

Alexi Kuusiniemi

NAISTENLAHDEN VOIMALAITOKSEN KATTILA 2  
PAINELAITTEIDEN ELINIKÄTUTKIMUS

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Energiatekniikan suuntautumisvaihtoehto  
2012

## NAISTENLAHDEN VOIMALAITOKSEN KATTILA 2 PAINELAITTEIDEN ELINIKÄTUTKIMUS

Kuusiniemi, Aleks  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Joulukuu 2012  
Ohjaaja: Zenger Pekka  
Sivumäärä: 42  
Liitteitä: 5

Asiasanat: leijupetikattila, tulistin, eroosio, korroosio, korkealämpötilakorroosio

---

Tampereen Energiantuotanto Oy antoi minulle aiheeksi tutkia Naistenlahden voimalaitoksen leijupetikattilaa. Kattilassa, jota tässä työssä nimitetään kattila 2:ksi, tutkittiin painelaitteiden kuntoa ja tehtiin muutamia ennusteita. Painelaitteiksi luetaan vedensilämmittimet, höyrystin ja tulistimet.

Ennen tutkimustuloksia työssäni on käyty läpi yleisesti prosessia ja painelaitteet yksitellen. Tämän jälkeen on käsitelty asioita, jotka vaikuttavat tähän kulumiseen ja kulumisen nopeuteen. Tuloksista on kehitelty ajatuksia, joita toteuttamalla painelaitteet tulisi kestää aina seuraavaan revisioon. Tuloksista voi huomata, että ennustaminen monen vuoden päähän on riskialtista.

Tutkimuksessa käytettiin silmämääräistä tarkastelua, ultraäänimittaria ja NDT -tutkintaa. Tärkeimmässä roolissa oli ultraäänimittaukset, joilla saatiin mitattua painelaitteiden putkien seinämäpaksuuksia. Tuloksia on käyty läpi monesta eri mittalinjasta, ja niistä on hahmoteltu käyriä jotka kuvaavat kulumisen etenemistä. Käyrät on tehty helpottamaan tulosten lukemista ja ymmärtämistä. Opinnäytetyöhön kuuluu myös kaksi excel -tiedostoa tukemaan ja antamaan lisätietoja mittauslinjoista ja ennusteista.

## LIFETIME SURVEY TO NAISTENLAHTI POWER PLANT BOILER 2 PRESSURE DEVICES

Kuusiniemi, Aleksi

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Mechanical and Production Engineering

December 2012

Supervisor: Zenger Pekka

Number of pages: 42

Appendices: 5

Keywords: fluidised-bed boiler, superheater, erosion, corrosion, high temperature corrosion

---

The purpose of this thesis was study the lifetime of the fluidized-bed boiler pressure devices. The boiler is called boiler 2 and it has three superheaters two economizers and one evaporator.

The study begins with general information of the overall functions of the process and then every pressure device is described separately. Then, matters influencing the inspected devices, like corrosion and erosion are explained separately and what causes them. The results show that it is very difficult to predict how long these devices last.

The study was carried out by visual inspection, ultrasonic-meter and with NDT-inspection (non-destructive test). With ultrasonic-meter it can be measured how thick the pipe is on the measuring line. The results were shown in diagrams where the progress of the corrosion can be seen. The lines in diagrams were created to help interpreting the results.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TAMPEREEN SÄHKÖLAITOS OY .....	6
2.1	Tampereen Energiantuotanto Oy .....	6
2.2	Naistenlahden voimalaitos .....	6
2.3	Kattila 2.....	7
2.3.1	Leijupetikattila.....	9
3	KATTILA 2 PAINELAITTEET .....	11
3.1	Kokonaisuus.....	11
3.2	Ekonomaiser (EKO).....	12
3.3	Höyrystin.....	13
3.4	Tulistin .....	14
3.4.1	Säteilytulistin .....	14
3.4.2	Verhotulistin .....	14
3.4.3	Konvektiotulistin .....	15
3.4.4	Tulistinmateriaalit.....	15
3.4.5	Merkintätavat .....	16
3.4.6	Myötölujuus .....	16
4	LÄMPÖPINTOJEN LIKAANTUMINEN, KORROOSIO JA EROOSIO .....	17
4.1	Lämpöpintojen likaantuminen .....	17
4.1.1	Likaantumisen vaikutukset.....	18
4.1.2	Lämpöpintojen puhdistaminen höyrynuohimella.....	19
4.2	Lämpöpintojen korroosio.....	19
4.2.1	Korkealämpötilakorroosio .....	20
4.2.2	Matalalämpötilakorroosio.....	22
4.3	Lämpöpintojen eroosio .....	23
5	TUTKIMUKSET PAINELAITTEISSA .....	24
5.1	Höyrystin.....	25
5.2	Tulistin 2 .....	27
5.3	Tulistin 3 .....	28
5.4	Tulistin 1 .....	32
5.5	EKO 2 .....	35
5.6	EKO 1 .....	38
6	LOPPUYHTEENVETO.....	40
6.1	Tulistimet .....	40
6.2	Höyrystin.....	41
6.3	Ekonomaiserit .....	41
	LÄHTEET, LIITTEET .....	42

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli paneutua Naistenlahden voimalaitoksen kattila 2 painelaitteiden kuntoon ja tehdä painelaitteille elinikäennuste. Työhön liittyvät painelaitteet ovat tulistimet, ekonomaiserit ja höyrystin. Tärkein tavoite oli päästä näkemään fyysisesti putkien kunto ja mittaamaan seinämäpaksuudet ennestään tunnetuista mittalinjoista. Mittalinjat ovat olleet samoja useita vuosia, ja näin ollen se mahdollisti tutkimuksen.

Jotta tutkimusta olisi helpompi ymmärtää, työn alkuun on otettu selostus kattilan toiminnasta ja sen luonteesta. Alussa puhutaan yleisesti kyseisen laitoksen kattilasta ja sen kattilatyypistä, jonka jälkeen jokainen tutkimukseen liittyvä osa on selostettu tarkemmin. Tutkimukseen liittyy myös vahvasti kemia, joten putkien pintaan muodostuvien sitä syövien yhdisteiden tyyppejä on selostettu, jotta kokonaisuus tulisi hyvin esille. Korroosiota ja eroosiota vaikuttavia tekijöitä on useita ja niistä on kerrottu pääpiirteet. Työn tilaaja painotti myös kuumakorroosion tutkintaan, joten siitä on myös kerätty tietoa alan kirjallisuudesta.

Viidennessä luvussa on otettu painelaitteita kattila 2:sta tarkempaan tarkasteluun ja siihen liittyvät kuvat ja tutkimukset on myös esitetty. Jokainen laite on eritelty ja jokaisella on omat otsikkonsa. Tekstissä on selostettu mitä alla oleva kuva, kuvaaja tai kuvio esittää ja miten sitä tulisi tulkita.

Mittalinjoilla olevia putkia on osittain suojattu erilaisilla suojilla, joten niiden seinämäpaksuutta ei voida enää ottaa huomioon. Tämä vaikeuttaa ennustamista, joten oli kuvainnollisempaa ottaa tarkempaan tutkintaan mittalinjoja, joissa oli mielekkäästi erotettavissa kulumisen eteneminen. Eli parhaan tulkinnan saa aikaiseksi kun putket ovat paljaita mahdollisimman monesta kohtaa mittalinjalta.

## 2 TAMPEREEN SÄHKÖLAITOS OY

### 2.1 Tampereen Energiantuotanto Oy

Tampereen Sähkölaitos on Tampereen kaupungin omistama energialiikelaitos, joka on toiminut vuodesta 1888 vuoteen 2008 loppuun. Vuoden 2009 alusta lukien Tampereen Sähkölaitos yhtiöitettiin muodostamalla Tampereen kaupungin omistama emoyhtiö Tampereen Sähkölaitos Oy ja sen tytäryhtiöt, joista yksi on opinnäytetyöhöni liittyvä Tampereen Energiantuotanto Oy.

Yhtiö toimittaa sähköä, kaukolämpöä ja maakaasua yksityis- ja yritysasiakkaille pääasiassa Pirkanmaalla. Energiaa tuotetaan Naistenlahden ja Lielahden voimalaitoksissa, jossa sähköä ja lämpöä tuotetaan yhteistuotantona. /1/

Sähköntuotanto 2011 voimalaitoksittain (netto)

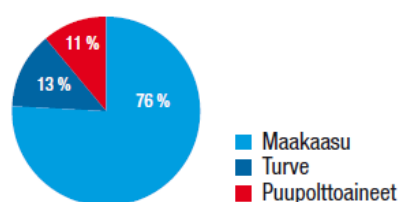


Kaukolämmön tuotanto 2011

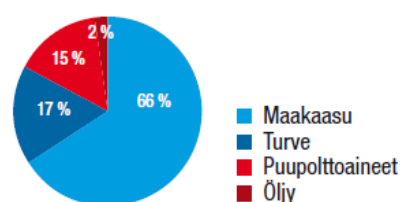


Kuvio 1 ja 2. Energiantuotannon jakauma vuonna 2011. /2/

Sähköntuotannon polttoaineet



Kaukolämmöntuotannon polttoaineet



Kuvio 3 ja 4. Energiantuotannon polttoainejakauma vuonna 2011. /2/

### 2.2 Naistenlahden voimalaitos

Naistenlahden voimalaitos sijaitsee Tampereella, Lapin kaupunginosassa. Voimalaitoksen ensimmäinen osa on rakennettu 1971 ja toinen osa 1977. Nykyään se tuottaa sähköä ja kaukolämpöä Pirkanmaalle. Pääpolttoaineena tällä hetkellä on maakaasu, jyrshinturve, kuori ja muu puujäte. Voimalaitos sisältää yhden kaasuturbiinin, kaksi höyryturbiinia ja kaksi kattilakokonaisuutta. /3/

Kattila 1 yksinään voidaan kutsua kombivoimalaitokseksi, eli kaasuturbiinin tuottaman sähkön lisäksi kattilan höyry ajetaan vielä höyryturbiinille ja kaukolämmön lämmönvaihtimille. Kokonaisuus tuottaa sähkötehoa 129 MW ja lämpötehoa 144 MW /1/.

Kattila 2 voidaan kutsua myös erillisellä nimellä, joka on vastapainevoimalaitos. Eli sähköntuotannon lisäksi sillä tehdään vielä kaukolämpöä. Kattilatyyppi on kerrosleijukattila, jossa poltetaan lähinnä turvetta ja puupolttoainetta. Maakaasua käytetään joko yksin tai yhdessä leijupolton kanssa. Tämän kokonaisuuden sähköteho on 60 MW ja lämpöteho 120 MW /1/.



Kuva1. Naistenlahden voimalaitos.

### 2.3 Kattila 2

Naistenlahden voimalaitoksen kattila 2:n valmistumisvuosi on 1977, jolloin pääpolttoaineena oli jyrshinturve. Kattilaa modernisoitiin 1998, jolloin polttoaineena voitiin käyttää monipuolisempaa valikoimaa, eli turvetta, puuta, kaasua ja öljyä. /1/ Öljyä käytetään vain käynnistyspolttoaineena. Modernisoinnin suurin muutos oli pohjan

muuttaminen kiinteästä arinasta palkkiarinaksi kerrosleijupolttoa varten. Leijukerros on niin kutsuttua kuplivaa petityyppiä, jossa hiekkakerros pysyy matalana eikä lähde kiertoon. /3/

#### Kattilan päämitoitussarvot /3/

• maksimi höyrytys leijupoltolla	kg/s	75
• maksimikuorma kaasulla	kg/s	45
• höyryn paine	bar	113
• höyryn lämpötila tulistimien jälkeen	°C	535
• nettolämpöteho leijupoltolla	MW	182
• syöttöveden lämpötila kp-esilämmittimien jälkeen	°C	235

Tulipesän koko on määräytynyt savukaasumäärästä, vaaditusta höyrystystehosta ja käytettävistä polttoaineista. Tulipesä on mitoitettu niin, että savukaasut ovat jäähtyneet alle tuhkan pehmenemispisteen ennen tulistimien lämpöpintoja kattilan ylhäällä. Tulipesä on höyrystinputkien verhoama ja rakenteeltaan täysin jäähdytetty.

Savukaasut johdetaan tulipesästä kattilan kanavien ja sähkösuodattimen kautta savu-  
piippuun. Solia rajoittavat kattilan ja kanavien seinät. Ensimmäisen solan (1.veto)  
muodostavat tulipesä, tulistin 2 sekä höyrystinpaketti (hila) ja toisen solan (2.veto)  
tulistin 3, tulistin 1, EKOt ja LUVOt.

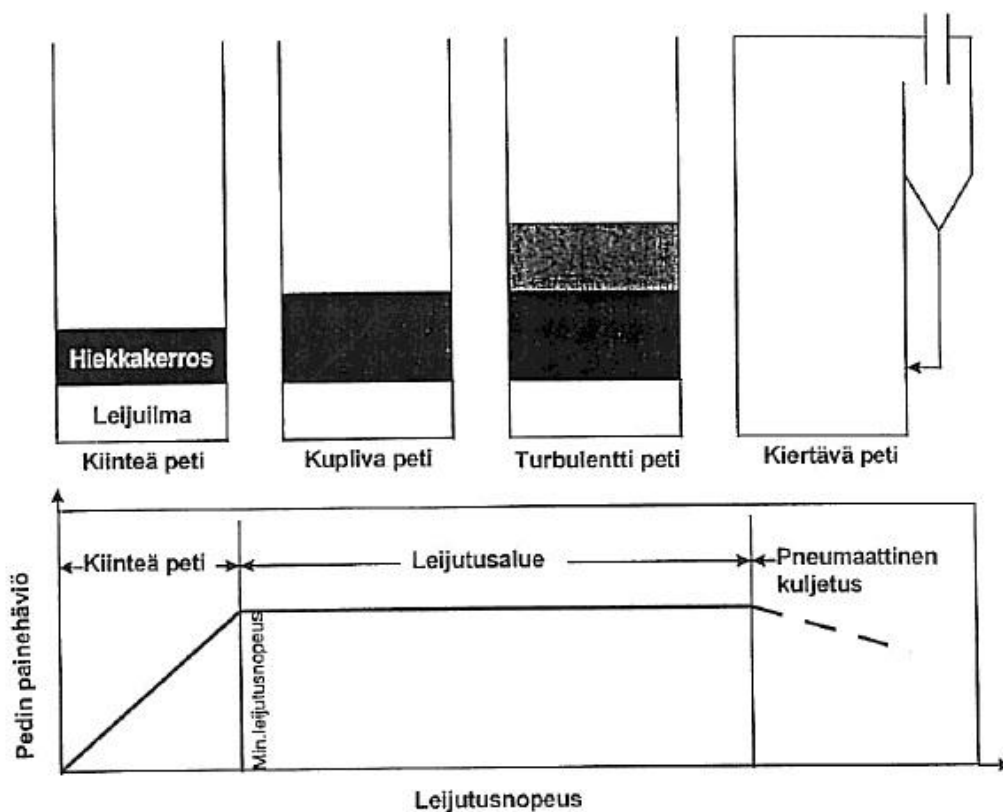




Kuva 2. Kattila 2 läpileikkauskuva. /3/

### 2.3.1 Leijupetikattila

Leijupolttojärjestelmän tehtävä on polttaa kosteita polttoaineita korkean lämpökapasiteetin omaavassa polttilassa, joka muodostuu leijuarinasta, hiekkakerroksesta ja muurauksista. /3/ Leijutuksella tarkoitetaan kiinteän rakeisen materiaalin leijuttamista ilmavirralla kattilan pohjassa. Leijutuksessa kiinteä noin 400 mm – 600 mm korkea hiekkapeti fluidisoituu eli muuttuu ominaisuuksiltaan nestettä vastaavaksi. Kiinteää polttoainetta syötetään kattilan hiekkapetin päälle pudotusputkia pitkin. Hiekka sekoittaa ja kuivaa polttoaineen, kun se sekoittuu kuplivaan hiekkaan. Samalla hiekka rikkoo isommat polttoaine-osat pienemmiksi, joka nopeuttaa sen palamista. Pienet partikkelit palavat nopeasti leijukerroksen yläpuolella, ja suuremmat partikkelit kulkeutuvat petiin.



Kuva 3. Leijukerrostyyppit. /3/

Mikäli ilman leijutusnopeus on suurempi kuin hiekkapartikkelin lentoonlähönnopeus, lähtevät hiukkaset kulkemaan leijutusväliaineen mukana./5/ Tässä kattilassa sitä ei tavoitella, eikä ole myöskään tekniikaltaan mahdollista kierrättää petihiekkaa. Nais-tenlahden kattila 2:ssa, jossa hiekka ei varsinaisesti kierrä, säästytään huomattavasti painelaitteiden eroosiolta.

Tulipesän alaosa on suojattu muurauksella eroosion välttämiseksi. Muurauksen paksuus on noin 25 mm putken pinnasta, ja on korkeudeltaan kolmeen metriin ulottuva. Muurauksessa käytetty massa on tulenkestävä LC -massaa. /3/ Muuraus auttaa kostean polttoaineen palamista korkean lämpötilan vyöhykkeessä ja samalla suojaa kattilan seinäputkia alhaalta /4/. Kattilan seinät ovat kokonaan höyrystinputkea, joten ilman muurausta hiekkapetin virtaukset kuluttaisivat putket puhki huomattavan nopeasti. Tähän kiinnitetään myös revisioissa huomiota, ja muurauksia paikataan kesäseisokin aikana.

## Leijukerrospolton tyypilliset piirteet /3/

### 1. Hyvät puolet

- alhainen petilämpötila n. 700 – 900 °C
- tuhka ei sula
- polttolämpötila on riittävän korkea, jotta lietteenpoltossa ei synny haitallisia raskasmetalliyhdisteitä
- suuri lämpökapasiteetti tasoittaa kosteuden vaihteluita
- palamisnopeus suuri, joten puupolttoaineilla ja lietteellä ei synny polttoainevarastoa petiin
- polttoaineen leviäminen arinalle ei ole kovin tarkkaa, koska ilma jakautuu petissä tasaisesti
- polttoaine jauhautuu ja sekoittuu tehokkaasti
- lähes kaikki tuhka poistuu lentotuhkana (poikkeuksena ylimääräiset isot kappaleet, kuten kivet ja rautaesineet)
- lämpötilaprofiilia ei ole, joten leijutukselle riittää tarkkailu
- säätönopeus suuri, eli polttoainetta syöttöä säätämällä
- petin tila hallitaan instrumentein

### 2. Huonot puolet

- polttoaineen kappalekoko rajoitettava leijumisen takia
- omakäyttösähköteho perinteistä arinaa suurempi (leijupuhallin)

## 3 KATTILA 2 PAINELAITTEET

### 3.1 Kokonaisuus

Savukaasut johdetaan tulipesästä kattilan kanavien ja sähkösuodattimen kautta savupiippuun. Solia rajoittavat kattilan ja kanavien seinät. Ensimmäisen solan (1.veto) muodostavat tulipesä, tulistin 2 sekä höyrystinputket (hila) ja toisen solan (2.veto)

muodostavat tulistin 3, tulistin 1, EKOt ja LUVOt. Tulistin 2 (riipputulistin) on sijoitettu tulipesän yläosaan ja on tyypiltään harvajakoinen säteilylämpöpinta.

Tulistin 2 jälkeen savukaasut menevät hilan läpi toiseen vetoon ja kääntyvät alaspäin tulistin 3:lle. Tulistin on tyypiltään konvektiotulistin.

Tulistin 3:lta savukaasut johdetaan tulistin 1:lle, joka on konvektiotulistin. Tulistin 1:ltä johdetaan savut kahdelle sileäputkityyppiselle ekonomaiserpaketille (EKO 2). Näiden pakettien alapuolelle on rakennettu suppilo, jonka tarkoituksena on estää suurien tulistin 3, tulistin 1 ja ekonomaiserista (EKO 2) tippuvien kuonakappaleiden joutuminen savukaasuvirrassa seuraavina oleviin lämpöpintoihin.

Seuraavana lämpöpintana on sileäputkityyppinen ekonomaiser (EKO 1) ja alimmat 3 pakettia 2-vedossa ovat valurauta ripaputki-ilmanesilämmittimiä eli LUVOt

Seinät 2-vedossa on jäähdytetty takaseinään höyrystinputkilla toiselle ekopakettile saakka. Siitä alaspäin LUVOjen alla oleville suppiloille saakka on levyvaippa. /3/

### 3.2 Ekonomaiser (EKO)

Syöttöveden esilämmitin (EKO) lämmittää syöttövettä ennen höyrystinputkistoa. Syöttöveden esilämmittimet jaetaan toimintatapansa puolesta höyrystämättömiin ja höyrystäviin. Höyrystämättömissä esilämmittimissä poistuvan veden lämpötila tulee olla noin 20° C kiehumispistettä alhaisempi, ettei kuormitusvaihtelujen aiheuttama kiehumisvaaraa esiintyisi missään oloissa. Höyrystävät esilämmittimet suunnitellaan siten, että loppuvaiheessa vesi saavuttaa kiehumislämpötilan ja osa syöttövedestä höyrystyy. /5/

Lämmönsiirtoputkissa on mahdollista käyttää joko rivoitettua tai sileää pintaa. Rivoitettu pinta mahdollistaa isomman pinta-alan lämmönsiirtymiselle. Tässä kattilassa se ei ole edullista, koska lentotuhka tukkisi ripavälit ja painehäviö kasvaisi kriittisesti. Naistenlahden kattila 2:ssa on siis päädytty sileäpintaiseen lämmönsiirtoputkeen, joissa käytetään normaaleja hiiliteräksiä St35.8 ja St45.8. Syitä näiden materiaalien

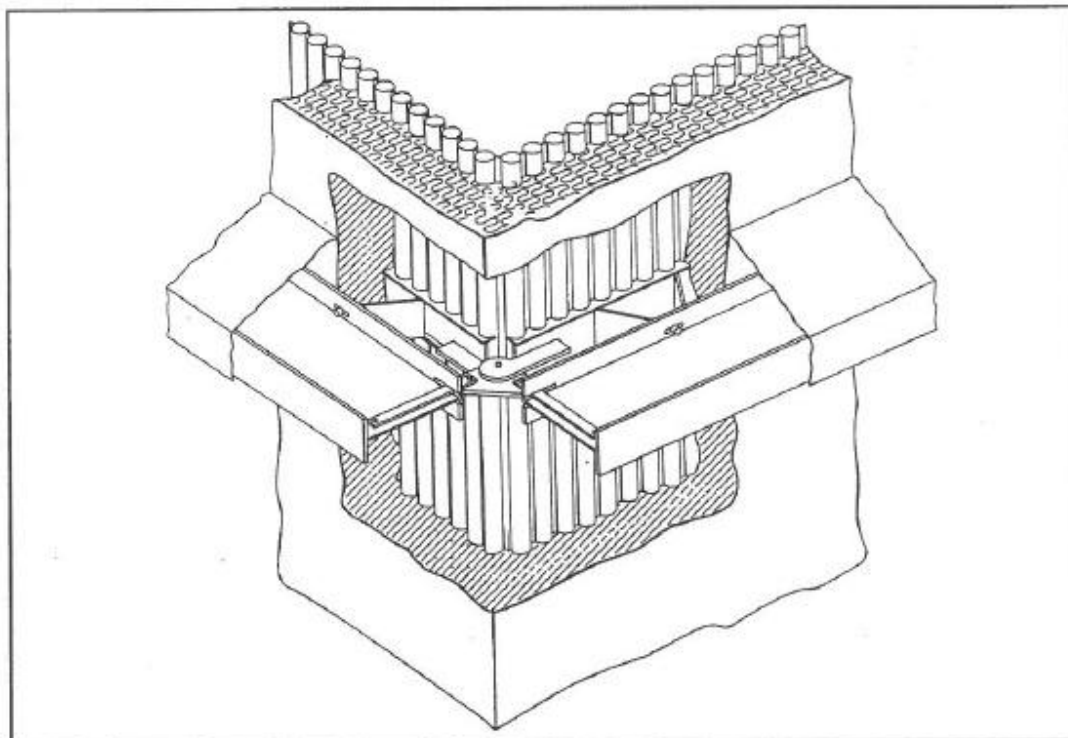
käyttöön on esimerkiksi hyvä lämmönjohtavuus, helppo hitsattavuus ja edullinen hinta.



Kuva 4. Syöttöveden esilämmitysputkia kuvattuna konepajassa. /5/

### 3.3 Höyrystin

Syöttöveden esilämmittimestä tullut vesi höyrystyy keittoputkistossa eli höyrystimessä. Tulistetun höyryn paine määrä höyrystinosan paineen, joka painehäviöiden vuoksi on hiukan suurempi kuin tulistetun höyryn paine. Höyrystinosa käsittää yleensä tulipesän kaikki seinäputket. Sijoittamalla kyseiset putken tulipesään saadaan kuumimpaan paikkaan hyvä jäähdytys, eikä vaarana ole seinäputkien ylikuumentuminen. Tulipesän savukaasujen lämpötilat ovat  $800 - 1300^{\circ}\text{C}$  ja lämpö siirtyy lämpöpintaan säteilemällä. Höyrystimen putkimateriaalin pintalämpötila nousee käytössä vähän höyrystymislämpötilaa korkeammaksi mutta jää kuitenkin alle  $450^{\circ}\text{C}$ . Kattila 2:ssa höyryn lämpötila höyrystimen jälkeen on mitattu olevan  $423^{\circ}\text{C}$  /6/. Tulipesän materiaaliksi riittää tavallisesti hiiliteräs St35.8 tai St45.8. Naistenlahdessa on seinäputket toteutettu eväputkilla. Ne vaativat vähemmän hitsaustyötä, mutta putkimateriaalikustannukset kasvavat. /5/



Kuva 5. Putkiseinän tukirakenne ja höyrystinputket. /5/

### 3.4 Tulistin

#### 3.4.1 Säteilytulistin

Säteilytulistin sijaitsee kattilan tulipesän yläosassa, johon lämpöenergia siirtyy liekeistä säteilemällä. Tämän tyyllisissä tulistimissa höyryn nopeus on suurta, jotta massiiviset tulistinputket jäähtyvät lämpösäteilyltä /5/. Naistenlahdessa tämä tulistin on tulistin 2, johon saapuva höyry on  $432^{\circ}\text{C}$  ja tulistuksen jälkeen  $500^{\circ}\text{C}$  /6/.

#### 3.4.2 Verhotulistin

Verhotulistin toimii säteilytulistimen periaatteella, mutta sillä on toinenkin tärkeä tehtävä. Se on rakennettu savukaasujen poistoaukkoon suojaamaan jälkimmäisiä tulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. Verhotulistin jäähdyttää sulaa tuhkaa ja suoloja sisältävät savukaasut niin nopeasti, ettei sula pääse tarttumaan jäljempänä sijaitseviin konvektiotulistimiin. Verhotulistimet muodostuvat useasta levymäisestä putki-

ryhmästä, jotka jakavat savusolan väliseinillä osiin. Verhotulistimia käytetään pääsääntöisesti vain likaavien polttoaineiden kanssa, kuten hiilen, turpeen ja erilaisten jäteliemien kanssa. Kattila 2:ssa verhotulistimena toimii tulistin 3 ylösmenoputket. /5/

### 3.4.3 Konvektiotulistin

Tämä tulistintyyppi on höyrykattiloiden yleisin. Se sijoitetaan kattilan tulipesän jälkeen, niin että se on suojassa liekkien säteilyltä. Lämpö siirtyy vain kosketuksen eli konvektion kautta, mikä tarkoittaa lämmön siirtymistä virtaavasta väliaineesta lämmönsiirtimeen. Konvektiotulistimien lämpötila on 10 – 40 °C korkeampi kuin höyryn lämpötila. Kattila2:ssa tämän tyyppisiin tulistimiin lukeutuu tulistin3 ja tulistin1. /5/

### 3.4.4 Tulistinmateriaalit

Korkeissa lämpötiloissa käytettäville materiaaleille kuten tulistinputkille asetetaan seuraavia vaatimuksia /5/

- materiaalien tulee olla kuumalujia eli niiden virumiskestävyyden pitää olla hyvä
- materiaalin tulee kestää tulta jotta vältetään kuumakorroosiolta eli hilseilyltä
- kuumalujat metallit voidaan jakaa seostamattomiin teräksiin, niukkaseosteisiin ferriittiteräksiin, runsasseosteisiin martensiittiteräksiin ja runsasseosteisiin austeniittiteräksiin.

Taulukko 1. Kuumalujia putkimateriaaleja /5/

Materiaali	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Seostamaton St 44 (SFS1100)	0,2	0,15–0,55	0,40–1,2	<0,05	<0,05	–	–	–
Niukkaseosteinen 15Mo3	0,12–0,20	0,15–0,35	0,50–0,80	<0,04	<0,04	–	<0,30	0,25–0,35
Niukkaseosteinen 13CrMo44	0,10–0,18	0,15–0,35	0,40–0,70	<0,04	<0,04	–	0,70–1,00	0,40–0,50
Niukkaseosteinen 10CrMo910	<0,15	0,15–0,5	0,40–0,50	<0,04	<0,04	–	2,0–2,5	0,9–1,10
Runsasseosteinen martensiittinen X20CrMoV121	0,17–0,23	<0,5	<1,0	<0,03	<0,03	0,3–0,8	10,0–12,5	0,8–1,2
Runsasseosteinen austeniittinen X6CrNiMo1713	0,04	0,75	2,0	<0,03	<0,03	12–14	16,0–18,0	2,0–2,5

### 3.4.5 Merkintätavat

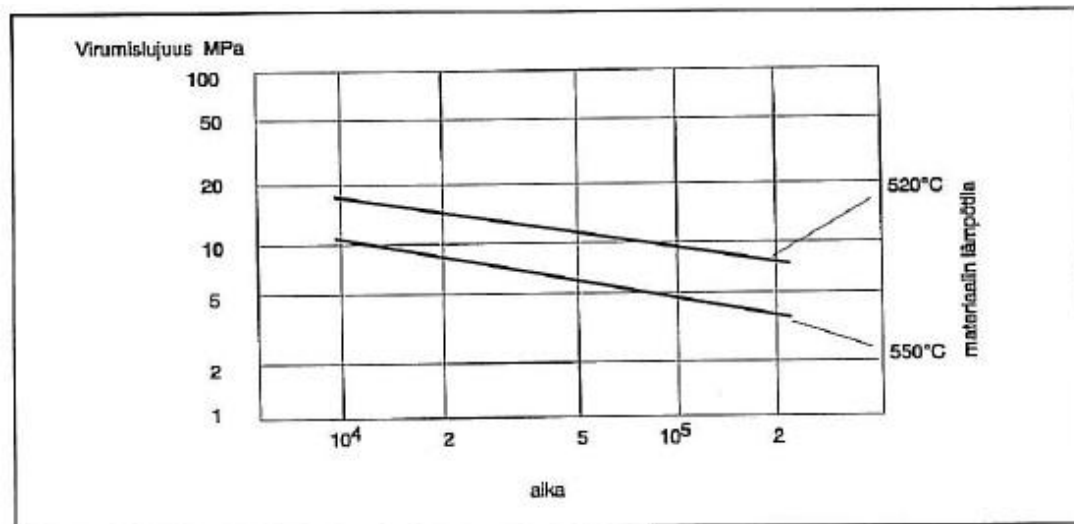
Materiaalien merkintäjärjestelmästä on olemassa standardi SFS100. Sen mukaisesti runsasseosteiset teräkset merkitään alkumerkillä X. Seuraava luku ilmoittaa aineen hiilipitoisuuden prosentin sadasosina. Tämän jälkeen koodi luettelee oleelliset komponentit ja niiden pitoisuudet prosentteina. Niukkaseosteisten aineiden komponenttien pitoisuudet eivät ilmaise suoraan komponenttien prosenttiosuuksia, vaan pitoisuudet on kerrottu standardista saavalla kertoimella, joka esimerkiksi kromille (Cr) on 4 ja molybdeenille (Mo) 10. /5/

### 3.4.6 Myötölujuus

Paineenaisten osien lujuustekninen mitoitus tapahtuu tiettyyn lämpötilaan saakka myötölujuuden mukaan. Myötölujuus pienenee olennaisesti lämpötilan kasvaessa. Kun aine on jatkuvan rasituksen alaisena, tietyn lämpötilan yläpuolella sen muoto alkaa muuttua jo myötörajaa pienemmissäkin jännityksissä. Riittävän pitkän ajan kulluttua muodonmuutos johtaisi aineen murtumiseen. Tätä hidasta muodonmuutosta kutsutaan virumiseksi ja virumisen aiheuttavaa jännitystä virumislujuudeksi. Virumislujuus on riippuvainen sekä lämpötilasta että tarkasteluajasta. Eri materiaaleille



saadaan virumislajuuden arvot esimerkiksi DIN-standardeista. Seuraava kuva esittää tulistinmateriaalin 13CrMo44 virumislajuuden käyttöiän funktiona lämpötilan ollessa parametrina. /5/



Kuvio 5. Putkimateriaalin 13CrMo44 virumislajuus käyttöiän ja lämpötilan funktiona. /5/

Kuviosta 5 nähdään tulistinmateriaalin kestoiän huomattava lyhentymisen käyttölämpötilan noustessa. Tämän vuoksi on erityisen tärkeää, että tulistimet eivät pääse ylikuumentamaan sisäpuolisen kattilakiven tai epätasaisen virtauksen vaikutuksesta. /5/

## 4 LÄMPÖPINTOJEN LIKAANTUMINEN, KORROOSIO JA EROOSIO

### 4.1 Lämpöpintojen likaantuminen

Kattiloissa, joissa poltetaan tuhkapitoisia polttoaineita, esiintyy merkittävää likaantumista. Puuperäisten polttoaineiden poltossa syntyvä tuhka jauhautuu käytännössä kokonaisuudessaan hienoksi ja poistuu lentotuhkana kattilasta. Sen sijaan polttoaineiden mukana tulevat kivet ja muu leijumisen kannalta liian karkea materiaali jää arinan pohjalle ja vaatii pohjan kautta tapahtuvaa tuhkanpoistoa. Leijukerroksessa

tapahtuu luonnollista seulontaa siten, että leijumaton materiaali painuu leijupetin pohjalle ja on poistettavissa tuhkasuppiloiden ja –torvien kautta tuhkaruuveille ja niiltä edelleen tuhkalavalle. /3/

Polttoaineiden palamatta jäävä tuhka likaa lämpöpintoja ja niihin tiivistyy höyrystyneitä alkaleita, kuten Natriumia ja Kaliumia. Tulistimiin tarttuu myös sulatuhka ja törmäämällä kiinteät partikkelit. Kiinteiden tuhkapartikkelien suorasta törmäyskiinnittymisestä ei usein aiheudu suuria ongelmia, koska lika lähtee enimmäkseen helposti lämpöpinnoista. Pinnat on kuitenkin puhdistettava riittävän usein, jotta vältetään partikkelien sintraantumiselta toisiinsa. /5/

#### 4.1.1 Likaantumisen vaikutukset

Likakerrokset heikentävät lämmönsiirtymistä savukaasuista putkissa virtaavaan höyryyn. Lika myös huonontaa lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerrointa ja tietyn lämpötehon siirto vaatii suuremman lämpöpinnan. Käytännössä lämpöpintojen likaisuus näkyy siitä, että likainen lämmönsiirrin jäädyttää huonommin savukaasuja ja niiden lämpötilat nousevat. Likakerroksen paksutessa saattavat liian kuumiksi jääneet savukaasut jopa johtaa seuraavana virtaussuunnassa olevien lämmönsiirtimien likaantumisen ja ylikuumentumisen. Lisäksi paksut likakerrokset aiheuttavat kattilassa virtausvastuksia savukaasuille. Lämmönsiirtimien painehäviöitä tai savukaasun loppulämpötilan nousua voidaankin pitää merkinä lämmönsiirtimien likaisuudesta ja nuohoustarpeesta. /5/

Palamisen yhteydessä tuhkassa olevat alkalit voivat höyrystyä. Tämä johtaa siihen, että ensimmäisten tulistinputkien pinnoille tiivistyy alkaleita tai sitten ne kiinteytyvät savukaasuvirtaan lämpötilan laskiessa. Mikäli lämpötila on riittävän korkea, voi lämpöpinnoille muodostua tahmea kerros, joka nopeasti kasvaa. Likakerros syntyy lähinnä kattilan keski- ja yläosiin, ja niiden puhdistaminen on työläämpää kuin kiinteiden pölyhiukkasten poistaminen. Sulat kerrostumat metallien pinnalla ovat ongelmallisia sikäli, että ne edistävät kattilaputkien syöpymistä. Tästä käytetään niin kutsuttua korkealämpötilakorroosio -nimitystä. /5/. Siitä aiheesta tarkemmin kohdassa 4.2.1.

#### 4.1.2 Lämpöpintojen puhdistaminen höyrynuohoimella

Kattilan lämpöpintoja puhdistetaan ajon aikana höyrynuohoimilla. Nuohous on välttämätöntä tehdä, koska putkistojen pinnoille muodostuva noki ja tuhka haittaavat lämmönsiirtymistä kattilaveden ja höyryyn. Tästä seuraa suurentunut lämpötilaero savukaasujen ja kattilaveden sekä höyryn välillä. Näin ollen savukaasujen lämpötila kasvaa, joka merkitsee hyötysuhteen huononemista.

Nuohointen lukumäärä ja sijainti on valittu siten, että ne puhdistaisivat mahdollisimman kattavan alueen kattilan sisältä. Tosin laitteita ei voi käyttää jos savukaasujen lämpötila kyseisessä kohdassa on yli  $600^{\circ}\text{C}$  /10/. Nuohoimet käyttävät laitoksen omaa höyryä, joka ohjataan nuohoinlaitteelle. Suihkun eli höyryn paine on pesussa 30 – 40 baarin luokkaa. Nuohoin on pitkittäissuuntaisesti liikkuvaa tyyppiä, joka levittää suihkutusta kattilan alkuseinältä syvemmälle kattilaan.

Jos kattilan nuohous on ongelmallista, puhdistuskertoja on lisättävä. Jos näin ei tehdä, saattavat lämmönvaihtimet tukkeutua, josta seurauksena voi olla alasajo. Myös vaikka kuona irtoaisikin helposti, ja nuohoussykli on liian harva, saattavat hiukkaspäästöt kasvaa huomattavan suureksi nuohoushetkellä. Tämä voi aiheuttaa ongelmia sähkösuodattimessa, koska suodatin ei välttämättä ehdi varata tuhka hiukkasia. Niinpä huomattava osa tuhka hiukkasista voi päästä savukaasupuhaltimiin, mikä aiheuttaa eroosiota savukaasupuhaltimien siivissä. Myös hiukkaspäästöt ilmastoon voivat kasvaa nuohoushetkellä. /11/

#### 4.2 Lämpöpintojen korroosio

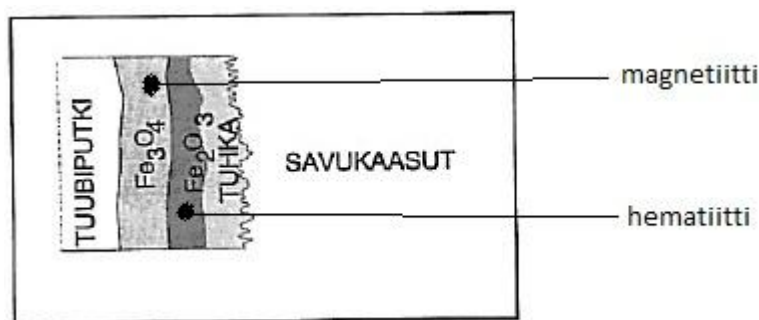
Kattilan savukaasupuolen korroosioalueet /5/

- tulipesä, jossa korroosio johtuu lähinnä pelkistävästä oloista
- tulistimet, joissa yleisimmin korroosioita aiheuttavat ylikorkeat materiaali-lämpötilat tulistinputkissa
- kuumat lämpöpinnat, joissa lentotuhkasta muodostunut sula faasi aiheuttaa korroosiota
- kylmät lämpöpinnat, joissa happokastepisteen alitus aiheuttaa korroosiota

#### 4.2.1 Korkealämpötilakorroosio

Lähes kaikki metallit muodostavat ilman kanssa reagoidessa oksidikerroksen. Tätä kutsutaan metallin hapettumiseksi eli korrodoitumiseksi. Syntyneet metallioksidikerroksen johdosta heikkenee metallin ja hapen välinen reaktio, minkä takia myös hapettuminen eli korroosio vähenee. Korroosionopeus tulee riippuvaiseksi siitä, miten helposti metalli tai happi pystyy kulkemaan metallioksidikerroksen läpi. /5/

Korkeassa lämpötilassa hapettavissa oloissa tapahtuvaa korroosiota nimitetään hilseilyksi. hilseilyn kestävyys riippuu muodostuvan oksidikerroksen ominaisuuksista. Useimmat metallit, myös rauta, voivat muodostaa metallin pinnalle erityyppisiä oksidikerroksia. Raudan muodostamat oksidikerrokset ovat metallista ulospäin lueteltuina: wustiitti ( $>570^{\circ}\text{C}$ ), magnetiitti ja hematiitti. Näistä wustiitti, jota syntyy vain yli  $570^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa, johtaa hyvin ioneja ja kiinnittyy huonosti metallin pintaan. Siksi rauta hapettuu yli  $570^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa nopeasti. Tämän lämpötilan alapuolella muodostuva oksidikerrostuma sen sijaan antaa riittävän suojan hapettumisen jatkumista vastaan. /5/



Kuva 6. Suojaavan oksidikerroksen muoto hapettavissa oloissa ( $t < 570^{\circ}\text{C}$ ). /5/

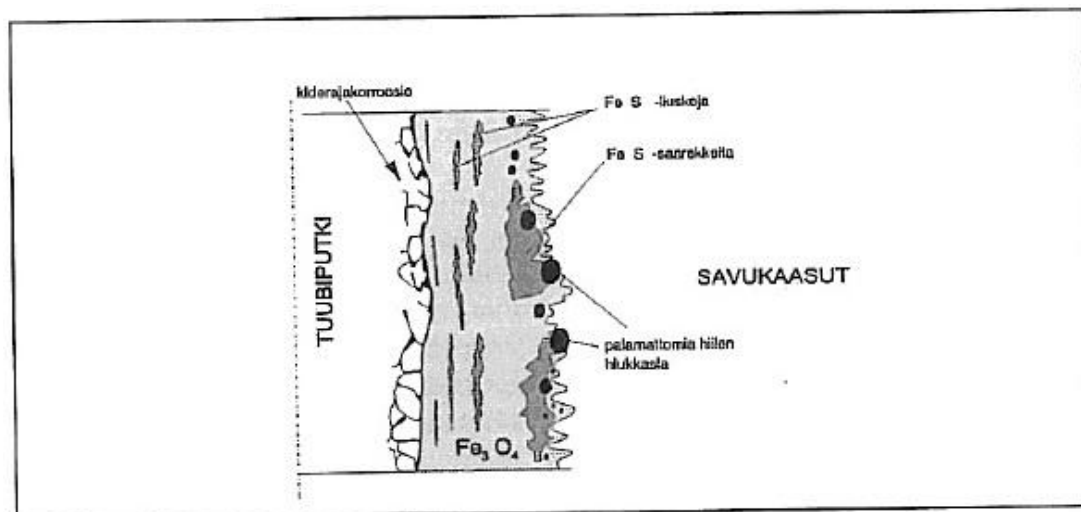
Kattiloissa hapen osapaine voi olla niin alhainen, että puhdas rauta ei kykene suojaamaan korroosiota vastaan. Sopivilla seosaineilla voidaan kuitenkin korroosiokestävyyttä parantaa. Yleisimmin hapettumiskestävyyttä lisätään seostamalla kromilla. Runsasseosteisten terästen kromipitoisuus on yleensä 10 - 20 %. Kromin metallia suojaava vaikutus perustuu siihen, että metallin pinnalle muodostuu kromikerrosoksidia, jonka ionijohtavuus on hyvin heikko. Kromioksidi toimii hyvin kattilan tulistinputkissa. Korkeissa lämpötiloissa yli ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) kromioksidi alkaa höyrystyä ja metal-

li menettää korroosiokestävyytensä. Tämän lämpötilan kuumemmalla puolella toimii alumiinioksidi kromioksidia paremmin. /5/

Taulukko 2. Terästyypien hilseilylämpötila ilmassa. /7/

Terästyyppi:	Hilseilylämpötila ilmassa (°C)
• 13%Cr:	830
• 17%Cr	850
• 26%Cr	1075
• 25%Cr-5%Ni-1,5%Mo	1070
• 18%Cr-8%Ni	850
• 17%Cr-12%Ni-2,5%Mo	850
• 20%Cr-11%Ni, Si, Ce	1150 1)
• 25%Cr-20%Ni	1150
1) Avesta 254MA	

Korroosiomuodostus pätee vain siinä tapauksessa, että metallia ympäröivässä kaasufaasissa ei ole muita aktiivisia komponentteja, kuten rikkidioksidia, reaktiomekanismit muuttuvat. Metallin ollessa happi- ja rikkipitoisissa ympäristöissä, joissa hapen ja rikin osapaineet sijaitsevat metallisulfidin suotuisilla muodostumisalueilla, rikki saattaa diffundoitua oksidikerroksen läpi ja muodostaa metallisulfidia. /5/



Kuva 7. Pelkistävässä oloissa kattilaputken pinnalle kasvava sulfidikerros. /5/

Yhdistynyt oksidi-sulfidikerros voi syntyä myös rikkidioksidin kulkeutuessa oksidikerroksen läpi esimerkiksi sen huokosten tai mikrohalkeamien kautta. Oksidikerros yleensä parantaa korroosiokestävyyttä, mutta sulfidikerros huonontaa sitä, koska sulfidikerrokset ovat huokosia ja rikkiyhdisteet tekevät muodostuvan oksidikerroksen

huokoiseksi ja helposti hilseileväksi. Pelkistävässä oloissa voi oksidikerros jäädä kokonaan syntymättä. Savukaasuissa olevan rikin vaikutuksesta metallien hilseilylämpötila voi tapauskohtaisesti laskea jopa satoja asteita. /5/

Jos kaasufaasi sisältää epäorgaanisia yhdisteitä, jotka niissä oloissa voivat tiivistyä suliksi metallin pinnoille, reaktio nopeutuu huomattavasti. Reaktion jyrkkä nopeutuminen johtuu pääosin siitä, että ionit kulkevat nopeammin nesteessä kuin kiinteässä faasissa. Tätä ajatellen erityisen ongelmallisia suoloja ovat alkalimetallisuolat, joista esimerkiksi natriumkloridi muodostaa kaasumaisen rikin kanssa natriumsulfaattia. Metallin päälle syntyvä sula natriumsulfaatti hajottaa metallia suojaavan oksidikerroksen, joka runsasseosteisilla teräksillä on useimmin kromioksidia. /5/



Kuva 8. Ultraäänimittausta varten poistettu epäpuhtaudet tulistin2 pinnalta.

#### 4.2.2 Matalalämpötilakorroosio

Poltettaessa rikkipitoisia polttoaineita rikistä muodostuu voimakkaasti syövyttäviä reaktiotuotteita. Suurin osa rikistä kuitenkin palaa rikkidioksidiksi, mutta osasta muodostuu rikkitrioksidia. Savukaasujen kastepisteen alittuessa pääsee niissä oleva

kosteus tiivistymään ja yhdessä savukaasujen rikkiatrioksidien kanssa muodostamaan rikkihappoa ja hapettavia kalvoja. /5/

Rikkiatrioksidin määrä riippuu suureksi osaksi /5/

- polttoaineen rikkipitoisuudesta
- savukaasujen viipymäajasta tulipesässä
- tulipesän ja seinämän lämpötilasta
- ylimääräisestä
- katalyyttien määrästä

Rikkihappokorroosiota esiintyy kattilan loppupäässä eli ilman- ja esilämmittimien ja savupiipun alueella. Otollisimmat paikat ovat sellaiset lämpöpinnat, joiden lämpötila laskee alle 200 °C:n. Rikkihappohöyry muodostuu tässä lämpötilassa, mutta ei jää lämpöpinnoille ennen kuin lämpötila laskee alle happokastepisteen. Happokastepisteellä tarkoitetaan lämpötilaa jolloin ensimmäiset happopisarat tiivistyvät lämpöpinnoille. Korroosio alkaa kun happokastepistelämpötila on alitettu (n. 150 °C) ja happopisarat ovat alkaneet tiivistyä pinnalle. Lisäksi korroosio on huomattavasti suurempaa jos lämpötila alittaa vesikastepisteen (n. 50 °C). Tällöin näiden yhdistymisestä tulee rikkihapoketta, joka korrodoi terästä enemmän kuin saman vahvuinen rikkihappo. Naistenlahden tyyppisissä voimalaitoksissa tätä ilmiötä voidaan torjua nostamalla savukaasujen lämpötilaa, neutraloimalla happamien rikkiyhdisteet magnesiumiyhdisteiden avulla tai syöttämällä ammoniakkia savukanavaan. /5/

#### 4.3 Lämpöpintojen eroosio

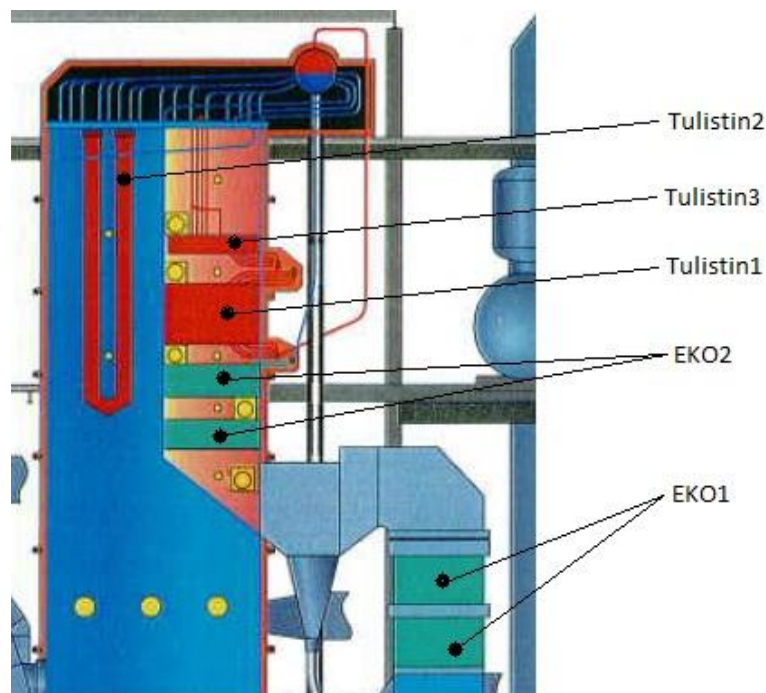
Tämän tyyllisellä eroosiolla tarkoitetaan savukaasuissa olevien pienten, kovien hiukasten aiheuttamaa kulumista. Eroosionopeuteen vaikuttaa esimerkiksi törmäysnopeus, -kulma, partikkelin massa, kovuus ja putkimateriaalien ominaisuudet. Eroosionopeutta voidaan laskea erilaisten matemaattisten mallien mukaan, mutta kehitetyt mallit sopivat vain tiettyihin tilanteisiin. Eroosiota ei pidetä yhtä pahana ongelmana kuin korroosiota, ellei polttoaine sisällä runsaasti kuluttavia partikkeleita, kuten turve. Turpeessa ja turpeen tuhkassa on huomattavasti kuluttavia, kovia kvartsiyhdisteitä.

Siksi turpeen siirto- ja polttolaitteiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon voimakas eroosio. /5/

Eroosiota voidaan hidastaa mm. pienillä virtausnopeuksilla, välttämällä liian jyrkkiä käännöksiä putkissa pyörteiden syntymisen estämiseksi ja rakentamalla tarpeeksi suuret savu- ja virtauskanavat. Lisäksi putkia voidaan suojata eroosiolta käyttämällä suojaavia muurauksia ja teräslevyjä. Muurauksia ei voida käyttää tulistinpaketeissa eikä ekonomaisereissa, joten niitä putkia suojataan erityyppisillä hitsausmenetelmillä ja kouruputkilla. /5/

## 5 TUTKIMUKSET PAINELAITTEISSA

Tutkimustulosten järjestys on yhteydessä savukaasujen virtaussuunnan kanssa.



Kuva 9. Yleisnäkymä kattilan painelaitteista. /3/



## 5.1 Höyrystin

Höyrystin sijaitsee kattilan sivuseinillä ja ulottuu ihan pohjalta ylös asti. Siellä ekonomaisereista tuleva vesi höyrystetään. Lämpötilat putkissa virtaavalla höyryllä on syöttöpäässä noin 300 ° C ja loppupäässä 420 ° C. Kuvassa höyrystinputket ovat kaikki siniset ja keltapunertavat alueet tulipesän puolelta EKO 2:een asti. Höyrystimen pohjalla oleva alue on kosketuksissa hiekkapetin kanssa, mutta kulumista ei juuri tapahdu, koska putkien päälle on tehty suoja-muuraus, jonka paksuus on noin 25mm.

Erosion lisäksi putket ovat alttiita korroosiolle pelkistävässä olosuhteissa. Koska putket ovat jo niin vanhoja, niiden pintaan on syntynyt suojaava oksidikerros. Oksidikerros on suojannut putkia hyvin, eikä paksuusmittauksissa näkynyt juurikaan kulumisen merkkejä. Ainoat huomioitavat kohdat olivat, joissa höyrystinputki teki jonkun tyyllisen käännöksen tai hiekkavirtaus on pyörremäistä. Näitä mutkakohtia on reunakohdissa, seinässä olevien lisälaitteiden ja miesluukkujen kohdilla. Miesluukut sijaitsevat tulistimien ja ekonomaisereiden vieressä. Takavedon miesluukkujen, nuohoin- ja instrumenttiaukkojen heittoputkissa on havaittu kuluneita putkia. Nämä kohdat vaativat päällehitsauksen, jotta seinämäpaksuutta saadaan lisättyä. Päällehitsattavia kohteita oli vuonna 2011 nuohoinaukot kohteissa \*”O4”, ”O3”, ”V3” ja instrumenttiaukon reunaputki EKO 2:sen yläpuolella. Tulipesän puolella ei ollut merkittävää kulumista lisälaitteiden kohdilla, joten toimenpiteitä ei tarvittu.

\*Termit:     ”O4”           kattilan oikeapuoli (O) ja ylhäältä laskettu 4. luukku.  
              ”V3”           kattilan vasenpuoli (V) ja ylhäältä laskettu 3. luukku.



Kuva 10. Miesluukun ”O4” heittoputkien päällehitsattavat kohdat. /9/

Höyrystinputkissa on seurantakohde 3½ kerroksen seinämässä, jossa on joulukuussa 2002 revennyt yksi putkista. Putkessa oli ilmeisesti valuvirhe, joka oli lähtenyt evää pitkin repeytymään ja putki oli auennut kattilaan päin kuin oven sarana. Inspectan tarkastajan kanssa kävimme tutkimassa onko repeytymä edistynyt viereiseltä alueelta, mutta merkittävää muutosta ei ole vuosiin tapahtunut joten ajolupa on annettu tälle putkialueelle. Alueelle hitsattiin uusi putkiryhmä tapahtuman jälkeen.



Kuva 11. Höyrystinputki repesi auki joulukuussa 2002.

## 5.2 Tulistin 2

Tulistin 2 eli sekundääritulistin kuuluu säteilytulistimiin ja sijaitsee kattilan katossa, tulipesän yläpuolella. Virtaavan höyryn lämpötila on putkien alkupäässä 423 ° C ja loppupäässä 500 ° C. Putket ovat alttiita likaantumaa, koska ovat ensimmäisenä jäähdyttämässä lentotuhkaa, joka on tässä vaiheessa osittain sulamuodossa. Epäpuhtaudet ja tuhka kerrostuvat tulistinputkien pinnoille, aiheuttaen lämmönsiirtymisen heikkenemistä.

Suoritimme pintatutkimuksissa paksuusmittauksia ultraäänilaitteella kolmelta eri korkeudelta. Yhdeltä tasolta mittasimme pistotarkastuksin muutaman kohdan, ja merkitsimme paksuuden putken pintaan. Emme ottaneet mittauksia kaikista putkista, jotta ensi vuonna voidaan suorittaa samalta tasolta uudet arvot niistä kohdista joissa on vielä kuonaa päällä. Tarkastimme myös mahdollisen kuumakorroosion. Tämä olisi näkynyt putken pinnassa hilseilynä ja läikkämäisenä pintana kuonan alla, mutta korroosiota ei ollut ilmestynyt. Poistimme epäpuhtaudet putken pinnalta akkukäyttöisellä kulmahiomakoneella, jotta saimme pinnaksi sileää aluetta. Kuumakorroosioon liittyvät tutkimukset olivat hyvä suorittaa tänä vuonna, koska tulevana ajokausina ajetaan mahdollisesti enemmän haketta kuin ennen. Ensi vuonna mittaustulokset saavat referenssiä siitä, miten hakkeen lisääminen aiheuttaa kuumakorroosioon. Odotukset ovat, että jos kuluminen kiihtyy, niin syy on hakkeen polton lisääntymisessä ja sen sisältämässä kloridissa.

Paksuusmittaustulokset olivat hyvät, eikä vaadi toimenpiteitä. Alemmassa putkikohdassa oli lukemia 5,4 mm ja alkuperäinen putkipaksuus on 5,6 mm. Putki on siis kulumunut tältä kohdalta 0,2 mm 35:ssä vuodessa. Ylemmäs mentäessä tulokset olivat maksimissaan 5,2 mm, joka myös on todella vähän.



Kuva 12. Tulistin 2:n alin mittauskohta. /LIITE 1/

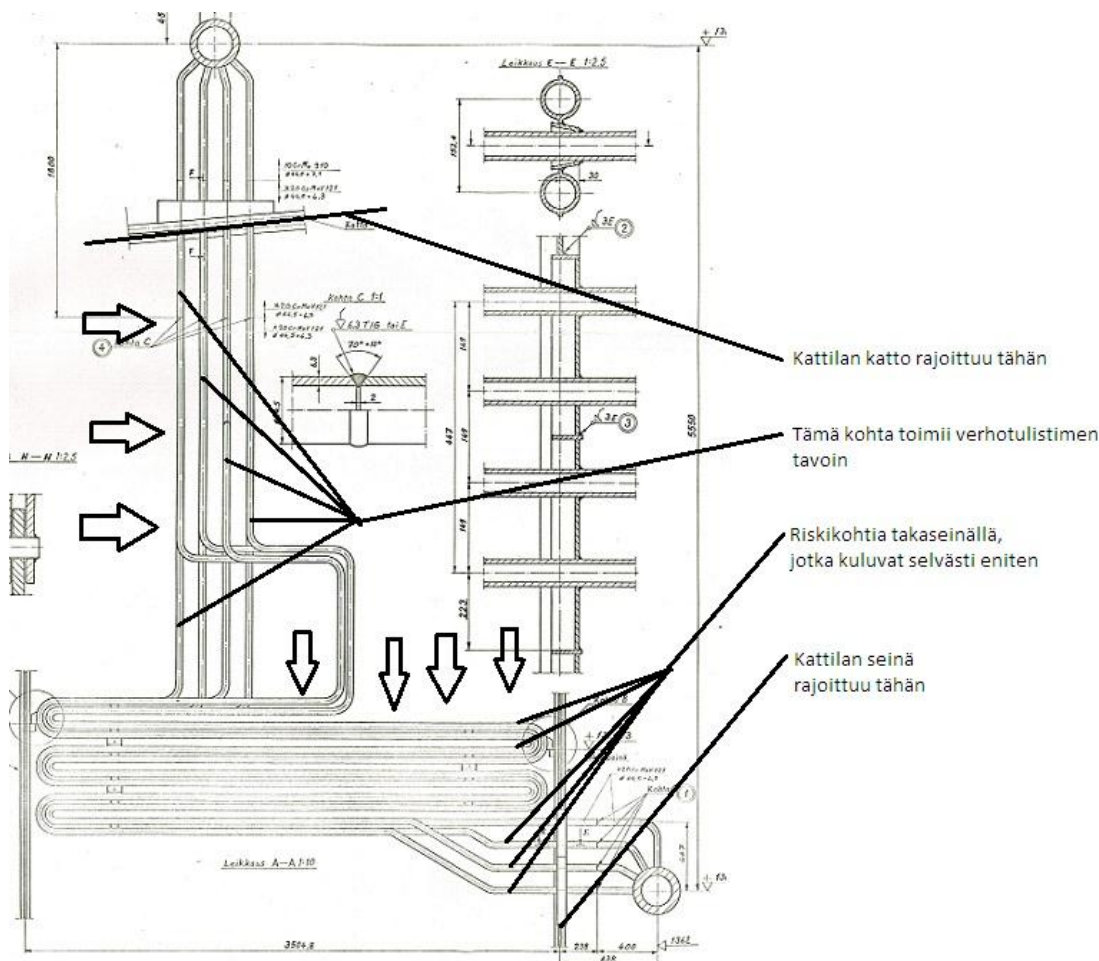
### 5.3 Tulistin 3

Tulistin 3 eli tertiääritulistin on ensimmäinen tulistin savukaasujen käännetyä. Putkissa virtaa 492 °C höyry, joka tulistuu maksimissaan 535 °C:een. Loppulämpötila riippuu kattilan ajosta ja valituista käyttöarvoista, mutta täydellä teholla kattila saadaan tuottamaan kyseinen höyryn lämpötila.

Tulistimen ylöspäin johtavat putket toimivat verhotulistimen roolissa, joka on myös altis likaantumaan tulistin 2:n tapaan. Tuhka ja muut partikkelit tarttuvat jäähtyttyään pintaan ja osa sintraantuu vanhan kuonan päälle. Kuonan syntyminen pintaan aiheuttaa putkissa ylikuumenemisen vaaraa, joka taas kasvattaa eroosion purevuutta. Tulistimen yläputket johtavat varsinaiselle tulistinpaketille, jossa epäpuhtauksia poistetaan höyrynuohoimilla. Nuohoin poistaa höyryllä painepesurin tapaan putkipakettia käytön aikana. Nuohoukselle on tehty optimointi, joten puhdistus on tarkkaan mietitty. Liian usein käytettynä höyryn paine ja kuona yhdessä aiheuttaa hiekkapuhalluksen kaltaisen efektin, joka hioo putkimateriaalia. Kattilan ollessa kylmänä (eli kesäisin), puhdistus suoritetaan painepesurilla miesvoimin, jossa noin 1000 baarin pesu irrottaa pahimman pinttyneen kuonan.

Tulistin 3 kriittisiin kohtiin kuuluu takavedon kohdat, jotka on merkitty kuvaan. Savukaasujen virtaus kääntyy tässä kohtaa alaspäin (virtaus nuolien tyyliin), joka aiheuttaa takaputkille suurta virtausta. Virtauksen mukana tulevat epäpuhtaudet, lentoon

lähtenyt petihiekka ja osittain kovettunut lentotuhka hioo kyseistä kohtaa merkittävästi.

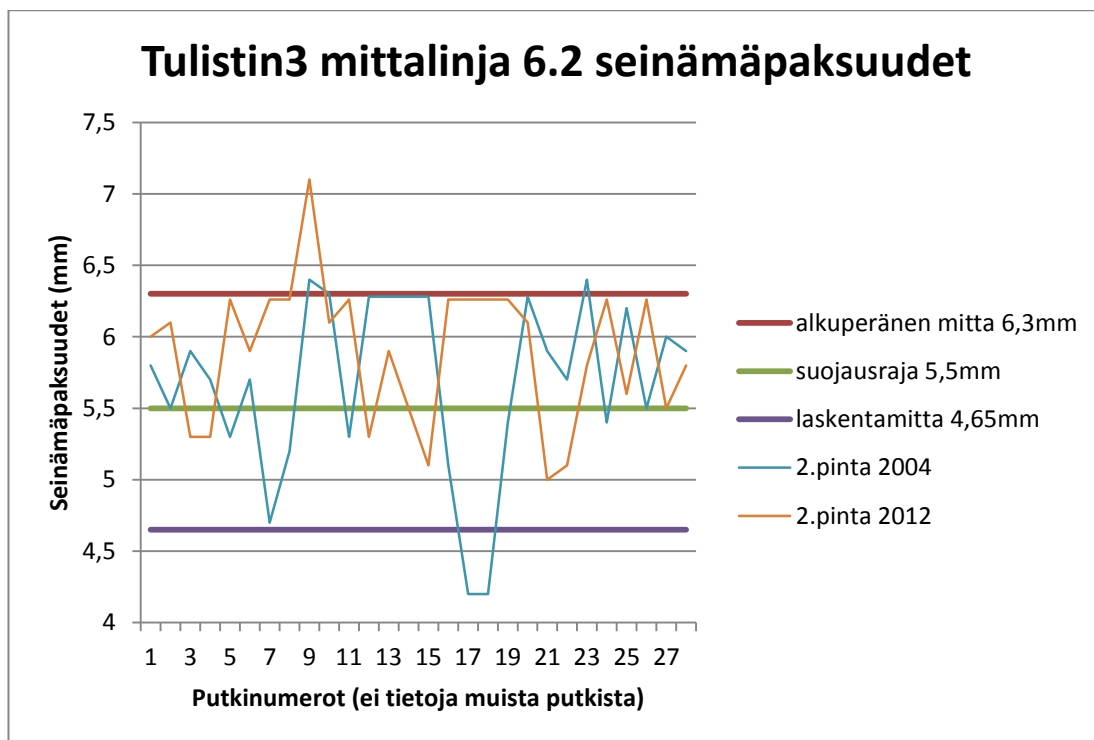


Kuva 13. Tulistin 3 sivulta. Nuolet kertovat virtaussuunnan. /8/ /LIITE 2/

Tulistimen putkimateriaali on X20CrMoV121, ja seinämänpaksuus on 6,3 mm. Tutkimuksissa perhdyttiin jo tiedettyyn ongelma-alueeseen, joka on tulistinpaketin peräseinällä. Siellä virtaus kääntyy alaspäin. Ensimmäinen pintaputkisto on pääosin suojattu, ja sivuilta suojaamattomat riskikohdat suojattiin revision aikana vuonna 2012. Tämän takia keskitytään seuraavaan pintaputkistoon, jota ei ole vielä merkittävästi suojattu ja joka näyttäisi kuluvan niin kauan kun putket ovat kosketuksissa virtaukseen.

Alla olevassa kuviossa sininen viiva kuvaa toisen putkipintarivistön mittaustuloksia vuonna 2004 ja vertauksena nykyiset saman alueen tulokset 2012 oranssilla. Kun suojausraja (kuviossa vihreällä) alitetaan, putkisto kyseinen kohta suojataan U-

muotoisella teräslevyllä. Laskentamitta kertoo tutkimuksissa mitta-arvoa, jolloin on aika tehdä päällehitsaus. Päällehitsauksessa tehdään hitsausaamaa pinnanmuotojen mukaan, jolloin sen putken seinämäpaksuus kasvaa turvalliselle alueelle. Mikäli hitsausta ei voida toteuttaa, putki täytyy tulpata mahdollisuuksien mukaan.



Kuvio 6. Tulistin 3 2. pinnan paksuusmittaustulokset. /9/

Joissain tilanteissa turvaudutaan myös tulppaukseen, eli putki tulpataan molemmista päistä, jolloin putkessa loppuu virtaus kokonaan. Tätä pyritään välttämään, koska tulistinputkien menettäminen vaikuttaa lämmön talteenottoon eli tehoon. Virtauksen loputtua putkessa, se tarkoittaa myös sitä, että putki ei jäähdy savukaasuvirtauksessa ja kuluu lopulta kokonaan pois.



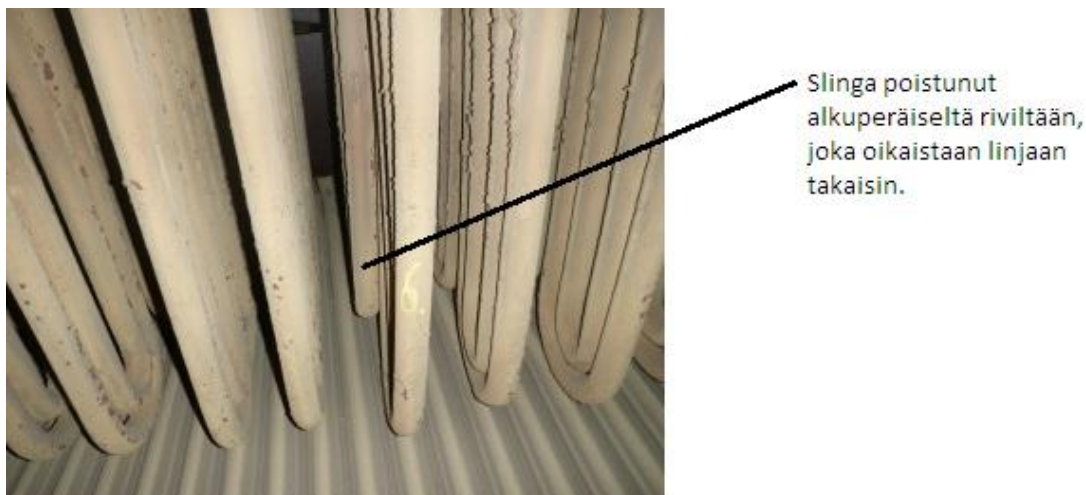


Kuva 14. Tulppaus toteutettu tulistin 3:ssa. Valkoinen aine on NDT -testin kehitettä.  
/9/

Osa reunakohtaista on suojattava rei'itetyllä tulenkestävällä teräslevyllä. Tämä jarruttaa hieman virtausta seinien kohdalla ja suojaa paketin reunoilla olevia putkia juuri siihen kohdistuvilta taka- ja sivuseinän voimakkaalta virtaukselta. Putkiryhmät on myös oikaistava, mikäli ne lähtevät nojaamaan vinoon. Kuvassa 14 on tästä tilanteesta kuva.



Kuva 15. Tulistin 3:n takaseinän reunakohta levytetty (vanha levy). /9/



Kuva 16. Tulistin 3 6. ja 26. rivin putket lähtenyt pois radaltaan. /9/

Tulistinpaketissa oli useita korjauskohtia revisiolle 2012 ja niitä syntyy joka vuosi korjattavaksi. Pakettia on pakko pitää silmällä joka kesä, varsinkin kun hakkeen polttoon aiotaan lisätä ja turpeen osuutta vähentää. Kuvio 6:sta huomataan, että seitsemässä vuodessa on mahdollista noin 1,2 mm kuluminen (nro 15), jos poltetaan samanlaisella turpeen ja puun polttoainesekoituksella.

#### 5.4 Tulistin 1

Tulistin 1 eli primääritulistin sijaitsee tulistin 3 alapuolella. Putkisto on vaihdettu uuteen vuonna 1996. Höyryn lämpötila on noin 300 °C, kun se tulee putkistoon ja tulistuu 453 °C:een.

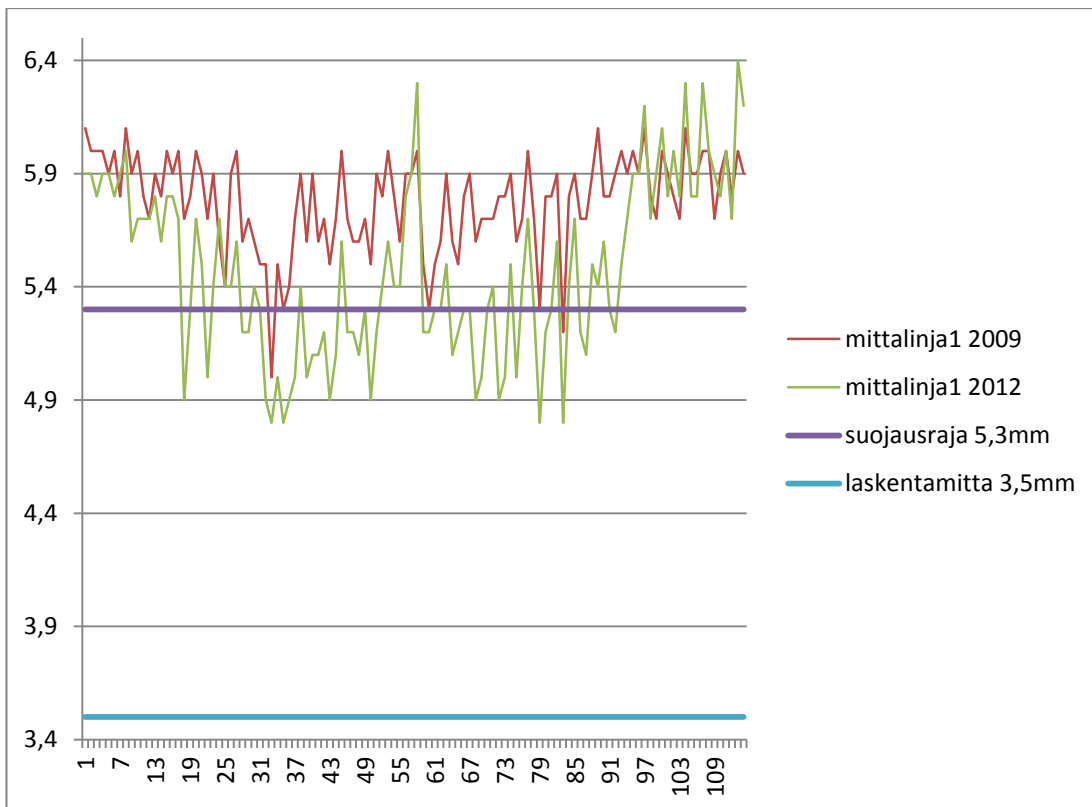
Tässä tulistimessa on haasteena suojata takaseinän aluetta, jossa virtaus on vielä kulltavampaa kuin muualla paketissa. Virtausta pystytään hidastamaan ja samalla putkia suojaamaan asentamalla tulenkestävää reikälevyä takaseinän ja sivuseinien alueelle. Tässä on kyseisen tulistimen ylimmät putket.





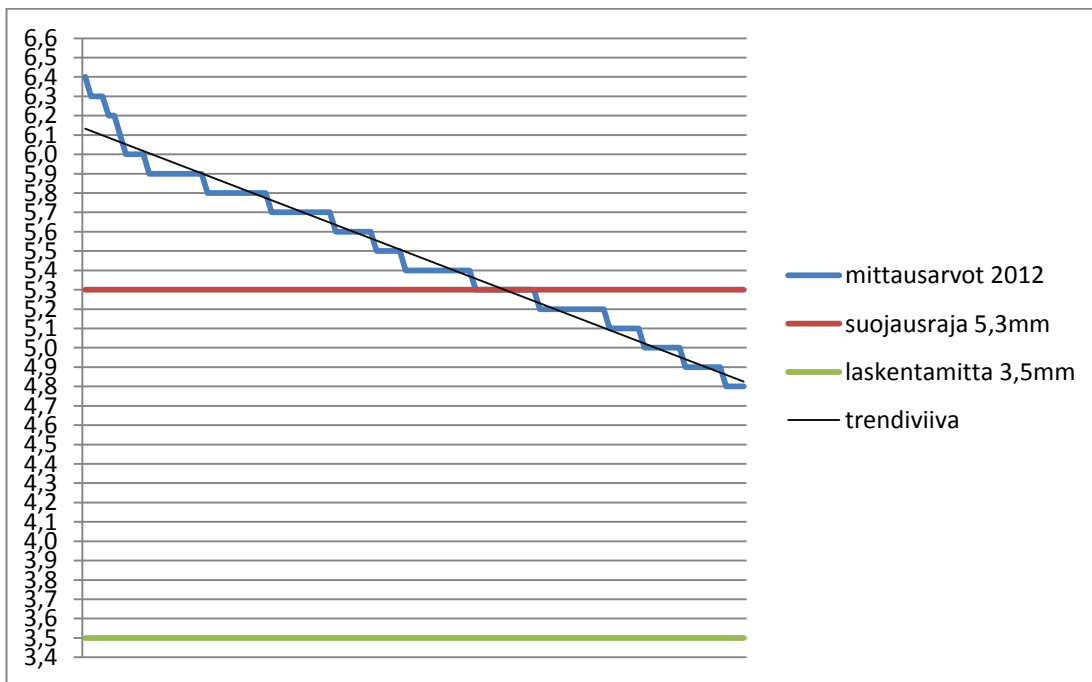
Kuva 17. Uudet reikälevyt tulistin 1 takaseinällä. Nuolet kuvaavat pahinta aluetta.  
/LIITE 3/

Seuraavalla sivulla oleva kuvio kuvaa tulistin 1:sen mittalinja 1 tuloksia. Vasemmalla sivulla on kuvattuna putken seinämäpaksuus millimetreinä. Alhaalla olevat luvut ovat putkinumeroita. Putkien alkuperäinen seinämäpaksuus on 6,3 mm. Suojausraja on kuviossa violetilla värillä kuvattu suora viiva. Laskentamittaa ei näy taulukossa, koska mitkään tulokset eivät olleet lähellä sitä aluetta. Punaisella viivalla on mittaus-tulokset vuodelta 2009, jotka ovat lähes kaikki suojausrajan yläpuolella, eli rajan yläpuolella oleville putkille ei tehty toimenpiteitä. Neljän vuoden aikana seinämäpaksuus on vajonnut vihreän viivan mukaisiin paksuuksiin. Kuvioista voi tarkastella pahimpia kulumisen etenemisen kohtia, esimerkiksi putkinumeroilla 18, 40, 72 ja 73. Näiden putkien kulumisen on ollut suurinta, eli 0,7 – 0,9 mm neljässä vuodessa. Voidaan odottaa, että jopa suojaamattomana putket kestäisivät vuoteen 2016. Tämä tietenkin vaatisi kattilan ajolta samanlaisia ajo-arvoja kuin viimeisenä neljänä vuotena. Samat ajotunnit ja sama turve/puu polttoaine suhde.



Kuvio 7. Tulistin 1 paksuusmittaustulosten vertailua vuosilta 2009 – 2012. /9/

Alla olevasta kuvio 8:sta voidaan havaita, että noin kolmasosa mittarivistä päättyi suojusrajan alapuolelle.



Kuvio 8. Tulistin1 mittausarvot järjestyksessä 2012. /9/

Tulistin1:ssä on tulpattuja putkia 1. sisimmässä ja 2. ja 3. linjassa. Näissä kuluminen on ollut liian rajua, ja tämä on nähty ainoaksi tavaksi ratkaista asia. Muissa paketin kohdissa on tehty suojauksia U-muotoisella teräslevyllä ja joitain putkia on oikaistu seivästämällä rivi suoraksi. Seivästämisen idea on pitää rivi yhdenmukaisena, jotta virtauksesta poikkeavat putket eivät siirtyisi liian rajusti virtauksen eteen. Kun virtaus puhaltaa epäsäännöllisesti, sen purevuus kasvaa merkittävästi. Seivästys tehdään pitkällä rautaputkella, joka vie putkien sivuseinää pitkin suoraan alaspäin. Yläpää hitsataan johonkin tukirakenteeseen tai toisiin seipäisiin, mahdollisuuksien mukaan.

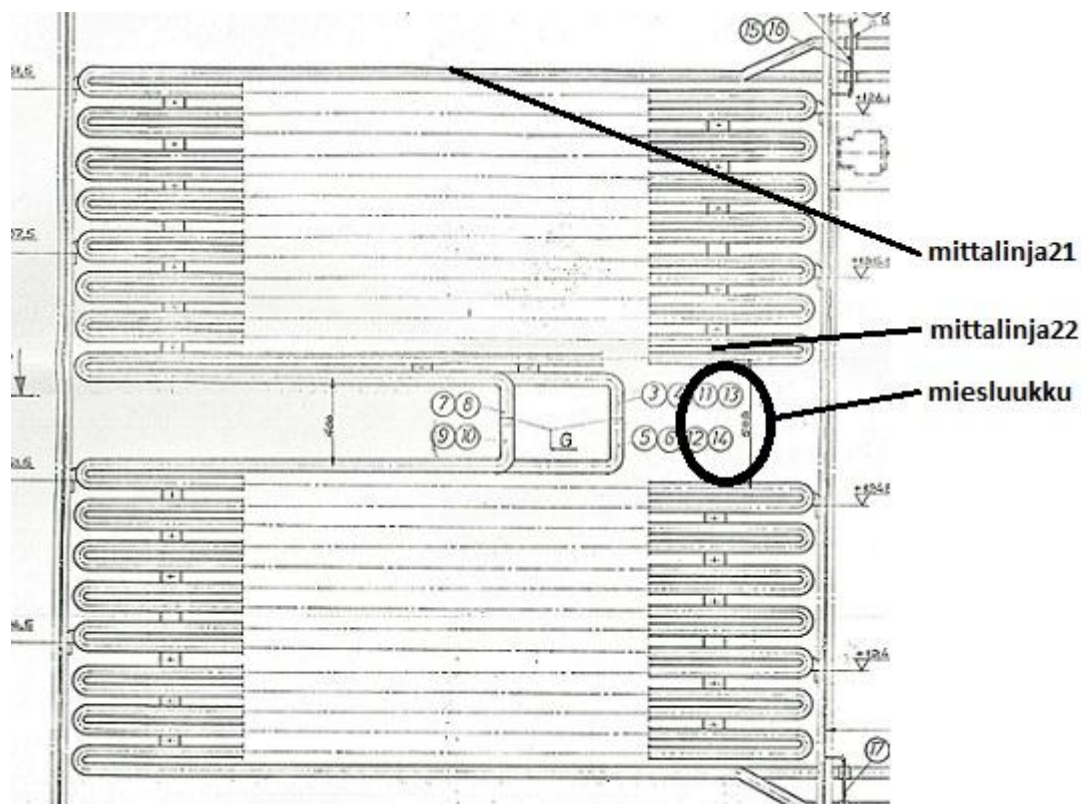


Kuva 18. Tulistin 1:n putkien pinnalle on kiristetty U-muotoinen suoja-levy.

## 5.5 EKO 2

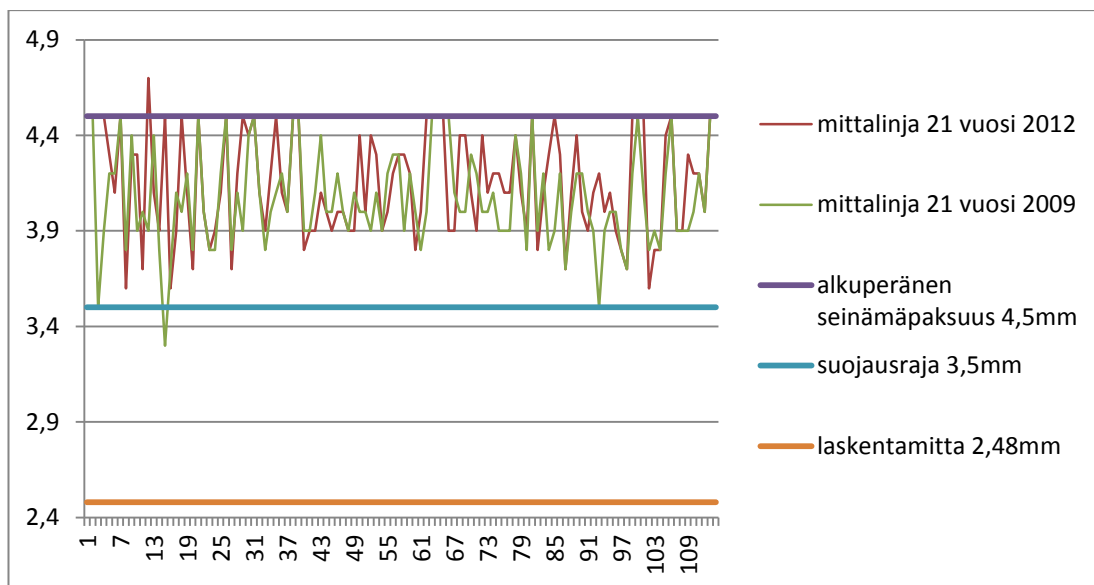
EKO 2 eli vedenesilämmitin numero 2 sijaitsee tulistimien jälkeen. Putkistossa virtaa noin 250 °C vesi, joka paketin läpi virratessa lämpenee noin 300 °C:een. Paketissa on useita mittalinjoja, joista suuri osa on suojattu. Uusia etenemiskohteita löytyy joka vuosi lisää ja kuluminen on siirtymässä paketin muihinkin kohtiin kuin vain takaseinälle. Useimmat ensimmäiset mittalinjat ovat suojattu, joka merkitsee sitä, ettei niissä tapahdu enää normaalia kulumista. Suojan rikkoutuessa, siitä täytyy poistaa suoja-levy ja suorittaa mittaus uudelleen. Mittauksia on vaikea verrata, kun linjoja suoja-

taan niin monesta kohtaa, siksi keskityn mittalinjaan 21 ja 22, joita tullaan vasta suojaamaan tulevaisuudessa.



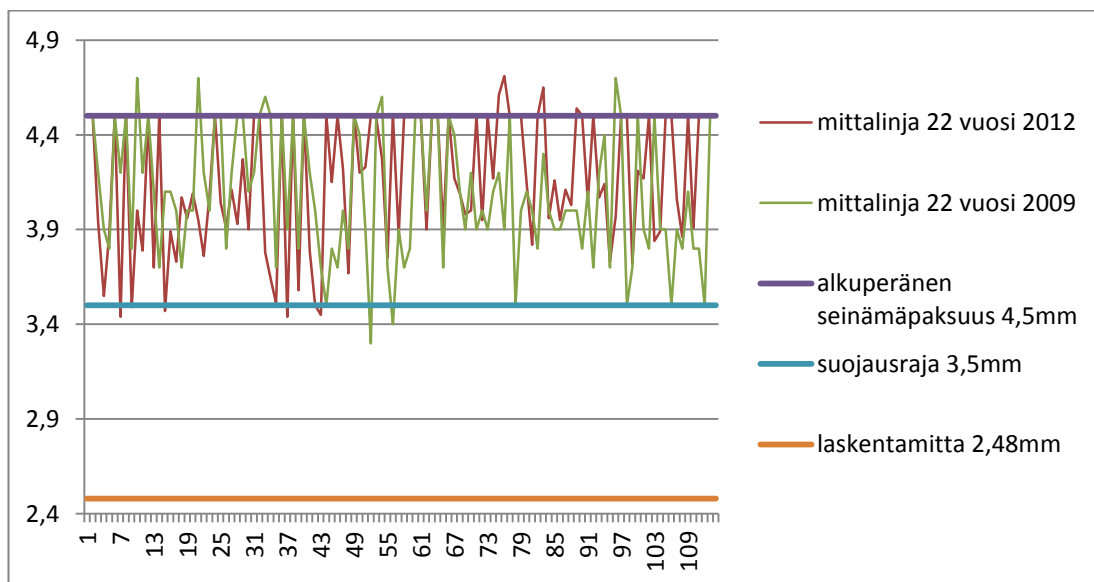
Kuva 19. EKO 2:n putkipaketti sivulta. Mittalinjat on merkitty nuolin. /8/ /LIITE 4/

Kuvioista alhaalla näkyy tutkittujen mittalinjojen kulumisen kasvu. Lähtötiedoksi otin vuoden 2009, joka näkyy vihreällä värillä kuvioista. Vertaamalla vihreää ja punaista viivaa, saadaan kulumisen eteneminen 3 vuoden aikana. Mikäli vihreä viiva on alempana kuin 2012 punainen viiva, niin se on suojattu. Kun punainen viiva on alimpana, se kuvaa kulumisen etenemistä. Mittalinjalta voi tulkita, että kolmen vuoden aikana maksimi kulutus on ollut 0,3 mm – 0,6 mm. Nämä arvot ovat putkista nro. 11, 13, 43, 66 ja 71. Näiden perusteella voidaan ennustaa, että maksimi kulumisella lasketuna putkiston tulisi kestää 6 vuotta eteenpäin. Olettaen, että putkiston kulumismaksimi on laskentamitta-arvo (2,48 mm). /9/



Kuvio 9. Mittalinjan 21 kuluminen vuosilta 2009 – 2012. /9/

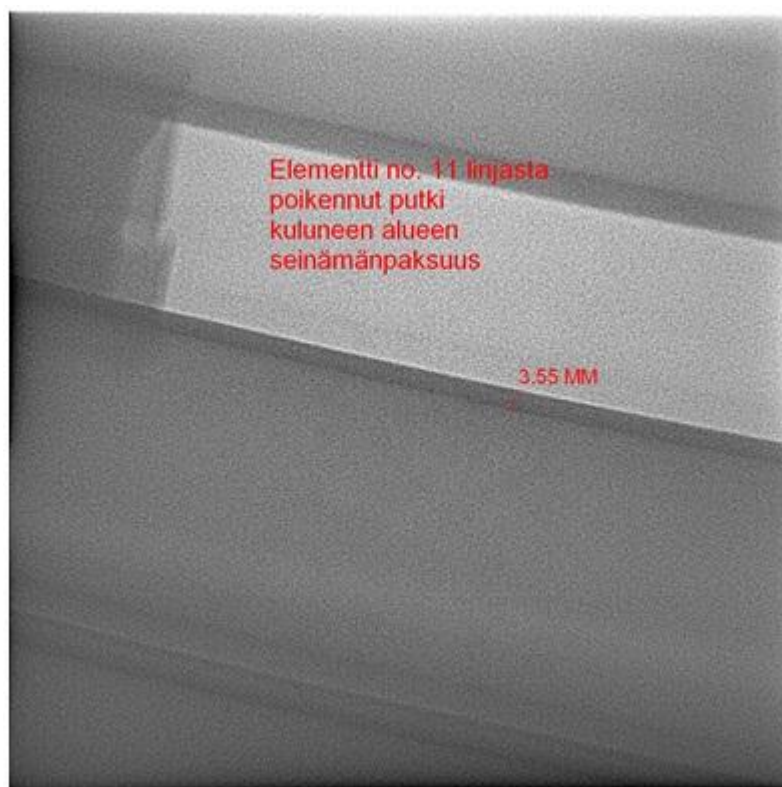
Seuraavassa kuviossa on arvot mittalinjalta 22. Tässä suurimmat kulumat oli tapahtunut putki nro. 7, 21, 33 ja 34. Näissä putkissa kuluminen oli edennyt eniten 3 vuoden aikana, jolloin materiaalia oli kulunut 0,7 mm – 0,9 mm. Jos eteneminen on samankaltaista, laskentamitta tulee maksimikulumisella eteen 3 vuoden kuluttua. Silloin putkinro7 ohittaa laskentamitan, mikäli sitä ei suojata ennen vuotta 2015.



Kuvio 10. Mittalinjan 22 kuluminen vuosilta 2009 – 2012. /9/



Putkistopakettien keskivaiheilta (linja 11) oli löydetty vuonna 2011 linjaltaan poistunut putki, jota epäiltiin kuluneeksi. Jotta putki pystyttiin tutkimaan, käyttöön otettiin Vi-disco foxRayzor – detektoripaneeli, joka kuvaa elektromagneettisäteellä putkiston paksuuden. Kuvausetäisyys oli 200 mm ja valotusaika 0,6 sekuntia. Geometrisen suurennuksen aiheuttaman mittavirheen korjauksen jälkeen kyseisen putken kuluneimman kohdan seinämäpaksuudeksi saatiin 3,5 mm  $\pm$ 0,2 mm. Putkipaketissa suojausraja on 3,5 mm seinämäpaksuutta. Tästä tiedetään tulevaisuudessa, että pois linjastaan siirtyneet putket on syytä siirtää takaisin linjaansa.

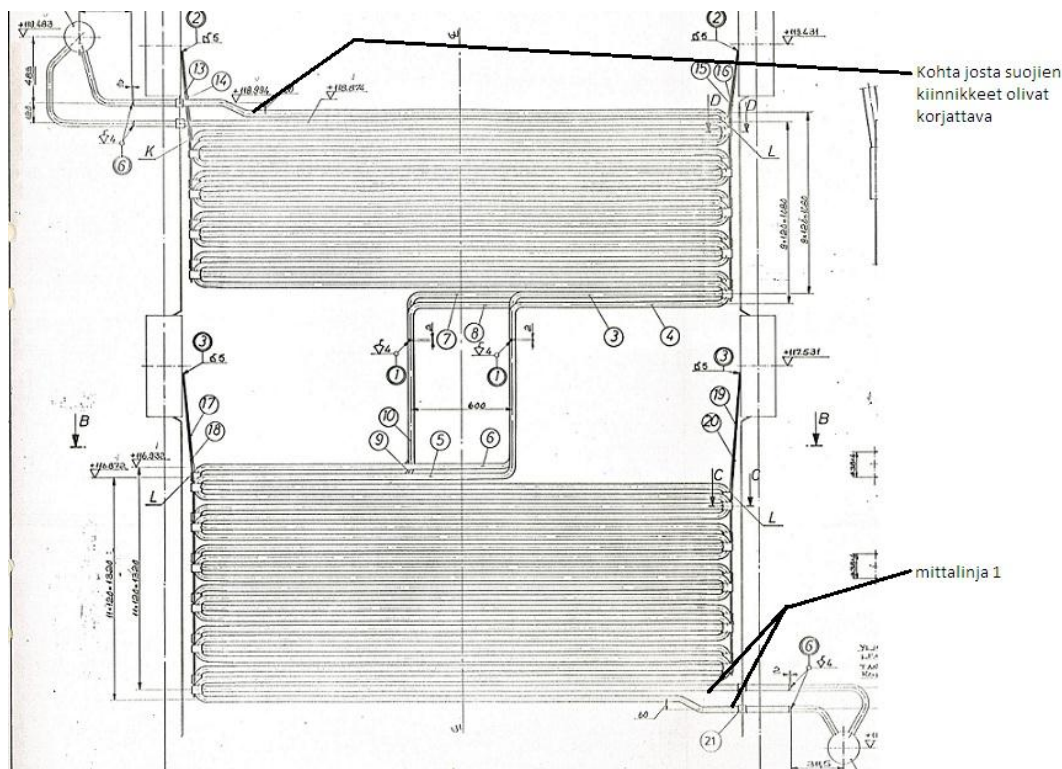


Kuva 20. Röntgenkuvausta putkiston keskelle. /9/

## 5.6 EKO 1

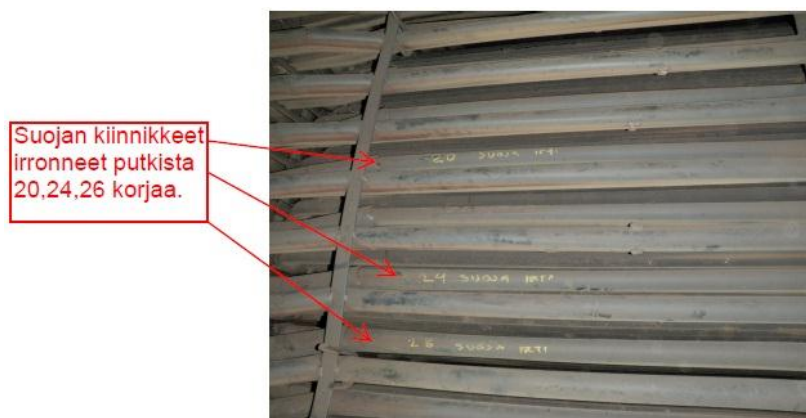
EKO 1 eli veden esilämmitin 1 toimii tutkimukseni ensimmäisenä painelaitteena ja sijaitsee savukaasujen loppupäässä. Tässä putkistossa vesi lämmitetään toista EKOa varten lämpötilaan 250 °C. Esilämmittimien jälkeen vesi virtaa höyrystimeen ja siitä tulistimiin. Näiden putkistojen seinämäpaksuus on 3,8 mm ja suojaukseen ryhdytään kun seinämästä saadaan arvo 3,5 mm. EKO 1 on olosuhteiltaan aika rauhallisessa

paikassa, jossa lämpötilat ovat selvästi alhaisemmat kuin ylempänä virtauksessa. Hiekka ja jäähtynyt tuhkakkin on jo virtaukseltaan tasaista, joka hidastaa merkittävästi kulumista.



Kuva 21. EKO 1 sivulta. Piirretyt merkinnät ovat korjauskohteet. /8/ /LIITE 5/

Putkistopakettia on suojattu jo useasta kohtaa vuosina 2003 ja 2004, joten nykyään vuonna 2012 on lähinnä kuluneiden suojarantojen etsintää ja niiden korjausta. Tämän vuoden revisiossa (2012) korjattiin suojiin kiinnikkeitä kuudesta eri kohtaa. Putket olivat numero: 20, 24, 26, 97, 101 ja 130. /9/



Kuva 22. EKO 2:n yläputkien suojusta kuluneet kiinnikkeet. /9/

## 6 LOPPUYHTEENVETO

### 6.1 Tulistimet

Tulistin 1:ssä on haasteena suojata takaseinän aluetta, jossa virtaus on vielä kuluttavampaa kuin muualla paketissa. Virtausta pystytään hidastamaan ja samalla putkia suojaamaan asentamalla tulenkestävää reikälevyä takaseinän ja sivuseinien alueelle. Mittalinja 1:n ohuimmat kohdat ovat putkien 33 ja 83 ympäristöt. Pahimpia kuluminen etenemisen kohtia ovat esimerkiksi putkinumeroilla 18, 40, 72 ja 73. Näiden putkien kuluminen on ollut suurinta, eli 0,7 – 0,9 mm neljässä vuodessa. Voidaan odottaa, että jopa suojaamattomana putket kestäisivät vuoteen 2016.

Tulistin 2:ssa tarkastimme mahdollisen kuumakorroosion. Tämä olisi näkynyt putken pinnassa hilseilynä ja läikkämäisenä pintana kuonan alla, mutta korroosiota ei ollut ilmestynyt. Poistimme epäpuhtaudet putken pinnalta akkukäyttöisellä kulmahiomakoneella, jotta saimme pinnaksi sileää aluetta. Kuumakorroosioon liittyvät tutkimukset olivat hyvä suorittaa tänä vuonna, koska tulevina ajokausina ajetaan mahdollisesti enemmän haketta kuin ennen. Ensi vuonna mittaustulokset saavat referenssiä siitä, miten hakkeen lisääminen aiheuttaa kuumakorroosioon. Odotukset ovat, että jos kuluminen kiihtyy, niin syy on hakkeen polton lisääntymisessä ja sen sisältämässä kloridissa.

Tulistin 3:ssa sen ylöspäin johtavat putket toimivat verhotulistimen roolissa, joka on myös altis likaantumaan tulistin 2:sen tapaan. Tuhka ja muut partikkelit tarttuvat jäähtyttyään pintaan ja osa sintraantuu vanhan kuonan päälle. Kuonan syntyminen pintaan aiheuttaa putkissa ylikuumenemisen vaaraa, joka taas kasvattaa eroosion purevuutta. Tulistin 3:n kriittisiin kohtiin kuuluu takavedon kohdat, jotka on merkitty kuvaan nro. 13. Savukaasujen virtaus kääntyy tässä kohtaa alaspäin (virtausnuolien tyyliin), joka aiheuttaa takaputkille suurta virtausta. Virtauksen mukana tulevat epäpuhtaudet, lentoon lähtenyt petihiekka ja osittain kovettunut lentotuhka hioo kyseistä kohtaa merkittävästi. Osa reunakohdista on suojattava rei'itetyllä tulenkestävällä teräslevyllä. Tämä jarruttaa hieman virtausta seinien kohdalla ja suojaa paketin reunoilla olevia putkia juuri tältä taka- ja sivuseinän voimakkaalta virtaukselta. Putki-



ryhmät on myös oikaistava, mikäli ne lähtevät nojaamaan vinoon. Pakettia on pakko pitää silmällä joka kesä, varsinkin kun hakkeen polttoa aiotaan lisätä ja turpeen osuutta vähentää. Kuvio 6:sta huomataan, että seitsemässä vuodessa on mahdollista noin 1,2 mm kuluminen (nro 15) jos poltetaan samantyyllisellä turpeen ja puun polttoaine sekoituksella.

## 6.2 Höyrystin

Höyrystimen putket ovat pääosin hienossa kunnossa tulipesän puolella. Höyrystinputkissa on seurantakohte 3½ kerroksen seinämässä, jossa on joulukuussa vuonna 2002 revennyt yksi putkista. Takavedon miesluukkujen, nuohoin- ja instrumenttiaukkojen heittoputkissa on havaittu kuluneita putkia. Nämä kohdat vaativat päällehitsauksen, jotta seinämäpaksuutta saadaan lisättyä. Päällehitsattavia kohteita oli vuonna 2011 nuohoinaukot kohteissa ”O4”, ”O3”, ”V3” ja instrumenttiaukon reuna-putki EKO 2:sen yläpuolella.

## 6.3 Ekonomaiserit

EKO 1:sen putkistopakettia on suojattu jo useasta kohtaa vuosina 2003 ja 2004, joten nykyään vuonna 2012 on lähinnä kuluneiden suojapantojen etsintää ja niiden korjauksia. Tämän vuoden revisiossa (2012) korjattiin suojien kiinnikkeitä kuudesta eri kohtaa. Putket olivat numero: 20, 24, 26, 97, 101 ja 130.

EKO 2:ssa useimmat ensimmäiset mittalinjat ovat suojattu, joka merkitsee sitä, ettei niissä tapahdu enää normaalia kulumista. Suojan rikkoutuessa, siitä täytyy poistaa suojalevy ja suorittaa mittaus uudelleen. Niissä kohdissa, joissa on vielä suojaamattomia putkia selviää, että kolmen vuoden aikana maksimi kulutus on ollut 0,3 mm – 0,6 mm. Nämä arvot ovat (kuvio 9) putkista nro. 11, 13, 43, 66 ja 71. Näiden perusteella voidaan ennustaa, että maksimi kulumisella laskettuna putkiston tulisi kestää 6 vuotta eteenpäin. Olettaen, että putkiston kulumismaksimi on laskentamitta-arvo (2,48 mm).

## LÄHTEET, LIITTEET

/1/ Tampereen Sähkölaitos Oy:n Internet sivut. ”yrityksestä” – välilehti. Viitattu 3.10.2012.

/2/ Tampereen Sähkölaitoksen vuosiraportti 2011.

/3/ Koskinen, J. 1999. Kvaerner Pulping Power Division. Kattilan muuttaminen kerosleijukattilaksi –koulutuskansio.

/4/ Huhtinen, M. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Opetushallitus.

/5/ Huhtinen, M. 2004. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Opetushallitus, EDITA.

/6/ Metson tutkimuspöytäkirja.

/7/ Lukkari, J. 1999. KUNNOSSAPITO – lehti. erikoisliite n:o50, 5/99.

/8/ Naistenlahden painelaitteiden PI -kaaviokansio.

/9/ Latvala, K. 2012. Inspecta yrityksen asiantuntija Tampereella.

/10/ Raiko, R. 1997. Höyrytekniikka Thermal Power Plants I. Luentomateriaali.

/11/ Luukkanen, M. 2003. Lämpöpintojen puhdistus ja korroosio Kainuun Voima Oy:n kiertopetikattilassa. Opinnäytetyö. Kajaanin AMK. Viitattu 30.10.2012

