnoitteeseen. Pidemmillä hehkutusajoilla rajapinnan läheisyyteen ja muutosvyöhykkeelle pohjamateriaalin puolelle jää hieman alentunut kovuus hiilenkadon ja rakeenkasvun vuoksi.

Hehkutetuissa suorissa näyteputkissa ei havaittu tarkasteluilla ennalta arvaamattomia mikrorakennemuutoksia. Putkien taivutus lisää jännityksiä rakenteeseen, jolloin mikrorakennemuutokset kiihtyvät. Lisäksi rakenteen muokkautuminen voi lisätä herkistymistä ympäristövaikutteisille vauriomekanismeille. Näiden asioiden mahdollista tarkastelua tulevaisuudessa suositellaan.

Yleisesti voidaan todeta, että pitkäaikainen käyttö korkeissa lämpötiloissa aiheuttaa sekä hitsauspinnoitettujen että kompound-putkien pohjamateriaaleissa ja rajapinnalla mikrorakennemuutoksia hiilen diffundoituessa seostamattomasta/matalaseosteisesta teräksestä korkeammin seostettuun pintamateriaaliin aiheuttaen pohjaputkessa hiilen katoa ja pintamateriaalissa hiilettymistä ja sen seurauksena herkistymistä. Hitsauspinnoitteet ovat rakenteeltaan kilpailukykyisiä kompound-putkien kanssa eikä valmistusmenetelmästä johtuvia vaurioita ole odotettavissa, kun valmistus tehdään normeja seuraten. Hitsauspinnoitteiden eduksi voidaan katsoa mm. laaja materiaalivalikoima sekä usein nopeampi toimitusaika verrattuna kompound-rakenteisiin.

Luottamuksellisuus	Luottamuksellinen

Tampere 6.11.2017

Laatija	**Hyväksyjä**
Satu Tuurna Tiimivetäjä	Pekka Pohjanne Tutkimuspäällikkö

VTT:n yhteystiedot
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, PL 1000, 02044 VTT
Puh. 020 722 111, etunimi.sukunimi@vtt.fi

Jakelu (asiakkaat ja VTT)
Tilaaja 1 kpl
VTT arkisto 1 kpl

VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Sisällysluettelo

1. Johdanto 3

2. Koemateriaalit ja tutkimusmenetelmät 4

3. Vanhennushehkutusten tulokset 6

3.1 Mikrorakennemuutokset 6
3.2 Kovuusmittaukset 10
3.3 Hiilenkato rajapinnan yli ja pinnoitteen hiilettyminen rajapinnalla 25

4. Yhteenveto 29

Lähdeviitteet 30

Liite 1. Pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset hehkutusten jälkeen
Liite 2. Rajapintojen rakenne
Liite 3. Pinnoitteiden mikrorakenne hehkutusten jälkeen
Liite 4. EDX-analyysit pinnoite-perusainerajapinnan yli

1. Johdanto

Korkeissa lämpötiloissa toimivien komponenttien kunnon ja jäljellä olevan eliniän määrittämiseksi on tärkeä tuntea komponenttiin kohdistuva lämpökuormitus, lämpötilan ja ajan yhteisvaikutus. Komponenttien lämpötilan suora mittaus käyttöolosuhteissa on usein haastavaa, mutta sen arviointi jälkikäteen on usein mahdollista käytön aikaisten materiaalimuutosten perusteella.

Niukkaseosteisissa tai seostamattomissa teräksissä, joiden mikrorakenne on toimitustilassa ferriittisperliittinen, mikrorakennemuutokset ilmenevät aluksi perliitin lamellien katkeiluna ja vähitellen etenevänä palloutumisena, jota seuraa palloutuneiden karbidien karkeneminen [1-3]. Rakennemuutoksia voidaan seurata mikroskooppitarkasteluin (optinen, SEM) sekä kovuusmittausten avulla. Kompound- ja hitsauspinnoitetuissa putkissa, joissa hiiliteräksen pintaan on tuotu korroosiota kestävämpi kerros, tapahtuu pohjamateriaalien rakennemuutosten lisäksi muutoksia pinnoite-pohjarajapinnalla. Pohjamateriaalista diffundoituu hiiltä pinnoitteen puolella aiheuttaen pohjamateriaalissa hiilenkatoa ja vastaavasti korkeammin seostetun pinnoitteen hiilettymistä ja sen seurauksena herkistymistä.

Ferriittisperliittisen teräksen karbidirakenteen palloutuminen ja karkeneminen noudattavat kinetiikaltaan Arrheniuksen yhtälöä

$$k = Ae^{-E/T}, \tag{1}$$

missä k on reaktionopeus, A vakio, E aktivaatioenergia ja T lämpötila (K).

Yhtälön ollessa voimassa reaktionopeuden tai vastaavan tiettyyn muutokseen kuluvan ajan ja valitsevan lämpötilan riippuvuus on lineaarinen 1/T - log t - koordinaatistossa. Eri asteisissa muutoksia kuvaavalle käyräparvelle on pyritty etsimään yleisempää riippuvuutta, jolloin ajan ja lämpötilan yhteisvaikutus voitaisiin esittää parametrimuodossa numeroarvona. Tämän tyyppisistä parametreista yleisimmin käytetty on Larson-Miller -parametri

$$P_{LM} = T \times (\log t + C), \tag{2}$$

missä P_{LM} on Larson-Miller parametri, T lämpötila (K), t aika (h) ja C vakio.

Aiemmin tehtyjen tutkimusten [4] mukaan tiettyyn mikrorakenteen muutokseen kuluvan ajan ja metallin lämpötilan on DIN 17 175 -normin mukaisella teräksellä St 35.8, 10 CrMo 9 10 ja X 20 CrMoV 12 1 havaittu noudattavan hyvin Larson-Miller -parametrin mukaista riippuvuutta vakion C arvolla 14.

Hiili siirtyy kompound- ja hitsauspinnoitetussa putkessa niukkaseosteisesta teräksestä rajapinnan yli seostetumpaan teräkseen diffundoitumalla. Diffuusion matka-aikariippuvuus noudattaa Fickin toista lakia [4], jonka mukaan tietylle pitoisuudelle

$$x^2 \approx D\,t, \tag{3}$$

missä x on diffuusiomatka, D diffuusiokerroin (vakio vakiolämpötilassa) sekä t aika [5].

Käytännössä kompound- ja pinnoitehitsatuissa putkissa tapahtuu hiilen diffuusiota rajapinnan yli jo valmistusvaiheessa, jolloin hehkutuksen aikana tapahtuva diffuusio ei noudata Fickin lakia. Yhtälön (3) diffuusiokertoimen lämpötilariippuvuus on Arrheniuksen yhtälön kaltainen

$$D = D_o\, e^{-Q/RT}, \tag{4}$$

missä D_o on diffuusiovakio, Q aktivaatioenergia ja R yleinen kaasuvakio [5].

Diffuusionopeuden lämpötilariippuvuudesta johtuen diffuusion aiheuttamaan muutokseen kuluvan ajan ja metallin lämpötilan odotettu riippuvuus on 1/T - log t -koordinaatistossa lineaarinen.

Raportti kokoaa hitsauspinnoitetuille putkille tehtyjen vanhennushehkutusten tulokset. Tuloksia voidaan hyödyntää selvitettäessä mikrorakennemuutosten perusteella käytössä olleisiin tai ylikuumentuneisiin komponentteihin kohdistuneita lämpörasituksia.

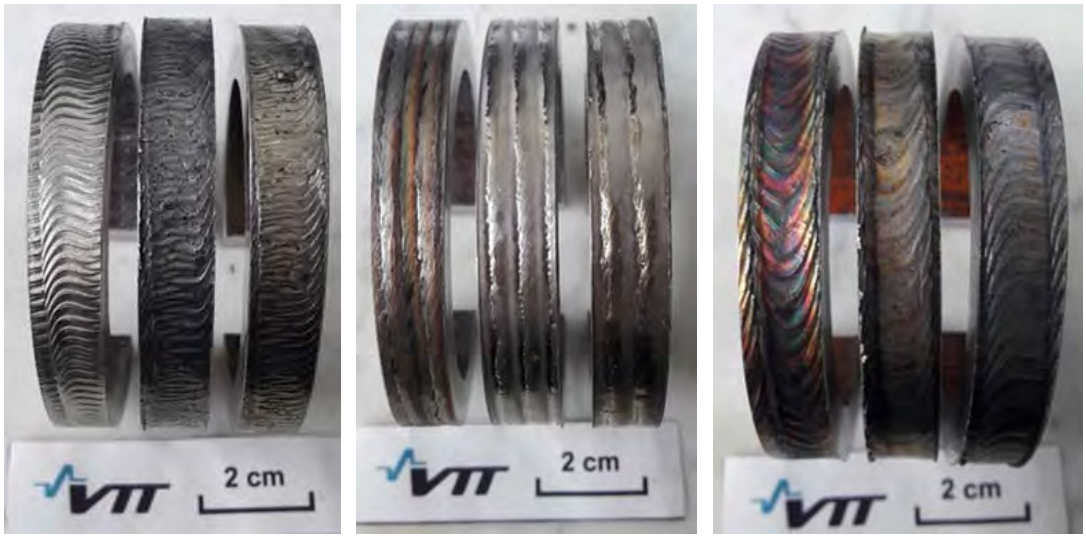
2. Koemateriaalit ja tutkimusmenetelmät

Vanhennuskokeisiin tilattiin hitsauspinnoitteita 309L, IN625 ja IN825 P265GH pohjaputkella kolmelta toimittajalta, AZZ, Uhlig sekä Areva. Toimitettujen pinnoitteiden pohjamateriaalit vaihtelivat kuitenkin seuraavasti; AZZ:n toimittamien putkinäytteiden pohjamateriaali oli P235GH, Uhligin 16Mo3 ja Arevan 7CrMoVTiB10-10. Yhteenveto toimitetuista pinnoitteista sekä pohjamateriaaleista on esitetty Taulukossa 1. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty näyterenkaat toimitetuista hitsauspinnoitteista sekä hitsauspinnoitteiden paksuus putken poikkileikkauksesta. Minimipaksuusvaatimus pinnoitteille oli 2 mm. Paksuusvaihtelut pinnoitteissa johtuvat pääosin spiraalityyppisestä putken ympärikulkevasta pinnoitustavasta. Putkikohtaiset muutosvyöhykkeiden paksuudet on esitetty Taulukossa 2. Referenssimateriaaleina hitsauspinnoitetuille putkille hehkutuksissa toimivat kompound-putket 304L, Sanicro 28 sekä Sanicro 38.

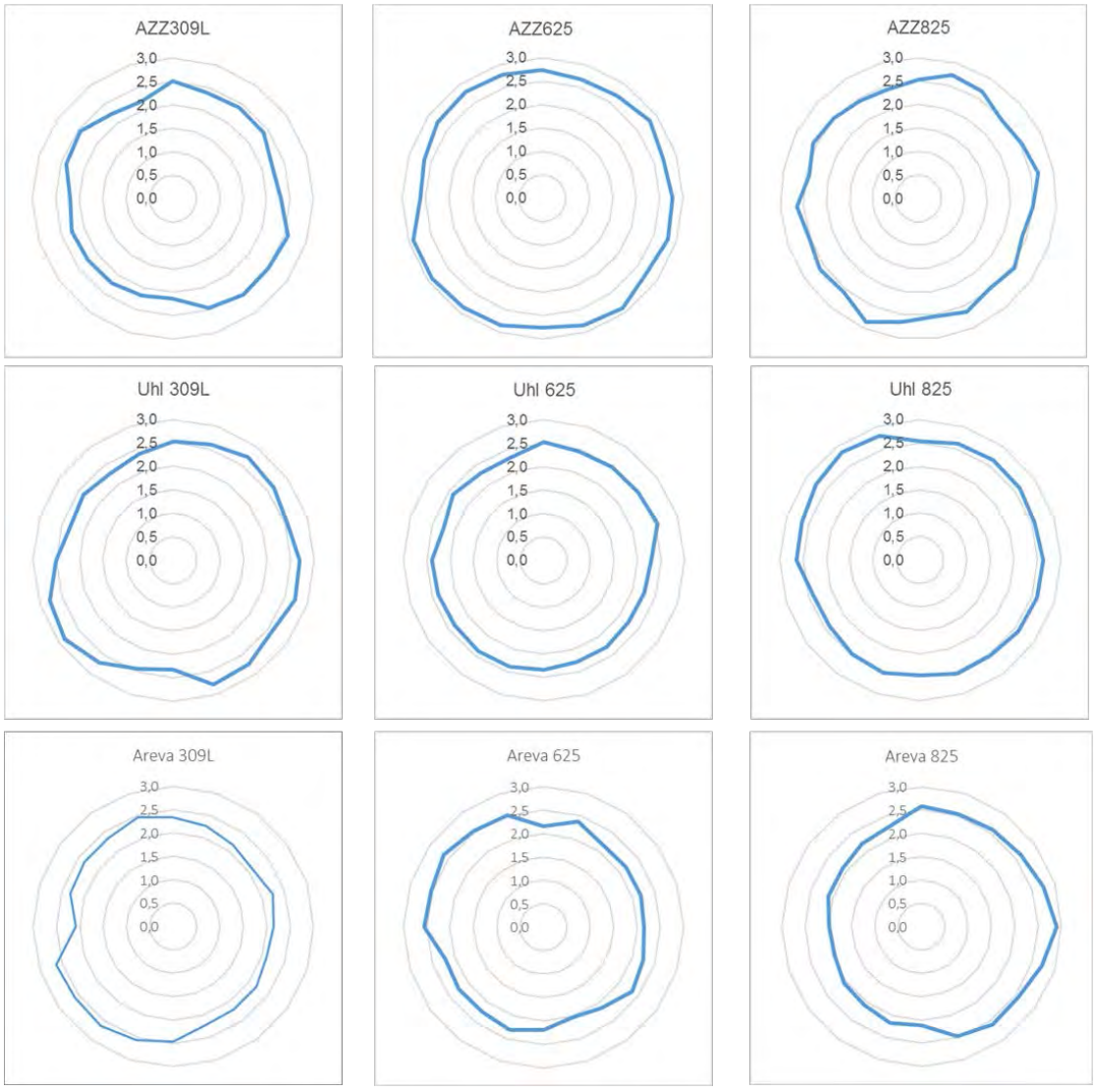
Taulukko 1. Koemateriaalit ja ainestodistuksen mukainen koostumus (jäännös Fe)

Materiaali	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	Muut	Huom
309L*		0,45	1,96	23,1		13,1			AZZ, hitsaus-pinnoite
625*				23,7	8,3	65,2		0,2Ti0, 15Al	
825*		0,2		21,6	2,8	36,1		1,8Cu, 0,7Ti	
P235GH**	0,16	0,35	0,6-1,2	0,3	0,08	0,3	0,02		
309L, E309L	0,01	0,8	1,6	23,2	<0,1	13,5		0,1Cu	Uhlig, hitsaus-pinnoite, mat.tod mukainen koostumus
625, Thermanit	<0,1	<0,1	<0,1	22,1	8,8	64,5	3,5		
825, FM65	0,01	0,3	0,8	22,7	3,1	43,4		2,1Cu, 0,8Ti 0,22Co	
16Mo3	0,17	0,19	0,68	0,22	0,27	0,11			
309L, Ugitech	0,016	0,40	1,60	23,37	0,22	13,61		0,03Cu	Areva, hitsaus-pinnoite, mat.tod mukainen koostumus
625, Sanicro 60	0,013	0,07	0,03	22,34	9,11	64,3	3,53	0,2Ti	
825, Sanicro 41CU	0,009	0,15	0,77	23,0	2,99	42,9		1,07Ti 2,29Cu	
T24	0,07	0,26	0,55	2,44	0,96			0,24V 0,07Ti	7CrMoVTiB 10-10
304L St45.8	0,009 0,19	0,44 0,29	1,17 0,69	18,4		10,36			kompound, mat.todistus
San28* T22	***	0,5 0,3	1,6 0,4	27,8 2,4	3,4 0,9	30,0		0,8Cu	kompound
San38* P265GH**	0,18	0,4 0,36	0,6 0,7	20,7	2,6	37,2		1,3Cu, 0,7Ti	kompound

*SEM analyyseihin perustuva koostumus; **Normin mukainen koostumus
***Hiiltä EDX-kammiossa epäpuhtautena, pitoisuus jätetty huomioimatta



Kuva 1. Hitsauspinnoitetut näyteputket. Vasemmalta oikealle AZZ, Uhlig ja AREVA.



Kuva 2. Toimitustilaisten hitsauspinnoitteiden paksuus putken poikkileikkauksen ympäri mitattuna [mm].

Taulukko 2. Toimitustilaisten hitsauspinnoitteiden muutosvyöhykkeiden paksuus pohjamateriaalissa [μm].

Materiaali	Hiilenkato	HAZ
309L AZZ	50-70	1400-1600
625 AZZ	<20	600-800
825 AZZ	10-40	700-900
309L Uhlig	~10	900-1200
625 Uhlig	~10	600-700
825 Uhlig	~10	700-900
309L Areva	<10	900-1300
304L	100-150	
San28	50-100	
San38	100	

Toimitetuista putkista irrotettiin näytepaloja (~25x25 mm), jotka hehkutettiin lämpötiloissa 600, 650 ja 700°C, Taulukko 3. Arevan toimittamista materiaaleista hehkutettiin vain 309L-pinnoitettu näytemateriaali. Vanhennettujen näytepalojen mikrorakenteet tutkittiin valomikroskoopin avulla, ja tulosten perusteella osaa näytteistä tarkasteltiin lisäksi pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM). Lisäksi näytteistä mitattiin mikrokovuudet (HV 0,1) ja kovuus (HV5) pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan ylitse. Tuloksia verrattiin ennen hehkutusta määritettyihin ominaisuuksiin.

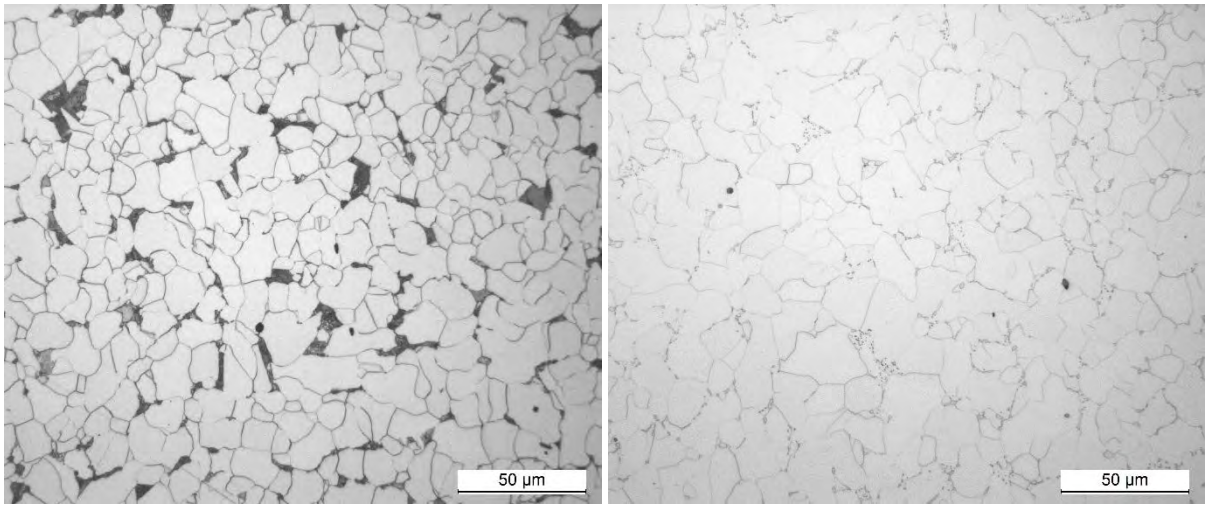
Taulukko 3. Koematriisi vanhennushehkutuksille.

t/T	600°C	650°C	700°C
10 h		x	x
100 h	x	x	x
1000 h	x	x	

3. Vanhennushehkutusten tulokset

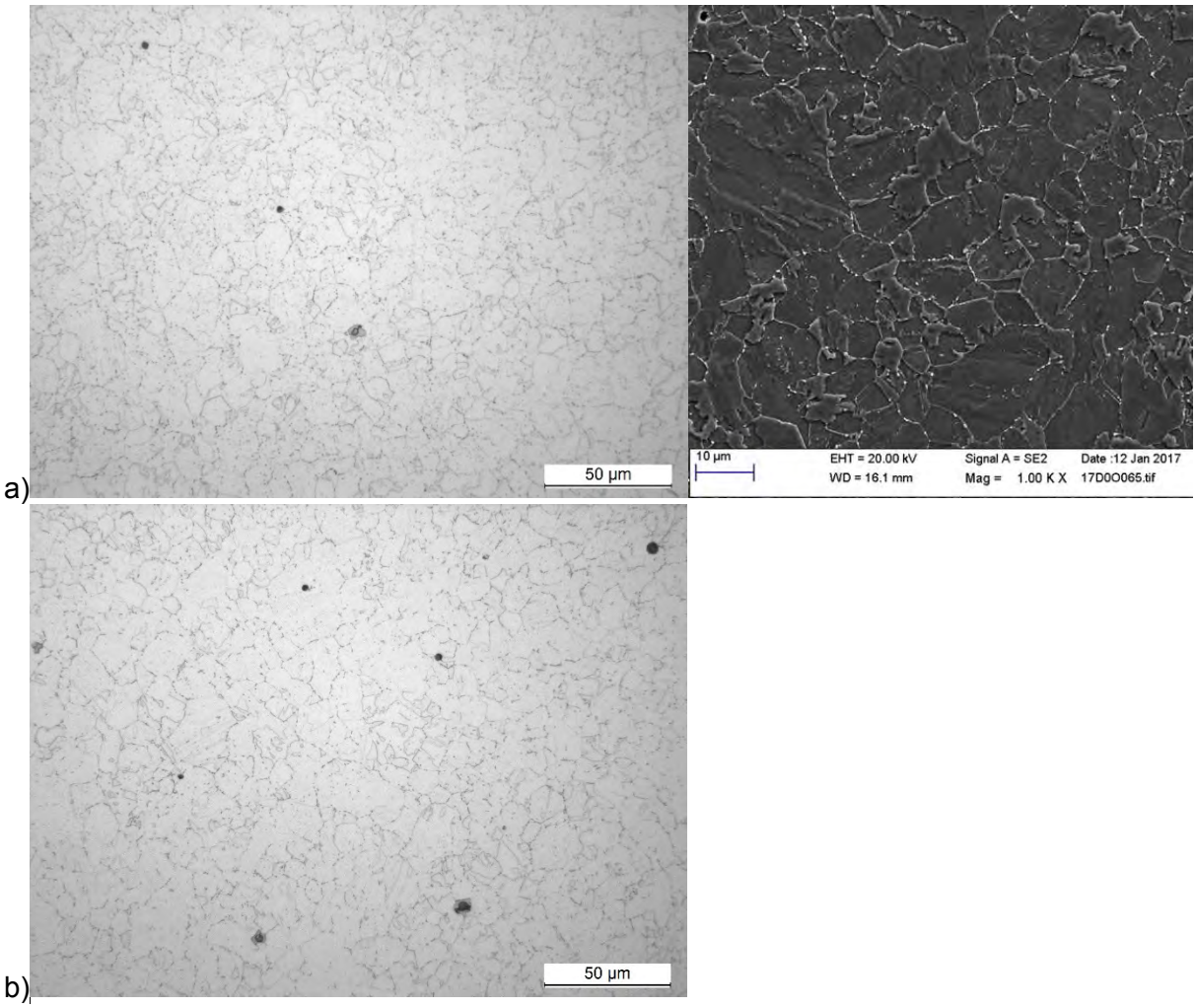
3.1 Mikrorakennemuutokset

Vanhennushehkutusten aikana teräksissä tapahtuneita mikrorakennemuutoksia kuvaavat optiset mikrorakennekuvat on esitetty Liitteessä 1. Hiiliteräksisten pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset alkavat ferriittisperliittisen rakenteen perliittirakeiden karbidilamellien katkeiluna ja vähittäisenä palloutumisena, jota seuraa karbidien karkeneminen (Kuva 3). Ferriittisperliittisbainittiselle pohjamateriaalille 16Mo3 soveltuu vastaava luokittelu. Teräksen 10CrMo9-10 (San28 kompoundin pohjamateriaali) mikrorakenne oli jo lähtötilassa hajaantunutta ja ferriittisillä alueilla oli havaittavissa karbidien muodostusta (Liite 1, Kuva 33). Arevan toimittamien putkien pohjamateriaalissa 7CrMoVTiB10-10 oli myös toimitustilassa havaittavissa voimakasta karbidin muodostumista raerajoille (Kuva 4), eikä suuria muutoksia mikrorakenteessa hehkutuksien aikana havaittu (Liite 1, Kuvat 17-24). Muutokset teräksissä 10CrMo9-10 ja 7CrMoVTiB10-10 rajoittuivat lähinnä raerajakarbidien kasvuun.



a) b)

Kuva 3. Pohjamateriaalin P235GH mikrorakennemuutos; a) toimitustila ja b) 650°C/100 h.



a)

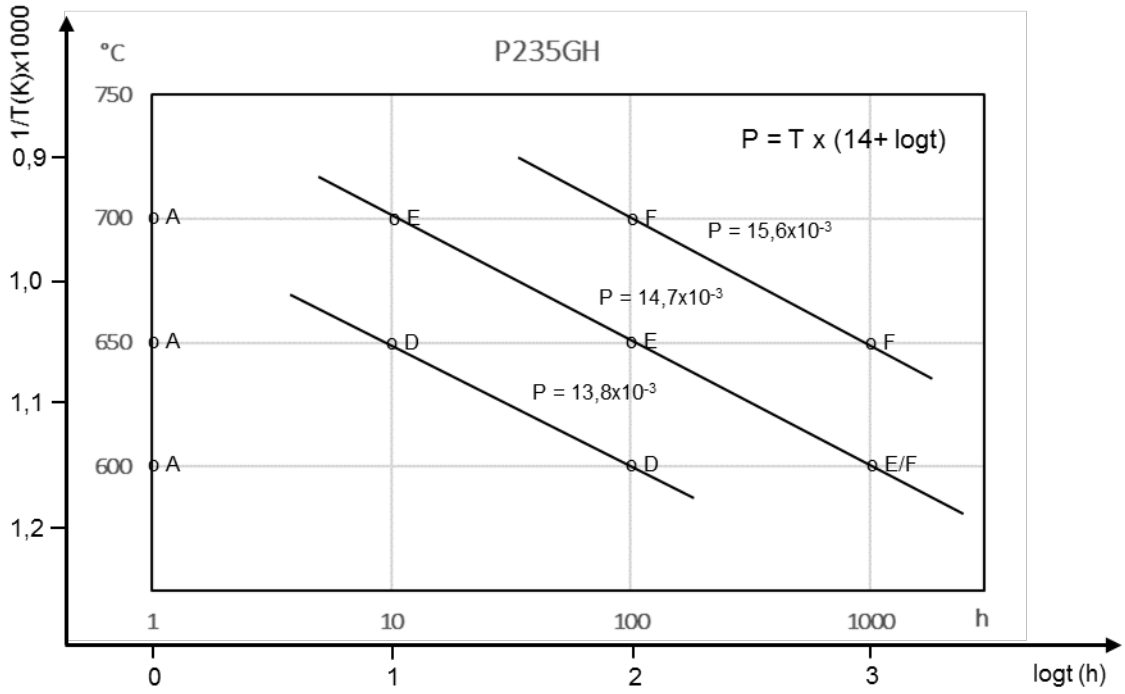
b)

Kuva 4. Pohjamateriaalin 7CrMoVTiB10-10 mikrorakenne toimitustilassa sekä 650°C/1000 h vanhennuksen jälkeen.

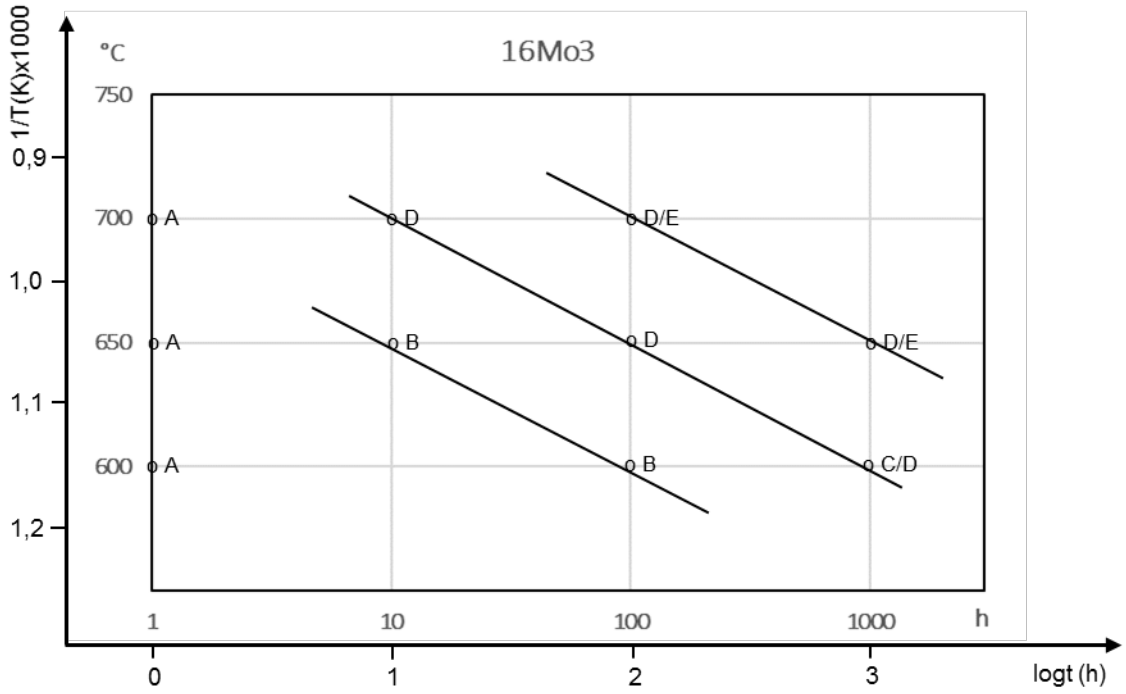
Hiiliterästen mikrorakenteessa tapahtuvien muutosten luokitteluun on käytetty seuraavaa ferriittisperliittisille teräksille soveltuvaa asteikkoa [1, 3, 4]:

A Käyttämättömän teräksen mikrorakenne, ferriittiä ja perliittiä
B Ensimmäiset merkit palloutumisesta
C Huomattavaa palloutumista, mutta edelleen joitakin lamellaaria karbideja
D palloutuminen täydellistä, mutta karbidit yhä entisillä perliittialueilla
E Karbidit hajaantuneet, mutta edelleen havaittavissa vähäisiä merkkejä perliittialueista
F Alkuperäiset perliittialueet hävinneet, osa karbideista kasvanut huomattavasti

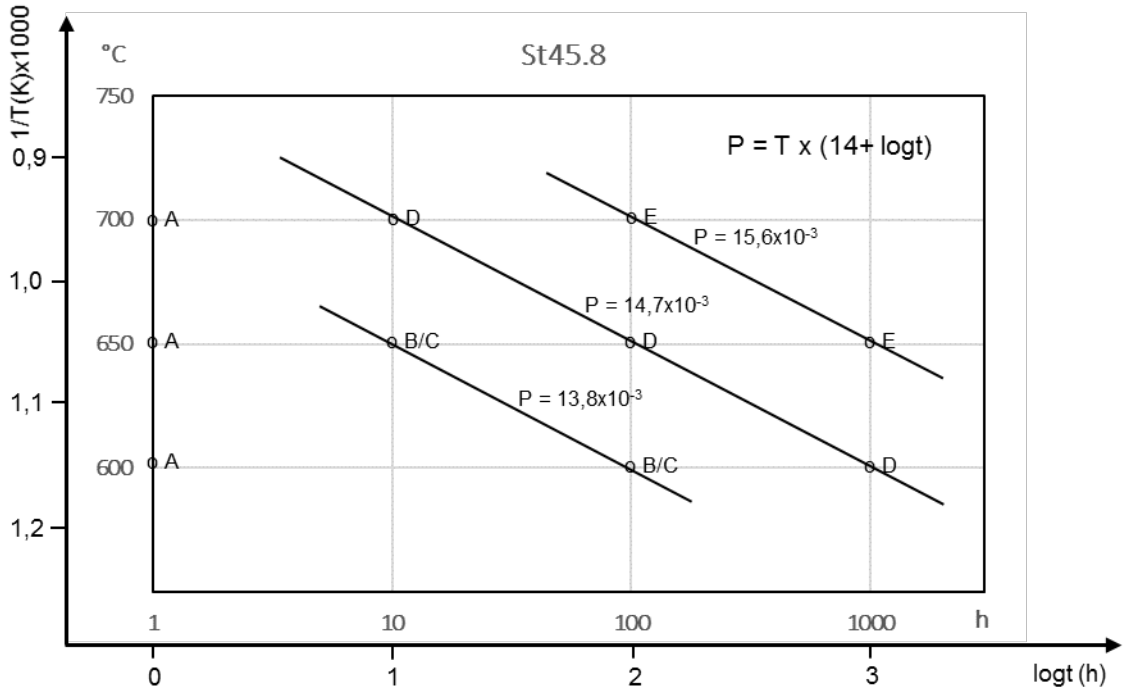
Mikrorakennetutkimusten tulokset materiaaleille P235GH, 16Mo3, St45.8 ja P265GH on esitetty Kuvissa 5-8 edellä esitetyn luokittelun mukaisesti aika-lämpötilariippuvuutena. Luokittelu perustuu valomikroskooppitutkimusten tuloksiin. Saman mikrorakennemuutoksen saavuttamiseksi tarvittavat T-t -yhdistelmät ovat kyseisessä koordinaatistossa suorilla, jotka toteuttavat LM-parametriyhtälön vakion C arvolla 14. Vertailtaessa tuloksia voidaan todeta, että teräksen P235GH mikrorakennemuutokset tapahtuvat hieman muita materiaaleja nopeammin vähäisemmästä hiilipitoisuudesta johtuen.



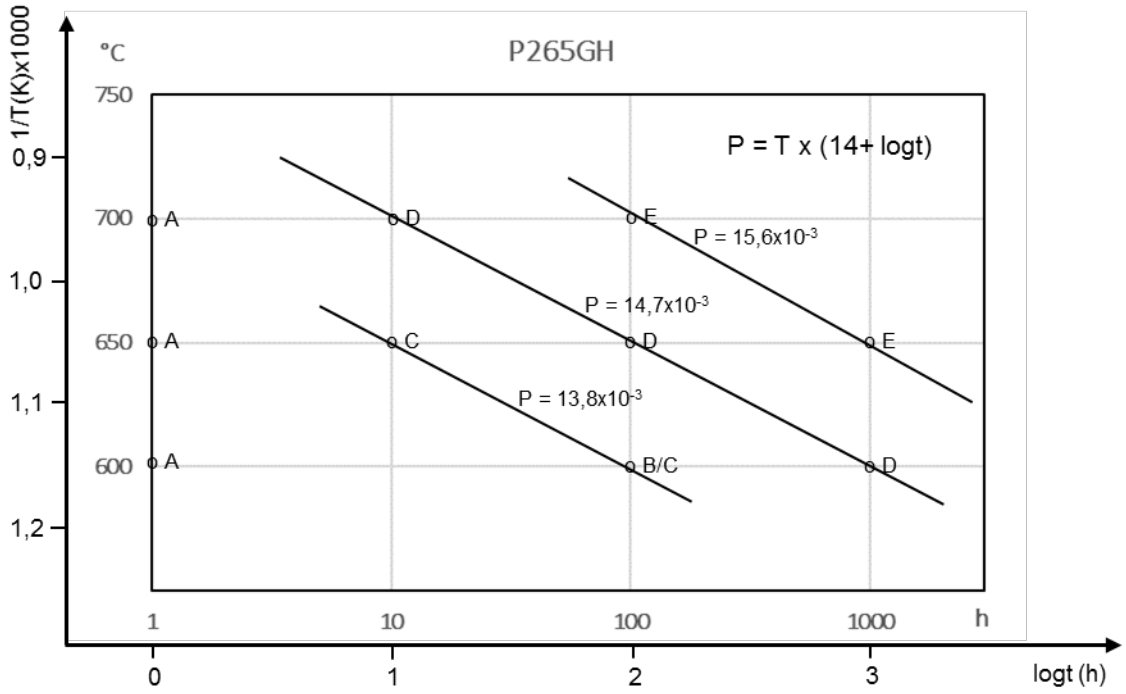
Kuva 5. Teräksen P235GH mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus.



Kuva 6. Teräksen 16Mo3 mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus.



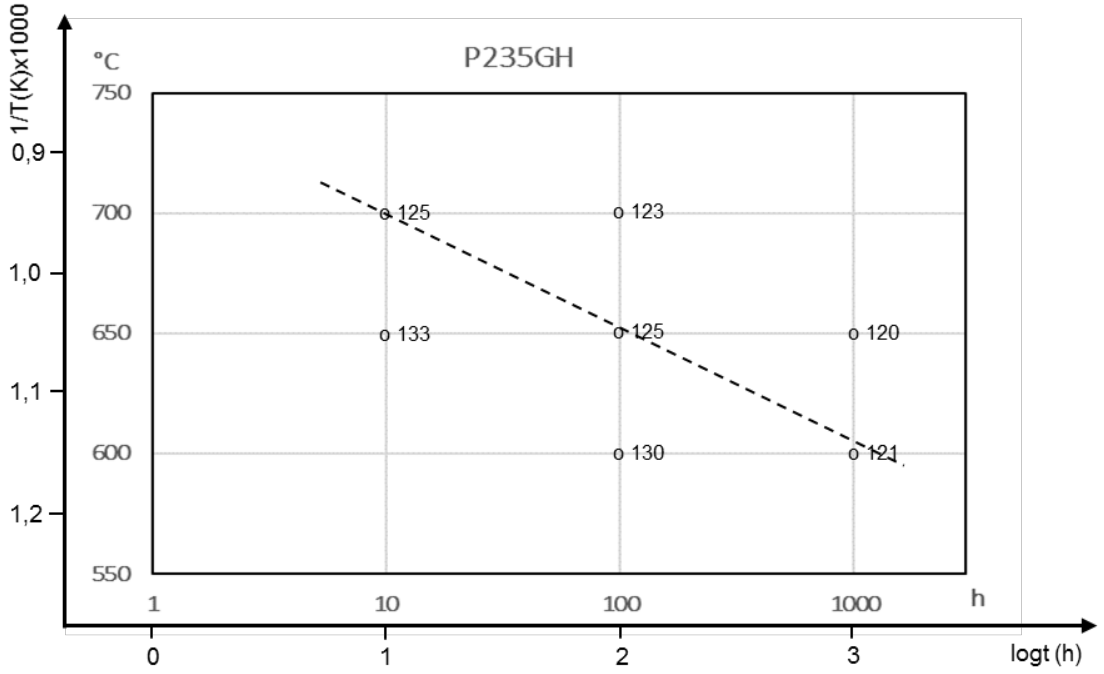
Kuva 7. Teräksen St45.8 (kompound 304L pohja) mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus.



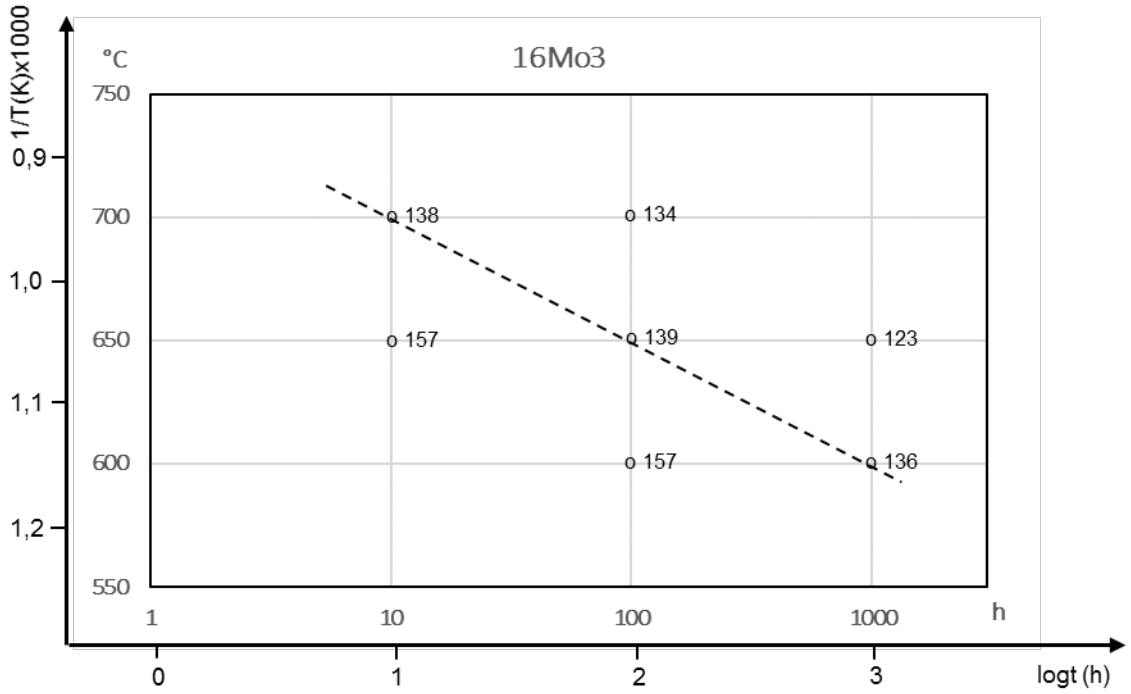
Kuva 8. Teräksen P265GH (kompound San 38 pohja) mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus.

3.2 Kovuusmittaukset

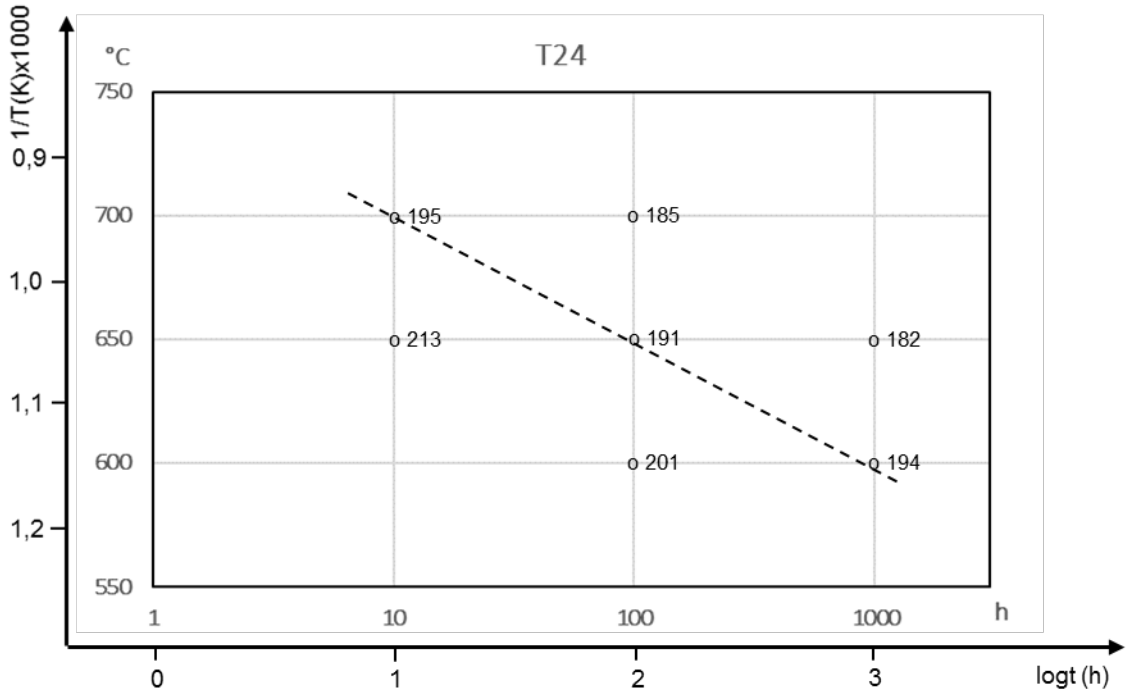
Mikrokovuusmittaustulokset (HV0,1) on esitetty 1/T - log t -koordinaatistolla Kuvissa 9-14. Kuvista voidaan todeta lähes samaan kovuuteen johtavien aika-lämpötila -yhdistelmien olevan kyseisessä koordinaatistossa suorilla, joiden kulmakerroin on samaa luokkaa kuin samoihin mikrorakennemuutoksiin johtavia aika-lämpötila -yhdistelmiä kuvaavat suorat Kuvissa 5-8. Tuloksissa näkyvä kovuuksien hajonta johtuu pääsääntöisesti käytetystä pienestä voimasta mittauksien aikana (HV0,1). Kuvassa 15 on esitetty korrelaatio kovuustuloksille HV0,1 ja HV5 hehkutuksen 650°C/1000 h jälkeen.



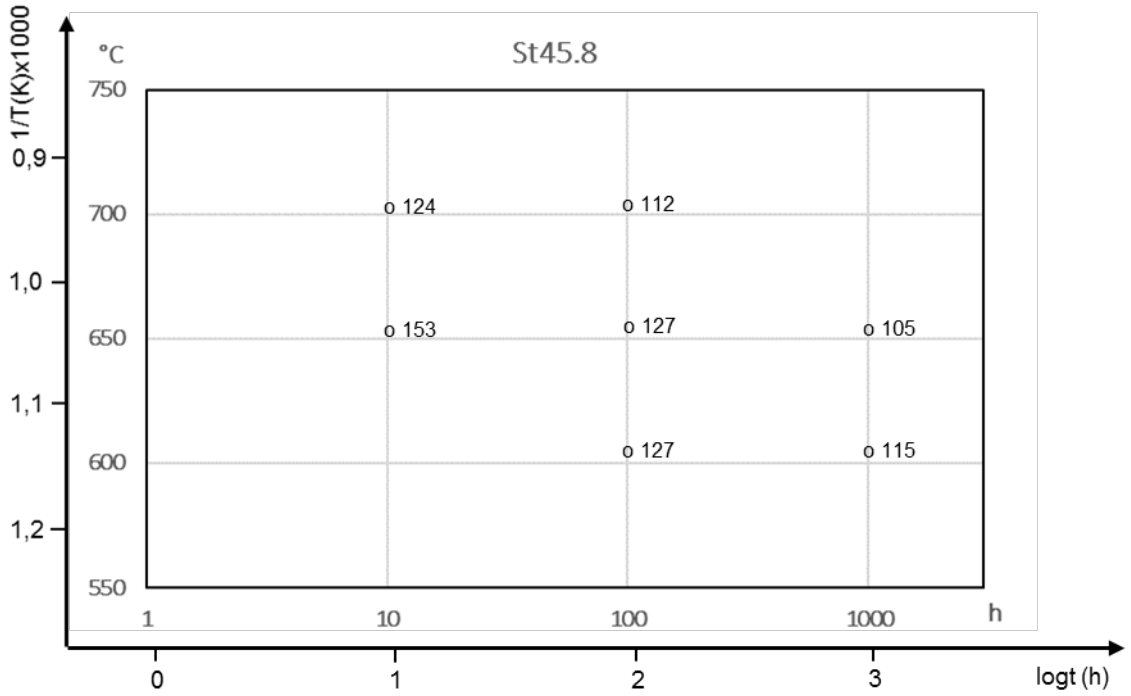
Kuva 9. Teräksen P235GH (AZZ:n toimittamien putkien pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus.



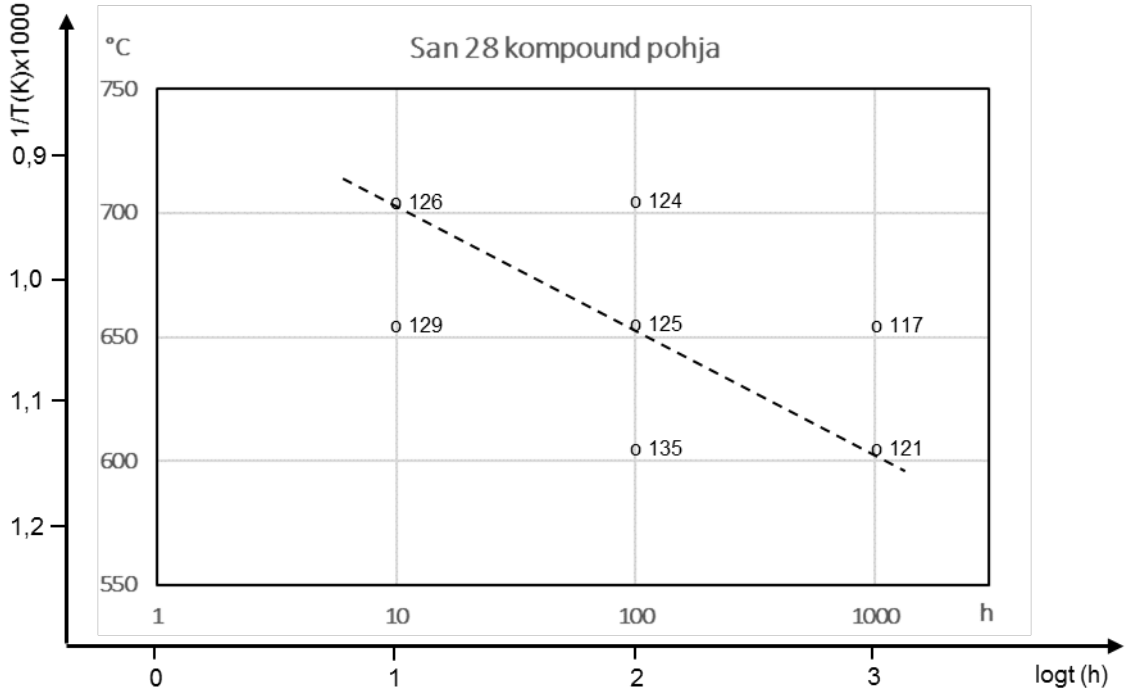
Kuva 10. Teräksen 16Mo3 (Uhligin toimittamien putkien pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus.



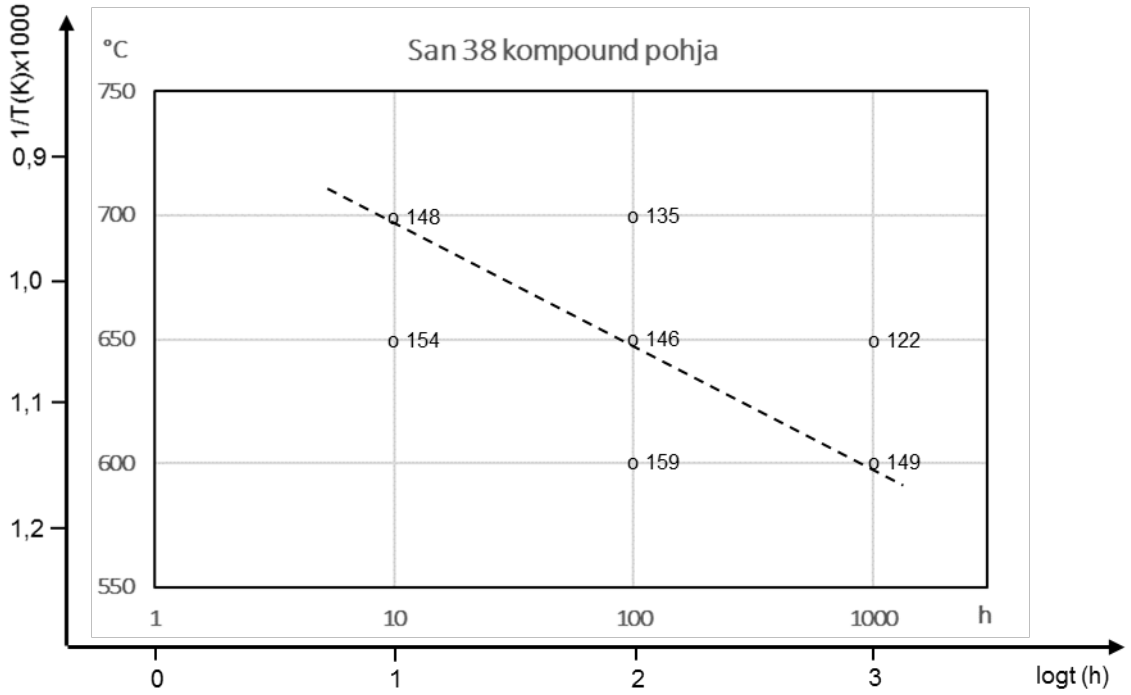
Kuva 11. Teräksen 7CrMoVTiB10-10 (Arevan toimittamien putkien pohjamateriaali) kovuus-muutosten t-T -riippuvuus.



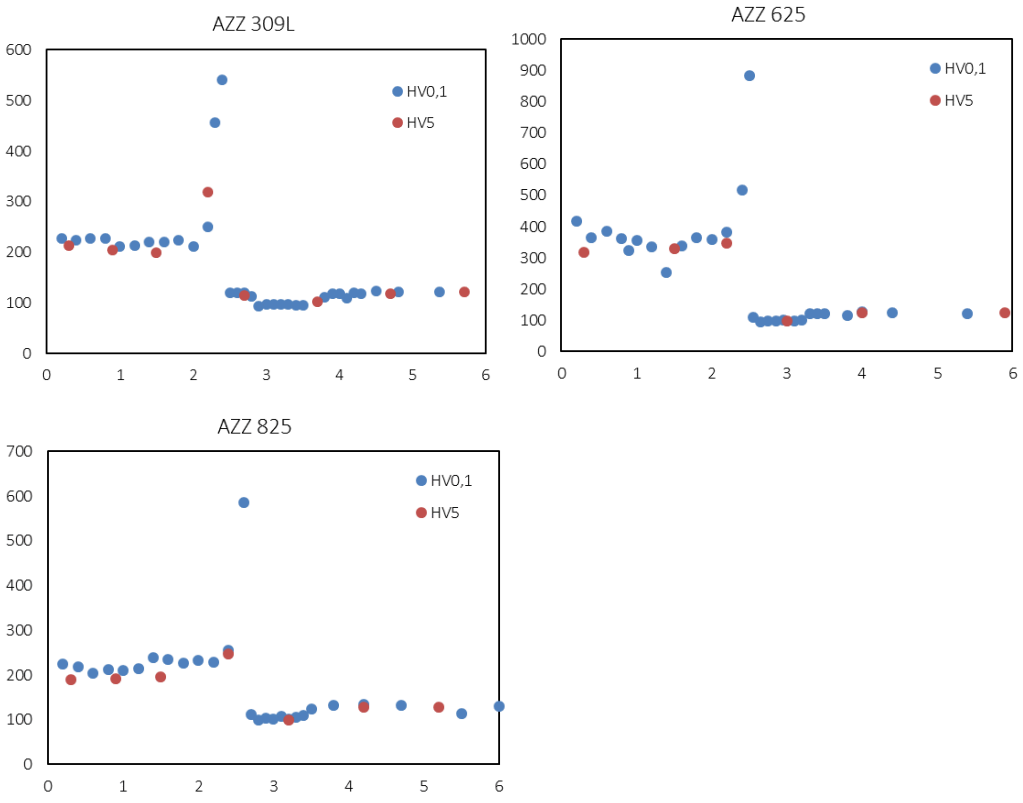
Kuva 12. Teräksen St45.8 (kompound 304L putken pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus.

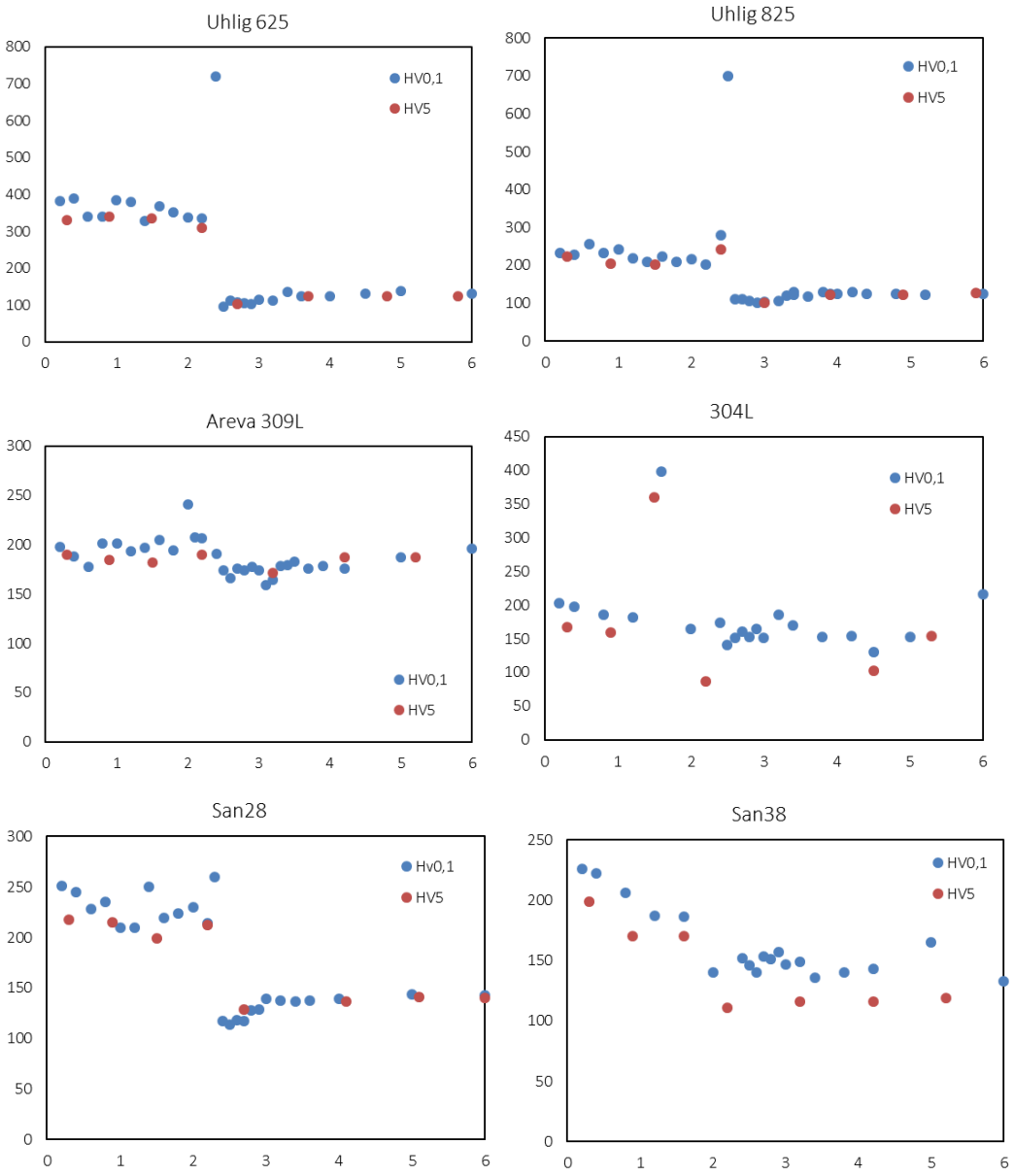


Kuva 13. Teräksen 10CrMo9-10 (San28 kompound putken pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus.



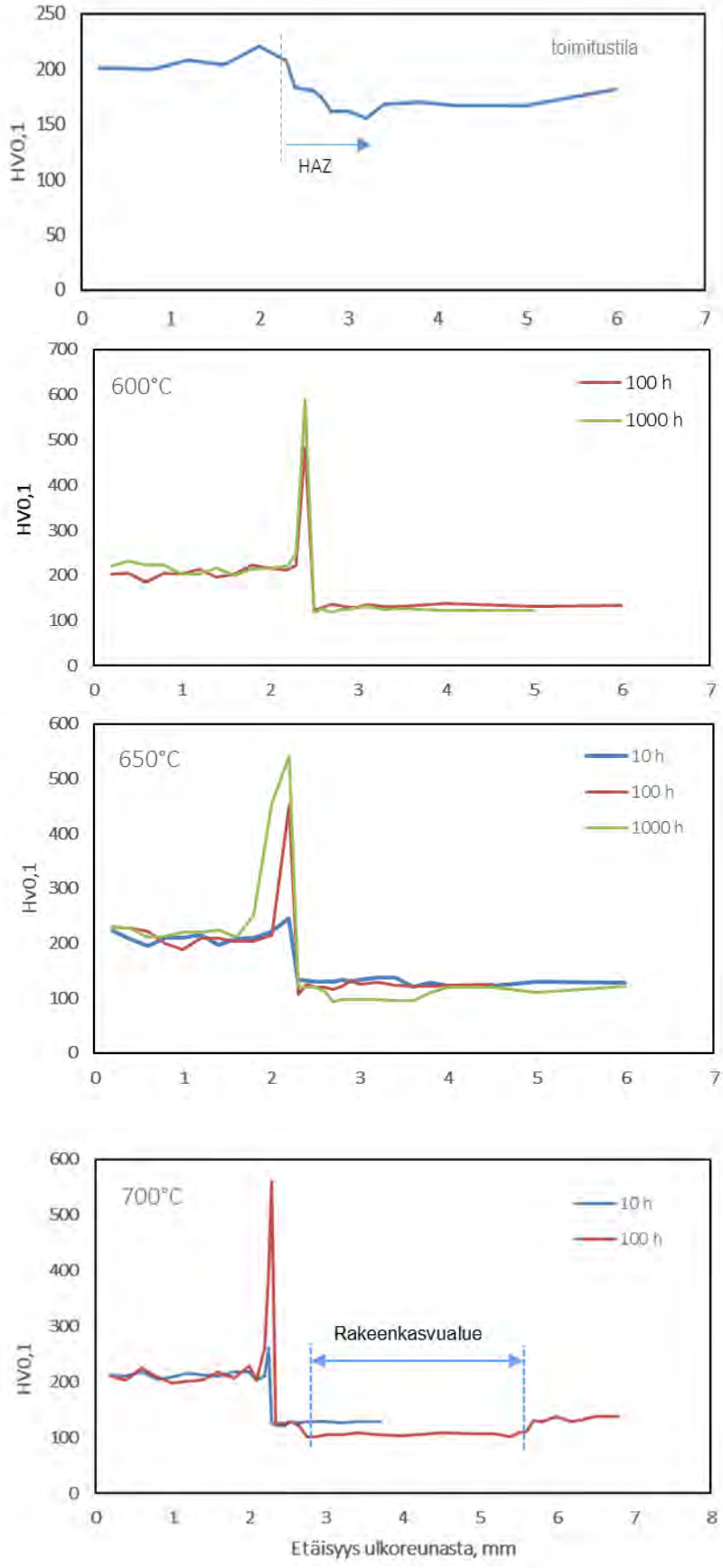
Kuva 14. Teräksen P265GH (San38 kompound putken pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus.



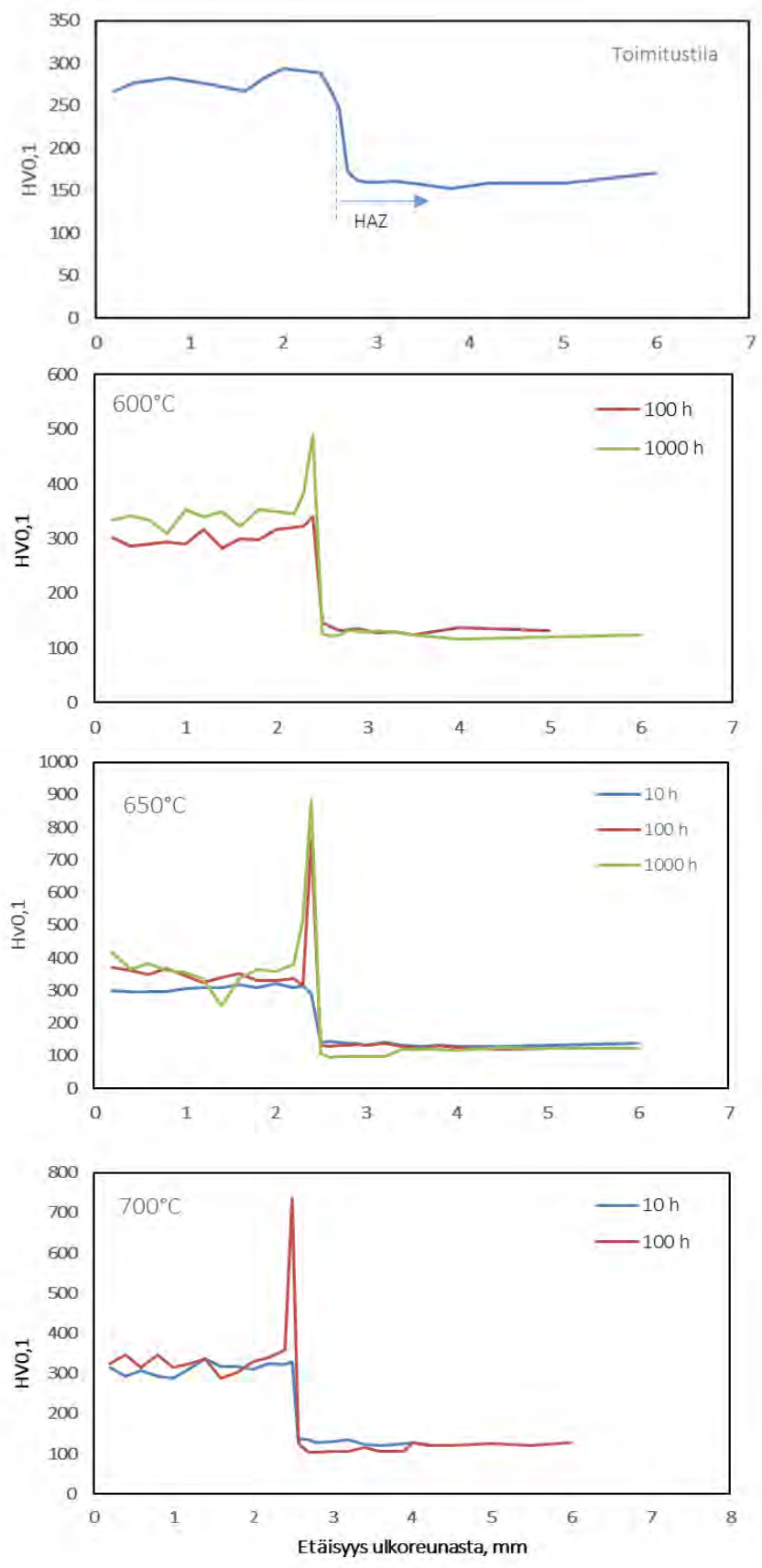


Kuva 15. Kovuustulokset pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan yli HV0,1 ja HV5 650°C/1000 h hehkutuksen jälkeen.

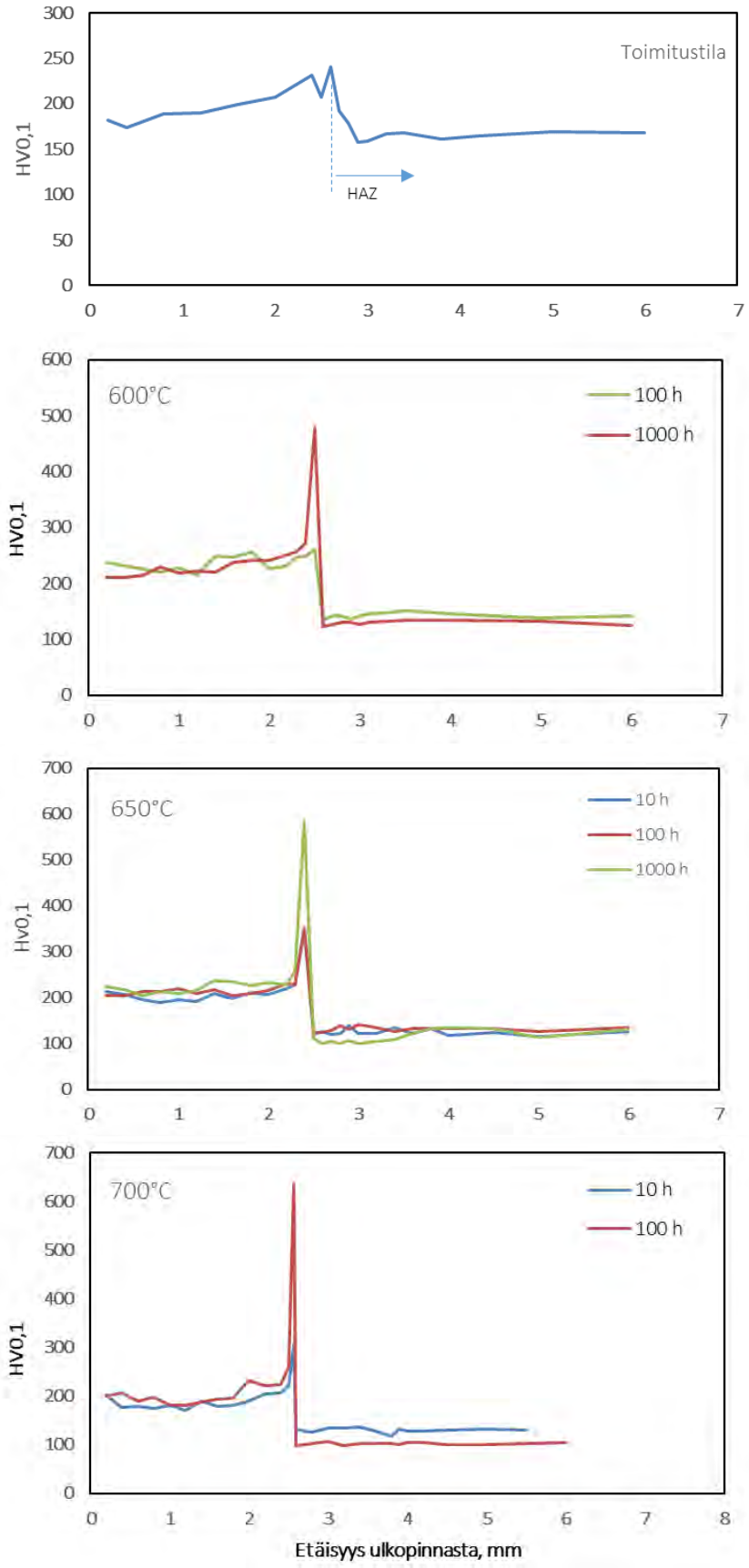
Mikrokovuustulokset pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan yli on esitetty Kuvissa 16-25. AZZ:n toimittamissa pinnoitteissa HAZ-alueen kovuus pohjamateriaalin puolella ei suuresti eroa pohjamateriaalin keskiarvokovuudesta. Uhligin 625-pinnoite käyttäytyy toimitustilaisena samoin. Uhligin 309L sekä 825 -pinnoitettujen putkien kovuusarvot nousevat HAZ-alueella (Kuvat 19 ja 21). Saman tyyppinen kovuuden nousu on nähtävissä Arevan toimittamassa 309L putkessa (Kuva 22). Ko. alueen kovuus tasoittui hehkutuksen aikana ja korkein kovuusarvo hehkutetuissa näytteissä muodostui pinnoitteen puolella lähelle rajapintaa, mikä selittyy hiilen diffuusiolla pohjamateriaalista pinnoitteeseen. Arevan 309L pinnoitetussa putkessa HAZ-alueen kovuus lähestyi pinnoitteen ja pohjamateriaalin kovuuksia lämpökäsittelyjen aikana ja rajapinnalle kasvava kovuuspiikki havaitaan vasta pitkillä hehkutusajoilla (Kuva 22). Pääsääntöisesti kuitenkin kaikkiin näytteisiin, niin pinnoitushitsattuihin kuin myös referenssinä olleisiin kompound-näytteisiin, muodostuu vanhennushehkutusten aikana pinnoitteen puolelle lähellä rajapintaa kovuuspiikki hiilen diffundoituessa pohjamateriaalista pinnoitteen puolelle. Pidemmillä hehkutusajoilla rajapinnan läheisyyteen pohjamateriaalin puolelle muodostuu hieman matalampien kovuusarvojen vyöhyke (esim Kuvat 19, 20 ja 21). Tämä alue näkyy mikrorakennekuvissa rakeenkasvualueena, Kuva 26.



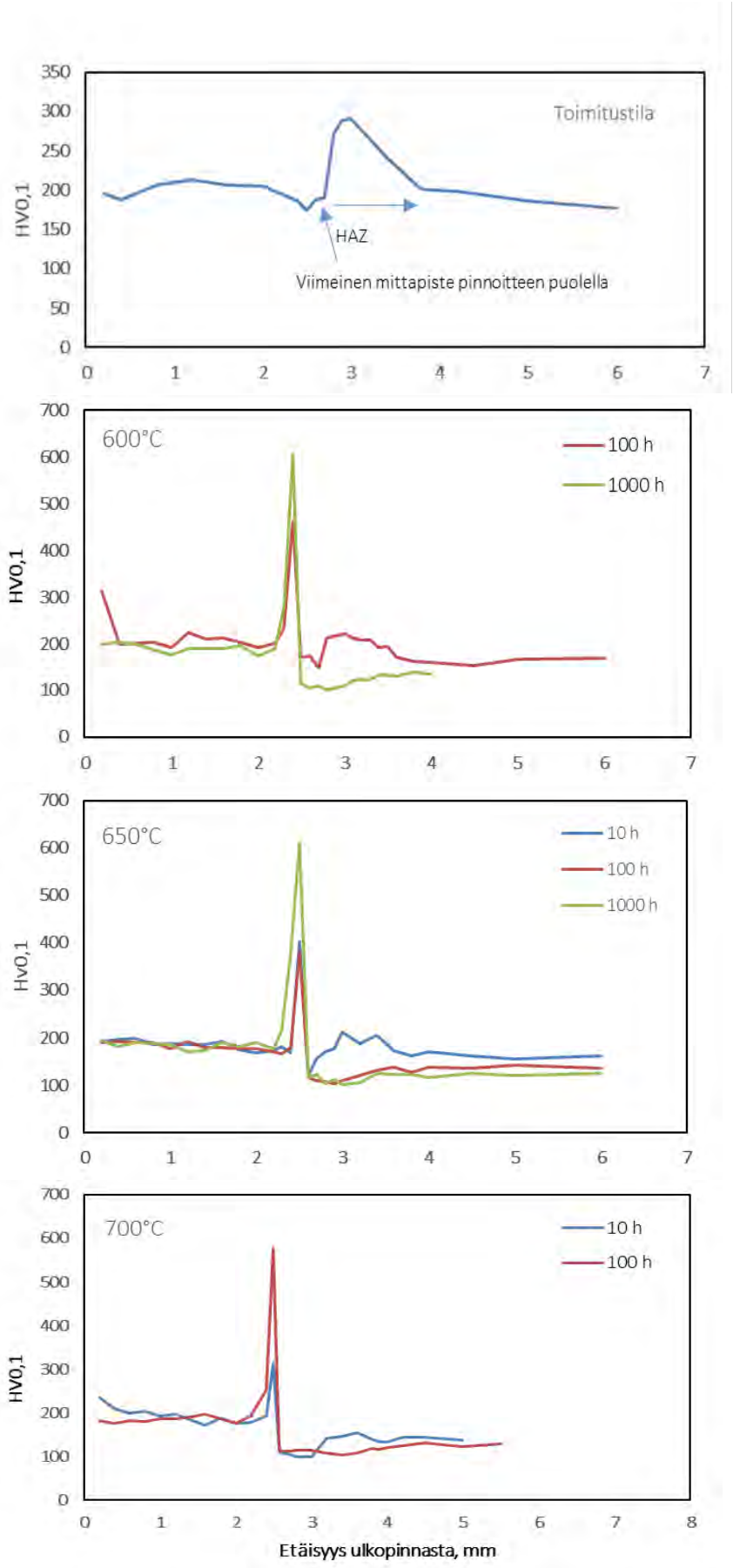
Kuva 16. Pinnoitteen 309L-P235GH (AZZ) kovuusmuutos rajapinnan yli, korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



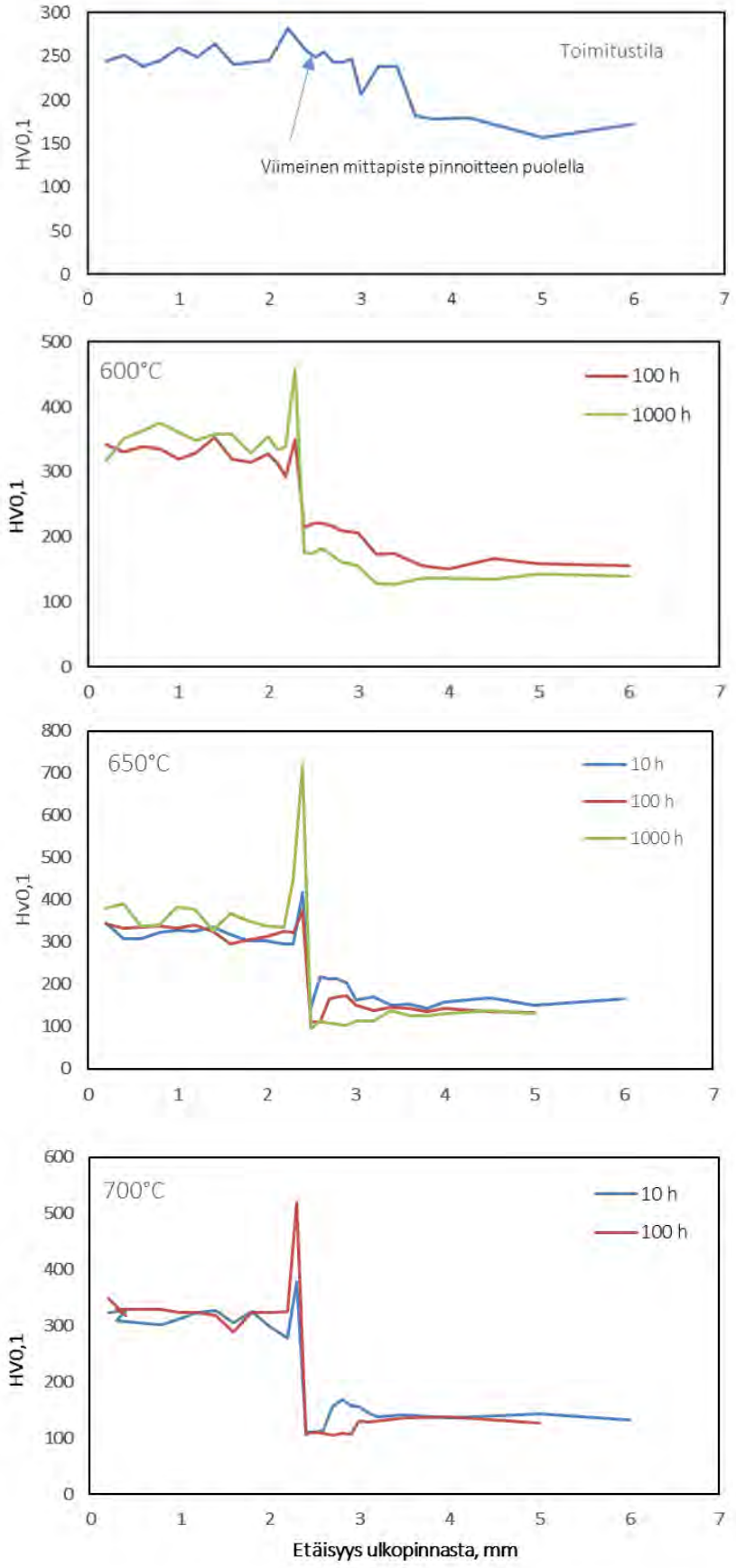
Kuva 17. Pinnoitteen 625-P235GH (AZZ) kovuusmuutos rajapinnan yli, korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



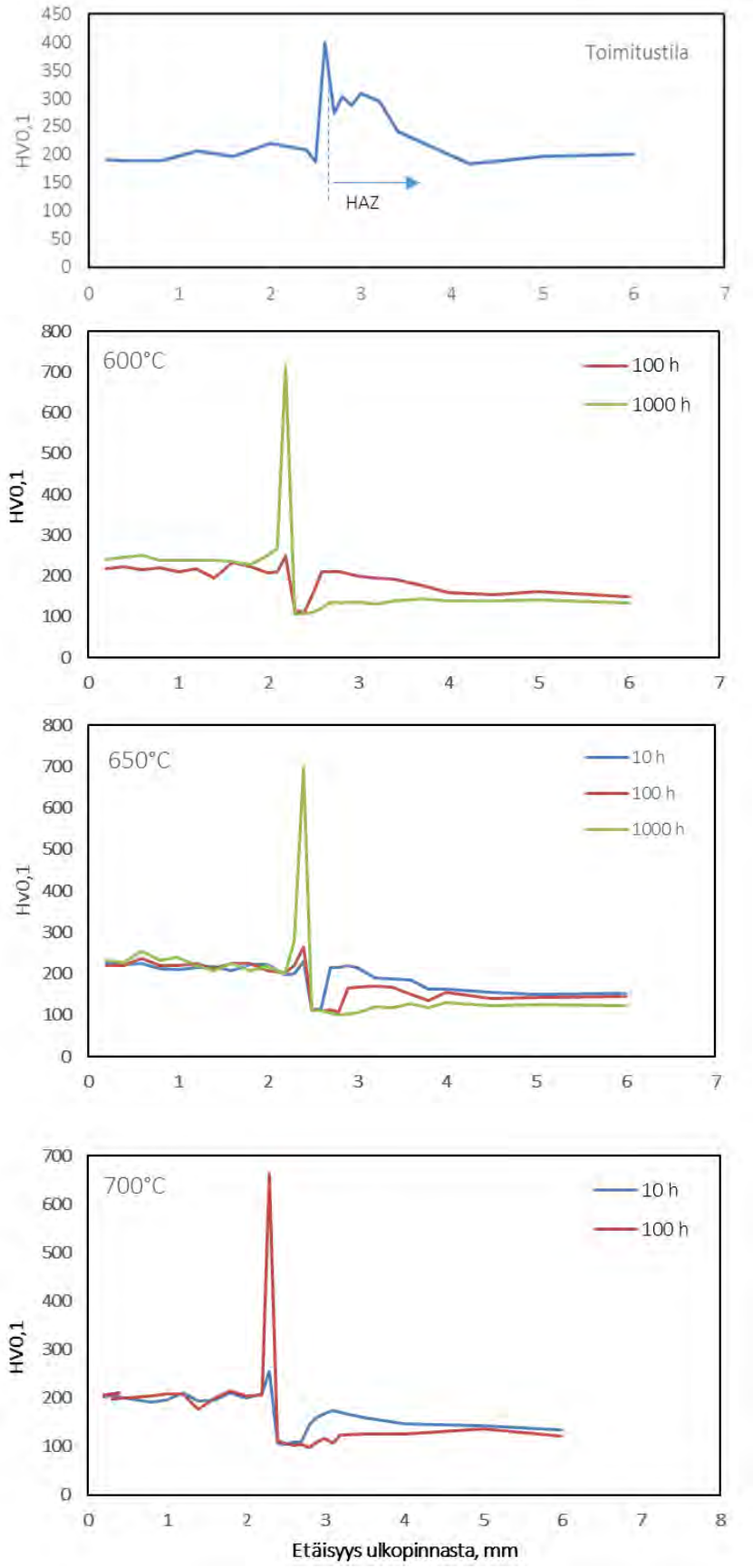
Kuva 18. Pinnoitteen 825-P235GH (AZZ) kovuusmuutos rajapinnan yli, korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



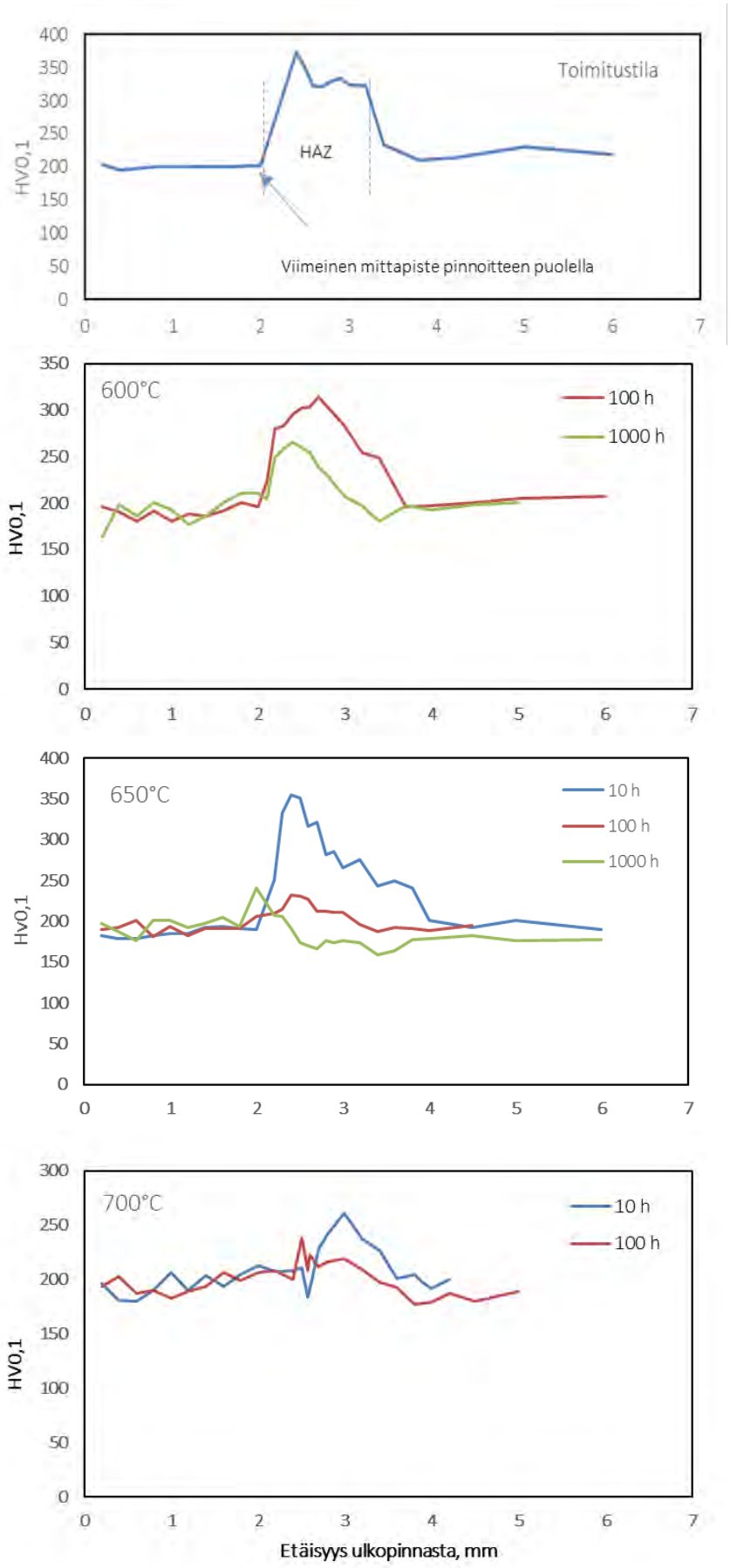
Kuva 19. Pinnoitteen 309L-16Mo3 (Uhlig) kovuusmuutos rajapinnan yli, hehkutetuissa näytteissä korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



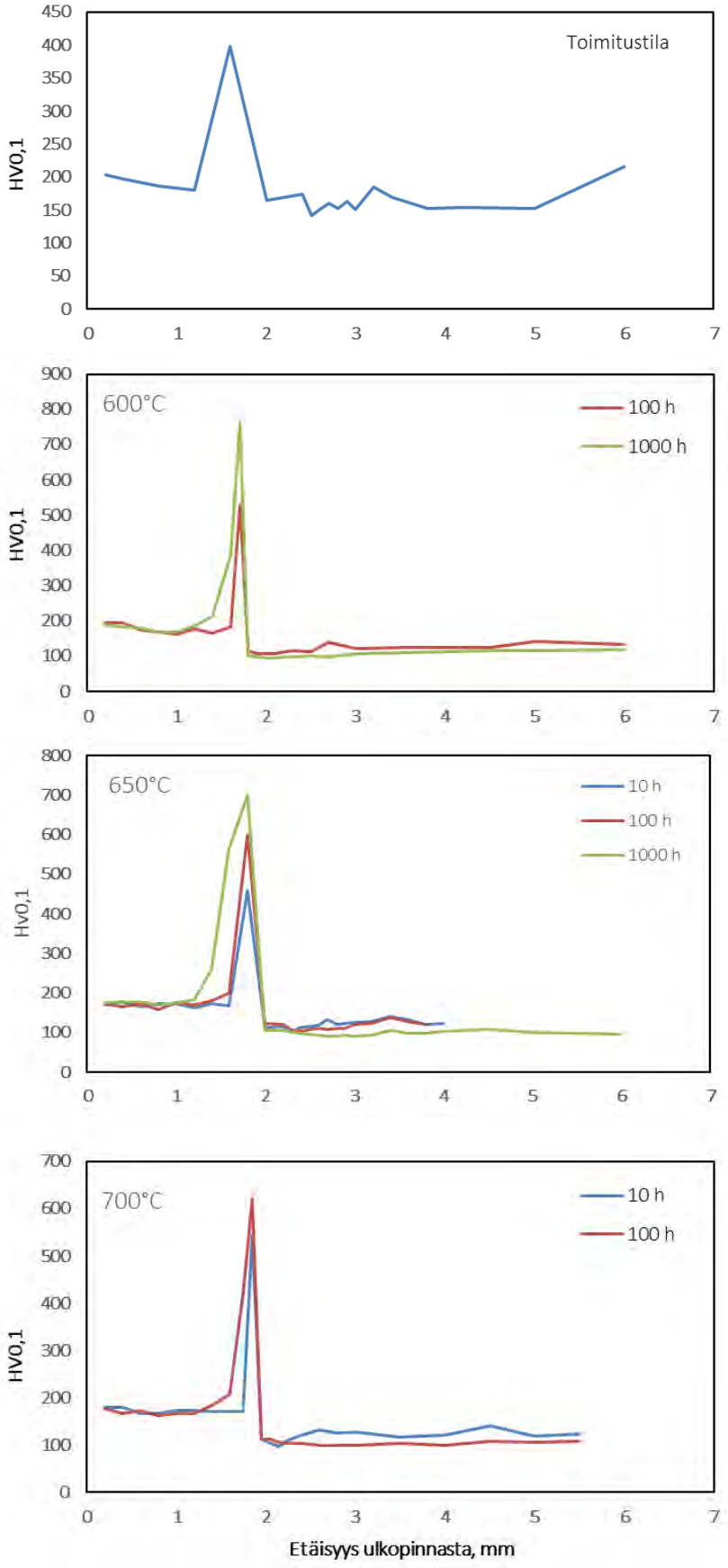
Kuva 20. Pinnoitteen 625-16Mo3 (Uhlig) kovuusmuutos rajapinnan yli, hehkutetuissa näytteissä korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



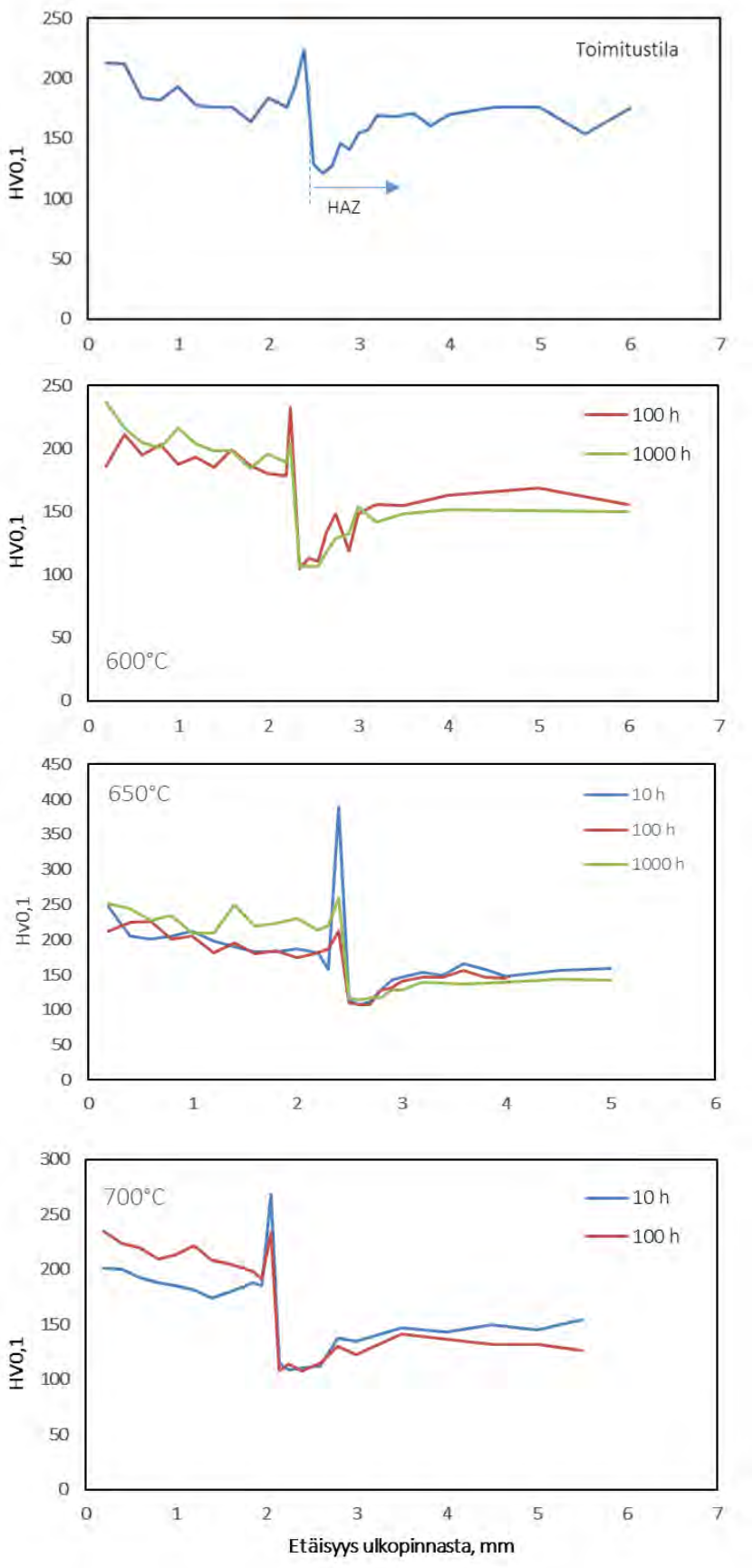
Kuva 21. Pinnoitteen 825-16Mo3 (Uhlig) kovuusmuutos rajapinnan yli, korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



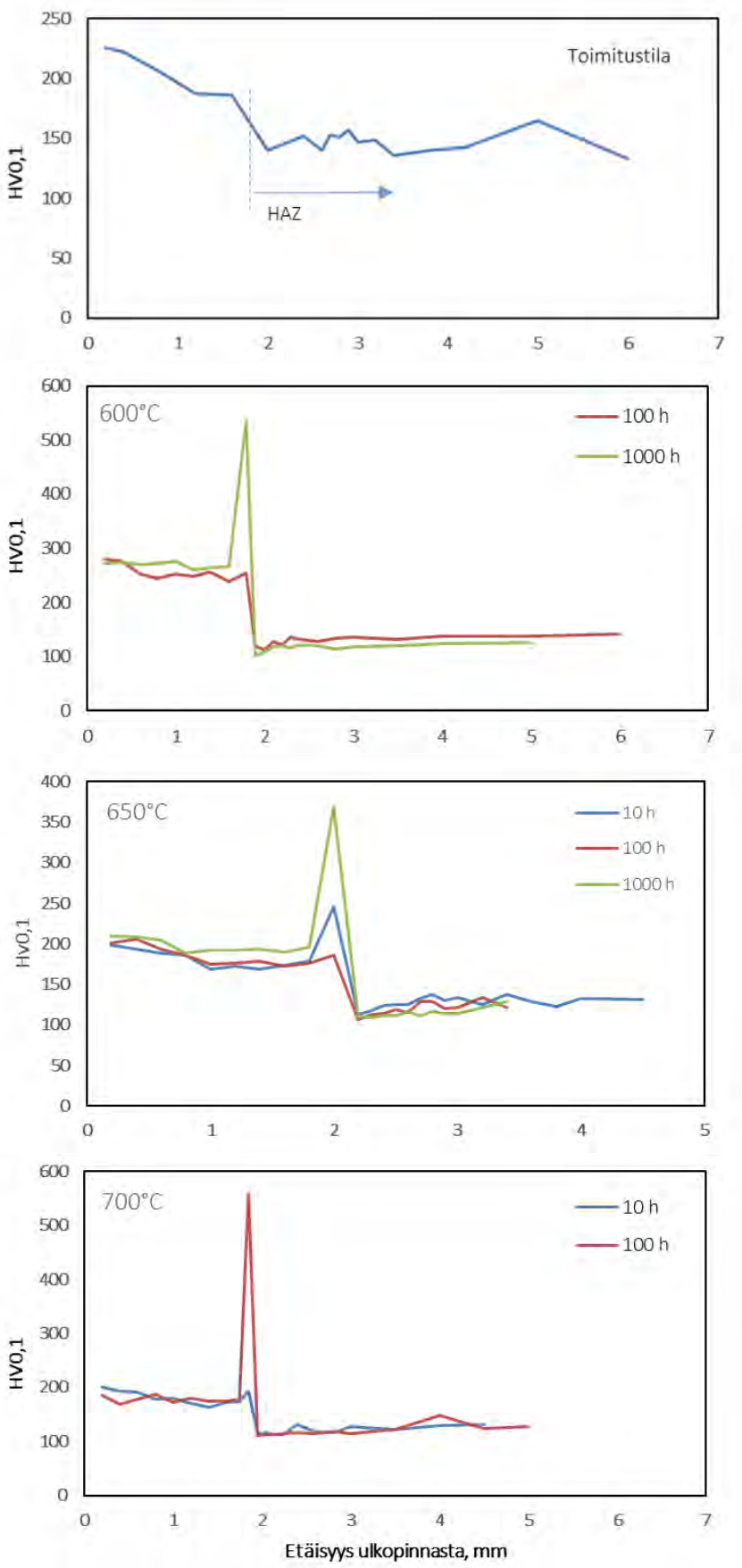
Kuva 22. Pinnoitteen 309L-T24 (Areva) kovuusmuutos rajapinnan yli.



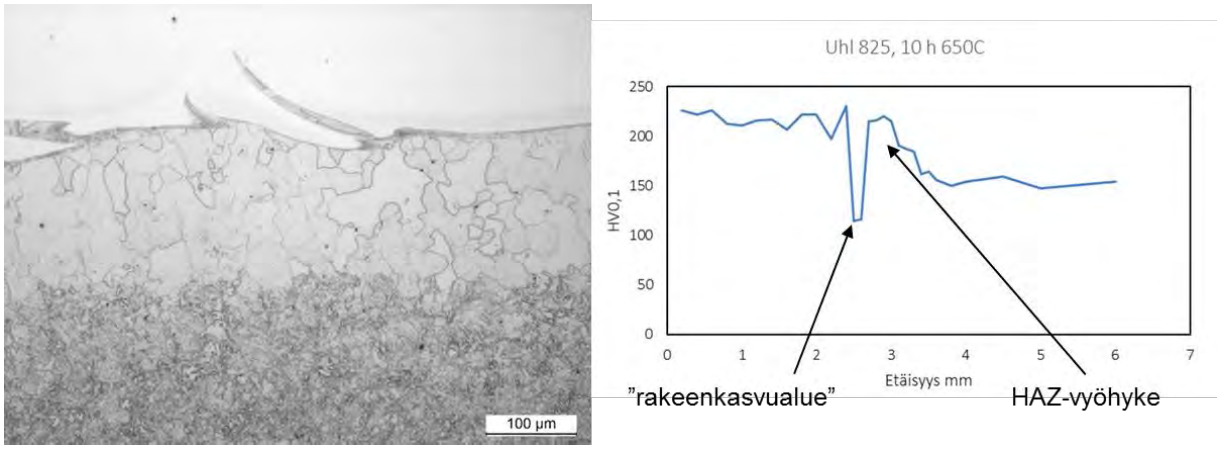
Kuva 23. 304L kompound-putken kovuusmuutos rajapinnan yli, korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



Kuva 24. Sanicro 28 kompound-putken kovuusmuutos rajapinnan yli, korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



Kuva 25. Sanicro 38 kompound-putken kovuusmuutos rajapinnan yli, Korkein kovuusarvo hehkutetuissa näytteissä viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.

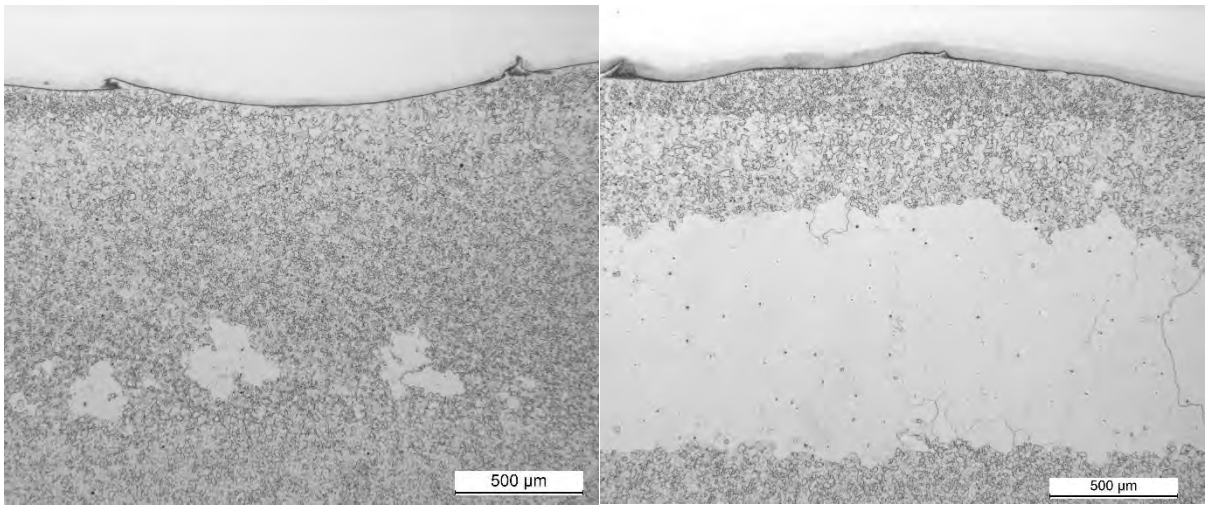


Kuva 26. Arevan 825-pinnoitteen mikrorakenne ja kovuuskäyrä rajapinnan läheisyydestä vanhennuksen jälkeen (10h/650°C).

3.3 Hiilenkato rajapinnan yli ja pinnoitteen hiilettyminen rajapinnalla

Vanhennushehkutettujen näytteiden poikkileikkauksista valomikroskoopilla mitatut hiilenkato-syvyydet on esitetty Taulukossa 4 ja pinnoitteen hiilettymissyvyys Taulukossa 5. Liitteessä 4 on esitetty hehkutettujen näytteiden rajapintojen poikkileikkaukset. Hehkutusajan pidentyessä ja/tai lämpötilan noustessa HAZ-alueen reuna-alueella alkaa tapahtua rakeenkasvua pohjamateriaalilla P235GH, Kuva 27. Vyöhykkeeksi kasvaneet rakeet ovat suuntautuneita kohtisuoraan rajapintaa vastaan. Vastaavanlaista havaittiin materiaalipareilla St45.8/304L ja 16Mo3/309L. Suurirakeisella alueella hiilenkatoa oli havaittavissa koko alueella. Näissä tapauksissa hiilenkato oli suurinta näytteissä lähellä rajapintaa tapauksissa, joissa rakeen-kasvualue ulottui jo rajapinnalle. Uhligin 16Mo3-pohjamateriaalissa havaittiin kaikilla hitsaus-pinnoitteilla rajapinnan läheisyydessä rakeiden karkenemista hehkutusten aikana (esim. Kuva 42, Liite 2).

Pinnoitteiden hiilettyminen voidaan todeta rajapinnan läheisyydessä rakeiden sisäisiä karbideja sisältävän alueen paksuuden kasvuna. Lisäksi pinnoiterakenteissa on nähtävissä herkistymistä raerajoilla, joka johtuu osittain myös alkuperäisen rakenteen hiilipitoisuudesta. Tästä syystä rakenteen osittainen herkistyminen on jätetty pois mittauksista, mikä mutkistaa hiilettymissyvyyteen perustuvia johtopäätöksiä. Taulukon 5 tulokset perustuvat syvyyteen, jossa täysin herkistyneen vyöhykkeen kaikki raerajat ovat voimakkaasti syöpyneet.



a) b)

Kuva 27. HAZ-alueen rakeenkasvua (AZZ 309L-P235GH), a) 650°C, 100 h, b) 1000 h.

*Taulukko 4. Hiilenkatosyvyys pohjamateriaalin rajapinnalla. *HAZiin muodostuva voimakas rakeenkasvualue, jossa hiilenkatoa.*

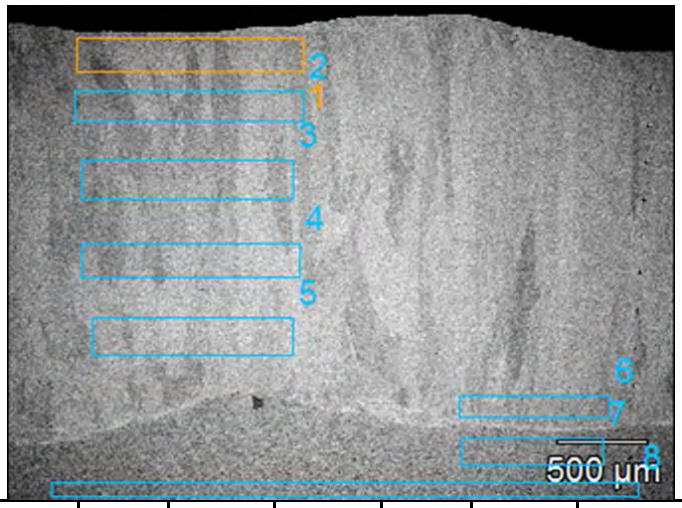
Lämpötila [°C]	Aika [t]	Hiilenkatosyvyys [µm]									
		AZZ			Areva	Uhlig			kompound		
		309L	625	825	309L	309L	625	825	304L	San28	San38
toim.tila		20	<20	10	-	~10	~10	~10	100-150	50-100	100
600	100	20	10	10	10	50-200	10-40	200	250	100	20-50
	1000	20-50	[a]	10-20	20	300	10	300	280	270	50-70
650	10	20-40	<10	10-20	10-20	120	10-80	100-150	150	120	50-70
	100	20-50 [b]	20	20-100, [b]	20	400	200	440	200-250	200	60-80
	1000	20-50 [b]	700*	750*	40	500	400-500	750	1200*	260	100-130
700	10	120	50-200	[a]	100	550-700	280	350	350	300	100
	100	2800*	1200*	2100*	150	1000*	100-450	100-400	800-1000*	350	300

[a]hiiliteräs hiilettynyt voimakkaasti rajapinnalta
[b]rakeenkasvu alkanut HAZ:n alarajalta

Taulukko 5. Pinnoitteen hiilettymissyvyys rajapinnalla hehkutuksen jälkeen.

Lämpötila [°C]	Aika [t]	Pinnoitteen hiilettymissyvyys [µm]									
		AZZ			Areva	Uhlig			kompound		
		309L	625	825	309L	309L	625	825	304L	San28	San38
toim.tila		10-25	10-20	10-20	10-30	15-20	20-30	10-20	100-150	50-70	60
600	100	70-100	20-25	50-70	20-40	110-130	20	50-70	120-140	50-80	70-100
	1000	180-200	30-50	90-120	25-40	150-170	25	70-100	140-170	60-90	120-150
650	10	30-50	10-20	40-70	20-30	100	15-30	20	200	100	100
	100	70-100	20-25	50-80	20-40	100-120	40-60	25	120-150	50-80	100-120
	1000	150-200	100-150	100-150	15-20	200-250	150-200	100-200	250	130	150
700	10	70-100	20-30	20-40	50-70	90-110	20-30	50-70	200-230	60-90	100-140
	100	180-200	70-90	150-160	50-80	150-170	60-90	70-100	180-250	60-90	120-150

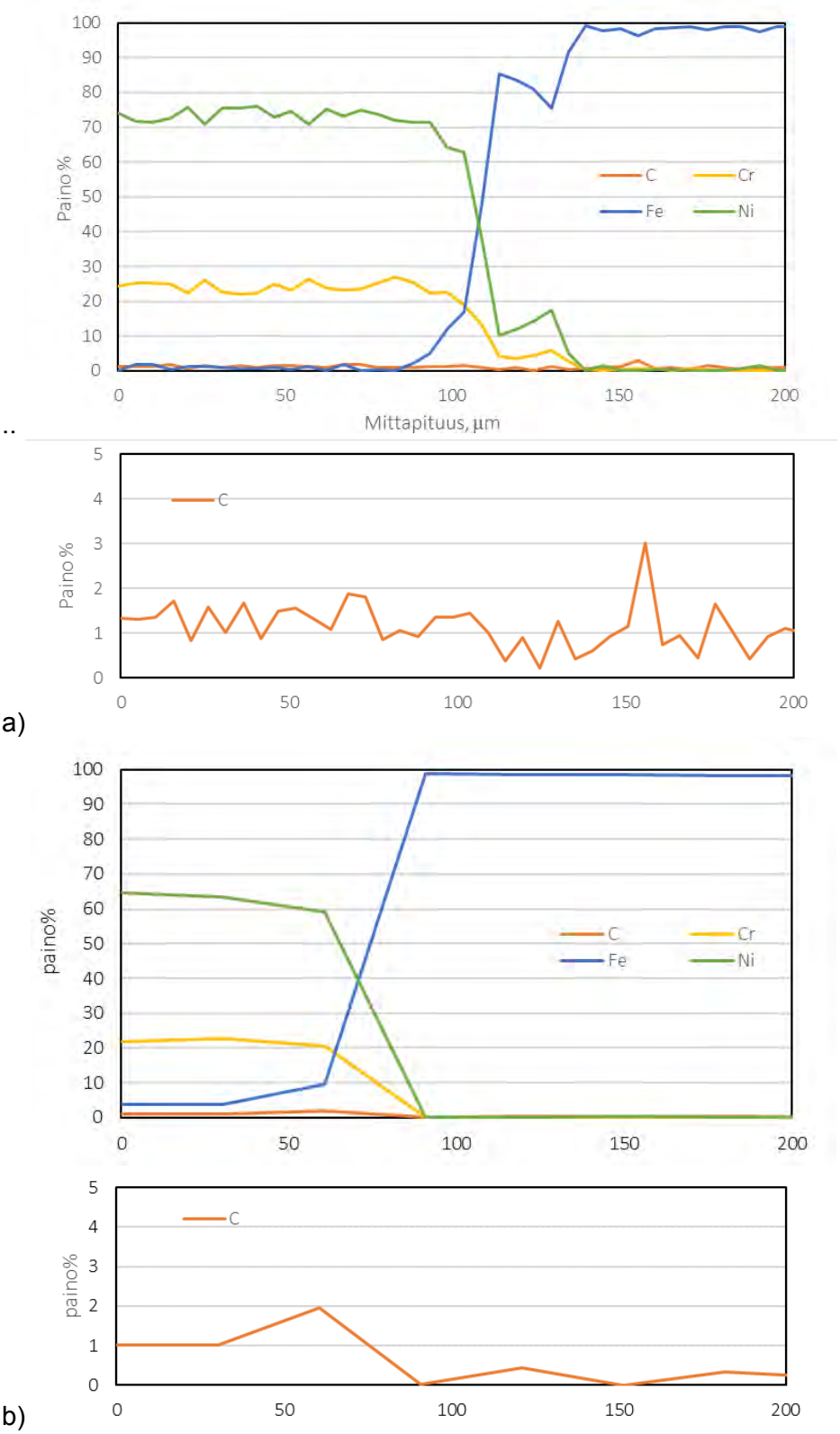
Hitsauspinnoitteiden rakenteissa ei vanhennusten aikana tapahtunut huomattavia muutoksia (Liite 3 ja 4) rajapintaa lukuun ottamatta. Kuvassa 28 on esitetty 309L pinnoitteen rakenne vanhennuksen jälkeen (1000 h/650°C). Suuria koostumusvaihteluita pinnoitteen paksuuden läpi ei ollut havaittavissa. Hiili on EDX-kammiossa epäpuhtautena, joten sen arvo analyyseissä on vain viitteellinen. Kompound-putkien pinnoitteiden, 304L, Sanicro 28 ja Sanicro 38, rakenteissa havaittiin hehkutusten aikana karbidien kasvua raerajoille (Liite 3, Kuvat 22-30).



	C	Mg	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0.9		0.0	0.5	0.0	21.4	2.5	62.7	11.6	0.0	0.2
2	0.9		0.1	0.6	0.0	21.5	2.0	63.2	11.4	0.0	0.3
3	0.9		0.1	0.5	0.0	22.0	1.7	62.9	11.4	0.1	0.4
4	1.1	0.1	0.0	0.5	0.1	21.9	2.0	60.8	12.8	0.3	0.3
5	0.8		0.0	0.5	0.0	21.3	2.0	61.1	13.5	0.3	0.3
6	1.1		0.0	0.5	0.1	22.4	1.9	61.5	12.1	0.0	0.3
7	1.4		0.0	0.3	0.2	2.7	0.9	92.9	0.0	0.0	1.6
8	0.9		0.0	0.2	0.3	2.8	0.8	93.2	0.0	0.1	1.6

Kuva 28. 309L (Areva) hitsauspinnoitteen koostumus vanhennuksen (1000 h/650°C) jälkeen

Vaikka EDX-analyysit antavat viitteellisen arvon hiilen pitoisuudelle, EDX-kuvaajista nähdään, että vanhennusten aikana hiili diffundoituu pohjamateriaalin puolelta pinnoitteeseen. Useissa analyyseissa nähtiin hiilen pitoisuudessa piikki lähellä rajapintaa pinnoitteen puolella. Kuvassa 29 on esimerkkinä EDX-analyysit AZZ:n toimittamasta 625-pinnoitteesta toimitustilaisesta sekä 700°C:ssa vanhennetusta näytteestä. Liitteessä 4 on esitetty EDX-analyysit rajapinnan ylitse toimitustilaisina sekä lämpötiloissa 650 ja 700°C tehtyjen hehkutusten jälkeen.



Kuva 29. AZZ625 hitsauspinnoitteen EDX-kuvaajat rajapinnan yli: a) toimitustilainen ja b) hehkutettu 100 h, 700°C.

4. Yhteenveto

Korkeassa lämpötilassa toimivien komponenttien elinikää rajoittaa voimakkaasti käyttölämpötila, jonka paikallinen mittaus on kuitenkin usein vaikeasti järjestettävissä. Tällöin lämpötilan arviointiin voidaan käyttää mikrorakenteessa käytön aikana tapahtuneita muutoksia.

Vanhennuskokeissa tarkasteltiin hitsauspinnoitteita 309L, IN625 ja IN825 kolmelta toimittajalta, AZZ, Uhlig ja Areva. Referenssimateriaaleina hitsauspinnoitetuille putkille koehehkutuksissa toimivat kompoundputket 304L, Sanicro 28 ja Sanicro 38. Vanhennushehkutuksia tehtiin lämpötiloissa 600, 650 ja 700°C kymmenestä tunnista tuhanteen tuntiin asti. Vanhennettujen näytepalojen mikrorakenteet tarkasteltiin valo- ja pyyhkäisyelektronimikroskopian avulla. Lisäksi näytteistä mitattiin kovuudet (HV0,1 ja HV5) pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan yli. Pinnoitushitsatuille putkille tehtyjen vanhennushehkutusten tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa käytössä olleisiin tai ylikuumentuneisiin komponentteihin kohdistuneita lämpökuormituksia.

Vanhennushehkutusten perusteella voidaan todeta, että hiiliteräksisten pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset alkavat ferriittisperliittisen rakenteen perliittirakeiden karbidilamellien katkeiluna ja vähittäisenä palloutumisena, jota seuraa pidemmällä ajanjaksolla ja/tai lämpötilan noustessa karbidien karkeneminen. Vastaava muutos oli nähtävissä ferriittis-perliittis-bainittisella pohjamateriaalilla 16Mo3. Arevan toimittamien putkien pohjamateriaalissa 7CrMoVTiB10-10 oli jo toimitustilassa havaittavissa voimakasta karbidin muodostumista raerajoille. Samoin teräksen 10CrMo9-10 (San28-kompoundin pohjamateriaali) mikrorakenne oli jo lähtötilassa hajaantunutta. Muutokset teräksissä 10CrMo9-10 ja 7CrMoVTiB10-10 rajoittuivat lähinnä raerajakarbidien kasvuun.

Toimitustilaisten näytteiden muutosvyöhykkeiden kovuusvaihtelut tasoittuivat hehkutuksissa, jolloin korkein kovuus kehittyi pinnoitteen puolelle lähelle rajapintaa, mikä selittyy hiilettymisellä eli hiilen diffuusiolla pohjamateriaalista pinnoitteeseen. Pidemmillä hehkutusajoilla rajapinnan läheisyyteen ja muutosvyöhykkeelle pohjamateriaalin puolelle jää hieman alentunut kovuus hiilenkadon ja rakeenkasvun vuoksi.

Hehkutetuissa suorissa näyteputkissa ei havaittu tarkasteluilla ennalta arvaamattomia mikrorakennemuutoksia. Putkien taivutus lisää jännityksiä rakenteeseen, jolloin mikrorakennemuutokset kiihtyvät. Lisäksi rakenteen muokkautuminen voi lisätä herkistymistä ympäristövaikutteisille vauriomekanismeille. Näiden asioiden mahdollista tarkastelua tulevaisuudessa suositellaan.

Yleisesti voidaan todeta, että pitkäaikainen käyttö korkeissa lämpötiloissa aiheuttaa sekä hitsauspinnoitettujen että kompound-putkien pohjamateriaaleissa ja rajapinnalla mikrorakennemuutoksia hiilen diffundoituessa seostamattomasta/matalaseosteisesta teräksestä korkeammin seostettuun pintamateriaaliin aiheuttaen pohjaputkessa hiilen katoa ja pintamateriaalissa hiilettymistä ja sen seurauksena herkistymistä. Hitsauspinnoitteet ovat rakenteeltaan kilpailukykyisiä kompound-putkien kanssa eikä valmistusmenetelmästä johtuvia vaurioita ole odotettavissa, kun valmistus tehdään normeja seuraten. Hitsauspinnoitteiden eduksi voidaan katsoa mm. laaja materiaalivalikoima sekä nopeampi toimitusaika verrattuna kompound-rakenteisiin.

Lähdeviitteet

1. Toft, L.H. & Marsden, R.A. The structure and properties of 1% Cr-0.5% Mo steel after service in CEGB power stations. Structural processes in creep. ISI Spec. rep. No. 70, ISI London, 1961, s. 276-294.

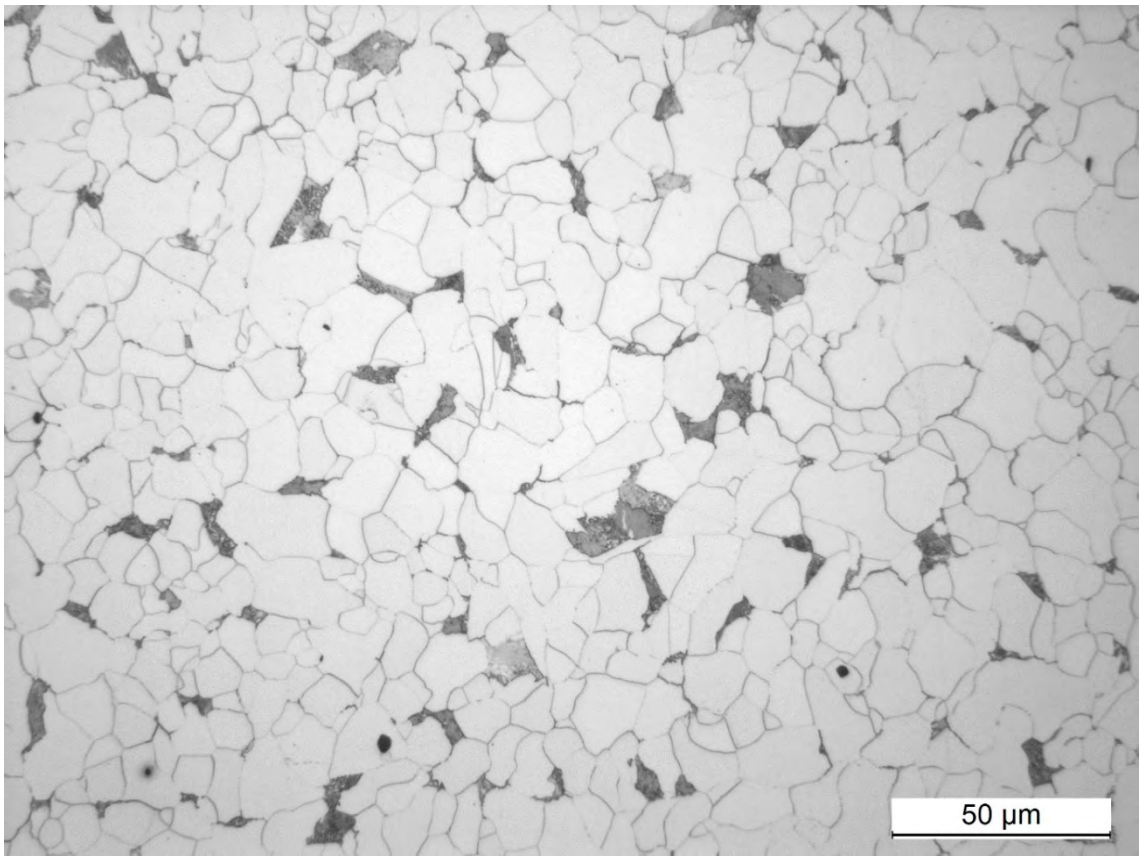
2. Viswanathan, R. Damage mechanisms and the life assessment of high-temperature components. USA, 1989, s. 183-263.

3. Salonen, J. Compound-putken ja 15Mo3-teräksen mikrorakennemuutokset pitkäaikaisessa hehkutuksessa. VTT Julkaisuja 810 (1995).

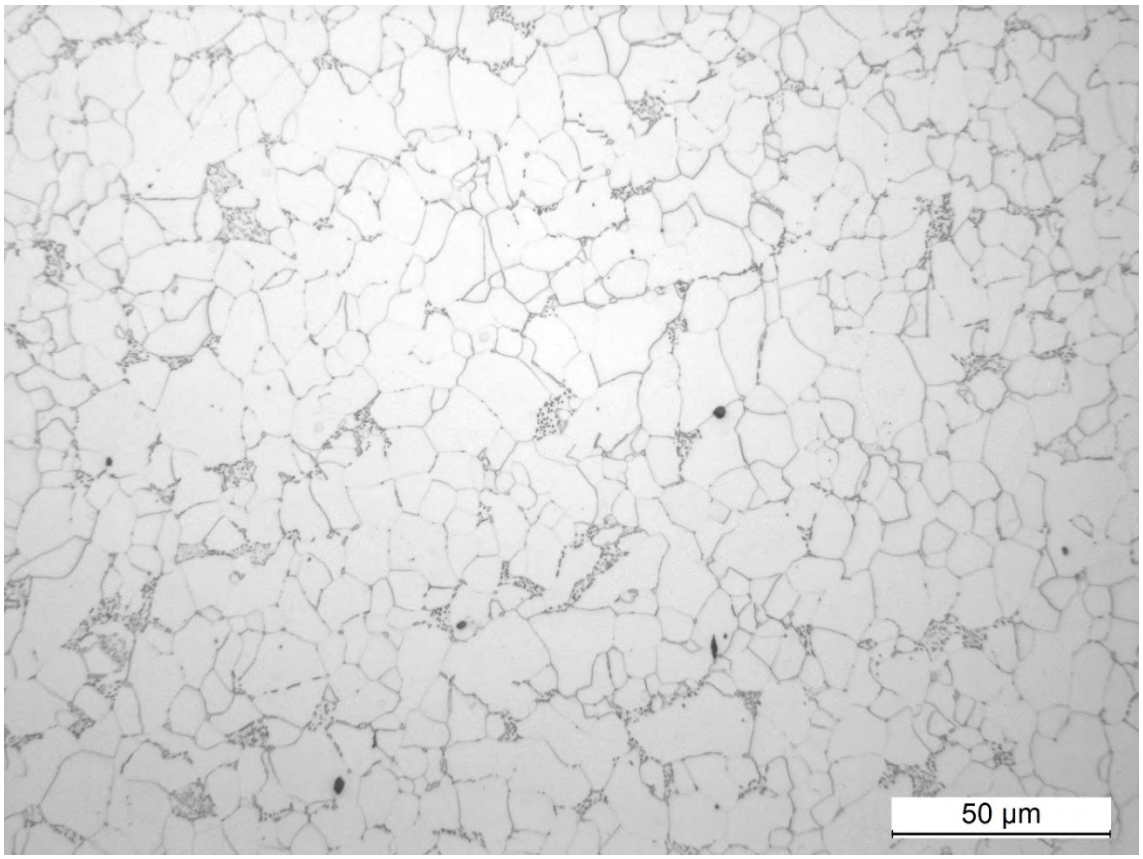
4. Salonen, J. Korkealämpötilaterästen mikrorakennemuutokset pitkäaikaisessa hehkutuksessa. VTT Julkaisuja 789 (1994).

5. Metals Handbook. Desk Ed. American Society for Metals (1984), USA, s. 28.65-28.66.

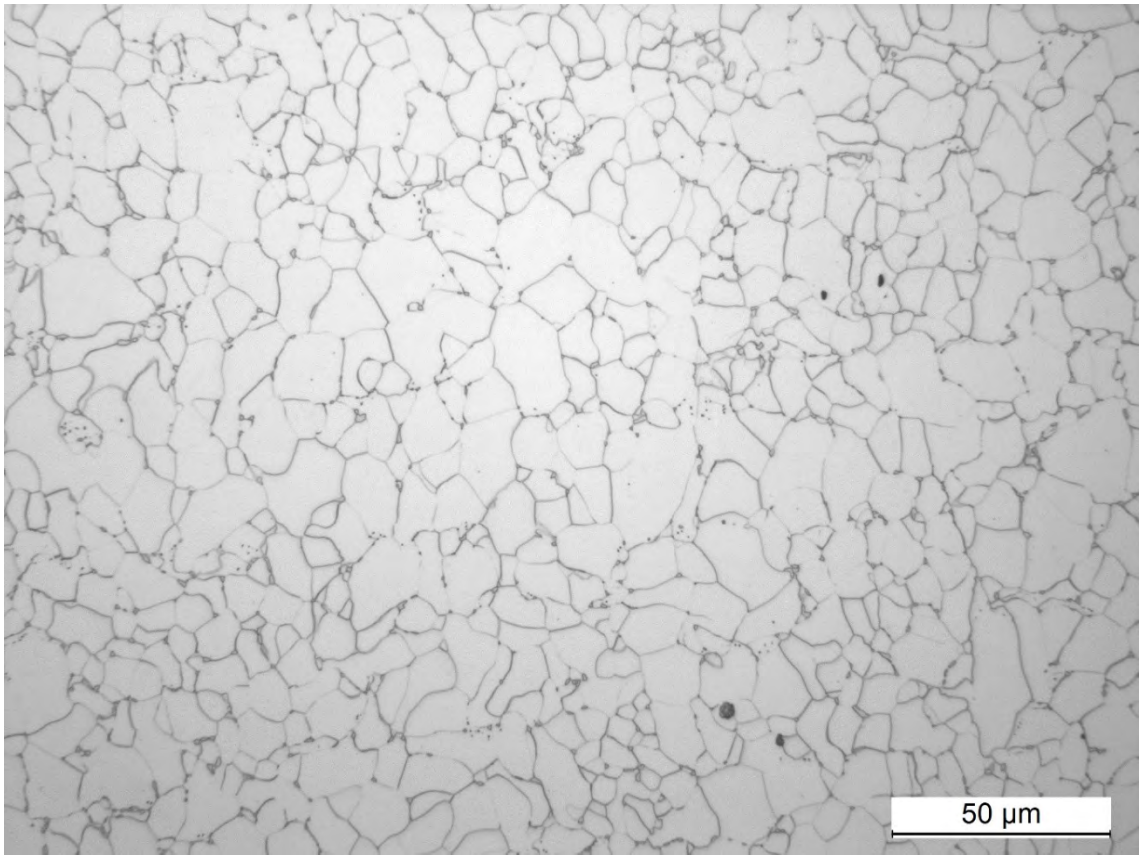
Liite 1. Pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset hehkutusten jälkeen.



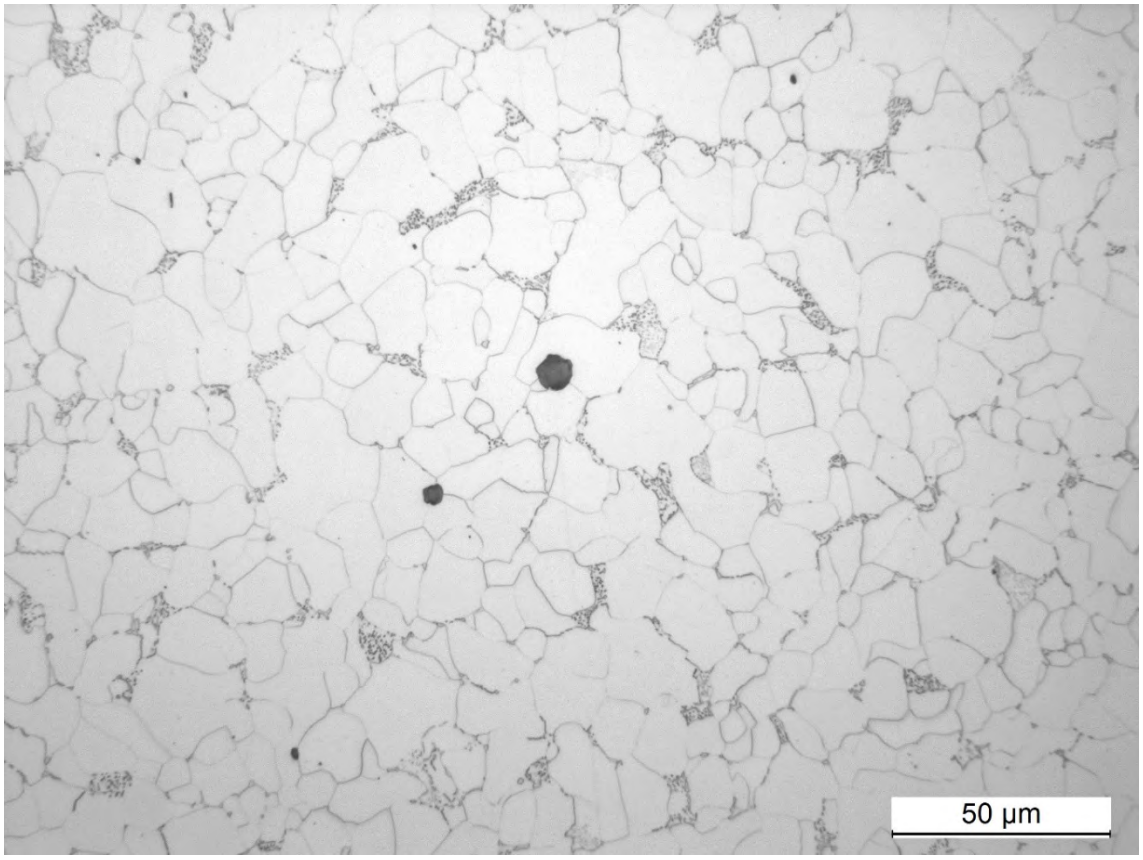
Kuva 1. Teräs P235GH, toimitustila, aste A.



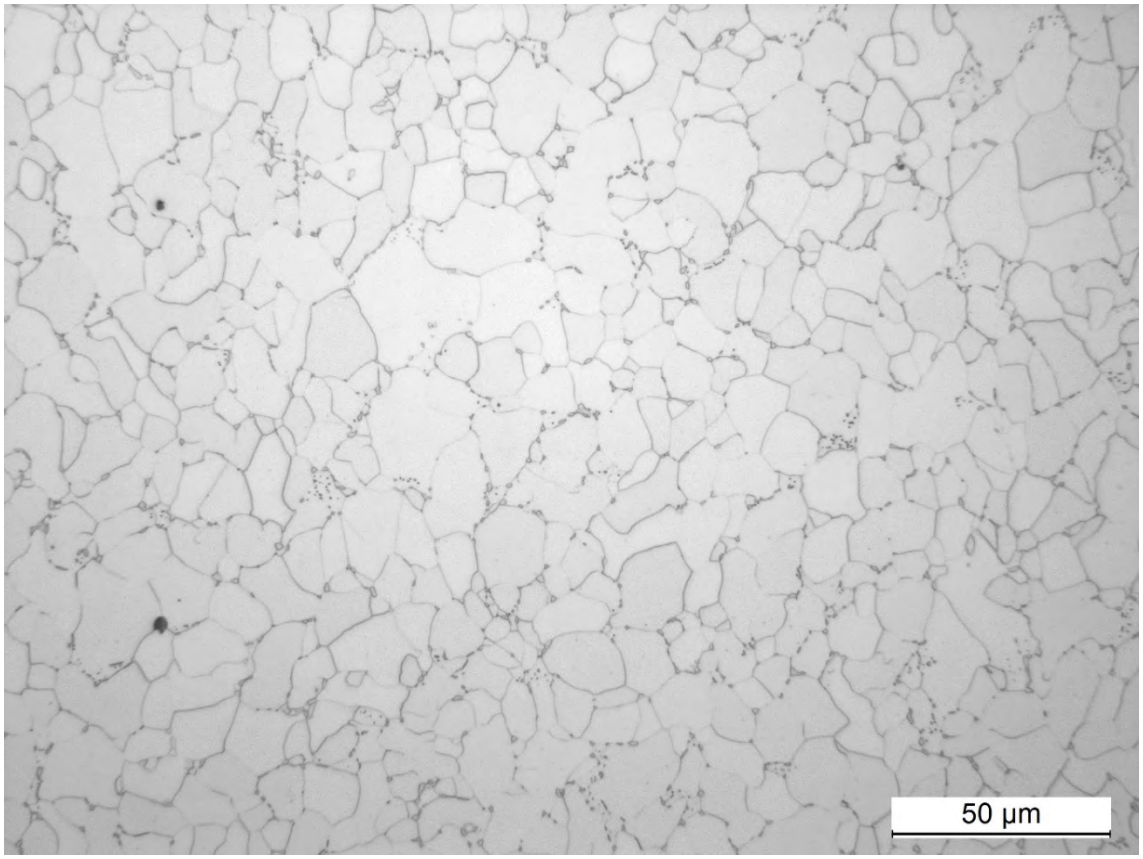
Kuva 2. Teräs P235GH, 600°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D.



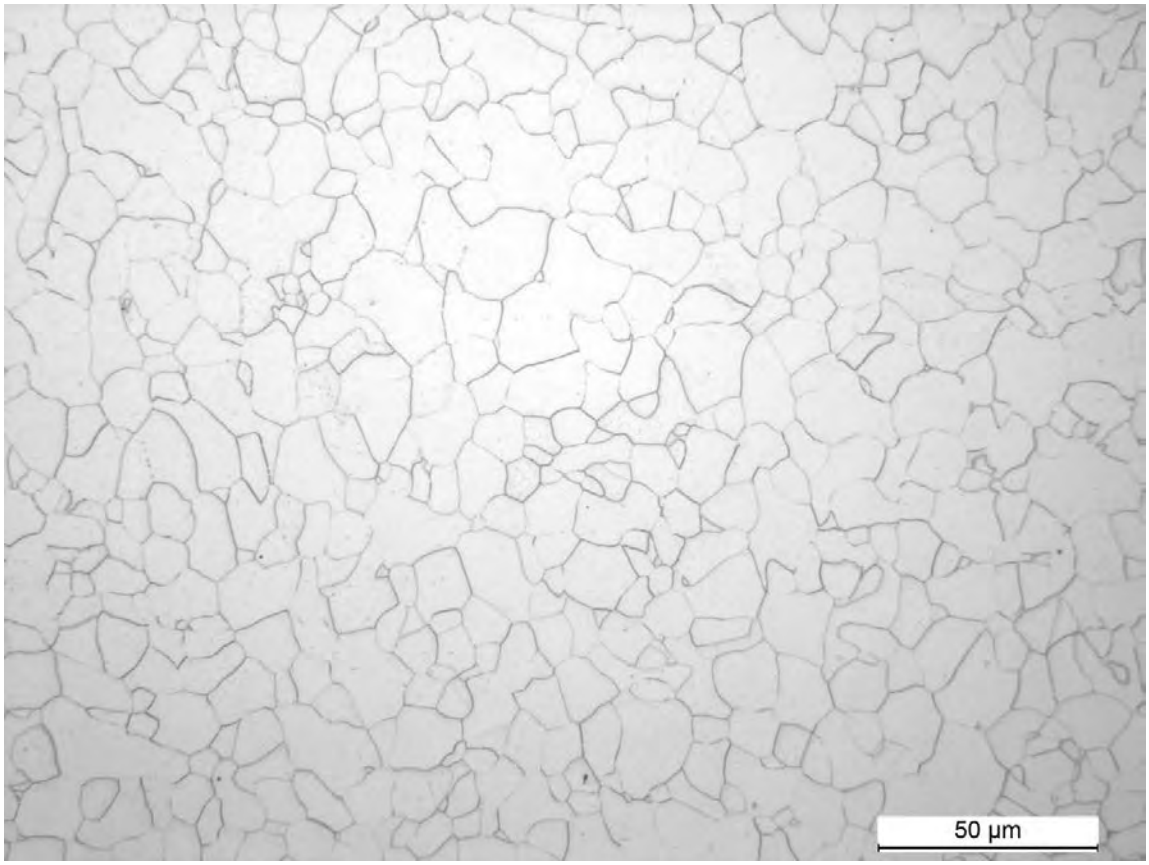
Kuva 3. Teräs P235GH, 600°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste E/F.



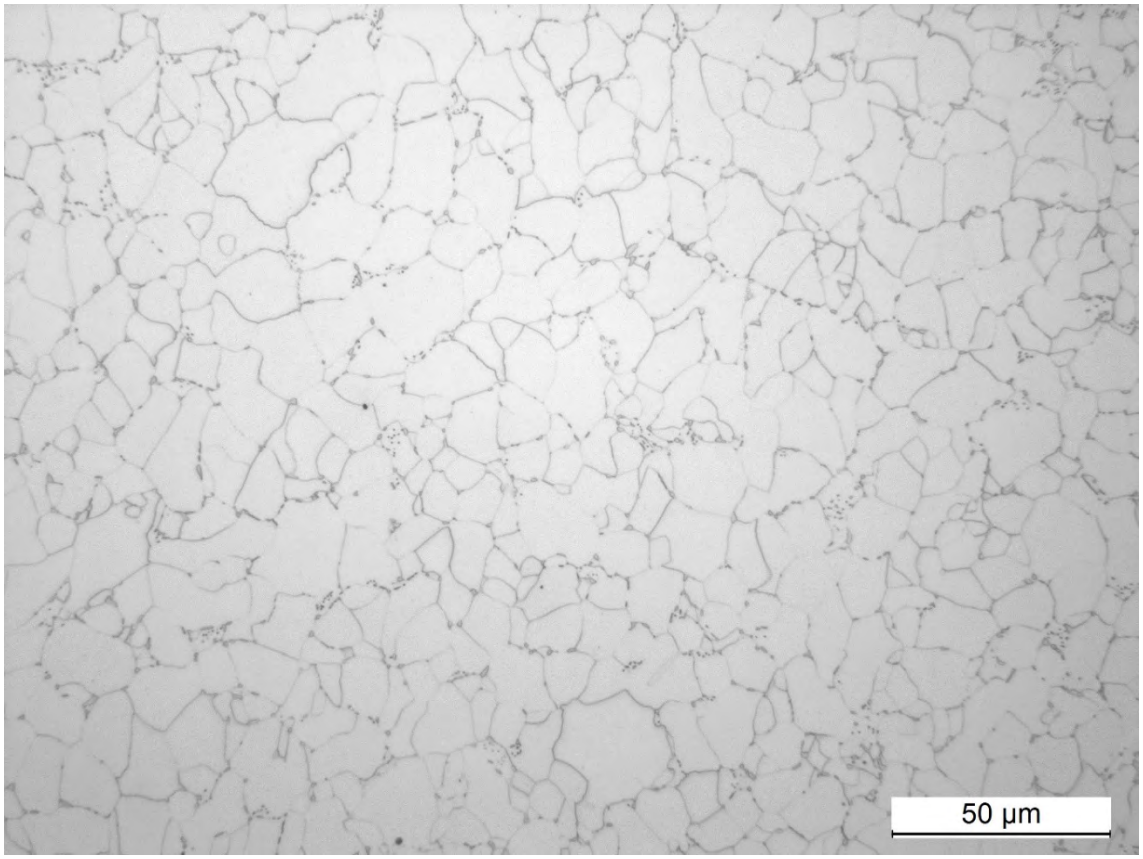
Kuva 4. Teräs P235GH, 650°C, 10 h, , P_{LM} (C=14), aste D.



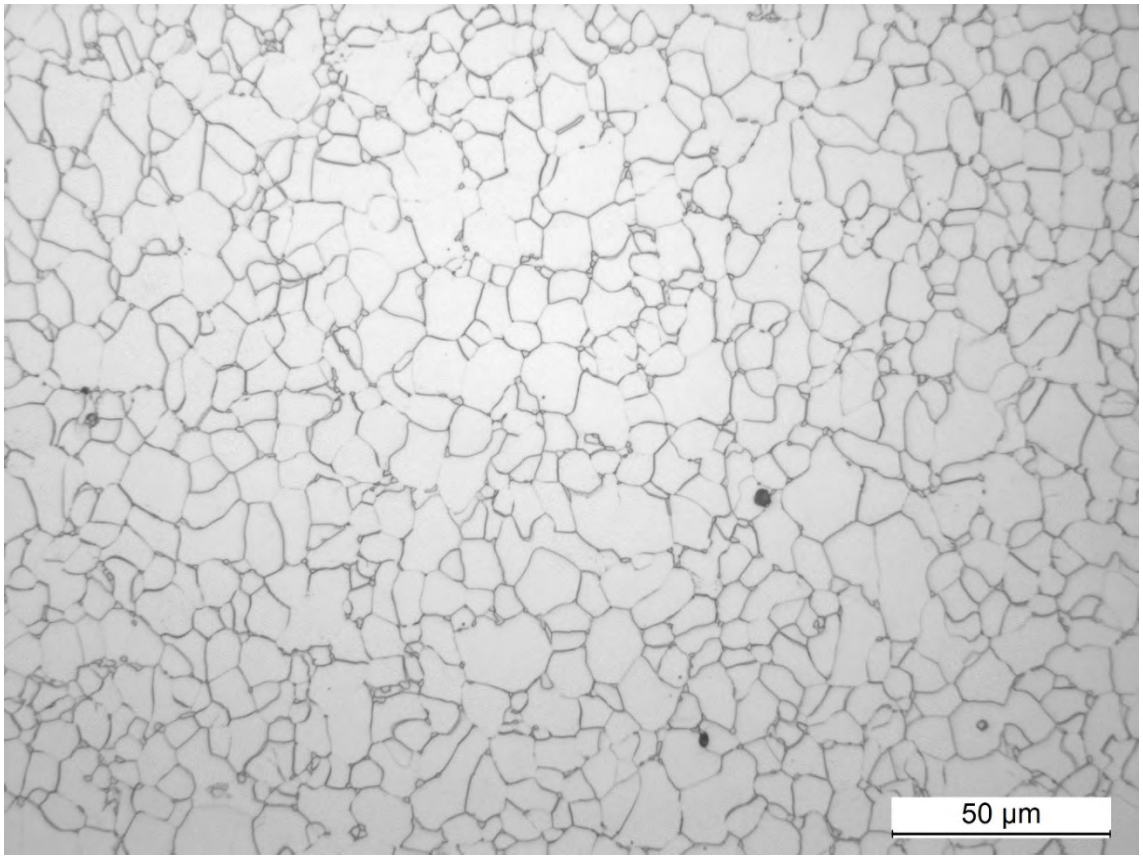
Kuva 5. Teräs P235GH, 650°C, 100 h, , P_{LM} (C=14), aste E.



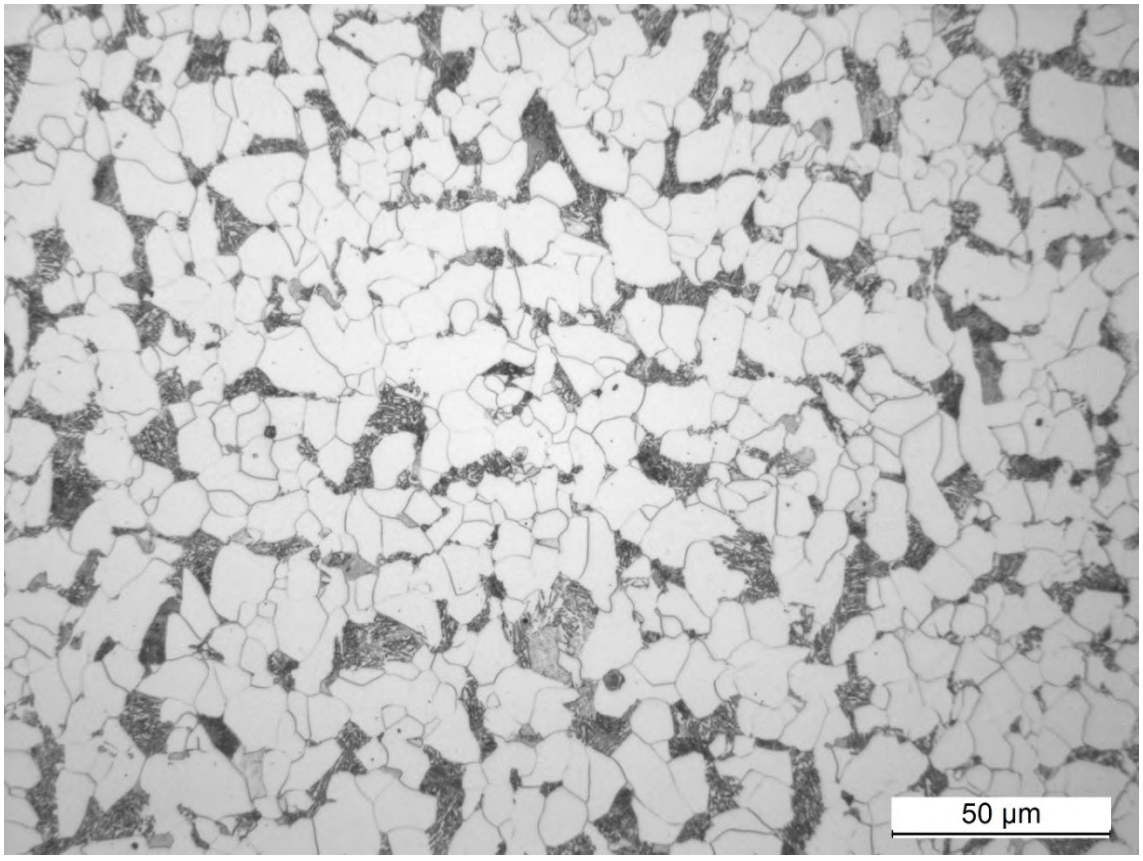
Kuva 6. Teräs P235GH, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste F.



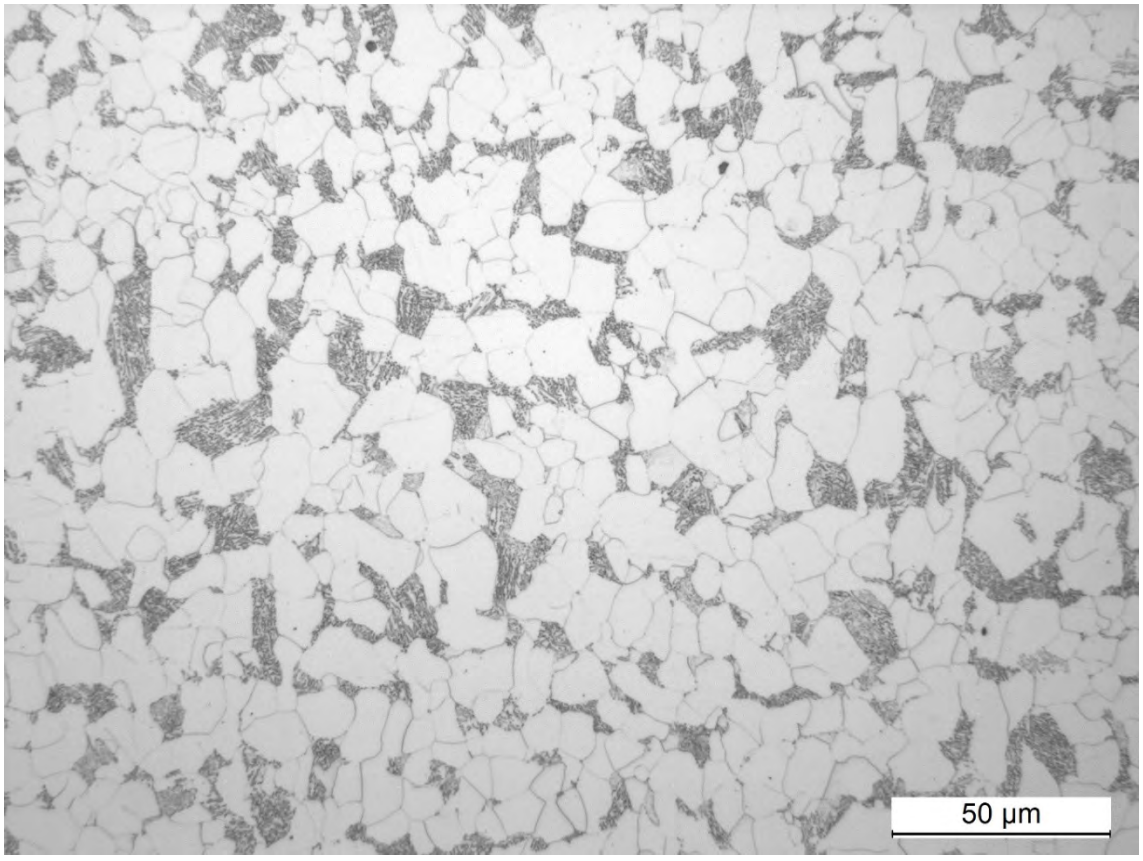
Kuva 7. Teräs P235GH, 700°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste E.



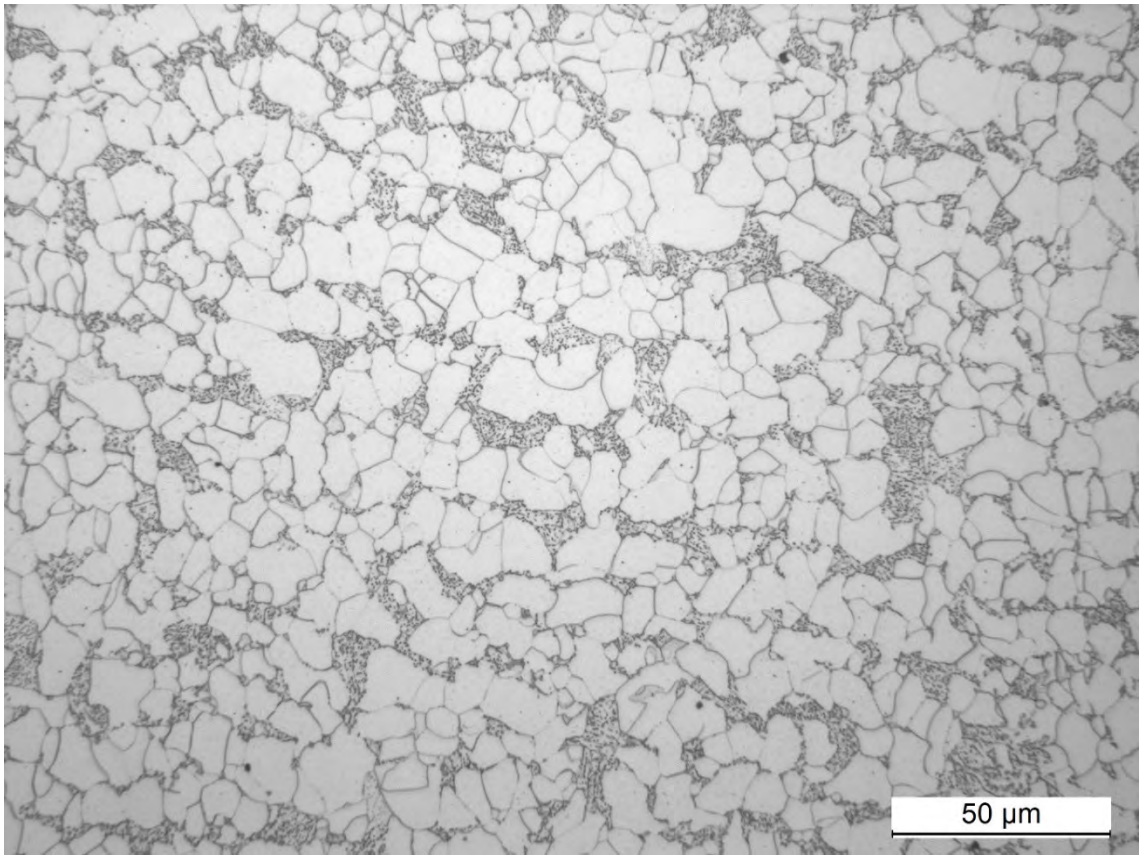
Kuva 8. Teräs P235GH, 700°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste F.



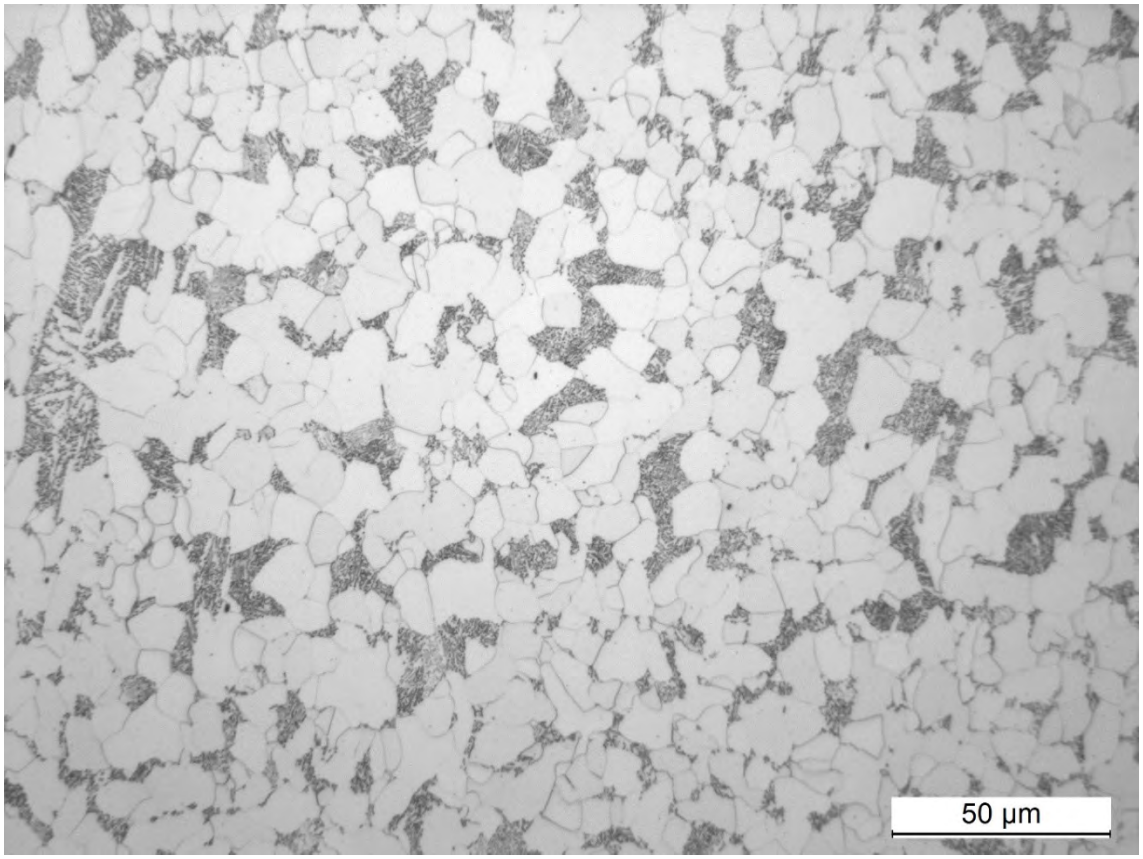
Kuva 9. Teräs 16Mo3, toimitustila, aste A.



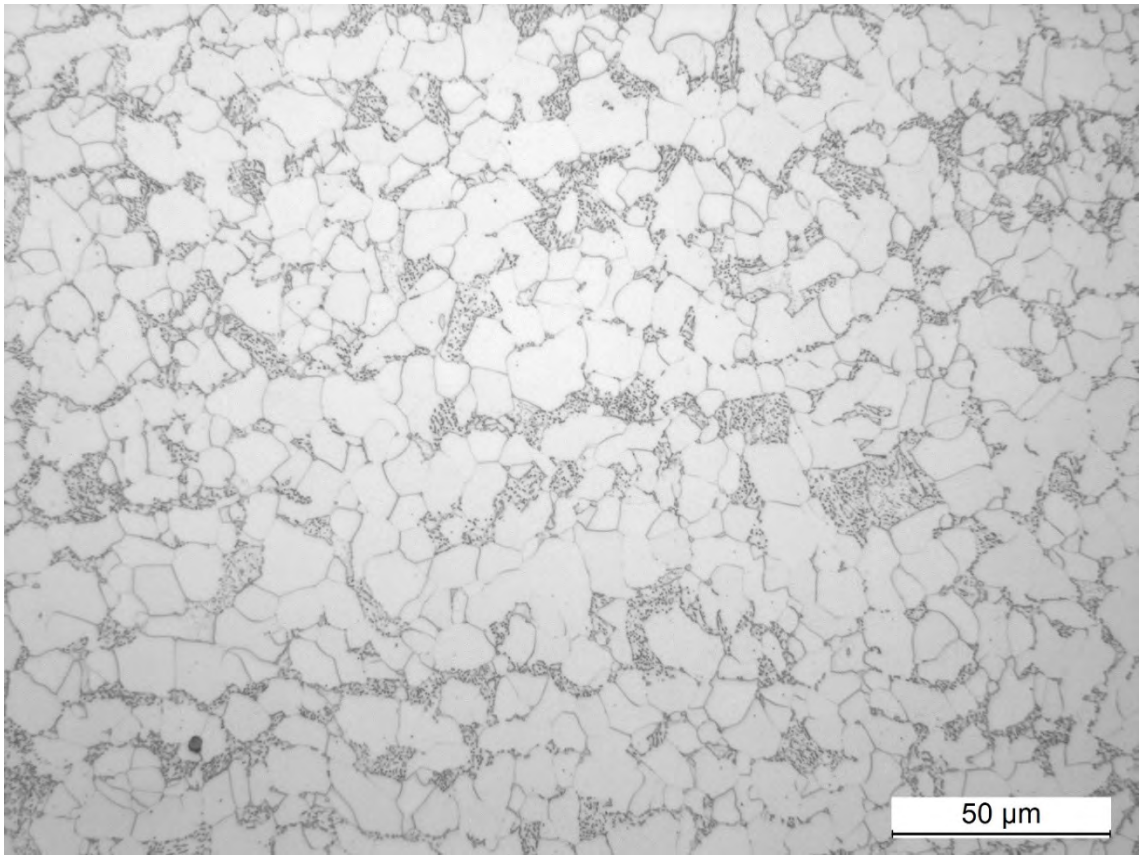
Kuva 10. Teräs 16Mo3, 600°C, 100 h, , P_{LM} (C=14), aste B.



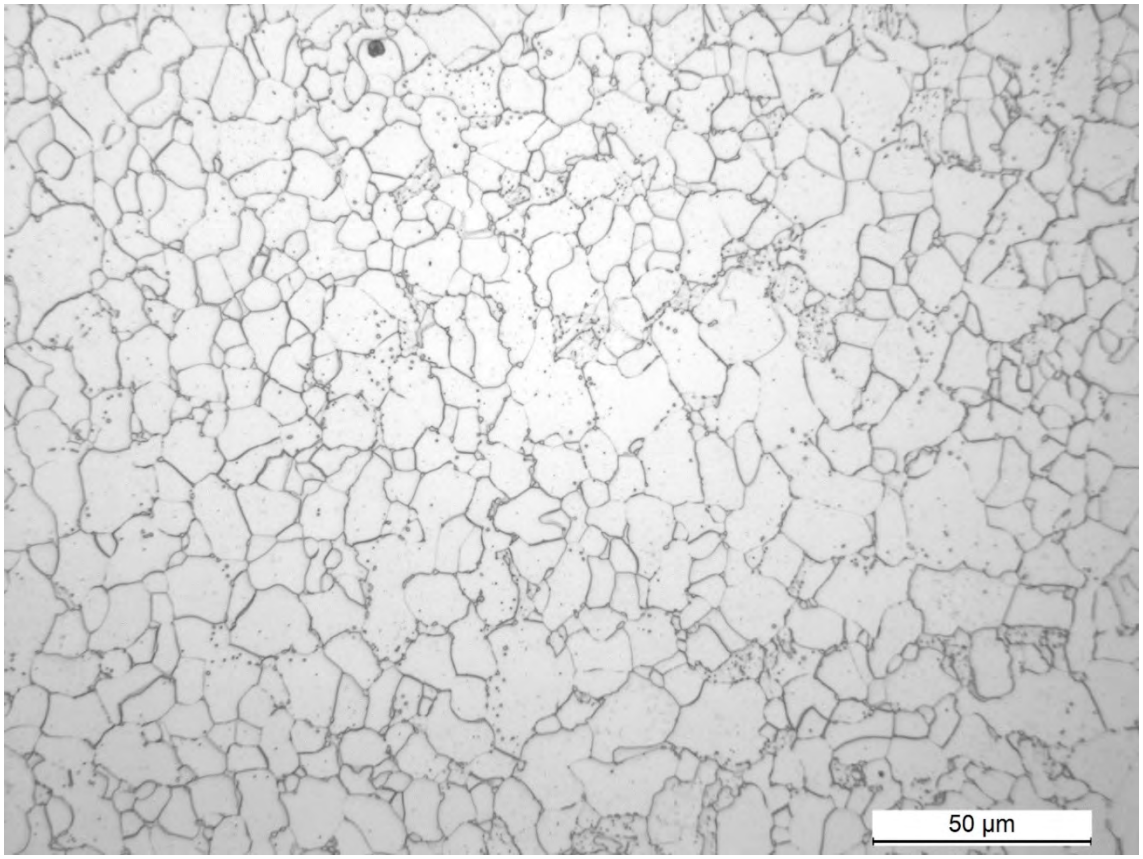
Kuva 11. Teräs 16Mo3, 600°C, 1000 h, , P_{LM} (C=14), aste C/D.



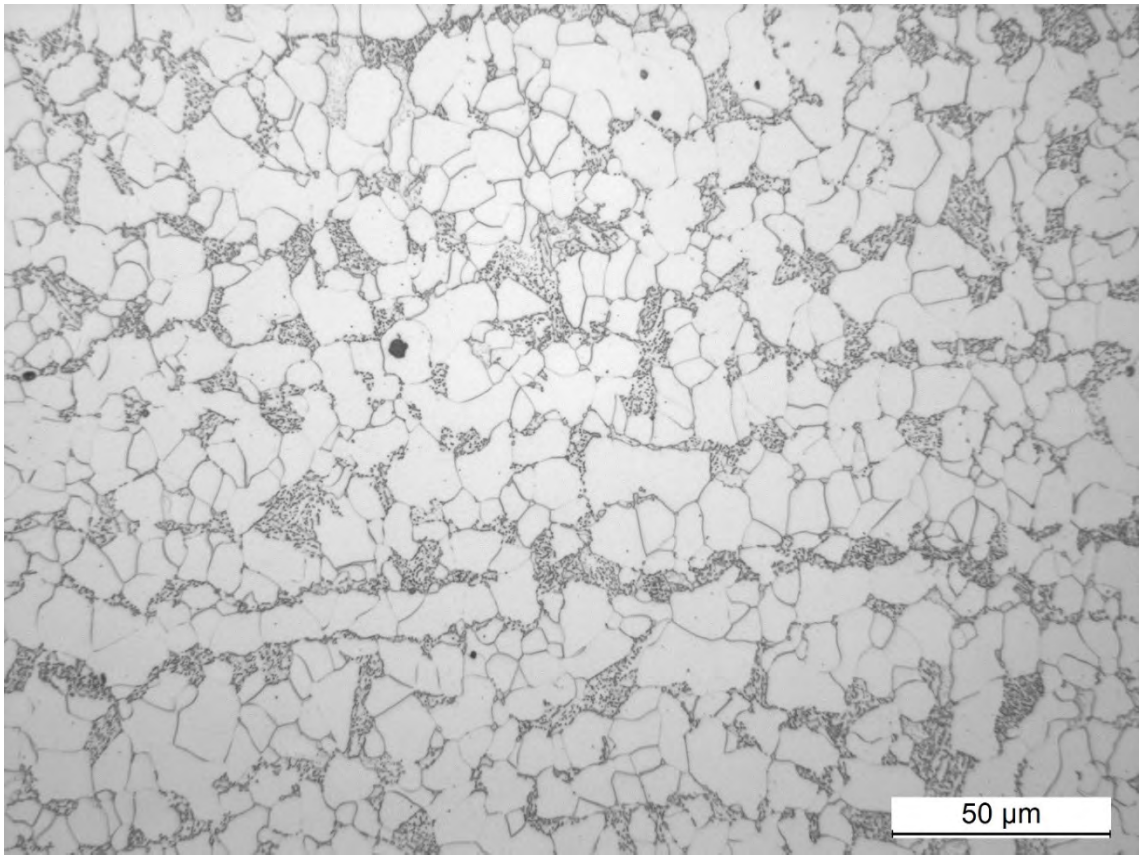
Kuva 12. Teräs 16Mo3, 650°C, 10 h, , P_{LM} (C=14), aste B.



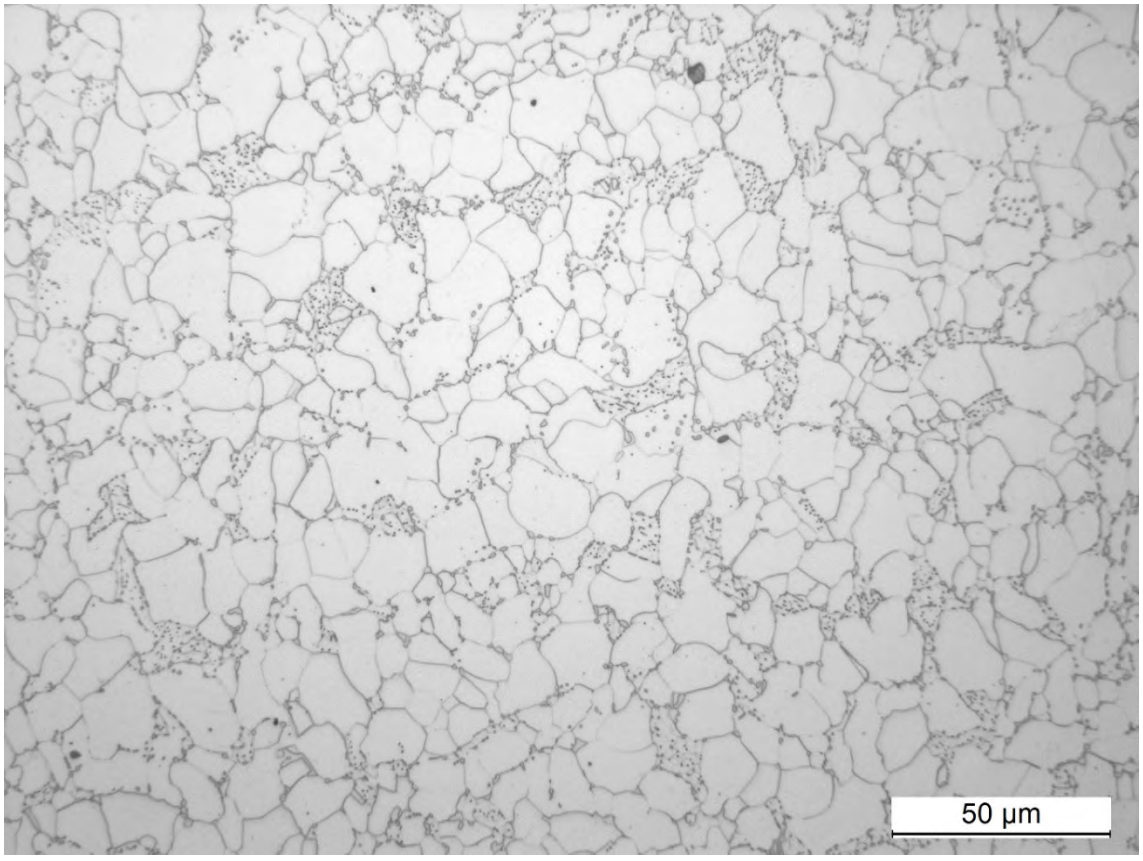
Kuva 13. Teräs 16Mo3, 650°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D.



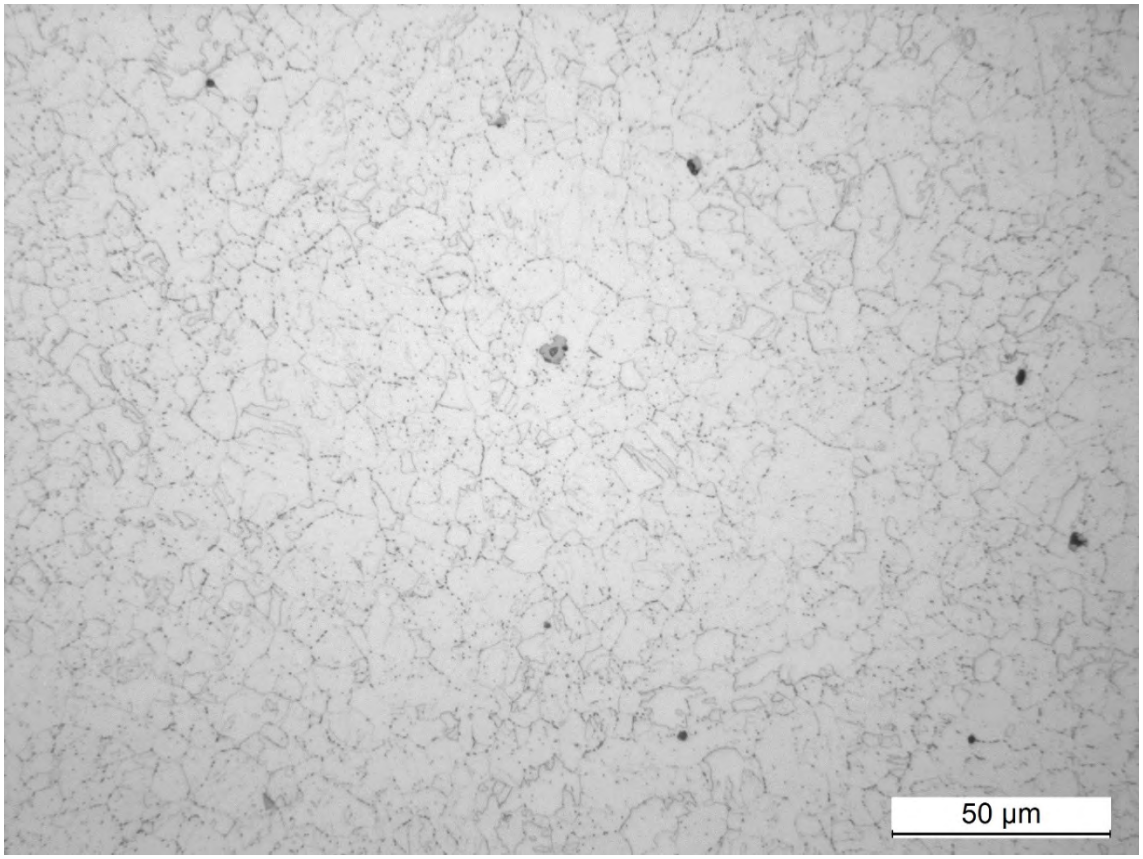
Kuva 14. Teräs 16Mo3, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste D/E.



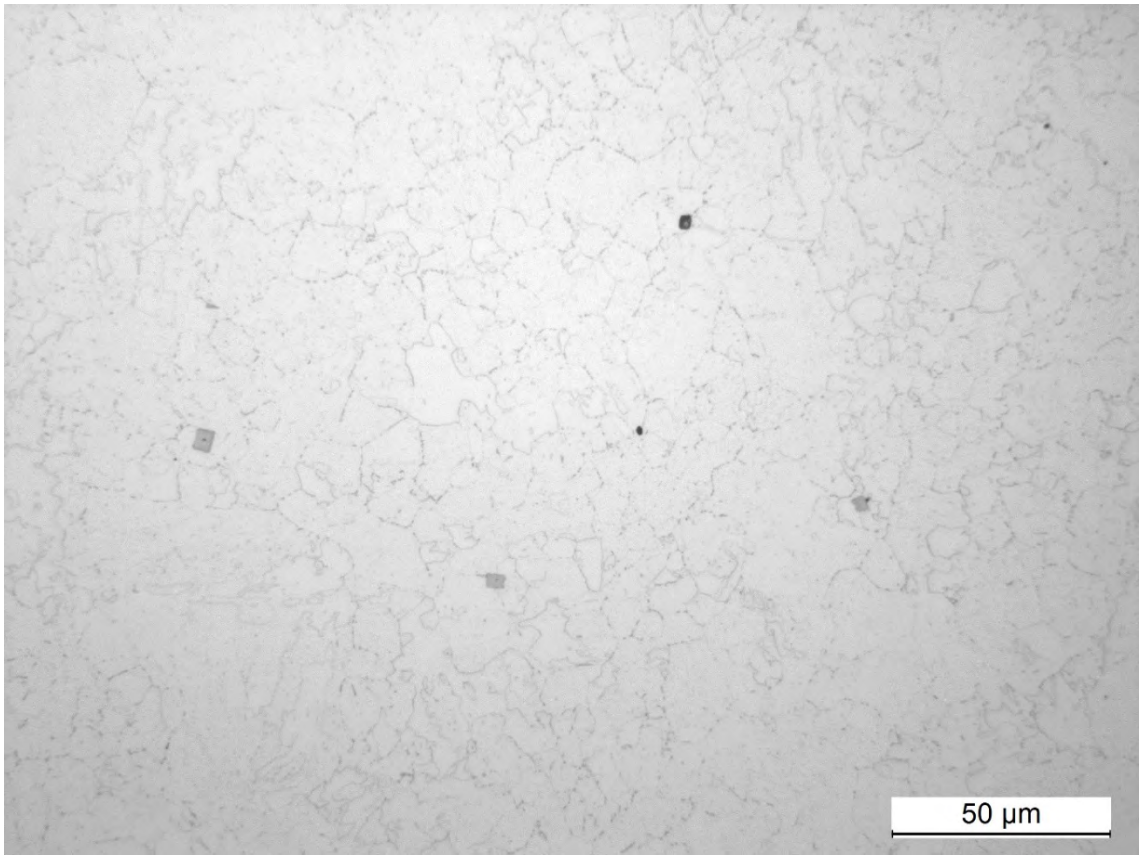
Kuva 15. Teräs 16Mo3, 700°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste D.



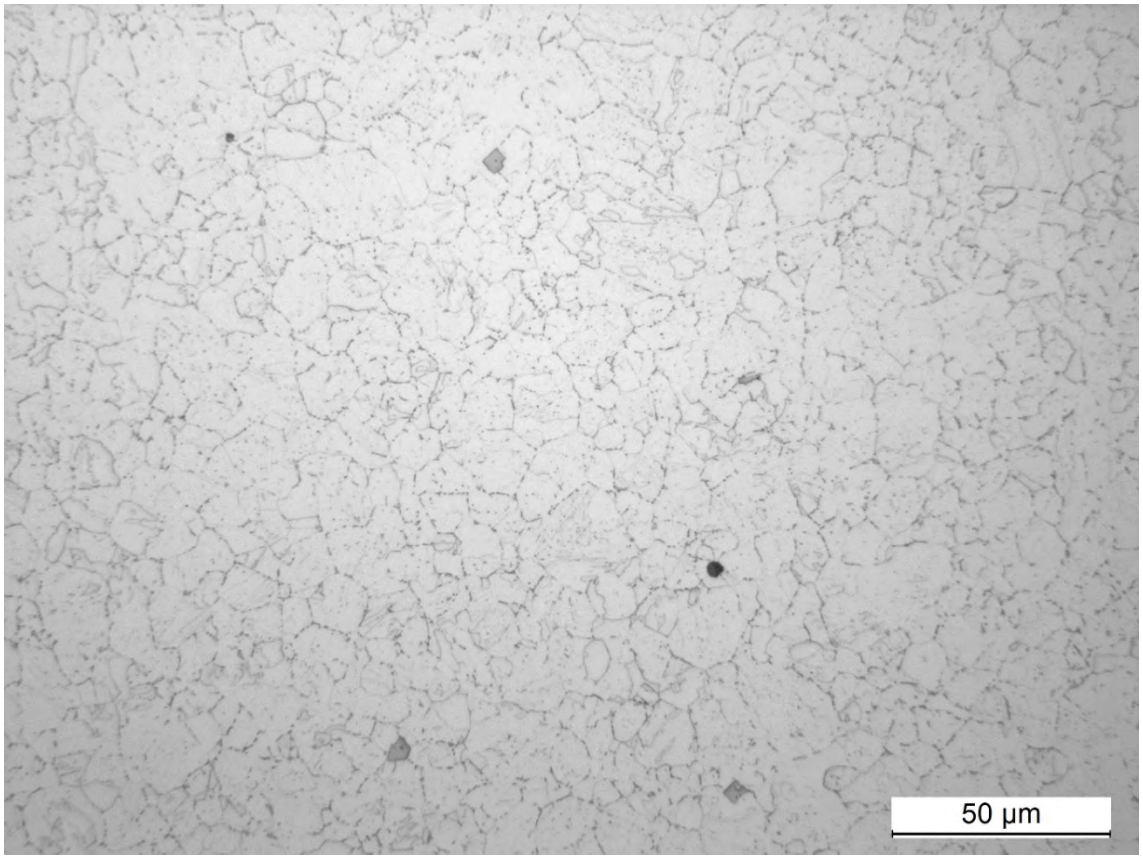
Kuva 16. Teräs 16Mo3, 700°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D/E.



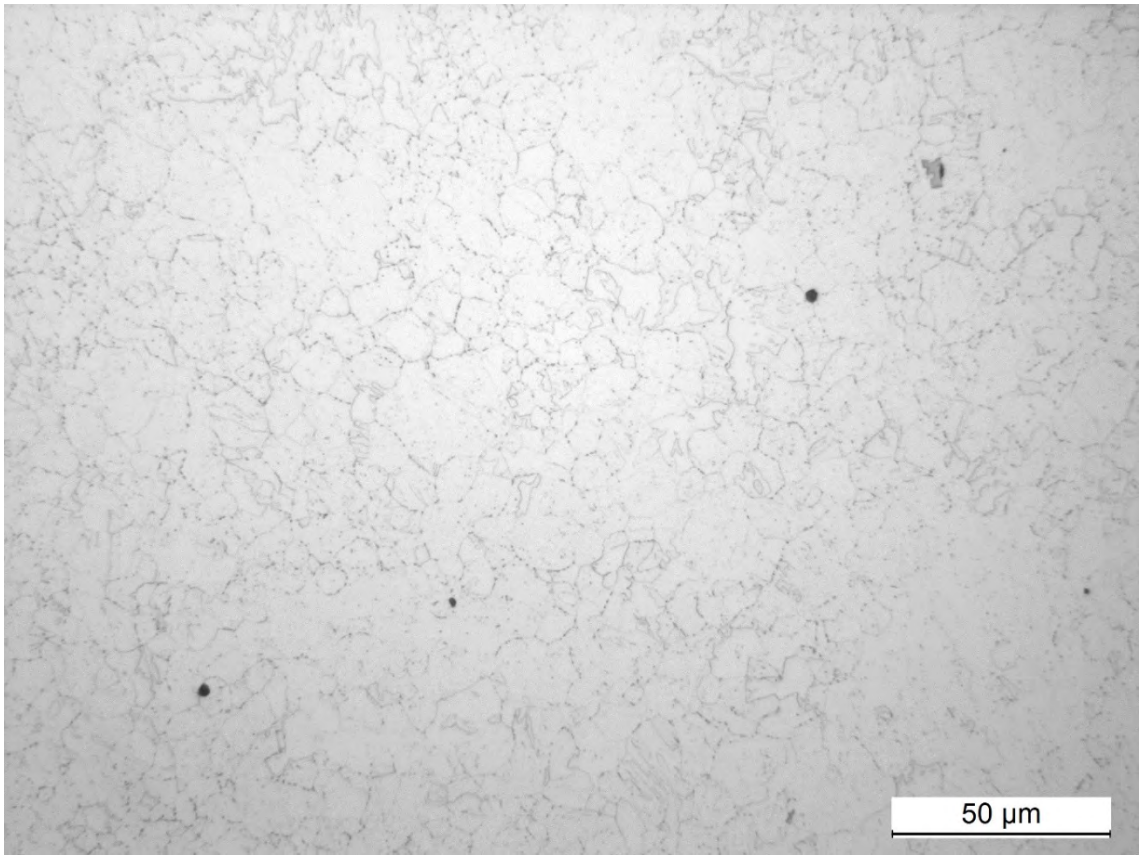
Kuva 17. Teräs 7CrMoVTiB10-10, toimitustila.



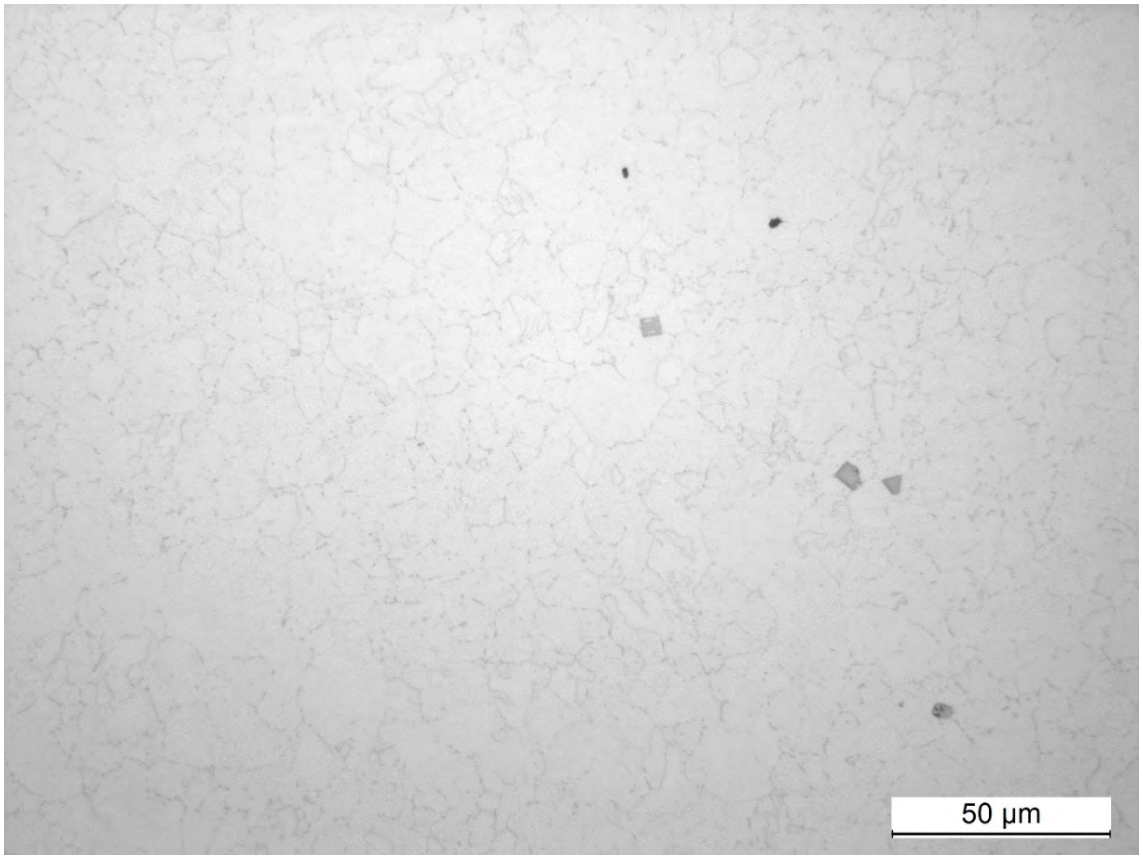
Kuva 18. Teräs7CrMoVTiB10-10, 600°C, 100 h.



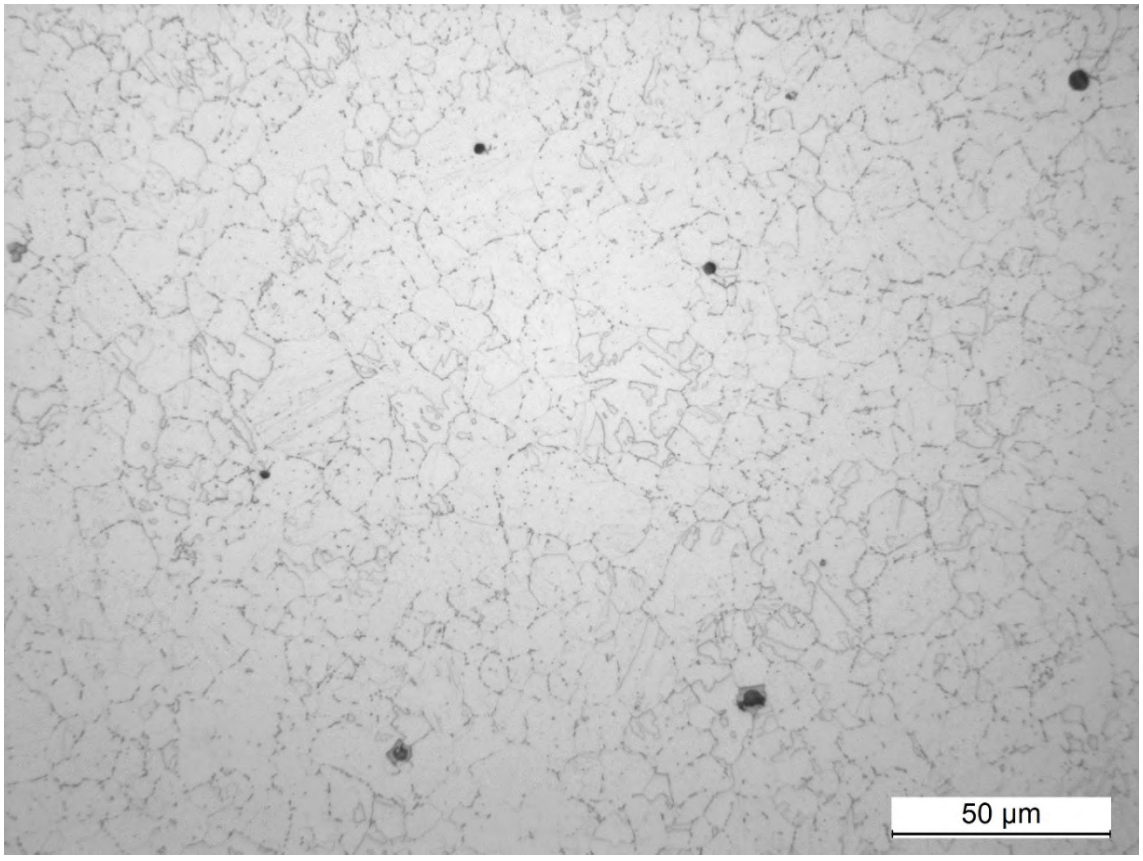
Kuva 19. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 600°C, 1000 h.



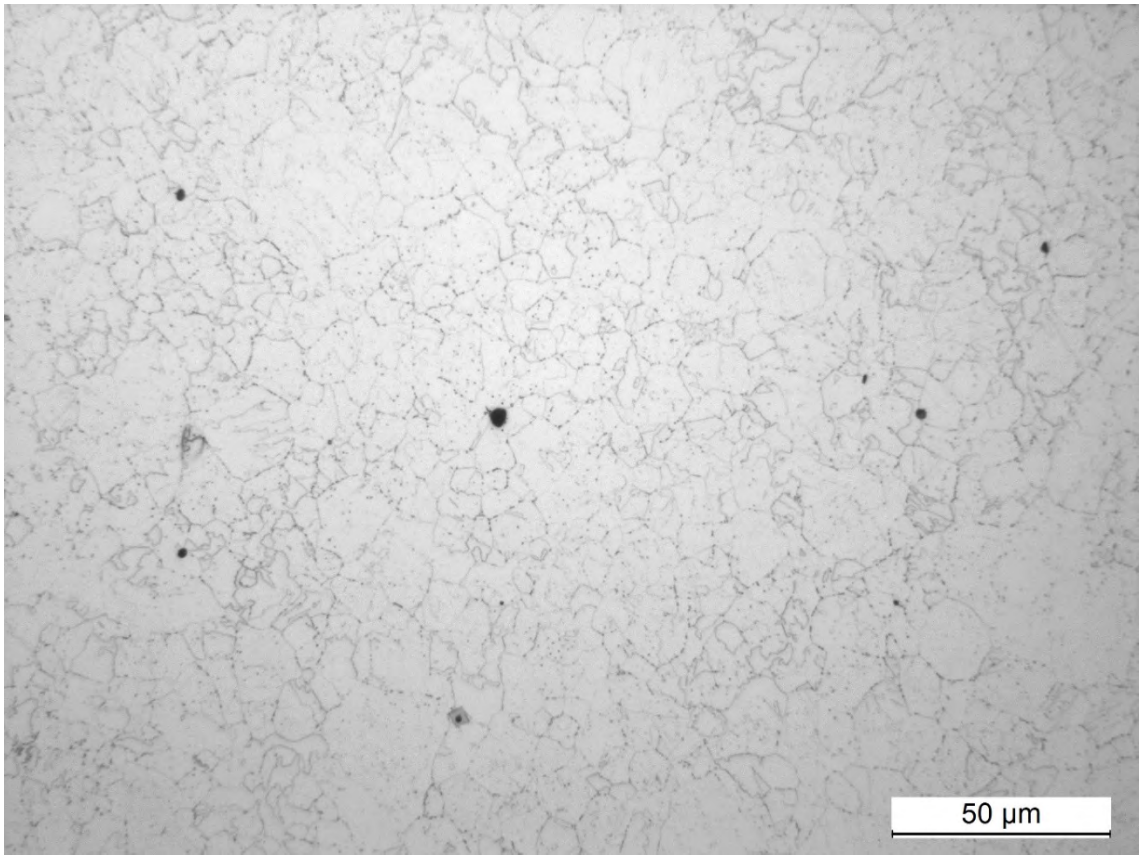
Kuva 20. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 650°C, 10 h.



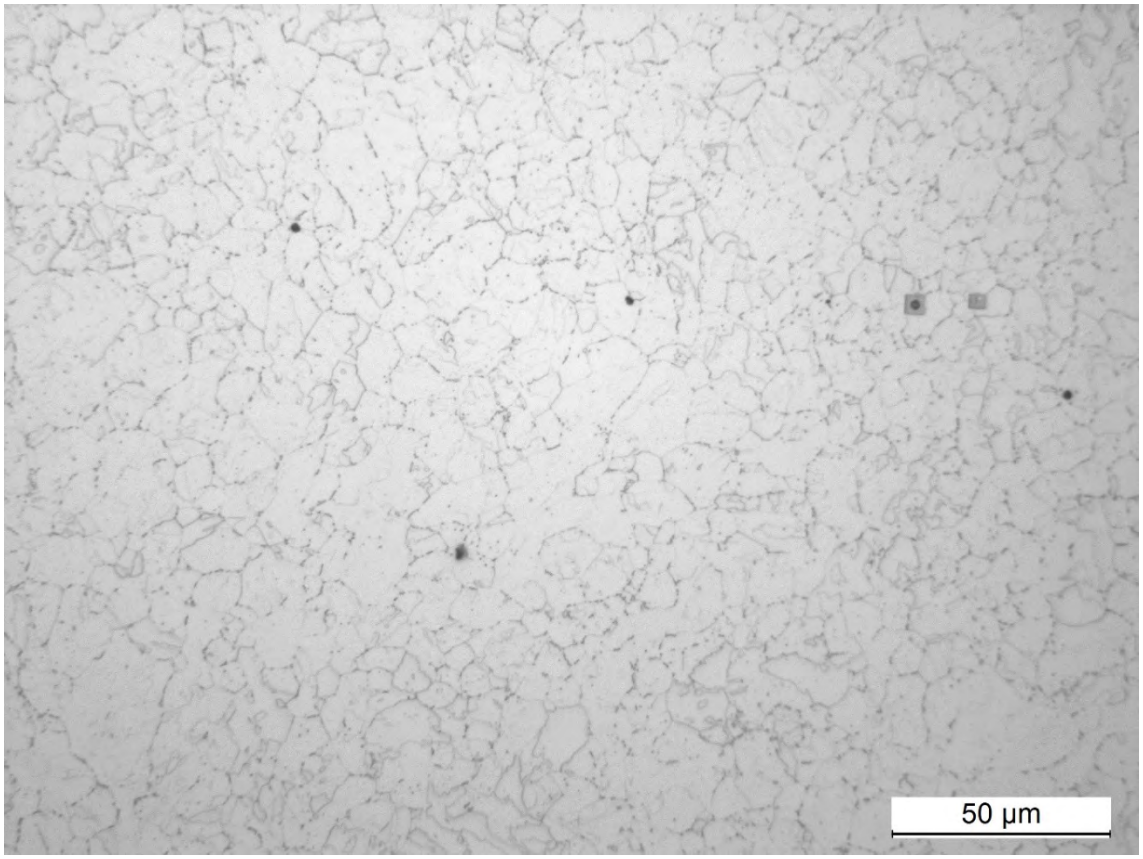
Kuva 21. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 650°C, 100 h.



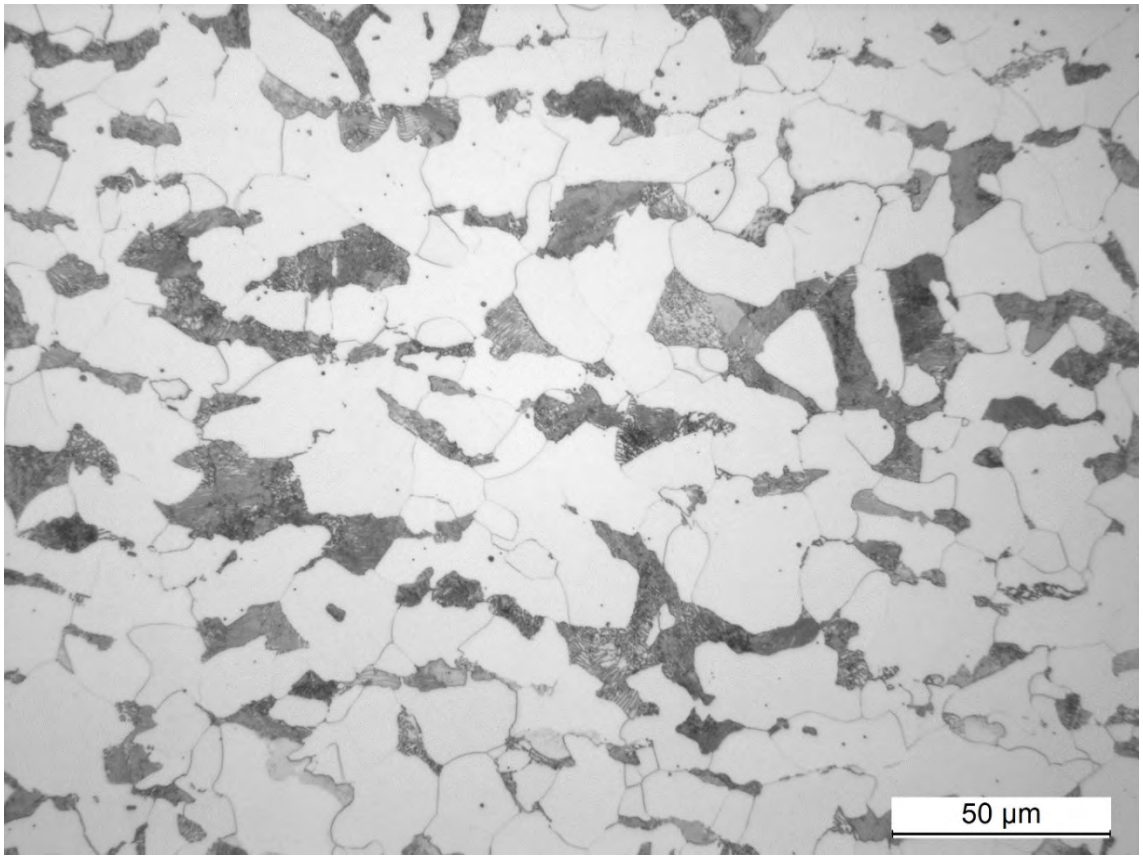
Kuva 22. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 650°C, 1000 h.



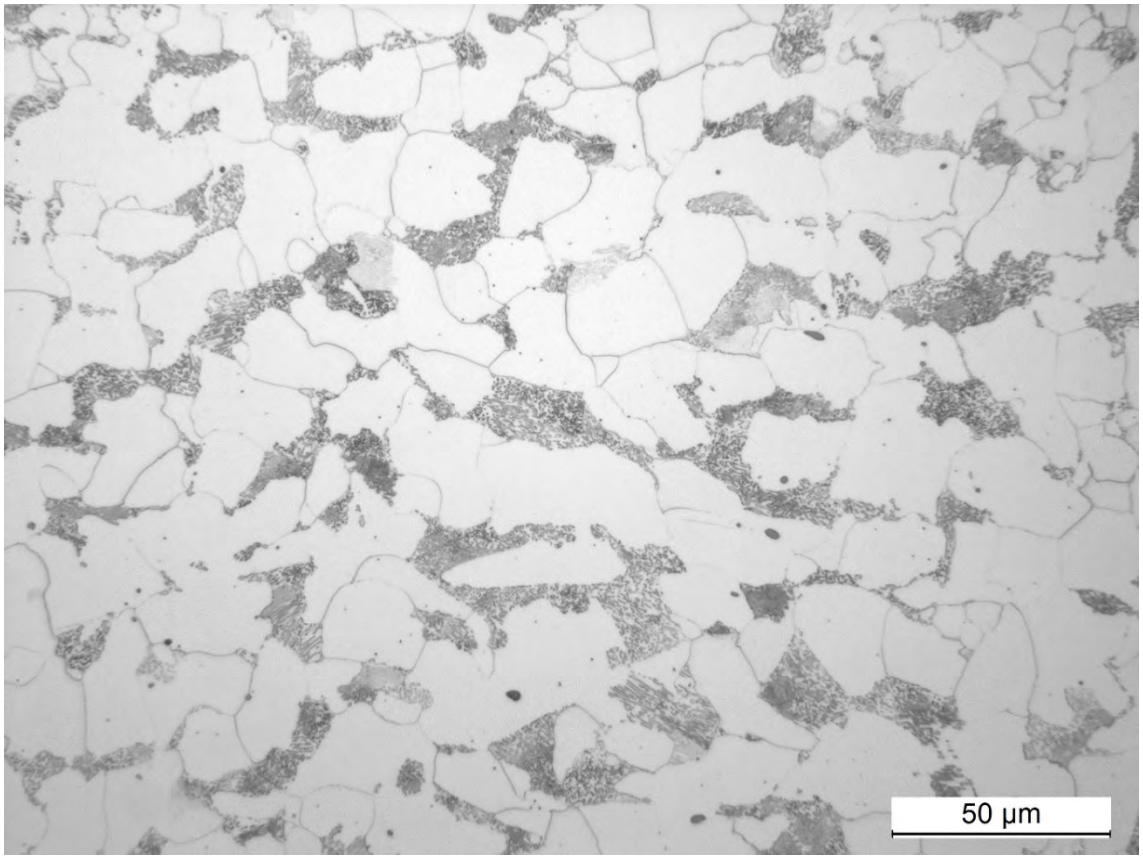
Kuva 23. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 700°C, 10 h.



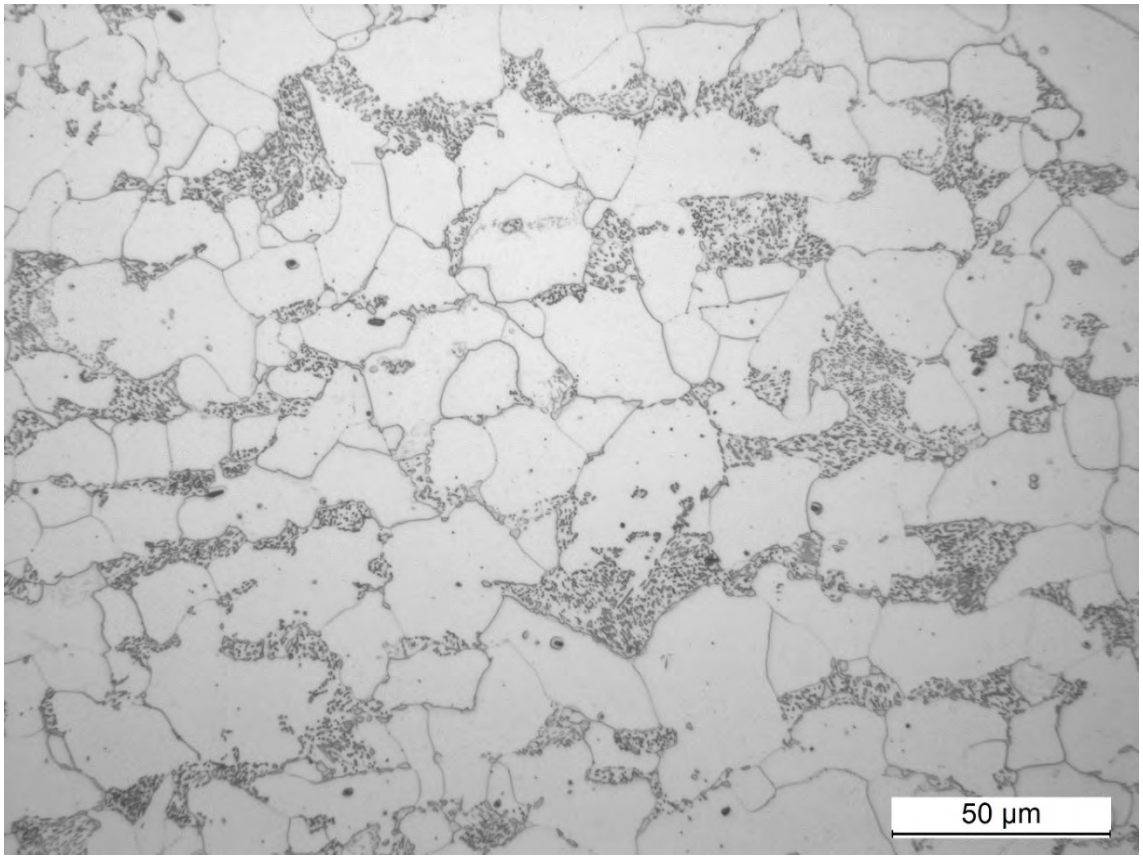
Kuva 24. Teräs7CrMoVTiB10-10, 700°C, 100 h.



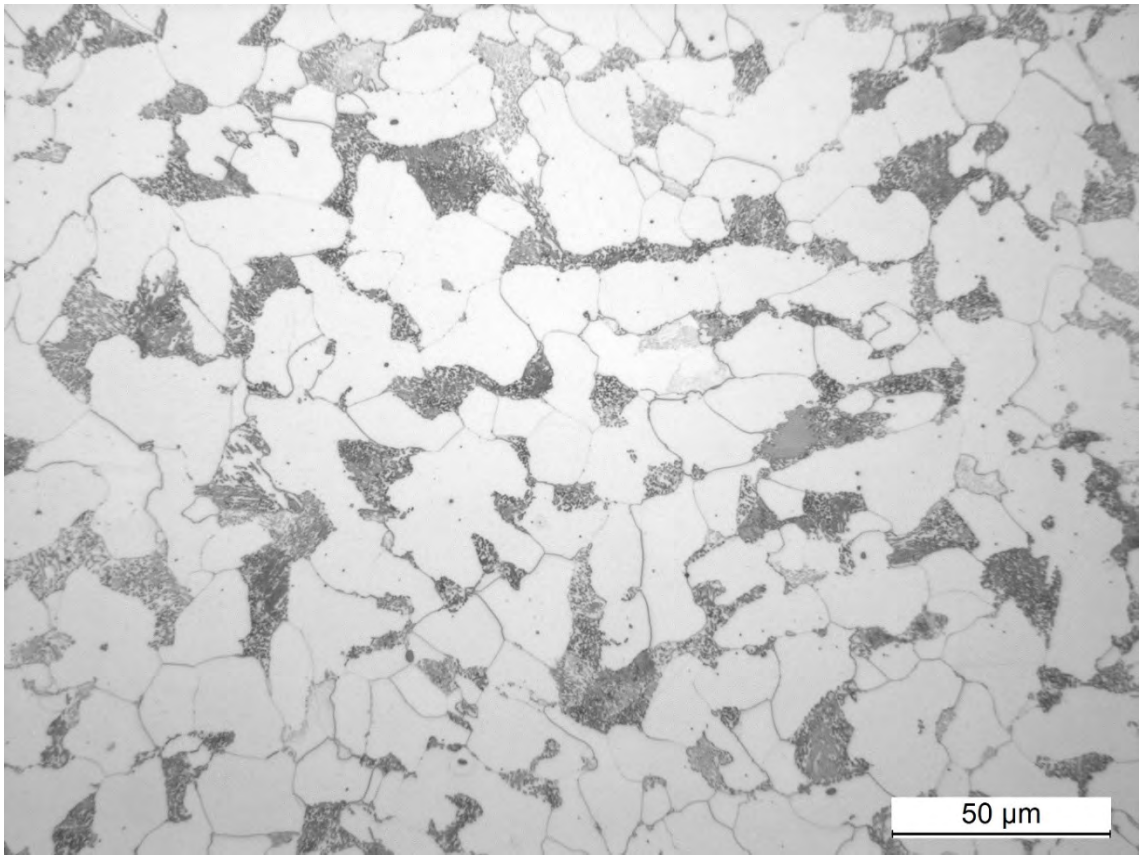
Kuva 25. St45.8, toimitustila, aste A.



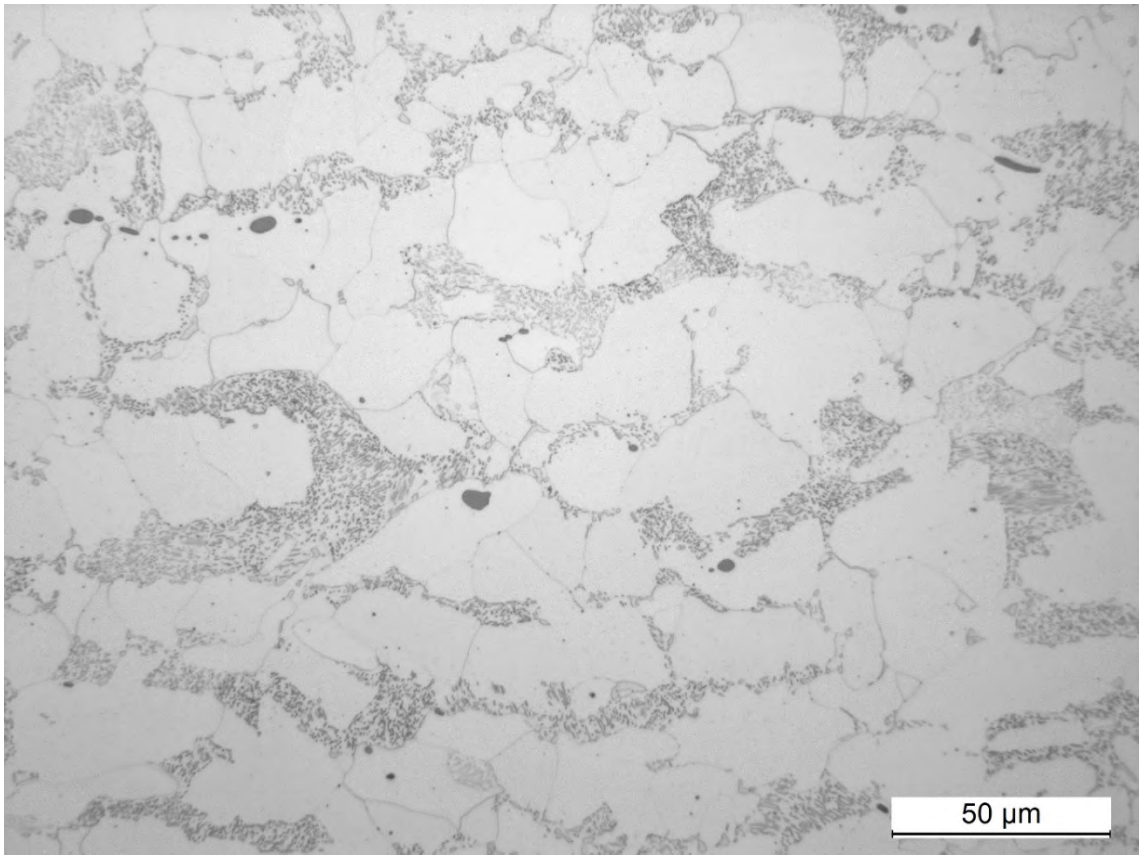
Kuva 26. St45.8, 600°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste B/C.



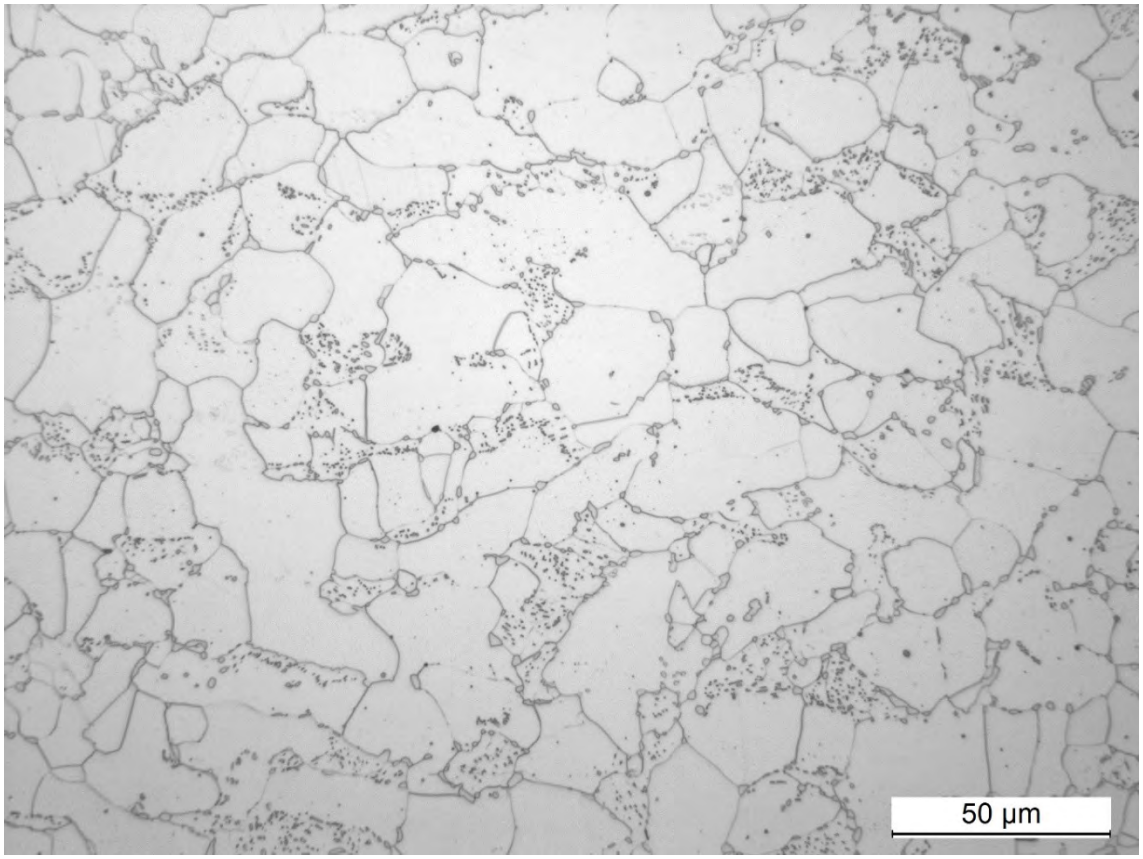
Kuva 27. St45.8, 600°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste D.



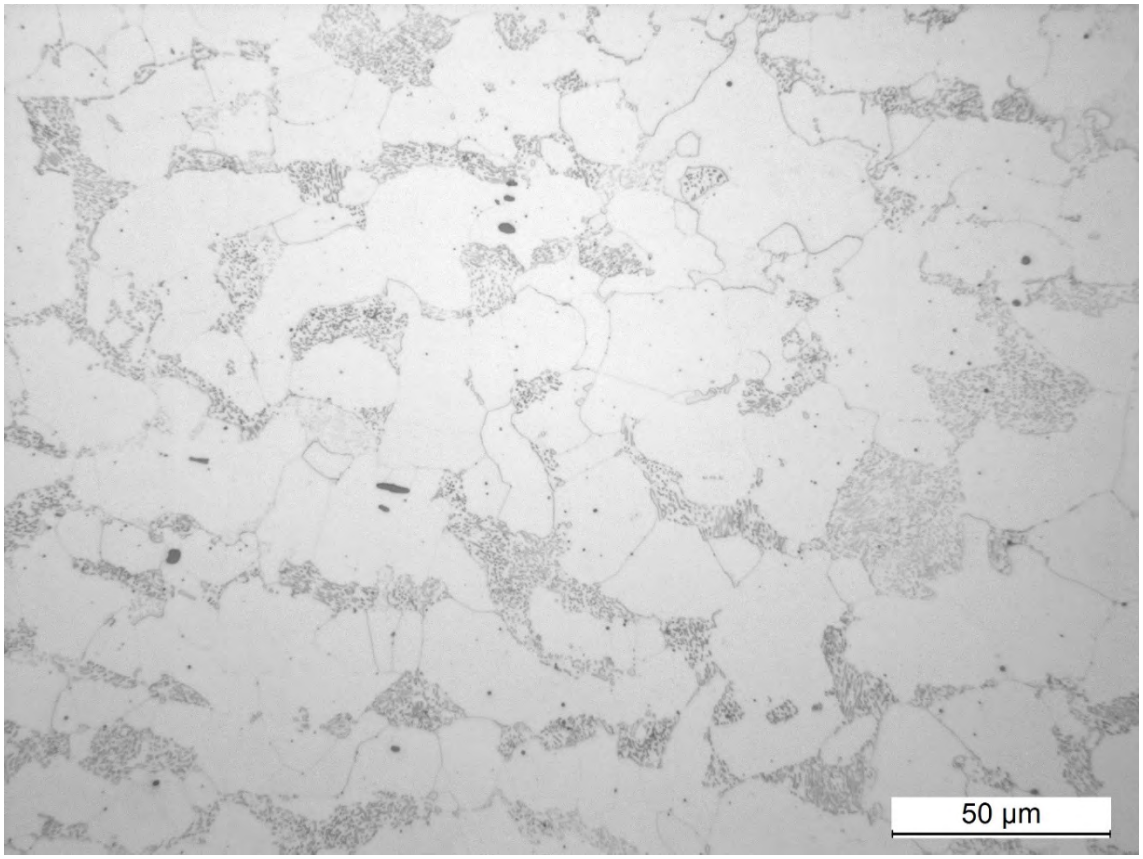
Kuva 28. St45.8, 650°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste B/C.



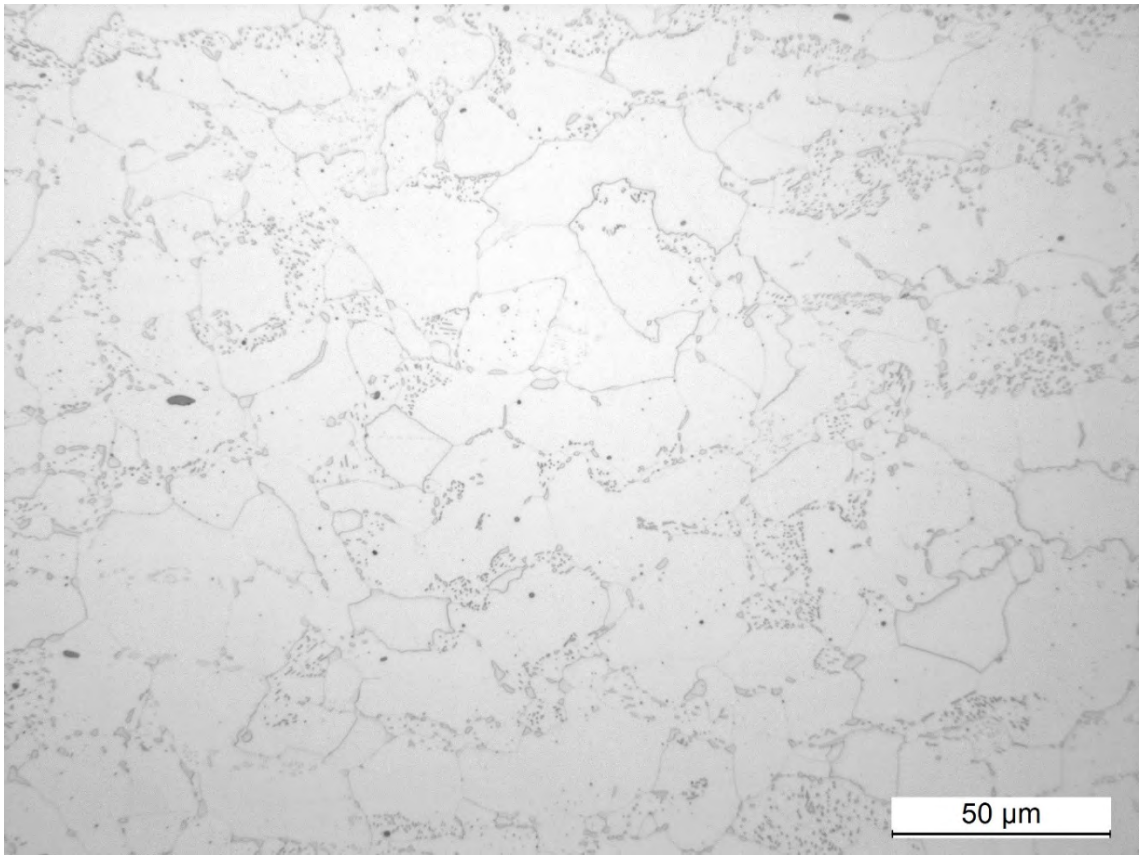
Kuva 29. St45.8, 650°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D.



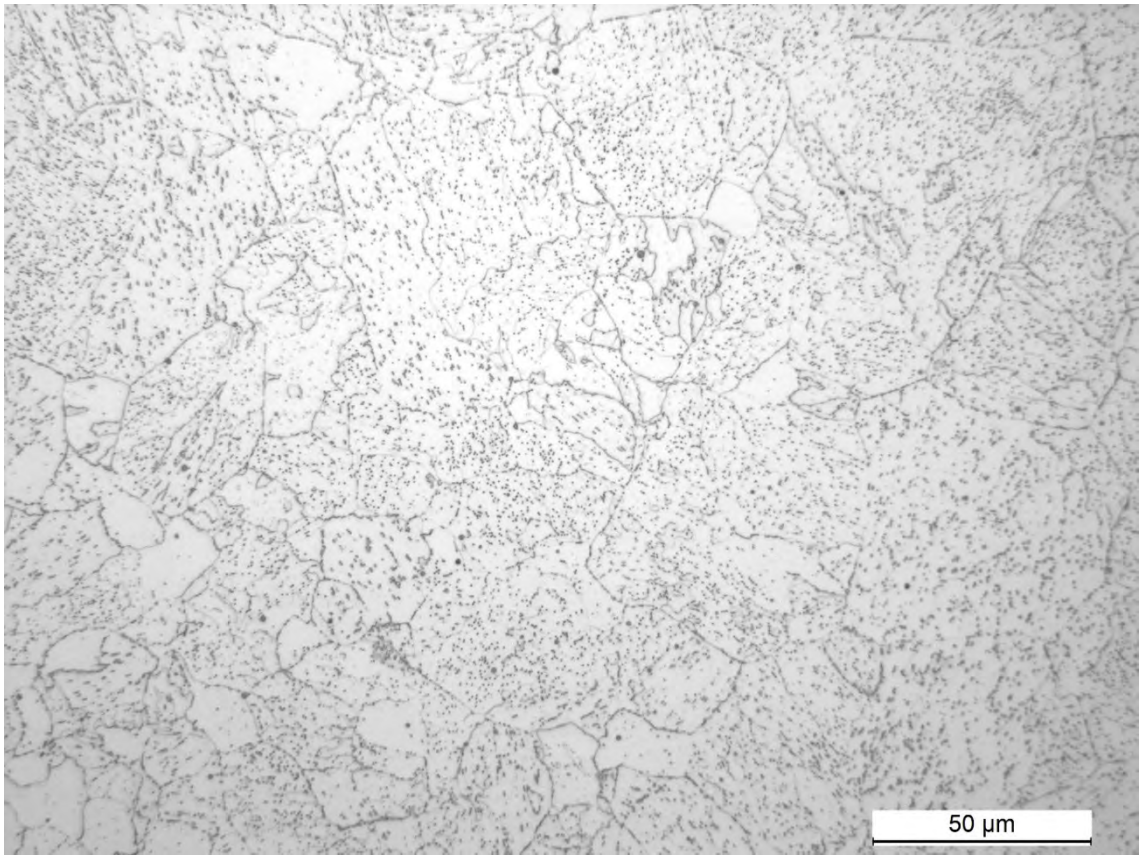
Kuva 30. St45.8, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste E.



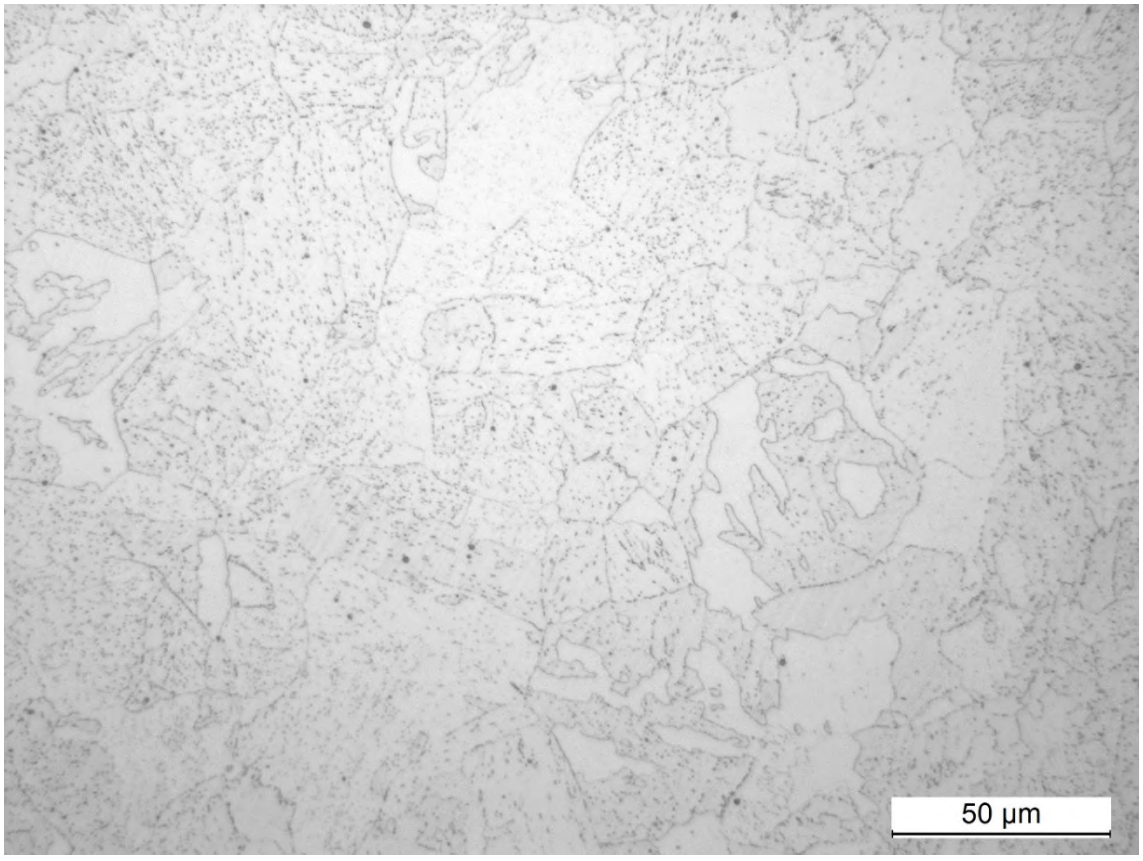
Kuva 31. St45.8, 700°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste D.



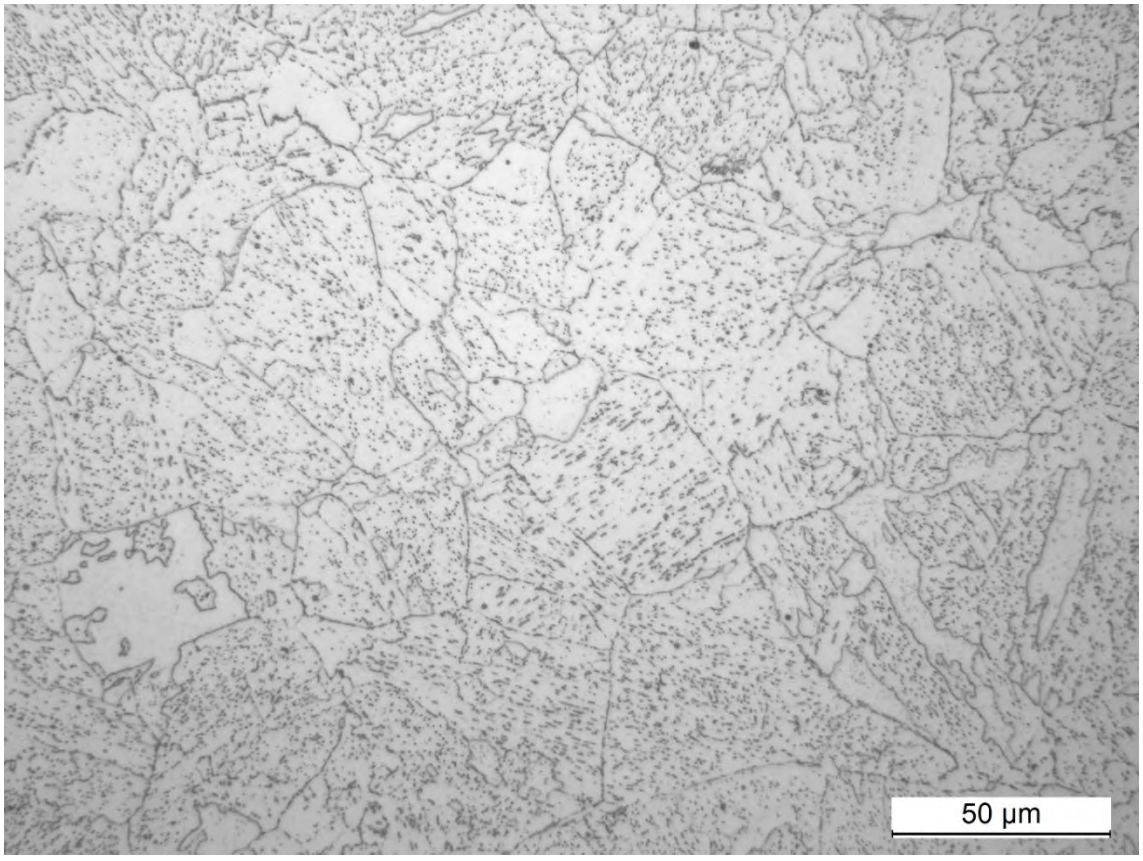
Kuva 32. St45.8, 700°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste E.



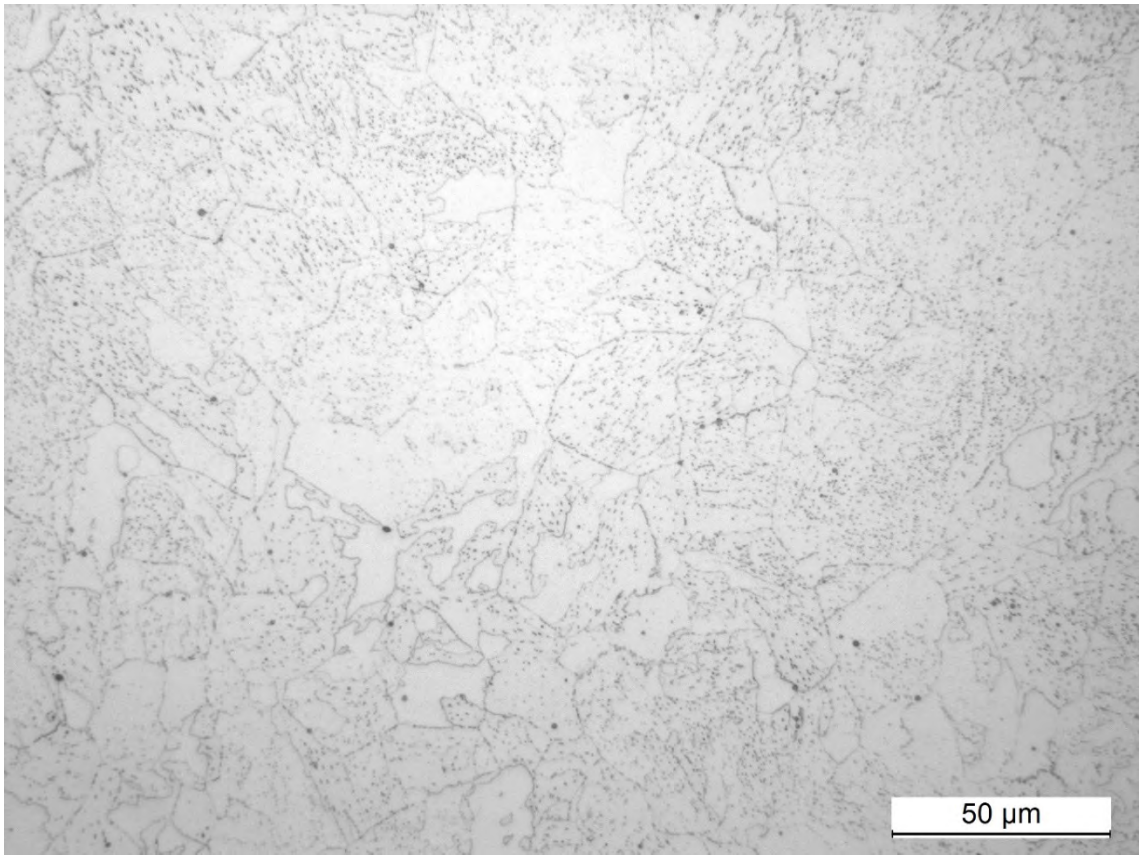
Kuva 33. T22, toimitustila.



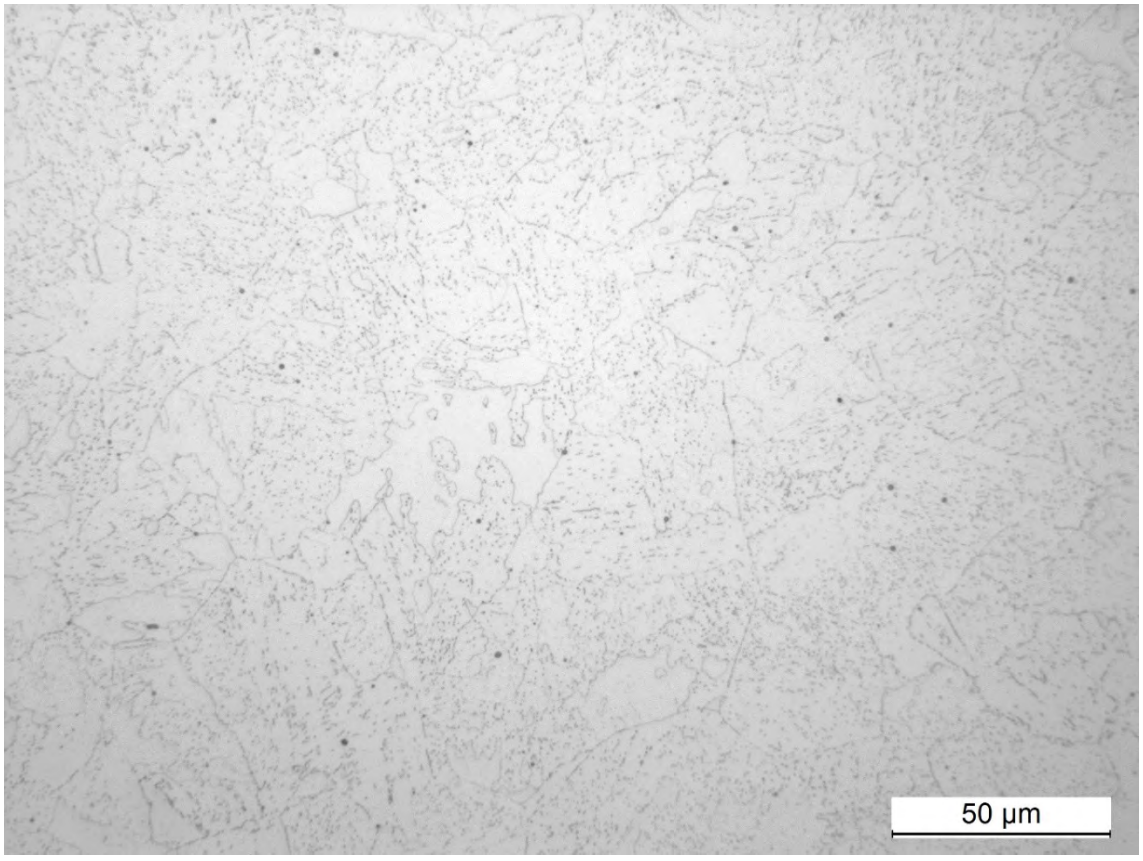
Kuva 34. T22, 600°C, 100 h.



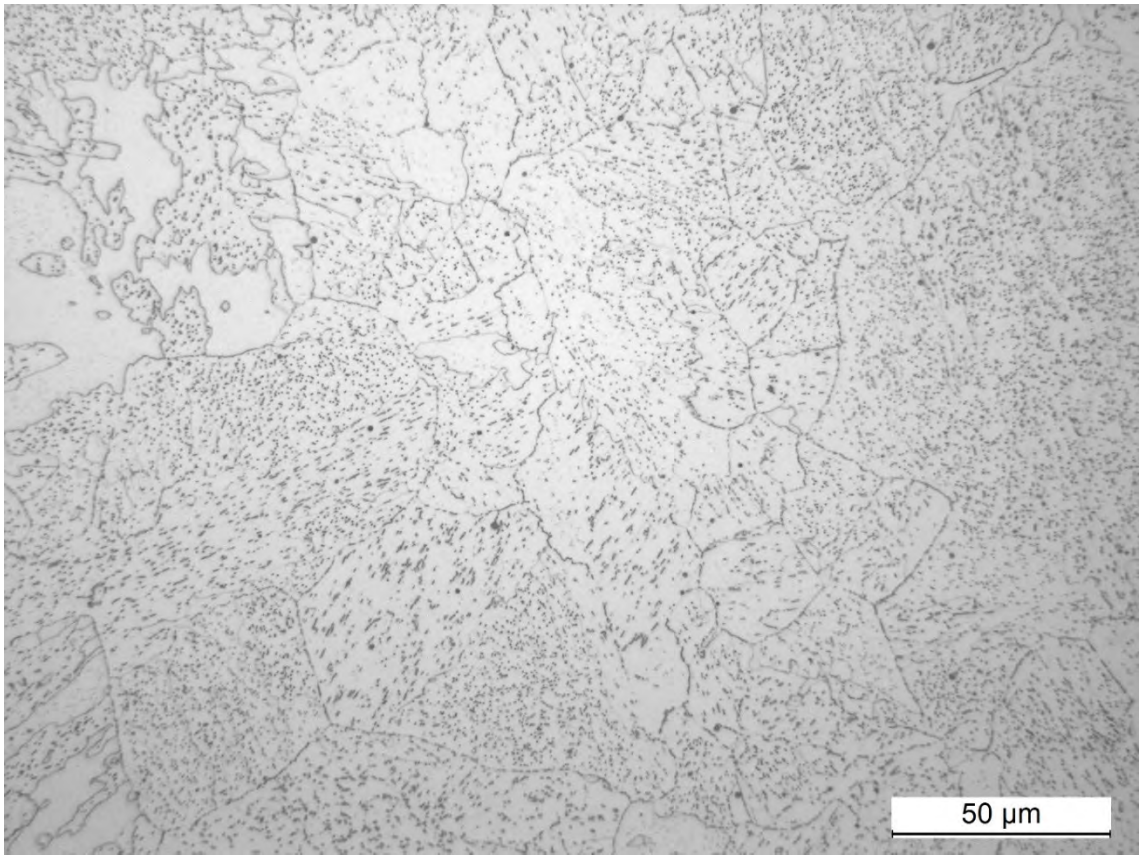
Kuva 35. T22, 600°C, 1000 h.



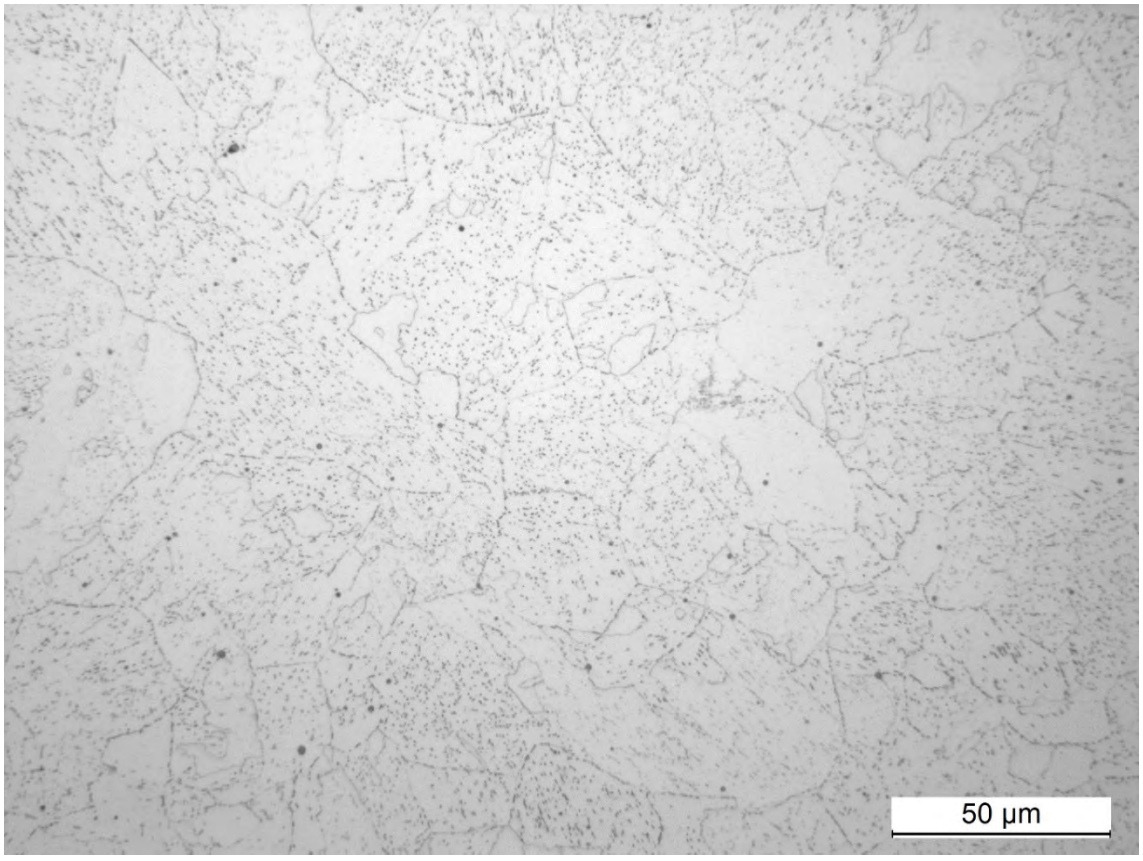
Kuva 36. T22, 650°C, 10 h.



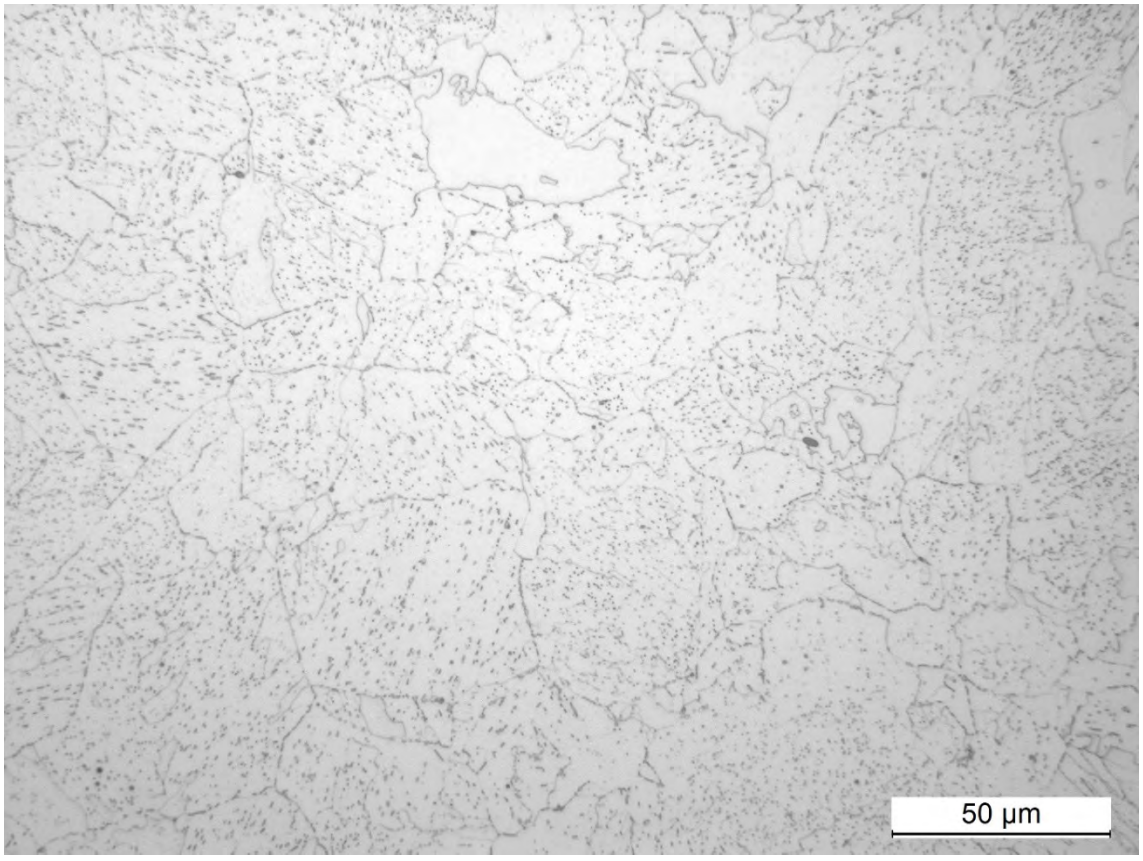
Kuva 37. T22, 650°C, 100 h.



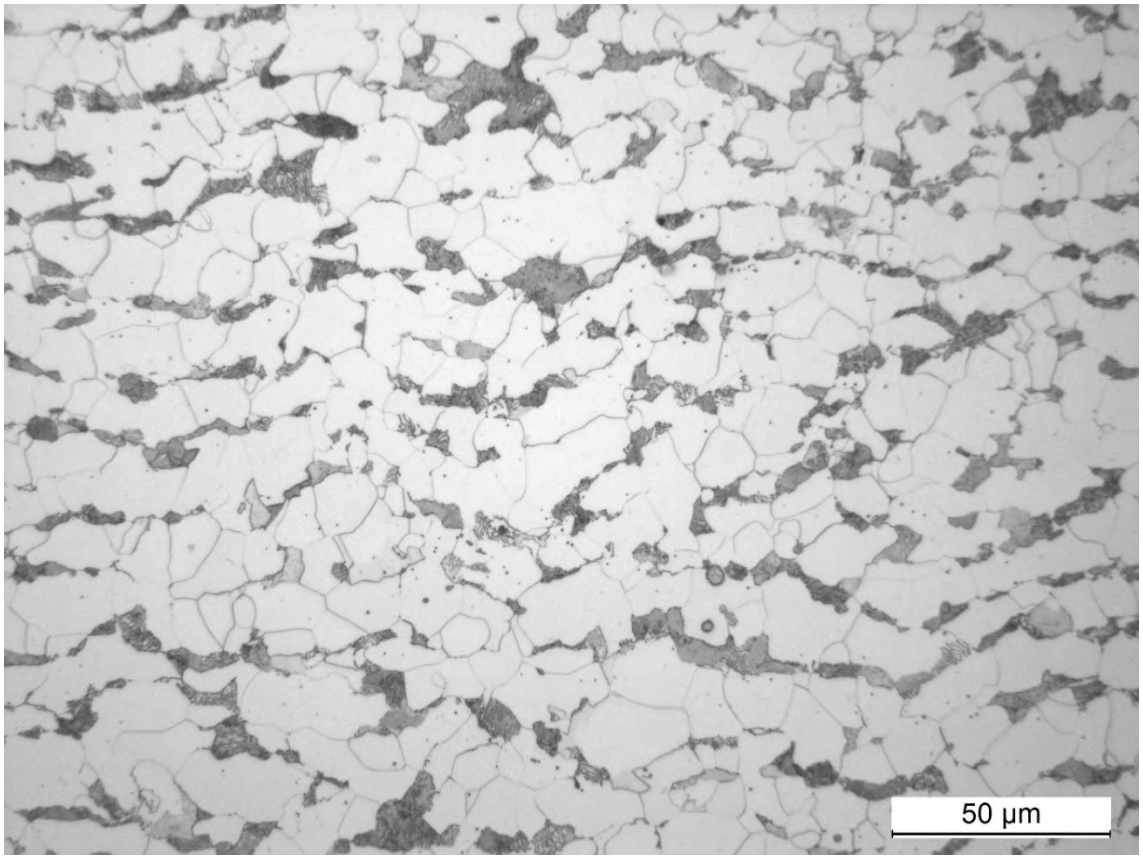
Kuva 38. T22, 650°C, 1000 h.



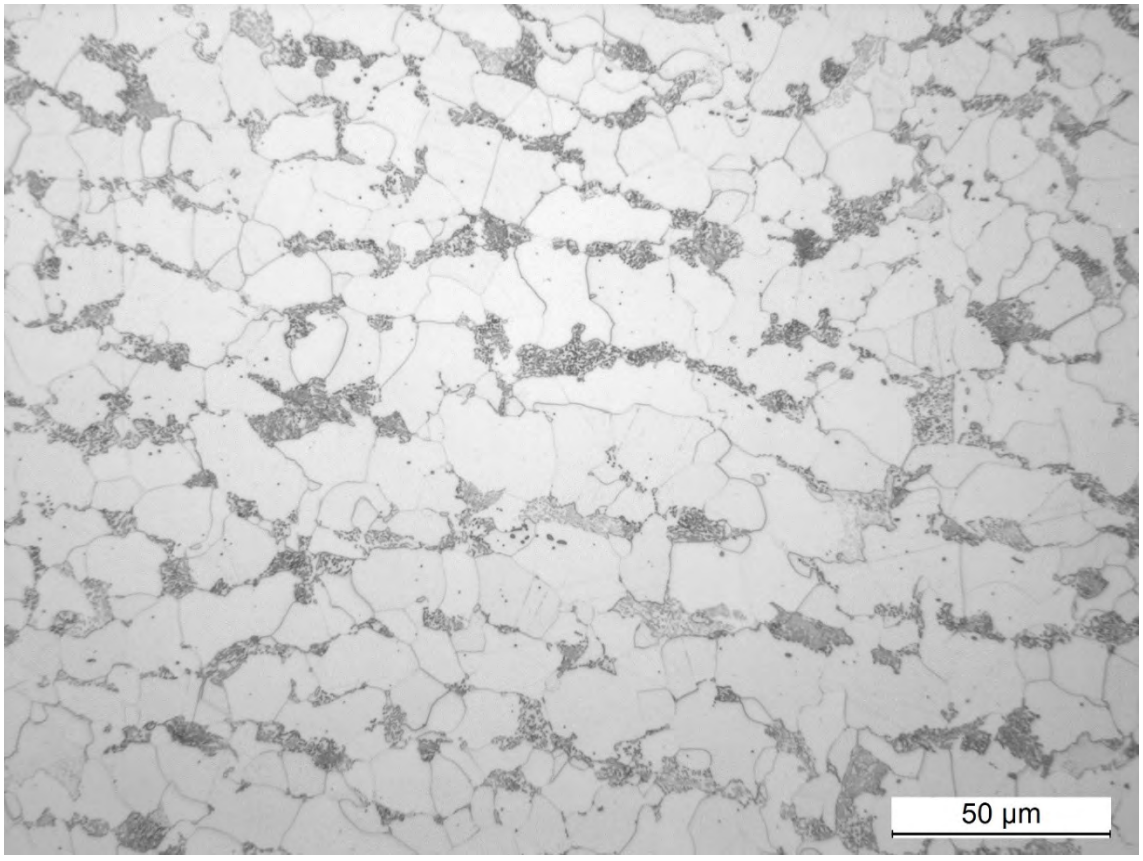
Kuva 39. T22, 700°C, 10 h.



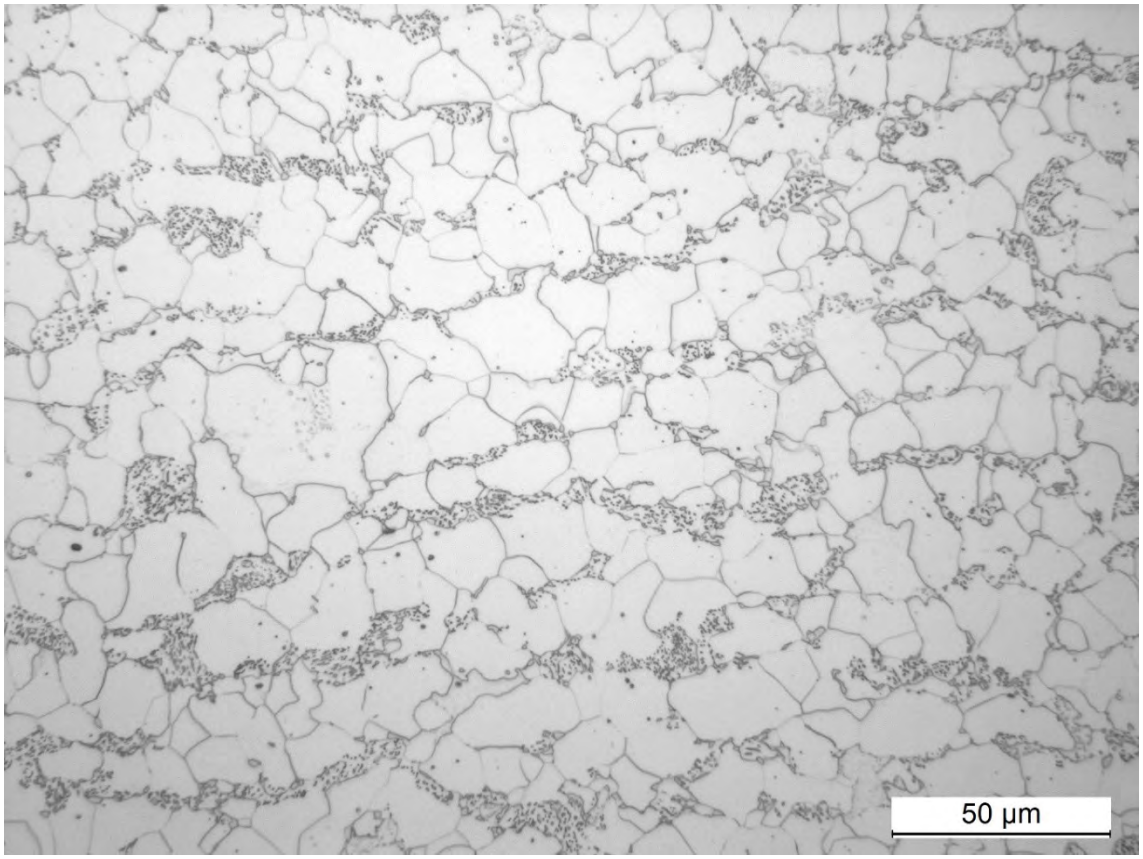
Kuva 40. T22, 700°C, 100 h.



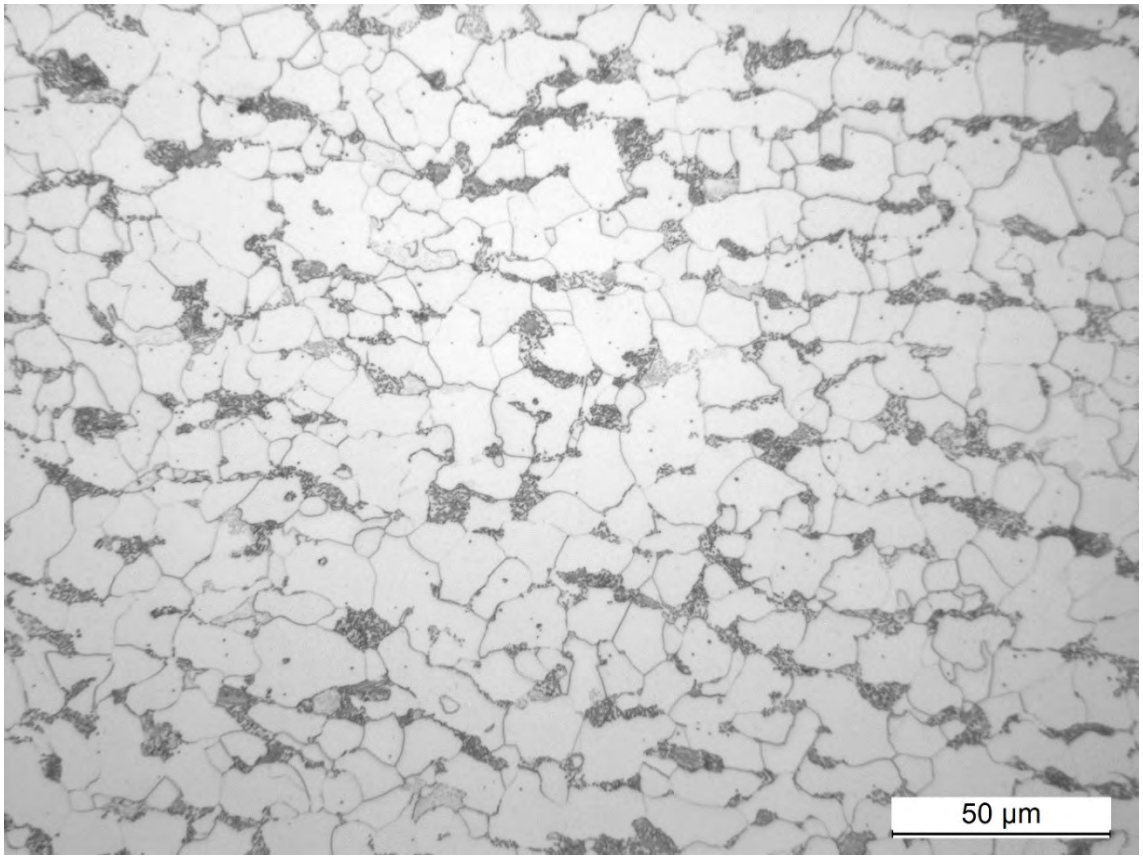
Kuva 41. P265GH, toimitustila, aste A.



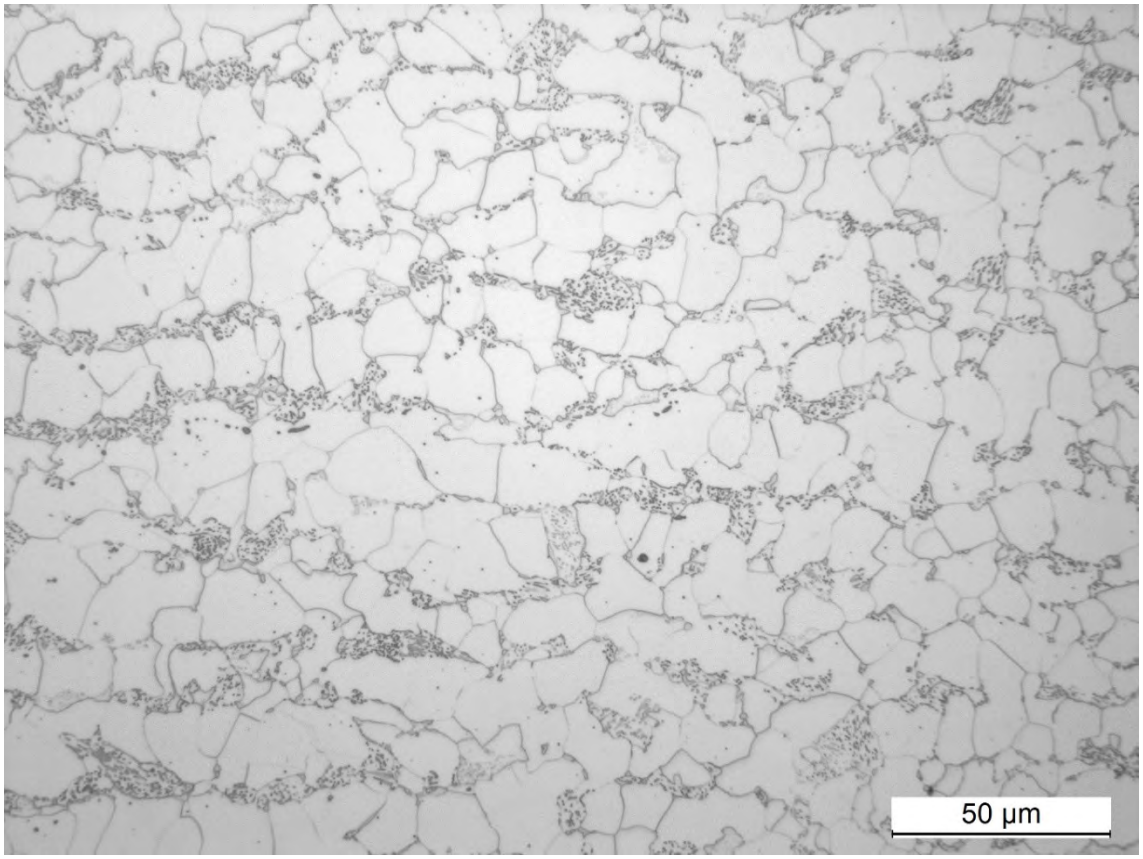
Kuva 42. P265GH, 600°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste B/C.



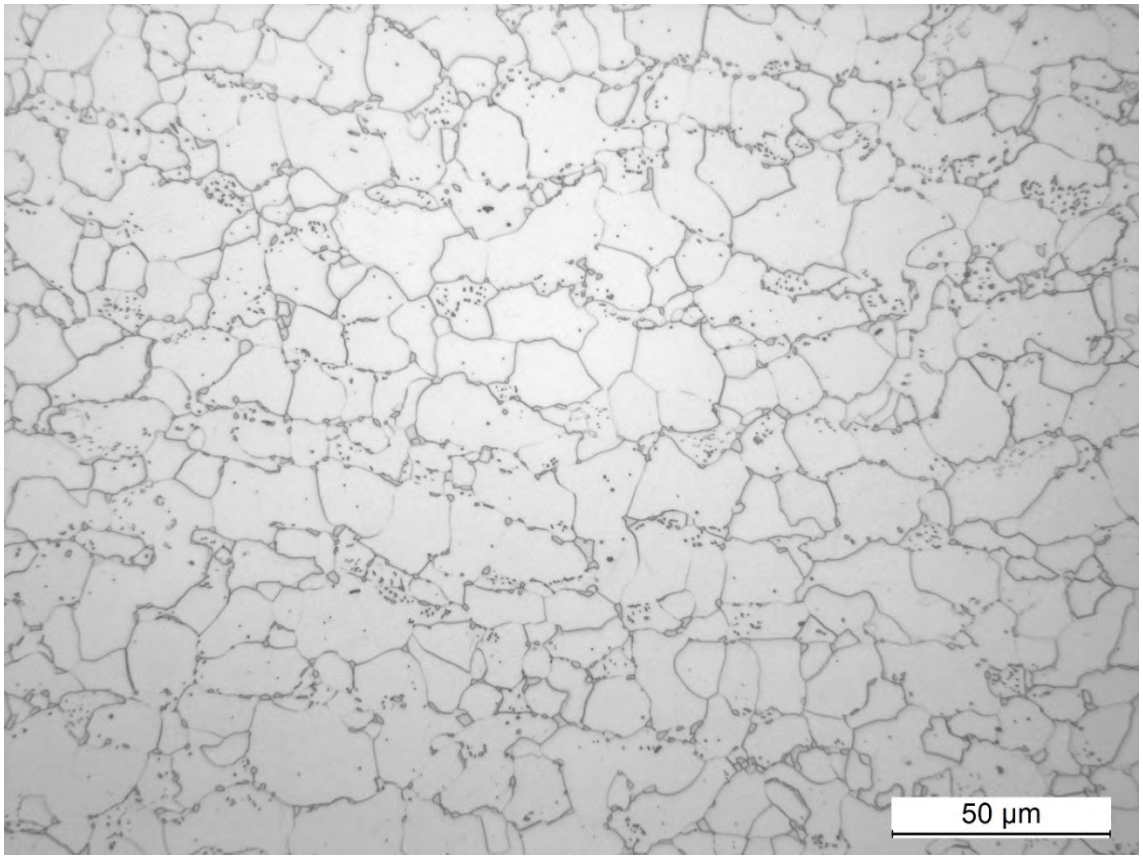
Kuva 43. P265GH, 600°C, 1000 h, PLM (C=14), aste D.



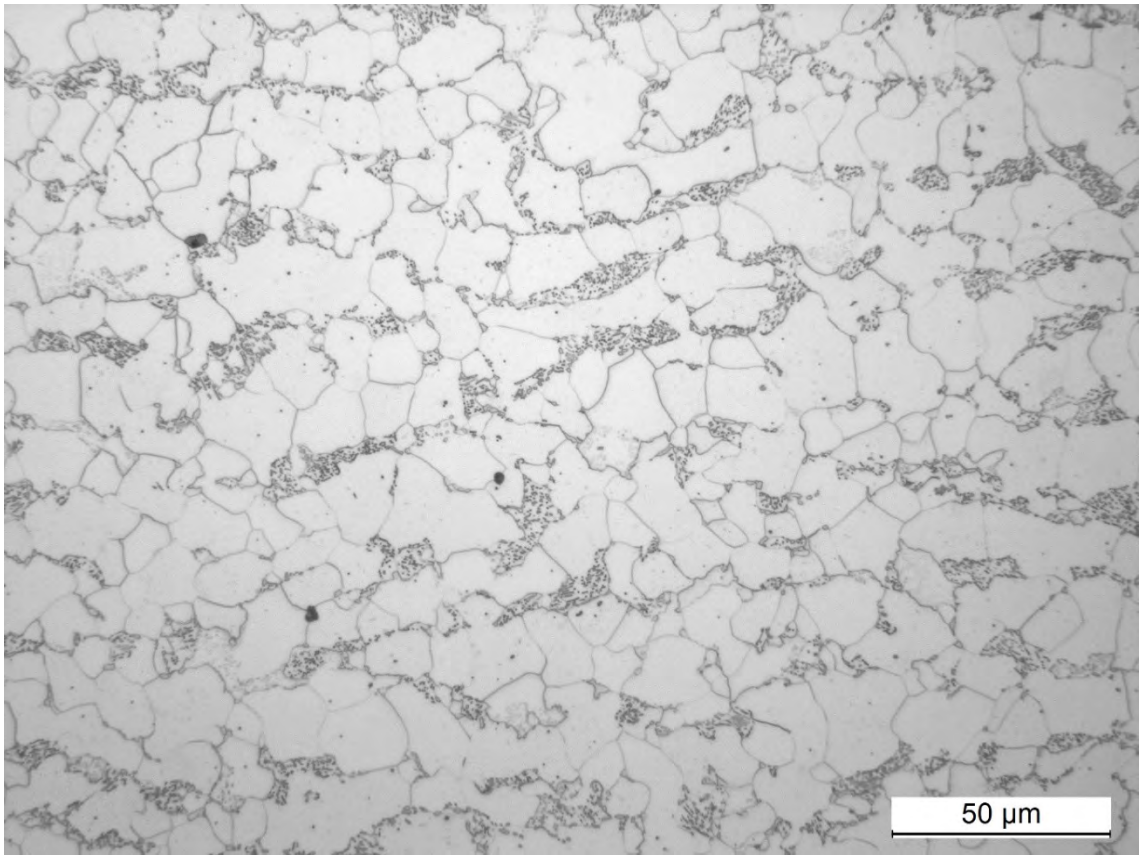
Kuva 44. P265GH, 650°C, 10 h, PLM (C=14), C.



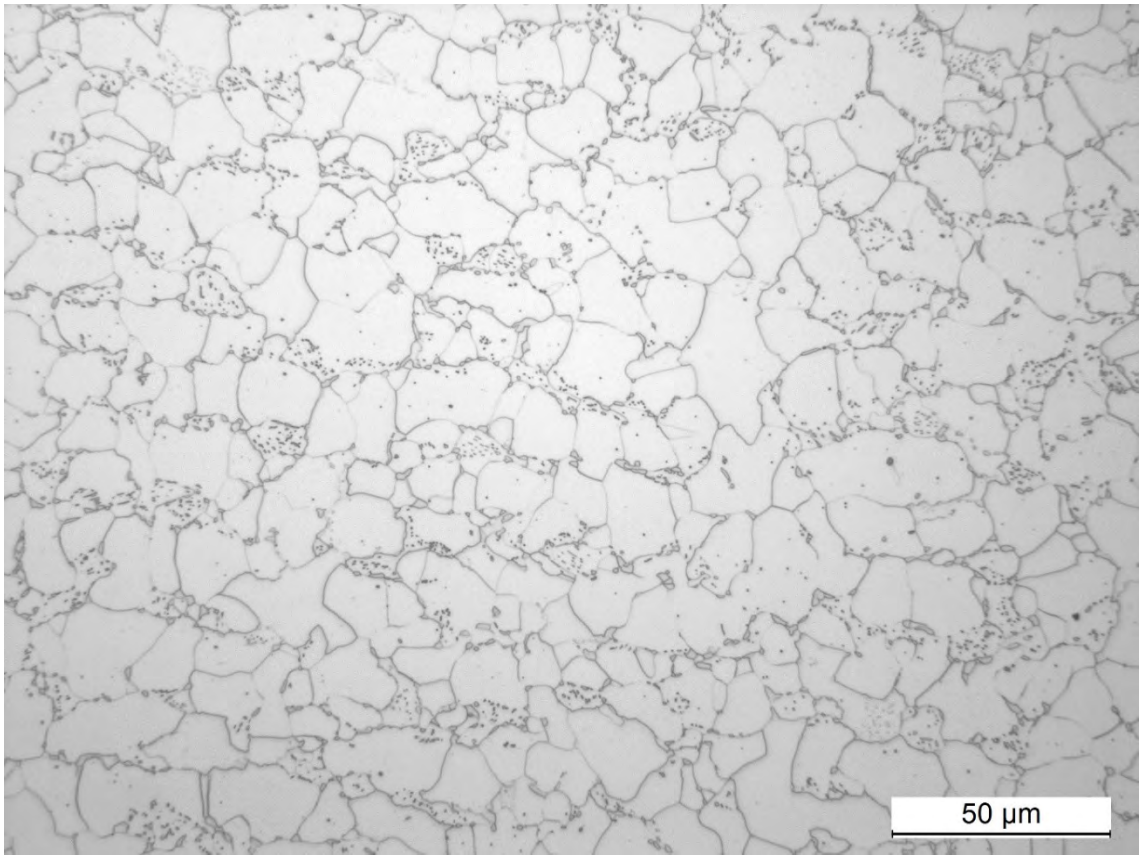
Kuva 45. P265GH, 650°C, 100 h, P_{LM} (C=14), D.



Kuva 46. P265GH, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), E.

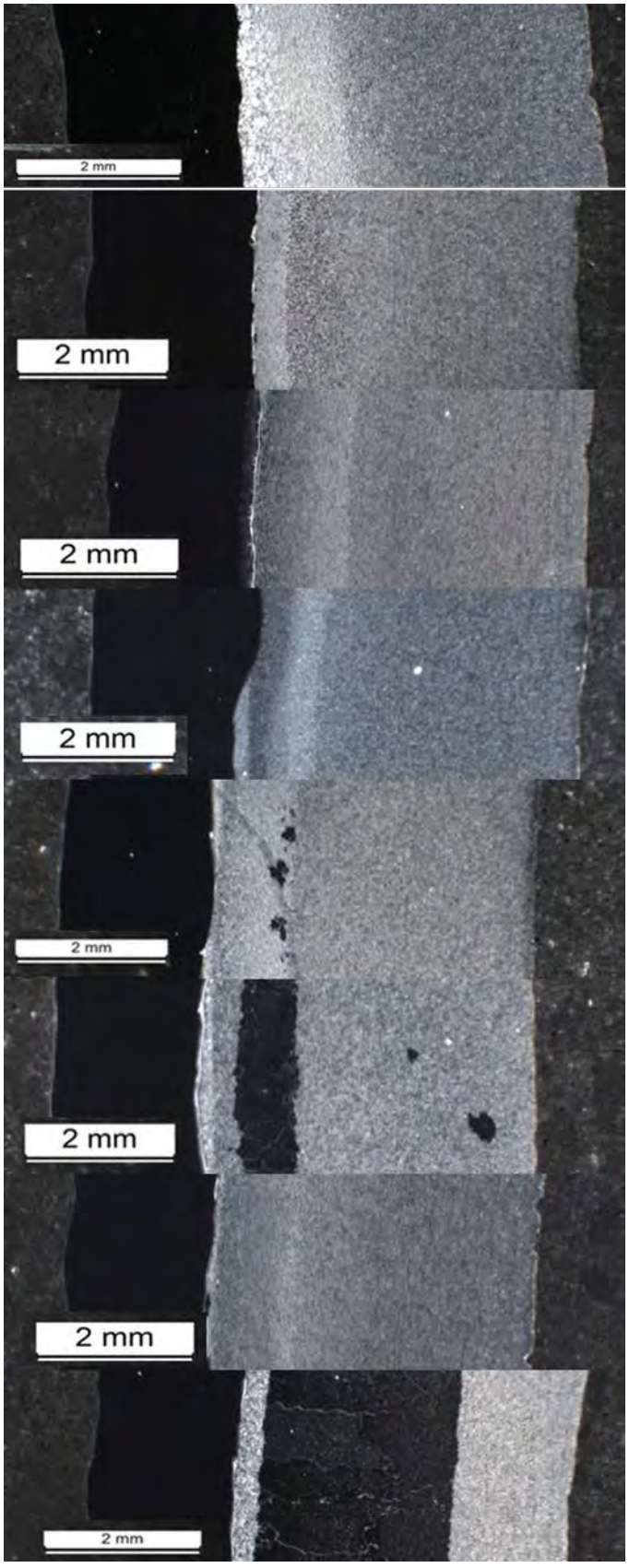


Kuva 47. P265GH, 700°C, 10 h, PLM (C=14), D.

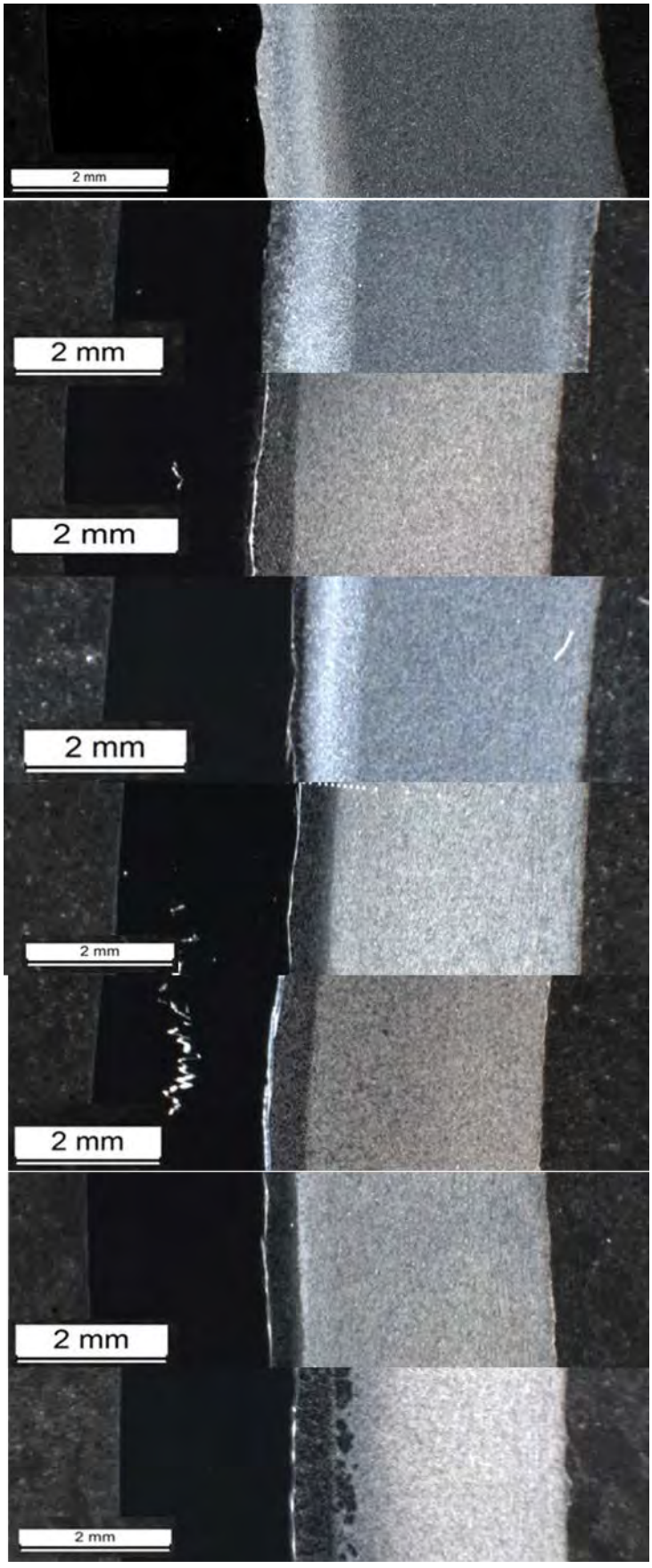


Kuva 48. P265GH, 700°C, 100 h, PLM (C=14), E.

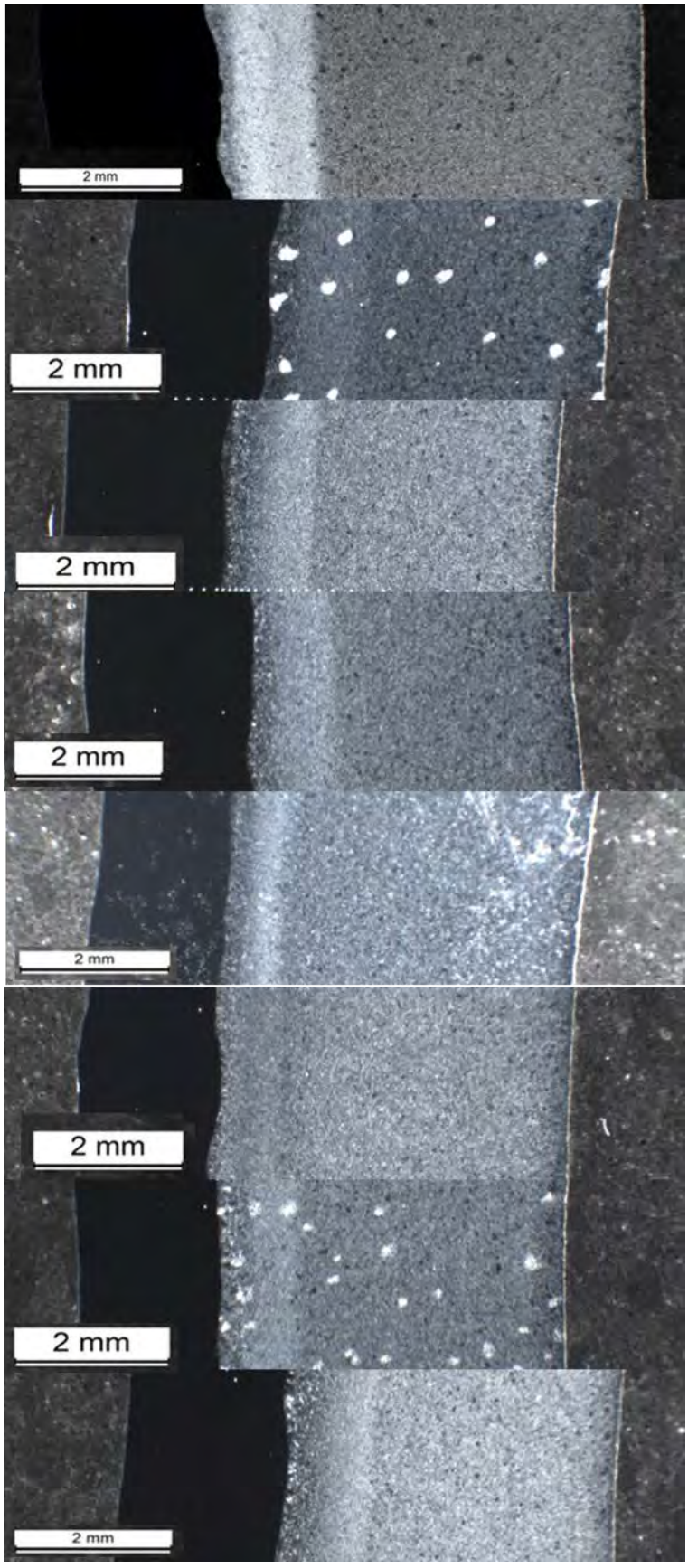
Liite 2. Rajapintojen rakenne.



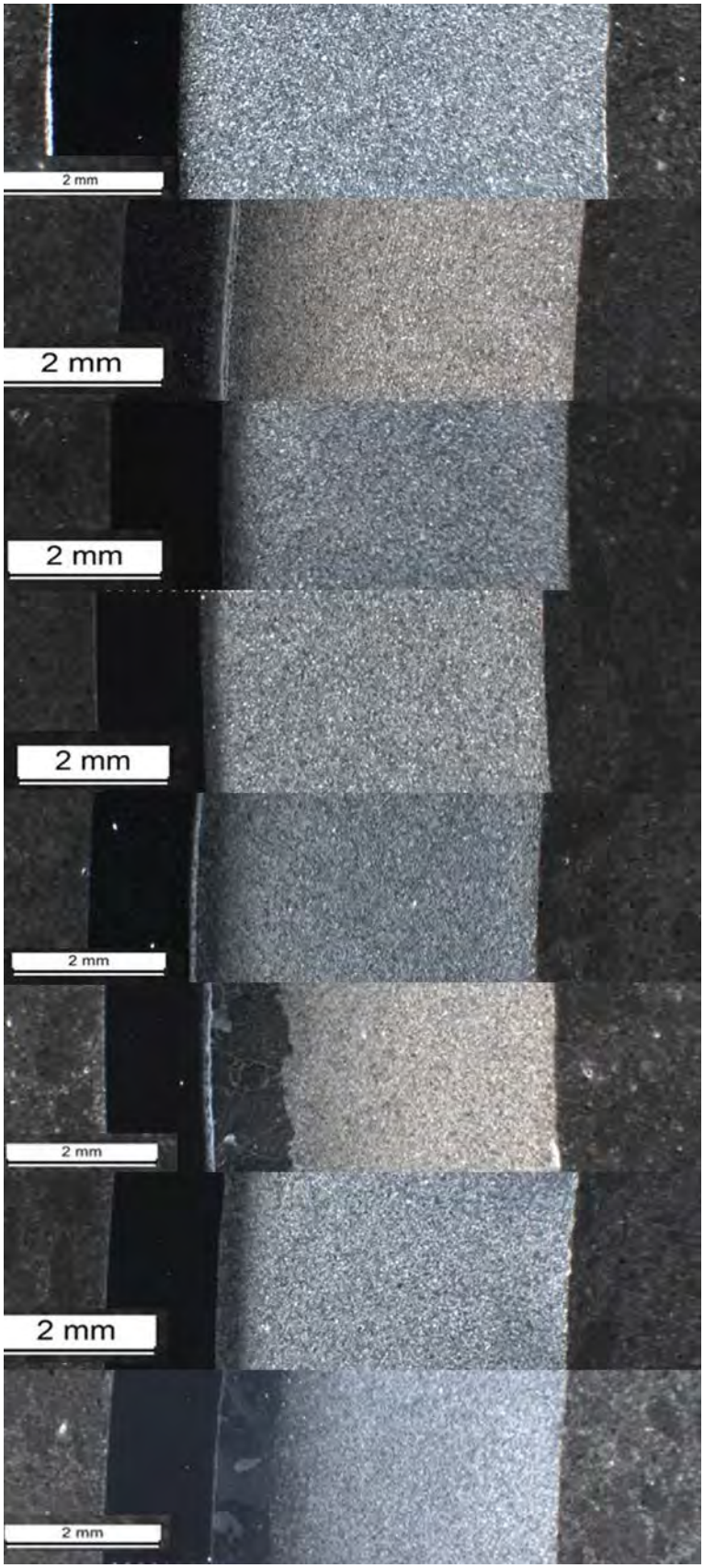
Kuva 1. Yleiskuva P235GH (309) rajapinnasta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h.



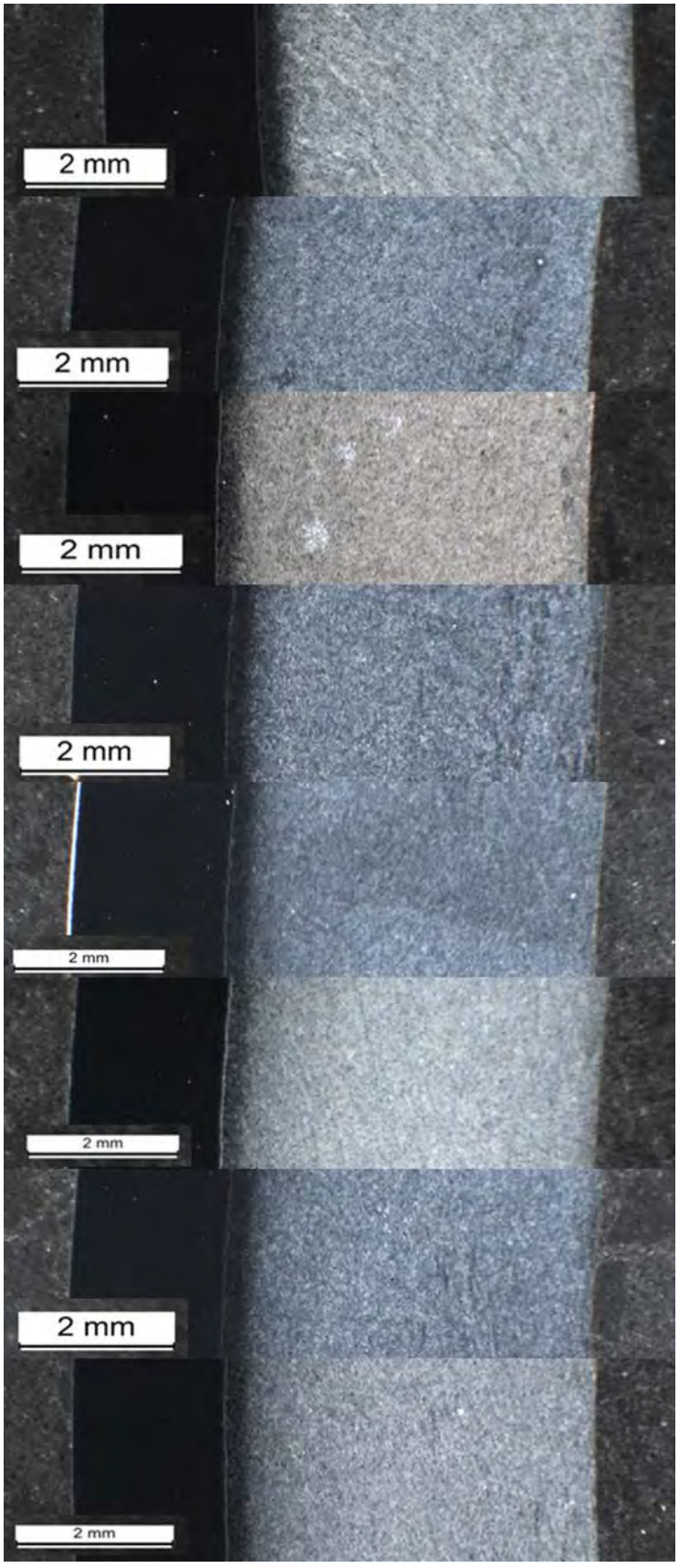
Kuva 2. 16Mo3 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100 h.



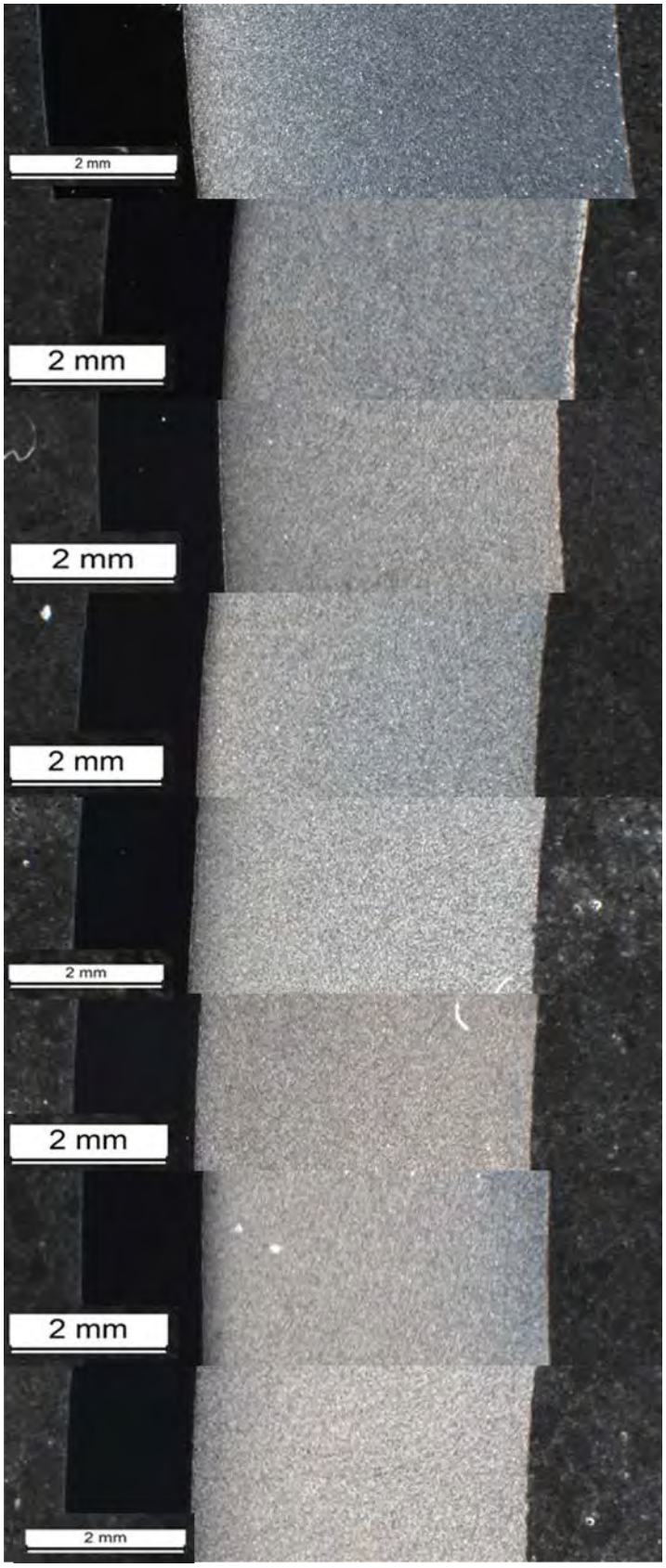
Kuva 3. 7CrMoVTiB10-10 rajapinta a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100 h.



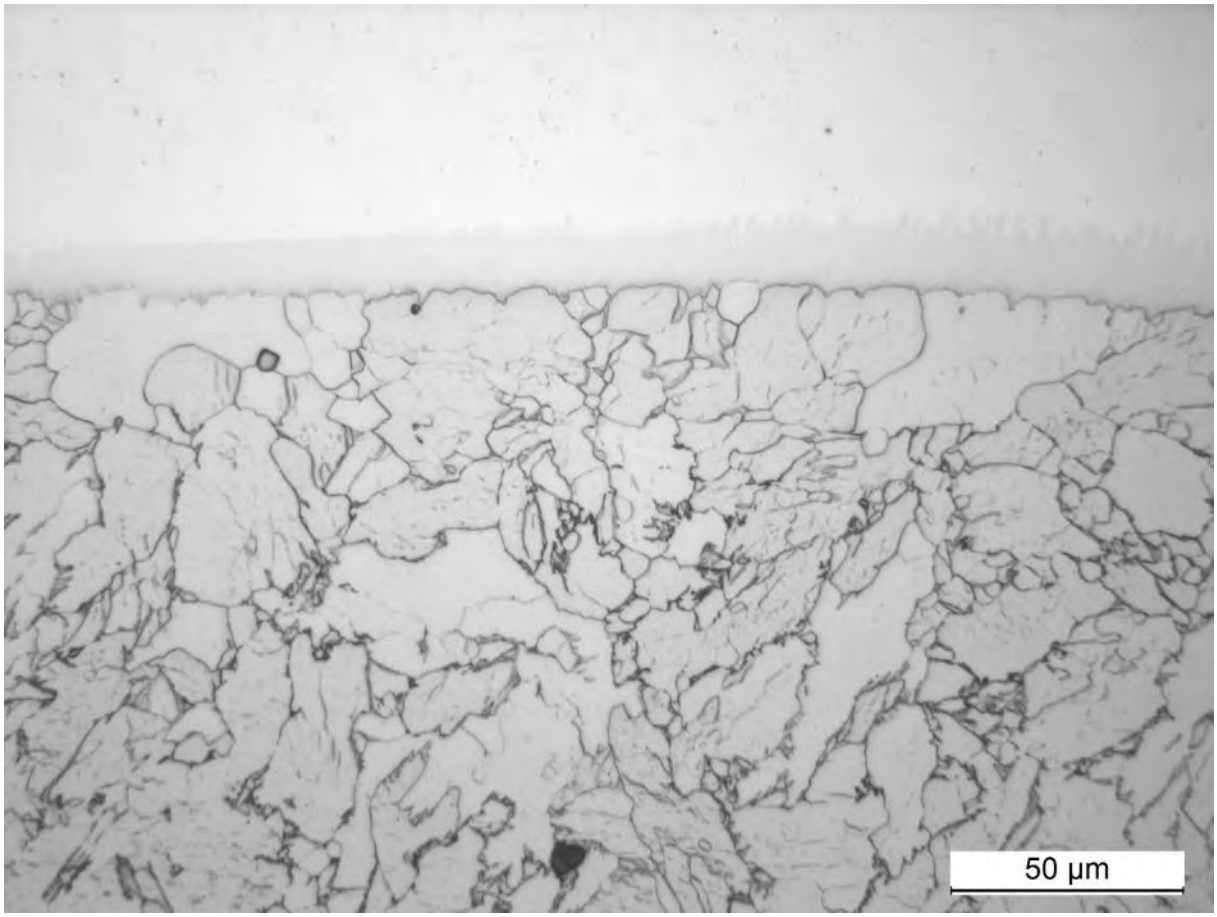
Kuva 4. 304L - St45.8 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100 h.



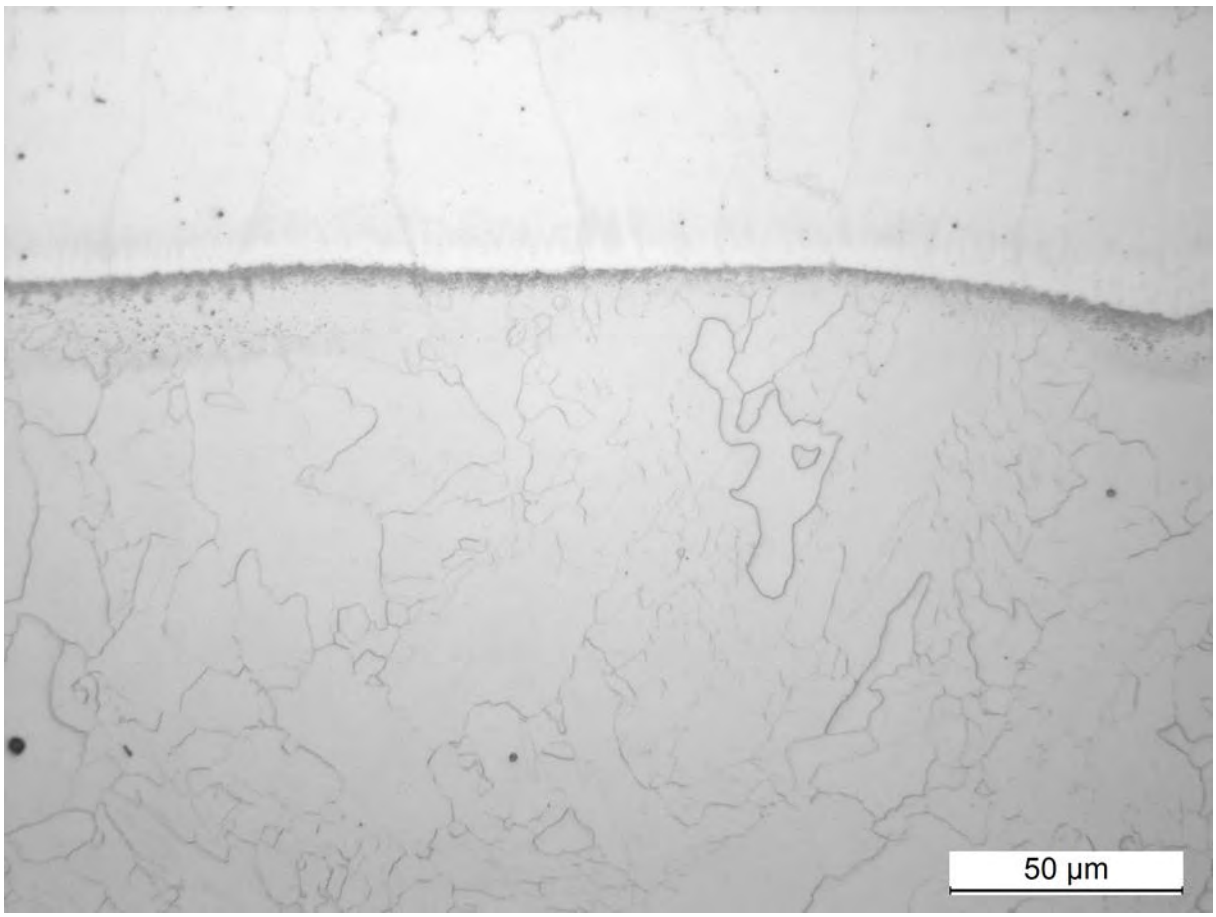
Kuva 5. San28 - T22 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100 h.



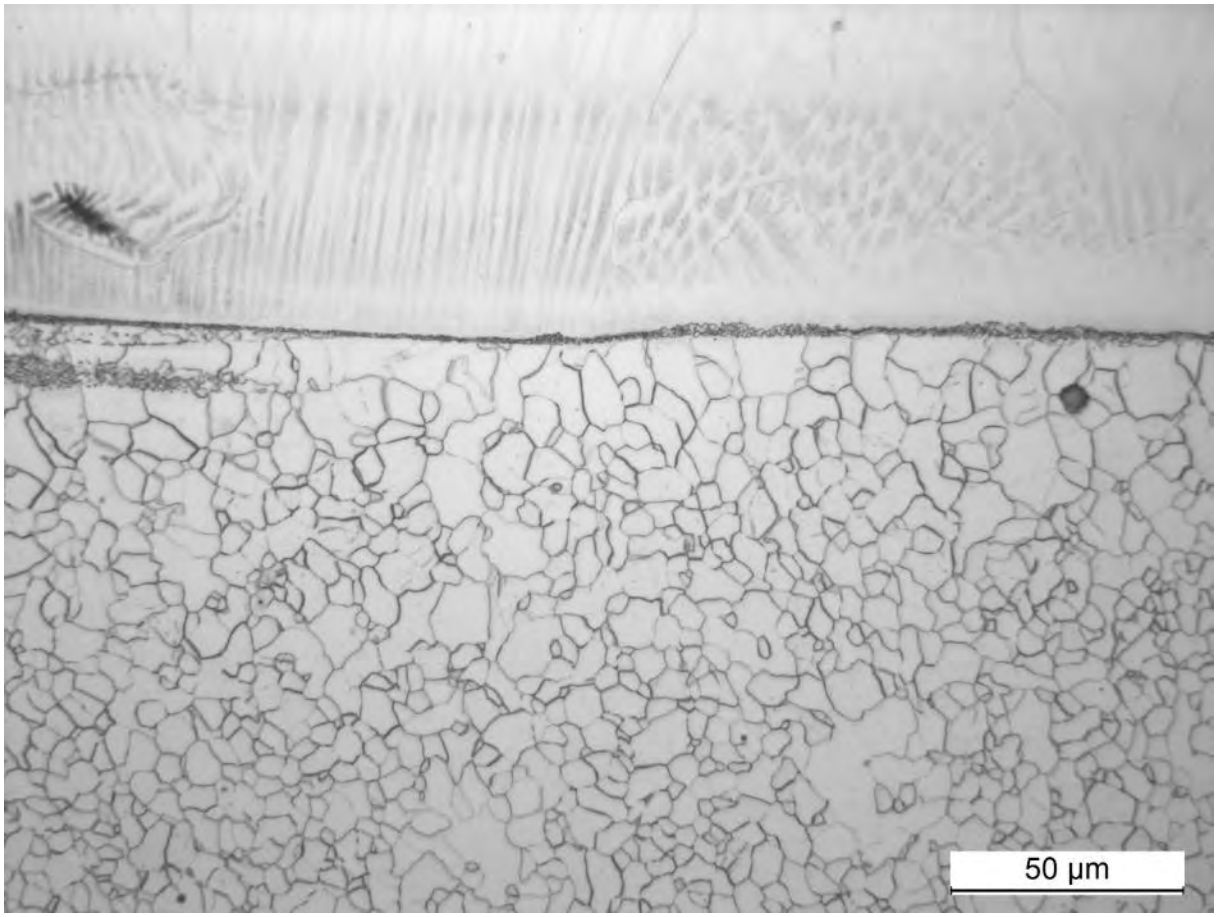
Kuva 6. San38 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100 h.



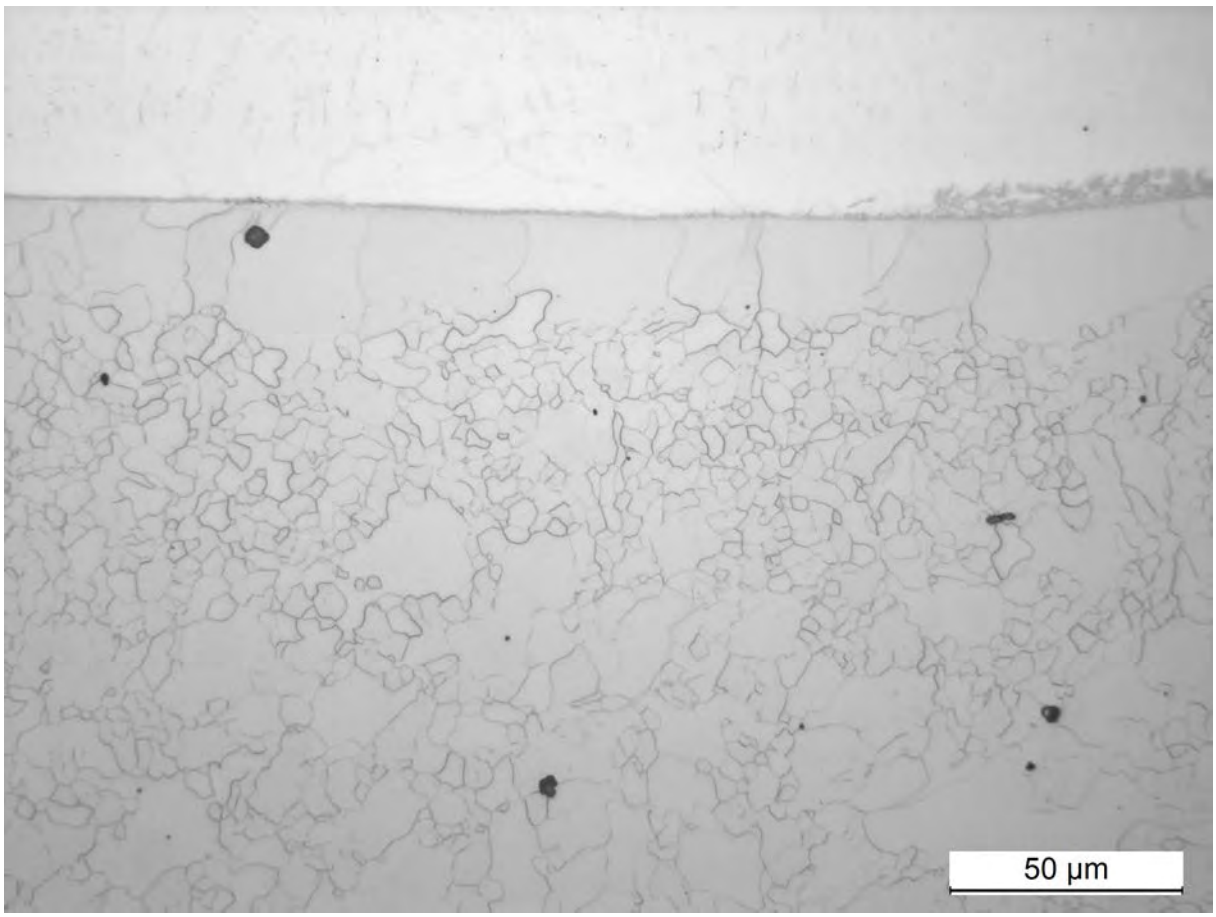
Kuva 7. 309 AZZ rajapinta, toimitustila.



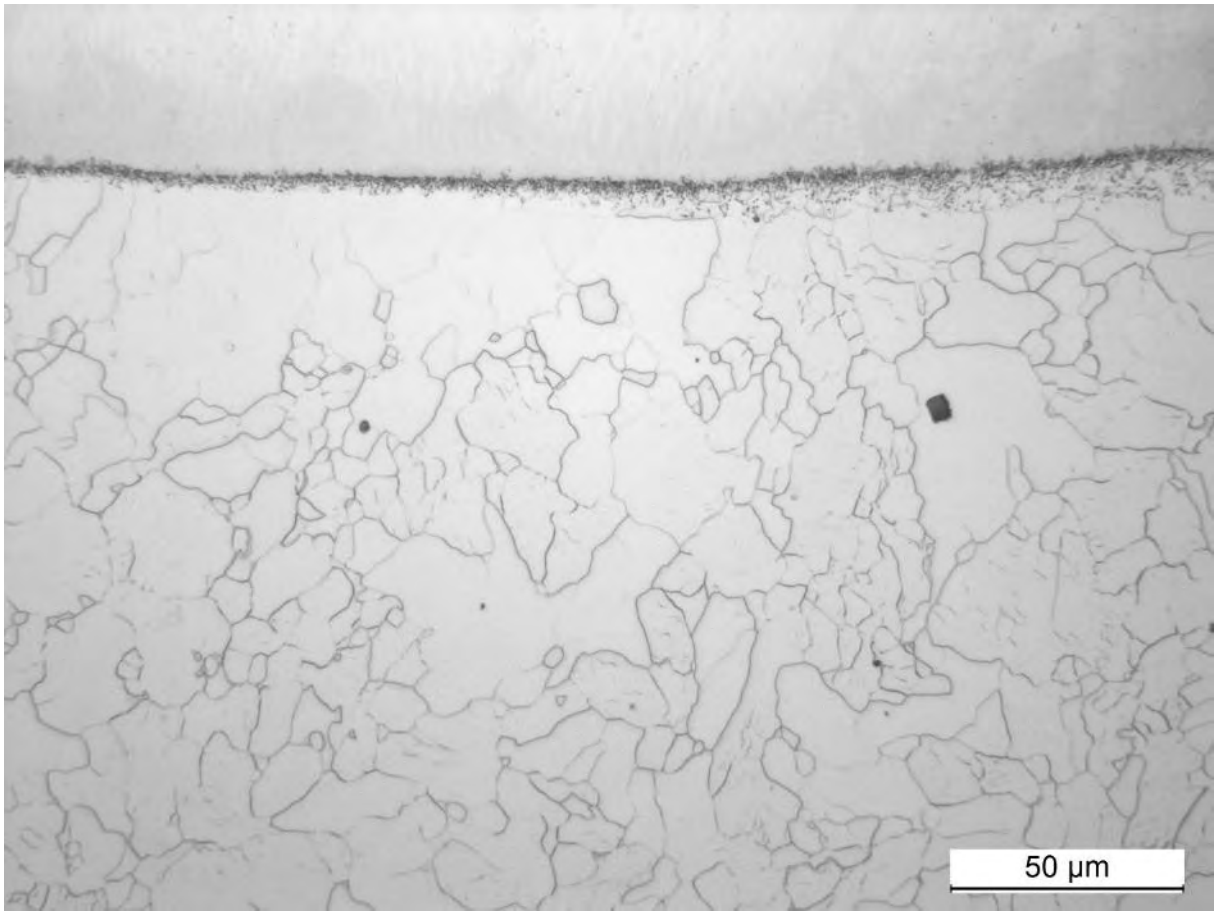
Kuva 8. 309 AZZ, 600°C, 100 h.



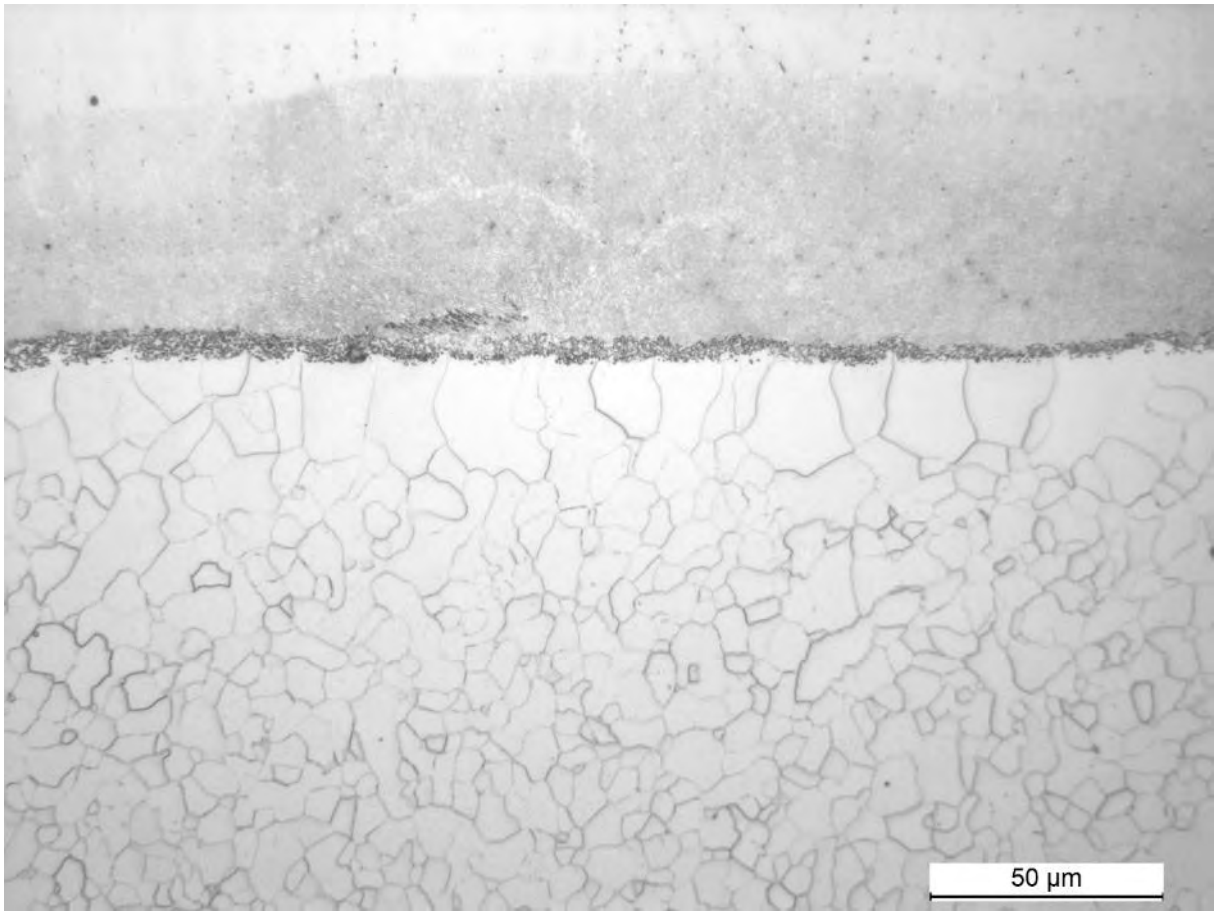
Kuva 9. 309 AZZ, 600°C, 1000 h.



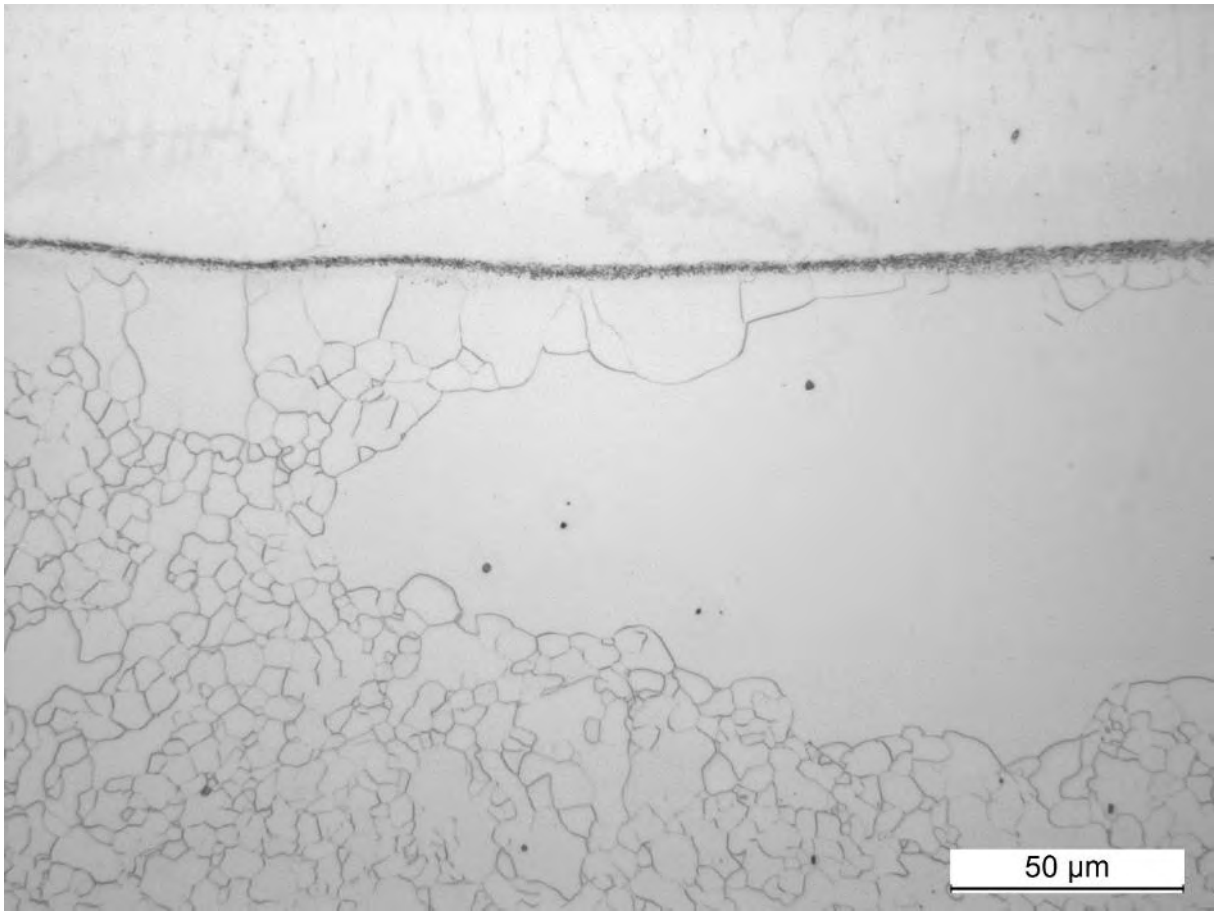
Kuva 10. 309 AZZ, 650°C, 10 h.



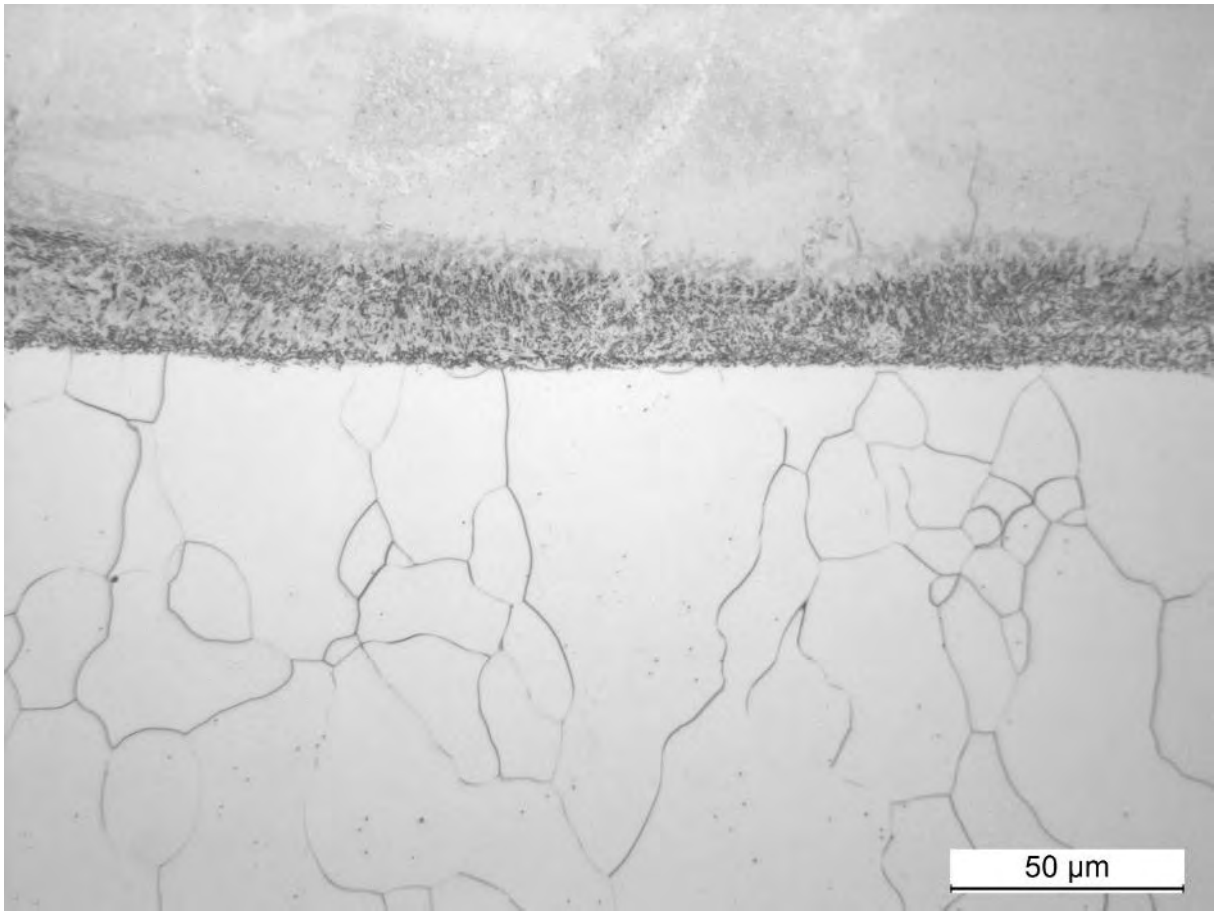
Kuva 11. 309 AZZ, 650°C, 100 h.



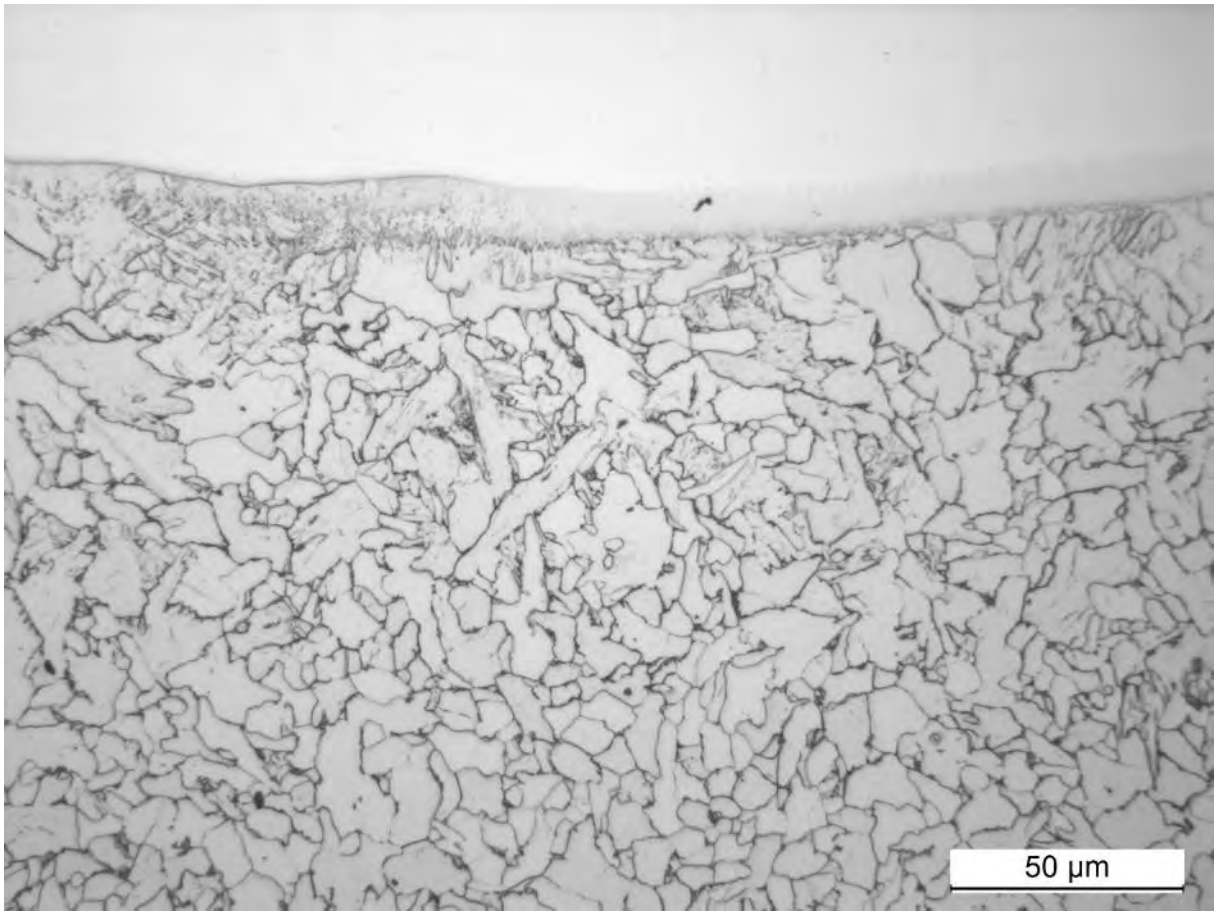
Kuva 12. 309 AZZ, 650°C, 1000 h.



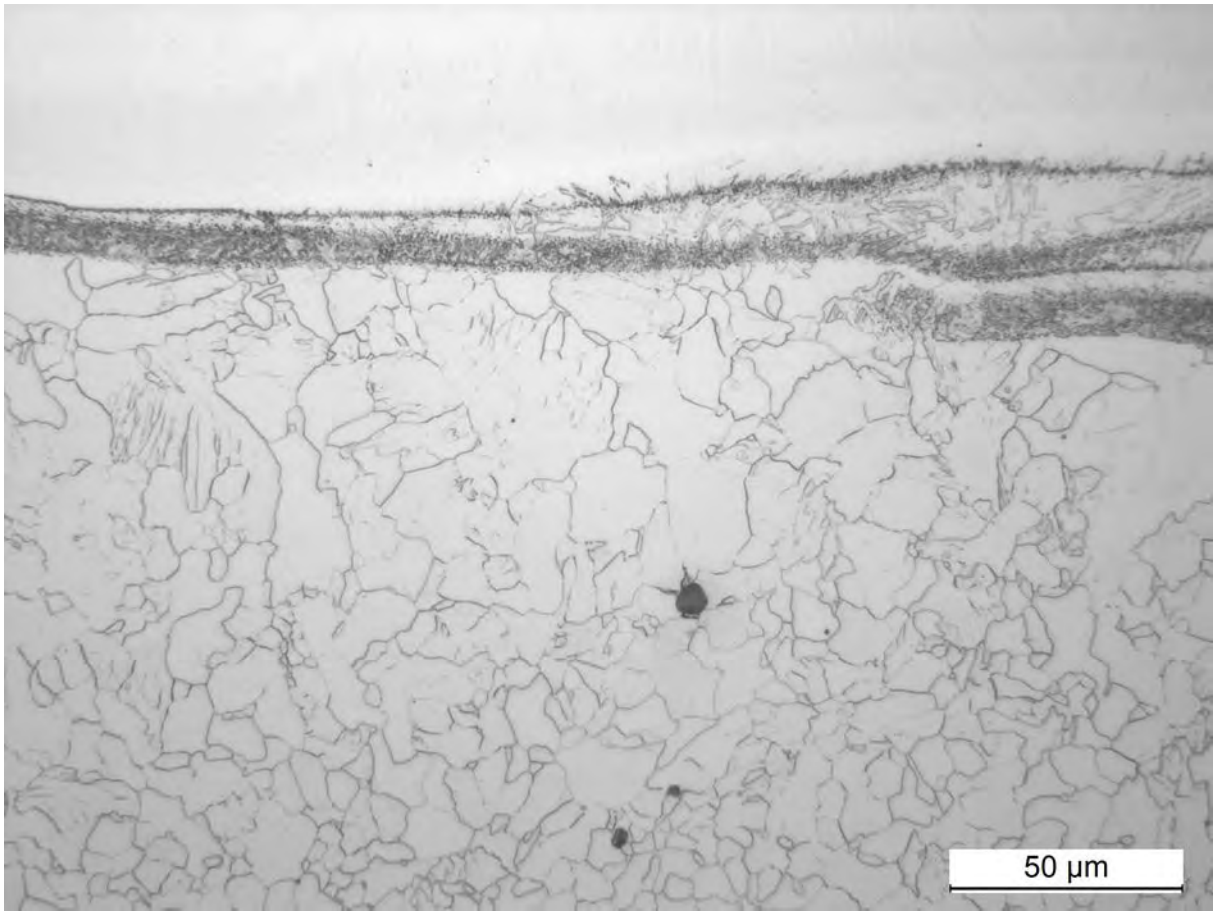
Kuva 13. 309 AZZ, 700°C, 10 h.



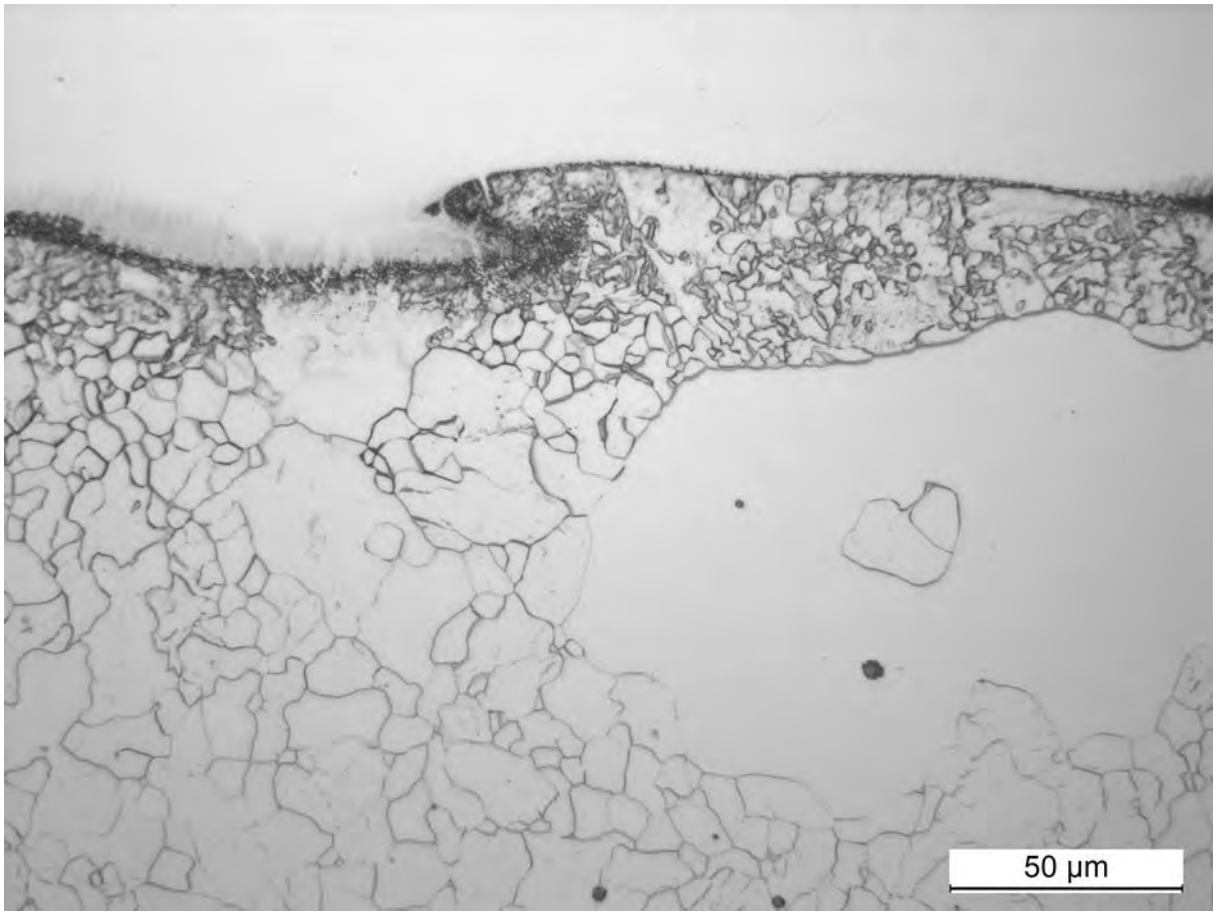
Kuva 14. 309 AZZ, 700°C, 100 h.



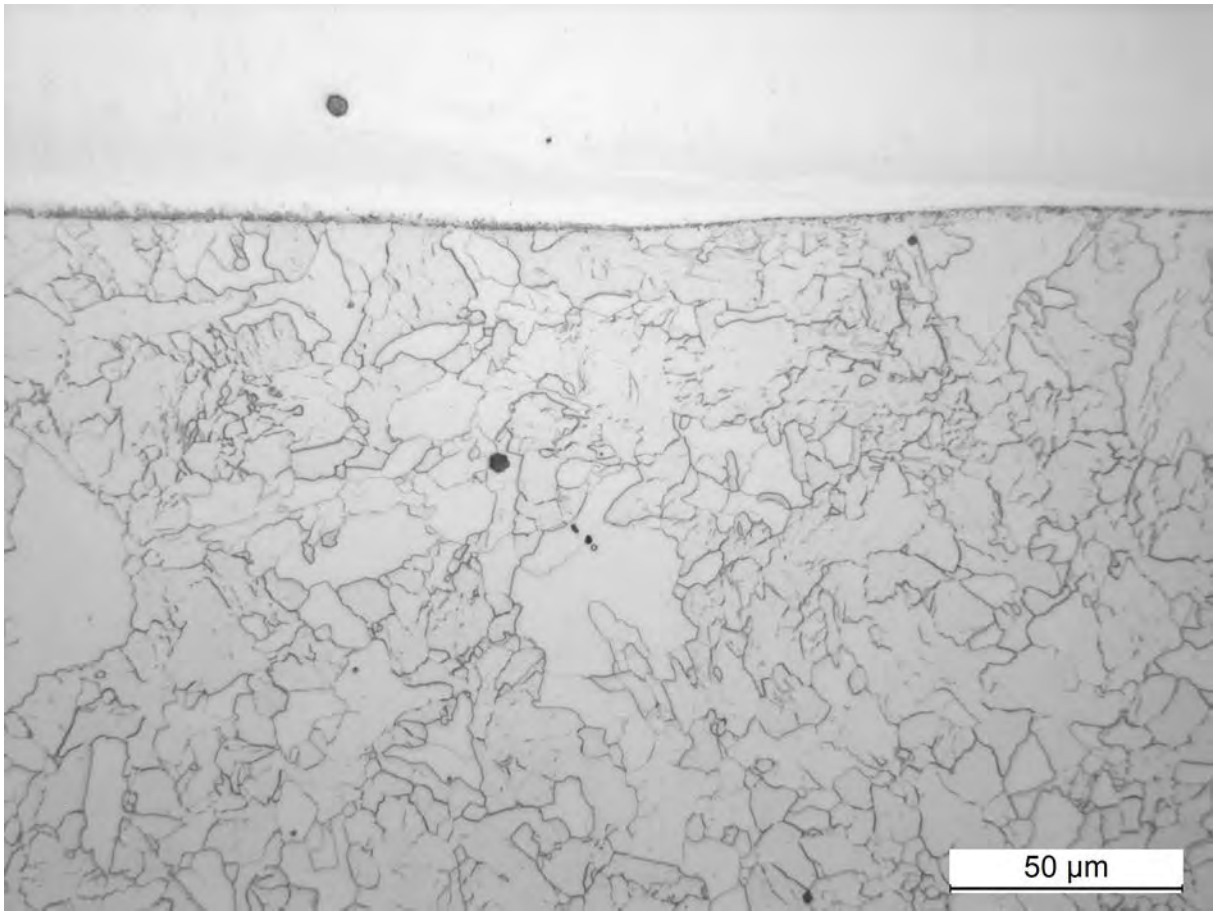
Kuva 15. IN625 AZZ rajapinta, toimitustila.



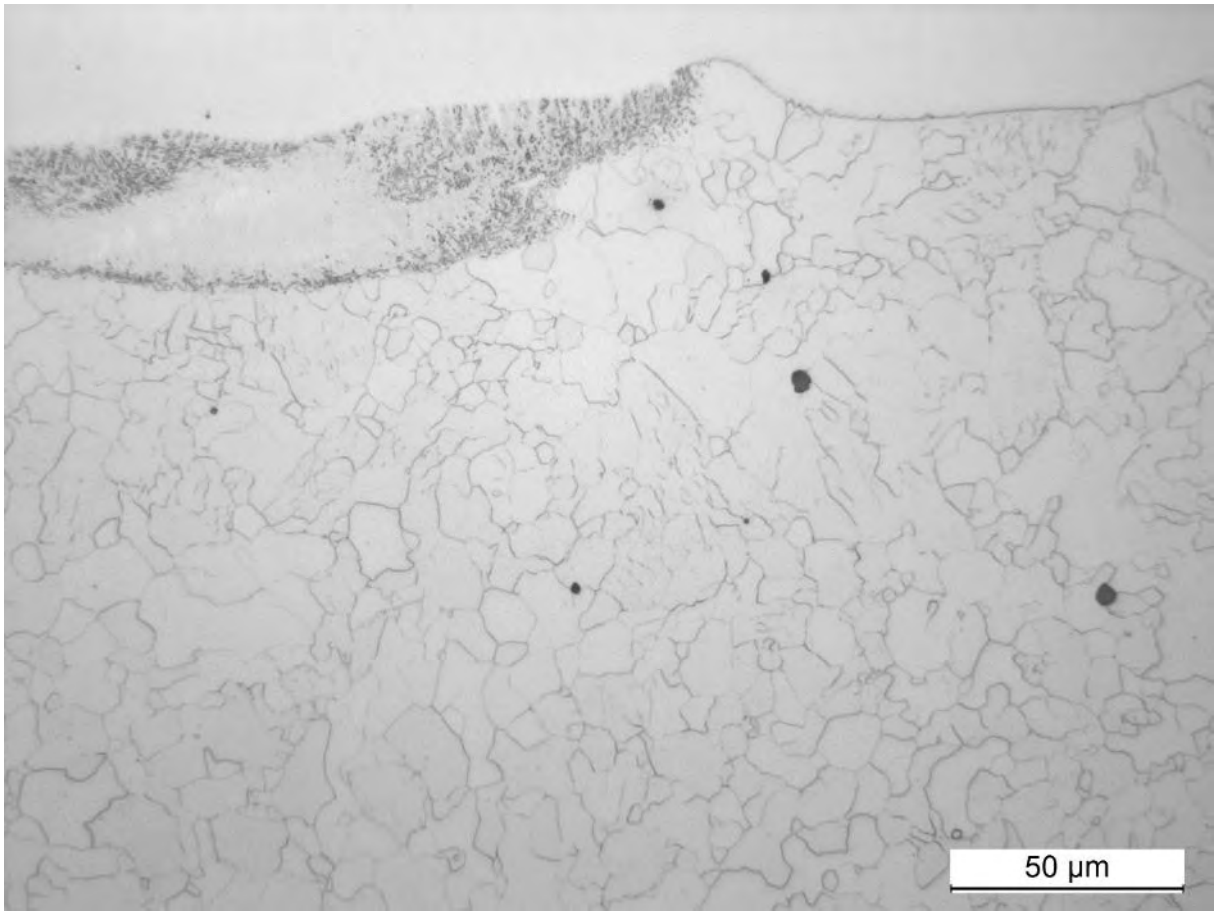
Kuva 16. IN625 AZZ rajapinta, 600°C, 100 h.



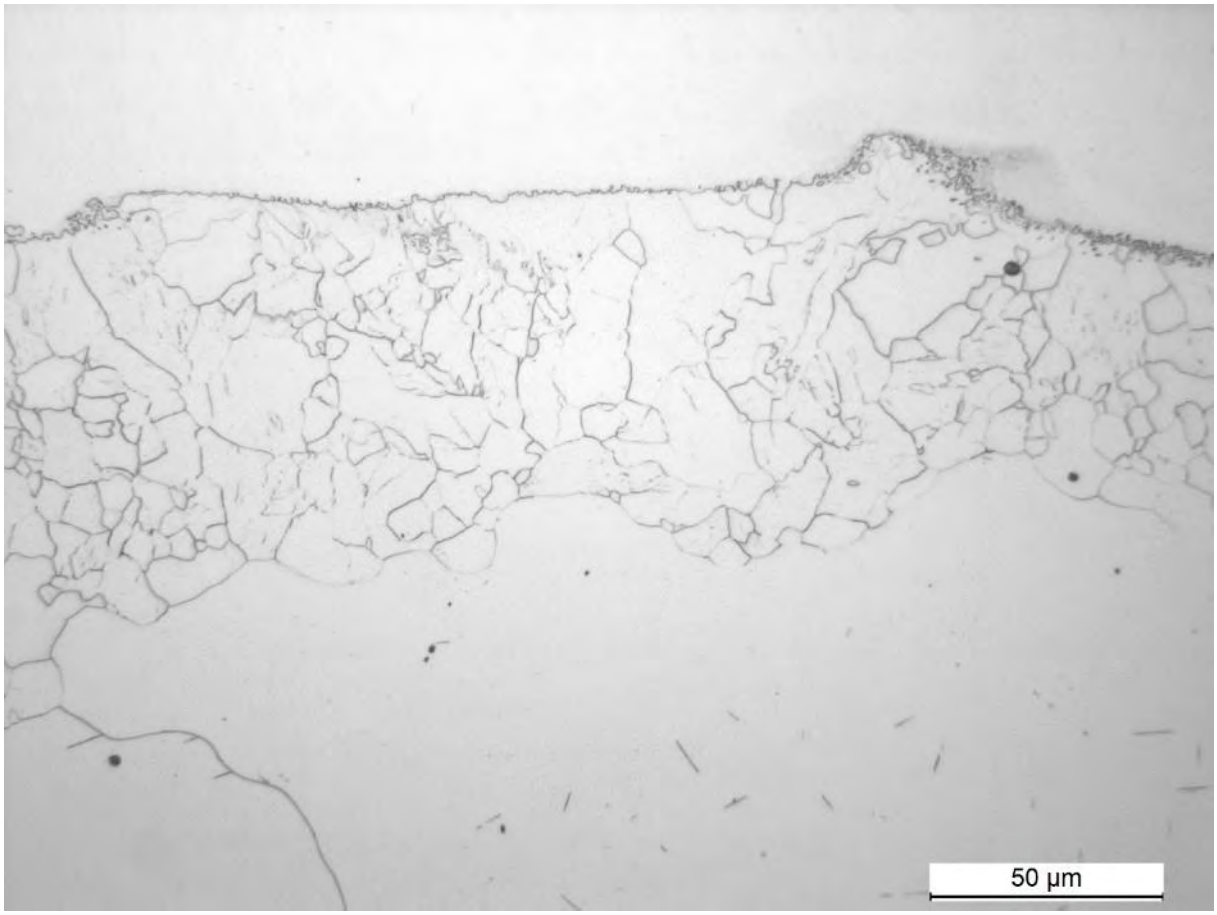
Kuva 17. IN625 AZZ rajapinta, 600°C, 1000 h.



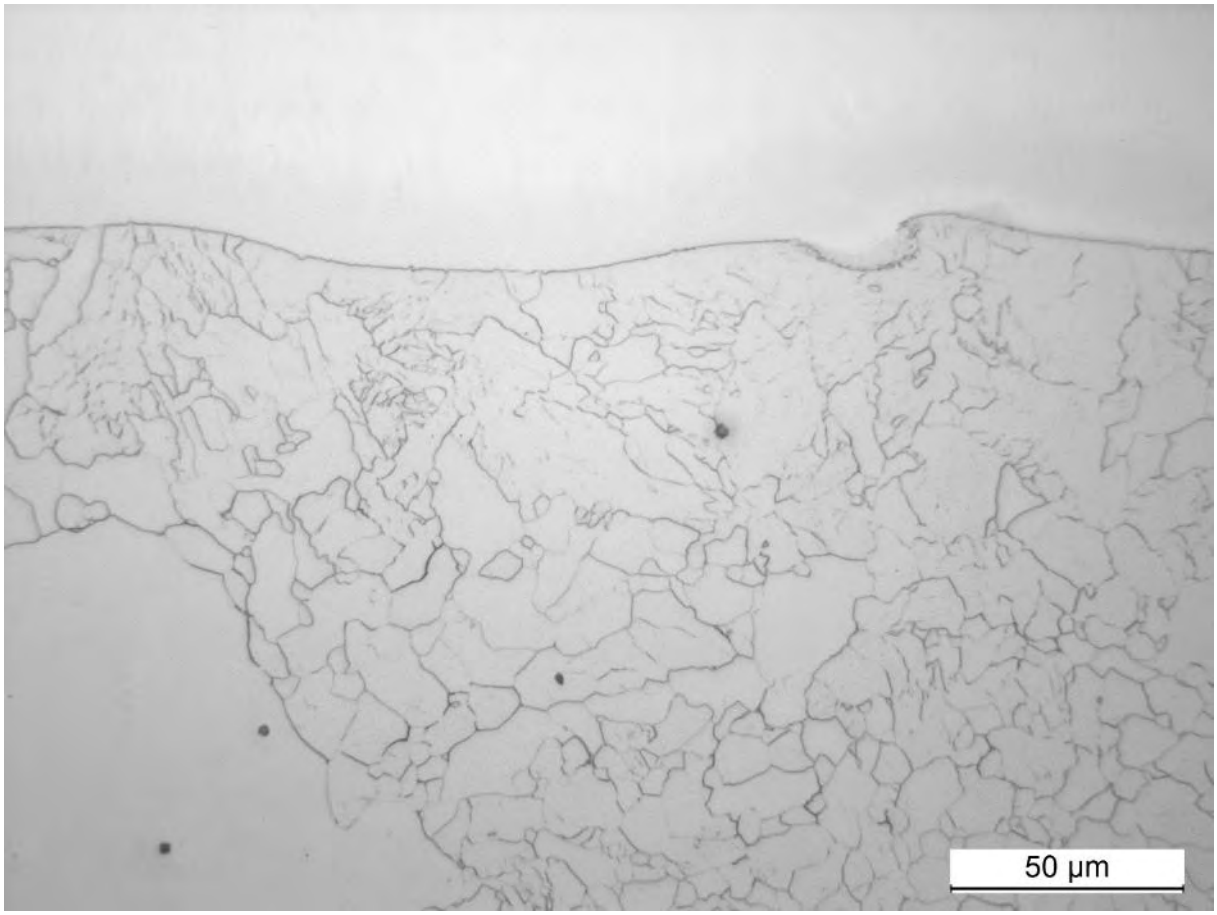
Kuva 18. IN625 AZZ, 650°C, 10 h.



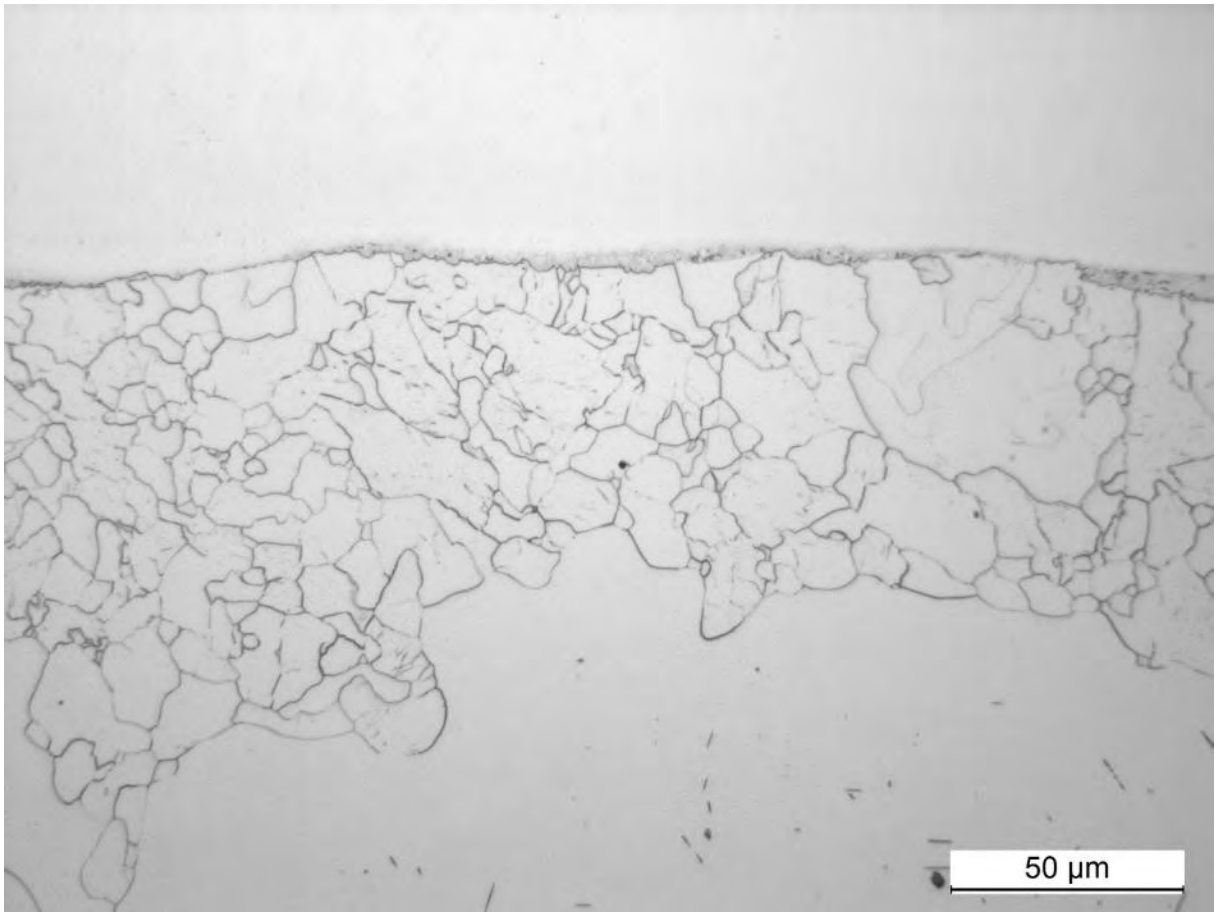
Kuva 19. IN625 AZZ, 650°C, 100 h.



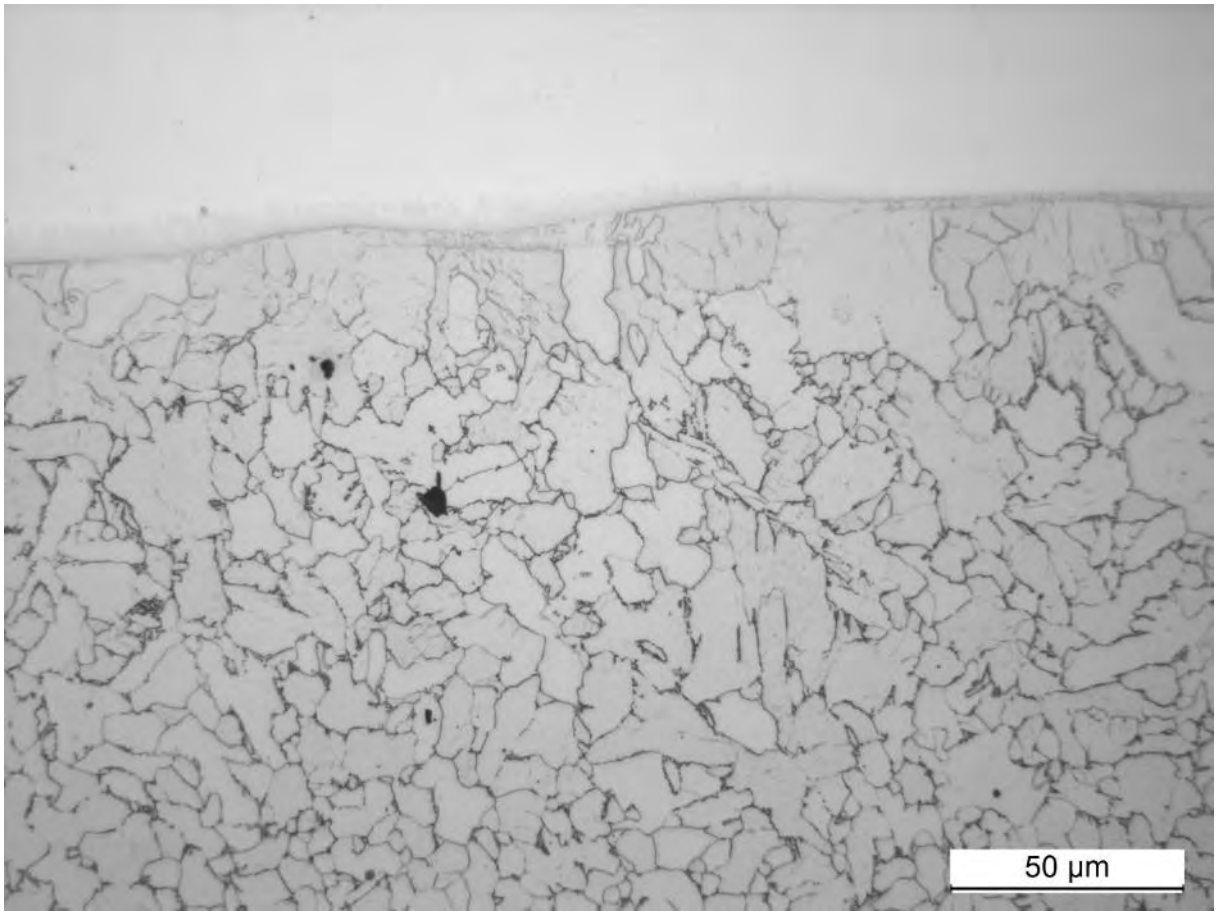
Kuva 20. IN625 AZZ, 650°C, 1000 h.



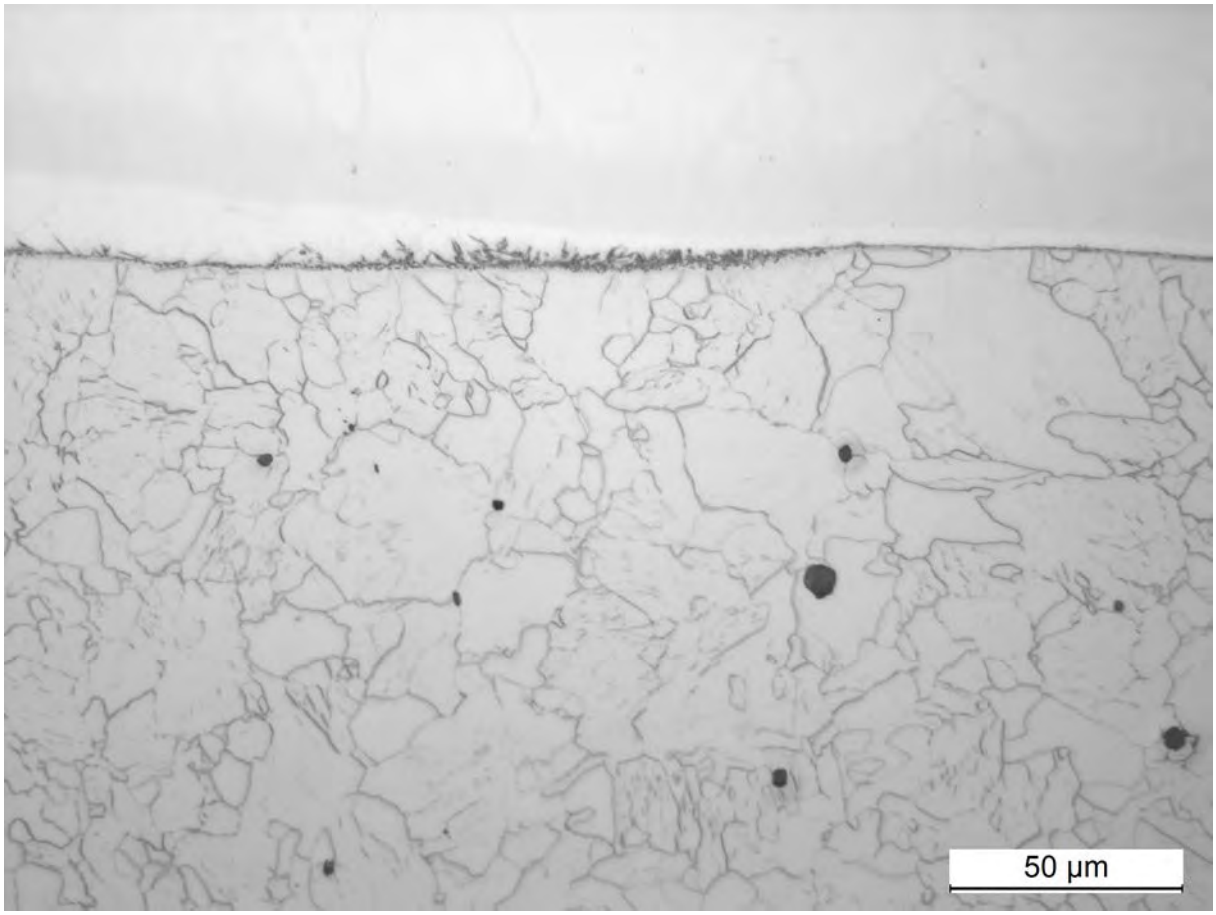
Kuva 21. IN625 AZZ, 700°C, 10 h.



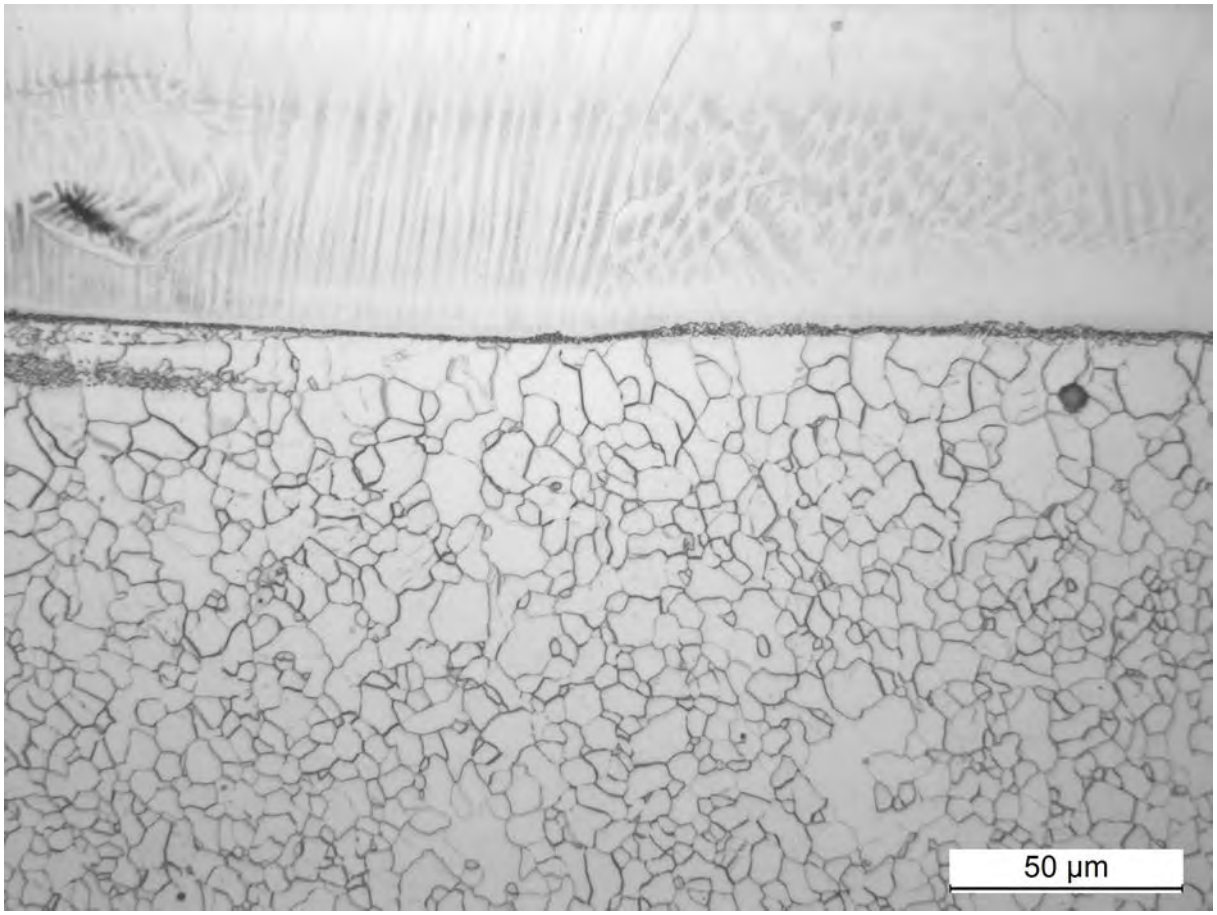
Kuva 22. IN625 AZZ, 700°C, 100 h.



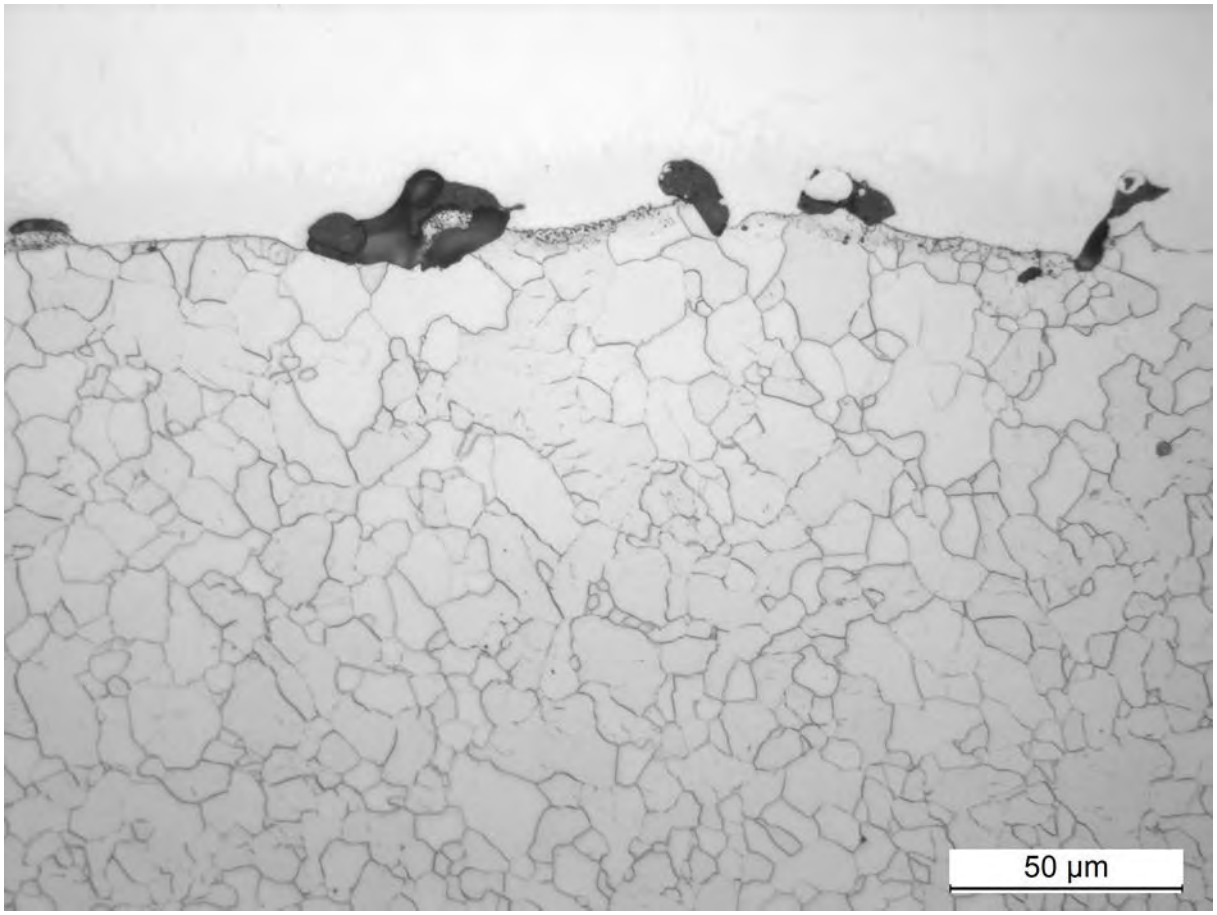
Kuva 23. IN825 AZZ rajapinta, toimitustila.



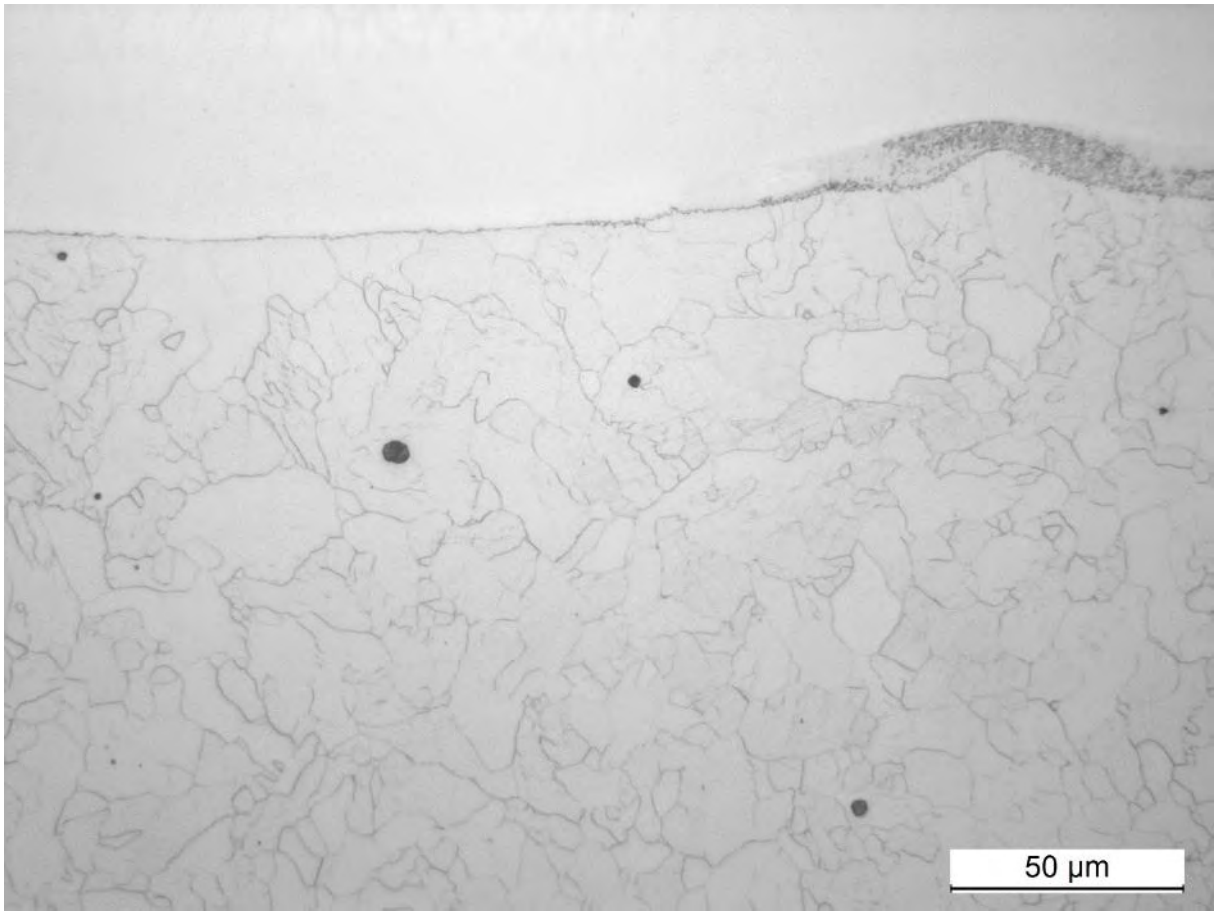
Kuva 24. IN825 AZZ rajapinta, 600°C, 100 h.



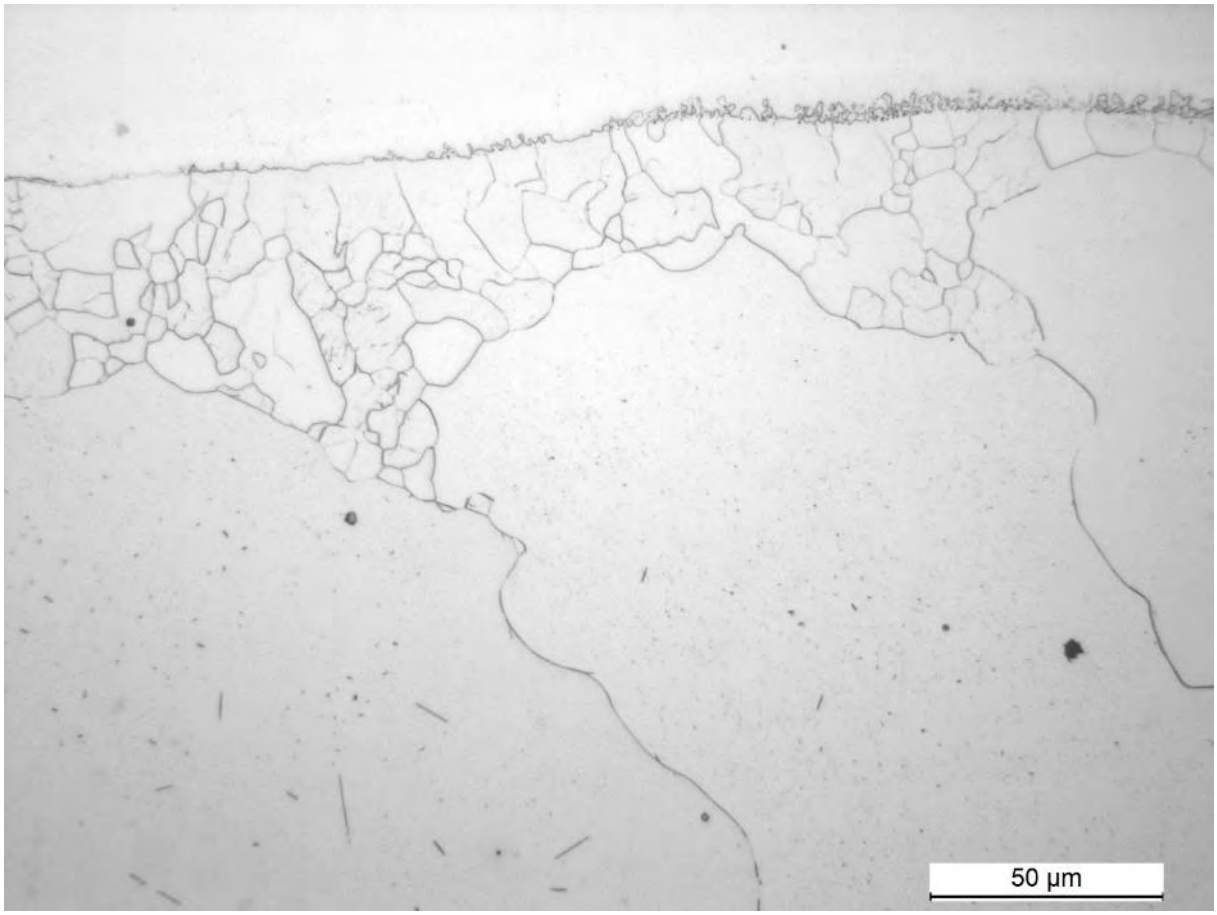
Kuva 25. IN825 AZZ rajapinta, 600°C, 1000 h.



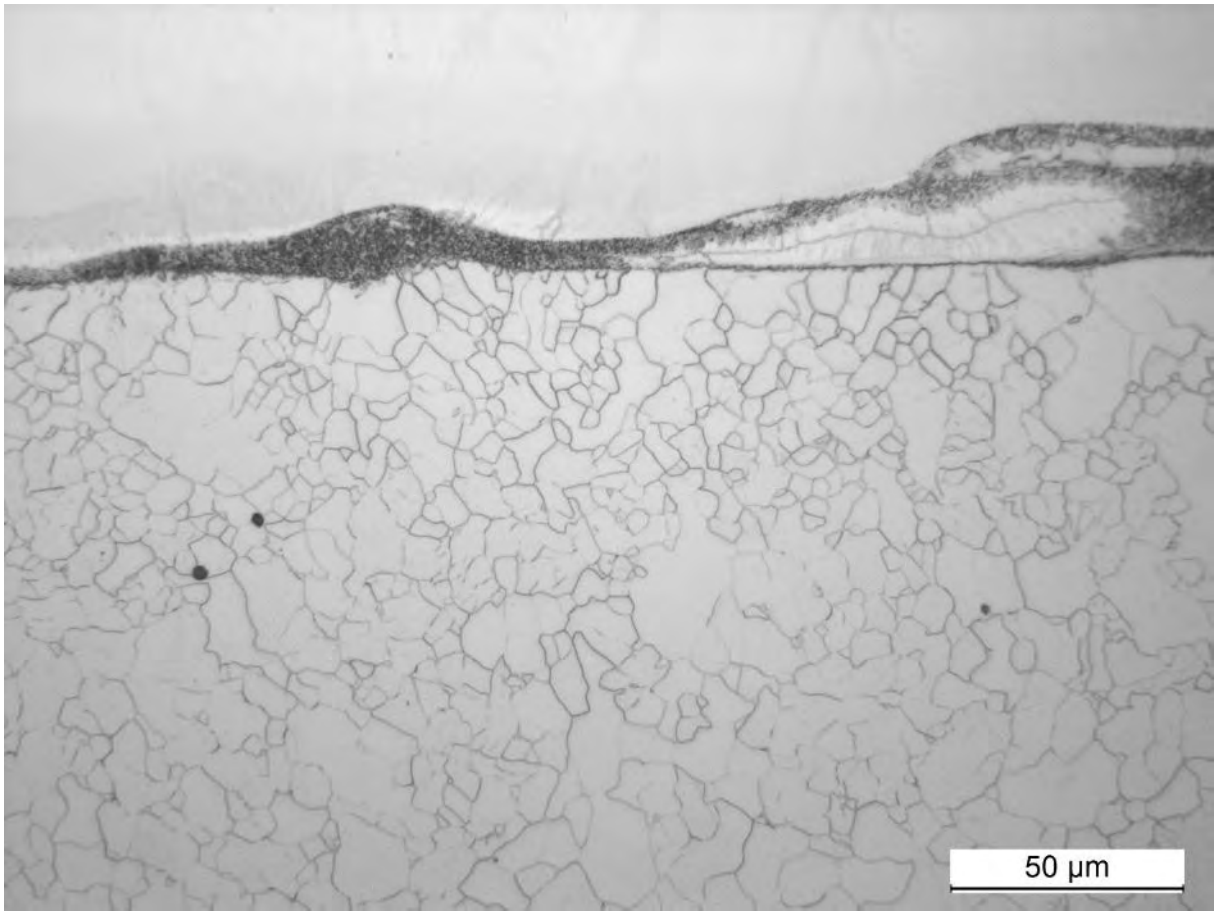
Kuva 26. IN825 AZZ, 650°C, 10 h.



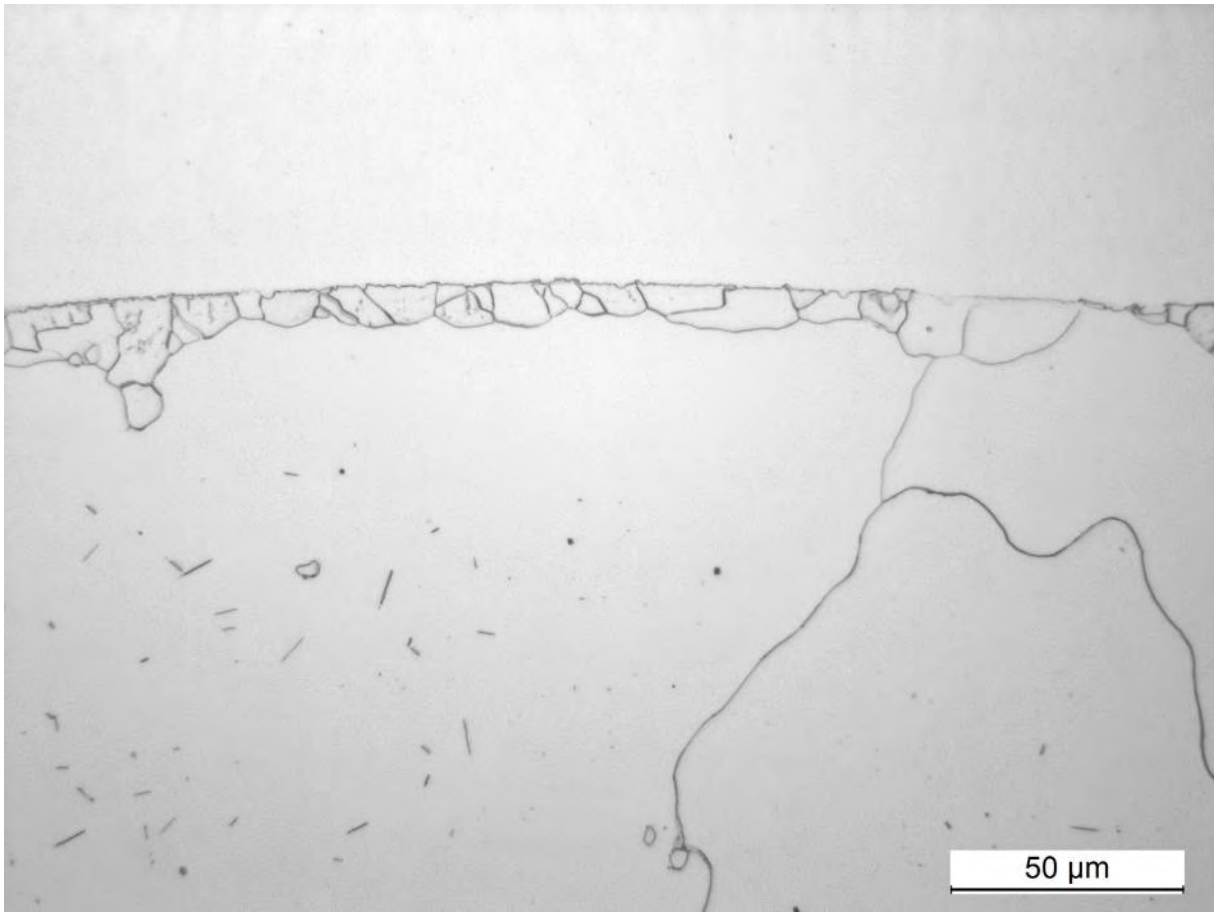
Kuva 27. IN825 AZZ, 650°C, 100 h.



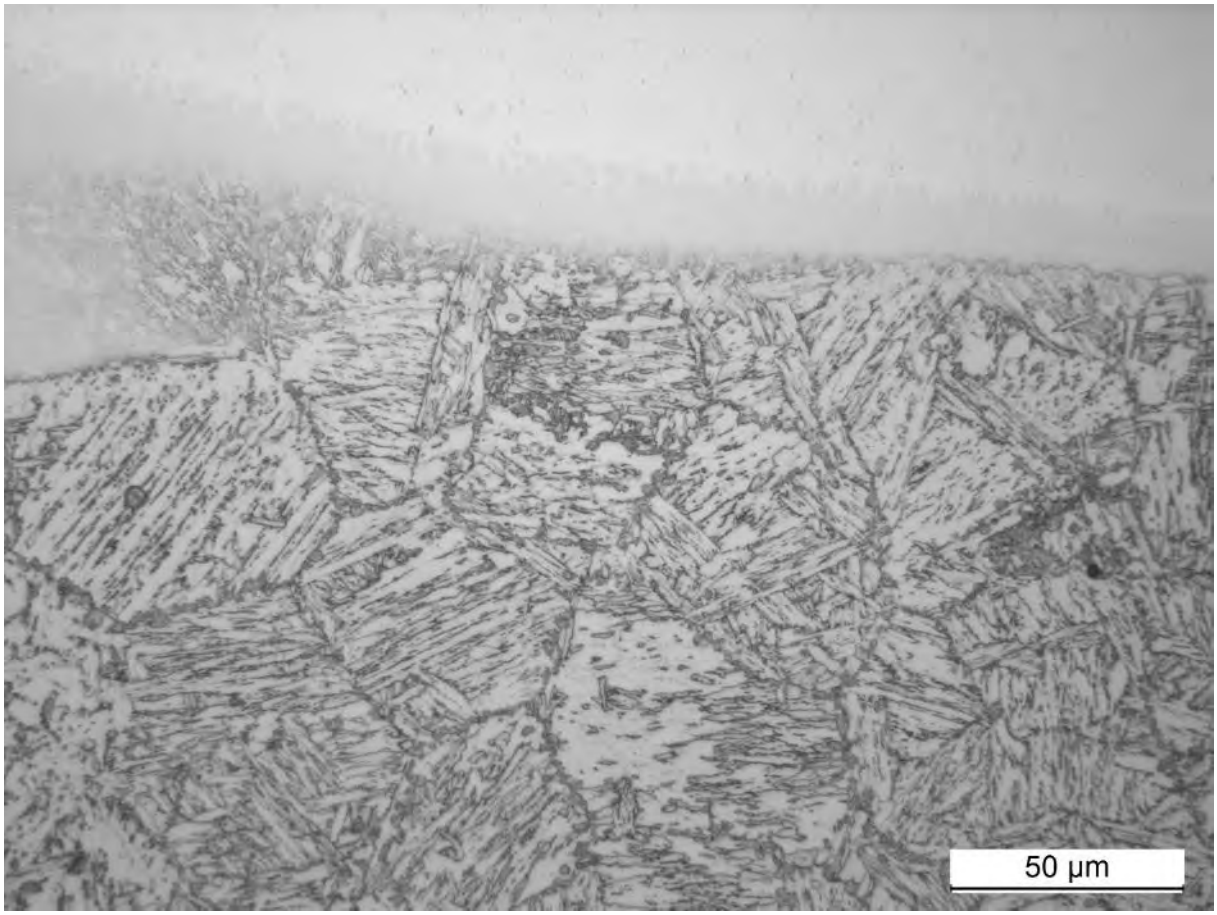
Kuva 28. IN825 AZZ, 650°C, 1000 h.



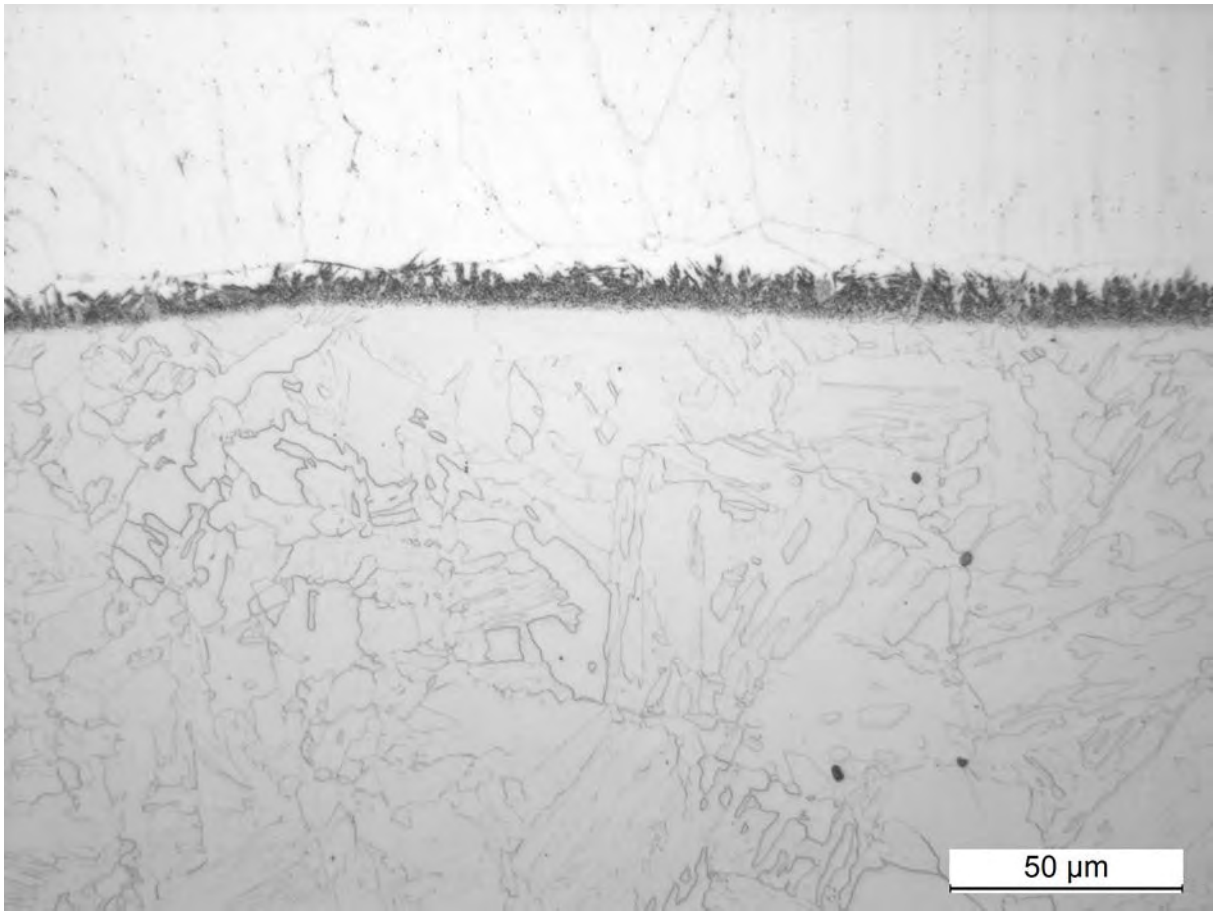
Kuva 29. IN825 AZZ, 700°C, 10 h.



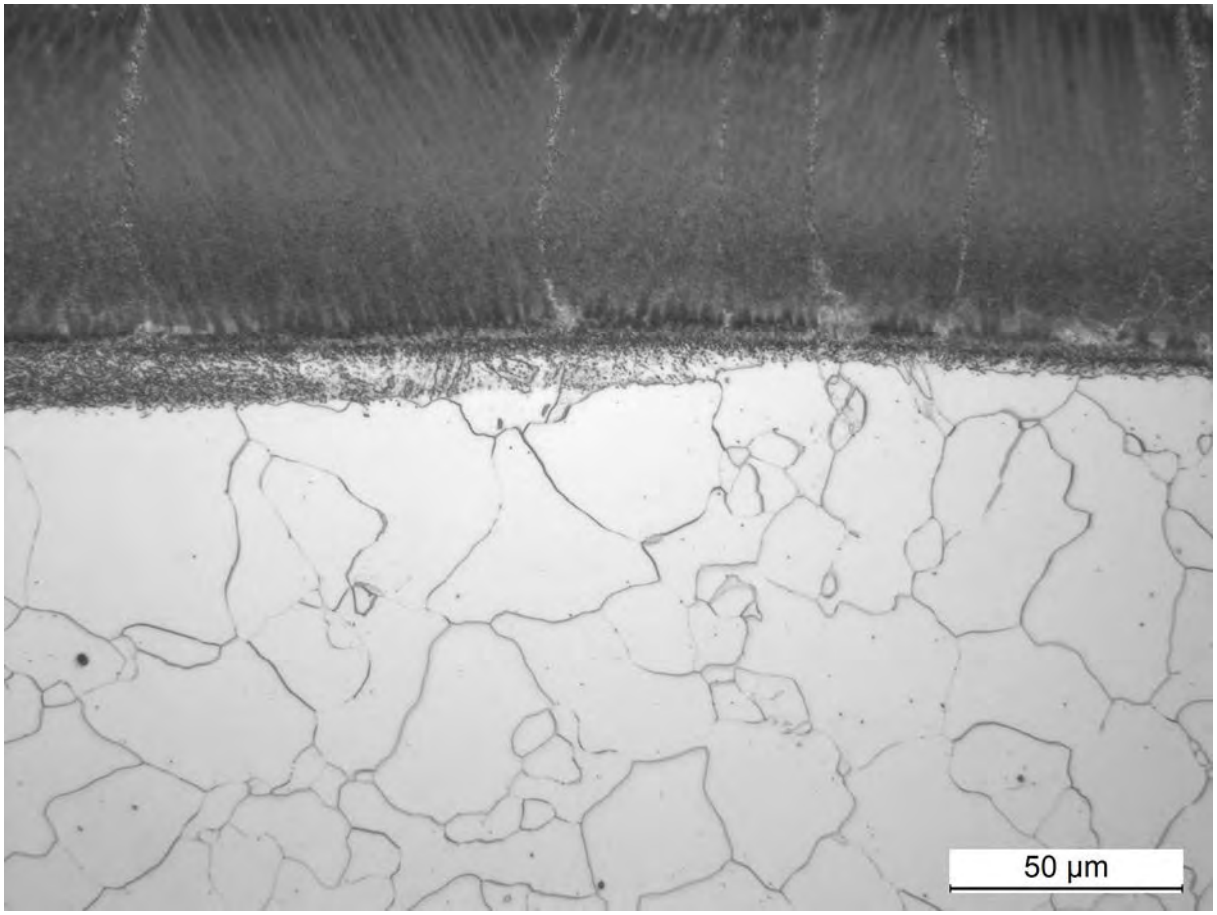
Kuva 30. IN825 AZZ, 700°C, 100 h.



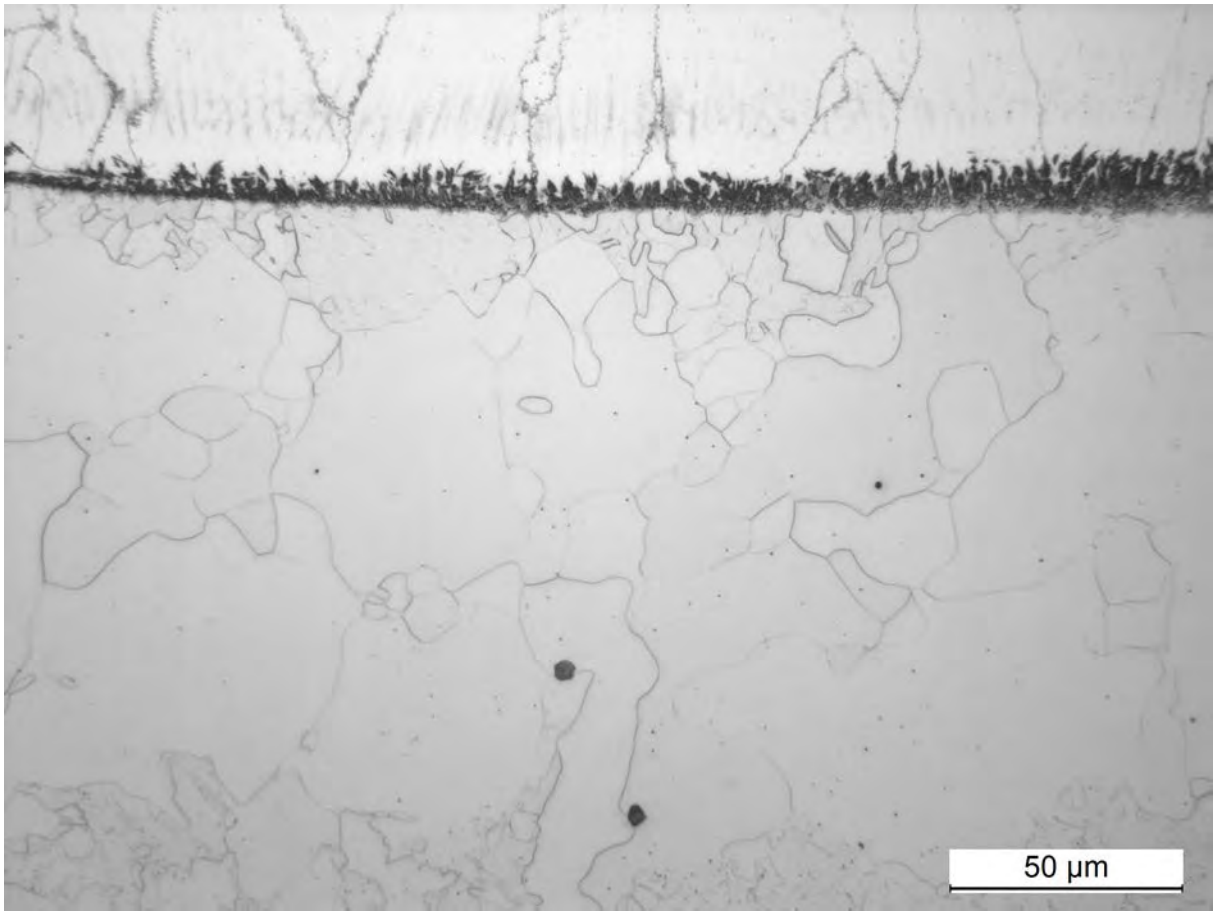
Kuva 31. 309 Uhlig, toimitustila.



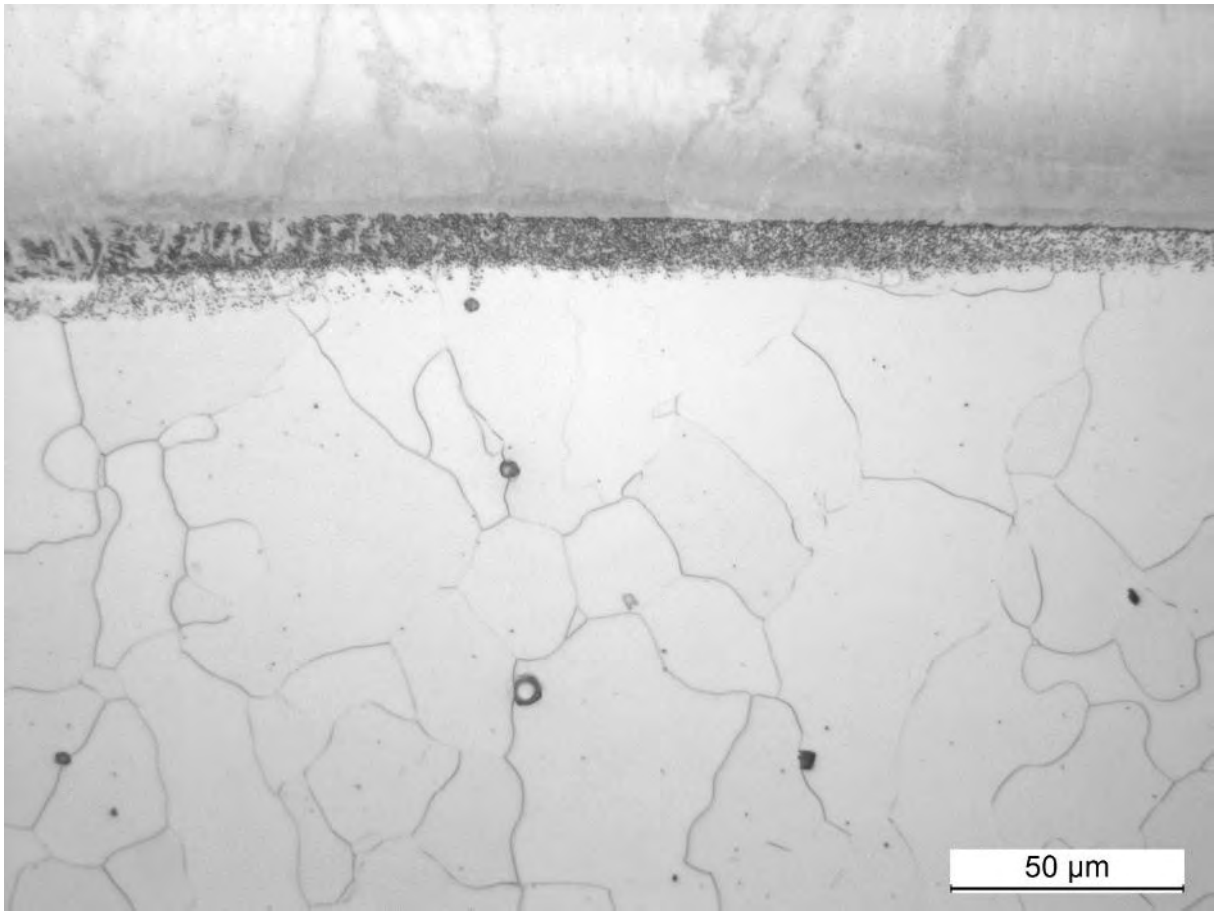
Kuva 32. 309 Uhlig, 600°C, 100 h.



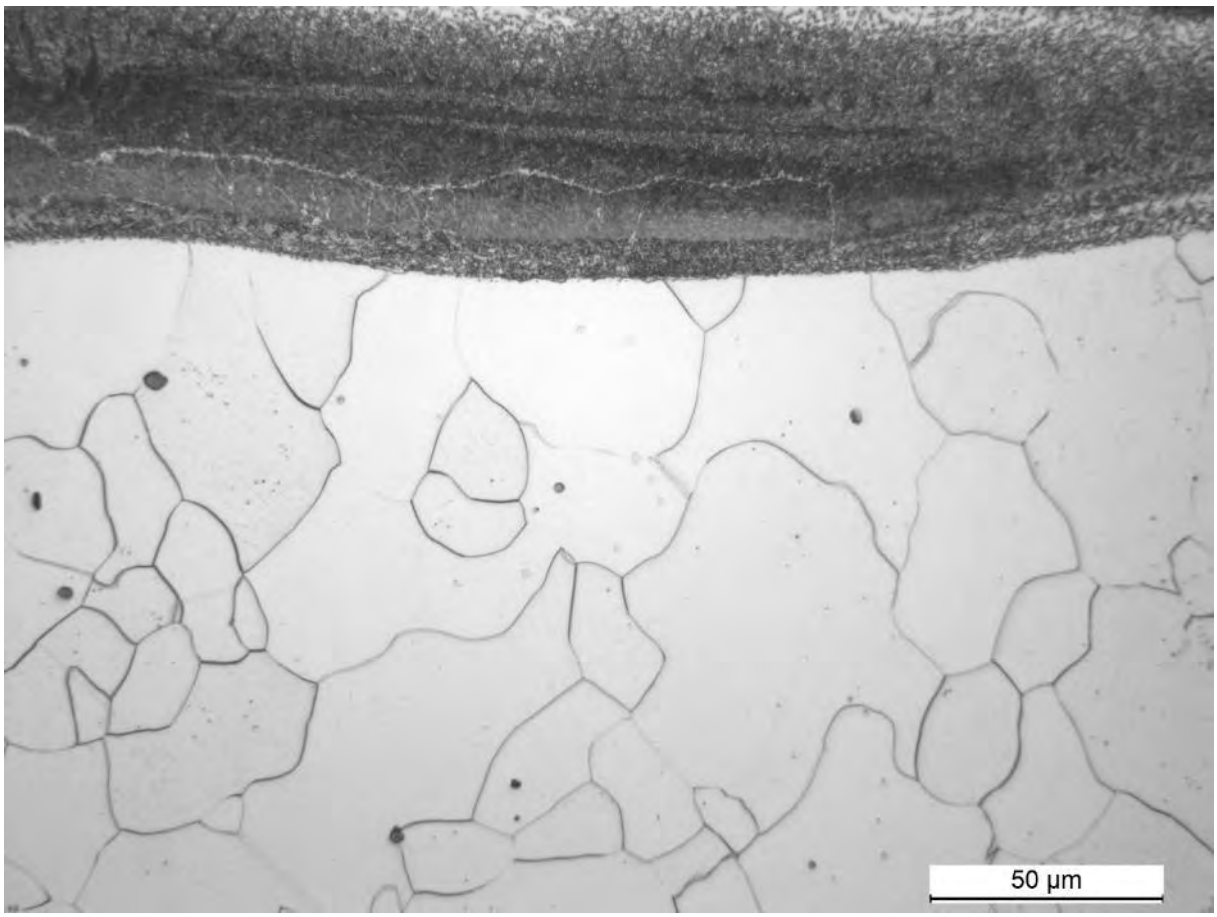
Kuva 33. 309 Uhlig, 600°C, 1000 h.



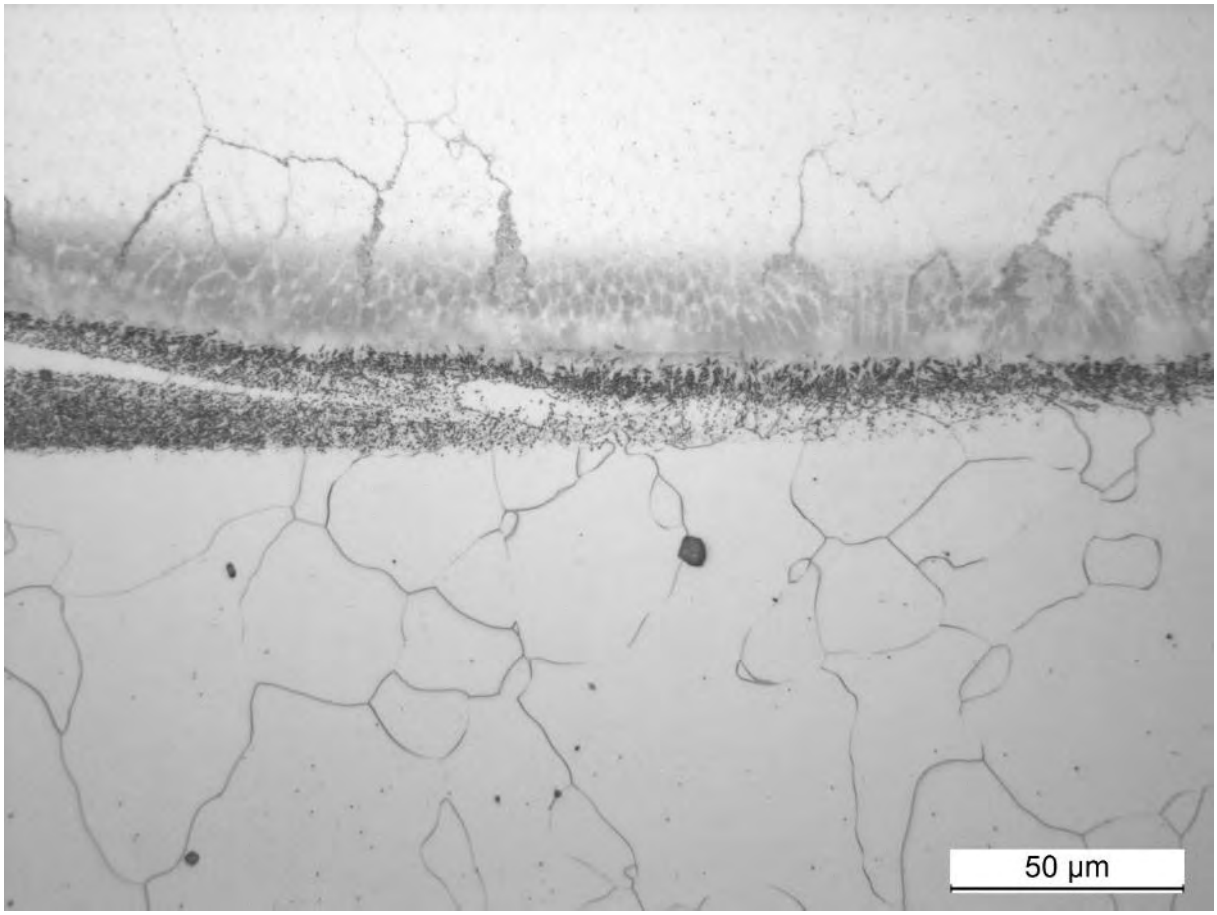
Kuva 34. 309 Uhlig, 650°C, 10 h.



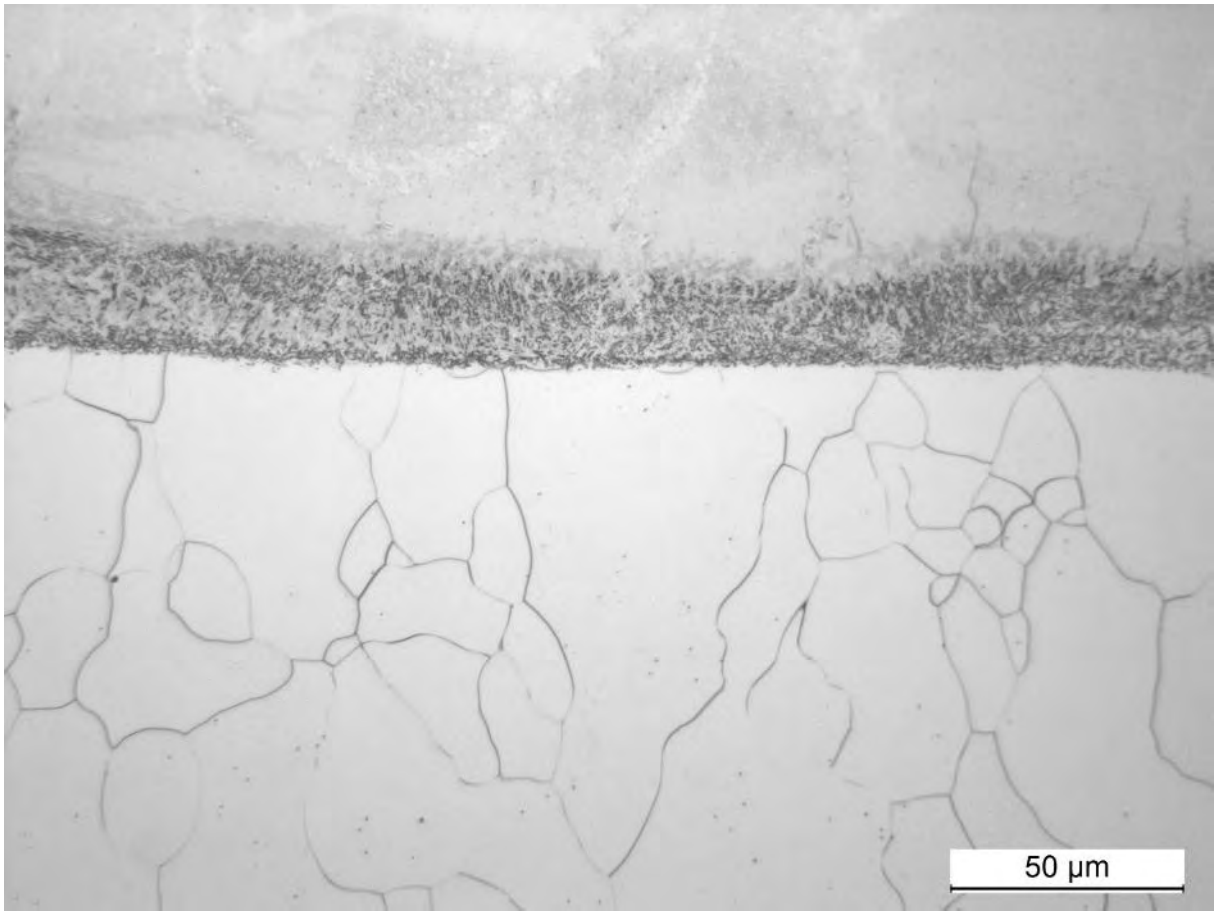
Kuva 35. 309 Uhlig, 650°C, 100 h.



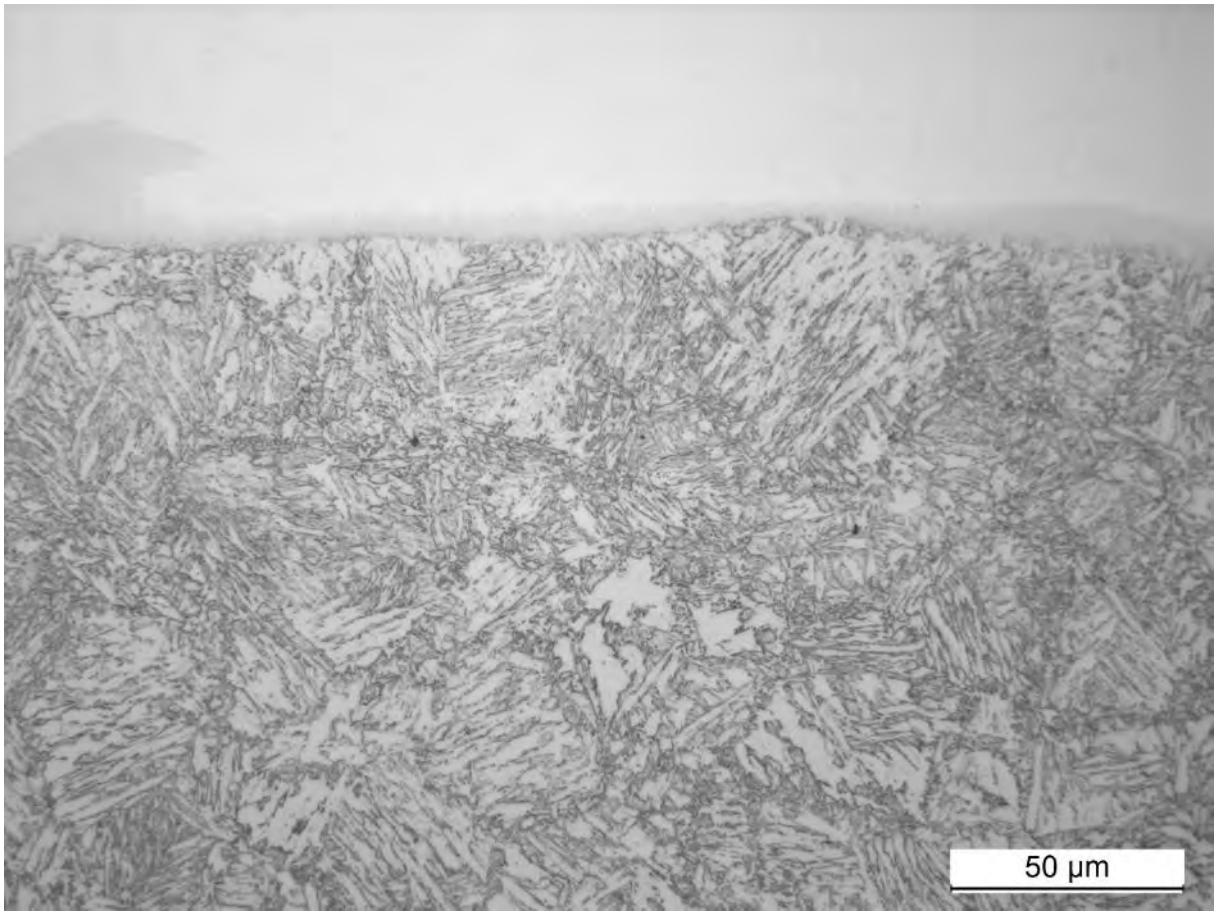
Kuva 36. 309 Uhlig, 650°C, 1000 h.



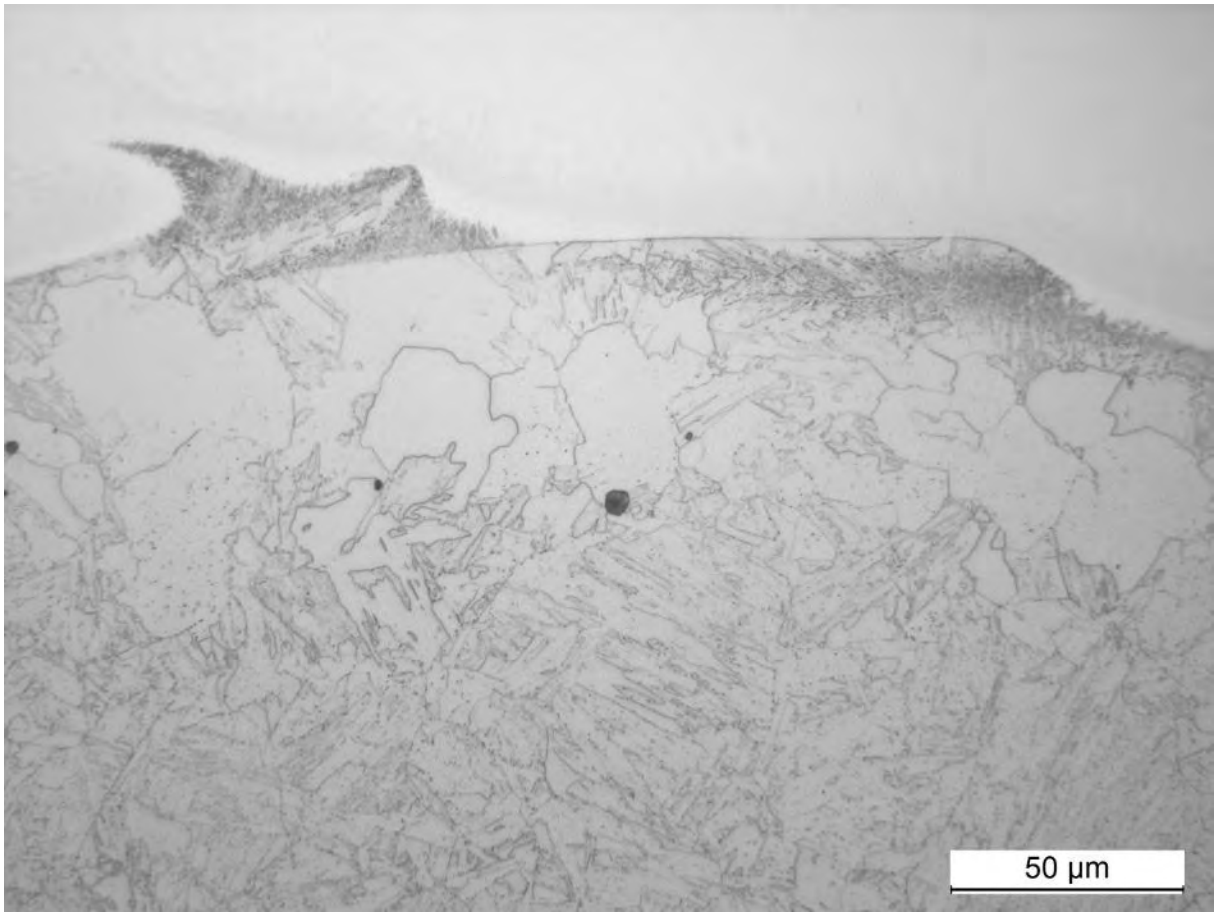
Kuva 37. 309 Uhlig, 700°C, 10 h.



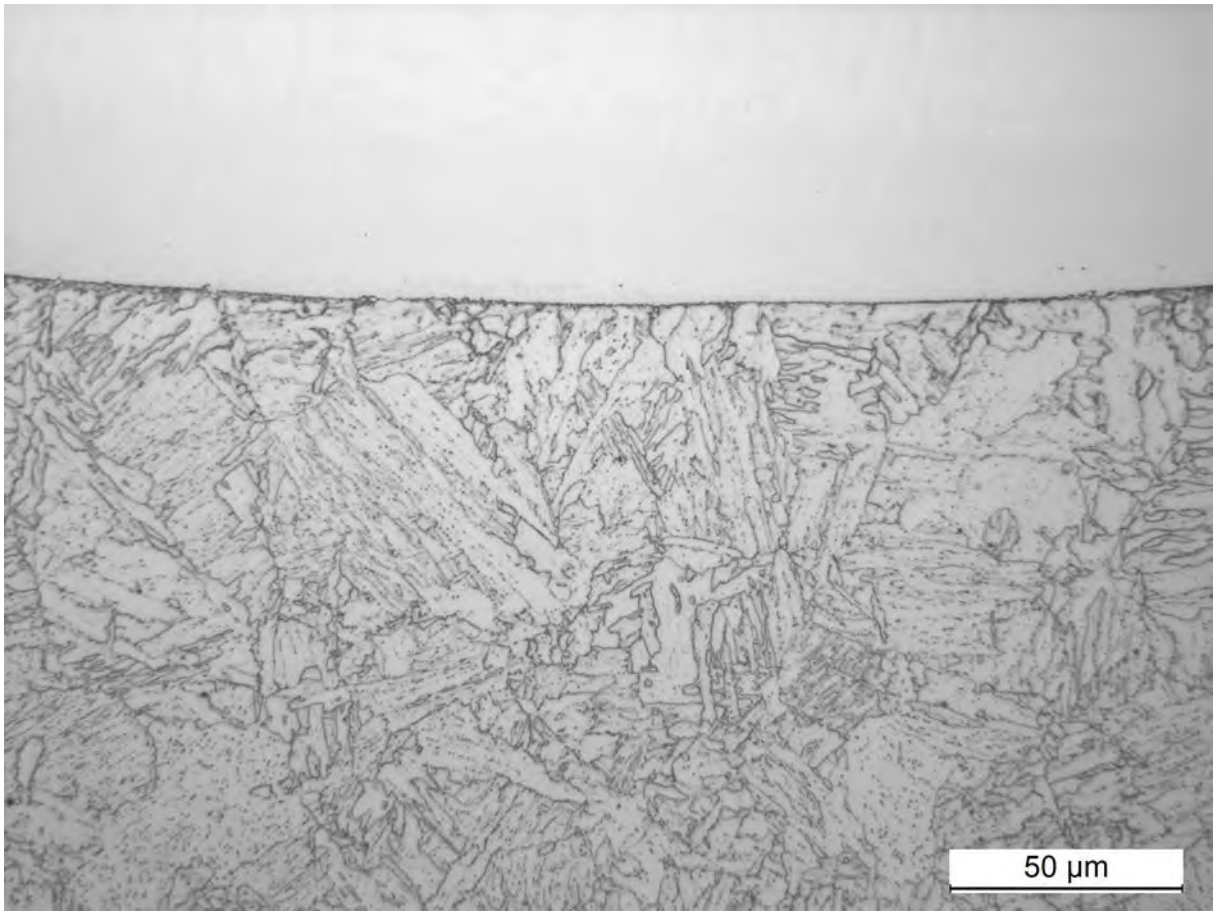
Kuva 38. 309 Uhlig, 700°C, 100 h.



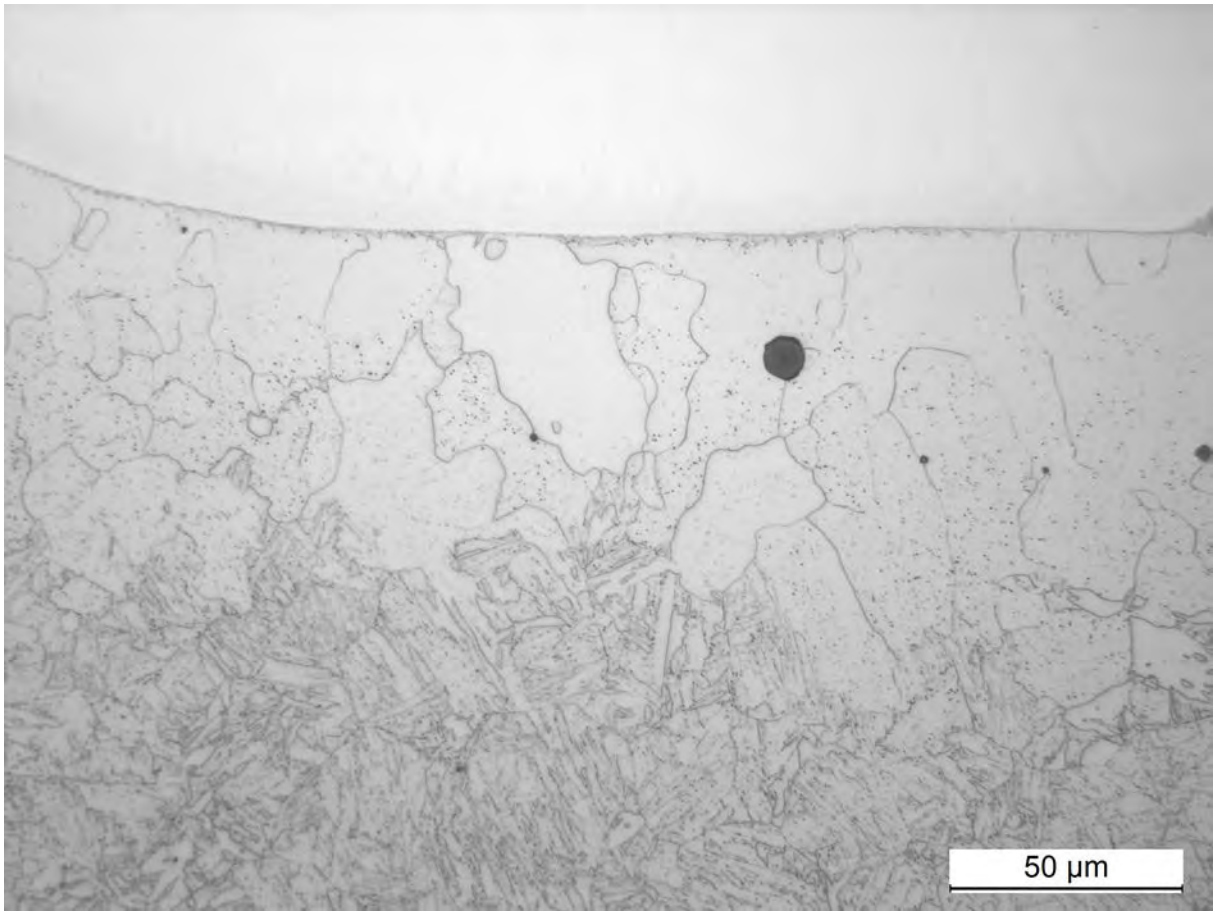
Kuva 39. IN625 Uhlig, toimitustila.



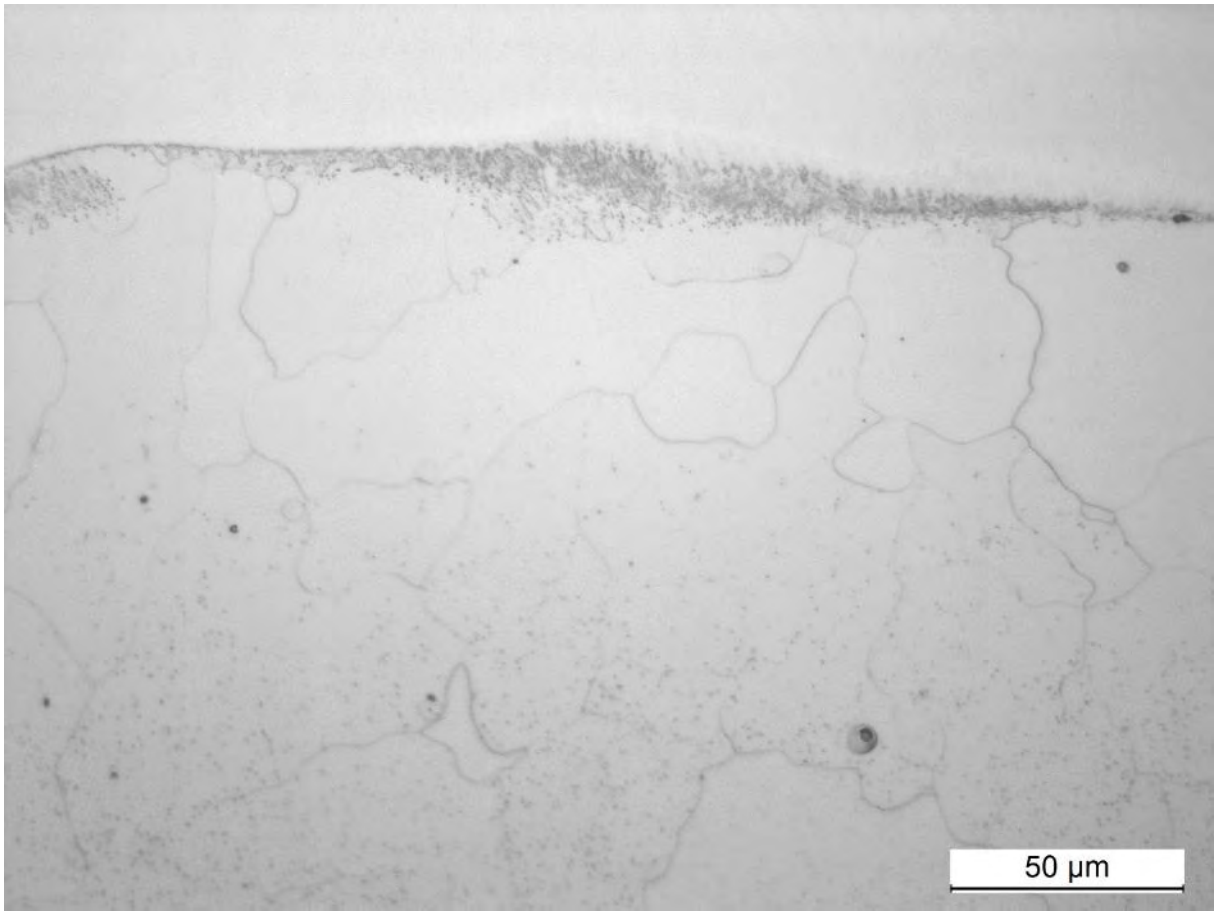
Kuva 40. IN625 Uhlig, 600°C, 100 h.



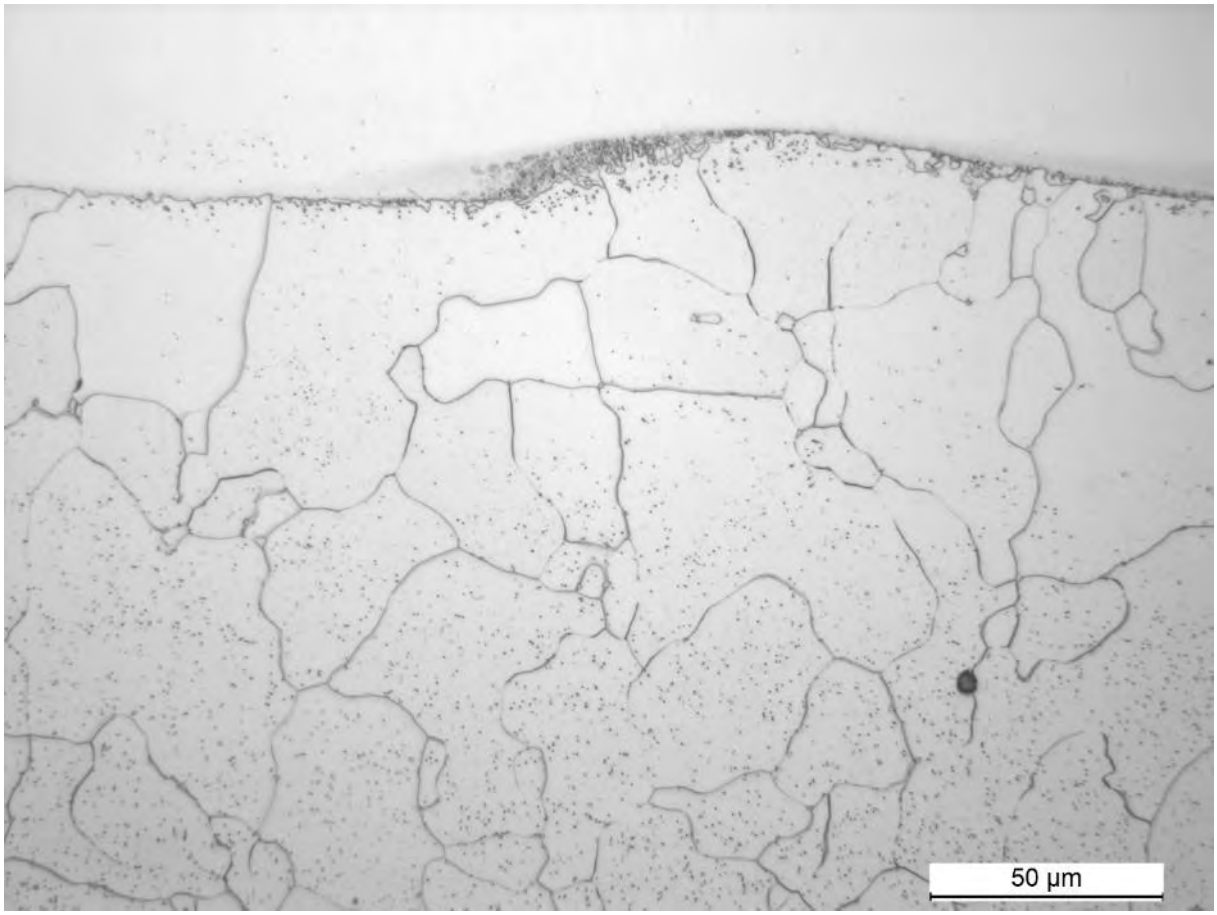
Kuva 41. IN625 Uhlig, 600°C, 1000 h.



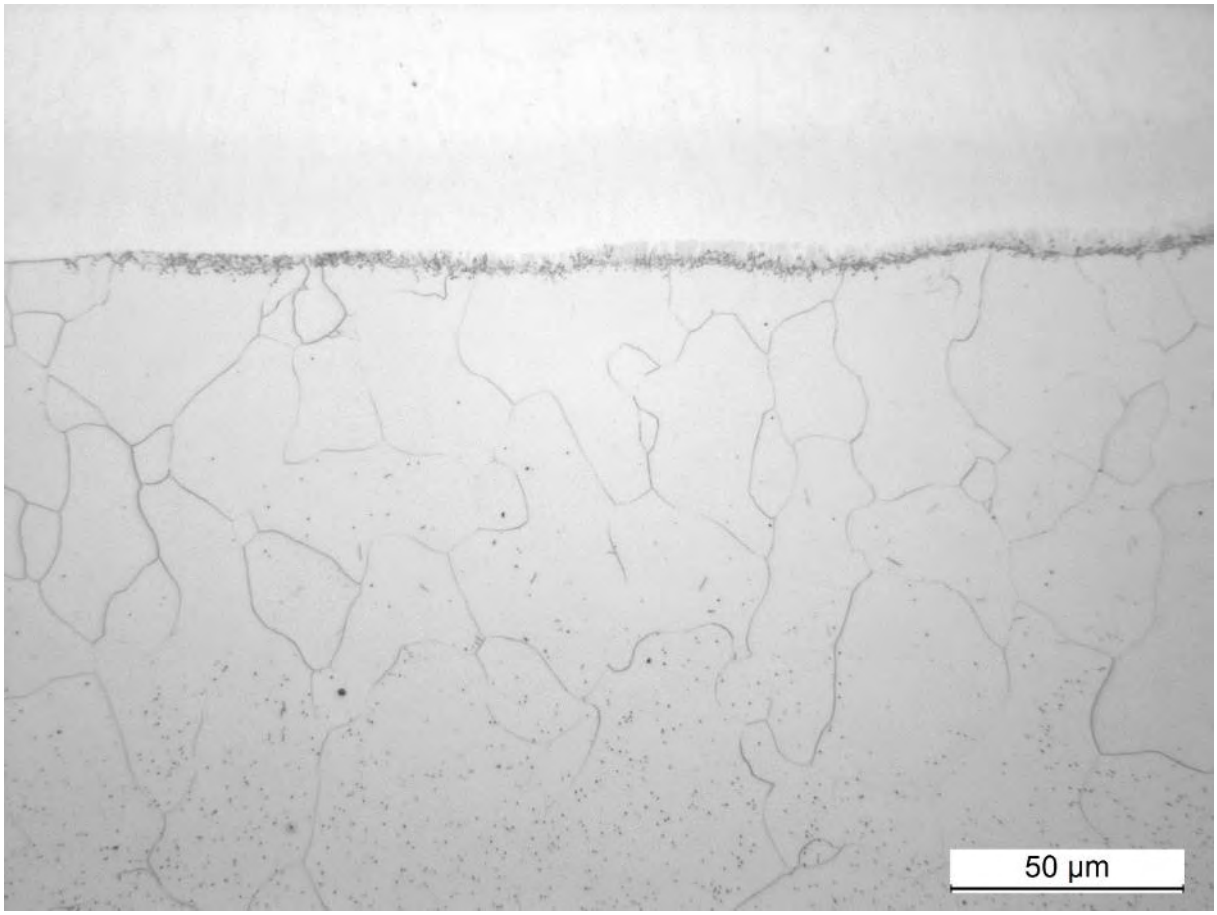
Kuva 42. IN625 Uhlig, 650°C, 10 h.



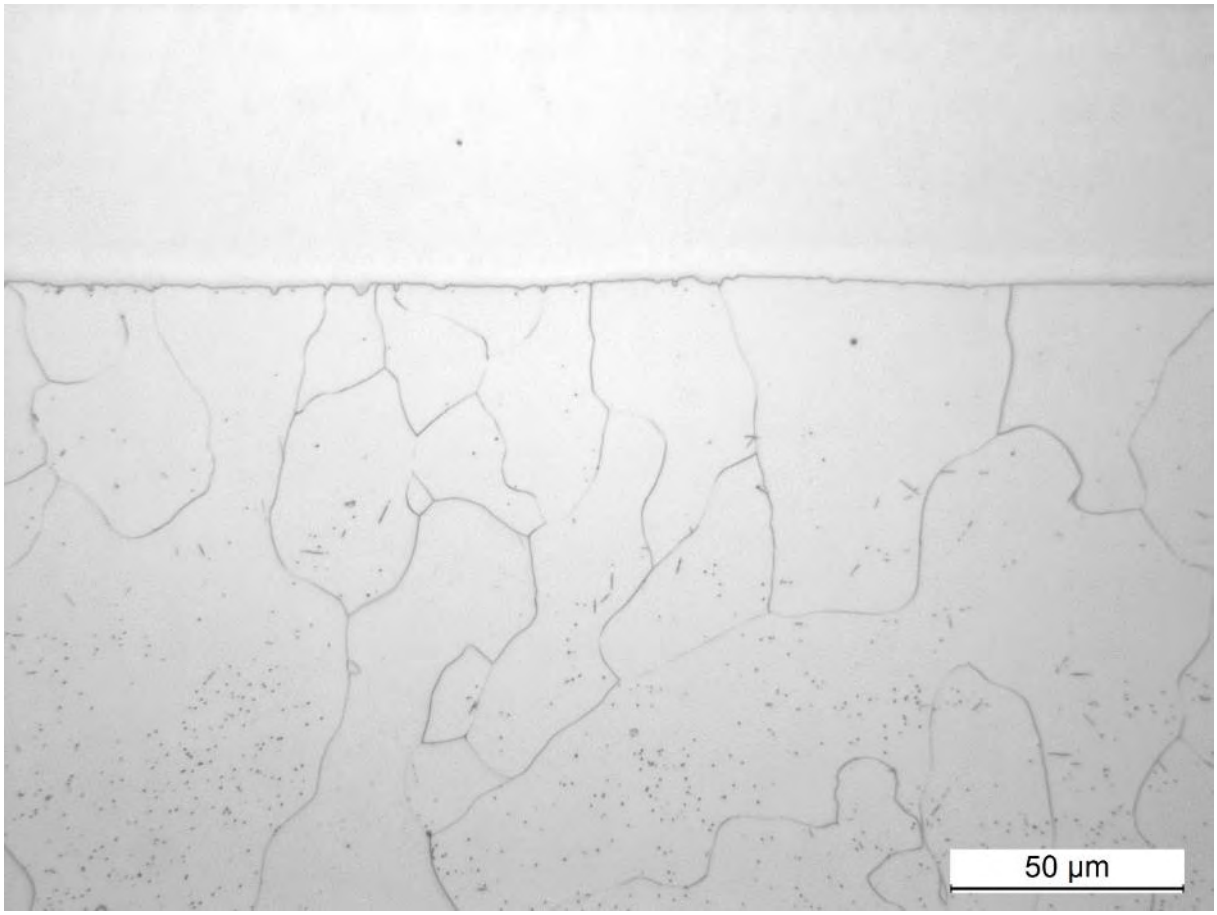
Kuva 43. IN625 Uhlig, 650°C, 100 h.



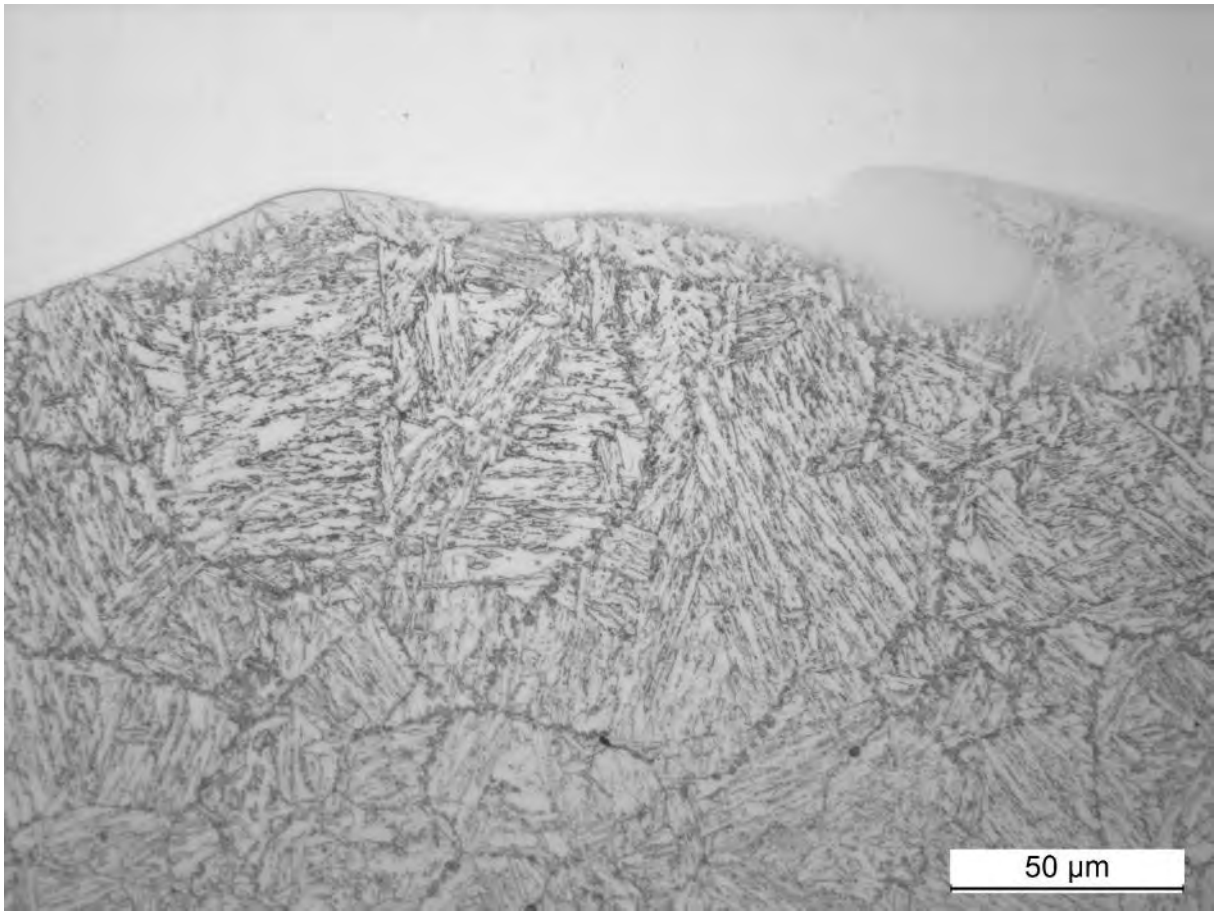
Kuva 44. IN625 Uhlig, 650°C, 1000 h.



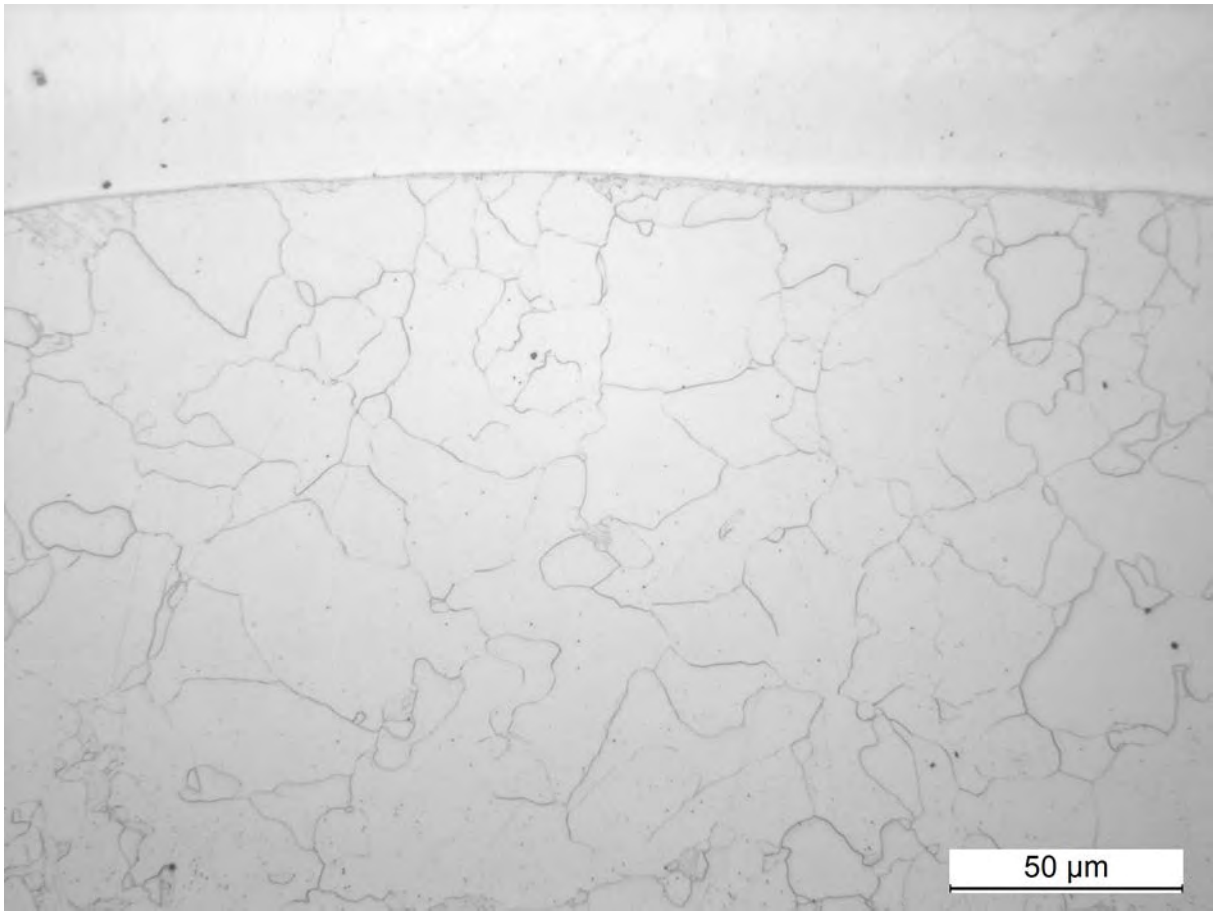
Kuva 45. IN625 Uhlig, 700°C, 10 h.



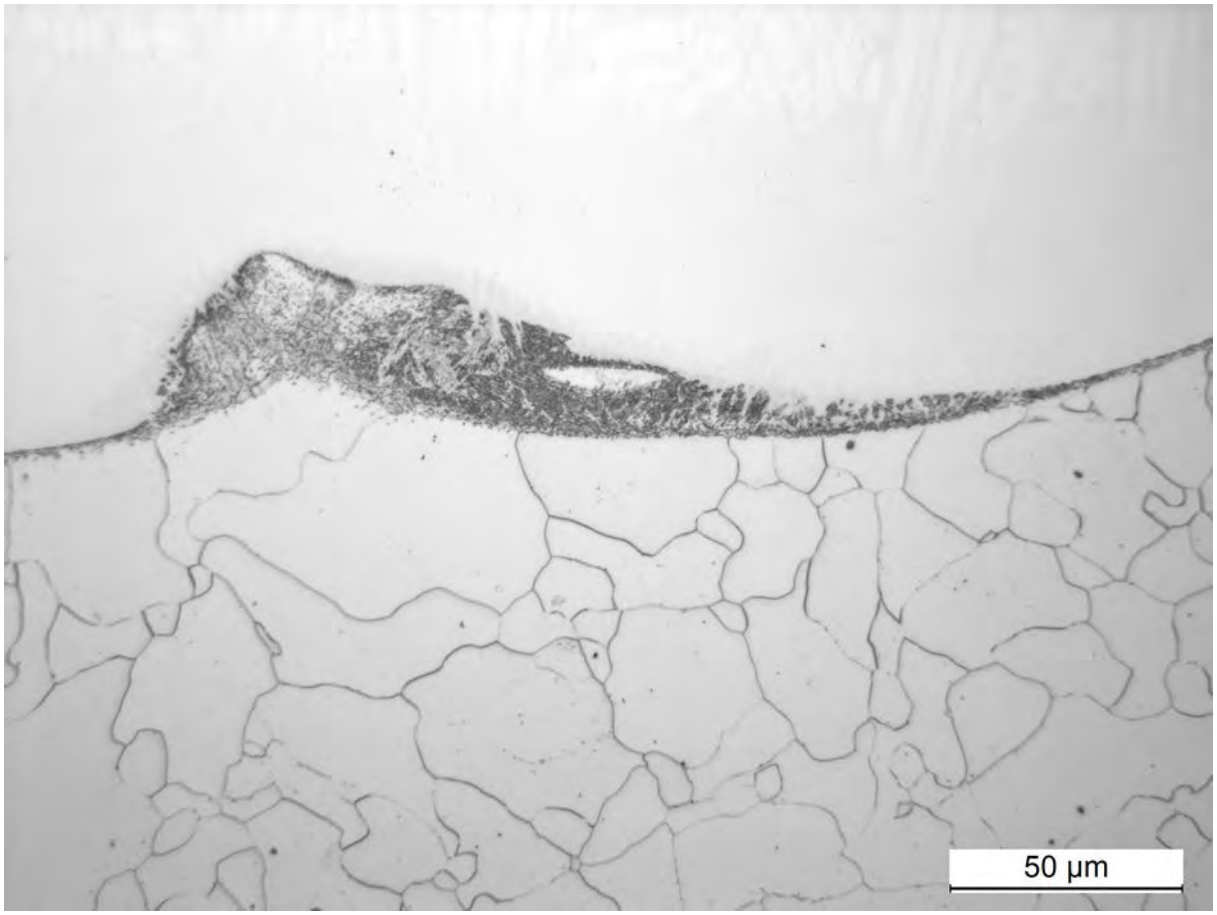
Kuva 46. IN625 Uhlig, 700°C, 100 h.



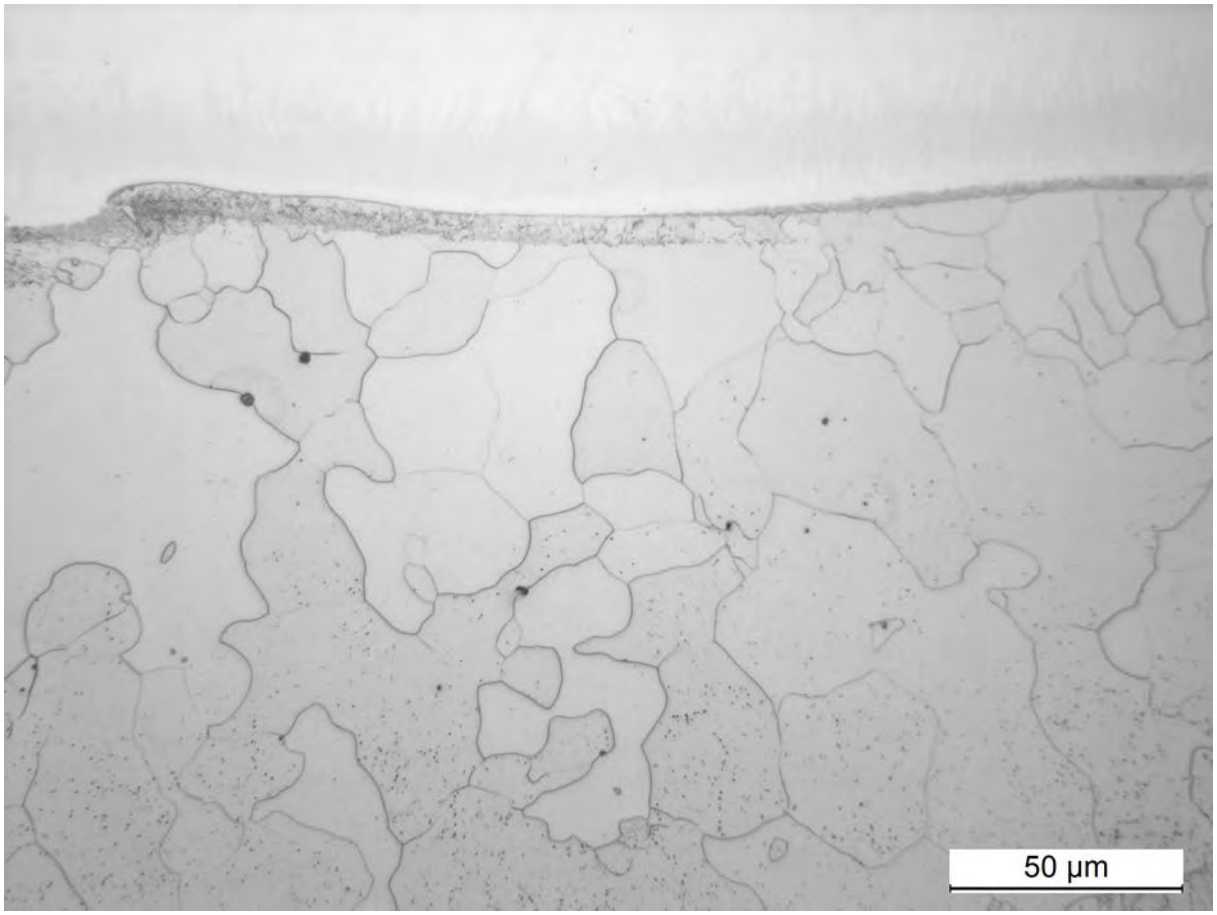
Kuva 47. IN825 Uhlig, toimitustila.



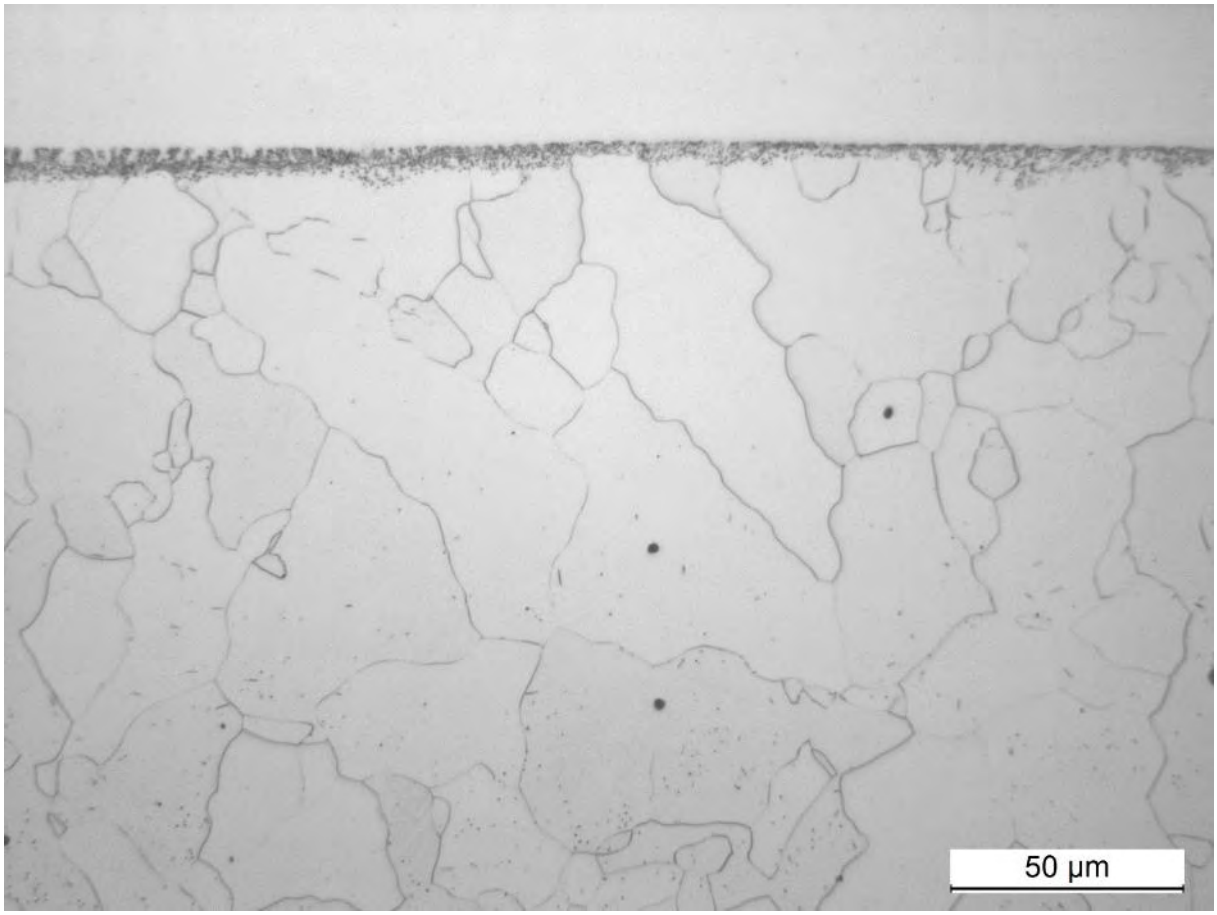
Kuva 48. IN825 Uhlig, 600°C, 100 h.



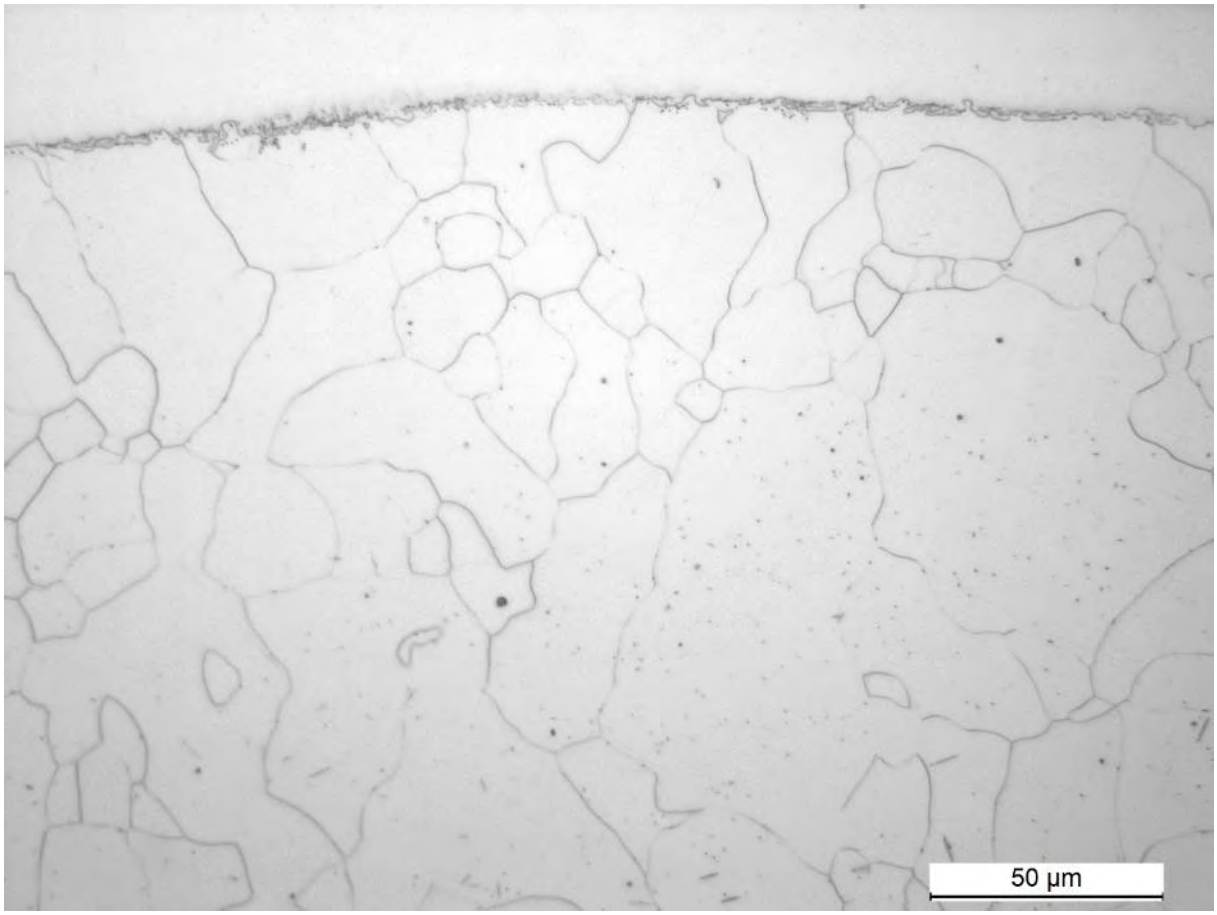
Kuva 49. IN825 Uhlig, 600°C, 1000 h.



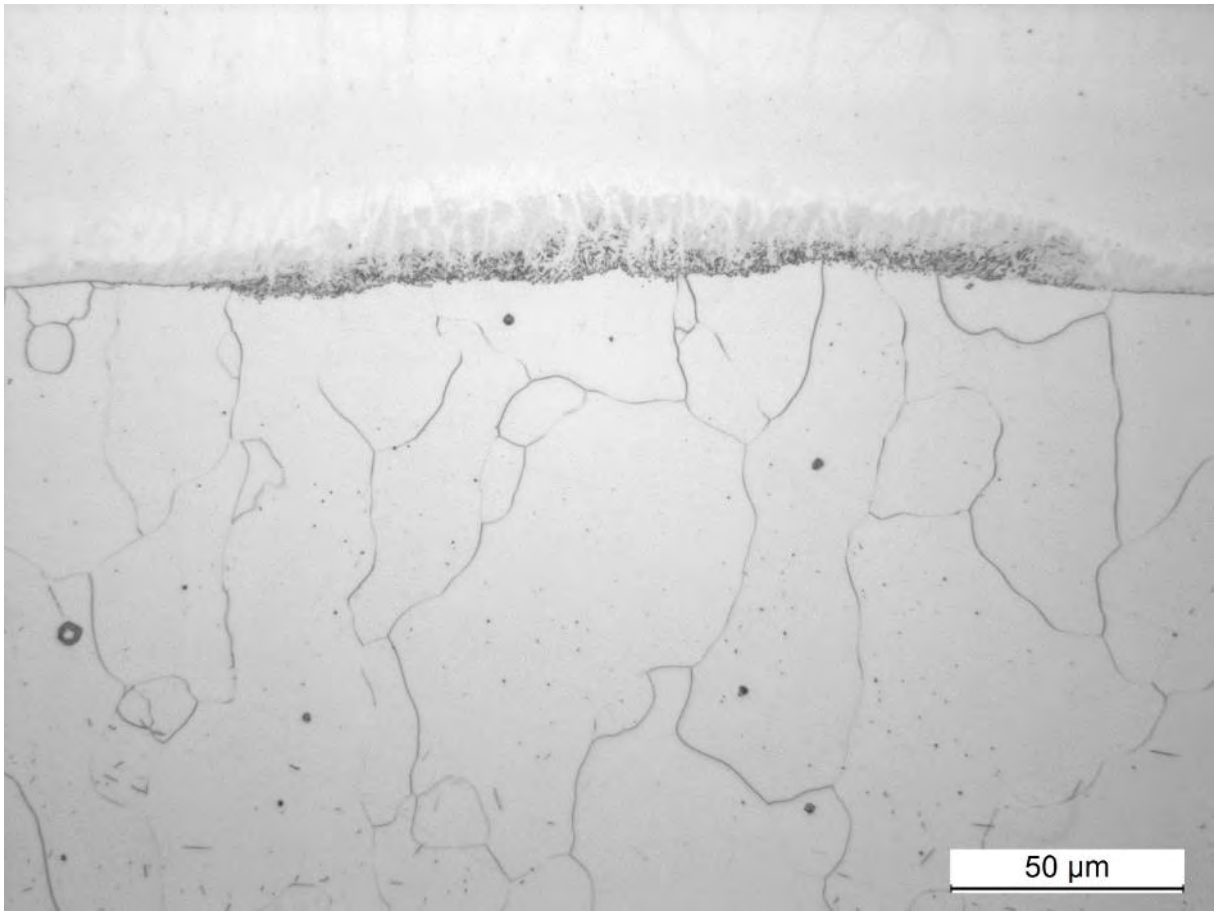
Kuva 50. IN825 Uhlig, 650°C, 10 h.



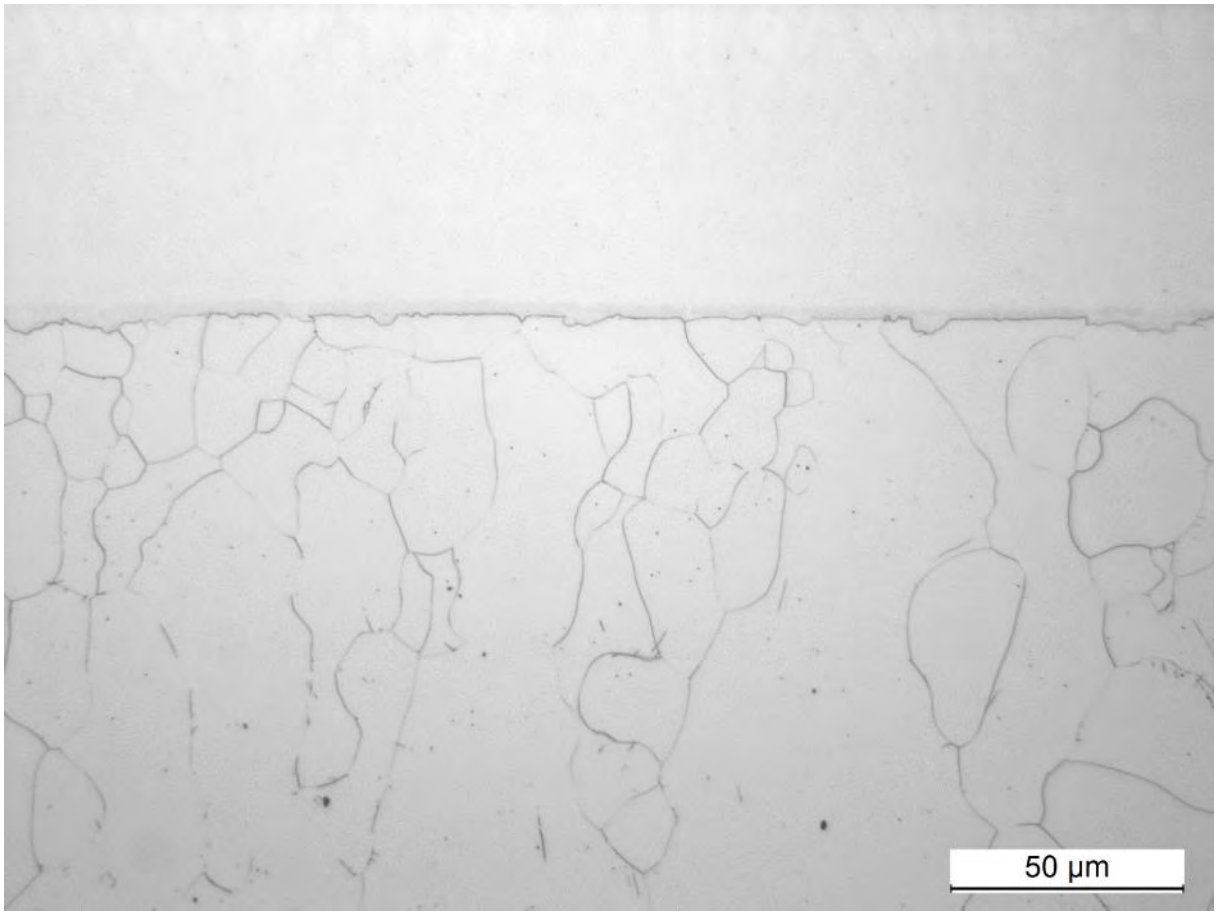
Kuva 51. IN825 Uhlig, 650°C, 100 h.



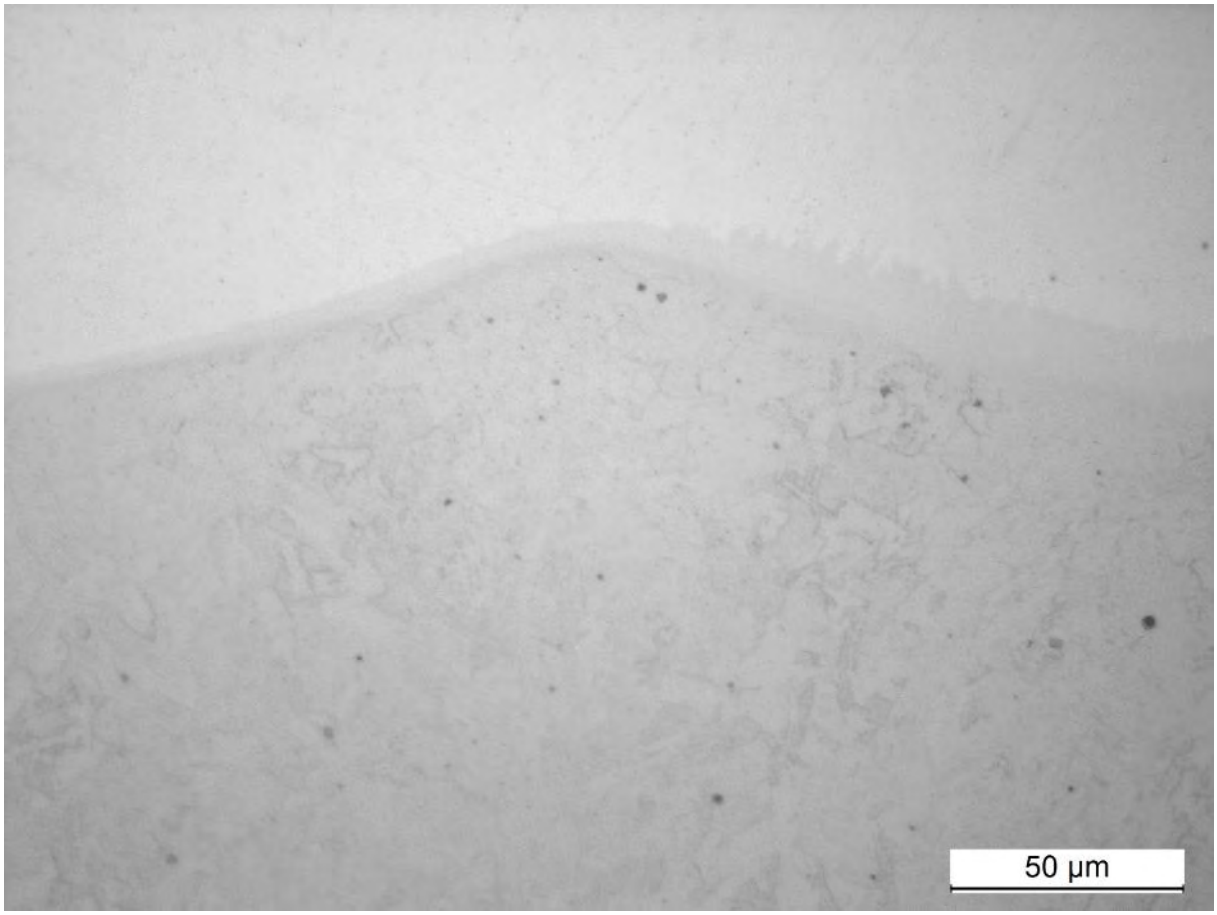
Kuva 52. IN825 Uhlig, 650°C, 1000 h.



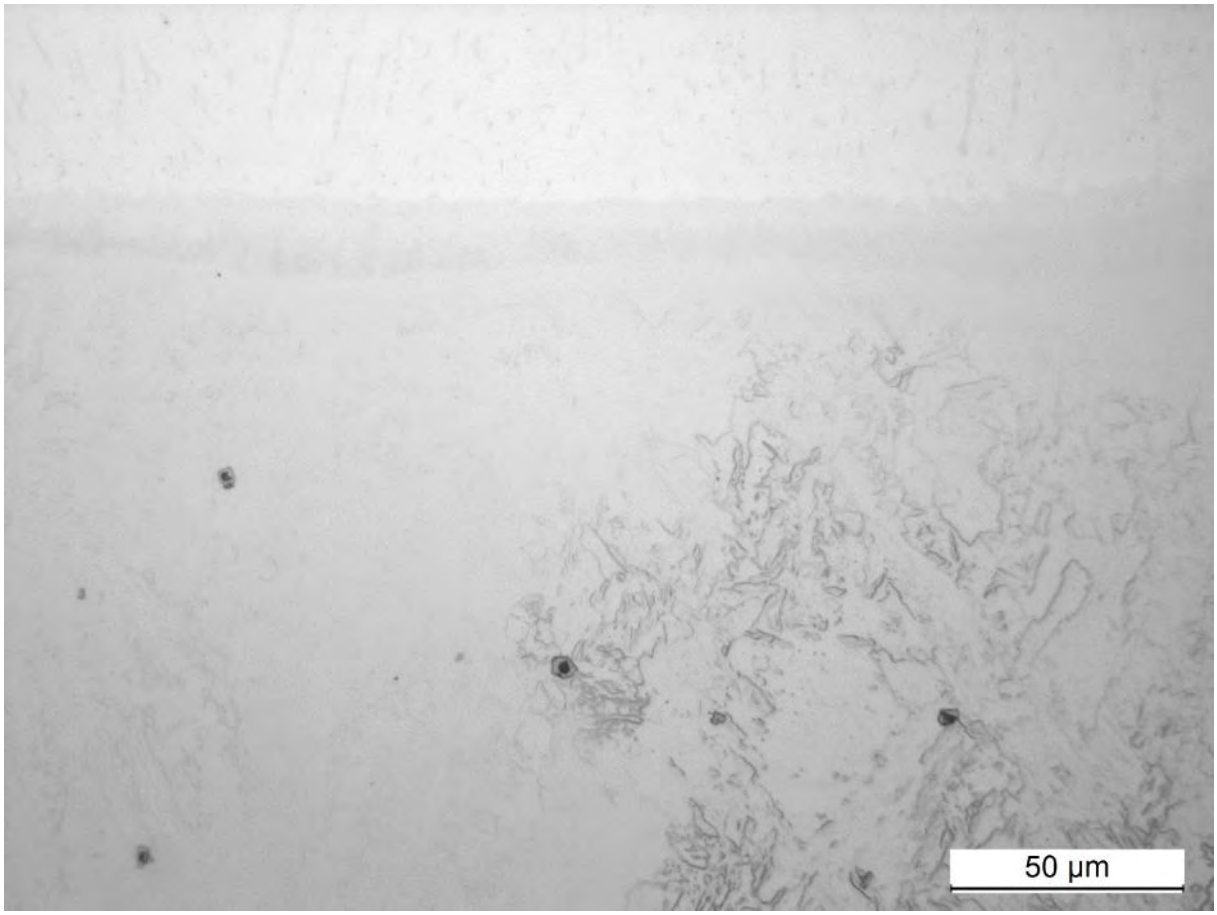
Kuva 53. IN825 Uhlig, 700°C, 10 h.



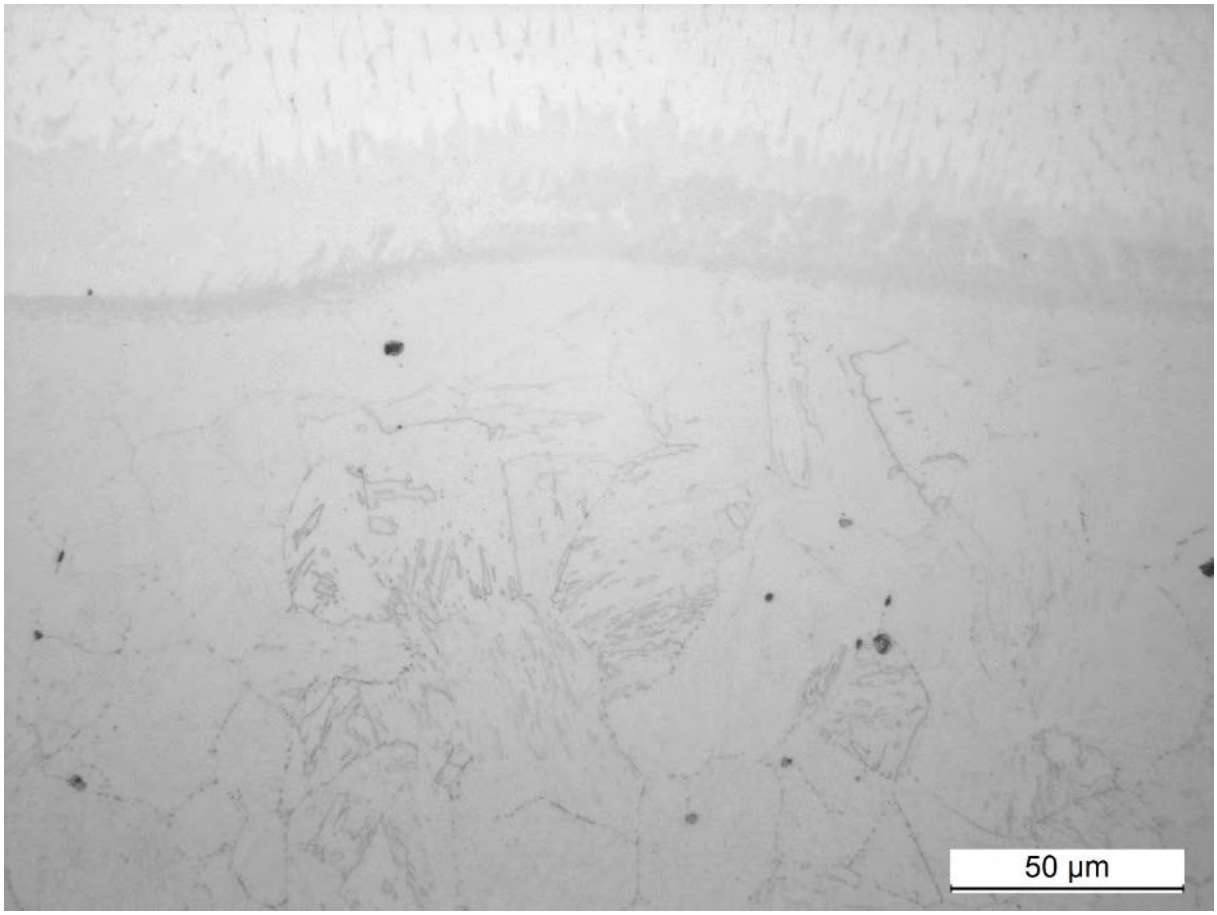
Kuva 54. IN825 Uhlig, 700°C, 100 h.



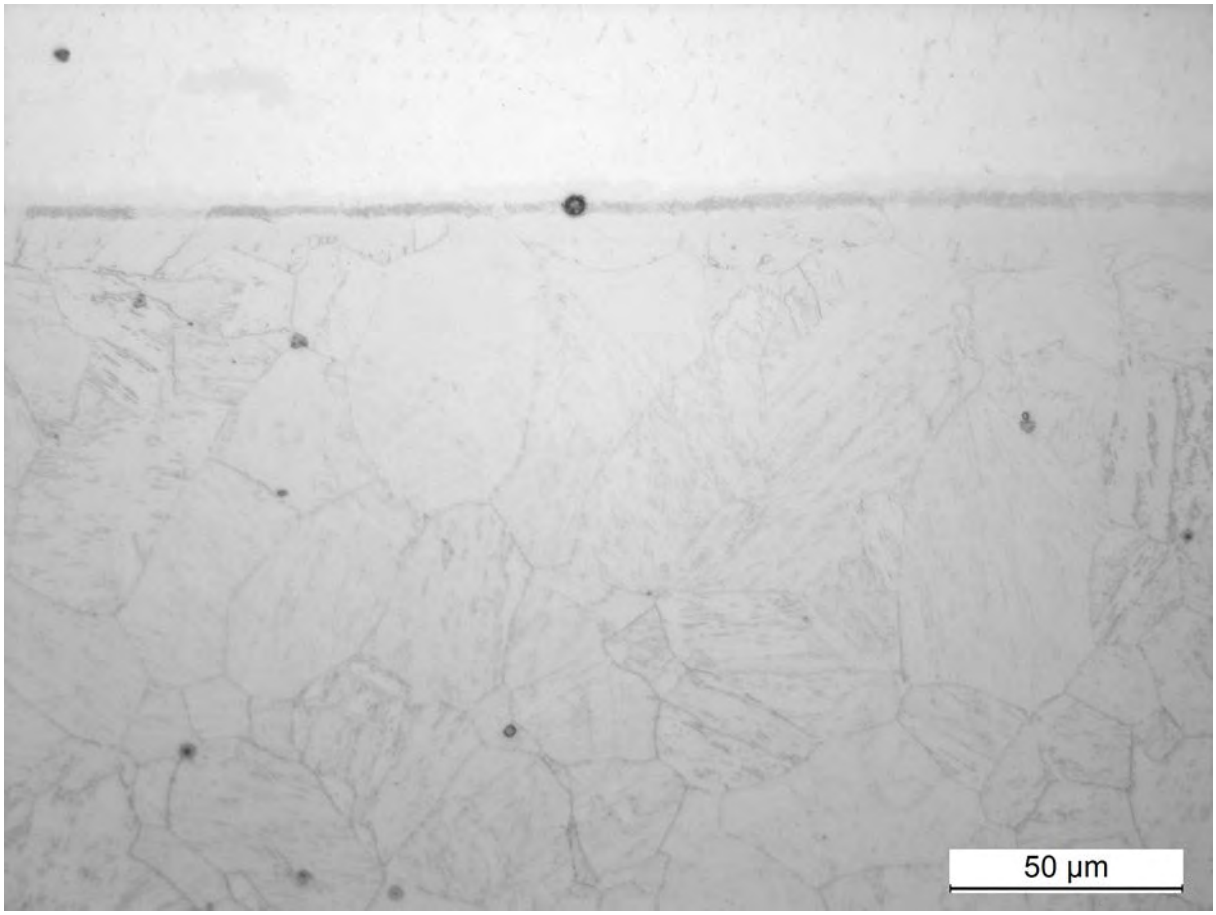
Kuva 55. 309 Areva, toimitustila.



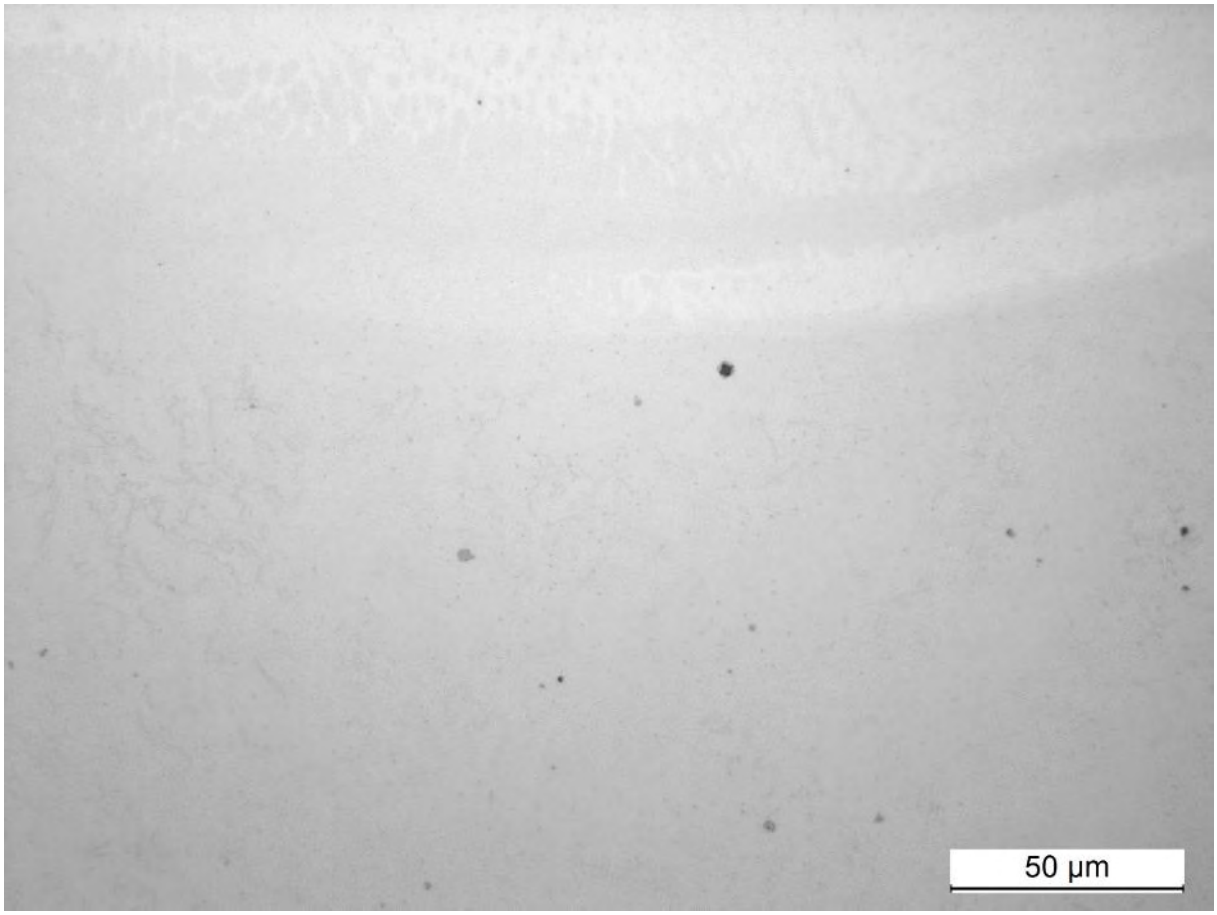
Kuva 56. 309 Areva, 600°C, 100 h.



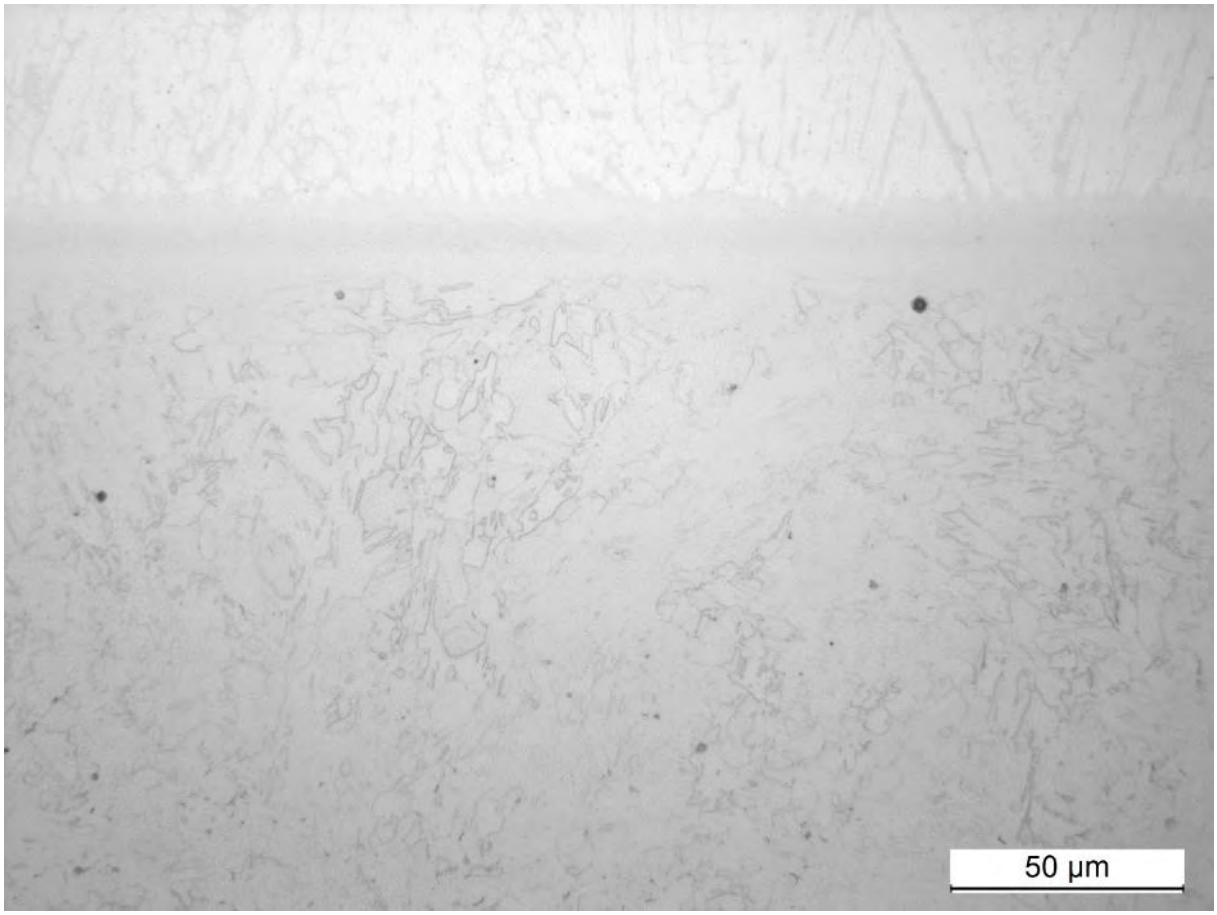
Kuva 57. 309 Areva, 600°C, 1000 h.



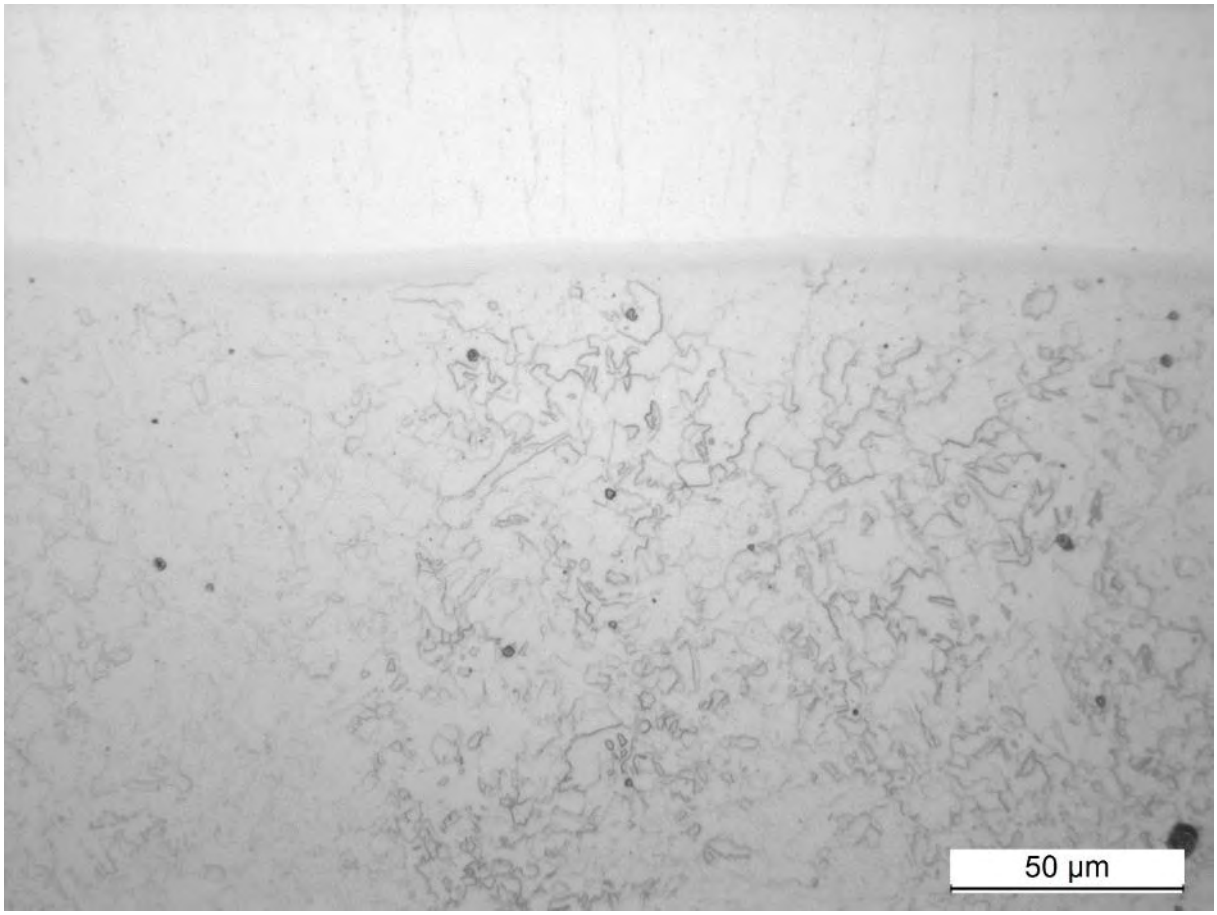
Kuva 58. 309 Areva, 650°C, 10 h.



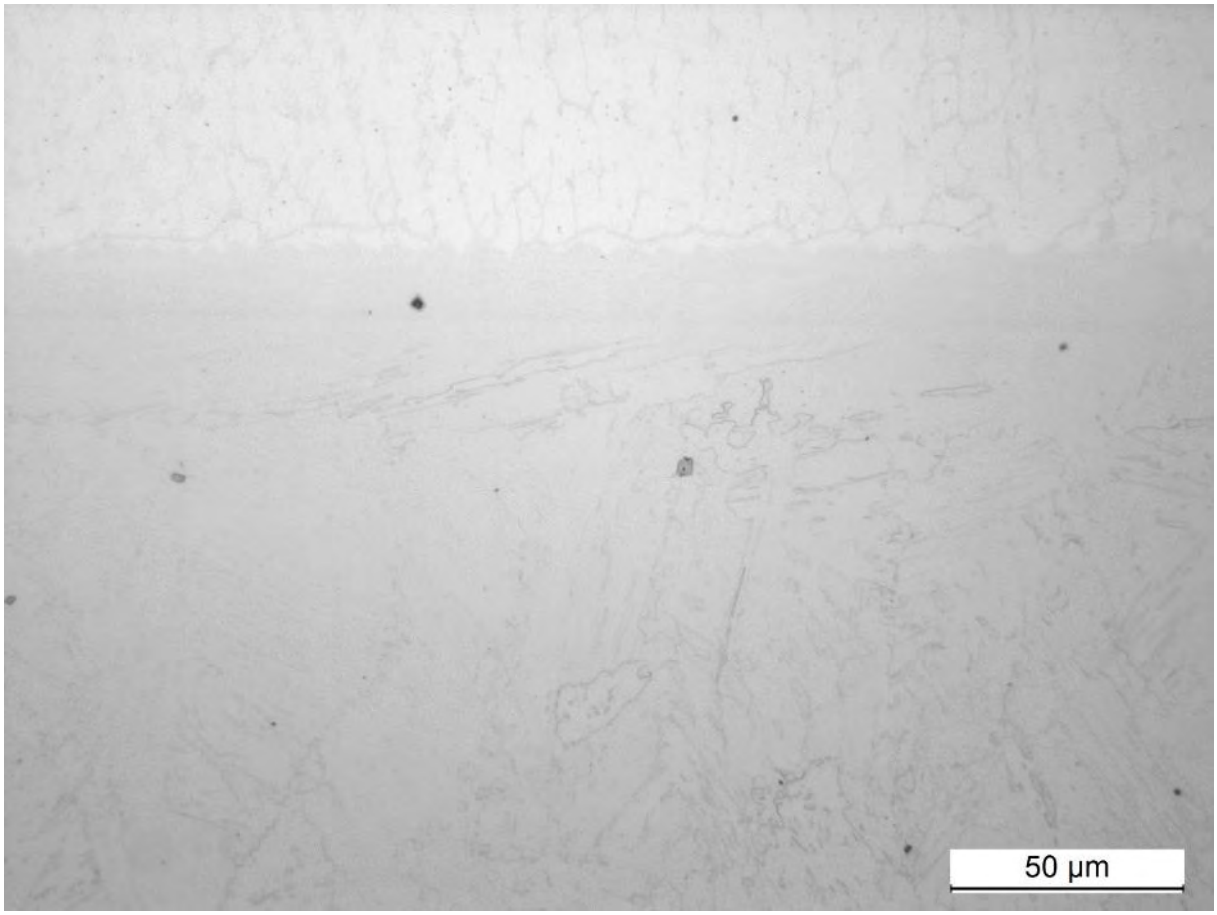
Kuva 59. 309 Areva, 650°C, 100 h.



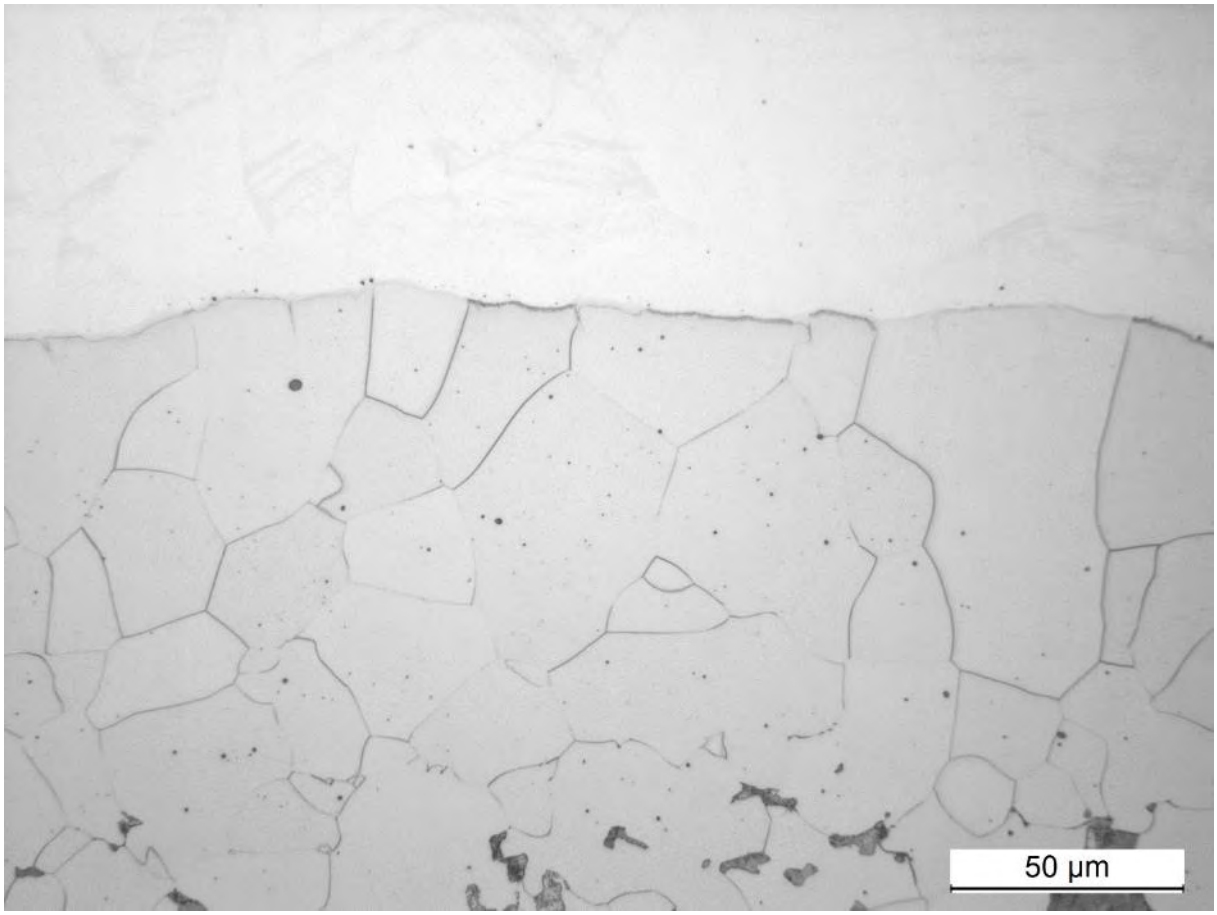
Kuva 60. 309 Areva, 650°C, 1000 h.



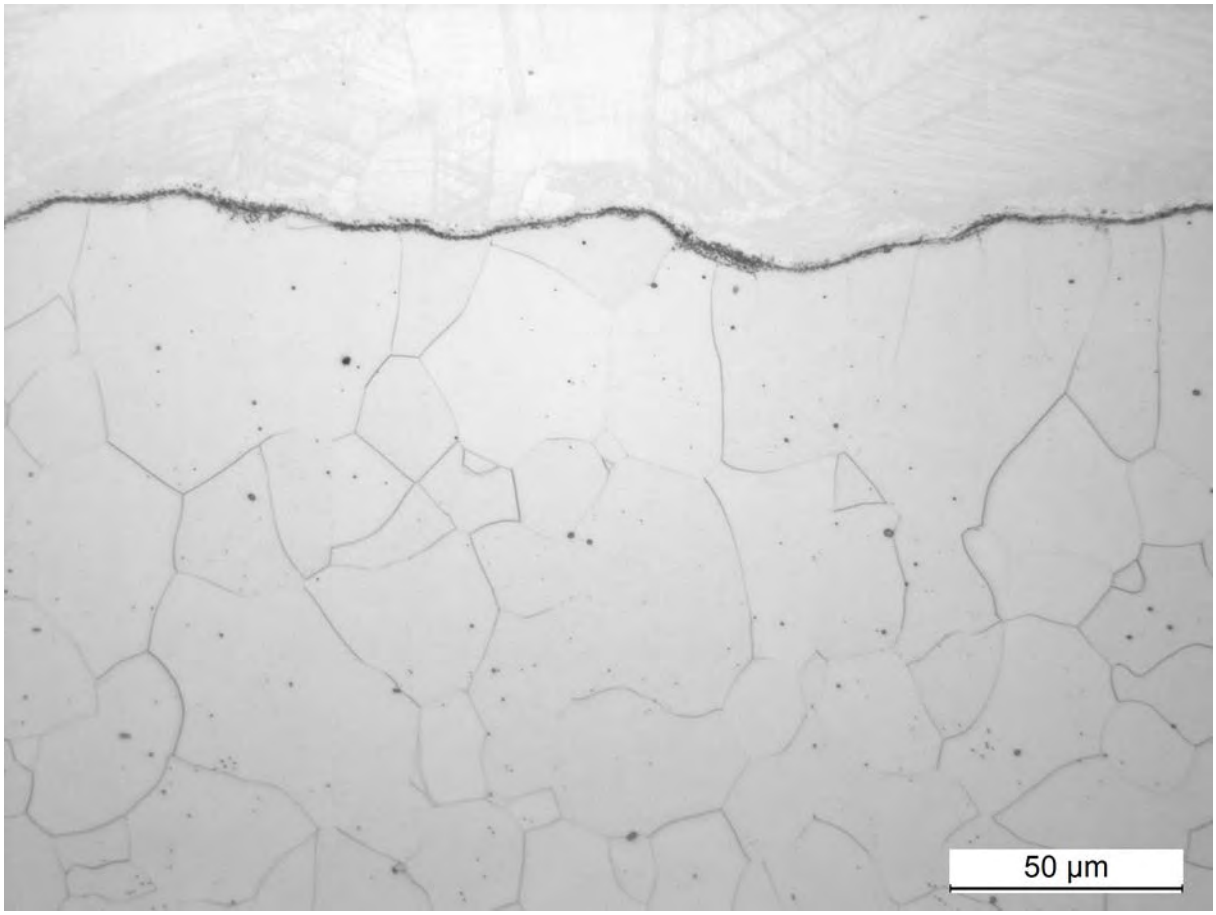
Kuva 61. 309 Areva, 700°C, 10 h.



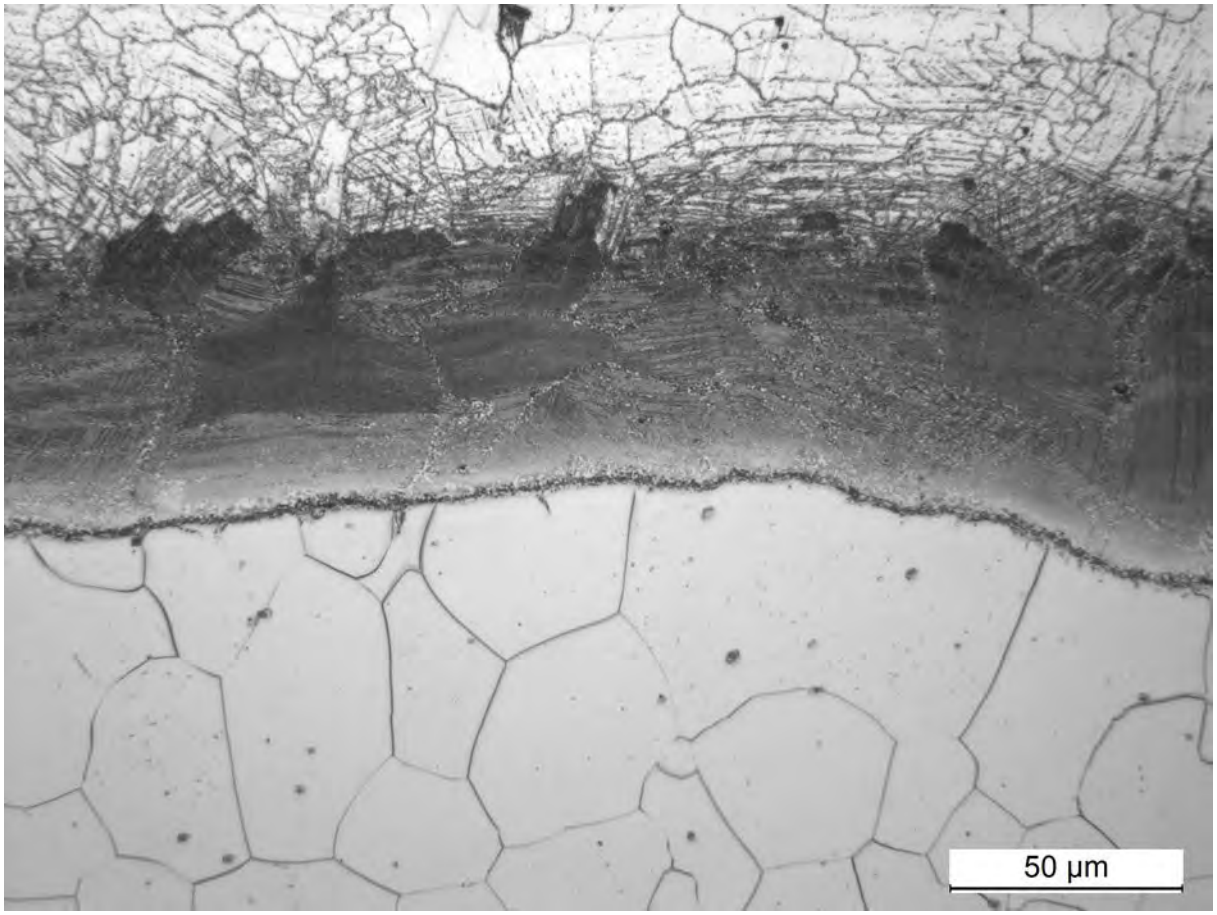
Kuva 62. 309 Areva, 700°C, 100 h.



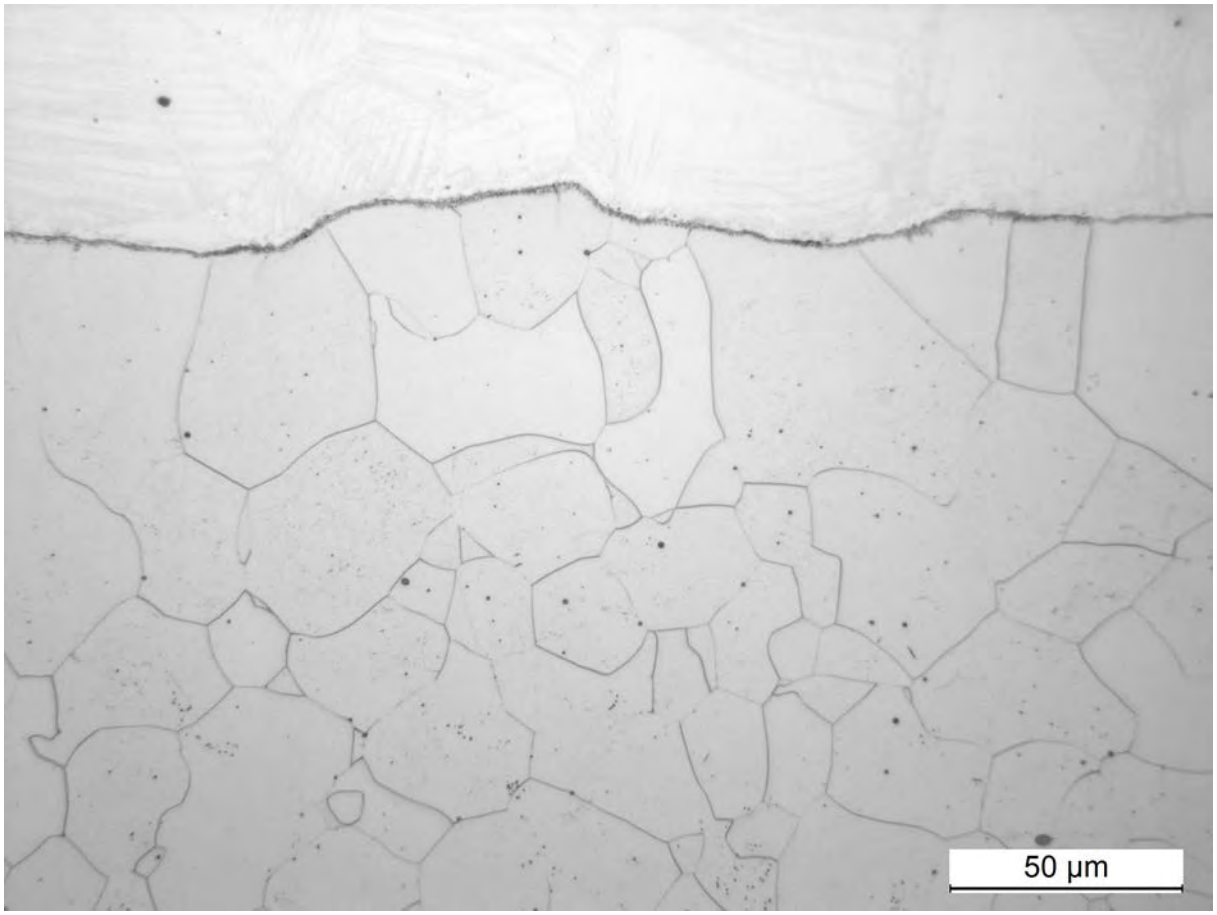
Kuva 63. 304L, toimitustila.



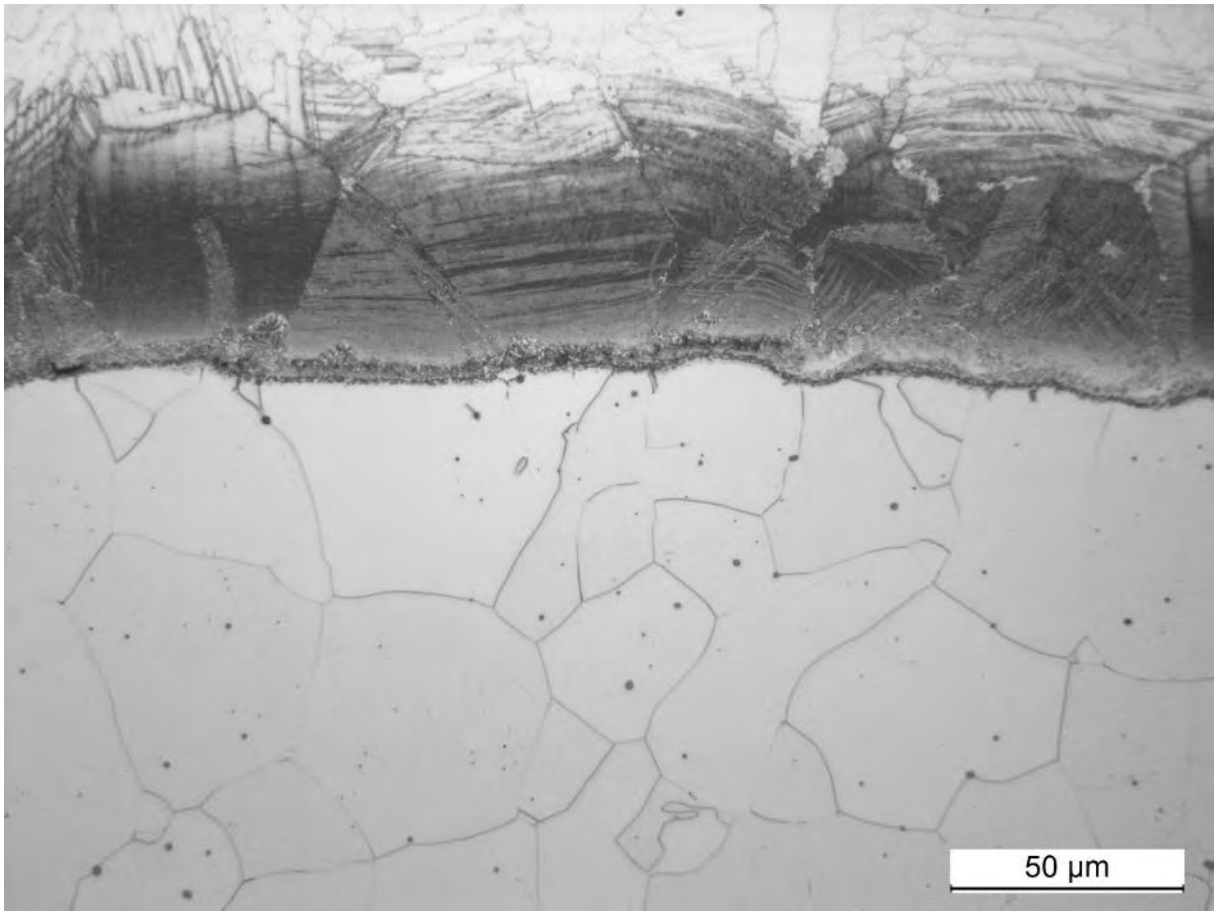
Kuva 64. 304L, 600°C, 100 h.



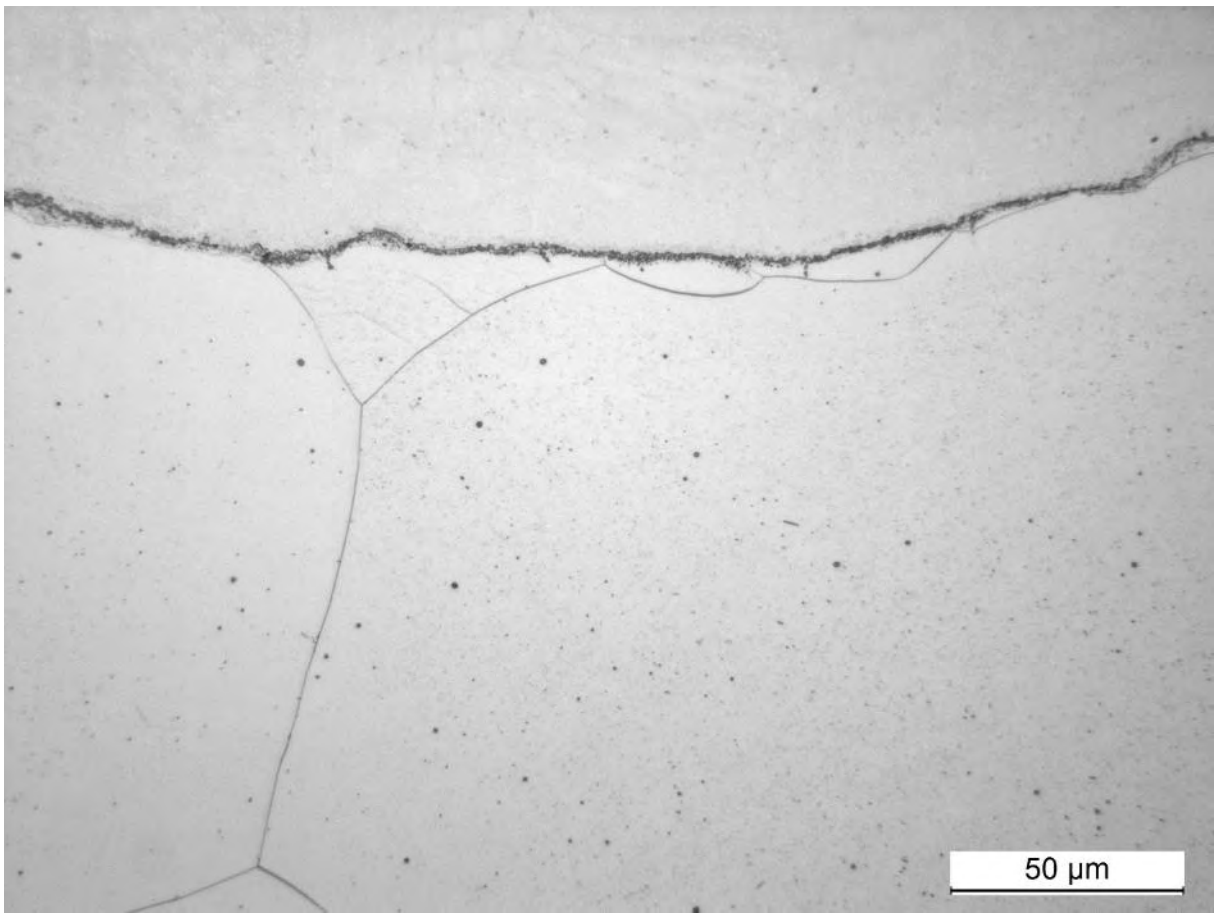
Kuva 65. 304L rajapinta, 600°C, 1000 h.



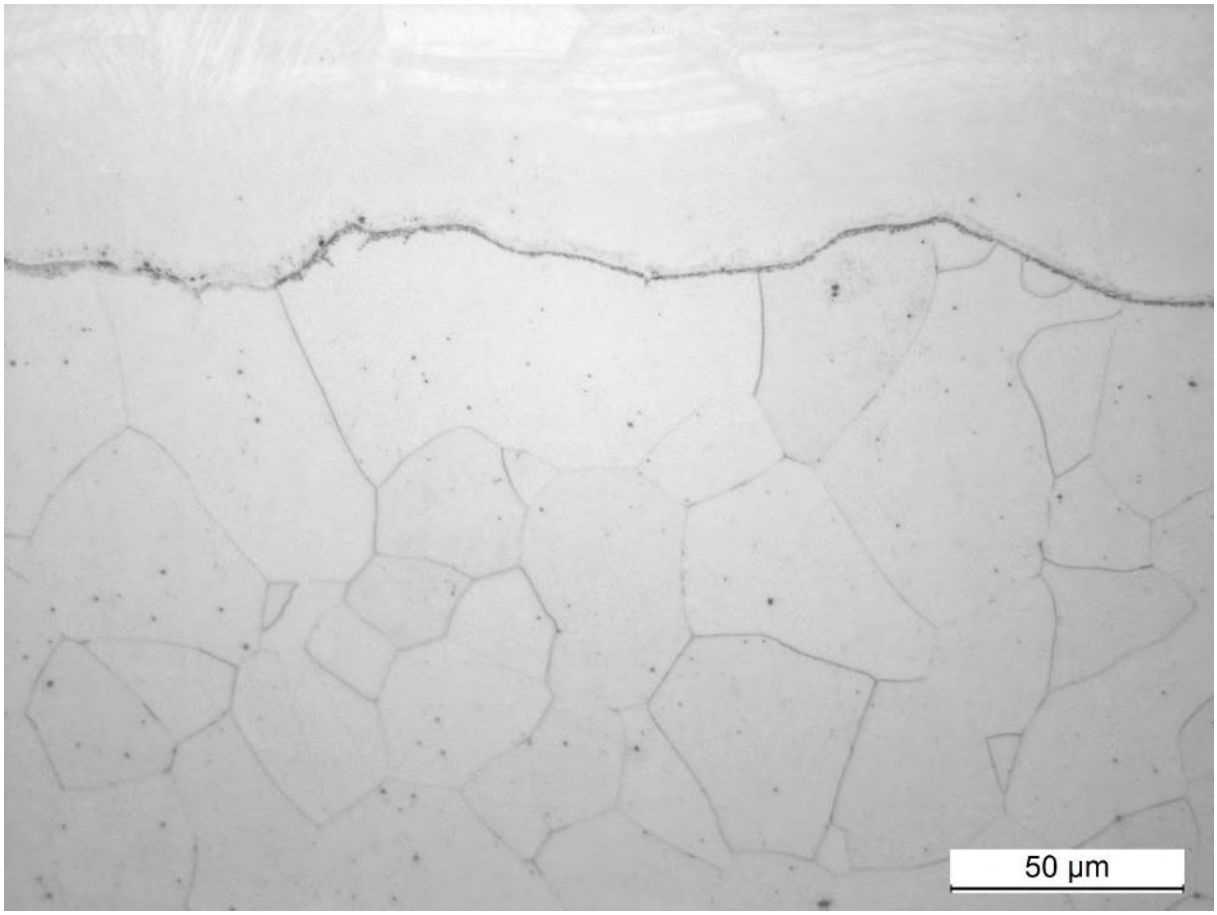
Kuva 66. 304L, 650°C, 10 h.



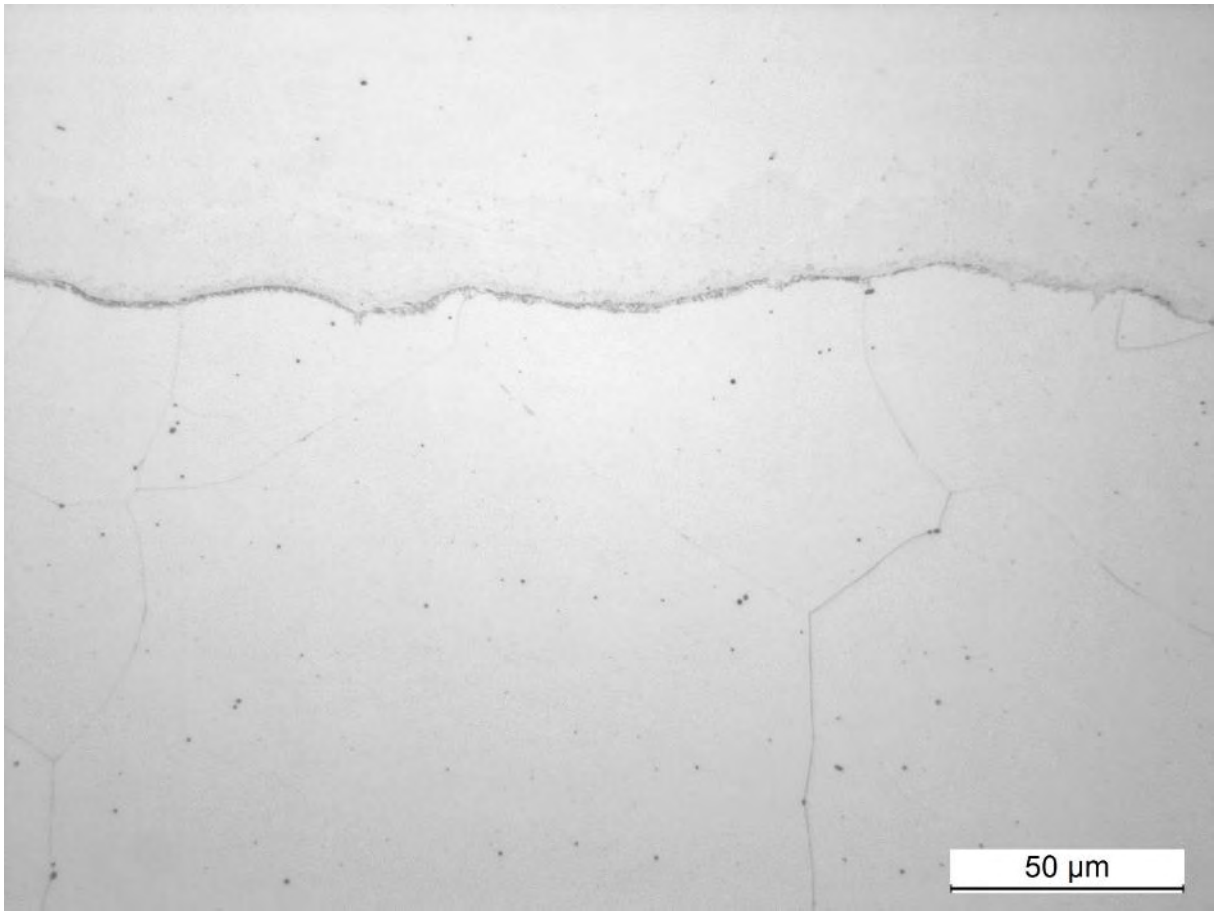
Kuva 67. 304L, 650°C, 100 h.



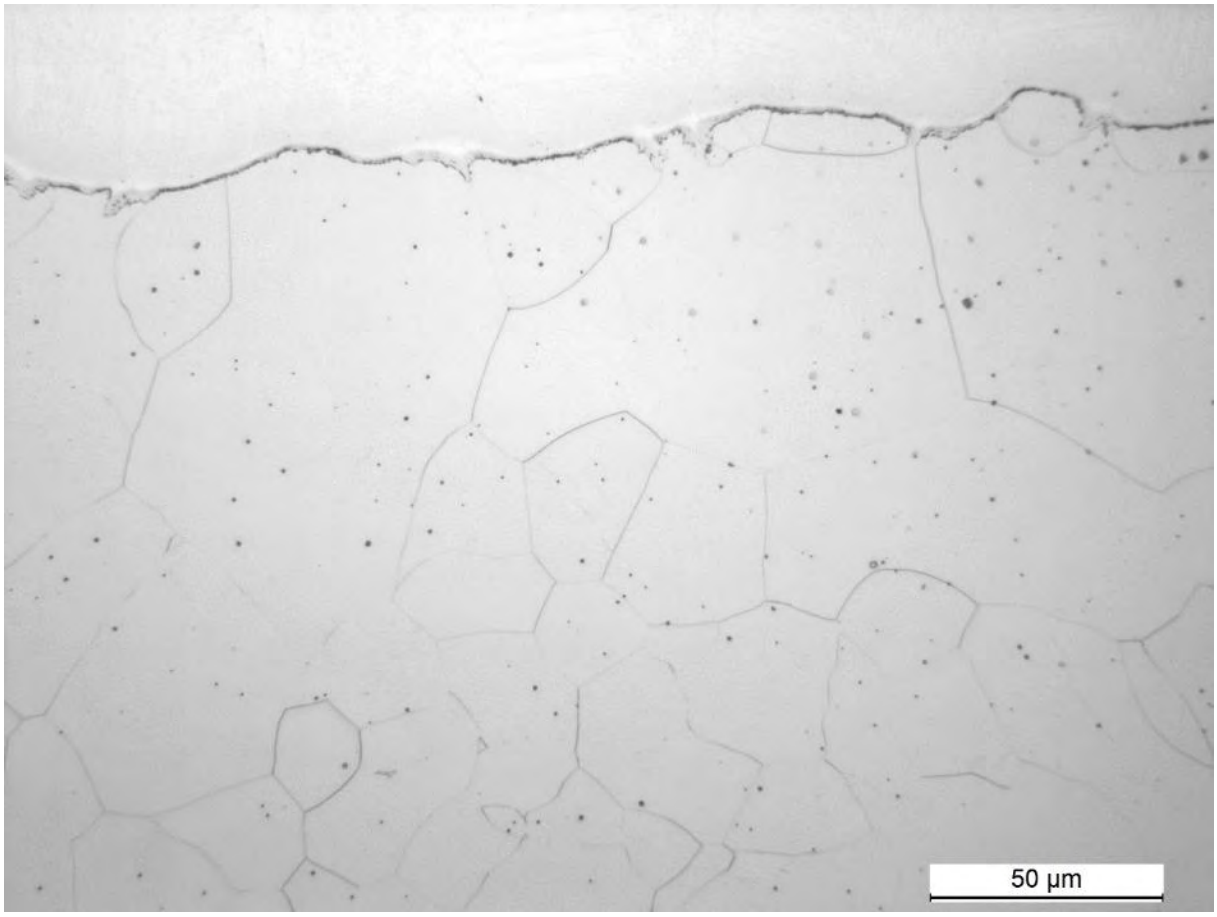
Kuva 68. 304L, 650°C, 1000 h.



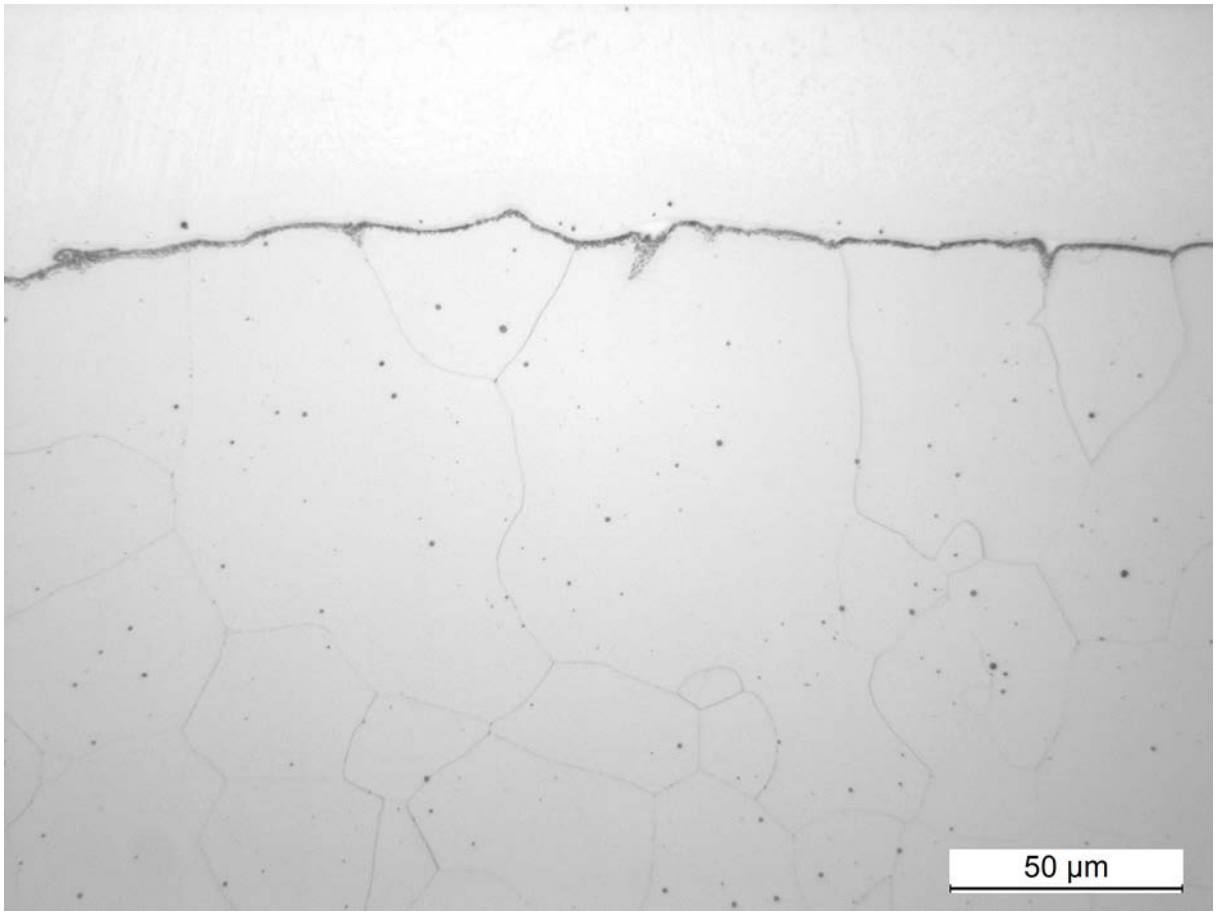
Kuva 69. 304L, 700°C, 10 h.



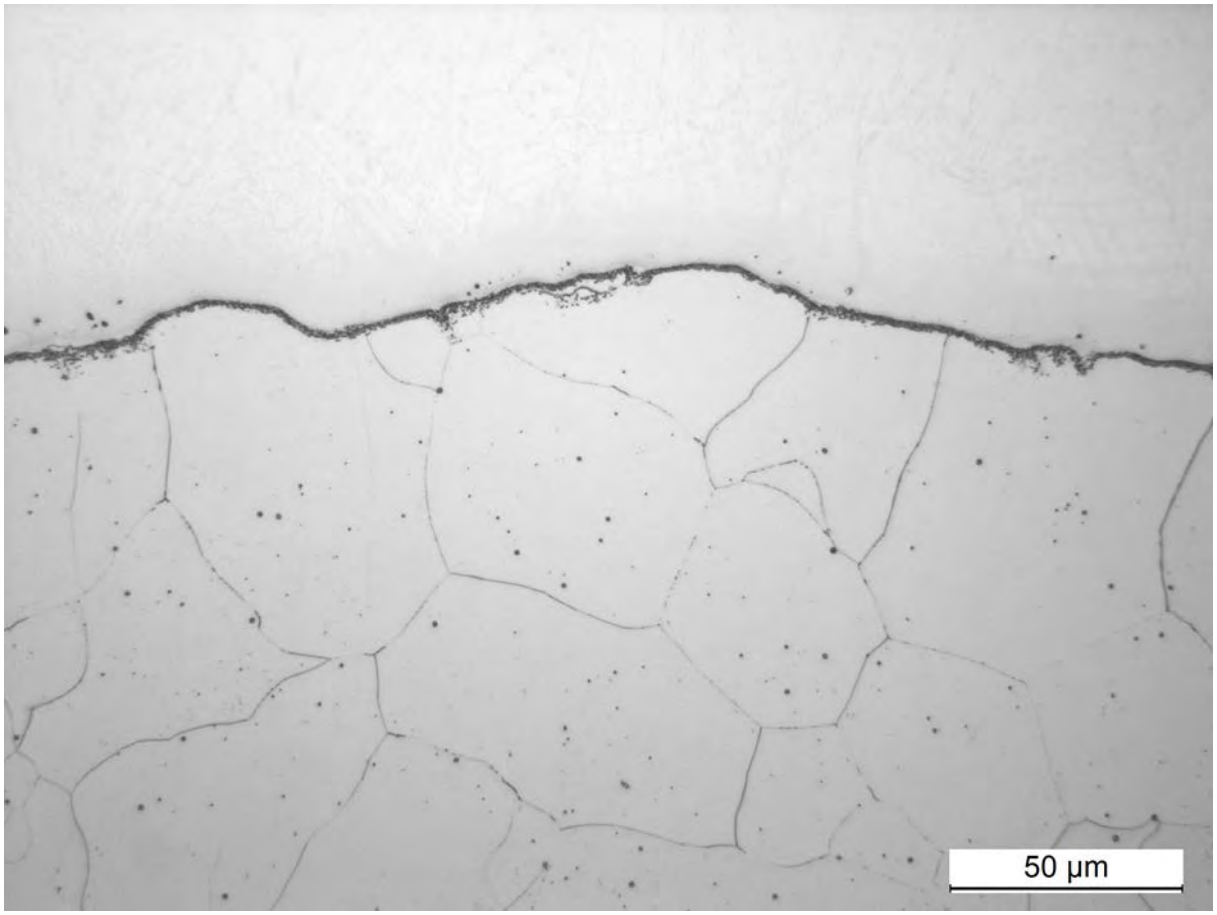
Kuva 70. 304L, 700°C, 100 h.



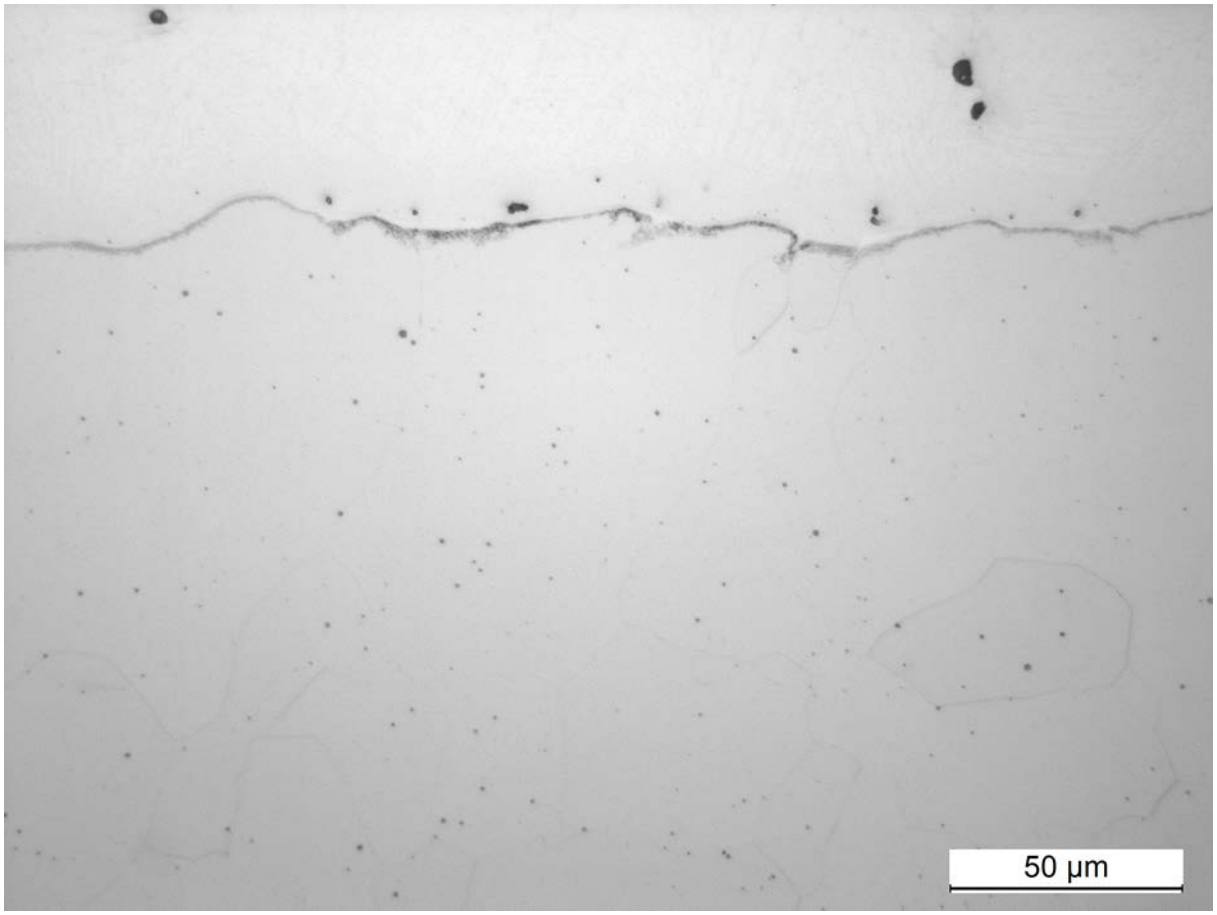
Kuva 71. San28 rajapinta, toimitustila.



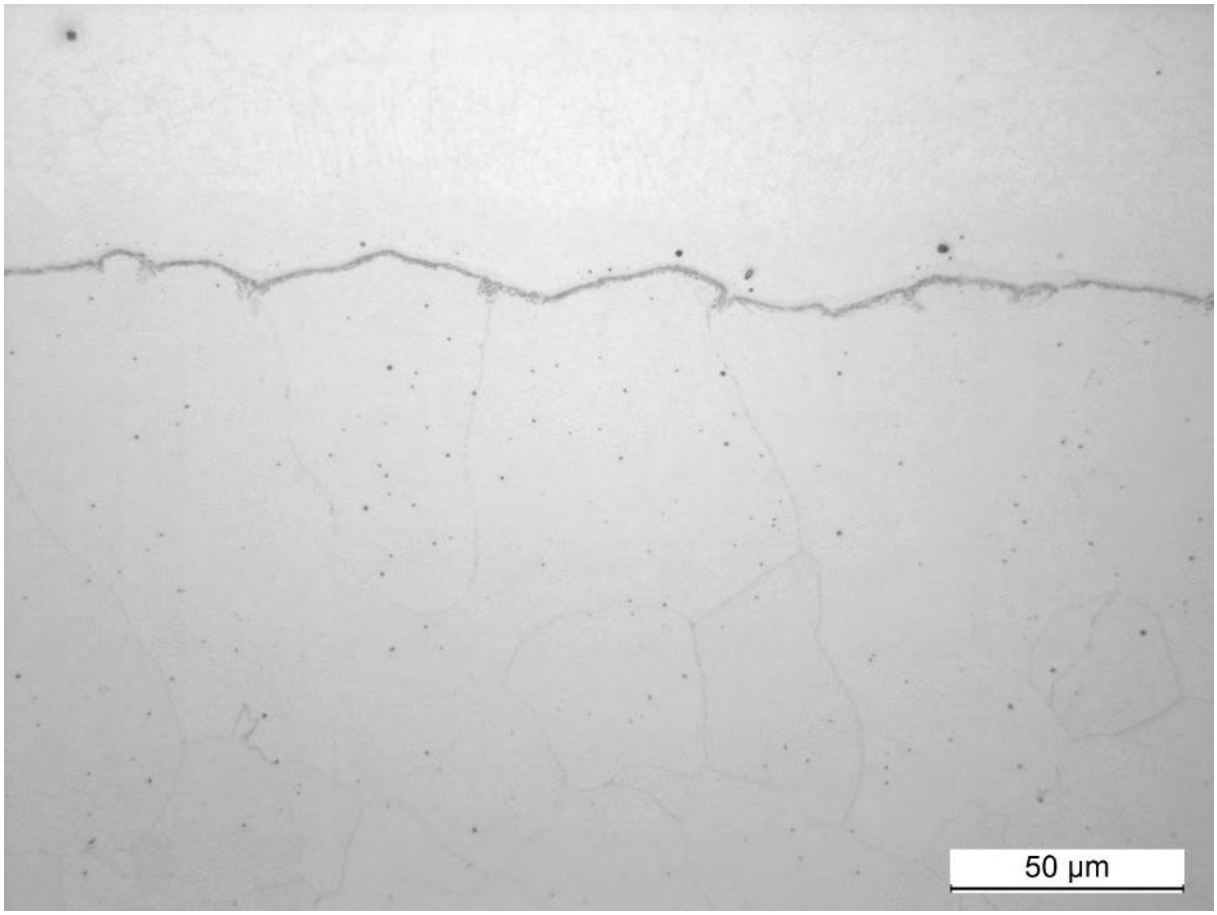
Kuva 72. San28 rajapinta, 600°C, 100 h.



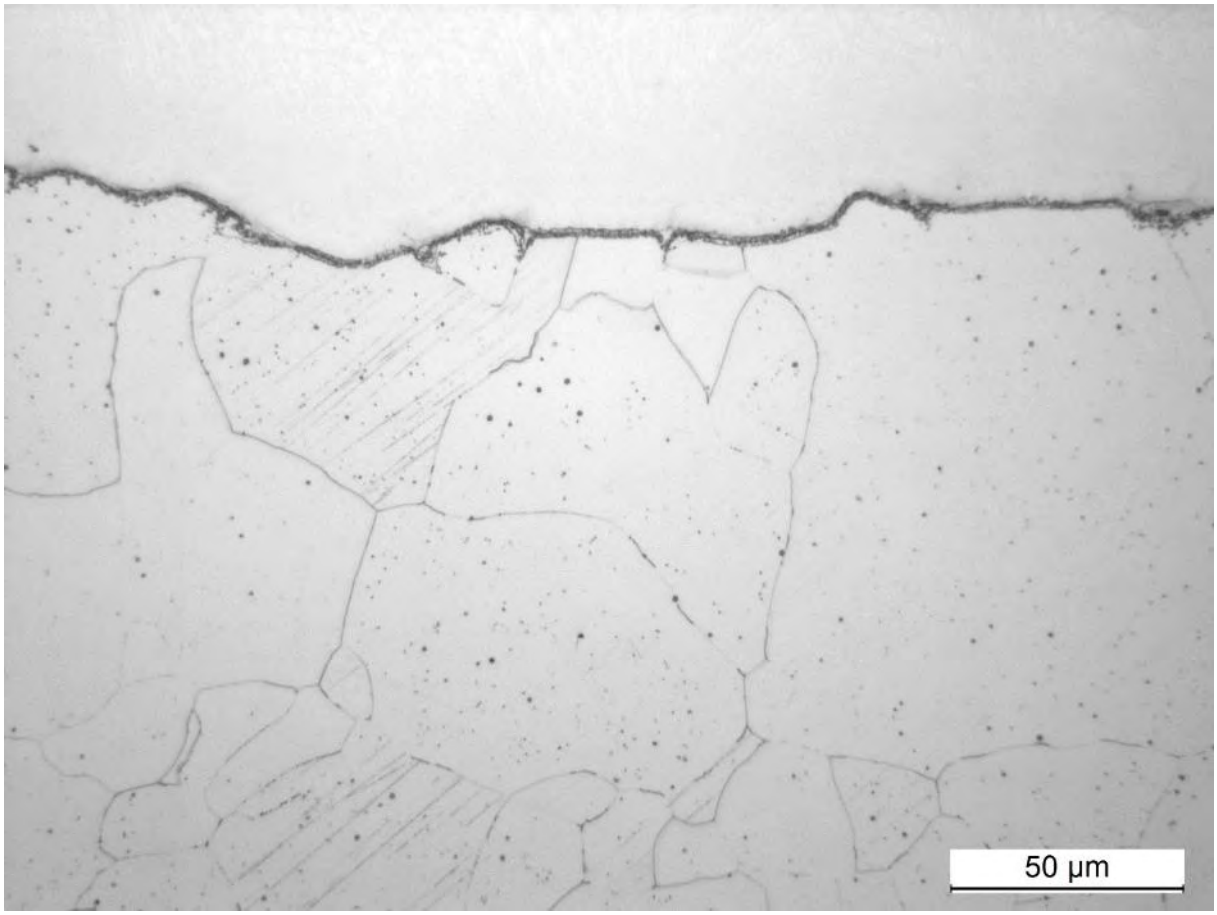
Kuva 73. San28, 600°C, 1000 h.



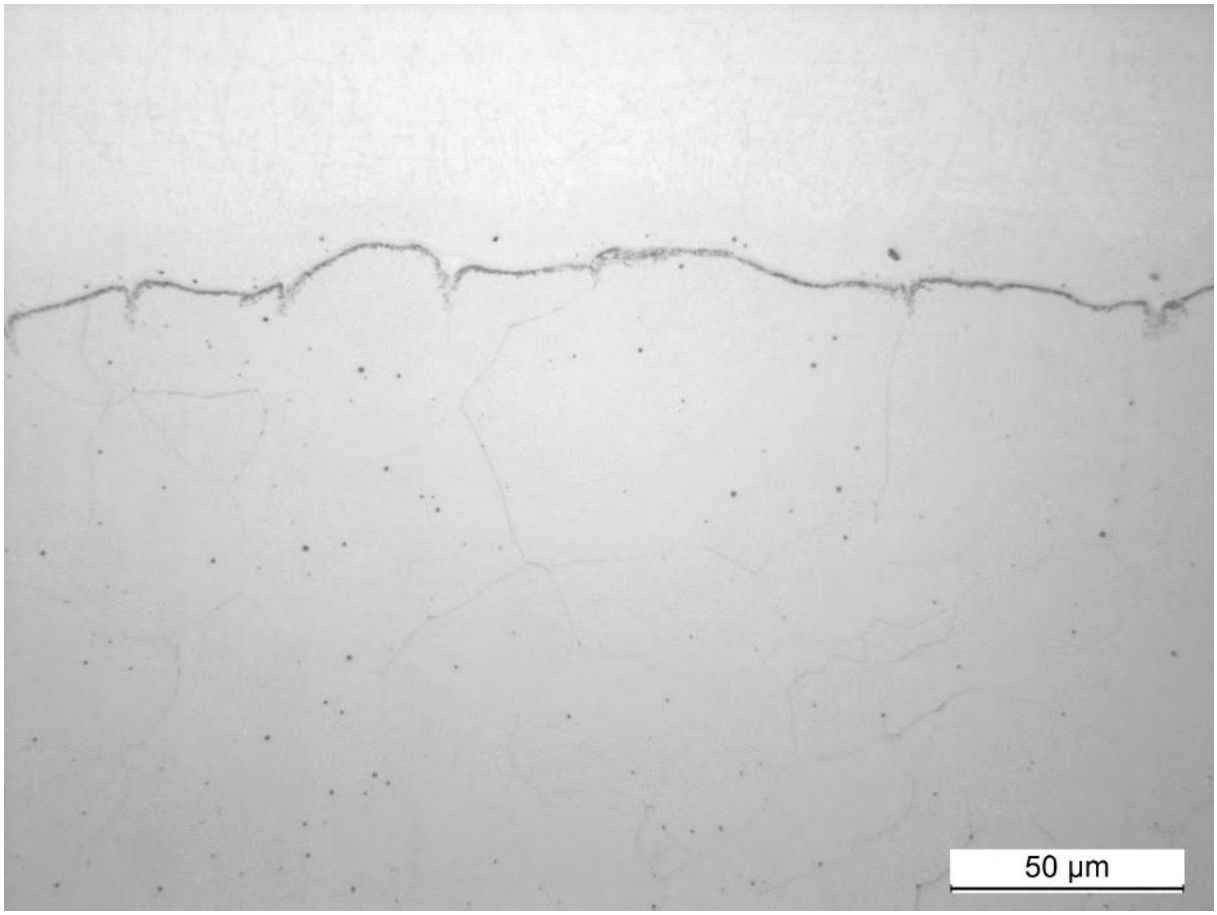
Kuva 74. San28, 650°C, 10 h.



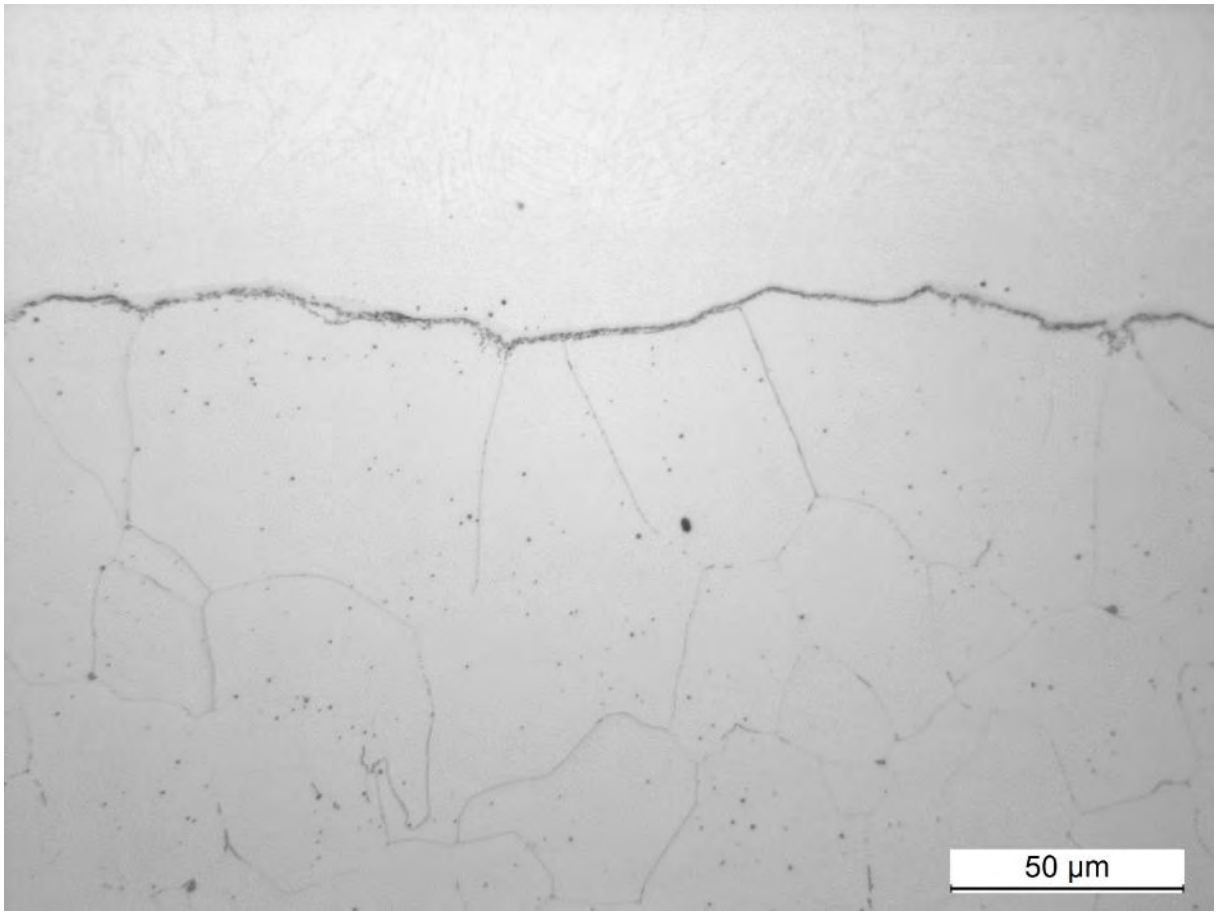
Kuva 75. San28, 650°C, 100 h.



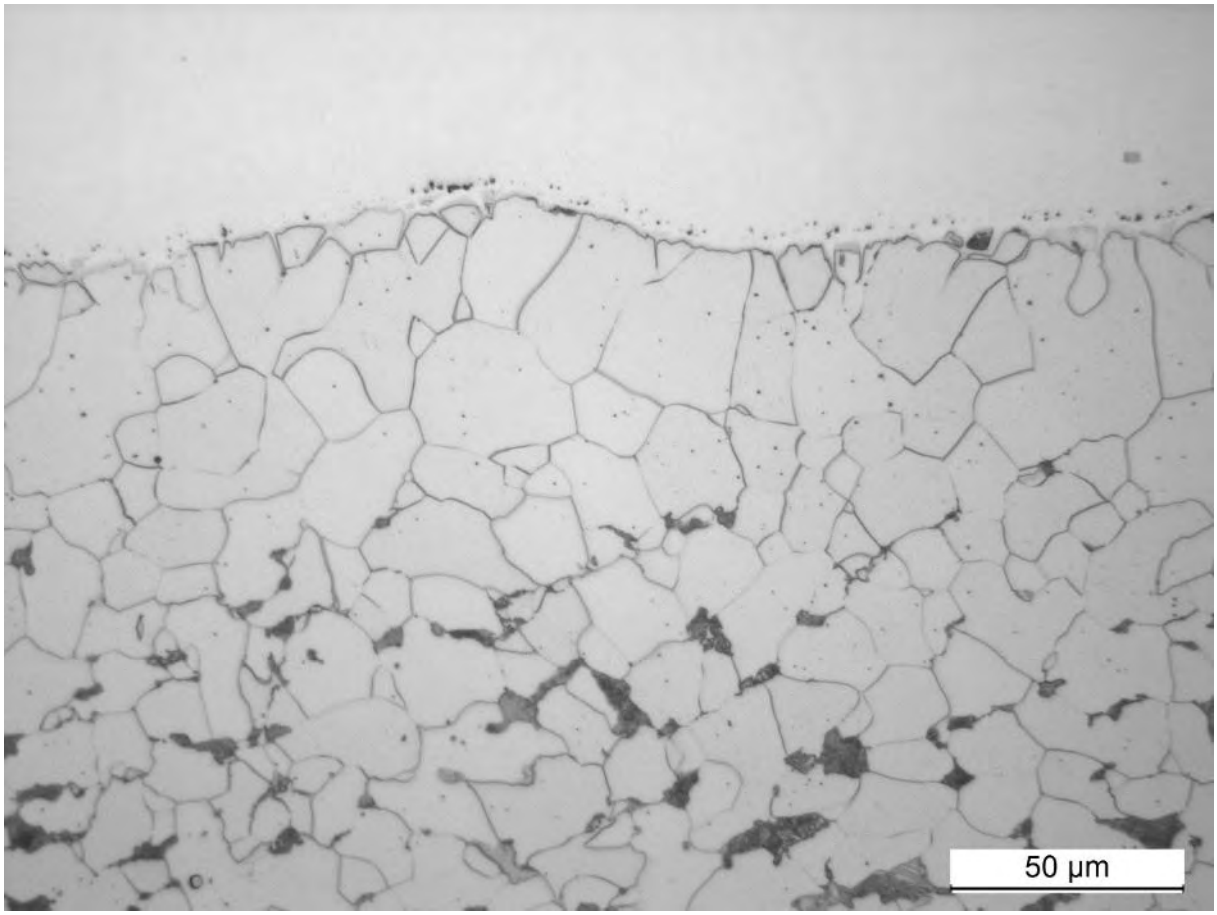
Kuva 76. San28, 650°C, 1000 h.



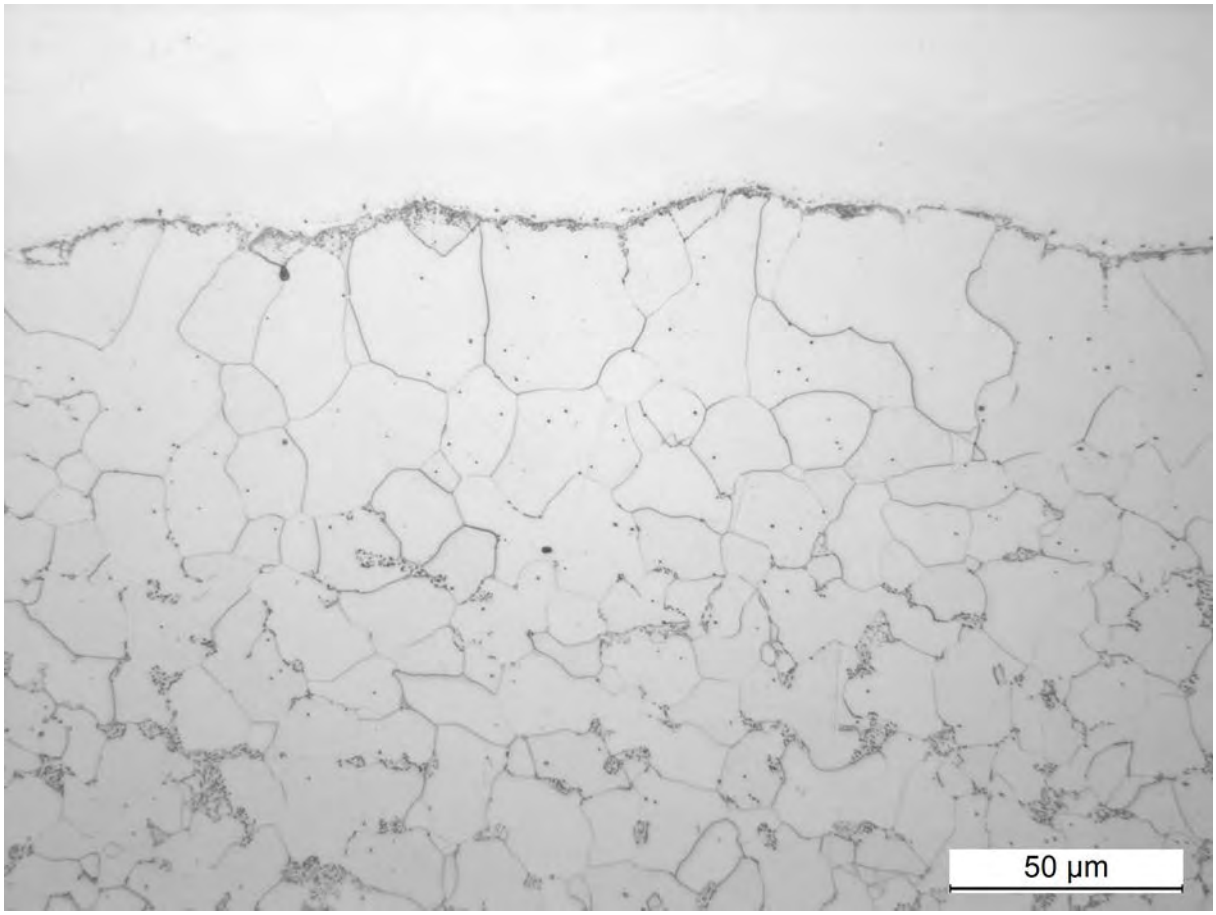
Kuva 77. San28, 700°C, 10 h.



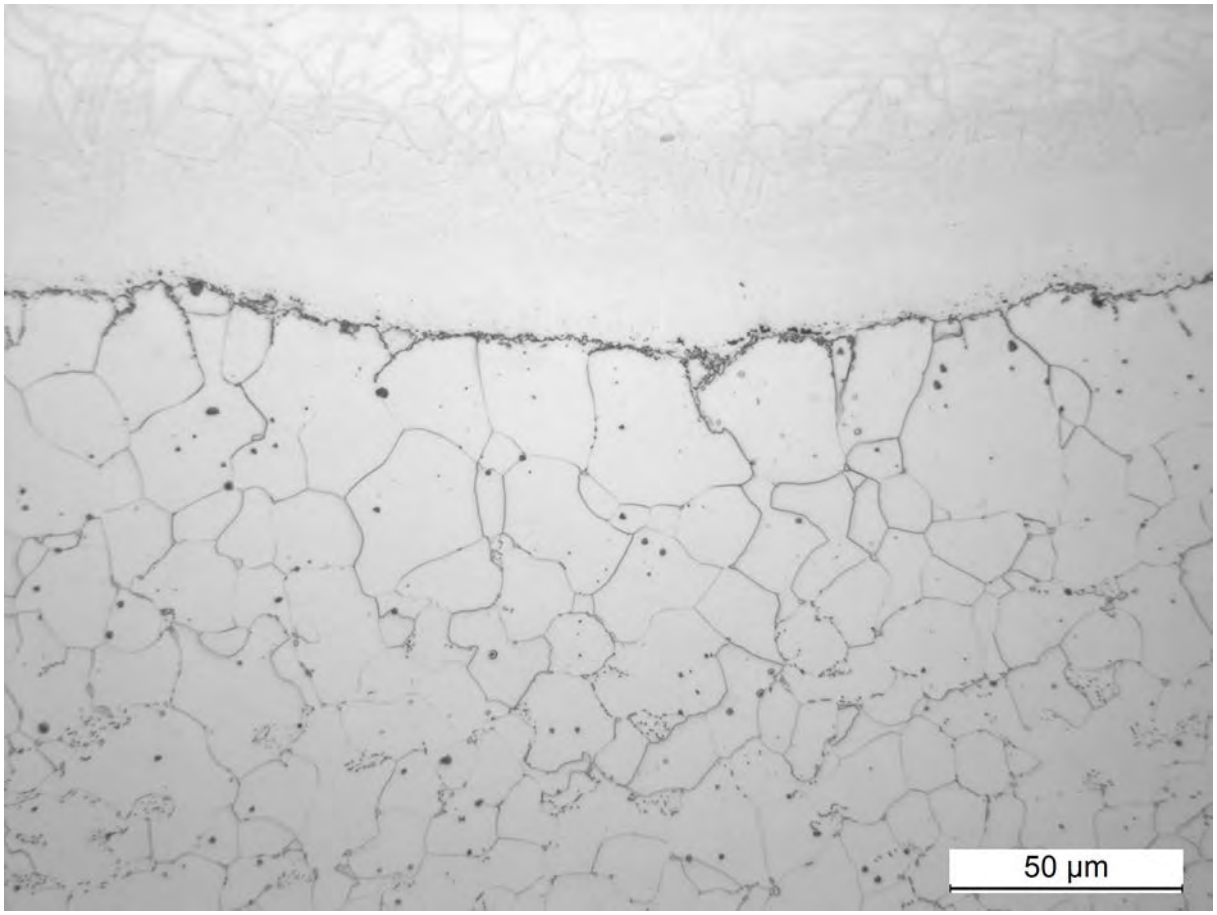
Kuva 78. San28, 700°C, 100 h.



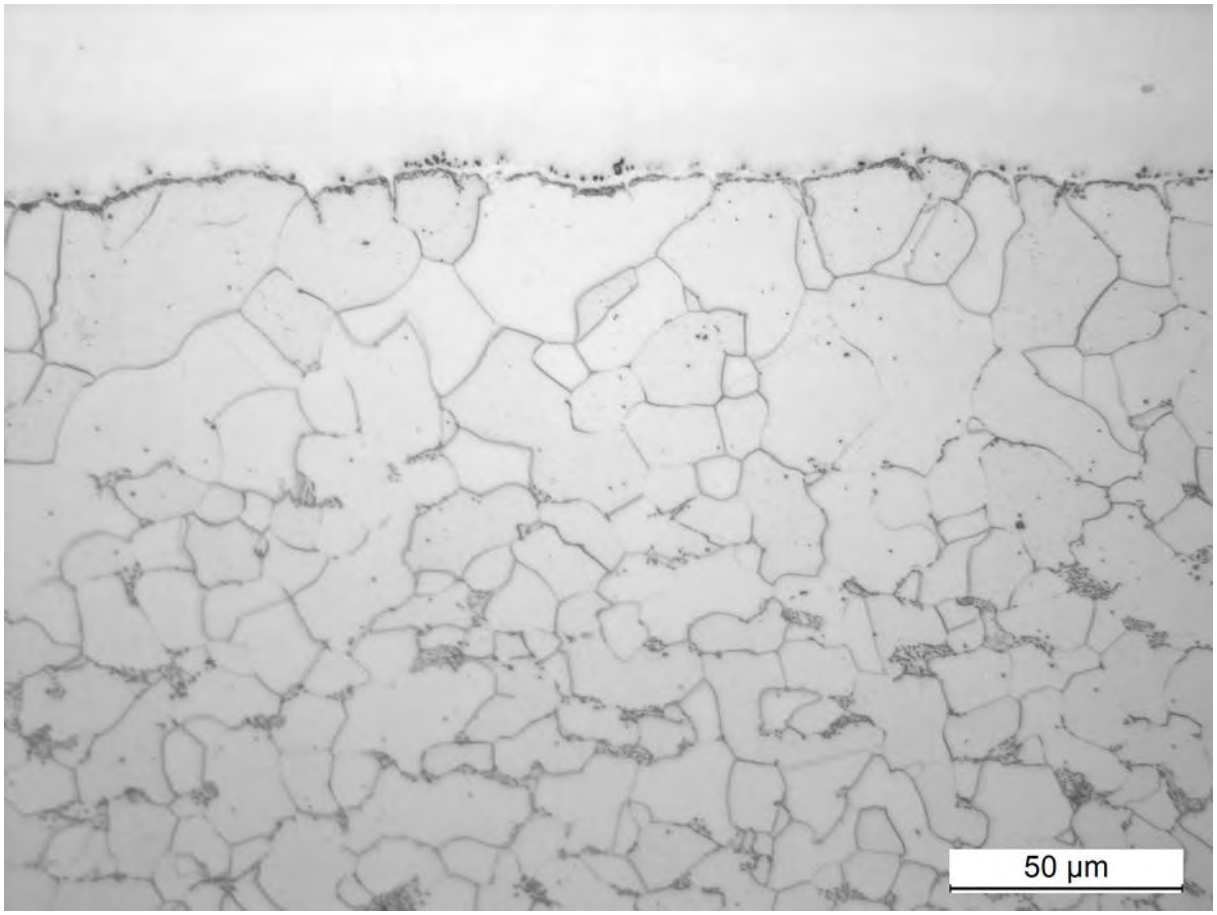
Kuva 79. San38 rajapinta, toimitustila.



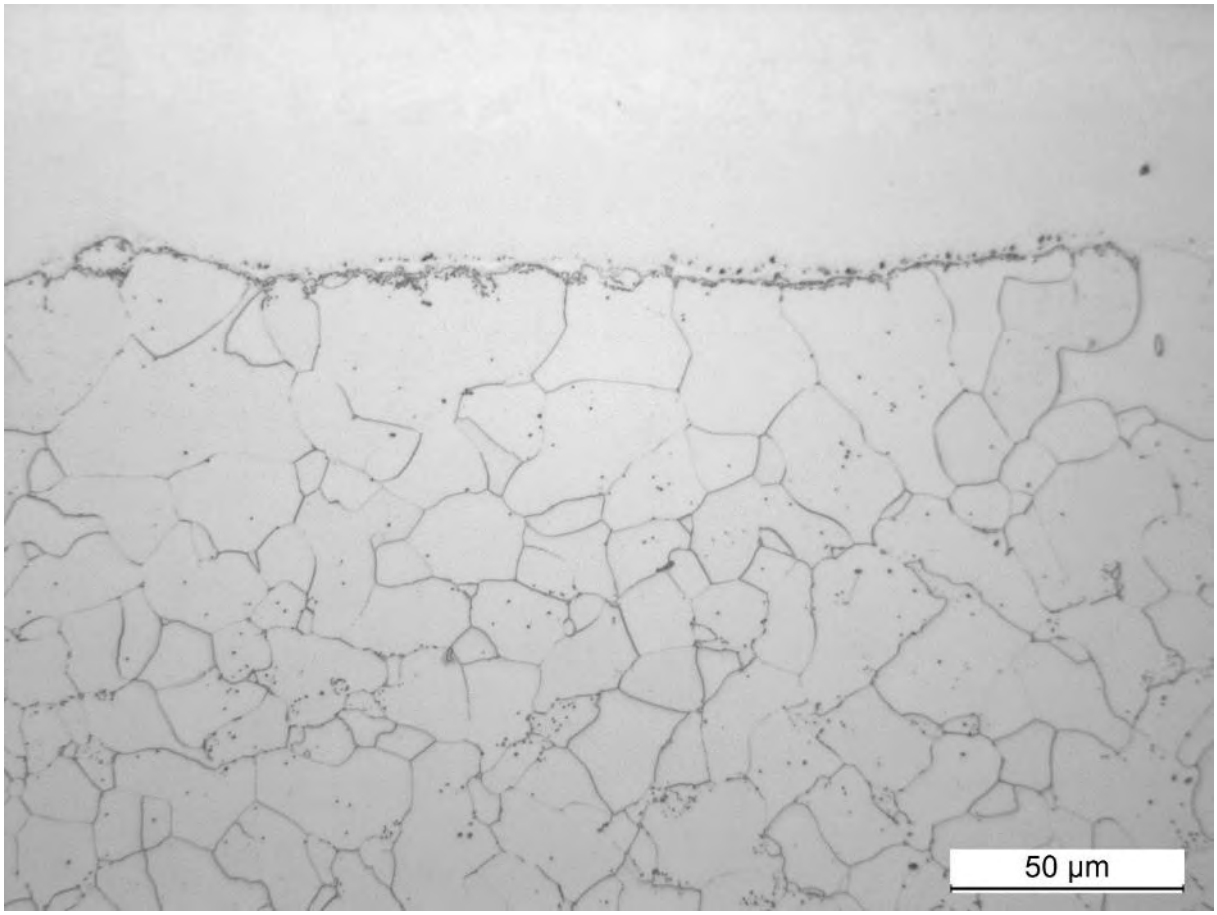
Kuva 80. San38, 600°C, 100 h.



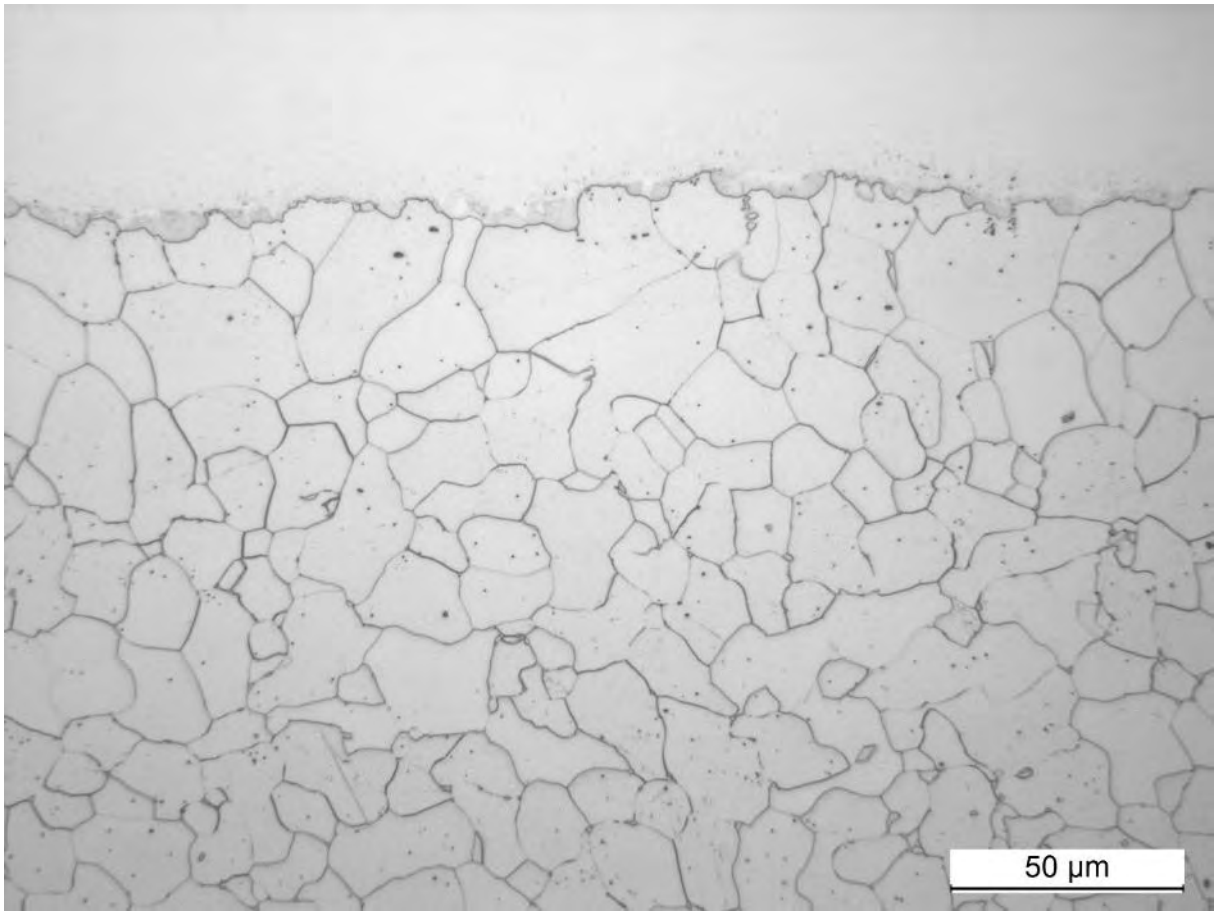
Kuva 81. San38 rajapinta, 600°C, 1000 h.



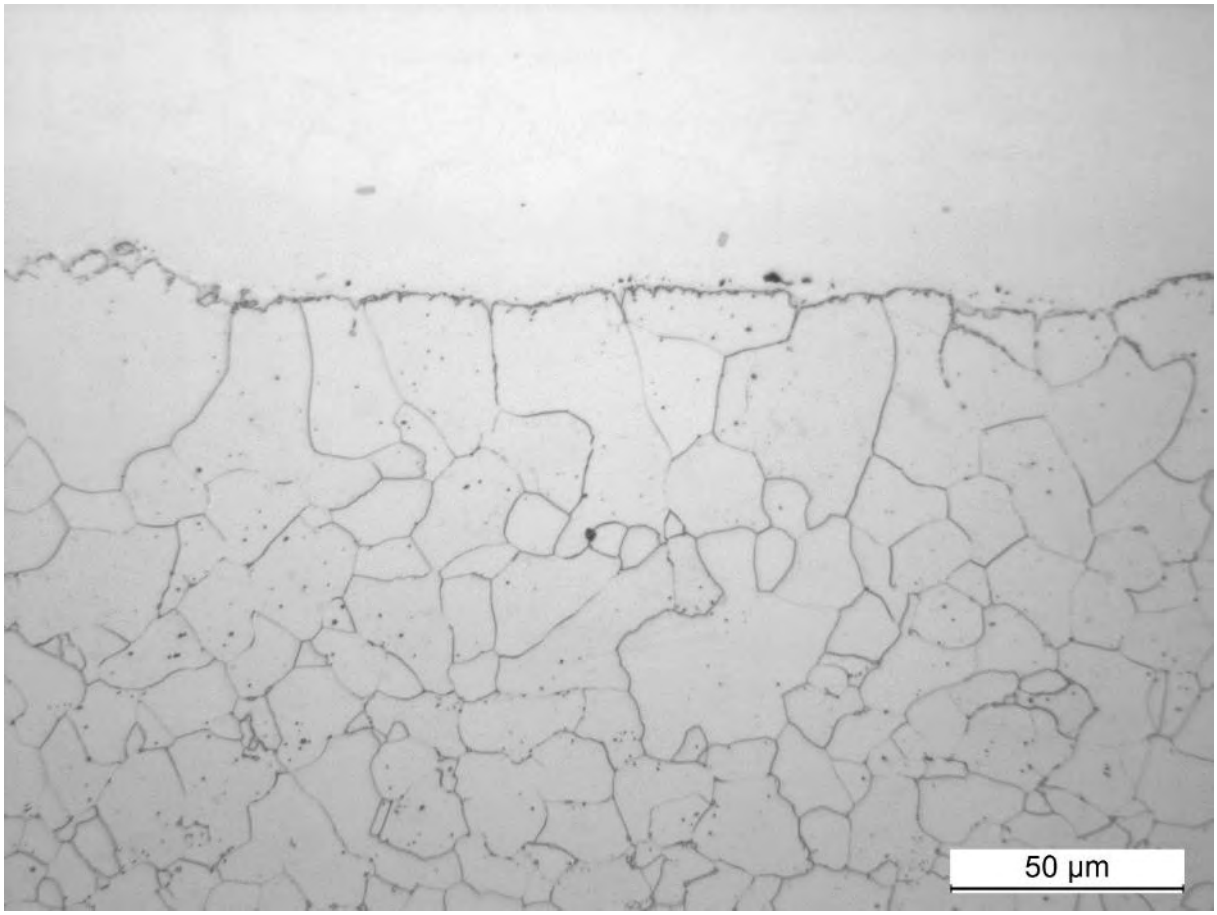
Kuva 82. San38, 650°C, 10 h.



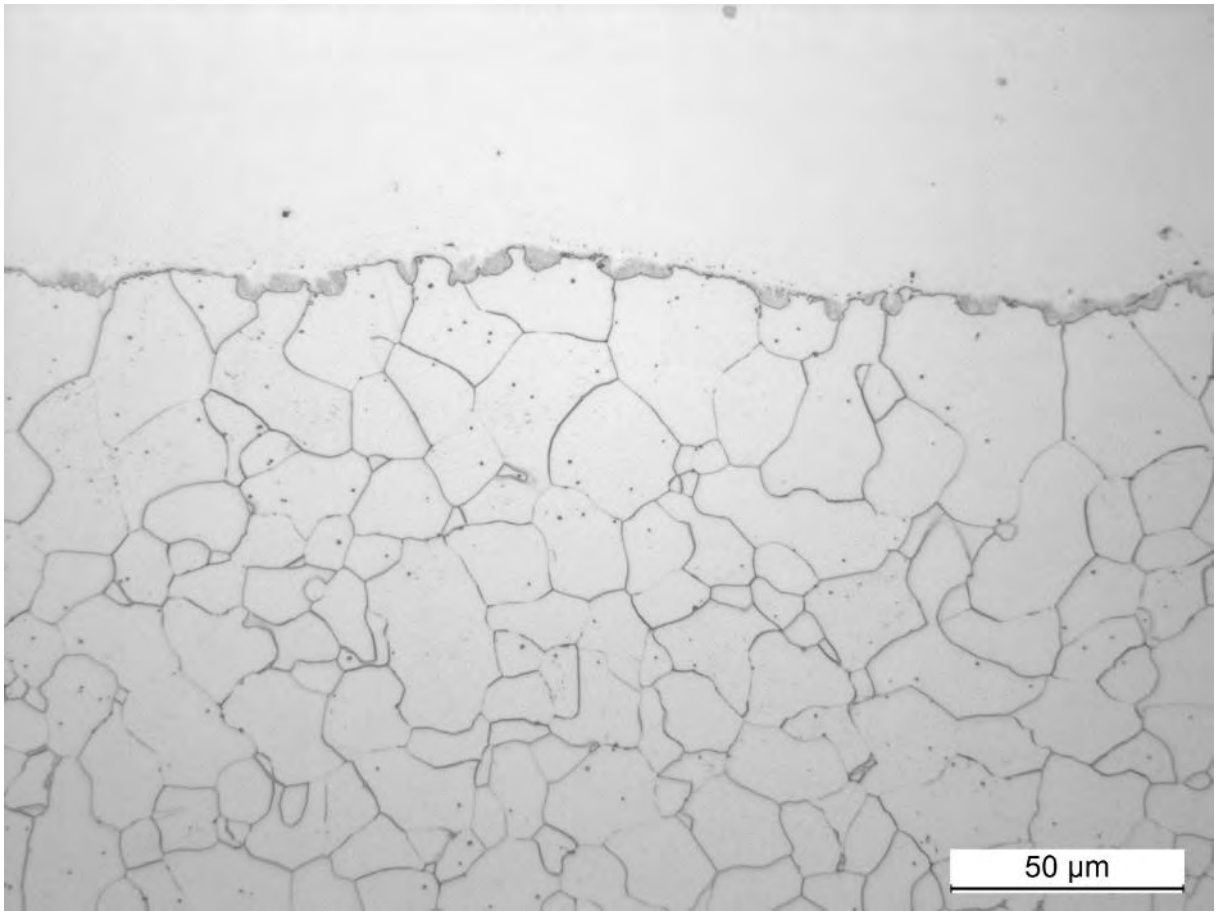
Kuva 83. San38, 650°C, 100 h.



Kuva 84. San38, 650°C, 1000 h.



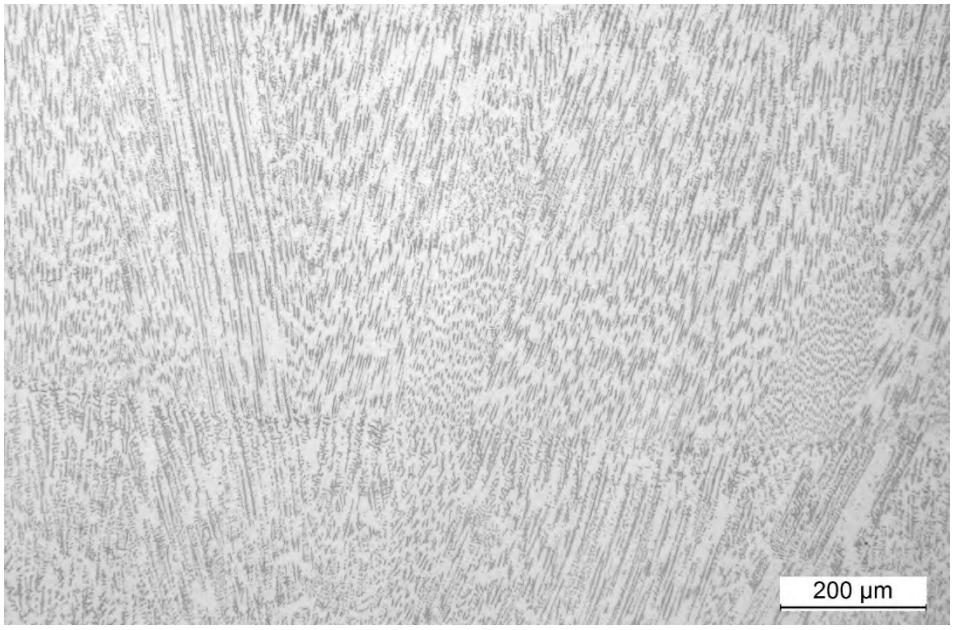
Kuva 85. San38, 700°C, 10 h.



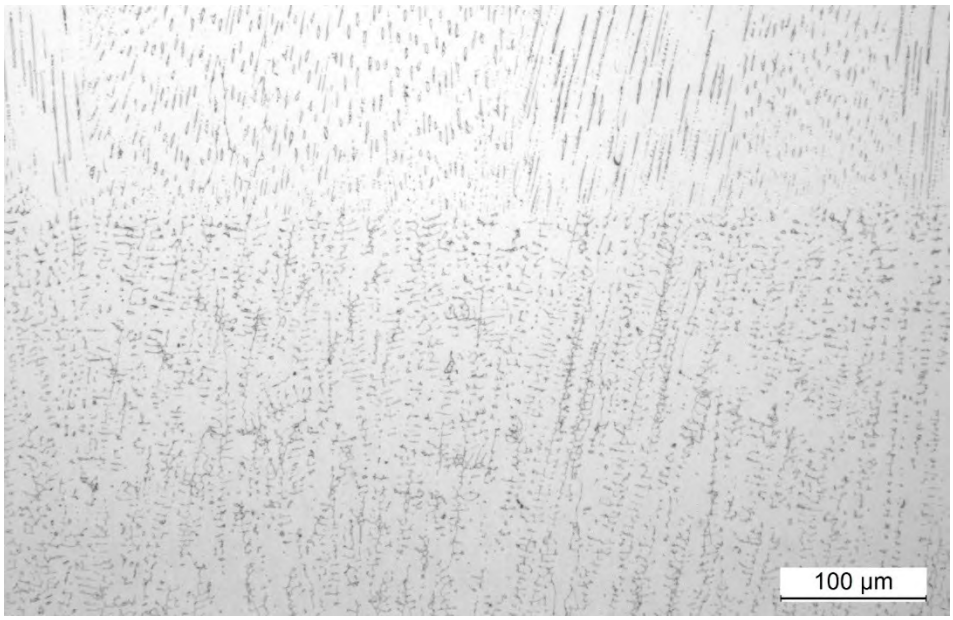
Kuva 86. San38, 700°C, 100 h.

Liite 3. Pinnoitteiden mikrorakenne hehkutuksen jälkeen.

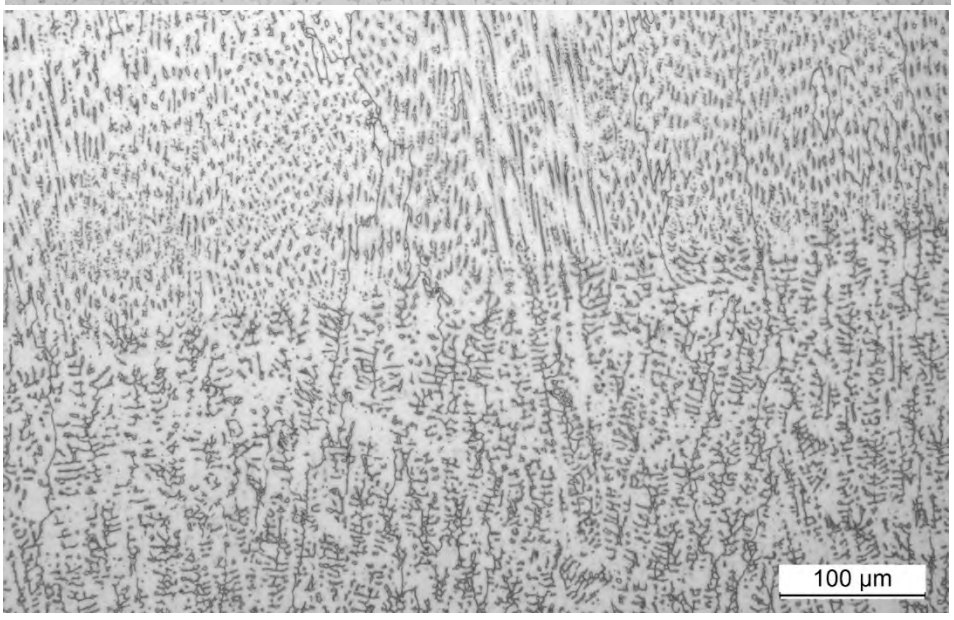
a



b

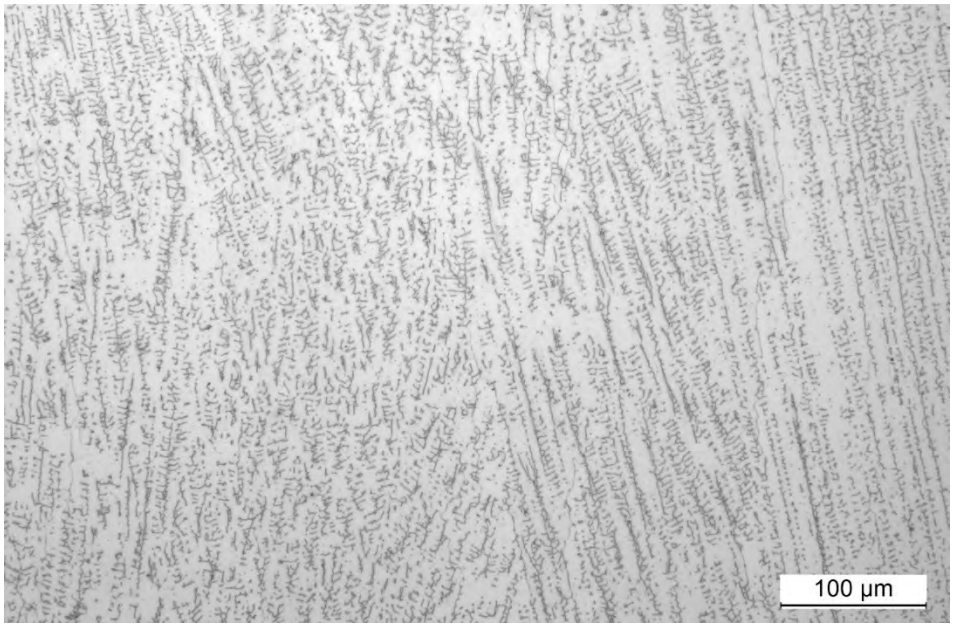


c

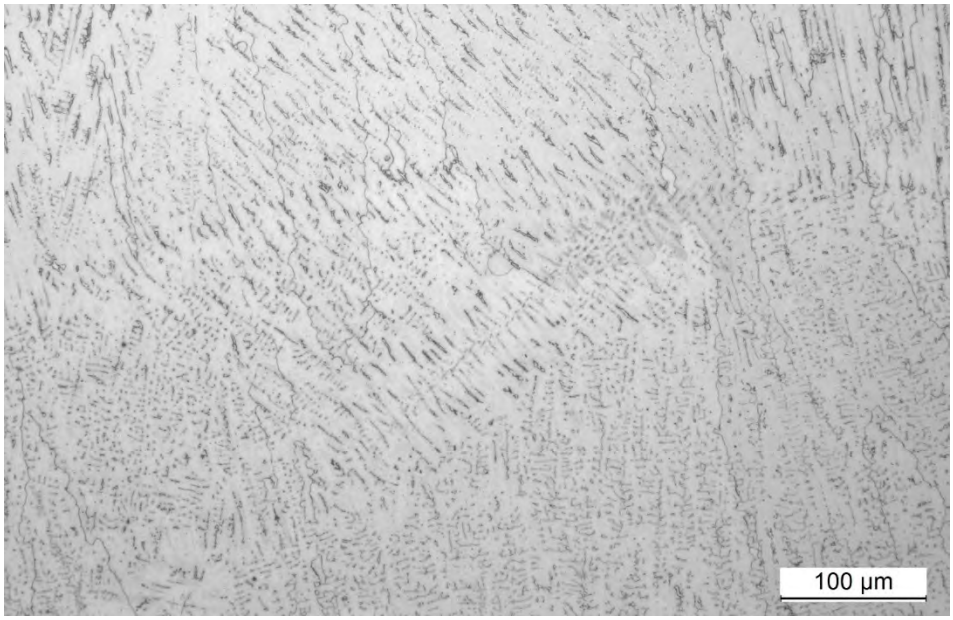


Kuva 1. 309 AZZ, a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.

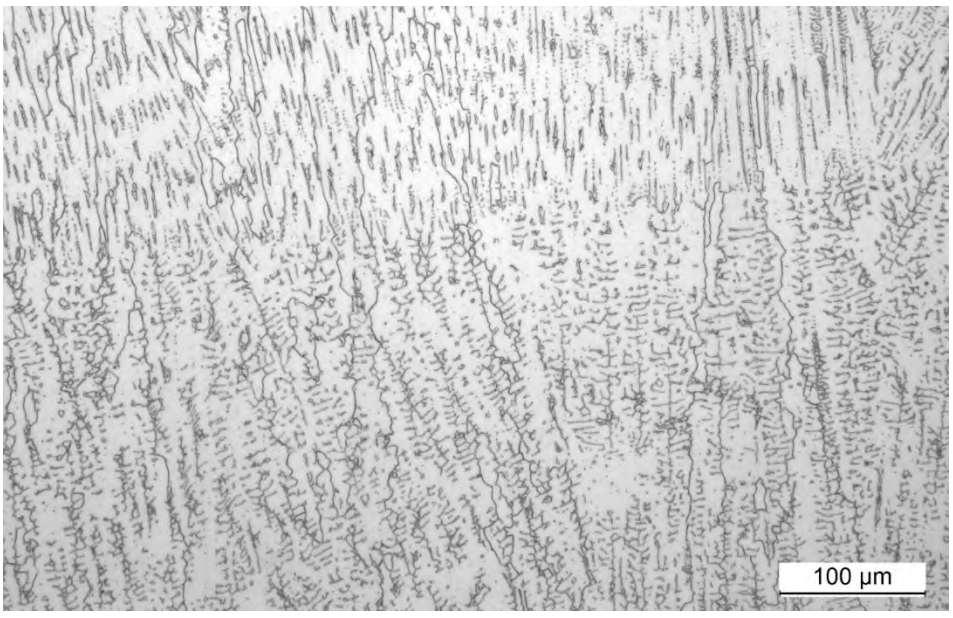
a



b

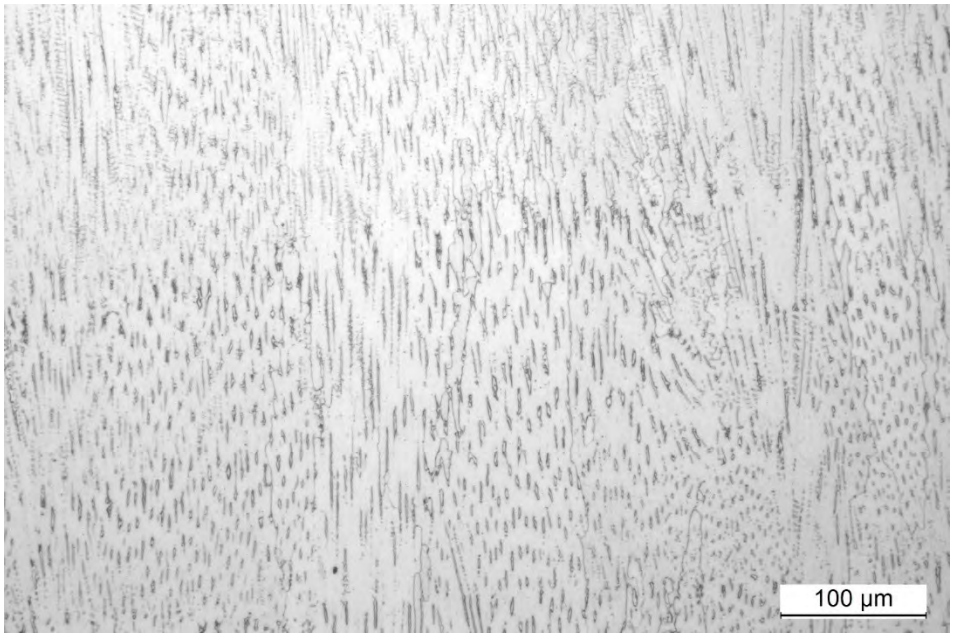


c

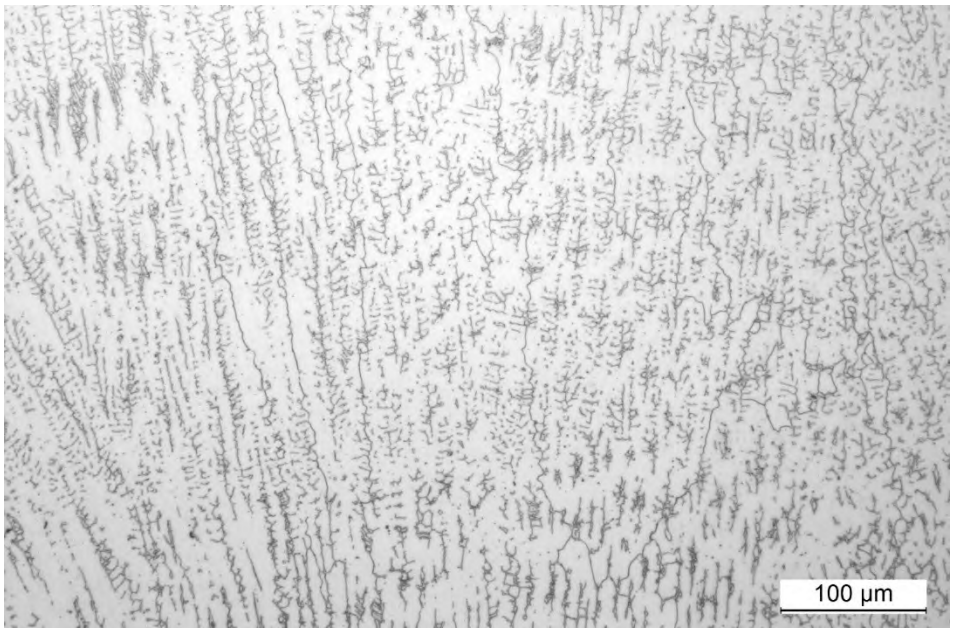


Kuva 2. 309 AZZ, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

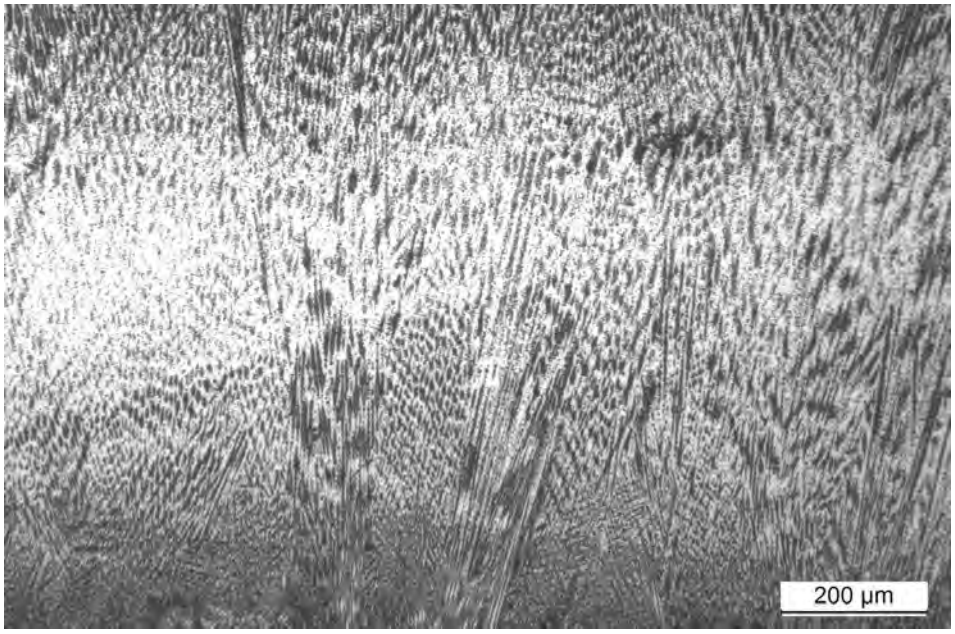


b

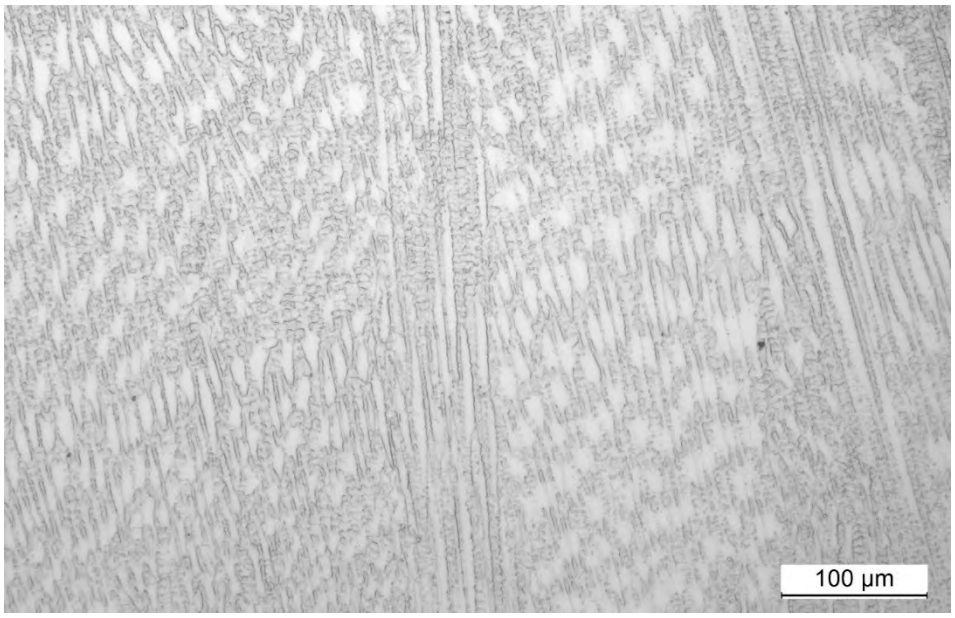


Kuva 3. 309 AZZ, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

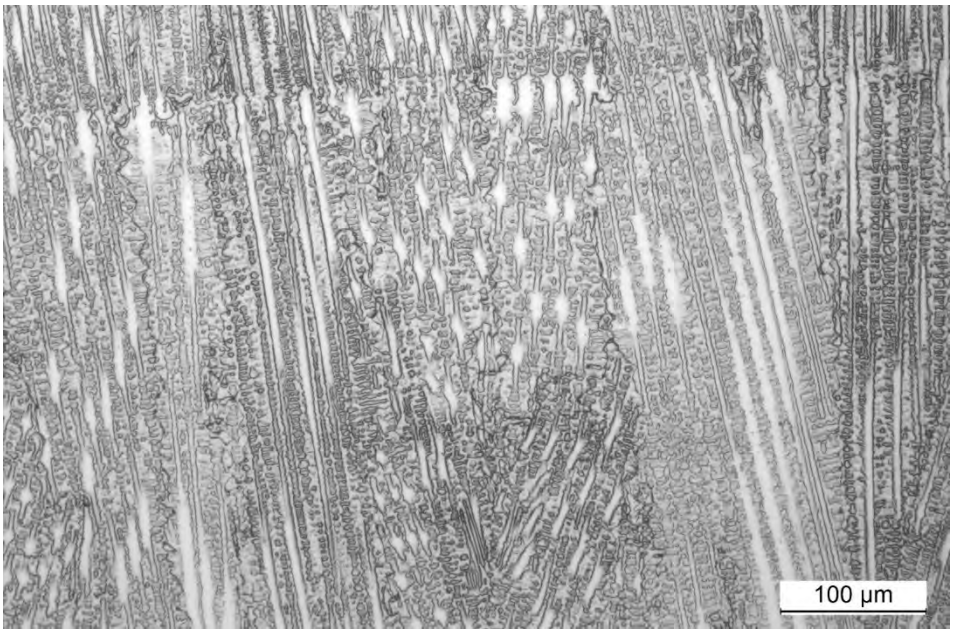
a



b

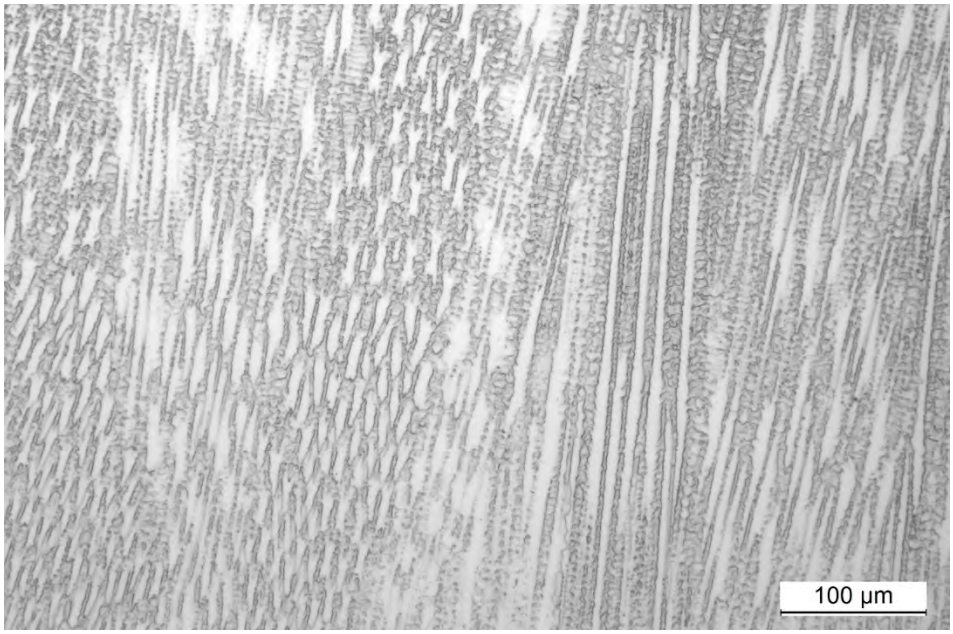


c

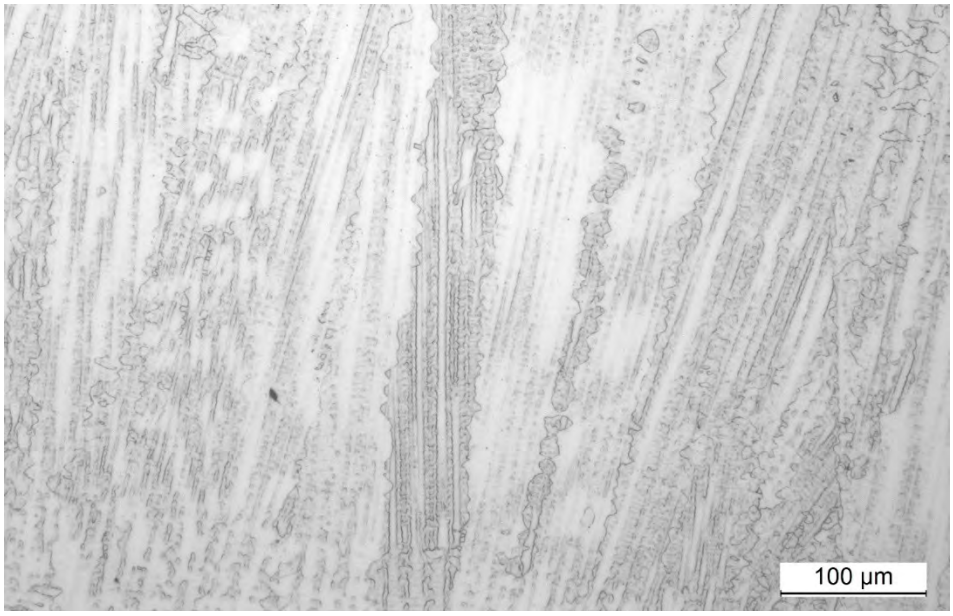


Kuva 4. IN625 AZZ, a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom suurennos.

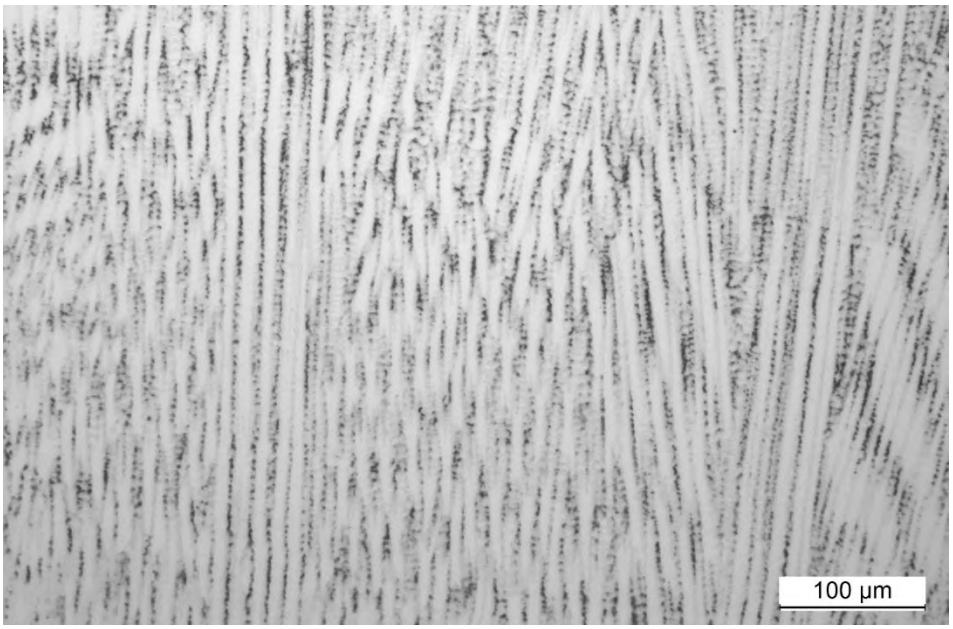
a



b

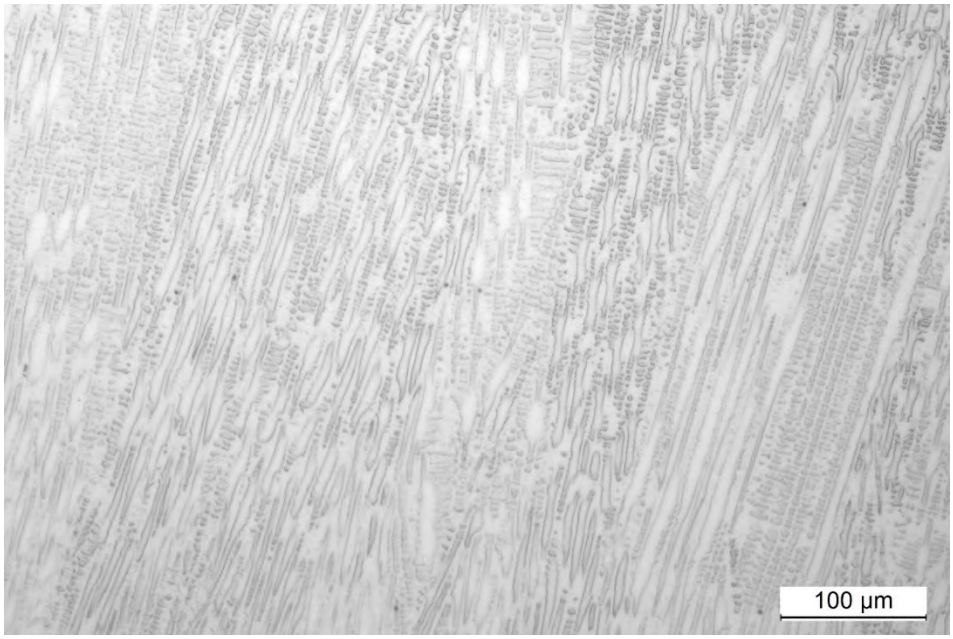


c

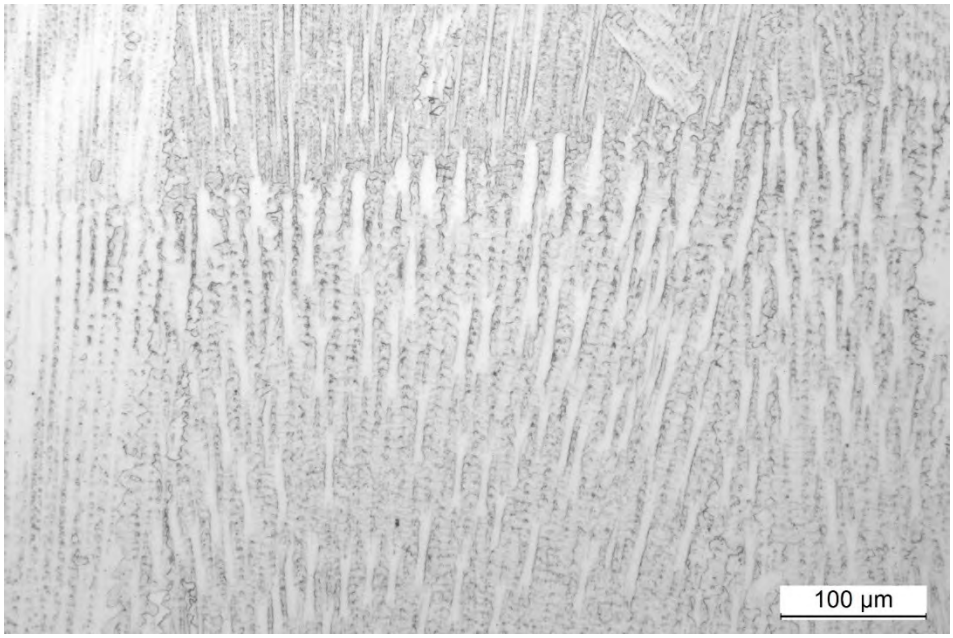


Kuva 5. IN625 AZZ, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

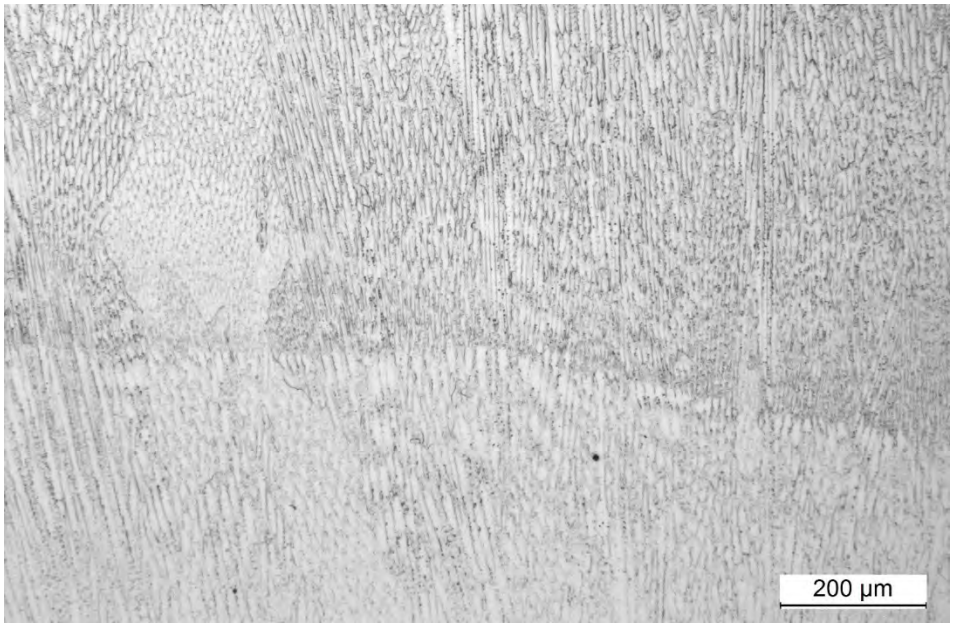


b

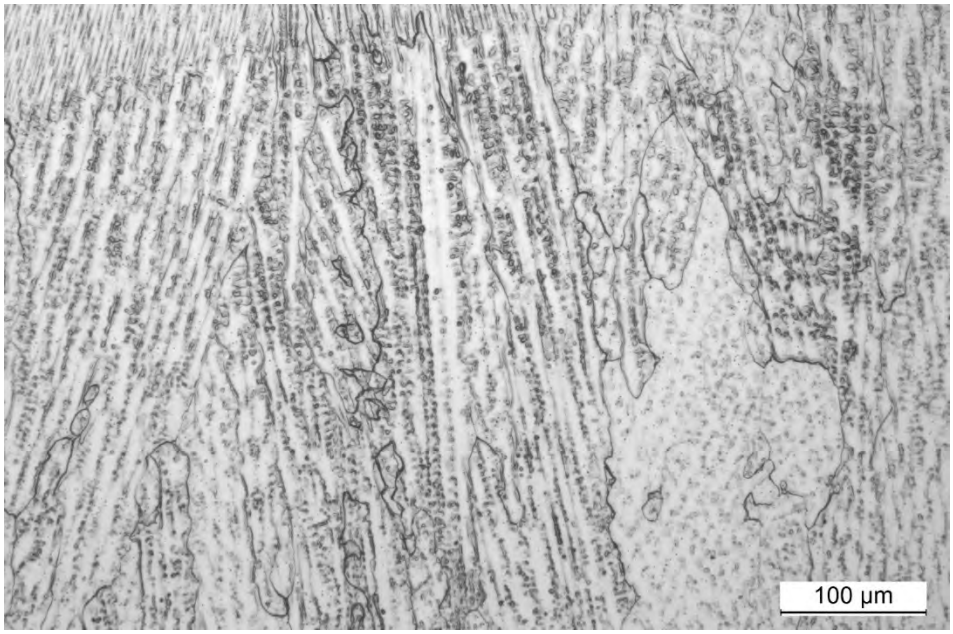


Kuva 6. IN625 AZZ, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

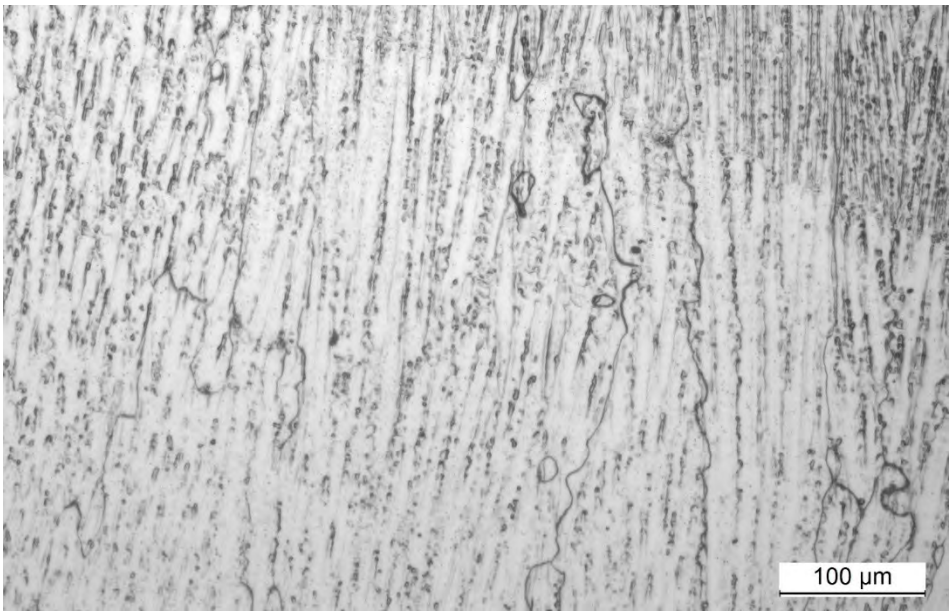
a



b

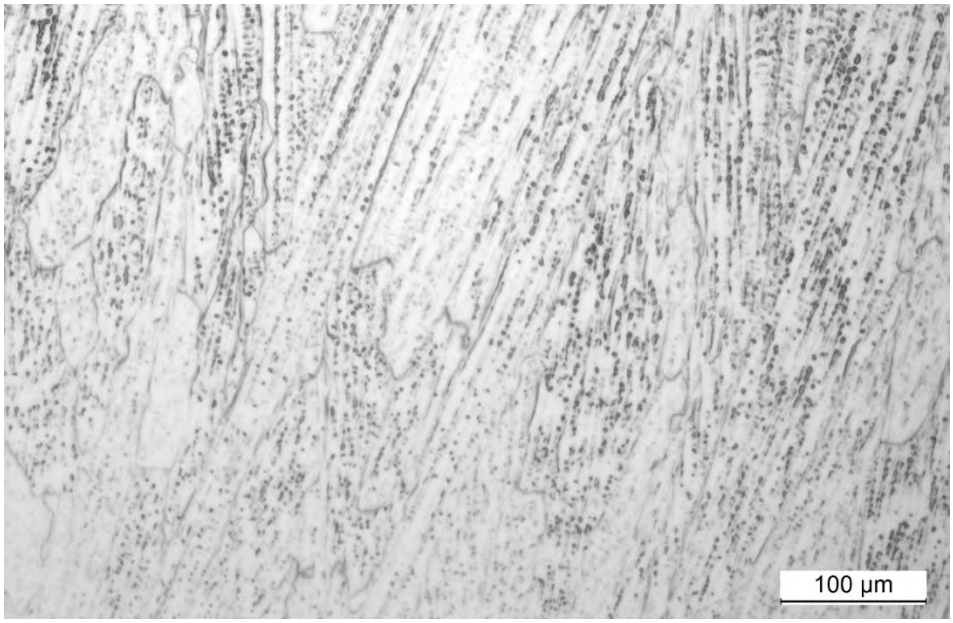


c

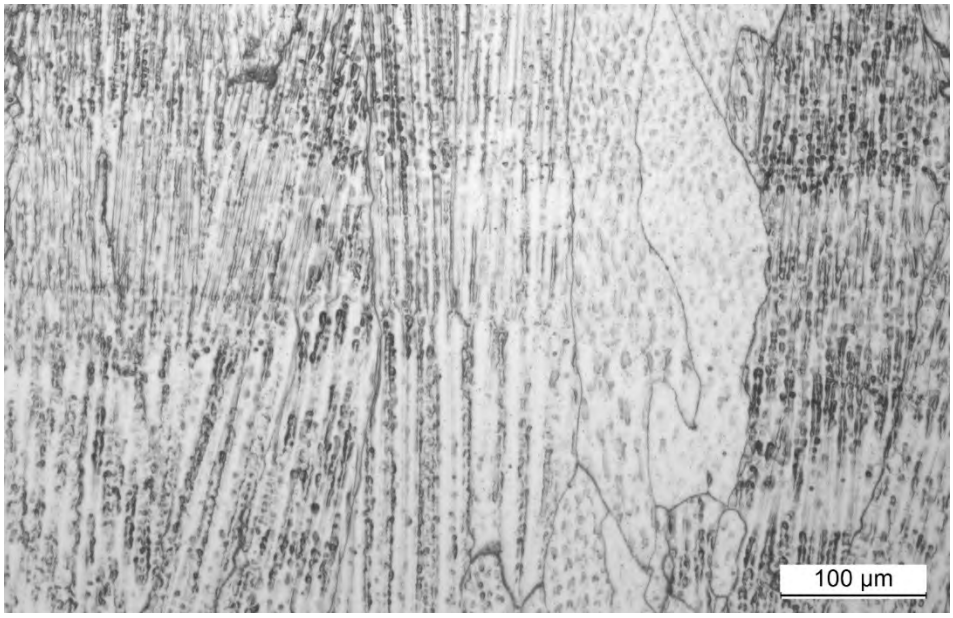


Kuva 7. IN825 AZZ, toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.

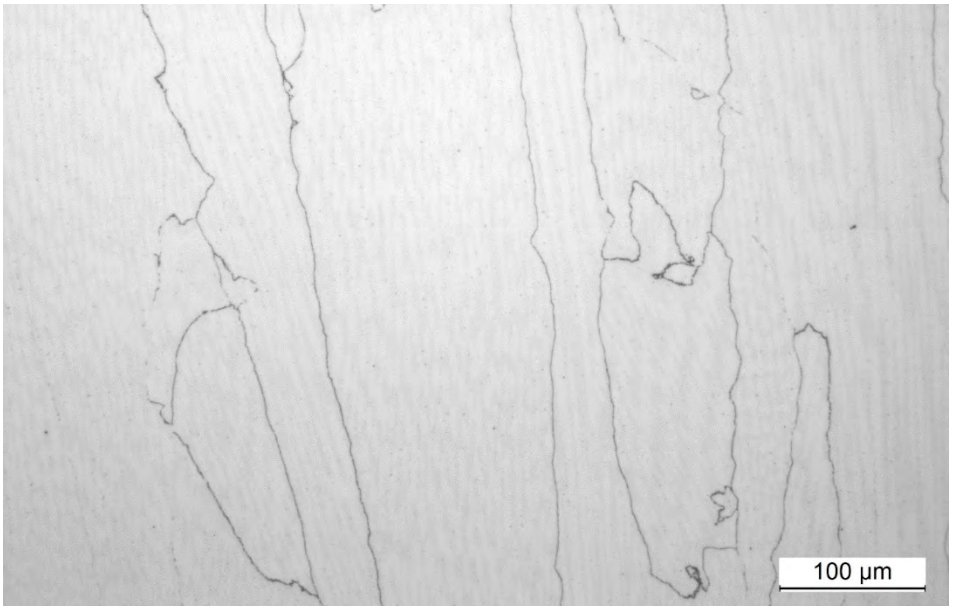
a



b

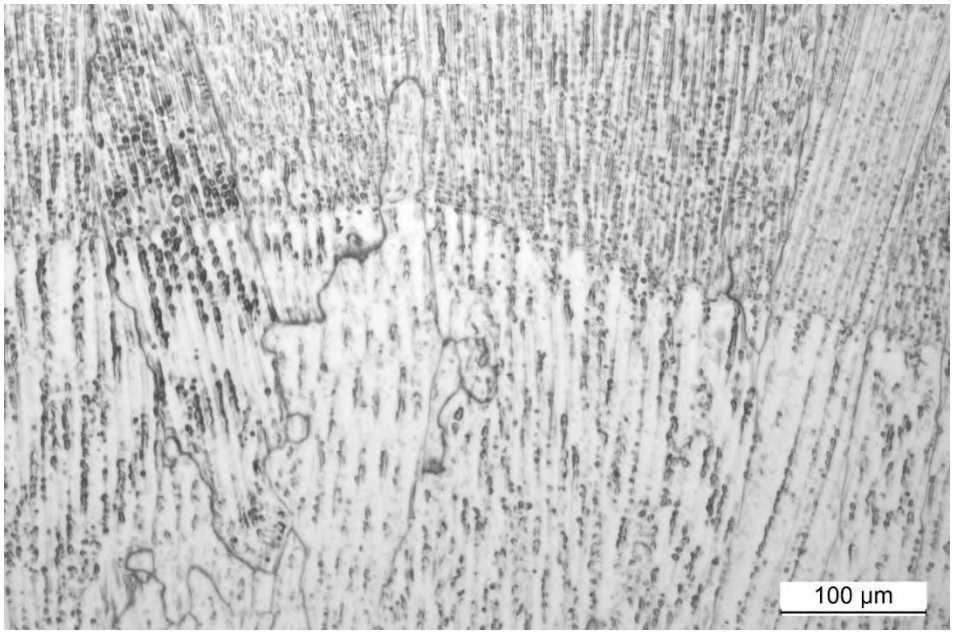


c

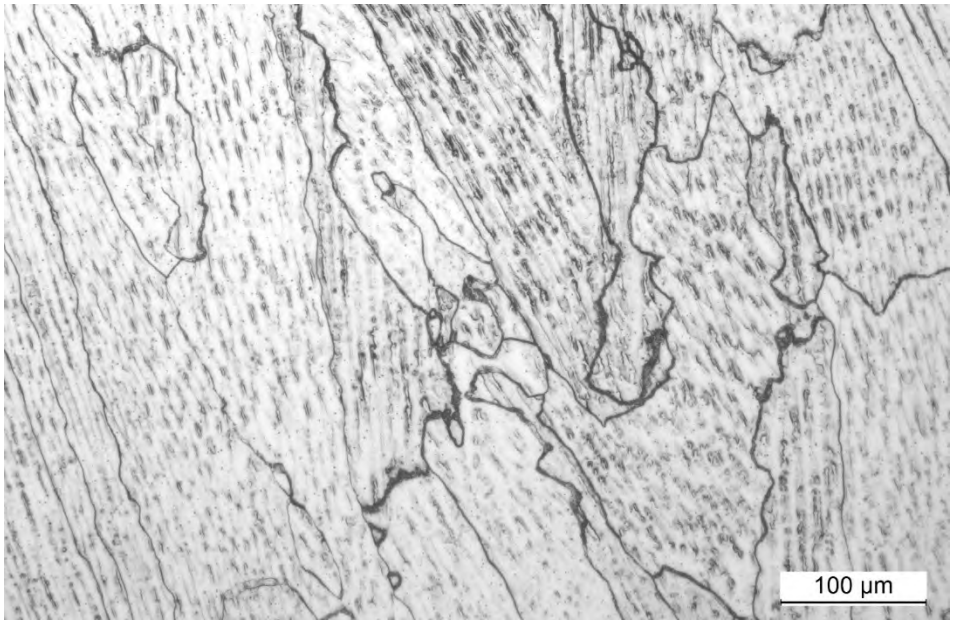


Kuva 8. IN825 AZZ, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a



b

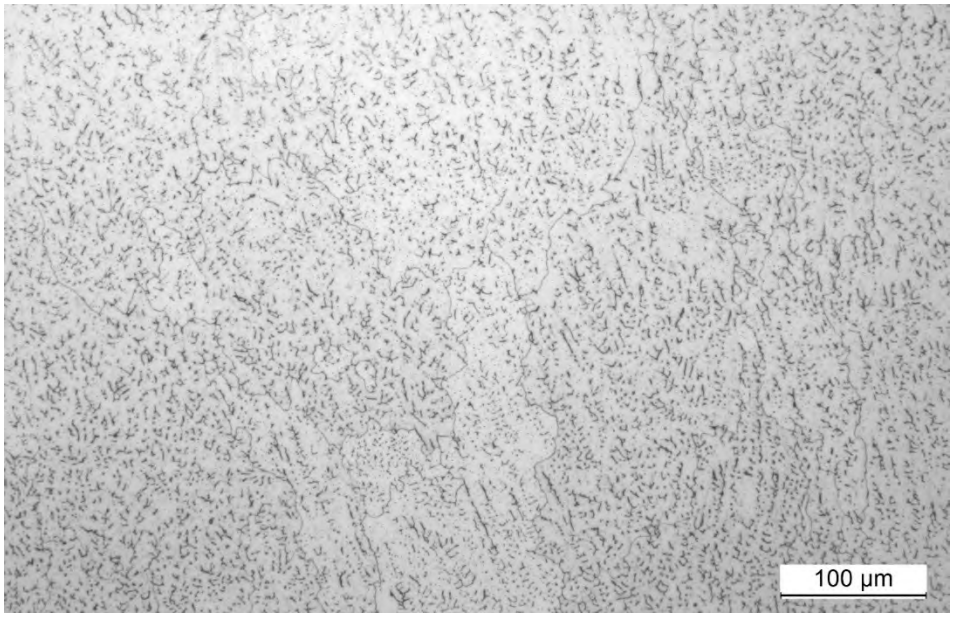


Kuva 9. IN825 AZZ, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

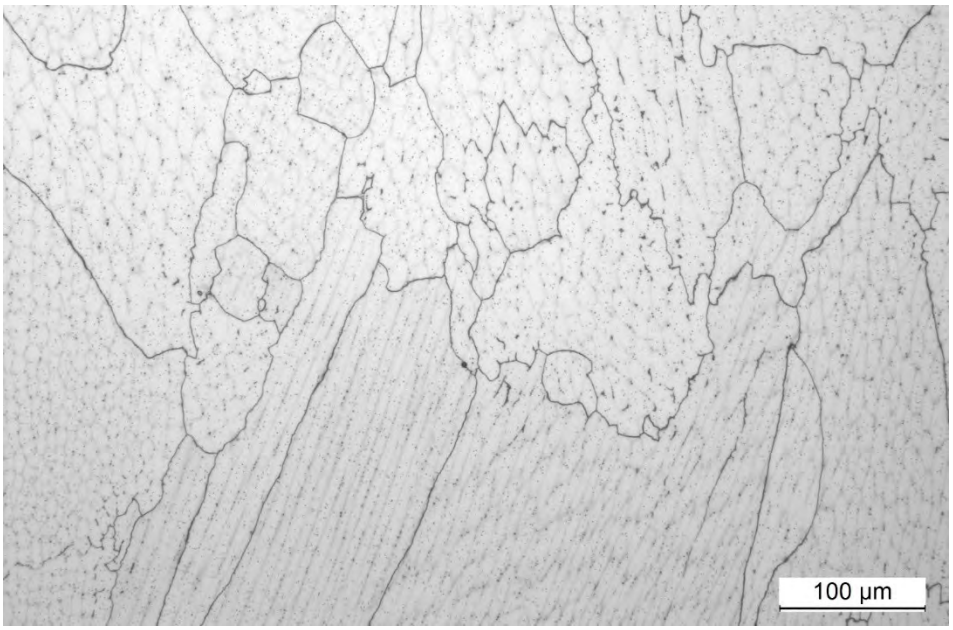
a



b

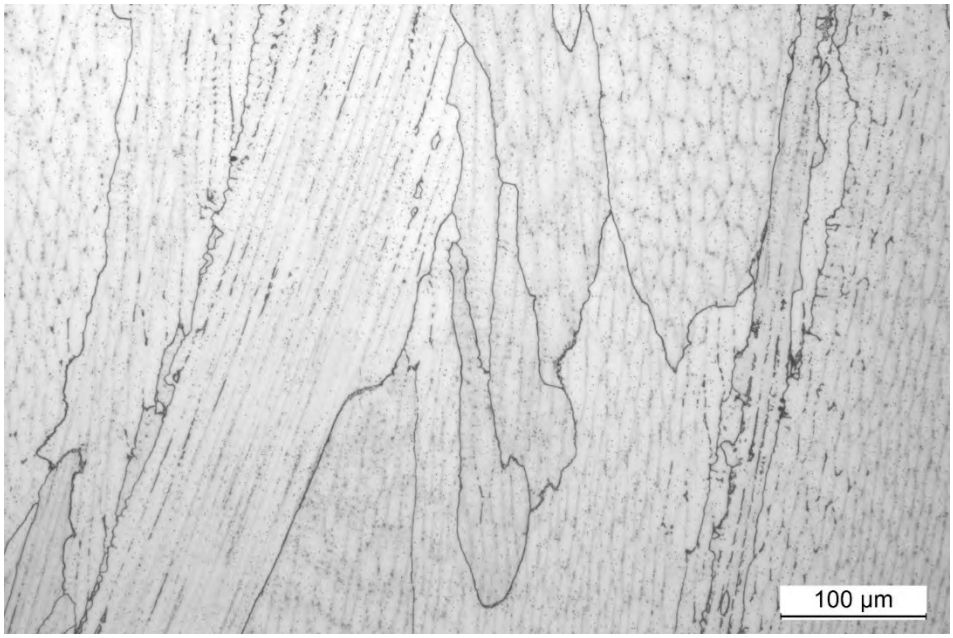


c

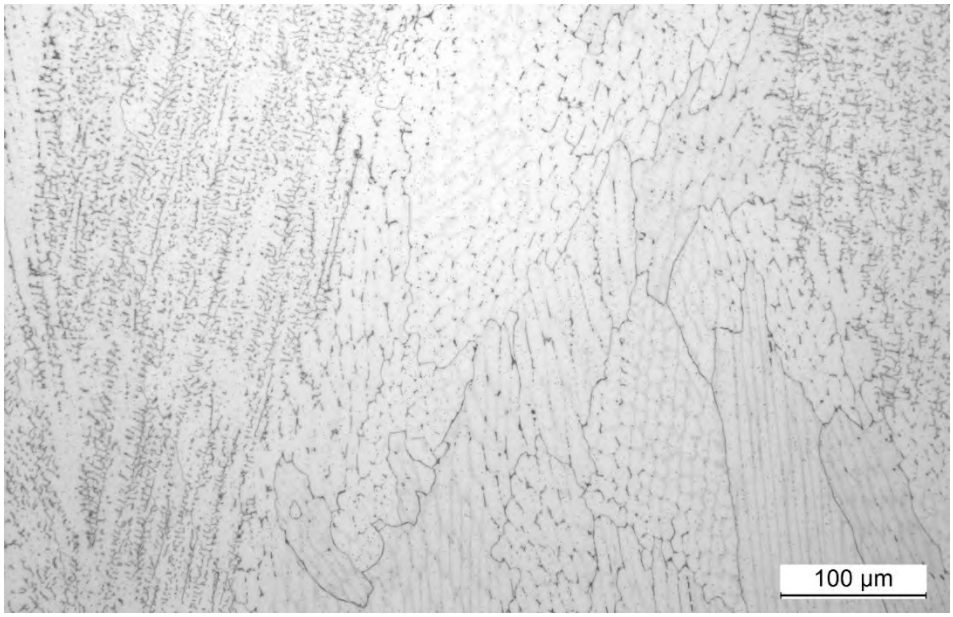


Kuva 10. 309 Uhlig, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom suur.

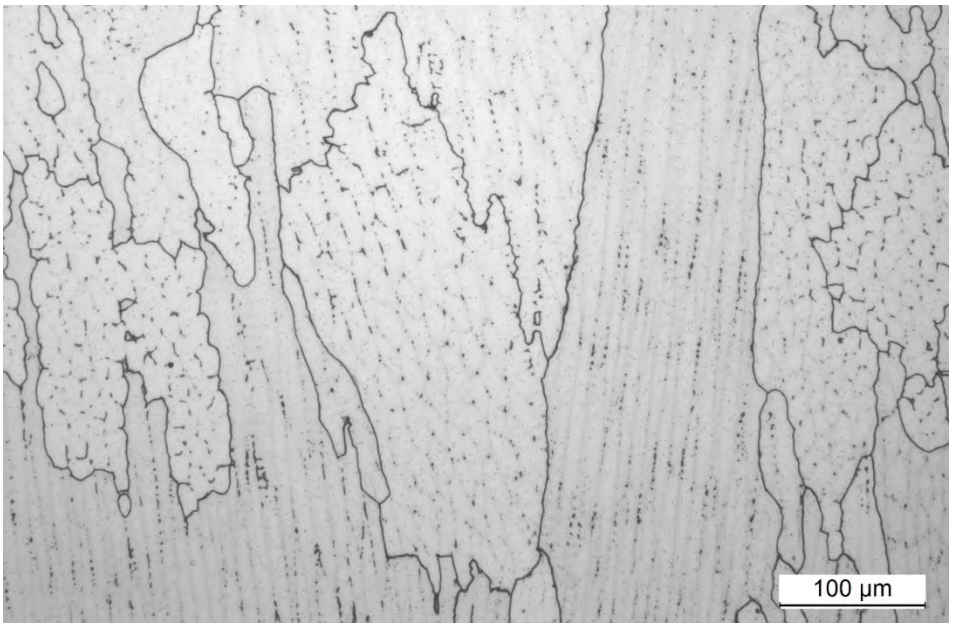
a



b

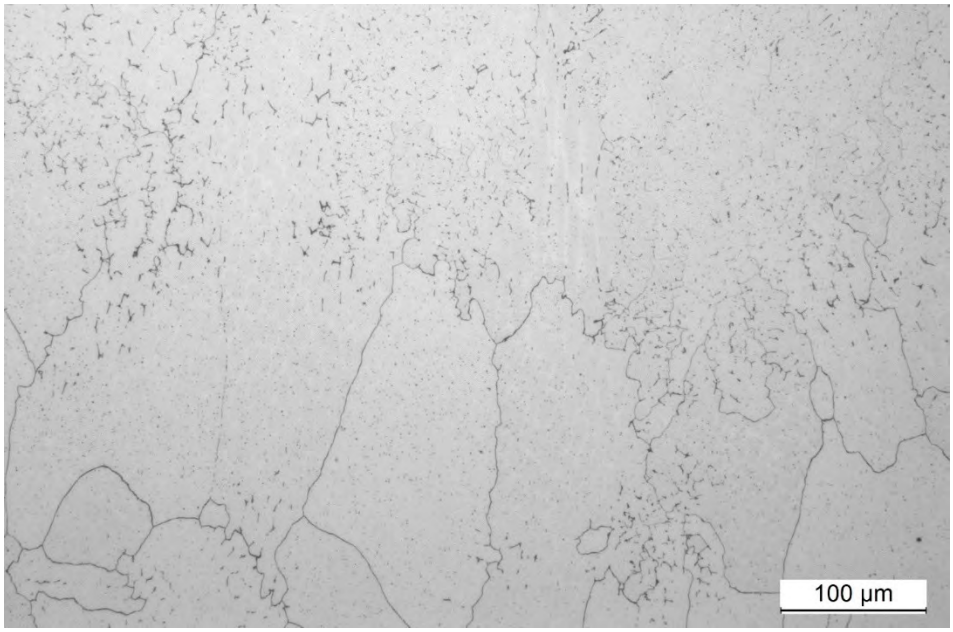


c

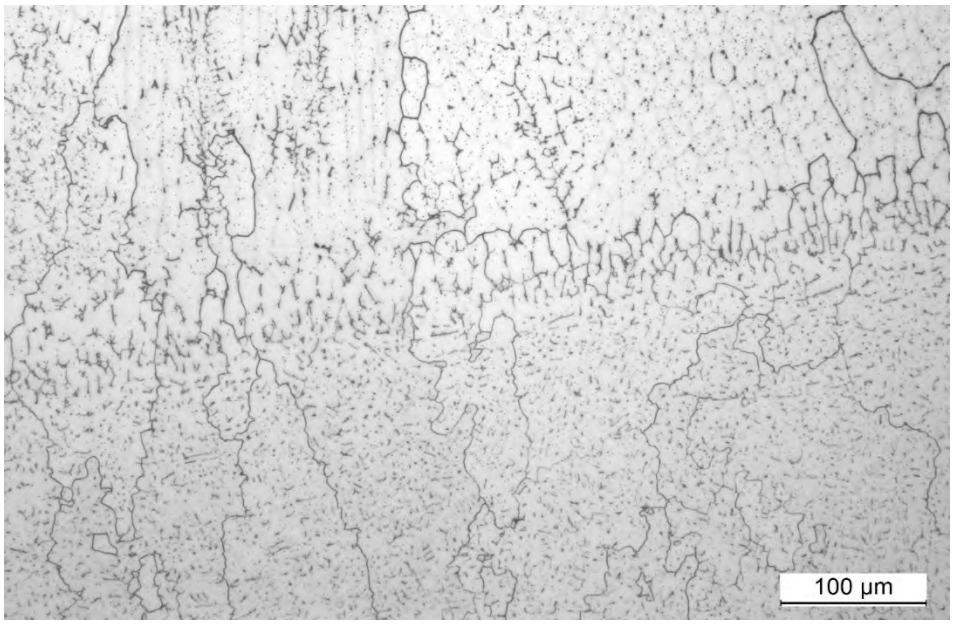


Kuva 11. 309 Uhlig a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

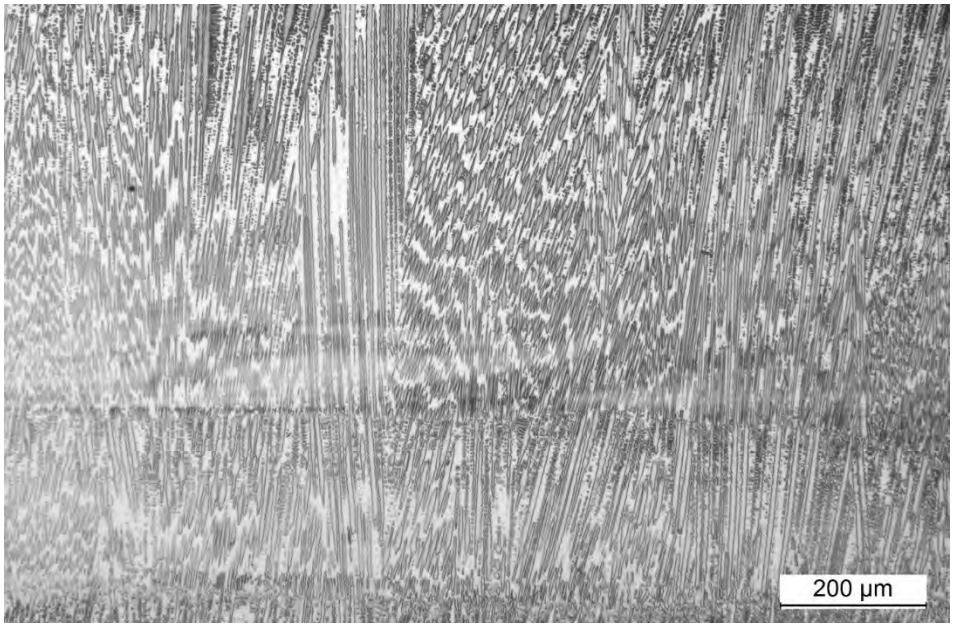


b

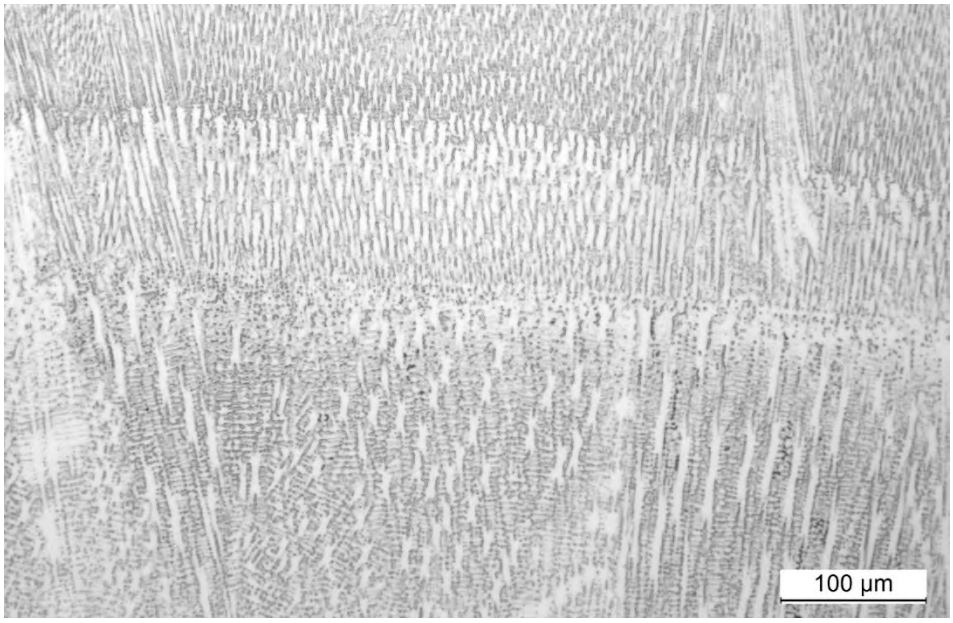


Kuva 12. 309 Uhlig, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

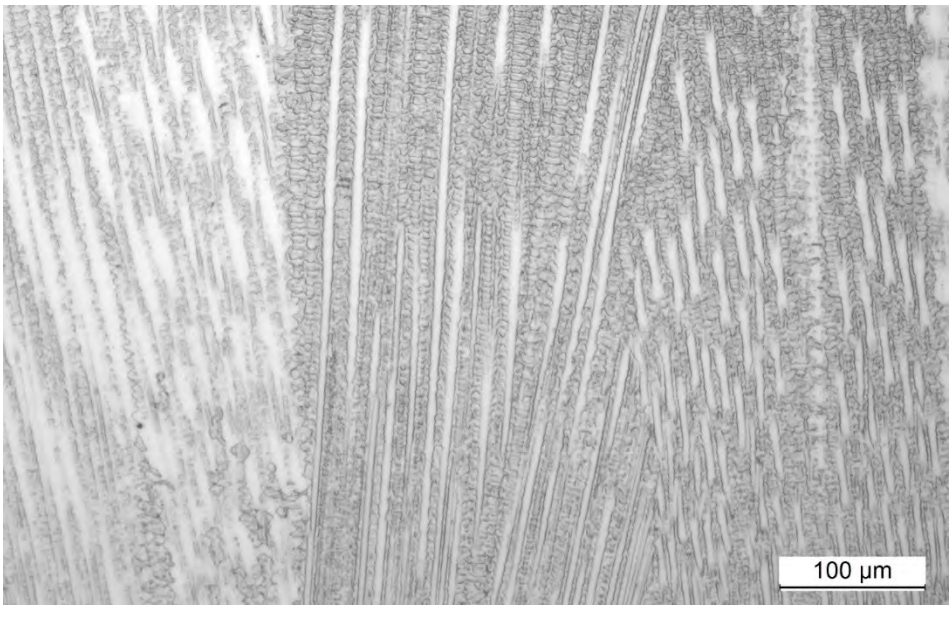
a



b

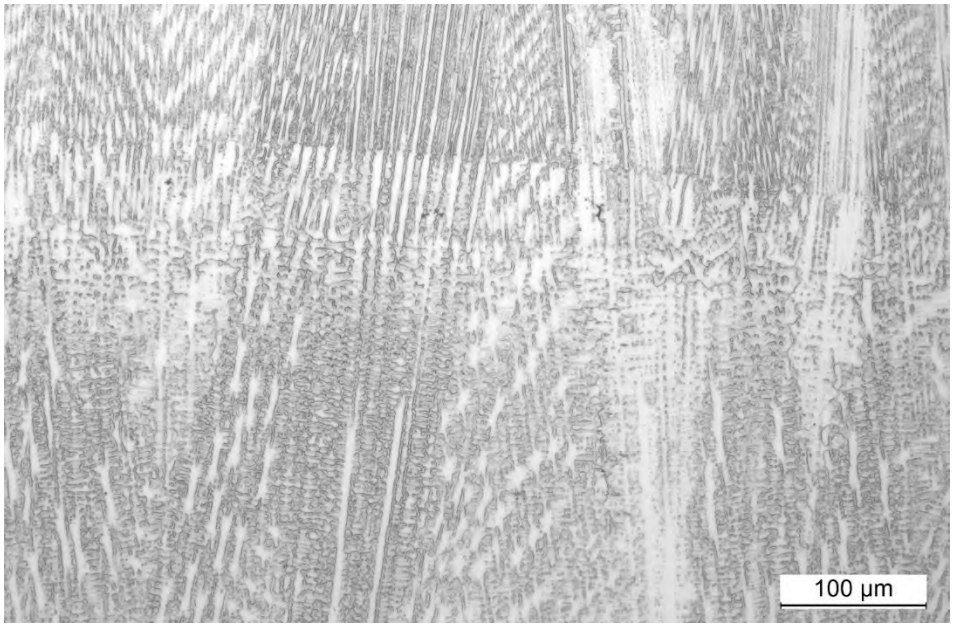


c

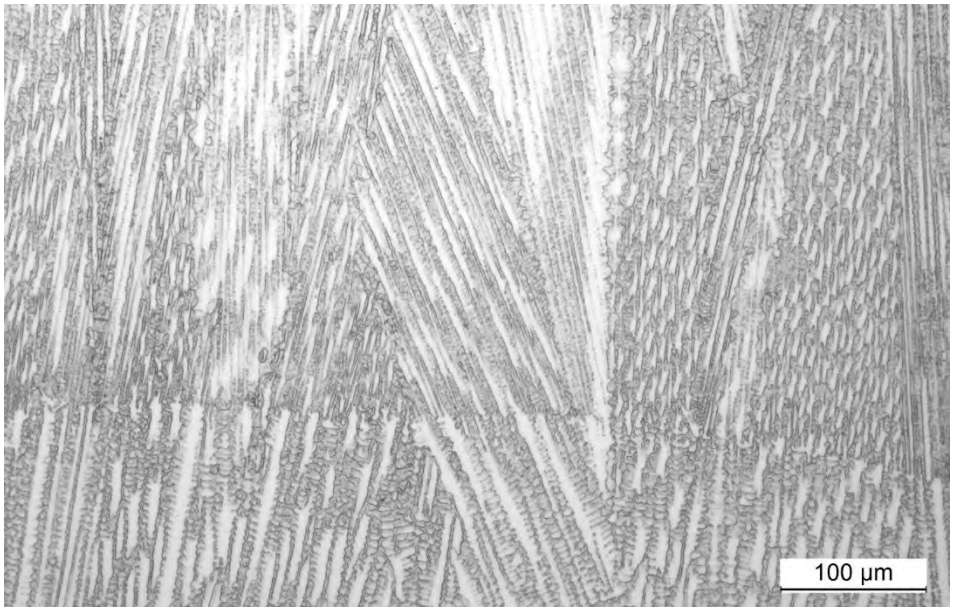


Kuva 13. IN625 Uhlig, a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.

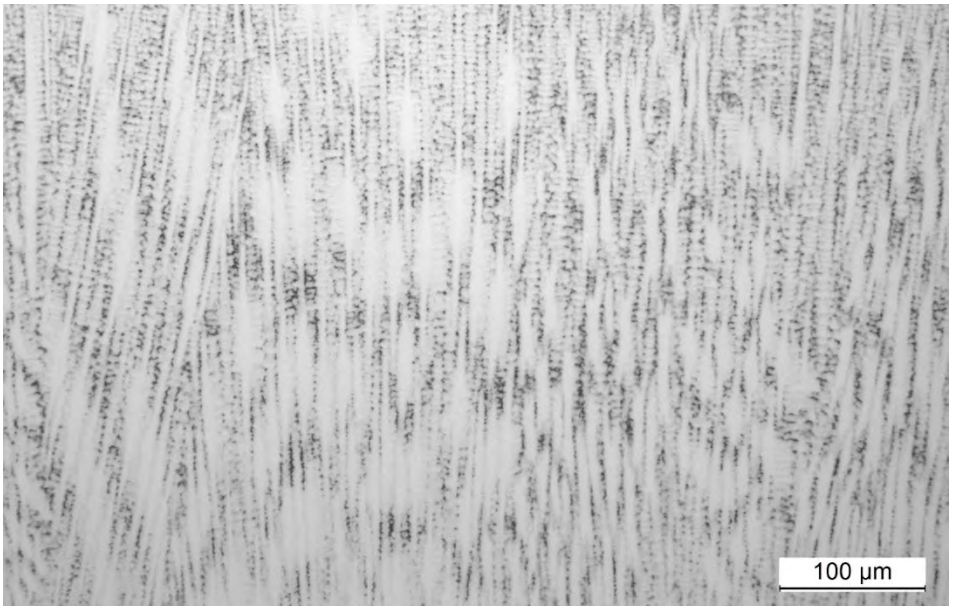
a



b

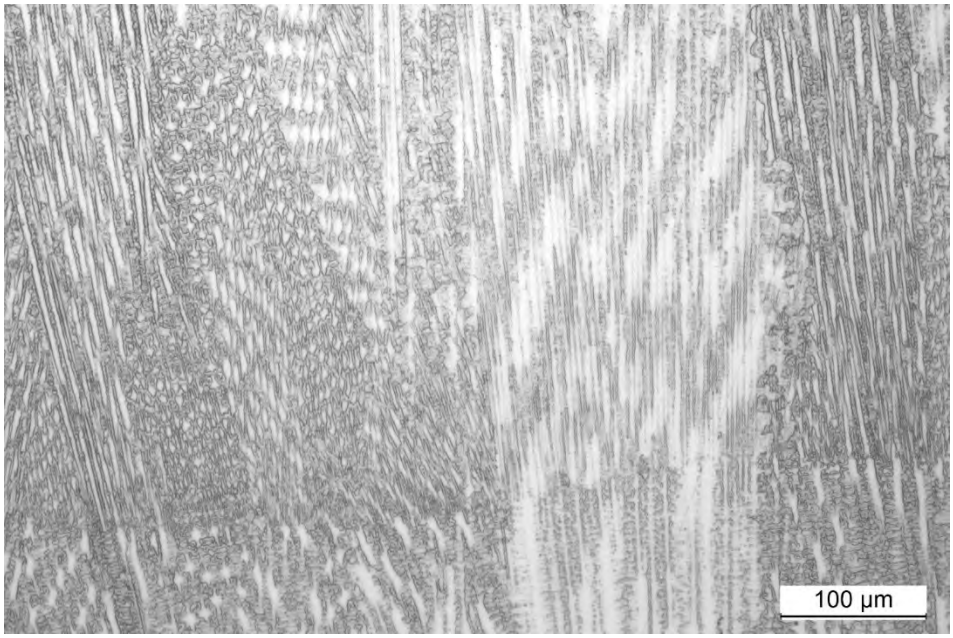


c

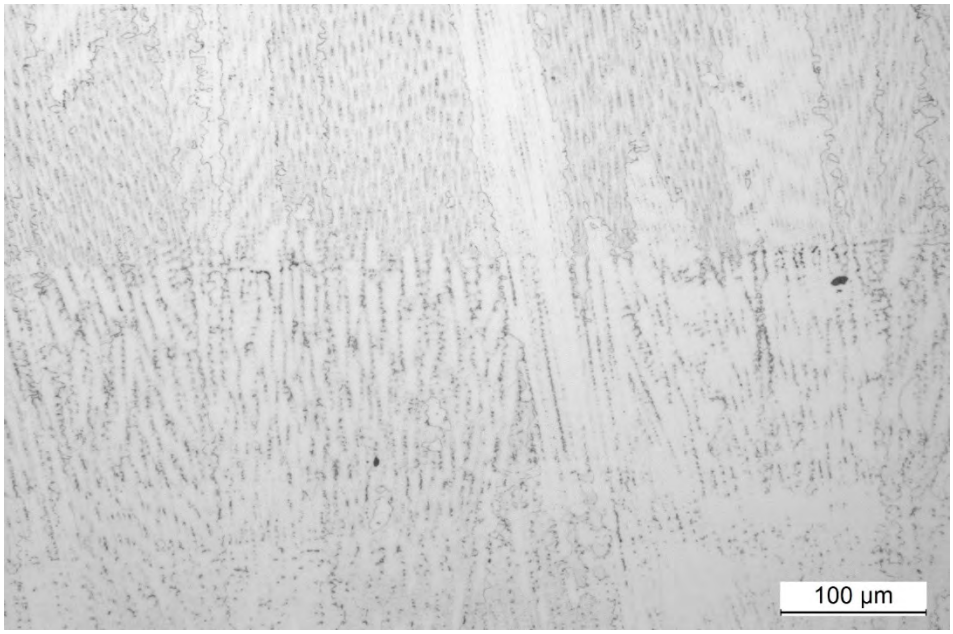


Kuva 14. IN625 Uhlig, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

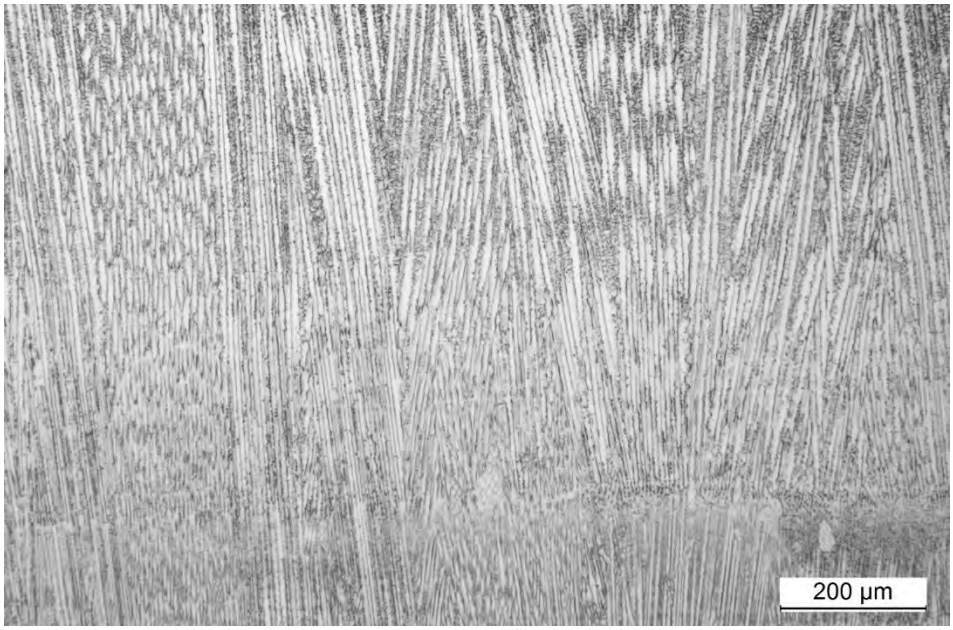


b

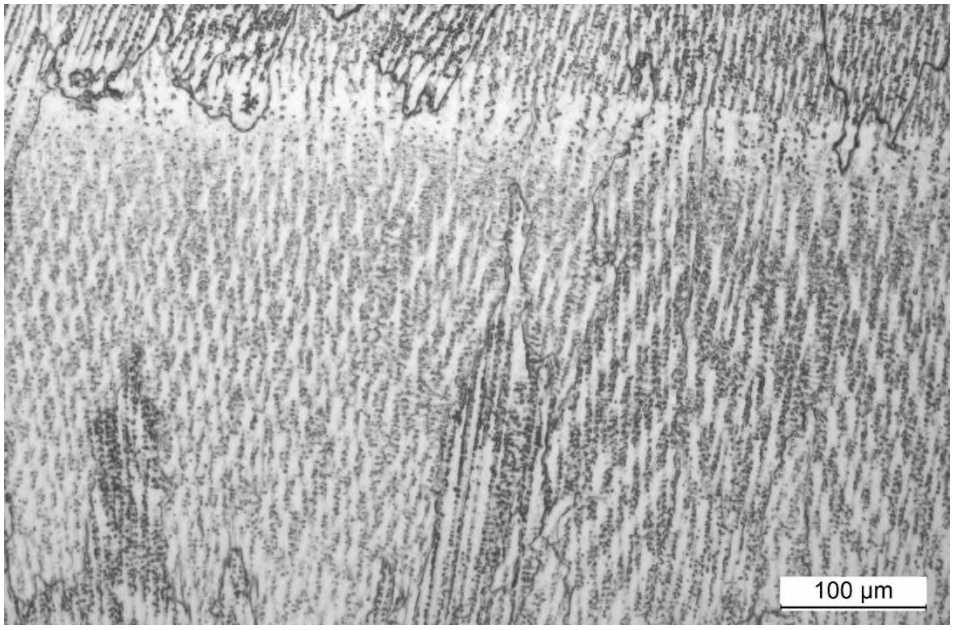


Kuva 15. IN625 Uhlig, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

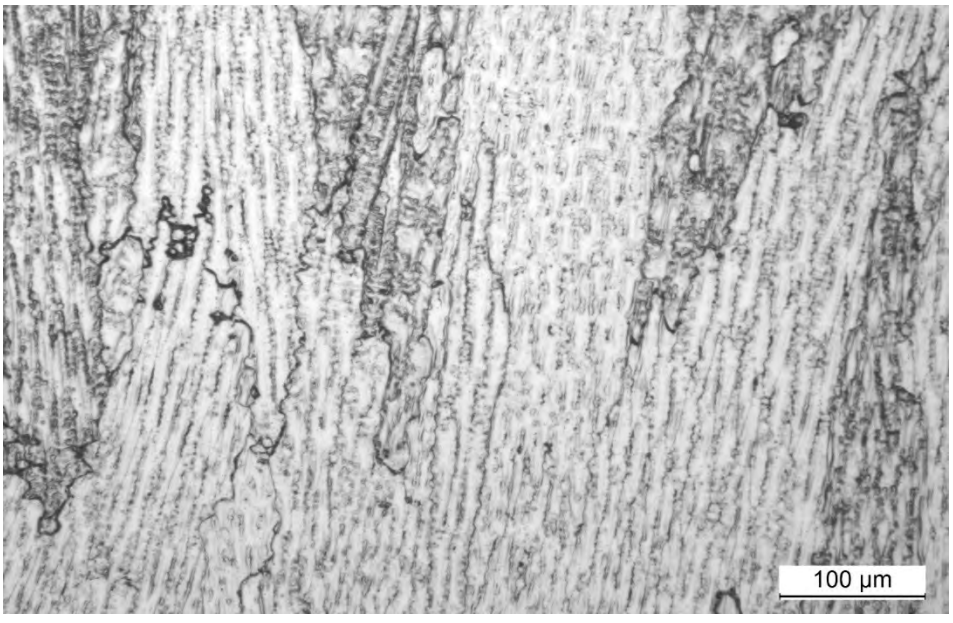
a



b

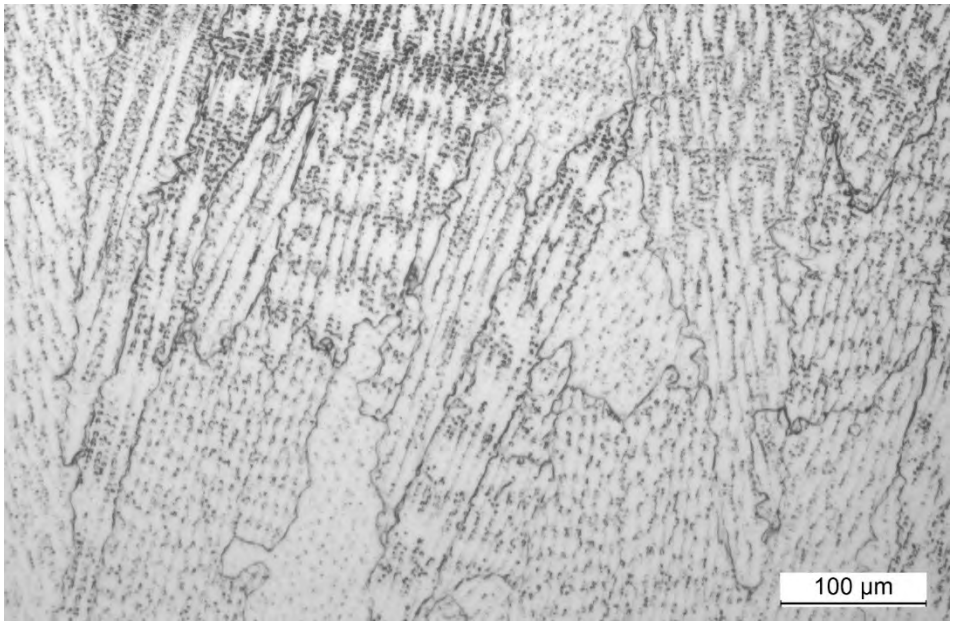


c

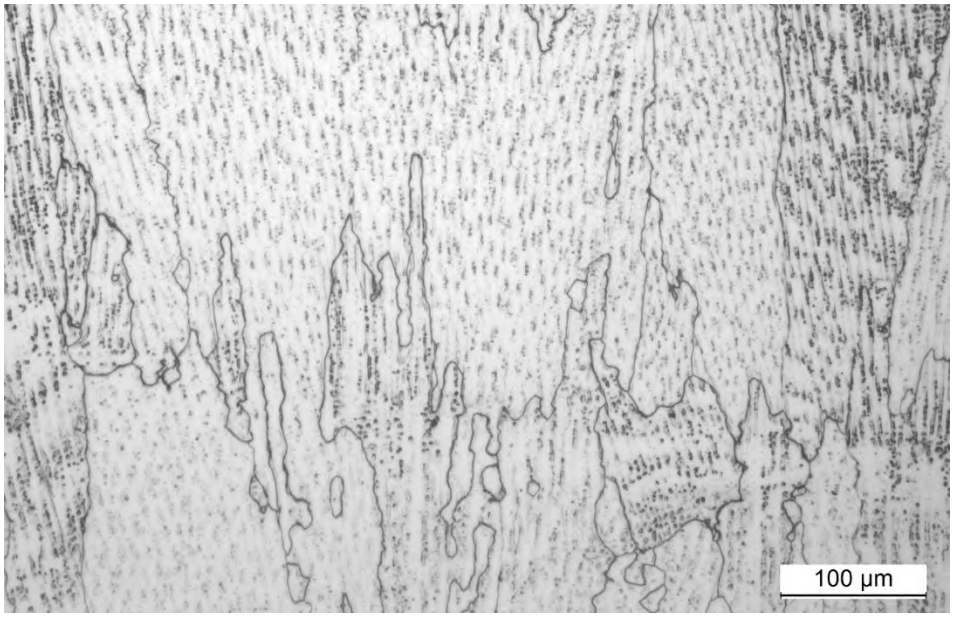


Kuva 16. IN825 Uhlig, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom suur.

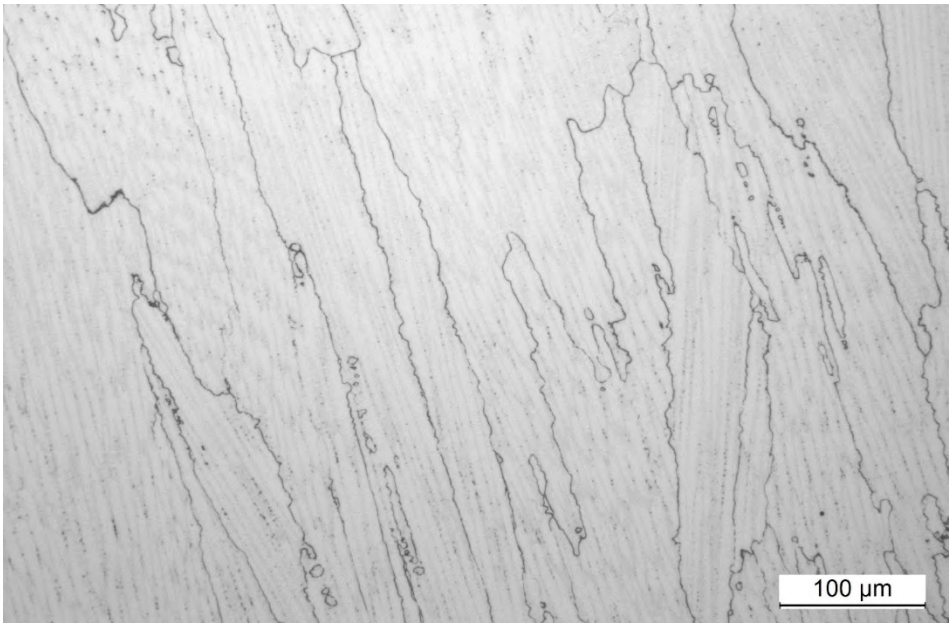
a



b

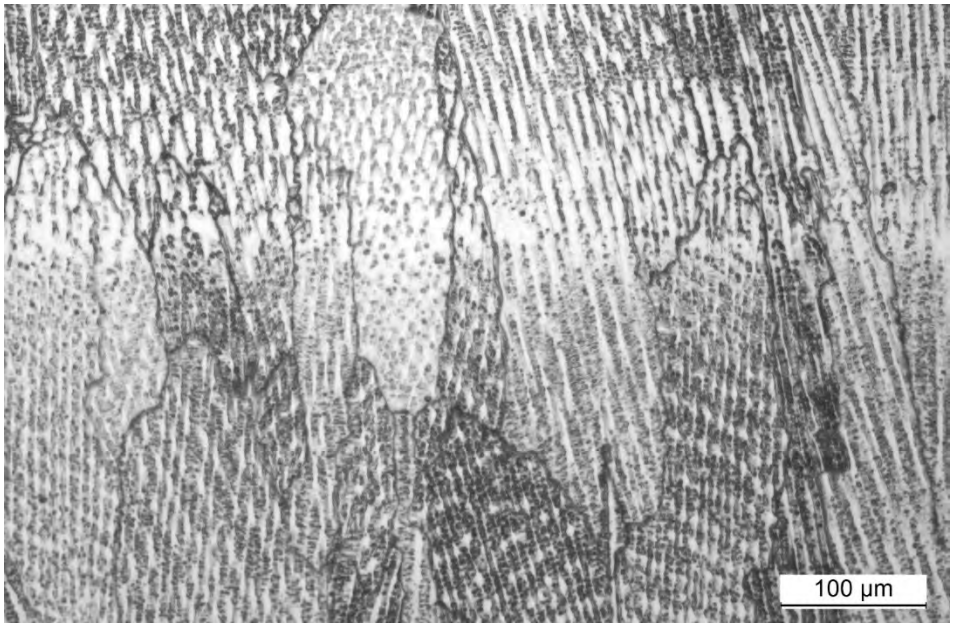


c

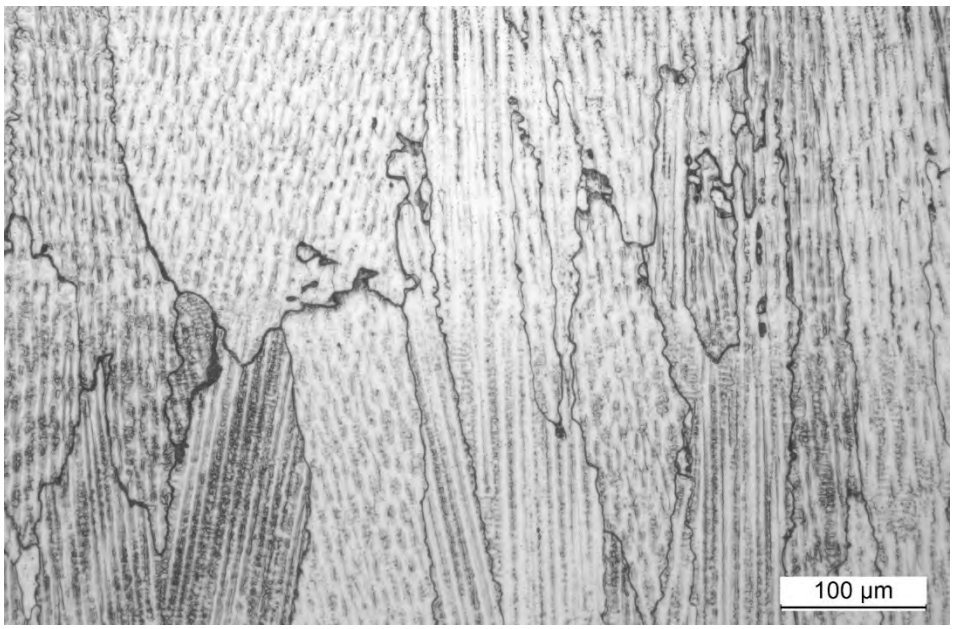


Kuva 17. IN825 Uhlig, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

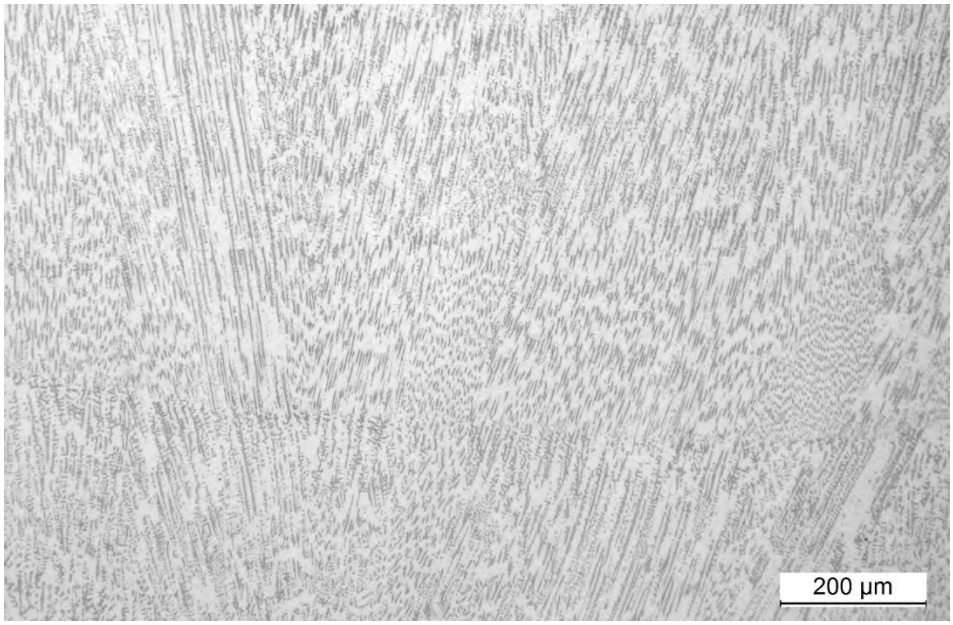


b

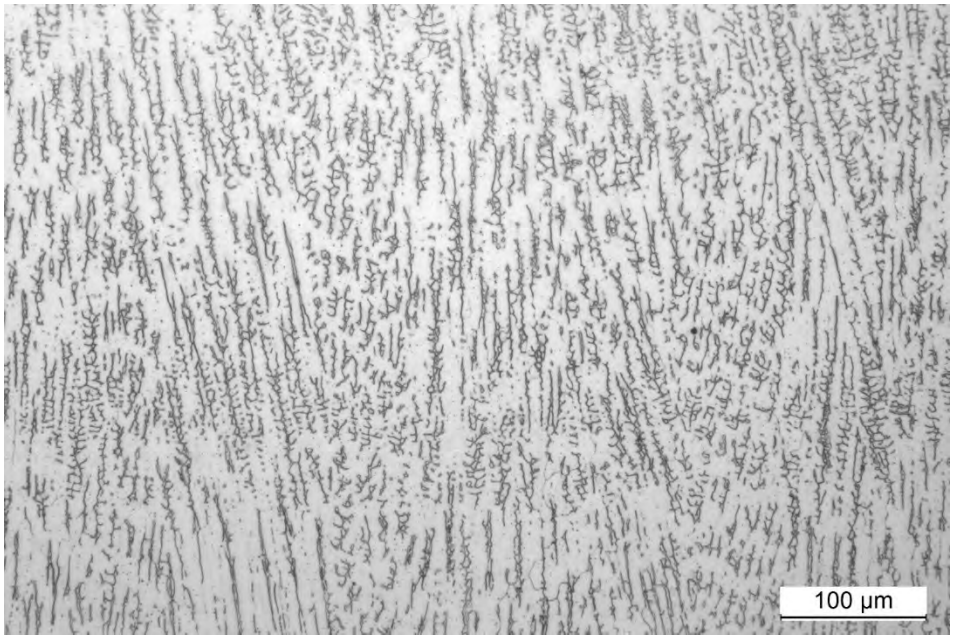


Kuva 18. IN825 Uhlig, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

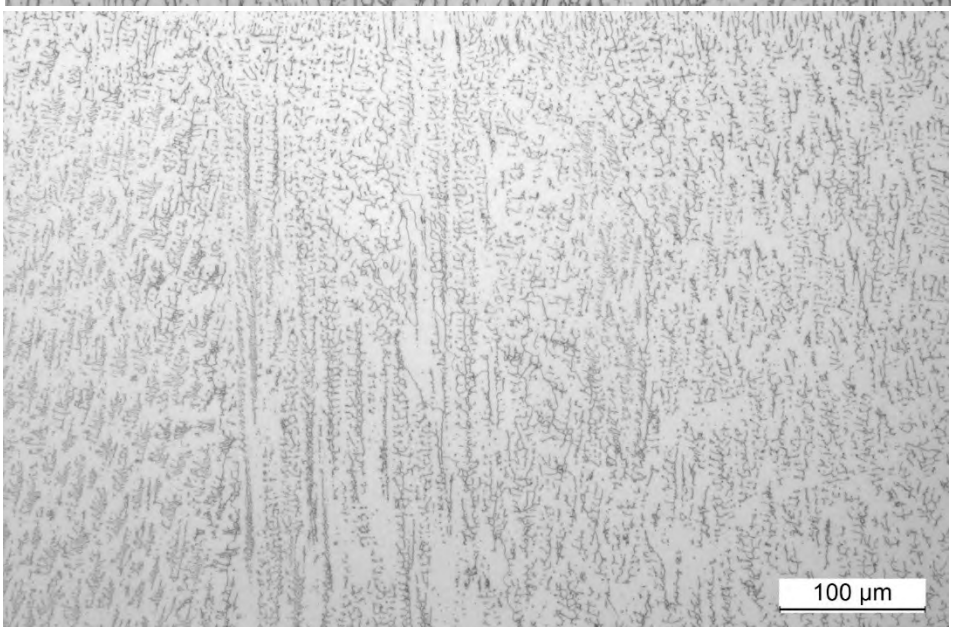
a



b

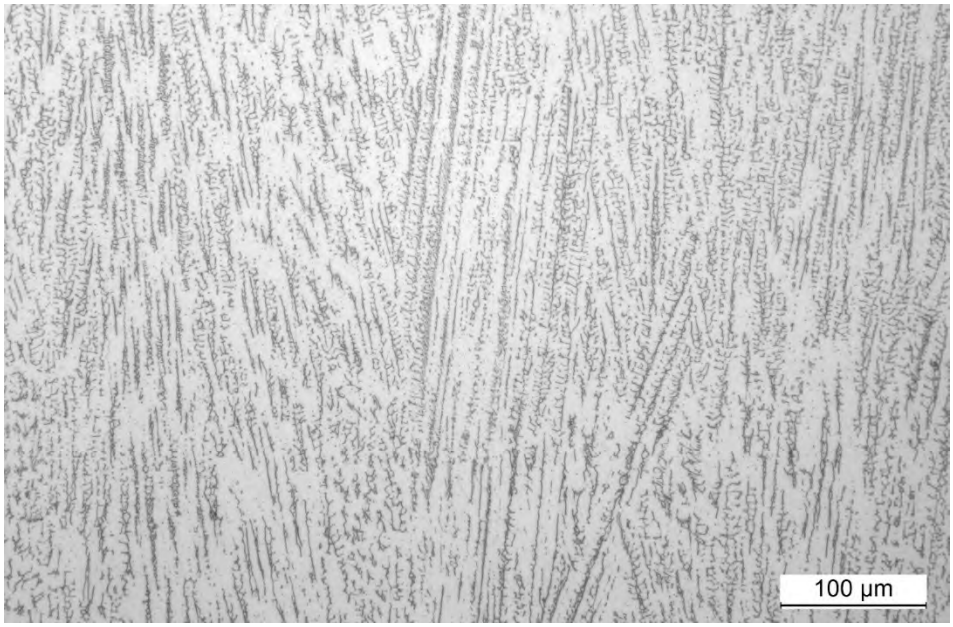


c

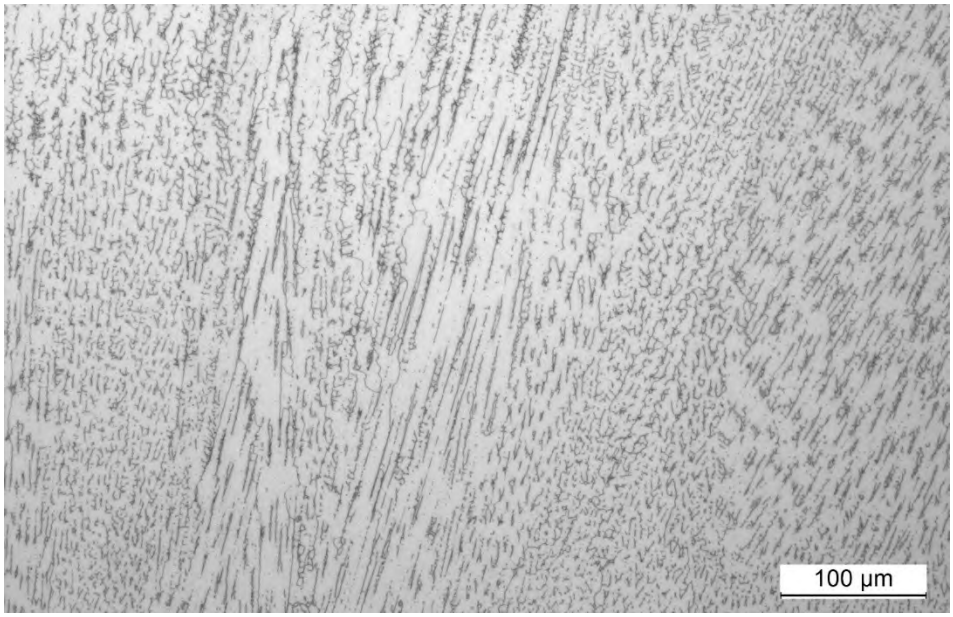


Kuva 19. 309 Areva, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.

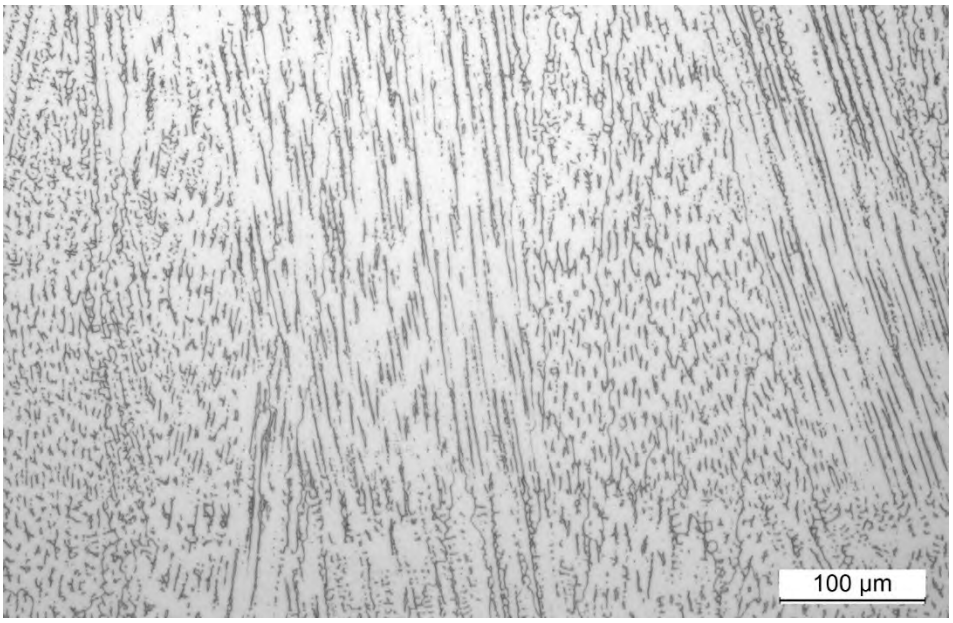
a



b

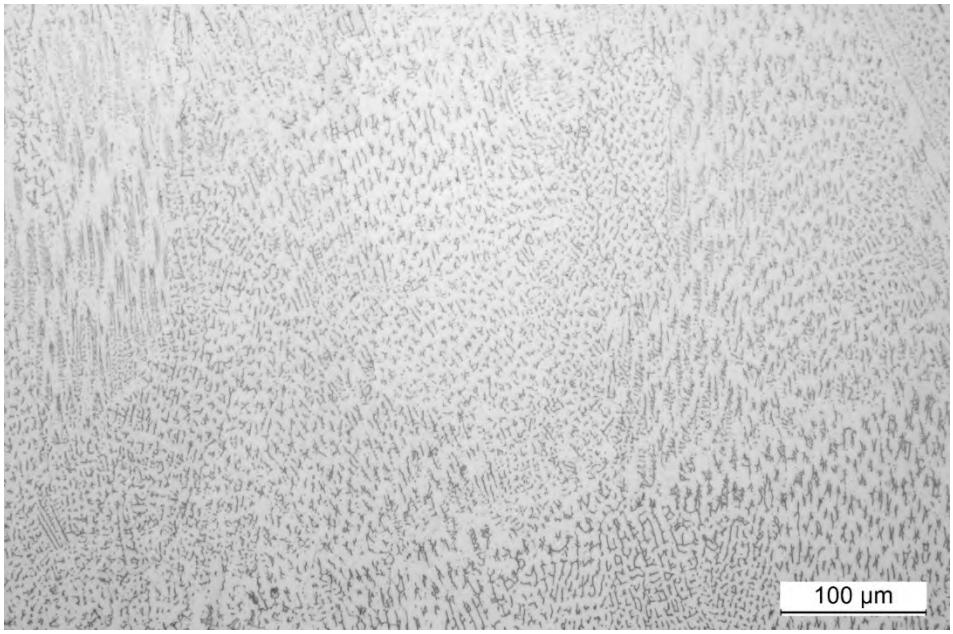


c

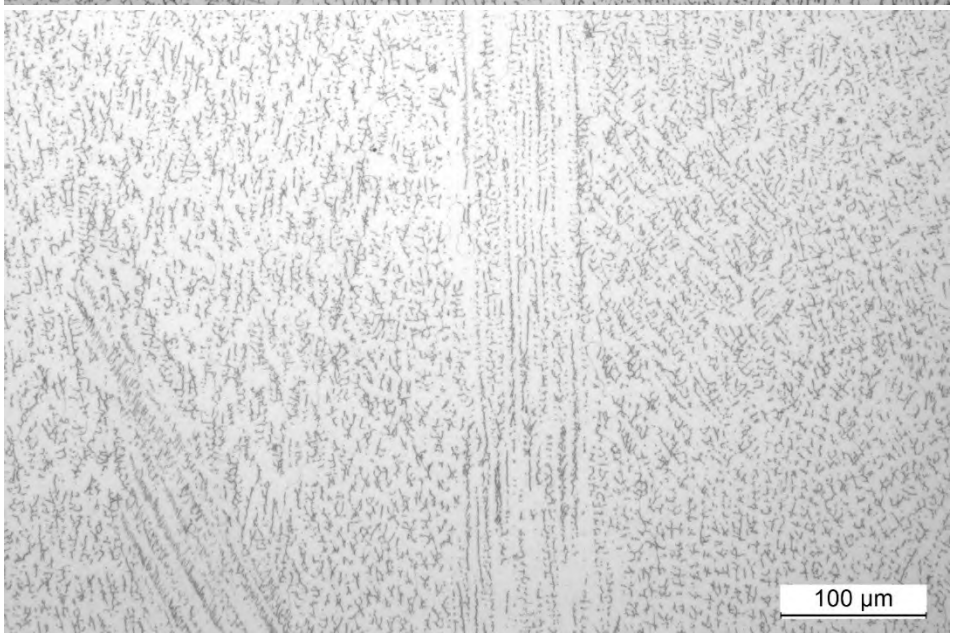


Kuva 20. 309 Areva, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

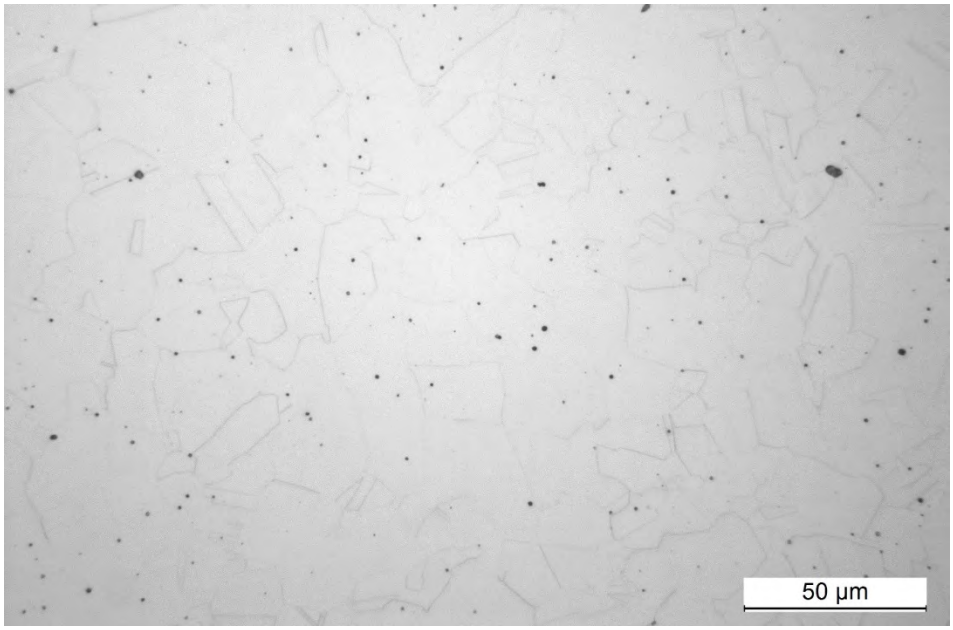


b

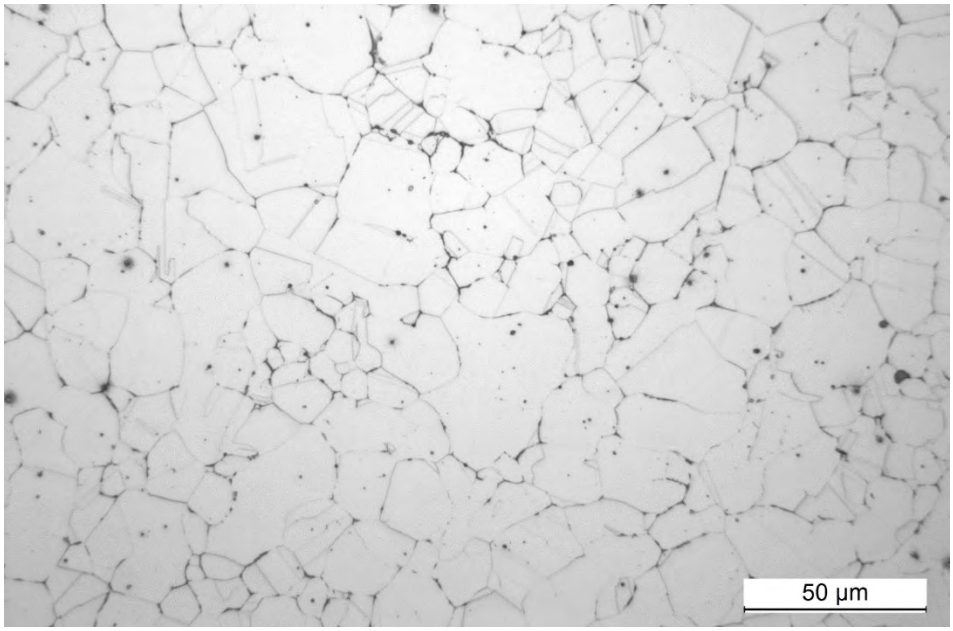


Kuva 21. 309 Areva, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

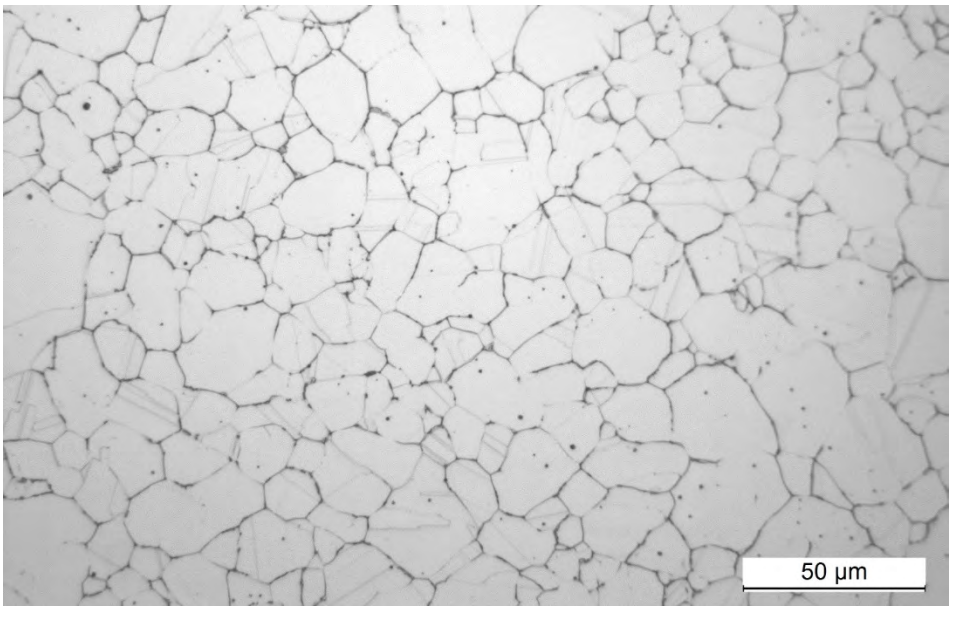
a



b

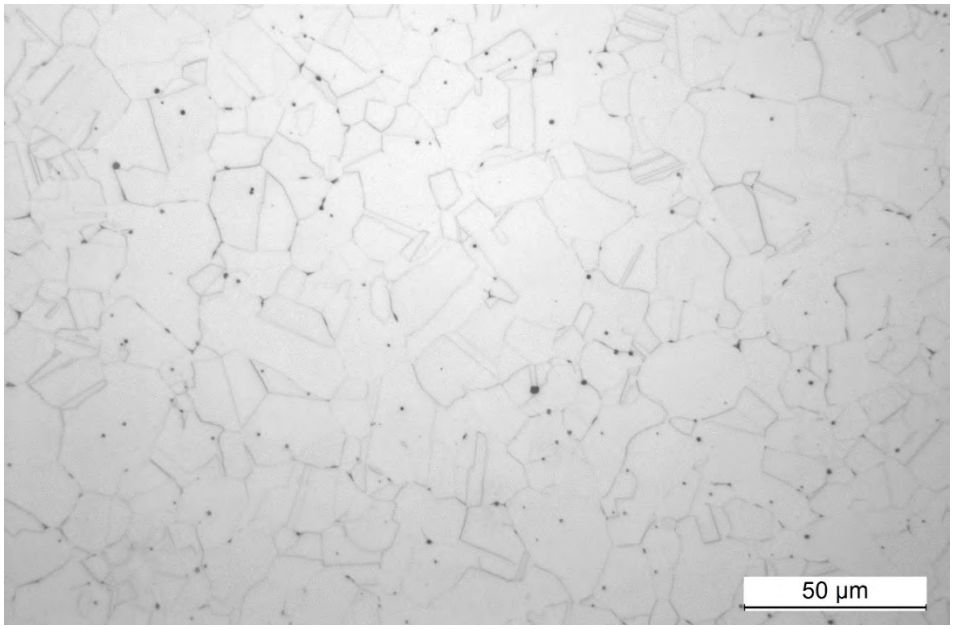


c

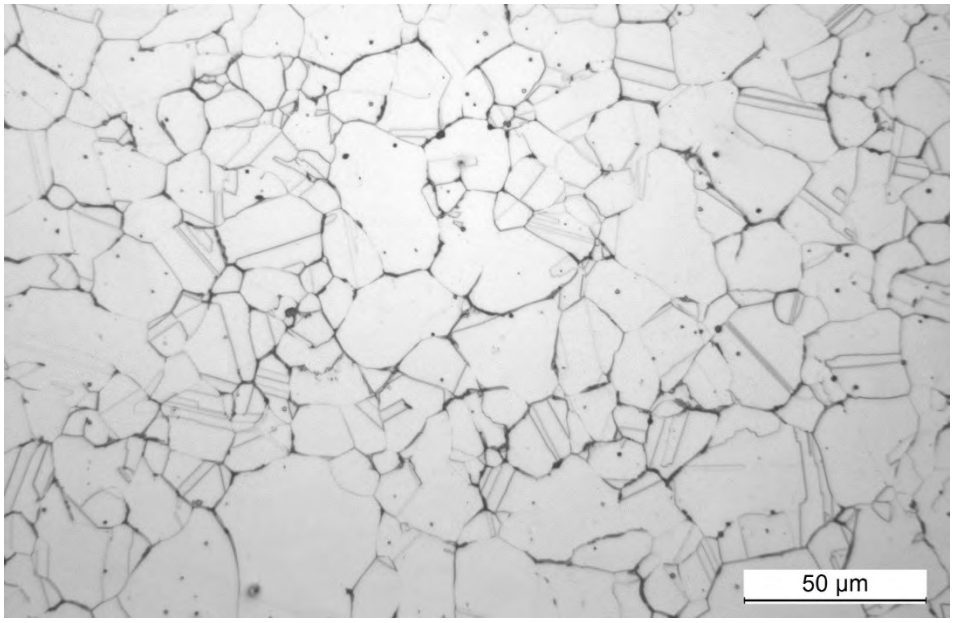


Kuva 22. 304L, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h.

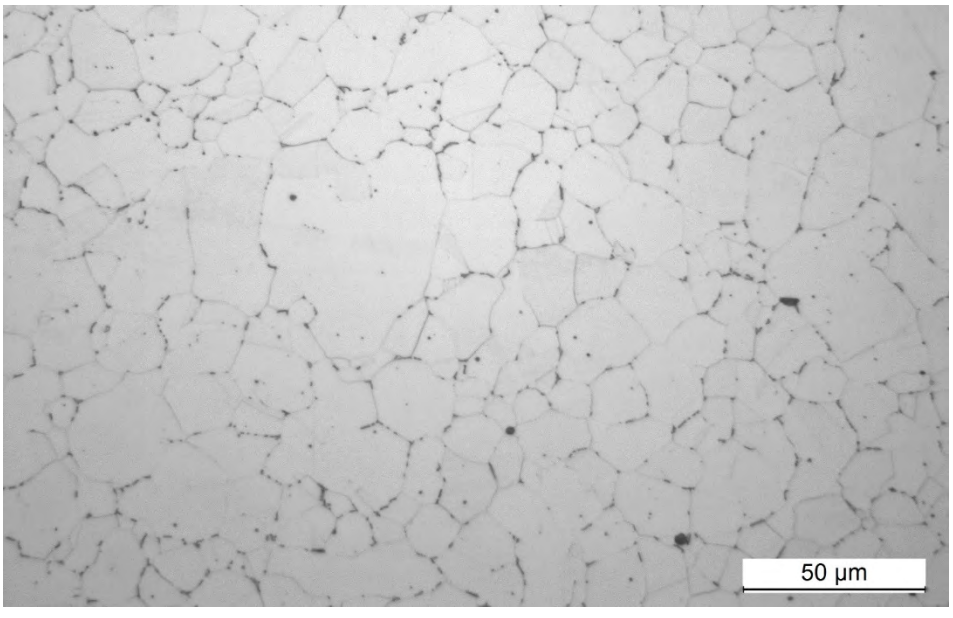
a



b

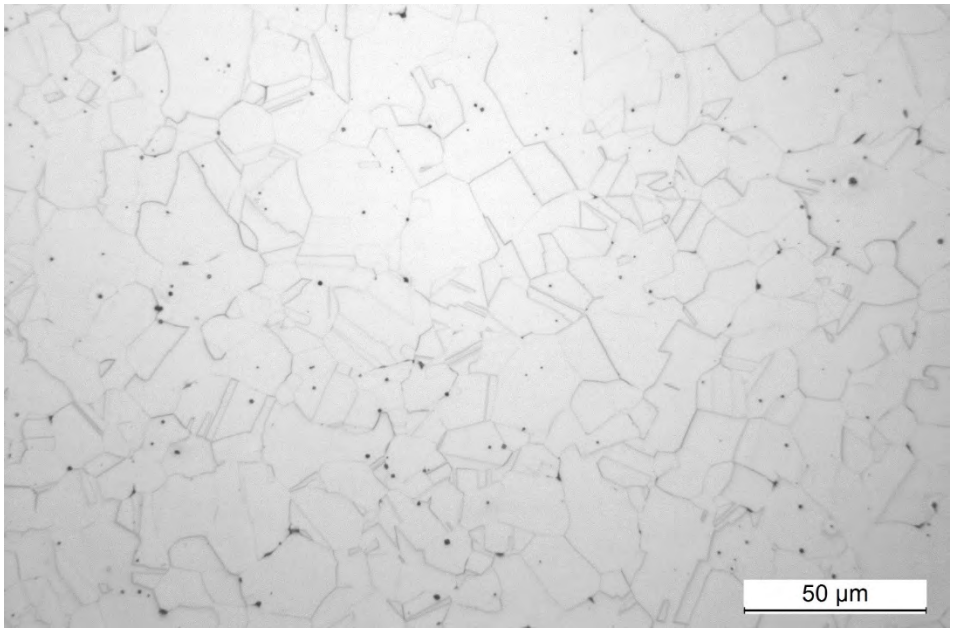


c

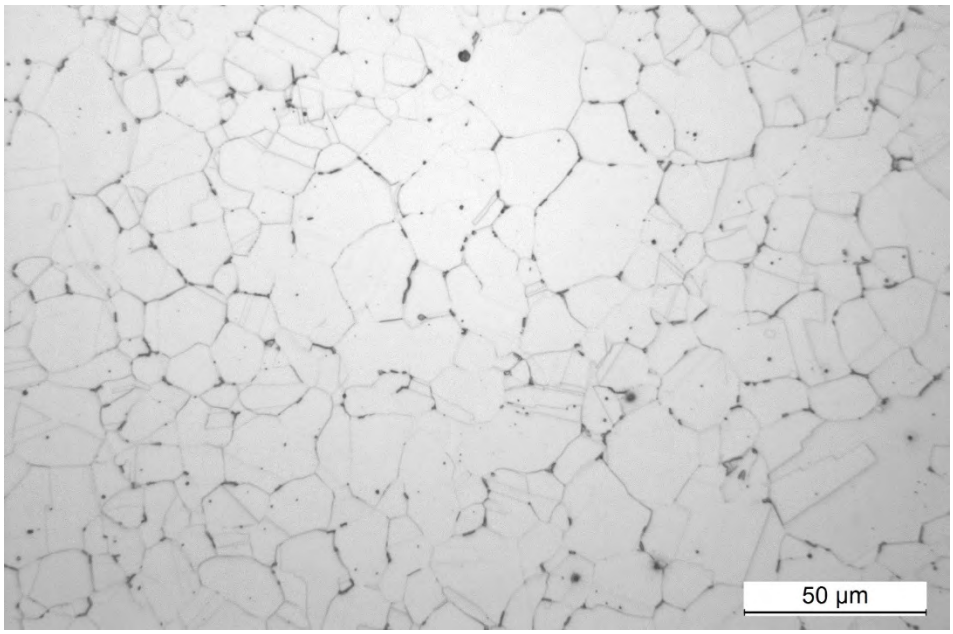


Kuva 23. 304L, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

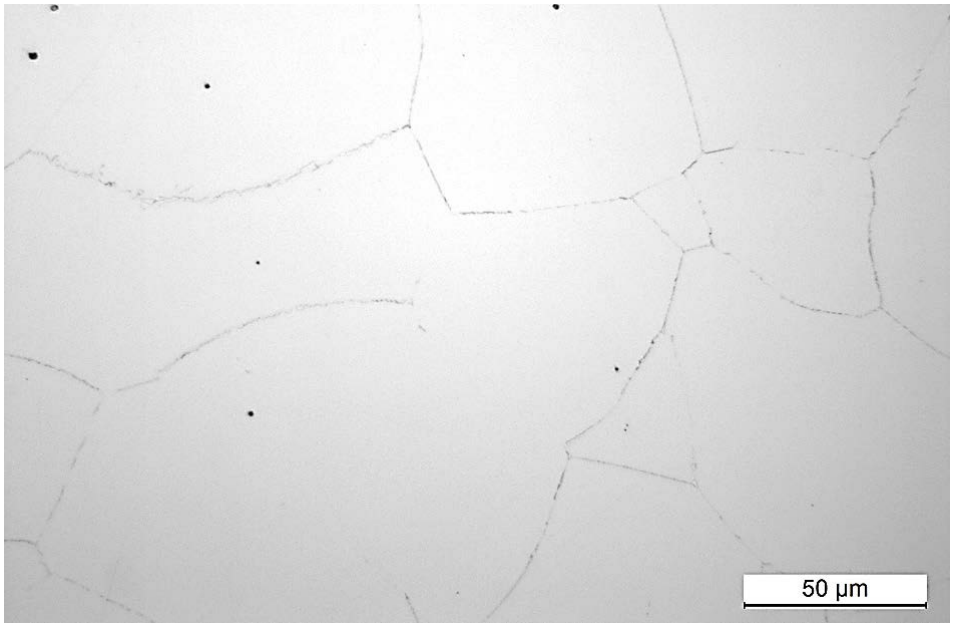


b

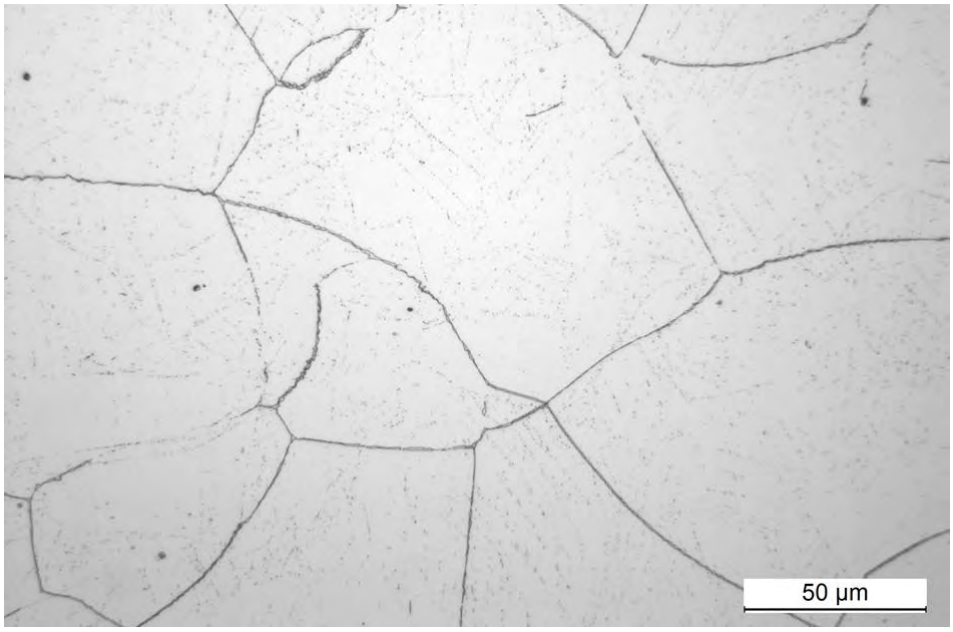


Kuva 24. 304L, a) 700°C, 10 h, b) 700°C, 100 h.

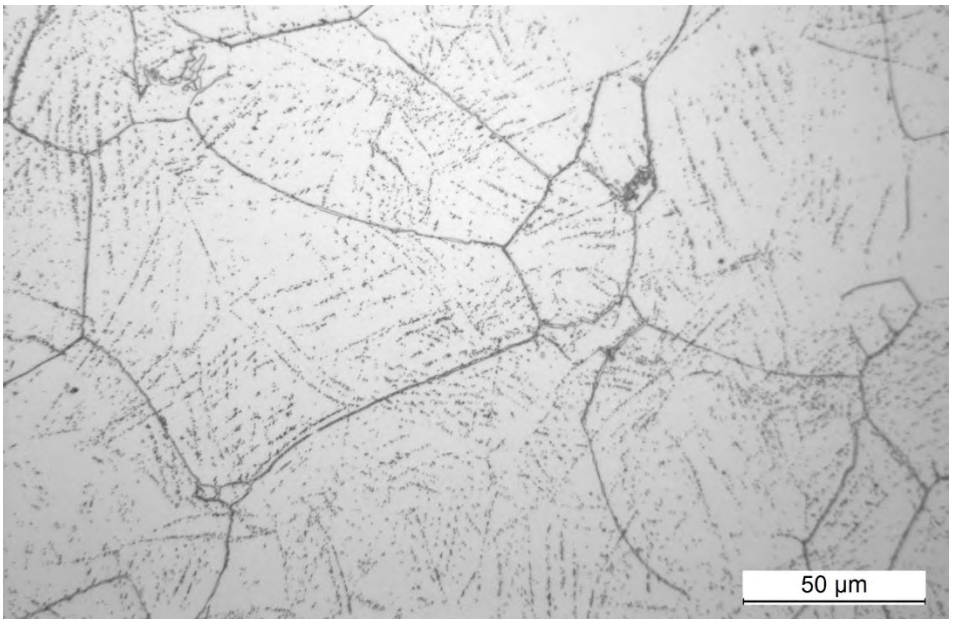
a



b

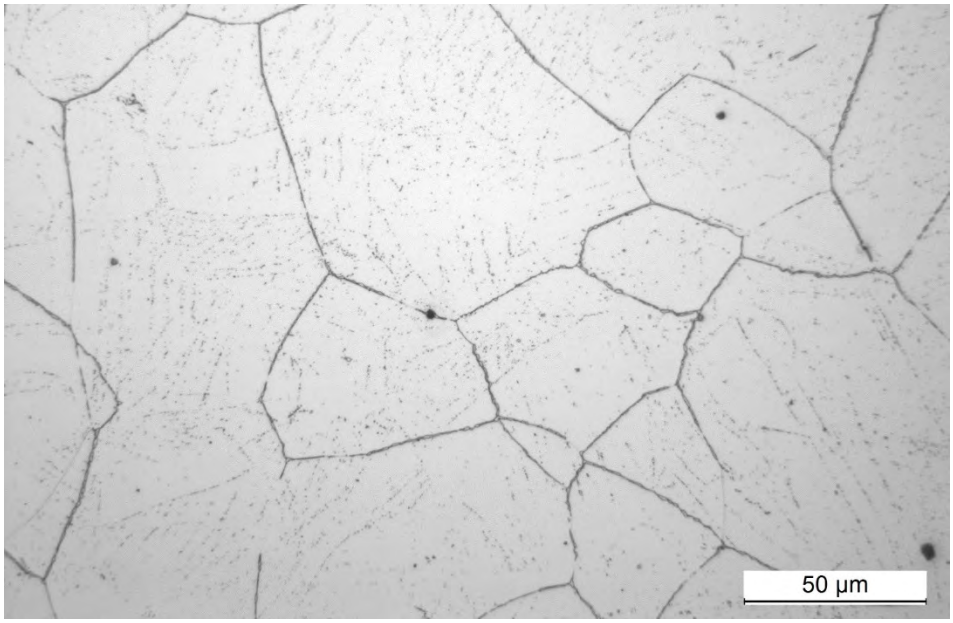


c

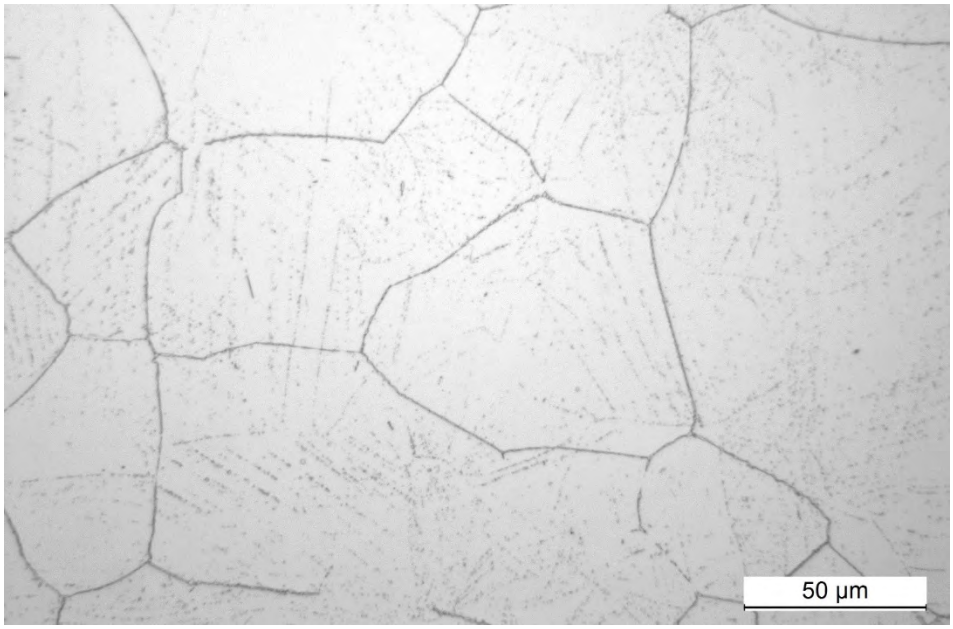


Kuva 25. San28, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h.

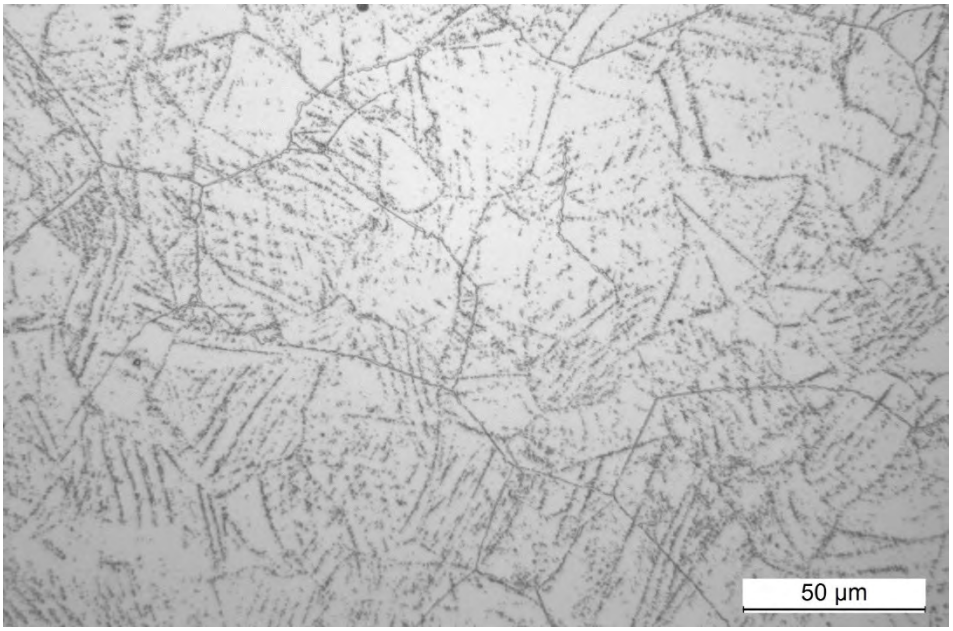
a



b

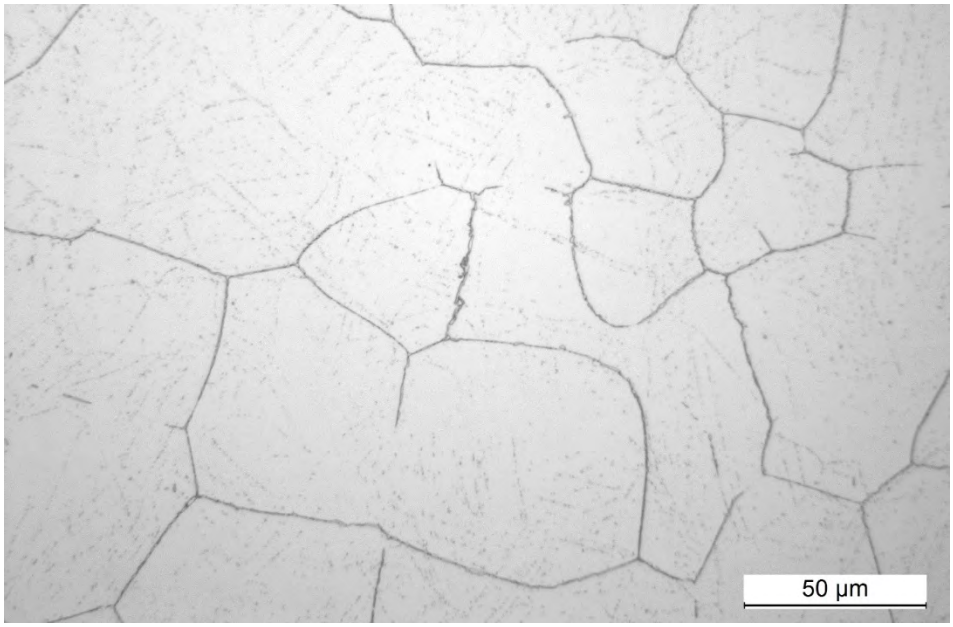


c

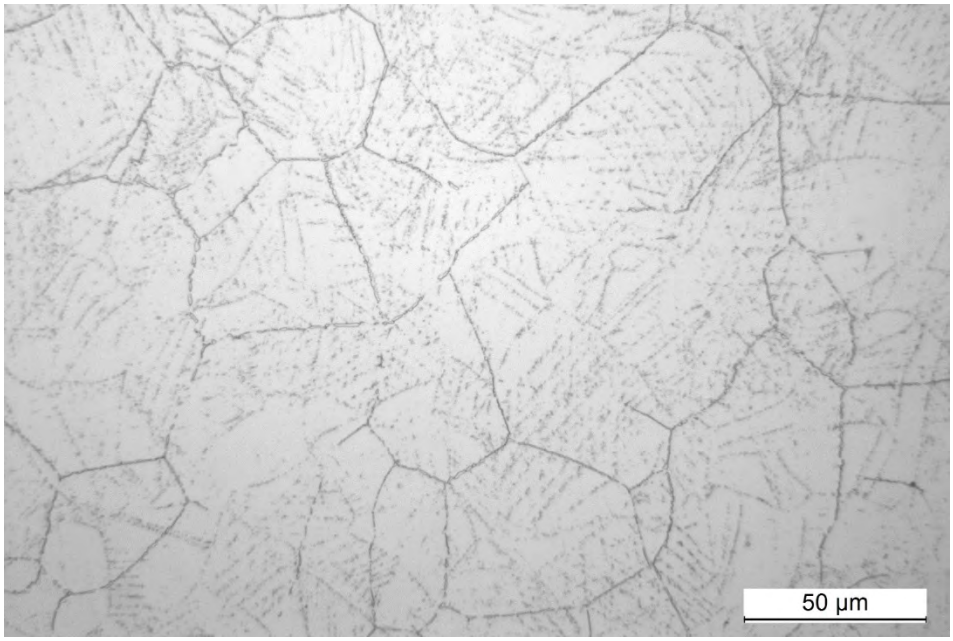


Kuva 26. San28, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a

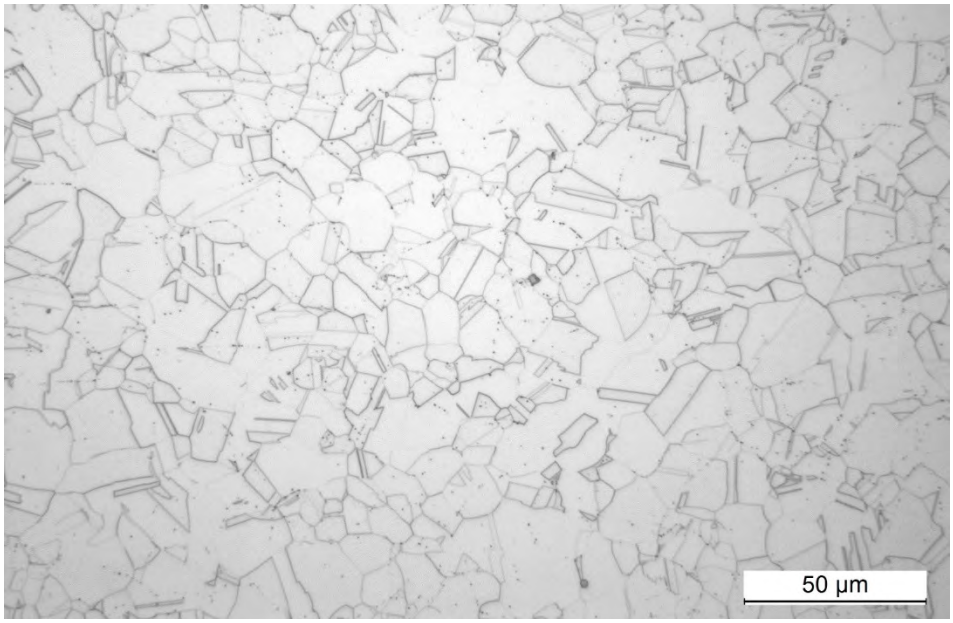


b

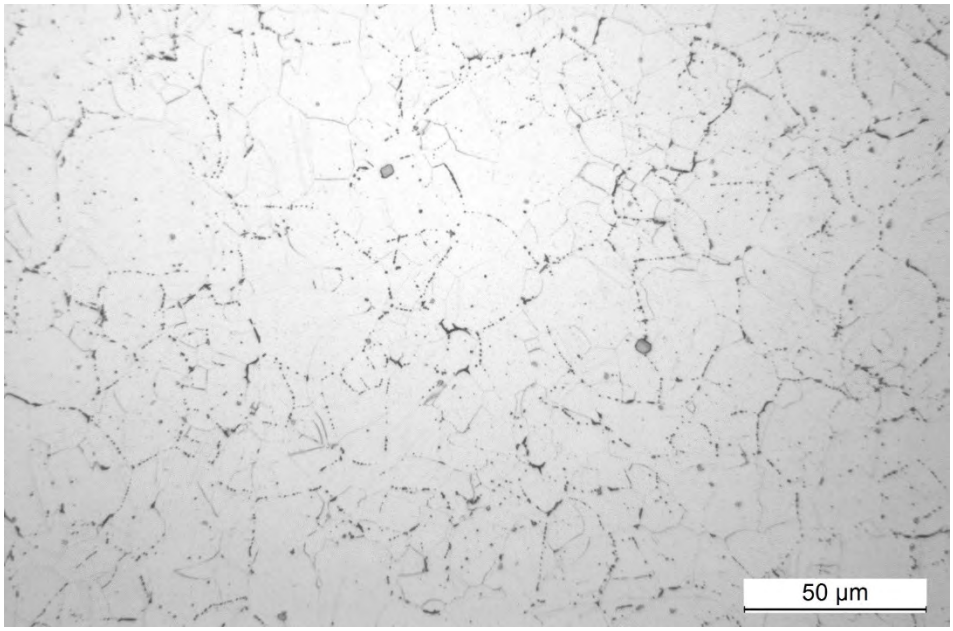


Kuva 27. San28, a) 700°C, 10 h, b) 700°C, 100 h.

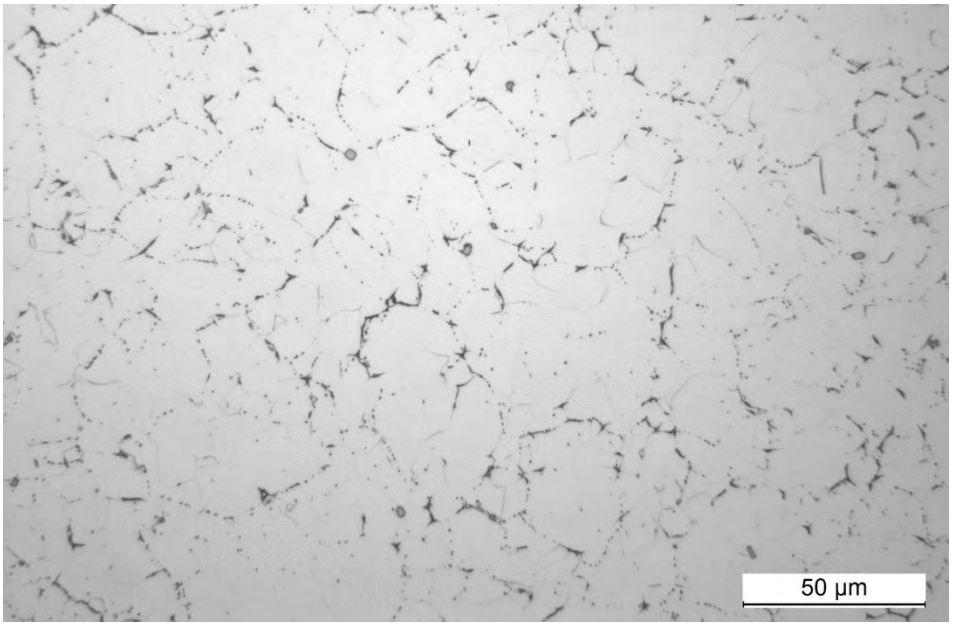
a



b

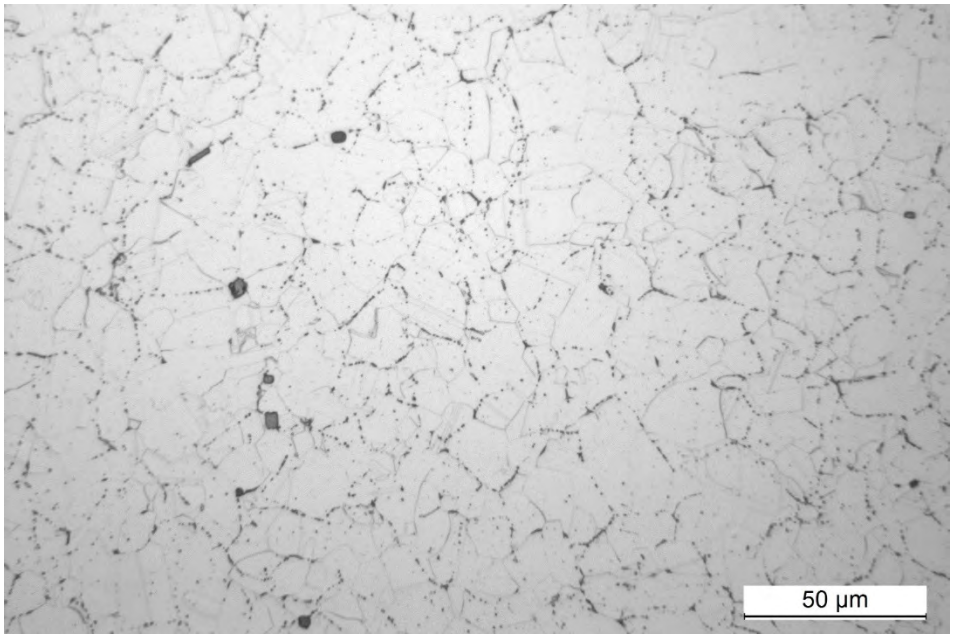


c

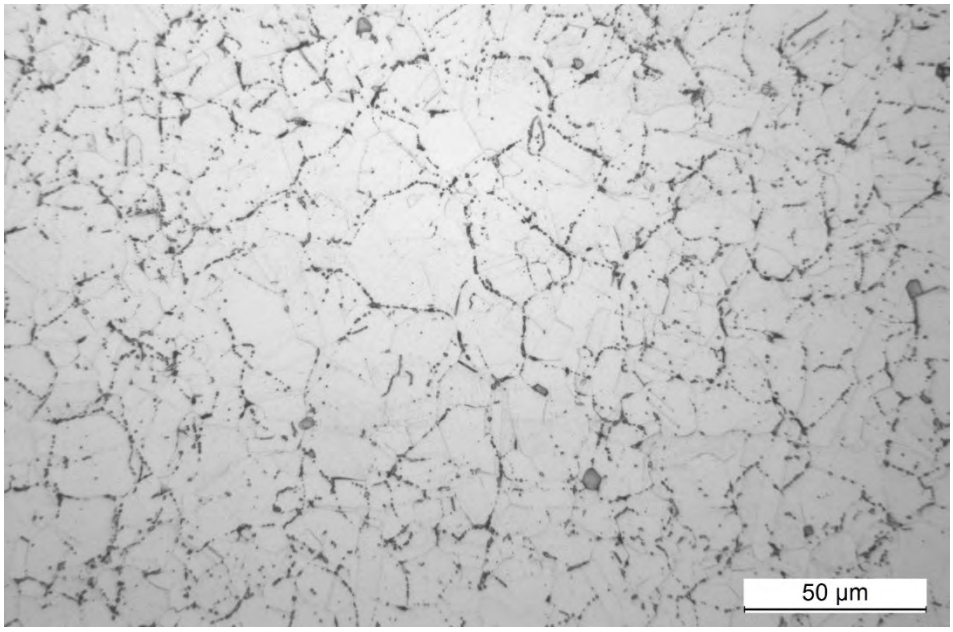


Kuva 28. San38, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h.

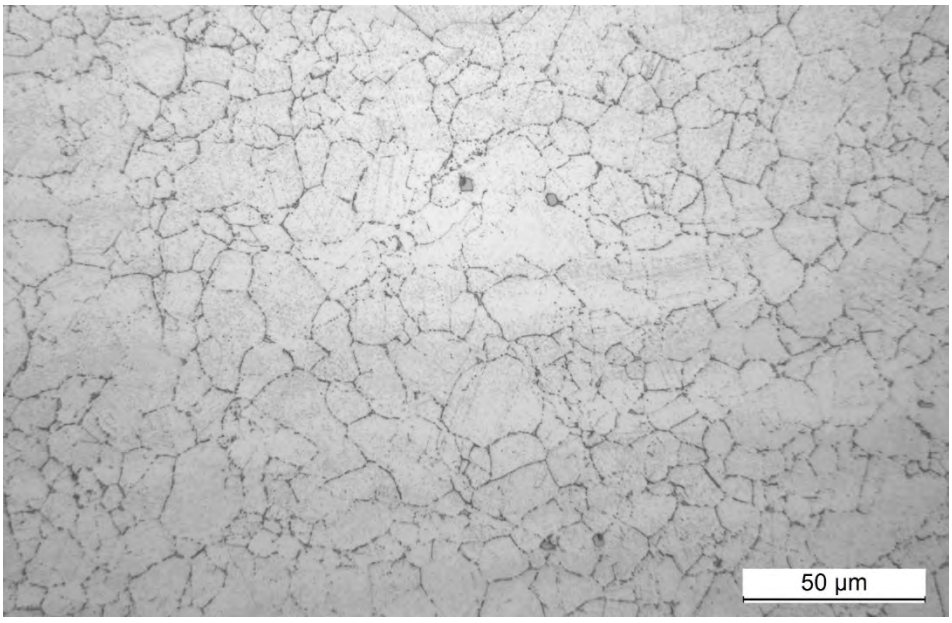
a



b

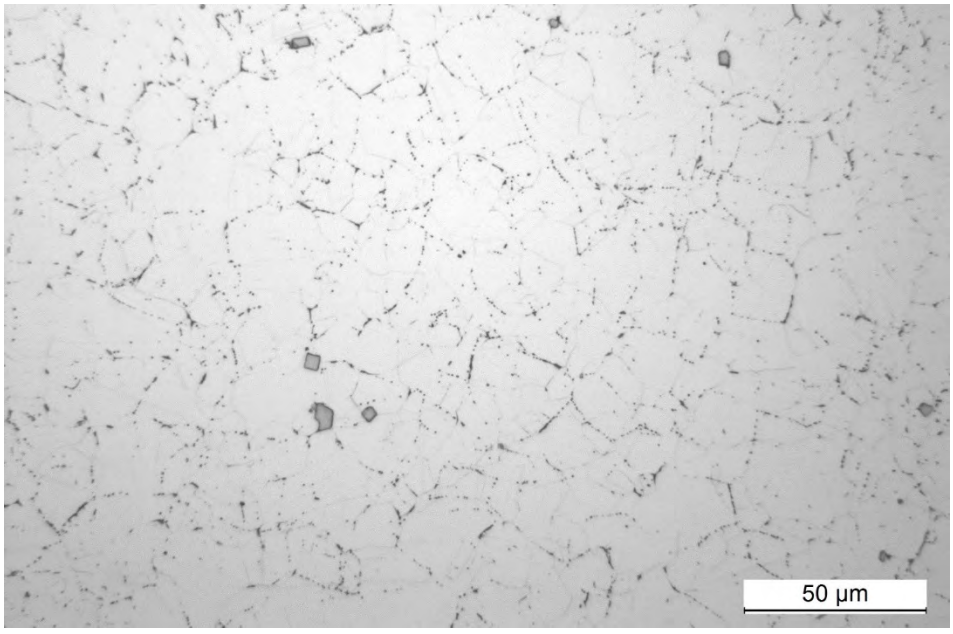


c

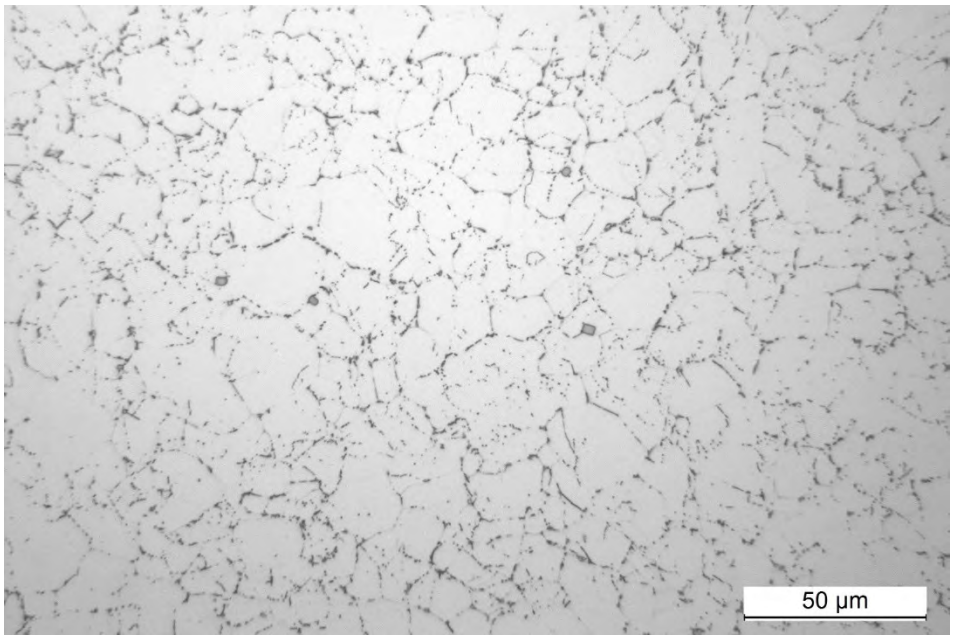


Kuva 29. San38, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h.

a



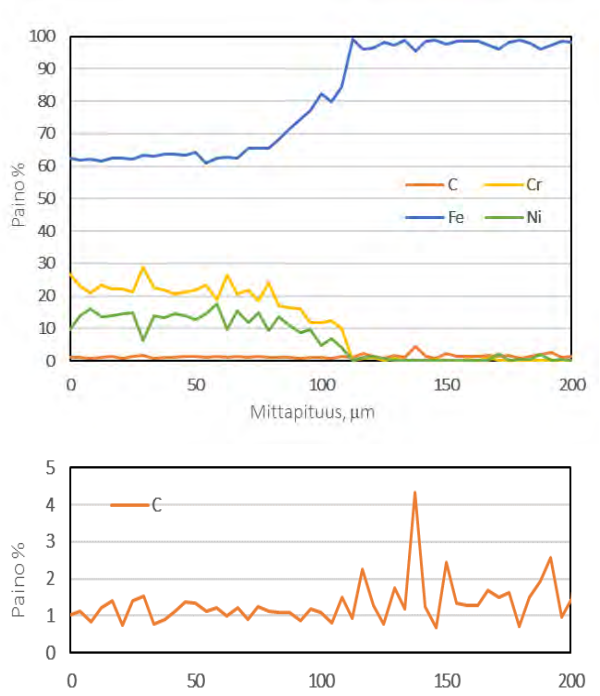
b



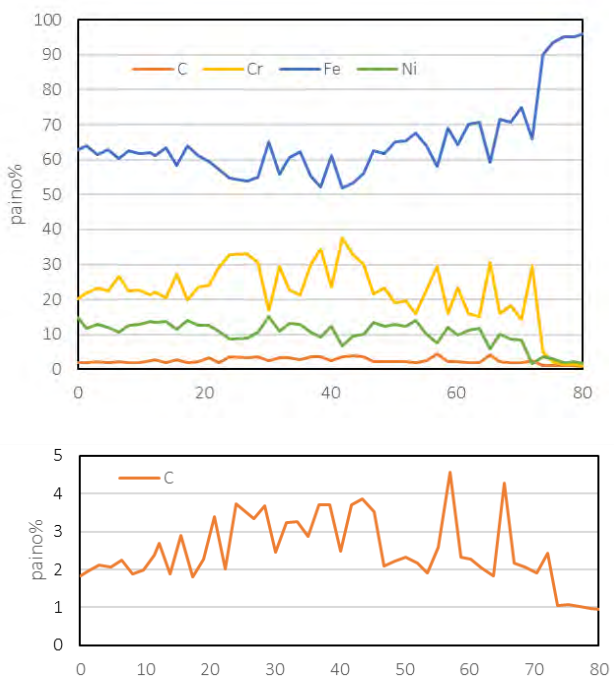
Kuva 30. San38, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h.

Liite 4. EDX-analyysit pinnoite-perusainerajapinnan yli.

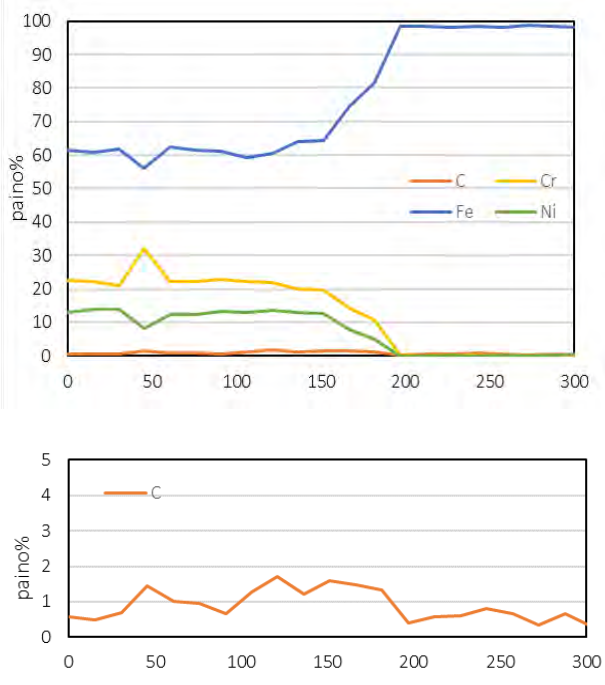
Toimitustila
AZZ309L



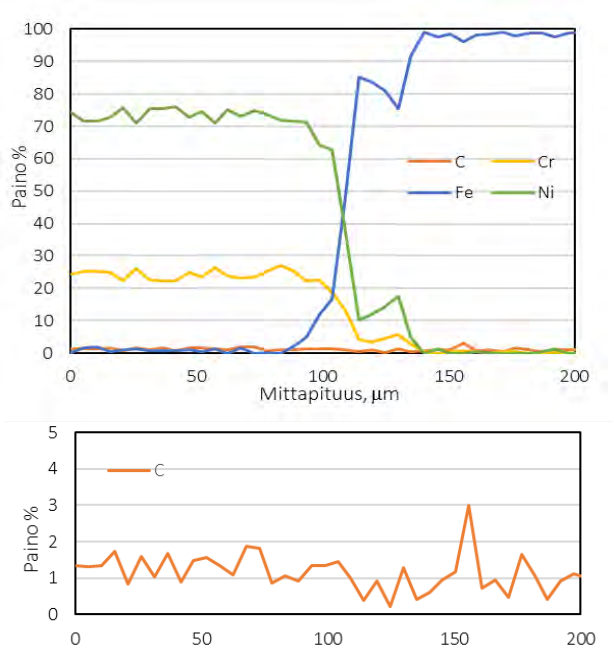
1000 h, 650°C

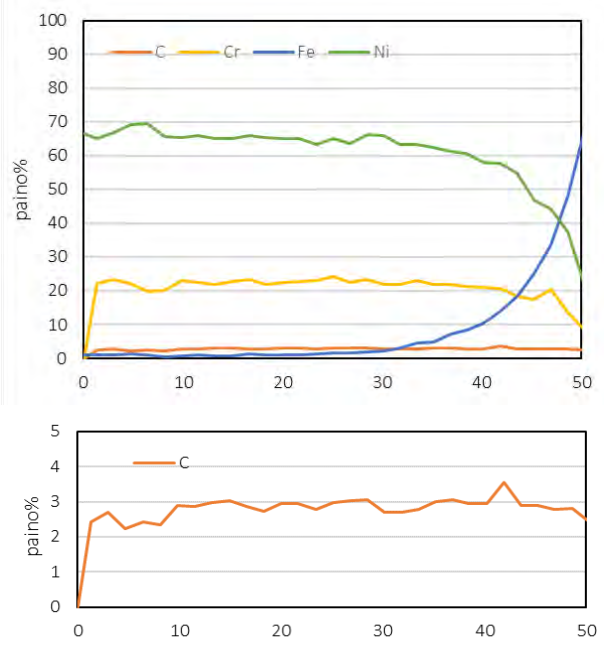


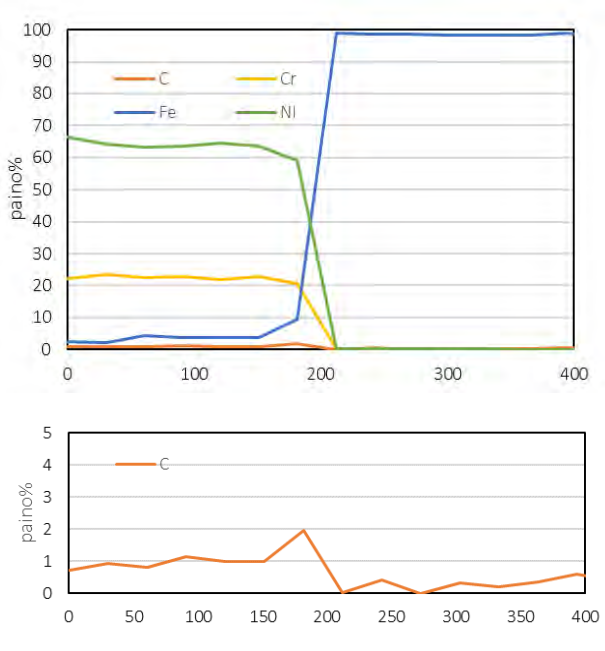
100 h, 700°C



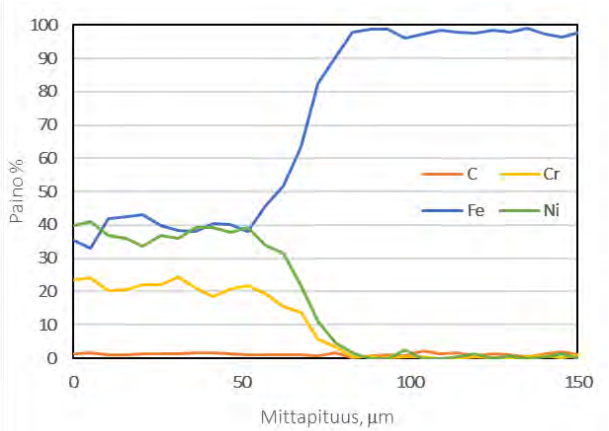
AZZ625

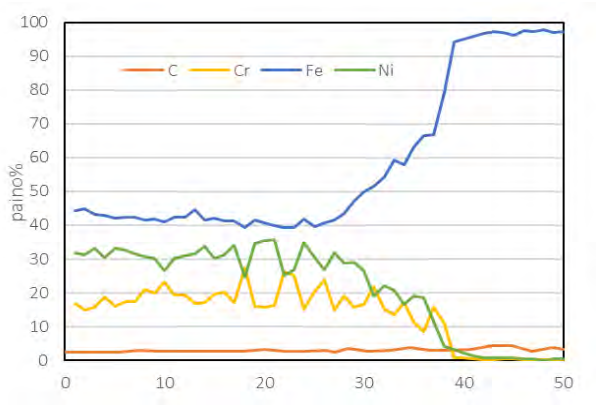

Paino %
Mittapituus, µm
C
Cr
Fe
Ni
Paino %
C

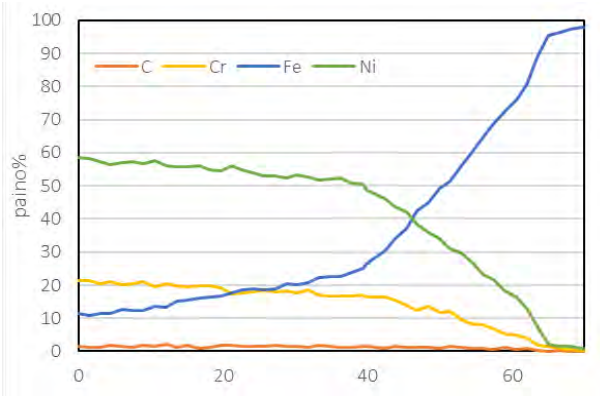

paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C

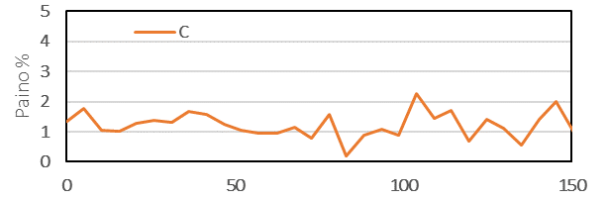

paino%
C
Cr
Fe
NI
paino%
C

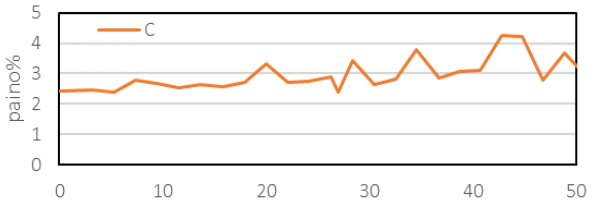
AZZ825

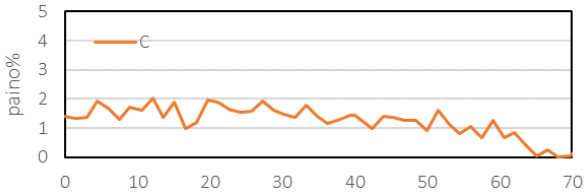

Paino %
Mittapituus, µm
C
Cr
Fe
Ni


paino%
C
Cr
Fe
Ni

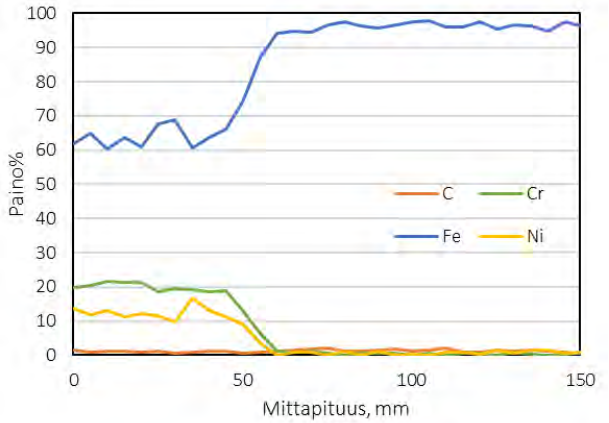

paino%
C
Cr
Fe
Ni

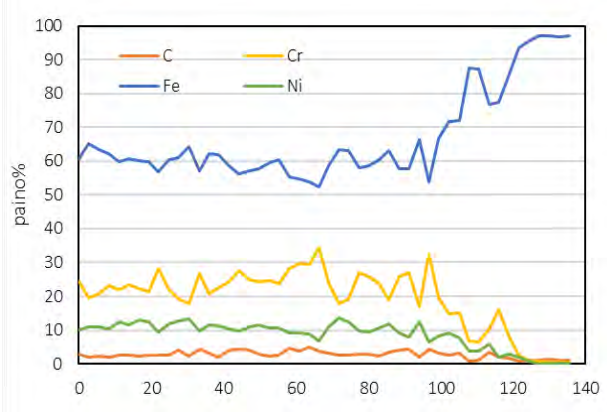

Paino %
C

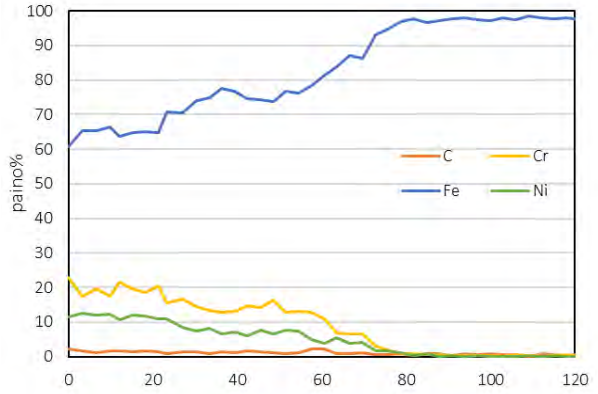

paino%
C

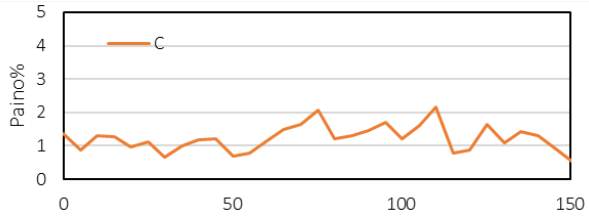

paino%
C

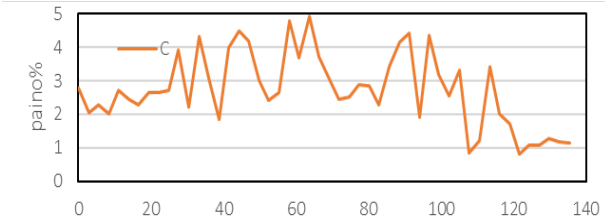
Uhlig309L

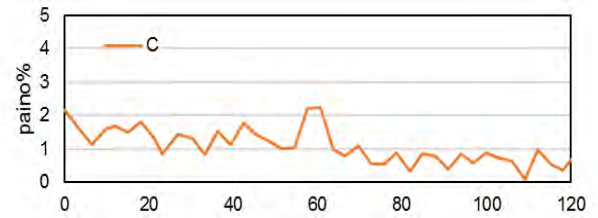

Paino%
Mittapituus, mm
C
Cr
Fe
Ni


paino%
C
Cr
Fe
Ni

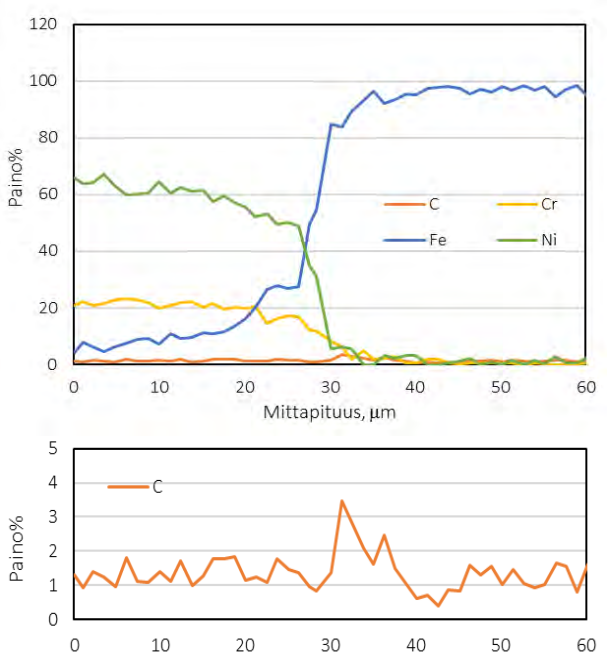

paino%
C
Cr
Fe
Ni

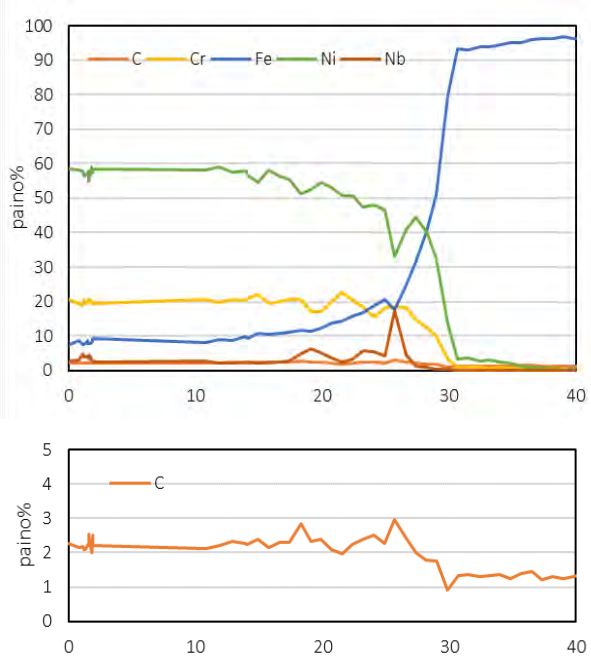

Paino%
C

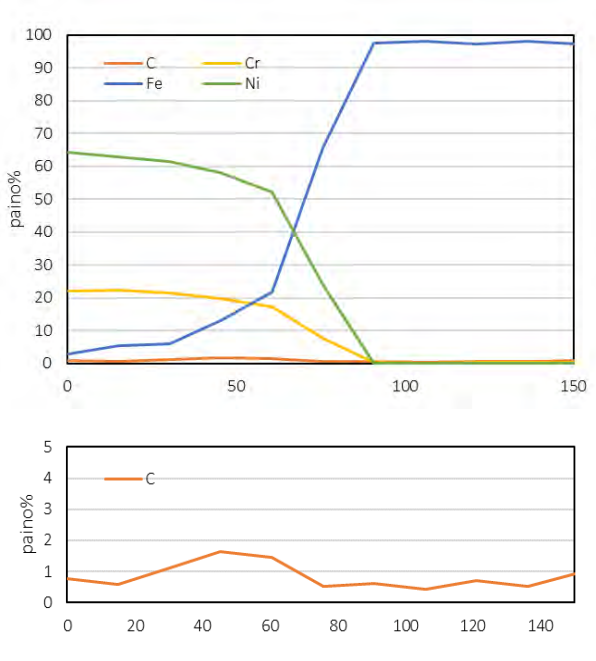

paino%
C


paino%
C

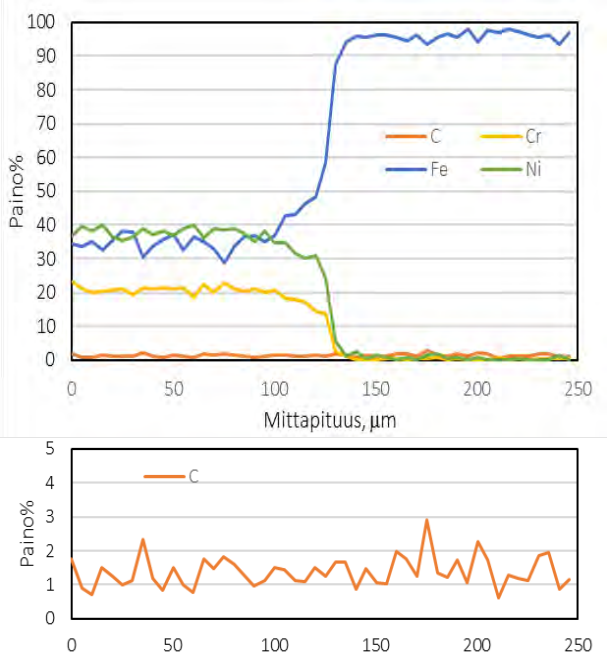
Uhlig625

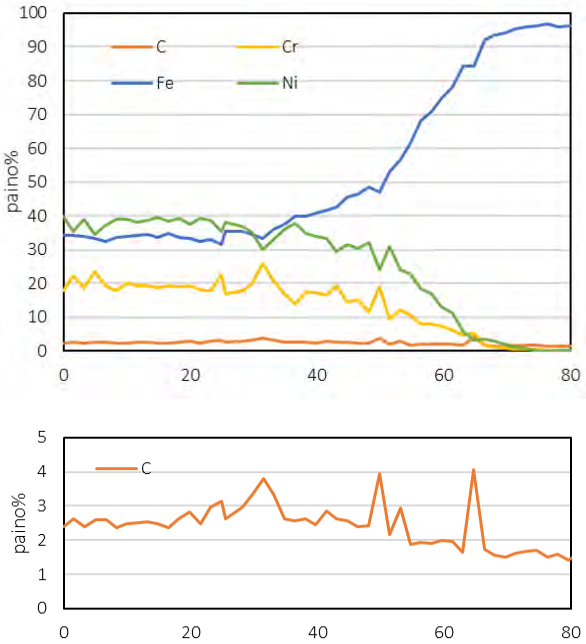

Paino%
Mittapituus, µm
C
Cr
Fe
Ni
Paino%
C

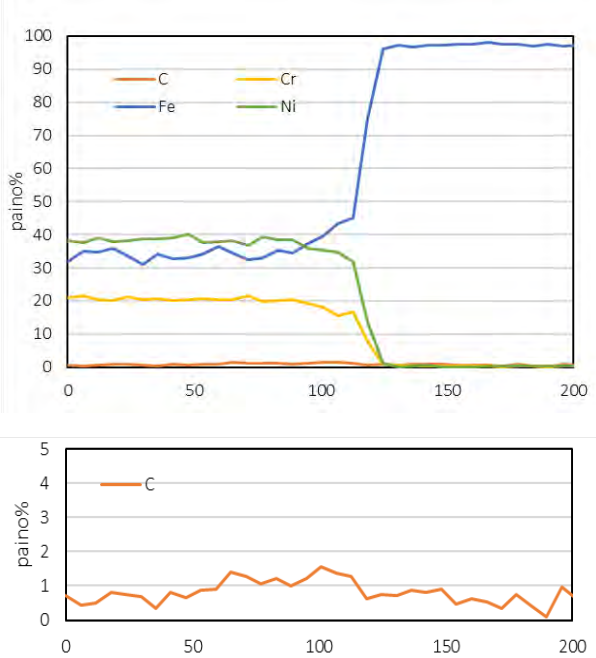

paino%
C
Cr
Fe
Ni
Nb
paino%
C


paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C

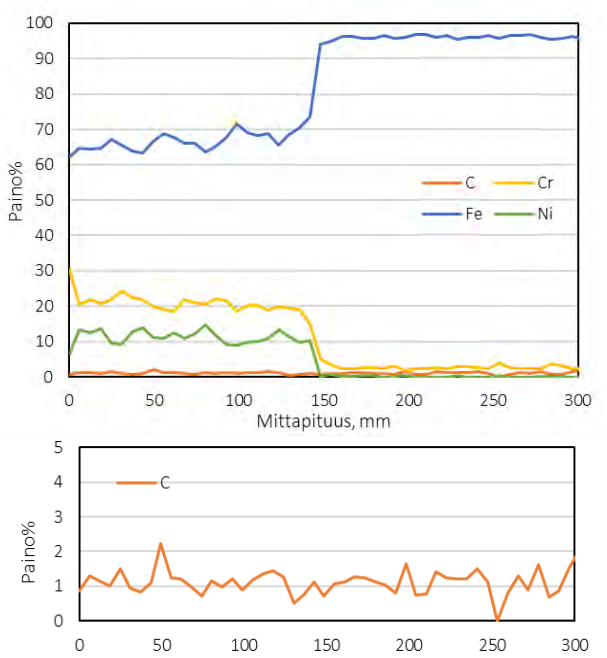
Uhlig825

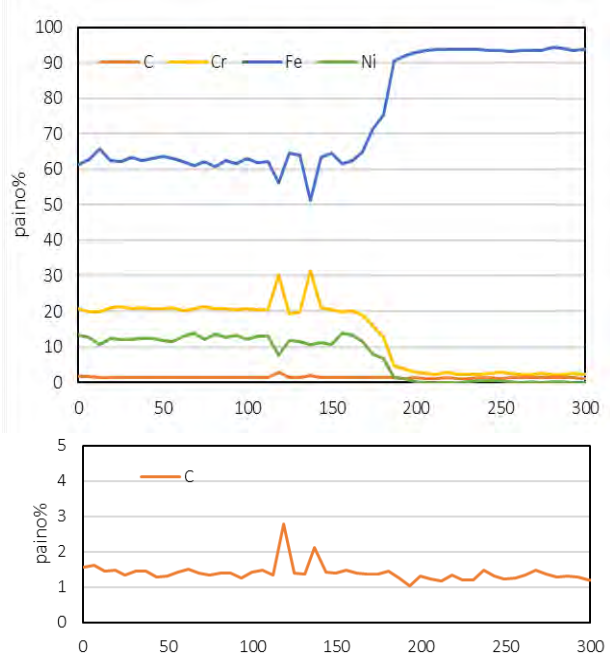


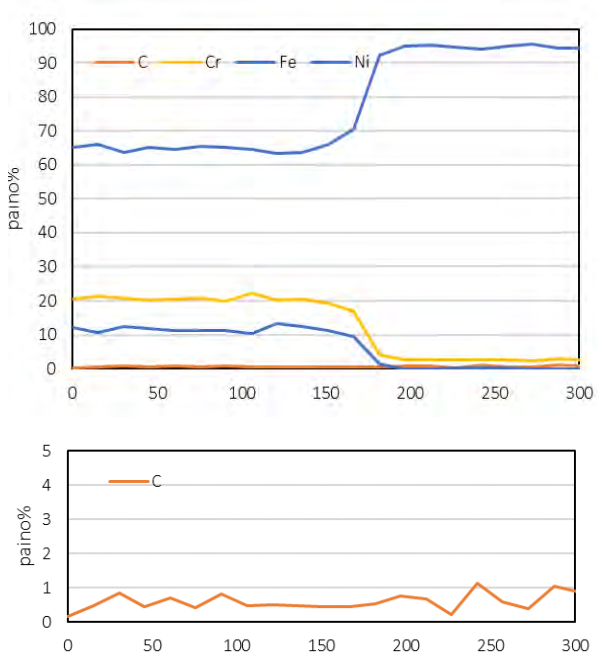




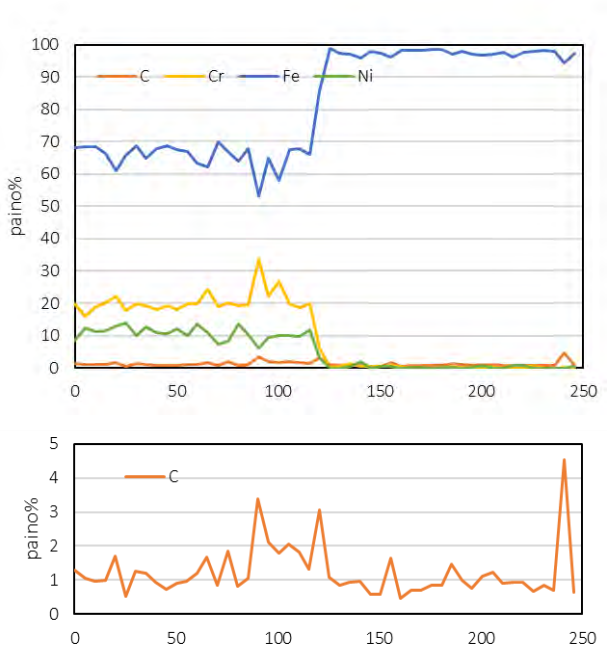
Areva 309L

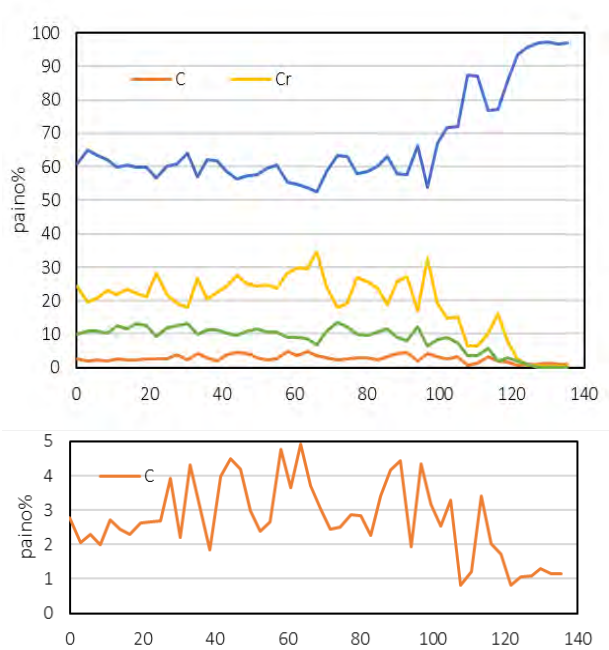

Paino%
Mittapituus, mm
C
Cr
Fe
Ni
Paino%
C

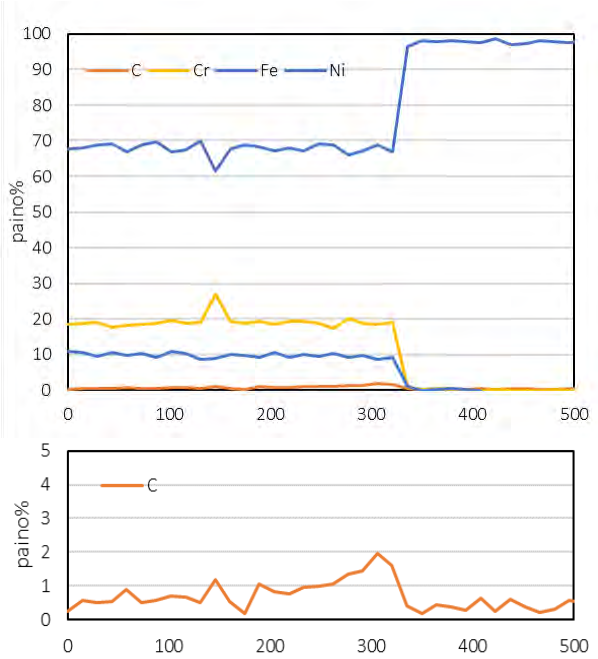

paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C


paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C

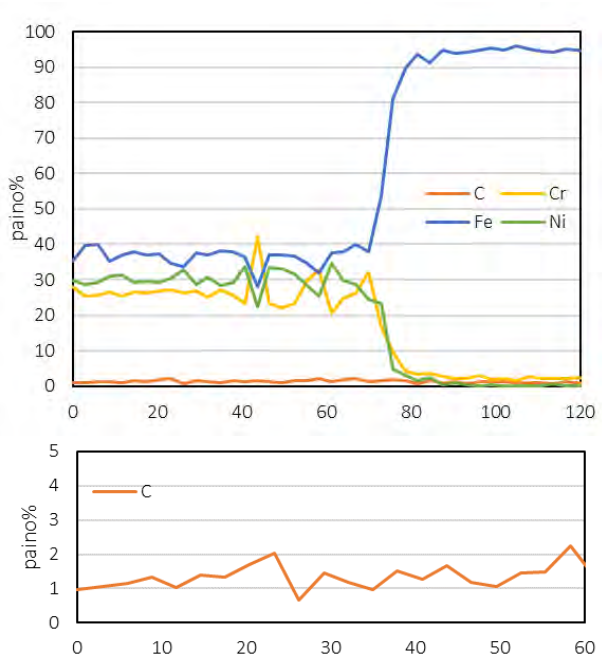
304L

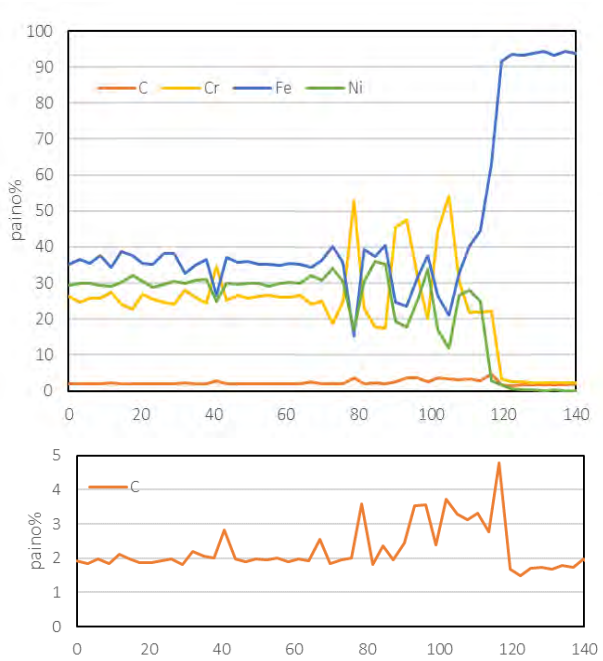

C
Cr
Fe
Ni
paino%
0
50
100
150
200
250
C
paino%

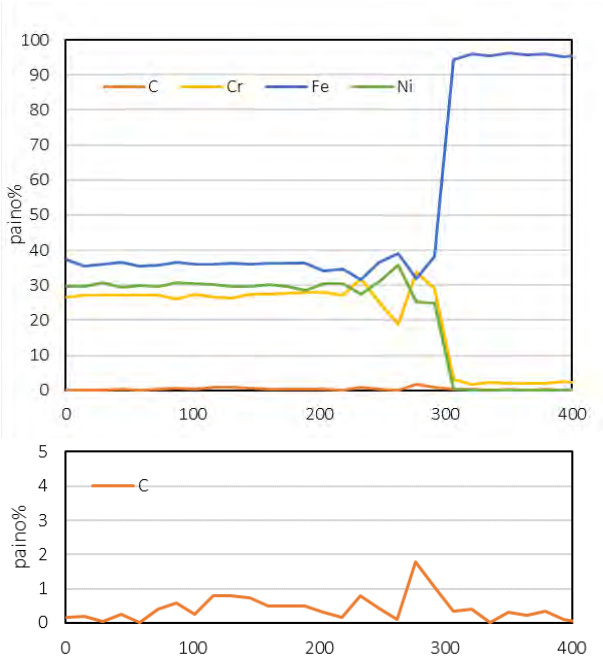

C
Cr
paino%
0
20
40
60
80
100
120
140
C
paino%


C
Cr
Fe
Ni
paino%
0
100
200
300
400
500
C
paino%

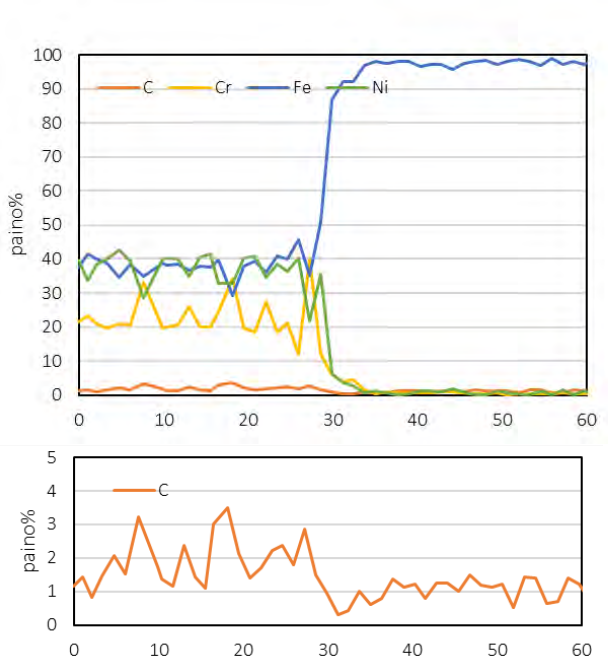
San28

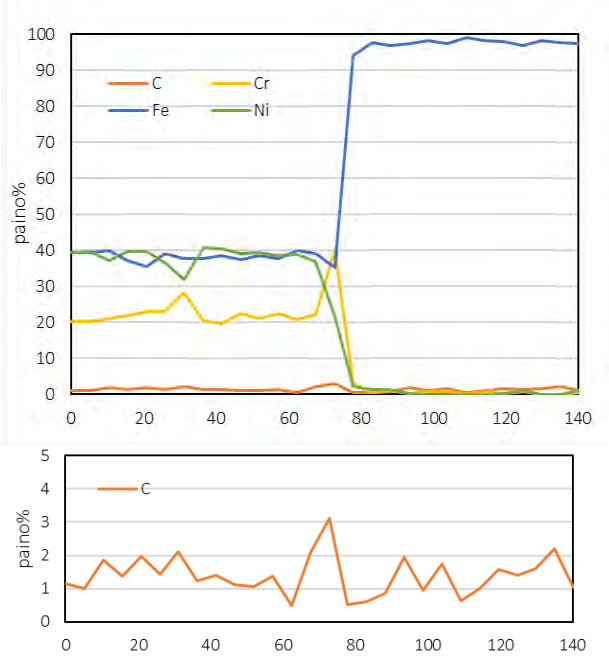

paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C

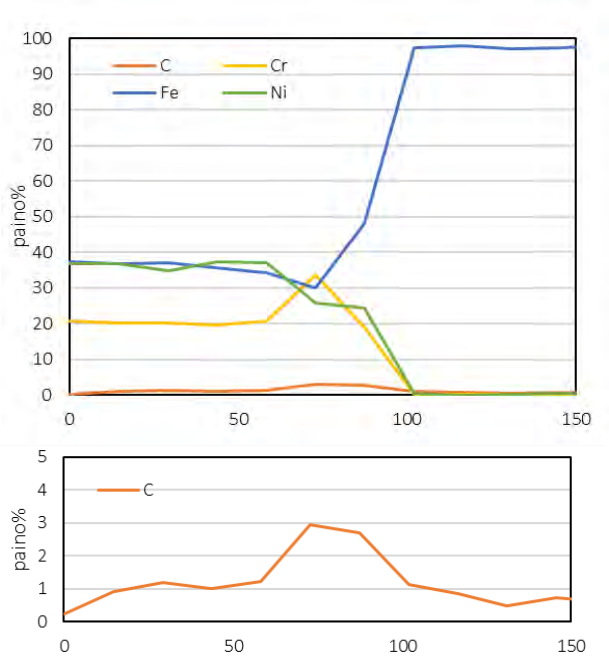

paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C


paino%
C
Cr
Fe
Ni
paino%
C

San38


C
Cr
Fe
Ni
paino%
C
paino%


C
Cr
Fe
Ni
paino%
C
paino%


C
Cr
Fe
Ni
paino%
C
paino%

LIITE 4

KTR: LUT, Selvitys sularännien toiminnasta vaihtelevalla kuormalla – diplomityö 27.10.2017

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Eetu Rantanen

SOODAKATTILAN SULAKOURUJEN TOIMINTAOLOSUHTEET: LÄMPÖRASITUKSET JA SULAVIRTAUKSET

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Yliopisto-opettaja, TkL Aija Kivistö
Työn ohjaajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
DI Markus Nieminen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Eetu Rantanen
Soodakattilan sulakourujen toimintaolosuhteet: lämpörasitukset ja sulavirtaukset

Diplomityö
2017
116 sivua, 54 kuvaa, 33 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Yliopisto-opettaja, TkL Aija Kivistö
Ohjaajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
DI Markus Nieminen

Hakusanat: Sulakourut, sularännit, lämpörasitus, sulavirta

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia soodakattilan sulakouruihin kohdistuvia lämpörasituksia. Kattilasta virtaavan kemikaalisulan tilavuusvirrassa tapahtuu voimakkaita vaihteluita, jotka altistavat sulakourut vaihtelevalle lämpökuormalle. Lämpökuormat yhdessä korrodoivan ympäristön kanssa muodostavat haasteellisen toimintaympäristön sulakouruille. Sulakouruvaurio voi johtaa sula-vesi-räjähdykseen, joka saattaa pahimmassa tapauksessa aiheuttaa henkilövahinkoja. Taloudelliset tappiot ovat todennäköisiä tuotannonmenetyksinä, mutta myös mahdollisina laitevaurioina.

Työssä kerättiin dataa useilta soodakattiloilta, jonka pohjalta tarkasteltiin tehonmuutoksia sulakourujen jäähdytysveteen sitoutuneessa tehossa. Tietojen avulla luotiin laskentamalli kourujen kokonaislämpörasitusten seurantaan. Lisäksi suoritettiin mittauksia sulakourun ja sulavirran lämpötilaprofiileihin sekä sulavirtaukseen liittyen. Sulan aiheuttama lämpövuo kouruun on mittausten perusteella suuruusluokaltaan 175 kW/m^2, joka vastaa lähes soodakattilan tulipesän maksimilämpövuota. Sulakourun jäähdytysveteen sitoutunut maksimiteho oli useilla tehtailla yli 100 kW, joka on noin kolminkertainen keskimääräiseen tehoon verrattuna. Lämpörasitusten seurannalla on mahdollista pyrkiä ennustamaan sulakourujen kuntoa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Energy Technology

Eetu Rantanen
Operational environment of recovery boiler's smelt spouts: heat loads and smelt flows

Master's Thesis
2017
116 pages, 54 figures, 33 tables and 6 appendices

Examiners: Professor, Ph.D. (Tech.) Esa Vakkilainen
University Lecturer, Lic.Sc. (Tech.) Aija Kivistö
Instructors: Professor, Ph.D. (Tech.) Esa Vakkilainen
M.Sc. (Tech) Markus Nieminen

Keywords: Smelt spouts, heat load, smelt flow

The purpose of this Master's Thesis was to investigate the heat loads of the recovery boiler's smelt spouts. There are large variations in the smelt flow coming from the recovery boiler which causes alternating heat loads to the smelt spouts. These variations with the corroding environment are the key points why the operational environment is challenging. If the smelt spout failure happens it is possible that the leaking water reacts with smelt. In the worst case the smelt-water explosion can cause bodily injuries. Economic losses are probable in the form of production loss but also process equipment can be damaged.

The data related to the smelt spout operation was collected from several recovery boilers. The variation of the cooling water thermal power was investigated. The calculation formula was made to compare total heat loads of different spouts. Also measurements related to smelt flow and temperature fields of smelt and smelt spout were made. The heat flux from smelt to cooling water is in the order of 175 kW/m^2 which is close to maximum heat flux in the furnace of the recovery boiler. The maximum thermal power in many spouts was over 100 kW which is approximately three times more than the average thermal power. It is possible to try to predict the smelt spout condition by monitoring heat loads.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Suomen Soodakattilayhdistystä mielenkiintoisesta ja käytännönläheisestä diplomityöaiheesta.

Kiitos ohjaajilleni Esa Vakkilaiselle ja Markus Niemiselle ajatuksista ja avusta, jotka ovat edesauttaneet työn edistymistä merkittävästi. Kiitos Soodakattilayhdistyksen Kestoisuustyöryhmälle sekä muille työhön osallistuneille tahoille, joita ilman data olisi jäänyt saamatta ja mittaukset suorittamatta. Kiitos Tero Arvilommi, Cay Gunnila, Kari Haaga, Martti Hirttiö, Tapani Hirvonen, Reijo Hukkanen, Jyri Järvi, Timo Karjunen, Jukka Kolehmainen, Kalle Kostamo, Jarmo Latva, Eija Liikola, Lauri Mattila, Teppo Pakarinen, Jaakko Rautala, Kari Salminen, Esa Vihavainen, Ilkka Välipakka sekä Toni Wahlman.

Vuodet Lappeenrannassa ovat luoneet paljon uusia mainioita ystävyyssuhteita, ja olen saanut mahtavia uusia kokemuksia opiskelijaelämässä ja sen ulkopuolella.

Haluan kiittää vanhempiani saamastani kannustuksesta läpi opintojeni. Erityiskiitos puolisolleni Reetalle, jonka kärsivällisyyttä olen koetellut aika ajoin. Kiitos pojallemme Aapolle vauhdikkaista hetkistä, jotka ovat toimineet hyvänä vastapainona diplomityön kirjoittamiselle.

Lappeenrannassa 27.10.2017
Eetu Rantanen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO
1 JOHDANTO 9
2 SOODAKATTILA 10
2.1 Soodakattiloiden kehitys 10
2.2 Moderni soodakattila 12
2.3 Soodakattilan toiminta 13
2.4 Sellutehtaan tuotannon kasvattaminen soodakattilan rajoittaessa tuotantoa 16
3 TULIPESÄREAKTIOT SOODAKATTILASSA 20
3.1 Mustalipeän palaminen 20
3.2 Reaktiot tulipesän alaosassa 23
4 SULA 25
4.1 Sulan aineominaisuudet 26
4.2 Sulan virtausominaisuudet 30
4.3 Sula-vesi-räjähdys 32
5 SULAKOURUT 34
5.1 Sulakourutyypit 35
5.1.1 Jäähdytetty kouru 35
5.1.2 Jäähdyttämätön kouru 38
5.2 Sulakourujen vauriomekanismit 39
5.2.1 Sulan metallin aiheuttama korroosio 39
5.2.2 Jännityskorroosio 40
5.2.3 Korroosioväsyminen ja lämpöväsyminen 42
5.2.4 Jäähdytysvesiongelmat 44
5.3 Sulavirtauksen ajallinen vaihtelu 51
5.4 Sulakourujen rikkoutumisen juurisyiden selvittäminen 54
5.5 Sulakourujen korroosiovauriot 55
6 SULAVIRRAN AJALLINEN VAIHTELU 58
6.1 Mittausdata esimerkkitehtaalta 58

6.1.1 Keskiarvolaskenta 59
6.1.2 Sulan tilavuusvirta ja kourun lämpötilaprofiili 69
6.1.3 Sulakourujen lämpörasitusten vaihtelu 80
6.2 Tehdaskohtaiset lämpörasitukset 88
6.2.1 Tehdas A 88
6.2.2 Tehdas B 91
6.2.3 Tehdas E 93
6.2.4 Tehdas K 96
6.2.5 Tehdas L 99
6.2.6 Tehdas M 100
6.2.7 Tehdas N 103
6.3 Eri tehtaiden lämpörasitusten vertailu 106
7 JOHTOPÄÄTÖKSET 110
8 YHTEENVETO 111
LÄHTEET 112

LIITE I. Sulakourun geometria
LIITE II. Termoelementtien varmennusmittaus
LIITE III. Sulan lämpötilaprofiilit
LIITE IV. Lämpötilaprofiilit sulakourujen reunassa
LIITE V. Sulakourun säteily
LIITE VI. Sulakourujen lämpörasitusten vertailu

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

a, b, c, d, e	merkitsevyystermi
A	virtauskanavan poikkipinta-ala [m^2]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
C	massaosuus [kg/kg_{ka}]
D_{h}	hydraulinen halkaisija [m]
Dh_{R}	pelkistymislämpö [MJ/kg]
DS	mustalipeän kuiva-ainepitoisuus [kg_{ka} /kg_{pa}]
G	massavuo [kg/m^2s]
h	entalpia [kJ/kg]
Δh_{v}	höyrystymislämpö [kJ/kg]
HHV	ylempi lämpöarvo [MJ/kg]
k	lämmönjohtavuus [W/mK]
l	veden höyrystymislämpö [MJ/kg]
L	pituus, paksuus [m]
m	veden kouruosan massa [kg]
M	moolimassa [kg/kmol]
n	korrelaatiotermi
NHV	nettolämpöarvo [MJ/kg]
Nu	Nusseltin luku
p	paine [bar]
P	märkäpiiri [m]
Pr	Prandtlin luku
q	lämpöteho [kW]
$\dot{q}$	lämpötehon muutos [kW/min]
q''	lämpövuo [W/m^2]
q_m	massavirta [kg/s]
q_v	tilavuusvirta [m^3/s]
Re_{D}	Reynoldsin luku

t	veden viipymäaika rännissä [s]
T	lämpötila [K, °C]
U	kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K]
w	jäähdytysveden virtausnopeus [m/s]
W	sulan kontaktipinnan leveys [m]
x	epäorgaanisen aineen osuus mustalipeästä [kg/kg$_{ds}$]
x_{tukk}	tukkeutumiskertojen määrä
X	höyryn massaosuus [-]

Kreikkalaiset aakkoset

Δ	erotus
η_{red}	reduktioaste
μ	viskositeetti [Ns/m^2]
ρ	tiheys [kg/m^3]

Alaindeksit

$\mathrm{H_2}$	vety
$\mathrm{H_2O}$	vesi
i	ilma
jv	jäähdytysvesi
k	kouru
m	metalli
ml	mustalipeä
pl	poikkileikkaus
s	sula
S	rikki
sat	kylläinen tila
tot	kokonais
v	vesi
w	seinä

1 JOHDANTO

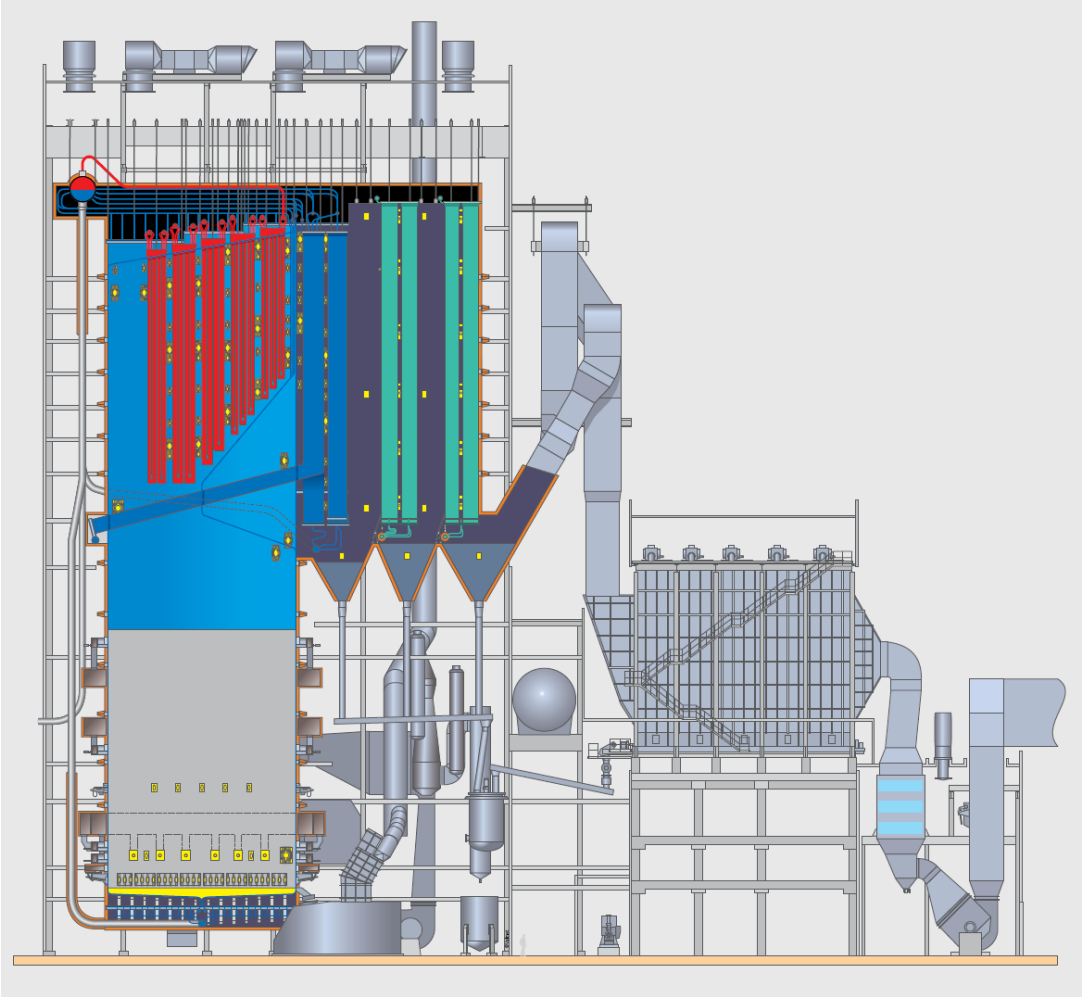
Soodakattilan sulakourujen eli sularännien vaurioitumiset muodostavat henkilövahinkoriskin mahdollisuuden, sillä sulan reagoidessa veden kanssa voi tapahtua niin sanottu sula-vesiräjähdys. Mikäli räjähdys tapahtuu, ovat taloudelliset tappiot erittäin todennäköisiä laitevaurioiden muodossa. Lisäksi aiheutuu tuotannonmenetystä. Tästä syystä sularännien kunnonseuranta on olennaista mahdollisuuksien mukaan myös vuosihuoltojen välillä. Mahdollinen vaurion havaitseminen johtaa tehtaan alasajoon ja kourun vaihtoon, joten kourujen kestoikään kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Kouruun kohdistuvat lämpörasitukset ovat usein osallisena sulakouruvaurioissa.

Tässä työssä tarkastellaan sulakouruihin kohdistuvia lämpörasituksia sulavirran vaihtelun seurauksena. Työtä varten on kerätty dataa kahdeksalta eri tehtaalta ja lisäksi esimerkkitehtaalla on suoritettu sulaan liittyviä mittauksia. Työssä lasketaan sulan ja jäähdytysveden välistä lämmönsiirtoa ja arvioidaan lämpövuota sekä kokonaislämmönsiirtokerrointa sulan ja jäähdytysveden välillä. Tehtaiden DCS-datasta määritetään sulakourujen kokemia maksimipiikkejä lämpötilan sekä lämpötehon osalta. Datan perusteella lasketaan lämpötehon muutoksiin perustuva kourun kokema kokonaisrasitus.

Aluksi työssä esitellään luvuissa kaksi ja kolme soodakattiloiden kehitys sekä toiminta pääpiirteittäin. Lisäksi mainitaan vaihtoehtoja soodakattilan modernisoinnille, mikäli soodakattila rajoittaa sellutehtaan tuotannon kasvattamista. Tämän jälkeen luvussa neljä esitellään sulan aine- sekä virtausominaisuuksia. Lukuun viisi on koottu eri sulakourutyyppien esittelyt sekä lämpörasituksiin liittyvät kourun vauriomekanismit. Luvussa kuusi käsitellään aluksi esimerkkitehtaan datasta tehtyjä keskiarvolaskelmia. Tämän jälkeen keskitytään tehtyihin mittauksiin sekä pohditaan lämpövuon suuruutta sulasta jäähdytysveteen. Lämpötehon muutokset esitellään sekä alkuperäisestä että muokatusta datasta. Lämpötehon erisuuruiset muutokset tarkastelujakson ajalta on taulukoitu ja tietoja verrataan muilta tehtailta kerättyyn dataan. Lopuksi luodaan lasketuista rasituksista kokonaislämpörasitusarvo joka kourulle.

2 SOODAKATTILA

Soodakattila on olennainen osa sulfaattisellutehtaan kemikaalikiertoa. Soodakattilan päätehtäviä ovat korkeapainehöyryn tuottaminen polttamalla mustalipeän orgaaninen aine, kemikaalien pelkistäminen ja useiden jätevirtojen ympäristövaikutusten minimointi. (Vakkilainen 2008b, 86). Nykyaikaisen soodakattilan poikkileikkauskuva on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Poikkileikkauskuva modernista soodakattilasta (muokattu lähteestä Valmet 2015a).

2.1 Soodakattiloiden kehitys

Soodakattiloiden kehitys on tapahtunut vuosikymmenten saatossa uusien tarpeiden tunnistamisen yhteydessä (Vakkilainen 2014, 19–27). Luonnollisesti teknologia rajoittaa omalta osaltaan tavoitteiden toteutumista. On myös muistettava, että soodakattilan käyttöikä on noin 30–40 vuotta (Vakkilainen 2006b), joten uuden teknologian laaja käyttöönotto vie aikaa.

Soodakattiloiden yleistyminen sulfaattisellutehtaissa tapahtui 1930-luvun tietämillä. Sellutehtaiden kapasiteetti oli kasvanut niin suureksi, että keittokemikaalien talteenotto oli kustannustehokasta. Jo ennen soodakattiloiden yleistymistä sellutehtailla oli ollut käytössä kemikaalien pelkistykseen suunniteltuja uuneja. Nämä vaativat kuitenkin monia manuaalisesti toteutettavia työvaiheita, eikä pelkistymisaste ollut erityisen korkea. Soodakattilat pystyttiin myös rakentamaan suuremmiksi ja energiatehokkaammiksi kuin aiemmat pyörivät uunit. Sulfaattisellutehtaan kemikaalien talteenotto paransi menetelmän kannattavuutta sulfiittimenetelmään verrattaessa. Tästä syystä sulfaattisellutehtaiden ja samassa soodakattiloiden määrä kasvoi merkittävästi 1900-luvun puolivälin aikaan. (Vakkilainen 2014, 19–22.)

Tärkein soodakattiloiden kehitystä ohjaava tekijä tuolloin oli käytettävyyden maksimointi. Käytännössä savukaasukanavien likaantuminen aiheutti ongelmia, jonka johdosta höyrynuohoimet otettiin käyttöön. Likaantumista pyrittiin hillitsemään myös putkijakoa väljentämällä. Käytettävyyden maksimointi hillitsi tuorehöyryn paineen ja lämpötilan nostoa. Kaksoislieriökattilat olivat hallitsevassa asemassa 1980-luvulle saakka, jolloin moderni yksilieriörakenne esiteltiin soodakattiloissa. Yksilieriörakenteen etuja ovat muun muassa vuotomahdollisuuden eliminointi kattilaan, nopeampi ylös- ja alasajo ohuemmasta lieriön seinämävahvuudesta johtuen, tasaisempi virtaus putkissa ja mahdollisuus rakentaa kapasiteetiltaan suurempia kattiloita. (Vakkilainen 2014, 22–23.)

Soodakattiloiden pohjat ja kattilan alaosat ovat kehittyneet vuosikymmenien saatossa merkittävästi. Ensimmäisissä soodakattiloissa uuniosat olivat vuorattuja esimerkiksi tulitiilillä, mutta tämän rakenteen tiheä uusimistarve kehitti vaihtoehtoisia rakenteita. Tangentiaalinen seinärakenne korvasi aiemman vuoratun rakenteen, mutta 1960-luvulla membraaniseinärakenne yleistyi ja on syrjäyttänyt tangentiaalisen rakenteen. Kattilan alaosan putkia on suojattu vuoraamalla tapitetut putkipinnat, mutta suuremman kunnossapitotarpeen johdosta tapitettua rakenneta ei enää suosita. Putkimateriaalina käytettiin aluksi hiiliterästä. Korroosioongelmien johdosta putkimateriaali muuttui kromiseosten kautta nykyisiin kompound-putkiin. (Vakkilainen 2014, 23.)

Palamisilman tuontijärjestelmät voidaan jakaa viiteen ikäluokkaan sen mukaan, mitkä ovat olleet päätavoitteet ilmajärjestelmän suunnittelussa. Ensimmäisten järjestelmien tavoitteena

oli tuoda ilma siten kattilaan, että mustalipeän palaminen olisi tasaista. Seuraavan sukupolven myötä tavoiteltiin korkeampaa reduktioastetta. Tämän tavoitteen toteutumiseksi mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta kasvatettiin ja sekundääri-ilmakanavien sijainti kattilassa vaihtui lipeäsuuttimien alapuolelta yläpuolelle. Kolmannen sukupolven ilmajärjestelmä jaettiin primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmaan. Tässä järjestelmässä ainoastaan tertiääri-ilmasuuttimet ovat lipeäsuuttimien yläpuolella. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden kasvuun yhdistettynä kolmannen sukupolven järjestelmällä saatiin tulipesän alaosan lämpötilaa jälleen kasvatettua ja täten vähennettyä rikkipäästöjä. Neljännen sukupolven ilmajärjestelmissä tavoitteena on ilman vaiheistuksella tai vertikaali-ilmalla vähentää NO_x-päästöjä. Neljännen sukupolven ilmajärjestelmien kehityksessä on jo ollut apuna CFD-mallit, joiden avulla palamisilman sekoittumista kattilassa on pystytty simuloimaan. Tällä hetkellä tutkitaan tapoja, joilla pystyttäisiin ilmajärjestelmän suunnittelulla vähentämään tulistimien ja savukaasukanavan höyrystinpintojen likaantumista. (Vakkilainen 2014, 25–26.)

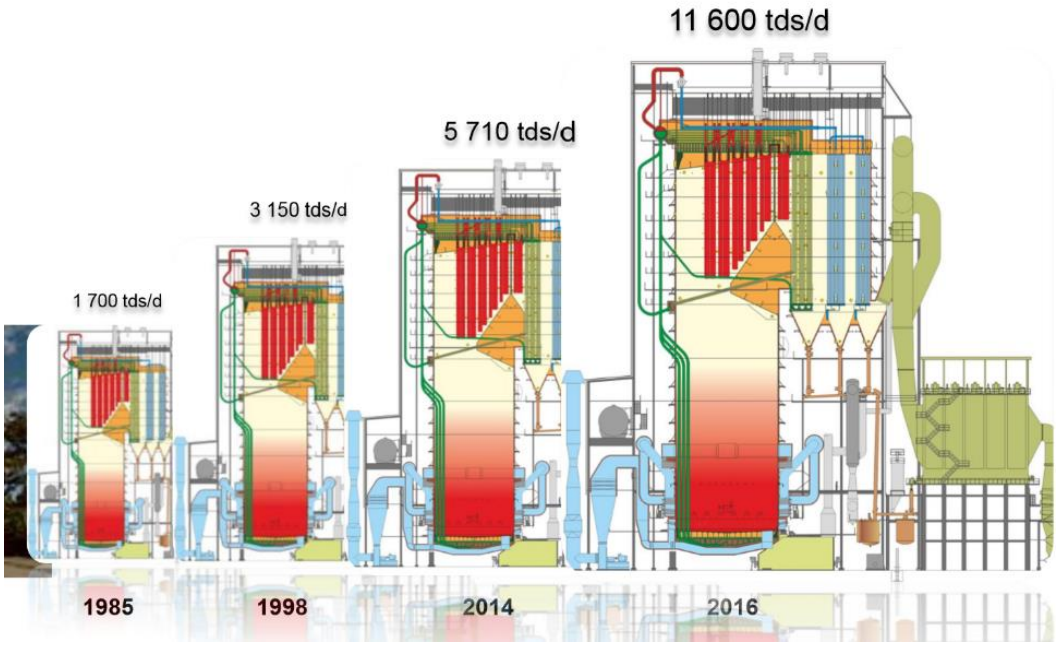
Mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on kasvanut vuosikymmenten aikana merkittävästi. 1950-luvulla kuiva-ainepitoisuus oli noin 50 %, josta se on kasvanut nykyiseen 80–85 %:iin (Vakkilainen 2009, 10–11). Kuiva-ainepitoisuuden nousu 68 %:iin mahdollisti soodakattilan osakuorma-ajon ilman tukipolttoainetta noin 65 %:n teholla maksimista. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuudella 60 % osakuorma-ajo tuotti haasteita, joten muutos oli merkittävä. Toinen huomattava parannus oli rikkipäästöjen väheneminen mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden ylittäessä 75 %. (Vakkilainen 2014, 24–25.)

2.2 Moderni soodakattila

Modernin soodakattilan piirteisiin kuuluu merkittävänä osana entistä tarkempi mustalipeän sisältämän energian hyödyntäminen. Sähköntuotannon lisäämiseksi kattiloiden tuorehöyryn paine ja lämpötila ovat kasvaneet. Nykyisin monen uuden soodakattilan suunnittelupaine on yli 100 bar ja tuorehöyryn lämpötila yli 500 °C. (Vakkilainen 2014, 26–28.)

Soodakattiloiden kapasiteetit ovat viime vuosina kasvaneet huomattavasti. Suurin soodakattila on kapasiteetiltaan 11 600 tonnia kuiva-ainetta päivässä (Andritz 2014; Kabar24 2017).

Kuvasta 2 voidaan havaita, että erityisesti viime vuosina soodakattiloiden kapasiteetin kehittyminen on ollut erittäin nopeaa.



Kuva 2. Soodakattiloiden koon kehitys viime vuosikymmenten aikana (muokattu lähteestä Venäläinen 2015).

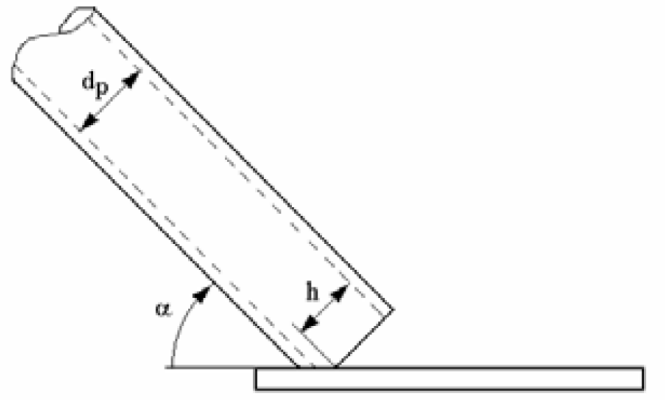
Modernille soodakattilalle tunnusomaista on, että sekä väkevät että laimeat hajukaasut poltetaan soodakattilassa. Muutenkin päästöjen hallintaan kiinnitetään entistä enemmän huomiota. (KnowPulp 2011.)

2.3 Soodakattilan toiminta

Soodakattilassa poltetaan sellun keitossa syntyvää mustalipeää. Mustalipeä koostuu orgaanisesta ja epäorgaanisesta aineesta. Orgaaninen aines sisältää puusta liuennutta ligniiniä, hemiselluloosaa sekä hieman selluloosaa. Epäorgaaninen osa koostuu reagoineista keittokemikaaleista sisältäen natrium- ja rikkiyhdisteitä. Mustalipeä erotetaan sellusta pesuvaiheessa. Pesun jälkeen mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on hyvin matala, 14–18 %, joten kuiva-ainepitoisuutta on nostettava ennen polttoa soodakattilassa. Haihduttamossa mustalipeän kuiva-ainepitoisuus nostetaan moderneissa tehtaissa noin 80 %:iin tai jopa yli. Mustalipeän viskositeetti kasvaa kuiva-ainepitoisuuden noustessa, joten mustalipeän muuttuvat pump-

pausominaisuudet on huomioitava esimerkiksi kuiva-ainepitoisuuden nostoa suunniteltaessa. Mikäli mustalipeän kuiva-ainepitoisuus viimeisen haihdutinvaiheen jälkeen on yli 75 %, on haihduttamon jälkeen sijaitsevan mustalipeän varastosäiliön oltava paineistettu. Tällöin mustalipeän lämpötila voi olla ilmanpaineista säiliötä korkeampi, jotta viskositeetti saadaan pysymään tarpeeksi alhaisena pumppauksen mahdollistamiseksi. Vaihtoehtoisesti mustalipeän viskositeettia voidaan alentaa lämpökäsittelyllä, jossa mustalipeä lämmitetään noin 175–195 °C:n lämpötilaan. Lämpökäsittelyssä mustalipeän ligniinin ja pitkien polysakkaridien rakenne pilkkoutuu ja viskositeetti alenee pysyvästi. (Parviainen et al. 2008, 38–42; 72–74.)

Polttolipeälinjassa on höyrylämmitin, jolla voidaan lämmittää mustalipeää ennen ruiskutusta kattilaan. Normaali mustalipeän ruiskutuslämpötila kattilaan on 115–135 °C. Mustalipeän syöttö kattilaan tapahtuu lipeäruiskuilla. Yleisin lipeäruiskun suutintyyppi on lusikkasuutin, muita käytettyjä suutintyyppejä ovat swirlcone- ja V-tyypin suuttimet. (KnowPulp 2011; Vakkilainen 2006, 169–170.) Lusikkasuuttimen periaatekuva on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Periaatekuva mustalipeän ruiskutukseen käytettävästä lusikkasuuttimesta (Miikkulainen et al. 2000).

Kuvan 3 mukaisesti syötettävä mustalipeä törmää suuttimen edessä olevaan levyyn, joka jakaa mustalipeän kattilaan. Kuvassa esitetty suuttimen levyn ja putken välinen kulma, α, on yleensä 35°–55°. Mustalipeän osuessa levyyn sen virtaussuunta kääntyy ja se muodostaa tasaisen kerroksen, joka pisaroituu kattilassa. (Adams 1997, 103–104.)

Kattilaan syötettävän mustalipeän kemiallinen koostumus on riippuvainen käytettävästä puulajista, keittomenetelmästä ja selluprosessista (Vakkilainen 2006a, 45). Tyypilliset mustalipeän kuiva-aineen koostumukset pohjoismaiselle havu- ja lehtipuulle on esitetty taulukossa 1. Inertti osuus sisältää esimerkiksi seuraavat aineet: typpi, kalsium, fluori, rauta, alumiini, magnesium, fosfori, vanadiini sekä silikaatti. Huolimatta pienistä massaosuuksista, on nämä aineet huomioitava prosessisuunnittelussa. Typpi muodostaa NO_x-päästöjä ja esimerkiksi kalsium, alumiini ja silikaatti muodostavat kerrostumia höyrystinpinnoille. Vanadiini lisää korkealämpötilakorroosiota. (Vakkilainen 2008a, 17.)

Taulukko 1. Pohjoismaisen havu- ja lehtipuupohjaisen mustalipeän tyypilliset koostumukset (Vakkilainen 2008a, 18).

	Havupuu (mänty)		Lehtipuu (koivu)	
	Tyypillinen [%]	Vaihteluväli [%]	Tyypillinen [%]	Vaihteluväli [%]
C	35,0	32–37	32,5	31–35
H	3,6	3,2–3,7	3,3	3,2–3,5
N	0,1	0,06–0,12	0,2	0,14–0,2
O	33,9	33–36	35,5	33–37
Na	19,0	18–22	19,8	18–22
K	2,2	1,5–2,5	2,0	1,5–2,5
S	5,5	4–7	6,0	4–7
Cl	0,5	0,1–0,8	0,5	0,1–0,8
Inertti	0,2	0,1–0,3	0,2	0,1–0,3

Mustalipeän ylempi lämpöarvo pohjoismaiselle havupuulle vaihtelee välillä 13,3–14,8 MJ/kg ja lehtipuulle välillä 13,0–14,3 MJ/kg. Mustalipeän yhteydessä käytetään nettolämpöarvoa, joka huomioi sekä veden höyrystymisen että kemikaalien pelkistymisen vaatiman lämmön. (Vakkilainen 2008a, 19–21.) Nettolämpöarvo lasketaan yhtälöllä 1.

$$NHV = HHV - l_{25}\left[\frac{M_{H2O}}{M_{H2}} \cdot C_H + \frac{1 - DS}{DS}\right] - \frac{78}{32} \cdot Dh_R \cdot C_S \cdot \eta_{red} \quad (1)$$

missä

NHV	nettolämpöarvo [MJ/kg]
HHV	ylempi lämpöarvo [MJ/kg]
l_{25}	veden höyrystymislämpö 25 °C:ssa [MJ/kg]
M_{H2O}	veden moolimassa [kg/kmol]

M_{H2}	vedyn moolimassa [kg/kmol]
C_{H}	vedyn massaosuus [$\mathrm{kg_H}$/kg kuiva-aine]
DS	mustalipeän kuiva-ainepitoisuus [kg kuiva-aine/kg polttoaine]
Dh_R	pelkistymislämpö [MJ/kg] (=13,1 MJ/kg Na_2S)
C_{S}	kuiva-aineen rikkipitoisuus [kg *S*/kg kuiva-aine]
η_{red}	reduktioaste

2.4 Sellutehtaan tuotannon kasvattaminen soodakattilan rajoittaessa tuotantoa

Sellutehtailla soodakattilan kapasiteetti on eräs yleisistä sellun tuotantokapasiteetin nostoa rajoittavista tekijöistä. Tällaisissa tilanteissa on kaksi mahdollisuutta pullonkaulan poistamiseksi, mikäli kokonaan uusi kattila jätetään vaihtoehtojen ulkopuolelle. Vanha kattila voidaan modernisoida tai soodakattilan kuormaa voidaan alentaa prosessimuutoksilla. Näitä mahdollisia muutoksia ovat ligniinin erotus mustalipeästä ennen polttoa sekä mustalipeän kaasutus. (Vakkilainen & Kivistö 2008, 5.)

Kattilan modernisoinnissa esimerkiksi lämpöpintoja lisäämällä ja ilmansyöttöä muokkaamalla saatetaan pystyä kasvattamaan soodakattilan kapasiteettia noin 20 % (Vakkilainen 2006b), mutta kapasiteetin kasvupotentiaali on hyvin yksilöllinen. Kirjallisuudessa on esitetty jopa lähes 40 %:n kasvu kattilan kapasiteetissa modernisoinnin tuloksena. Kyseisessä projektissa kahdesta modernisoidusta kattilasta toisen käyttöpainetta nostettiin merkittävästi, sillä kattilaa oli ajettu vedenkäsittelylaitteistosta johtuen suunnittelupainetta alemmassa paineessa. (Fransson 2014, 63–69.)

Mustalipeän kaasutuksella olisi mahdollista korvata soodakattila sellutehtaan kemikaalikierrossa. Mustalipeän kaasutus on esitelty 1960-luvulla, mutta teknologia ei ole korvannut perinteisiä soodakattiloita. Kaasutuksella olisi mahdollista kasvattaa tehtaan sähköntuotantoa polttamalla tuotekaasu kombilaitoksessa. Pilottikokoluokan laitoksista on kokemuksia ja eräs kehityssuunta on tuotekaasun jalostaminen bioliikennepolttoaineiksi. (Gebart 2014, 127–135.) Tällöin eräs mahdollisuus on hankkia pienen kokoluokan kaasutin, jolla voidaan kasvattaa mustalipeän käsittelykapasiteettia ja jatkojalostaa tuotekaasu polttoaineiksi.

Ligniinin osittaisella erotuksella mustalipeästä voidaan alentaa soodakattilan lämpökuormaa. Ligniinin erotus muuttaa mustalipeän koostumusta ja luonnollisesti myös orgaanisen ja epäorgaanisen aineen suhdetta. Epäorgaanisen aineen osuus mustalipeässä kasvaa, jolloin myös sulan määrä syötettyä polttolipeäkiloa kohti kasvaa. Ligniinin erotuksen vaikutukset mustalipeän koostumukseen eri erotusosuuksilla on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ligniinin erotuksen vaikutus mustalipeän koostumukseen Pohjoismaisella havupuuta käyttävällä tehtaalla (muokattu lähteestä Vakkilainen & Kivistö 2008, 14).

Lignin removal		0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
C	%	34,65	33,49	32,26	30,95	29,56	28,07
H	%	3,46	3,37	3,28	3,17	3,06	2,95
N	%	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
S	%	4,09	4,21	4,34	4,47	4,62	4,77
Na	%	21,40	22,03	22,70	23,41	24,17	24,98
K	%	2,20	2,27	2,33	2,41	2,49	2,57
Cl	%	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18
O by diff	%	33,95	34,38	34,83	35,32	35,83	36,38
Inorganics		26,36	27,02	27,72	28,47	29,27	30,12
S/(Na2+K2)	mol-%	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
Cl/(Na+K)	mol-%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
K/(Na+K)	mol-%	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Dry solids	%	78,0	78,0	78,0	78,0	78,0	78,0

Taulukosta havaitaan, että hiilen osuus vähenee yli 6 %-yksikköä ligniinin erotuksen ollessa 50 %. Epäorgaanisen aineen osuus mustalipeässä nousee kyseisellä erotusasteella lähes 4 %-yksikköä. Koska ligniinin lämpöarvo on korkea, vaikuttaa sen erotus merkittävästi mustalipeän lämpöarvoon (Vakkilainen & Kivistö 2008, 8). Ligniinin erotuksen vaikutukset eri erotusasteilla kattilan toimintaan on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ligniinin erotuksen vaikutukset soodakattilalla (Vakkilainen & Kivistö 2008, 13; 19).

Lignin removal		0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Heating value of BLDS	kJ/kg	14148	13795	13419	13018	12589	12128
Heat in to recovery boiler	MW	524	495	467	438	409	380
Massflow to recovery boiler	tDS/d	3439	3330	3221	3112	3003	2894
HHRR	kW/m^2	3376	3187	2999	2811	2623	2435
Black liquor DS generation	kg/ADt	1807	1752	1696	1641	1585	1530
Lignin in black liquor	kg/BDt	616	554	493	431	369	308
Total organic to BL	kg/BDt	1358	1296	1234	1173	1111	1050
Total inorganic to BL	kg/BDt	650	650	650	650	650	650
NetHeat	kW/kgds	8959	8580	8178	7751	7296	6810
Air at 1.164	$m^3n/kgds$	3,585	3,427	3,260	3,082	2,892	2,690
FG at 1.164	$m^3n/kgds$	4,317	4,143	3,958	3,761	3,552	3,329
FurnH/FG	kW/m^3n	2660	2669	2680	2693	2708	2726
Fg	m^3n/s	170,0	158,2	146,4	134,7	123,0	111,3
Air	m^3n/s	121,3	112,4	103,6	94,8	86,0	77,3
LFtemp	^oC	1136	1142	1142	1142	1136	1114

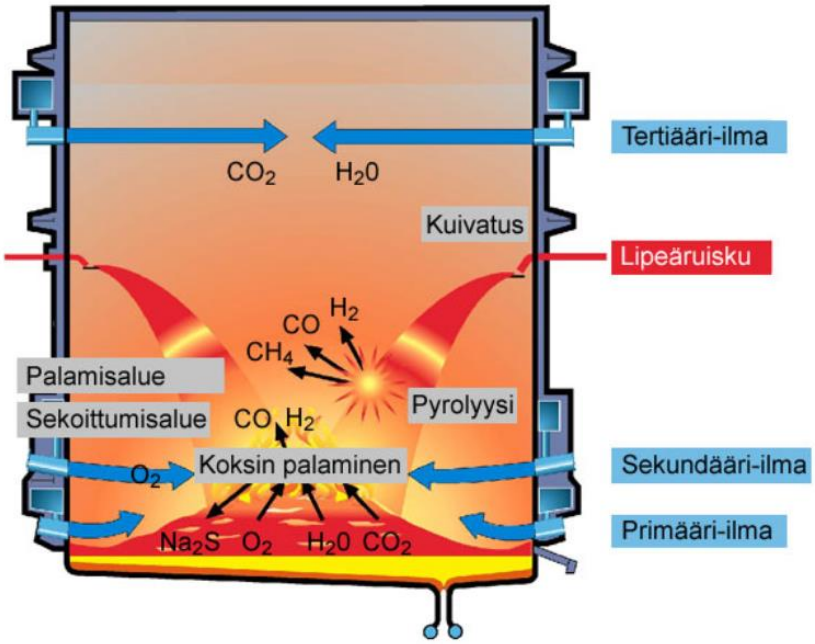
Taulukosta havaitaan, että lämmöntuonti soodakattilaan laskee lähes 30 % ligniinin erotusasteella 50 %. Samalla ilman tarve laskee merkittävästi. Tätä ilmiötä korostaa ligniinin erotuksen aiheuttama ilmantarpeen lasku myös polttolipeäkiloa kohti. Näiden syiden ansiosta kattilaan voidaan ruiskuttaa enemmän mustalipeää, jolloin lipeän epäorgaanisen aineen käsittelykyky kasvaa.

Mustalipeän koostumuksen muuttuminen vaikuttaa sulavirtaan. Syötettyä polttolipeäkiloa kohti kattilan sulavirta kasvaa. Epäorgaanisen aineen määrä mustalipeän kuiva-aineessa kasvaa noin 32 prosentista 38 prosenttiin, eli 6 %-yksikköä ligniinin erotusosuudella 50 %. Mikäli siis kattilan teho säilyy samana, kasvaa sulavirran määrä huomattavasti enemmän. Mustalipeää täytyy ruiskuttaa noin 1,3-kertainen määrä, jotta kattilan höyryteho säilyy samana kuin ilman ligniinin erotusta. Tällöin sulavirran määrä karkeasti puolitoistakertaistuu alkuperäiseen tilanteeseen verrattaessa.

Ligniinin erotusmenetelmistä Valmetin LignoBoost on edennyt kaupalliseksi tuotteeksi. Mikäli soodakattila on sellutehtaan rajoittavana tekijänä, voidaan ligniinin 25 prosentin erotusosuudella pystyä kasvattamaan selluntuotantoa noin 20–25 prosenttia. Teollisen kokoluokan laitokset sijaitsevat Domtarin tehtaalla Plymouthissa Yhdysvalloissa ja Stora Enson Sunilan tehtaalla Suomessa. Plymouthin LignoBoost-laitos käynnistyi 2013 ja sen vuosikapasiteetti on 25 000 tonnia ligniiniä. Sunilan laitos käynnistyi 2015 ja sen vuosikapasiteetti on 50 000 tonnia. (Valmet 2015b.)

3 TULIPESÄREAKTIOT SOODAKATTILASSA

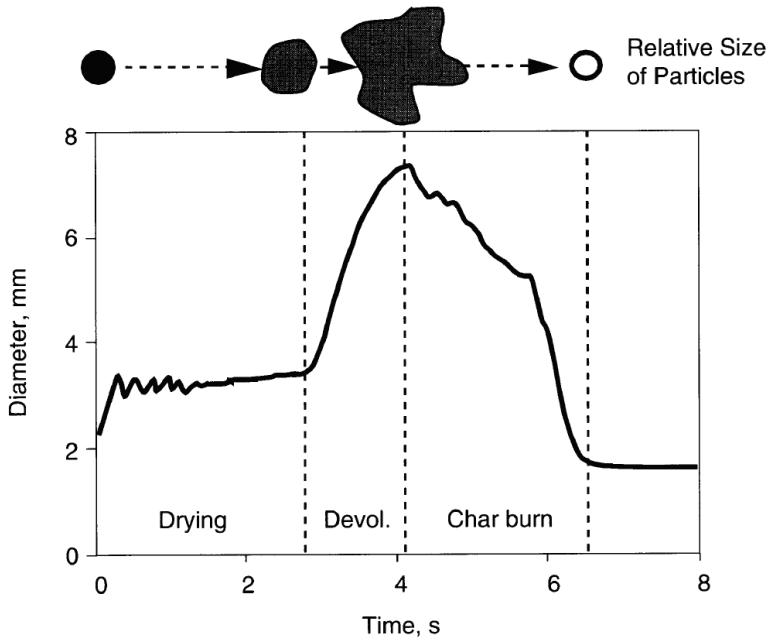
Tässä luvussa kuvataan soodakattilan tulipesäreaktioita. Kuvassa 4 esitetään mustalipeän palamisen eri vaiheet.



Kuva 4. Mustalipeän palamisen eri vaiheet soodakattilan tulipesässä (KnowPulp 2011).

3.1 Mustalipeän palaminen

Mustalipeän reaktiot soodakattilassa koostuvat neljästä eri vaiheesta, jotka tapahtuvat osittain päällekkäin. Vaiheita ovat mustalipeäpisaran kuivuminen, pyrolyysi, koksin palaminen ja sulan reaktiot. Sulfaattikeitossa syntyvälle mustalipeälle on ominaista lipeäpisaran merkittävä paisuminen palamisen aikana. Tilavuus saattaa kasvaa 20–50-kertaiseksi palamisen aikana. Toinen mustalipeän merkittävä ero muihin polttoaineisiin verrattaessa on mustalipeän sisältämän epäorgaanisen aineen suuri osuus. Epäorgaanisen aineen johdosta mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden vertaaminen suoraan muihin biopolttoaineisiin on harhaanjohtavaa. Mikäli verrataan mustalipeän vesipitoisuutta palavan orgaanisen aineen määrään, eli käsitellään epäorgaanista ainesta tuhkana, kasvaa laskennallinen tuhkattoman aineksen vesipitoisuus kymmeniä prosenttiyksikköjä. (Frederick & Hupa 1997, 131–133.) Tulipesään vapautuvaa lämpömäärää laskettaessa on lisäksi huomioitava yhtälön 1 mukaisesti pelkistymisreaktioiden vaatima lämpö. Mustalipeän palamisen vaiheet on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Mustalipeän paisuminen esitettynä palamisvaiheen ja ajan funktiona (Vakkilainen 2006a, 45).

Mustalipeän kuivuminen tapahtuu päällekkäin pyrolyysin kanssa. Mustalipeäpisaran sisältämä vesi höyrystyy tulipesän lämmön vaikutuksesta. Jopa tulipesän lämpötiloissa lämmönsiirto pisaraan rajoittaa höyrystymistä, kemialliset reaktiot pisaran sisällä voisivat tapahtua nopeamminkin. Tulipesässä 2 mm mustalipeäpisaran kuivuminen kestää noin 0,1–0,2 sekuntia. (Frederick & Hupa 1997, 136–137; Vakkilainen 2008b, 99–100.)

Pyrolyysivaiheessa mustalipeäpisaran tilavuus kasvaa, pisaran haihtuvat aineet kaasuuntuvat ja pisarassa havaitaan näkyvä liekki. Muodostuvia kaasuja ovat esimerkiksi hiilidioksidi ja -monoksidi, vety, vesihöyry, kevyet hiilivedyt, rikkivety, orgaaniset rikkiyhdisteet, typpioksidi ja ammoniakki. Nämä muodostuvat kaasut yhdessä pisaran pintaominaisuuksien kanssa aikaansaavat mustalipeän paisumisen. Paisuminen jatkuu läpi pyrolyysivaiheen. (Frederick & Hupa 1997, 133; Vakkilainen 2006a, 47–50.)

Koksin palamisessa jäljellä oleva orgaaninen hiili palaa ilman näkyvää liekkiä. Happi diffusoituu koksipartikkeliin ja reagoi hiilen kanssa muodostaen pääasiassa hiilimonoksidia eli häkää. Häkä diffusoituu takaisin ja hapettuu tulipesässä hiilidioksidiksi. Koksin sisältämä

epäorgaaninen osa toimii katalyyttinä nopeuttaen hiilen palamista. Pyrolyysivaiheessa tapahtunut paisuminen edesauttaa hapen ulkoista kulkeutumista koksipartikkeliin ja avaa partikkelin sisäistä huokoista rakennetta. Kaasujen vaihto toimii koksin palamisnopeutta rajoittavana tekijänä. (Frederick & Hupa 1997, 152.) Pääasialliset hiilen ja hapen välillä tapahtuvat reaktiot koksin palamisessa ovat:

$$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO \quad (2)$$

$$C + H_2O\ (v) \rightarrow CO + H_2 \quad (3)$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2\ CO \quad (4)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (5)$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 \quad (6)$$

missä

C	hiili
O_2	happi
CO	hiilimonoksidi
H_2O	vesi
H_2	vety
CO_2	hiilidioksidi

Koksin hapettumien auttaa myös kemikaalien pelkistämisessä seuraavasti:

$$4C + Na_2SO_4 \rightarrow Na_2S + 4CO \quad (7)$$

$$2C + Na_2CO_3 \rightarrow 2Na\ (v) + 3CO \quad (8)$$

missä

Na_2SO_4	natriumsulfaatti
Na_2S	natriumsulfidi
Na_2CO_3	natriumkarbonaatti
Na	natrium

Natriumkarbonaatin pelkistyminen yhtälön 8 mukaisesti tapahtuu hitaammin kuin koksin reagoiminen hapen kanssa yhtälöiden 2–4 mukaisesti, joten käytännössä hiilen hapettuminen

yhtälön 8 mukaisesti on vain vähäistä. Periaatteessa natriumsulfaattiin ja -karbonaattiin sitoutunut happi kattaisi noin neljänneksen vaadittavasta happimäärästä, jotta hiili koksissa reagoisi hiilimonoksidiksi. Käytännössä happea saadaan pelkistymisreaktioista vähemmän koksin palamiseen, noin 10 %. Koksin palamisvaiheessa syntyy myös epäorgaanisista komponenteista koostuvaa kaasua. Natrium höyrystyy pääasiassa alkuainemuodossa, kun taas kalium, kloori ja osa natriumista höyrystyvät klorideina. Epäorgaanisen aineen vapautuminen tapahtuu pääasiassa koksin palamisen tapahtuessa jo matkalla lipeäsuuttimesta kekoon. Myös typpeä vapautuu koksin palamisvaiheessa, noin 20–50 % mustalipeän sisältämästä typestä. Vapautuvan typen määrä kasvaa tulipesän lämpötilan noustessa. (Frederick & Hupa 1997, 153.)

Mustalipeän paisuminen vaikuttaa merkittävästi mustalipeän käyttäytymiseen tulipesässä. Paisuneet partikkelit kulkeutuvat huomattavasti helpommin savukaasujen mukana pois tulipesästä. Paisuminen vaikuttaa myös pisaran kuivuuteen. Huomattavasti paisunut pisara kulkeutuu hitaammin kekoon, jolloin se on kuivempi, mutta myös vähemmän hiiltä sisältävä kekoon laskeutuessa kuin vähemmän paisunut pisara. Ruiskutettavan lipeän pisarakoolla voidaan hallita pisaroiden käyttäytymistä tulipesässä. Liian pieni pisarakoko aikaansaa edellä mainitun tilanteen, jossa pisara paisuessaan kulkeutuu savukaasuvirtauksen mukana pois tulipesästä. Hieman suuremmat pisarat laskeutuvat kekoon, mutta merkittävä osa palamisesta on tapahtunut jo ennen kekoa, jolloin partikkelin sisältämä koksimäärä ei riitä ylläpitämään keon kokoa. Ylisuuret pisarat puolestaan eivät ehdi kuivua täysin ennen kekoa, jolloin ne tuovat kosteutta kekoon ja täten laskevat keon lämpötilaa. Optimaalinen pisarakoko on sellainen, joka kuivuu ennen kekoa, mutta kuitenkin suurin osa koksista on palamatta. Tällöin hiiltä kulkeutuu kekoon, mikä edesauttaa keon tasaista palamista. Mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta nostamalla suurempi osa mustalipeäpisaroista saapuu kekoon kuivina, mutta silti koksia sisältävinä. (Frederick & Hupa 1997, 149–152.)

3.2 Reaktiot tulipesän alaosassa

Soodakattilan pohjalla sijaitseva keko sisältää lähinnä koksia ja epäorgaanisia yhdisteitä. Keko koostuu päällekkäisistä kerroksista, joita ovat: aktiivinen ylin kerros, pelkistävä sulakerros, nestemäinen sulakerros ja kiinteä sulakerros. Tulipesän pohjan muoto vaikuttaa keon

ominaisuuksiin. Ylimmässä kerroksessa partikkelit ovat kosketuksissa tulipesän kaasujen kanssa, joten tässä kerroksessa tapahtuu koksin palaminen. Ylimmässä kerroksessa tapahtuu sulfaatti-sulfiitti-kiertoa. Pelkistynyt natriumsulfidi reagoi hapen kanssa muodostaen natriumsulfaattia, joka jälleen pelkistyy. Natriumsulfaatin pelkistyminen voi tapahtua sulfaatin reagoidessa hiilen, hiilimonoksidin tai vedyn kanssa. Soodakattilaympäristössä sulfaatin reaktio hiilen kanssa on pelkistymisessä pääroolissa. Pelkistävä sulakerros sijaitsee ylimmän kerroksen alla, jolloin pelkistynyt sulfidi ei pääse reagoimaan hapen kanssa ja täten säilyy pelkistyneessä muodossa. Keon pohjalla sijaitsee kiinteä kerros, joka suojaa kattilaputkia korroosiolta. Sula jähmettyy suunnilleen 760 °C:n lämpötilassa. Keossa tapahtuvat pelkistymisreaktiot vaativat lämpöä. Koksin palaminen keon yläosassa tuottaa lämpöä, mutta myös tulipesän seinien säteily lämmittää keon pintaa. Konvektio siirtää lämpöä joko kekoon tai keosta tulipesän kaasuihin, riippuen ympäröivien kaasujen lämpötilasta. (Grace & Frederick 1997, 163–179.) Taulukkoon 4 on koottu keon eri osien fysikaalisia ja lämmönsiirtoon liittyviä ominaisuuksia. On huomattava, että lämmönjohtavuuden arvot ovat erittäin alhaisia, joten mahdollisessa kattilan alasajotilanteessa keon jäähtyminen vie huomattavasti aikaa.

Taulukko 4. Tulipesän keon eri alueiden ominaisuudet taulukoituna (Richardson & Merriam 1982, 561).

		Aktiivinen alue	Epäaktiivinen alue	Nestemäinen sula	Kiinteä sula
Tiheys	kg/m^3	290–460	480–1330	1923	2163
Ominaislämpö-kapasiteetti	kJ/kgK	1,25	1,25	1,34	1,42
Lämmönjohtavuus	W/mK	0,28–0,38	0,078	0,45	0,88
Terminen diffusiviteetti	m^2/s	$0{,}5\text{-}1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$0{,}5\text{-}0{,}75 \cdot 10^{-7}$	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$	$2{,}8 \cdot 10^{-7}$
Muodostumislämpö	kJ/kg	-	-	142	-

4 SULA

Sula koostuu pääasiassa epäorgaanisista aineista. Pääasialliset alkuaineet sulassa ovat natrium ja rikki. Soodakattilan yksi perustehtävistä on pelkistää keittokemikaalit takaisin hyödynnettävään muotoon. Pelkistymistä mitataan reduktioasteella.

$$\text{Reduktioaste} = \frac{Na_2S}{Na_2S + Na_2SO_4} \tag{9}$$

Soodakattilan sulan lämpötila vaihtelee tyypillisesti välillä 750–850 °C siten, että uudemmissa mustalipeää korkeammassa kuiva-ainepitoisuudessa polttavissa kattiloissa lämpötila on lähempänä ylärajaa. Sulan koostumus moderneilla kattiloilla on melko samankaltainen, natriumkloridin ja kaliumyhdisteiden määrä on sidoksissa niiden määrään mustalipeässä. (Vakkilainen 2006a, 66–68.) Tyypilliset lehti- ja havupuuta käyttävien sellutehtaiden sulan koostumukset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Sulan sisältämien pääyhdisteiden osuudet taulukoituna (Vakkilainen 2006a, 68).

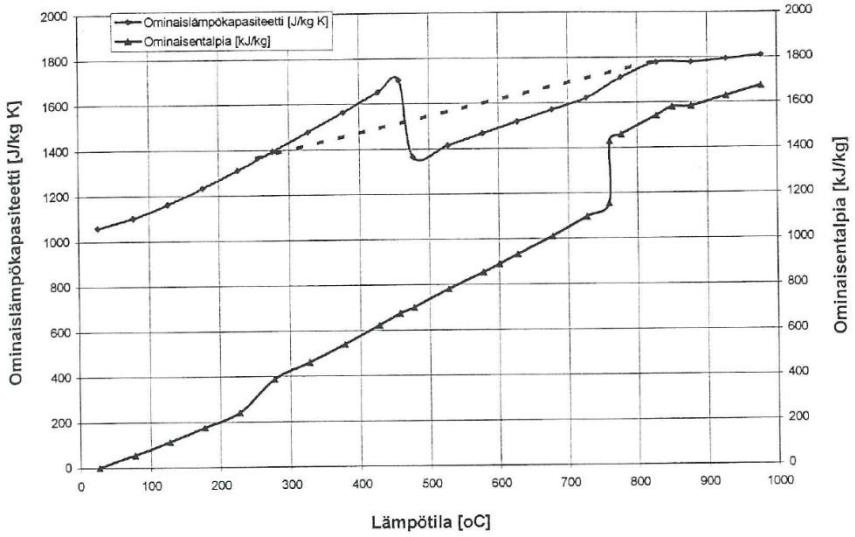
		Havupuu	Lehtipuu
Na_2S	%	25–28	19–21
Na_2CO_3	%	66–68	72–75
Na_2SO_4	%	0,4–1,0	0,6–1,4
$Na_2S_2O_3$	%	0,3–0,4	0,2–0,4
Muut	%	5–6	3–5

Taulukosta voidaan havaita, että natriumsulfaatin, Na_2SO_4, määrä on ymmärrettävästi pieni, joten reduktioaste on hyvä. Huomioitavaa on, että natriumkarbonaatin, Na_2CO_3, osuus sulasta on huomattava, yli kaksi kolmasosaa. Natriumsulfaatin pelkistyminen sulfidiksi vaatii rikkiä, ja yleensä natriumin määrä lipeässä on merkittävästi rikkiä suurempi, jolloin osa natriumista ei pelkisty sulfidiksi. Tämä osa poistuu kattilasta natriumkarbonaattina, Na_2CO_3. (Hupa & Hyöty 1995, 461.)

4.1 Sulan aineominaisuudet

Sulan aineominaisuuksien määrittäminen toteutetaan pääasiassa kattilasta otettavia sulanäytteitä analysoimalla. Tiettyjä aineominaisuuksia voidaan arvioida myös sulan pääkomponenttien aineominaisuuksien avulla, esimerkiksi sulan sulamispiste arvioidaan usein faasidiagrammin avulla.

Laine (1995, 35−36) on määrittänyt sulan ominaislämpökapasiteetin ja ominaisentalpian sulan komponenttien aineominaisuuksien perusteella. Kuvassa 6 esitettävät arvot sulan ominaislämpökapasiteetille ja ominaisentalpialle on määritetty sulalle, jonka koostumus on 72,7 mol-% Na_2CO_3, 18,6 mol-% Na_2S, 2,8 mol-% Na_2SO_4, 0,5 mol-% $Na_2S_2O_3$, 4,1 mol-% K_2CO_3 ja 1,2 mol-% NaCl. Katkoviivalla kuvattu ominaislämpökapasiteetin sovite huomioi sen, ettei sulan kiderakenteen muutos vastaa yksittäisten sulakomponenttien kiderakenteiden muutoksia.



Kuva 6. Sulan ominaislämpökapasiteetti ja ominaisentalpia lämpötilan funktiona (Laine 1995, 36).

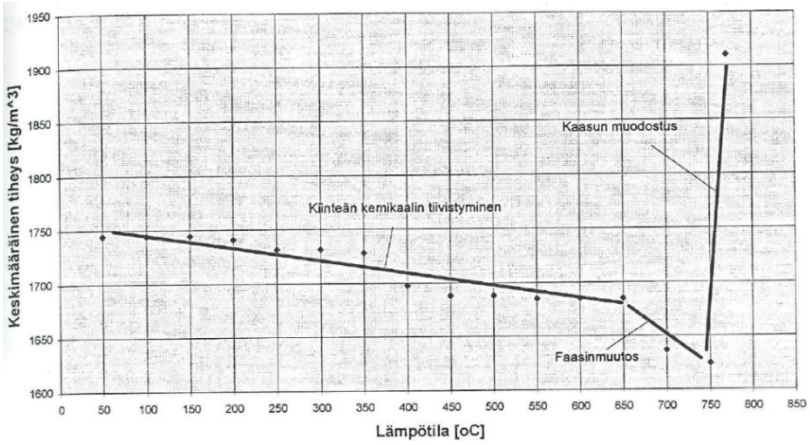
Sulan sulamislämpö on noin 274 kJ/kg. Natriumsulfidin sulamislämmölle on kirjallisuudessa toisistaan poikkeavia arvoja, erot johtuvat oletettavasti natriumsulfidin herkästä hapettumisluonteesta. (Laine 1995, 38.) Tästä syystä luotettavan mittausjärjestelyn toteuttaminen on haasteellista.

Laine (1995, 46−50) on määrittänyt sulan tiheyden kokeellisesti ottamalla sulanäytteitä sulakourun alapuolelta sulaputouksesta. Sulan tiheys 760 °C:n lämpötilassa on keskimäärin 1860 kg/m^3 ja 25 °C:n lämpötilassa 1650 kg/m^3. On huomioitava, että erityisesti huoneenlämpötilassa mittaustuloksissa on merkittäviä eroja mittauskertojen välillä. Vaihtelun oletetaan johtuvan korkeassa lämpötilassa kuonapaakuista ja matalassa lämpötilassa huokoisuuseroista näytteissä. Kuona on pääasiassa tulipesästä sulan mukana kulkeutuvaa palamatonta hiiltä. Tiheysmittausten tulokset esitetään kuvassa 7.

Koe	Lämpötila [°C]	Tiheys km [kg/m^3]
1	25	1540
2	"	1750
3	"	1640
4	"	1670
5	"	1615
6	"	1680
7	"	1675
8	"	1600
9	"	1765
10	"	1745
1	760	1830
2	"	1830
3	"	1825
4	"	1850
5	"	1870
6	"	1860
7	"	1810
8	"	1800
9	"	1915
10	"	1910

Kuva 7. Sulan tiheysmittausten tulokset (Laine 1995, 47).

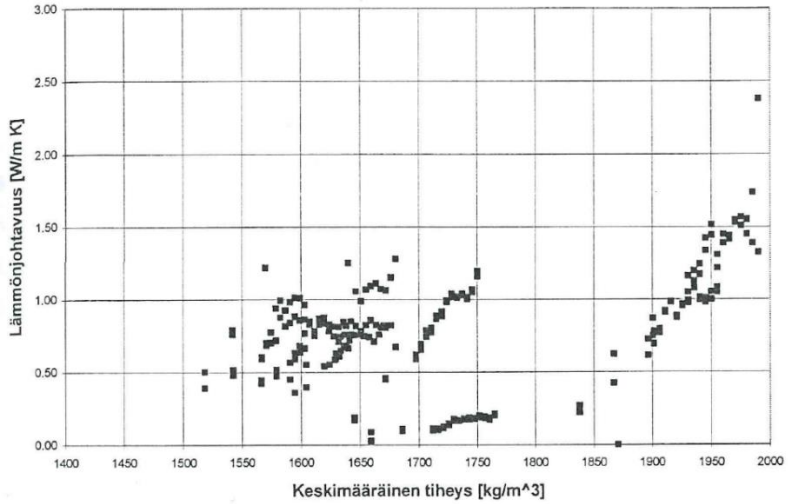
Sulanäytteen mukana tullut hiili muodostaa kaasuja, joiden johdosta sulanäyte paisuu pian näytteenoton jälkeen. Tästä syystä tiheydessä havaitaan minimi pian näytteenoton jälkeen. (Laine 1995, 47.) Ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 8.



Kuva 8. Sulanäytteen keskimääräinen tiheys lämpötilan funktiona (Laine 1995, 50).

Kuvasta 8 havaitaan, että hyvin pienellä lämpötilamuutoksella sulan tiheys muuttuu huomattavasti. Sularänneissä virtaavassa sulassa ei oletettavasti muodostu edellä kuvatulla tavalla kaasuja sulavirran sisällä, sillä kuonapartikkelit kulkeutuvat liuotinsäiliöön pääasiassa sulavirran päällä alhaisemmasta tiheydestä johtuen.

Sulan lämmönjohtavuutta on määritetty useiden tahojen toimesta. Laine (1995, 50−54) on määrittänyt lämmönjohtavuuden sulanäytteistä lieriönmuotoisessa mittausastiassa olettaen lämmönsiirron 1-dimensionaaliseksi. Mittauksissa havaittiin lämmönjohtavuuden olevan riippuvainen sekä tiheydestä että lämpötilasta. Sulan lämmönjohtavuuden tiheysriippuvuus esitetään kuvassa 9.



Kuva 9. Sulanäytteen lämmönjohtavuus tiheyden funktiona (Laine 1995, 54).

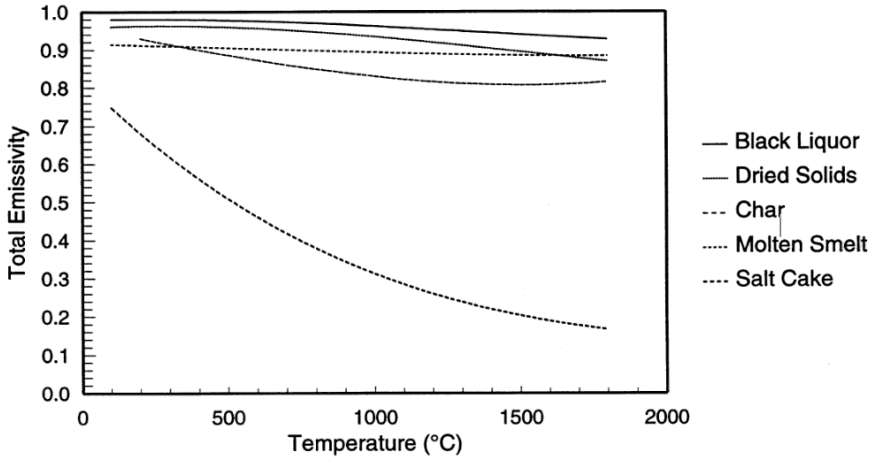
Kuvasta 9 havaitaan, että tiheyden ollessa suuri, on mittaustuloksissa havaittavissa selkeästi, että lämmönjohtavuus kasvaa tiheyden kasvaessa. Alemmilla tiheyden arvoilla mittaustuloksissa on enemmän hajontaa. Laineen (1995, 54) mukaan lämmönjohtavuuden arvot ovat keskimääräisillä tiheyksillä 1600, 1700, 1800 ja 1900 kg/m^3 karkeasti 0,7 W/mK, 0,9 W/mK, 1,0 W/mK ja 1,2 W/mK.

Tan et al. (2000) määrittivät Domtarin Espanola-tehtaalla sulakourusta otetun sulanäytteen lämmönjohtavuuden. Sulan jäähtymistä seurattiin termoelementeillä tarkoitukseen rakennetulla testilaitteistolla. Sulan jäähtymistä simuloitiin 3-ulotteisella CFD-mallilla, jolla pyrit-

tiin saamaan todellista jäähtymistä vastaava jäähtymiskäyrä muuttamalla lämmönjohtavuuden arvoa. Tutkimuksen perusteella sekä juoksevan että kiinteytyneen sulan lämmönjohtavuus on noin 0,6 W/mK.

Sulan emissiivisyys hehkuvana on Laineen (1995, 55−57) mittausten perusteella 750 °C:n lämpötilassa noin 0,85. Samassa lämpötilassa hehkumisen loppuessa emissiivisyys laskee noin arvoon 0,75. Täysin kiinteytyneen sulan emissiivisyys 700−750 °C:ssa on noin 0,6. Sulan edelleen jäähtyessä emissiivisyys nousee noin 0,77:ään.

Wessel & Bailey (1996) ovat suorittaneet mustalipeän, koksin ja sulan emissiviteettimittauksia. Mittausten tulokset esitetään kuvassa 10.



Kuva 10. Mustalipeän, koksin, sulan ja sähkösuodintuhkan emissiviteetit lämpötilan funktiona (Wessel & Bailey 1996, 27).

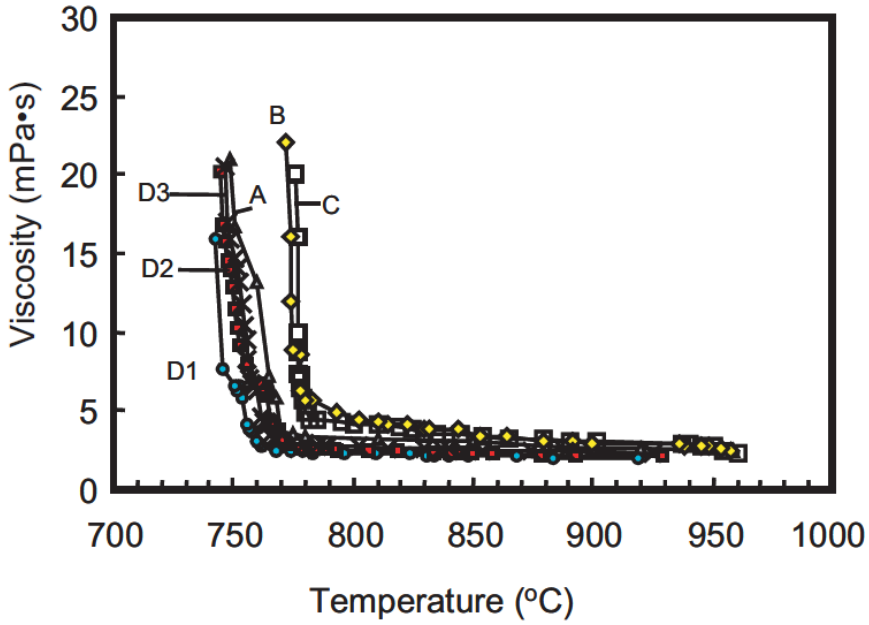
Juoksevan sulan emissiviteetti on tutkimuksen perusteella noin 0,9, eikä juurikaan riipu lämpötilasta. Koksin emissiviteetti lämpötilassa 850 °C on noin 0,85. Sulanäytteiden emissiviteettit mitattiin lämpötilavälillä 813−931 °C. Koksin emissiviteettiä ei onnistuttu mittaamaan korkeissa lämpötiloissa. (Wessel & Bailey 1996, 14, 24, 27.) Kapeasta mittausalueesta johtuen on syytä suhtautua varauksella kuvan 10 emissiviteetin arvoihin lämpötilan ollessa matala tai korkea. Soodakattilaympäristössä juoksevan sulan lämpötila on kuitenkin lähellä mittausaluetta.

Warnqvist (1992, 551−556) on tutkinut keon ja sulan ominaisuuksia. Sulakouruissa virtaava sula sisältää tutkimuksen mukaan noin 5 % hiiltä. Tiosulfaattia sulassa on luokkaa 150 mmol/kg. Tutkimuksessa myös mitattiin sulan lämpötilaa, lämpötila kouruissa vaihteli välillä 776−842 °C.

4.2 Sulan virtausominaisuudet

Sulan viskositeetti vaikuttaa merkittävästi sulavirtaukseen liuotinsäiliöön. Viskositeetti on kääntäen verrannollinen sulan virtaavuuteen. Mikäli viskositeetti on korkea, aiheuttaa se epätasaisen virtauksen sulakouruihin ja edesauttaa niiden tukkeutumista. Sulan viskositeetti kasvaa huomattavasti lämpötilan laskiessa jähmettymispisteen tuntumaan tai sen alle. (Tran et al. 2006, 182.)

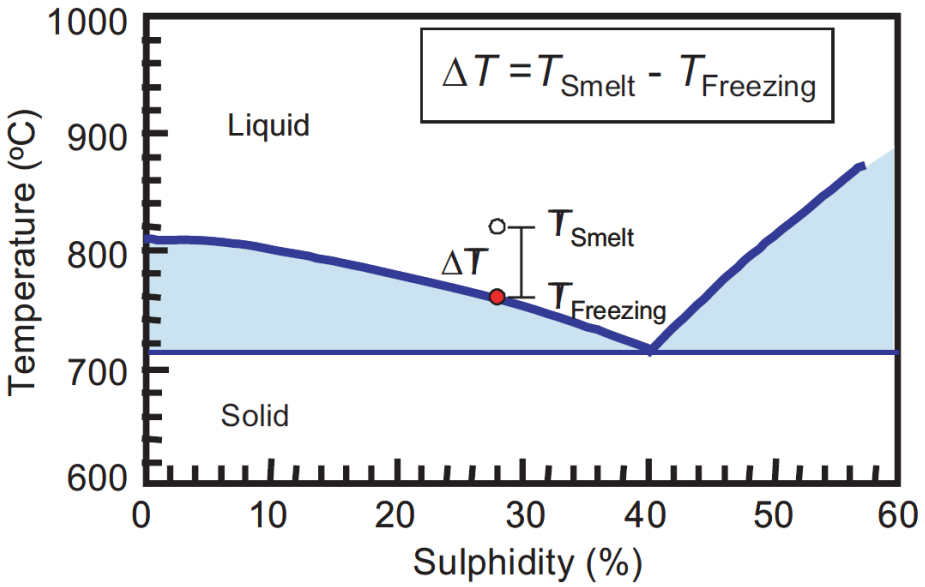
Tran et al. (2006, 182–187) tutkivat kuuden eri sellutehtailta otetun sulanäytteen viskositeettia lämpötilan funktiona. Näytteitä oli yhteensä neljältä eri tehtaalta, yhdeltä tehtaalta otettiin kolme eri näytettä. Kokeessa käytettiin Brookfield-viskometriä viskositeetin määrittämiseen. Koe suoritettiin suljetussa typpitäytteisessä uunissa, jolloin sulfidin hapettuminen pystyttiin minimoimaan. Näyte lämmitettiin noin 1000 °C:een, jonka jälkeen sen annettiin jäähtyä noin 1 °C/min nopeudella. Eri näytteiden viskositeetin muutos lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Eri sulanäytteiden viskositeetin käyttäytyminen lämpötilan funktiona esitettynä (Tran et al. 2006, 183).

Kuvan 11 perusteella on huomattavissa jyrkkä viskositeetin nousu noin 765–780 °C:n paikkeilla, näytteestä riippuen. Kyseisellä lämpötila-alueella sula alkaa jähmettyä. Lämpötilan ollessa korkeampi on sulan viskositeetti alhainen. Kaikkien näytteiden viskositeetit ovat yli 800 °C:n lämpötilassa välillä 2,5–5 mPas. Kuvan perusteella voidaan päätellä myös, että sulan koostumus vaikuttaa jähmettymislämpötilaan, sillä eri näytteiden jähmettymislämpötiloissa on eroa. (Tran et al. 2006, 183–184.)

Sulan koostumuksella on merkittävä vaikutus jähmettymislämpötilaan. Tyypillisellä sulakoostumuksella sulan jähmettymislämpötila on alimmillaan sulfiditeetin ollessa noin 40 %. Lipeän sulfiditeettitaso siis määrää osittain vaadittavan sulan lämpötilan, jotta sulavirtauksen ongelmilta voitaisiin välttyä. (Tran et al. 2006, 183–186.) Kuva 12 havainnollistaa tätä tilannetta.



Kuva 12. Sulan jähmettymislämpötila sufiditeetin funktiona. Kuvassa esitetyn teoreettisen sulan kaliumpitoisuus on 5 mol-% K/(Na+K) ja sulfaattipitoisuus 5 mol-% SO_4/(S+SO_4). (Tran et al. 2006, 186.)

Kuvassa 12 esitetty lämpötilaero kuvastaa tulipesän sulan lämpötilan ja jähmettymislämpötilan eroa. Sulfiditeetin ollessa korkea voi tulipesän lämpötila olla alhaisempi, mutta silti lämpötilaero jähmettymislämpötilaan säilyy riittävänä. Sulan seassa oleva jäännöshiili voi myös nostaa sulan viskositeettia. Samalla jäännöshiili toimii niin sanottuna kiintopisteenä jähmettymiselle, mikäli sulan lämpötila on lähellä jähmettymislämpötilaa. Tällöin sulan osittainen jähmettyminen voi tapahtua nopeasti. (Tran et al. 2006, 186.)

4.3 Sula-vesi-räjähdys

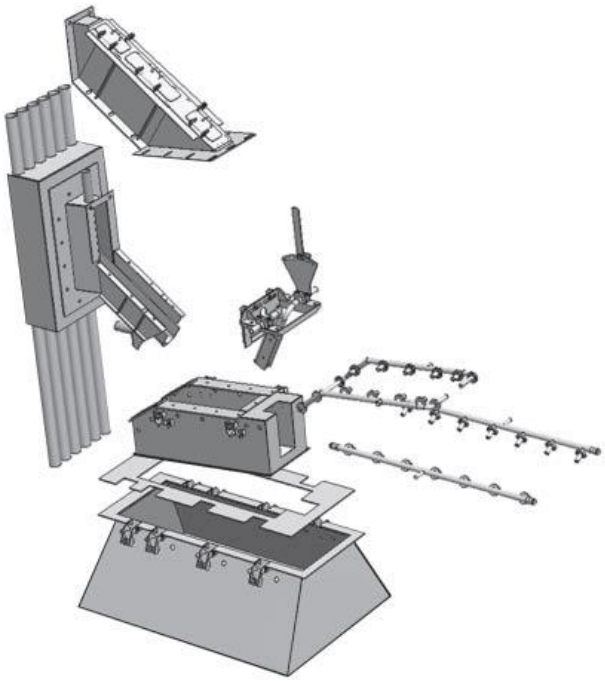
Eräs sulaan liittyvä piirre liittyy sen reagoimiseen veden kanssa. Sula saa veden kanssa reagoidessaan veden höyrystymään äkillisesti aiheuttaen niin sanotun sula-vesi-räjähdyksen. Vakavimmat sula-vesi-räjähdykset tapahtuvat tulipesässä, liuotinsäiliössä pieniä räjähdyksiä tapahtuu jatkuvasti. Veden äkillinen höyrystyminen aiheuttaa paineaallon kattilan sisälle, joka voi aiheuttaa kattilan rakenteissa muodonmuutosta tai jopa repeämiä. Tästä syystä veden pääsyn estäminen tulipesään on soodakattioissa ensiarvoisen tärkeää. (Grace 1997, 327–329; 333–345.)

Tulipesän sula-vesi-räjähdykseen johtavia syitä ovat esimerkiksi vuoto keittoputkistossa, pesuveden kulkeutuminen mustalipeän ruiskutusputkistoa pitkin kattilaan, liian alhainen mustalipeän kuiva-ainepitoisuus, sulakourujen jäähdytysvesivuoto ja pesuveden kulkeutuminen kattilaan. Vaarallisimpia vuotoja aiheuttavat keon läheisyydessä tulipesän alaosassa tai kattilan pohjassa tapahtuvat putkirikot. Toisaalta myös suuret vuodot kattilan yläosan putkistoissa aiheuttavat suuren räjähdyksen vaaran. Liuotinsäiliössä vesi ja sula ovat jatkuvasti vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Olennaista on, että tuleva sula hajotetaan höyrysuihkulla tarpeeksi pieniksi pisaroiksi, jolloin mahdolliset räjähdykset ovat erittäin pieniä. (Grace 1997, 333–345.)

Jäähdytetyn sulakourun vaurioituminen mahdollistaa veden pääsyn tulipesään ja luo sula-vesi-räjähdyksen mahdollisuuden. Suuremman räjähdyksen tapahtuessa on mahdollisuus henkilövahinkojen syntymiseen, taloudelliset vahingot ovat erittäin todennäköisiä. Tästä johtuen kourujen kuntoa on seurattava mahdollisuuksien mukaan ajojakson aikanakin.

5 SULAKOURUT

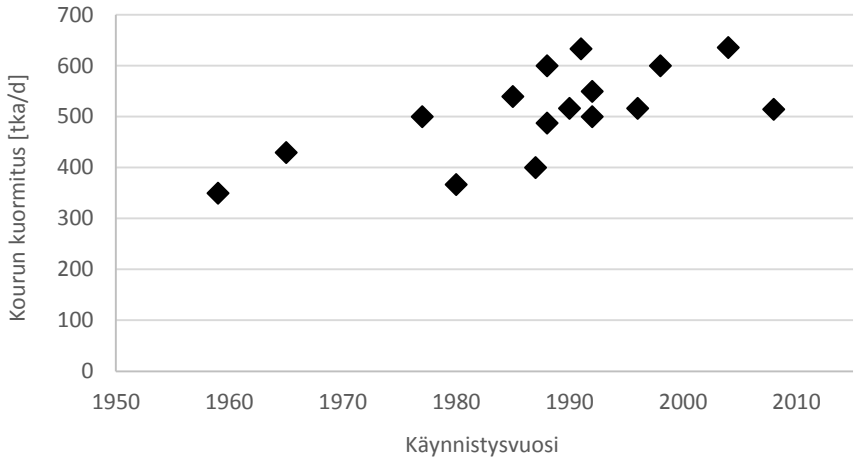
Sulakourun tehtävänä on johtaa sula pois kattilan pohjalta liuotinsäiliöön. Pääasiassa sulakourut ovat vesijäähdytteisiä, mutta on olemassa myös jäähdyttämättömiä versioita. (Vakkilainen 2006a, 120; BLRBAC 2012, 59–65.) Kuvassa 13 esitetään sulakouru ja siihen läheisiesti liittyviä rakenteita.



Kuva 13. Sulakouru ja siihen liittyvä huuva esitettynä. Kuvassa on esitetty myös sulan hajottamiseksi käytettävän höyrysuihkun laitteita (Valmet 2014).

Sulakouruissa kulkevan sulan määrä vaihtelee merkittävästi ajotilanteesta riippuen. Normaalin kattilan kuormasta johtuvan vaihtelun lisäksi esimerkiksi yhden kourun tukkeutuminen lisää muiden kourujen läpi kulkevaa virtausta. Kourun tukkeutuminen on melko yleistä, ja monet kattilaan liittyvät ajotilamuutokset saattavat aiheuttaa sulakourun tukkeutumisen. Esimerkkejä näistä tilanteista ovat kattilan ylös- ja alasajo, pienellä osakuormalla ajo ja kattilan yläosista tippuvien kerrostumien kulkeutuminen sularännin tukkeeksi. (BLRBAC 2012, 69.)

Kuvassa 14 esitetään keskimääräiset kourukohtaiset kuormitukset eri kattiloilla.



Kuva 14. Soodakattiloiden kourukohtainen kuormitus käynnistysvuoden funktiona.

On havaittavissa, että uudemmissa kattiloissa kourukohtainen kuormitus on keskimäärin suurempi. Toisaalta vanhempien kattiloiden tehonnostojen johdosta kuormitus on niissäkin saattanut nousta alkuperäisestä. Sulavirtana kuormitus 600 tka/d on hieman yli 3 kg/s, eli noin 1,6 l/s (luku 6.1.1).

5.1 Sulakourutyypit

Sulakourut jaetaan jäähdytettyihin ja jäähdyttämättömiin kouruihin. Seuraavissa alaluvuissa esitellään eri kourutyypit ja tyypilliset jäähdytysveden kierrätysmenetelmät.

5.1.1 **Jäähdytetty kouru**

Suurin osa sulakouruista on jäähdytettyjä, jäähdytykseen käytetään poikkeuksetta vettä. Jäähdytetty kouru esitetään kuvassa 15.



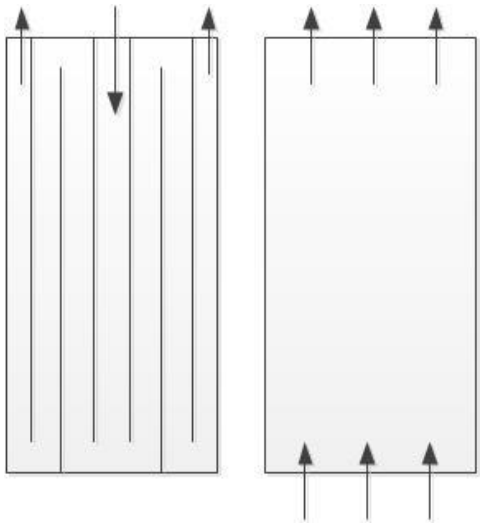
Kuva 15. Jäähdytetty sulakouru sivusta ja etuviistosta kuvattuna (AkerKvaerner).

Jäähdytetyissä kouruissa kiertää vesi, jonka lämpötila sisäänmenossa on noin 60 °C ja ulostulossa maksimissaan noin 80 °C. Veden laatuun on kiinnitettävä huomiota, jotta sulakourujen vesitilaan ei pääse muodostumaan kerrostumia tai pahimmillaan tukoksia, ja jotta happikorroosio vesipuolella saadaan minimoitua. Käytettävän jäähdytysveden on oltava demineralisoitua tai esimerkiksi lauhdetta. (BLRBAC 2012, 59.)

Jäähdytysveden lämpötilan on säilyttävä hieman järjestelmän tyypistä riippuen lähellä edellä esitettyjä arvoja, sillä sekä liian alhainen että liian korkea lämpötila voivat osaltaan olla aiheuttamassa ongelmia sulakourujärjestelmän toiminnalle. Liian matala veden lämpötila voi aiheuttaa ilmassa olevan kosteuden kondensoitumista rännin pintaan, ja tällöin vesipisarat saattavat joutua kosketuksiin sulan kanssa aiheuttaen pieniä sulavesiräjähdyksiä. Matala jäähdytysveden lämpötila saattaa pitää sulakourun joidenkin osien lämpötilan alle happokastepisteen, jolloin kourun pinta voi altistua korroosiolle. Liian korkea jäähdytysveden lämpötila puolestaan saattaa aiheuttaa paikallista veden höyrystymistä rännissä, joka heikentää lämmönsiirtoa ja häiritsee jäähdytysveden virtausta. (BLRBAC 2012, 59–60.)

Jäähdytetyt kourut voidaan jakaa kahteen ryhmään jäähdytysveden virtausreitin mukaan. Niin sanotussa once-through-kourussa jäähdytysvesi ohjataan kourun vaippaan toisesta päästä kourua ja vesi poistuu toisesta päädystä (Reid 2011). Esimerkkitehtaan kourut edus-

tavat tätä tyyppiä. Multipass-kourussa vesivaippa on jaettu moneen pitkittäissuuntaiseen virtauskanavaan käyttämällä ohjauslevyjä (Reid 2011). Kourun runko on tyypillisesti valmistettu hiiliteräksestä. Sulan kanssa kosketuksissa olevassa kouruosassa hiiliteräs voidaan päällehitsata ruostumattomalla teräksellä tai nikkelipohjaisella seoksella. Vaihtoehtoisesti kouru voi olla kompound-materiaalia, jossa hiiliteräksen päällä on ruostumaton teräs. (Soodakattilayhdistys 2017.) Periaatekuvat kourujen virtauskanavista esitetään kuvassa 16.



Kuva 16. Jäähdytysveden virtausreitit ylhäältä päin esitettynä, vasemmalla multipass- ja oikealla once-through-kouru.

Jäähdytysveden kierrätysjärjestelmä voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Suositeltavaa on, että järjestelmä suunnitellaan siten, että kourussa kiertävä vesi on alipaineessa. Tällä voidaan vähentää jäähdytysveden mahdollisuutta päästä tulipesään mahdollisessa kourun vauriotilanteessa. Tyypillisiä jäähdytysveden kierrätysjärjestelmiä ovat paineistettu pumppukierto, pumppukierto, jossa venttiileillä luodaan kouruun pieni alipaine sekä ejektoritoiminen kierto. Alipaineisissa järjestelmissä on huolehdittava, että alipaine on sopivan suuruinen. Liiallinen alipaine mahdollistaa jäähdytysveden höyrystymisen helpommin. (BLRBAC 2012, 61−68.)

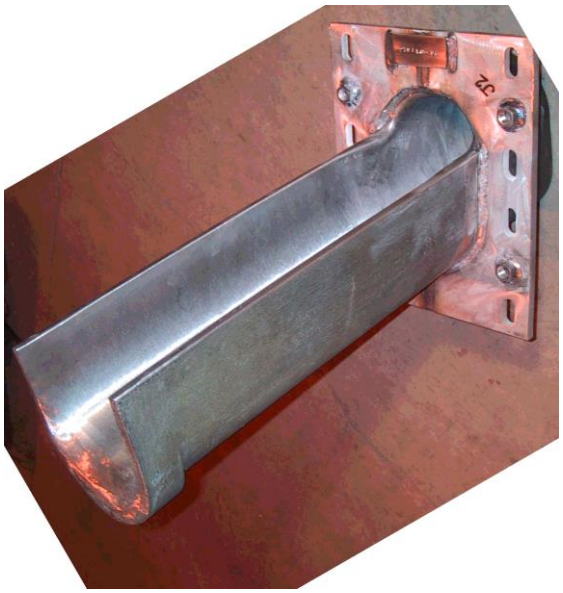
Veden virtauksen tarkkailemiseksi on sulakourujen jäähdytysvesijärjestelmä varustettava virtausmittauksilla. Jotta yksittäisessä kourussa tapahtuva mahdollinen häiriö virtauksessa voitaisiin huomata helposti, on jokaisen kourun jälkeiseen jäähdytysvesiputkeen asennettava

oma virtausmittaus. (BLRBAC 2012, 60.) Mittaamalla virtausta kourun jälkeen voidaan varmistua siitä, ettei kourun vesivaipassa ole vuotoja tai virtausta merkittävästi rajoittavia tekijöitä.

Sulakourut pitää vaihtaa vuosittain. Käytössä olleita kouruja ei saa korjata tai muokata uudelleen käytettäväksi. Sulakourujen kunto on tarkistettava jokaisen suunnitellun seisakin yhteydessä. Uusille kouruille pitää suorittaa painekoe ennen käyttöönottoa mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi. (BLRBAC 2012, 63−64.) Näillä toimenpiteillä pyritään minimoimaan sularännin mahdollisen vaurioitumisen aiheuttamat riskit henkilövahingoista ja taloudellisista menetyksistä. Toisaalta nykyään sellutehtaiden tavoitteena on ajaa tehdasta noin puolitoista vuotta seisakkien välillä, joten mikäli rännit vaihdetaan aina seisakissa, pitenee vaihtoväli BLRBAC:n suositusta suuremmaksi. Kun tähän yhdistetään mahdollisesta sulakouruvauriosta aiheutuva tehtaan alasajo, on ymmärrettävää, että kunnossapidon näkökulmasta tilanne on haastava.

5.1.2 **Jäähdyttämätön kouru**

Jäähdyttämättömät kourut ovat harvinaisia, esimerkiksi Suomessa yhdelläkään tehtaalla ei ole käytössä jäähdyttämättömiä kouruja. Kuvassa 17 esitetään jäähdyttämättömän kourun rakenne.



Kuva 17. Jäähdyttämätön kouru (Hollenbach & Morrison 2001).

Jäähdyttämättömän kourun eduiksi on mainittu seuraavat tekijät: mahdollisuus sula-vesi-räjähdykseen kourun vaurioituessa poistuu, kourun jäähdytysvesijärjestelmää ei tarvita, jolloin investointi on pienempi, kourun käyttöikä on pidempi sekä vuotuinen kourun vaihtotarve poistuu (Hollenbach & Morrison 2001). Jäähdyttämättömiä kouruja on valmistettu esimerkiksi noin 50/50 nikkeli-kromi-seoksesta (Reid 2011; Singbeil et al. 2014).

Käytännössä jäähdyttämättömissä kouruissa on havaittu esimerkiksi säröilyä ja yleistä materiaalin syöpymistä puhki asti (Reid 2011). Todellisuudessa siis ajojaksot jäähdyttämättömillä kouruilla eivät välttämättä ole tarpeeksi pitkiä kattamaan kalliista materiaalista aiheutuvat korkeat hankintakustannukset.

5.2 Sulakourujen vauriomekanismit

Tunnistettuja sularännien vaurioitumiseen liittyviä tekijöitä ovat: valmistusvirhe, suunnitteluvirhe, jäähdytysvesiongelmat, mekaaninen vaurioituminen, korroosio, eroosio, väsymiskorroosio, lämpöväsyminen ja sulan ominaisuudet. Valmistusvirheet sisältävät esimerkiksi huonot hitsit. Jäähdytysvesiongelmiin luetaan sekä huonolaatuisen veden aiheuttamat kerrostumat, että jäähdytysveden höyrystyminen kourussa. Mekaanisista vaurioista yleisimpiä ovat rännin rassauksen yhteydessä tapahtuva rännimateriaalin kolhiintuminen. (Singbeil et al. 2014; Busby 2014; Reid 2011.)

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään eri vauriomekanismeja yleisesti ja tuodaan esille sularännien toimintaympäristön erityispiirteet. Keskittymiskohteena ovat vauriomuodot, joissa lämpörasitukset ovat osallisina.

5.2.1 Sulan metallin aiheuttama korroosio

Sulat metallit voivat aiheuttaa kiinteissä metalleissa haurastumista ja korroosiota. Alhaisen sulamispisteen omaava sulassa muodossa oleva metalli voi tunkeutua kiinteän metallin kiderajoille tai mahdollisesti muodostaa sen kanssa yhdisteitä. Tällöin metallin lujuus kyseisessä kohdassa alenee ja materiaalin ollessa jännitystilassa tapahtuu haurasmurtuminen. Alhaisen sulamispisteen omaavia metalleja ovat esimerkiksi elohopea, sinkki, kadmium, alumiini, tina, lyijy, litium ja kupari sekä alkalimetallit natrium ja kalium. (Nikula 2004, 188.)

Soodakattilan savukaasujen tarkemmalla talteenotolla saadaan talteen paitsi rikkiyhdisteitä, myös kaliumsuoloja ja klorideja. Nämä ei-toivotut komponentit tulevat prosessiin keittoon tulevan puun mukana. Vaikka pitoisuudet ovat pieniä, aineet rikastuvat lähes suljetussa kierrossa. Nämä aineet lisäävät korroosiota. (Ahlers 2004a, 306.)

Soodakattilaympäristössä natrium ja kalium ovat erittäin yleisiä aineita. Sekä tulipesän että sularännien suojaaminen perustuu sulan jähmettymiseen metallin pinnalle. Tämä jähmettynyt sulakerros estää juoksevan sulan komponenttien reagoinnin kattilaputki- ja sularännimateriaalien kanssa ja pitää materiaalien lämpötilat alhaisempina (Tran 1997, 298−302).

5.2.2 **Jännityskorroosio**

Jännityskorroosion aiheuttamaa säröilyä voi ilmetä metallissa, kun materiaali on korrodoivassa ympäristössä ja siihen kohdistuu vetojännitystä. Vetojännitys voi johtua joko ulkoisista tai sisäisistä jännityksistä, tai näiden yhdistelmästä. Sisäiset kuormitukset ovat erityisen vaarallisia, sillä niiden suuruuden määrittäminen on haasteellista. Sularännien yhteydessä merkittävimpiä sisäisten jännitysten aiheuttajia ovat kylmämuokkaus ja hitsaaminen. Ulkoiset kuormat aiheutuvat pääasiassa termisistä muutoksista. (Siitonen 2004, 117−120.)

Haasteellisissa olosuhteissa jännityskorroosiota voi ilmetä jo jännityksen ylittäessä 10 % materiaalin myötörajasta. Sulat suolat aiheuttavat jännityskorroosiota, joten sularänneissä olosuhteet mahdollistavat jännityskorroosion esiintymisen. Jännityskorroosion tarkka mekanismi ei ole täysin selvillä. (Siitonen 2004, 118−119.) Tyypillisen sularännimateriaalin myötölujuus on joko 235 tai 265 MPa (Soodakattilayhdistys 2015), jolloin jännityskorroosiota olisi mahdollista esiintyä jo jännityksen ylittäessä noin 25 MPa.

Yleisesti jännityskorroosion estoon on seuraavia toimenpiteitä (Nikula 2004, 175−176):

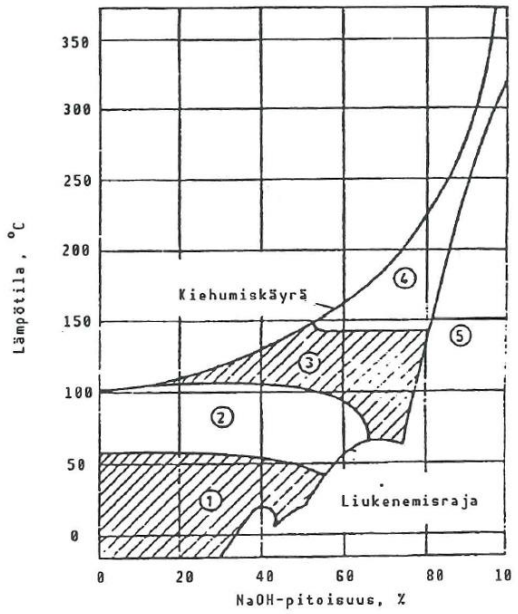
- ”Pyri vähentämään jännityskorroosiota aiheuttavien kemikaalien vaikutusta esim. pH-arvon säädöllä, kaasun poistolla, mineraalien poistolla, tislaamalla jne.
- Varo erikoisesti Cl^-- ja OH^+-ionien väkevöitymistä rakeiden pinnalle ja rakoihin.

- Valitse rakenneaine, joka ei ole herkkä jännityskorroosiolle ao. ympäristössä. Käytä mieluimmin alhaisen myötölujuuden omaavia niukkahiilisiä teräksiä. Esim. ammoniakilla hiiliteräs, jonka vetomyötölujuus on < 350 N/mm^2.
- Käytä riittävän suurta varmuuskerrointa lujuuden suhteen.
- Poista tai vähennä vetojännitykset lämpökäsittelyllä.
- Hitseissä olevia vetojännityksiä voidaan poistaa myös oikealla kuulapuhalluksella.
- Suunnittele hitsausjärjestys niin, että rasitekemikaalin puoleisen hitsipinnan vetojännitys tulee mahdollisimman pieneksi.
- Vältä muokkauslujittumista ja kiderakenteen kasvua. Molemmat saattavat olla jännityskorroosion lähtökohtia. Muokkauslujittumista ja sisäisiä jännityksiä voi syntyä leikattaessa levyä tylsällä leikkurilla, taivutettaessa levyä jyrkkään pyöreyteen, tai oiottaessa levyn epätasaisuuksia takomalla.
- Vähennä jännityshuippuja muotoilulla; varo rakenteen epäjatkuvuuskohtia.
- Vältä suunnittelulla sisäisiä jännityksiä.
- Varo epätasaisesta lämmityksestä ja jäähdytyksestä johtuvia lämpöjännityksiä esim. lämmönsiirtopinnoissa.
- Vältä erikoisesti pistesyöpymisen, rakokorroosion ja raerajakorroosion pääsyä vaarallisiin kohtiin. Ne ovat usein jännityskorroosion lähtökohtia.
- Pintojen tulee olla sileitä. Hio kriittisissä paikoissa hitsauskuvut ja juurivirheet sekä muut pintasäröt sileiksi. Käytä hionnassa riittävän hienoa hiomakiveä. Varo kuumentamasta teräksen pintaa hionnassa, pinnan väri ei saa muuttua.
- Estä syövyttävän aineen pääseminen metallin pintaan luotettavalla suojapinnoitteella.
- Käytä korroosiota kestäviä inhibiittejä.
- Käytä katodista suojausta, mutta varo vetyhaurautta. Joissakin tapauksissa voi anodinen suojaus olla oikea ratkaisu. Jännityskorroosion potentiaalialue on usein tietyissä vakioympäristöissä varsin kapea.
- Lisää kriittisten kohtien ainesvahvuutta.
- Jännityskorroosion aiheuttaman särön etenemisen voi pysäyttää tai sitä voi ainakin hidastaa hiomalla särön terävä kärki pyöreäksi riittävän suurella pyöristyssäteellä tai poraamalla särön kohdalle reikä.”

Sulan rikkiyhdisteet voivat aiheuttaa pistesyöpymää, joka puolestaan toimii mahdollisena jännityskorroosion alkupisteenä. Pieninä pitoisuuksina sulasta tavattu tiosulfaatti voi poistaa tai heikentää metallin pinnalle muodostuneen suojaavan korroosiotuotteiden kalvon. Tällöin ruostumaton teräs voi altistua pistekorroosiolle olosuhteissa, joissa korroosiota ei ilmenisi ilman tiosulfaattia. Natriumsulfidi esiintyy vesiliuoksissa vetysulfidina. Vetysulfidi aiheuttaa alkalisissa oloissa pistesyöpymää sekä passiivitilassa olevalle hiiliteräkselle että ruostumattomalle teräkselle. (Ahlers 2004b, 410.)

Monet jännityskorroosion hillitsemistoimenpiteistä liittyvät suunnittelu- ja valmistusvaiheisiin. Näin ollen laadunvalvonta on tärkeässä roolissa. On raportoitu yksittäistapauksia, joissa uusista käyttämättömistä sularänneistä on löydetty tarkastuksessa säröjä. Rännin toimintaympäristöön vaikuttaminen on haasteellista. Sulavirran muutokset luovat vaihtelevan lämpörasituksen kourumateriaaliin.

Ympäristön alkalipitoisuuden ollessa korkea ei hiiliteräs sovellu käytettäväksi, mikäli metallin lämpötila on korkea. Alkalipitoisuuden sekä lämpötilan ollessa korkeita, voi hiiliteräs altistua alkaliselle jännityskorroosiolle, jota kutsutaan myös lipeähauraudeksi. Kuvassa 18 esitetyn alueen 1 olosuhteet mahdollistavat hiiliteräksen käytön ilman huomattavaa korroosiovaaraa. (Henrikson 2004, 451.) Kuvasta havaitaan, ettei hiiliteräs sovellu käytettäväksi natriumhydroksidiliuos-ympäristössä juurikaan yli 50 °C:n lämpötilassa.

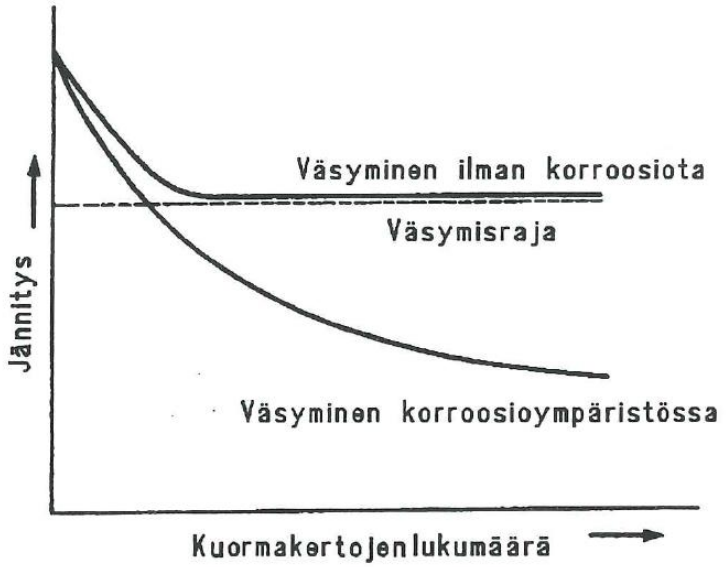


Kuva 18. Hiiliteräksen soveltuva käyttökohde natriumhydroksidiliuoksessa liuoksen väkevyyden ja lämpötilan funktiona on esitetty alueena 1 (Henrikson 2004, 451).

5.2.3 **Korroosioväsyminen ja lämpöväsyminen**

Lämpöväsyminen on yksi materiaalin väsymisen muodoista. Korroosioväsymisessä korrodoiva ympäristö vähentää merkittävästi materiaalin väsymiskestävyyttä. Korroosiovapaassa

ympäristössä materiaalilla on väsymisraja, jota pienemmät jännitykset eivät aiheuta väsymismurtumista. Korrodoivassa ympäristössä tällaista rajaa ei esiinny. (Siitonen 2004, 122.) Tyypillisiä korroosiomuotoja, jotka vaikuttavat väsymistä aiheuttavan vaihtokuormituksen rinnalla, ovat galvaaninen korroosio, pistesyöpyminen, rakokorroosio ja vetyhaurastuminen (Nikula 2004, 179). Kuvassa 19 havainnollistetaan väsymisvaurioitumista ei-syövyttävässä ja syövyttävässä ympäristössä.



Kuva 19. Materiaalin väsymiskäyttäytymisen muuttuminen korrodoivan ympäristön vaikutuksesta (Siitonen 2004, 122).

Lämpöväsymistä aiheuttavat muun muassa paikalliset lämpötilavaihtelut (Siitonen 2004, 123). Sularännien yhteydessä sulavirran vaihtelu aikaansaa kourumetallin lämpötilan vaihtelun. Rännin sisäkourun lämpötila sulan puolella on joitakin kymmeniä asteita jäähdytysvesipuolta korkeampi (luku 6.1.1). Rännin tukkeutuessa lämpötila sulapuolella laskee lähelle jäähdytysveden lämpötilaa tai hieman sen alle. Samoin sulasyöksyt aiheuttavat muutoksia kourun lämpötiloihin. Kourun lämpötilaprofiilia käsitellään tarkemmin luvussa 6.1.2.

Korroosioväsymistä ehkäiseviä toimenpiteitä ovat (Nikula 2004, 180):

- ”Valitse ko. rasitusympäristössä korroosiota kestävä rakenneaine.
- Muotoile ja mitoita rakenne siten, että jännitys vaihtokuormituksessa on mahdollisimman tasainen. Kaikki rakenteen epäjatkuvuuskohdat on poistettava.

- Selvitä jo suunnitteluvaiheessa koneenosien värähtelymahdollisuudet ja värähtelyjen resonanssialueet. Pyri estämään ne muuttamalla rakenteen ominaisvärähtelylukua tai ympäristön värähtelyjä.
- Suunnittele rakenne riittävän joustavaksi, etteivät lämpölaajeneminen, tärinä, iskut jne. kuormitukset aiheuta jännityshuippuja.
- Vältä sisäisten jännitysten muodostuminen.
- Suunnittele hitsausjännitysten poisto oikealla hitsausjärjestyksellä, lämpökäsittelyllä tai kompensoi vetojännitys puristusjännitykseksi metallin pinnassa esim. kuulapuhalluksella tai muulla kylmämuokkauksella.
- Estä korroosion vaikutus kriittisiin kohtiin esimerkiksi pinnoituksella.
- Valitse tarkoitukseen sopiva pinnan laatu ja viimeistely. Pinnan sileydellä on erittäin suuri vaikutus väsymiskestävyyteen.
- Mitoita kriittiset kohdat niin, että jännitykset jäävät riittävän alhaisiksi. Muista lämpölaajenemisen aiheuttamat mahdolliset lisäjännitykset.
- Korroosioväsymisessä syntyneen särön eteneminen voidaan pysäyttää tai ainakin hidastaa hiomalla särön pohja riittävän suureen pyöristyssäteeseen (lovivaikutus pienenee) tai poraamalla särön kärkeen reikä
- Estä pyörivien ja värähtelevien koneenosien joutuminen epätasaiseen kuormitukseen tai värähtelyyn puhdistamalla pinnat riittävän usein tai käyttämällä pinnoitteita, joihin prosessiaine tai likaisuudet eivät tartu kiinni.
- Järjestä tarvittaessa sallitun värähtelyn ylittymisestä automaattinen hälytys.”

Sularänneihin sovellettavista toimenpiteistä monet vastaavat jännityskorroosion yhteydessä mainittuja. Suunnittelu ja valmistus ovat merkittävässä roolissa tuotteen kestävyyden kannalta.

5.2.4 **Jäähdytysvesiongelmat**

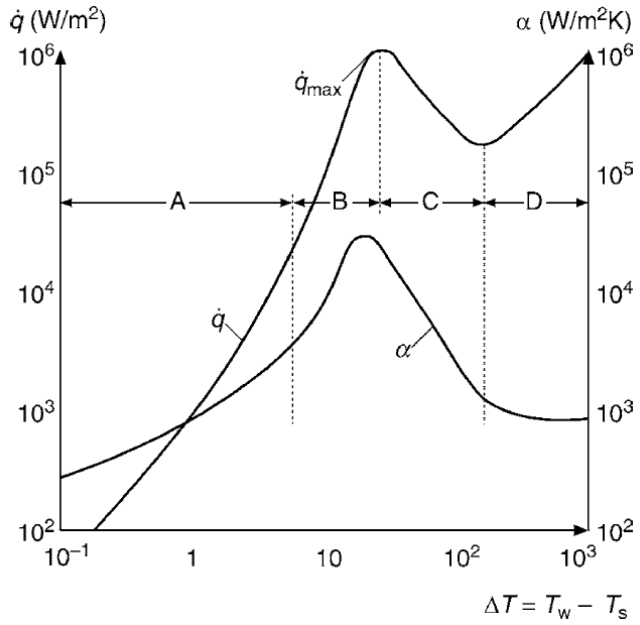
Sularännien jäähdytysvesiongelmat pitävät sisällään monia yksittäin tai yhdessä esiintyviä tekijöitä, jotka voivat osaltaan lyhentää rännin kestoikää. Rännimateriaalin lämpötila saattaa päästä nousemaan liian korkeaksi esimerkiksi jäähdytysveden virtauksen häiriintyessä tai mikäli vesipuolelle on muodostunut kerrostumia. Ulkomailla kerrostumat jäähdytysvesikanavissa ovat olleet osallisena rännivauriossa (Busby 2014).

Eräänä mahdollisena sularännien kestoikää lyhentävänä tekijänä pidetään jäähdytysveden ajoittaista höyrystymistä esimerkiksi sulasyöksyn aikana. Jäähdytysveden sisäänmenolämpötila ränniin on Suomessa tyypillisesti 48−78 °C ja ulostulolämpötila 55−83 °C (Soodakat-

tilayhdistys 2015). Rännien jäähdytysvesi on tyypillisesti alipaineessa, mutta esimerkiksi tämän työn esimerkkitehtaalla ja korkeinta jäähdytysveden lämpötilatasoa käyttävällä tehtaalla ei ole alipainetta. Jokaisella tehtaalla rännien jäähdytysvesi on siis reilusti alijäähtynyttä ennen ränniä.

Höyrykuplien syntyminen edellyttää ympäröivän materiaalin olevan veden höyrystymislämpöä korkeammassa lämpötilassa. Alijäähtyneessä vedessä ensimmäiset muodostuvat höyrykuplat romahtavat heti seinän läheisyydessä, jolloin lämmönsiirto tehostuu. Samalla seinämateriaalin lämpötila laskee. (Kind & Schröder 2010, 804.)

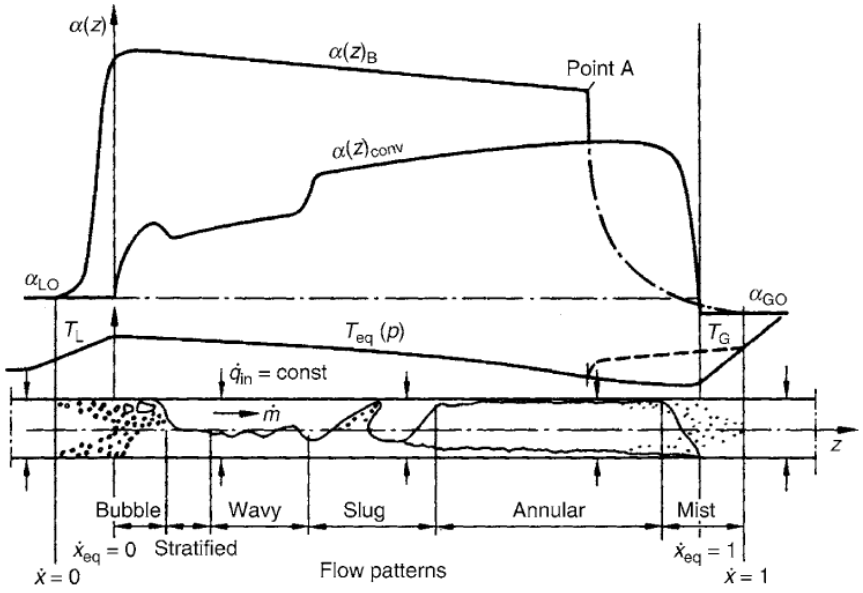
Astiakiehumisen eri vaiheet ja lämmönsiirtokertoimet eri kiehumisalueilla on esitetty kuvassa 20. Kuvassa esitetyt arvot ovat vedelle 1 barin paineessa.



Kuva 20. Astiakiehumisen eri vaiheet ilmanpaineessa olevalle vedelle. Kuvassa vaaka-akselilla esitetään materiaalin pintalämpötilan ja höyrystymislämpötilan erotus, vasemmalla pystyakselilla lämpövuo ja oikealla lämmönsiirtokerroin. Alueella A luonnollinen konvektio on pääroolissa, jolloin höyrystymistä tapahtuu ainoastaan veden ja ilman rajapinnassa. Alue B esittää kuplakiehumista, C kiehumisen siirtymäaluetta ja D filmikiehumista. (Stephan 2010, 28.)

Kuvasta on selvästi havaittavissa, että lämmönsiirto materiaalista veteen tehostuu merkittävästi kiehumisen alkaessa ja voimistuessa, aina kiehumiskriisiin (kuvassa $\dot{q}_{\max}$) saakka. Materiaalin pintalämpötila nousee huomattavasti kiehumiskriisin jälkeen, jolloin materiaalivaurio on todennäköinen. Kiehumiskriisin alapuolella materiaalin lämpötila on vain joitakin kymmeniä asteita nesteen kiehumislämpötilaa korkeampi, joten luonnollisen konvektion tai kuplakiehumisen alueella oltaessa teräksen pintalämpötilan ei pitäisi nousta lähellekään materiaalivaurioon johtavaa lämpötilaa. Käytännössä olosuhteet sularännin jäähdytysvesikanavassa eivät vastaa astiakiehuntaa kuin mahdollisesti virtaushäiriön johdosta.

Jäähdytysveden virtauksen johdosta virtauskiehunta vastaa paremmin mahdollista tilannetta jäähdytysvesikanavassa. Virtauskiehunnan vaiheet vaakasuuntaisessa putkessa esitetään kuvassa 21.



Kuva 21. Virtauskiehunnan vaiheet (Kind 2010, 795).

Sularännien osalta kuvan vasemmassa reunassa esitettävä alijäähtyneen nesteen kiehunta on olennaisin kiehumisen vaiheista. Tarpeeksi suurella lämpövuolla kiehunta alkaa kylläistä lämpötilaa alemmassa lämpötilassa. Lämmönsiirtokertoimen arvot kiehunnan eri vaiheissa esitetään alhaiselle lämpövuolle alaindeksillä *conv* ja korkealle indeksillä *B*. Lämmönsiirto tehostuu huomattavasti kiehunnan alkaessa.

Normaalitilanteessa sularännin jäähdytysvesi on reilusti alijäähtynyttä myös rännin jälkeen. Luvussa 6 tarkemmin esiteltävän kerätyn mittausdatan perusteella rännin jälkeiset veden lämpötilat ovat vähintään noin 20 °C alle kylläisen lämpötilan. Tästä syystä mahdollisena kiehumisen muotona käsitellään alijäähtynyttä virtauskiehuntaa. Lisäksi pohditaan paikallisen lämmönsiirtokriisin mahdollisuutta.

Ensimmäisten höyrykuplien muodostumisen vaatimaa rännimateriaalin pintalämpötilaa voidaan arvioida yhtälöllä

$$(T_\mathrm{w} - T_\mathrm{sat})_\mathrm{i} = \frac{5}{9}\left[\left(\frac{q''}{1120}\right)^{0{,}463} p^{-0{,}535}\right]^{p^{0{,}0234}} \tag{10}$$

missä

T_w	seinämän lämpötila [K]
T_sat	veden kylläinen lämpötila [K]
q''	lämpövuo [W/m^2]
p	paine [bar]

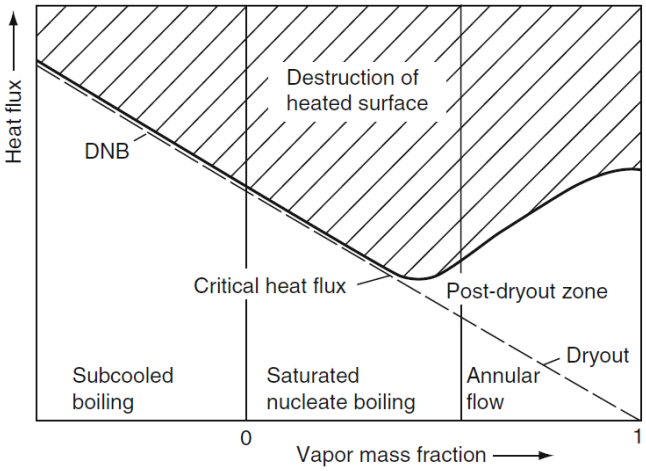
Esimerkkitehtaan ränneille luvussa 6.1.1 laskettujen lämpövuon arvojen pohjalta voidaan arvioida lämpövuon olevan noin 175 kW/m^2. Tehtaan rännien jäähdytysvesijärjestelmä on noin 1 barin paineessa, joten höyrystymislämpötila on noin 100 °C. Lämpötilaero on

$$(T_\mathrm{w} - T_\mathrm{sat})_\mathrm{i} = \frac{5}{9}\left[\left(\frac{175\,000\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}}{1120}\right)^{0{,}463} \cdot 1\ \mathrm{bar}^{-0{,}535}\right]^{1\ \mathrm{bar}^{0{,}0234}} = 5{,}8\ °\mathrm{C}.$$

Kourumetallin ollessa vesipuolella yli 106 °C voi muodostua ensimmäisiä höyrykuplia. Edellä esitetty yhtälö on tarkoitettu pystysuuntaisille putkille, rännin virtauskanavan ollessa vinossa voi kuplien muodostumista tapahtua jo aiemmin (Kind & Schröder 2010, 807). Nämä mahdollisesti muodostuvat kuplat kuitenkin lauhtuvat pian ympäröivässä alijäähtyneessä vedessä, kuten aiemmin todettiin.

Rännimateriaalin vaurioitumisen kannalta on vältettävä filmikiehunnan alueelle joutuminen. Filmikiehunnassa materiaalin pinnalle muodostuu suuren lämpövuon aiheuttamana höyryfilmi. Lämmönsiirron tapahtuessa höyryyn nesteen sijasta lämmönsiirtokerroin heikkenee merkittävästi ja tästä syystä materiaalin pintalämpötila voi nousta useissa tilanteissa materiaalin kannalta vaarallisen korkeaksi. (Auracher & Herbst 2010, 832−833.)

Tätä edellä kuvattua lämmönsiirtokriisimuodon esiintymistä havainnollistetaan kuvassa 22.



Kuva 22. Materiaalivaurioon johtavan lämmönsiirtokriisin vaatima lämpövuo kiehumisen eri vaiheissa vesi-teräs-systeemille (Auracher & Herbst 2010, 833).

Kuvan perusteella on nähtävissä, että lämmönsiirtokriisiin ajautuminen alijäähtyneen kiehunnan alueella vaatii huomattavan korkean lämpövuon. Kriittisen lämpövuon arvoja on taulukoitu eri höyryosuuden ja massavuon arvoilla. Massavuo määritetään seuraavasti.

$$G = \frac{q_m}{A} \tag{11}$$

missä

G	massavuo [kg/m^{2}s]
q_m	massavirta [kg/s]
A	virtauskanavan poikkipinta-ala [m^2]

Esimerkkitehtaan tapauksessa massavuo on luvun 6.1.1 tietojen perusteella noin

$$G = \frac{2{,}7\,\frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0{,}00395\ \text{m}^2} = 684\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}.$$

Virtaavalle nesteelle voidaan määrittää termodynaaminen höyryn massaosuus seuraavasti.

$$X = \frac{h - h'}{\Delta h_{\mathrm{v}}} \tag{12}$$

missä

X	höyryn massaosuus [-]
h	virtaavan veden entalpia tarkastelupisteessä [kJ/kg]
h'	kylläisen veden entalpia tarkastelupaineessa [kJ/kg]
Δh_{v}	höyrystymislämpö tarkastelupaineessa [kJ/kg]

Alijäähtyneelle nesteelle termodynaaminen massaosuus on negatiivinen. Esimerkkitehtaan tietojen perusteella veden aineominaisuudet katsotaan paineessa 1 bar. Tarkasteltavan nesteen entalpia katsotaan lämpötilassa 70 °C, joka on yli keskimääräisen rännin ulostulolämpötilan, mutta alle maksimin. Tällöin

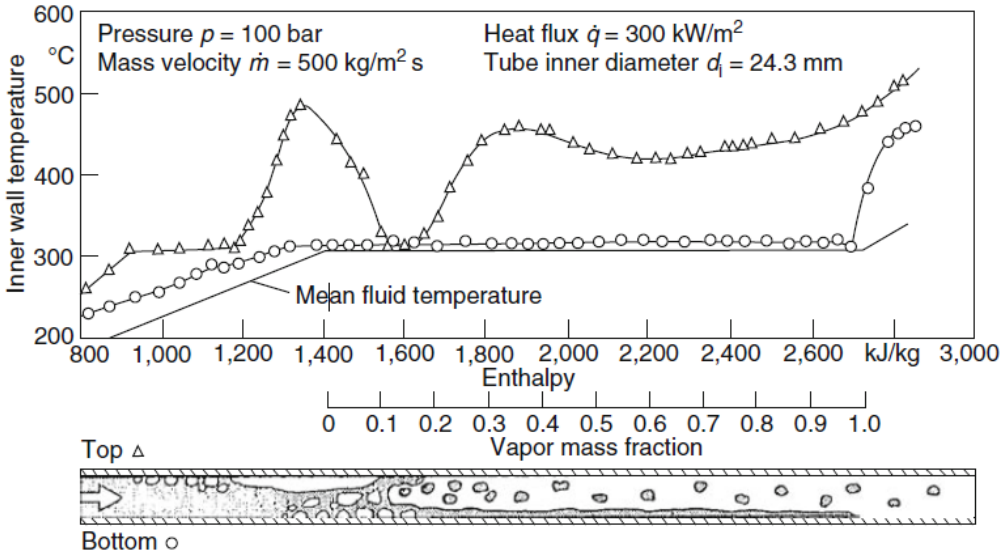
$$X = \frac{293{,}1\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} - 417{,}4\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}}{2257{,}5\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}} = -0{,}055.$$

Näiden tietojen avulla voidaan arvioida rännin kriittistä lämpövuota. Groeneveld et al. (2007, 1909−1922) on koonnut taulukkomuotoon veden kriittisen lämpövuon arvoja eri paineilla, massavuon arvoilla sekä eri höyryn osuuksilla. Taulukossa 6 esitetään kriittisen lämpövuon arvoja rännin kannalta relevantilta alueelta.

Taulukko 6. Kriittisen lämpövuon arvoja pystysuuntaiselle putkivirtaukselle, putken halkaisija 8 mm (Groeneveld et al. 2007, 1917).

Paine kPa	Massavuo kg/m^{2}s	CHF kW/m^2				
	X	-0,10	-0,05	0,00	0,05	0,10
100	0	3057	1990	1142	637	415
100	50	3453	2420	1570	1011	784
100	100	3640	2942	2103	1558	1275
100	300	3865	3196	2479	1961	1707
100	500	3938	3369	2685	2087	1808
100	750	4234	3471	2780	2229	1970
100	1000	4495	3533	3012	2653	2349

On huomioitava, että taulukon arvot ovat pystysuuntaiselle putkivirtaukselle. Rännin osalta sekä virtauskanavan geometria että kallistus eroavat edellä esitetyistä. Vaakasuuntaisissa ja kallistetuissa putkissa on tyypillistä, että kiehumiskriisi tapahtuu putken yläosassa (Auracher & Herbst 2010, 841). Tätä ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 23.



Kuva 23. Höyrystyminen vaakasuuntaisessa putkessa (Auracher & Herbst 2010, 842).

Sularännien kannalta kiinnostavaa on, että kuvassa 23 esitetyissä mittauksissa putken yläpinnalle muodostuvien höyrykuplien johdosta putken pintalämpötila on jopa 100 °C virtaavan nesteen lämpötilaa suurempi, vaikka ollaan reilusti alijäähtyneellä alueella. Lähestyttäessä kylläistä tilaa, tapahtuu putken yläpinnalla selkeä lämpötilannousu höyryfilmin muodostumisen johdosta.

Painovoiman ja virtauksen turbulenttisesta sekoittumisesta aiheutuvien voimien suhde vaikuttaa siihen, kuinka suuri ero pysty- ja vaakavirtauksen välisissä kiehumiskriisin raja-arvoissa on. Massavirran kasvattaminen ja virtauskanavan pienentäminen suurentavat massavuota, jolloin ero pysty- ja vaakavirtauksen kiehumiskriisin tapahtumapaikan välillä pienenee. Mikäli massavuo on yli 4000−6000 kg/m^{2}s, ei putken kallistuksella ole enää vaikutusta kiehumiskriisin tapahtumakohtaan putkessa. (Auracher & Herbst 2010, 841)

Sulakourujen tilanteessa virtauskanavan kallistuksella on merkitystä, sillä massavuo on huomattavasti raja-arvoa alhaisempi. Lukujen 6.1.1 ja 6.1.2 perusteella lämpövuo kourussa on

suuruusluokaltaan noin 175 kW/m^2, joten jäähdytysveden höyrystyminen kourussa on epätodennäköistä. Jäähdytysvesivirtauksen pysähtyessä höyrystyminen muuttuu todennäköiseksi.

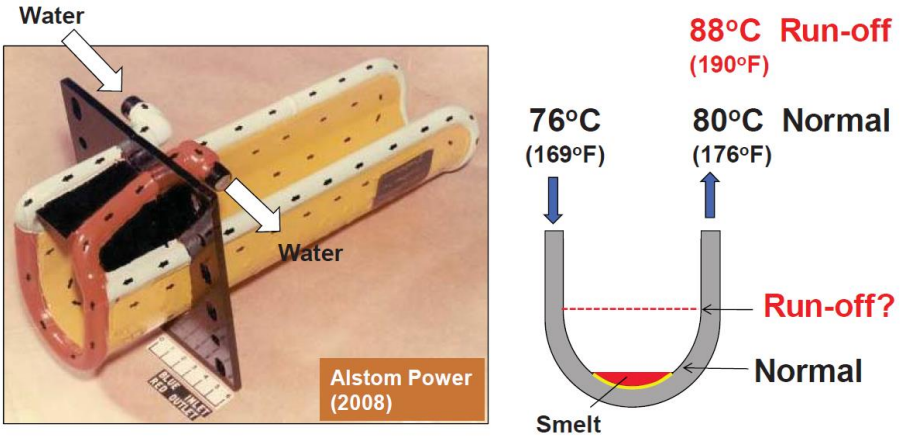
5.3 Sulavirtauksen ajallinen vaihtelu

Tran et al. (2014, 197–210) on tutkinut syitä voimakkaan hetkellisen sulavirtauksen taustalla. Voimakas sulavirtaus on helpointa havaita automaatiojärjestelmästä hetkellisesti kohoavina sulakourujen jäähdytysveden lämpötiloina. Sulavirtaus kasvaa hetkellisesti noin 3–5-kertaiseksi normaalitilaan verrattuna. Kestoltaan nämä suuret virtausmäärät ovat yleensä alle 30 minuuttia.

Voimakas sulavirtaus voi johtua useasta eri syystä. Esimerkkejä tilanteen muodostumiseksi ovat tukkeutuneen sularännin avaaminen, tulipesän keon alaspoltto, mustalipeän alhainen sulfiditeetti, kattilan käynnistäminen siten, että tulipesä ei ole tyhjä ja keon romahtaminen. On myös tärkeää pitää huoli siitä, että keko säilyy stabiilissa tilassa. Normaalia suuremmat sulavirtaukset aiheuttavat ongelmia erityisesti liuotinsäiliössä. Höyrysuihkut ennen liuotinsäiliötä eivät välttämättä pysty hajottamaan koko sulavirtaa pisaroiksi, jolloin liuotinsäiliössä pääsee tapahtumaan liuotinsäiliöräjähdyksiä. Pahimmillaan tästä seuraa henkilötapaturmia tai vahinkoa prosessilaitteistolle. Lisäksi prosessiongelmia saattaa syntyä myöhempiin kemikaalikierron vaiheisiin, esimerkiksi kaustistamolle. (Tran et al. 2014, 197–210.)

Tran et al. (2014, 202) suorittaman selvityksen mukaan keskimääräinen yksittäisen sulakourun sulan tilavuusvirta on 0,96 l/s, vaihteluvälin ollessa 0,44–1 l/s. Käytännössä yksittäisen sulakourun tilavuus- tai massavirran tarkka suora mittaaminen on haastavaa, mutta sulavirtaa voidaan arvioida jäähdytysveden lämpötilannousun avulla. Tran et al. (2014, 202–203) olettaa jäähdytysveden lämpötilannousun olevan suoraan verrannollinen sulan ja jäähdytysveden väliseen pinta-alaan. Normaalitilanteessa lämpötilannousu jäähdytysvedelle oli 4 °C, voimakkaan sulavirtauksen aikana lämpenemistä tapahtui jopa 12 °C. Tästä on päätelty, että kourussa kulkeva sula on peittänyt voimakkaan virtauksen aikana kolminkertaisen pinta-alan kourun seinämästä normaalitilanteeseen verrattuna. Sulakourun poikkileikkaukseltaan U-muotoinen geometria huomioiden virtausmäärän on oltava viisinkertainen, jotta

lämmönsiirtopinta-ala kasvaa kolminkertaiseksi. Kuvassa 24 havainnollistetaan sulakourun geometriaa.



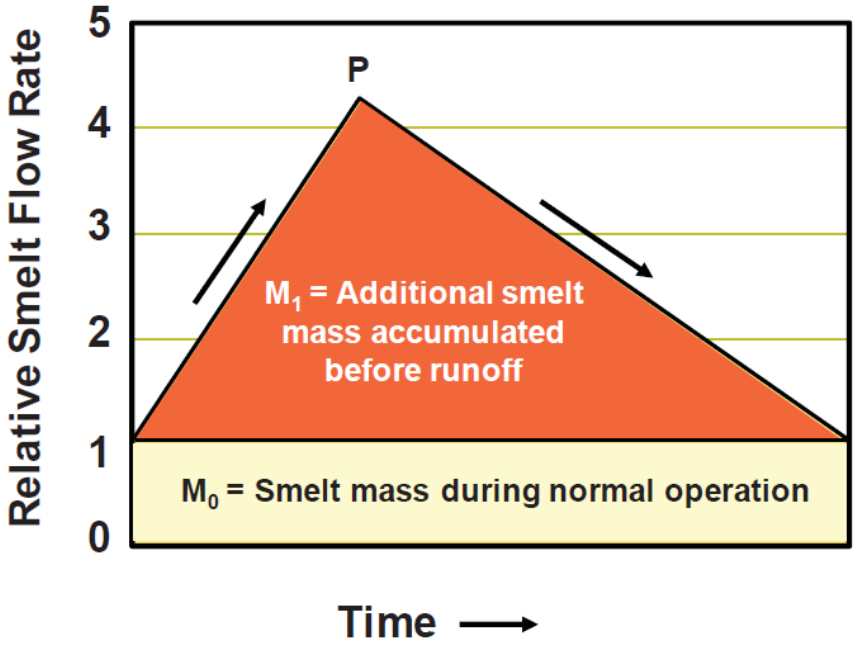
Kuva 24. Sulakourun jäähdytysvesivirtaus esitettynä vasemmalla, oikealla jäähdytysveden lämpötilojen toiminta-arvot ja sulan pinta havainnollistettuna normaalitilanteessa ja voimakkaan virtauksen aikana (Tran et al. 2014, 203).

Toinen tapa sulavirran seuraamiseen on liuotinsäiliön massataseen tarkkailu. Menetelmää hyödynnettäessä on huomioitava, ettei yksittäisten sulakourujen massavirtojen seuraaminen ole mahdollista, vaan menetelmä antaa tietoa kokonaissulavirtauksen vaihtelusta. Lisäksi virtausta mitataan vasta liuotinsäiliön jälkeen, joten liuotinsäiliö tasoittaa havaittavaa virtausta. (Tran et al. 2014, 203.)

Wiklander (1982) on tarkastellut sulan virtausta liuotinsäiliötaseen avulla. Laskelmien mukaan sulavirran massavirran keskiarvo oli 22 t/h, vaihteluvälin ollessa tarkastelujaksolla 8–48 t/h. Artikkelissa oletetaan mainitun suuruisten sulavirran vaihteluiden tapahtuvan normaaliajossa, joten esimerkiksi häiriötilanteissa vaihtelut voivat olla mainittua suurempia. Tarkasteltavan kattilan kapasiteetti oli 1800 tonnia kuiva-ainetta päivässä.

Sulavirtaus perustuu painovoimaan. Käytännössä tarkan virtausmäärän laskenta ei ole kuitenkaan yksinkertaista, sillä tulipesän keon ominaisuudet vaihtelevat. Lisäksi sulan virtaus on vahvasti sidoksissa sen viskositeettiin. Käytännössä voidaan kuitenkin hyödyntää tietoa,

että voimakas sulavirtaus kehittyy nopeasti ja pienenee hitaammin takaisin normaalivirtauksen tasolle. Yksinkertainen approksimointi voimakkaan sulavirran käyttäytymisestä on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Voimakkaan sulavirran kehittyminen ja purkautuminen ajan funktiona (Tran et al. 2014, 205).

Mahdollisen lisäsulan kertyminen kattilaan vaikuttaa sulakourujen korkeudella olevaan sulan aiheuttamaan hydrostaattiseen paineeseen. On kuitenkin huomattava, että erilaisilla pohjilla varustetuissa soodakattiloissa vaikutuksen voimakkuus on erilainen. Myös sulakourujen sijoitus vaikuttaa käyttäytymiseen. Kaltevalla pohjalla varustetuissa kattiloissa pienempi sulan määrän lisäys tulipesässä aikaansaa saman muutoksen hydrostaattisessa paineessa sulakourujen korkeudella kuin tasaisella pohjalla toteutetussa kattilassa. Tästä syystä kaltevalla pohjalla varustetut soodakattilat ovat alttiimpia voimakkaille sulavirtauksille. (Tran et al. 2014, 205–207.)

Sulan viskositeetilla on merkittävä vaikutus sulavirtauksen käyttäytymiseen. Mitä alhaisempi viskositeetti, sitä juoksevampaa sula on. Tällöin voimakkaita sulavirtauksia ei muodostu herkästi ja sula on helppo hajottaa pisaroiksi ennen liuotinsäiliötä. Sulan sulfiditeetti

vaikuttaa viskositeettiin ja jähmettymislämpötilaan merkittävästi. Natriumsulfidin ja -karbonaatin muodostaman liuoksen jähmettymislämpötila on alhaisimmillaan sulfiditeetin ollessa noin 40 %. Tehtailla sulfiditeetti on yleensä alle 40 %, joten sulan jähmettymisherkkyyttä voidaan vähentää kasvattamalla sulfiditeettia. (Tran et al. 2014, 207–208.)

Tulipesän yläosista putoavat kerrostumat voivat osaltaan olla aiheuttamassa voimakasta sulavirtausta. Mahdollisia tapahtumaketjuja ovat esimerkiksi putoavan kerrostuman johdosta tukkiutuva sulakouru tai yksinkertaisesti kerrostuman aiheuttama sulatason pinnan nousu tulipesässä. Kerrostumien matala sulfiditeetti aiheuttaa sen, että kerrostuman sulaessa ja sekoittuessa tulipesän sulaan sulfiditeetti alenee. Tämä puolestaan nostaa sulan viskositeettia ja täten heikentää sulan virtausominaisuuksia. (Tran et al. 2014, 208.)

5.4 Sulakourujen rikkoutumisen juurisyiden selvittäminen

Tänä päivänä on mahdollista hyödyntää laajaa mittausdataa osana vianmääritystä. Samaa aineistoa voidaan hyödyntää myös jälkikäteen jo tapahtuneiden vaurioiden juurisyiden selvittämiseksi.

Jones et al. (2014, 211–220) on hyödyntänyt monimuuttuja-analyysiä (MVA) selvittäessään juurisyitä sulakourujen ennenaikaiseen rikkoutumiseen. Tutkimuksessa keskityttiin sulakourujen säröilyyn johtaneiden syiden tutkintaan. Säröilyä syntyy, kun materiaali joutuu toistuvan rasituksen kohteeksi. Sulakourujen pinnassa käytetty ruostumaton teräs, tyypillisesti 304L, on materiaalina huono kestämään lämpörasituksen vaihteluita, joita voi syntyä sulavirran ajallisesta vaihtelusta. Kuten aiemmin jo todettiin, sulan maksimivirtaus voi olla moninkertainen normaalivirtaukseen verrattuna. Ruostumattoman teräksen käyttöä sulakourun pinnassa puoltaa sen hyvä korroosiosuoja.

Artikkelissa tutkittiin monimuuttuja-analyysin avulla erään sulakourujen säröilystä kärsineen soodakattilan toiminta-arvoja kolmen eri mittausperiodin ajalta. Mittausperiodit jaettiin sulfiditeetin ja sulakourun jäähdytysveden ulostulolämpötilan vaihtelun perusteella siten, että ensimmäisen periodin aikana sulfiditeetti oli korkea ja lämpötilan vaihtelu pieni, seuraavassa sulfiditeetti oli alhainen ja lämpötilan vaihtelu pieni ja viimeisessä sulfiditeetti oli

alhainen ja lämpötilan vaihtelu suuri. Tutkimusaineisto sisälsi mittaustietoa sulfiditeetista, eri ilmatasojen mittaustiedot, mustalipeän ruiskutustiedot sekä kattilan kuormituksen. Jäähdytysveden lämpötilannousu toimii hyvänä indikaattorina sulavirtauksen määrää selvitettäessä. Monimuuttuja-analyysin avulla voidaan selvittää, millä muuttujilla on yhteys tässä tilanteessa jäähdytysveden lämpötilannousuun. (Jones et al. 2014, 211–213.)

Merkittävimmät prosessiparametrit, jotka liittyvät analyysin perusteella sulavirtaan olivat: kokonaisilmamäärä, sekundääri-ilma, viherlipeän sulfiditeetti, primääri-ilma, lipeän kuiva-ainepitoisuus ja valkolipeän kuiva-ainepitoisuus. Tästä on päätelty, että sulfiditeetti on varmasti yksi sulavirtaukseen vaikuttava parametri. Korkeampi sulfiditeetti vähentää sulavirran vaihtelua. Kuiva-ainepitoisuuden vaihtelu ei ollut suurta, vaihteluväli oli 75–77 %, joten tämän ei oletettu aiheuttavan epätasaista sulavirtausta. Kun sulfiditeetti poistettiin mahdollisena selittävänä tekijänä, sekundääri-ilmamäärän vaikutus sulavirran vaihteluun nousi parhaiten esille. Tulosten perusteella sekundääri-ilman kasvattaminen vähentää sulavirtauksen vaihtelua. Tehtaalla hyödynnettiin saatuja tuloksia nostamalla sulfiditeettia ja muuttamalla kattilan ilmajakoa. Sulfiditeetin nosto tasoitti sulavirtausta. Primääri-ilman määrää alennettiin noin 25 % ja vastaavasti sekundääri-ilman määrää kasvatettiin noin 20 %. Tässä vaiheessa sulfiditeettia oli jo nostettu. Ilmajaon muuttamisella ei havaittu olevan vaikutusta sulavirtaukseen, mutta tulipesäprosessiin se vaikutti negatiivisesti. Keko oli liian lähellä seiniä, sulan lämpötila laski ja lentotuhkan määrä kasvoi. Näistä syistä ilmajako palautettiin ennalleen. Artikkelissa oletetaan, että sulavirtaukseen vaikuttaa jokin sellainen ilmiö, joka ei ole mittausaineistossa mukana. On mahdollista, että tulistimista putoavat kerrostumat aiheuttavat sulavirran vaihtelua. (Jones et al. 2014, 213–215.)

5.5 Sulakourujen korroosiovauriot

Ribeiro et al. (2010, 39–45) tutkivat artikkelissaan Brasiliassa sijaitsevan soodakattilan sulakourun vaurioita ja vaurioon johtaneita syitä. Vaurion syntyyn liittyi olennaisena tekijänä tehdasalueella tapahtunut sähkökatkos. Jäähdytysvesipumput eivät toimineet, sillä tehdasalueen generaattorissa tapahtuneen oikosulun johdosta myöskään varavoima ei toiminut. Sulakourujen jäähdytysvesikierto loppui, kun jäähdytysvesisäiliö tyhjeni. Jotta jäähdytysvettä

olisi riittänyt pidemmäksi aikaa, kuristi operaattori jäähdytysvesilinjan käsiventtiilillä virtausta. Tarkasteltava soodakattila oli alhaalla yhteensä viisi päivää, jonka aikana generaattori korjattiin. Soodakattila ehti olla käynnistyksen jälkeen ajossa kaksi päivää, jonka aikana sulakourun 5 alhainen jäähdytysveden lämpötila aiheutti ihmetystä. Syylliseksi epäiltiin viallista termoelementtiä. Operaattorin ollessa tarkastamassa sulakourua 5, havaitsi hän pieniä räjähdyksiä tulipesässä. Operaattori sulki sulakourun 5 jäähdytysvesiventtiilin olettaen veden pääsevän tulipesään kourun jäähdytysvesikierrosta, mutta veden tulo ei loppunut. Tämän jälkeen kattilalla suoritettiin hätäpysäytys.

Kattilaa tutkittaessa havaittiin, että sulakouru 5 oli pahoin vaurioitunut. Tutkimuksissa havaittiin myös, että sulakourujen 3 ja 5 jäähdytysvesiventtiilien tunnisteet olivat ristissä. Tästä syystä vedentulo ei loppunut jäähdytysvesiventtiilin sulkemisen jälkeenkään. Kouruissa 1, 2, 3, 4 ja 6 ei havaittu ohentumista, säröilyä tai kerrostumia vesikierron puolella. Kouru 5 sen sijaan oli tulipesän puolelta suurelta osin läpi syöpynyt ja myös kourun liuotinsäiliön puoleisessa päädyssä oli reikä. Lisäksi kourussa 5 havaittiin itse kouruosassa eroosio-korroosiota ja takaosan jäähdytysveden tulo- ja poistoputkien välinen hitsi oli viallinen. Materiaalitutkimuksen perusteella kourun 5 metallin lämpötila on ollut jossakin vaiheessa yli 540 °C. Osassa jäähdytysvesilinjoja havaittiin pieniä painaumia, joiden merkitys kourun 5 vaurioitumiseen oletettiin vähäiseksi. Näiden painaumien aiheuttajaksi epäiltiin hapen aiheuttamaa pistekorroosiota kattilan alhaalla oloaikoina. Vaikka kouru 3 oli ilman jäähdytysvettä hätäpysäytyksen ajan, ei siinä havaittu merkkejä ylikuumenemisesta. (Ribeiro et al. 2010, 41–43.)

Tutkimusten perusteella oli selvää, että vauriot kourussa 5 johtuivat metallin ylikuumenemisesta ja sulan virtauksesta. Ylikuumenemisen puolestaan aiheutti riittämätön jäähdytysvesivirtaus. Huono hitsi saattoi pettää sähkökatkon yhteydessä tapahtuneessa tulipesän lämpötilan muutoksessa aiheuttaen pienen vuodon. Tällöin jäähdytysvesivirtaus kourussa oli muita kouruja alhaisempi sähkökatkon jälkeen. Vuotanut jäähdytysvesi saattoi kerääntyä keon päälle, mikäli tulipesän lämpö ei ehtinyt höyrystämään kaikkea jäähdytysvettä. Tällöin veden ja sulan seos virtaa kourua pitkin pois kattilasta. Seos on korrodoivaa, sillä se sisältää natriumtiosulfaattia. Osa kourun 5 jäähdytysvesikanavista oli tukkeutuneita jähmettyneestä

sulasta, joka myös osaltaan heikensi jäähdytysvesivirtausta. Jäähdytysveden lämpötila kourun 5 jälkeen oli epäilyttävän matala sähkökatkon jälkeen. Lämpötilaa selittäviä tekijöitä listattiin artikkelissa kolme: jäähdytysveden virtaus oikotietä tuloputkesta poistoputkeen, sulan jäähtyminen vuotoveden johdosta ja veden pinnan oleminen putkessa mittauskohdalla niin alhaalla, ettei anturi mitannut oikein. Mikäli mittaus näytti oikein, altistui sulakourun etuosa matalan lämpötilan johdosta kastepistekorroosiolle. (Ribeiro et al. 2010, 43–44.)

Sulakouruvauriosta huolimatta kattilalla selvittiin ilman sula-vesi-räjähdystä. Jähmettynyt sulakerros suojasi vettä pääsemästä kosketuksiin nestemäisen sulan kanssa. Lisäksi vettä virtasi kourua pitkin koko ajan pois tulipesästä, joten suuren vesimäärän kertyminen vältettiin. Aiempi kattilan alasajo sähkökatkon johdosta pienensi kerrostumien kekoon putoamisen mahdollisuutta. Suora kerrostuman putoaminen kertyneeseen vesialtaaseen oli epätodennäköistä, sillä sulakourut sijaitsevat nokan alla. Vaurion johdosta jokaisen sulakourun jäähdytysvesilinjaan asennettiin virtausmittari ja jäähdytysvesisäiliö liitettiin osaksi sammutusvesijärjestelmää. Lisäksi uusien kourujen tarkastusta erityisesti hitsien osalta tarkennettiin. (Ribeiro et al. 2010, 44–45.)

6 SULAVIRRAN AJALLINEN VAIHTELU

Sulavirtaus tulipesän pohjalta sulakourujen kautta liuotinsäiliöön tapahtuu painovoiman avulla. Sulavirran määrä on pitkällä aikavälillä riippuvainen polttolipeämäärästä, mutta hetkellisiä vaihteluita ei pystytä kontrolloimaan. Tässä luvussa raportoidaan todelliseen mittausdataan pohjautuen sulavirran ajallista vaihtelua ja sen aiheuttamia lämpörasituksia kouruihin.

6.1 Mittausdata esimerkkitehtaalta

Tutkittavalla esimerkkitehtaalla on käytössä kaksi soodakattilaa, kapasiteeteiltaan 860 ja 1200 tonnia kuiva-ainetta päivässä. Molemmilla kattiloilla on käytössä kaksi sulakourua. Kapasiteetiltaan suuremmalla kattilalla on yhteensä neljä kourua, mutta reunimmaisten annetaan tukkeutua. Kattiloilta kerättiin dataa sulakouruihin ja kattilan toimintaan liittyen aikavälillä 17.3.2017–16.4.2017. Lista kerätyistä mittauksista on esitetty taulukossa 7. Suurin osa tiedoista kerättiin minuuttidatana.

Taulukko 7. Luettelo kerätystä mittausdatasta ja muista tarvittavista tiedoista.

Kerätty mittausdata	Tiedonkeruusykli
Sulakourun jäähdytysveden lämpötila ennen kouruja	minuutti
Sulakourun jäähdytysveden lämpötila kourun jälkeen	minuutti
Sulakourun jäähdytysveden tilavuusvirta	kerta
Sulakourun jäähdytysveden lämmönvaihtimen venttiilin asento	minuutti
Liuotinsäiliön tiheys	minuutti
Luotinsäiliön pinta	minuutti
Laihavalkolipeän tilavuusvirta	minuutti
Viherlipeän tilavuusvirta	minuutti
Liuotinsäiliön dimensiot	kerta
Tuorehöyryvirtaus	minuutti
Polttolipeävirtaus	minuutti
Reduktioaste	minuutti
Tulipesän lämpötila	minuutti
Polttolipeän kuiva-ainepitoisuus	minuutti
Sulfiditeetti	minuutti
Käynnistys-/tukipolttoaineen virtaus	minuutti

Tässä työssä ei käsitellä liuottajaan liittyviä mittauksia, sillä niistä ei pystytä selvittämään kourukohtaisia virtauksia.

6.1.1 **Keskiarvolaskenta**

Sulakourujen lämpörasituksen suuruusluokan arvioimiseksi laskettiin kourukohtainen lämpötilannousun keskiarvo tarkastellulta kuukauden ajojaksolta. Kattilalla A lämpötilannousut olivat 3,00 °C ja 3,47 °C. Vastaavat luvut kattilalla B olivat 2,28 °C ja 2,05 °C. Reunimmaiset normaalisti tukossa olevat kourut lämpenivät huomattavasti vähemmän, keskimääräiset lämpötilannousut olivat 0,15 °C ja 0,19 °C. Jäähdytysveteen sitoutunut lämpöteho voidaan laskea yhtälöllä 13.

$$q = q_m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \tag{13}$$

missä

q	lämpöteho [kW]
q_m	massavirta [kg/s]
c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
T	lämpötila [°C]

Jäähdytysveden massavirta voidaan laskea paikallismittauksista luettujen tilavuusvirtojen avulla. Massavirta lasketaan yhtälöllä 14.

$$q_m = \rho \cdot q_v \tag{14}$$

missä

ρ	tiheys [kg/m^3]
q_v	tilavuusvirta [m^3/s]

Veden tiheydeksi oletetaan 981 kg/m^3 (1 bar, 65 °C). Vastaavasti veden ominaislämpökapasiteetti on 4,19 kJ/kgK. Tilavuusvirrat kattilalla A olivat 9,4 m^3/h ja 9,6 m^3/h. Kattilan A yhden sulakourun jäähdytysveden vastaanottama lämpöteho on

$$q = 981\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}4\,\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600}\,\frac{\text{h}}{\text{s}} \cdot 4{,}19\,\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 3{,}00\ ℃ = 32{,}2\ \text{kW}.$$

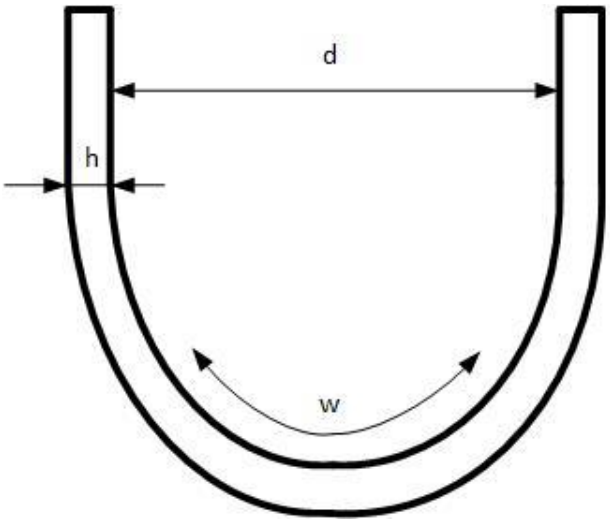
Kaikkien kourujen tiedot esitetään taulukossa 8. Tiheys ja ominaislämpökapasiteetti oletetaan vakioiksi molemmilla kattiloilla, vaikka todellisuudessa kattilan A jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan asetusarvo on 60 °C ja kattilalla B 65 °C. Tällä oletuksella tehtävä virhe jää pieneksi.

Taulukko 8. Esimerkkitehtaan tarkastelujakson keskimääräiset sulakourujen jäähdytysveden lämpötehot.

		Kattila A		Kattila B			
Sulakouru		1	3	1	2	3	4
Jäähdytysveden tilavuus-virta	m^3/h	9,4	9,6	9,8	10	10	9,8
Jäähdytysveden massavirta	kg/s	2,56	2,62	2,67	2,73	2,73	2,67
Lämpötilaero	°C	3,00	3,47	0,15	2,28	2,05	0,19
Lämpöteho	kW	32,2	38,0	1,7	26,0	23,4	2,1

Taulukosta 8 on selvästi havaittavissa, että kattilan B kourut 1 ja 4 eivät juurikaan ole käytössä. Kattilan A korkeampaa lämpötehoa selittää osaltaan kourujen pituusero, sillä A:lla kourut ovat pituudeltaan noin 1,5-kertaiset kattilan B kouruihin verrattuna. Toisaalta kattilan B polttolipeävirtaus on tarkastelujakson aikana ollut keskimäärin noin 30 % suurempi, joten myös sulavirtaus on ollut vastaavasti suurempi.

Kourun jäähdytysveteen siirtynyt kokonaislämpöteho ei paljasta varsinaista kourumetalliin kohdistuvaa lämpörasitusta, vaan on tarpeellista tarkastella pinta-alaan kohdistuvaa lämpökuormaa. Esimerkkitehtaan sulakourujen poikkileikkausta havainnollistetaan kuvassa 26.



Kuva 26. Sulakourun yksinkertaistettu poikkileikkauskuva. Sula virtaa kourun pohjalla, jäähdytysvesi puolestaan metallilevyjen välisessä virtauskanavassa.

Kourun sisäosan leveys d on noin 13 cm ja jäähdytysvesikananvan korkeus h noin 1 cm. Todellisuudessa ränni levenee pari senttiä alareunaa kohti, mutta näissä tarkasteluissa käsitellään ränniä tasalevyisenä käyttäen rännin keskimääräistä leveyttä laskennassa. Lämpövuon suuruutta arvioitaessa lasketaan lämpövuon arvot kolmella eri kosketuspinnan leveyden W arvolla, jotka ovat 10, 15 ja 20 cm. Lämpövuon todellista suuruutta arvioidaan tarkemmin luvussa 6.1.2. Kattilalla A kourujen pituus on noin 1,5 metriä, kattilalla B puolestaan noin 1,0 metriä. Olettamalla lämmönsiirtoa tapahtuvan ainoastaan sulan ja kourun kontaktipinnan välillä, tämän alueen lämpövuo on

$$q'' = \frac{q}{W \cdot L} \tag{15}$$

missä

q''	lämpövuo [kW/m^2]
W	sulan kontaktipinnan leveys [m]
L	sulakourun pituus [m]

Kattilan A kourun 1 lämpövuo 10 cm:n kontaktipinnan oletuksella on

$$q''_{\mathrm{A},1} = \frac{32{,}2\ \mathrm{kW}}{0{,}1\ \mathrm{m} \cdot 1{,}5\ \mathrm{m}} = 215\ \mathrm{kW/m^2}.$$

Kaikkien kourujen keskimääräiset lämpövuot on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Eri kourujen keskimääräiset lämpövuot tarkastelujaksolla kolmella eri sulan kosketusleveyden arvolla laskettuna.

		Lämpövuo [kW/m^2]					
		Kattila A		Kattila B			
Sulakouru		1	3	1	2	3	4
Kontaktileveys [m]	0,10	215	254	17	260	234	21
	0,15	143	169	11	174	156	14
	0,20	107	127	8	130	117	11

Taulukosta havaitaan, että huolimatta pienestä jäähdytysveden lämpötilannoususta, ovat lämpövuot merkittävän suuruisia. Brink et al. (2010) on tutkinut soodakattilan tulipesän säteilylämpövuota mittaamalla. Mitattu lämpövuo tulipesässä oli 60–200 kW/m^2 mittauskohdasta riippuen. Mittausten aikana kattilan kuorma oli 70 %.

Luvun 6.1.2 tietojen perusteella lämpövuo sulakourussa on noin 175 kW/m^2, eli lähellä tulipesän lämpövuon maksimiarvoa. Korkea lämpövuo yhdistettynä korrodoivaan ympäristöön sekä nopeasti vaihtuviin lämpökuormiin muodostavat haasteellisen toimintaympäristön rännimateriaalille.

Sulakourun jäähdytysveden virtausnopeus voidaan arvioida kourun dimensioista. Virtausnopeus lasketaan yhtälöllä

$$w = \frac{q_v}{A_{\mathrm{pl}}} \tag{16}$$

missä

w	jäähdytysveden virtausnopeus [m/s]
A_{pl}	virtauskanavan poikkileikkaus [m^2]

Virtauspoikkipinta-ala kourussa on noin 0,00395 m^2, jolloin esimerkkikourun virtausnopeus on

$$w = \frac{9{,}4\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}} \cdot \frac{1}{3600}\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{s}}}{0{,}00395\ \mathrm{m}^2} = 0{,}66\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

Kourun pituuden avulla voidaan arvioida veden viipymäaikaa itse kouruosassa. Tämän lisäksi sulakourun tulo- ja poistoyhteiden yhteydessä on eräänlaiset jako- ja kokoojakammiot, joiden sisältämää vesimäärää ei näissä laskuissa huomioida. Veden viipymäaika kouruosassa on

$$t = \frac{L}{w} \tag{17}$$

missä

t	veden viipymäaika rännissä [s]

Esimerkkikourun viipymäaika on

$$t = \frac{1{,}5\ \mathrm{m}}{0{,}66\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = 2{,}3\ \mathrm{s}.$$

Kouruosassa oleva veden massa lasketaan yhtälöllä

$$m = A \cdot L \cdot \rho \tag{18}$$

missä

m veden kouruosan massa [kg]

Vettä on esimerkkikourussa

$$m = 0{,}00395\ \text{m}^2 \cdot 1{,}5\ \text{m} \cdot 981\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 5{,}8\ \text{kg}.$$

Taulukkoon 10 on koottu kaikille kouruille lasketut jäähdytysveden virtausnopeudet, viipymäajat sekä massat.

Taulukko 10. Esimerkkitehtaan sulakourujen jäähdytysveteen liittyviä arvoja taulukoituna.

		Kattila A		Kattila B			
Sulakouru		1	3	1	2	3	4
Jäähdytysveden virtausnopeus	m/s	0,66	0,68	0,69	0,70	0,70	0,69
Jäähdytysveden viipymäaika	s	2,3	2,2	1,5	1,4	1,4	1,5
Jäähdytysveden massa	kg	5,8	5,8	3,9	3,9	3,9	3,9

Jäähdytysveden viipymäaika lämpötilamittausten välillä putkisto huomioidenkin on niin lyhyt, että vesimassa ehtii minuutin aikana vaihtua useita kertoja lämpötilamittausten välillä. Tällöin tehonmuutoksia voidaan tarkastella luotettavasti yhtälön 13 avulla määrittämällä teho eri ajanhetkille.

Sulan lämpötilan avulla on mahdollista laskea kokonaislämmönsiirtokerroin sulakourulle. Kokonaislämmönsiirtokerroin lasketaan yhtälöllä 19.

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \tag{19}$$

missä

U kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K]

ΔT sulan ja jäähdytysveden välinen lämpötilaero [°C]

Sulan lämpötila on suoritettujen mittausten perusteella keskimäärin 820 °C olettaen rännin matkalla tapahtuvan jäähtymistä noin 10 °C. Jäähdytysveden lämpötilaksi oletetaan sisäänmeno- ja poistumislämpötilojen keskiarvo. Esimerkkilaskun kosketuspinnan leveydeksi W valitaan 10 cm. Tällöin esimerkkikourun kokonaislämmönsiirtokerroin on

$$U_{\mathrm{A},1} = \frac{32{,}2\,\frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}}{0{,}15\ \mathrm{m}^2 \cdot (820 - 61{,}5)\ ^\circ\mathrm{C}} = 283\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}.$$

Edellä mainituilla oletuksilla laskien kokonaislämmönsiirtokertoimet eri kouruille on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Sulakourujen laskennalliset kokonaislämmönsiirtokertoimet eri kosketuspinnan leveyden oletuksilla esitettynä.

		Kattila A		Kattila B			
Sulakouru		1	3	1	2	3	4
Sulan lämpötila	°C	820		820			
Jäähdytysveden keskimääräinen lämpötila	°C	61,5	61,7	65,1	66,1	66,1	65,1
Kokonaislämmönsiirtokerroin W=0,10 m	W/m^{2}K	283	334	22	345	310	28
Kokonaislämmönsiirtokerroin W=0,15 m	W/m^{2}K	189	223	15	230	207	19
Kokonaislämmönsiirtokerroin W=0,20 m	W/m^{2}K	141	167	11	173	155	14

Kokonaislämmönsiirtokerroin siis on välillä 150–350 W/m^{2}K. Luvun 6.1.2 tietojen perusteella todennäköinen lämpövuo olisi luokkaa 175 kW/m^2, jolloin yhtälöllä 19 laskien kokonaislämmönsiirtokerroin olisi 230 W/m^{2}K.

Metallin pintalämpötilat lasketaan lämpövuon arvolla 175 kW/m^2. Taulukoihin kootaan pintalämpötilat lämpövuon arvoilla 150, 175 ja 200 kW/m^2. Lämmönsiirto tapahtuu nestemäisestä sulasta kourun pintaan jähmettyneeseen sulaan, tästä kourumateriaaliin ja kourumetallista jäähdytysveteen. Metallin lämpötila vesipuolella voidaan arvioida lämpövuon ja konvektiokertoimen avulla yhtälöllä

$$T_{\mathrm{k,jv}} = T_{\mathrm{jv}} + \frac{q''}{h_{\mathrm{v}}} \tag{20}$$

missä

$T_{\mathrm{k,jv}}$	kourumetallin lämpötila jäähdytysveden puolella [°C]
T_{jv}	jäähdytysveden keskimääräinen lämpötila [°C]
h_{v}	veden konvektiokerroin [W/m^{2}K]

Veden konvektiokerroin määritetään Nusseltin luvun avulla seuraavasti.

$$h_{\mathrm{v}} = \frac{Nu \cdot k_{\mathrm{v}}}{D_{\mathrm{h}}} \tag{21}$$

missä

Nu	Nusseltin luku
k_{v}	veden lämmönjohtavuus [W/mK]
D_{h}	virtauskanavan hydraulinen halkaisija [m]

Nusseltin luku määritetään Dittus-Boelter-yhtälöllä. Reunaehtona yhtälön käytölle on täysin kehittynyt virtaus, mutta tulosta voidaan myös hyödyntää keskimäärisenä arvona koko kourulle, mikäli $L/D_{\mathrm{h}} > 10$ (Incropera & DeWitt 2002, 508).

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re_{\mathrm{D}}^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{n} \tag{22}$$

missä

Re_{D}	Reynoldsin luku
Pr	Prandtlin luku
n	korrelaatiotermi, nyt 0,4

Reynoldsin luku on

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot D_{\mathrm{h}}}{\mu} \tag{23}$$

missä

ρ	tiheys [kg/m^3]
w	virtausnopeus [m/s]
μ	viskositeetti [Ns/m^2]

Hydraulinen halkaisija määritetään yhtälöllä

$$D_{\mathrm{h}} = \frac{4 \cdot A}{P} \tag{24}$$

missä

P virtauskanavan poikkileikkauksen märkäpiiri [m]

Esimerkkikourun tapauksessa hydraulinen halkaisija on

$$D_{\mathrm{h}} = \frac{4 \cdot 0{,}00395\ \mathrm{m}^2}{0{,}810\ \mathrm{m}} = 0{,}0195\ \mathrm{m}.$$

Nyt siis ehto $L/D_{\mathrm{h}} > 10$ täyttyy. Laskennassa tarvittavat veden aineominaisuudet esitetään pisteestä 1 bar, 65 °C. Veden viskositeetti on tällöin $0{,}433 \cdot 10^{-3}$ Ns/m^2. Reynoldsin luku esimerkkirännille on

$$Re = \frac{981\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 0{,}66\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0{,}0195\ \mathrm{m}}{0{,}433 \cdot 10^{-3}\ \frac{\mathrm{Ns}}{\mathrm{m}^2}} = 29\,210.$$

Prandtlin luku on 2,77. Tällöin Nusseltin luku on

$$Nu = 0{,}023 \cdot 29\,210^{\frac{4}{5}} \cdot 2{,}77^{0{,}4} = 129{,}2.$$

Veden lämmönjohtavuus laskentapisteessä on 0,655 W/mK, jolloin veden konvektiokerroin on

$$h_{\mathrm{v}} = \frac{129{,}2 \cdot 0{,}655\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}}{0{,}0195\ \mathrm{m}} = 4337\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}.$$

Kourumetallin keskimääräinen lämpötila vesipuolella on tällöin

$$T_{\mathrm{k,jv,A1}} = 61{,}5\ ^{\circ}\mathrm{C} + \frac{175\ \frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m}^2}}{4337\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}} = 101{,}8\ ^{\circ}\mathrm{C}.$$

Esimerkkitehtaan kaikkien rännien konvektiokertoimien ja rännimetallin keskimääräiset pintalämpötilat vesipuolella ajossa oleville ränneille on esitetty taulukossa 12. Kattilan B rännien 1 ja 4 vesipuolen konvektiokertoimet ovat 4484 W/m^{2}K.

Taulukko 12. Vesipuolen konvektiokertoimet ja rännimetallin vesipuolen keskimääräiset pintalämpötilat taulukoituna.

		Kattila A		Kattila B	
Sulakouru		1	3	2	3
Konvektiokerroin	W/m^{2}K	4337	4411	4557	4557
Metallin lämpötila vesipuolella, q''=150 kW/m^2	°C	96,1	95,7	99,0	98,9
Metallin lämpötila vesipuolella, q''=175 kW/m^2	°C	101,8	101,4	104,5	104,4
Metallin lämpötila vesipuolella, q''=200 kW/m^2	°C	107,6	107,0	110,0	109,9

Ränniteräksen pintalämpötila sulan puolella voidaan laskea yhtälöllä 25.

$$T_{\mathrm{k,s}} = T_{\mathrm{k,jv}} + \frac{q'' \cdot L_{\mathrm{k}}}{k} \tag{25}$$

missä

$T_{\mathrm{k,s}}$ kourumetallin lämpötila sulan puolella [°C]

L_{k} kourun paksuus [m]

k kourun lämmönjohtavuus [W/mK]

Kourumateriaalin lämmönjohtavuudeksi oletetaan 41 W/mK (Incropera & DeWitt 2002, 906), ja metallin paksuudeksi 0,008 m. Tällöin metallin lämpötila sulan puolella esimerkkikourulle on

$$T_{\mathrm{k,s,A1}} = 101{,}8\ °\mathrm{C} + \frac{175\ \frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m^2}} \cdot 0{,}008\ \mathrm{m}}{41\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}} = 136{,}0\ °\mathrm{C}.$$

Eri lämpövuon arvoilla lasketut metallin pintalämpötilat sulan puolella esitetään taulukossa 13.

Taulukko 13. Kourumetallin pintalämpötilat sulan puolella eri lämpövuon arvoilla laskettuna.

		Kattila A		Kattila B	
Sulakouru		1	3	2	3
Metallin lämpötila sulan puolella, q''=150 kW/m^2	°C	125,4	125,0	128,3	128,2
Metallin lämpötila sulan puolella, q''=175 kW/m^2	°C	136,0	135,5	138,6	138,5
Metallin lämpötila sulan puolella, q''=200 kW/m^2	°C	146,6	146,1	149,0	148,9

Sulakourun pinnalla on jähmettyneen sulan muodostama kerros, mikäli nestemäisen virtaavan sulan aiheuttama eroosio ei estä kerroksen muodostumista. Teoreettisessa tarkastelussa voidaan olettaa, että jähmettyneen kerroksen paksuus määräytyy lämmönjohtavuuden perusteella. Sula alkaa jähmettyä noin 760 °C:n lämpötilassa (Grace & Frederick 1997, 163; Tran et al. 2006, 182–186). Tällöin yhtälön 26 avulla voidaan selvittää jähmettyneen kerroksen paksuus.

$$L_{\mathrm{js,A1}} = \frac{k_{\mathrm{js}} \cdot (T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{k,s,A1}})}{q''} \tag{26}$$

Jähmettyneelle sulalle käytetään lämmönjohtavuuden arvoa 0,88 W/mK (taulukko 4). Tällöin jähmettyneen sulakerroksen vahvuus on

$$L_{\mathrm{js,A1}} = \frac{0{,}88\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}} \cdot (760 - 136{,}0)\mathrm{°C}}{175\ \frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{m^2}}} = 0{,}0031\ \mathrm{m}.$$

Jähmettyneen kerroksen paksuus näillä oletuksilla laskien olisi siis 3,1 mm. Muille ajossa oleville ränneille jähmettyneen kerroksen paksuus on samaa suuruusluokkaa, eli noin 3 mm.

Sulavirran määrä voidaan laskea kattilaan syötetystä polttolipeämäärästä. Sulaa muodostuu noin 0,45 kilogrammaa poltettua kuiva-ainekiloa kohti (Vakkilainen 2006a, 67). Mustalipeän tiheys arvioidaan kuiva-ainepitoisuuden ja lämpötilan avulla. Esimerkkitehtaalla mustalipeän tiheys on noin 1470 kg/m^3 (Vakkilainen 2008a, 22). Keskimääräinen mustalipeävirtaus on tarkastelujaksolla ollut 8,14 l/s. Sulan keskimääräinen massavirta lasketaan yhtälöllä 27.

$$q_{m,\mathrm{s}} = x \cdot DS \cdot q_{v,\mathrm{ml}} \cdot \rho_{\mathrm{ml}} \quad (27)$$

missä

$q_{m,\mathrm{s}}$	sulan massavirta [kg/s]
x	epäorgaanisen aineen osuus mustalipeästä [$\mathrm{kg/kg_{ds}}$]
DS	kuiva-aine [$\mathrm{kg_{ka}/kg_{pa}}$]
$q_{v,\mathrm{ml}}$	mustalipeän tilavuusvirta [l/s]
ρ_{ml}	mustalipeän tiheys [$\mathrm{kg/m^3}$]

Esimerkkikattilan sulavirran määrä tarkastelujakson aikana on ollut keskimäärin

$$q_{m,\mathrm{s}} = 0{,}45\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kg_{ds}}} \cdot 0{,}792 \cdot 8{,}14\,\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{s}} \cdot 1{,}47\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{l}} = 4{,}26\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}.$$

Nestemäisen sulan tiheydelle on ilmoitettu arvoksi 1923 $\mathrm{kg/m^3}$ (taulukko 4). Tällöin sulan tilavuusvirta on keskimäärin

$$q_{v,\mathrm{s}} = \frac{4{,}26\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}}{1923\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}} = 0{,}0022\,\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}},$$

eli 2,2 l/s. Ränniä kohti sulavirtaus on siis keskimäärin ollut 1,1 l/s. Kattilalla B kourukohtainen keksimääräinen sulavirta on ollut noin 1,5 l/s.

6.1.2 **Sulan tilavuusvirta ja kourun lämpötilaprofiili**

Sulakourun lämpötilaprofiilia on mahdollista tarkastella sekä laskennallisesti että mittausten avulla. Edellä on laskettu kourun lämpötiloja keskimääräisten tietojen perusteella. Tässä luvussa esitetään mittausten antamaa informaatiota lämpötiloista kourun eri kohdissa ja niiden muutoksista.

Sulakourun tilavuusvirta voidaan määrittää videon avulla. Esimerkkitehtaalla suoritettujen kuvausten keskiarvotulokset esitetään taulukossa 14. Mittausjakso oli 30 minuuttia lukuun ottamatta kattilan B ränniä 3, jolla mittausjakso oli 13 minuuttia. Tilavuusvirran määrittämiseksi on tiedettävä kourun dimensiot sekä määritettävä sulavirran leveys ja virtausnopeus. Sulavirran leveys on arvioitu videosta hyödyntäen leveyden skaalauksessa 3 cm:n levyistä

lattarautaa ja kourun reunoja. Videolta määritettiin sulan leveys kerran minuutissa. Tarkastelujaksoilla ei tapahtunut suuria lämpötilanmuutoksia jäähdytysvedessä. Alle 0,5 °C/min muutoksen havaitseminen videolta on haasteellista. Leveyden tarkka arviointi on haasteellista, mikäli kuona muodostaa rännin reunoille eräänlaisen kannen sulavirran yläpuolelle. Sulavirran nopeus on määritetty tarkastelemalla missä ajassa yksittäiset kuonapaakut kulkeutuvat rännin päästä päähän sulavirran päällä kelluen. Nopeus on keskimäärin noin 1,5 m/s.

Taulukko 14. Sulan videoinnin tulokset.

		Kattila A		Kattila B	
		1	3	2	3
Lämpötilan nousu	°C	3,9	3,2	2,6	2,1
Lämpöteho	kW	41,8	35,1	29,7	24,0
Sulan leveys	cm	7,7	8,5	9	5,1
Kosketuspinnan leveys	cm	8,2	9,3	9,9	5,2

Lämpötilan nousu ja lämpöteho on määritetty DCS-järjestelmän datasta. Kosketuspinnan leveys on laskettu mitatusta sulan leveydestä kourun dimensioiden ja geometrian avulla (liite I). Tulokset esitetään kuvassa 33, jossa esitetään teoreettinen kourun lämpötehon muuttuminen sulavirran funktiona.

Lämpötilaprofiilin selvittämiseksi suoritettiin esimerkkitehtaalla yhdistetty termoelementti- ja lämpökameramittaus. Mittauksessa hyödynnettiin kahta lämpökameraa sekä kahta termoelementtiä. Lämpökamerat olivat malleiltaan FLIR T1020 ja FLIR T640. Mittauksissa käytettiin SAB:n valmistamia K-tyypin termoelementtejä, jotka sijoitettiin ruostumattomasta teräksestä valmistettujen suojaputkien sisään. Suojaputkien seinämävahvuus oli 2,0 mm ja ulkohalkaisija 21,3 mm. Lämpötilatiedot termoelementeistä tallennettiin Huato HE802 -dataloggerilla. Termoelementtien maksimivirheeksi on ilmoitettu 1,5 °C tai 0,4 % näyttämästä. Dataloggerin maksimivirheeksi on ilmoitettu 1 °C tai 0,5 % näyttämästä. Lämpötilatasossa 900 °C virheiden summautuessa voisi virhe olla maksimissaan noin 8 °C. Tästä syystä antureille suoritettiin yksinkertainen varmennusmittaus, jonka tulokset esitetään liitteessä II. Varmennusmittausten perusteella lämpötilatietojen jälkikäsittelylle ei ole tarvetta.

Lämpökamerakuvauksessa mitattavan kohteen emissiviteetti on olennaisessa osassa mittauksia. Sulakourun materiaalin emissiivisyys pyrittiin kalibroimaan hyödyntämällä kattilan B reunimmaisia rännejä referenssipisteenä. Kyseisten kourujen pintalämpötila on lähellä kourussa kiertävän jäähdytysveden lämpötilaa. Keskimääräisellä jäähdytysveden lämpötilalla 65 °C, olettamalla vapaan konvektion lämmönsiirtokertoimeksi kourumetallista ympäristöön 25 W/m^{2}K, vesipuolelle 4500 W/m^{2}K ja kattilahuoneen keskimääräiseksi lämpötilaksi kourun ympäristössä 25 °C saadaan laskettua tarkempi arvio pintalämpötilasta. Kokonaislämmönsiirtokerroin lasketaan yhtälöllä 28.

$$U_{\mathrm{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\mathrm{v}}} + \frac{L_{\mathrm{k}}}{k} + \frac{1}{h_{\mathrm{i}}}} \tag{28}$$

missä

h_{i} konvektiokerroin kourusta ilmaan [W/m^{2}K]

Kokonaislämmönsiirtokerroin on

$$U_{\mathrm{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{4500\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}} + \frac{0{,}008\ \mathrm{m}}{41\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}} + \frac{1}{25\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}}} = 24{,}7\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}.$$

Lämpövuo määritetään yhtälöllä 29.

$$q'' = U_{\mathrm{tot}} \cdot \Delta T \tag{29}$$

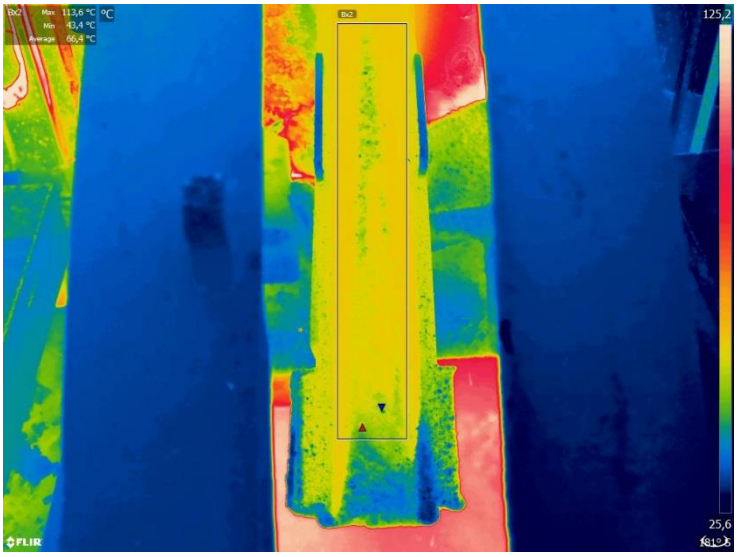
Lämpövuo kourusta ympäristöön on

$$q'' = 24{,}7\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} \cdot 40\ \mathrm{°C} = 988\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}.$$

Yhtälöön 20 arvot sijoittamalla saadaan metallin lämpötilaksi kattilahuoneen puolella

$$T_{\mathrm{m}} = 25\ \mathrm{°C} + \frac{988\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}}{25\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}} = 64{,}5\ \mathrm{°C}.$$

Kattilan B kourusta 4 otettiin kolme lämpökamerakuvaa, joiden avulla emissiviteetti säädettiin. FLIRin Tools -ohjelmisto mahdollistaa emissiviteetin säädön jälkikäteen. Kuvassa 27 esitetään ohjelmistolla tehty alueen rajaus yhden kuvan osalta, jonka avulla emissiviteetti on säädetty.



Kuva 27. Rännimateriaalin emissiviteetin kalibrointi kattilan B rännin 4 avulla FLIRin Tools -ohjelmistolla.

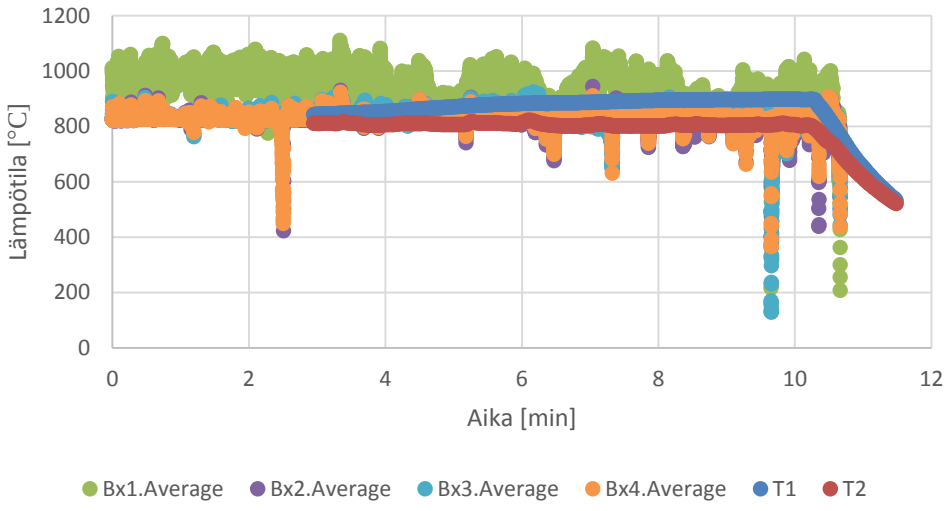
Kuvista rajattujen alueiden keskimääräiset lämpötilat emissiviteetillä 0,91 ovat 66,4 °C, 63,5 °C sekä 63,7 °C. Tällöin kokonaiskeskiarvolämpötila on 64,5 °C, joka vastaa laskennallista keskiarvoa.

Virtaavan sulan emissiviteetille on esitetty kirjallisuudessa arvo 0,9, joka ei juurikaan ole lämpötilasta riippuva (Wessel & Bailey 1996, 27). Lämpökamerakuvauksessa kyseistä emissiviteettiä käytettiin oletuksena. Lämpökameran mittaustuloksia verrattiin termoelementtien näyttämiin lämpötiloihin. Kuvassa 28 esitetään vertailun toteuttaminen käytännössä yhden rännin osalta. Kuvassa oikealla sijaitsee tulipesä, vasemmalla liuottaja. Rännin eri kohdista seurattiin sulan keskiarvolämpötiloja ja näitä tuloksia verrattiin termoelementtien lämpötiloihin.



Kuva 28. FLIR Tools -ohjelmistolla määritetyt alueet lämpökameran ja termoelementtien lämpötiladatojen vertailua varten. Vertailulla on mahdollista varmentaa sulan emissiviteetin arvo.

Yllä esitetyn kattilan B kourun 3 lämpötiladata esitetään kuvassa 29. Kuvaan on koottu kaikkien lämpökameran tiedoista määritettyjen alueiden keskimääräiset lämpötilat sekä termoelementtien lämpötilat. T1 mittaa lämpötilaa sula-aukolta läheltä tulipesää ja T2 kourun alapäädystä. Liitteeseen III on koottu kaikkien kourujen lämpötilatrendit.



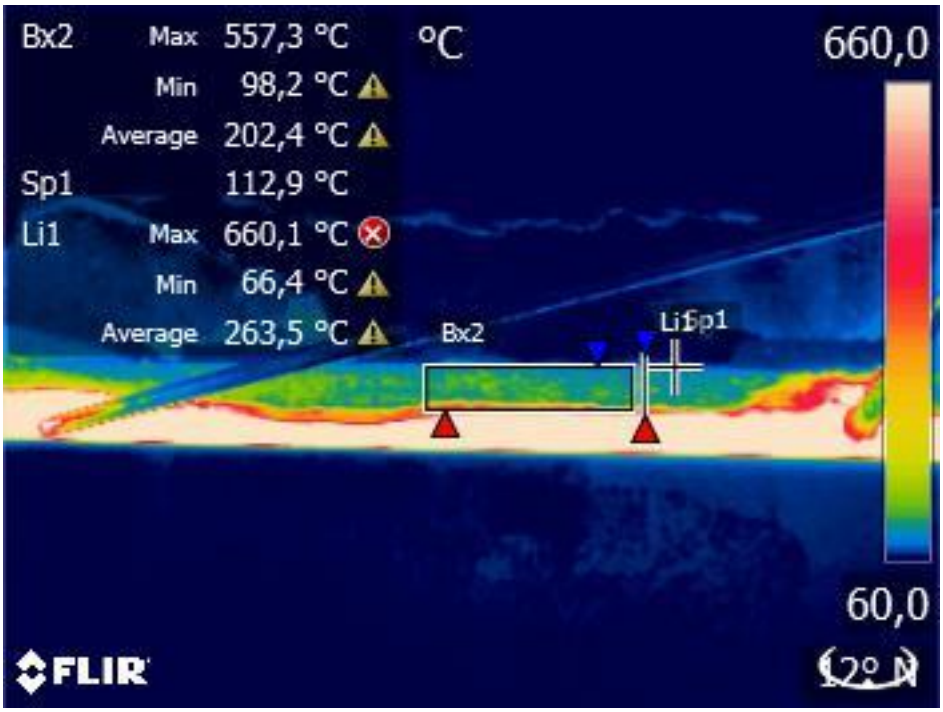
Kuva 29. Kattilan B kourun 3 sulan lämpötila eri kohdissa kourua.

Tulipesän suulta mitatut lämpötilat ovat selkeästi suurempia kuin muut. Mittauksissa tulipesän keko käytännössä oli kosketuksissa ylemmän termoelementin kanssa, joten termoelementin yläpuolelta määritetyt lämpötilat kuvaavat osittain keon pintalämpötilaa. Myös termoelementti T1 mittaa osittain keon lämpötilaa. Mittauksissa havaittiin, että termoelementin liikuttamisen jälkeen lämpötila nousi pysyvästi.

Sulan keskimääräinen lämpötila termoelementin T2 mukaan oli kattilalla A 810 °C kourussa 1 ja 813 °C kourussa 3. Vastaavasti kattilalla B lämpötilat olivat 821 °C kourussa 2 ja 807 °C kourussa 3. Termoelementin T1 keskimääräiset lämpötilat olivat 859, 913, 882 ja 880 °C. Termoelementti T1:n sijainnista johtuen se ei mitannut virtaavan sulan lämpötilaa. Videolta tarkastellen sulan jäähtyminen kourun matkalla oli huomattavasti vähäisempää.

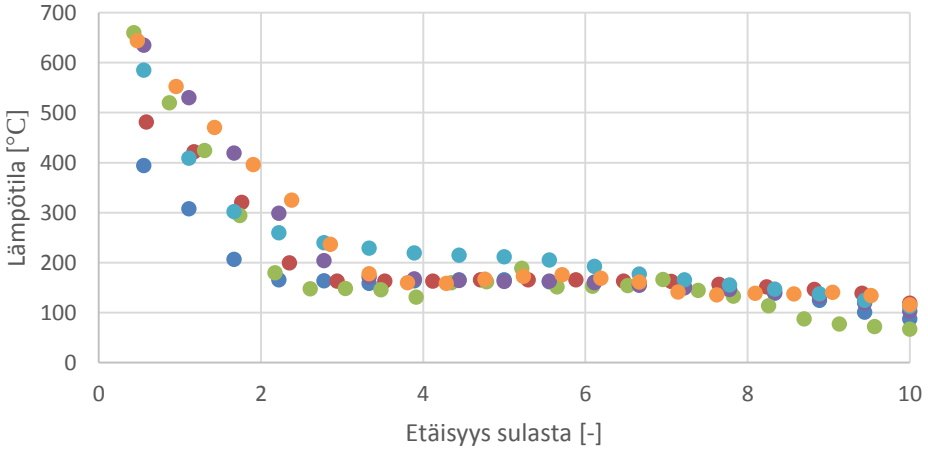
Tarkka sulan emissiviteetin tarkistus suoritettiin hyödyntäen T2:n lämpötiloja ja vertaamalla niitä lämpökamerakuvasta määritetyn lähimmän alueen keskimääräisiin lämpötiloihin. Kattilan B kourun 3 (kuva 28) tapauksessa vertailu suoritettiin siis alueeseen Bx2. Kyseisen kourun tapauksessa emissiviteetillä 0,9 lämpökameravideosta laskettu keskimääräinen lämpötila on 20 °C termoelementin arvoa korkeampi. Parhaiten arvot vastaavat toisiaan kyseisen kourun osalta emissiviteetillä 0,93. Suoritettaessa vertailu kattilan B kourulle 2 lämpötilat vastaavat toisiaan tarkimmin emissiviteetillä 0,88. Kattilalle A lämpötilojen mukaan iteroidut emissiviteetin arvot ovat 0,91 kourulle 1 ja 0,93 kourulle 3. Lämpötilatarkasteluissa päädyttiin käyttämään videomateriaalin analysoinnissa emissiviteettiä 0,9 ja yksittäisten kuvien analysoinnissa emissiviteettiä 0,91.

FLIR T640 -lämpökameralla kuvattiin kunkin kourun reuna-alueita. Reuna-alueiden lämpötilaprofiilin selvittäminen lisää ymmärrystä kourumetallin ripaefektin ja sulan säteilyn todellisista vaikutuksista materiaalin lämpörasituksiin. Reunaprofiilin lämpötilan määritystavan havainnollistamiseksi kuvassa 30 esitetään yksi kattilan B kourun 3 lämpökamerakuvista.



Kuva 30. Esimerkkikuva kourun reunan kuvauksesta. Tulipesä kuvassa vasemmalla.

Lämpötilaprofiili voidaan määrittää ohjelmiston alue- ja viivatyökalujen avulla. Aluetyökalua käytettäessä voidaan esimerkiksi Microsoft Excel -ohjelmistolla määrittää jokaisen rivin keskiarvolämpötila. Tällöin on mahdollista saada paremmin keskiarvotilannetta kuvaava lämpöprofiili. Vastaavasti viivatyökalun avulla saadaan helposti tarkastelua esimerkiksi kuonapaakkujen vaikutuksia paikallisesti. Kuvaan 31 on koottu kattilan B kourun 3 lämpötilaprofiilit eri kuvista määrittäen.

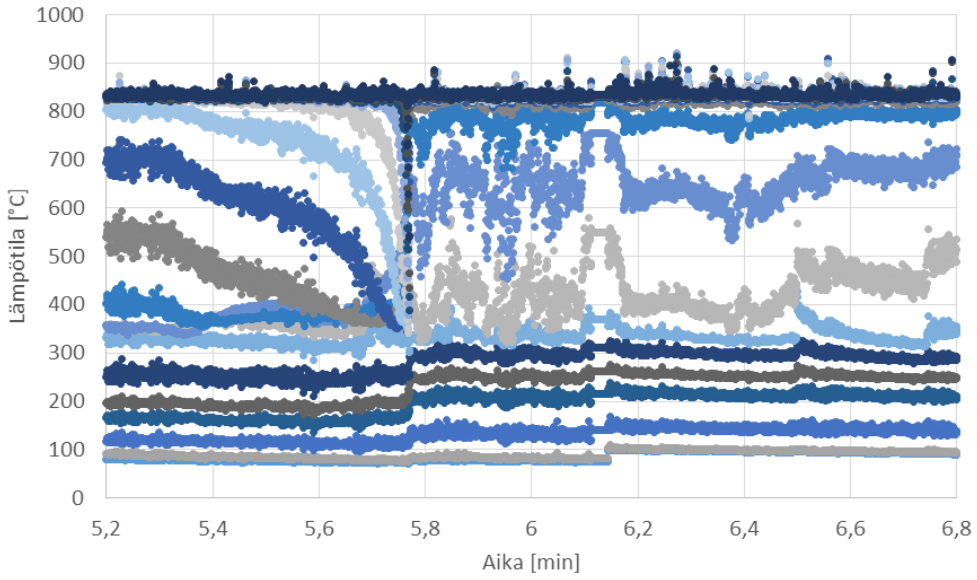


Kuva 31. Kattilan B sularännin 3 reunan lämpötilaprofiili.

Lämpötilaprofiilia tarkasteltaessa on huomattava, että osa lämpökamerakuvista on otettu siten, että maksimilämpötila on asetettu 660 °C:een. Osassa kuvista vastaavasti minimilämpötila on määritetty 100 °C:een. Samasta kourusta otetut lämpökamerakuvat on skaalattu toisiinsa määrittämällä sulan reuna nollakohdaksi ja rännin yläreuna päätekohdaksi. Skaalaus on toteutettu siten, että kuvassa esitetty suhteellinen etäisyys sulasta vastaa melko tarkasti etäisyyttä senttimetreinä. Kourun kaarevuus ja kuvaus yläviistosta aiheuttavat pienet virhetekijät, jotka jätetään tässä yhteydessä huomiotta.

Kuvan 31 perusteella havaitaan, että lämpötila laskee hyvin voimakkaasti heti sulan yläpuolella. Lämpötila kuitenkin tasoittuu tasolle 150 °C, joka edelleen vastaa suuruusluokaltaan samaa lämpötilatasoa luvussa 6.1.1 lasketun kourumetallin pintalämpötilan kanssa. Tämä tarkoittaisi, että lämpövuo suoraan sulasta johtumalla kourumetallin kautta jäähdytysveteen olisi samaa suuruusluokkaa rännin yläosien lämpövuon kanssa. Toisaalta pienetkin sularoiskeet reunalla voivat vääristää mittausta, sillä sula jäähtyy hitaasti ja tästä johtuen kourumetallin lämpötila ei välttämättä täysin vastaa lämpökameran mittaamaa lämpötilaa. Lisäksi sulan säteilyn heijastuminen kourumetallista voi vääristää tuloksia.

Lämpöprofiilin muutoksia aiheuttavat esimerkiksi sulavirran vaihtelut ja kuonapaakkujen irtoamiset kourun reunoilta. Kuvassa 32 esitetään lämpötilaprofiilin muutos kuonapaakun irrotessa kourun reunasta. Lämpötilaprofiili on muodostettu viivatyökalulla sisältäen rännin yhden kohdan lämpötilat reunasta reunaan. Luentaselkeyden parantamiseksi kuvassa näytetään ainoastaan rännin toisen reunan profiili, ja tästä joka toinen datapiste.



Kuva 32. Kuonapaakun irtoamisen vaikutus sulakourun lämpötilaprofiiliin.

Virtaavan sulan päälle muodostuva kerros jäähtyy pinnaltaan useita satoja asteita alla virtaavaa sulaa kylmemmäksi. Paakun irrotessa lämpötila mittauskohdassa luonnollisesti nousee takaisin sulan lämpötilaan. Rännin reunan läheisyydessä on havaittavissa muutaman kymmenen asteen nousu lämpötiloissa kuonapaakun irtoamisen jälkeen. Tämän suuruinen lämpötilannousu korreloi hyvin luvussa 6.1.1 lasketun teoreettisen kourumetallin pintalämpötilan kanssa. Koska lämpötilaprofiili on muodostettu ylhäältä kuvatusta videosta, niin rännin pystyosan lämpötilajakaumasta ei saada tällä metodilla kovin tarkkaa selvyyttä. On myös havaittavissa, että lämpötilat säilyvät kourun alle 100 °C:n lämpötilasta noin 300 °C:een saakka melko tasaisina. Sulan lämpötila pysyy myös suunnilleen saman suuruisena. Näiden välissä on kaksi käyrää, joiden lämpötilat tasaantuvat vasta yli puoli minuuttia paakun irtoamisen jälkeen. Näiden mittapisteiden alue oletettavasti on kourun reunalla se, jossa kourun jäähdytyksen teho on sen suuruinen, että virtaava sula alkaa jähmettyä.

Lämpökameravideosta voidaan melko luotettavasti määrittää sulan virtausnopeus. FLIR Tools -ohjelmistolla voidaan määrittää pituus eri kohtien välillä. Referenssipituuksina käytetään termoelementtien suojaputkien halkaisijoita sekä kourun dimensioita. Hiilipaakut erottuvat sulavirrasta selkeästi erilaisen lämpötilansa johdosta. Näiden paakkujen nopeus voidaan määrittää jakamalla kuljettu matka siihen kuluneella ajalla. Lämpökamera kuvaa 30

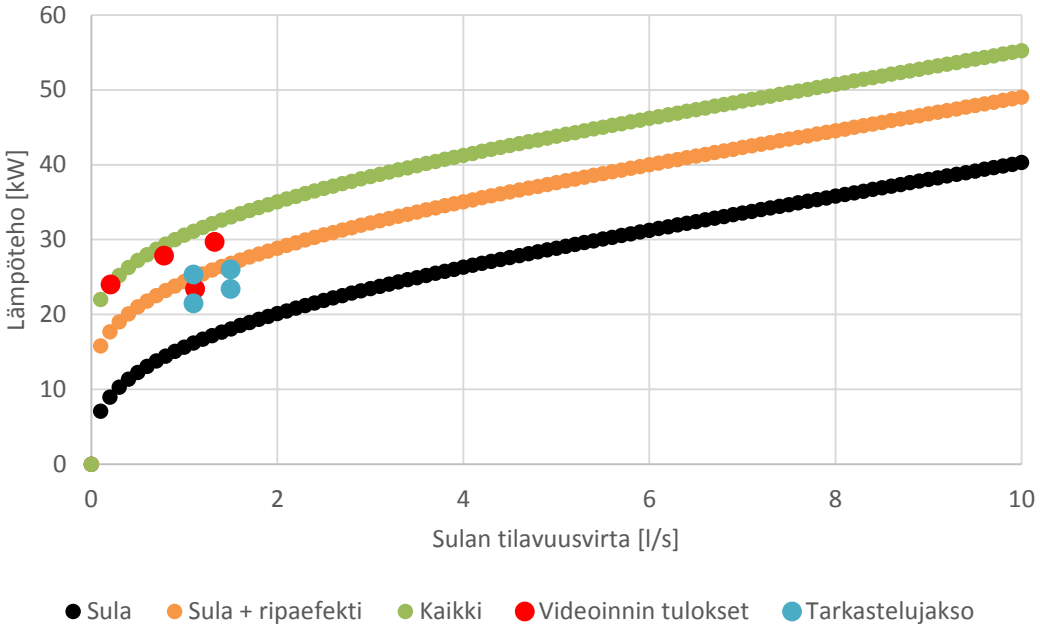
kuvaa sekunnissa, jolloin ruutu kerrallaan videota selaten pystytään minimoimaan ajanmittauksesta aiheutuva virhe. Taulukossa 15 esitetään nopeusmittauksen tulokset.

Taulukko 15. Sulavirran nopeus lämpökameravideosta määritettynä.

Klo videolla	Kattila	Ränni	Nopeus [m/s]
0:58	A	1	1,8
1:52	A	1	1,8
3:16	A	1	1,8
12:50	A	1	1,8
0:19	A	3	2,1
5:49	A	3	1,9
9:09	A	3	1,9
10:41	A	3	1,9
1:37	B	2	2,1
3:00	B	2	1,9
5:05	B	2	1,5
9:56	B	2	0,8
10:06	B	2	1,3
0:20	B	3	2,1
0:31	B	3	2,1
0:28	B	3	2,3
8:55	B	3	2,0
		Keskiarvo	1,8

Tarkasteluhetkellä, jolloin nopeudeksi määritettiin 1,5 m/s, virtasi kourussa iso kuonapaakku. Vastaavasti hetkellä, jolloin nopeus oli 0,8 m/s, oli kourun virtaus erittäin alhainen. On huomioitava, että virtausnopeus on määritetty kourun pinnasta, eikä sulan virtausnopeus oletettavasti ole sama lähellä kourun reunoja tai pohjaa. Avoimessa virtauskanavassa nopeus pinnan läheisyydessä voi olla kaksinkertainen keskimääräiseen nopeuteen nähden (White 2003, 693). Nyt oletetaan, että pinnan nopeus on 1,5-kertainen keskimääräiseen nopeuteen nähden. Tällöin sulavirran keskimääräinen nopeus on 1,2 m/s.

Sulakourun geometrian avulla on mahdollista määrittää teoreettisesti, kuinka sulavirran muutokset vaikuttavat ränniin siirtyvään lämpötehoon (liite I). Seuraavassa kuvassa oletetaan lämpövuon olevan 175 kW/m^2, sulan virtausnopeuden 1,2 m/s, rännin dimensioiden luvun 6.1.1 mukaiset ja kourun pituuden 1 metri.



Kuva 33. Sularänniin siirtyvä lämpöteho tilavuusvirran funktiona.

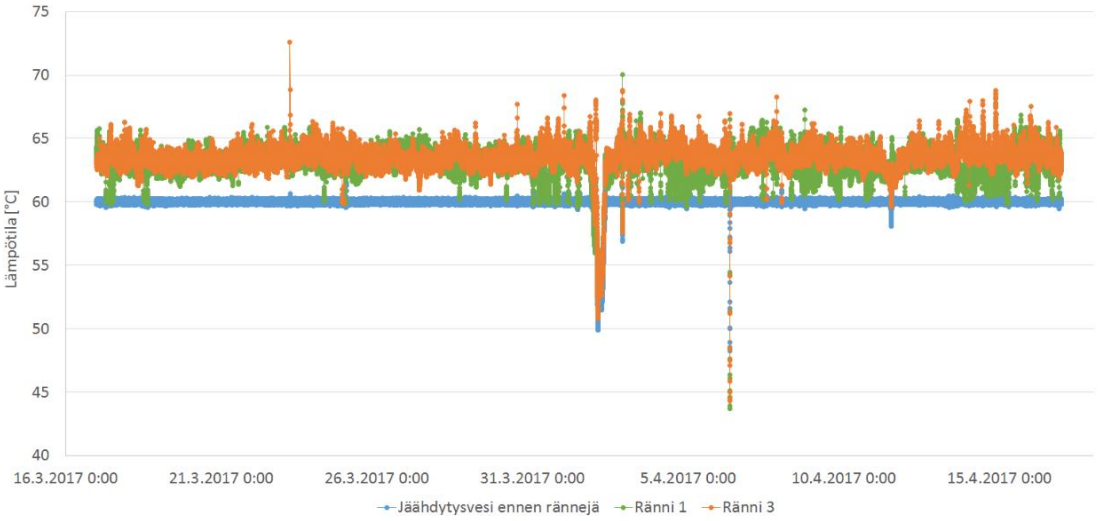
Kuvan perusteella 175 kW/m^2 on realistinen oletus kourun lämpövuoksi. Mustan käyrän oletuksena on, että kaikki lämpö siirtyy suoraan sulasta kourumetalliin ja siitä edelleen jäähdytysveteen. Oranssi käyrä kuvaa oletusta, jossa sulan kosketusleveyden lisäksi oletetaan lämpökamerakuvien perusteella ripaefektin vaikutuksesta lämmönsiirtopinnan jatkuvan 2,5 cm sulan molemmille puolille. Myös tämän ripaosuuden lämpövuoksi on määritetty 175 kW/m^2. Vihreä käyrä ottaa huomioon lisäksi tulipesän säteilyn, tulipesän rakenteista siirtyvän lämmön sekä sulavirran säteilyn kourun reunoihin. Tulipesän osuus tehosta on 1,9 kW, joka vastaa kattilan B reunimmaisten rännien keskitehoa. Säteilytehoksi on määritetty 4,3 kW (liite V). Molemmat tehoista ovat riippumattomia sulavirran määrästä. Kuvassa esitetään myös videoinnin tulokset sekä tarkastelujakson keskiarvot.

Tehdasvertailun perusteella havaitaan, että useilla tehtailla jäähdytysveteen sitoutunut maksimilämpöteho on yli 100 kW. Kuvan 33 perusteella näin suuri teho vaatisi sulavirran olevan reilusti yli 10 l/s. Sulasyöksyssä sulan pinnan noustessa rännissä, juoksevaa sulaa jäähtyy ja jähmettyy kourumetallin pintaan. On oletettavaa, että tämä lisää hetkellisesti siirtyvää lämpötehoa. Lämpökamerakuvauksen perusteella hiilipaakkujen lämpötila voi olla yli 900 °C, eli noin sata celsiusta sulan lämpötilaa korkeampi. Myös tämä voi osaltaan selittää hetkellisiä lämpötilapiikkejä.

6.1.3 Sulakourujen lämpörasitusten vaihtelu

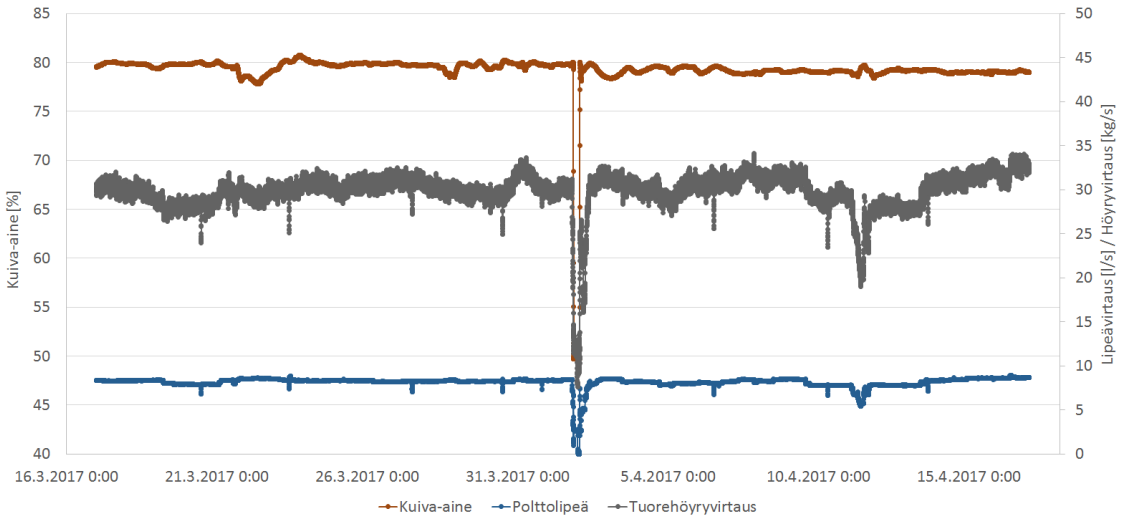
Keskiarvolaskennan perusteella saadaan käsitys sulakourujen toimintaympäristöstä ideaalissa tilanteessa. Lisäksi keskiarvolaskennan perusteella voidaan vertailla eri arvojen suhteellisia muutoksia.

Käytännössä sulavirtaus vaihtelee huomattavasti. Tässä luvussa keskitytään esittämään sularännien jäähdytysveden lämpötilanmuutoksia. Kuvassa 34 esitetään kattilan A rännien jäähdytysveden lämpötilojen vaihtelu tarkastelujakson aikana. Kuvasta havaitaan, että rännien lämpötilat ovat käyttäytyneet normaalista poikkeavasti joitakin kertoja tarkastelujakson aikana. Merkittävimmät poikkeamat ovat tapahtuneet huhtikuussa, toinen ja kuudes huhtikuuta. Lisäksi 23.3. rännin 3 lämpötila on piikannut merkittävästi.



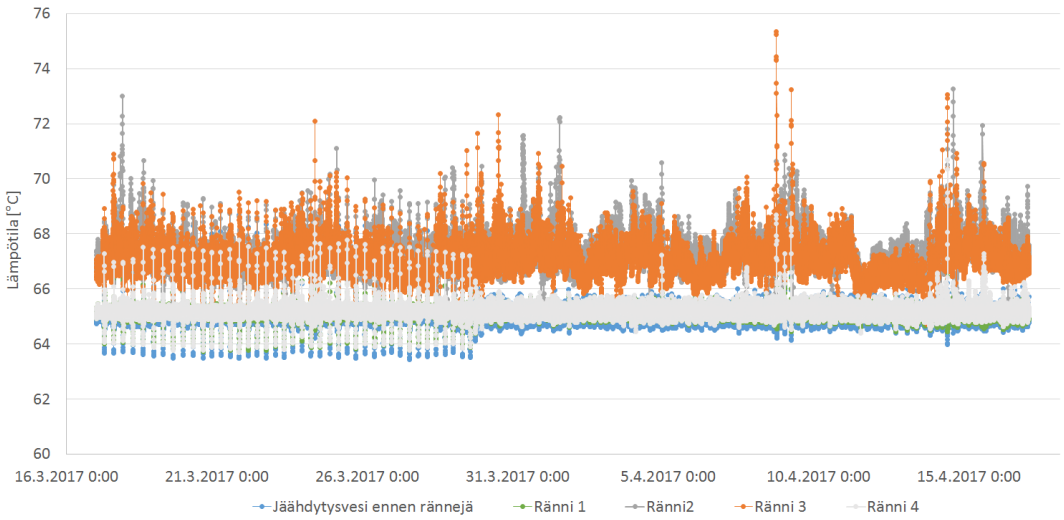
Kuva 34. Esimerkkitehtaan kattilan A jäähdytysveden lämpötilatrendi tarkastelujakson ajalta.

Kuvassa 35 esitetään kattilan toimintaparametreja tarkastelujakson ajalta. Kuvan perusteella havaitaan, että huomattavimmat poikkeamat rännien jäähdytysvesien lämpötiloissa ovat tapahtuneet samaan aikaan, kun kattilan toiminnassa on ollut muutakin normaalista poikkeavaa. Muutokset polttolipeävirtauksessa näkyvät luonnollisesti myös höyryntuotannossa.



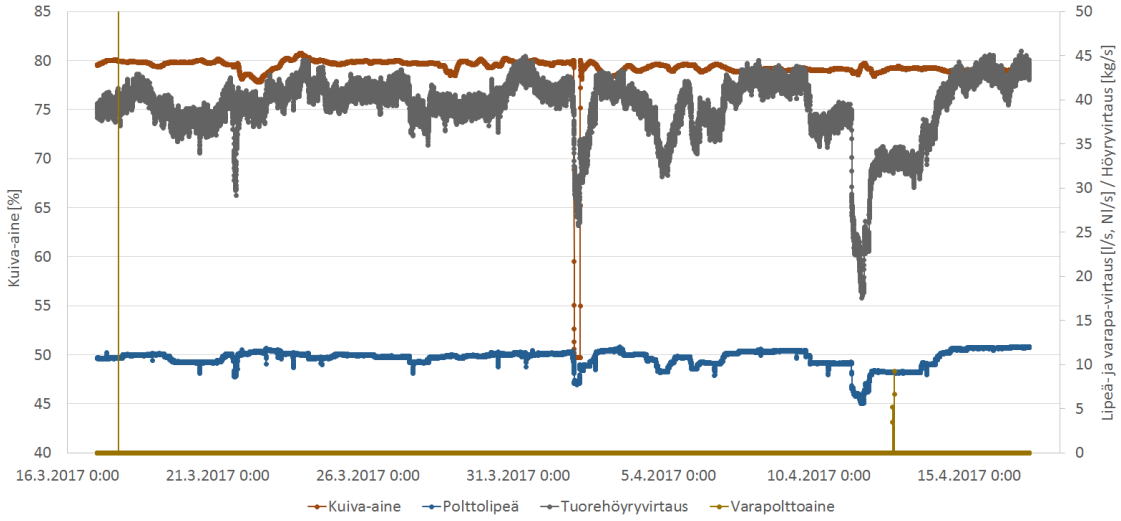
Kuva 35. Esimerkkitehtaan kattilan A toimintaparametreja esitettynä tarkastelujakson ajalta.

Esimerkkitehtaan kattilan B sulakourujen jäähdytysveden ja kattilan toiminta-arvot esitetään vastaavasti kuvissa 36 ja 37. Kuvasta 36 havaitaan, että tarkastelujakson alkupuolen ajan jäähdytysveden sisäänmenolämpötilassa on huomattavaa vaihtelua havaittavissa. Huhtikuun alun jälkeen kyseistä heilumista ei ole tapahtunut. Syynä tähän käytökseen on oletettavasti ollut jäähdytysveden lämmönvaihtimen pinnanmittauksen antama virheellinen arvo. Mittauksen kalibroinnin jälkeen ilmiö poistui. Rännien jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan keskiarvo on 65 °C, vaihtelua tapahtuu keskimäärin noin puoli astetta molempiin suuntiin. Rännien ulostulolämpötiloissa on havaittavissa useampia lämpötilapiikkejä kuin kattilalla A, toisaalta myös lämpötila-asteikon pienempi lämpötilaväli helpottaa piikkien havaitsemista.



Kuva 36. Esimerkkitehtaan kattilan B sulakourujen jäähdytysveden lämpötilatrendit tarkastelujakson ajalta.

Alla esitettyjen kattilan toimintaparametrien perusteella esiintyvät lämpötilapiikit eivät ole selvästi sidoksissa häiriö-/huoltotilanteisiin kattilalla.



Kuva 37. Esimerkkitehtaan kattilan B toimintaparametreja esitettynä tarkastelujakson ajalta.

Esimerkkitehtaan molempien kattiloiden toiminta-arvojen keskiarvot sekä minimi- ja maksimiarvot tarkastelujaksolta esitetään taulukossa 16.

Taulukko 16. Esimerkkitehtaan kattiloiden toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

		Kattila A			Kattila B		
		Keskiarvo	Min	Max	Keskiarvo	Min	Max
°C	Jäähdytysvesi ennen rännejä	59,9	48,2	64,0	65,0	63,4	68,7
l/s	Polttolipeä	8,1	0,0	8,9	10,8	5,6	12,1
%	Kuiva-aine	79,2	49,7	80,8	79,2	49,7	80,8

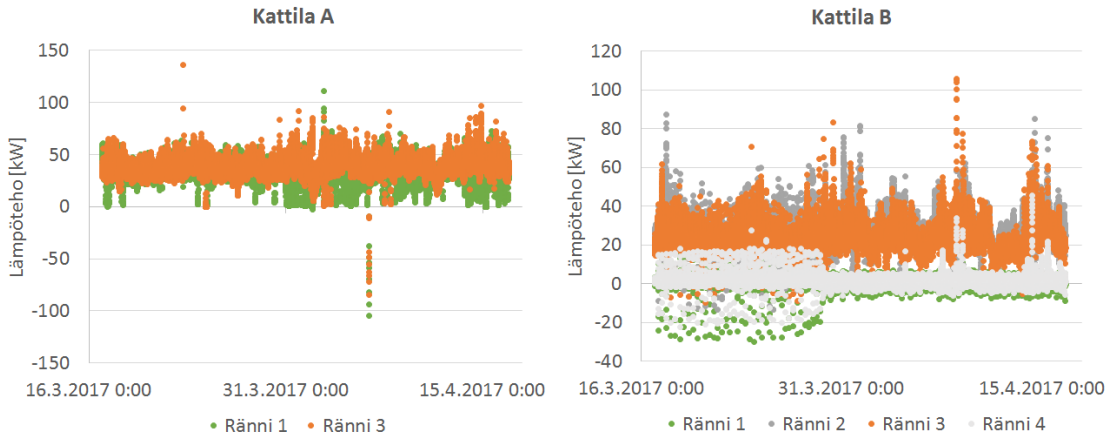
Sulakouruihin liittyvät arvot esitetään taulukossa 17.

Taulukko 17. Esimerkkitehtaan sulakourujen toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

		Kattila A		Kattila B			
		1	3	1	2	3	4
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	43,7	44,3	63,7	64,8	64,6	63,7
	k-a	62,9	63,4	65,1	67,3	67,1	65,2
	max	70,0	72,6	69,0	73,3	75,4	70,7
Lämpötilan nousu [°C]	min	-9,7	-7,7	-2,7	-1,2	-0,9	-2,0
	k-a	3,0	3,5	0,1	2,3	2,1	0,2
	max	10,4	12,4	2,6	7,6	9,3	4,1
Lämpöteho [kW]	min	-104,3	-84,3	-29,8	-13,6	-9,7	-22,4
	k-a	32,2	38,1	1,6	26,1	23,5	2,1
	max	111,3	136,1	29,3	87,4	106,0	45,4
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-67,7	-56,4	-42,2	-43,2	-38,6	-33,9
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	55,7	75,0	31,7	32,3	52,6	25,9

Taulukosta on havaittavissa, että rännien lämpötehon maksimiarvot ovat noin 3,5-kertaiset keskiarvoon verrattuna. Ulostulolämpötilat eivät kuitenkaan ole maksimiarvoillakaan lähellä kylläistä lämpötilaa, sillä esimerkkitehtaan jäähdytysvesijärjestelmä ei ole alipaineinen. Pelkästään sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja tarkastelemalla on haasteellista arvioida, kuinka suuria lämpötilaeroja rännissä virtaavassa vedessä on virtauskanavan ala- ja yläosan välillä. Oletettavaa on kuitenkin, että alaosassa vesi lämpenee korkeampaan lämpötilaan suurehkon lämpövuon johdosta. Tästä syystä tietyssä rännin kohdassa voidaan olla huomattavasti lähempänä kylläistä lämpötilaa, kuin mitä taulukon arvot antavat ymmärtää. Toisaalta sulasyöksytilanteissa sulan kosketuspinta ränniin on laajempi, jolloin lämpövuo vaikuttaa laajempaan vesimassaan.

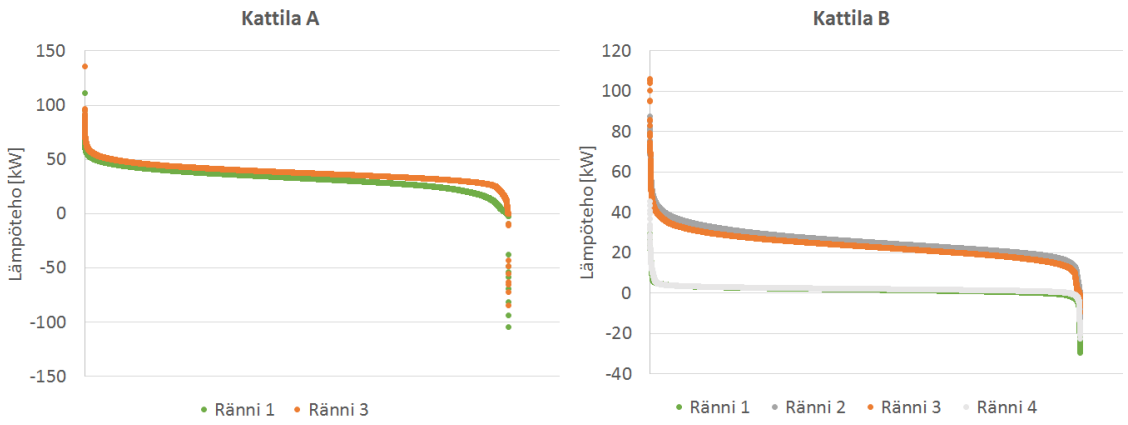
Taulukosta havaitaan, että mittaustuloksissa on joitakin epärealistisia arvoja. Lämpötilannousun minimiarvot ovat negatiivisia joka rännin osalta. Käytännössä minimiarvon pitäisi olla lähellä nollaa astetta, mikäli rännissä ei ole sulavirtausta. Kuvassa 38 esitetään jäähdytysveden sitoma lämpöteho ajan funktiona.



Kuva 38. Sularännien jäähdytysveden sitoma lämpöteho ajan funktiona.

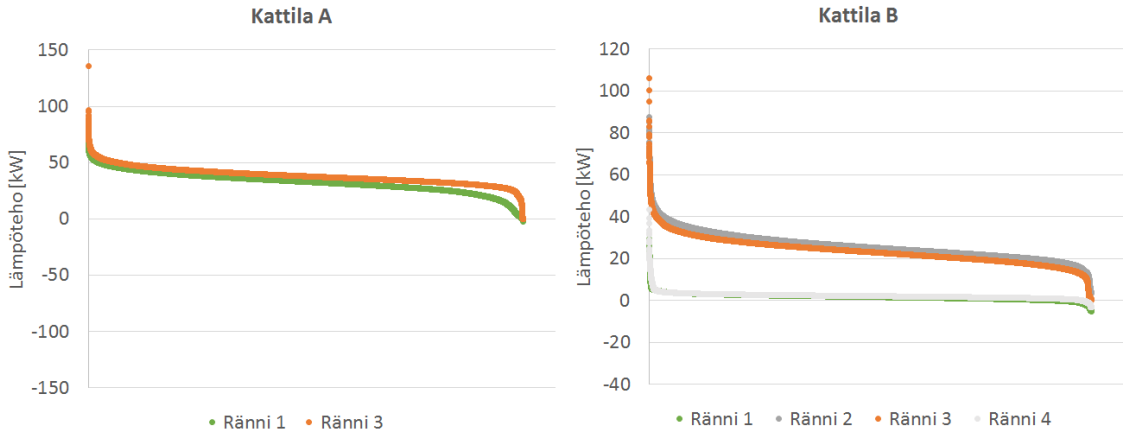
Kattilan A selkeästi negatiiviset arvot esiintyvät huhtikuun kuudentena päivänä, jolloin kuvien 34 ja 35 perusteellakin on kattilalla tehty huoltotoimenpiteitä tai ollut häiriötilanne. Kattilalla B tarkastelujakson alussa tapahtunut jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan vaihtelu selittää pääosin negatiiviset lämpötehot. Erityisesti ei-käytössä olevien rännien 1 ja 4 lämpöteho on laskennallisesti huomattavan usein negatiivinen. Mikäli lämpötilat luetaan samana ajanhetkenä ennen ja jälkeen rännin, voi negatiivisia arvoja esiintyä sisäänmenolämpötilan noustessa nopeasti. Sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja mittaavien lämpötila-antureiden välimatka aiheuttaa sen, että veden viipymä-aika mittapisteiden välillä on merkittävä. Olettamalla antureiden välimatkaksi 15 metriä ja mitoitusvirtausnopeudeksi putkilinjassa 1 m/s, olisi viipymä-aika 15 sekuntia. Lisäksi kouru jako- ja kokoojakammioineen lisää viipymäaikaa noin viidellä sekunnilla.

Kuvan 39 avulla havainnollistetaan lämpötehon vaihtelua eri ränneissä.



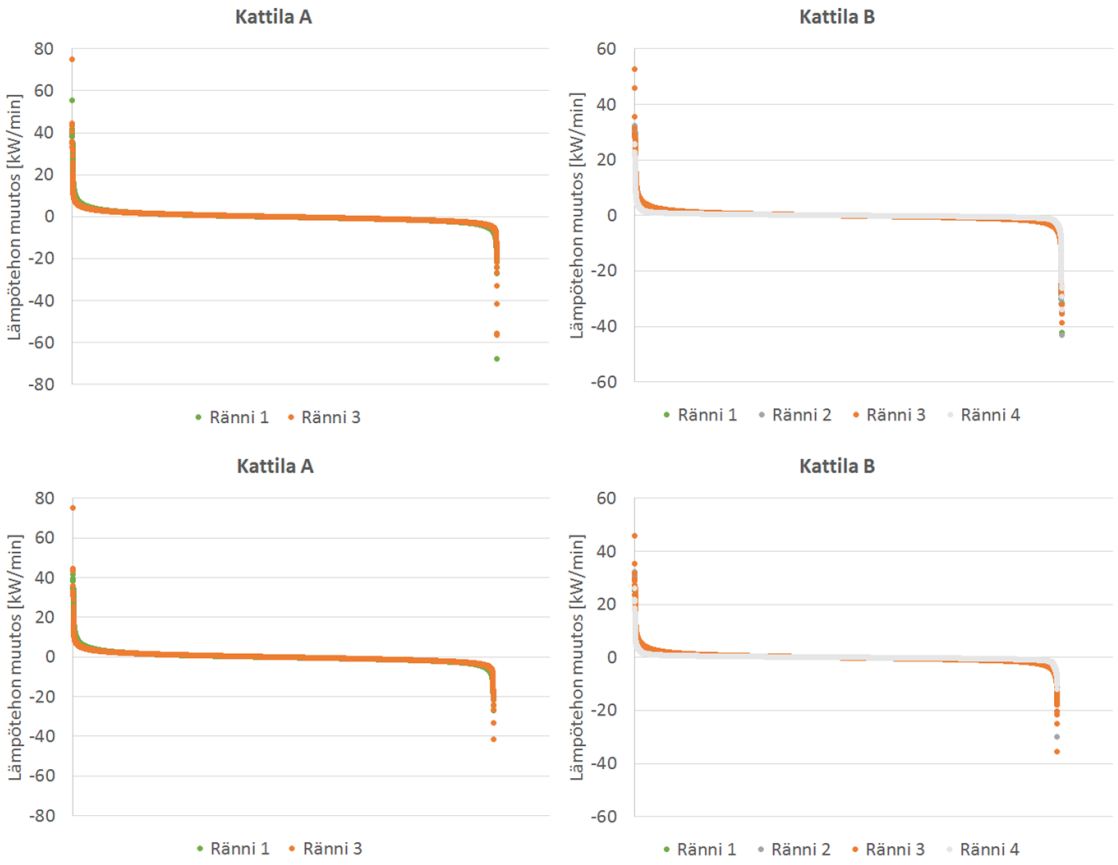
Kuva 39. Esimerkkitehtaan kattiloiden A ja B rännikohtaiset lämpötehot tarkastelujakson ajalta.

Kattilalla A negatiiviset lämpötehot selittyvät edellä mainituilla häiriöillä, sillä poistamalla tarkastelusta ajanhetket, jolloin rännien jäähdytysveden lämpötila on ollut poikkeuksellisen alhainen, poistuvat merkittävimmät negatiivisten lämpötehojen arvot. Alla esitetyssä kuvassa raja-arvona on käytetty 59 °C:a. Vastaavasti kattilalla B rajattaessa sisäänmenolämpötila välille 64−66 °C, saadaan suurin osa negatiivisista lämpötehoista poistettua.



Kuva 40. Muokatut lämpötehon pysyvyyskäyrät.

Lämpötehojen muutoksia voidaan havainnollistaa vastaavilla pysyvyyskäyrillä.



Kuva 41. Ylhäällä lämpötehon muutokset rännikohtaisesti koko tarkastelujakson ajalta, alhaalla muokatut lämpötehon muutoksen pysyvyyskäyrät. Muokkauskriteerit vastaavat kuin lämpötehoja käsiteltäessä.

Vertailemalla muokattua ja alkuperäistä lämpötehojen muutoksen pysyvyyskäyrää havaitaan, että osa ääriarvoista poistuu näillä muokkauskriteereillä. Tätä voi selittää negatiivisten lämpötehon arvojen poistuminen, jolloin suurten muutosten määrä vähenee. Kuitenkin tarkastelujaksolla on tapahtunut molemmilla kattiloilla useita muutoksia, joissa lämpöteho on noussut 20−40 kW/min, joissakin yksittäisissä tapauksissa jopa enemmän.

Eri tehtaiden rännien lämpörasitusten vertailemiseksi lämpötehon muutokset esitetään taulukoituna. Taulukkoon 18 on koottu eri suuruisten muutosten määriä rännikohtaisesti. Taulukossa esitetyt määrät on laskettu siten, että lämpötehon muutos on ollut absoluuttiarvoltaan vähintään määrätyn suuruinen. Taulukossa esitetään myös esiintymiskerrat lämpötehon suurille suhteellisille muutoksille. Vertailutehona käytetään taulukossa 17 esitettyä rännin keskimääräistä lämpötehoa tarkastelujakson ajalta.

Taulukko 18. Esimerkkitehtaan rännien lämpötehojen muutokset tarkastelujakson aikana.

Muutos vähintään		Kattila A		Kattila B			
		1	3	1	2	3	4
10	kW/min	418	169	142	259	267	121
20	kW/min	57	25	63	79	70	25
30	kW/min	18	14	7	11	7	1
40	kW/min	4	7	1	1	2	0
50	kW/min	3	3	0	0	1	0
40	%	219	58	12962	231	302	5975
50	%	109	27	9217	161	201	3754
60	%	66	21	6521	121	154	2647
80	%	26	14	3460	75	85	1754
100	%	14	7	2270	25	36	1379

Kattilan B rännien 1 ja 4 osalta suhteellisia muutoksia käsittelevä data on harhaanjohtavaa siinä mielessä, että vertailuarvona on hyvin pieni lämpöteho. Kuten edellä esitetyistä kuvistakin havaittiin, ovat erikoistilanteet kattiloilla aiheuttaneet mittaustuloksia, joiden luotettavuuteen on syytä suhtautua varauksella. Nämä hetket lisäävät taulukossa esiintyvien tehonmuutostilanteiden lukumäärää, vaikkei niillä välttämättä ole vaikutusta rännin elinikään. Taulukossa 19 esitetään muokatun datan perusteella lasketut tehonmuutostilanteet samalta ajanjaksolta.

Taulukko 19. Esimerkkitehtaan rännien lämpötehojen muutokset muokatusta datasta laskettuna tarkastelujakson ajalta.

Muutos vähintään		SK10 Kattila A		SK11 Kattila B			
		1	3	1	2	3	4
10	kW/min	406	155	52	167	177	35
20	kW/min	49	19	16	31	29	5
30	kW/min	13	9	0	3	4	0
40	kW/min	1	4	0	0	1	0
50	kW/min	0	1	0	0	0	0
40	%	210	50	12599	143	210	5620
50	%	100	21	8857	81	120	3410
60	%	58	15	6162	51	82	2319
80	%	21	9	3106	28	37	1460
100	%	9	4	1919	7	18	1126

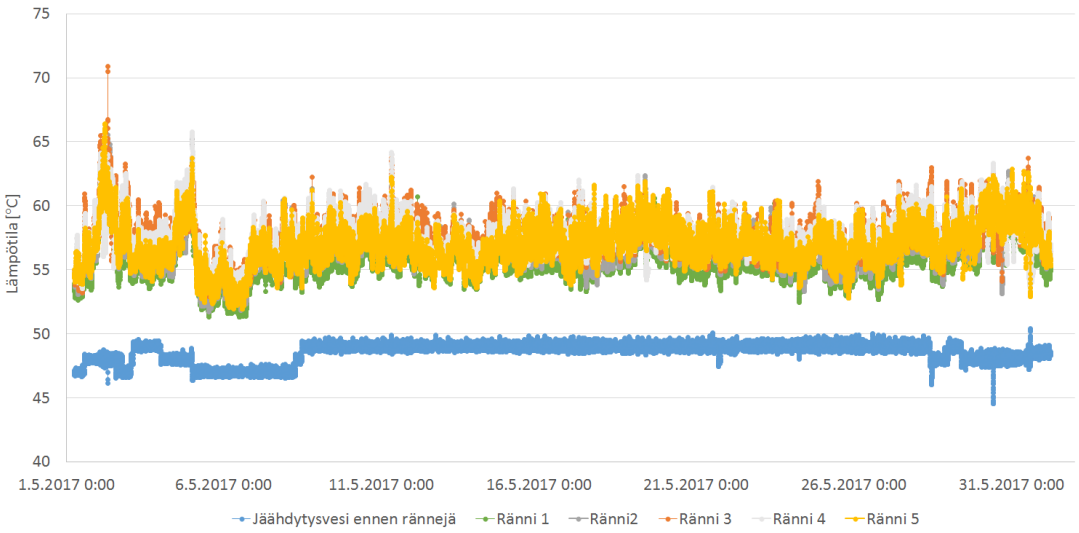
Taulukoiden perusteella on havaittavissa, että esitettyjen merkittävien lämpötehojen muutosten määrä vähenee merkittävästi käytettäessä muokattua dataa. Muokkauksen tavoitteena on poistaa mittausjärjestelmän erikoistilanteissa antama luotettavuudeltaan kyseenalainen data, jolla ei välttämättä ole yhteyttä rännin kestoaikaan.

6.2 Tehdaskohtaiset lämpörasitukset

Tässä luvussa esitetään datakyselyn perusteella hankitun rännidatan tulokset kyselyyn osallistuneiden tehtaiden osalta.

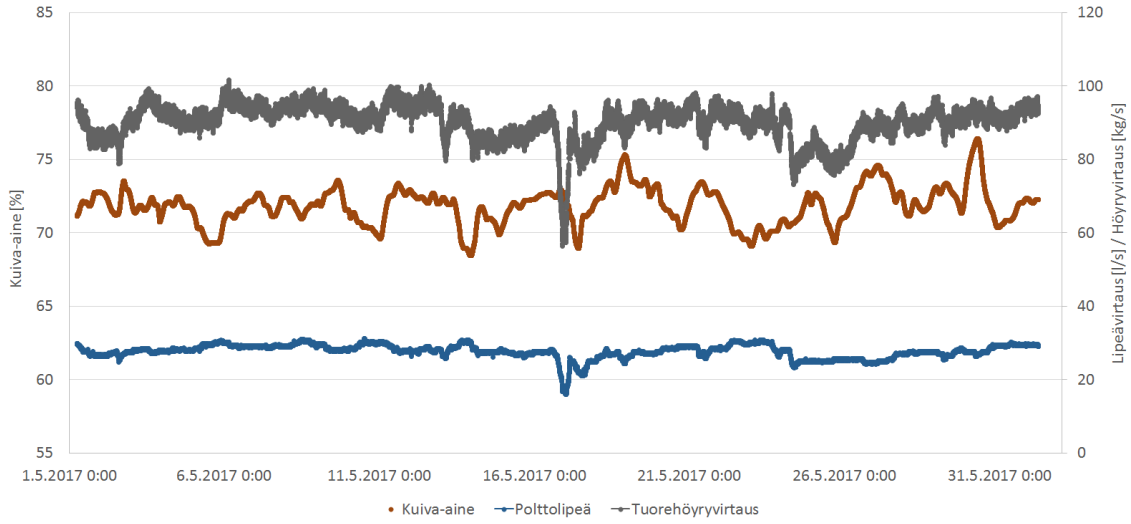
6.2.1 Tehdas A

Tehtaalla A on viisi sularänniä. Kyseisen tehtaan tarkastelujakso on 1.5.2017 klo 6:00 – 1.6.2017 klo 6:00. Tehtaan datassa on joitakin ajanhetkiä, joilta mittausdata ei ole tallentunut järjestelmään. Eniten laskentaan vaikuttava mittauspiste, jossa näitä muutaman minuutin aukkoja esiintyy, on kourujen jäähdytysveden sisäänmenolämpötila. Sisäänmenolämpötilan osalta data on täydennetty olettaen lämpötilan pysyvän lähellä edeltävän mittauksen arvoa. Koska arvoja puuttuu vain lyhyinä pätkinä, pääasiassa minuutti tai kaksi kerrallaan, ei tällä oletuksella aiheuteta oletettavasti suurta virhettä laskentaan.



Kuva 42. Tehtaan A sulakourujen jäähdytysvesien lämpötilatrendit tarkastelujaksolta.

Kuvasta havaitaan, että keskimääräinen lämpötilannousu ränneissä on huomattavasti esimerkkitehdasta suurempi. Rännissä 3 on esiintynyt yksittäinen lämpötilapiikki tarkastelujakson alussa, tämän lisäksi on havaittavissa joitakin lämpötilapiikkejä erityisesti tarkastelujakson alkupuolella. Kuvassa 43 esitetään soodakattilan toiminta-arvoja tarkastelujaksolta.



Kuva 43. Tehtaan A soodakattilan eräitä toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

Illalla 16.5. lipeänpolttoa on vähennetty, jolloin höyryntuotanto on ollut normaalia pienempää. Takaisin normaaliajossa on oltu alkuyöstä 17.5. Tätä poikkeamaa lukuun ottamatta soodakattilan toiminta tarkasteltujen parametrien osalta on ollut tasaista tarkastelujakson ajan. Täten sulakourudatan voidaan olettaa kuvaavan hyvin normaaliajossa tapahtuvia muutoksia. Tehtaan A sulakourujen toiminta-arvoja on esitetty taulukossa 20. Sulakourujen jäähdytysveden tilavuusvirran oletetaan olevan vakio läpi tarkastelujakson, arvoltaan 90 litraa/min.

Taulukko 20. Tehtaan A sularännien toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

		Ränni				
		1	2	3	4	5
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	51,3	51,7	52,5	52,4	51,9
	k-a	55,8	56,7	57,4	57,5	56,8
	max	63,8	65,7	70,9	65,7	66,4
Lämpötilan nousu [°C]	min	3,8	4,2	4,8	4,6	3,8
	k-a	7,2	8,1	8,8	8,9	8,2
	max	15,5	18,6	22,6	18,6	18,5
Lämpöteho [kW]	min	23,3	25,9	30,0	28,3	23,6
	k-a	44,8	50,3	54,8	55,3	51,1
	max	96,0	115,5	140,3	115,2	115,0
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-13,0	-14,1	-28,5	-13,0	-15,0
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	19,1	16,9	26,6	15,5	27,5

Taulukon perusteella havaitaan, että keskimääräiset lämpötehot ovat noin kaksinkertaiset verrattuna esimerkkitehtaan kattilan B vastaaviin arvoihin. Tehtaan A kourujen maksimi-lämpökuormat ovat hieman yli kaksinkertaiset keskiarvoon verrattuna, lukuun ottamatta kourua 3, jolla ero on hieman yli 2,5-kertainen. Lämpötehon maksimin ja keskiarvon suhde on siis pienempi esimerkkitehtaan arvoihin verrattuna.

Lämpötehon merkittävien muutosten lukumäärät on koottu taulukkoon 21.

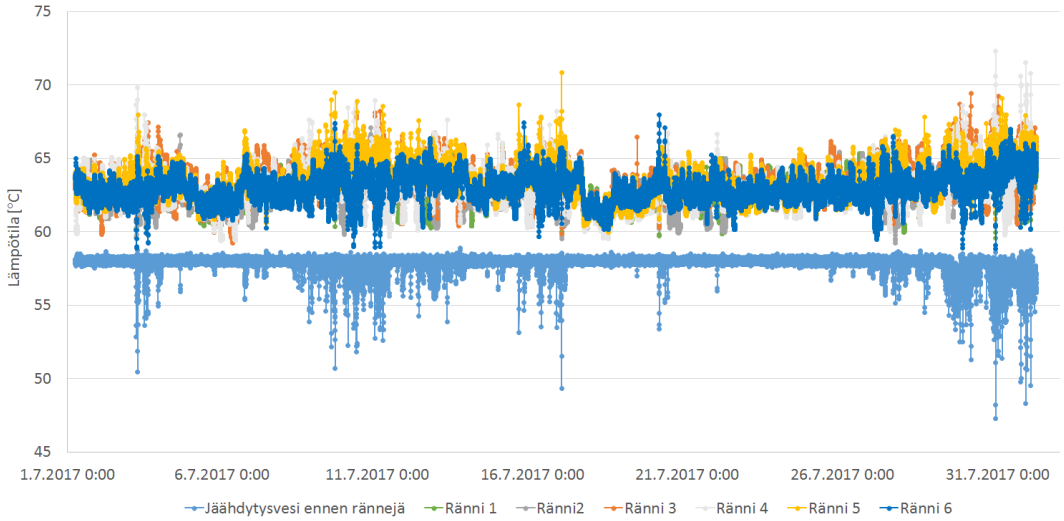
Taulukko 21. Tehtaan A sulakourujen lämpötehon merkittävät muutokset.

		Ränni				
Muutos vähintään		1	2	3	4	5
10	kW/min	50	15	89	13	58
20	kW/min	0	0	6	0	1
30	kW/min	0	0	0	0	0
40	kW/min	0	0	0	0	0
50	kW/min	0	0	0	0	0
40	%	1	0	6	0	1
50	%	0	0	1	0	1
60	%	0	0	0	0	0
80	%	0	0	0	0	0
100	%	0	0	0	0	0

Tehtaan A sularännien tehonmuutokset ovat tämän tarkastelun perusteella huomattavasti rauhallisempia tai pienempiä kuin esimerkkitehtaalla.

6.2.2 **Tehdas B**

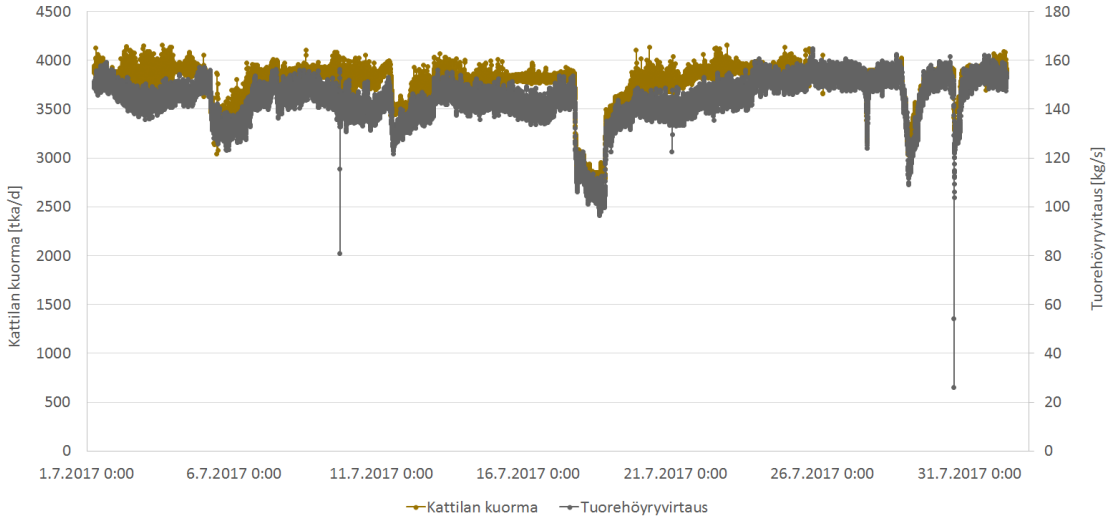
Tehtaalla B on kuusi sularänniä. Tarkastelujaksona on aikaväli 1.7.2017 klo 6:00 – 1.8.2017 klo 6:00. Tehtaan sulakourudata esitetään kuvassa 44.



Kuva 44. Tehtaan B sularännien jäähdytysvesien lämpötilojen käyttäytyminen tarkastelujakson aikana.

Kuvasta havaitaan selkeästi, että jäähdytysveden sisäänmenolämpötila on heilahdellut melko paljon. Jäähdytysveden lämpötilan vaihtelut ovat oletettavasti sidoksissa sulavirran muutoksiin, sillä kourujen ulostulolämpötiloissa on havaittavissa piikkejä samaan aikaan, kun sisäänmenolämpötilassa on nähtävissä notkahduksia. Mahdollisesti ilmiö on sidoksissa jäähdytysveden lämpötilansäädön viritykseen. Jäähdytysveden ulostulolämpötila on piikannut joitakin kertoja yli 70 °C:een.

Kuvassa 45 esitetään kattilan kuorma ja höyryntuotto tarkastelujakson ajalta.



Kuva 45. Tehtaan B soodakattilan toimintaparametreja tarkastelujakson ajalta.

Höyryntuotossa on havaittavissa kaksi terävää notkahdusta, lisäksi kuormaa on alennettu 17.7. noin vuorokauden ajaksi.

Tehtaan B sulakourujen toiminta-arvoja on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Tehtaan B sulakourujen toiminta-arvoja taulukoituna.

		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	1,90	1,90	1,79	1,78	1,80	1,70
	k-a	1,94	1,94	1,85	1,93	1,89	1,79
	max	1,99	1,97	1,90	1,98	1,93	1,85
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	59,6	59,2	59,2	59,4	60,0	58,9
	k-a	63,1	62,9	63,3	63,1	63,3	62,9
	max	66,6	67,8	69,4	72,3	70,8	68,0
Lämpötilan nousu [°C]	min	1,8	1,5	1,1	1,2	1,9	1,4
	k-a	5,2	5,0	5,5	5,2	5,5	5,1
	max	16,1	16,7	18,4	23,3	18,9	16,9
Lämpöteho [kW]	min	14,9	12,2	8,7	10,0	14,8	10,4
	k-a	42,0	40,4	41,7	41,7	43,0	37,6
	max	131,4	136,0	141,8	187,0	148,7	125,5
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-51,2	-47,6	-46,0	-65,8	-47,4	-46,2
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	52,1	53,3	54,7	61,7	61,7	51,0

Kattilan DCS-järjestelmä sisältää myös rännien jäähdytysveden virtausmittausten arvot. Niillä kattiloilla, joilla virtaustieto on ainoastaan paikallismittauksena, on oletettu vakiovirtaus koko tarkastelujakson ajalle. Tehtaan B datan perusteella virtauksen muutokset ovat keskimäärin alle 5 % keskimääräisestä virtauksesta. Lämpötehon vaihtelu ränneissä on merkittävää: rännin 4 maksimilämpöteho on 4,5-kertainen keskimääräiseen verrattuna. Muidenkin rännien osalta maksimilämpökuorma on yli 3-kertainen keskimääräiseen verrattuna.

Taulukkoon 23 on koottu tarkemmin lämpötehojen muutostilanteiden dataa.

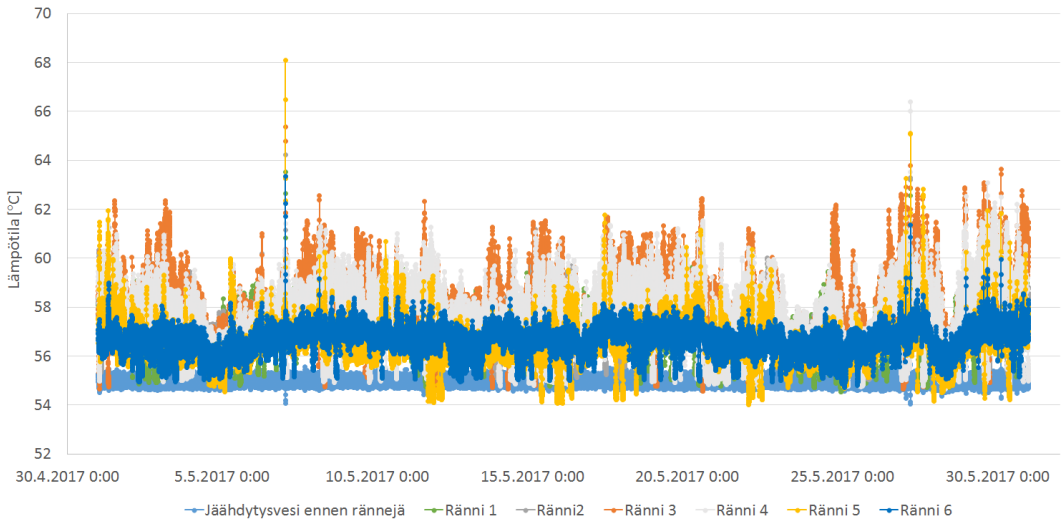
Taulukko 23. Tehtaan B lämpötehojen muutokset tarkastelujakson ajalta.

		Ränni					
Muutos vähintään		1	2	3	4	5	6
10	kW/min	452	478	482	527	454	392
20	kW/min	95	97	98	126	102	78
30	kW/min	32	30	27	44	35	19
40	kW/min	8	7	8	20	11	3
50	kW/min	2	1	1	6	2	1
40	%	150	169	151	190	133	159
50	%	84	97	86	117	87	95
60	%	51	58	46	74	54	52
80	%	24	22	19	30	22	19
100	%	6	7	5	16	5	5

Tehtaalla B on tapahtunut useita suuria muutoksia lämpötehossa.

6.2.3 **Tehdas E**

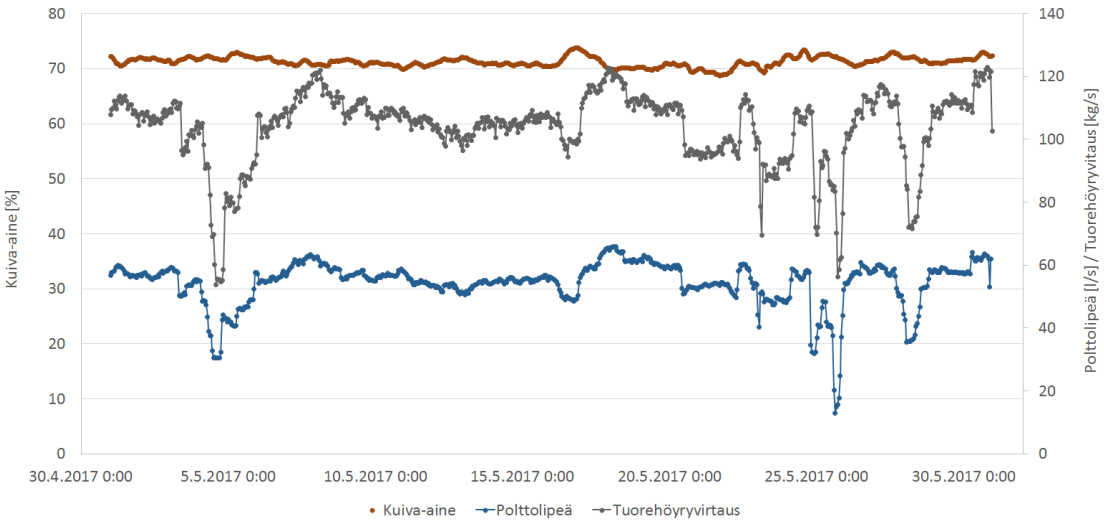
Tehtaalla E on kuusi sularänniä. Tarkastelujakso tehtaan sulakouruille on 1.5.2017 klo 0:00 – 31.5.2017 klo 0:00. Tarkastelujakson ajalta 17.5. klo 7:44 – 7:46 ja klo 7:48 – 7:50 sekä 24.5. klo 20:40 – 22:06 dataa ei ole saatavilla, joten nämä jaksot jätetään tarkastelussa huomiotta. Oletettavasti ohjelmistosyistä johtuen aina 10 000 datapisteen jälkeen esiintyy rivi, jolle ei ole tallentunut dataa. Yhteensä tarkastelujaksolla on neljä tällaista minuuttia, nämä hetket poistetaan tarkastelusta. Kourun 1 osalta data puuttuu lisäksi neljältä yksittäiseltä minuutilta, näiden minuuttien arvot täydennetään edellisen ja seuraavan mittaustuloksen keskiarvolla. Jäähdytysveden lämpötilatrendit esitetään kuvassa 46.



Kuva 46. Tehtaan E sulakourujen jäähdytysvesien lämpötilatrendit tarkastelujakson ajalta.

Lämpötiladatasta erottuu kaksi huomattavaa lämpötilapiikkiä päivinä 7. ja 27. toukokuuta. Lisäksi havaitaan, että lämpötilannousu on hyvin alhainen useana ajanhetkenä. Yleistyksenä voidaan todeta, että keskimmäisissä ränneissä lämpötilapiikit ovat merkittävämpiä.

Tehtaan E soodakattilan toiminta-arvoja on esitetty kuvassa 47.



Kuva 47. Tehtaan E soodakattilan toiminta-arvoja.

Toiminta-arvojen perusteella suurimmat lämpötilapiikit jäähdytysvedessä ovat tapahtuneet kattilan kuorman ollessa korkea. Kuormanmuutostilanteet eivät ole aiheuttaneet muista lämpötilapiikeistä erottuvia muutoksia.

Sulakourujen jäähdytysvedestä on käytössä tuntitason kokonaisvirtausdata. Tämän virtausmäärän oletetaan jakautuvan tasaisesti kaikille kouruille siten, että kunkin tunnin ajan virtauksen oletetaan säilyvän vakiosuuruisena. Tuntitason tarkkuudesta johtuen mahdolliset hetkelliset virtausvaihtelut eivät datasta erotu. Taulukkoon 24 on koottu tehtaan E kourujen toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

Taulukko 24. Tehtaan E sulakourudataa tarkastelujakson ajalta.

		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
	k-a	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
	max	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	54,5	55,0	54,6	54,7	54,0	54,7
	k-a	57,4	57,3	58,1	57,7	56,5	56,6
	max	63,5	64,2	65,4	66,4	68,1	63,3
Lämpötilan nousu [°C]	min	-0,1	0,4	-0,2	-0,1	-0,7	0,1
	k-a	2,4	2,3	3,1	2,7	1,5	1,6
	max	7,1	7,8	9,0	10,8	11,7	6,9
Lämpöteho [kW]	min	-1,3	3,9	-2,7	-0,6	-7,5	0,9
	k-a	26,1	25,6	33,9	29,9	16,9	17,9
	max	78,1	85,9	98,3	118,5	128,3	76,2
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-18,5	-18,5	-26,7	-24,4	-27,4	-16,8
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	33,9	41,9	42,6	44,7	73,5	33,3

Taulukon tietojen perusteella kouru 5 on altistunut sekä suurimmalle lämpöteholle että suurimmalle lämpötehon muutokselle. Toisaalta kourun 3 keskimääräinen lämpöteho on ollut suurin. Taulukkoon 25 on koottu tarkemmin eri kourujen kokemat merkittävät lämpörasitusten muutokset.

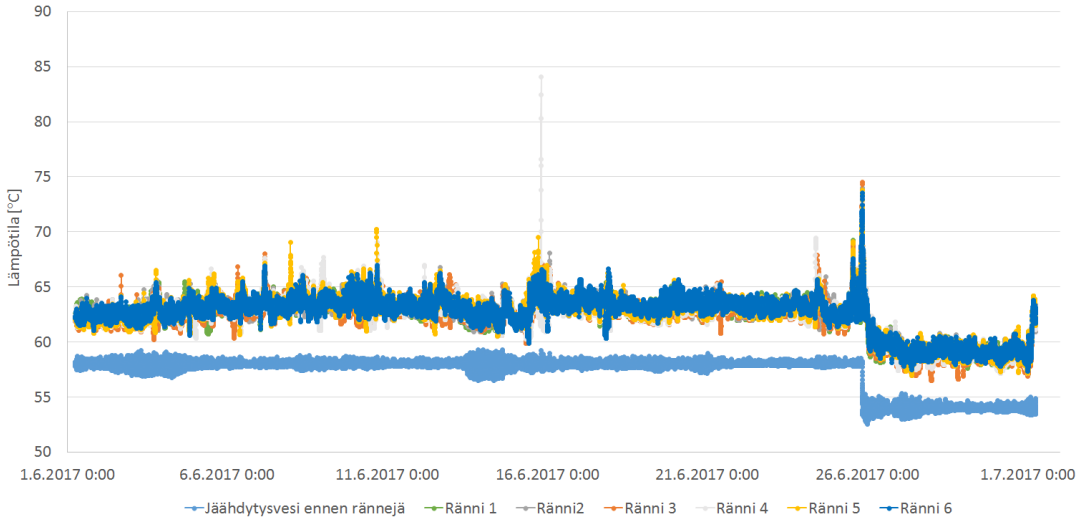
Taulukko 25. Tehtaan E kourukohtaiset lämpörasitusten muutokset tarkastelujakson ajalta.

		Ränni					
Muutos vähintään		1	2	3	4	5	6
10	kW/min	156	53	150	419	103	19
20	kW/min	3	4	19	46	23	1
30	kW/min	1	1	3	7	4	1
40	kW/min	0	1	1	1	2	0
50	kW/min	0	0	0	0	1	0
40	%	140	50	68	276	252	53
50	%	48	25	41	148	150	25
60	%	16	13	19	79	99	18
80	%	3	4	3	20	50	10
100	%	1	2	2	7	35	3

Näiden tietojen perusteella kourut 4 ja 5 ovat altistuneet suurimmalle määrälle lämpörasituksen muutoksia.

6.2.4 Tehdas K

Tehtaalla K on kuusi sularänniä. Tarkastelujakso tehtaan sulakouruille on 1.6.2017 klo 06:00 – 1.7.2017 klo 05:59. Sularännien toiminta-arvot esitetään kuvassa 48.



Kuva 48. Tehtaan K sularännien jäähdytysvesien lämpötilatrendit tarkastelujakson ajalta.

Tarkastelujakson aikana kourun numero 4 lämpötila on piikannut rajusti 19.5.2017 hieman klo 19 jälkeen. Toinen suuri lämpötilapiikki ilmenee tarkastelujakson loppupuolella samaan

aikaan, kun jäähdytysveden sisäänmenolämpötilaa on alennettu. Kuvassa 49 esitetään eräitä kattilan toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.



Kuva 49. Tehtaan K soodakattilan toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

Kuvasta havaitaan, että rännin 4 lämpötilapiikki on tapahtunut tehonnostotilanteessa suunnilleen samaan aikaan, kun on saavutettu tavoitekuorma. Myös 25.6. tapahtunut usean rännin lämpötilan piikkaaminen on tapahtunut kuormaa nostettaessa, tässä tapauksessa suunnilleen kuorman noston puolivälissä.

Tehtaan K sulakourujen eri toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta esitetään taulukossa 26.

Taulukko 26. Tehtaan K sularännien toiminta-arvoja tarkastelujaksolta.

		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	1,48	1,48	1,35	0,43	1,35	1,45
	k-a	1,78	1,79	1,65	1,76	1,62	1,76
	max	1,82	1,84	1,72	1,82	1,68	1,85
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	57,1	57,4	56,5	57,0	57,0	57,4
	k-a	62,3	62,3	62,2	62,3	62,4	62,5
	max	73,2	74,0	74,5	84,1	73,8	73,5
Lämpötilan nousu [°C]	min	2,5	2,6	1,7	1,8	2,4	1,9
	k-a	5,0	5,0	4,9	5,0	5,2	5,2
	max	15,4	16,2	16,6	26,6	16,1	16,2
Lämpöteho [kW]	min	18,8	19,4	11,7	13,5	16,1	13,9
	k-a	36,7	37,2	33,3	36,7	34,5	37,9
	max	100,7	108,1	101,1	122,7	98,4	105,1
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-7,3	-17,2	-12,8	-45,4	-8,7	-9,2
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	14,2	16,8	20,6	55,4	14,3	14,7

Jäähdytysveden virtauksessa on havaittavissa suurehkoja vaihteluja tarkastelujakson aikana, kourun 4 minimivirtaus on erittäin alhainen. Virtauksen minimiarvot kourussa 4 esiintyvät edellä esitetyn lämpötilapiikin kohdalla. Tämän datan perusteella vakiovirtauksen oletus niille tehtaille, joiden rännikohtaiset jäähdytysveden virtausmäärät eivät ole saatavissa, aiheuttaisi merkittävän virhetekijän laskentaan. Maksimilämpötilan ollessa 84 °C ja virtauksen laskiessa alle kolmasosaan keskimääräisestä, on jäähdytysvedessä saattanut tapahtua höyrystymistä. Kylläisen tilan lämpötilaa 84 °C vastaava absoluuttipaine on 0,56 bar. Maksimilämpötehot ovat noin kolminkertaisia keskimääräisiin tehoihin verrattuna, rännillä 4 noin 3,3-kertainen.

Taulukkoon 27 on koottu vertailua varten lämpötehon merkittävät absoluutti- ja suhteelliset muutokset tarkastelujakson ajalta.

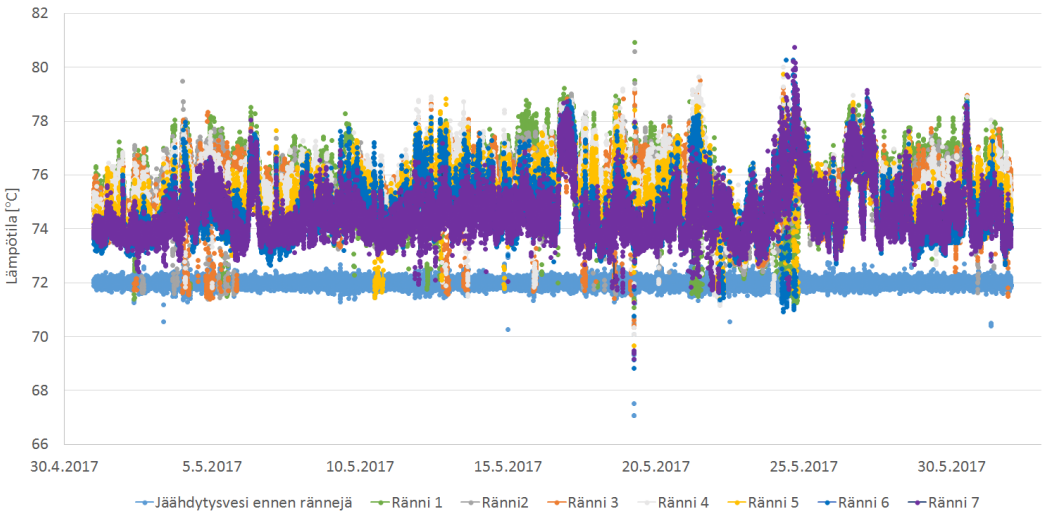
Taulukko 27. Tehtaan K merkittävät lämpötehonmuutokset sulakouruissa.

Muutos vähintään		Ränni 1	2	3	4	5	6
10	kW/min	62	74	56	86	55	79
20	kW/min	0	0	1	6	0	0
30	kW/min	0	0	0	3	0	0
40	kW/min	0	0	0	2	0	0
50	kW/min	0	0	0	1	0	0
40	%	0	3	6	11	4	0
50	%	0	0	3	6	0	0
60	%	0	0	1	4	0	0
80	%	0	0	0	3	0	0
100	%	0	0	0	2	0	0

Kouru 4 on selkeästi altistunut suurimmille lämpötehon muutoksille, toisaalta dataa tarkastelemalla havaitaan, että jokainen muutosnopeudeltaan yli 20 kW/min ajanhetki liittyy 15.6. tapahtuneeseen lämpötilan piikkaamiseen.

6.2.5 **Tehdas L**

Tehtaalla L on seitsemän sulakourua. Tehtaan tarkastelujakso on 30.4.2017 klo 23:59 – 1.6.2017 klo 0:00. Tehtaan datassa aikavälit vaihtelevat tallennettujen tietojen välillä, mikä hankaloittaa lämpörasitusten luotettavaa laskentaa. Kuvassa 50 esitetään jäähdytysveden lämpötilatrendit kourukohtaisesti.



Kuva 50. Tehtaan L rännikohtaiset jäähdytysveden lämpötilat tarkastelujakson ajalta.

Tehtaan L jäähdytysveden sisäänmenolämpötila on tarkastelun korkeimpia. Tästä syystä tehtaalla pääsee ulostulolämpötila nousemaan joitakin kertoja yli 80 °C:n. Lisäksi on havaittavissa jonkin verran tukkeutumisia. Vaihtelevan mittausten tallennusvälin johdosta tehtaalta ei pystytä luotettavasti laskemaan lämpötehojen muutoksia. Mittausten väliset ajat olivat pisimmillään noin 10 minuuttia, joten lämpötehojen muutoksia ei taulukoitu.

Alla esitetään sulakourujen toiminta-arvoja tarkastelujakson ajalta.

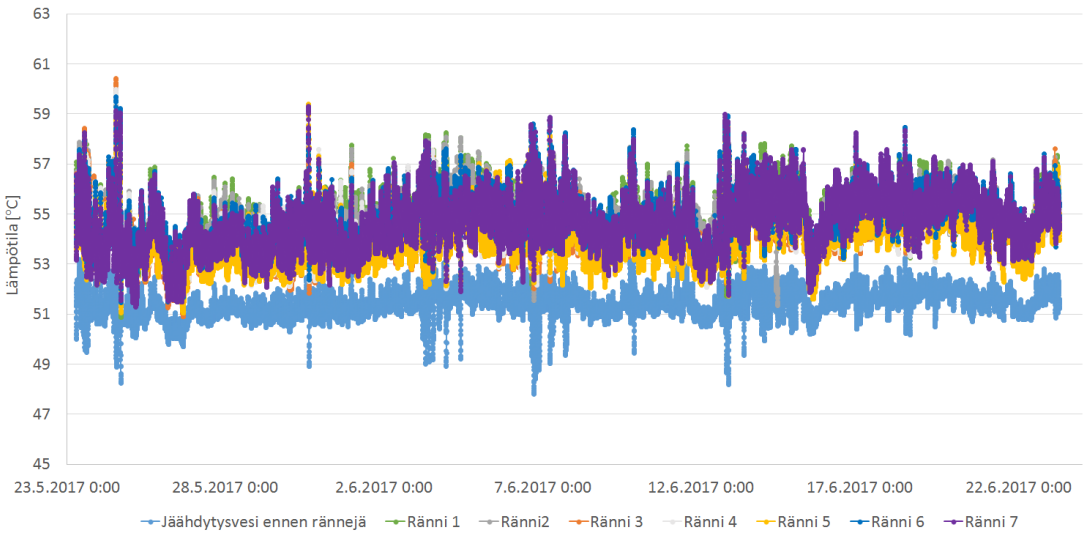
Taulukko 28. Tehtaan L sulakourujen arvoja taulukoituna tarkastelujaksolta.

		Ränni						
		1	2	3	4	5	6	7
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	2,85	2,76	2,79	2,68	2,83	2,74	2,75
	k-a	2,91	2,81	2,84	2,76	2,87	2,79	2,81
	max	2,94	2,85	2,89	2,79	2,91	2,82	2,85
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	71,1	70,5	70,3	70,1	69,4	68,8	69,2
	k-a	75,6	75,5	75,4	75,5	75,2	74,8	74,6
	max	80,9	80,6	79,5	80,0	79,7	80,3	80,7
Lämpötilan nousu [°C]	min	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-1,1	-1,7	-1,7
	k-a	3,6	3,5	3,4	3,5	3,2	2,8	2,6
	max	7,7	7,4	7,5	7,9	7,6	8,4	8,9
Lämpöteho [kW]	min	-9,2	-8,3	-8,4	-8,7	-12,8	-19,5	-20,0
	k-a	43,8	40,6	40,0	40,3	38,5	32,6	30,2
	max	92,9	86,1	88,2	90,7	90,6	96,4	103,3

Taulukon 28 perusteella havaitaan, että virtauksen vaihtelut ovat olleet hyvin pieniä. Koska mittausten aikavälit vaihtelivat, laskettiin lämpötilan nousut sekä lämpötehot käyttäen jäähdytysveden virtauksen keskiarvoa ja keskiarvoistamalla jäähdytysveden sisäänmenolämpötila. Sisään menevän jäähdytysveden keskiarvoistus saattaa osaltaan selittää miksi lämpötilan nousujen ja lämpötehojen minimiarvot ovat negatiivisia. Keskiarvoistus tehtiin noin 15 minuutin ajalta liukuvana keskiarvona.

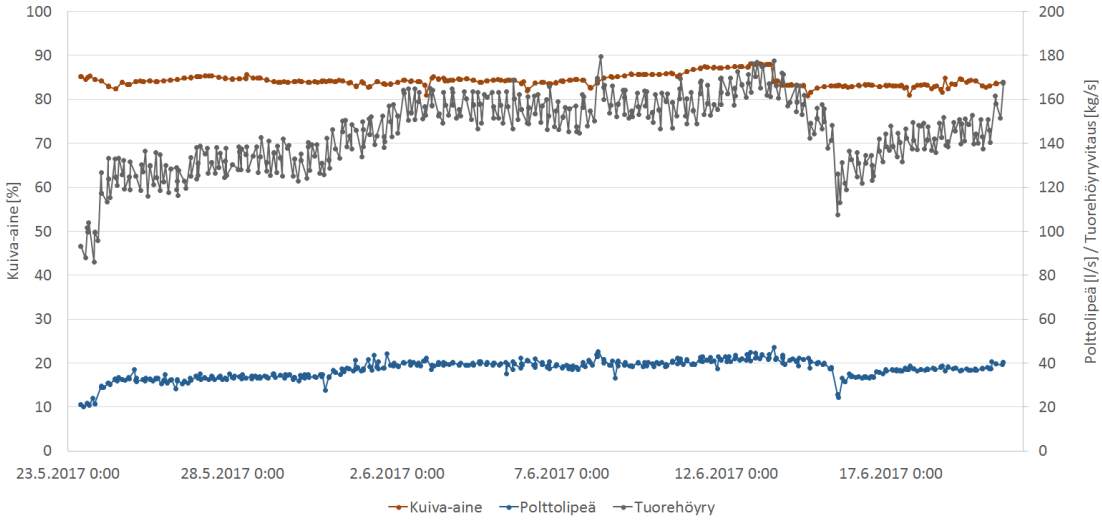
6.2.6 **Tehdas M**

Tehtaalla M on seitsemän sulakourua. Tarkastelujakso tehtaan sulakourujärjestelmälle on 23.5.2017 klo 7:00 – 23.6.2017 klo 6:59. Kuvassa 51 esitetään lämpötilakäyttäytyminen kourukohtaisesti.



Kuva 51. Tehtaan M jäähdytysveden lämpötilat kourukohtaisesti tarkastelujakson ajalta.

Mittausdatan perusteella lämpötilapiikkejä, joissa lämpötila nousee noin 4 astetta normaalia korkeammalle, esiintyy, mutta ne ovat melko rauhallisia. Kuvaan 52 on koottu kattilan toimintaparametreja tarkastelujaksolta.



Kuva 52. Tehtaan M soodakattilan toiminta-arvoja tarkastelujaksolta.

Tarkastelujakson alussa kuormaa on nostettu ja tämän jälkeen esiintyy kyseisen tehtaan suurin lämpötilapiikki. Lämpötilapiikki esiintyy kuitenkin vasta noin 12 tuntia kuorman noston jälkeen.

Tehtaan M sulakourujen toiminta-arvoja tarkastelujaksolta esitetään taulukossa 29.

Taulukko 29. Tehtaan M sulakourujen arvoja taulukoituna tarkastelujaksolta.

		Ränni						
		1	2	3	4	5	6	7
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	1,97	2,05	2,37	2,36	2,43	2,37	2,36
	k-a	2,01	2,09	2,42	2,41	2,48	2,42	2,41
	max	2,03	2,12	2,45	2,44	3,00	2,47	2,45
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	50,9	51,2	50,9	51,1	51,0	51,5	51,3
	k-a	54,7	54,6	54,1	54,2	54,0	54,8	54,6
	max	59,3	60,1	60,4	60,0	59,4	59,7	59,3
Lämpötilan nousu [°C]	min	1,5	0,3	1,1	1,4	1,3	1,5	1,2
	k-a	3,3	3,2	2,7	2,8	2,6	3,4	3,2
	max	5,7	6,6	6,6	6,0	6,3	7,3	7,4
Lämpöteho [kW]	min	12,5	2,9	10,8	13,7	13,0	15,5	11,8
	k-a	27,1	28,0	27,5	27,8	26,7	33,8	31,7
	max	47,4	57,2	64,8	59,4	64,5	72,6	74,0
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-5,4	-8,2	-7,6	-7,2	-8,3	-7,2	-11,0
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	10,7	11,8	10,5	13,6	13,0	16,9	18,6

Maksimilämpöteho on ollut noin 2,4-kertainen keksimääräiseen lämpötehoon verrattuna, osassa kouruista kyseinen suhdeluku on ollut vain hieman yli 2. Merkittävien lämpötehon muutosten määrät on esitetty taulukossa 30.

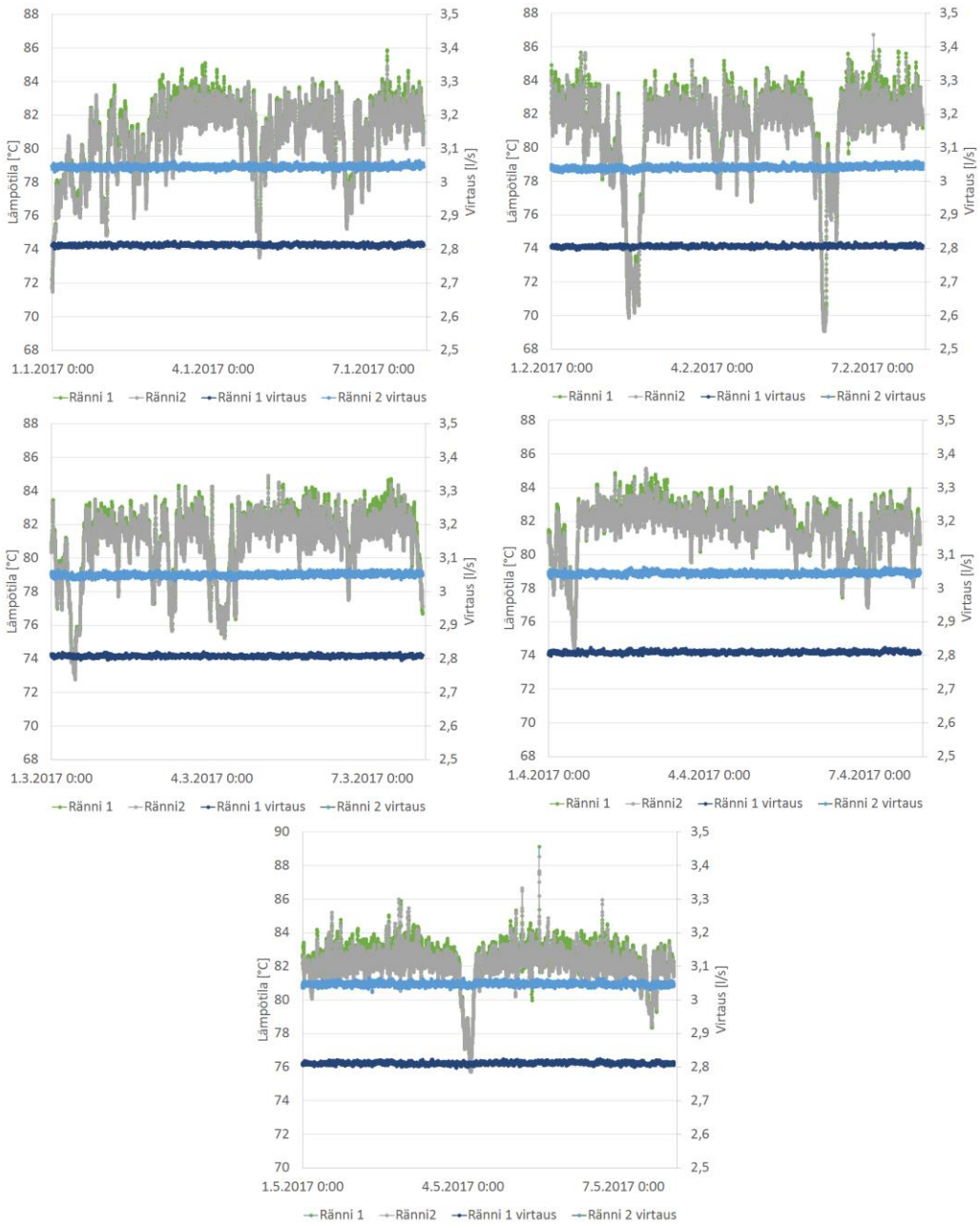
Taulukko 30. Tehtaan M merkittävät lämpötehonmuutokset tarkastelujakson ajalta.

		Ränni						
Muutos vähintään		1	2	3	4	5	6	7
10	kW/min	1	5	4	11	15	16	22
20	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
30	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
40	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
50	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
40	%	0	1	0	4	9	4	4
50	%	0	0	0	0	0	0	1
60	%	0	0	0	0	0	0	0
80	%	0	0	0	0	0	0	0
100	%	0	0	0	0	0	0	0

Tietojen perusteella toisen laidan kourut altistuvat enemmän lämpörasitusten muutoksille, kuitenkaan yksikään kouruista ei ole tarkastelujaksolla kokenut erityisen suuria nopeita lämpötehon muutoksia.

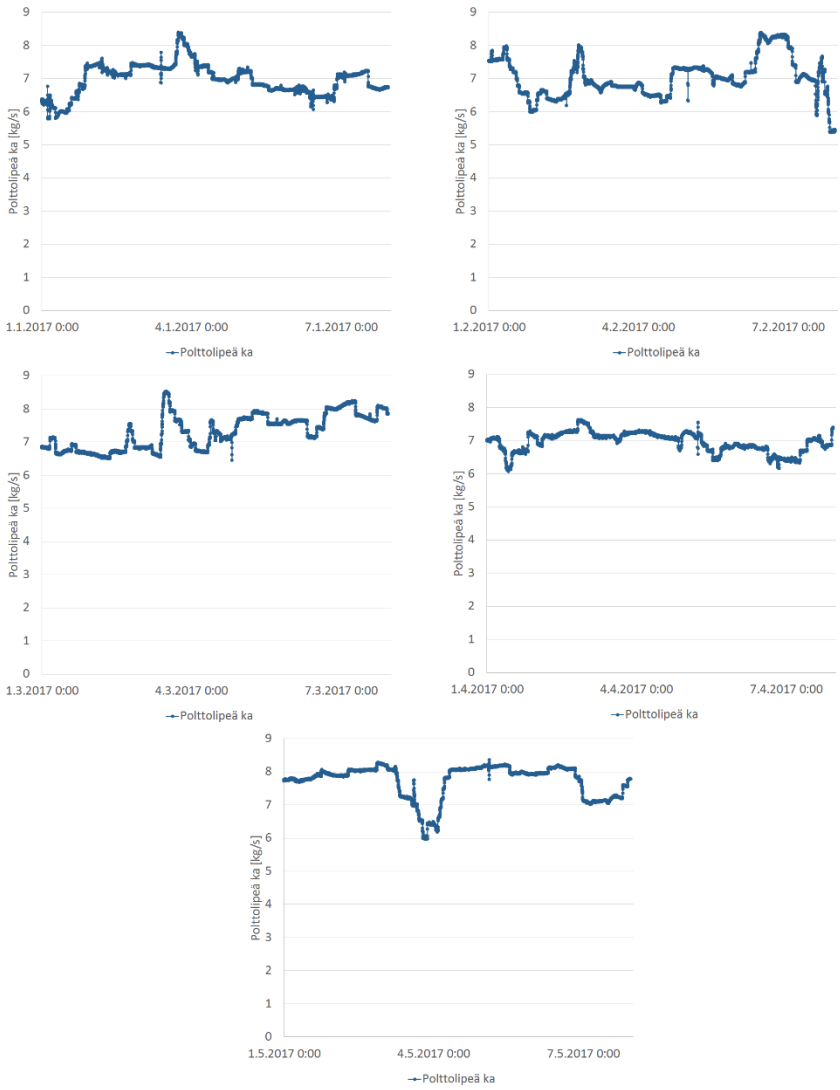
6.2.7 **Tehdas N**

Tehtaalla N on kaksi sulakourua. Tehtaan kourujen tarkastelujaksot ovat 1.1.2017 klo 0:00 – 7.1.2017 klo 22:39, 1.2.2017 klo 0:00 – 7.2.2017 klo 22:39, 1.3.2017 klo 0:00 – 7.3.2017 klo 22:39, 1.4.2017 klo 0:00 – 7.4.2017 klo 22:39 ja 1.5.2017 klo 0:00 – 7.5.2017 klo 22:39. Tehtaan sulakourujärjestelmästä on lämpötilatiedot ainoastaan kourun jälkeen, joten lämpötehojen laskenta ei ole mahdollista. Sulakourujen jäähdytysveden virtausmäärät ovat käytettävissä. Kuvassa 53 esitetään jäähdytysveden lämpötilat ja virtaukset tarkastelujaksoilta.



Kuva 53. Tehtaan N kourujen jäähdytysvesitrendit tarkastelujaksojen ajalta.

Datan perusteella lämpötiloissa on tapahtunut useita notkahduksia. Toukokuun jaksolla on havaittavissa selkeä lämpötilapiikki molemmissa kouruissa. Virtausmäärät pysyvät lähes vakioina läpi jaksojen, huomattavaa kuitenkin on, että rännin 2 virtausmäärä on datan perusteella noin 9 % suurempi. Kuvassa 54 esitetään polttolipeämäärät tarkastelujaksoina.



Kuva 54. Polttolipeämäärät tehtaalla N tarkastelujaksojen aikana.

Kourujen sisäänmenolämpötilojen puute hankaloittaa kattilan kuorman ja rännien lämpötilannousujen vertailua, sillä on mahdollista, että lämpötilan notkahduksissa myös sisäänmenolämpötila on ollut alempi.

Taulukkoon 31 on koottu tehtaan N rännien toiminta-arvoja.

Taulukko 31. Tehtaan N sulakourujen toiminta-arvoja tarkastelujaksojen ajalta.

		Ränni	
		1	2
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	2,80	3,02
	k-a	2,81	3,05
	max	2,83	3,07
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	69,3	69,1
	k-a	81,5	81,2
	max	89,1	88,5

Tietojen perusteella virtaus pysyy hyvin vakaana, lämpötiloissa sen sijaan on huomattavia vaihteluita. Kuten aiemmin mainittiin, tarkemman analyysin tekeminen vaatisi lämpötiladatan jäähdytysvedestä ennen kouruja.

6.3 Eri tehtaiden lämpörasitusten vertailu

Liitteeseen VI on koottu edellisessä luvussa esitetyt lämpötehon muutokset helpommin vertailtavaan muotoon. Taulukoissa esitetään eri tehtailla tapahtuneet tietyn suuruiset tehonmuutokset.

Sularännin tukkeutumisen jälkeinen avaaminen aiheuttaa aina kourumateriaalin lämpötilassa nopean ja voimakkaan muutoksen. Kourun tukkeutuminen voidaan havaita alentuneesta jäähdytysveteen sitoutuneesta lämpötehosta. Raja-arvona tukkeutuneelle kourulle on käytetty lämpötehoa 5 kW. Kun jäähdytysveteen siirtynyt lämpöteho laskee alle 5 kW:n, oletetaan kourun olevan tukkeutunut. Aikaväli, jolloin ränniin siirtynyt teho säilyy yhtäjaksoisesti alle 5 kW:n, lasketaan yhdeksi tukkeutumiskerraksi. Eri tehtaiden kourujen tukkeutumiskertojen määrät on koottu taulukkoon 32.

Taulukko 32. Kourukohtaiset tukkeutumiskerrat eri tehtailla.

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	0	0	0	0	0	0	
Tehdas A	0	0	0	0	0		
Tehdas E	78	28	20	159	130	107	
Tehdas H1	69		8				
Tehdas H2	251	57	48	211			
Tehdas K	0	0	0	0	0	0	
Tehdas M	0	3	0	0	0	0	0
Tehdas H2, 2016	131	90	84	120			

Esimerkkitehtaan kattila A on taulukossa Tehdas H1 ja kattila B Tehdas H2. On havaittavissa, että tukkeutumiskertojen määriä vertailtaessa esimerkkitehdas on tehtaan E kanssa ainoita, joilla ränneissä on tapahtunut tukkeutumisia tällä kriteerillä tarkastellen. Kattilan B kourujen 1 ja 4 tukkeutumiskerrat ovat oletettavasti harhaanjohtavia, sillä esimerkiksi jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan vaihtelut voivat aiheuttaa sen, että jonain hetkenä lämpöteho nousee yli 5 kW:n.

Lämpötehon muutosten ja tukkeutumiskertojen arvoista voidaan laskea kourukohtainen kokonaisrasitus yhtälöllä

$$\dot{q}_{\mathrm{tot}} = a \cdot \dot{q}_{10} + b \cdot \dot{q}_{20} + c \cdot \dot{q}_{30} + d \cdot \dot{q}_{40} + e \cdot \dot{q}_{50} + f \cdot x_{\mathrm{tukk}} \tag{30}$$

missä

$\dot{q}_{\mathrm{tot}}$	kokonaisrasitus
$\dot{q}_{10}$	kerrat, jolloin lämpötehon muutos yli 10 kW/min
$\dot{q}_{20}$	kerrat, jolloin lämpötehon muutos yli 20 kW/min
$\dot{q}_{30}$	kerrat, jolloin lämpötehon muutos yli 30 kW/min
$\dot{q}_{40}$	kerrat, jolloin lämpötehon muutos yli 40 kW/min
$\dot{q}_{50}$	kerrat, jolloin lämpötehon muutos yli 50 kW/min
x_{tukk}	tukkeutumiskertojen määrä
a	merkitsevyystermi, nyt 1
b	merkitsevyystermi, nyt 2
c	merkitsevyystermi, nyt 3

d merkitsevyystermi, nyt 4

e merkitsevyystermi, nyt 5

f merkitsevyystermi, nyt 5

Merkitsevyystermit ovat hypoteettisia arvoja. Lämpörasitusten osalta nyt oletetaan, että viisi 10 kW/min muutosta vastaa yhtä 50 kW/min muutosta. Esimerkkitehtaan kattilan A rännille 1 kokonaisrasitus näin laskien on

$$\dot{q}_{\mathrm{tot}} = 1 \cdot 418 + 2 \cdot 57 + 3 \cdot 18 + 4 \cdot 4 + 5 \cdot 3 + 5 \cdot 69 = 962.$$

Taulukkoon 33 on koottu tarkasteltujen tehtaiden kokonaisrasitukset tarkastelujaksojen ajalta. Lisäksi taulukossa esitetään laskennallinen kokonaisrasitus esimerkkitehtaan kattilan B yhden kuukauden ajojaksolle vuodelta 2016.

Taulukko 33. Eri tehtaiden laskennalliset kokonaislämpörasitukset.

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	780	795	796	1021	817	622	
Tehdas A	50	15	101	13	60		
Tehdas E	555	208	301	1331	824	559	
Tehdas H1	962		344				
Tehdas H2	1548	739	681	1229			
Tehdas K	62	74	58	120	55	79	
Tehdas M	1	20	4	11	15	16	22
Tehdas H2, 2016	1285	1202	963	958			

Laskennan perusteella eri tehtaiden rännien rasituksissa on erittäin suuria eroja. Esimerkkitehtaan kattilan B (taulukossa Tehdas H2) kourujen 1 ja 4 rasitukset aiheutuvat pääasiassa suuresta laskennallisesta tukkeutumiskertamäärästä. Käytännössä rännit ovat lähes koko ajan tukossa, mutta tarkastelujakson alussa tapahtunut jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan nopea vaihtelu aikaansaa sen, että laskennallisesti ränni olisi tukkeutunut ja auennut useita kertoja. Taulukon perusteella vuoden 2016 tarkastelujakson kokonaisrasitus olisi ollut noin 1,5-kertainen tämän vuoden tarkastelujaksoon verrattuna.

Tarkastelun perusteella tehtailla B, E ja H sulakourut altistuvat huomattavasti suuremmalle määrälle lämpökuorman vaihteluita kuin muilla tarkastelun tehtailla. Huomioitavaa on, että

tämän laskentatavan lisäksi on tarkasteltava mahdolliset erityistilanteet, esimerkiksi virtaushäiriöistä johtuvat kiehumistilanteet, erikseen. Näiden tilanteiden tarkastelussa kourukohtaiset virtausmittaukset ja lämpötilatrendit ovat tärkeässä roolissa. Kyseisiä tilanteita käsiteltiin tarkemmin tehdaskohtaisesti aiemmissa luvuissa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä laskettuja lämpörasitusten muutoksia sularänneissä voidaan hyödyntää sulakourujen kunnon ennustamisessa. Seuraavana vaiheena tulosten hyödyntämisessä on vertailla laskettuja kokonaislämpörasituksia ajosta poistettavien kourujen kuntoon. Mikäli säröilyä on havaittavissa eniten laskennallisesti kovimmalle rasitukselle joutuneessa kourussa, voidaan todeta, että ainakin tehdastasolla kokonaisrasitusten seuranta antaa lisäinformaatiota rännien kunnon ennustamiseen.

Koska jokainen tehdas on yksilö ja rännimateriaalit eroavat tehtailla toisistaan, on kiinnitettävä huomiota siihen, kuinka hyvin eri tehtaiden laskennalliset lämpörasitukset korreloivat keskenään. Tätäkin arvioitaessa käytettyjen kourujen kunnon arviointi vaihdon yhteydessä antaa arvokasta lisäinformaatiota. Samalla voidaan tarkastaa, vaikuttaako tukkeutumismäärä mahdollisen säröilyn sijaintiin. Oletuksena useasti tukkeutuneen rännin säröt sijaitsisivat pohjalla.

Saatavien tulosten myötä on harkittava, että riittääkö kuukauden pituinen ajojakso antamaan kokonaiskuvan ränneihin kohdistuvista rasituksista. Erityisesti kouruongelmista kärsivillä tehtailla voisi olla hyödyllistä seurata lämpörasituksia kuukausittain.

Veden lämpötilaprofiilin tarkempi selvittäminen erityisesti kerran läpi virtaavissa kouruissa olisi mielenkiintoinen tarkennuskohde. Erityisesti paikallisen kiehumisen kannalta todellisen lämpötilaprofiilin tunteminen sekä pituus- että poikittaissuunnassa antaisi tarkempaa tietoa paikallisen höyrystymisen mahdollisuutta pohdittaessa. Kouruvalmistajat ovat mallintaneet kourun virtausta CFD-mallein, mutta näiden tulosten käyttäminen tässä työssä ei ollut mahdollista. Lisäksi olisi hyödyllistä suorittaa kourumateriaalin lämpötilan mittauksia toimivalla kattilalla. Käytännössä tämä vaatisi erikoisvalmisteisen kourun, johon olisi kiinnitetty termoelementtejä ennen kourun asennusta kattilaan.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin soodakattilan sulakouruihin kohdistuvia lämpörasituksia. Työssä luotiin laskentamalli, jolla voidaan tehtaan DCS-järjestelmään tallentuvan datan avulla seurata kourujen lämpötehoja ja tehon muutoksia. Lämpötehon muutos aiheuttaa aina muuttuvan lämpörasituksen. Pitkän aikavälin lämpörasitusten datankeruulla ja käytettyjen rännien kunnon dokumentoinnilla on mahdollista pyrkiä ennustamaan sularännin kuntoa.

Työssä käytiin läpi kourujen vauriomekanismeja, joissa lämpörasitus on osallisena. Vaihtelevan sulavirran johdosta toimintaympäristö on haasteellinen, sillä vaihtelevan lämpörasituksen lisäksi sula on korrodoivaa. Korrodoiva ympäristö edistää säröilyä.

Tarkastelun kohteena olivat myös sulakourumateriaalin ja sulan lämpötilaprofiilit kourussa. Tarkastelun mahdollistamiseksi esimerkkitehtaalla suoritettiin sulakouruihin ja sulavirtaan liittyviä mittauksia. Sulavirtaa kuvattiin videolle ja videosta määritettiin sulan nopeus sekä sulavirran leveys kourussa. Toisella mittauskerralla sulan lämpötilaa mitattiin termoelementeillä kourun ylä- ja alapäädystä. Samalla suoritettiin lämpökameramittaus, jossa toisella lämpökameralla kuvattiin sulavirtausta videomuodossa ja toisella lämpökameralla kuvattiin kourun reunoja.

Tehtyjen mittausten ja DCS-järjestelmästä kerätyn datan pohjalta on määritetty sulavirran lämpövuon suuruusluokaksi 175 kW/m^2. Lämpövuo vastaa suuruudeltaan lähes soodakattilan tulipesän maksimilämpövuota. Kokonaislämmönsiirtokerroin sulasta jäähdytysveteen on tarkastelun perusteella noin 230 W/m^{2}K. Sulakourun jäähdytysveden maksilämpötehot olivat useilla tehtailla yli 100 kW. Tämä on noin kolminkertainen teho normaalitilanteeseen verrattuna. Sulakourun jäähdytysveden lämpötilan nousu lähelle kiehumispistettä on tarkastelun perusteella todennäköistä vain virtaushäiriön tapahtuessa.

LÄHTEET

Adams, T. 1997. Chapter 4: Black Liquor Spray Nozzles. Teoksessa: Adams, T. (toim.) Kraft Recovery Boilers. Atlanta: Tappi Press. ISBN 0-9625985-9-3.

Ahlers, P-E. 2004a. Luku 9.5: Prosessivedet puunjalostusteollisuudessa. Teoksessa: Korroosiokäsikirja. Toinen painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12. Rajamäki: KP-Media Oy. ISBN 951-97101-7-5.

Ahlers, P-E. 2004b. Luku 9.9: Muut kemikaalit. Teoksessa: Korroosiokäsikirja. Toinen painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12. Rajamäki: KP-Media Oy. ISBN 951-97101-7-5.

AkerKvaerner. Smelt Spout Cooling System.

Andritz. 2014. Andritz to supply world's largest High Energy Recovery Boiler to OKI Pulp & Paper Mills, Indonesia. Saatavissa: https://www.andritz.com/group/gr-news/gr-news-detail.htm?id=27097 [13.2.2017]

Auracher, H. & Herbst, O. 2010. Part H3.5 Critical Boiling States in Flowing Lquids. Teoksessa: Stephan, P. (toim.) VDI Heat Atlas. Second Edition. Springer Berlin Heidelberg.

BLRBAC. 2012. Recommended Good Practice: Safe Firing of Black Liquor in Black Liquor Recovery Boilers. The Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee.

Brink, A., Laurén, T., Hupa, M., Koschack, R. & Mueller, C. 2010. In-furnace Temperature and Heat Flux Mapping in a Kraft Recovery Boiler. 2010 Tappi/Paptac International Chemical Recovery Conference.

Busby, G. 2014. Corrosion and Cracking of Spouts. Tappi PEERS 2014. Tacoma, Washington, 14-17 September.

Fransson, A. 2014. Closing of a Recovery Boiler – a Success Story! 2014 International Chemical Recovery Conference. 9-12 June 2014. Tampere Hall, Finland.

Frederick, W. & Hupa, M. 1997. Chapter 5: Black Liquor Droplet Burning Processes. Teoksessa: Adams, T. (toim.) Kraft Recovery Boilers. Atlanta: Tappi Press. ISBN 0-9625985-9-3.

Gebart, R. 2014. Entrained Flow Black Liquor Gasification – Review of Pilot Scale Research 2004–2014. Teoksessa: Vakkilainen, E., Lampinen, P. & Nieminen, M. (toim.) Continuous

Development of Recovery Boiler Technology – 50 Years of Cooperation in Finland. Vantaa: Finnish Recovery Boiler Committee. ISBN 978-952-93-3984-6.

Grace, T. 1997. Chapter 11: Recovery Boiler Safety. Teoksessa: Adams, T. (toim.) Kraft Recovery Boilers. Atlanta: Tappi Press. ISBN 0-9625985-9-3.

Grace, T. & Frederick, W. 1997. Chapter 6: Char Bed Processes. Teoksessa: Adams, T. (toim.) Kraft Recovery Boilers. Atlanta: Tappi Press. ISBN 0-9625985-9-3.

Groeneveld, D., Shan, J., Vasić, A., Leung, L., Durmayaz, A., Yang, J., Cheng, S. & Tanase, A. 2007. The 2006 CHF look-up table. Nuclear Engineering and Design, vol. 237, s 1909−1922.

Henrikson, S. 2004. Luku 10: Valuraudat, hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset. Teoksessa: Korroosiokäsikirja. Toinen painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12. Rajamäki: KP-Media Oy. ISBN 951-97101-7-5.

Hollenbach, D. & Morrison, S. 2001. Operating Experience and Dry Spout Design. Tappi 2001 Engineering / Finishing & Converting Conference Proceedings.

Hupa, M. & Hyöty, P. 1995. Mustalipeän poltto ja soodakattila. Teoksessa: Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. (toim.) Poltto ja palaminen. Jyväskylä. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-448-2.

Incropera, F. & DeWitt, D. 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fifth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Jones, A., Wagoner, J., Michaelson, T. & Tran, H. 2014. Use of Multivariate Analysis to Understand the Root Causes of Premature Smelt Spout Failures on Recovery Boilers. 2014 International Chemical Recovery Conference. 9-12 June 2014. Tampere Hall, Finland.

Kabar24. 2017. OKI Pulp & Paper Sumbang 85% Realisasi Investasi Ogan Komering Ilir. Saatavissa: http://kabar24.bisnis.com/read/20170608/78/660903/oki-pulp-paper-sumbang-85-realisasi-investasi-ogan-komering-ilir [21.10.2017]

Kind, M. 2010. Part H3 Flow Boiling – An Introduction. Teoksessa: Stephan, P. (toim.) VDI Heat Atlas. Second Edition. Springer Berlin Heidelberg.

Kind, M. & Schröder, J-J. 2010. Part H3.3 Subcooled Boiling. Teoksessa: Stephan, P. (toim.) VDI Heat Atlas. Second Edition. Springer Berlin Heidelberg.

KnowPulp. 2011. KnowPulp 10.0. Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. Prowledge Oy.

Laine, J. 1995. Soodasulan ominaisuuksien ja sen vaihtoehtoisten jäähdytysmenetelmien tarkastelu. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Miikkulainen, P., Järvinen, M. & Kankkunen, A. 2000. Black liquor spray properties in operating recovery boiler furnaces. INFUB 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers. Porto, Portugal, 11–14 April.

Nikula, A. 2004. Luku 8: Korroosion torjuntakeinoja korroosion estämiseksi esiintymismuodottain. Teoksessa: Korroosiokäsikirja. Toinen painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12. Rajamäki: KP-Media Oy. ISBN 951-97101-7-5.

Parviainen, K., Jaakkola, H. & Nurminen, K. 2008. Evaporation of black liquor. Teoksessa: Tikka, P. (toim.) Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Second Edition. Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN 978-952-5216-26-4.

Reid, C. 2011. Laboratory Examination of Smelt Spouts. 2011 Tappi PEERS Conference. Portland, Oregon.

Ribeiro, J., Cardoso, M. & Tran, H. 2010. Smelt spout corrosion in a recovery boiler. Tappi Journal, August 2010, s 39–45.

Richardson, D. & Merriam, R. 1982. A study of black liquor recovery furnace firing conditions, char bed characteristics and performance. Tappi Pulping Conference, s 559–573.

Siitonen, P. 2004. Luku 5: Passivaatio ja korroosion ilmenemismuodot. Teoksessa: Korroosiokäsikirja. Toinen painos. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12. Rajamäki: KP-Media Oy. ISBN 951-97101-7-5.

Singbeil, D., Kish, J. & Keiser, J. 2014. Failure of Smelt Spouts in Kraft Recovery Boilers. Pulp and Paper Corrosion Symposium, November 14, 2014.

Soodakattilayhdistys. 2015. Yhteenveto sularännikyselyn vastauksista [Yhdistyksen sisäisessä käytössä].

Soodakattilayhdistys. 2017. Sularännisuositus. [Yhdistyksen sisäisessä käytössä].

Stephan, P. 2010. Part B1 Fundamentals of Heat Transfer. Teoksessa: Stephan, P. (toim.) VDI Heat Atlas. Second Edition. Springer Berlin Heidelberg.

Tan, G., Kawaji, M., Tran, H., Grace, T. & Tavares, A. 2000. Cooling of Kraft Recovery Boiler Smelt. 2000 Engineering Conference Proceedings.

Tran, H. 1997. Chapter 10: Recovery Boiler Corrosion. Teoksessa: Adams, T. (toim.) Kraft Recovery Boilers. Atlanta: Tappi Press. ISBN 0-9625985-9-3.

Tran, H., Sunil, A. & Jones, A. 2006. The Fluidity of Recovery Boiler Smelt. Journal of Pulp and Paper Science, vol 32, iss 3, s 182–187.

Tran, H., Jones, A. & Grace, T. 2014. Understanding The Recovery Boiler Smelt Run-Off Phenomena. 2014 International Chemical Recovery Conference. 9-12 June 2014. Tampere Hall, Finland.

Vakkilainen, E. 2006a. Kraft Recovery Boilers – High Dry Solids Firing.

Vakkilainen, E. 2006b. Recovery Boiler Replacement Options. Saatavissa: http://eng.utah.edu/~whitty/blackliquor/colloquium2006/presentations/5.1%20-%20Vakkilainen%20-%20Recovery%20Boiler%20Replacement%20Options.pdf [9.2.2017]

Vakkilainen, E. 2008a. Chemical Recovery. Teoksessa: Tikka, P. (toim.) Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Second Edition. Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN 978-952-5216-26-4.

Vakkilainen, E. 2008b. Recovery Boiler. Teoksessa: Tikka, P. (toim.) Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Second Edition. Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN 978-952-5216-26-4.

Vakkilainen, E. & Kivistö, A. 2008. Fossil fuel replacement in the pulp mills. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Research report EN A-58. ISBN 978-952-214-623-6.

Vakkilainen, E. 2009. Boundaries of Recovery Boiler Development. Teoksessa: 45 Years Recovery Boiler Co-Operation in Finland. Vantaa: Finnish Recovery Boiler Committee.

Vakkilainen, E. 2014. Recovery Boilers – History and Future. Teoksessa: Vakkilainen, E., Lampinen, P. & Nieminen, M. (toim.) Continuous Development of Recovery Boiler Technology – 50 Years of Cooperation in Finland. Vantaa: Finnish Recovery Boiler Committee. ISBN 978-952-93-3984-6.

Valmet. 2014. Smelt Spout System with ShatterMax Dual Shatter Jet. Saatavissa: http://www.valmet.com/globalassets/north-america/products--services/power-services/boiler-enhancement/smeltspoutsystem_low.pdf [1.3.2017]

Valmet. 2015a. Forward. Valmet's Customer Magazine. 3/2015. Saatavissa: http://www.valmet.com/Valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-151117-2256E-2C55E/$File/valmet_forward_3-2015_EN_FINAL.pdf?OpenElement [10.2.2017]

Valmet. 2015b. First LignoBoost plants producing large volumes of kraft lignin to the market place. Saatavissa: http://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/PEERS1stLignoBoostPlants/ [19.5.2017]

Venäläinen, I. 2015. Voimakattiloiden kehitysnäkymät ja paikalliset tarpeet. Saatavissa: http://docplayer.fi/6800446-Takeoff3-energiaa-voimakattiloiden-kehitysnakymat-ja-paikalliset-tarpeet-ilkka-venalainen-myyntijohtaja-andritz-oy-power-boilers.html [10.2.2017]

Warnqvist, B. 1992. Char Bed and Smelt Properties – Mill Studies. 1992 International Chemical Recovery Conference, s 551–556.

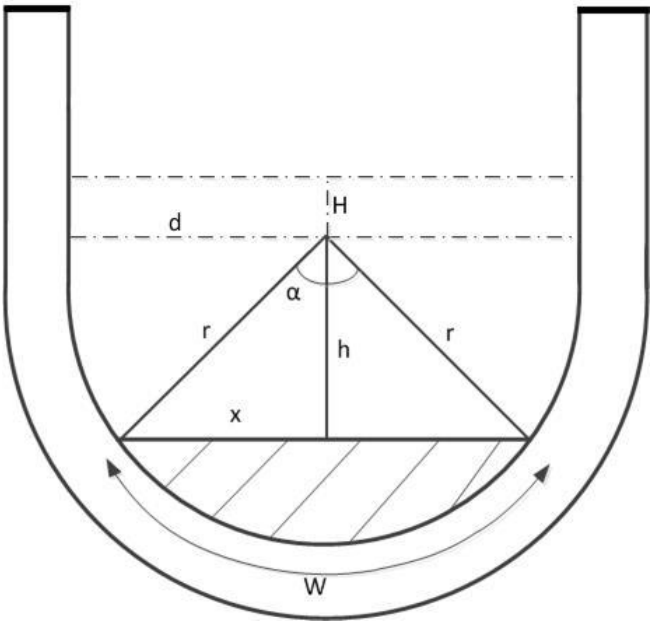
Wessel, R. & Bailey, R. 1996. Radiative Heat Transfer Properties for Black Liquor Combustion: Final Project Report. Babcock & Wilcox Company.

White, F. 2003. Fluid Mechanics; International Edition. Fifth Edition. Boston: McGraw-Hill.

Wiklander, G. 1982. Some New Developments in the Recovery Cycle. Proceedings of the 1982 Black Liquor Recovery Boiler Symposium, August 31 – September 1. Helsinki, Finland.

LIITE I. SULAKOURUN GEOMETRIA

Kuvassa L1 esitetään sulakourun geometria ja laskennassa tarvittavat mitat.



Kuva L1. Kourun geometria.

Kosketuspinnan leveyden määritys, kun sulan leveys tiedossa.

Lasketaan α suorakulmaisesta kolmiosta, *x* puolet sulan mitatusta leveydestä.

$$\sin(\frac{\alpha}{2}) = \frac{x}{r}$$

Lasketaan kosketuspinnan leveys *W*.

$$W = \frac{\alpha}{360} \cdot \pi \cdot d$$

Kosketuspinnan leveyden määritys, kun tilavuusvirta tiedossa.

Mitataan virtausnopeus, lasketaan sulan poikkipinta-ala.

$$A = \frac{q_v}{w}$$

Kun α on korkeintaan 180°: Iteroidaan α sulan poikkipinta-alan yhtälöstä

$$A = \frac{\alpha}{360} \cdot \pi \cdot r^2 - x \cdot h,$$

joka voidaan kirjoittaa

$$A = \frac{\alpha}{360} \cdot \pi \cdot r^2 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot r.$$

Lasketaan kosketuspinnan leveys

$$W = \frac{\alpha}{360} \cdot \pi \cdot d.$$

Kun α on yli 180°: Lasketaan *H* yhtälöllä

$$H = \frac{A - \frac{180}{360}\pi \cdot r^2}{d}.$$

Lasketaan kosketuspinnan leveys

$$W = \frac{180}{360}\pi \cdot d + 2 \cdot H.$$

LIITE II. TERMOELEMENTTIEN VARMENNUSMITTAUS

Termoelementtien varmennusmittaus

Päiväys: 21.9.2017

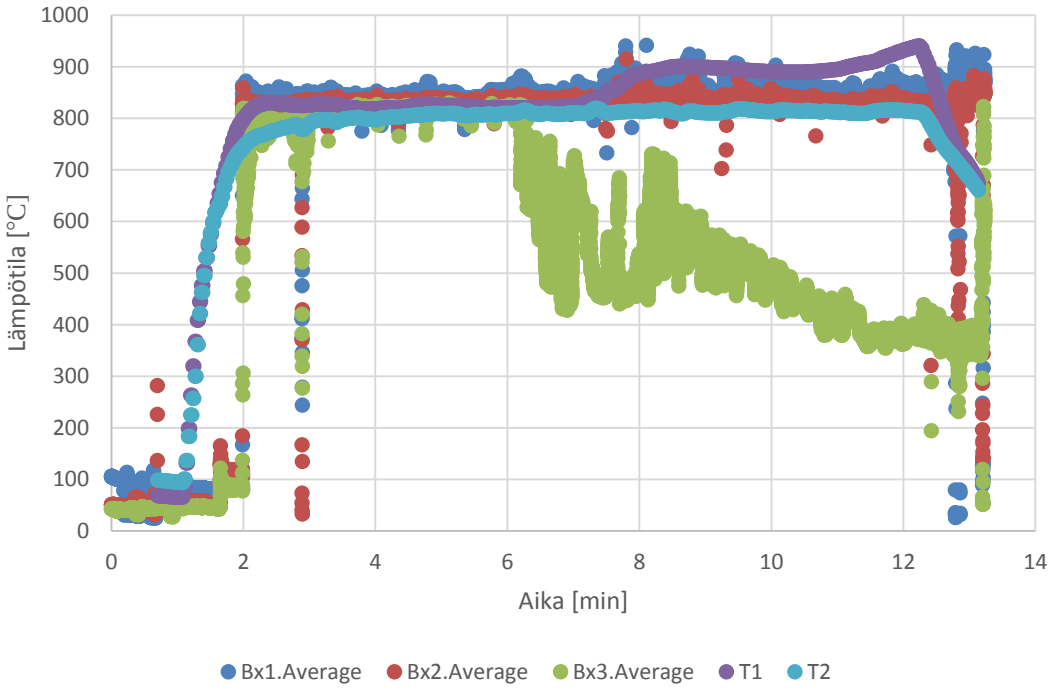
Mittaaja: Eetu Rantanen

Mittalaite: J.P. Selecta Select-Horn

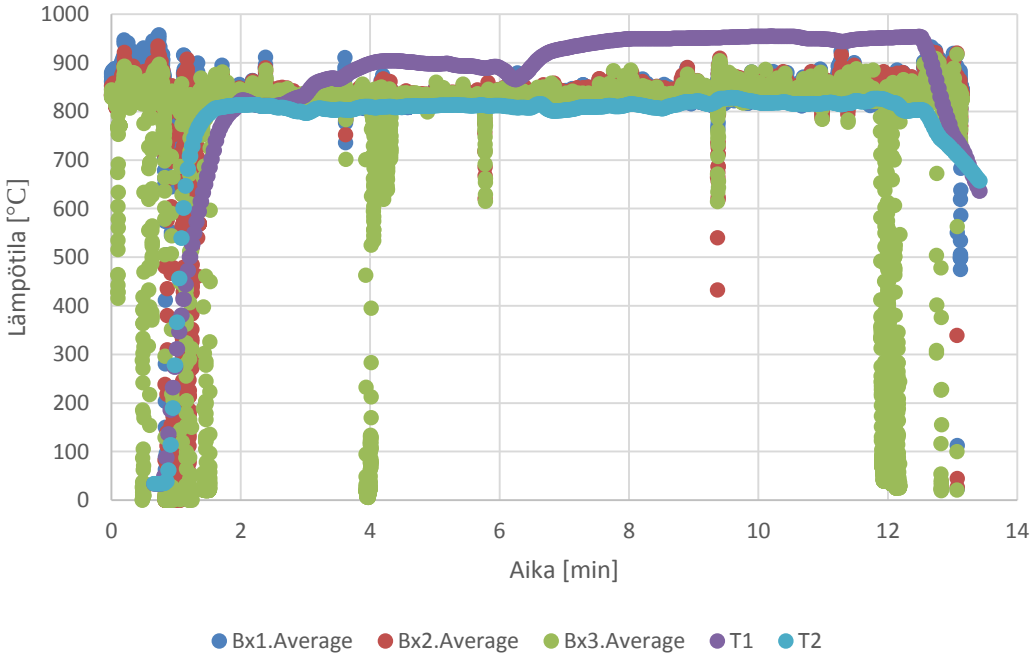
Mittausajankohta	T uuni [°C]	T1 [°C]	T2 [°C]
11:45	500	503,1	503,4
12:58	850	851,5	852,6

LIITE III. SULAN LÄMPÖTILAPROFIILIT

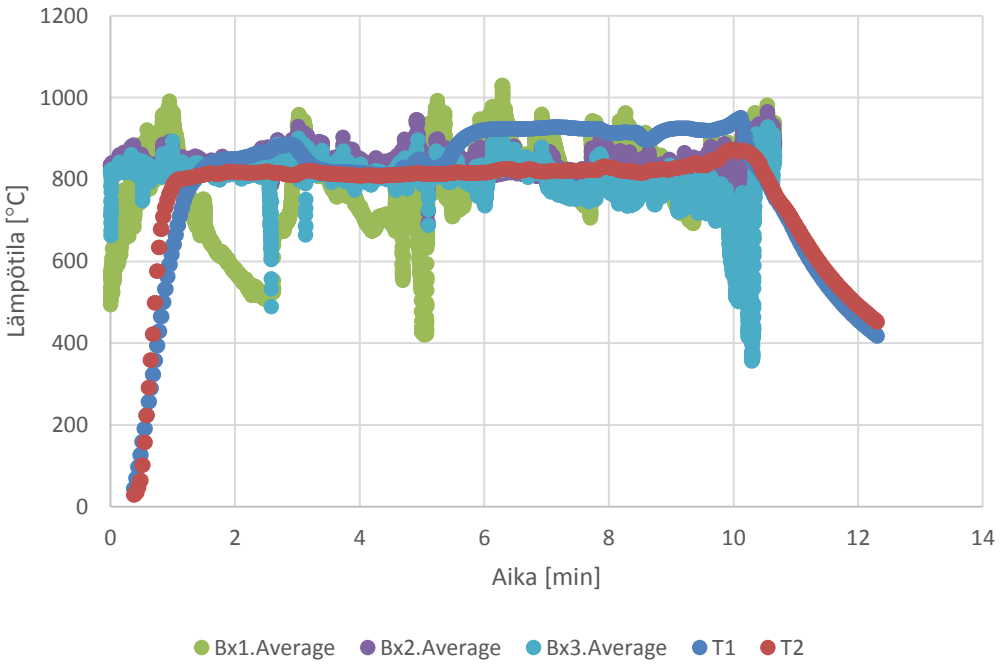
Liite IIIa. Esimerkkitehtaan kattilan A kouru 1.



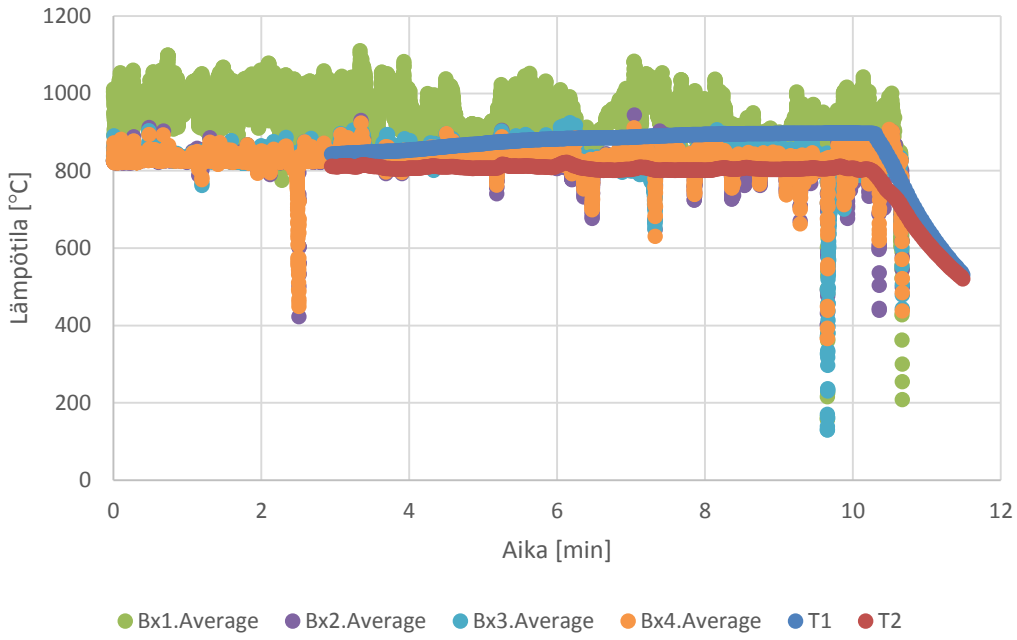
Liite IIIb. Esimerkkitehtaan kattilan A kouru 3.



Liite IIIc. Esimerkkitehtaan kattilan B kouru 2.

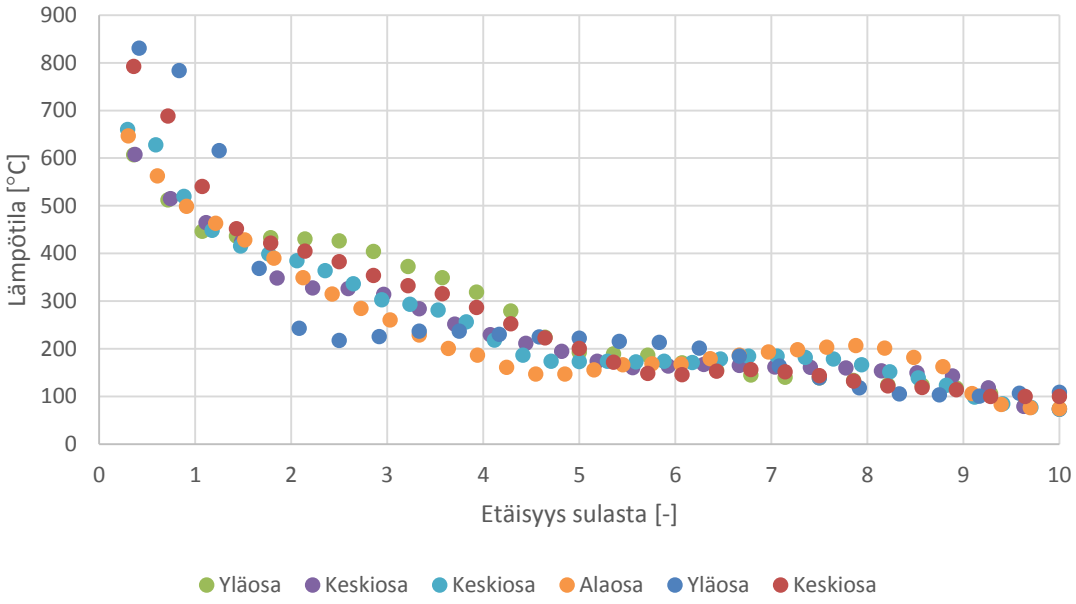


Liite IIId. Esimerkkitehtaan kattilan B kouru 3.

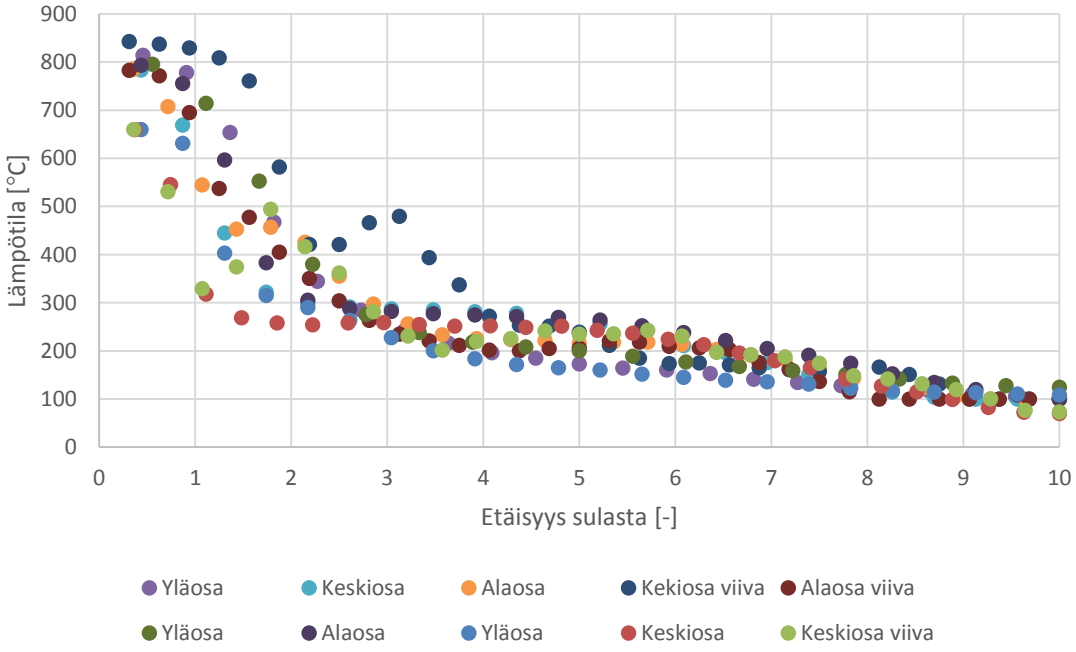


LIITE IV. LÄMPÖTILAPROFIILIT SULAKOURUJEN REUNASSA

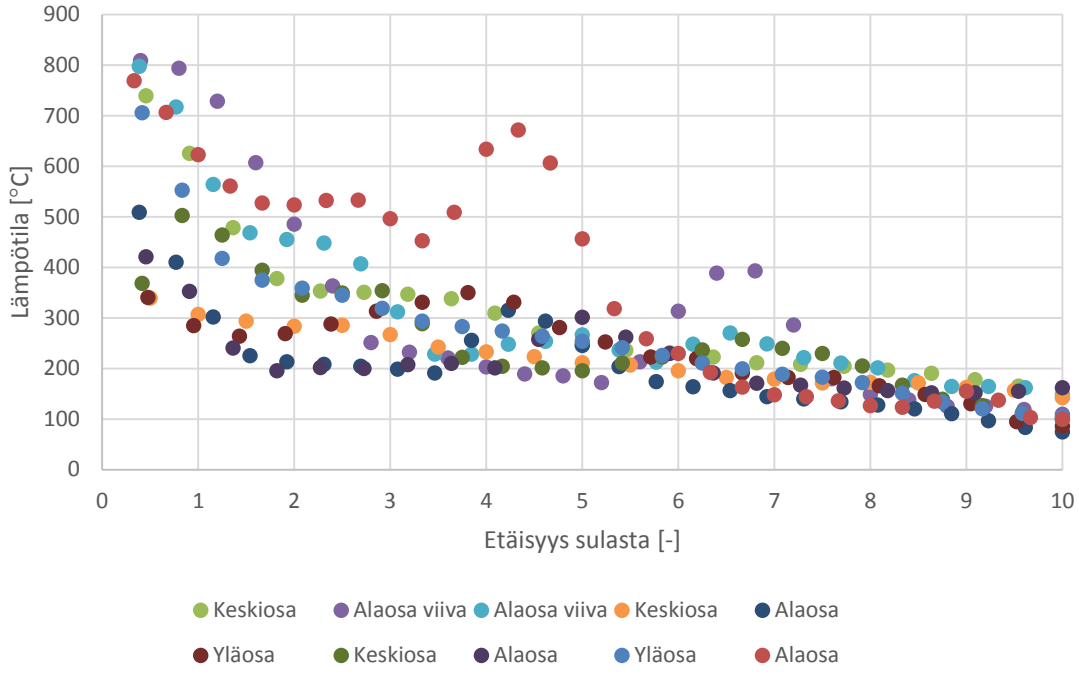
Liite IVa. Esimerkkitehtaan kattilan A kouru 1.



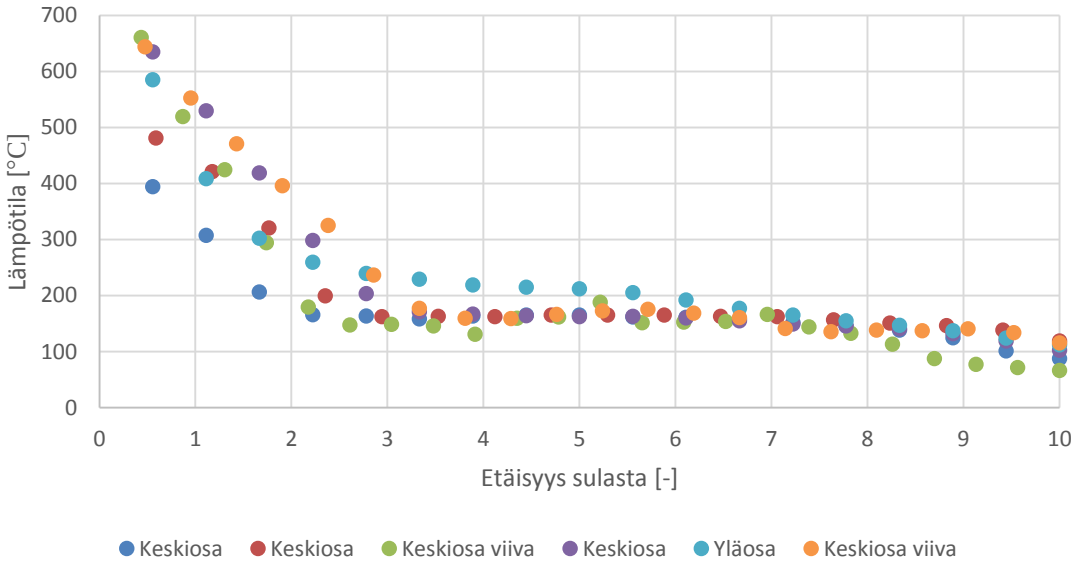
Liite IVb. Esimerkkitehtaan kattilan A kouru 3.



Liite IVc. Esimerkkitehtaan kattilan B kouru 2.



Liite IVd. Esimerkkitehtaan kattilan B kouru 3.



LIITE V. SULAKOURUN SÄTEILY

Virtaava sula säteilee ympäristöön ja kourun reunoihin. Tarkan säteilymäärän arviointi on haasteellista, sillä kourun reunoilla tapahtuu myös ripaefektin johdosta lämmönsiirtoa ja sularoiskeet lämmittävät kourumetallia. Lisäksi mahdollinen sulavirran päälle muodostuva kuonapeite muuttaa säteilyä. Tässä tarkastelussa sulavirran oletetaan muodostavan kourun reunojen kanssa suorakulmaisen särmiön muotoisen tarkastelutilavuuden. Pinta 1 on sula, pinta 2 kourun reunat ja pinta 3 mustana kappaleena käsiteltävä ilma kourun yläpuolella ja päädyissä. Kourun leveys on 0,13 m, pituus 1 m ja reunojen korkeus 0,1 m. Pinta-alat ovat: A_1=0,13 m^2, A_2=0,2 m^2 ja A_3=0,156 m^2. Lämpötilat ovat mittausten perusteella: T_1=820 °C, T_2=150 °C ja T_3=130 °C. Emissiviteetit ovat: ε_1=0,9 ja ε_2=0,91. Säteilyn arviointi on toteutettu hyödyntäen lähdettä Incropera & DeWitt (2002, 790–828).

Vierekkäisten toisiaan kohtisuorassa olevien levyjen välinen näkyvyyskerroin voidaan määrittää apuparametrien *Z/X* ja *Y/X* avulla. Määritettäessä näkyvyyskerrointa sulasta kourun reunoihin *Z*=0,1 m, *X* =1 m ja *Y* =0,13 m. Tällöin näkyvyyskerroin sulasta kourun toiseen reunaan on 0,25 (Incropera & DeWitt 2002, 797). Yhteensä näkyvyyskerroin *F12* on siis 0,5. Muut näkyvyyskertoimet ovat F_{13}=0,5, F_{21}=0,325, F_{22}=0,33, F_{23}=0,345, F_{31}=0,42 ja F_{32}=0,44 ja F_{33}=0,14. Mustan kappaleen säteily lasketaan yhtälöllä

$$E_{\mathrm{bi}} = \sigma \cdot T_{\mathrm{i}}^4.$$

missä

E_{bi}	mustan kappaleen säteily [W/m^2]
σ	Stefanin-Boltzmannin vakio, 5,67·10^{-8} W/m^{2}K^4
T_{i}	kappaleen lämpötila [K]

Kouruun tuleva lämpöteho lasketaan yhtälöstä

$$q_2 = (E_{\mathrm{b2}} - J_2)/(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}).$$

Säteily-yhtälöt pinnoille 1 ja 2 ovat

$$(E_{\mathrm{b2}} - J_2)/(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}) = (J_2 - J_1)/(\frac{1}{A_2 F_{21}}) + (J_2 - J_3)/(\frac{1}{A_2 F_{23}})$$

ja

$$(E_{\mathrm{b1}} - J_1)/(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}) = (J_1 - J_2)/(\frac{1}{A_1 F_{12}}) + (J_1 - J_3)/(\frac{1}{A_1 F_{13}}).$$

Yhtälöt voidaan ilmaista muodoissa

$$J_2 = E_{\mathrm{b}2} - \left(\frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{0{,}325}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{0{,}345}} \right) \cdot \frac{9}{91}$$

ja

$$J_1 = E_{\mathrm{b}1} - \left(\frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{0{,}5}} + \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{0{,}5}} \right) \cdot \frac{1}{9}.$$

Nyt $E_{\mathrm{b}3} = J_3$. Yhtälöistä iteroidaan J_1 ja J_2, arvot ovat J_1=73102 W/m^2 ja J_2=3954 W/m^2. Edelleen sijoittamalla J_2 kourun lämpötehon yhtälöön saadaan ratkaistua kouruun tulevan säteilytehon määrä edellä tehdyillä oletuksilla. Säteilytehon suuruus on 4,3 kW.

LIITE VI. SULAKOURUJEN LÄMPÖRASITUSTEN VERTAILU

Lämpötehon muutos yli 10 kW/min

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	452	478	482	527	454	392	
Tehdas A	50	15	89	13	58		
Tehdas E	156	53	150	419	103	19	
Tehdas H1	418		169				
Tehdas H2	142	259	267	121			
Tehdas K	62	74	56	86	55	79	
Tehdas M	1	5	4	11	15	16	22
Tehdas H2, 2016	226	299	278	188			

Lämpötehon muutos yli 20 kW/min

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	95	97	98	126	102	78	
Tehdas A	0	0	6	0	1		
Tehdas E	3	4	19	46	23	1	
Tehdas H1	57		25				
Tehdas H2	63	79	70	25			
Tehdas K	0	0	1	6	0	0	
Tehdas M	0	0	0	0	0	0	0
Tehdas H2, 2016	136	144	104	55			

Lämpötehon muutos yli 30 kW/min

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	32	30	27	44	35	19	
Tehdas A	0	0	0	0	0		
Tehdas E	1	1	3	7	4	1	
Tehdas H1	18		14				
Tehdas H2	7	11	7	1			
Tehdas K	0	0	0	3	0	0	
Tehdas M	0	0	0	0	0	0	0
Tehdas H2, 2016	26	40	7	5			

Lämpötehon muutos yli 40 kW/min

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	8	7	8	20	11	3	
Tehdas A	0	0	0	0	0		
Tehdas E	0	1	1	1	2	0	
Tehdas H1	4		7				
Tehdas H2	1	1	2	0			
Tehdas K	0	0	0	2	0	0	
Tehdas M	0	0	0	0	0	0	0
Tehdas H2, 2016	6	5	4	5			

Lämpötehon muutos yli 50 kW/min

	Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Tehdas B	2	1	1	6	2	1	
Tehdas A	0	0	0	0	0		
Tehdas E	0	0	0	0	1	0	
Tehdas H1	3		3				
Tehdas H2	0	0	1	0			
Tehdas K	0	0	0	1	0	0	
Tehdas M	0	0	0	0	0	0	0
Tehdas H2, 2016	6	5	4	5			

LIITE 5

KTR: LUT, Selvitys sularännien toiminnasta vaihtelevalla kuormalla – esitys 22.12.2017

Sularännien toimintaolosuhteet: lämpörasitukset ja sulavirtaukset

Eetu Rantanen

22.12.2017

LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Kysymys

- Toiminta-aikaa pitäisi pystyä pidentämään
- Sularännejä hajoaa
- Tarkastus vaikeaa

”Voisiko yksi hajoamisen syy olla lämpötilan vaihtelut?”

Sisällys

- Datan keruu
- Sulakourun energiatase ja laskenta
- Suoritetut mittaukset
- Tehdasvertailu
- Kokonaislämpörasitus
- (Liuottaja)

Datan keruu

Datan keruu

- Ohessa lueteltuja tietoja kysytty suomalaisilta sellutehtailta

Minuuttidata, 1 kk

Sulakourun jäähdytysveden lämpötila ennen kouruja
Sulakourun jäähdytysveden lämpötila kourun jälkeen
Sulakourun jäähdytysveden tilavuusvirta

Minuuttidata, 1 vrk

Liuotinsäiliön tiheys
Luotinsäiliön pinta
Laihavalkolipeän tilavuusvirta
Viherlipeän tilavuusvirta

Minuutti-/tuntidata, 1 kk

Tuorehöyryvirtaus
Polttolipeävirtaus
Tulipesän lämpötila
Polttolipeän kuiva-ainepitoisuus

Sularännin dimensiot

Kourun pituus
Sisäkourun halkaisija
Sisäkourun materiaalivahvuus
Materiaali
Vesikanavan poikkileikkauksen ala/mitat laskemiseen
Veden virtausreitti/kourutyyppi

Lisäksi reduktioaste, sulfiditeettitaso ja liuotinsäiliön tilavuus

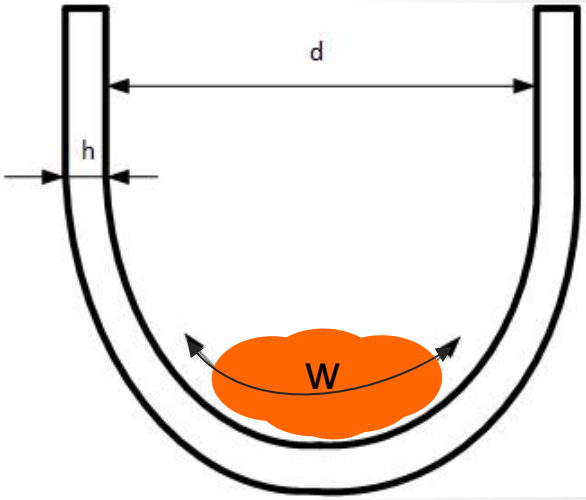
Datan keruu

- Data tehtailta
  - Sunila
  - Joutseno
  - Äänekoski
  - Enocell
  - Oulu, 1 vrk
  - Kaukas
  - Kymi (vaihteleva mittausväli)
  - Pietarsaari
  - Kotkamills, ei rännin sisäänmenolämpötilaa

Sulakourun energiatase ja laskenta

Sulakourun energiatase

- Suurin osa siirtyvästä lämmöstä siirtyy juoksevasta sulasta kiinteään sulaan, siitä kourumetalliin ja kourumetallista jäähdytysveteen
- Sulan säteilyteho kourun reunoihin laskennan perusteella 4,3 kW
  - Todellisuudessa rännin reunoilla usein kuonaa, jolloin todellinen säteilyteho oletettavasti alempi
- Tulipesän rakenteista ja säteilystä kouruun siirtyvä teho 1,9 kW Sunilan SK11 –kattilan reunimmaisten rännien datan perusteella



Sulakourun energiatase, muutostilanteet

- Sulasyöksy/rassaus
  - Sulamäärä kasvaa, nestemäistä sulaa jähmettyy rännin reunaan, lämpö pääasiassa jäähdytysveteen -> 1 kg jähmettyvää ja jäähtyvää sulaa nostaa lämpötehoa tietyn minuutin ajalta karkeasti 14 kW
    - Esimerkkirännillä kyseinen tilanne kun sulavirta muuttuu 1 l/s -> 5,5 l/s, 3 mm jähmettyvä kerros

Lämpövuon suuruuden arviointi

- Lämpövuo laskettavissa keskimäärin mitatusta lämpötiladatasta ja mittausten perusteella määritetystä kosketuspinnan leveydestä
- Suoritettujen mittausten perusteella lämpövuo on noin 175 kW/min
  - Vertailun vuoksi tulipesän seinien lämpövuo 100 – 200 kW/m^2
  - Tukia (1976) arvioinut Sunilassa lämpövuoksi 140 kW/m^2, tuolloin vesipuolen pienemmän massavirran johdosta vesipuolen lämmönsiirtokerroin ollut luokkaa 1500 W/m^{2}K
  - Lämmönsiirtokriisi vaatisi moninkertaisen lämpövuon

		Lämpövuo [kW/m^2]					
		Kattila A		Kattila B			
Sulakouru		1	3	1	2	3	4
Kontaktileveys [m]	0,10	215	254	17	260	234	21
	0,15	143	169	11	174	156	14
	0,20	107	127	8	130	117	11

Sulakourun lämpötilat stationääritilassa

		Valmet Once-trough U-kouru	Andritz Multipass V-kouru
Veden lämpötila	ºC	65	65
Kourumetallin lämpötila vesipuolella	ºC	104	88
Metallin lämpötila mustan ja rosterin rajapinnassa	ºC	-	113
Metallin lämpötila sulapuolella	ºC	138	137

Lähtöarvot			
Lämpövuo	kW/m^2	175	175
Konvektiokerroin vesipuolella	W/m^2K	4500	7700
Lämmönjohtavuus musta	W/mK	41	41
Lämmönjohtavuus ruostumaton	W/mK	-	15
Kourun paksuus	mm	8	6+2

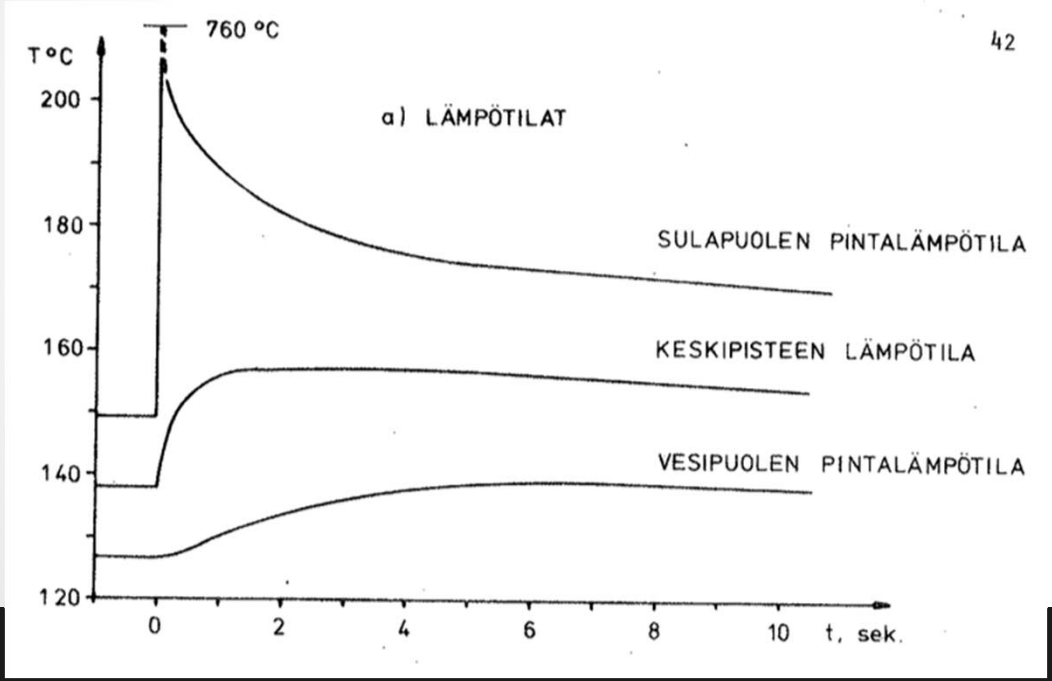
Sulakourun lämpörasitukset

- Tukkeutuneen rännin materiaalin lämpötila laskee lähelle jäähdytysveden lämpötilaa, ränni avaamisen jälkeen lämpötila nousee keskimäärin noin 50 °C ulkokourun lämpötilaa korkeammaksi
- Jäykälle teräskappaleelle aiheutuva jännitys tästä muutoksesta olisi

  $\sigma = -\alpha E \Delta T$ =123 MPa
  - Ulkokuori säilyy vakiolämpötilassa, ja täten rajoittaa kourun venymistä, mutta todellinen tilanne ei kuitenkaan vastaa myöskään täysin jäykkää kappaletta

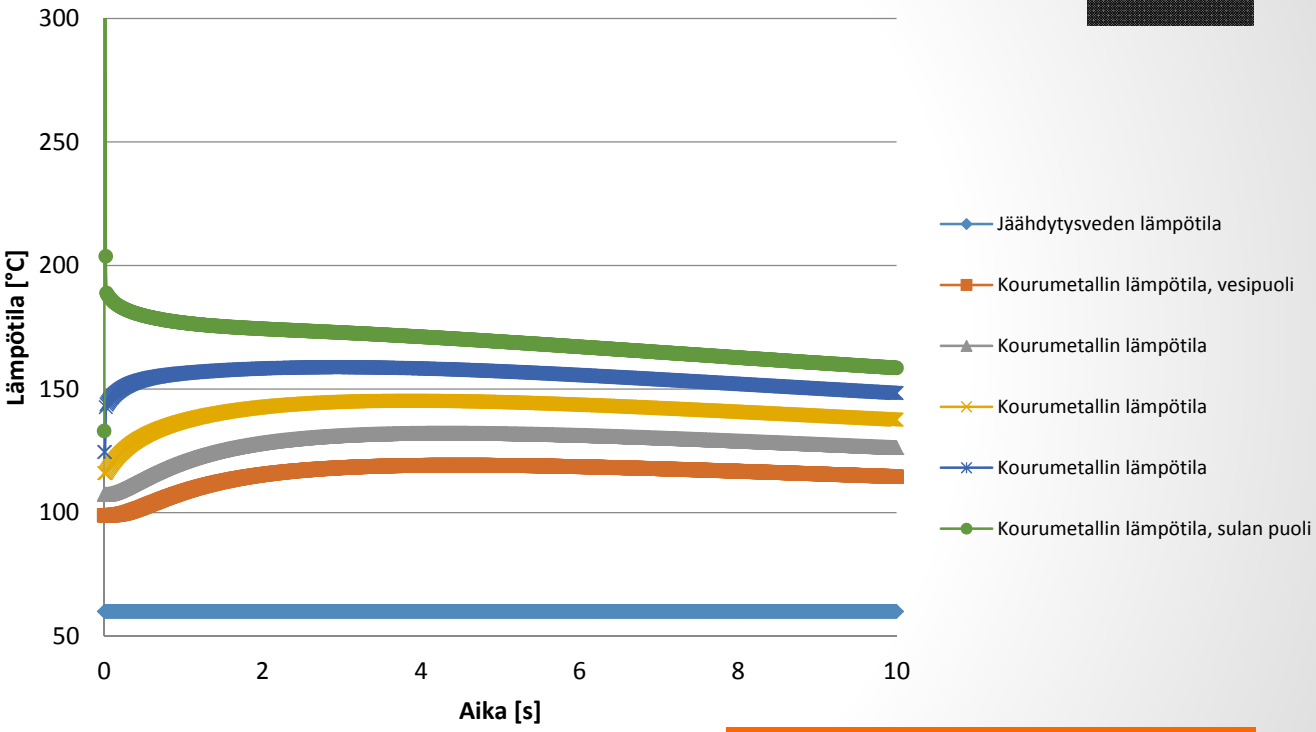
Sulakourun lämpötilat muutostilanteessa

- Rännin rassaus (Tukia 1976, 42)



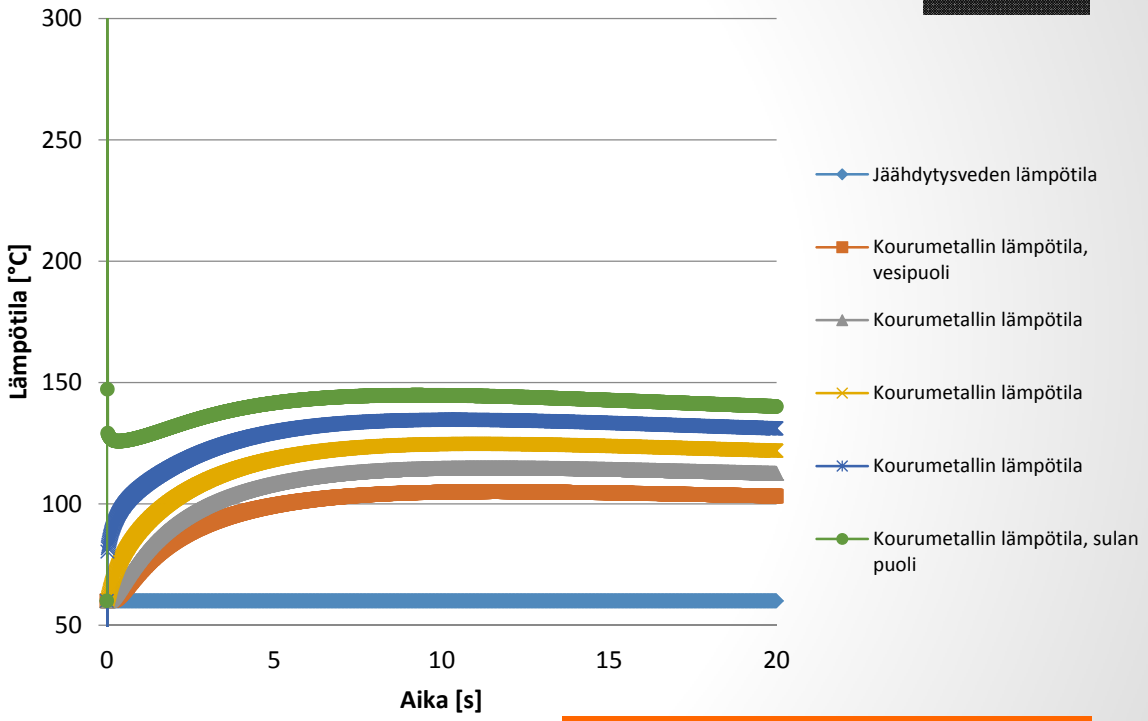
Sulakourun lämpötilat muutostilanteessa

- Rännin rassaus lämpövuolla 175 kW/m^2, jähmettyneen kerroksen muodostuminen mukaillen Tukian laskentaa



Sulakourun lämpötilat muutostilanteessa

- Tukkeutuneen rännin aukeaminen lämpövuolla 175 kW/m^2, jähmettyneen kerroksen muodostuminen mukaillen Tukian laskentaa

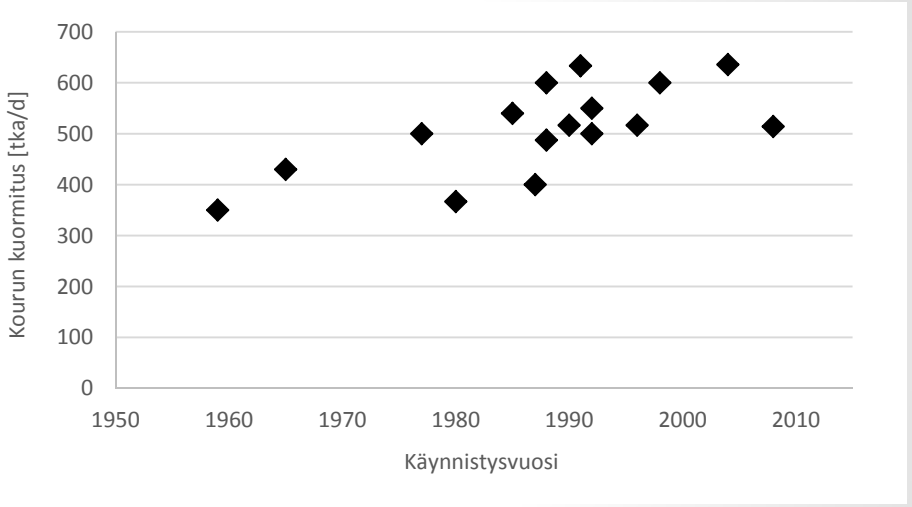


Sulakourun lämpötilat muutostilanteessa

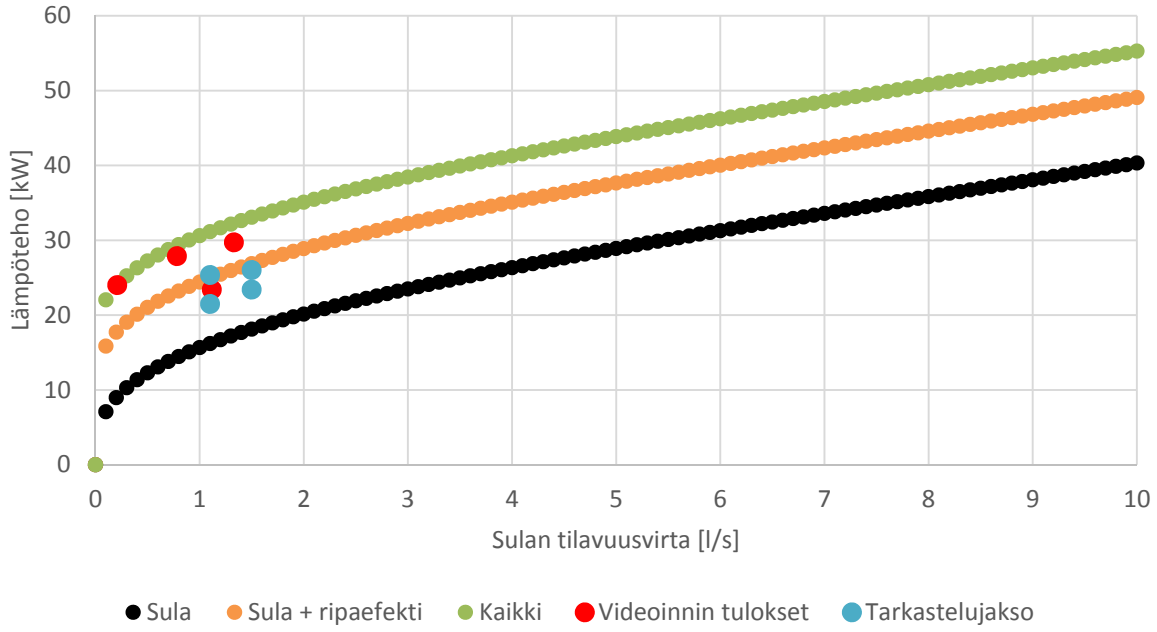
- Ensimmäisten höyrykuplien muodostuminen vaatii noin 6 °C kylläistä lämpötilaa korkeamman materiaalin lämpötilan
  - Rassauksessa vesipuolen maksimilämpötila 119 °C
  - Tukkeutuneen rännin avaamisessa vesipuolen maksimilämpötila 105 °C
- Höyrykuplien muodostuminen olisi näiden laskujen perusteella todennäköistä rassauksessa jäähdytysveden ollessa 1 barin paineessa. 1,9 barin paineessa höyrystymistä ei tapahtuisi
  - Höyrystyminen tehostaa lämmönsiirtoa, edellä esitetyissä kuvissa oletettu vakiolämmönsiirtokerroin

Sulamäärä

- Polttolipeästä
  - Keskimääräinen pidemmän aikavälin luku
- Liuotinsäiliötaseesta
  - Kokonaissulavirta
- Erikoismittauksilla
  - Videointi (nopeus, poikkipinta-ala)



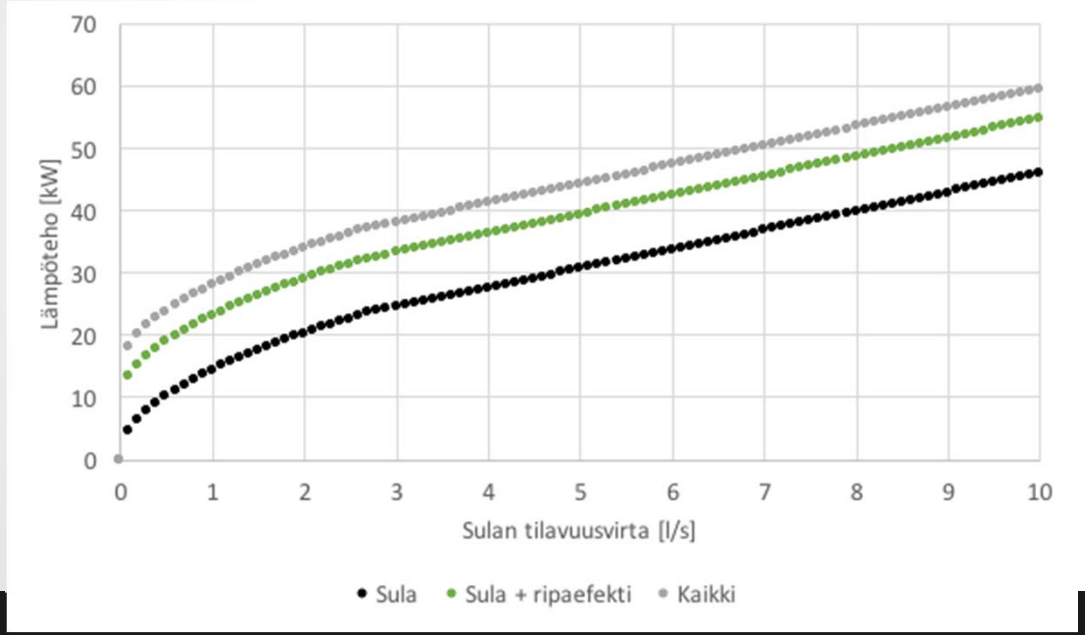
Lämpöteho sulavirran funktiona



Rännin pituus	1	m
Rännin leveys	0,13	m
Rännin korkeus	0,14	m
Sulan virtausnopeus	1,2	m/s
Lämpövuo	175	kW/m^2

Lämpöteho sulavirran funktiona

- Vertailuksi Andritz v-rännin laskennallinen lämpöteho



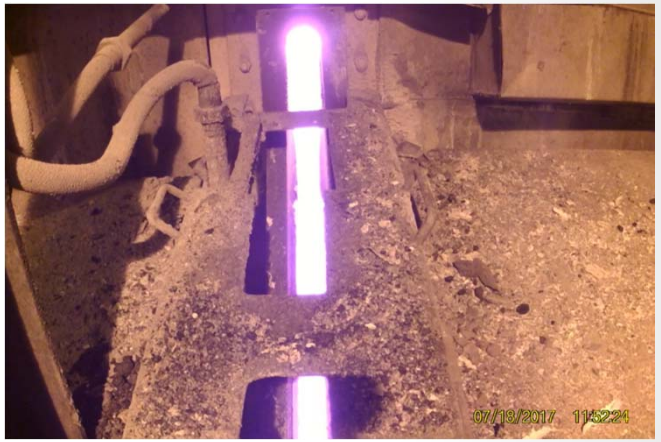
Rännin pituus	1	m
Rännin leveys	0,095	m
Rännin korkeus	0,145	m
Sulan virtausnopeus	1,2	m/s

Suoritetut mittaukset

Sulan videokuvaus

Mittausjakso 30 min lukuun ottamatta SK11 ränniä 3, jolla jakso oli 13 min

		SK10		SK11	
		1	3	2	3
Lämpötilan nousu	°C	3,9	3,2	2,6	2,1
Lämpöteho	kW	41,8	35,1	29,7	24,0
Sulan leveys	cm	7,7	8,5	9	5,1
Kosketuspinnan leveys	cm	8,2	9,3	9,9	5,2



Taulukkoon kootut arvot videoinnin keskiarvoja

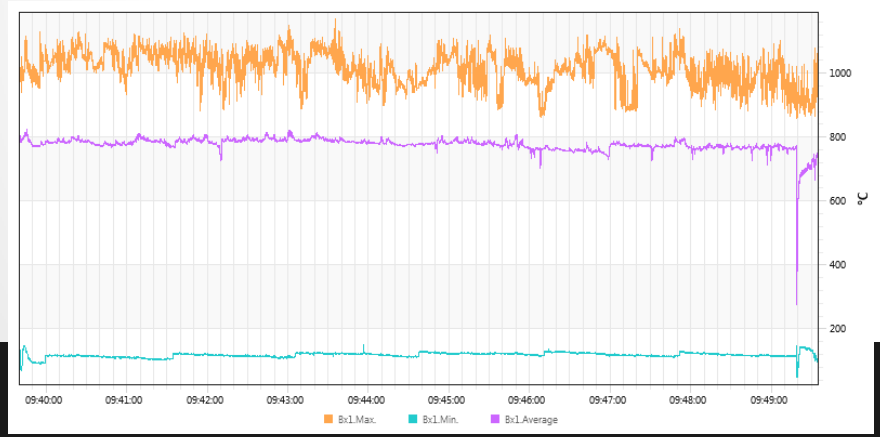
Sulan videokuvaus

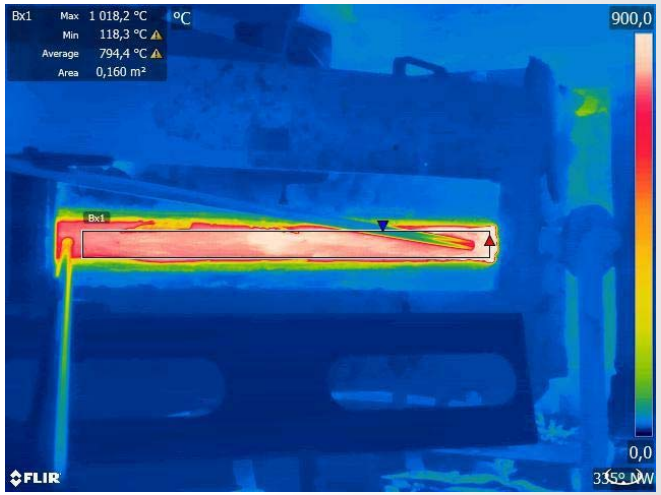
- Sulan nopeus luokkaa 1,5 m/s, epävarmuus merkittävä

- Sulan leveys määritettiin joka minuutilta erikseen
  - Pienien lämpötehon muutosten havainnointi haasteellista sulavirran leveyttä seuraamalla

Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

- 19.9. mittauspäivä, kaksi termoelementtiä ja kaksi lämpökameraa
- Mittausjakso 10 min/ränni
  - Lämpökameralla kuvattiin videota
  - Termoelementit rännin ylä- ja alapäässä suojaputkien sisässä
- Lämpötilaprofiili, sulan nopeus ja emissiviteetti





Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

Mittausjärjestelyt:





Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

- Ylempi termoelementti osittain kekoa vasten, alempi rännin alapäädyssä
- Datan keruusykli termoelementeillä 1 sekunti, lämpökameralla 30 kertaa sekunnissa



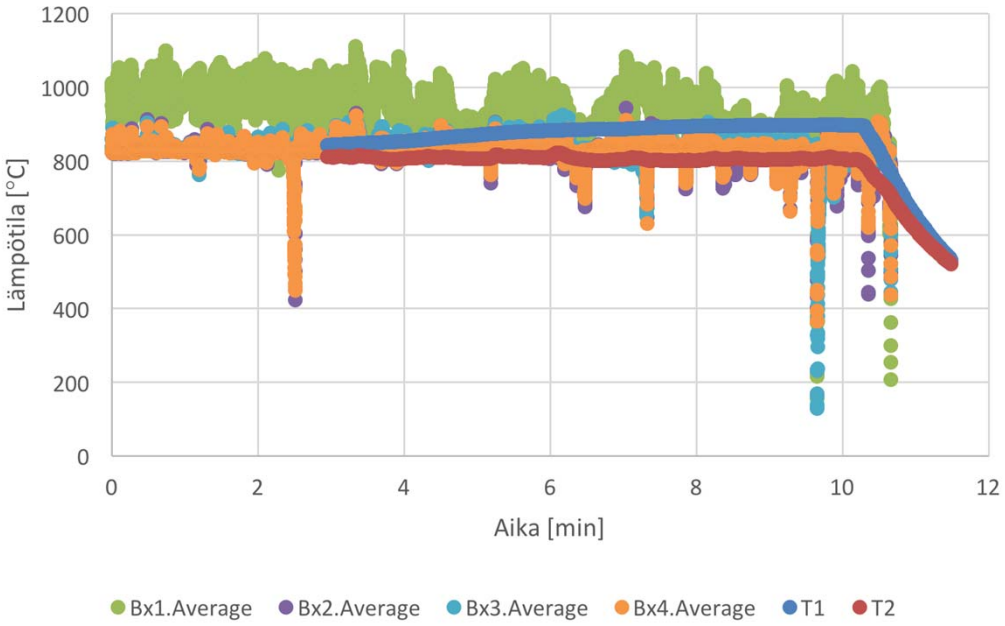


Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

- Datan perusteella kourumetallin emissiviteetti 0,91 ja sulan emissiviteetti termoelementtien lämpötiloista määritettynä 0,88-0,93
- Sulan virtausnopeus keskimäärin 1,8 m/s
  - Avoimessa virtauskanavassa nesteen virtausnopeus yläosassa on noin 1,5-kertainen keskimääräiseen virtausnopeuteen verrattuna. Tällöin keskimääräinen sulan virtausnopeus on 1,2 m/s.

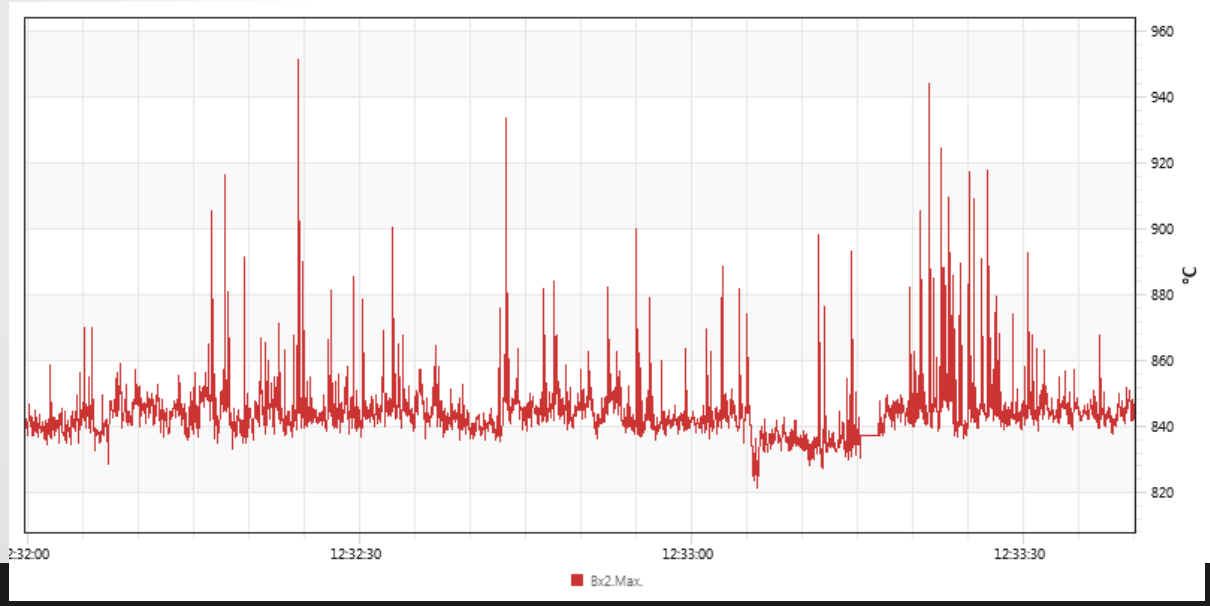
Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

- Lämpötilaprofiili mittauksen ajalta, SK11 ränni 3
- Nestemäisen sulan keskimääräinen lämpötila alemman termoelementin mukaan eri ränneillä 807-821 °C
- Keon pintalämpötila ränniaukossa noin 1000 °C

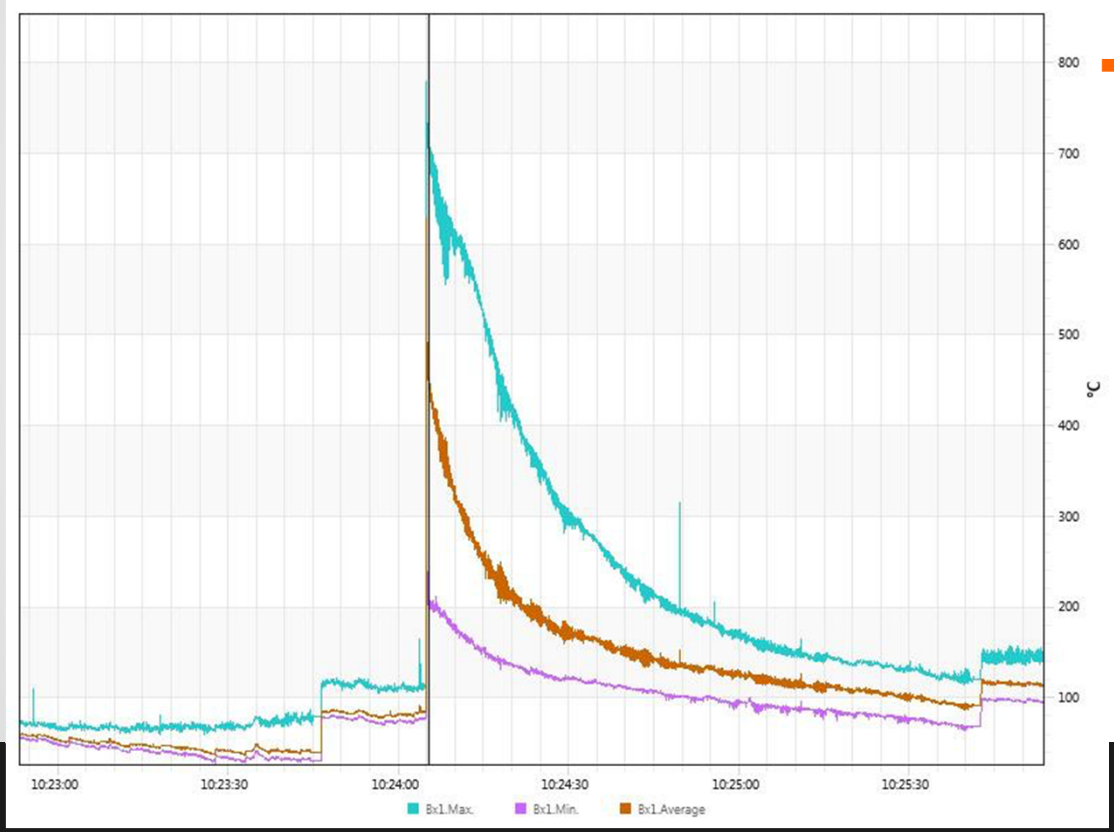


Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

- Kuonapaakut huomattavasti sulaa kuumempia (kuva), tosin todellista eroa saattaa hieman pienentää kuonan vähän korkeampi emissiviteetti



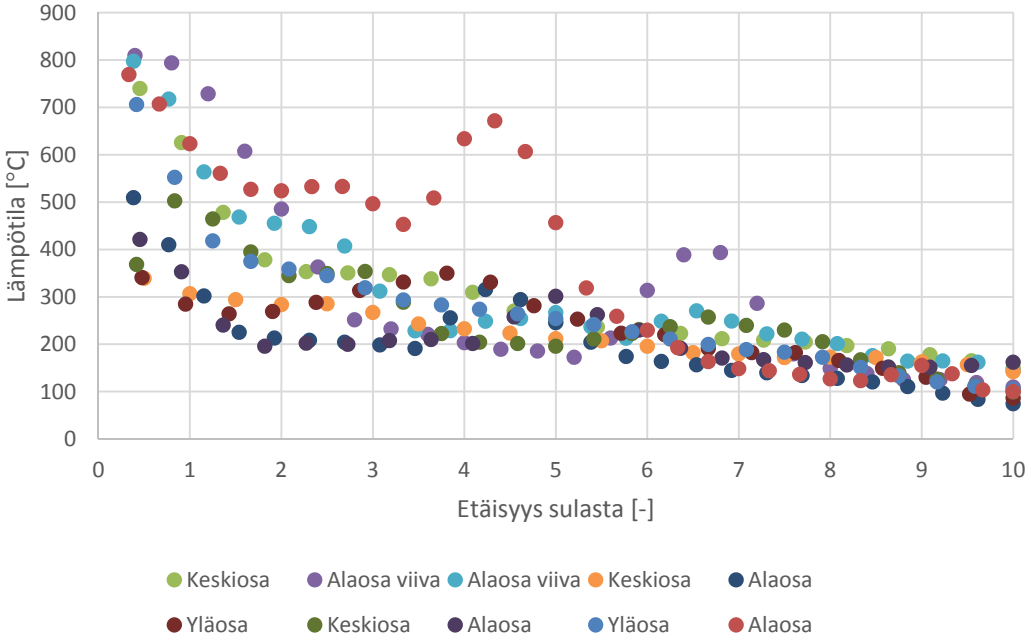
Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus



- Sularoiskeen jäähtyminen rännin yläpintaan
  - Havaittavissa sulan huono lämmönjohtavuus, sulan pinnan jäähtyminen vie noin minuutin

Sulan lämpötilanmittaus ja lämpökamerakuvaus

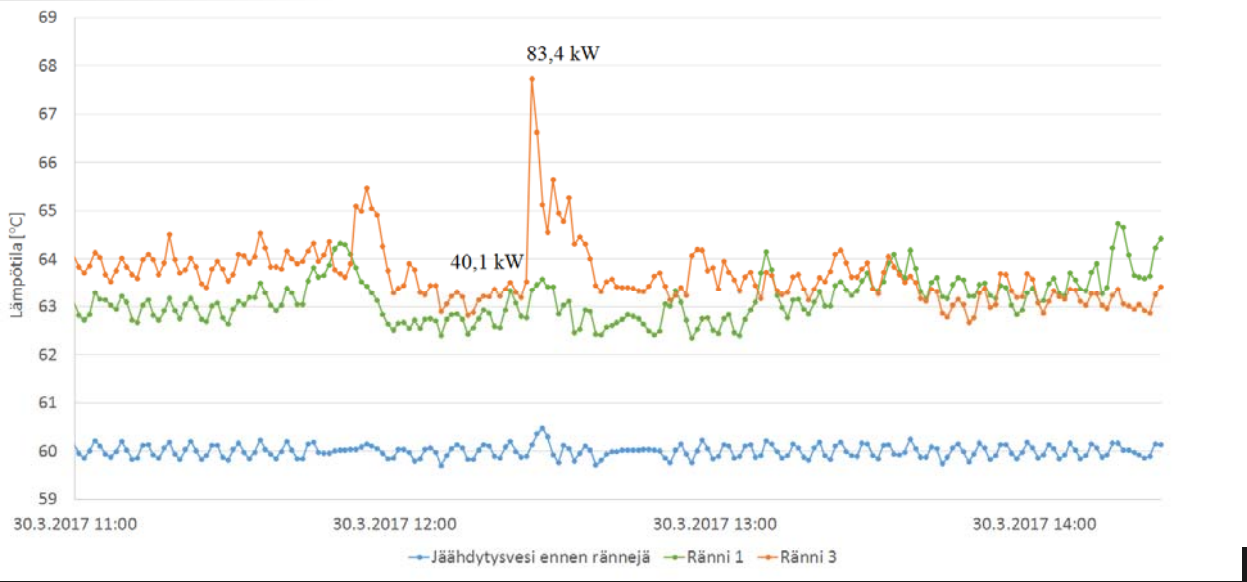
- SK11 rännin 2 reunan lämpötilaprofiilit
- Muutamassa kohdassa jäähtyvää sulaa reunoilla, nämä näkyvät korkeampina lämpötiloina
- Yleisesti lämpötilat huomattavasti korkeampia kuin laskennalliset lämpötilat jähmettyneen sulakerroksen alla



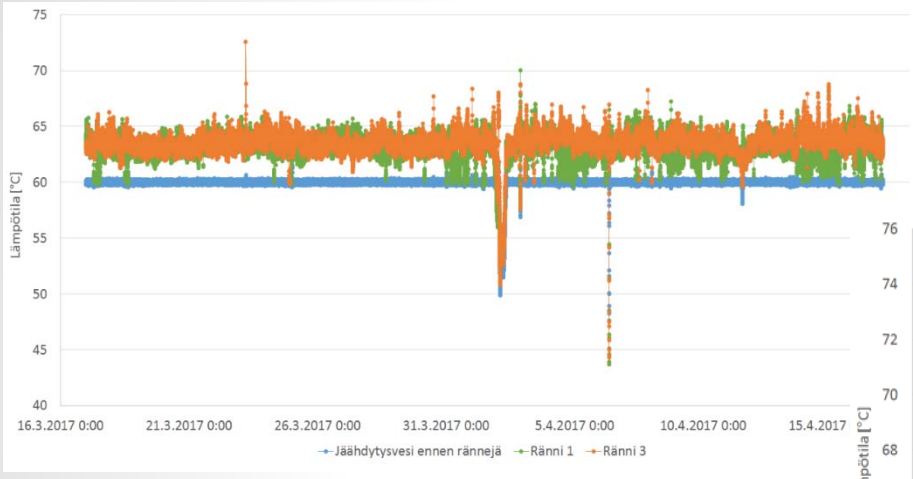
Tehdasvertailu

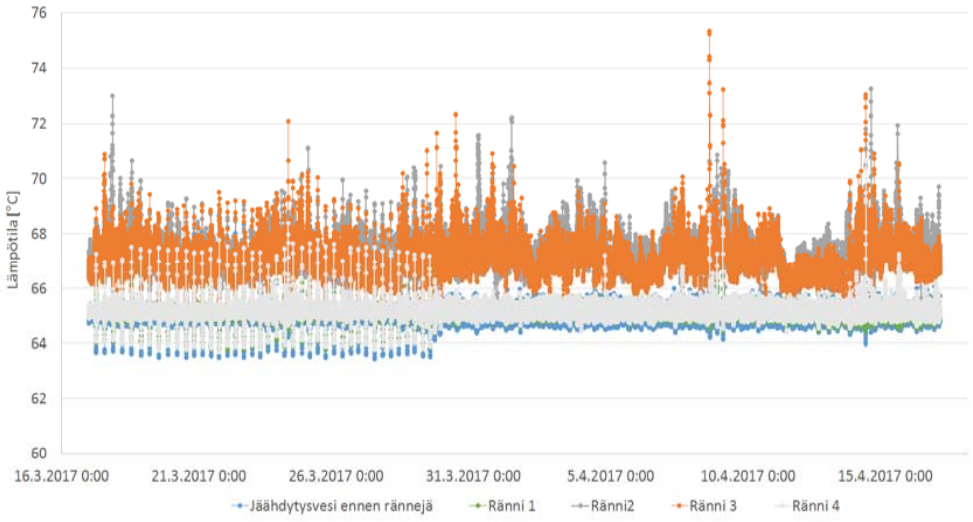
Lämpötehon määritys

- $q = q_m \cdot c_p \cdot (T_{\text{ulos}} - T_{\text{sisään}})$
  - Jokaiselle ajanhetkelle rännikohtaisesti



Sunila


75
70
65
60
55
50
45
40
Lämpötila [°C]
16.3.2017 0:00
21.3.2017 0:00
26.3.2017 0:00
31.3.2017 0:00
5.4.2017 0:00
10.4.2017 0:00
15.4.2017
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni 3


76
74
72
70
68
66
64
62
60
Lämpötila [°C]
16.3.2017 0:00
21.3.2017 0:00
26.3.2017 0:00
31.3.2017 0:00
5.4.2017 0:00
10.4.2017 0:00
15.4.2017 0:00
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4

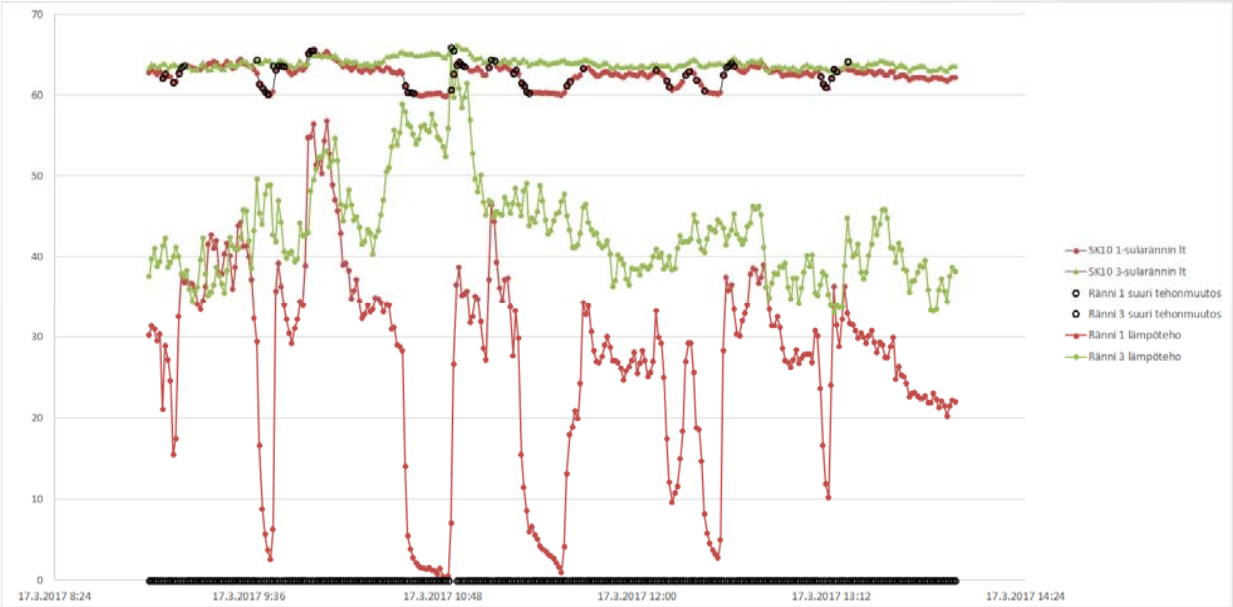
Sunila

		SK10			SK11		
		Keskiarvo	Min	Max	Keskiarvo	Min	Max
°C	Jäähdytysvesi ennen rännejä	59,9	48,2	64,0	65,0	63,4	68,7
l/s	Polttolipeä	8,1	0,0	8,9	10,8	5,6	12,1
%	Kuiva-aine	79,2	49,7	80,8	79,2	49,7	80,8

		SK10		SK11			
		1	3	1	2	3	4
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	43,7	44,3	63,7	64,8	64,6	63,7
	k-a	62,9	63,4	65,1	67,3	67,1	65,2
	max	70,0	72,6	69,0	73,3	75,4	70,7
Lämpötilan nousu [°C]	min	-9,7	-7,7	-2,7	-1,2	-0,9	-2,0
	k-a	3,0	3,5	0,1	2,3	2,1	0,2
	max	10,4	12,4	2,6	7,6	9,3	4,1
Lämpöteho [kW]	min	-104,3	-84,3	-29,8	-13,6	-9,7	-22,4
	k-a	32,2	38,1	1,6	26,1	23,5	2,1
	max	111,3	136,1	29,3	87,4	106,0	45,4
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-67,7	-56,4	-42,2	-43,2	-38,6	-33,9
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	55,7	75,0	31,7	32,3	52,6	25,9

Sunila

Ränneillä jonkin verran tukkeutumista, kuvassa esimerkki aikavälistä, jolloin SK10 ränni 1 tukkeutunut useasti

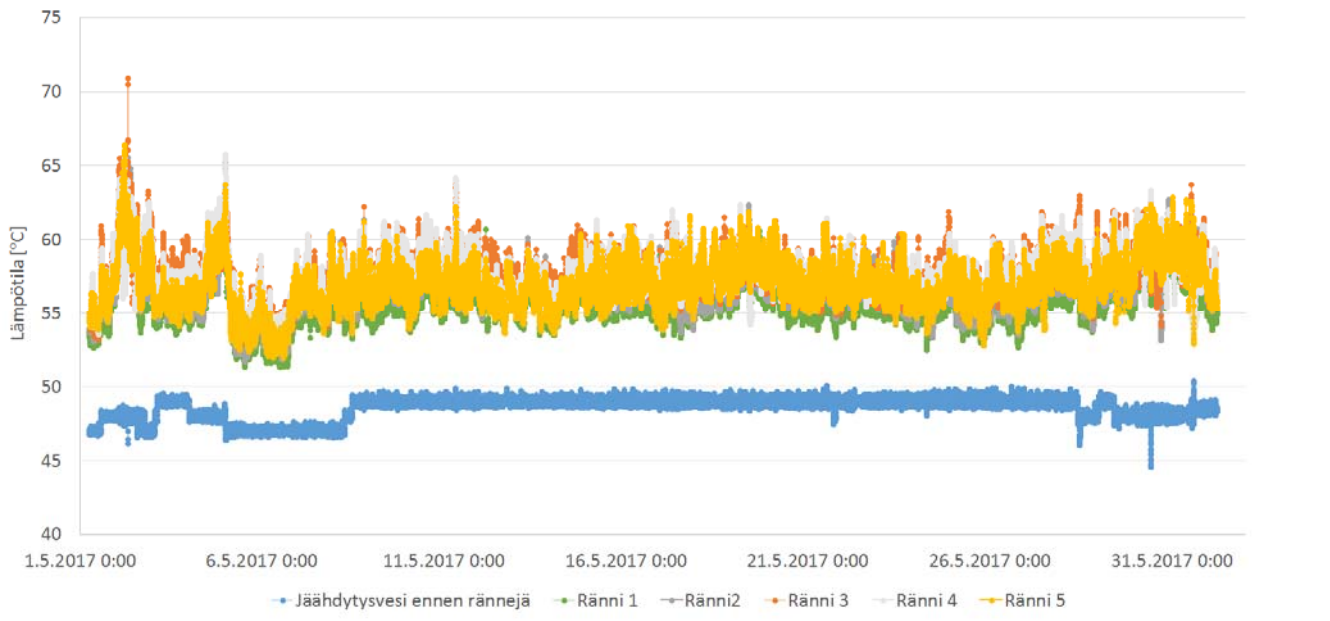


Sunila

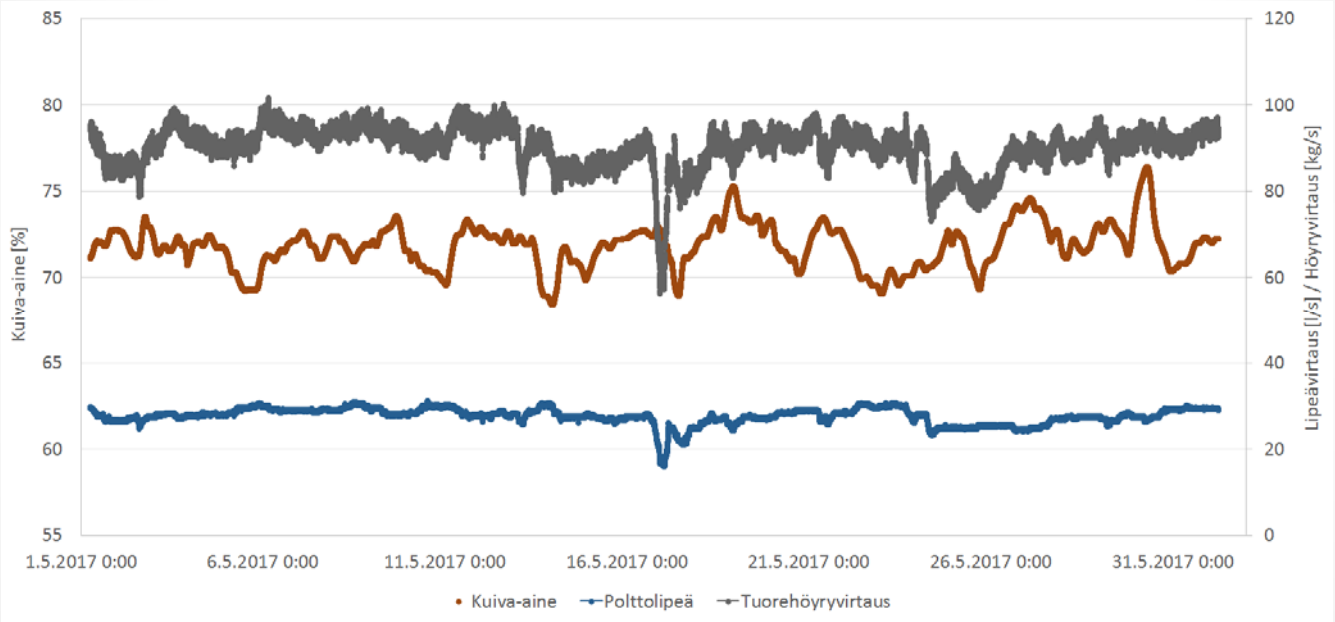
Muutos vähintään		SK10 1	SK10 3	SK11 1	SK11 2	SK11 3	SK11 4
10	kW/min	418	169	142	259	267	121
20	kW/min	57	25	63	79	70	25
30	kW/min	18	14	7	11	7	1
40	kW/min	4	7	1	1	2	0
50	kW/min	3	3	0	0	1	0
40	%	219	58	12962	231	302	5975
50	%	109	27	9217	161	201	3754
60	%	66	21	6521	121	154	2647
80	%	26	14	3460	75	85	1754
100	%	14	7	2270	25	36	1379

Muokatusta datasta laskien vähemmän merkittäviä muutoksia

Äänekoski


75
70
65
60
55
50
45
40
Lämpötila [°C]
1.5.2017 0:00
6.5.2017 0:00
11.5.2017 0:00
16.5.2017 0:00
21.5.2017 0:00
26.5.2017 0:00
31.5.2017 0:00
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5

Äänekoski


85
80
75
70
65
60
55
Kuiva-aine [%]
120
100
80
60
40
20
0
Lipeävirtaus [l/s] / Höyryvirtaus [kg/s]
1.5.2017 0:00
6.5.2017 0:00
11.5.2017 0:00
16.5.2017 0:00
21.5.2017 0:00
26.5.2017 0:00
31.5.2017 0:00
Kuiva-aine
Polttolipeä
Tuorehöyryvirtaus

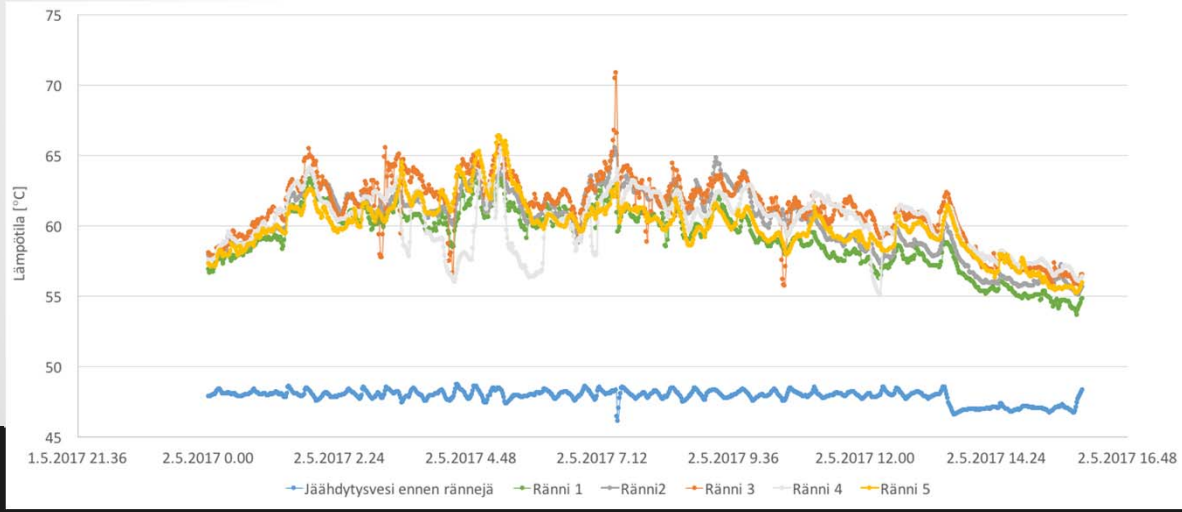
Äänekoski

		Ränni				
		1	2	3	4	5
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	51,3	51,7	52,5	52,4	51,9
	k-a	55,8	56,7	57,4	57,5	56,8
	max	63,8	65,7	70,9	65,7	66,4
Lämpötilan nousu [°C]	min	3,8	4,2	4,8	4,6	3,8
	k-a	7,2	8,1	8,8	8,9	8,2
	max	15,5	18,6	22,6	18,6	18,5
Lämpöteho [kW]	min	23,3	25,9	30,0	28,3	23,6
	k-a	44,8	50,3	54,8	55,3	51,1
	max	96,0	115,5	140,3	115,2	115,0
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-13,0	-14,1	-28,5	-13,0	-15,0
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	19,1	16,9	26,6	15,5	27,5

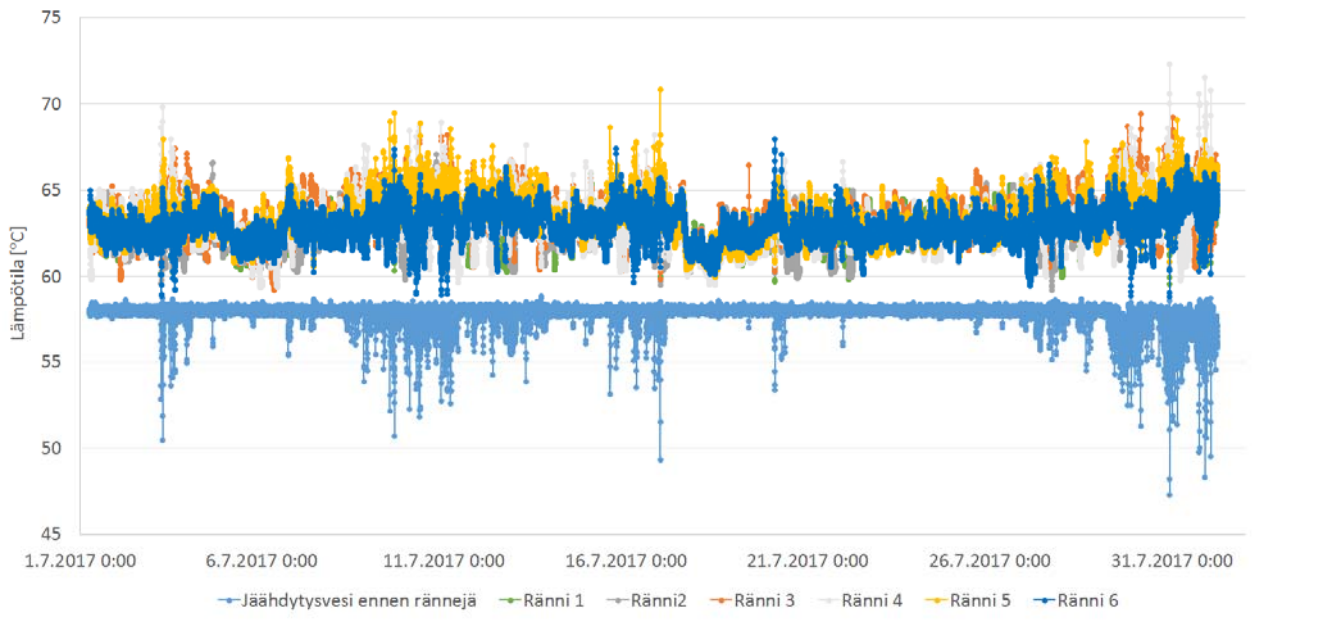
		Ränni				
Muutos vähintään		1	2	3	4	5
10	kW/min	50	15	89	13	58
20	kW/min	0	0	6	0	1
30	kW/min	0	0	0	0	0
40	kW/min	0	0	0	0	0
50	kW/min	0	0	0	0	0
40	%	1	0	6	0	1
50	%	0	0	1	0	1
60	%	0	0	0	0	0
80	%	0	0	0	0	0
100	%	0	0	0	0	0

Äänekoski

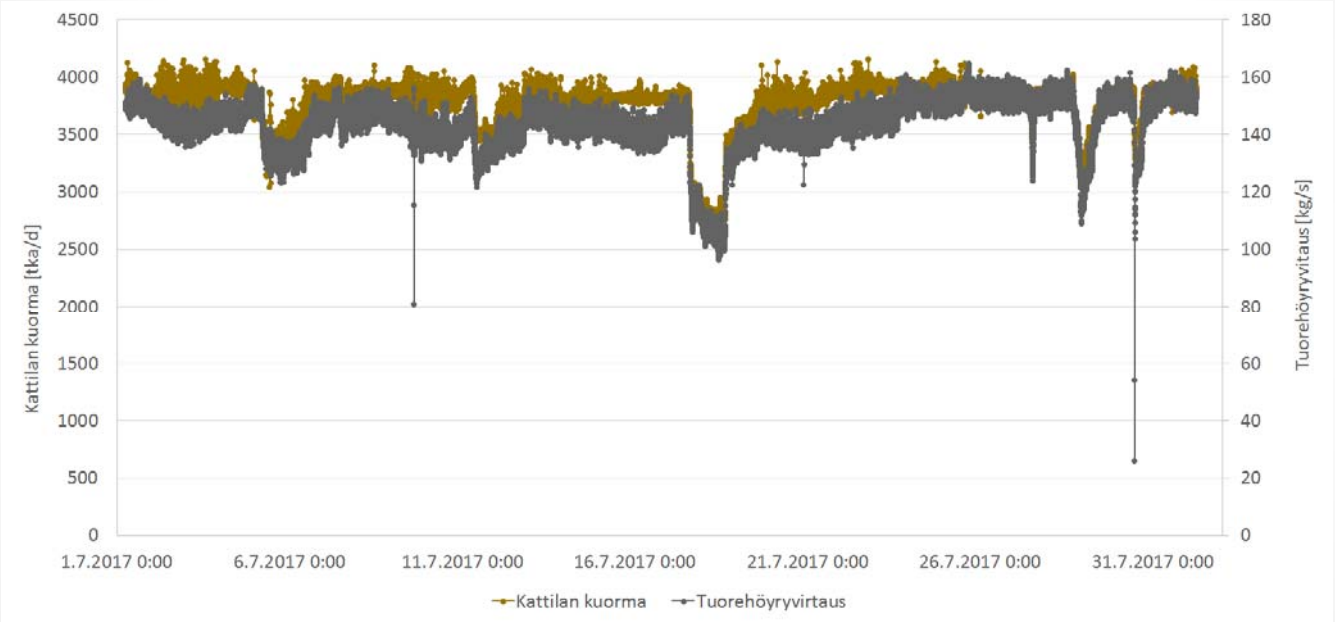
- Ei yhtään tukkeutumiskertaa yhdessäkään rännissä
- Keskimääräinen lämpötilannousu suuri, yli 8 ºC
- Ei suuria nopeita kuormanmuutoksia tarkastelujaksolla
- Maksimiulostulolämpötila hieman yli 70 ºC (ränni 3), alla kuva tilanteesta



Joutseno


75
70
65
60
55
50
45
Lämpötila [°C]
1.7.2017 0:00
6.7.2017 0:00
11.7.2017 0:00
16.7.2017 0:00
21.7.2017 0:00
26.7.2017 0:00
31.7.2017 0:00
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5
Ränni 6

Joutseno


4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Kattilan kuorma [tka/d]
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Tuorehöyryvitaus [kg/s]
1.7.2017 0:00
6.7.2017 0:00
11.7.2017 0:00
16.7.2017 0:00
21.7.2017 0:00
26.7.2017 0:00
31.7.2017 0:00
Kattilan kuorma
Tuorehöyryvirtaus

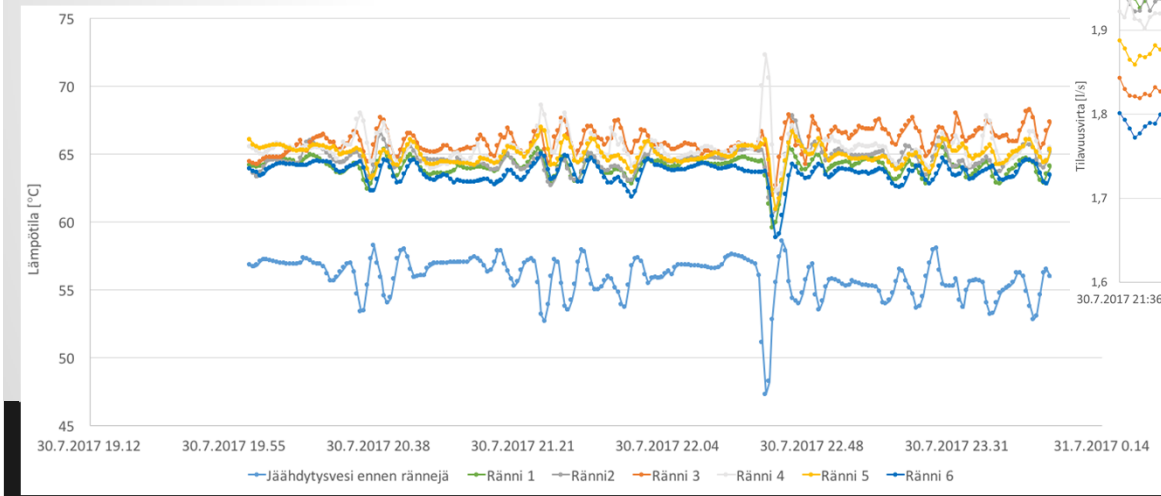
Joutseno

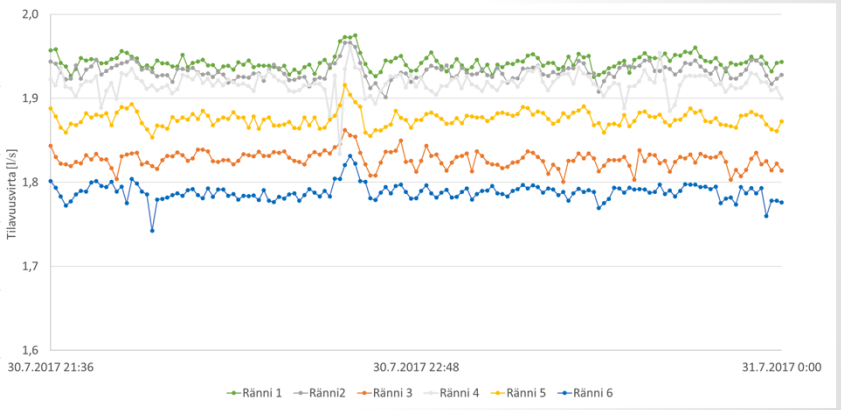
		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	1,90	1,90	1,79	1,78	1,80	1,70
	k-a	1,94	1,94	1,85	1,93	1,89	1,79
	max	1,99	1,97	1,90	1,98	1,93	1,85
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	59,6	59,2	59,2	59,4	60,0	58,9
	k-a	63,1	62,9	63,3	63,1	63,3	62,9
	max	66,6	67,8	69,4	72,3	70,8	68,0
Lämpötilan nousu [°C]	min	1,8	1,5	1,1	1,2	1,9	1,4
	k-a	5,2	5,0	5,5	5,2	5,5	5,1
	max	16,1	16,7	18,4	23,3	18,9	16,9
Lämpöteho [kW]	min	14,9	12,2	8,7	10,0	14,8	10,4
	k-a	42,0	40,4	41,7	41,7	43,0	37,6
	max	131,4	136,0	141,8	187,0	148,7	125,5
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-51,2	-47,6	-46,0	-65,8	-47,4	-46,2
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	52,1	53,3	54,7	61,7	61,7	51,0

Muutos vähintään		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
10	kW/min	452	478	482	527	454	392
20	kW/min	95	97	98	126	102	78
30	kW/min	32	30	27	44	35	19
40	kW/min	8	7	8	20	11	3
50	kW/min	2	1	1	6	2	1
40	%	150	169	151	190	133	159
50	%	84	97	86	117	87	95
60	%	51	58	46	74	54	52
80	%	24	22	19	30	22	19
100	%	6	7	5	16	5	5

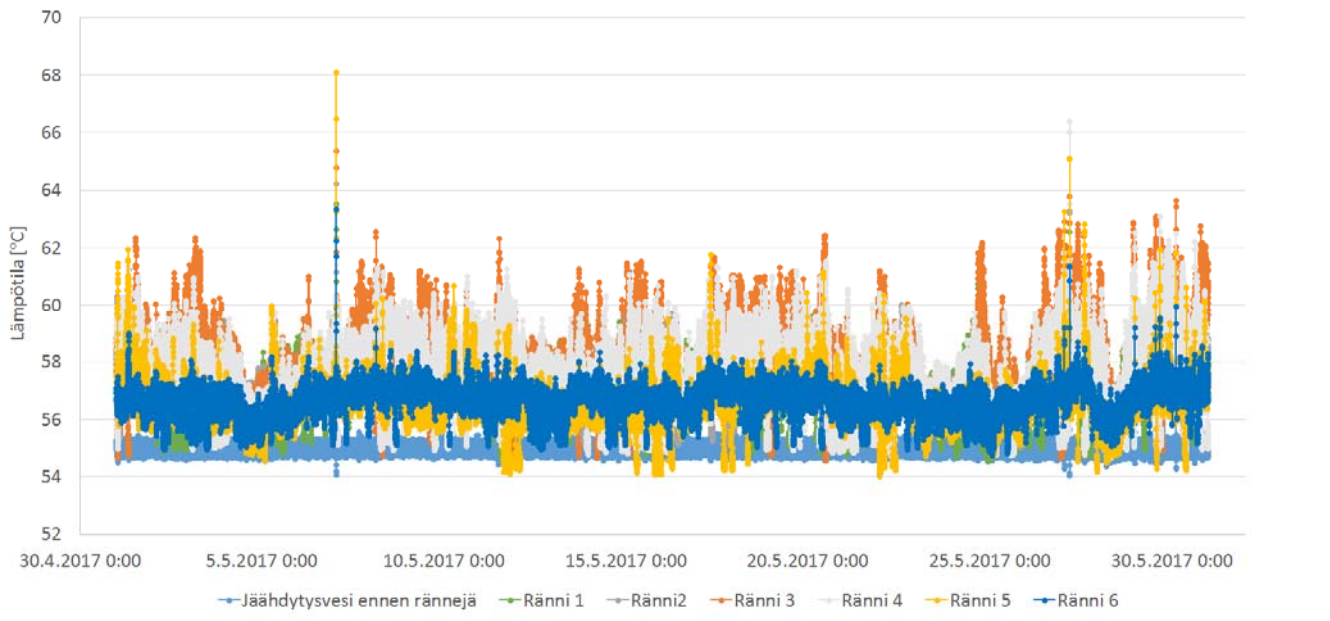
Joutseno

- Oletettavasti jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan nopea heilahtelu vääristää laskennan tuloksia
- Virtaus säilynyt hyvin tasaisena läpi tarkastelujakson
  - Kuitenkin lämpötilapiikkien yhteydessä virtaus notkahtaa noin 5 % normaalia alhaisemmaksi

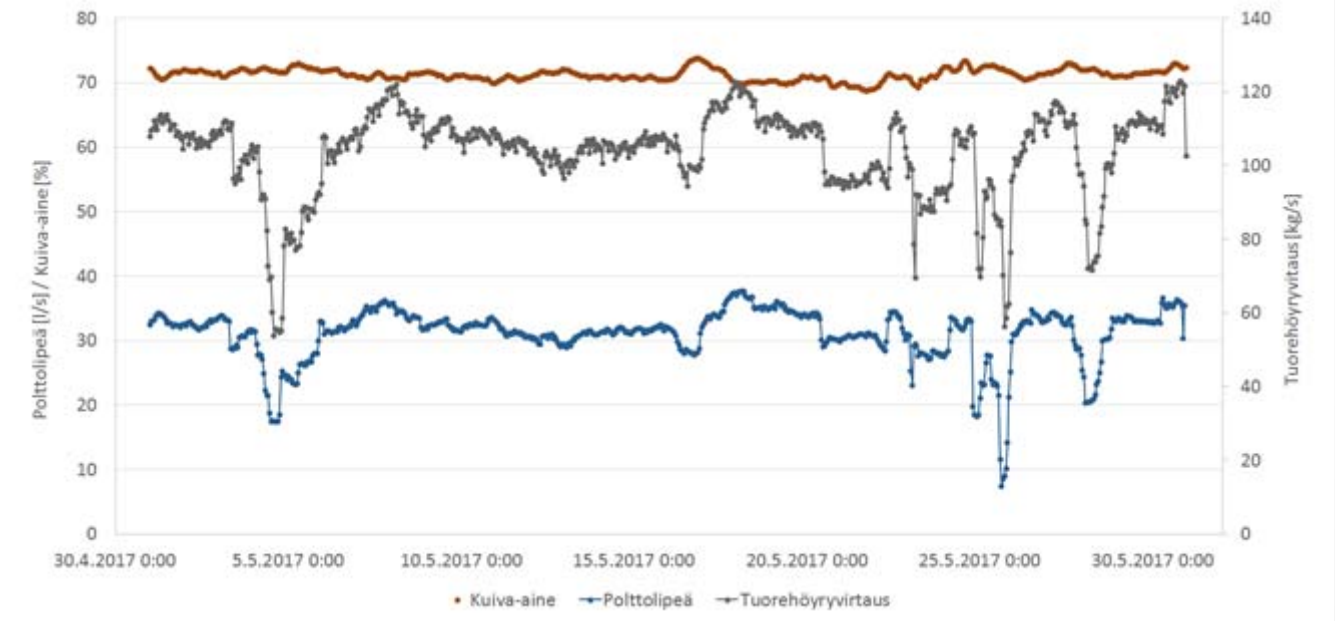




Enocell


70
68
66
64
62
60
58
56
54
52
Lämpötila [°C]
30.4.2017 0:00
5.5.2017 0:00
10.5.2017 0:00
15.5.2017 0:00
20.5.2017 0:00
25.5.2017 0:00
30.5.2017 0:00
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5
Ränni 6

Enocell


80
70
60
50
40
30
20
10
0
Polttolipeä [l/s] / Kuiva-aine [%]
140
120
100
80
60
40
20
0
Tuorehöyryvirtaus [kg/s]
30.4.2017 0:00
5.5.2017 0:00
10.5.2017 0:00
15.5.2017 0:00
20.5.2017 0:00
25.5.2017 0:00
30.5.2017 0:00
Kuiva-aine
Polttolipeä
Tuorehöyryvirtaus

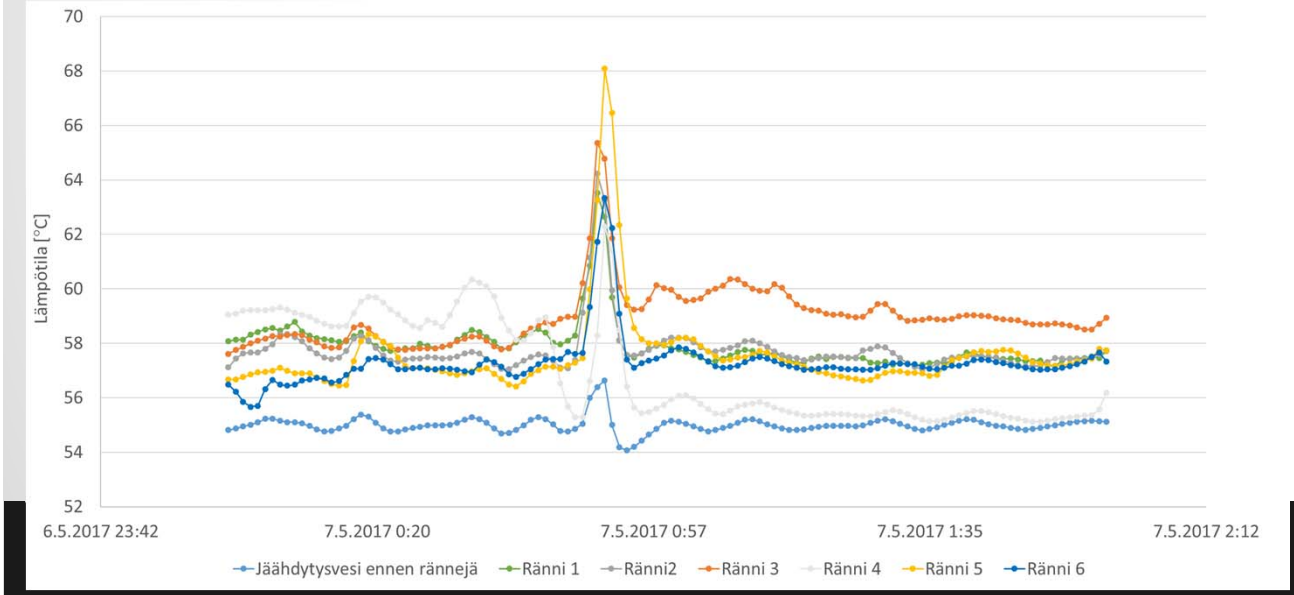
Enocell

		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
	k-a	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
	max	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	54,5	55,0	54,6	54,7	54,0	54,7
	k-a	57,4	57,3	58,1	57,7	56,5	56,6
	max	63,5	64,2	65,4	66,4	68,1	63,3
Lämpötilan nousu [°C]	min	-0,1	0,4	-0,2	-0,1	-0,7	0,1
	k-a	2,4	2,3	3,1	2,7	1,5	1,6
	max	7,1	7,8	9,0	10,8	11,7	6,9
Lämpöteho [kW]	min	-1,3	3,9	-2,7	-0,6	-7,5	0,9
	k-a	26,1	25,6	33,9	29,9	16,9	17,9
	max	78,1	85,9	98,3	118,5	128,3	76,2
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-18,5	-18,5	-26,7	-24,4	-27,4	-16,8
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	33,9	41,9	42,6	44,7	73,5	33,3

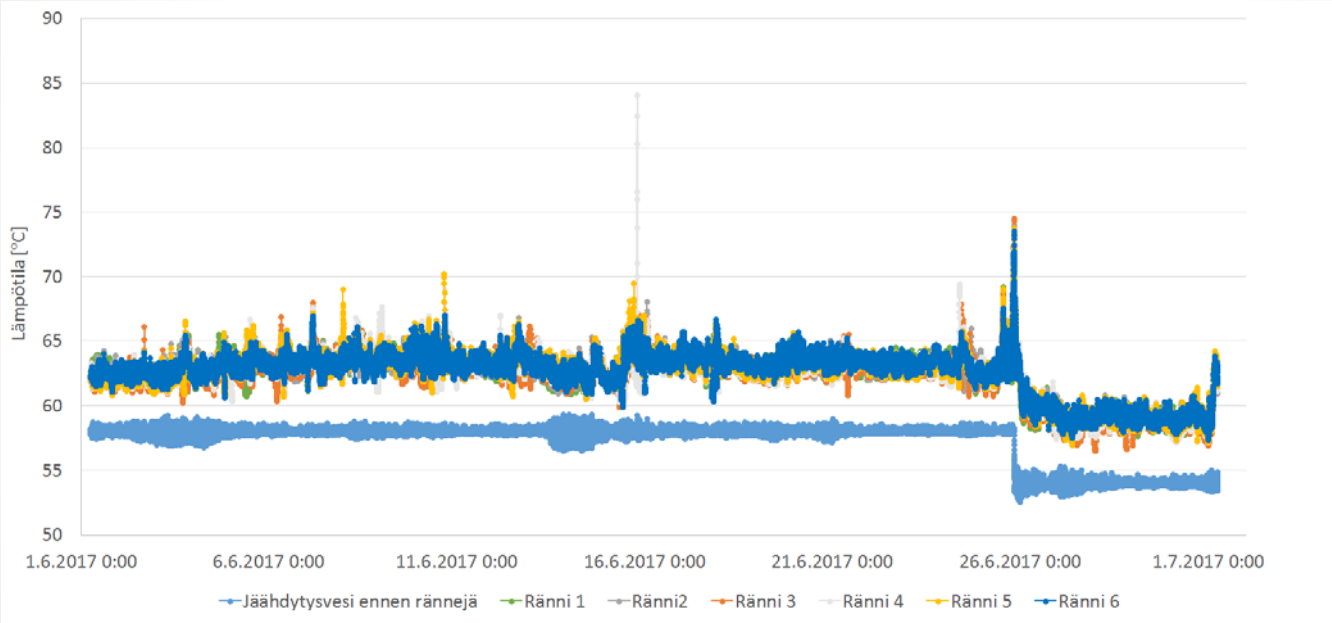
Muutos vähintään		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
10	kW/min	156	53	150	419	103	19
20	kW/min	3	4	19	46	23	1
30	kW/min	1	1	3	7	4	1
40	kW/min	0	1	1	1	2	0
50	kW/min	0	0	0	0	1	0
40	%	140	50	68	276	252	53
50	%	48	25	41	148	150	25
60	%	16	13	19	79	99	18
80	%	3	4	3	20	50	10
100	%	1	2	2	7	35	3

Enocell

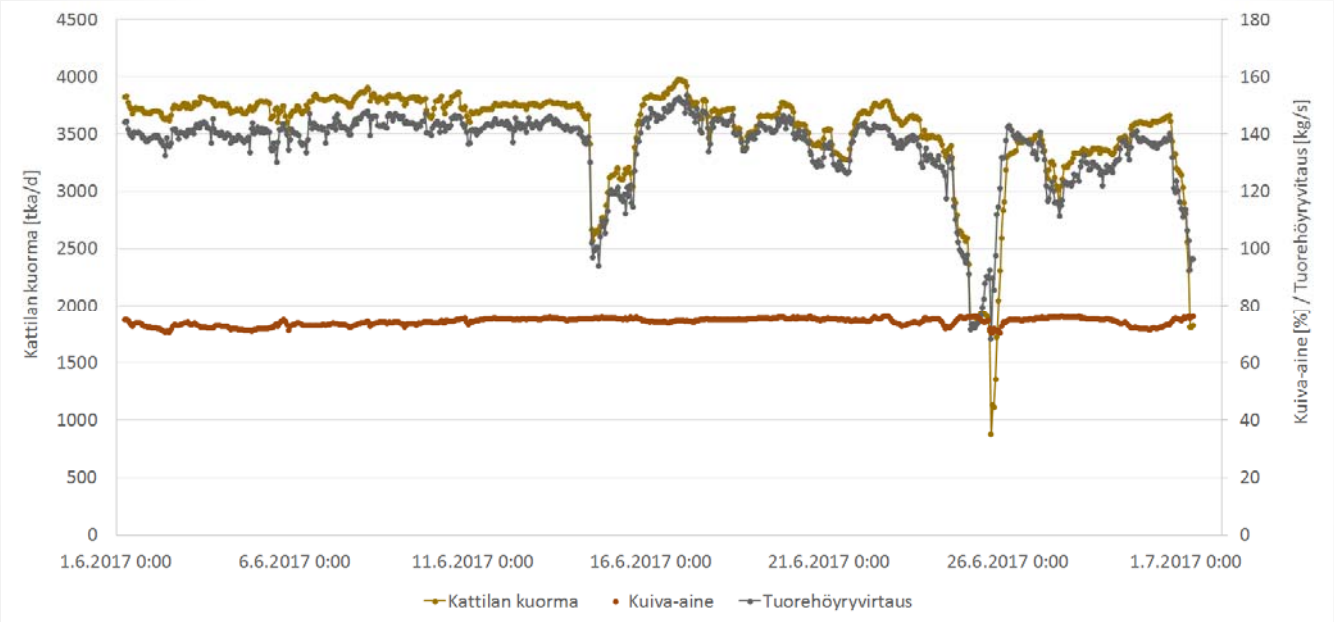
- Paljon tukkeutumisia
- Keskimääräinen lämpötilannousu pieni, maksimipiikissä lämpötilannousu jopa nelinkertainen keskimääräiseen verrattuna (kuva)



Kaukas


90
85
80
75
70
65
60
55
50
Lämpötila [°C]
1.6.2017 0:00
6.6.2017 0:00
11.6.2017 0:00
16.6.2017 0:00
21.6.2017 0:00
26.6.2017 0:00
1.7.2017 0:00
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5
Ränni 6

Kaukas


4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Kattilan kuorma [tka/d]
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Kuiva-aine [%] / Tuorehöyryvitaus [kg/s]
1.6.2017 0:00
6.6.2017 0:00
11.6.2017 0:00
16.6.2017 0:00
21.6.2017 0:00
26.6.2017 0:00
1.7.2017 0:00
Kattilan kuorma
Kuiva-aine
Tuorehöyryvirtaus

Kaukas

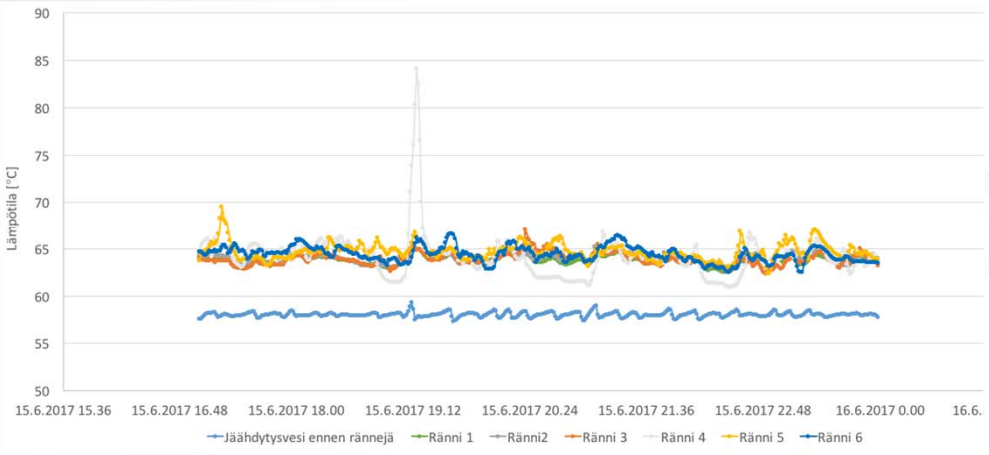
		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	1,48	1,48	1,35	0,43	1,35	1,45
	k-a	1,78	1,79	1,65	1,76	1,62	1,76
	max	1,82	1,84	1,72	1,82	1,68	1,85
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	57,1	57,4	56,5	57,0	57,0	57,4
	k-a	62,3	62,3	62,2	62,3	62,4	62,5
	max	73,2	74,0	74,5	84,1	73,8	73,5
Lämpötilan nousu [°C]	min	2,5	2,6	1,7	1,8	2,4	1,9
	k-a	5,0	5,0	4,9	5,0	5,2	5,2
	max	15,4	16,2	16,6	26,6	16,1	16,2
Lämpöteho [kW]	min	18,8	19,4	11,7	13,5	16,1	13,9
	k-a	36,7	37,2	33,3	36,7	34,5	37,9
	max	100,7	108,1	101,1	122,7	98,4	105,1
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-7,3	-17,2	-12,8	-45,4	-8,7	-9,2
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	14,2	16,8	20,6	55,4	14,3	14,7

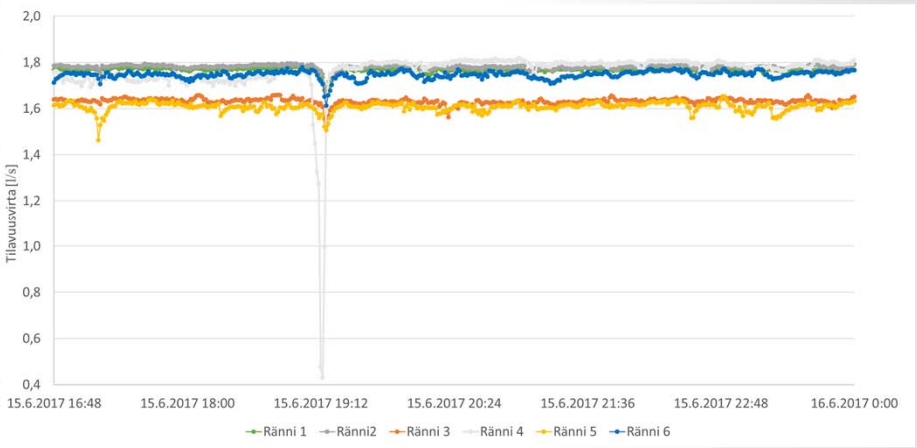
Muutos vähintään		Ränni					
		1	2	3	4	5	6
10	kW/min	62	74	56	86	55	79
20	kW/min	0	0	1	6	0	0
30	kW/min	0	0	0	3	0	0
40	kW/min	0	0	0	2	0	0
50	kW/min	0	0	0	1	0	0
40	%	0	3	6	11	4	0
50	%	0	0	3	6	0	0
60	%	0	0	1	4	0	0
80	%	0	0	0	3	0	0
100	%	0	0	0	2	0	0

Kaukas

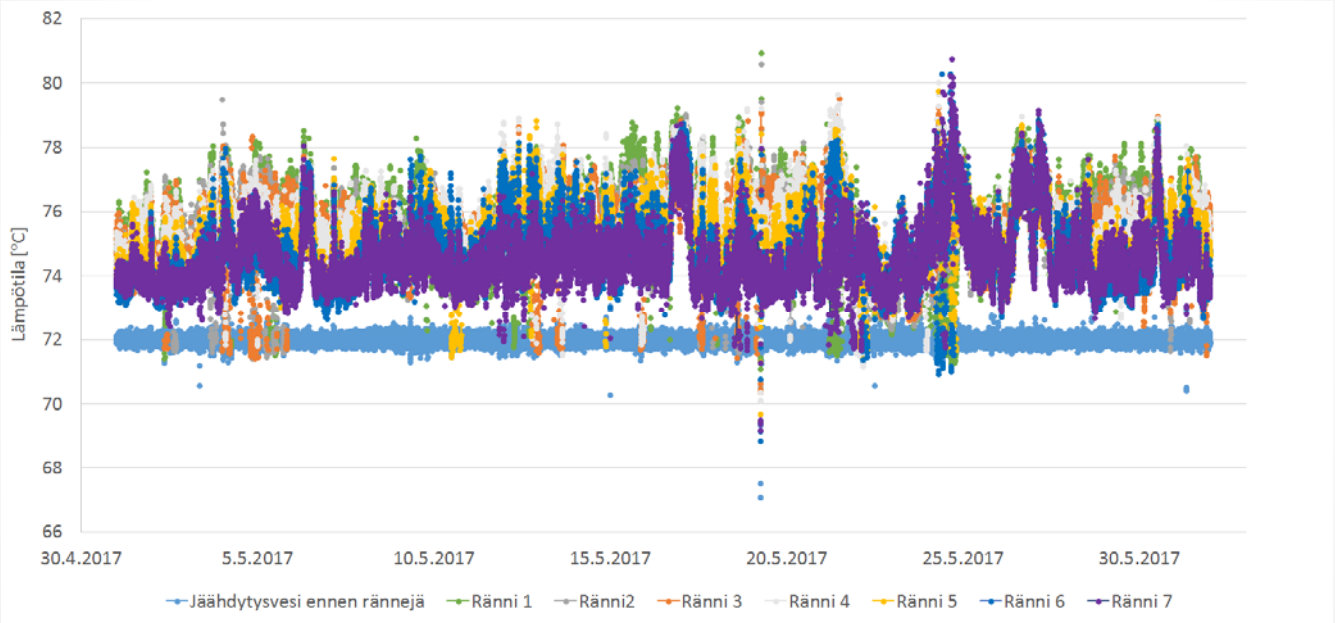
- Yhdessä lämpötilapiikissä kourun 4 lämpötila noussut lähelle kiehumispistettä, virtaushäiriö samaan aikaan (kuvat seuraavalla dialla)
  - Jäähdytysveden höyrystyminen virtaushäiriön aiheuttajana?
- Jäähdytysvesivirtauksessa muutenkin vaihtelu suurempaa kuin esimerkiksi Joutsenossa
  - Lämpötilapiikeissä vastaava ilmiö, eli virtaus notkahtaa, muutos hetkellisesti noin 10 % normaalivirtauksesta
- Loppukuun lämpötilapiikki tehonnoston yhteydessä

Kaukas


Lämpötila [°C]
90
85
80
75
70
65
60
55
50
15.6.2017 15.36
15.6.2017 16.48
15.6.2017 18.00
15.6.2017 19.12
15.6.2017 20.24
15.6.2017 21.36
15.6.2017 22.48
16.6.2017 0.00
16.6.
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5
Ränni 6


Tilavuusvirta [l/s]
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
15.6.2017 16:48
15.6.2017 18:00
15.6.2017 19:12
15.6.2017 20:24
15.6.2017 21:36
15.6.2017 22:48
16.6.2017 0:00
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5
Ränni 6

Kymi

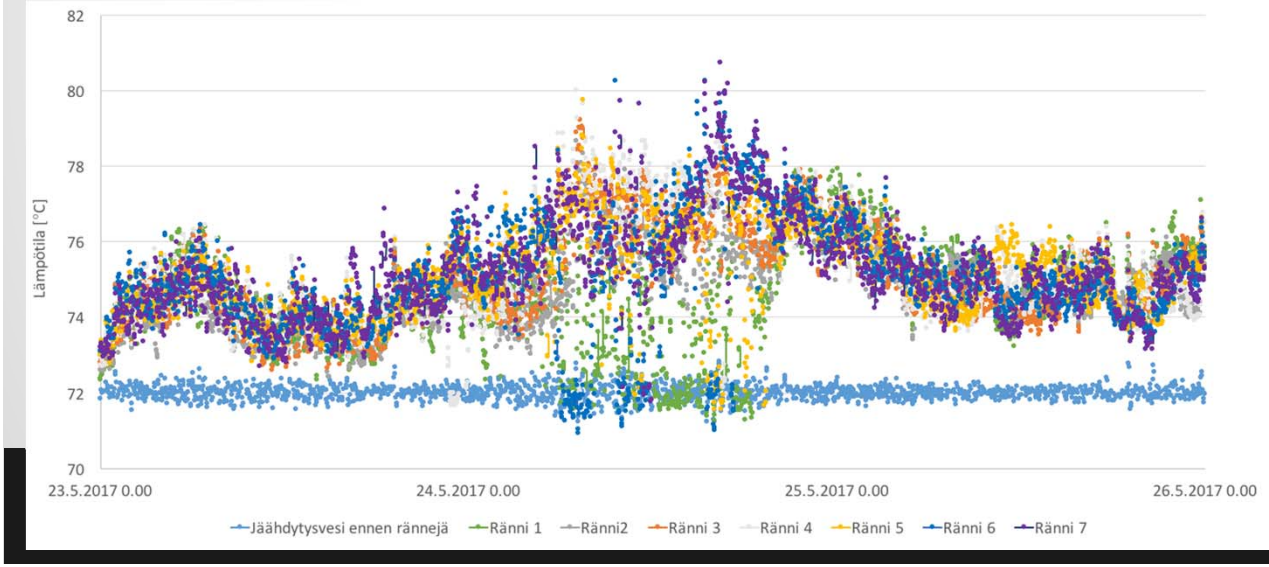

82
80
78
76
74
72
70
68
66
Lämpötila [°C]
30.4.2017
5.5.2017
10.5.2017
15.5.2017
20.5.2017
25.5.2017
30.5.2017
Jäähdytysvesi ennen rännejä
Ränni 1
Ränni2
Ränni 3
Ränni 4
Ränni 5
Ränni 6
Ränni 7

Kymi

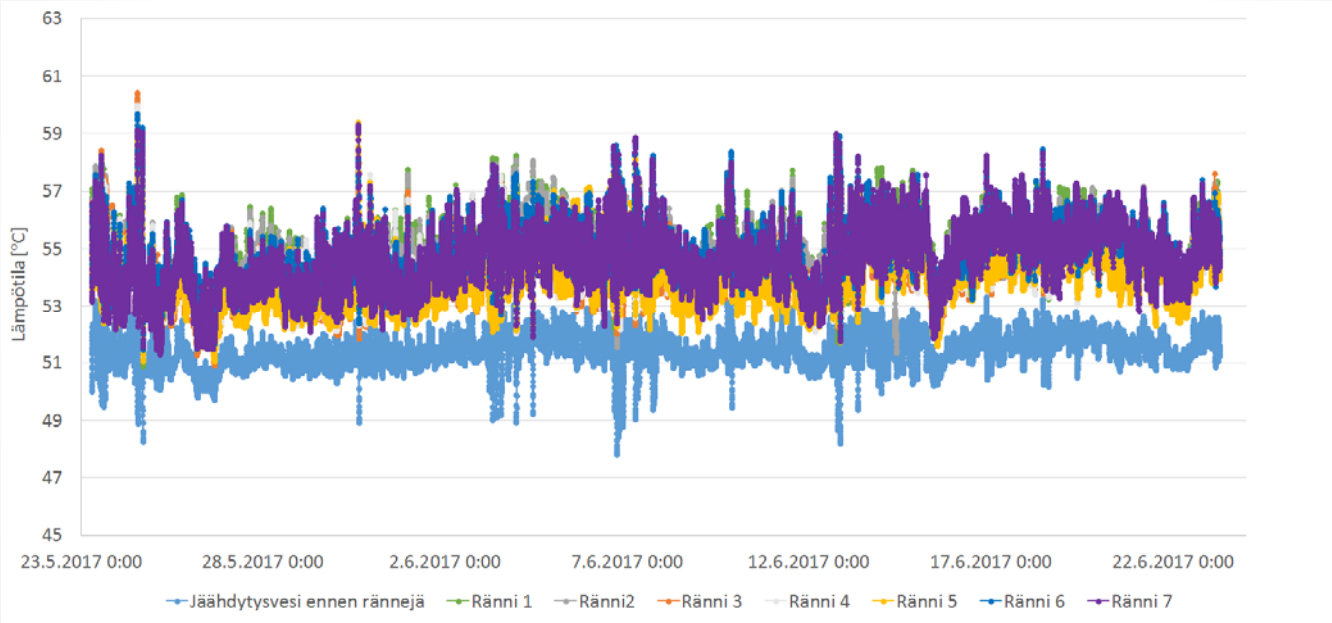
		Ränni						
		1	2	3	4	5	6	7
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	2,85	2,76	2,79	2,68	2,83	2,74	2,75
	k-a	2,91	2,81	2,84	2,76	2,87	2,79	2,81
	max	2,94	2,85	2,89	2,79	2,91	2,82	2,85
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	71,1	70,5	70,3	70,1	69,4	68,8	69,2
	k-a	75,6	75,5	75,4	75,5	75,2	74,8	74,6
	max	80,9	80,6	79,5	80,0	79,7	80,3	80,7
Lämpötilan nousu [°C]	min	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-1,1	-1,7	-1,7
	k-a	3,6	3,5	3,4	3,5	3,2	2,8	2,6
	max	7,7	7,4	7,5	7,9	7,6	8,4	8,9
Lämpöteho [kW]	min	-9,2	-8,3	-8,4	-8,7	-12,8	-19,5	-20,0
	k-a	43,8	40,6	40,0	40,3	38,5	32,6	30,2
	max	92,9	86,1	88,2	90,7	90,6	96,4	103,3

Kymi

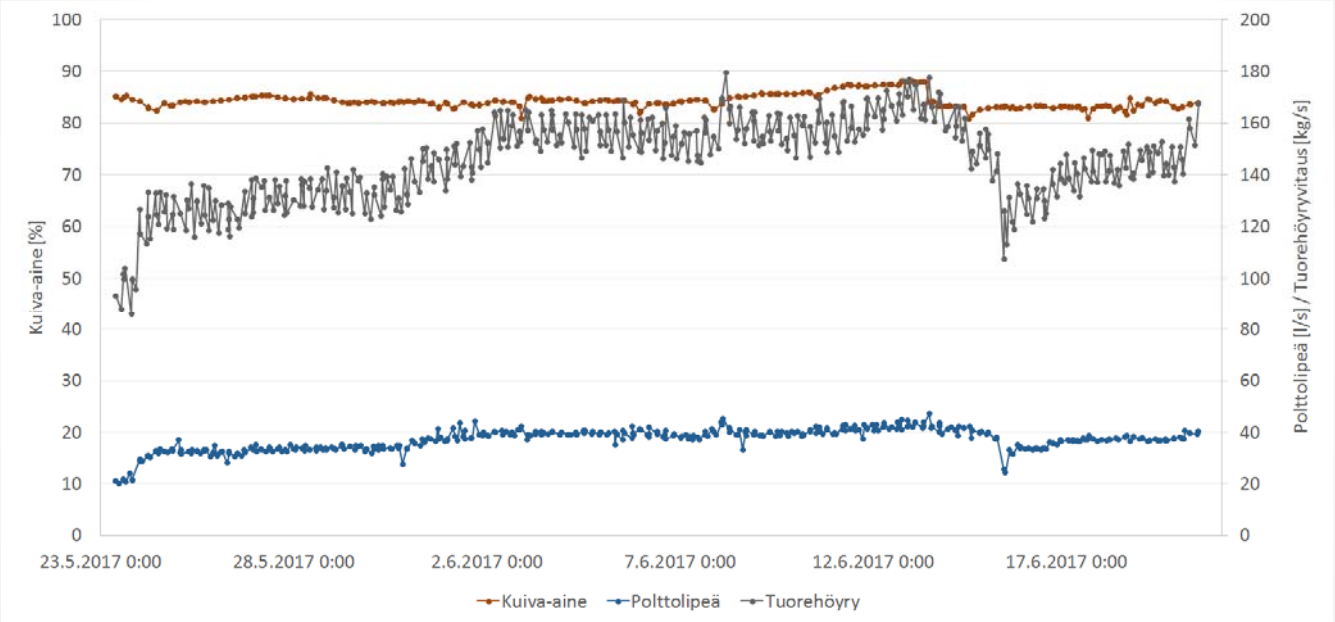
- Datassa vaihteleva mittausväli, lämpörasitusten muutoksia ei tästä syystä taulukoitu
- Joitakin tukkeutumiskertoja, kuvassa esimerkkitilanne, jossa useampi ränni ollut tukossa. Muissa ränneissä tällöin lämpötilan nousu suurempi



Pietarsaari



Pietarsaari



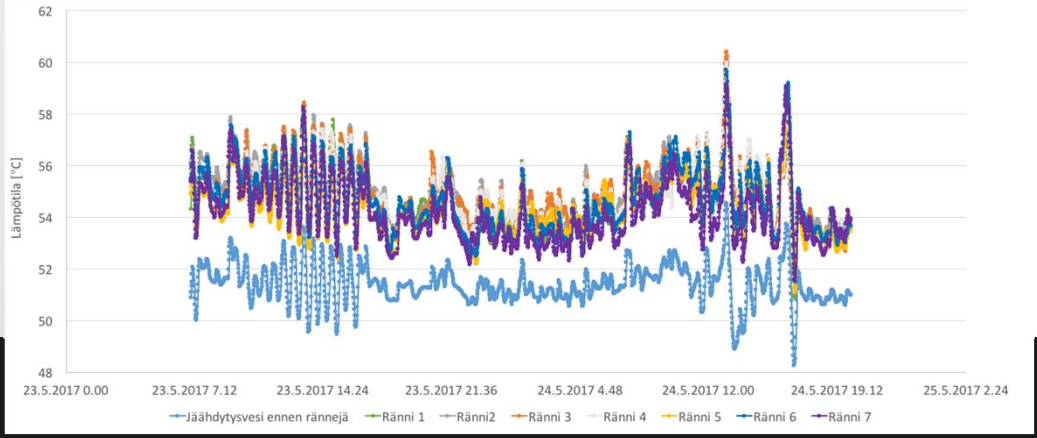
Pietarsaari

		Ränni						
		1	2	3	4	5	6	7
Jäähdytysveden virtaus [l/s]	min	1,97	2,05	2,37	2,36	2,43	2,37	2,36
	k-a	2,01	2,09	2,42	2,41	2,48	2,42	2,41
	max	2,03	2,12	2,45	2,44	3,00	2,47	2,45
Jäähdytysveden lämpötila [°C]	min	50,9	51,2	50,9	51,1	51,0	51,5	51,3
	k-a	54,7	54,6	54,1	54,2	54,0	54,8	54,6
	max	59,3	60,1	60,4	60,0	59,4	59,7	59,3
Lämpötilan nousu [°C]	min	1,5	0,3	1,1	1,4	1,3	1,5	1,2
	k-a	3,3	3,2	2,7	2,8	2,6	3,4	3,2
	max	5,7	6,6	6,6	6,0	6,3	7,3	7,4
Lämpöteho [kW]	min	12,5	2,9	10,8	13,7	13,0	15,5	11,8
	k-a	27,1	28,0	27,5	27,8	26,7	33,8	31,7
	max	47,4	57,2	64,8	59,4	64,5	72,6	74,0
Lämpötehon muutos [kW/min]	min	-5,4	-8,2	-7,6	-7,2	-8,3	-7,2	-11,0
	k-a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	max	10,7	11,8	10,5	13,6	13,0	16,9	18,6

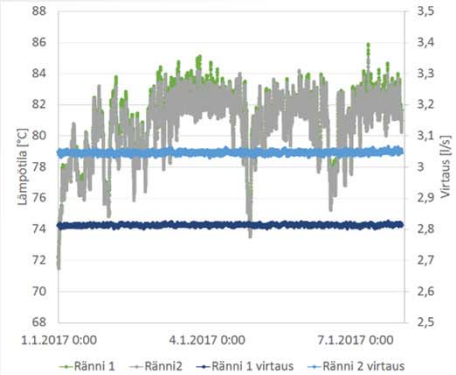
		Ränni						
Muutos vähintään		1	2	3	4	5	6	7
10	kW/min	1	5	4	11	15	16	22
20	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
30	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
40	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
50	kW/min	0	0	0	0	0	0	0
40	%	0	1	0	4	9	4	4
50	%	0	0	0	0	0	0	1
60	%	0	0	0	0	0	0	0
80	%	0	0	0	0	0	0	0
100	%	0	0	0	0	0	0	0

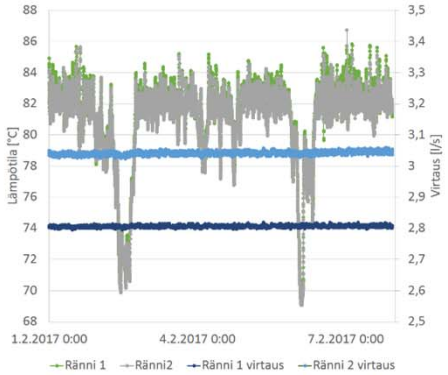
Pietarsaari

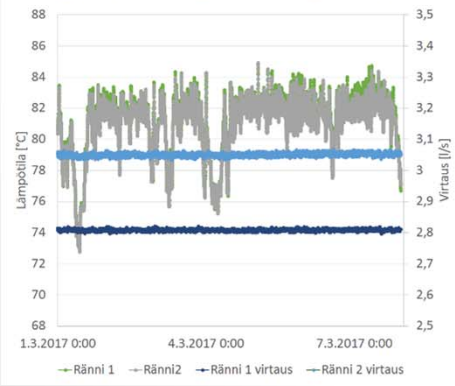
- Jäähdytysveden sisäänmenolämpötila vaihdellut melko paljon
- Virtaus ollut hyvin tasainen, rännin 5 maksimipiikki 3 l/s oletettavasti jokin häiriö mittauksessa, sillä kyseessä yksittäinen minuutti
  - Kuitenkin rännien välillä suurehkoja eroja virtauksissa
- Kuvan mukaisesti sulavirtaus vaikuttaa jakautuvan melko tasaisesti eri rännien välille

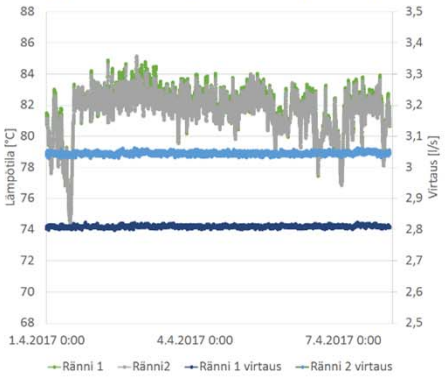


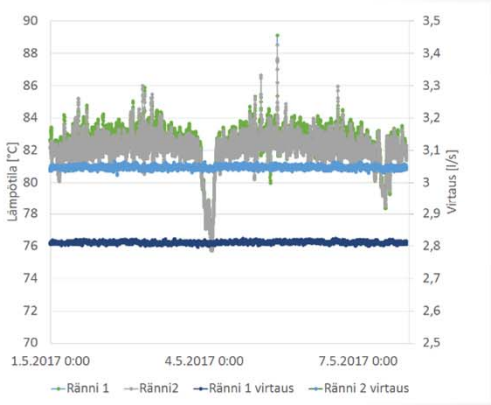
Kotkamills


Lämpötila [°C]
Virtaus [l/s]
1.1.2017 0:00
4.1.2017 0:00
7.1.2017 0:00
Ränni 1
Ränni2
Ränni 1 virtaus
Ränni 2 virtaus


Lämpötila [°C]
Virtaus [l/s]
1.2.2017 0:00
4.2.2017 0:00
7.2.2017 0:00
Ränni 1
Ränni2
Ränni 1 virtaus
Ränni 2 virtaus

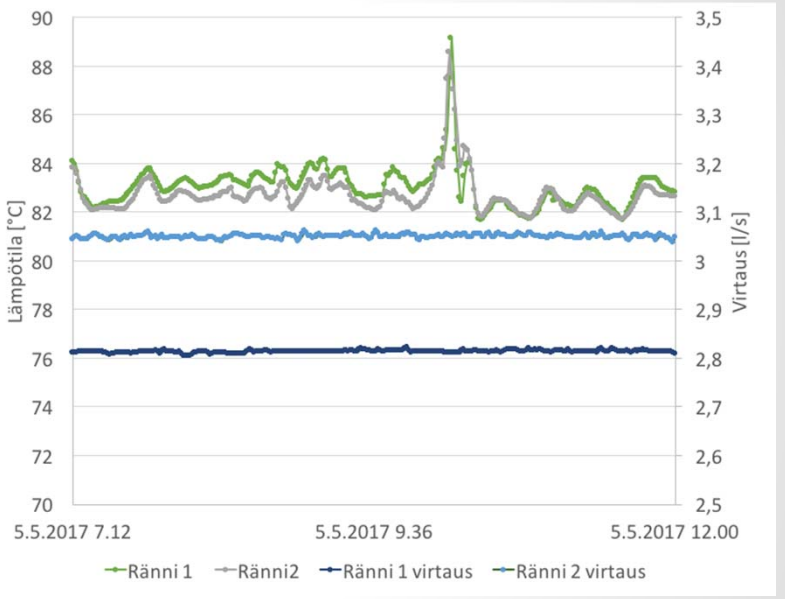

Lämpötila [°C]
Virtaus [l/s]
1.3.2017 0:00
4.3.2017 0:00
7.3.2017 0:00
Ränni 1
Ränni2
Ränni 1 virtaus
Ränni 2 virtaus


Lämpötila [°C]
Virtaus [l/s]
1.4.2017 0:00
4.4.2017 0:00
7.4.2017 0:00
Ränni 1
Ränni2
Ränni 1 virtaus
Ränni 2 virtaus


Lämpötila [°C]
Virtaus [l/s]
1.5.2017 0:00
4.5.2017 0:00
7.5.2017 0:00
Ränni 1
Ränni2
Ränni 1 virtaus
Ränni 2 virtaus

Kotkamills

- Jäähdytysveden sisäänmenolämpötilan puute hankaloittaa tarkastelua
  - Ei voi laskea tukkeutumiskertoja, lämpötilan nousua rännissä yms.
- Monessa lämpötilapiikissä molemmat rännit piikanneet samaan aikaan (kuva)



Kokonaislämpörasitus

Lämpötehon muutokset (1/5)

		Lämpötehon muutos yli 10 kW/min						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	452	478	482	527	454	392	
Äänekoski	Mill A	50	15	89	13	58		
Enocell	Mill E	156	53	150	419	103	19	
Sunila SK10	Mill H1	418		169				
Sunila SK11	Mill H2	142	259	267	121			
Kaukas	Mill K	62	74	56	86	55	79	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	1	5	4	11	15	16	22
Sunila SK11 2016		226	299	278	188			

Lämpötehon muutokset (2/5)

		Lämpötehon muutos yli 20 kW/min						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	95	97	98	126	102	78	
Äänekoski	Mill A	0	0	6	0	1		
Enocell	Mill E	3	4	19	46	23	1	
Sunila SK10	Mill H1	57		25				
Sunila SK11	Mill H2	63	79	70	25			
Kaukas	Mill K	0	0	1	6	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	0	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		136	144	104	55			

Lämpötehon muutokset (3/5)

		Lämpötehon muutos yli 30 kW/min						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	32	30	27	44	35	19	
Äänekoski	Mill A	0	0	0	0	0		
Enocell	Mill E	1	1	3	7	4	1	
Sunila SK10	Mill H1	18		14				
Sunila SK11	Mill H2	7	11	7	1			
Kaukas	Mill K	0	0	0	3	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	0	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		26	40	7	5			

Lämpötehon muutokset (4/5)

		Lämpötehon muutos yli 40 kW/min						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	8	7	8	20	11	3	
Äänekoski	Mill A	0	0	0	0	0		
Enocell	Mill E	0	1	1	1	2	0	
Sunila SK10	Mill H1	4		7				
Sunila SK11	Mill H2	1	1	2	0			
Kaukas	Mill K	0	0	0	2	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	0	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		6	5	4	5			

Lämpötehon muutokset (5/5)

		Lämpötehon muutos yli 50 kW/min						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	2	1	1	6	2	1	
Äänekoski	Mill A	0	0	0	0	0		
Enocell	Mill E	0	0	0	0	1	0	
Sunila SK10	Mill H1	3		3				
Sunila SK11	Mill H2	0	0	1	0			
Kaukas	Mill K	0	0	0	1	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	0	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		6	5	4	5			

Tukkeutumiset

Tukkeutumiskerrat [kpl]
(Ränniveteen siirtynyt teho alle 5 kW)

		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	0	0	0	0	0	0	
Äänekoski	Mill A	0	0	0	0	0		
Enocell	Mill E	78	28	20	159	130	107	
Sunila SK10	Mill H1	69		8				
Sunila SK11	Mill H2	251	57	48	211			
Kaukas	Mill K	0	0	0	0	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	3	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		131	90	84	120			

Kokonaisrasitus (1/2)

- $\dot{q}_{\mathrm{tot}} = a \cdot \dot{q}_{10} + b \cdot \dot{q}_{20} + c \cdot \dot{q}_{30} + d \cdot \dot{q}_{40} + e \cdot \dot{q}_{50} + f \cdot x_{\mathrm{tukk}}$
- Eri suuruiset muutokset skaalattu hypoteettisilla kertoimilla

a	1	10 kW muutokset
b	2	20 kW muutokset
c	3	30 kW muutokset
d	4	40 kW muutokset
e	5	50 kW muutokset
f	5	tukkeutuminen

Kokonaisrasitus (2/2)

		Kokonaisrasitus						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	780	795	796	1021	817	622	0
Äänekoski	Mill A	50	15	101	13	60	0	0
Enocell	Mill E	555	208	301	1331	824	559	0
Sunila SK10	Mill H1	962	0	344	0	0	0	0
Sunila SK11	Mill H2	1548	739	681	1229	0	0	0
Kaukas	Mill K	62	74	58	120	55	79	0
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	1	20	4	11	15	16	22
Sunila SK11 2016		1285	1202	963	958	0	0	0

Johtopäätökset

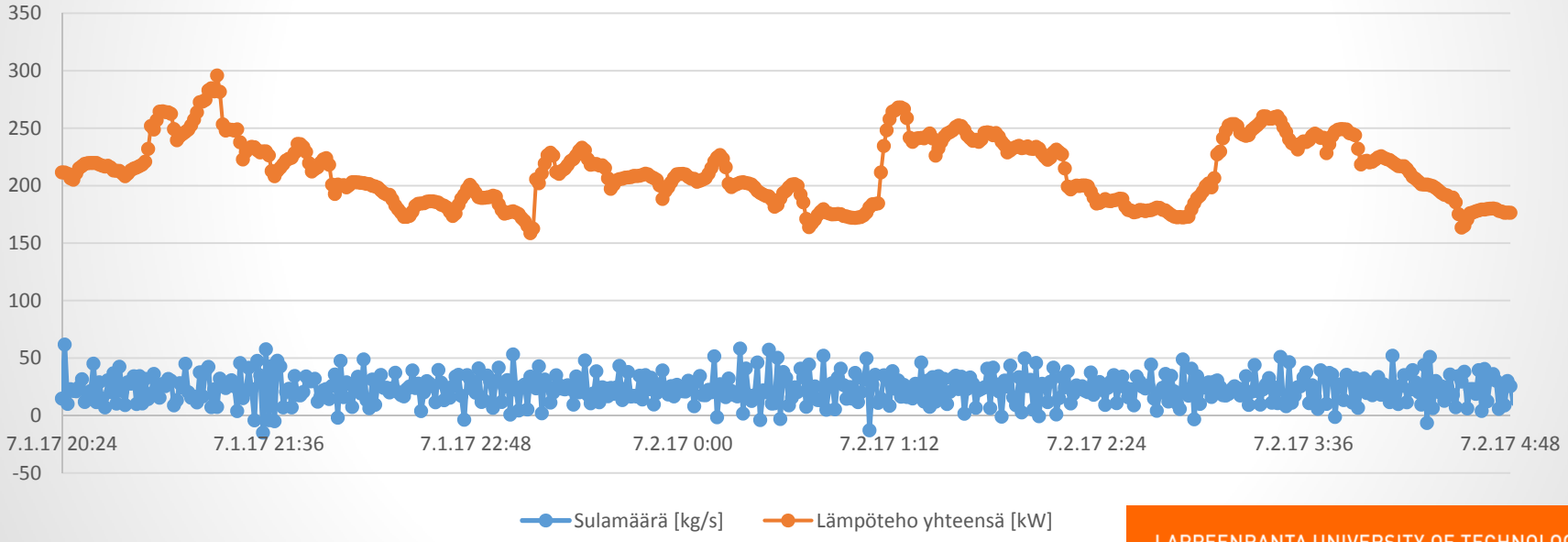
- Sunilassa lämpötehon muutoksia paljon, SK10:llä pitkät rännit osittain selittävänä tekijänä, sillä lämmönsiirtopinta-alaa pitkässä rännissä enemmän
- Kattilan kuormanmuutokset eivät tarkastelun perusteella ole merkittävässä roolissa sulasyöksyjen aiheutumisessa
- Kourumateriaalin lämpötilojen mittaaminen kourun eri kohdissa termoelementeillä vaatisi erikoisvalmisteisen kourun, mutta se antaisi arvokasta lisäinformaatiota mahdolliseen jäähdytysveden höyrystymiseen liittyen

(Liuottaja)

- Massataseeseen liittyvät epävarmuudet (tilavussvirrat, pinta, tiheys, ei-mitattavat virrat esim. hönkä) muodostavat haasteita sulavirran luotettavalle määrittämiselle liuottajan taseesta. Lisäksi pitäisi määrittää sulan jakautuminen kourukohtaisesti
- Seuraavan dian kuvan mukaisesti liuottajan pinnan erittäin pieni muutos muuttaa laskennallista sulamäärää merkittävästi. Toisaalta pinnan muutoksen huomiotta jättäminen tasoittaa laskennallisen sulavirran määrän.

(Liuottaja)

- Ote Joutsenon liuotinsäiliötaseen kautta lasketusta sulamäärästä ja rännien jäähdytysveteen siirtyneestä kokonaislämpötehosta



LIITE 6

LTR: ÅA, Understanding Low Temperature Corrosion in BL Combustion, Phase 3 - report 25.9.2017

Final Report - Understanding Low Temperature Corrosion in BL Combustion – Phase 3

Nikolai DeMartini, Emil Vainio
22 September 2017

Summary & Conclusions

Five precipitator ashes were obtained and analyzed by SEM-EDX. Of these five, three (Pietarsaari, Orange TX, Heinola) were used in 22h tests in which 100mg of ash was placed on a polished 2cmx2cm coupon of 16Mo3/5 and at temperatures of 60 °C to 110 °C. The gas used in this work was air containing 25 vol% H_2O. The three ashes tested were chosen to provide a high carbonate ash (Pietarsaari) an ash with some bisulfate (Heinola) and an ash from a low solids recovery boiler which has low to no Na_2CO_3 (Orange, TX). Based on these short-term tests, conditions were chosen for the 1000h test. One of the key conclusions of the 22h tests was the 16Mo3/5 is less susceptible to dew point corrosion under hygroscopic salts than ST45.8.



Figure 1. Sample holder used in the 1000h test. Note the thermocouples above the steel coupons. The samples at 120 °C are at the far left, the 100 °C samples are at the far right and the 105 °C samples are the samples in between.

For the 1000h test, the sample holder was modified to provide 3 temperatures and to hold 6 steel coupons (3 of 16Mo3/5 and 3 of ST45.8), Figure 1. The back element in the tube furnace was disconnected, which meant that there were different temperatures at different positions in the furnace. In this way, it was possible to get three different temperatures in one furnace run. The temperatures selected were 120 °C, 105 °C and 101 °C. The temperatures were measured by thermocouples positioned above the samples. The concentration of water was 25 vol-%. The 1000h test was run with the precipitator ash from Pietarsaari. The ash composition was (33.2% Na, 3.7% K, 44.6% SO_4, 0.7% Cl, 17.8% CO_3) based on SEM-EDX for Na, K, S, and Cl and CO_3 by balance.

The samples (unwashed and washed) after the 1000h test are shown in Figure 2. No corrosion was seen in any of the samples at any of the temperatures. We had seen in earlier tests with 1 precipitator ash [Holmblad, 2015; DeMartini, 2015] that no corrosion occurred after 24h in 27% H_2O at 100 °C. For the other ash tested in that study, there was very slight corrosion visible at 100 °C. These earlier results indicated that 100 °C is close to the borderline of corrosion, but none was seen in these tests. The other important observation is that these results are consistent with the 22h tests. This combined with the earlier study supports the idea that short tests 4-22h can be used to screen conditions. The results also indicate that steel temperatures of 100 to 110 °C should be possible without corrosion in 25 vol-% H_2O. The 22h tests results indicate that there is not a very big difference for boilers firing low solids black liquor (low carbonate, possibly some bisulfate) with those firing high solids black liquor (high carbonate). Thus significant additional thermal energy can be recovered from both modern and older recovery boilers.

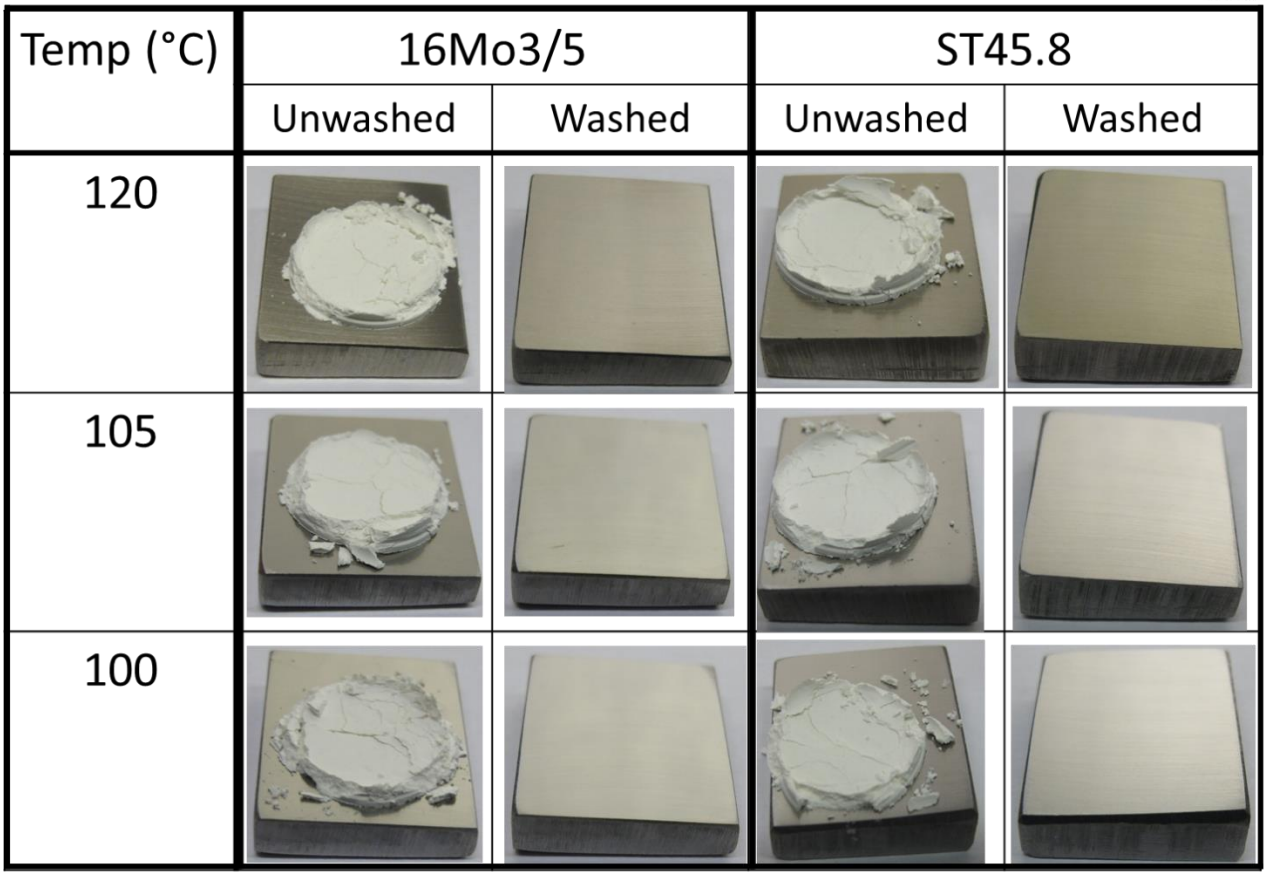


Figure 2. Samples after the 1000h test, both unwashed and washed.

Experimental

Precipitator Ashes

Precipitator ash samples were obtained from 5 mills and analyzed by SEM-EDX and titration, Table 1. For the high carbonate ash, the carbonate numbers from both a charge balance and titration agree reasonably well. The Heinola and Oragne, TX samples probably contain some carbonate as well as some bisulfate. The charge balance based on the Na, K, S, Cl analysis by SEM-EDX would indicate there is some carbonate present. However, SEM-EDX does not analyze H. Thus, the cation concentration could be higher so there must be some carbonate present. The 9.5 pH of the Orange, TX sample is only slightly alkaline indicating the presence of bisulfate. The Heinola sample is slightly on the acidic side indicating the presence of bisulfate and carbonate. The ash from Pietarsaari had the highest carbonate content based on the mass balance using the SEM-EDX results for Na, K, S and Cl. Three of the ashes Pietarsaari, Heinola and Orange, TX) and pure sodium sulfate were used in corrosion tests using 16Mo3. Sodium sulfate was also tested on ST45.8 to repeat the results of Holmblad [2015].

Table 2. Composition of ashes tested using SEM-EDX and titration. [a]CO_3 determined by charge balance in the SEM-EDX results. [b]CO_3 determined by titration.

	Na wt-%	K wt-%	SO_4 wt-%	Cl wt-%	CO_3 [a] wt-%	CO_3 [b] wt-%	pH	$S/(Na_2+K_2)$ mol frac
Pietasaari	33.2 %	3.7 %	44.6 %	0.7 %	17.8 %	14.1 %	11.353	0.60
Heinola	31.5 %	2.9 %	59.3 %	0.0 %	6.3 %	0	6.2	0.85
Orange, TX	32.1 %	1.8 %	60.8 %	0.4 %	5.0 %	0	9.5	0.88
Kymi	30.9 %	5.2 %	52.0 %	0.3 %	11.6 %	10.2 %	11.4	0.73
Rauma	31.7 %	4.2 %	51.9 %	0.7 %	11.6 %	11.5 %	11.4	0.73

22h runs

The three ashes chosen for the 22h tests were Pietarsaari, Heinola and Orange, TX. Pietarsaari was chosen as a high carbonate ash representing a modern recovery boiler firing high solids black liquor. The Orange, TX mill precipitator ash was chosen as an ash from an older boiler firing low solids black liquor. The Heinola precipitator ash was chosen as an ash with some bisulfate in it. Both sodium carbonate and bisulfate were found to be more hygroscopic than sodium sulfate [Holmblad, 2015] and so it was of interest to see if these ashes, which represented both ends of the extreme in terms of alkalinity, behaved differently.

For the corrosion experiments, we used a similar experimental approach as used by Henri Holmblad [2015] in our earlier dew point corrosion work, Figures 3 & 4. The modification, is that the last heating element in the tube furnace was disconnected to create a temperature gradient from the front to the back of the furnace. For the 22h runs, steel samples were placed in the front and back of a ceramic sample holder, Figure 5. The sample holder was positioned to give a temperature that was 15 °C lower for the back sample when compared to the front sample. In each of these runs, the same steel (16Mo/3 or ST45.8) was used in the front and back with the same salt, so the only variable was the temperature. The vol-% H_2O in all of the runs at 25 vol-%. The 16Mo3/5 was the recommended steel for these experiments. However, this steel showed less susceptibility to dew-point corrosion than the ST45.8 had in our earlier studies. For this reason, some runs were also carried out with ST45.8. The 22h experiments run are given in Table 3.

Table 3. Samples and temperatures run for the 22h tests.

Ash	Steel	Temperature (°C)	
Pietarsaari	16Mo3/5	110	95
Pietarsaari	16Mo3/5	105	90
Pietarsaari	16Mo3/5	90	75
Pietarsaari	16Mo3/5	75	60
Heinola	16Mo3/5	110	95
Heinola	16Mo3/5	105	90
Heinola	16Mo3/5	90	75
Orange, TX	16Mo3/5	110	95
Orange, TX	St45.8	110	95
Orange, TX	16Mo3/5	90	75
Na2SO4	16Mo3/5	90	75
Na2SO4	St45.8	90	75

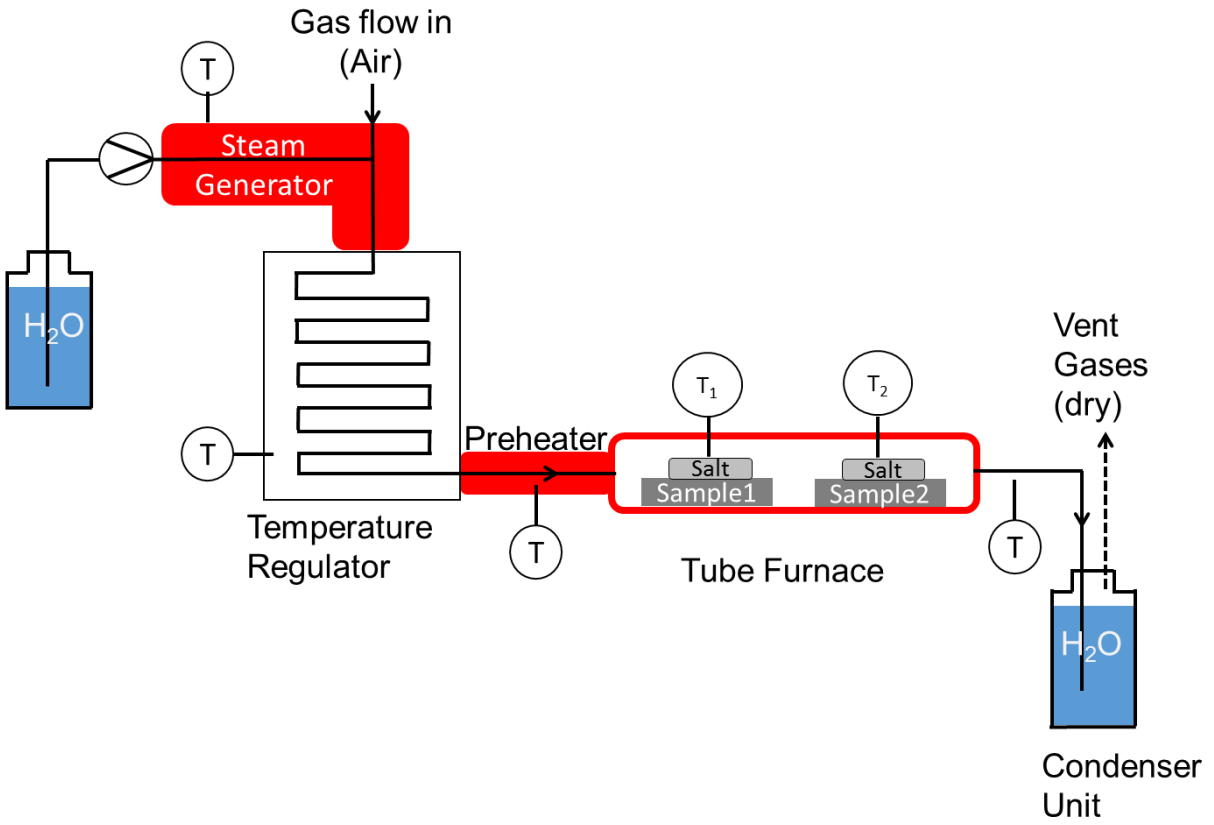


Figure 3. Diagram of the experimental set-up.

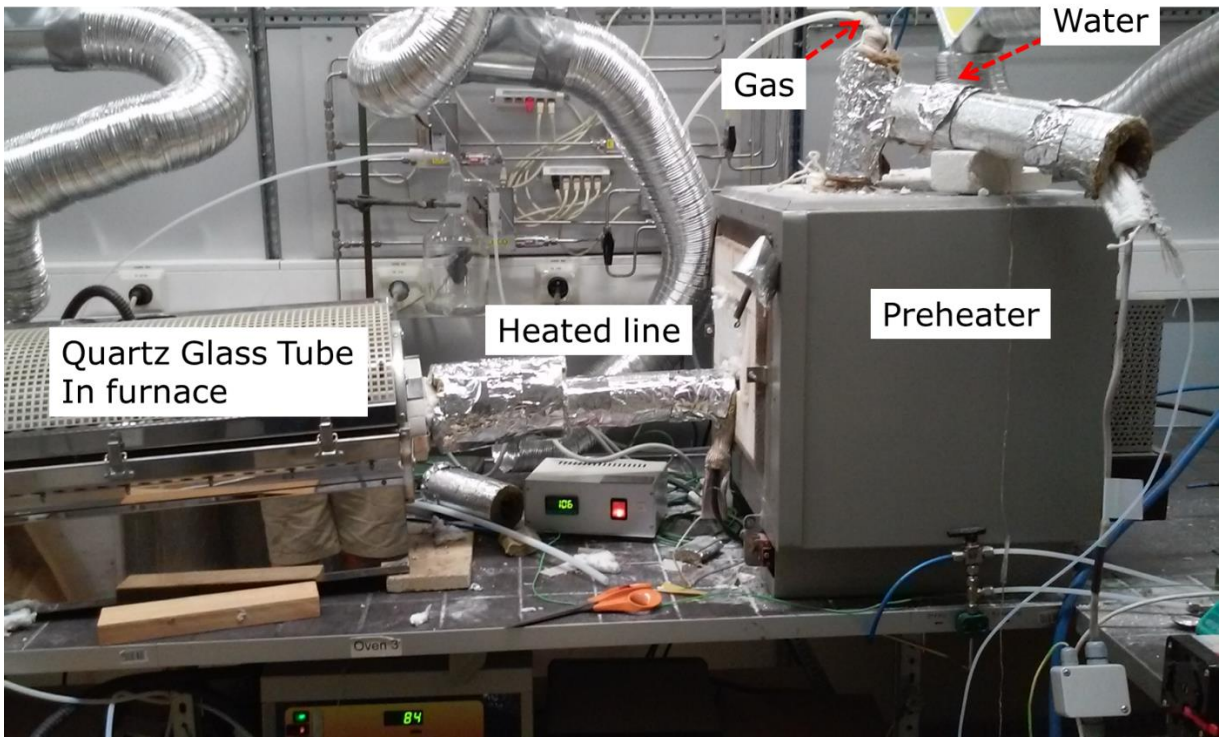


Figure 3. Tube furnace used in this work.

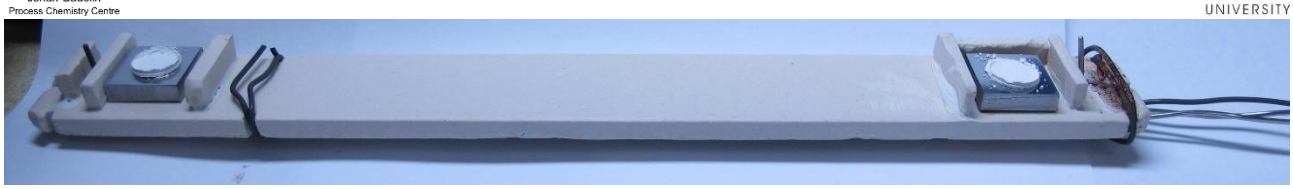


Figure 5. Sample holder used in the 22h tests.

1000h run

For the 1000h test, the sample holder was modified to provide 3 temperatures and to hold 6 steel coupons (3 of 16Mo3/5 and 3 of ST45.8), Figure 6. In this way, it was possible to get three different temperatures in one furnace run. The highest temperature selected were 120 °C and the gradient resulted in temperatures of 105 °C and 101 °C for the samples at the cooler end. The concentration of water was 25 vol-%. The 1000h test was run with the precipitator ash from Pietarsaari. This ash was chosen as it was reasonably representative of Finnish recovery boiler ashes. Also, the 22h tests indicated that there was not a significant difference in the behavior of the different ashes.



Figure 6. Sample holder used in the 1000h test. Note the thermocouples above the steel coupons. The samples at 120 °C are at the far left, the 100 °C samples are at the far right and the 105 °C samples are the samples in between.

Results & Discussion

22h runs

In our most recent project on this topic for SKY we found that 100-110 °C was the safe temperature for low temperature corrosion of ST45.8 steel [Holmblad, 2015]. The first experiments were carried out between 95 and 110 °C using 16Mo3/5 with the three ashes. Corrosion was expected at 95 °C based on the earlier results with ST 45.8. However, no corrosion was seen on the 16Mo3/5 for any of the three ashes. The temperature was lowered in subsequent runs. For the Pietarsaari and Heinola ashes, corrosion was first seen at 75 °C, Figure 7. For the Orange TX, ash corrosion was not seen at the lowest temperature tested (75 °C). Tests were run with Na_2SO_4 with both ST45.8 and 16Mo3/5 to see if the lack of corrosion was due to the steel. As can be seen in Figure 8, no corrosion was seen under Na_2SO_4 for the 16Mo3/5 sample, but corrosion was visible on the ST45.8 at 75 °C. We also ran some experiments with both steels under the precipitator ash from Orange, TX, Figure 9. Corrosion was seen on the ST45 at 95 °C, but not on the 16Mo3. No corrosion was seen on either steel at 110 °C. These results indicate that 16Mo3/5 is less susceptible to dew point corrosion than ST45.8.

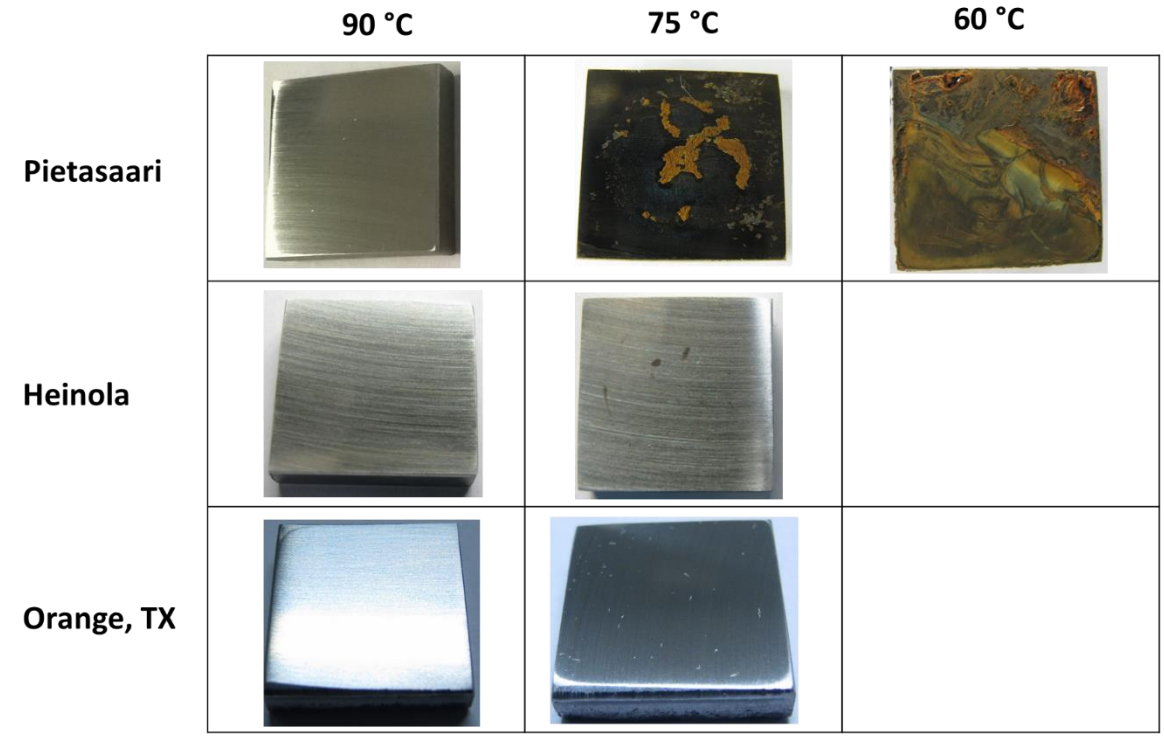


Figure 7. Corrosion results for 16Mo3/5 under Pietasaari, Heinola and Orange, TX ashes, Temperatures 60, 75 and 90 °C.

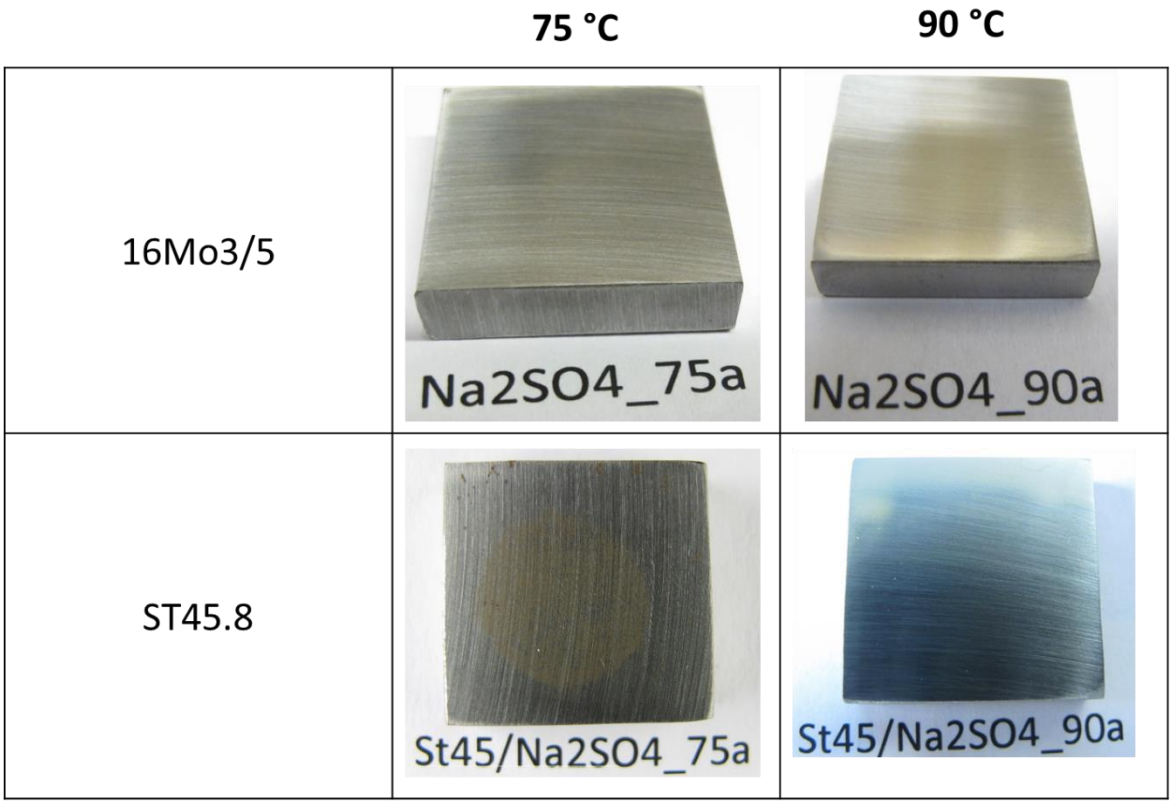


Figure 8. Corrosion results for 16Mo3/5 and ST45.8 at 75 and 90 °C under Na_2SO_4 in 25 vol-% H_2O in air.

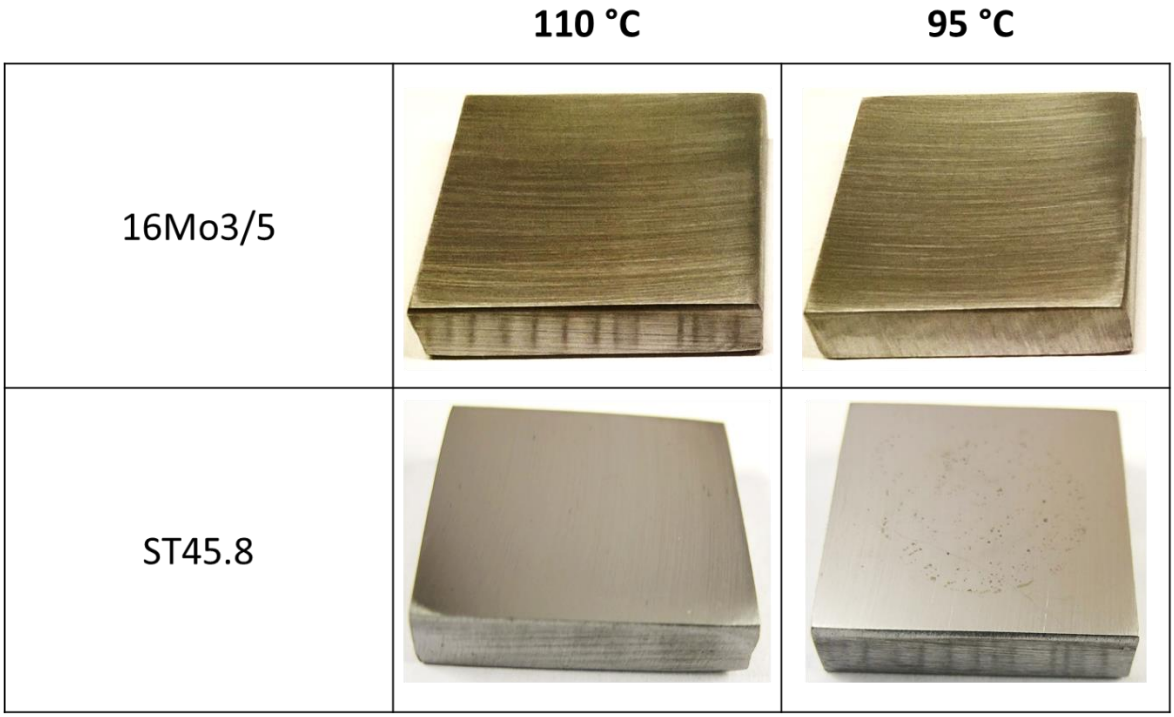


Figure 9. Corrosion results for 16Mo3/5 and ST45.8 at 95 and 110 °C under the Orange, TX precipitator ash in 25 vol-% H_2O in air.

1000h run

The thermocouple measurements for the 1000h run are shown in Figure 10. There was a very small change in temperature just after 650h. This occurred when an electrician momentarily cut the electricity. We had a remote alarm and it was caught and the electricity was put on within about 15 minutes. The small drop in temperature did not affect the results, since the water feed was also shut down for the short period.

The coupons with and without the precipitator ash after the 1000h test are shown in Figure 11. There was no clear sign of water absorption in any of the samples and no corrosion was observed. These results are consistent with an earlier 24h tests with another precipitator ash [Holmblad, 2015] in which no corrosion was seen after 24h at 100 °C in 27 vol-% H_2O. The 1000h test results indicate that shorter tests 4-22h are sufficient for screening steels/ashes. The results also indicate that steel temperatures of 100 to 110 °C should be possible without corrosion in 25 vol-% H_2O. Combined with the 22h tests, the results indicate that there is not a very big difference for boilers firing low solids black liquor (low carbonate, possibly some bisulfate) with those firing high solids black liquor (high carbonate). It should be possible to recover a significant amount of thermal energy from the flue gases of both modern and older recovery boilers.

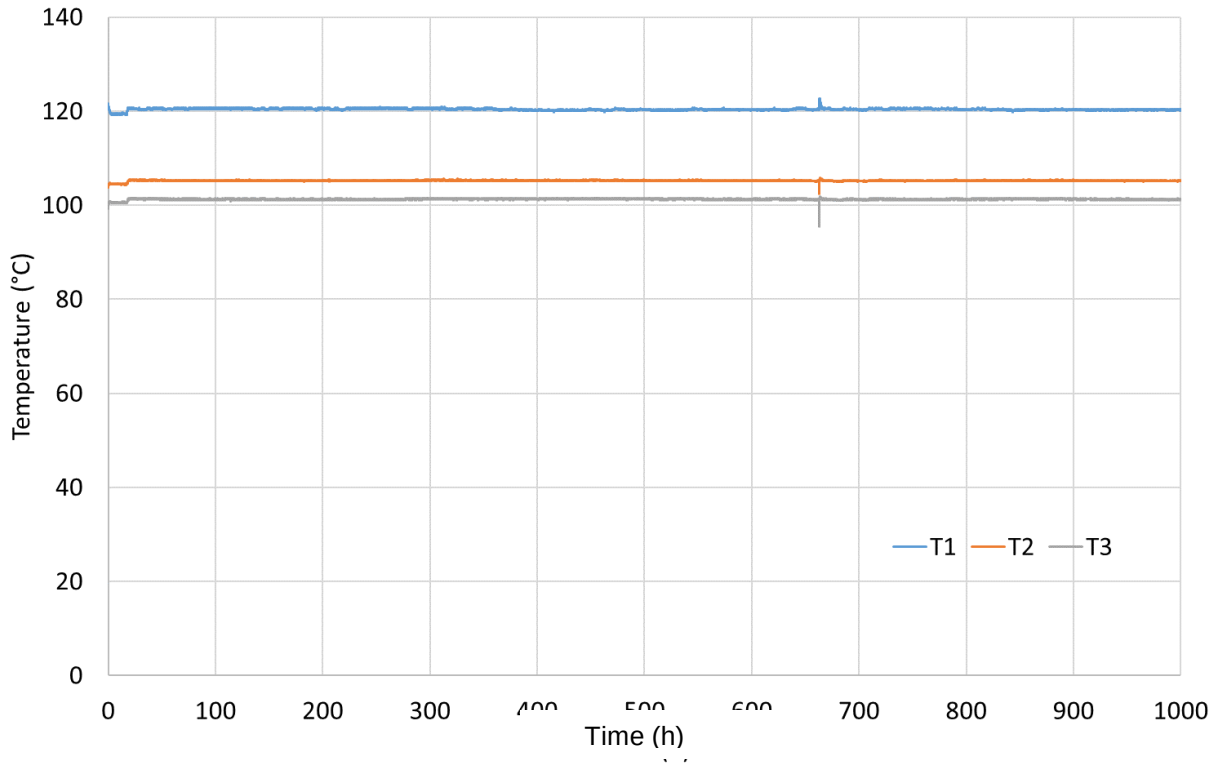


Figure 10. Thermocouple measurements at the 3 steel coupon positions.

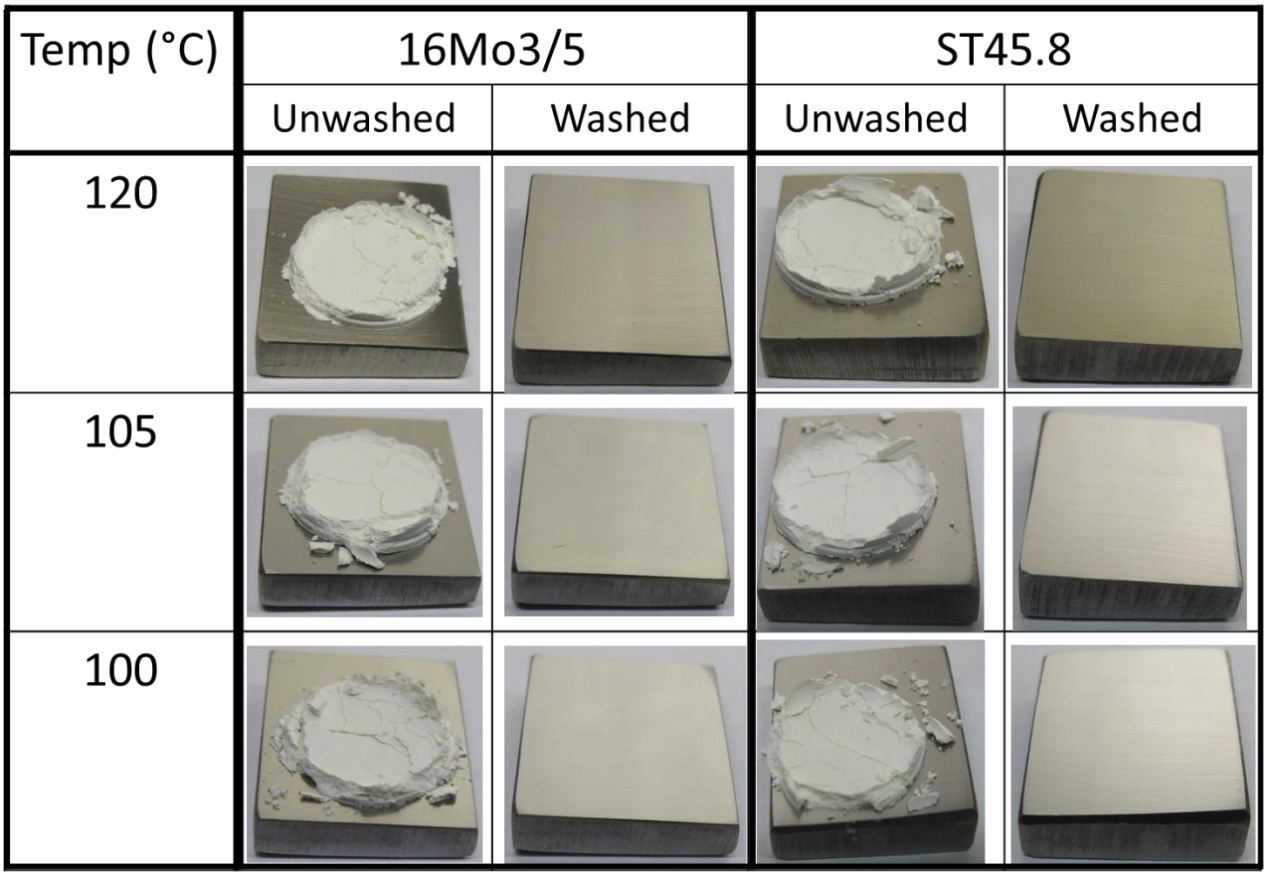


Figure 11. Samples after the 1000h test, both unwashed and washed.

General Discussion

Corrosion probe studies and SO_3/H_2SO_4 measurements in part 1 of the low-temperature corrosion project showed that there is no acid dew point in kraft recovery boilers. Furthermore, the measurements at Heinola, where there was high SO_2, indicate that even in a high SO_2 environment, no acid dew point exists in the flue gases. This is because SO_3 is very reactive towards alkaline ash. In kraft recovery boilers, SO_3 and H_2SO_4 reacts with Na_2CO_3 to form sulfates (Reactions 1 and 2). In the furnace, SO_3 may also react with gaseous NaOH to form Na_2SO_4 (Reaction 3).

$$Na_2CO_3(s) + H_2SO_4(g) \rightarrow Na_2SO_4(s) + CO_2(g) + H_2O(g) \quad (1)$$

$$Na_2CO_3(s) + SO_3(g) \rightarrow Na_2SO_4(s) + CO_2(g) \quad (2)$$

$$2NaOH(g) + SO_3(g) \rightarrow Na_2SO_4(s) + H_2O(g) \quad (3)$$

Corrosive acidic sodium bisulfates may also form in sulfite boilers and in kraft boilers with a high ratio of S/Na in the black liquor and low solids firing. Sodium bisulfate is formed in the presence of H_2SO_4 reacting with Na_2SO_4 according to Reaction 4. Sodium bisulfate forms a sticky deposit with a low melting temperature, 185°C (DeMartini 2017), and it has shown to be very corrosive also at lower temperatures.

$$Na_2SO_4(s) + H_2SO_4(g) \rightarrow 2NaHSO_4(s,l) \quad (4)$$

The water dew point is normally 50-60ºC and does not normally cause corrosion in recovery boilers, except if there are cold areas caused by e.g. air leakage. The dew point of hydrochloric acid (HCl) is about the same as for water vapour and does not cause corrosion in normal operation. However, hygroscopic salts absorb moisture from the flue gas to form a wet deposit at much higher temperatures than the pure water dew point. The phenomenon when a salt or salt mixture absorb enough water to totally dissolve is called deliquescence. Salts will start to absorb water at a temperature above the deliquescence temperature. Some salts are more hygroscopic than others, and usually a mixture of salts is more hygroscopic than individual salts. For example, Na_2CO_3 and Na_2SO_4 are mildly hygroscopic, whereas $NaHSO_4$ is very hygroscopic. Thus, the hygroscopicity of an ash deposit depends on ash composition. For example, for the low carbonate ash Orange, TX, corrosion was seen for ST45.8 at a temperature of 95ºC and water vapour concentration of 25 vol%. It has to be noted that a higher water vapour concentration would lead to corrosion at higher material temperature. This may occur near sootblowers where the water vapour concentration may locally be high. Once a deposit absorbs moisture and becomes wet, it requires a higher temperature to dry than the deliquescence temperature.

Corrosion may also be initiated during down-time of a boiler. Deposits in the boiler might absorb humidity from the air and cause corrosion. It is thus important to completely wash away the salts during the shut down. Corrosion products, e.g. $FeCl_2$, may accelerate the corrosion due to its very hygroscopic nature. This would require further research.

The effect of acidic gases with a low dew point temperature (HCl) may have an effect on the corrosion rate of a wet deposit, because some HCl may be absorbed in the deposit. This would require more research to understand the effect of gases absorbing in wet deposit.

References

DeMartini, N.; Vainio, E.; Holmblad, H.; Hupa, M. Understanding low temperature corrosion in Kraft Recovery Boilers – Implications for Increased Energy Recovery. 2016 TAPPI PEERS Conference. Sept 25-28, Jacksonville, FL (2016)

Holmblad, H., Low temperature corrosion in black liquor recovery boilers due to hygroscopic salts. MSc. Thesis, Åbo Akademi University, Turku, Finland (2015).

DeMartini N., Vainio E., Hupa L. Bisulfate Formation and Impact on Low Temperature Corrosion, International Chemical Recovery Conference (ICRC), Halifax, NS, Canada (2017).

Appendix

Table 4. Composition of ashes based on the SEM-EDX results and calculated first melting point of the ashes assuming all sulfur as sodium sulfate. T_0 for Heinola ash is not shown due to uncertainties in the amount of bisulfate. Note, the Orange, TX ash may also contain some bisulfate and the result should be interpreted with caution.

	Na wt%	K wt%	SO_4 wt%	Cl wt%	CO_3 wt%	T_0
Pietarsaari	33.2	3.7	44.6	0.7	17.8	537
Orange, TX	32.1	1.8	60.8	0.4	5.0	590
Kymi	30.9	5.2	52.0	0.3	11.6	534
Rauma	31.7	4.2	51.9	0.7	11.6	545

LIITE 7

LTR: ÅA, Understanding Low Temperature Corrosion in BL Combustion, Phase 3 - esitys 2.11.2017

Johan Gadolin
PROCESS CHEMISTRY CENTRE

Åbo Akademi University

Low Temperature Corrosion in Recovery Boilers

Emil Vainio, Nikolai DeMartini,
Patrik Yrjas & Mikko Hupa

Johan Gadolin Process Chemistry Centre

Laboratory of Inorganic Chemistry

Åbo Akademi

Soodakattilapäivä, Helsinki
November 2, 2017

Background

- Industrial interest in extracting more energy from flue gases
  - 10 °C drop in flue gas temperature → ~ 0.5 % efficiency improvement of the boiler
- Some historical industrial observations of low temperature corrosion
- H_2SO_4 thought to exist in flue gases of recovery boilers

SKY projects

<u>Understanding Low Temperature Corrosion in Black Liquor Combustion</u>

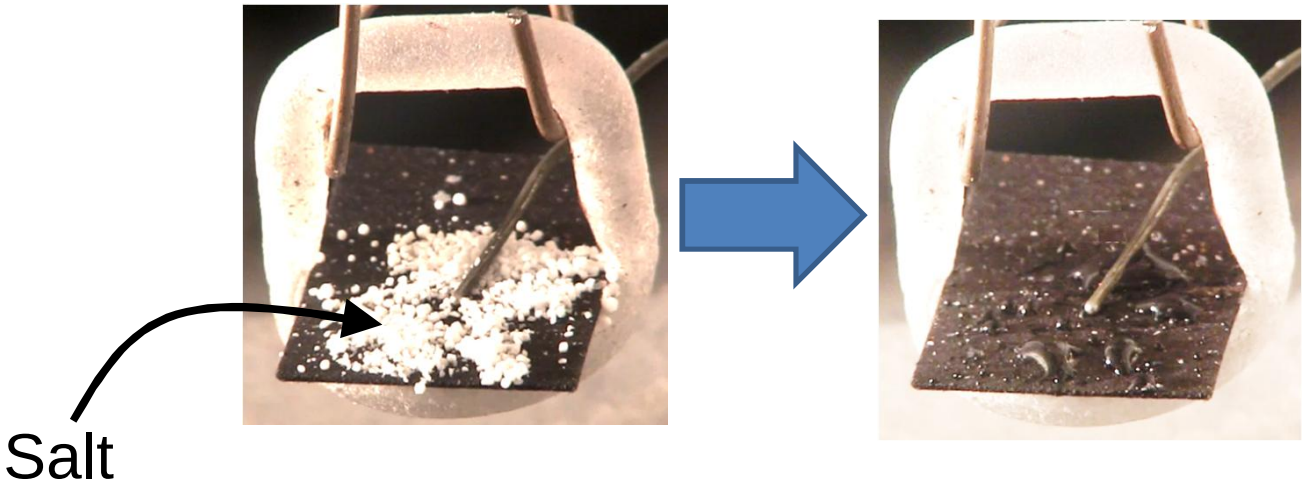
- Measurements in RB boilers (dew point, SO_3/H_2SO_4, corrosion)
- Laboratory study with pure salts (Na_2SO_4, Na_2CO_3, $NaHSO_4$, KCl, NaCl) and some ashes using ST45.8
- *Laboratory study with boiler ashes, short and long term tests with two metals*

Previously

- Recent measurements; H_2SO_4 doesn't exist in RB flue gases
- Hygroscopic compounds may cause corrosion
- In a recovery boiler SO_3 and H_2SO_4 will react with ash forming compounds:
  - $Na_2CO_3(s) + H_2SO_4(g) \rightarrow Na_2SO_4(s) + CO_2(g) + H_2O(g)$
  - $Na_2CO_3(s) + SO_3(g) \rightarrow Na_2SO_4(s) + CO_2(g)$
  - $2NaOH(g) + SO_3(g) \rightarrow Na_2SO_4(s) + H_2O(g)$
- Bisulfate may also be formed:
  - $Na_2SO_4(s) + H_2SO_4(g) \rightarrow 2NaHSO_4(s,l)$

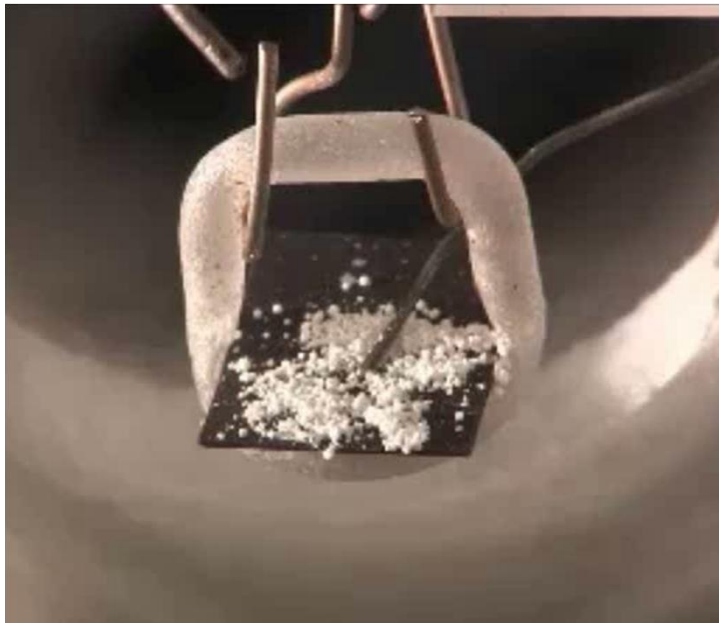
Hygroscopic compounds and deliquescence temperature

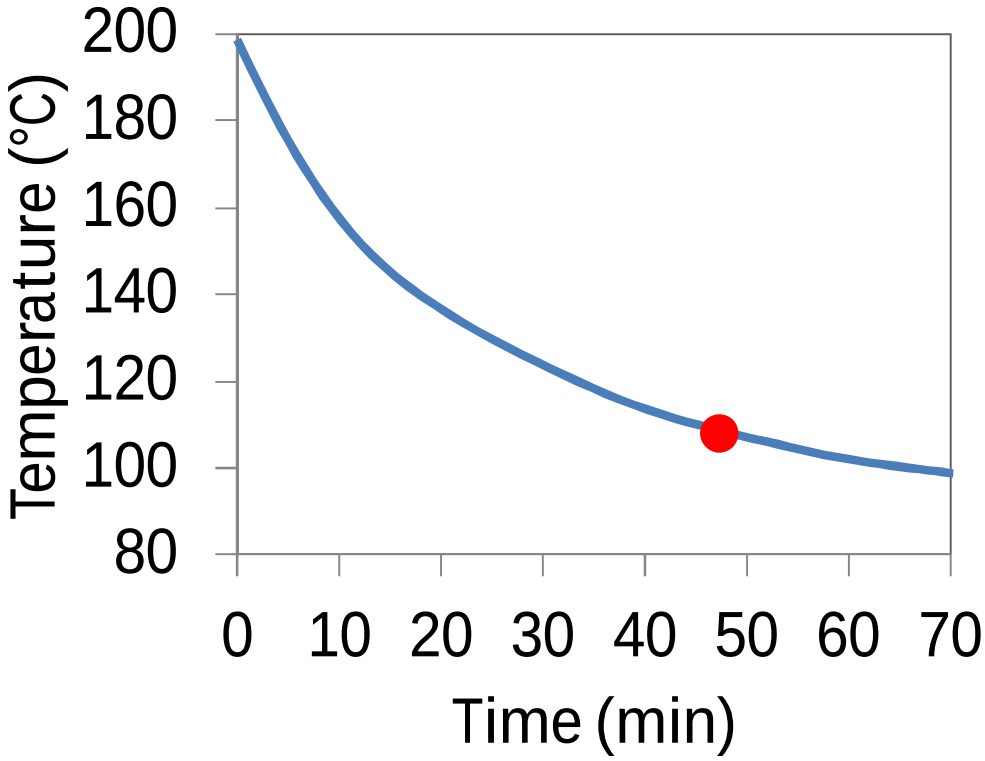
The temperature at which a salt or salt mixture absorbs enough water to fully dissolve at a fixed vol% H_2O



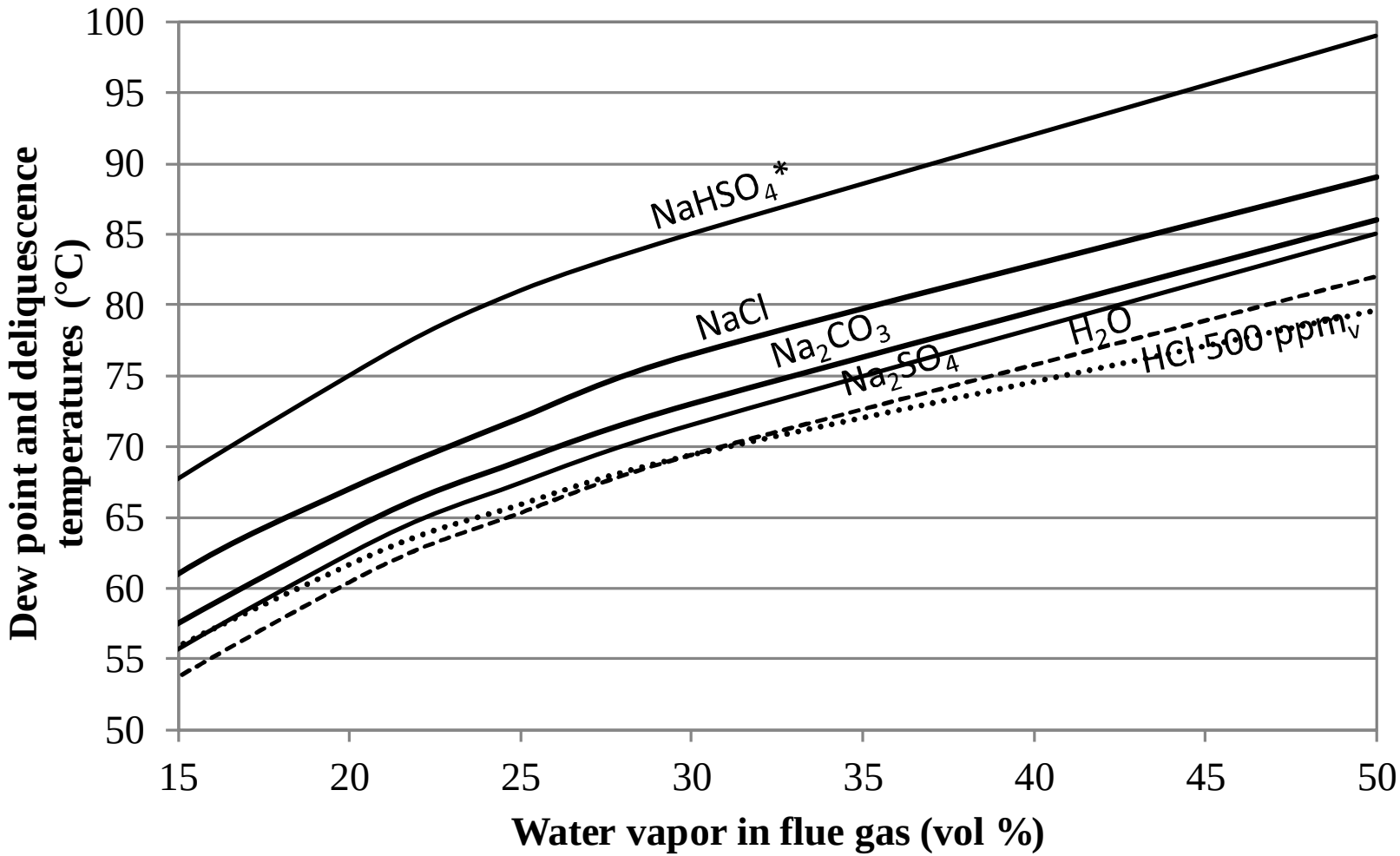
Deliquescence of $CaCl_2$

$CaCl_2$, 25 vol% H_2O





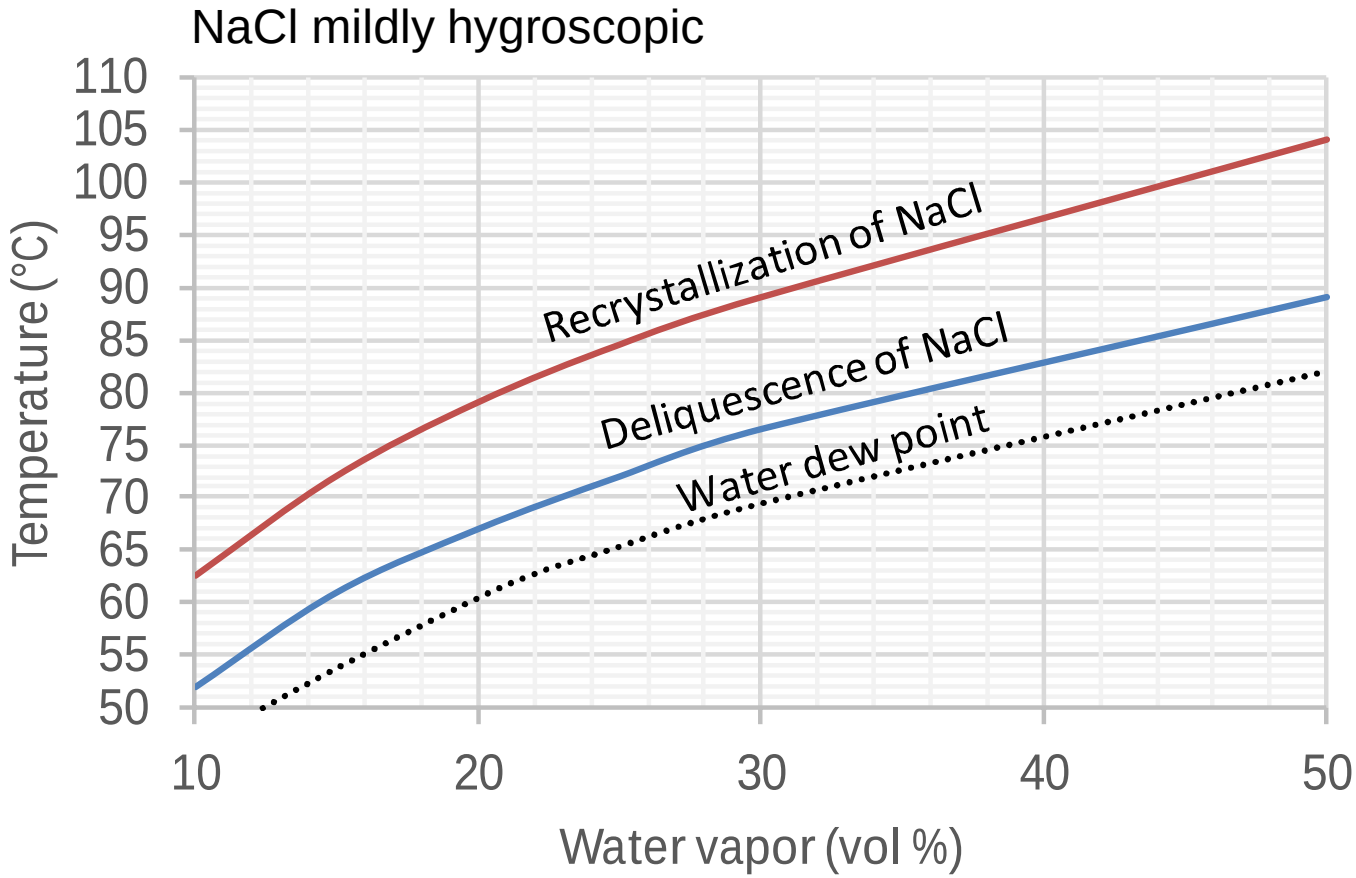
Dew points and deliquescence



*Values for $NaHSO_4$ extrapolated from data at 25°C

Data from: Wolery, T., “Environment on the Surfaces of the Drip Shield and Waste Package Outer Barrier” 2004

Deliquescence and recrystallization

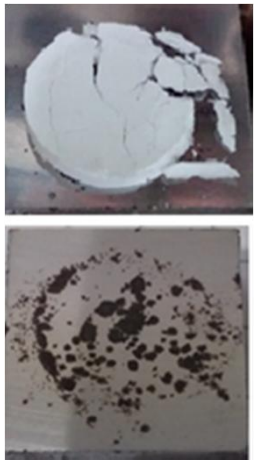
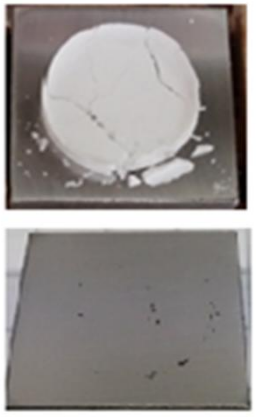
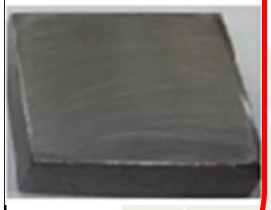


Data from: Tang I.N. J. Geophys. Res., 102 (1997)

Adsorption of water by salts

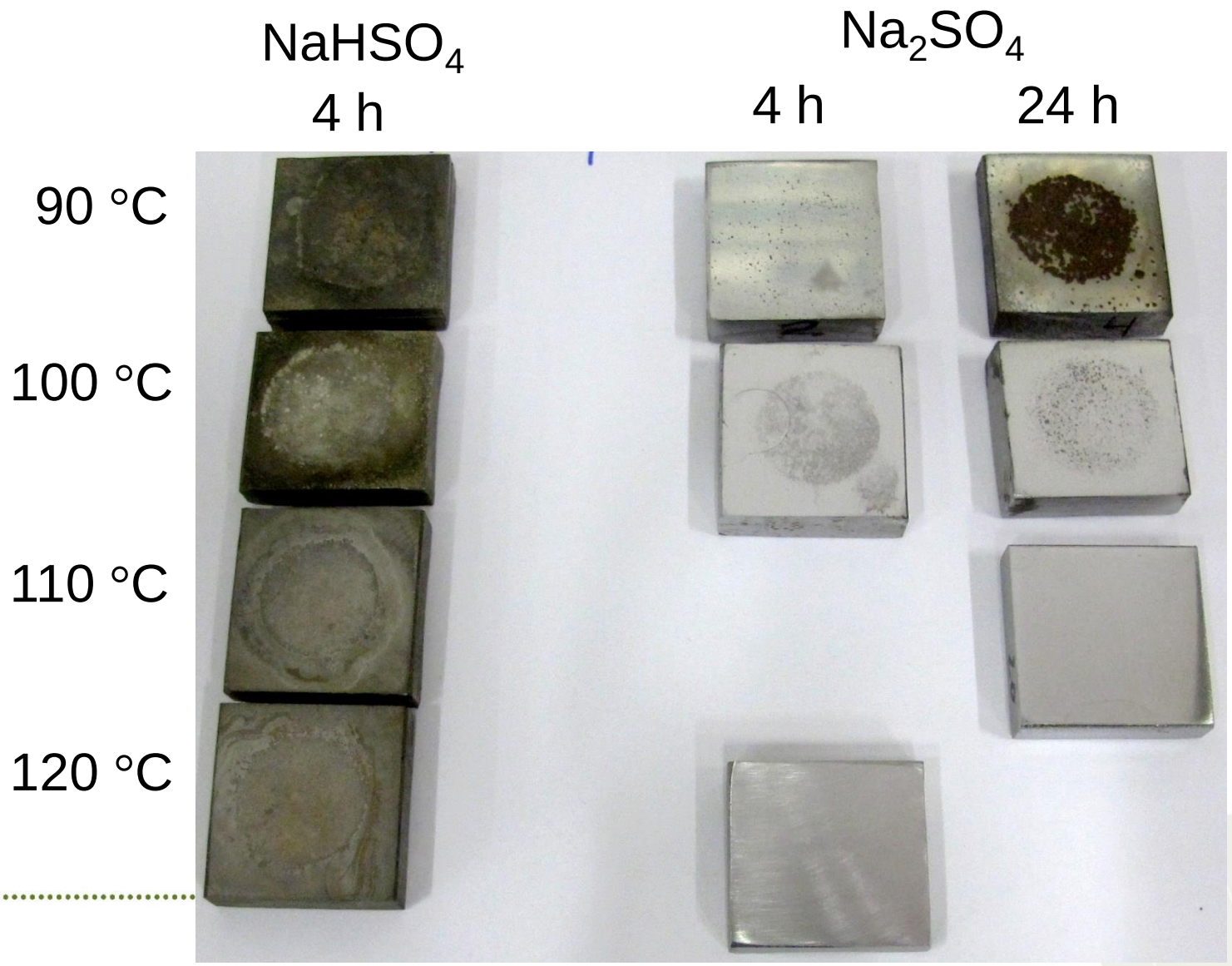
- Recrystallisation at $T > T_{deliquescence}$
- Different salts absorb water at different T
- Salt mixtures can behave differently than their pure salts
- At least mild corrosion can be expected when water is absorbed

Example: Na_2SO_4

H_2O	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C	120 °C
<u>27 %</u> Before Wash After Wash						
<u>60 %</u> Before Wash After Wash						

Comparison of two salts

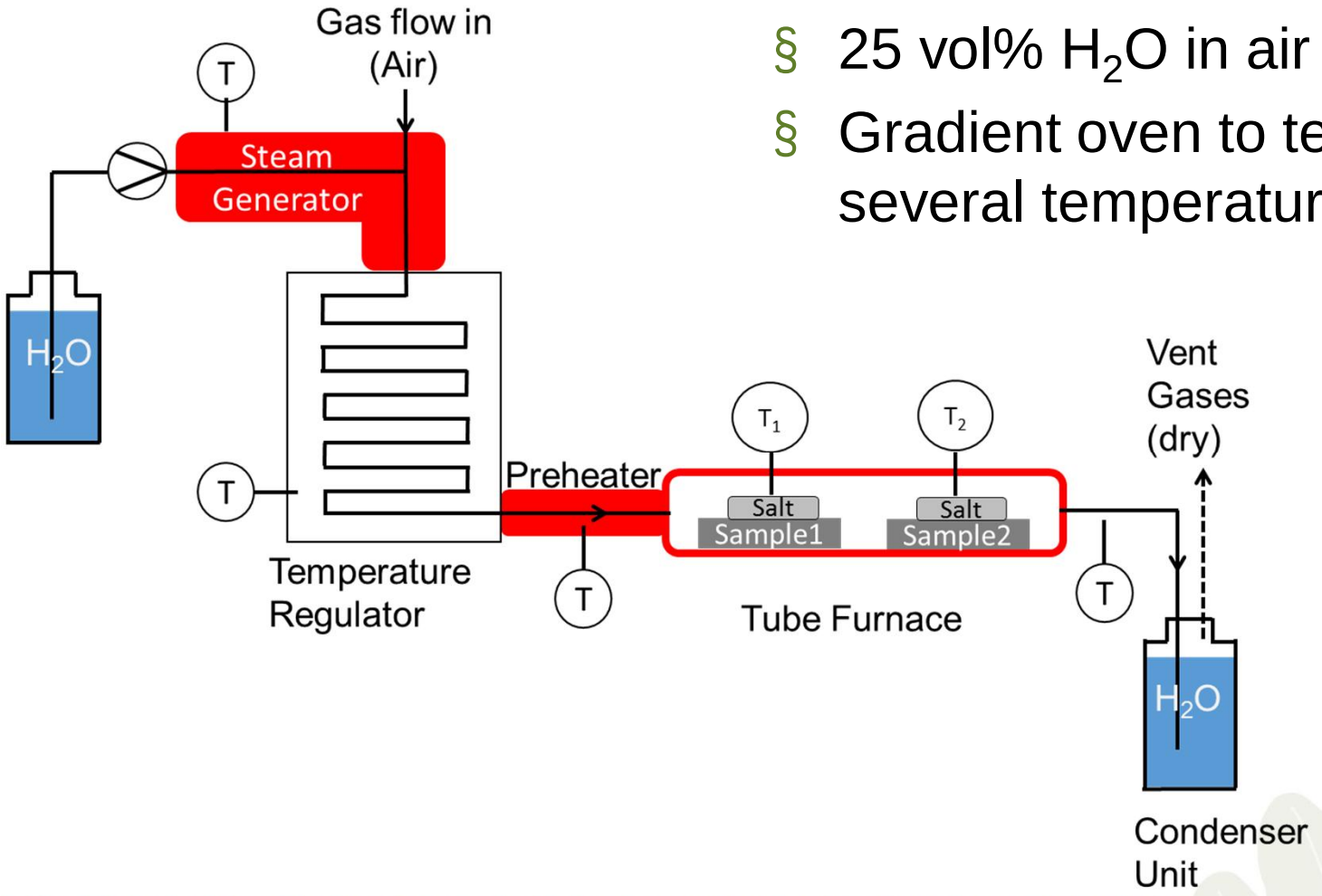
(60 vol-% H_2O)



Objectives

- Understand the role of RB deposits on low temperature corrosion
- Can short, 22 h runs be used to determine when corrosion occurs?
- Choice of metal on corrosion
- Build a setup for long exposures and do tests under controlled conditions for 1000 h

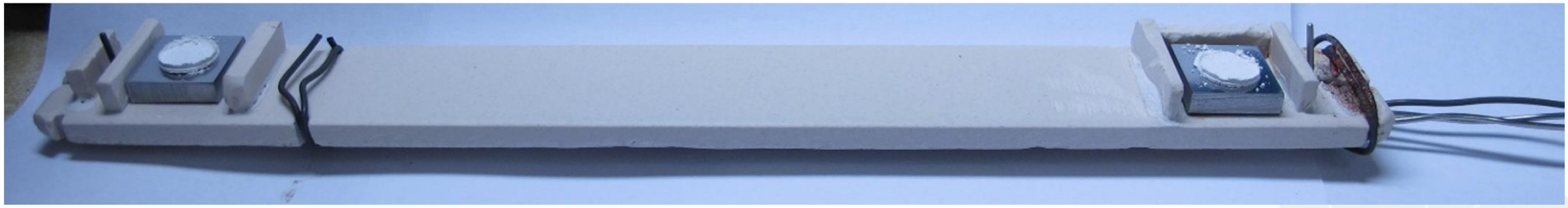
Experimental



- 25 vol% H_2O in air
- Gradient oven to test several temperatures

Experimental

- Samples:
  - 2x2 cm carbon steel coupons
  - St45.8 and 16Mo3
- ~ 0.1 g of ash on the coupon
- Sample holder 22 h runs:



Metal compositions

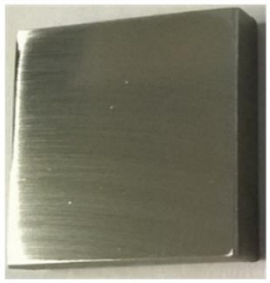
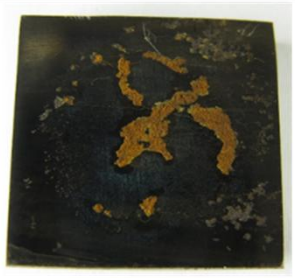
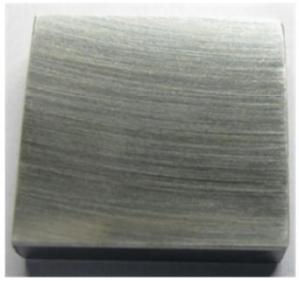
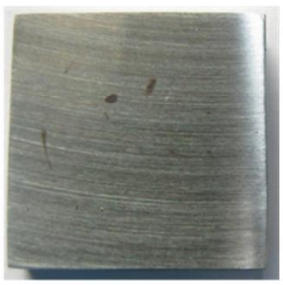
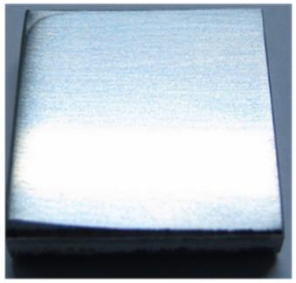
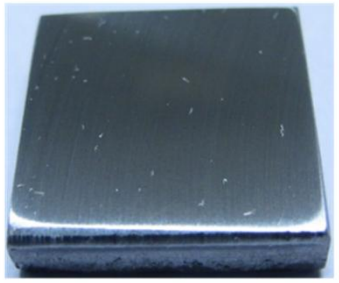
	C wt%	Si wt%	Mn wt%	P wt%	S wt%	Cr wt%	Cu wt%	Mo wt%	Ni wt%
16Mo3	0.12-0.20	≤ 0.35	0.40-0.90	≤ 0.025	≤ 0.010	≤ 0.30	≤ 0.30	0.25-0.35	≤ 0.3
St45.8	≤ 0.21	0.1-0.35	0.4-1.2	0.04	0.04				

SEM-EDX analyses of the ESP ashes

	Na wt%	K wt%	SO_4 wt%	Cl wt%	CO_3 wt%	pH	S/(Na_2+K_2) mol frac
Modern kraft RB	33.2	3.7	44.6	0.7	17.8	11.4	0.60
Kraft RB with low solids BL	32.1	1.8	60.8	0.4	5.0	9.5	0.88
Sulfite boiler	31.5	2.9	59.3	0.0	6.3	6.2	0.85

CO_3 determined by balance in SEM-EDX analyses

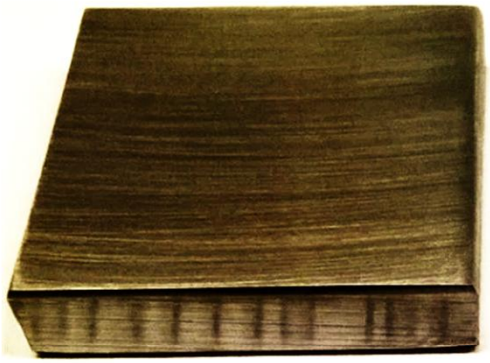
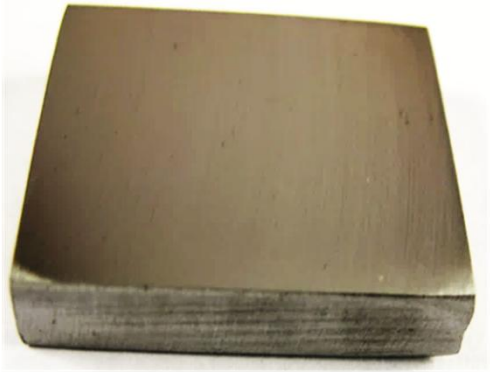
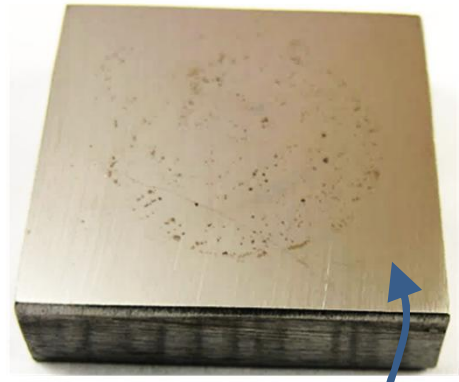
Tests with 16Mo3/5

	90 °C	75 °C	60 °C
Modern kraft RB			
Sulfite boiler			
Kraft RB with low solids BL			

No corrosion seen at 90 °C

Comparison of the materials

Kraft recovery boiler ash (low solids BL)

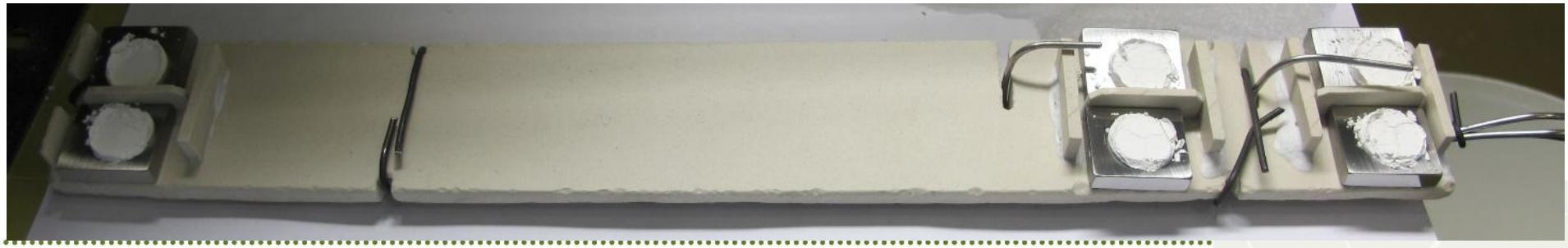
	110 °C	95 °C
16Mo3/5		
ST45.8		

Corrosion

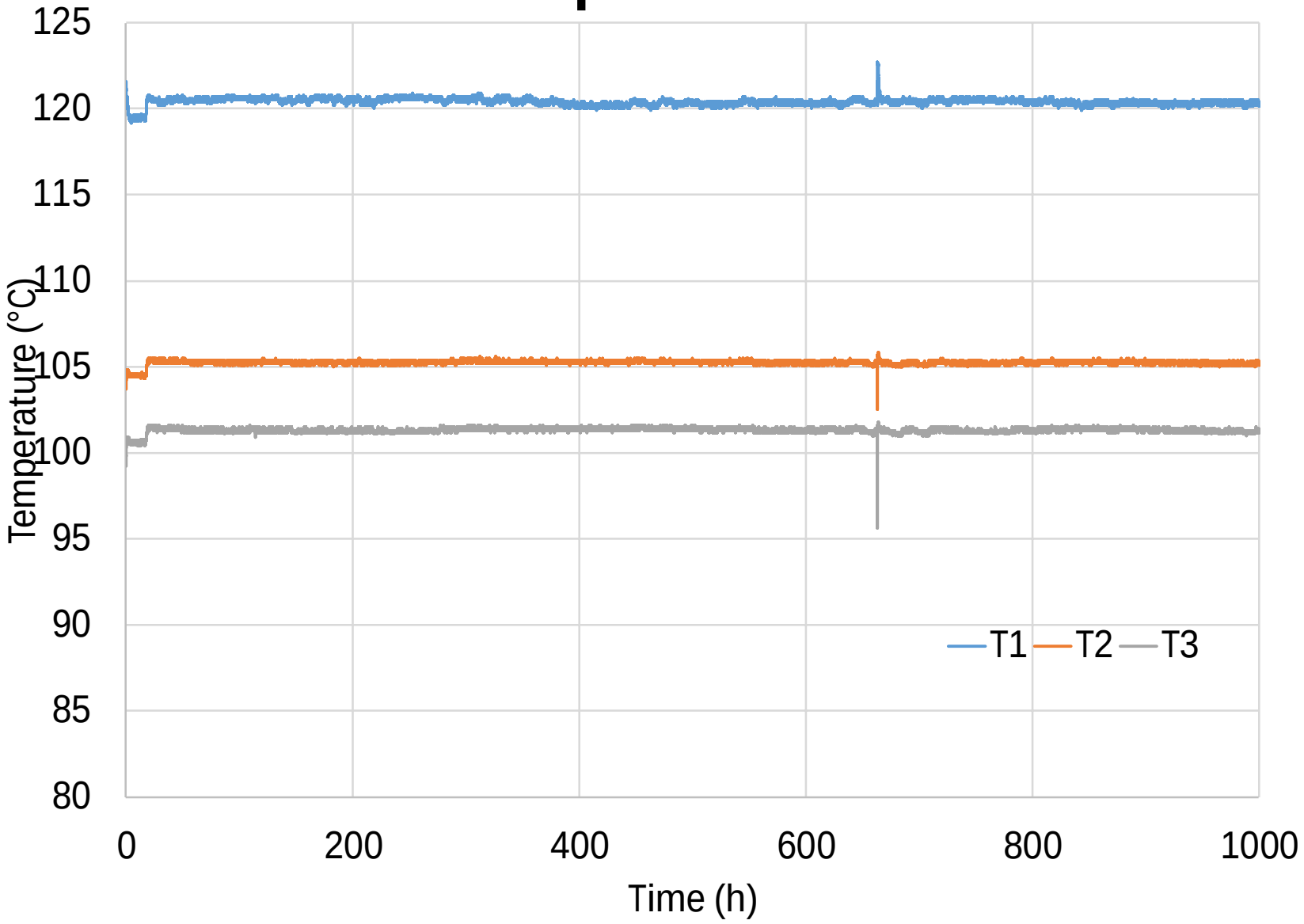
1000 h runs

- Three temperatures and two metals tested simultaneously
- Tests were made to confirm the 22 h results with no corrosion at T > 100 °C
- 25 vol% H_2O in air
- Sample holder for 1000 h:

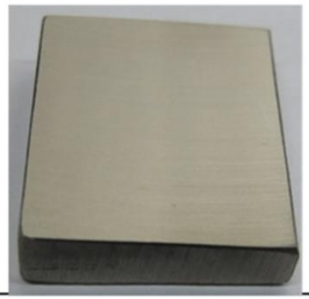
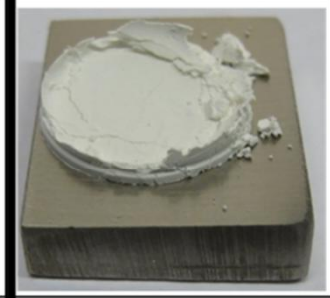
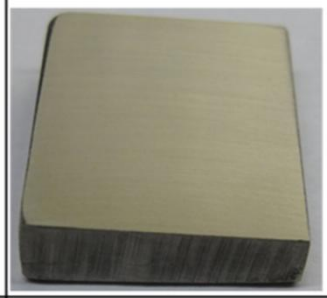
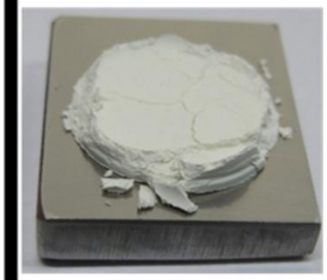
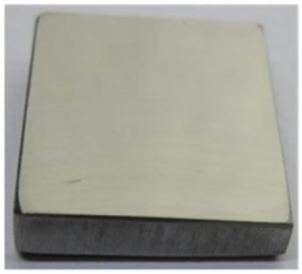
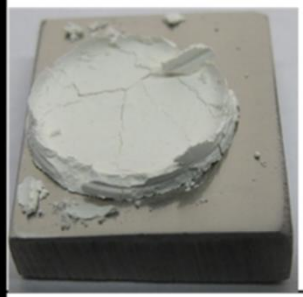
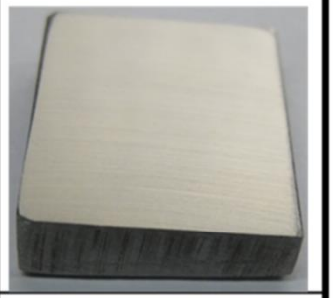
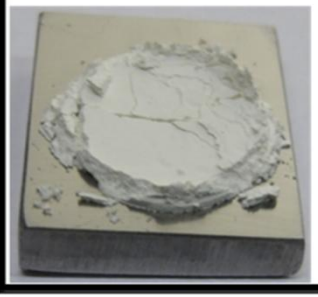
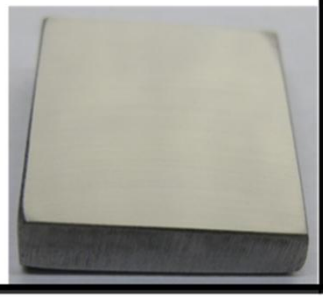
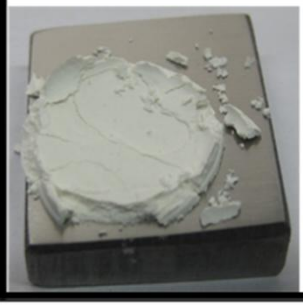
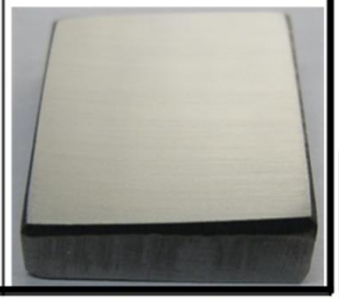
120°C 105°C 101°C



Temperatures



Results - 1000 h run

Temp (°C)	16Mo3/5		ST45.8	
	Unwashed	Washed	Unwashed	Washed
120				
105				
101				

Conclusions

- 16Mo3/5 is less susceptible to corrosion caused hygroscopic salts than ST45.8
- Neither material corroded at temperatures above 100 °C in the 1000 h run
- 22 h tests are valid for screening materials and conditions

Publications

- Vainio, E., DeMartini, N., Laurén, Orang, N., Tran, H., Hupa, M.,: Understanding low-temperature corrosion in recovery boilers – Measurements at four mills, International Chemical Recovery Conference (ICRC), Halifax, NS, Canada, **2017**

- DeMartini, N., Vainio, E., Lauren, T., Hupa, L., Bisulfate Formation and Impact on Low Temperature Corrosion in Kraft Recovery Boilers, International Chemical Recovery Conference (ICRC), Halifax, NS, Canada, **2017**

- DeMartini, N., Vainio, E., Holmblad, H., Hupa, M.: Understanding low temperature corrosion in Kraft Recovery Boilers – Implications for Increased Energy Recovery, TAPPI Peers, September 25–28, **2016,** Jacksonville, FL

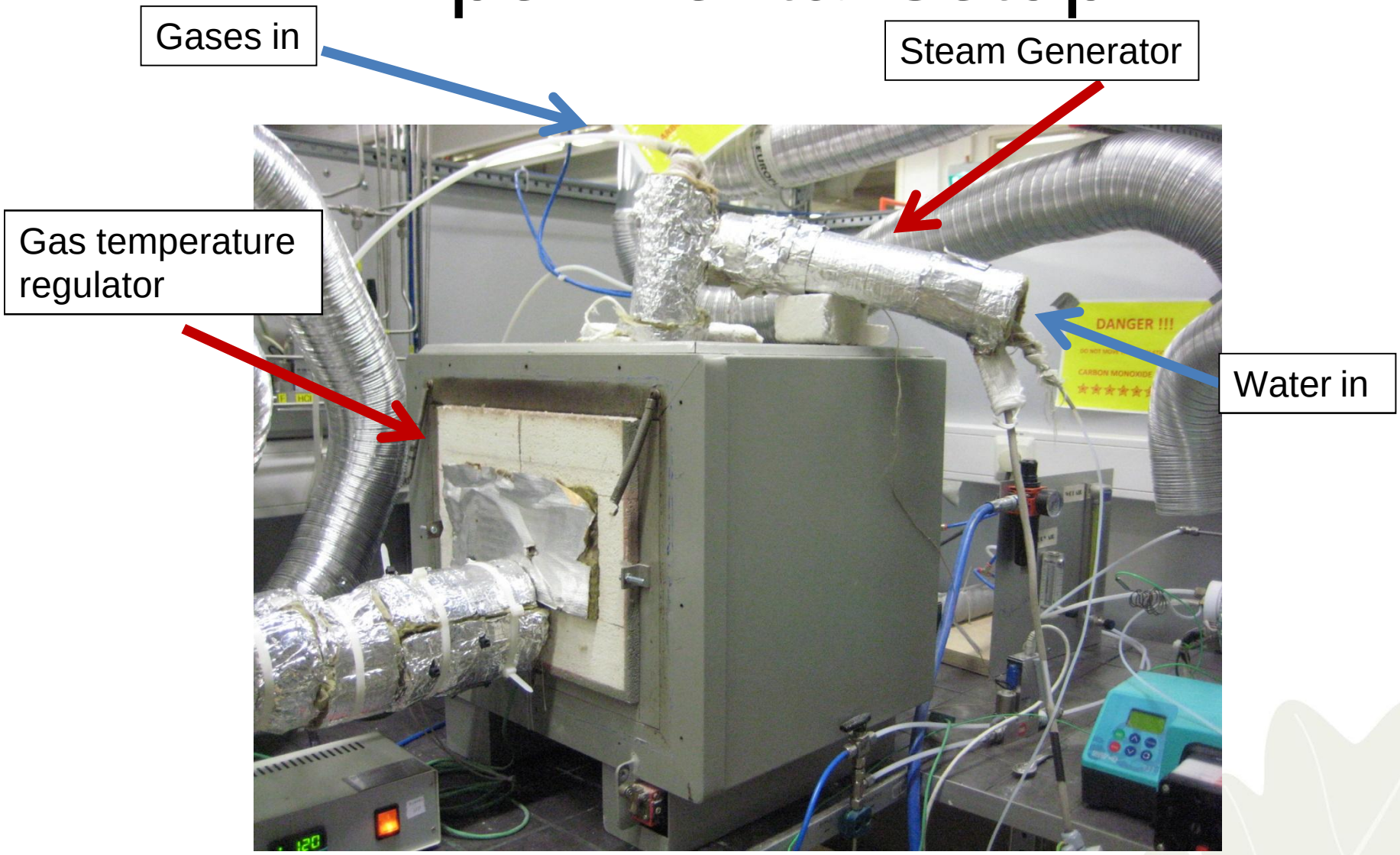
- Vainio, E., Laurén, T., DeMartini, N., Brink, A., Hupa, M.,: Understanding Low-Temperature Corrosion in Recovery Boilers: Risk of Sulphuric Acid Dew Point Corrosion? Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, 4(6), pp 14-22, **2015.**

- Vainio E., Laurén T., DeMartini N., Brink A., Hupa M.: Sulfuric Acid Induced Low Temperature Corrosion in Recovery Boilers?, International Chemical Recovery Conference, 9-12 June, **2014,** Tampere Finland, Vol 2, pp 189-203.

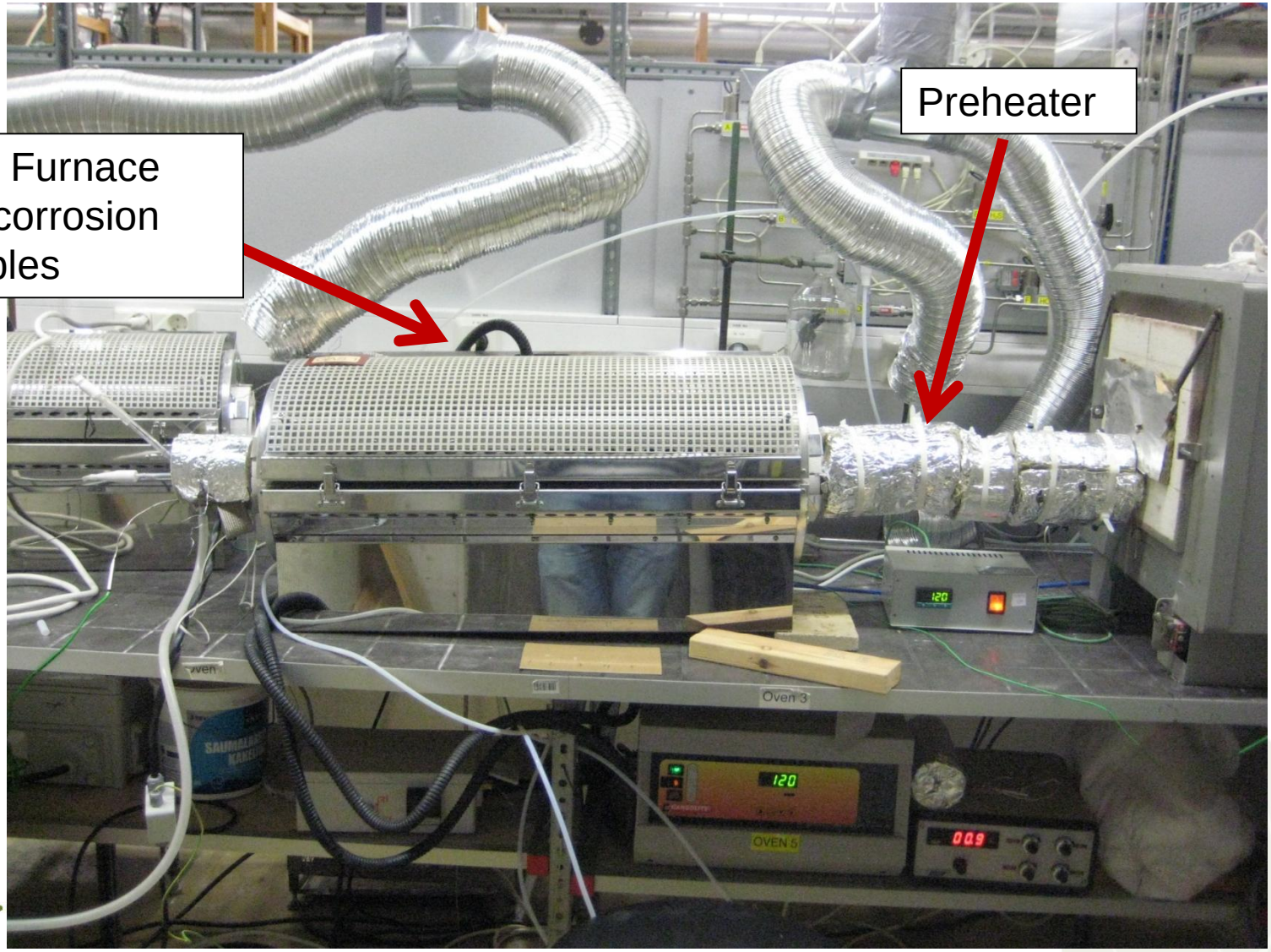
Acknowledgements

§ Our thanks to SKY and member companies for continued support of projects at ÅAU

Experimental setup



Experimental setup



LIITE 8

YTR: LUT, NCG-järjestelmien turvallisuusauditointi, syntyvät hajukaasumäärät ja koostumukset, tyypilliset onnettomuuteen johtavat syyt – prosessikonseptitarkastelut – esitys 2.11.2017



UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY AND BUSINESS

Hajukaasut ja hajukaasuturvallisuus

Kirsi S. Hovikorpi

Yliopisto Saimaan-rannalla



LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PROJEKTI

NCG-järjestelmien turvallisuusauditointi,
syntyvät hajukaasumäärät ja koostumukset,
tyypilliset onnettomuuteen johtavat syyt –
prosessikonseptitarkastelut

LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MITÄ JA MIKSI?

- Pohjatyö soodakattilayhdistyksen kanssa suositus-luonnokseen hajukaasuista ja hajukaasuturvallisuu-desta.
- Etsitään analysoitavia onnettomuuksia ja ”läheltä piti” tilanteita, jotta voidaan tutkia niiden juurisyitä ja ennaltaehkäistä jatkossa vastaavia.
- Tehdään tehdasauditointeja.

TURVALLISUUS

- Väkevät (CNCG) ja laimeat (DNCG) käsitys: pidettävä niin kaasu- kuin nestejakeet erillään.
- Väkevien keräily täysin suljetuista keräilykohteista, vuotoilma ei sallittua, tilavuusvirrat pieniä vs. laimeat, mutta pitoisuudet (TRS, tärpätti, MeOH) suuria vs. laimeat.
- Laimeiden keräily ei-paineellisista, avoimista/osittain avoimista keräilykohteista, vuotoilma sallittua, tilavuusvirrat suuria vs. väkevät, mutta pitoisuudet (TRS, tärpätti, MeOH) alhaiset vs. väkevät

MITÄ TULLUT JO VASTAAN

- KAADOT, että ovat riittävät ja huomioitu kaasu- ja lauhdevirtauksien suunnat
- LAUHTEIDEN POISTOT, että ovat oikeissa paikoissa, oikein tehtynä ja riittävän suuret poistolinjakoot eri tilanteissa syntyvien nestejakeiden poistoon putkistosta ja kanavistosta tarvittavilla pintaindikoinneilla, ja johdettu oikeisiin paikkoihin ja huomioitu ympäristön lämpötilat (sähkösaatto, eristykset)
- MAADOITUKSET: oikeaoppisesti, ja irrotetut myös kytketty takaisin kiinni

MITÄ TULLUT JO VASTAAN

- HÖYRYLINJAT: höyryjen ottokohdat väkevien järjestelmiin, etenkin polttopään paineenpitohöyryjen osalta, että ei johdeta väärää faasia paineenpitoon (höyry – lauhde). Lauhteenpoistimien säännöllinen tarkastaminen ja toimivuuden toteaminen. Putkisto lay-out, prosessieristys.
- LIPEÄN PAISUNTA väärässä paikassa: haihduttamon lipeäsäiliöillä, liika kuumana sarjoilta lipeä säiliöön, josta hönkien keräily laimeiden keräilyyn à TRS-pitoisuudet yli LEL:n

MITÄ TULLUT JO VASTAAN

- ERI OSASTOJEN VÄLINEN KESKUSTELU ja TIEDONSIIRTO:
  - kuka vastaa alipaineen asetusarvoista keräilyissä (ejektorin alipainesäädön asetusarvo, laimeiden puhaltimien alipaineiden säädöt keräilyn ja soodakattilan alueella).
  - Poikkeamatilanteiden muodostuminen, ennakoivaa tietoa eteenpäin muille tietoa hyödyntäville osastoille.

2000-luvun NCG TAPAUKSIA

- 2004 Sunila (hakesiilo, DNCG)
- 2004 Joutseno (hakesiilo, DNCG)
- 2005 Veracel (hakesiilo, DNCG)
- 2007 Veracel (paineellinen polttolipeäsäiliö)
- 2008 UPM Pietarsaari (paineellinen polttolipeäsäiliö, DNCG)
- 2009 Botnia Uruguay (hakesiilo, DNCG erillispoltto)
- 2011 Värö, Ruotsi (vesi, CNCG)
- 2014 SE Skoghall (vesi, liuottajan höngät)
- 2016 SE Veitsiluoto (altistuminen CNCG kaasuille)
- 2017 SE Imatra (haihduttamon CNCG)

SE Sunila, 19.10.2004

- Laimeiden hajukaasujen keräilyputkistossa tapahtunut räjähdys johdettaessa varapolttopaikalle soihtuun.
- Laimeiden väkevöitymisen yli LEL:n johtui keittämön hakesiilolle johdettavasta paisuntahöyrystä, jossa on korkeat TRS pitoisuudet.
- Nykyään hakesiiloon vain ja ainoastaan tuorehöyryä ja höngät johdetaan ulos ilman erillistä käsittelyä.



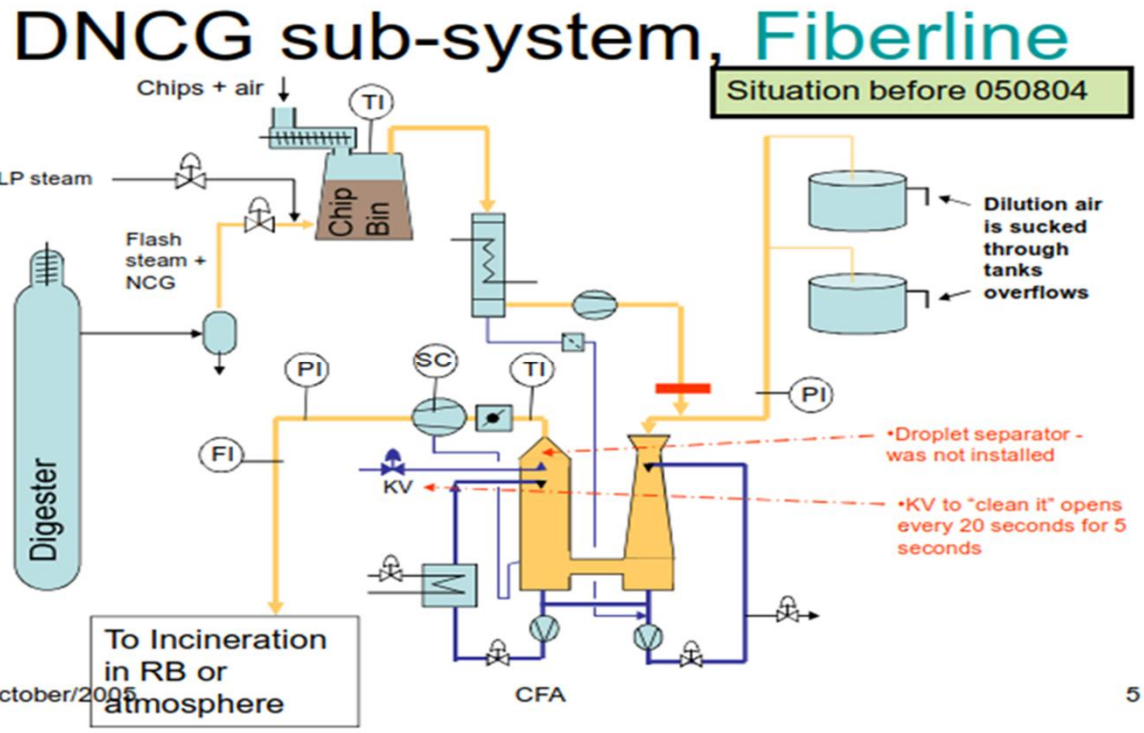
LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MB Joutseno, 01.04.2004

- Hakesiilolle johdettiin paisuntahöyryjä.
- Hakesiilolla oli häiriöitä, jolloin hönkien määrä ja pitoisuus nousivat voimakkaasti (TRS, tärpätti, metanoli), joka johti laimeiden hajukaasujen väkevöitymisen yli LEL:n ja räjähdykseen soodakattilan tertiääri-ilmajärjestelmässä.
- Hakesiilon höngät kytkettiin pois laimeiden keräilystä.

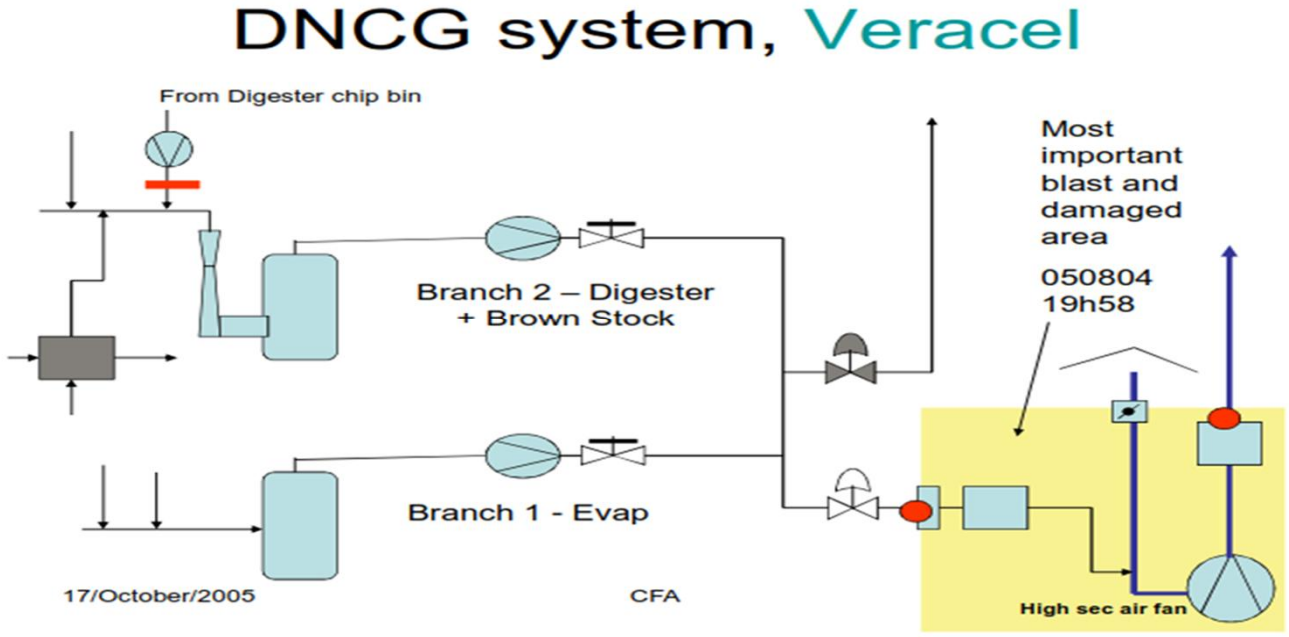
Veracel Brazil, 04.08.2005

- Hakesiilo käytti paisuntahöyryä hakkeen pasutukseen.



Veracel Brazil, 04.08.2005

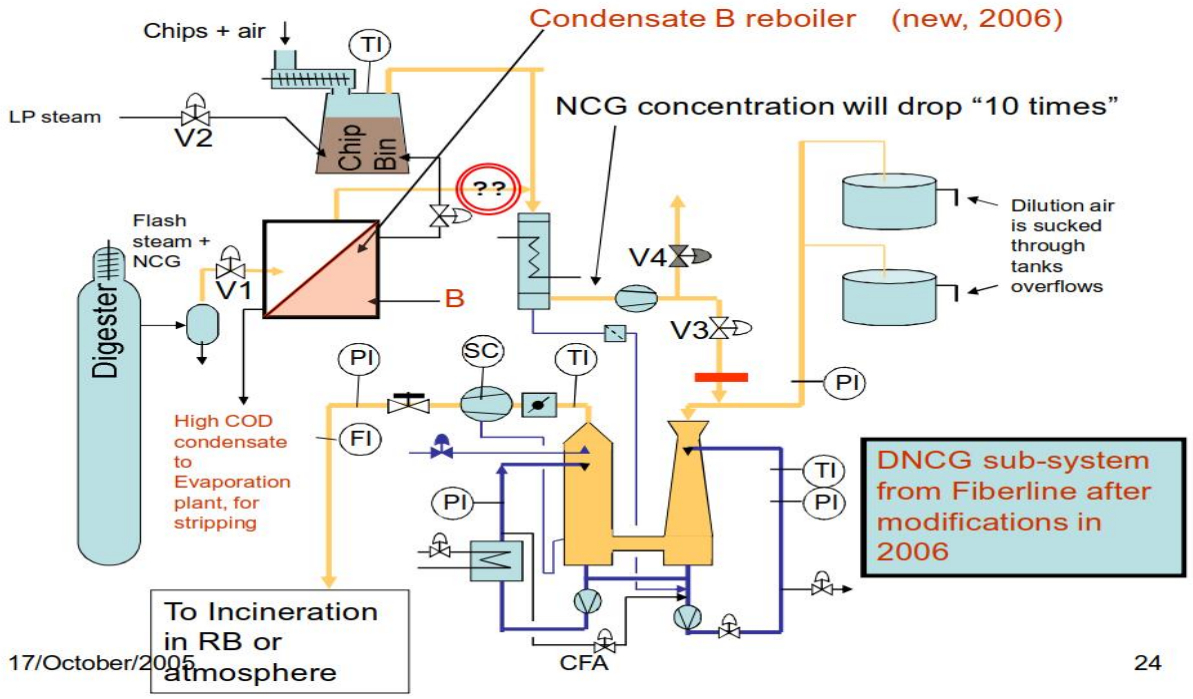
- Mekaaninen asennuspuute kuitulinjan DNCG pesurilla à pisaranerotinelementin ajastintoimiset pesuvedet puhaltimelle kaasuvirran mukana aiheuttaen puhaltimellevesikuormituksen.



LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Veracel Brazil, 04.08.2005

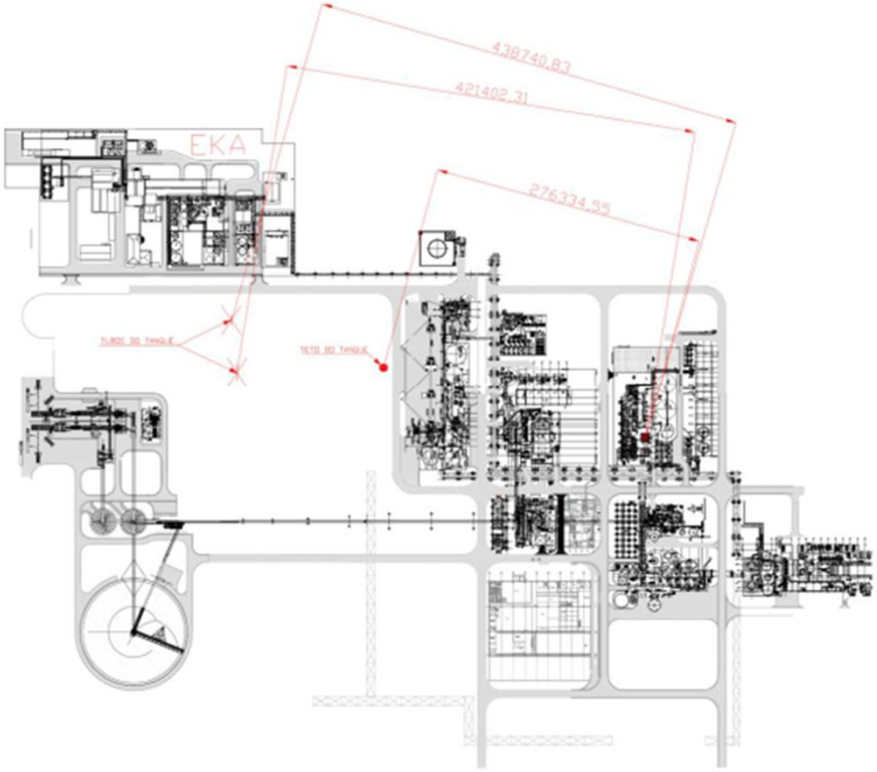
- Paisuntahöyry reboilerille puhtaamman pasutushöyryn tuottamiseksi B-lauhdetta höyrystämällä.



Veracel Brazil, 21.09.2007

- Paineellisen polttolipeäsäiliön paineistuminen ja katon lento rakenteineen yli soodakattilarakennuksen 276 m päähän.



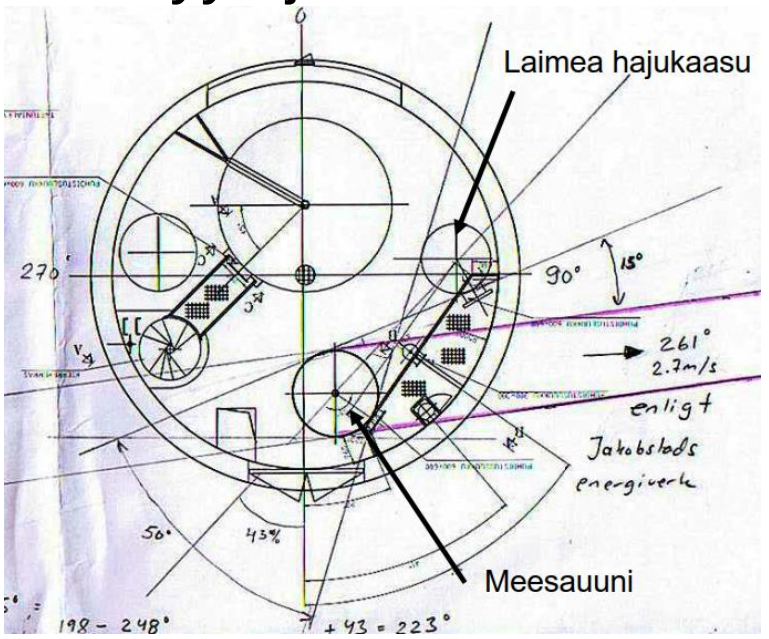


LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

UPM Wisaforest, 28.12.2008

- Seisokissa tapahtunut DNCG kaasujen ohiajopiipun räjähdys (lämmönlähteenä meesauunin savukaasut), paineellisen polttolipeäsäiliön kaasut johdettu seisakin aikana laimeisiin.
- Muutettu säiliön kytkennät CNCG keräilyyn ja haihduttamon sarjalle.





LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

UPM Uruguay, 2009

- Hakesiilolle hakkeen pasutukseen paisuntahöyryä.
- Tehtaan käynnistyksessä erilaisia ongelmia, josta seurasi mm. tilanne, että paisuntahöyry pääsi hakepatjan läpi ja johti laimeiden hajukaasujen väkevöitymiseen yli LEL:n ja lopulta räjähdykseen DNCG erillispolttokattilan alueella.

Södra Värö 13.09.2011 klo 14:46

- SULA-VESI räjähdys soodakattilassa



LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Södra Värö 13.09.2011 klo 14:46

- Lauhdetta/syöttövettä matalapainehöyrylinjan kautta CNCG linjojen polttopään paineenpitohöyrylinjoja pitkin soodakattilaan 40-50 l/min (1 litra à 1674 litraa höyryä).

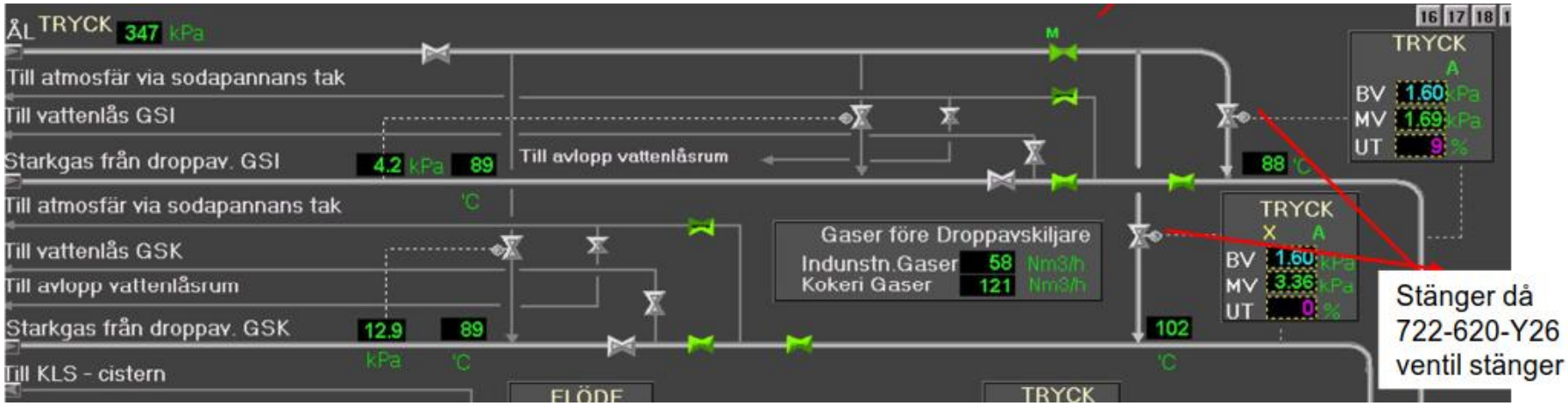




LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Södra Värö 13.09.2011 klo 14:46

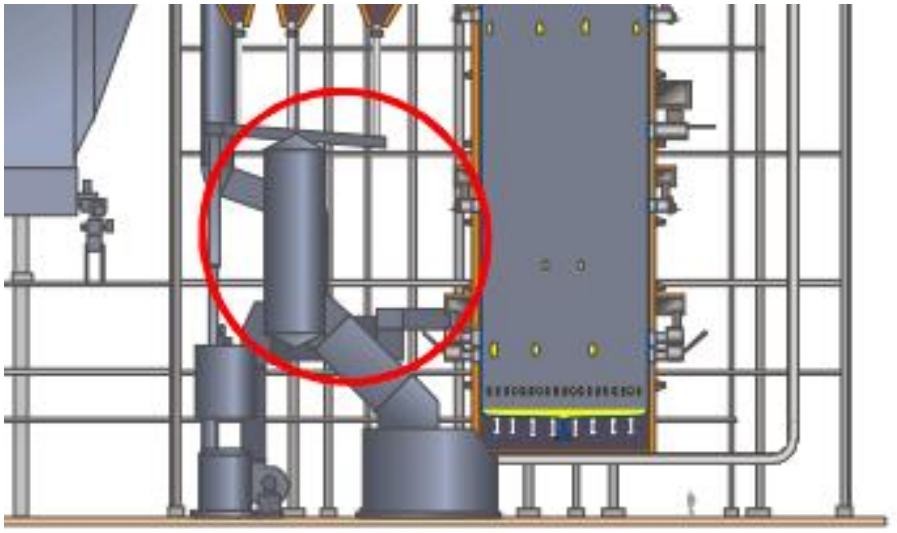
- CNCG linjojen paineenpitohöyrylinjan pääsulkuventtiilin lukitus ei toiminut alentuneesta höyrylinjanpaineesta, ja CNCG polttimen ajossa tarvittiin tuolloin paineenpitohöyryä, joka ei ollutkaan “höyry” faasissa vaan “neste” faasissa.



LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SE Skoghall, 21.01.2014 klo 20:41

- Liuottajan hönkäpesurin pisaranerotinelementin pesuvedet kantautuivat soodakattilaan ja aiheutti sula-vesi räjähdyksen soodakattilassa.
- Hönkäsysteemin tasosijainti vs. ilma-aukkojen korko
- Puutteelliset vesitykset kanavistossa, vesityksiä ei saa yhdistää.



LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SE Veitsiluoto 07.11.2016 klo 03.14

- Työntekijöiden altistuminen hengenvaarallisesti CNCG hajukaasuille keräilyjärjestelmän putkistossa tapahtuneen räjähdyksen jälkeisten murtolevyjen vaihtotöiden yhteydessä





SE Imatra, 19.07.2017

- CNCG palo haihduttamolla



Uutisvuoksi to 20.7.2017

MATTI VEIJALAINEN

Kaukopään tehtailla havaittiin keskiviikkona pieni palonalku.

Hajukaasut syttyivät tuleen Kaukopäässä

LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MITKÄ NOUSI PINTAAN

- TÄRPÄTTI, MeOH
- Hakesiilo ja paisuntahöyryn käyttö pasutukseen
- Sakan syttyminen kanavistossa
- Laimeiden hajukaasujen laimennukset, suljettu keräily
- Hajukaasujen koostumuksien mittaaminen säännöllisesti
- Kanavien tarkistus ja puhdistaminen säännöllisesti
- Poikkeamatarkastelu (HAZOP) tehtävä aina järjestelmä-muutosten yhteydessä yhdessä hajukaasujärjestelmän toimittajan kanssa

YHTEISTYÖTÄ

Otetaan vastaan

onnettomuuskuvauksia

”läheltä piti” tapauksia

hajukaasujen mittausdataa

Projekti jatkuu ehkä keväällä, kun kootaan ryhmä joka laatii ohjeita asioista joita tulee huomioida hajukaasujärjestelmien auditoinnissa.

LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KIITOS!

Kirsi S. Hovikorpi
LUT

kirsi.hovikorpi@uwg.fi / puh. 044 324 9004

LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LIITE 9

YTR: Pöyry Finland, Soodakattilan päästömittausten menetelmät – esitys 2.11.2017



SOODAKATTILAN PÄÄSTÖMITTAUKSET

Soodakattilapäivät 2017

Paula Juuti

2.11.2017

SISÄLTÖ

Mitä on tarkoitus käydä läpi

Lainsäädäntö ja standardointi

- Muutoksia tapahtunut sitten edellisen selvityksen

Mitattavia päästöyhdisteitä

- Mitä, milloin, miten

Mittausten laadunvarmennuksesta

- Vaiheet, tehtävä jakoa, käytännön haasteita soodakattilalla

Mittaustulosten käsittelystä periaatteita

- Mittarilta raja-arvoon verrattavaan keskiarvoon

LAINSÄÄDÄNTÖ JA STANDARDOINTI

- IE Direktiivin myötä BREF dokumentien painoarvo kasvoi
- BAT-päätelmät vaikuttavat ympäristölupien päästöraja-arvoihin

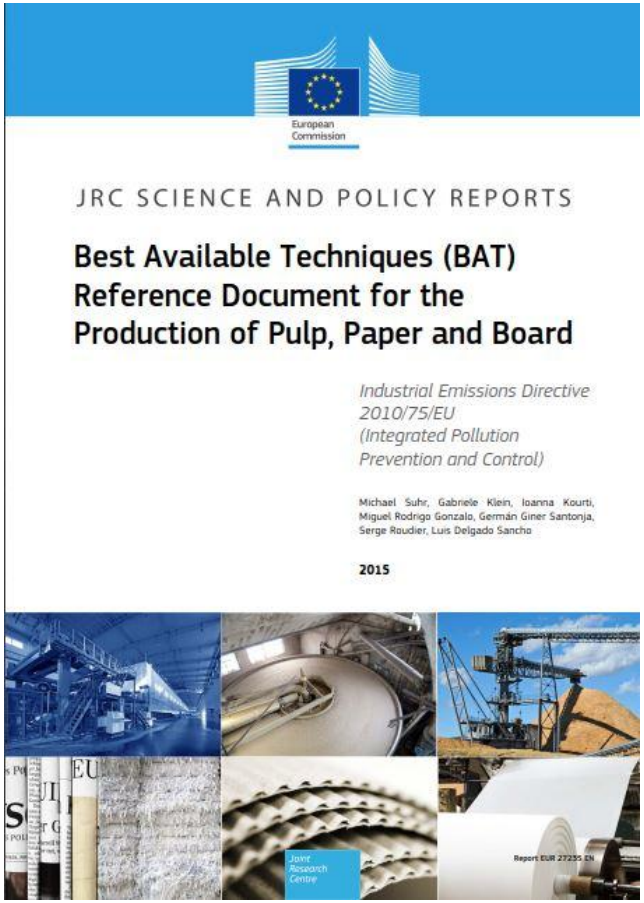
- Tarkkailuvelvoitteet uusissa luvissa

- Mittausstandardit tulevat CENistä
  - vanhat käytössä olleet SFS-standardit eivät ole enää käytössä

- Tavoitteena tarkkailun yhtenäistämistä EU:n taholta
  - JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED installations (Revised final draft 2017-06-05) Joint Research Centre
    http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/mon.html

PP BREF

Massan, paperin ja kartongin tuotannon BAT päätelmät



- BAT päästöjen vähentämiseksi ja päästötasoja soodakattilalla seuraaville yhdisteille
  - **Rikkidioksidi**n ja kaasumaisen kokonaisrikin päästötasoa määritettäessä huomioidaan polttolipeän kuiva-ainepitoisuus
  - **Kaasumaiselle kokonaisrikille** ominaispäästörajat
  - **TRS** raja-arvo pitoisuustaso alentunut
  - **Typen** oksidien pitoisuuskeskiarvon ja ominaispäästön vuosikeskiarvorajaa määritettäessä huomioidaan polttolipeän kuiva-ainepitoisuus
  - **Hiukkasten** päästöraja-arvon määrityksessä huomioidaan hiukkaspuhdistusjärjestelmän elinkaaren vaihe

http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_5_24-05-2017_web.pdf

COPYRIGHT©PÖYRY

PÄÄSTÖRAJAT JA MITTAUSVELVOITTEET

Tuoreimmista selluteollisuuden ympäristöluvista 2015 – 2017 (8) poimittua

Päästö raja-arvoista

- Kaasumaisen kokonaisrikin ominaispäästörajat uusilla laitoksilla tasolla 0,05 kgS/ADt, muilla laitoksilla vaihteluvälin yläpään tasot 0,13 – 0,15 kgS/ADt
- NOx ominaispäästörajat vaihteluvälin yläpäässä 1,4 – 1,7 kgNOx/ADt
- Hiukkasten ominaispäästörajat uusilla 0,2 kg/ADt, muilla 0,4 kg/ADt
- Raja-arvopitoisuuksien tila kuiva NTP 6 % O_2
- Kaikilla laitoksilla TRS pitoisuusraja-arvo ja lähes kaikilla myös hiukkasille
- SO_2 ja NOx pitoisuusraja noin puolella
- Pitoisuusraja-arvojen keskiarvotusajoissa vaihtelua, eivät suoraan verrattavissa

Tarkkailuvelvoitteista

- TRS, (SO_2), NOx mitattava jatkuvatoimisesti
- Muutamalla laitoksella myös hiukkaset mitattava jatkuvatoimisesti
- Jatkuvatoimisten mittausten laadunvarmennukseen on sovellettava standardia SFS-EN 14181
  - QAL-2, AST ulkopuolinen asiantuntija
  - QAL-3 ylläpito

Mittaustuloksien 95 % luotettavuutta kuvaavat osuudet:

- SO_2 ja NOx 20 %
- Hiukkaset ja TRS 30 % päästörajasta

COPYRIGHT©PÖYRY

KERTAMITTAUKSIA

E-PRTR ym. raportointiin

- Metsäteollisuuden päästöjen raportointi Euroopan päästö- ja siirtorekisteriin (YM raportteja 13/2007)
  - Dokumentissa esitetyt energiatuotanto-laitokselta ilmeiset raportoitavat ilmapäästöt
  - Suluissa mahdollisesti raportoitavat
- Tiedot VAHTI-järjestelmään
- Päästökertoimet päivitetään laitosten oman tarkkailusuunnitelmien mukaan
- Vieressä voimassa olevat mittausstandardit
  - * referenssimenetelmä vertailumittauksissa SFS-EN 14181

Yhdiste/-ryhmä	Standardi / menetelmä
Hiukkaset	SFS-EN 13284-1*,-2
CO	SFS-EN 15058*
CO_2	ISO 12039
NMVOC	SFS-EN 12619*
NOx	SFS-EN 14792*
SO_2	ISO 7935, SFS-EN 14791*
(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb), Zn	SFS-EN 14385
(Hg)	SFS-EN 13211
(PCDD/F I-TEQ)	SFS-EN 1948-1,-2,-3
PAH	SFS-EN 1948-1
HCl (Cl ja epäorgaaniset yhd.)	SFS-EN 1911, EN/TS16429
HF (F ja epäorgaaniset yhd.)	ISO 15713, EN/TS16429
O_2	SFS-EN 14789*
H_2O höyry	SFS-EN 14790*
Virtaus	EN ISO 16911-1,-2

COPYRIGHT©PÖYRY

MITTAUSPERIAATTEITA JATKUVIIN MITTAUKSIIN

Soodakattilan kaasumaiset yhdisteet - perinteistä ja vähän muokattua

- Näytettä ottavat järjestelmät
- Näytekaasun käsittely

- Sondi kylmä/kuuma
- Hiukkasten suodatus
- Vesipitoisuuden lasku alle ympäristölämpötilan kastepisteen
  - laimentaen -> kostea mittaus
  - kuivainta käyttäen
    S-yhdisteiden oletetun veteen siirtymisen takia permeaatiokuivain yleinen
- Jako analysaattoreille
- Kuivaustaa käytettäessä TRS yhdisteiden hapettumisen varmistamiseksi laimennus ennen konvertteria
- Mahdollista SO_2 pesu ennen konvertteria, jolloin konvertterin jälkeen analysaattori mittaa suoraan TRS

Mittaustekniset periaatteet

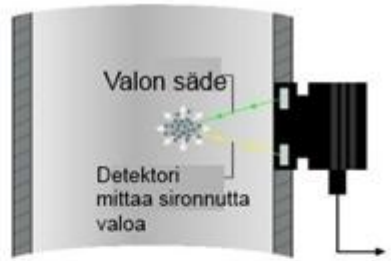
- NOx: kemiluminesenssi,
  IR
- SO_2 UV-fluoresenssi
  NDIR
- TRS Total Reduced Sulphur
  (H_2S, MM, DMS DMDS)
  UV-fluoresenssi
  - erotuksena SO_2TRS – SO_2 tai
  - SO_2 pesurin jälkeen

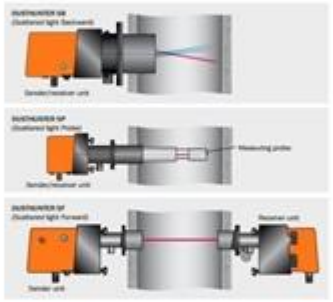
Apusuureet

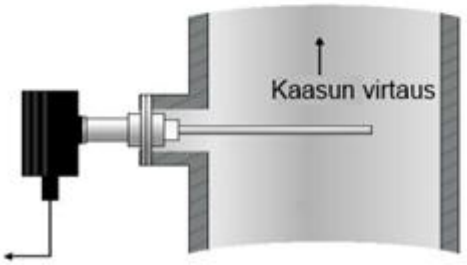
- O_2 zirkonium
  paramagneettinen
- Kosteus, jos mittaus kosteista kaasuista
  IR
  pesurin jälkeen laskennallinen

COPYRIGHT©PÖYRY

Hiukkaset ns. kuivista kaasuista ei pisarakosteutta







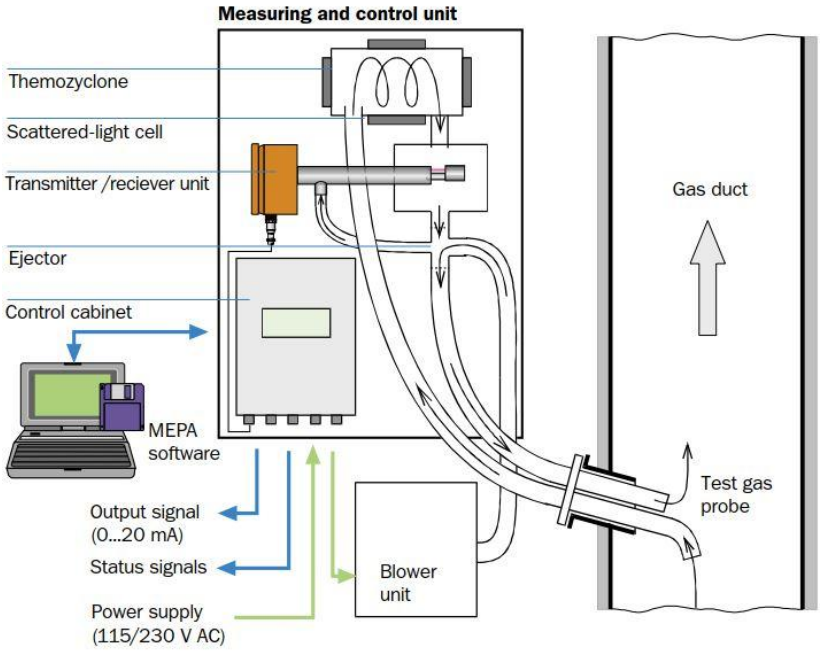
IN-situ eli kanavassa mittaava järjestelmät

A. Valon sirontaan perustuvat
   - Hiukkasten heijastamaa valoa mitataan tietyssä suunnassa
   - eteen, taakse tai sivulle
   - läpi kanavan
   - kertaluokkaa/-ia pienemmille pitoisuuksille soveltuva kuin opasiteettianalysaattorit

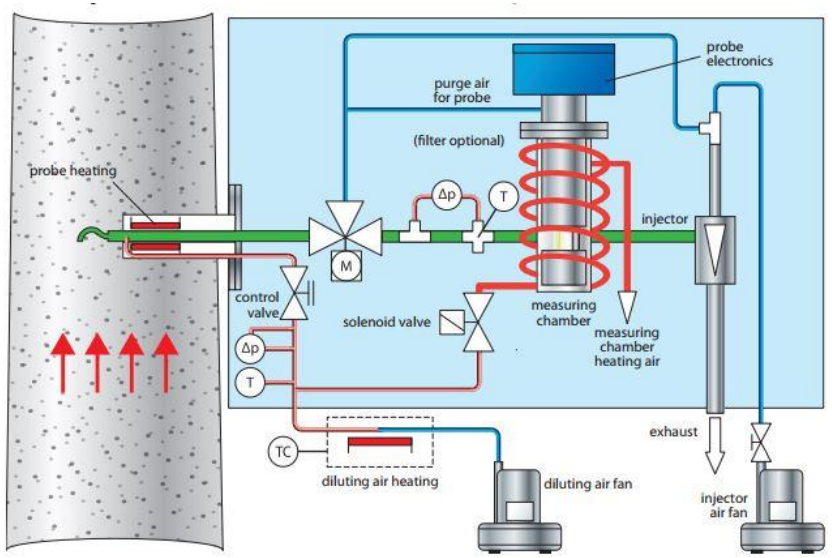
B. Sähkövaraukseen perustuvat
   - hiukkasten varaus aiheuttaa havaittavan virranmuutoksen, joka on suhteessa pitoisuuteen
   - Tribolectric ja ElectroDynamic™
   - eri signaali- ja virta-analyysejä käytössä

COPYRIGHT©PÖYRY

Hiukkaset kosteista kaasuista ekstraktiivisesti



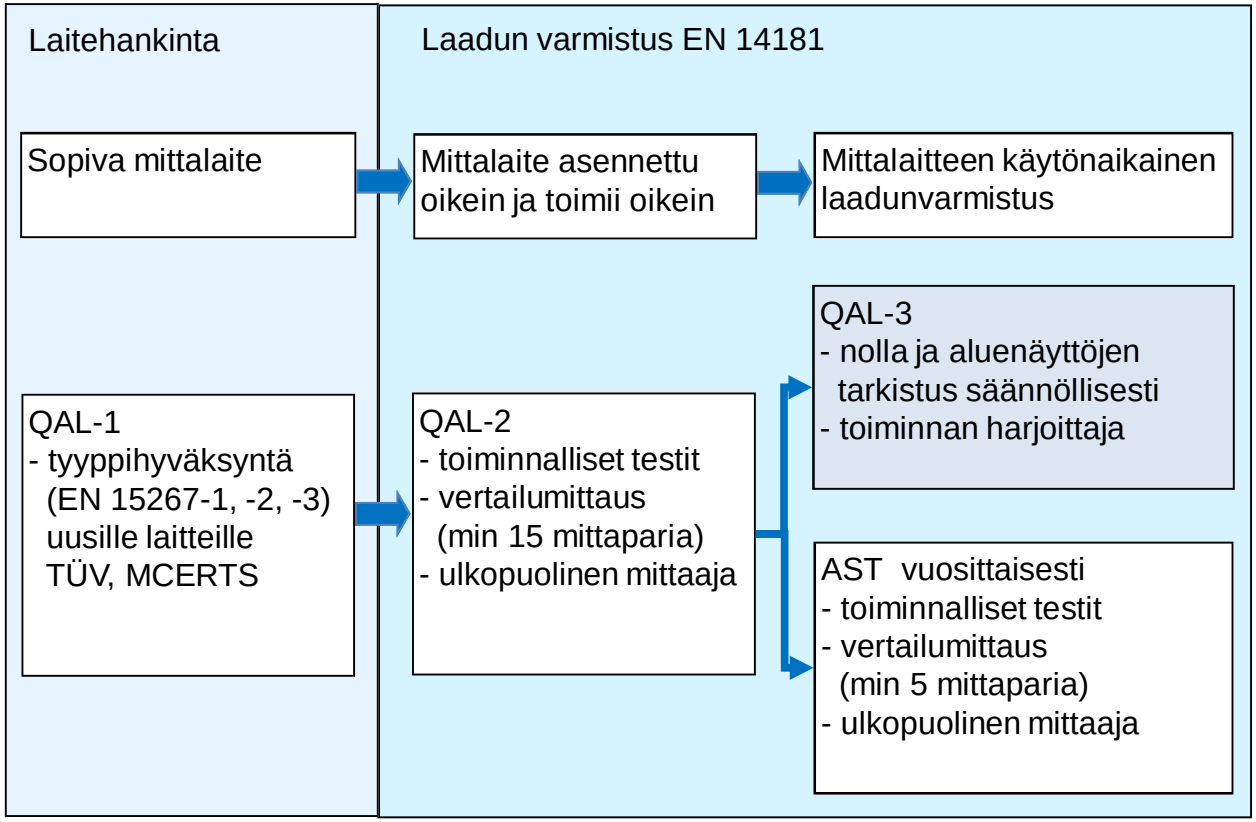
Kaasu tuodaan kuumennettuna (höyrystettynä) kanavasta mittauskammioon



Kaasunäyte laimennetaan lämmitetyllä ilmalla, minkä jälkeen lämpimänä mittauskammioon

MITTAUSTEN LAADUNVARMENNUS

Hankinnasta, asennuksen tarkistamisesta ja käytönaikainen seuranta



TEHTÄVÄJAOSTA

SFS-EN 14181 mukaiset roolit (VTT Technology 289/2017)

o Laitevalmistaja/-toimittaja	· Asianmukainen asennus, yhteistyö toiminnanharjoittajan kanssa ennen vertailuja tarvittaessa niiden aikana, tarvittaessa toiminnalliset testit osin tai kokonaan
o Päästömittaus laboratorio	· Akkreditoidut menetelmät, vertailumittaukset, toiminnallisten testien suoritus ja/tai testiraporttien auditointi
o Toiminnan harjoittaja	· QAL2, QAL3, ja AST raporttien tomittaminen viranomaisille, toiminnallisten testien toteutuksesta huolehtiminen ennen vertailumittauksia, QAL3 tarkastelun toteuttaminen
o Viranomainen	· Toiminnanharjoittajan esittämän päästöjen seurannan ja raportointiohjelman hyväksyntä, ohjelmatoimien toteuttamisen valvonta laitoksella, raporttien tarkastus ja mahdollisiin toimenpiteisiin ryhtyminen

https://energia.fi/files/1522/VTT_Ohjeistuksia_paastomittausten_laadunvarmistukseen_Suomessa_289_2017.pdf

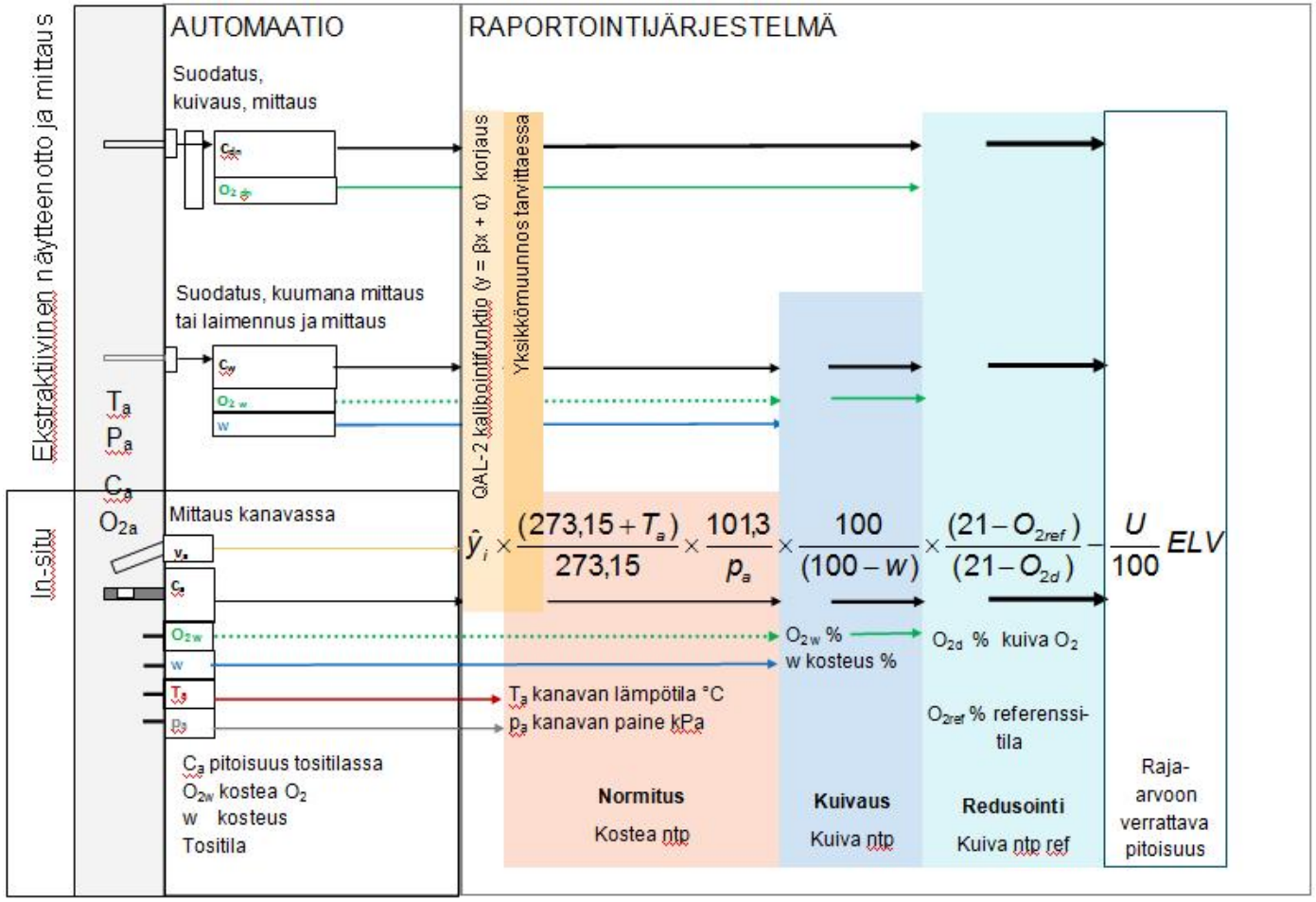
VERTAILUMITTAUKSISTA KÄYTÄNNÖSSÄ

Haasteita soodakattilaympäristössä

- Vain ominaispäästöraja-arvo
  - Mikä arvo otetaan pitoisuusraja-arvoksi kalibrointisuoran pätevyyden testauksessa?
- Pienet pitoisuudet
  - Hiukkaset
  - TRS
  - Referenssimenetelmien määritysrajat
    - Pesurin jälkeen korkeammat kuin in-stack menetelmällä
    - Kaksi mittalaitetta, SO_2 pitoisuus ja näytteenkäsittely nostavat määritysrajaa ja epävarmuutta mahdollisesti yli 30 % raja-arvosta
    - Ei virallista referenssimenetelmää
    - Ø ohjeistuksissa esitetty, että TRS mittaukselle ei tehdä QAL-2 menettelyä, vaan laitteistolle tehdään sen sijaan säännölliset kalibrointien tarkastukset (nolla/span) vähintään kerran kuussa
  - Missä määrin mahdollisuus säätää prosessia edustavan suoran saamiseksi vähintään, laitoksen asiantuntemus käytönaikaisesta vaihtelusta huomioitava suunnittelussa
- Mittaustason edustavuusarvio
  - Savukanavan mitat ja rajoitteiset työskentelytilat
    - Mahdolliset pitoisuuserot mittaustasossa

MITTAUSTULOSTEN MUOKKAUS

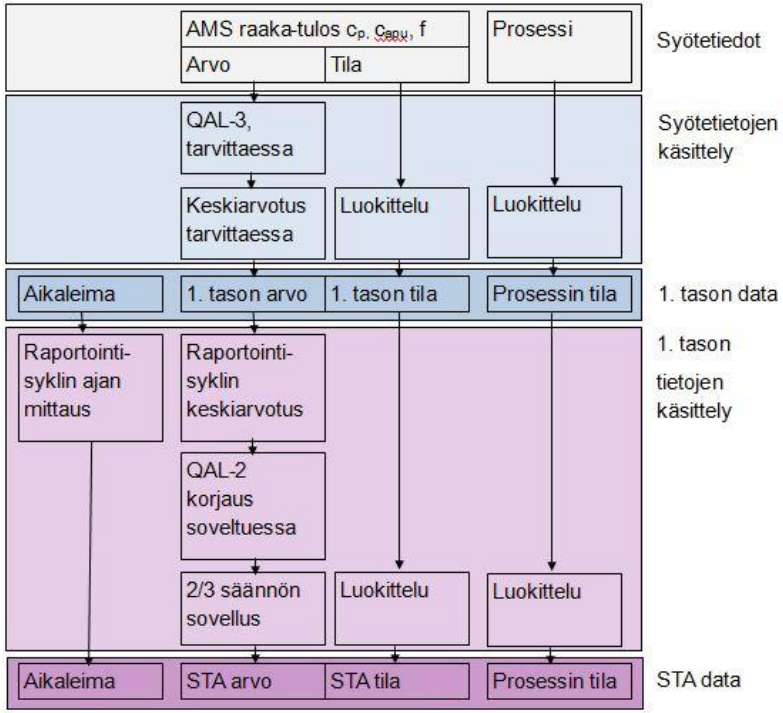
Raja-arvoon verrattavaan pitoisuuteen eri mittaustavoista lähtien

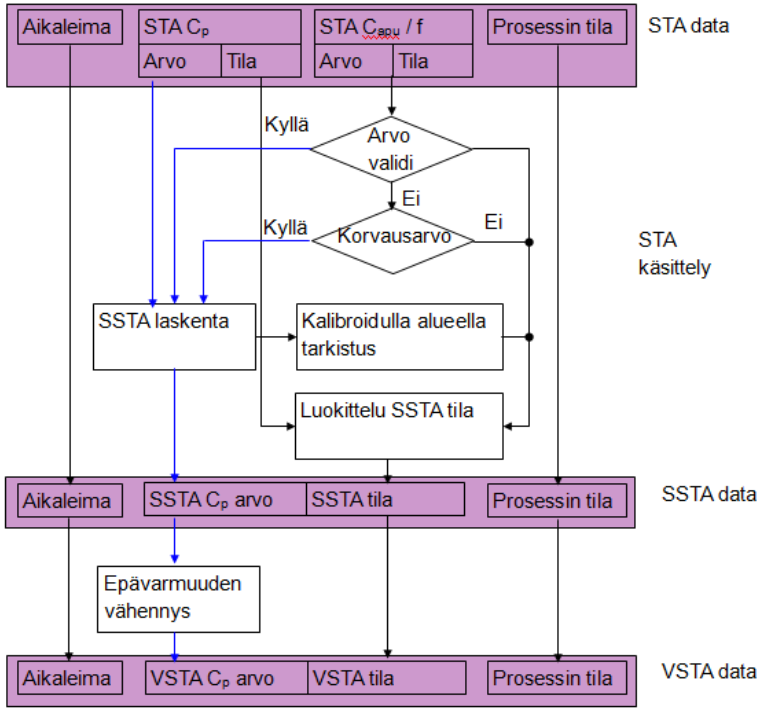


COPYRIGHT©PÖYRY

DATAN KÄSITTELYÄ

Standardin laadinta vaiheessaan prEN 00264076-1:2017





STA lyhyen jakson keskiarvo
SSTA lyhyen jakson keskiarvo referenssitilassa

VSTA validoitu lyhyen ajanjakson keskiarvo

OMINAISPÄÄSTÖN LASKENTA

- Käytetään päästömittausten arvoja
- Tilavuusvirtausarvoja
  - Virtausmittaus / laskenta
  - Samassa olotilassa laskentaan käytetyn pitoisuuden kanssa
  - Apusuureet huomioitava: paine, lämpötila, kosteus
- Todellisia toteutuneista tuotantomääriä

MITTAUSTEN EPÄVARMUUSTARKASTELU

Menetelmäkohtaiset epävarmuuden osatekijät on-line mittaukset

- Epälineaarisuus
- Virityksen nollasiirtymä
- Virityksen aluesiirtymä
- Näytevirtauksen vaikutus
- Ilmanpaineen vaikutus
- Ympäristölämpötilan vaikutus
- Jännitteen vaihtelun vaikutus
- Interferenssit
- Toistettavuus
- Kalibrointikaasun epävarmuus

- Osatekijöiden neliöiden summa
- Laajennettu epävarmuus = edellinen x 2
  - k = 2

$$S_{int,n} > S_{int,p}$$

$$u(C_{CO,ppm}) = \sqrt{\begin{array}{l} u^2(Corr_{fit}) + u^2(Corr_{0,dr}) + u^2(Corr_{s,dr}) + u^2(Corr_{rep}) + u^2(Corr_{adj}) + u^2(Corr_{s,vf}) \\ + u^2(Corr_{a,press}) + u^2(Corr_{temp}) + u^2(Corr_{volt}) + S_{int,n}{}^2 \end{array}}$$

- Uusille mittausjärjestelmille QAL-1 dokumentaation mukana

COPYRIGHT©PÖYRY



PÖYRY

The connected company

Consulting. Engineering. Projects. Operations.

www.poyry.com

LIITE 10

LTR: ÅA, Pulp mill deposit formation and aging – role of intra-deposit alkali chloride transport – tarjous 11/2017

Johan Gadolin
Process Chemistry Centre

ÅBO AKADEMI
UNIVERSITY

Proposal: Pulp mill deposit formation and aging – role of intra-deposit alkali chloride transport

November 2017

Markus Engblom, Daniel Lindberg, Leena Hupa

Executive summary

The work described in this proposal aims for better understanding of changes in morphology and chemistry during aging of recovery boiler deposits. Laboratory, pilot, and industrial scale data so far suggests that recovery boiler deposit chemistry and morphology change over time. The understanding so far is that alkali chloride transport can occur within deposits, resulting in densification of the deposit and chloride enrichment within the deposit and also at the deposit-steel interface. These changes can have practical implications for deposit removability and corrosion of the superheater material. However, systematic studies into recovery boiler deposit aging is lacking.

The objective of this work is to systematically establish how deposit morphology and chemistry depend on deposit formation and aging, especially on the aging processes connected to the deposit temperature gradient. Ultimately this new information can help the industry manage corrosion in the superheater region of recovery boilers and power boilers.

In the proposed work, deposits of different age will be collected from a recovery boiler using air-cooled probes, followed by detailed SEM/EDX analysis of the deposit cross sections. Comparison of the deposit SEM/EDX data will be made to identify time-dependent changes in deposit chemical composition and morphology (e.g. porosity). Mathematical modeling will be utilized to further analyse the experimental data, e.g. by calculations of characteristic temperatures (T_0, T_{15}, T_{70}, T_{100}) for the deposit of different age.

Acknowledging the challenge associated with the deposit collection process over longer time periods, pre-studies into sample collection have been carried out at the Metsä Fibre Rauma recovery boiler. Boiler deposit collection has so far been tested for a relatively short time of 20 minutes. In addition to the Rauma deposit, samples collected from two other recovery boilers have been analysed using SEM for the purpose of obtaining data of the chemical composition as function of position along the deposit cross section, from the steel surface to the outer surface of the deposit. Currently we have developed a functioning process for deposit collection and analysis. We also have collaborated with Rauma for a new design for the probe to be used in longer sampling. The prototype is being constructed.

The work proposed here is divided into two stages. Stage one (7 000 euro) is a continuation of the pre-study, with the objective of obtaining enough practical experience of the deposit collection that a more comprehensive study can be carried out. In the first stage, the sampling time will be extended from 20 minutes to one week. The main purpose of stage one is to provide practical experience in longer sampling times and identification of possible areas of further development needed in the sampling process. Stage one is also expected to provide a good basis for SKY in making a decision to proceed to stage two or not, and a more detailed plan for the work to be done in stage two.. Stage two would be a more comprehensive study, and could be carried out as a master thesis work (30 000 euro), in which sampling times will be extended e.g. to 1000 hours.

Background

Experiments carried out in the laboratory at Åbo Akademi University with granular salts have shown alkali chloride transport to occur within the deposit when a temperature gradient is present over the deposit. The practical implication of this is that Cl is transported towards the cooler heat transfer surface, resulting in enrichment of Cl at the heat transfer surface. Figure 1 presents a SEM image of the deposit cross section, showing alkali chloride build-up within the deposit. Figure 1 also shows a SEM cross section of a deposit collected from a boiler firing straw. The intra-deposit build-up of potassium chloride in the straw deposit visually resembles the build-up in the laboratory deposit, indicating that the alkali chloride transport occurs also in boiler environment.

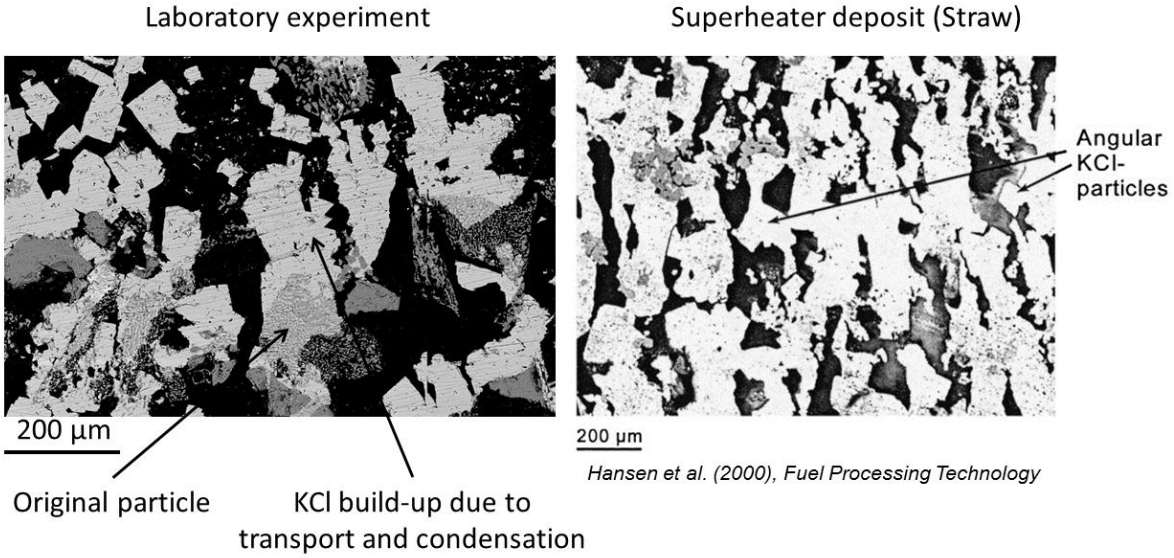


Figure 1. *SEM/EDX deposit cross section images from laboratory experiments and boiler deposits showing localized build-up of KCl within deposits due to temperature gradient induced transport.*

Alkali chloride transport within deposits has also been studied in pilot/bench scale using synthetic salts relevant for recovery boilers. Figure 2 presents SEM cross sections of deposits collected from an entrained flow reactor. In the images, signs of alkali chloride transport and build-up are seen after a relatively short time of only 1.5 hours.

More recently, Costa et al. report differences in the chemical composition of a recovery boiler deposit, when comparing the deposit tube side vs the deposit flue gas side. The deposit of Costa et al. was taken directly from a superheater tube. Figure 3 presents a photograph and chemical composition of the Costa et al deposit.

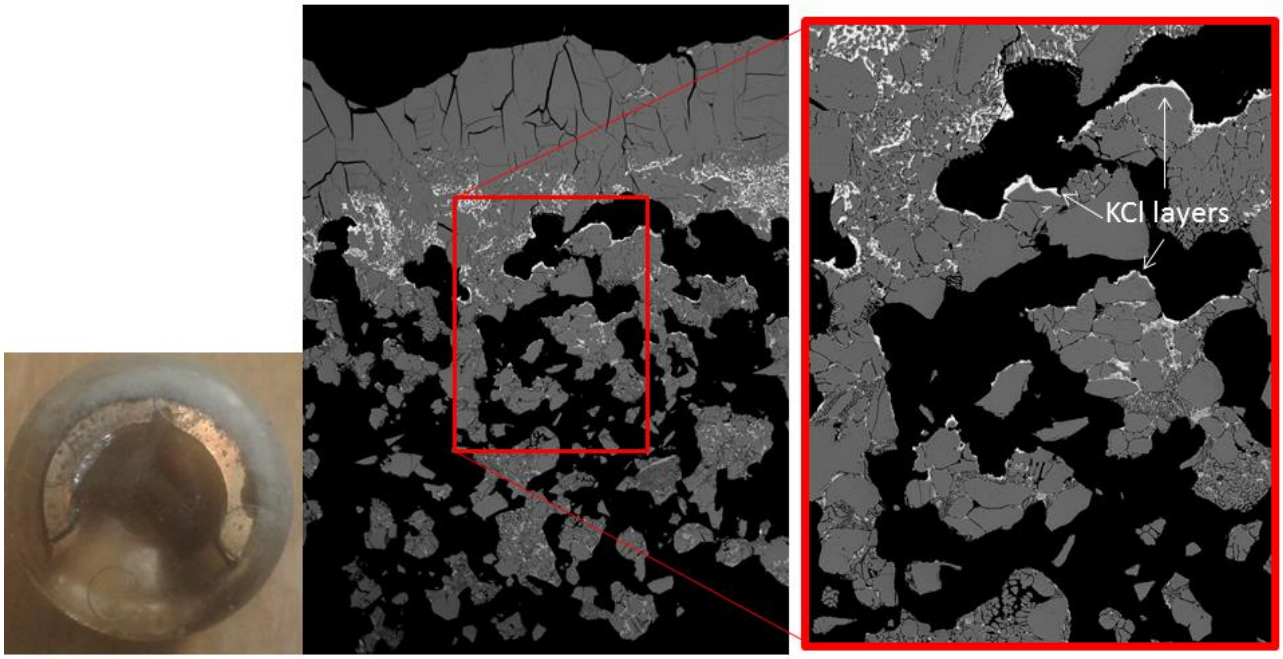


Figure 2. *Photograph (left) and SEM/EDX deposit cross section images (right) from entrained flow reactor experiments showing localized build-up of KCl within a KCl/K_2SO_4 deposit due to temperature gradient induced transport after only 1.5 hours exposure (unpublished research, Niemi 2016).*

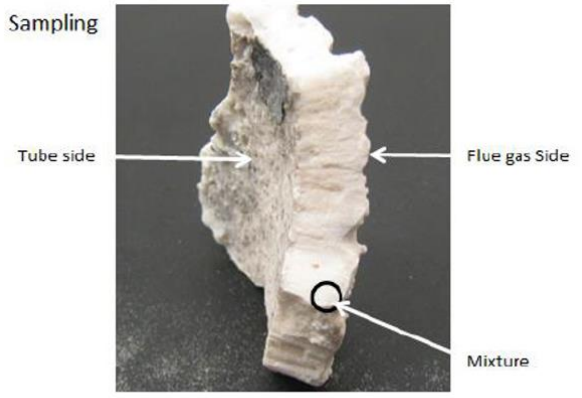


Table 3 : Deposit composition comparison - Gas side vs. tube side

	Tube side	Flue gas side
Na, wt% ash	29,05	31,62
K, wt% ash	10,21	4,44
Cl, wt% ash	17,77	8,06
CO_3, wt% ash	10,5	8,5
FMT, °C	507	549
CMT, °C	540	692

(Costa et al. ICRC 2017)

Figure 3. *Photograph of recovery boiler deposit collected from a superheater tube and analysis of the deposit composition on tube side and flue gas side showing chloride enrichment on tube side and consequent lowering of first melting temperature (FMT, T_0) and complete melting temperature (CMT, T_{100}) estimated using thermodynamic modeling (Costa et al., 2017)*

In our pre-study, deposit sampling was tested at the Rauma mill recovery boiler. Due to limited time, only one deposit sample was collected, over a time period of 20 minutes. In addition to the Rauma sample, two other deposit sample cross sections were analysed using SEM. Figure 4 presents a Cl map from one of the deposits, as well as corresponding Cl profile and characteristic melting temperature profiles calculated using thermodynamic modeling. The pre-study showed that deposit sampling is technically possible, although care needs to be taken in handling the deposit so it does not accidentally detach from the probe before the deposit+sampling probe metal ring is sealed by casting into epoxy. However, it was also noted that deposit collection can

be done by intentionally removing the deposit from the probe before casting it into epoxy, such as in the case in the deposit in Figure 4.

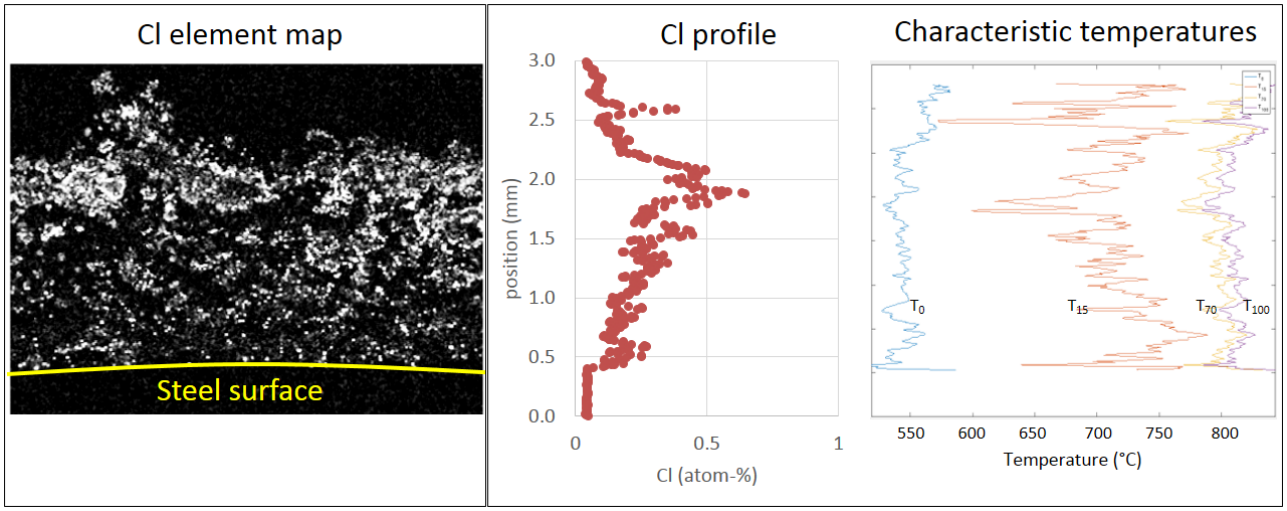


Figure 4. *On left: Deposit SEM Cl element map; on right: deposit average Cl profile and calculated deposit characteristic melting temperature profiles as function of position through the deposit.*

We are currently in the processes of designing and constructing a new probe for deposit collection. This is done in collaboration with the Rauma mill. Figure 5 presents schematic drawings of the new probe construction and probe attachment when placed into the boiler for measurements. The main difference from the probe used earlier to the new construction is that the earlier probe construction was more complicated and thus more expensive. The new construction is planned to be a simple pipe, through which cooling air is blown into the boiler. In the earlier construction, a sample ring is located in the probe tip and the ring is removed after sample collection. In addition, there were two concentric pipes, with the cooling air returning to the base of the probe, located outside the boiler. The new construction will allow us to directly cast the probe tip with deposit attached into epoxy. This removes the additional step of the earlier design in which the steel sampling ring is first removed from the probe and then the ring with deposit is cast into epoxy; this additional step having been identified as a potential step where the deposit may accidentally detach from the probe ring. Other modifications of the new design include a larger hole through which the probe with deposit is removed from the boiler, as well as addition of an arm with which the probe will be more securely fixed in place during deposit collection. We are also looking into possibilities how to remotely keep an eye on the probe temperature control.

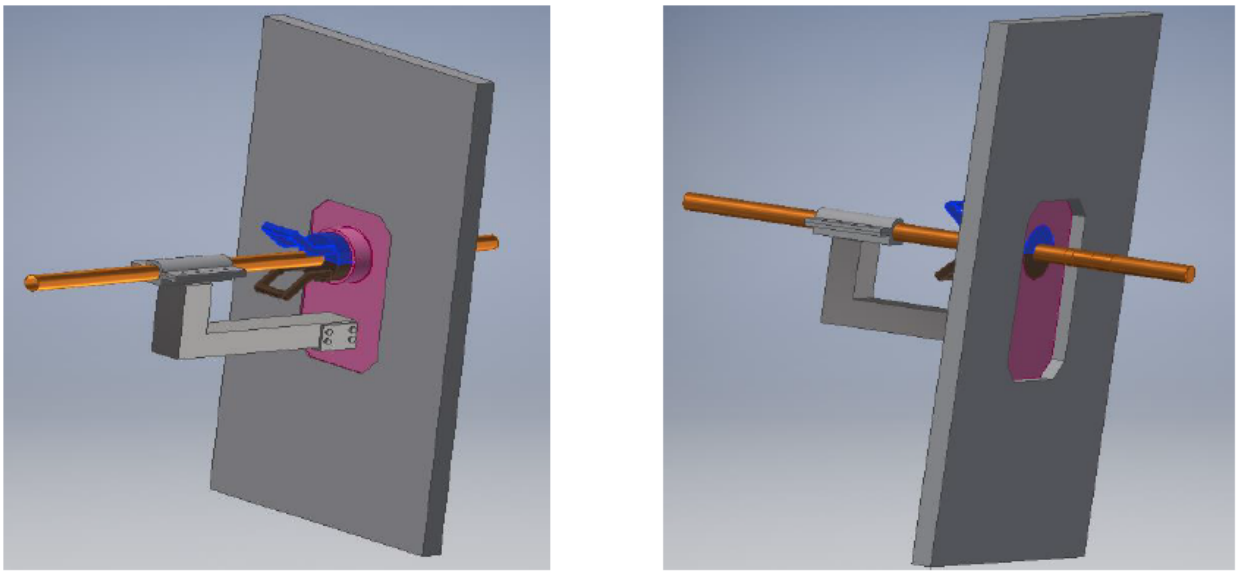


Figure 5. *Schematic pictures of the new probe design; on left: seen from outside the boiler; on right: seen from inside the boiler. Solid bodies (blue and brown) with handles are sealings in the shape of half-cylinder, which serve then purpose of stopping dust build-up in the hole during deposit collection. The sealings are removed when probe is taken out from the boiler.*

Taken together, the data so far from laboratory, pilot, and industrial scale, suggests that recovery boiler deposit chemistry and morphology change over time. The understanding so far is that alkali chloride transport can occur within deposits, resulting in densification of the deposit and chloride enrichment within the deposit and also at the deposit-steel interface. These changes can have practical implications for deposit removability and corrosion. However, systematic studies into recovery boiler deposit aging is lacking.

Objective

The objective of this work is to begin to establish how deposit morphology and chemistry depend on deposit formation and aging, especially on the aging processes connected to the deposit temperature gradient. Ultimately this new information can help the industry manage corrosion in the superheater region of recovery boilers and power boilers.

Description of work

The main activities of the proposed work would consist of deposit sampling at a Kraft recovery boiler and detailed analysis of deposit cross sections using SEM/EDX. The sampling campaign is planned to be carried out in co-operation with one or several of the industrial partners in SKY. The pre-study has been carried out at the Metsä Fibre Rauma mill, and the mill currently is positive to continuing with stage one outline in this proposal. This proposal deals with funding to cover the Åbo Akademi part of the sampling campaign and deposit SEM/EDX and supporting analyses.

The work proposed here is divided into two stages. Stage one is a continuation of the pre-study, with the objective of obtaining enough practical experience of the deposit collection that a more comprehensive study can be carried out. In the first stage, the new probe construction will be tested and the sampling time will be extended from 20 minutes to one/two weeks. The exact sampling times may need to be refined based on discussion with the mill, but currently we (ÅA) would be interested in obtaining samples over time periods of 2 hours, 24 hours, and one or two weeks. Doing these measurements is expected to provide practical experience of collecting

deposits over time periods where sootblowers are not in operation (2 hours) as well as time periods where the process is running as in normal operation and the probe is inside the boiler for a considerably longer time period than so far tested.

Stage two would be a more comprehensive study, and could be carried out as a master thesis work, in which sampling times will be extended e.g. to 1000 hours. A more detailed plan of the work in stage two would be done based on stage one results.

Schedule

The work in stage one is expected to be completed during the first half of 2018.
Stage two work is expected to require 6-9 months (MSc thesis duration is planned as 6 months).
Stage two could start during the second half of 2018, and be completed by spring/summer 2019.
Stage two is understood to be conditional on the decision to be made by SKY to proceed or not to proceed based on stage one results.

Cost

The amount applied for stage one is 7 000 euro (+VAT).
The amount applied for stage two is 30 000 euro (+VAT).

LIITE 11

LTR: Experience of Recovery Boiler Superheater Corrosion at Cenibra-ICRC 2017 esitys

EXPERIENCE OF RECOVERY BOILER SUPERHEATER CORROSION AT CENIBRA

Authors: Costa, Daniel Silva; Paoliello, Flavio Abelha.

Celulose Nipo-brasileira S.A. – Cenibra

Address: BR 381 - km 172 - Distrito de Perpétuo do Socorro - CEP.:35.196-000 - Belo Oriente - MG - Brazil

Abstract: This work presents the experience of severe corrosion of the tertiary superheater tubes in both two recovery boilers at Cenibra (Brazil, MG). Despite the high chloride and potassium contents in the precipitator ash, this corrosion problem was not expected to have occurred because of the relatively low steam temperature (450°C) these boilers operated at. The corrosion characteristics, the possible mechanisms involved and some data about deposits and carryover composition are shown. Remedial actions are also discussed.

Keywords: superheater corrosion, molten smelt corrosion,

Introduction

Corrosion of steam generating equipment is common in many processes and knowing well the fuel to be used is fundamental to predict the type of corrosion environment to which the equipment will be exposed, and to choose which materials will be most suitable for its construction.

In the case of the kraft recovery cycle, where the fuel burned in the recovery boiler (black liquor) has a high ash content, between 40-60%, according to [1], and the environment of the high temperature and sulfur-rich furnace, several mechanisms of corrosion are possible [4].

The main corrosion mechanism for superheaters in today's pulp mills is due to alkaline molten salts and is directly linked to the composition of the boiler fume, especially in boilers operating at steam temperatures above 480°C. Corrosion can be caused either directly by components in the gas phase, by deposits on the superheater tubes or by a combination of these like [3]. The fume from recovery boilers furnace in contact with the superheaters tubes are usually in the solid state, but mixtures of chloride-rich sodium and potassium salts may have low melting points (500-600 °C). In contact with metal surfaces, the liquid phase provides the electrolyte for the electrochemical reactions of corrosion and facilitates the dissolution of the corrosion products, further increasing the attack on the material [4]. In figure 1 the effect of chloride and potassium concentration on the melting temperature of the ash can be seen.

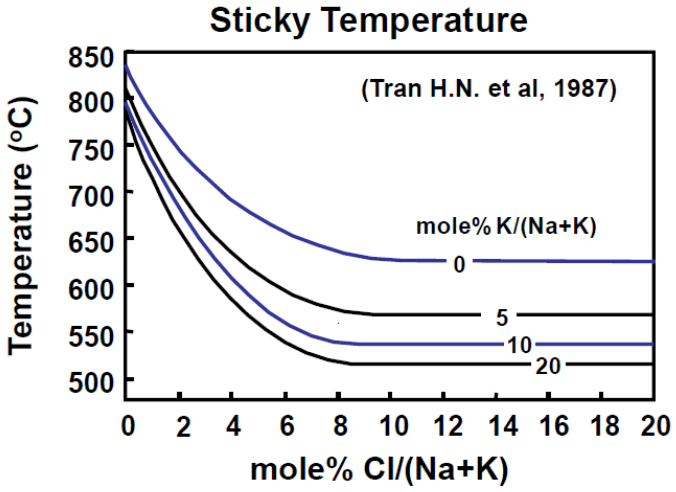


Figure 1: Relationship between chloride and potassium content with deposits melting point.

The other corrosion mechanism considered was chloride corrosion. According to [4], chloride is present in the gas stream in different forms (NaCl, Cl_2, HCl) and these forms react with iron forming $FeCl_3$. Under oxidizing conditions, $FeCl_3$ returns to Fe_2O_3 and releases Cl_2 again, re-feeding the reaction. For other hand, the literature related that corrosion rate become slower with high carbonate and with temperatures below 450°C [4].

CENIBRA's recovery boilers

CENIBRA (Celulose Nipo Brasileira SA), located in Belo Oriente, MG, Brazil, uses the Kraft pulping process to extract Eucalyptus Pulp. It has an approximate production of 1,200 ADt /year. Its Power Plant consists of six boilers and two condensing & extraction turbine generators. Of the six boilers, 3 are recovery boilers, with the following year of start-up and capacities:

- #1 (1976): 1800 tDS/d (currently idle);
- #2 (1992): 2050 (2700 after retrofit) tDS/d;
- #3 (2006): 3500 tDS/d

The recovery boiler # 2 (RB # 2) was retrofitted in 2004, when capacity was increased to 2700 tDS/d and the combustion and liquor injection system was upgraded, as well as other adjustments. Since then, the boiler has a combustion system very similar to the recovery boiler # 3. The recovery boiler #3 (RB#3) was purchased to prepare the recovery cyde to a production upgrade. The steam of both boilers is produced with 450° C and 65 bars, but RB#3 is prepared to operate at 480ºC and 85 bar in the future, with just minor upgrade.

In the present, the black liquor firing load is around 85-90% of designed capacity, as can be seen in figure 2 for RB#3. For RB#2, similar condition exists.

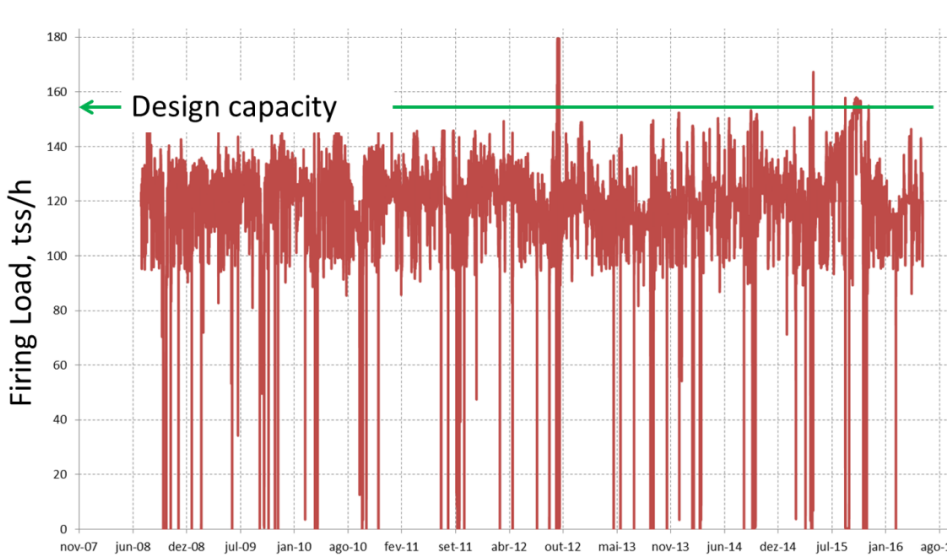


Figure 2: Black liquor firing load in recovery boiler 3 (RB#3) during 8 years (2008-2016)

The corrosion investigation was focused mainly on RB#3 since it is newer, larger and equipped with more modern instruments than RB#2.

RB#3 is of single drum type and comprises, in addition to the radiant furnace, three superheaters, a convective evaporator and two economizers. The secondary and tertiary superheaters are made out of SA213 T12 tubes (hot section of 2nd SH), solid SS316N in lower bends and SA213 T22 in the rest of the tubes, as shown in figure 3.

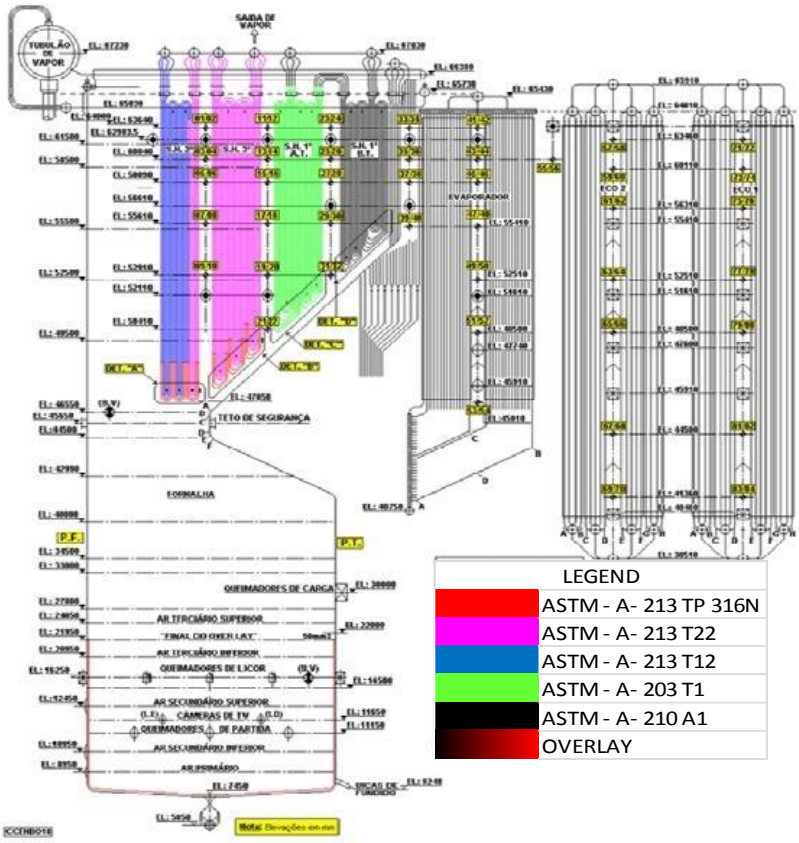


Figure 3: Schematic diagram of recovery boiler 3 with specs of its relevant materials of construction.

Problem discussion

Since the boiler scheduled outage in 2010, the inspection team found signs of corrosion on the last two tubes of the tertiary superheater panel, with increased intensity on the last (hottest) tube in each platen, but without significant loss of thickness, in spite of the rough appearance, as shown in figures 4 and 5.

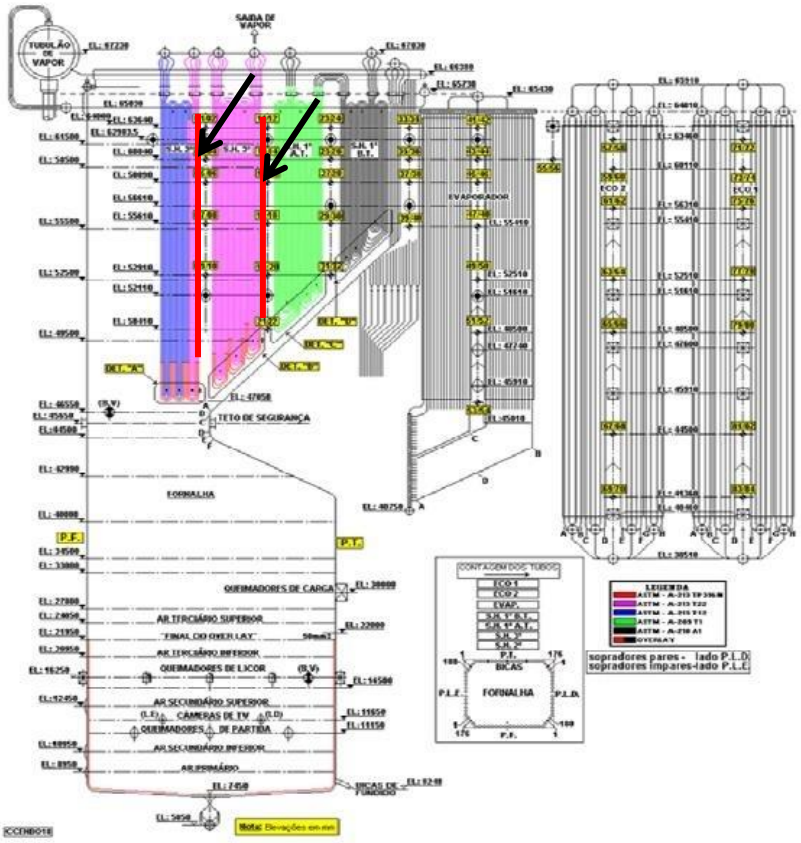


Figure 4: Location of the hottest tubes of 2ry and 3ry superheaters.



Figure 5: Photos of the panels of the superheater 3 ° and detail of the corroded hottest tube taken during the general shutdown of 2011.

In the September 2015 mill shutdown, the inspection team reported an intensification of the corrosive process on the last tube of each tertiary SH platen, as shown in Figure 6, with wall thickness reduction greater than 1 mm/year at several locations.



Figure 6: Photos of the panels of the superheater 3 ° and detail of the severely corroded hottest tube taken during the general shutdown of 2015.

An investigation was conducted to examine the possible causes of such severe tube wastage. The first hypothesis for wastage was the high temperature. However, when evaluating the temperature tendency of the hottest tube measured from the penthouse, the temperature was found to be below the limit values specified for the materials of the tertiary superheater. In addition, the corrosion was found only on the leeward side of the tubes, and not on the windward side according to [4]. The temperature tendency can be seen in Figure 7.

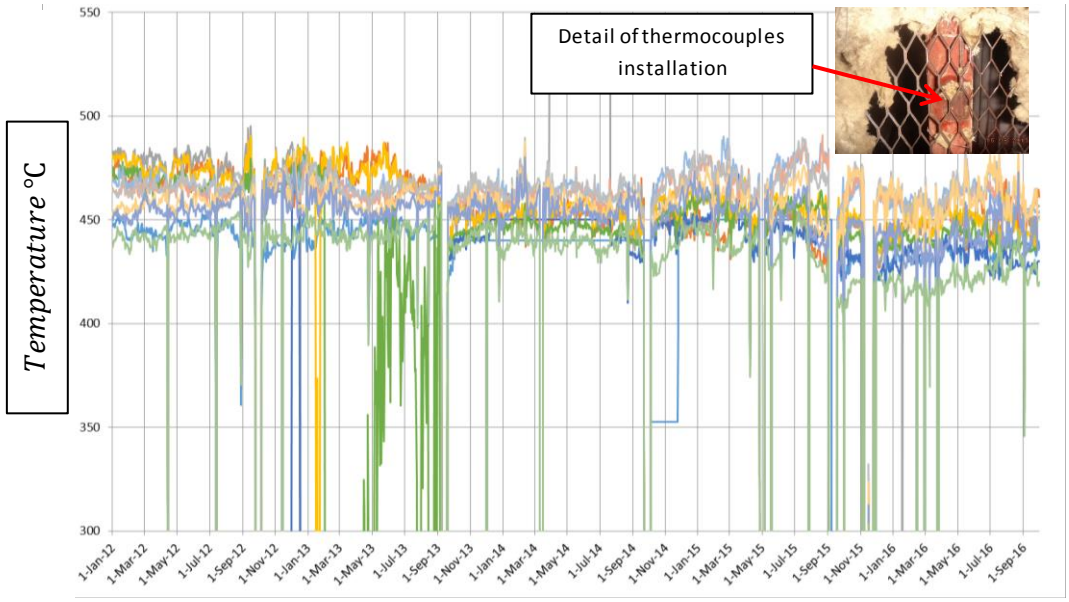


Figure 7: Steam temperature in the hottest tube, measure with thermocouples installed in penthouse, for tertiary superheater.

Corrosion by chlorine and molten deposits are directly related to the composition of the deposits and the ash of the boilers, as mentioned above. In the case of Cenibra mill, due to the absence of a chloride and potassium removal system, high values are observed when compared to other units, seen in figures 8 and 9.

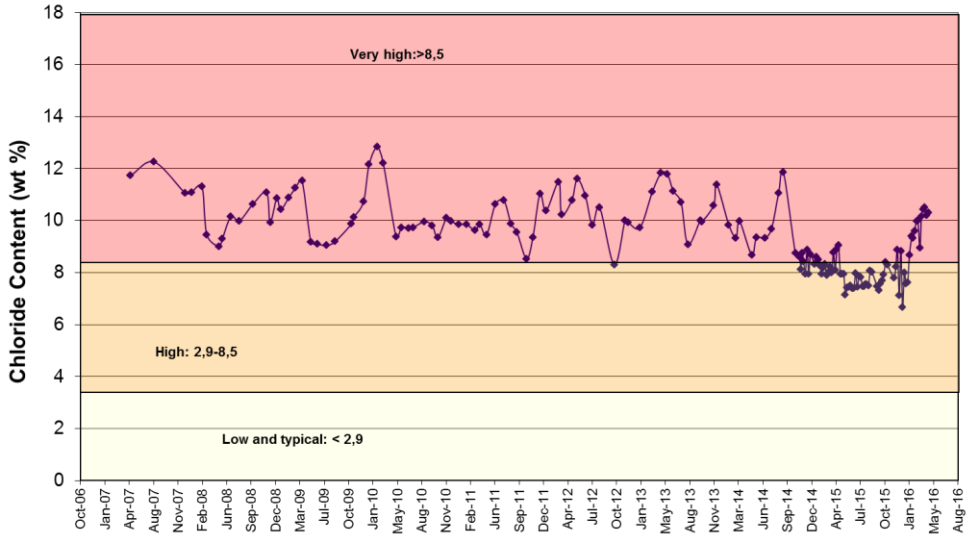


Figure 8: Chloride content (wt%) in ESP ash, from 2007 until 2016.

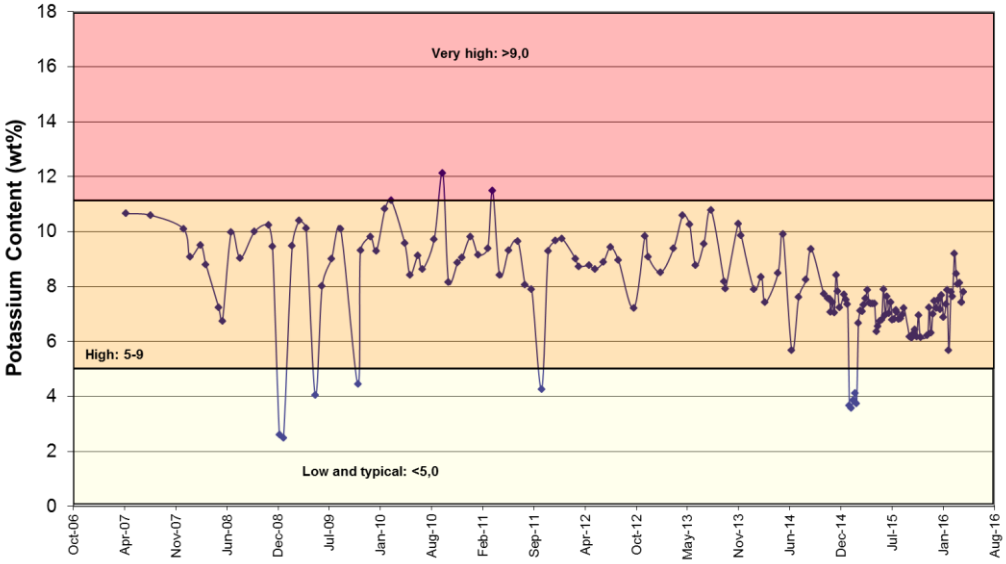


Figure 9: Potassium content (wt%) in ESP ash, from 2007 until 2016.

To confirm these results, black liquor and ESP ash samples were sent to University of Toronto. Based on these results the melting points of the carryover and the ashes were estimated using the MeltCalc software. The data are showed in Tables 1 and 2. The samples were collected in two periods. The samples from group 2 were collected in May 2015, when a controlled purge of the ash of the ESPs of the recovery boilers was done.

Table 1 : Chloride, potassium and sodium contents in as fired black liquor samples at different times.

	Sample 1 (June/2014)	Sample 2 (May/2015)
Na, wt% BLDS	17.8	18.5
K, wt% BLDS	2.29	1.79
Cl, wt% BLDS	2.14	1.73

Table 2 : Chloride, potassium, sodium and carbonate contents in ESPs ash samples at different times

	Sample 1 (June/2014)	Sample 2 (May/2015)
Na, wt% ash	28.82	29.97
K, wt% ash	6.46	4.40
Cl, wt% ash	11.67	7.52
CO_3, wt% ash	9.17	8.98
FMT, °C	531	549

With these data, can be seen that a controlled ESP ash purge increase of the First Melting Point (FMT). In addition, both ash analyzes indicate a significant presence of carbonate in the deposits, which would inhibit the mechanism of chloride corrosion, as already mentioned [4]. This mechanism ruled out for a boiler with this carbonate content, but is difficult to confirm due to the high solubility of corrosion products which normally get gone during boiler wash.

In order to verify the presence of molten deposits on the surface of the attacked tubes and to evaluate the impact of this elevation of the FMT to inhibit the mechanism of corrosion by molten deposits, an estimate of the skin temperature of the hottest tube was performed. From the addition of 50° C to the steam temperature in these tubes, as shown in figure 7, the new graph shown in figure 10 was created, in which the FMT of the carryover and the ash were also induded.

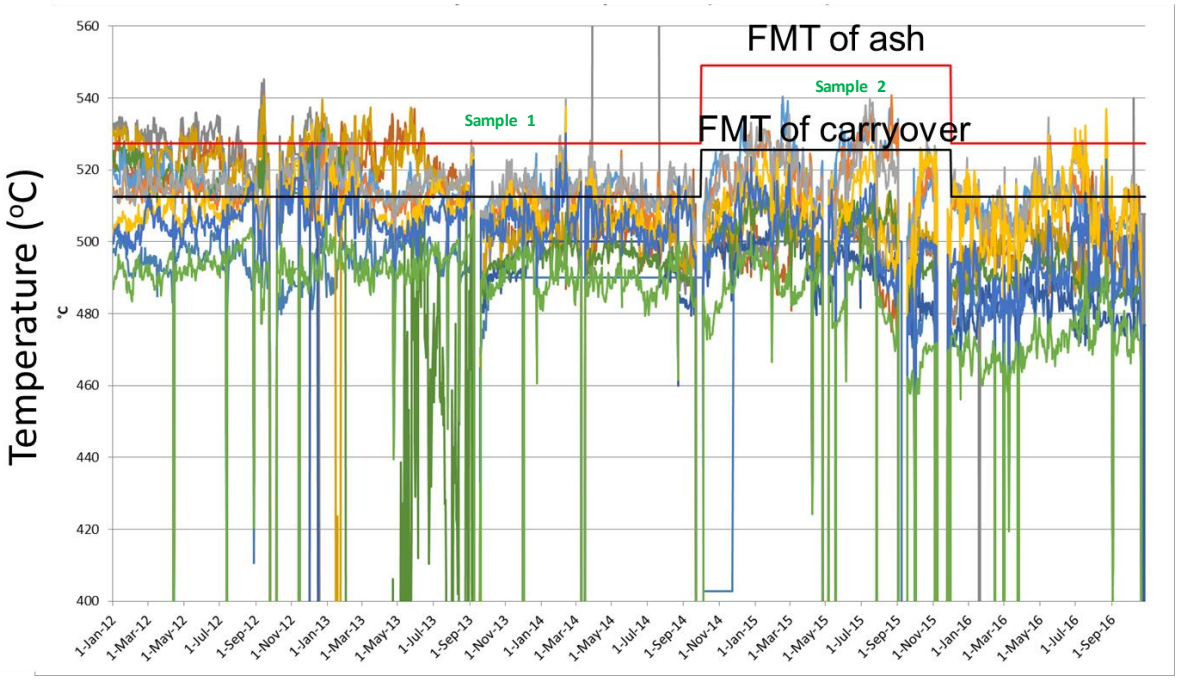


Figure 10: Estimative of skin tube temperature in the hottest tubes, measure with thermocouples installed in penthouse, for tertiary superheater, plus 50°C and compared with FMT of carry over and ash of the samples 1 and 2.

In this figure, it can be observed that the tube surface temperature occasionally exceeds the FMT of the ash, especially in the period before the general shutdown of 2015, when the corrosion increase was observed. This observation would lead us to rule out corrosion by molten deposits, but a new analysis was suggested in the joint assessment with the University of Toronto. During the general shutdown of 2016, deposit samples were collected directly on the affected tubes (the hottest tubes) before the boiler washing. The compositions of both the inner side (tube side) and flue gas side of the deposit were determined (figure 11). These results are summarized in Table 3.

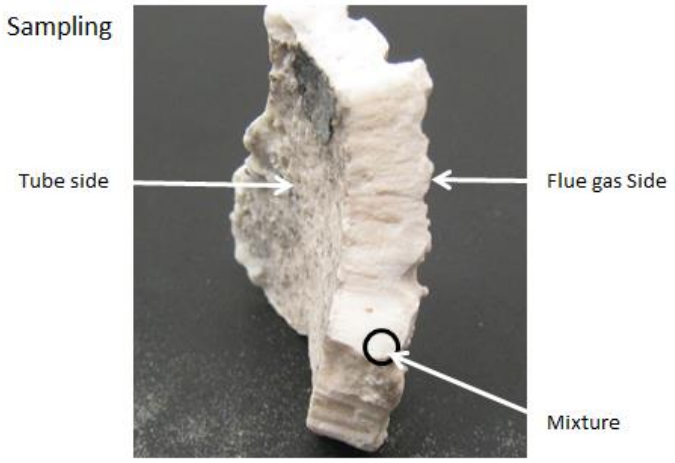


Figure 11: Deposit sample photo, with details of samples segregation.

Table 3 : Deposit composition comparison - Gas side vs. tube side

	Tube side	Flue gas side
Na, wt% ash	29,05	31,62
K, wt% ash	10,21	4,44
Cl, wt% ash	17,77	8,06
CO_3, wt% ash	10,5	8,5
FMT, °C	507	549
CMT, °C	540	692

Based on the composition of the tube side deposit, the FMT and complete melting point (CMT) of the deposit was estimated using the Meltcalc Software. Comparing FMT and CMT with the estimated hottest tube surface temperature (Figure 12), we observed that the FMT is reached in several situations and in periods like as July 2015, before mill shutdown, until the CMT is exceeded. This is a dear evidence that molten deposits may occur on the metal and that the molten deposition corrosion process occurs eventually when the temperature of the steam becomes higher, for example at the time the boiler worked at the highest load. In figure 1, it is dear that before the 2015 general shutdown the boiler was operated dose to the nominal load, different from the other periods evaluated, and that leads to the elevation of the skin temperature of the tubes.

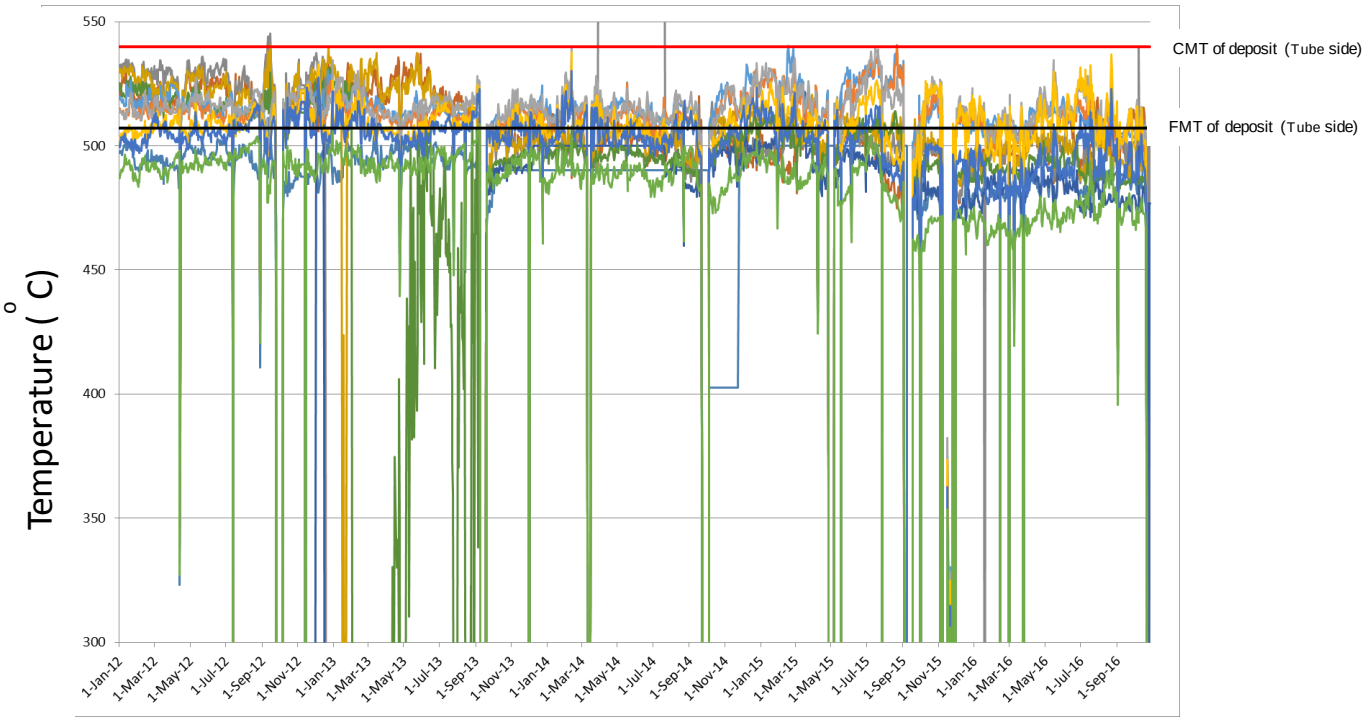


Figure 12: Estimative of skin tube temperature in the hottest tubes, measure with thermocouples installed in penthouse, for tertiary superheater, plus 50°C and compared with FMT of carry over and ash.

Solutions under consideration

The [5] suggested to prevent localized corrosion, special attention is necessary to control the corrosion environment, but additional design criteria and operating care can maximize the material performance.

To reduce chloride and potassium content can minimize a chance of molten phase present at the tube surface and help minimize tube fouling. But, a system for removing chloride and potassium is costly to install and operate (high alkaline loss). With a low firing load of the boilers, it is not economically feasible.

A specific high-temperature corrosion-resistant materials at locations where the expected temperature of steam is close to or above 480ºC looks like the best option in this moment. The alloy MN25R (309LMoN, or 25Cr14Ni0.8Mo0.3N, not UNS coded) was proposed by the boiler maker, but this would involve a major modification in the boiler and will probably have a higher cost since changing the base material with a different coefficient of thermal expansion does not allow a local replacement (i.e. only of the straight section of the hottest tube). Instead, the entire final loop of every platen would require replacement in this case, making for a substantial boiler upgrade job.

The option of applying a composite tube is also being evaluated. Although the composite tube itself is more expensive, this might be a lower cost solution since, in this case, only the affected sections would be replaced. Moreover, the application of a SS316LN (UNS S31651) stainless steel in this position have proven efficiency in the boiler itself, since the lower bends are of this material by original design, those are subject to the same corrosive atmosphere and did not suffer the same damage (figure 13).

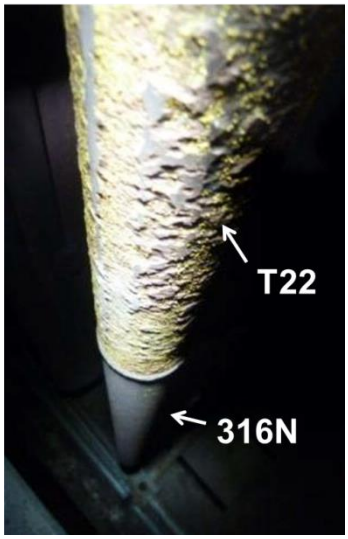


Figure 13: Photo of the hottest tube comparing behavior of SS 316N (UNS S31651) (lower bends) and T22 (UNS K21590) (straight section)

The technical solutions under consideration are summarized in Table 4.

Table 4 : Comparison between various solutions under consideration

Solution for SH hot-tube severe corrosion	**Advantage**	**Weakness**
Tube replacement in-kind	Adherence to the boiler original design, no engineering needed, lower short-term cost	Continued, endless maintenance needs
Tube replacement with austenitic alloy such as MN25R	Endorsed by the boiler OEM.	Requires the entire final loop replacement, a massive job, to avoid risks of differential thermal expansion with existing material
Tube replacement with composite, such as T22+SS310	Requires only replacement of the final tube of each SH platen. Lower cost in comparison to the MN25R alternative	Unprecedented solution. Concept not endorsed by boiler OEM.

Conclusion

From the results of this investigation, we condudes that this is a typical case of molten salt corrosion caused by high chloride (Cl) and high potassium (K) containing deposits. The much higher Cl and K contents in the deposit layer near to the tube surface compared to those in the outer layer facing the flue gas are likely due to the combined effects of a) the diffusion of Cl and K across the deposit layer from the high temperature side (flue gas) to the low temperature side (tube surface); and b) the direct condensation of fume (which is enriched in Cl and K) on the lower temperature tube surface. The similar results had been observed by [2].

The high Cl and K contents in the deposit layer near the tube reduced significantly the deposit FMT and CMT. The low FMT allows for corrosion to occur at a lower tube temperature, while the low CMT allows the deposit to contain more molten phase, and thus increase its ability to corrode the tube material. The estimated tube surface temperature was occasionally (particularly when the boiler was operated at a high firing load) higher than the deposit FMT. This allowed molten deposits to run down on the tube and increased tube wastage.

The installation of an ESP ash treatment system in order to control chloride and potassium ash contents was considered, but only when, and if, the mill decides to increase steam temperature or load in these boilers. In such cases, keeping a lower level of chloride and potassium is a must.

For the moment, materials options are being evaluated for replacing T22 (UNS K21590) for the last two hottest tubes in each platen of the secondary and tertiary superheater, aiming to ensure the fitness of the boiler for the current condition, but also to meet a future condition with higher solids burning and higher steam temperature.

REFERENCES

1. Green, R. P.; Hough, G. Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes. ed. Tappi Press, 1998.
2. Reeve, D.W ., Tran, H.N., Barham, D, "Superheater fireside deposits and corrosion in kraft recovery boilers", The Journal of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry Vol. 64, No. 5, (1981)
3. Nielsena , H.P., Frandsena ,F.J., Dam-Johansena ,K., Baxter ,L.L., "The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers", Progress in Energy and Combustion Science 26 (2000) 283–298.
4. Vakkilainen, E. K., Kraft recovery boilers - Principles and practice, Valopaino Oy, Helsinki, Finland, 2005
5. Faria, R.F. , França, M.A.S., Hermenegildo, T.F.C., "Recovery boiler advanced materials" , The 45th ABTCP International Pulp and Paper Congress and VII IberoAmerican Congress on Pulp and Paper, 2012.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank Sue Mao of the University of Toronto for her help with the deposit/liquor analysis. Our partnership with Professor Honghi Tran and his research group over the past 12 years has been fruitful, as we work dosely together to devise viable solutions to various problems encountered in the chemical recovery process of kraft pulp mills.

LIITE 12

YTR: ÅA, Evaluation of three different gas phase chemistry mechanisms for predicting NOx emission formation in recovery boilers – tarjous 11/2017

November 2017

Proposal:
Evaluation of three different gas phase chemistry mechanisms for predicting NOx emission formation in recovery boilers

Background

Detailed understanding of boiler NOx emission formation and emission formation dependence on different process parameters is key to meeting tightening emission limits or for providing insight into NO reduction levels achievable using primary measures. Mathematical modeling offers a tool for understanding and studying boiler NOx formation.

Chemistry mechanisms with different levels of complexity are currently available. The most detailed ones consider tens or hundreds of species involved in several hundreds of reactions. These mechanisms describe hydrocarbon and nitrogen chemistry and their interactions. These mechanisms are usually applied in simulations using so-called ideal reactors (plug flow and perfectly stirred tank reactors and modifications of these) and are suitable for studying detailed chemistry. In the other end of the spectrum are simplified chemistry mechanisms, which typically consist of a few species and reactions. One benefit of the simplified reactions mechanisms is that they can be incorporated into models based on Computational Fluid Dynamics (CFD). The lower number of species and reactions usually translates into shorter simulation times and better performance in terms of solution convergence. An intermediate class of reaction mechanisms is called skeletal or reduced. These consist of a larger number of species and reactions than the simplified ones but the number of species and reactions is considerably smaller than in the detailed ones.

The current standard approach for CFD engineering calculations of gas phase combustion and NO formation in black liquor recovery boilers usually involves calculating hydrocarbon chemistry using a five-step mechanism (Jones-Lindstedt), whereas NO chemistry is typically modeled using a two-step mechanism considering NO formation (unbalanced reaction R1) and reduction (unbalanced reaction R2).

$$NH_3 + O_2 \longrightarrow NO + H_2O \quad \text{(R1)}$$
$$NO + NH_3 \longrightarrow N_2 + H_2O \quad \text{(R2)}$$

Recently, NO formation in pulp mill boilers has been studied at Åbo Akademi using a reactor-network based model[1]. The in-house developed ÅA model – called "Jet-NOx" – uses a simplified description of fluid dynamics in combination with detailed nitrogen chemistry mechanism developed at ÅA. Figure 1 schematically illustrates the model approach and presents model predictions and boiler data from simulations of a BFB and a recovery boiler. In general, the model predicts well the NO formation in both boilers.

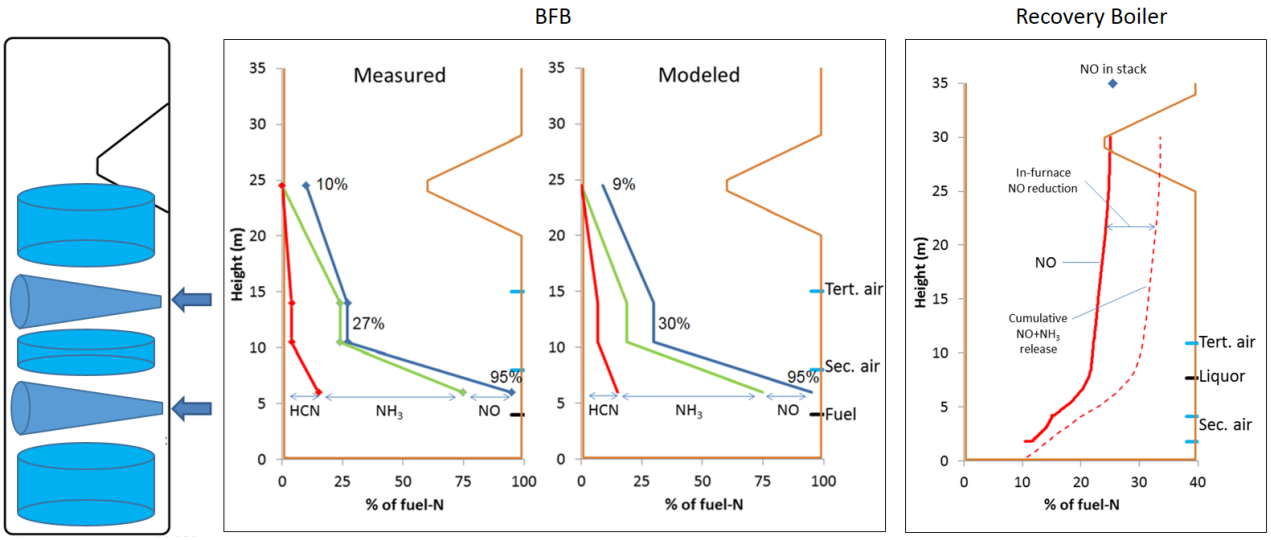


Figure 1. On left, illustration of Jet-NOx model approach for describing furnace gas fluid dynamics as a network of reactors considering furnace sections between air levels and air jets; middle, measured and modelled nitrogen species profiles in a BFB; on right modeled NO profile (thick line) and stack NO in a recovery boiler.

The Jet-NOx results are in many cases in good agreement with boiler data. As seen in Figure 1, particularly in the BFB, the in-furnace nitrogen chemistry as well as final boiler emission is well predicted. For recovery boilers, the Jet-NOx model predicts well the general trends in final NO due to e.g. changes in load or changes in liquor nitrogen content. However, for recovery boilers, the Jet-NOx model predictions are in some cases not in line with practical boiler experience. One concrete example is changes in the vertical placement of the uppermost air level, where depending on the simulated case, the model response is not in line with practical experience in terms of impact on final NO. The simplification of the fluid dynamics has been identified as the main reason for this. In the Jet-NOx model, all furnace gas flowing from below to an air level, is assumed to be mixed with the air jet. Analysis of a CFD simulation of the same case shows that part of the furnace gas actually by-passes the air levels (i.e. the mixing is not complete as assumed in the Jet-NOx model). It could be said that the nitrogen chemistry itself is well captured in the model, but is limited to occur in the lower furnace and not at upper tertiary or quaternary air elevations. Including furnace gas by-pass in the Jet-NOx model has been tested, but this was found not to be a practical approach since inclusion of by-pass is at best based on an additional CFD analysis of the boiler and it still entails a simplification of the fluid dynamic without clear knowledge to which extent the simplification then affects the prediction.

An additional observation from the Jet-NOx simulations is the formation of HCN as an intermediate species in the recovery boilers. This prediction is in line with in-furnace data on nitrogen species in recovery boilers. Current two-step NO chemistry mechanisms do not include HCN, and it is currently not clear to which extent omission of HCN affects e.g. the predicted final recovery boiler NO emission.

Considering the limitations of the Jet-NOx model for predicting recovery boiler NO, a better approach could prove to be the use of a CFD furnace model to better describe the furnace gas flows and mixing, and combine CFD with more detailed chemistry than the current 2-step mechanism. The work proposed here would contribute to answering these questions by assessing

the suitability of chemistry mechanisms of different level of complexity for in-furnace NO formation prediction. This is expected to lead in the future to an improvement in the CFD modelling of recovery boiler NO emission formation.

The objective of the work proposed here is to use the Jet-NOx model to study how the predicted recovery boiler nitrogen chemistry and final NO depend on the chemistry mechanism used. The work is expected to provide information about the benefits, suitability and limitations of three chemistry mechanism (detailed, skeletal, 2-step). This information is particularly relevant for CFD modelling. It would help establish how well the NO formation chemistry is described using the currently used two-step mechanism and provide a base for considering if a more detailed mechanism should be used instead. A description of the proposed work is provided below.

Description of work

The proposed work consists of Jet-NOx simulation of a recovery boiler. The test case would be Wisaforest, for which there exists in-furnace data. Characteristic of the Wisa case is a left-right asymmetry brought on by uneven distribution of fuel and combustion air. Figure 2 presents furnace temperatures as well as O_2 and CO concentrations. In general, the temperatures on the left furnace side are lower than the temperatures on the right side. This is consistent with the left side having oxidizing conditions and the right side having reducing conditions. Data is also available on in-furnace nitrogen species (Figure 3).

First, altogether six Jet-NOx simulation cases will be calculated. For each furnace side simulations will be carried out using three chemistry mechanism: detailed, skeletal, and 2-step. This will allow for comparison of the three mechanism under oxidizing and reducing conditions.

In a separate follow-up study, outside the scope of the present proposed work, CFD simulation of the Wisa case could be carried out to study the differences and similarities when using the 2-step reaction mechanism as compared to the skeletal mechanism. A prerequisite for this follow-up study is to first establish how the mechanism predictions compare to each other in the Jet-NOx simulations. After this, a more clear plan for and decision about the follow-up can be made.

Schedule

The work is expected to be completed during 2018.

Reporting

The work will be reported in form of a PPT presentation at a SKY meeting and a written report.

Cost

The amount applied for is 10 000 euro.

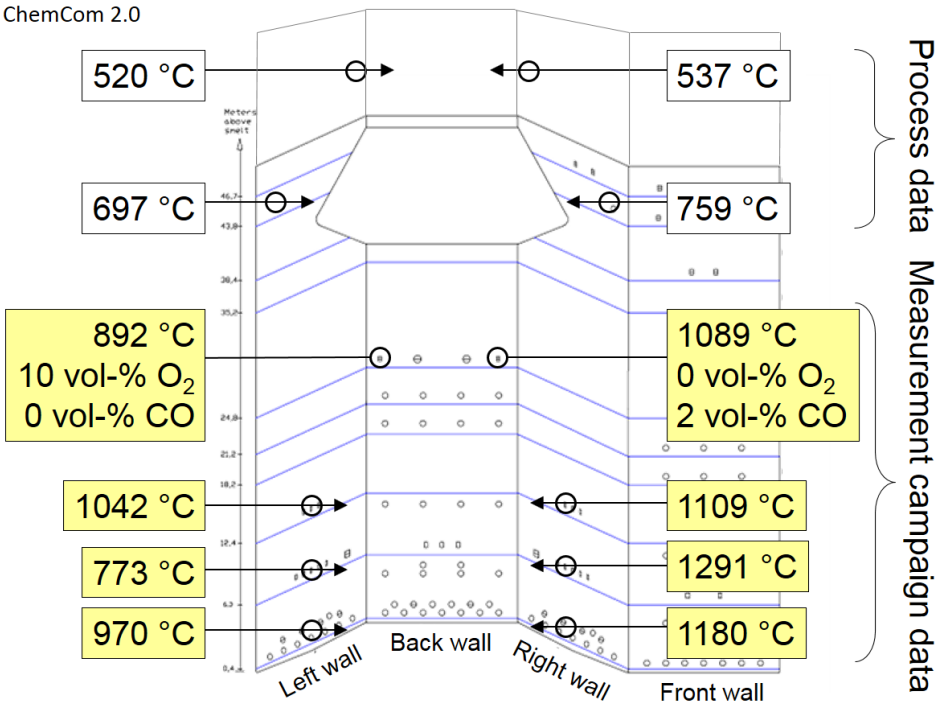


Figure 2. In furnace data from Wisa case on temperatures and gas species.

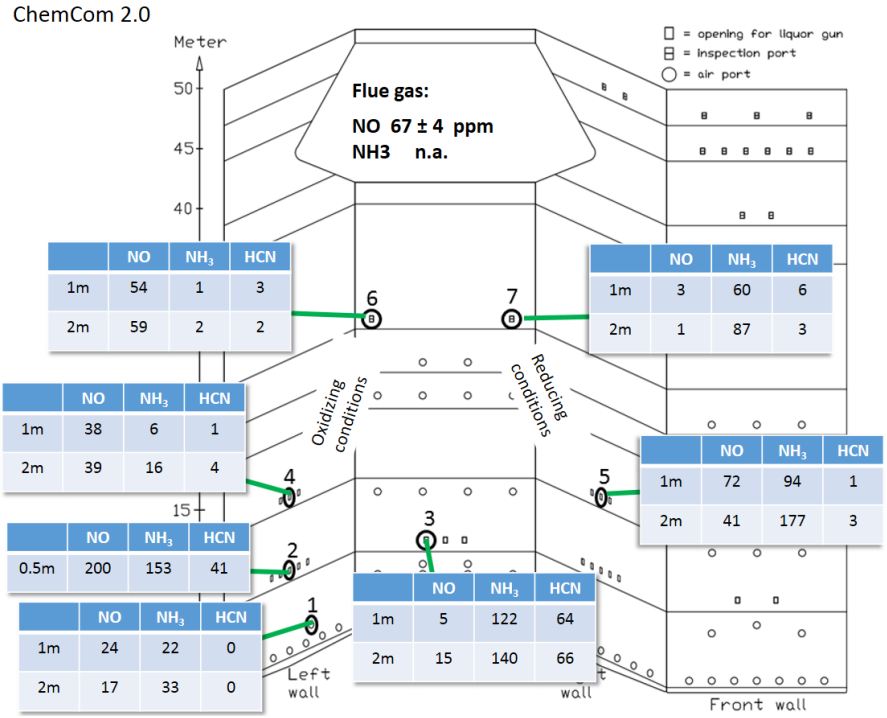


Figure 3. In-furnace data from Wisa case on nitrogen species.

1. Engblom et al, Understanding NO formation in pulp mill boilers, J-FOR, 2016.

LIITE 13

LTR: ÅA, Soodakattilan ja talteenottokierron vierasainetaseet – tarjous 25.11.2017

18.12.2017

Projektiehdotus:
Soodakattilan ja talteenoton vierasainetaseet

Markus Engblom, Leena Hupa
Åbo Akademi

Projektin tarkoituksena on kartoittaa sellutehtaan kemikaalikierron vierasaineiden pitoisuuksia. Työssä tarkastellaan alkuaineita Na, S, Cl, K, Ca, P, Mg, Al, F, ja Hg. Ko. alkuaineiden pitoisuudet määritetään seuraavista kohdista prosessia:

1. Mustalipeä, ennen tuhkan lisäystä
2. Soodakattilan sula
3. Savukaasu ESP jälkeen (kaasunäyte tuhkapartikkeleineen liuokseen joka analysoidaan)
4. Savukaasu pesurin jälkeen (jos tehtaassa tällainen) (kaasunäyte liuokseen joka analysoidaan)
5. ESP tuhka
6. Viherlipeä liuottimesta
7. Viherlipeän kiintoaine
8. Valkolipeä

Näytteitä kerätään kuudesta tehtaasta.

Työ toteutetaan diplomityönä. Työ raportoidaan Soodakattilayhdistykselle myös PPT esityksen ja kirjallisen raportin muodossa.

Työn kustannus Åbo Akademin osalta on: 25200 euroa.
Analyysikustannukset eivät sisälly yllä olevaan.

Analyysikustannuksista on saatu seuraavat tarjoukset:

Labtium:

1) 6 tehdasta x 8 näytettä x 10 alkuainetta: 19 500 eur (+ALV) (sisältää 2 rinnakkaismääritystä)
2) 6 tehdasta x 8 näytettä x 10 alkuainetta x 3 (kolme toistettua analyysiä per alkuaine): 23 400eur (+ALV)
3) 3 tehdasta x 8 näytettä x 10 alkuainetta x 3 (kolme toistettua analyysiä per alkuaine): 12 400 eur (+ALV)

ALS Scandinavia:

1) 6 tehdasta x 8 näytettä x 10 alkuainetta: 6500 eur (+ALV) (yksi määritys per alkuaine)
2) 6 tehdasta x 8 näytettä x 10 alkuainetta x 3 (kolme toistettua analyysiä per alkuaine): 15600 eur (+ALV)
3) 3 tehdasta x 8 näytettä x 10 alkuainetta x 3 (kolme toistettua analyysiä per alkuaine: 8800 eur (+ALV)

LIITE 14

KTR: VTT, Soodakattiloiden ääninuohous – tutkimussuunnitelma/tarjous 17.2.2017

ÄÄNEN KÄYTTÄYTYMINEN SOODAKATTILOIDEN ÄÄNINUOHOUKSESSA, TUTKIMUSSUUNNITELMA

Tausta

Suomen Soodakattilayhdistys ry on teettänyt Tampereen teknillisessä yliopistossa tutkimuksen ”Soodakattilan ääninuohous”[1]. Työn tavoitteena oli kartoittaa aiheesta jo tehtyä tutkimusta. Työhön on koottu ääninuohoinvalmistajien käyttökokemuksia ja tutkimustuloksia soodakattilan tuhkan koostumuksesta ja ominaisuuksista. Lisäksi työssä on käsitelty ääniaaltoa fysikaalisena ilmiönä ja pohdittu äänentaajuuden vaikutusta ääninuohouksen lopputulokseen. Tutkimuksen yhteenvedossa esitetään seuraavanlaisia jatkotutkimustarpeita:

> ”Jatkotutkimuksessa voitaisiin tutkia äänen käyttäytymistä kattilaympäristössä ja kattilarakenteiden akustiikkaa, jotta ääninuohouksen toimivuutta voitaisiin ennakoida ja nuohoustulokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten äänentaajuutta ja nuohoimien sijoituspaikkaa, optimoida. Äänenpaine hajaantuu kattilassa laajalle taajuuskaistalle, minkä vaikutus nuohoustulokseen on tuntematon. Lisäksi äänentaajuuden vaikutus äänen etenemiseen savukanavassa ja heijastumiseen kerrostumasta on epävarma. Myös äänen eri absorptiomekanismien merkitys äänen vaimentumiseen kattilaympäristössä on tuntematon.”
>
> ”Eräs keskeinen ääninuohouksen kehittämistä hidastava tekijä vaikuttaa olevan epätietoisuus ääninuohouksen kattilarakenteille aiheuttamasta rasituksesta. Jatkossa myös tätä aihetta on syytä tutkia.”
>
> ”Jatkotutkimuksessa voitaisiin myös pyrkiä selvittämään, miten ääninuohous aiheuttaa tuhkakerrostuman irtoamisen. Jos ääninuohouksen aiheuttamat tuhkakerrostuman hajoamismekanismit olisivat tiedossa, olisi helpompaa arvioida, miten tuhkakerrostuman fysikaaliset ominaisuudet ja äänen ominaisuudet vaikuttavat kerrostuman irtoamiseen. Myös tuhkan sintraantumisnopeutta on syytä tutkia tarkemmin, jotta nuohousvälin pituus voitaisiin optimoida ja tuhkan sintraantuminen nuohouskertojen välillä välttää. Kaikkiaan ääninuohouksen tulokseen vaikuttavia tekijöitä on runsaasti ja niiden vaikutuksia ei täysin tunneta, minkä vuoksi ääninuohouksen kehittäminen vaatii tutkimusta todellisessa soodakattilaympäristössä.”

Tämä tutkimussuunnitelma pyrkii antamaan vastauksia esitettyjen jatkotutkimustarpeiden akustisille kysymyksille. Ensin selvitetään äänen etenemiseen ja absorptioon liittyviä akustisia parametreja soodakattilaympäristössä laskennallisesti ja mittaamalla. Tulosten perusteella tarkastellaan nuohouksen fysikaalista toimintaa ja sen optimointia sekä simuloidaan ääninuohouksen aiheuttamaa värähtelyä kattilarakenteilla.

Tutkimussuunnitelma koostuu osista, jotka on tarkoitus toteuttaa peräkkäisinä erillisinä toimeksiantoina. Toteutettavaa toimeksiantoa seuraavien kokonaisuuksien suunnitelmia täsmennetään tarvittaessa. Osa niistä on tällä hetkellä vain otsikkotasolla.

---

[1] Peltola, Santeri, Soodakattilan ääninuohous. Kandidaatintyö. Tampereen teknillinen yliopisto 2015. 44 s. + liitteet 6 s.

OSA 1. SOODAKATTILAYMPÄRISTÖN AKUSTISET PARAMETRIT

Lähtökohta

VTT:llä on tehty MATLAB-ohjelma, joka tuottaa ilman akustiset parametrit. Lähtötietoina se tarvitsee lämpötilan ja ilmanpaineen arvot sekä ilman koostumuksessa esiintyvien kaasujen suhteelliset osuudet. Nykyisillään koostumukseen voi sisällyttää seuraavat kaasut: typpi, happi, argon, hiilidioksidi, vesi, rikkidioksidi, typpioksidi, hiilimonoksidi, helium ja metaani. Jos kaasujen suhteellisia osuuksia ei anneta, oletusarvona on typpi 78.08 %, happi 20.95 %, argon 0.934 % ja hiilidioksidi 0.036 %. Ohjelma tuottaa seuraavat akustiset parametrit ilmalle: äänen nopeus, tiheys, adiabaattivakio, puristuvuus, karakteristinen impedanssi, viskositeettikerroin, lämmönjohtumiskerroin sekä ominaislämmöt vakiopaineessa ja -tilavuudessa. Ohjelman logiikka perustuu pääosin eri aineiden molekyylipainoihin ja rotaatiovapausasteiden lukumäärään.

Tilaaja toimittaa seuraavat lähtötiedot soodakattilaympäristöstä

- Tyypilliset lämpötila-alueet
- Tyypilliset ilmanpaineet
- Ilman koostumuksessa esiintyvien kaasujen suhteelliset osuudet (tilavuussuhteet)

Tavoite

Tehtävän tavoitteena on määrittää tyypillisen kattilaympäristön akustiset parametrit. Näiden avulla on määriteltävissä tärkeimmät äänen etenemiseen liittyvät seikat.

Osatehtävä 1.A Ohjelman muuttaminen kattilaympäristöön sopivaksi

Ohjelmaa laajennetaan siten, että sillä voi käsitellä kattilaympäristössä esiintyviä kaasukoostumuksia. Tilavuusviskositeetti (bulk viscosity) sisällytetään laskentaan. Tämän ja joidenkin muiden parametrien osalta on tarvetta etsiä kirjallisuudesta relevantteja parametrien riippuvuuksia eri tekijöistä, erityisesti viskositeetin, lämmönjohtavuuden ja ominaislämpöjen lämpötilariippuvuus relevantissa kaasukoostumuksessa.

Osatehtävä 1.B Akustisten parametrien laskeminen tyypillisissä kattilaympäristöissä

Akustiset parametrit lasketaan tyypillisillä lämpötila- ja painealueilla kattilaympäristössä.

OSA 2. ÄÄNEN ETENEMISABSORPTION LASKENTA KATTILAYMPÄRISTÖSSÄ

Lähtökohta

Kansainvälinen standardi ISO 9613-1 sisältää menetelmän ilmakehän absorption aiheuttaman äänen etenemisvaimentumisen laskemiseksi. Siinä otetaan huomioon klassinen absorptio eli ilman viskositeetin ja lämmönjohtavuuden vaikutukset sekä hapen ja typen relaksaatioprosessien vaikutukset. Logiikka on koodattu MATLABille VTT:llä. Lähtötietoina se tarvitsee lämpötilan, ilmanpaineen ja suhteellisen kosteuden arvot.

Tilaaja toimittaa seuraavat lähtötiedot soodakattilaympäristöstä osan 1 lähtötietojen lisäksi

- Tyypilliset suhteellisen kosteuden arvot
- Tyypillinen kattilageometria
    - CAD-file ja/tai piirustukset
    - Sisältää ainakin puhdistettavat lämmönvaihtimet (tulistimet, keittoputket, ekonomaiseri) ja tyypilliset nuohoimien sijainnit

Osatehtävä 2.A MATLAB-koodin muokkaaminen kattilaympäristöön soveltuvaksi

MATLAB-koodia muokataan kattilaympäristöön paremmin soveltuvaksi. Viskositeetin ja lämmönjohtavuuden osalta hyödynnetään osatehtävän 1.B tuloksia. Relaksaatioprosessien osalta on tarvetta tutkia niitä kirjallisuuden avulla.

Osatehtävä 2.B Etenemisabsorption laskeminen tyypillisissä kattilaympäristöissä

Etenemisabsorptio taajuuden funktiona lasketaan tyypillisillä lämpötila-, paine- ja kosteusalueilla kattilaympäristössä tyypillisessä geometriassa tyypillisillä nuohoimien sijainneilla lämmönvaihtimiin nähden.

OSA 3. ÄÄNEN ABSORPTIO TUHKAKERROSTUMISSA

Osatehtävä 3.A Tuhkakerrostumien Biotin parametrien määrittäminen

Tyypillisten tuhkakerrostumien pintaimpedanssit mitataan impedanssiputkella. Biotin parametreista ominaisvirtausvastukset ja relevantit elastiset parametrit mitataan. Muut Biotin parametrit määritetään käänteisellä karakterisoinnilla FOAM-X –ohjelmaa ja mitattuja parametreja hyödyntäen.

Haaste

Tuhkakerrostumien saattaminen muotoon, jossa ne pysyvät pystyssä vaakasuuntaisen mittausputken poikkileikkaustasolla.

Osatehtävä 3.B Tuhkakerrostumien äänen absorptiokertoimen laskenta

Tuhkakerrostumien äänen absorptiokerroin taajuuden funktiona lasketaan. Ohjelmistona käytetään joko VTT:llä kehitettyä MATLAB-koodia tai kaupallista NOVA-ohjelmistoa. Osatehtävän 1.B tuloksia (3.A:n lisäksi) käytetään lähtötietoina.

Osatehtävä 3.C Tuhkakerrostumien vaikutus äänen etenemisabsorptioon

Osatehtävän 2.B tuloksia täydennetään tuhkakerrostumien absorption osalta.

OSA 4. NUOHOUKSEN FYSIKAALINEN TOIMINTA JA SEN OPTIMOINTI

Tehtävien 1 – 3 tuloksia hyödynnetään tässä tehtävässä.

Osatehtävä 4.A Tuhkakerrostumien irtoamisen fysiikka

Taajuuden ja taajuusjakauman vaikutus. Äänitason vaikutus. Äänen geometrisen etenemisvaimennuksen vaikutus.

Osatehtävä 4.B Nuohouksen tehokas etäisyys äänilähteestä

Osatehtävä 4.C Suolakerrostumien ominaisuuksien vaikutus nuohoustulokseen.

OSA 5. ÄÄNINUOHOUKSEN AIHEUTTAMA VÄRÄHTELY KATTILARAKENTEILLA

FEM-pohjainen mallinnus ja simulointi. Tehtävien 1 – 3 tuloksia hyödynnetään tässä tehtävässä.

Suomen Soodakattilayhdistys ry
c/o Pöyry Finland Oy
Markus Nieminen
PL 4
01621 Vantaa

SOODAKATTILAYMPÄRISTÖN AKUSTISET PARAMETRIT

Kiitämme tarjouspyynnöstänne ja tarjoudumme tekemään toimeksiannon liitteenä 2 olevan tutkimussuunnitelman osasta 1 ”Soodakattilaympäristön akustiset parametrit”.

Hinta ja laskutus

Toimeksiannon hinta on 15 000 €. Hintaan lisätään kulloinkin voimassa oleva arvonlisävero sekä mahdolliset ulkomaiset verot ja viranomaismaksut.

VTT laskuttaa toimeksiannon kertalaskuna, kun toimeksianto on suoritettu ja kirjallinen raportti on toimitettu asiakkaalle.

Lisäksi veloitetaan matka- ja majoituskustannukset sekä päivärahat VTT:n voimassaolevan matkustusohjeen mukaisesti.

Maksuehdot

Maksuehto on 21 päivää laskun päiväyksestä. Viivästyskorko on korkolain mukainen.

Aikataulu

Työ voidaan aloittaa heti tilauksen saapumisen jälkeen ja se valmistuu viimeistään 2 kk:n jälkeen tilauksen saapumisesta.

Raportointi

Tulokset raportoidaan suomenkielisenä VTT:n tutkimusraporttina.

Muut ehdot

VTT:llä on oikeus mainita toimeksiannon ja asiakkaan nimet referenssinään.

Tätä tarjousta tai sen sisältämiä tietoja saa hyödyntää vain VTT:n ja tarjouksen saajan välisessä suhteessa. Tämän tarjouksen osittainenkin kopioiminen, muuttaminen, edelleenluovuttaminen tai käyttäminen muuhun tarkoitukseen ilman VTT:n lupaa on kielletty.

Toimeksiannon ulkopuoliset työt veloitetaan erikseen VTT:n laskutushintojen mukaan.

Muutoin noudatetaan VTT:n yleisiä sopimusehtoja (liite 1).

Yhteyshenkilö

VTT:ssä asiaa hoitaa:
Seppo Uosukainen
Puh. 020 722 6983
Sähköposti: Seppo.Uosukainen@vtt.fi

Voimassaolo

Tarjouksemme on voimassa edellä mainituin ehdoin 30 päivää tarjouksen päiväyksestä. VTT laatii tilausvahvistuksen, jos tilaus poikkeaa tarjouksesta tai tilaus on suullinen. Näissä tapauksissa tilaus astuu voimaan, kun VTT on sen vahvistanut.

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Juha Virtanen
Tutkimustiimin päällikkö

LIITTEET

1 VTT yleiset sopimusehdot
2 Äänen käyttäytyminen soodakattiloiden ääninuohouksessa, tutkimussuunnitelma

Hyväksyminen

Hyväksymme yllä olevan tarjouksen ja teemme tarjouksen mukaisen tilauksen:

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY
Vuorimiehentie 3, Espoo
PL 1000, 02044 VTT
Puh. 020 722 111
Faksi 020 722 7001
seppo.uosukainen@vtt.fi
www.vtt.fi
Y-tunnus 2647375-4

Suomen Soodakattilayhdistys ry
c/o Pöyry Finland Oy
Markus Nieminen
PL 4
01621 Vantaa

ÄÄNEN ETENEMISABSORPTION LASKENTA KATTILAYMPÄRISTÖSSÄ

Kiitämme tarjouspyynnöstänne ja tarjoudumme tekemään toimeksiannon liitteenä 2 olevan tutkimussuunnitelman osasta 2 ”Äänen etenemisabsorption laskenta kattilaympäristössä”. Toimeksiannon tekeminen edellyttää myös aiemmin tarjotun toimeksiannon liitteenä 2 olevan tutkimussuunnitelman osasta 1 ”Soodakattilaympäristön akustiset parametrit” (tarjous VTT-CRM-150587-17) tilaamista.

Hinta ja laskutus

Toimeksiannon hinta on 10 000 €. Hintaan lisätään kulloinkin voimassa oleva arvonlisävero sekä mahdolliset ulkomaiset verot ja viranomaismaksut.

VTT laskuttaa toimeksiannon kertalaskuna, kun toimeksianto on suoritettu ja kirjallinen raportti on toimitettu asiakkaalle.

Lisäksi veloitetaan matka- ja majoituskustannukset sekä päivärahat VTT:n voimassaolevan matkustusohjeen mukaisesti.

Maksuehdot

Maksuehto on 21 päivää laskun päiväyksestä. Viivästyskorko on korkolain mukainen.

Aikataulu

Työ voidaan aloittaa heti tilauksen saapumisen jälkeen ja se sekä aiemmin tarjottu työ liitteenä 2 olevan tutkimussuunnitelman osasta 1 valmistuvat viimeistään 4 kk:n jälkeen kummankin työn tilausten saapumisesta.

Raportointi

Tulokset raportoidaan suomenkielisenä VTT:n tutkimusraporttina.

Muut ehdot

VTT:llä on oikeus mainita toimeksiannon ja asiakkaan nimet referenssinään.

Tätä tarjousta tai sen sisältämiä tietoja saa hyödyntää vain VTT:n ja tarjouksen saajan välisessä suhteessa. Tämän tarjouksen osittainenkin kopioiminen, muuttaminen, edelleenluovuttaminen tai käyttäminen muuhun tarkoitukseen ilman VTT:n lupaa on kielletty.

Toimeksiannon ulkopuoliset työt veloitetaan erikseen VTT:n laskutushintojen mukaan.

Muutoin noudatetaan VTT:n yleisiä sopimusehtoja (liite 1).

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY
Vuorimiehentie 3, Espoo
PL 1000, 02044 VTT
Puh. 020 722 111
Faksi 020 722 7001
seppo.uosukainen@vtt.fi
www.vtt.fi
Y-tunnus 2647375-4

Yhteyshenkilö

VTT:ssä asiaa hoitaa:
Seppo Uosukainen
Puh. 020 722 6983
Sähköposti: Seppo.Uosukainen@vtt.fi

Voimassaolo

Tarjouksemme on voimassa edellä mainituin ehdoin 30 päivää tarjouksen päiväyksestä. VTT laatii tilausvahvistuksen, jos tilaus poikkeaa tarjouksesta tai tilaus on suullinen. Näissä tapauksissa tilaus astuu voimaan, kun VTT on sen vahvistanut.

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Juha Virtanen
Tutkimustiimin päällikkö

LIITTEET

1	VTT yleiset sopimusehdot
2	Äänen käyttäytyminen soodakattiloiden ääninuohouksessa, tutkimussuunnitelma

Hyväksyminen

Hyväksymme yllä olevan tarjouksen ja teemme tarjouksen mukaisen tilauksen:

VTT:N YLEISET SOPIMUSEHDOT 1.4.2016

1. SOVELTAMISALA

1.1 Näitä VTT:n yleisiä sopimusehtoja (jäljempänä Sopimusehdot) sovelletaan osana Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n (jäljempänä VTT) ja VTT:n asiakkaan (jäljempänä Asiakas) välistä toimeksiantosopimusta (VTT ja Asiakas jäljempänä erikseen Sopijapuoli ja yhdessä Sopijapuolet), jolla Sopijapuolet sopivat VTT:n tekemästä työstä tai tuottamasta palvelusta (jäljempänä Toimeksianto).

1.2 VTT Groupiin katsotaan kuuluvaksi VTT sekä organisaatiot, joissa VTT käyttää välitöntä tai välillistä määräysvaltaa.

1.3 Tarjous, johon Sopimusehdot on liitetty, on voimassa yhden (1) kuukauden tarjouksen päiväyksestä.

1.4 Toimeksiannosta johtuvia oikeuksia tai velvollisuuksia ei voida siirtää kolmannelle osapuolelle ilman toisen Sopijapuolen suostumusta.

1.5 Sopijapuolet voivat sopia kirjallisesti näiden ehtojen yksittäisten määräysten muuttamisesta tai poissulkemisesta.

1.6 Mikäli Toimeksiantoon liittyvät sopimusasiakirjat (jäljempänä Sopimus) ovat sisällöltään ristiriitaisia, on niiden pätevyysjärjestys seuraava: 1) toimeksiantosopimus, 2) tilausvahvistus, 3) tarjous, 4) tilaus, 5) Sopimusehdot ja 6) tarjouspyyntö. Mikäli VTT saa Toimeksiannon suorittamista varten rahoitusta Asiakkaan lisäksi joltakin kolmannelta taholta (kuten Tekes, Suomen Akatemia, EU tms.), sovelletaan rahoitukselle annettuja rahoitusehtoja ensisijaisesti suhteessa Sopimukseen.

2. YHTEISTOIMINTAORGANISAATIO

2.1 Sopijapuolet nimittävät Toimeksiantoa varten omat vastuuhenkilönsä. Vastuuhenkilön muutoksesta on ilmoitettava toiselle Sopijapuolelle.

2.2 Mikäli Sopimuksen mukaan Toimeksiantoa ohjaa johtoryhmä (tai vastaava Sopijapuolten edustajista koostuva ohjaava elin), silloin kumpikin Sopijapuoli nimeää johtoryhmään saman verran edustajia.

2.3. Johtoryhmän tehtävänä on käsitellä Toimeksiantoa koskevia asioita sekä erityisesti valvoa ja ohjata Toimeksiannon toteuttamista Sopimuksen rajaamissa puitteissa. Tätä varten johtoryhmä:
- täsmentää Toimeksiannolle asetetut tavoitteet ja hyväksyy Toimeksiantoa koskevat suunnitelmat,
- käsittelee projektisuunnitelman tarkistukset ja muutokset sekä tarvittaessa esittelee ne Sopijapuolten hyväksyttäväksi,
- valvoo Toimeksiannon edistymistä ja tukee projektipäällikön toimintaa,
- hyväksyy Tulokset ja toteaa Toimeksiannon loppuun suoritetuksi

2.4 Johtoryhmä ei voi tehdä muutoksia Sopimukseen, ellei Sopijapuolten kesken siitä erikseen kirjallisesti sovita.

3. VELOITUS

3.1 Sopimuksessa sovitaan Toimeksiannon veloituksesta. Hinta ilmaistaan euroina.

3.2 Arvonlisävero sekä mahdolliset ulkomaiset verot ja viranomaismaksut lisätään sovittuun hintaan.

3.3 Mikäli Toimeksiannon tavoitetta tai aikataulua muutetaan, taikka Sopimuksen voimassaoloaikana tapahtuu Asiakkaan ja VTT:n yhteisesti toteamia olennaisia kustannustason muutoksia, tarkistetaan veloitusta vastaavasti ko. muutoksen ajankohdasta lukien.

3.4 Ellei laskutusaikataulusta ole muuta kirjallisesti sovittu, VTT laskuttaa sovitun hinnan Toimeksiannon aikataulua vastaavissa kuukausierissä.

3.5 VTT:llä on oikeus pitää hallussaan Tulokset, kunnes Toimeksianto on kokonaan maksettu.

3.6 Maksu on suoritettava 21 päivän kuluessa laskun päiväyksestä. Viivästyskorko on voimassaolevan korkolain (20.8.1982/633) mukainen viivästyskorko. Laskuun lisätään mahdolliset perintäkulut. Laskun huomautusaika on 8 päivää laskun päiväyksestä.

4. LUOTTAMUKSELLISUUS

4.1 "Salassapidettävällä Tiedolla" tarkoitetaan kaikkea tietoa (mukaan lukien tietämys, tietotaito, liikesalaisuudet, teknologinen tai kaupallinen tieto, laitteet ja ohjelmistot (mukaan lukien lähdekoodi) riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai voitaisiinko niitä suojata tekijänoikeudella, patentilla, tavaramerkillä tai muulla immateriaalioikeudella), joka liittyy Toimeksiantoon ja jonka tietoa luovuttava Sopijapuoli (jäljempänä Luovuttava Sopijapuoli) on luovuttanut (tai jonka puolesta luovutus on tehty) tietoa vastaanottavalle Sopijapuolelle (jäljempänä Vastaanottava Sopijapuoli) riippumatta tiedon luovutuksen tavasta (mukaan lukien kirjallinen, suullinen, elektroninen tai havainnoimalla tapahtunut luovutus). Vastaanottava Sopijapuoli sitoutuu pitämään Salassapidettävän Tiedon salassa ja olemaan luovuttamatta sitä kolmansille ilman Luovuttavalta Sopijapuolelta saatua etukäteistä kirjallista suostumusta. Vastaanottavalla Sopijapuolella on oikeus käyttää Salassapidettävää Tietoa ainoastaan Toimeksiantoon liittyvien tehtävien, sekä Sopimuksesta johtuvien oikeuksiensa ja velvollisuuksiensa toteuttamiseen.

4.2 Luovutettua tietoa ei katsota Salassapidettäväksi Tiedoksi siltä osin, kun Vastaanottava Sopijapuoli pystyy näyttämään toteen, että:
a) tieto on ollut tai tulee julkiseksi tai muutoin yleisesti saataville ilman tämän Sopimuksen rikkomista; tai
b) tieto on jo Vastaanottavan Sopijapuolen tiedossa tiedon luovutuksen hetkellä; tai
c) Vastaanottava Sopijapuoli on laillisesti saanut tiedon kolmannelta osapuolelta ilman salassapitovelvoitteita; tai
d) Vastaanottava Sopijapuoli on kehittänyt tiedon ilman Salassapidettävän Tiedon käyttämistä.

Mikäli Vastaanottava Sopijapuoli velvoitetaan hallinnollisen tai juridisen määräyksen tai päätöksen perusteella luovuttamaan Salassapidettävää Tietoa, Vastaanottavalla Sopijapuolella on oikeus tehdä luovutus, edellyttäen että se ilmoittaa lainsäädännön sallimissa tilanteissa luovutuksesta etukäteen Luovuttavalle Sopijapuolelle ja antaa Luovuttavalle Sopijapuolelle mahdollisuuden turvautua tarpeellisiin vastakeinoihin Salassapidettävän Tiedon suojaamiseksi.

4.3 Salassapitovelvoite on voimassa Sopimuksen keston ajan, sekä kymmenen (10) vuotta sen päättymisen jälkeen, ellei Sopimuksessa ole sovittu tästä poikkeavaa salassapitoaikaa.

4.4 Salassapitovelvoitteesta huolimatta VTT:llä on tarvittaessa oikeus antaa luottamuksellisia tietoja hyväksytyille ali-hankkijoilleen sekä VTT Groupiin kuuluville organisaatioille edellyttäen, että VTT huolehtii näiden sitouttamisesta vastaavan laajuisiin salassapitovelvoitteisiin kuin mitä Sopimuksessa on sovittu.

4.5 VTT:llä on oikeus mainita Toimeksiannon ja Asiakkaan nimet referenssinään.

5. OMISTUS- JA KÄYTTÖOIKEUDET

5.1 Sopijapuolen toiselle Sopijapuolelle luovuttama tieto, ideat, menetelmät, ratkaisumallit, laitteet, aineet ja muu aineisto, riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai suojattavissa immateriaalioikeudellisesti, jotka ovat syntyneet Toimeksiannon ulkopuolella (jäljempänä Tausta-aineisto), kuuluvat luovuttavalle Sopijapuolelle. Mikäli VTT:n Tausta-aineistoa tarvitaan Tulosten hyödyntämiseen, Tausta-aineiston käyttöoikeuden ehdoista sovitaan kirjallisesti erikseen.

5.2 Tieto, ideat, menetelmät, ratkaisumallit, laitteet, aineet ja muu aineisto, riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai suojattavissa immateriaalioikeudellisesti, jotka VTT esittää ja/tai luo Toimeksiannon toteuttamista ja/tai tulosten saavuttamista varten, mutta jotka eivät tule osaksi Tulosta (esimerkiksi tutkimustyökalut, jotka tehdään Toimeksiannossa tietyn tuloksen saavuttamiseksi), ovat VTT:n omaisuutta.

5.3 Tieto, ideat, menetelmät, ratkaisumallit, laitteet, aineet ja muu aineisto, mukaan lukien syntyneet raportit ja selvitykset, riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai suojattavissa immateriaalioikeudellisesti, jotka ovat syntyneet Toimeksiannossa ja tulevat osaksi Toimeksiannon tulosta (jäljempänä Tulokset) ovat Toimeksiantajan omaisuutta, ellei
a) Sopimuksessa ole todettu Toimeksiannon kohteena olevan VTT:n ydinteknologia (core technology), ja/tai
b) Toimeksiannon kohteena on tietokoneohjelmisto, tietokanta, integroidun piirin piirimalli ja/tai biotekninen löydös (esimerkiksi geenisekvenssi, mikro-organismi, tai kohdemolekyyli).
Edellä mainituissa tapauksissa omistusoikeus Tuloksiin jää VTT:lle ja Asiakas saa Tuloksiin erikseen määriteltävän käyttöoikeuden Asiakkaan kohtuullisten tarpeiden, sekä Toimeksiannon sovellusalueen kannalta järkevässä laajuudessa.

5.4 Sopijapuolet saavat käyttää toisen Sopijapuolen Tausta-aineistoa vain Toimeksiantoon kuuluvien tehtävien suorittamiseen.

5.4 Toimeksiantoa varten VTT:n itselleen hankkimat työvälineet ja laitteet ovat VTT:n omaisuutta, paitsi sikäli kun kyseiset työvälineet ja laitteet ovat Asiakkaan Tausta-aineistoa.

5.6 VTT:llä on oikeus käyttää hyväkseen Toimeksiannon yhteydessä saavutettua ammattitaitoa ja kokemusta myös muussa kuin Sopimuksen ja Toimeksiannon piiriin kuuluvassa toiminnassa.

6. OIKEUS KEKSINTÖÖN

6.1 Asiakkaalla on oikeus saada Sopimusehtojen tämän kohdan mukainen omistusoikeus sellaisiin keksintöihin, jotka kuuluvat Tuloksiin, jotka tulevat Asiakkaan omaisuudeksi Sopimuksen mukaisesti.

6.2 VTT:n palveluksessa oleva keksijä, joka on tehnyt Tuloksiin kuuluvan keksinnön, tekee työsuhdekeksintölain (29.12.1967/656) mukaisen kirjallisen ilmoituksen työsuhdekeksinnöstä VTT:lle. VTT sitoutuu ilmoittamaan Asiakkaalle tällaisista keksinnöistä ilman aiheetonta viivytystä saatuaan yllä mainitun ilmoituksen keksijältä.

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Vuorimiehentie 3, 02150 Espoo
PL 1000, 02044 VTT

Puh. 020 722 111
Faksi 020 722 7001

etunimi.sukunimi@vtt.fi
www.vtt.fi
Y-tunnus 2647375-4

6.3 Mikäli Asiakas haluaa omistusoikeuden VTT:n Toimeksiannossa tekemään keksintöön, Asiakkaan on ilmoitettava kirjallisesti VTT:lle vaatimuksensa keksintöön kahden (2) kuukauden kuluessa saatuaan VTT:ltä tiedon keksinnöstä uhalla, että VTT saa kaikki oikeudet keksintöön.
6.4 Sopijapuolet sitoutuvat toimimaan siten, että keksinnön ennenaikainen julkiseksi tulo estyy.
6.5 Keksijä tunnustetaan keksinnön tekijäksi. Keksijä on oikeutettu saamaan kohtuullisen korvauksen tehdystä keksinnöstä. Kaikki keksinnön mahdollisesta patentoinnista aiheutuvat kustannukset ja korvauksen keksijälle maksaa se Sopijapuoli, jolla on tai joka saa oikeuden keksintöön Sopimuksen mukaisesti. Kohtuullista korvausta määritettäessä noudatetaan työsuhdekeksintölakia, sekä sen Sopijapuolen työsuhdekeksinnöistä maksettavaa korvausta koskevia käytäntöjä, jolla on tai, joka saa omistusoikeuden kyseiseen keksintöön Sopimuksen mukaisesti. Mikäli Asiakkaalla ei ole käytäntöjä koskien työsuhdekeksinnöistä maksettavaa korvausta, noudatetaan VTT:n käytäntöjä.

7. ASIAKKAAN ASIAKIRJAT JA KOEMATERIAALI

7.1 Asiakkaan VTT:lle Toimeksiannon suorittamista varten toimittamaa koemateriaalia, näytettä tai koekappaletta säilytetään VTT:n toimesta enintään kolme (3) kuukautta Tulosten luovuttamisesta Asiakkaalle. Asiakkaalla ei ole oikeutta korvaukseen, jos Toimeksiannon asianmukainen suorittaminen on vaatinut toimenpiteitä, joiden seurauksena koemateriaali, näytteet ja/tai koekappaleet ovat tuhoutuneet, huonontuneet tai vähentyneet.

8. VTT:N ASEMA

8.1 VTT suorittaa Toimeksiannon sovittua aikataulua noudattaen. Mikäli aikataulua ei ole sovittu, Toimeksianto suoritetaan ilman aiheetonta viivästystä. VTT:llä on oikeus pidentää aikataulua sikäli kun viivästys johtuu Ylivoimaisesta Esteestä (Sopimusehdot, kohta 12), Asiakkaasta, tai Asiakkaan vastuulla olevasta syystä.
8.2 VTT suorittaa Sopimuksessa määritellyt tehtävät huolella ja ammattitaidolla. VTT huolehtii siitä, että Toimeksiannon suorittamiseen käytetään pätevyydeltään sopivia henkilöitä. Asiakkaan tulee vedota Toimeksiannon suorituksessa tapahtuneeseen virheeseen kahden (2) viikon kuluessa Tulosten luovuttamisesta. Virhetilanteessa VTT:llä on ensisijaisesti oikeus korjata tai uusia Toimeksiannon suoritus/virheellinen Tulos.
8.3 VTT ei ole oikeutettu ilman Asiakkaan suostumusta käyttämään muuta kuin VTT Groupiin kuuluvaa organisaatiota alihankkijana Toimeksiannon tai sen merkittävän osan suorittamisessa.
8.4 Mikäli VTT:lle aiheutuu vahinkoa tai Toimeksiannon laajuus tai tavoite muuttuu, viivästyy tai työ keskeytyy Asiakkaasta johtuvasta tai tämän vastuulla olevasta syystä, VTT:llä on oikeus saada korvaus näin aiheutuneista kustannuksista ja vahingosta.
8.5 VTT ei anna toimittamalleen Tulokselle, Tausta-aineistolle, laitteelle, materiaalille tai tavaralle mitään takuuta.
8.6 VTT:n luovuttaman materiaalin tai tavaran toimitusehto on "Ex Works VTT (Incoterms 2010)".

9. ASIAKKAAN ASEMA

9.1 Asiakkaalla on oikeus seurata Toimeksiannon edistymistä.
9.2 Asiakas luovuttaa ajoissa VTT:n käyttöön Toimeksiannon suorittamista varten tarvittavat perustiedot sekä erikseen sovittaessa tarvittavat laitteistot ja muut resurssit.
9.3 Vaaranvastuu Tulosten tapaturmaisesta vahingoittumisesta siirtyy Asiakkaalle Tuloksen tai sen osan luovutushetkellä. Mikäli luovuttaminen viivästyy Asiakkaan syystä, vaaranvastuu siirtyy hetkellä, jolloin luovutuksen olisi pitänyt viimeistään tapahtua.
9.4 Mikäli Toimeksianto suoritetaan Asiakkaan tiloissa tai tiloissa, joista Asiakas on muuten vastuussa, Asiakas huolehtii työsuojelusta ja työturvallisuudesta VTT:n tai VTT:lle Toimeksiannossa töitä tekevän kolmannen osapuolen palveluksessa olevan henkilön osalta.

10. TULOSTEN JULKAISEMINEN

10.1 Tulosten omistajalla on oikeus oman harkintansa mukaan julkaista Tuloksiin kuuluva lopullinen tutkimusraportti kokonaisuudessaan. Tutkimusraportin osittainen julkaiseminen on kielletty ilman VTT:n kirjallista lupaa.
10.2 Tuloksia julkistettaessa VTT:n nimi on mainittava asianmukaisella tavalla.
10.3 VTT:n nimeä saa käyttää mainonnassa tai muussa myynninedistämisessä vain VTT:n kirjallisella luvalla.
10.4 Julkisuudessa esitettyjen väitteiden tai Toimeksiantoa koskevien lausumien todentamiseksi ja/tai väärien väitteiden tai lausumien korjaamiseksi VTT:llä on oikeus antaa kolmannelle osapuolelle tai yleisölle tietoja Tuloksista siinä määrin, että julkisuudessa esitetyt väitteet tai lausumat tulevat todennetuiksi ja/tai väärät väitteet tai lausumat tulevat korjatuiksi.

11. VTT:N VASTUU

11.1 VTT vastaa Toimeksiannon suorittamisesta Sopimuksen mukaisesti. VTT vastaa alihankkijan työstä kuin omastaan.
11.2 VTT vastaa Asiakkaalle aiheutuneista välittömistä vahingoista, jotka johtuvat VTT:n tahallisesti tai tuottamuksellisesti tekemistä virheistä tai laiminlyönneistä.
11.3 VTT:n vastuu rajoittuu kaikissa tapauksissa Toimeksiannosta VTT:lle maksettavan palkkion määrään. VTT ei vastaa välillisestä tai epäsuorasta vahingosta.
11.4 Sopijapuolet vakuuttavat nimenomaisesti olevansa tietoisia niistä teknisistä ja muista riskeistä, joita tutkimus- ja kehitystyöhön liittyy ja tietoisesti hyväksyvät tällaiset epävarmuustekijät sekä sen, ettei tutkimus- ja kehitystyön tuloksia tai tavoitteita välttämättä saavuteta, tutkimus- ja kehitystyön luonteeseen kuuluvina.
11.5 Tausta-aineistoa ja/tai Tuloksia toisilleen luovuttaessaan Sopijapuolet pyrkivät siihen, että ne ovat mahdollisimman virheettömiä. Luovuttava Sopijapuoli ei kuitenkaan anna luovutuksen kohteelle mitään takuuta ja luovutetun aineistonkäyttö tapahtuu yksin luovutuksensaajan vastuulla. Lisäksi erityisesti sovitaan, että Asiakas kantaa tuotevastuun kolmatta osapuolta kohtaan.
11.6 Ellei toisin ole sovittu, VTT:n vastuu päättyy yhden (1) vuoden kuluttua Tulosten luovuttamisesta Asiakkaalle. Mikäli luovuttaminen viivästyy Asiakkaan syystä, määräaika alkaa hetkestä, jolloin luovutuksen olisi pitänyt viimeistään tapahtua.
11.7 Vaatimukset VTT:tä kohtaan on esitettävä kuuden (6) kuukauden kuluessa VTT:n vastuuajan päättymisestä. Muussa tapauksessa Asiakas menettää oikeutensa vaatia korvausta.

12. YLIVOIMAINEN ESTE

12.1 Ylivoimaisena Esteenä pidetään tapahtumaa, joka estää tai tekee kohtuuttoman vaikeaksi Toimeksiannon suorittamisen määräajassa. Tällaisia ovat sota, kapina, luonnonmullistus, yleinen energianjakelun keskeytyminen, tulipalo, valtion talousarvion tai valtioneuvoston asettama oleellinen rajoitus VTT:n toiminnalle, lakko, saarto tai muu yhtä merkittävä ja epätavallinen Sopijapuolista riippumaton syy. Alihankkijan viivästys em. syistä katsotaan myös Ylivoimaiseksi Esteeksi.

13. SOPIMUKSEN PURKAMINEN

13.1 Mikäli Sopijapuoli rikkoo oleellisesti Sopimuksen ehtoja, toisella Sopijapuolella on oikeus purkaa Sopimus.
13.2 Mikäli Asiakas rikkoo Sopimuksen ehtoja, VTT:llä on purkamisen sijasta oikeus väliaikaisesti keskeyttää Toimeksiannon suorittaminen, kunnes nähdään johtaako sopimusrikkomus Sopimuksen purkamiseen.
13.3 Kummallakin Sopijapuolella on oikeus purkaa Sopimus, jos toinen Sopijapuoli on ilmeisen maksukyvytön, haetaan selvitystilaan, velkajärjestely- tai yrityssaneerausmenettelyyn taikka konkurssiin.
13.4 Kummallakin Sopijapuolella on oikeus purkaa Sopimus, jos Sopimuksen täyttäminen Ylivoimaiseen Esteen jatkumisen johdosta tulee mahdottomaksi tai viivästyy oleellisesti tai yli 12 kuukautta.
13.5 Mikäli Sopimus puretaan, Asiakas maksaa VTT:lle hyväksytysti suoritetusta Toimeksiannon osasta korvauksen sovitun veloitusperusteen mukaisesti purkamispäivään tai töiden lopettamishetkeen saakka, mikäli töitä sovitaan tehtäväksi purkamispäivän jälkeen.
13.6 VTT:llä on oikeus saada korvaus Sopimuksen purkamisesta aiheutuneista kustannuksista ja vahingosta, jos Sopimuksen purkaminen johtuu Asiakkaasta tai tämän vastuulla olevasta syystä.

14. ERIMIELISYYDET

14.1 Sopimuksesta aiheutuvat riidat, joista asianomaiset eivät pääse keskenään sopimukseen, jätetään Helsingin käräjäoikeuden ratkaistavaksi.
14.2 Sopimuksen tulkinnassa ja riitojen ratkaisemisessa sovelletaan Sopimuksen tekohetkellä Suomessa voimassa olevaa oikeutta, lukuun ottamatta sen lainvalintasäännöksiä.