

# Behovsstyrd sotblåsning i avfallspannor

Fredrik Niklasson

Kent Davidsson



# **Behovsstyrd sotblåsning i avfallspannor**

## **Intelligent sootblowing in waste fired boilers**

Fredrik Niklasson  
Kent Davidsson

Projektnummer WR-10

**WASTE REFINERY**  
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut  
Box 857, 501 15 Borås  
**[www.wasterefinery.se](http://www.wasterefinery.se)**  
[wasterefinery@sp.se](mailto:wasterefinery@sp.se)  
ISSN 1654-4706



## Förord

Föreliggande rapport visar resultat från Ryaverket i Borås. Dessa experiment hade inte varit möjliga utan insatser från ett antal personer. Projektledaren riktar ett stort tack till driftpersonalen från Dalkia, där Anders Gunnarsson varit kontaktperson och Joakim Norberg skött programmeringen i Cactus. Göran Gustafsson på Borås Energi och Miljö AB har tagit hand om installation av nya temperaturgivare. Ett varmt tack även till andra i projektgruppen för diskussioner och stöd:

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| Anders Victorén | Metso Power            |
| Julia Fredäng   | Dalkia                 |
| Anders Johnsson | Borås Energi och miljö |
| Peter Lundblad  | Renova                 |



## Sammanfattning

Ökad användning av retur- och avfallsbränslen samt alternativa biobränslen har medfört att många anläggningar fått problem med beläggningar och korrosion på värmeöverförande ytor. Å ena sidan ger kraftig sotning rena ytor med höga värmeöverföringstal, men å andra sidan kan erosion ge upphov till ett ökat materialslitage. Behovsstyrd sotblåsning innebär att varje individuellt tubpaket bara sotblåses när det är motiverat för att avlägsna beläggningar på just dessa tuber. Ett dylikt behovsanpassat system förutsätter att det går att detektera graden av beläggningsbildning på de olika tubpaketen.

I detta projekt undersöks förutsättningarna för ett behovsstyrt sotblåsningssystem i avfallspannorna i Borås genom att studera uppmätta flöden, temperaturer och tryckfall relaterat till sotblåsningsintervaller. Nya kompletterande temperaturgivare har installerats för att mäta vattentemperaturen mellan och efter tubbankarna i ekonomisern. Givarna har anslutits till befintligt logg- och styrsystem. Från dess mätningar beräknas värmegenomgångstal vars variationer över tiden beror på beläggningstillväxten på tuberna. En tryckgivare har dessutom ändrats så att den för dessa försök mäter tryckfallet över kokyten.

För de två överhettarna visar mätningarna en tydlig uppgång av värmegenomgångstalen efter sotblåsningarna. Därefter faller värmegenomgångstalen ganska kraftigt under några timmar innan de börjar avta mer långsamt och närmast linjärt. Mätningarna tyder på att de båda överhettarna har ungefär samma beläggningstillväxt och resultaten motiverar inte individuella sotblåsningar av de två överhettarna.

Uppmätt tryckfall över kokyten visade sig vara en alltför okänslig indikator på försmutsning för att användas till att styra sotblåsning över detta tubpaket i denna specifika anläggning.

I ekonomisern visade värmegenomgångstalen hur snabbt olika paket försmutsas. Det framkom att de översta tubpaketen, som först möter rökgasen, generellt har betydligt snabbare beläggningstillväxt än nedströms paket. Försök med att riktat sotblåsa det översta tubpaket oftare än de efterföljande ökade värmegenomgångstalet för detta paket, men samtidigt ökade beläggningstillväxten för nedströms paket, antagligen beroende på att en del av den bortblåsta beläggningen fastnar på tuber nedströms. Att sotblåsa det översta paketet oftare än övriga jämnar ut beläggningarna i ekonomisern, men sker på bekostnad av ökat erosionsslitage på det översta tubpaketet.

De beräknade värmegenomgångstalen skulle kunna användas för att styra sotblåsningsssekvenser under förutsättning att pannan går med jämn last och utan störningar. Försöken visade dock att de beräknade värmegenomgångstalen varierar kraftigt med laständringar och driftstörningar, vilket ett behovsanpassat sotblåsningssystem måste kunna ta hänsyn till. I sitt nuvarande skick kan värmegenomgångstalen användas av driftoperatörerna som ett hjälpmedel att studera beläggningstillväxten på tuberna i både långt och kort tidsperspektiv.

**Nyckelord:** Avfallsförbränning, Sotblåsning, Ångsotning, Värmegenomgångstal

## Summary

The increased use of alternative and waste fuels has resulted in an increased number of plants having trouble with fouling and corrosion on boiler banks and superheater tubes. Frequent sootblowing will keep the surfaces relatively clean, but on the other hand, it may erode the tube material. An intelligent sootblowing system will initiate sootblowings on individual tube banks only when needed for that specific tube bank. Such a system depends on the detection of the degree of fouling of specific tube banks.

In this project, the conditions for an intelligent sootblowing system at the waste fired boilers in Borås are investigated from measured flows, temperatures and pressure drop. New thermocouples at the water tubes between the banks of the economiser have been installed and connected to the control and monitoring system of the boiler. From measured temperatures and flows, heat transfer coefficients are calculated and used to detect the fouling on the heat exchangers. A pressure transducer has been altered to measure the pressure over the boiler bank.

At the superheaters, the measurements show a significant improvement of the heat transfer coefficients immediately following sootblowing. Thereafter, the heat transfer coefficients decline more slowly, almost linearly. The measurements indicate that the fouling rate is almost same for the two superheaters and do not motivate individual sootblowing sequences of the two superheaters.

The pressure drop over the boiler bank was found too insensitive a measure to be used as an indicator for an intelligent sootblowing system, at least in this specific boiler.

In the economiser, the decline of calculated heat transfer coefficients showed a relative rate of fouling on individual tube banks. The results show that the fouling rate is significantly higher in the top tube banks, which comes first in the direction of the flue gas, compared to downstream banks. Experiments by sootblowing the top tube bank more frequently than the others improved the performance for the specific bank, but at the same time, the fouling on the downstream banks increased, probably because particles released from the top tube bank stuck to downstream tubes. An increased sootblowing rate on the top tube bank thus evens out the distribution of dust between the tube banks, but it may also increase the erosion on the top tube bank.

The calculated heat transfer coefficients may be used as control parameters in an intelligent sootblowing system while the boiler operates without disturbances at a constant load. The tests, however, also showed that the heat transfer coefficients vary significantly with load changes and disturbances of boiler operation, which an intelligent sootblowing system must be able to handle. In its current condition, the routines added to the control and monitoring system of the boiler show the heat transfer coefficients on screen and may be used as a tool to monitor the fouling rate of different tube banks under both short and long periods.

**Key words:** Waste combustion, Sootblowing, Steam, Heat transfer coefficient



## Innehållsförteckning

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INLEDNING</b>                                           | <b>1</b>  |
| 1.1      | PROBLEMDISKUSSION                                          | 1         |
| 1.2      | PROBLEMFORMULERING OCH MÅL                                 | 1         |
| <b>2</b> | <b>BAKGRUND</b>                                            | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>MATERIAL OCH METODER</b>                                | <b>7</b>  |
| 3.1      | FÖRSÖKSANLÄGGNING                                          | 7         |
| <b>4</b> | <b>BERÄKNING AV VÄRMEGENOMGÅNGSTAL</b>                     | <b>12</b> |
| 4.1      | RÖKGASFLÖDE                                                | 12        |
| 4.2      | ENTALPIER FÖR VATTEN OCH ÅNGA                              | 14        |
| 4.3      | BALANS ÖVER SEKUNDÄRÖVERHETTAREN                           | 15        |
| 4.4      | BALANS ÖVER PRIMÄRÖVERHETTAREN                             | 15        |
| 4.5      | KOKYTA                                                     | 17        |
| 4.6      | EKONOMISER                                                 | 18        |
| 4.7      | NOMENKLATUR                                                | 18        |
| <b>5</b> | <b>RESULTAT</b>                                            | <b>20</b> |
| 5.1      | IMPLEMENTERING I CACTUS                                    | 20        |
| 5.2      | ÖVERHETTARE                                                | 21        |
| 5.3      | KOKYTA                                                     | 24        |
| 5.4      | EKONOMISER                                                 | 25        |
| 5.5      | LÅNGTIDSTRENDER                                            | 30        |
| <b>6</b> | <b>RESULTATANALYS</b>                                      | <b>34</b> |
| 6.1      | DISKUSSION AV RESULTAT                                     | 34        |
| 6.2      | OSÄKERHET I MÄTNING AV VATTENTEMPERATUR IN TILL EKONOMISER | 35        |
| 6.3      | EKONOMISK KALKYL                                           | 36        |
| <b>7</b> | <b>SLUTSATSER</b>                                          | <b>40</b> |
| <b>8</b> | <b>REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING</b>                     | <b>42</b> |
| <b>9</b> | <b>LITTERATURREFERENSER</b>                                | <b>43</b> |

## Bilagor

|          |                                         |
|----------|-----------------------------------------|
| <b>A</b> | <b>VÄRMEGENOMGÅNGSTAL I EKONOMISERN</b> |
|----------|-----------------------------------------|



# 1 Inledning

## 1.1 Problemdiskussion

I större pannor för kraft och värmeförsörjning tas värme upp från de heta rökgaserna till pannans vattensida i ett flertal tubpaket placerade i rökgasstråket efter förbränningsrummet. Med rökgasen följer även en hel del stoftpartiklar som fastnar på tubpaketen, varvid beläggningar bildas och växer med tiden. Dessa beläggningar ger upphov till försämrat värmeutbyte mellan pannans gas och vattensida, vilket medför en försämrad verkningsgrad för pannan. Om tuberna sitter tätt ger kraftiga stoftbeläggningar upphov till ökat tryckfall (och därmed fläktarbete) och kan i värsta fall leda till att rökgaskanalen sätts igen. Beläggningstillväxten motverkas vanligtvis med sotblåsning, oftast med överhettad ånga.

I dagsläget bestäms tidsintervallet mellan sotblåsningarna i avfallspannor antingen manuellt (erfarenhetsvärden) eller så kan sekvensen starta automatiskt vid ett tröskelvärde för till exempel rökgastemperatur eller tryckfall över konvektionsstråket. Vanligtvis sotblåses då alla tubpaketen under samma sekvens, även om vissa tubpaket inte skulle behöva rengöras.

Nackdelen med att sotblåsa för mycket är att ångan eroderar tuber och pannväggar, vilket bidragit till flera kostsamma driftstopp i avfallspannorna i Borås. En annan nackdel är att sotblåsning med ånga ger en energiförlust med den trycksatta överhettade ångan som sprutas in i rökgasstråket. Att sotblåsa onödigt mycket medför således en obefogad kostnad.

Det finns en del arbeten gjorda inom behovsstyrd sotblåsning, exempelvis en inventering av Anders Kjörk [1]. Där framgår att behovsstyrd sotblåsning används vid flertalet sodapannor i Sverige idag. Beläggningsbildningen i dessa pannor uppskattas från förändrad värmeöverföring, vilket används för att styra sotblåsningen. Kjörk påpekar dock att det styrsystem som används är specifikt utvecklat för sodapannor och deras relativt konstanta driftförhållanden. Föreliggande projekt syftar till att utvärdera om en liknande metod är tillämpbar för de mer varierande driftförhållanden som råder vid avfallsförbränningsanläggningar, såsom den i Borås. Där är det möjligt att på motsvarande sätt följa hur värmeöverföringen varierar med tiden för specifika tubpaket genom mätningar av in- och utgående vattentemperaturer. Även tryckfallet över tubbankarna (på gassidan) studeras då det kan påverkas av ökad beläggningsbildning.

En behovsstyrd sotning skulle kraftigt kunna reducera risken för onödigt slitage och oplanerade driftstopp samtidigt som pannverkningsgraden höjs.

## 1.2 Problemformulering och mål

Den övergripande målsättningen är att minska ångförbrukningen samt minska erosionsslitaget på tuber i överhettare, kokytor och ekonomiser i en avfallseldad panna genom att använda ett styrsystem med individuellt behovsanpassad sotblåsning.

Mer specifikt ska detta projekt utvärdera om uppmätta vatten- och ångtemperaturer och tryckfall vid överhettare och ekonomiser kan användas för att styra sotblåsning av individuella tubpaket.

Utvärderingen ger information om hur beläggingsbildningar fördelas mellan tubpaketen, vilket kan användas direkt genom att justera sotblåsningsintervallen manuellt. I förlängningen ger ett optimerat behovsanpassat styrsystem färre driftstopp och minskad energiförlust.

## 2 Bakgrund

I stort sett alla fasta bränslen som används för kraft och värmeproduktion innehåller en viss mängd obrännbara beståndsdelar som blir kvar som en askåterstod efter utbränning. I förbränningsanläggningen blir en del aska kvar i botten av eldstaden och följaktligen benämns bottenaska medan den så kallade flygaskan följer med gasflödet ut ur eldstaden. Till flygaskan hör även de partiklar som bildats av ämnen som förångats i de höga förbränningstemperaturerna men som senare kondenserat till små partiklar (oftast under en mikrometer). Fördelningen mellan botten- och flygaska beror både på bränslets egenskaper och på förbränningsanläggningens utformning. I storskaliga pannor för kraft och värmeproduktion tas en stor del av förbränningsvärmen upp från rökgasen i tubbankar placerade i rökgasstråket efter eldstaden. Flygaskor som följer med rökgasen kan fästa på dessa tubbankar genom olika processer (impaktion, diffusion och termofores). Allteftersom temperaturen sjunker med rökgasflödet förändras askans egenskaper, framförallt dess klibbighet och korrosivitet.

Generellt förvärras askans egenskaper med ökande temperatur. Om inte tubbankarna regelbundet rengörs (t.ex. med sotblåsning) så växer beläggningar av flygaska på tuberna. Detta kan efter hand leda till att gaskanalen blockeras eller att klumpar som bildats blir så stora och tunga att de lossnar av gravitationen varvid de kan skada underliggande tuber. Det finns dock exempel på halmeldade anläggningar i Danmark där man utformat överhettare för denna typ av självrening [2]. Beläggningarna som bildas från askan är isolerande och sänker värmeöverförestalen mellan rökgas och tubbankar. Dessutom är askans beståndsdelar ofta korrosiva vid höga temperaturer. Det är denna temperaturberoende korrosiva egenskap som begränsar vilka materialtemperaturer som är praktiskt användbara i tubpaketen, vilket i sin tur begränsar utgående ångtemperatur. Askor från olika bränslen uppvisar mycket olika egenskaper vad gäller partikelstorleksfördelning, smälttemperatur och korrosivitet. Till exempel är flygaskan från bituminösa kol avsevärt mindre korrosiva än askan från biobränslen och avfall. Korrosionsförloppet kan fördröjas genom att välja mer höglegerade material, men det kan fördyra tubpaketen avsevärt. Materialvalet blir ofta en avvägning mellan materialkostnad och uppskattad livslängd.

För att undvika problem med beläggningar så långt som möjligt så rengörs tubpaketen i förbränningsanläggningar regelbundet. Typiskt körs för biobränslen en stor sotblåsning varje dygn, där man sekventiellt sotblåser överhettare, kokytor och ekonomiser (eventuellt även luftförvärmare) yta för yta i rökgasflödets riktning. Därutöver körs vanligtvis ett mindre program några gånger per dygn där bara ekonomisern sotblåses. Vanligt är att sotblåsningarna är schemalagda, och att ekonomisern sotblåses om rökgastemperaturen tenderar att bli hög. Sotblåsningar kan ske med flera olika metoder som listas nedan. En förbränningsanläggning kan använda olika metoder för olika panndelar.

### Sotblåsningens syfte

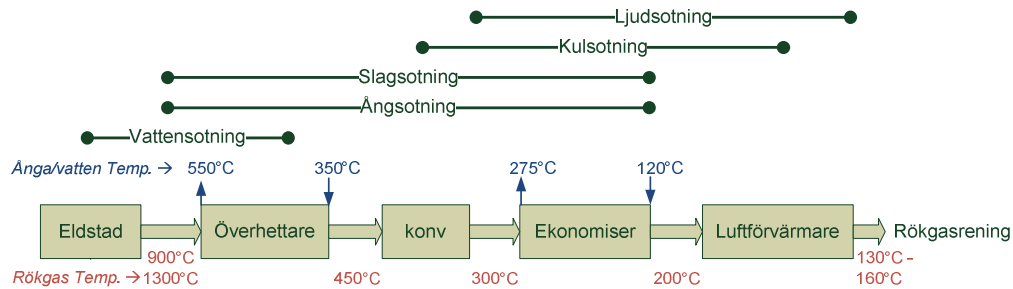
Ökad eldning av retur- och avfallsbränslen samt alternativa biobränslen (till exempel salix, rörflen, spannmål och halm) har medfört att många anläggningar fått problem med beläggningar och korrosion på värmeöverförande ytor. Dessa bränslen ställer höga krav på sotningen. Å ena sidan ger kraftig sotning rena ytor med höga värmeöverförestal, men

kan å andra sidan ge ett ökat materialslitage från erosion. Ångsotning ger även en förlust av högvärdig energi [3].

Sotningsmetoder och deras användningsområden illustreras i Figur 1. De vanligaste sotningsmetoderna är [2, 3]:

- Ångsotning, varvid ånga sprutas med högt tryck (10-30 bar) mot ytan som ska rengöras. Beläggningen bryts därmed upp mekaniskt. Kan också ge upphov till materialslitage, särskilt om det finns kondensat i ångan.
- Vattensotning, där vatten sprutas på ytorna. Detta ger högre anslagsenergi och effektivare rengöring, men också ett ökat materialslitage. Används främst på mycket hårda beläggningar som bildats vid hög temperatur i anslutning till eldstaden. I pannans senare delar används inte vattensotning under drift, till skillnad från vattendusch enligt nedan.
- Luftsotning, där luft används istället för ånga ger en lägre rengöringseffektivitet och kräver ett ansevärt tryck och flöde för att uppnå en acceptabel rengöring. En fördel är att eventuell erosion p.g.a. vattendroppar undviks.
- Vattendusch, där vatten sprayas med ett lågt tryck över hela tubbankar. Vattnet tränger in i hygroskopiska avlagringar där en snabb volymökning vid förångning ger sprickbildning i beläggningen som åtminstone delvis faller av. Denna metod lämpar sig enbart för vissa typer av beläggningar.
- Kulsotning, där renskolor eller clips av stål eller aluminium släpps ner över de ytor som ska sotas (främst i konvektionsdelar och ekonomiser). Metoden lämpar sig bäst för torra och hårda (spröda) beläggningar. Renskulorna samlas under draget och återförs till pannans toppen antingen pneumatiskt eller mekaniskt. Översta tubraderna kan slitas hårt om kulorna träffar dessa med hög energi, men det kan undvikas med tubskydd. Används oftast inte vid röksgastemperaturer över ca 550°C eftersom stålet i tuberna mjuknar över denna temperatur.
- Slag- och sprängsotning ger upphov till mindre materialavverkning än ång- och luftsotning. Vid slag- och sprängsotning lossnar beläggningen från ytan genom att ett brott uppstår mellan beläggning och värmeöverförande yta då accelerationskraften från tillslaget är större än vidhäftningskraften. De återkommande vibrationerna kan dock leda till materialutmattning och eventuellt sprickor i murverk. Slagsotning används för eldstadsvägar, skärmar och hängande paket. Sprängsotning används mest som ett komplement till övrig sotning och används i de flesta fall ett fåtal gånger per eldningssäsong för att ta bort beläggningar som inte lossnar med konventionella metoder.
- Ljudsotning, där tryckluft används för att skapa ljudvågor vid ytorna som ska rengöras, fungerar bäst för torra och lösa beläggningar, och är en relativt billig metod. Hörbart ljud och infraljud används.  
Vid hörbart ljud (små ljudsotare) anpassas ljudets frekvens till egenfrekvensen hos beläggningens partiklar. Det ger begränsad räckvidd och kräver flera ljudsotare.  
Vid infraljud (ca 20 Herz) anpassas ljudets frekvens efter egenfrekvensen hos gasen och gaskanalens geometri, varvid normalt endast en ljudsotare krävs.

Ångsotning är den vanligaste metoden. Den kan användas för de hårdare beläggningarna på överhettare med roterande utdragbara lansar och i ekonomisern med fasta roterande lansar eller ”krattor” med flera dysor.



Figur 1. Grov indelning av användningsområde för olika sotblåsningsmetoder. Typiska ång-, vatten- och gastemperaturer anges [3].

Figure 1. Coarse division of applicable areas for different sootblowing techniques. Typical temperatures of steam/water and flue gas are indicated [3].

## Styrning

Vanligtvis utförs sotblåsningen sekventiellt i rökgasflödets riktning eftersom sot som blåses bort från en tubbank riskerar att delvis fastna på nedströms tuber. Möjligtvis är en del värmeväxlare utformade eller placerade på ett sådant sätt att denna effekt är försumbar. Det är därför av intresse att få ett mått på hur stor värmeöverföringen är i olika tubpaket, och att studera förändringen över tiden. En studie över enskilda värmeöverföringstal kan ge viktig information om hur ångsotningssekvenser bäst bör utformas.

I vissa fall sker sotningssekvensen uppifrån och ned, trots att det kan vara motströms gasflödet. En sådan sekvens motiveras med att frigjorda avlagringar är så stora de faller nedåt, trots gasflödet, samt att risken minskar för att riktigt stora lossnande klumpar av askbeläggningar ska skada utdragbara sotblåsningslansar.

## Behovsstyrd sotblåsning

Behovsstyrd sotblåsning innebär att varje individuellt tubpaket bara sotblåses när det är motiverat för att avlägsna beläggningar på just dessa tuber. Ett dylikt behovsanpassat system förutsätter att det går att detektera graden av beläggningsbildning på de olika tubpaketen. Detta kan ske genom uppmätta flöden, temperaturer och tryckfall vid pannas olika delar [1]. Mätvärdena måste dock först behandlas, mer eller mindre avancerat, för att kunna uppskatta graden av försmutsning. Ett exempel på alternativ metod under utvärdering är att studera hur egenfrekvensen hos tuberna beror av beläggningen [4].

Från mätningar på pannans vattensida kan effektupptaget beräknas för de enskilda tubpaketen (förutom kokarytorna). Ett minskat effektupptag kan vara ett tecken på ökad beläggningsbildning, men kan också bero på ändrad last och rök Gastemperatur. Således måste även pannans drifttillstånd tas med i beräkningen. Det är inte heller trivialt att mäta höga rök Gastemperaturer på ett tillförlitligt sätt eftersom temperaturgivare påverkas av strålningsförluster mot kallare membranväggar och tubpaket. Dessutom kan givarna bli täckta av beläggningar, vilket påverkar mätningen. För att inte vara beroende av otillförlitliga mätvärden kan gastemperaturerna istället beräknas med hjälp av matematisk simulering av pannan. Att utforma en sådan simuleringsmodell är dock ett mycket större

arbete än vad som ryms inom föreliggande projekt. Här utgår vi istället från uppmätta temperaturer, men beräknar rökgasflödet utifrån uppmätt luftflöde, rökgasåterföring och syrekonzentration i rökgasen. Eftersom gastemperaturen inte mäts mellan tubpaketen beräknas dessa mellanliggande gastemperaturer utifrån upptagen värme i respektive tubpaket och uppmätta temperaturer före och efter hela ekonomisern.

Om ett automatiskt system appliceras utgående från beräknade individuella värmegenomgångstal så bör ett sådant system ha en viss inbyggd felhantering, exempelvis:

- Sotningssekvens bör initieras efter en viss förbestämd tid även om systemet inte har triggats automatiskt
- Automatiken måste kunna stängas av ifall den initierar för täta sotningar
- Ge möjlighet till manuell sotning som initieras av operatörerna

Avfallsförbränning ger upphov till större askpartiklar än exempelvis träbränslen. Dessa större partiklar ökar risken för erosionsskador vid ångsotning då de dras med av sotångflödet och träffar tubmaterialet med hög hastighet. Det är därför extra viktigt att inte sota för mycket i denna typ av pannor. Ångsotning medför dessutom generellt en kostnad för beredning av matarvatten och bortfall av ångproduktion. Vinsten från sotningen är att rena tubpaket kan ge ett större elutbyte, mindre tryckfall på gassidan och dessutom undviks tjocka beläggningar som kan blockera gasflödet eller falla ned och skada underliggande tubbankar.

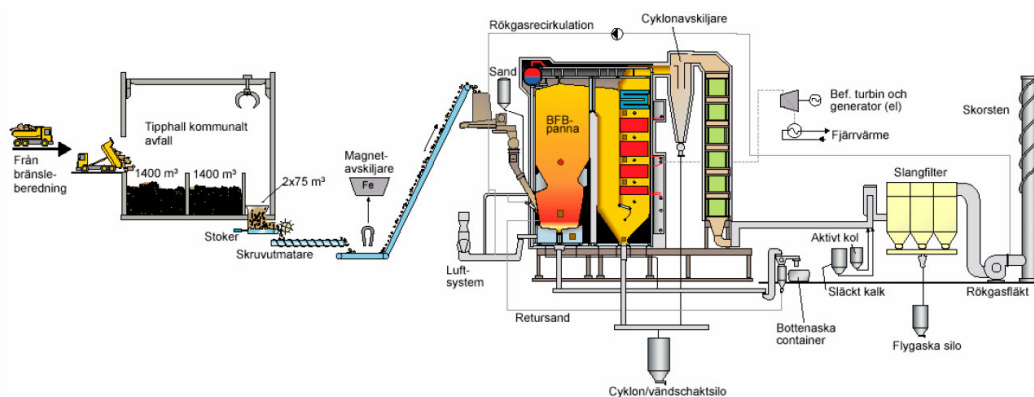


### 3 Material och metoder

Utvärderingen baseras på mätningar av temperaturer, tryckfall och flöden under drift av avfalls pannorna i Borås. Nya kompletterande temperaturgivare (5 st. Pt100) har installerats för att mäta vattentemperaturen mellan och efter tubbankarna i ekonomisern. Givarna har anslutits till befintligt logg och styrsystem. En tryckgivare har dessutom ändrats så den för dessa försök mäter tryckfallet endast över kokyten. Värmeupptaget beräknas från temperaturgivare på vattensidan före respektive efter tubpaket i överhettare och ekonomiser. Genom att studera uppkomna temperaturvariationer relaterat till sotblåsningsintervallerna utvärderas förutsättningarna för ett behovsstyrt sotblåsningssystem.

#### 3.1 Försöksanläggning

På Ryaverket i Borås finns två avfallseldade bubblande fluidiserade bäddpannor på vardera ca 20 MW<sub>t</sub> med ångdata 50 bar och 405°C, se Figur 2. Pannorna levererades av Metso Power AB och togs i drift 2005.



Figur 2. Schematisk bild över en av de två 20 MW<sub>t</sub> avfallsförbränningspannorna.

Figure 2. Sketch of one of two 20 MW<sub>th</sub> waste incinerators used for the experiments.

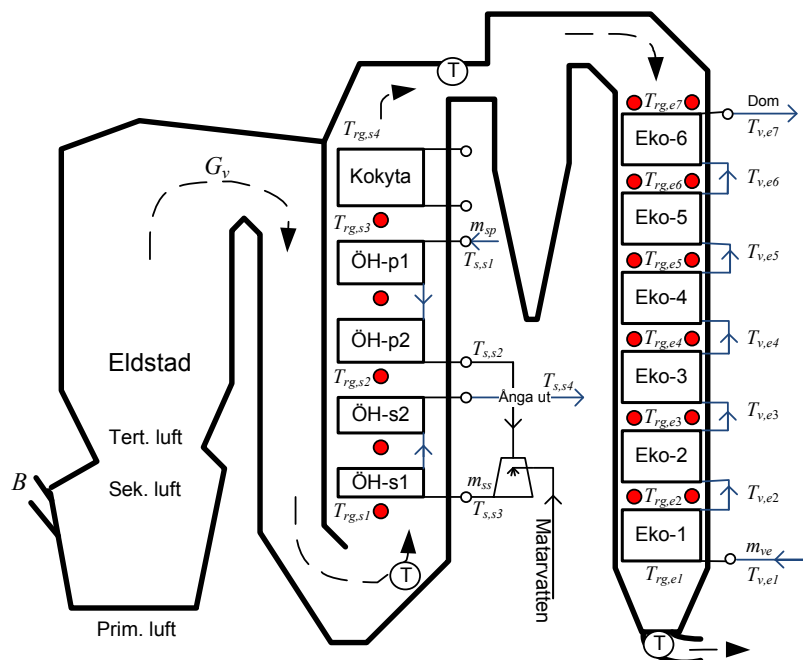
Bränslet som eldas är vanligtvis en blandning av 70 % verksamhetsavfall och 30 % hushållsavfall. Bränslet bereds på Sobacken utanför staden och transporteras med lastbilar till en tippbänk vid Ryaverket. Från tippbänken förs bränslet till två matarfickor med hjälp av en stor gripklo. Bränslet transporteras från matarfickornas botten med skruvar och band (via en magnetavskiljare) in till bränsledoserare i pannhuset. Där doseras bränslet in till pannorna med Metsos s.k. Feeding Master som är en volymdoserutrustning med bl.a. avrivarvals för att åstadkomma ett jämnt bränsleflöde. Bränslet faller ned i eldstaden via en cellmatare som ska förhindra bakåttbrand. Varje panna har en bränsleinmatning. Eftersom det är ett inhomogent bränsle som kräver ansenlig hantering inträffar ibland störningar i bränsletillförseln. För att upprätthålla produktionen (och avfallsdirektivets krav 850°C/2 s) även under sådana störningar är pannorna försedda med varsin oljeeldad stödbrännare på 12 MW. I luftlådan finns även en startbrännare på 6 MW.

Förbränningsluften som tas från tipphallen (och eventuellt från pannhuset) transporteras via en totalluftfläkt genom två luftförvärmare varefter flödet delas upp mellan primärluft och överluft, där det senare flödet fördelas mellan sekundär-, tertiär- och tvärluft. Primärluften går via en luftlåda under eldstaden in i eldstaden genom ett stort antal dysor i pannbotten. Vid bäddtemperaturer över 870°C börjar temperaturen regleras med hjälp av rökgasåterföring som blandas in med primärluften under dysbotten. Över bädden finns en förträngning av eldstadens främre och bakre väggar (s.k. näsor) ifrån vilka sekundär och tertiärluft tillförs. Ovanför dessa tillförs även tvärluft från pannans sidoväggar. Ammoniak sprutas in i eldstadens övre del för att minska emissionerna av NO<sub>x</sub>.

Rökgasen går ut från eldstadens övre del genom en öppning i bakväggen och vänder ned igenom ett tomdrag innan flödet vänder uppåt genom ett bakre drag där sekundär- och primäröverhettare är placerade, följda av en kokyta, se Figur 3. Gasen har en temperatur av ca 350 °C när den passerar cyklonen uppströms de sex tubpaketen i ekonomisern där gasen kyls ned emot 150 °C. Slutligen följer ett system för rökgasrening innan gasen går ut genom skorsten via rökgasfläkten.

En del av rökgasen återförs till eldstaden med en separat rökgasåterföringsfläkt. Detta flöde reglerar förbränningstemperaturen. Grova askpartiklar och annat obrännbart material matas ut tillsammans med bäddmaterial via ett vertikalt vattenkylt utlopp centralt beläget i eldstadens botten. Det grova materialet lämnar anläggningen som bottenaska medan det fina materialet transporteras till en behållare för retursand, gemensam för bägge pannorna, varifrån materialet återförs till pannorna. Ny sand tillförs regelbundet från en gemensam sandsilo för att upprätthålla bäddhöjden och omsätta bäddmaterialet.

Matarvattnet trycksätts mot ångpannan med matarvattenpumpar. Matarvattnet kyls i luftförvärmaren uppströms ekonomisern. Vatten leds från ångdomens botten ned genom falltuber till fördelningsrör i pannans botten. Från de nedre fördelningsrören går vattnet upp genom väggtuberna där vattnet successivt förångas. Den densitetsskillnad som uppkommer driver vattnet mot de övre samlingslådorna där ånga separeras från vätska innan de återförs till domen på olika nivåer. Den producerade ångan lämnar pannan via primär- och sekundäröverhettare placerade i bakre rökgasdraget. Matarvatten sprutas in i ångflödet mellan överhettarna för att hålla konstant utgående ångtemperatur.



Figur 3. Skiss över pannan och tubpaket i rökgasstråket. Sotblåsare markerade med röda cirklar.

Figure 3. Sketch over boiler and heat transfer tube bundles. Sootblowers marked by red circles.

Ett foto av ovansidan av sekundäröverhettaren visas i Figur 4, efter det att nya tubskydd satts på plats för att motverka erosionsskador på tubmaterialet från ångsotningen. Innan fotot togs hade pannan rengjorts manuellt, men trots det syns spår av hårda beläggningar på tubernas undersida (mot rökgasflödet). Motsvarande foto från ovansidan av primäröverhettaren visas i Figur 5 och en bild ned genom kokytan visas i Figur 6. Ovanpå kokytan finns ingen sotblåsningslans och därför behövs inga tubskydd. Det syns tydliga spår av beläggningsskal på tuberna i kokytan även efter den manuella rengöringen. Figur 7 visar en fast installerad sotlans mellan två paket i ekonomisern (mellan varje paket finns två lansar installerade). Under revisionen som genomfördes i oktober 2008 behövde ett antal tubrader (överst och underst i paketen) bytas i ekonomiserns tre övre tubpaket, vilket tyder på betydande erosion från ångsotningen. Inne i tubpaketen fanns en del beläggningar kvar även efter den manuella renspolningen.



*Figur 4. Tuber på ovansidan av sekundäröverhettaren, tuberna manuellt rensade och nyligen monterade tubskydd.*

*Figure 4. Tubes on the top of the secondary superheater, after that the tubes have been manually washed and tube shields recently mounted.*



*Figur 5. Tuber på ovansidan av primäröverhettaren, tuberna manuellt rensade och nyligen monterade tubskydd.*

*Figure 5. Tubes on the top of the primary superheater, after that the tubes have been manually washed and tube shields recently mounted.*



*Figur 6. Tuber på ovansidan av kokytan, tuberna manuellt rensade.*

*Figure 6. Tubes on the top of the boiler bank, after that the tubes have been manually washed.*



*Figur 7. Fast monterad sotblåsningslans mellan två tubpaket i ekonomisern. Nyligen utbytta översta tubrader i underliggande tubpaket.*

*Figure 7. Permanently installed sootblowing lance between two tube banks in the economiser. The tubes on top of the below tube bank have recently been replaced.*

## 4 Beräkning av värmegenomgångstal

Rökgastemperaturerna mäts inte före och efter alla enskilda tubpaket i rökgasstråket, men för att kunna beräkna tubpaketens värmegenomgångstal behövs dessa temperaturer. Därför beräknas mellanliggande rökgastemperaturer utifrån en uppmätt gastemperatur och en energibalans för varje enskilt tubpaket som rökgasen passerar. För att relatera rökgasens temperaturfall med effekt måste även rökgasflödet och dess värmekapacitet beräknas.

### 4.1 Rökgasflöde

Det totala rökgasflödet ( $G_v$ ) ges av bränsleflöde ( $Br$ ) och gasflöde ( $g_v$ ) per massenhet bränsle enligt

$$G_v = Br \cdot g_v \quad (1)$$

Motsvarande luftflöde ( $L_v$ ) in till pannan blir då

$$L_v = Br \cdot l_v = Br \cdot m \cdot l_0 \quad (2)$$

Där  $l_v$  är verkligt luftbehov per massenhet bränsle,  $m$  är luftfaktorn och  $l_0$  är det stökiometriska luftbehovet per massenhet bränsle. Dessa ekvationer ger att rökgasflödet relateras till luftflödet som

$$G_v = \frac{g_v}{l_0 m} L_v \quad (3)$$

Detta kan utnyttjas här eftersom luftflödet mäts och loggas (till skillnad mot rökgasflödet). Det specifika rökgasflödet  $g_v$  (våt gas) ges av det stökiometriska rökgasflödet  $g_{0v}$  genom sambandet

$$g_v = g_{0v} + (m-1)l_0 \quad (4)$$

Där  $g_{0v}$  och  $l_0$  beräknas från bränsleanalyser medan luftfaktorn måste beräknas från uppmätta gaskoncentrationer i rökgasen. Eftersom pannans styrsystem använder uppmätt syrekoncentration på våt gas så är det praktiskt att basera beräkningen av luftfaktorn på samma mätning enligt

$$m = 1 + \frac{g_{0t}}{l_{0t}} \frac{C_{O_{2t}}}{21 - C_{O_{2t}}} = 1 + \frac{g_{0t}}{l_{0t}} \frac{C_{O_2}}{21 \left( 1 - \frac{C_{H_2O}}{100} \right) - C_{O_2}} \quad (5)$$

Där  $C_{O_2}$  och  $C_{H_2O}$  är volymkoncentrationerna av syre respektive vattenånga i rökgasen. Ekvationer (3) till (5) ger att rökgasflödet kan beräknas ifrån det uppmätta luftflödet  $L_v$  som

$$G_v = \frac{g_v}{l_0 m} L_v = \frac{g_{0v} + (m-1)l_0}{l_0 m} L_v = \left( \frac{1}{m} \left( \frac{g_{0v}}{l_0} - 1 \right) + 1 \right) L_v \quad (6)$$



I ekvation (6) används uppmätta (tidsvariabla) värden på  $L_v$  medan konstanta värden på  $g_{0v}$  och  $l_0$  beräknas utifrån en bränsleanalys. Nedan används medelvärden från ett antal tagna bränsleprover återgivna i Tabell 1. Luftfaktorn  $m$  beräknas från uppmätt  $O_2$  och konstanta värden på  $g_{0v}/l_0$ . Tidsvariabla mätvärden kan användas även för fukthalten i gasen,  $C_{H_2O}$ , men för att erhålla en stabilare algoritm används ett medelvärde till att börja med. Tabell 1 nedan visar ungefärliga spann för bränsleanalyser tagna vid Boråsplantorna. Dessa värden användes för att beräkna stökiometriska gasflöden i Tabell 2.

Tabell 1. Spann för sju tidigare bränsleanalyser från Boråsplantorna.

Table 1. Range of seven analyzed fuel samples from the Borås plant.

|                                   | Min   | Medel | Max   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| Effektivt värmevärde [MJ/kg]      | 9,38  | 10,94 | 12,06 |
| Fukthalt [vikt %, som mottaget]   | 28,40 | 33,64 | 42,10 |
| C [vikt %, torrt prov]            | 43,10 | 45,09 | 46,60 |
| H [vikt %, torrt prov]            | 5,40  | 5,83  | 6,00  |
| N [vikt %, torrt prov]            | 0,71  | 1,02  | 1,20  |
| Cl [vikt %, torrt prov]           | 0,31  | 0,66  | 1,26  |
| S [vikt %, torrt prov]            | 0,27  | 0,42  | 0,60  |
| O (by diff.) [vikt %, torrt prov] | 26,56 | 29,62 | 32,61 |
| Aska [vikt %, torrt prov]         | 14,10 | 17,34 | 22,60 |

Tabell 2. Specifika gas- och luftflöden utgående från Tabell 1.

Table 2. Specific gas and air flows calculated from values in Table 1.

|                     | Min  | Medel | Max  |
|---------------------|------|-------|------|
| $l_{0t}$ [mol/kgBr] | 121  | 135   | 145  |
| $g_{0t}$ [mol/kgBr] | 118  | 132   | 141  |
| $g_{0v}$ [mol/kgBr] | 159  | 170   | 179  |
| $C_{H_2O}$ [vol.-%] | 20,6 | 22,3  | 25,6 |
| $g_{0v}/l_0$        | 1,23 | 1,26  | 1,31 |
| $g_{0t}/l_0$        | 0,97 | 0,98  | 0,98 |

Medelvärden från Tabell 2 ger att uttrycket för luftfaktor och gasflöde kan förenklas till

$$m = 1 + 0.98 \frac{C_{O_2}}{17.8 - C_{O_2}} \quad (7)$$

$$G_v = \left( \frac{0.26}{m} + 1 \right) L_v \quad (8)$$

Eftersom även flödet från rökgasåterföringen ( $R_v$ ) strömmar förbi överhettare, kokyta och ekonomiser ska det adderas vid beräkning av gasflödet.

$$G_v = \left( \frac{0.26}{m} + 1 \right) L_v + R_v \quad (9)$$

Det återförda gasflödet mäts och loggas av styrsystemet och behöver inte beräknas.

Driftdata från december 2007 visade i medeltal en uppmätt syrekoncentration på ca 6 % (våt gas) vilket blir ca 7 % i torr gas och motsvarar en luftfaktor ( $m$ ) på 1,49. Utgående från medelanalysen av bränslet ger det en volymbaserad rökgassammansättning av de största beståndsdelarna enligt Tabell 3.

Tabell 3. Typisk rökgassammansättning.

Table 3. Typical flue gas composition.

| Gas              | Volymandel |
|------------------|------------|
| CO <sub>2</sub>  | 0,11       |
| H <sub>2</sub> O | 0,16       |
| N <sub>2</sub>   | 0,67       |
| O <sub>2</sub>   | 0,06       |

Utgående från rökgassammansättningen i Tabell 3 uppskattas den specifika värmekapaciteten  $c_{p,rg}$  för rökgasen som

$$c_{p,rg} = 1.339 + 3.708 \cdot 10^{-4} T \quad [\text{kJ/Nm}^3] \quad (10)$$

Där  $T$  är rökgastemperatur i °C och  $c_{p,rg}$  ges i kJ/Nm<sup>3</sup> eftersom gasflödena anges i normalkubikmeter i loggsystemet. Vid rökgastemperaturer under 800°C ger lineariseringen av  $c_p$  endast små fel. Värmekapaciteten för rökgasen ändras också med sammansättningen (luftöverskott och bränslesammansättning), men sådana variationer negligeras tillsvidare då de påverkar beräkningsresultaten relativt lite samtidigt som det skulle krävas betydligt utförligare beräkningsrutiner för att ta hänsyn till sådana variationer.

## 4.2 Entalpier för vatten och ånga

Eftersom temperaturerna på vattensidan mäts och inte behöver beräknas används entalpier istället för värmekapacitet vid beräkning av upptagen värme i pannans olika delar. För ekonomisern används vattens entalpi enligt

$$h_v = 1.119 \cdot 10^{-3} T^2 + 4.004 T + 6.267 + 0.07313 p_s \quad [\text{kJ/kg}] \quad (11)$$

Där  $T$  ges i °C och  $p_s$  är vattentrycket i bar, relativt atmosfärstryck. Detta uttryck ger fel under 1 % vid vattentemperaturer från 20°C upp till förångningstemperaturen (här ca 260°C). För överhettarna uppskattas vattenångans entalpi med uttrycket

$$h_s = 4.19 \left( 0.495 T + 585.5 - \frac{83.6545 p_s}{\left( \frac{T + 273.16}{100} \right)^{2.82}} - \frac{1.624075 \cdot 10^{-3} p_s^3}{\left( \frac{T + 273.16}{100} \right)^{14}} \right) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12)$$

vilket ger en uppskattning med fel mindre än 1 % så länge man inte kommer för nära mättnadstemperaturen.



### 4.3 Balans över sekundäröverhettaren

Den första överhettaren i rökgasflödets riktning är sekundäröverhettaren och där används värden från givare i vändschakt som ingående gastemperatur ( $T_{rg,s1}$ ). För efterföljande primäröverhettare beräknas gastemperaturen med hjälp av upptagen värme i sekundäröverhettaren. Värmeupptag till ånga i sekundäröverhettaren ( $P_{SHS}$ ) beräknas enligt

$$P_{SHS} = m_{ss} (h_s(p_s, T_{s,s4}) - h_s(p_s, T_{s,s3})) \quad (13)$$

där  $m_{ss}$  är det uppmätta ångflödet,  $h_s$  ångans entalpi som beräknas med Ekvation (12). Ångtrycket i överhettaren ( $p_s$ ) approximeras med domtrycket ( $p_{dom}$ ) medan ingående och utgående ångtemperaturer  $T_{s,s3}$  och  $T_{s,s4}$  är mätvärden. Rökgastemperatur efter sekundäröverhettaren ( $T_{rg,s2}$ ) beräknas med hjälp av en värmebalans där avgiven värme från rökgasen sätts lika med upptagen värme till ångan enligt

$$P_{SHS} = G_v \bar{c}_{p,rg} (T_{rg,s1} - T_{rg,s2}) \quad (14)$$

vilket ger

$$T_{rg,s2} = T_{rg,s1} - \frac{P_{SHS}}{G_v \bar{c}_{p,rg}} \quad (15)$$

där egentligen medelvärdet för gastemperaturen i överhettaren borde användas vid beräkning av  $c_{p,rg}$ . Men för att underlätta beräkningsgången används temperaturen för ingående rökgas vid beräkning av värmekapaciteten. Detta ger ett fel på uppskattningsvis 1 %, vilket är måttligt i förhållande till övriga osäkerheter. Då felet dessutom är systematiskt påverkar det inte utvärderingen. Från uppmätta och beräknade temperaturer beräknas ett effektivt värmegenomgångstal  $UA$  (sekundäröverhettarens funktion approximeras med en medströms kopplad värmeväxlare)

$$UA_{SHS} = P_{SHS} \frac{\ln \left[ (T_{rg,s1} - T_{s,s3}) / (T_{rg,s2} - T_{s,s4}) \right]}{(T_{rg,s1} - T_{s,s3}) - (T_{rg,s2} - T_{s,s4})} \left( \frac{T_{rg,ref}}{T_{rg,s1}} \right)^{0.5} \left( \frac{G_{v,ref}}{G_v} \right)^{0.8} \quad (16)$$

Där de två sista faktorerna kompenserar för variationer i gastemperatur och gasflöde som kan ske vid till exempel laständringar, från referens [5]. Som referensvärden används här  $T_{rg,ref} = 570^\circ\text{C}$  och  $G_{v,ref} = 13,5 \text{ Nm}^3/\text{s}$ .

### 4.4 Balans över primäröverhettaren

Ingående ångtemperatur beräknas som mättnadstemperatur vid aktuellt domtryck ( $p_s$ ). Domtrycket ges relativt omgivningen och 1 bar läggs därmed till för att erhålla absoluttrycket från vilket mättnadstemperaturen ( $T_{s,s1}$ ) beräknas enligt

$$T_{s,s1} = 104,4 (p_s + 1)^{0.237} \quad (17)$$

Den mättade ångans entalpi uppskattas med

$$h_{s,sat} = 0.000384p_s^3 - 0.0706p_s^2 + 3.359p_s + 2755.5 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (18)$$

Varefter värmeupptaget till ångan i primäröverhettaren ges av

$$P_{SHP} = m_{sp} (h_s(p_s, T_{s,s2}) - h_{s,sat}(p_s)) \quad (19)$$

Flödet av ånga efter sekundäröverhettaren ( $m_{ss}$ ) mäts kontinuerligt, men inte flödet genom primäröverhettaren ( $m_{sp}$ ) som är mindre eftersom matarvatten sprutas in mellan primär- och sekundäröverhettaren för att styra utgående ångtemperatur. Inte heller det insprutande matarvattenflödet mäts. Däremot mäts temperaturen efter primäröverhettaren ( $T_{s,s2}$ ), matarvattentemperaturen ( $T_{Mava}$ ) och temperaturen före sekundäröverhettaren ( $T_{s,s3}$ ), se Figur 3. Från dessa temperaturer och ångflödet genom sekundäröverhettaren beräknas flödet genom primäröverhettaren med en kombinerad mass- och värmebalans enligt

$$m_{sp} = \frac{h_s(p, T_{s,s3}) - h_v(T_{Mava})}{h_s(p, T_{s,s2}) - h_v(T_{Mava})} m_{ss} \quad (20)$$

Rökgastemperatur efter primäröverhettaren ( $T_{rg,s3}$ ) kan beräknas med värmebalans på samma sätt som vid sekundäröverhettaren:

$$P_{SHP} = G_v \bar{c}_{p,rg} (T_{rg,s2} - T_{rg,s3}) \quad (21)$$

och

$$T_{rg,s3} = T_{rg,s2} - \frac{P_{SHP}}{G_v \bar{c}_{p,rg}} \quad (22)$$

Precis som för sekundäröverhettaren borde egentligen ett medelvärde för gastemperaturen användas vid beräkning av  $c_{p,rg}$ . Men för att underlätta beräkningsgången används temperaturen för ingående rökgas. Från framtagna temperaturer och effektupptag beräknas värmegenomgångstal  $UA$  med (primäröverhettarens värmeväxlare är kopplad motströms)

$$UA_{SHP} = P_{SHP} \frac{\ln \left[ \frac{(T_{rg,s3} - T_{s,s1}) / (T_{rg,s2} - T_{s,s2})}{(T_{rg,s3} - T_{s,s1}) - (T_{rg,s2} - T_{s,s2})} \right] \left( \frac{T_{rg,ref}}{T_{rg}} \right)^{0.5} \left( \frac{G_{v,ref}}{G_v} \right)^{0.8}}{\quad} \quad (23)$$

Som referensvärden används här  $T_{rg,ref} = 520^\circ\text{C}$  och  $G_{v,ref} = 13,5 \text{ Nm}^3/\text{s}$ .

## 4.5 Kokyta

För kokytan mäts varken vattenflöde in eller ångflöde ut. En metod som Metso använder för sodapannor bygger istället på mätningar av gassidans tryckfallsförändringar över kokyterna. Metoden bygger på det faktum att dragkraften från en fluid på en fast kropp ökar med arean hos den fasta kroppen. I det här fallet ökar arean ifall betydande beläggningar börjar byggas upp på kokytan. Kraften av en strömmande fluid på en fast kropp kan beräknas utifrån

$$F_{drag} = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A_c \quad (24)$$

Där  $C_D$  är dragkoefficienten,  $\rho$  gasens densitet,  $v$  gasens fria strömningshastighet och  $A_c$  den karaktäristiska arean för kroppen. I det här fallet kan gasens strömningshastighet beräknas från rökgasflödet  $G_v$ , som i sin tur beräknats enligt ovan, och rökgaskanalens fria tvärsnittsarea  $A_T$  enligt

$$v = \frac{G_v}{A_T} \frac{273 + T_{rg}}{273} \quad (25)$$

Densiteten för gasen beräknas från en typisk gassammansättning som korrigeras för aktuell rökgastemperatur (typiskt  $\rho_0 = 1.25 \text{ kg/Nm}^3$ )

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + T_{rg}} \quad (26)$$

Gasdensiteten beror givetvis även på gasens absoluttryck, men eftersom tryckvariationerna är relativt små har denna term försummats här. Sammantaget ger detta att kraften ovan beskrivs med ett samband av typen

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \underbrace{C_D \rho_0 A_c}_{k_d'} \frac{273 + T_{rg}}{273} G_v^2 \quad (27)$$

Eftersom kokytan består av ett antal tuber per tvärsnittyta i rökgasstråket så ger dragkraften på tuberna upphov till ett tryckfall i rökgaskanalen som är proportionellt mot dragkraften per tub. Detta leder till att tryckfallet i rökgaskanalen är proportionellt mot koefficienten  $k_d'$  som kommer att öka vid beläggningstillväxt på ytorna. Det är osäkert om tryckfallsökningen från ökande beläggning blir tillräckligt stor för att kunna användas som indikator. Den parameter som studeras beräknas från loggade parametrar enligt

$$k_d = \frac{dP_{ks}}{(273 + T_{rg}) G_v^2} \quad (28)$$

( $k_d$  här är inte exakt samma som  $k_d'$  i ekvationen ovanför, men de är proportionella mot varandra). Här används loggade värden från tryckgivare för  $dP_{ks}$  och den uppmätta rökgastemperaturen efter kokytan ger  $T_{rg}$ .

## 4.6 Ekonomiser

Ekonomisern består av sex stycken tubpaket vilka här behandlas som motströms värmeväxlare. Tubpaketen numreras (index  $i$ ) från 1 till 6 räknat i vattenflödets riktning (motströms rökgasflödet). Ekonomiserns totala värmeupptag beräknas som

$$P_{v,etot} = m_{ve} (h_v(T_{v,e7}) - h_v(T_{v,e1})) \quad (29)$$

Där  $m_{v,e}$  är vattenflödet genom ekonomisern (samma genom alla tubpaket) och  $h_v$  är vattnets entalpi som beräknas enligt Ekvation (11). För tubpaket  $i$  beräknas värmeupptaget enligt

$$P_{v,ei} = m_{ve} (h_v(T_{v,e(i+1)}) - h_v(T_{v,ei})) \quad (30)$$

Där vattentemperaturerna  $T_{v,ei}$  mäts och loggas av styrsystemet. Rökgastemperaturerna mellan tubpaketen mäts inte men kan beräknas från ingående rökgastemperatur och upptagen värme i respektive tubpaket. Genom att anta konstant värmekapacitet för rökgasen genom hela ekonomisern kan temperaturerna mellan paketen uppskattas med

$$T_{rg,ei} = T_{rg,e(i+1)} - \frac{P_{v,ei}}{P_{v,etot}} (T_{rg,e7} - T_{rg,e1}) \quad (31)$$

för index  $1 < i < 6$  som här refererar till rökgastemperaturen efter paket  $i$  och  $T_{rg,e7}$  är rökgastemperaturen innan paket 6. Ekonomiserns paket är motströms värmeväxlare varvid värmegenomgångstalen kan beräknas som

$$UA_{ci} = P_{v,ei} \frac{\ln \left[ (T_{rg,ei} - T_{v,ei}) / (T_{rg,e(i+1)} - T_{v,e(i+1)}) \right]}{(T_{rg,ei} - T_{v,ei}) - (T_{rg,e(i+1)} - T_{v,e(i+1)})} \left( \frac{T_{rg,refl}}{T_{rg,ei}} \right)^{0.5} \left( \frac{G_{v,ref}}{G_v} \right)^{0.8} \quad (32)$$

för  $1 \leq i \leq 6$ . Korrektionsfaktorer har lagts till för att motverka effekter från förändringar i rökgasens temperatur och flöde. Korrektionsfaktorernas referenstemperatur har uppskattats separat för varje tubpaket.

## 4.7 Nomenklatur

### Parametrar med uppmätta värden

|             |                    |                                                  |
|-------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| $C_{H_2O}$  | volym %, våt gas   | Koncentration av vattenånga i rökgasen           |
| $C_{O_2}$   | volym %, våt gas   | Koncentration av syre i rökgasen                 |
| $dP_{ks}$   | kPa                | Tryckfall över kokyta                            |
| $m_{ss}$    | Kg/s               | Ångflöde genom sek. ÖH                           |
| $m_{ve}$    | Kg/s               | Vattenflöde EKO                                  |
| $p_s$       | bar                | Ångtryck (approximeras med domtryck)             |
| $L_v$       | Nm <sup>3</sup> /s | Luftflöde till pannan                            |
| $R_v$       | Nm <sup>3</sup> /s | Flöde rökgasåterföring                           |
| $T_{Mava}$  | °C                 | Matarvattentemperatur                            |
| $T_{rg,s1}$ | °C                 | Temperatur rökgas in sek. ÖH – mäts i vändschakt |
| $T_{rg,e7}$ | °C                 | Temperatur rökgas före EKO (paket 6)             |
| $T_{rg,e1}$ | °C                 | Temperatur rökgas efter ekonomisern              |

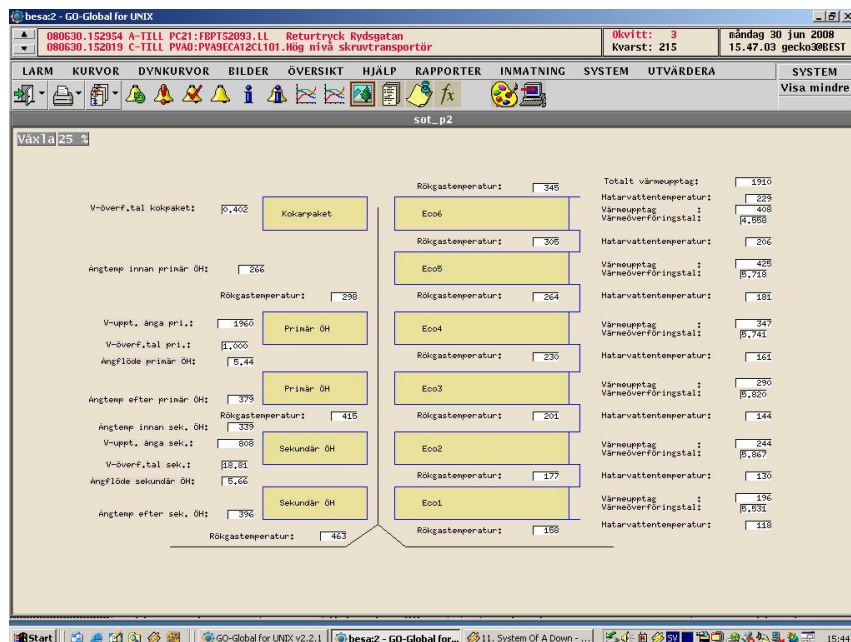
|                                        |                         |                                                      |
|----------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| $T_{v,e1}$                             | °C                      | Temperatur vatten in till paket 1 EKO                |
| $T_{v,e2}$                             | °C                      | Temperatur vatten in till paket 2 EKO                |
| $T_{v,e3}$                             | °C                      | Temperatur vatten in till paket 3 EKO                |
| $T_{v,e4}$                             | °C                      | Temperatur vatten in till paket 4 EKO                |
| $T_{v,e5}$                             | °C                      | Temperatur vatten in till paket 5 EKO                |
| $T_{v,e6}$                             | °C                      | Temperatur vatten in till paket 6 EKO                |
| $T_{v,e7}$                             | °C                      | Temperatur vatten ut från paket 6 EKO                |
| $T_{s,s2}$                             | °C                      | Temperatur ånga ut prim. ÖH                          |
| $T_{s,s3}$                             | °C                      | Temperatur ånga in sek. ÖH                           |
| $T_{s,s4}$                             | °C                      | Temperatur ånga ut sek. ÖH                           |
| <b>Parametrar med beräknade värden</b> |                         |                                                      |
| $Br$                                   | Kg/s                    | Bränsleflöde till pannan                             |
| $c_{p,rg}$                             | kJ/(Nm <sup>3</sup> °C) | Värmekapacitet rökgas                                |
| $l_v$                                  | mol/kgBr                | Luftflöde per massenhet bränsle, torr gas            |
| $l_0$                                  | mol/kgBr                | Stökiometriskt luftflöde per massenhet bränsle       |
| $g_{0t}$                               | mol/kgBr                | Stökiometriskt torrt rökgasflöde                     |
| $g_{0v}$                               | mol/kgBr                | Stökiometriskt vått rökgasflöde                      |
| $g_v$                                  | mol/kgBr                | Aktuellt rökgasflöde per massenhet bränsle (våt gas) |
| $h_s$                                  | kJ/kg                   | Entalpi för ånga, beror på tryck och temp            |
| $m$                                    | -                       | Luftfaktor ( $=l_v/l_0$ )                            |
| $m_{sp}$                               | Kg/s                    | Ångflöde genom prim. ÖH (beräknas)                   |
| $G_v$                                  | Nm <sup>3</sup> /s      | Gasflöde från pannan                                 |
| $P_{SHP}$                              | kW                      | Effekt i prim. ÖH                                    |
| $P_{SHS}$                              | kW                      | Effekt i sek. ÖH                                     |
| $P_{v,etot}$                           | kW                      | Effekt EKO                                           |
| $P_{v,ei}$                             | kW                      | Effekt EKO, paket $i$                                |
| $T_{rg,s2}$                            | °C                      | Temperatur rökgas in till primäröverhettaren         |
| $T_{rg,s3}$                            | °C                      | Temperatur rökgas efter prim. ÖH                     |
| $T_{rg,ei}$                            | °C                      | Temperatur rökgas efter paket $1 \leq i \leq 6$ EKO  |
| $T_{s,s1}$                             | °C                      | Temperatur ånga in prim. ÖH                          |
| $UA_{ci}$                              | kW/°C                   | Värmegenomgångstal, EKO paket $i$                    |
| $UA_{SHP}$                             | kW/°C                   | Värmegenomgångstal, prim. ÖH                         |
| $UA_{SHS}$                             | kW/°C                   | Värmegenomgångstal, sek. ÖH                          |

## 5 Resultat

### 5.1 Implementering i Cactus

Styr och övervakningssystemet som används i kontrollrummet vid pannorna hos Borås Energi och Miljö är utvecklat av Cactus Automation. De beräkningar som presenterades ovan har implementerats i systemet med rutiner skrivna i C-kod för att kunna följa utvecklingen av de beräknade värmegenomgångstalen i realtid. Det har varit en del problem med att det inte finns någon inbyggd felhanteringsrutin i programmiljön. Detta har medfört att beräkningsprogrammet ibland hänger sig och måste startas om manuellt. Problemen uppkommer i samband med större driftstörningar och omstarter av pannan. Vi har försökt fånga sådana fel med fler och fler villkorssatser i koden men den skulle behöva utvecklas ytterligare.

De beräknade värdena på effektupptag, temperaturer och värmegenomgångstal presenteras på en operatörsbild som kan nås från kontrollrummet, se Figur 8. Genom att klicka på de olika värdena på skärmen kan en historisk kurva erhållas. I sitt nuvarande skick används inte dessa beräkningar till att automatiskt styra sotblåsningssekvenserna, utan är tänkt att användas som ett hjälpmedel för att följa beläggingsbildningen.



Figur 8. Operatörsbild som visar temperaturer, effektupptag och värmegenomgångstal i pannans individuella tubpaket.

Figure 8. Operator's screen showing temperatures, power uptake and heat transfer coefficients of individual tube banks in the boiler.

## 5.2 Överhettare

Uppmätta temperaturer av ångan vid överhettarna visas överst i Figur 9 under en typisk femdagarsperiod med stabil last. Ångan in till primäröverhettaren består av mättad ånga vars temperatur är ganska konstant då den bestäms av domtrycket. I primäröverhettaren värms ångan till en temperatur runt typiskt 380°C (grön linje). Utgående ångtemperatur från sekundäröverhettaren hålls konstant för att användas i ångturbiner (ljusblå linje). Regleringen av den levererade ångtemperaturen sker med hjälp av matarvatteninsprutning i ångflödet mellan överhettarna. Det innebär att ångflödet i sekundäröverhettaren är större än i primäröverhettaren. Insprutningen av matarvatten sänker ångtemperaturen in till sekundäröverhettaren, röd linje i Figur 9. Sotblåsningarna syns tydligt som plötsliga sänkningar av denna temperatur, vilket beror på att mer värme tas upp i sekundäröverhettaren efter rengöringen. Eftersom styrsystemet arbetar för att hålla en konstant temperatur ut från sekundäröverhettaren behöver ångtemperaturen in sänkas när värmeupptaget ökar. Precis vid sotblåsningarna syns ett svagt rippel på utgående ångtemperatur innan reglersystemet hunnit justera matarvatteninsprutningen.

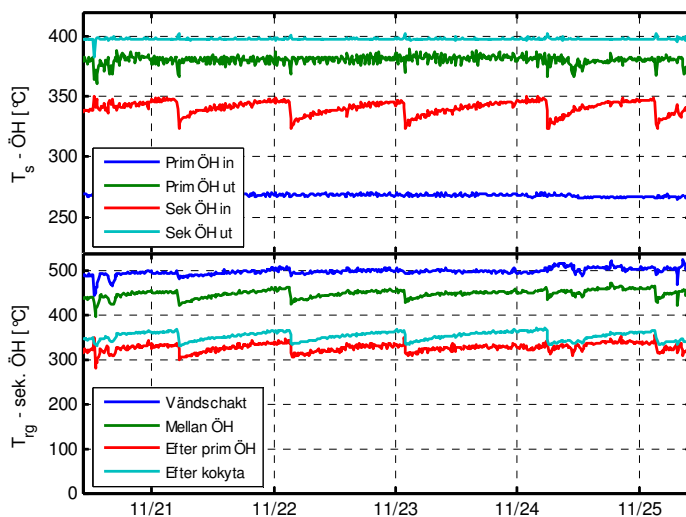
Allt eftersom överhettarna försmutsas mellan sotblåsningarna tas en allt större andel av värmen för överhettning av ångan upp i primäröverhettaren, men så länge som ångan ut håller den fastställda temperaturen så påverkas inte pannans elverkningsgrad av försmutsningen mellan sotblåsningarna. Värt att notera i Figur 9 är att den beräknade rökgastemperaturen efter primäröverhettaren är lägre än den uppmätta efter kokyten. Eftersom värme även tas upp i kokyten är det verkliga förhållandet det motsatta. Förklaringen till detta är att den uppmätta rökgastemperaturen innan sekundäröverhettaren är för låg. Det vill säga att den verkliga, genomsnittliga, rökgastemperaturen i vändschaktet är avsevärt högre än den uppmätta. Mätfelet är troligtvis orsakat av att temperaturgivaren kyls genom strålning mot kallare värmeöverförande ytor, men även beläggingsbildning eller stråkbildning av kallare rökgaser kan tänkas spela in. Tyvärr har inte tiden medgivit kontrollmätningar med sugpyrometer.

De beräknade värmegenomgångstalen ( $UA$ ) under samma tidsperiod som ovan visas i Figur 10. Vid sotblåsningarna, som genomförs en gång per dygn, ökar  $UA$ -värdet med ca 50 % för att sedan avta närmast exponentiellt. När driften av pannan är så pass jämn som den varit under tidsperioden i Figur 10 skulle ett tröskelvärde kunna användas för att initiera sotblåsningen (exempelvis när  $UA_{shs} < 10 \text{ kW/}^\circ\text{C}$ ). Tyvärr varierar värdena tidvis mycket mera vid instabila driftförhållanden.

Den relativa förbättring som erhöles vid sotblåsningarna av överhettarna som funktion av tiden sen senaste sotblåsning visas i Figur 11. Under förutsättning att tuberna rengörs till samma renhetsgrad efter varje sotblåsning så speglar den relativa förbättringen av  $UA$ -talen i Figur 11 beläggningstillväxten, som verkar likartad för primär- och sekundäröverhettarna. Figur 12 visar hur värmegenomgångstalet för sekundäröverhettaren förhåller sig till primäröverhettaren under fem dagar. Figuren visar att under de första timmarna efter en sotblåsning stiger kvoten vilket indikerar en snabbare beläggningstillväxt på primäröverhettaren initialt. Men efter ytterligare några timmar (ca 10 timmar efter sotblåsning) börjar kvoten sjunka, vilket betyder att sekundäröverhettaren nu försmutsas i raskare takt än primäröverhettaren. De utförda mätningarna ger ingen fysisk förklaring till detta beteende. Men det är i alla fall ingen dramatisk skillnad i beläggningstillväxt (kvoten i

Figur 12 håller sig mellan 0,25 och 0,30) och Figur 10 visar att beläggningstillväxten är relativt långsam 10 timmar efter senaste sotbläsning.

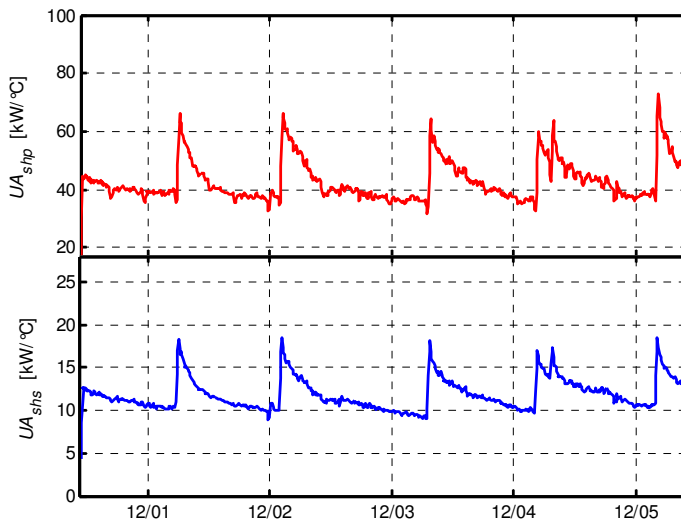
Dessa observationer ger ingen indikation på att det skulle vara någon driftfördel att sotblåsa överhettarna individuellt. I det korta tidsperspektiv som studerats här verkar det som att överhettarna blir väl rengjorda efter varje sotbläsning. Det kan dock inte uteslutas att det plötsligt dyker upp en besvärlig bränslefraktion som ger upphov till mer och besvärligare beläggningar som inte rengörs tillräckligt väl med detta sotningsintervall. Om en uppbyggnad av hårdare beläggningar väl startar kan det tänkas att beläggningstillväxten börjar accelerera. Detta skulle direkt avspeglas på en sjunkande basnivå för *UA*-talen. Således kan det vara värt för driftpersonalen att studera utvecklingen av *UA*-talen för överhettarna i samband med sotbläsningarna som en indikator för att i ett tidigt skede detektera svårare beläggningsbildningar och eventuellt försöka åtgärda detta genom att öka sotningsfrekvensen periodvis. Man måste dock vara observant på att *UA*-talen i dess nuvarande utformning är last- och temperaturkänsliga och inte direkt kan användas under perioder med instabil drift. För att bestämma lämpligt sotbläsningsintervall räcker det inte med att studera värmegenomgångstalen veckovis, utan det behövs utvärdering över längre tidsperioder.



Figur 9. Temperaturer vid överhettarna, vattenånga överst och gas underst.

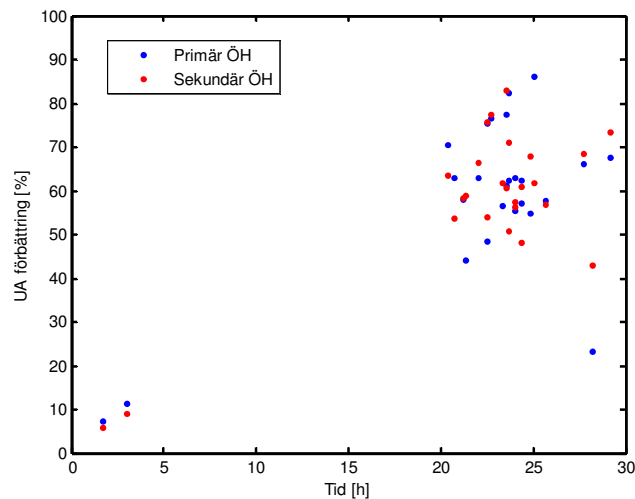
Figure 9. Temperatures at superheaters: top) steam, and below) gas.





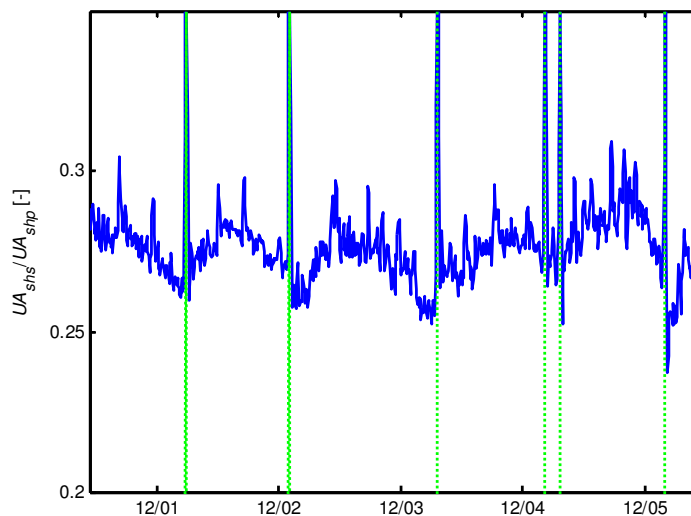
Figur 10. Värmegenomgångstal för överhettarna; överst) primär och underst) sekundär.

Figure 10. Overall heat transfer coefficients for super heaters; top) primary and below) secondary.



Figur 11. Relativ förbättring av UA värdet vid sotblåsning av överhettarna som funktion av tiden sen senaste sotblåsning.

Figure 11. Relative improvement of UA at sootblowing as a function of duration from last cleaning.

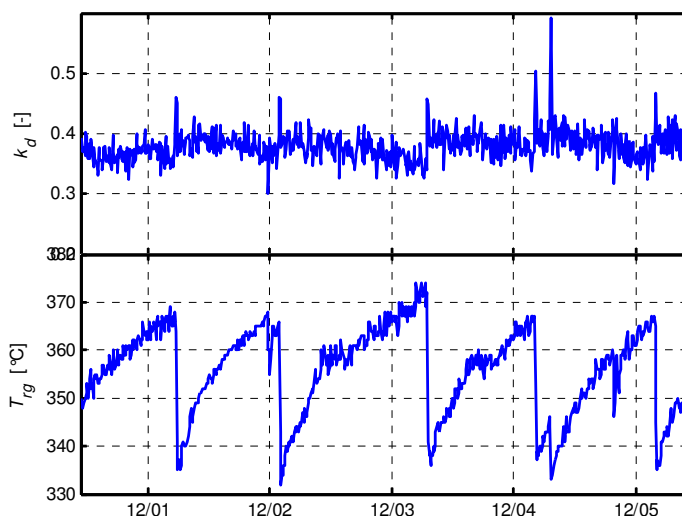


Figur 12. Värmeegenomgångstal för sekundäröverhettaren relativt primäröverhettaren. Gröna vertikala linjer indikerar tidpunkter för sotblåsningar av överhettarna.

Figure 12. Heat transfer coefficient values of secondary superheater relative to primary. Sootblowings of superheaters indicated by vertical green lines.

### 5.3 Kokyta

För kokytan kunde inte värmeupptaget beräknas, utan istället mättes tryckfallet på gassidan från vilket en tryckfallskoefficient  $k_d$  (Ekvation 28) beräknas. Värden för denna koefficient visas i överst i Figur 13, som också visar rökgasens temperatur efter kokytan. Gastemperaturen efter kokytan faller betydligt efter varje sotblåsning vilket tyder på att de värmeöverförande ytorna i överhettare och kokyta verkligen har rengjorts. Den framräknade koefficienten  $k_d$  ökar i värde med ökat tryckfall, vilket skulle vara en naturlig följd av kraftig beläggingsbildning. Figur 13 visar dock att  $k_d$  inte påverkas betydligt av den beläggingsbildning som trots allt kan antas ske mellan sotblåsningarna. Detta pekar på att förträngningen från beläggningar av den öppna vägen för rökgaserna genom kokytan är för liten för att menligt påverka tryckfallet under normala förhållanden. Koefficienten skulle dock fortfarande kunna användas som en indikator för kraftiga igensättningar men i detta fall inte för att styra sotblåsningsintervallerna.



Figur 13. Tryckfallskoefficient och temperatur efter kokyta.

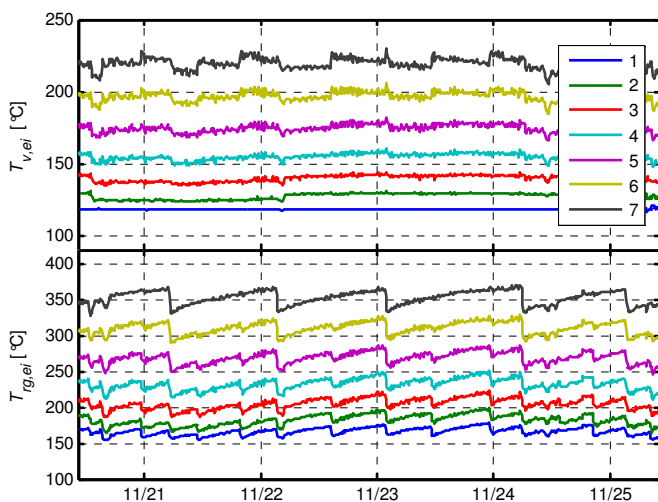
Figure 13. Drag coefficient and gas temperature after boiler bank.

## 5.4 Ekonomiser

Typiska vatten och rökgastemperaturer i ekonomisern visas i Figur 14 under fem dygn med stabil drift vid full last; överst visas vattentemperaturer där index 1 ger vattnets temperatur in till ekonomisern och index 7 ger vattentemperaturen ut från ekonomisern. Eftersom ekonomisern i princip fungerar som en motströms värmeväxlare motsvarar index 1 och index 7 utgående respektive ingående rökgastemperatur (se Figur 3). Tidpunkter från sotblåsningar syns tydligt som plötsligt fallande rökgastemperaturer i den undre grafen i Figur 14. Gastemperaturen in ( $i=7$ ) påverkas endast av överhettarnas sotbläsning en gång per dygn medan utgående gastemperatur ( $i=1$ ) också påverkas av riktade sotblåsningar i ekonomisern, vilket sker ungefär tre gånger per dygn utöver den stora sotblåsningen som innefattar ekonomisern.

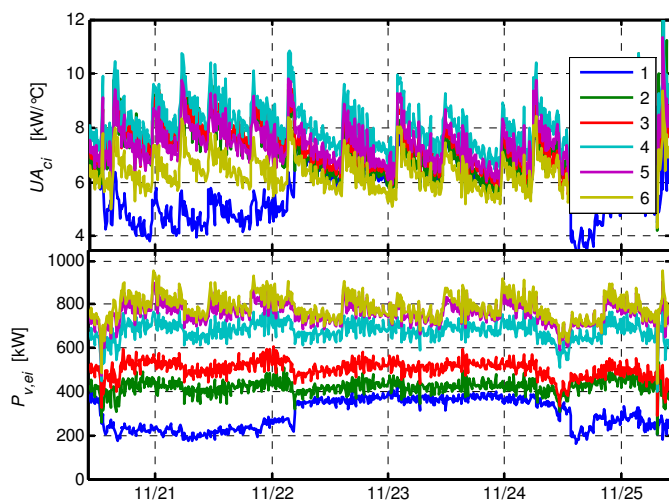
Hur de framräknade värdena på  $UA$  och effektupptag i ekonomiserns olika delar varierar visas i Figur 15 för samma tidsperiod som i Figur 14. I det översta diagrammet, som visar  $UA$ , ligger linjerna ovanpå varandra vilket gör det svårt att särskilja paketen, men det illustrerar att värdena för de mellanliggande tubpaketen inte varierar så mycket sinsemellan. Det som sticker ut är främst ekotubpaket 6 som ligger först i rökgasens och sist i vattnets riktning. Detta paket får ta emot störst stoftbelastning och försmutsas mer än övriga tubpaket, vilket diskuteras mer nedan. Det andra  $UA$ -värdet som tidvis sticker ut är för ekotubpaket 1, som ligger sist i rökgasens riktning. Att  $UA$ -värdet för detta paket tidvis faller kraftigt beror inte på försmutsning utan på att ingående vattentemperaturen mäts innan luftförvärmaren, vilket resulterar i ett för lågt uträknat värde de tidsperioder när luftförvärmaren används, se avsnitt 6.2. Detta fel skulle kunna åtgärdas genom att fysiskt flytta givaren eller genom att ta med en värmebalans över luftförvärmaren i beräkningen.

Sotningen av ekonomisern sker idag manuellt kontrollerat från kontrollrummet, normalt 3-4 gånger per dygn, eventuellt mer eller mindre beroende på rökgasens temperatur efter ekonomisern. Om sotningsfrekvensen dras ned så ökar pannans genomsnittliga rökgasförlust (sänkt totalverkningsgrad) och risken finns att beläggningarna på tuberna växer så mycket att de blir svåra att avlägsna med ordinarie ångsotning. Vid revision oktober 2008 fick ett antal tubrader överst och underst i ekopak 4-6 bytas ut på grund av slitage från ångsotarna. Att de övre paketen får ett högre slitage än de övriga beror antagligen på att där finns mer stoft som dras med ångflödet och eroderar tubmaterialet.



Figur 14. Typiska vatten- och rökgastemperaturer i ekonomisern.

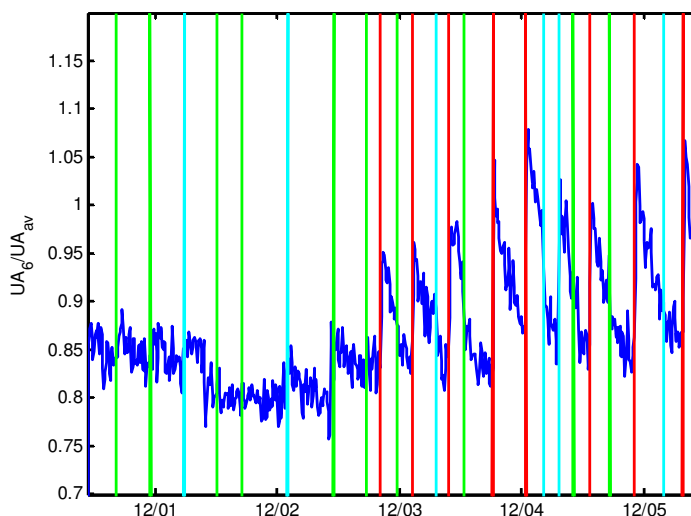
Figure 14. Typical temperatures of water (top) and flue gas (bottom).



Figur 15. Typisk femdagarssekvens över UA och effektupptag av olika paket i ekonomisern.

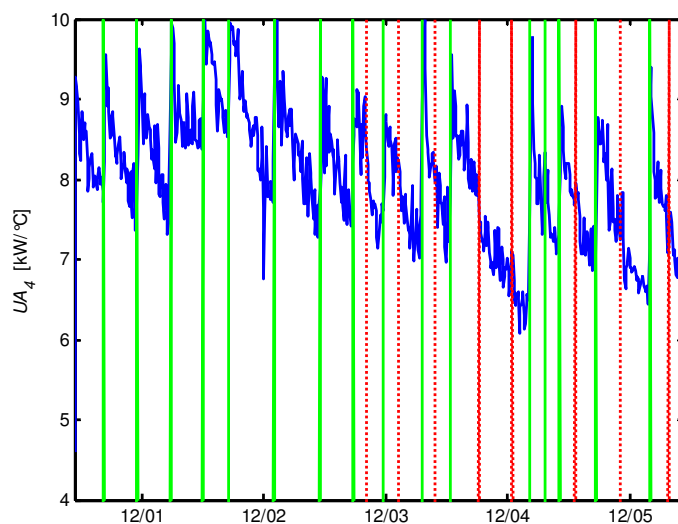
Figure 15. Typical behaviour of UA and power uptake of banks in economiser during 5 days.

Eftersom ekotubpaket 6 generellt uppvisar ett lägre värmegenomgångstal än övriga, provades under några dagar att sotblåsa detta tubpaket frekventare än övriga paket. Vid dessa riktade sotblåsningar användes de två övre nivåerna av sotlansar (se Figur 3) vilket medförde att även överdelen av paket 5 blev sotblåst samtidigt. Figur 17 visar hur  $UA$  för ekopakiet 6 förhåller sig till medelvärdet av tubpaket 2-4 under en femdagarsperiod. De vertikala linjerna indikerar sotblåsningar: ljusblå är sotning av överhettare och hela ekonomisern, gröna linjer visar sotblåsningar av hela ekonomisern och de röda linjerna visar när endast ekopakiet 6 sotblåstes. Figuren visar tydligt att värmegenomgångstalet för paket 6 närmar sig de övriga efter individuell sotblåsning av endast detta paket (röda vertikala linjer) vilket beror på den kombinerade effekten av att paket 6 rengörs men samtidigt fastnar en del av det bortblåsta stoftet på nedströms tubpaket. Vid sotblåsning av hela ekonomisern (gröna och ljusblå linjer) är värmegenomgångstalet relativt övriga paket i stort sett oförändrat. Figuren visar också att det relativa värmegenomgångstalet för paket 6 faller snabbt från 1 efter riktade sotblåsningar, vilket indikerar att tubpaket 6 försmutsas snabbare än övriga paket. Det är ganska naturligt då detta paket först möter gasflödet. Paket 6 behöver alltså sotblåsas oftare än övriga för att det ska hållas lika rent. Figur 17 visar att värmegenomgångstalet för paket 4 tenderar att sjunka när enbart paket 6 sotblåses. Värmegenomgångstalen för övriga nedströms paket sjunker på liknande sätt. Nedgången kan förklaras med att stoft som blivit bortblåst från paket 6 fastnar på nedströms tuber.



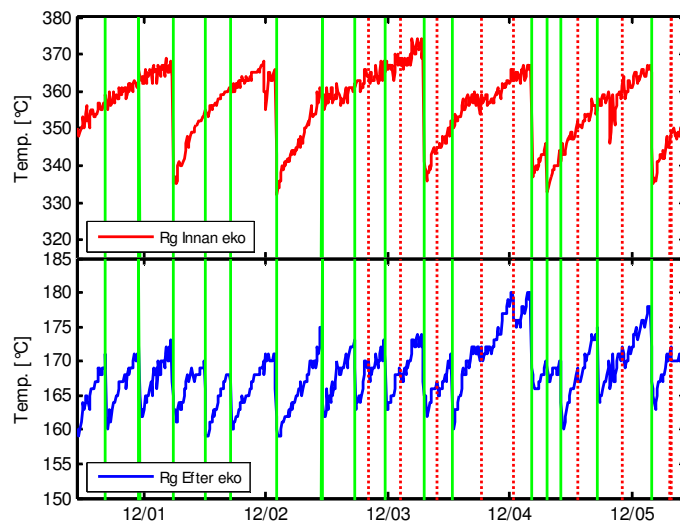
Figur 16. Femdagarssekvens över  $UA$  för paket 6 relativt paket 2 till 4. Sotblåsningar indikerade med vertikala linjer: Ljusblå) överhettare och hela ekon, Grön) hela ekon och Röd) enbart ekopakiet 6 och halva paket 5.

Figure 16. Sequence of  $UA$  for bank 6 divided by average of tube banks 2 to 4 during 5 days. Sootblowings indicated by vertical lines: Light blue) superheaters and eco, Green) whole eco and Red) only bank 6 and top of bank 5 in eco.



Figur 17. Sekvens över UA för paket 4 under samma tidsperiod som Figur 16. Sotblåsningar indikerade med vertikala linjer: Grön) hela ekon och Röd) paket 6 och halva paket 5.

Figure 17. Sequence of UA for bank 4 during same period as in Figure 16. Sootblowings indicated by vertical lines: Green) whole eco and Red) bank 6 and top of bank 5.

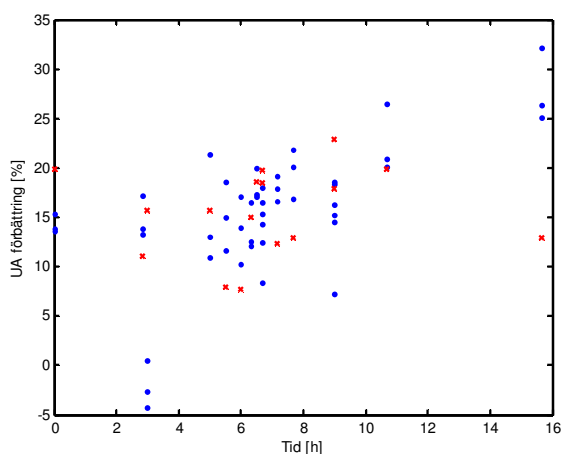


Figur 18. Sekvens över rökgasens temperatur innan (överst) och efter (underst) ekonomisern under samma tidsperiod som Figur 16, sotblåsningar indikerade med vertikala linjer: Grön) hela ekon och Röd) ekopak 6 och halva paket 5.

Figure 18. Sequence of flue gas temperatures before (top) and after (bottom) the economiser during same period as in Figure 16. Sootblowings indicated by vertical lines: Green) whole eco and Red) bank 6 and top of bank 5.

En annan indikator på beläggingsbildningen i ekonomisern är rökgasens utgående temperatur, vilket visas i Figur 18. Här syns att rök Gastemperaturen endast påverkas marginellt av riktade sotblåsningar av ekotubpaket 6, vilket betyder att en ökad sotningsfrekvens av detta tubpaket kanske inte kan motiveras med förbättrad verkningsgrad på pannan, åtminstone inte i ett kort tidsperspektiv. Men frekventare sotblåsningar i ekonomiserns övre del kan eventuellt förhindra långsiktig uppbyggnad av hårda beläggningar. Å andra sida ökar risken för erosionsskador på tuberna om sotningsfrekvensen ökar. Dock krävs utvärdering över lång drifttid för att fastställa sådant samband.

Figur 19 visar relativ förbättring av värmegenomgångstalen för ekonomiserns tubpaket som en funktion av tid sedan senaste sotblåsning. Det är en ganska tydlig trend att förbättringen ökar med tiden, vilket betyder att en tjockare beläggning avlägsnas. Figuren visar också att den relativa förbättringen är ungefär lika stor för ekopaket 6 som för de övriga paketen. Spridningen är relativt stor, vilket kan ha flera orsaker, till exempel bränslevariationer.



Figur 19. Relativ förbättring av UA värdet vid sotblåsning av ekonomisern som funktion av tiden sen senaste sotblåsning. Röd) Ekotubpaket 6, Blå) Ekotubpaket 2-5.

Figure 19. Relative improvement of UA at sootblowing of the economiser as a function of duration from last cleaning. Red) Tube bank 6, Blue) Tube banks 2-5.

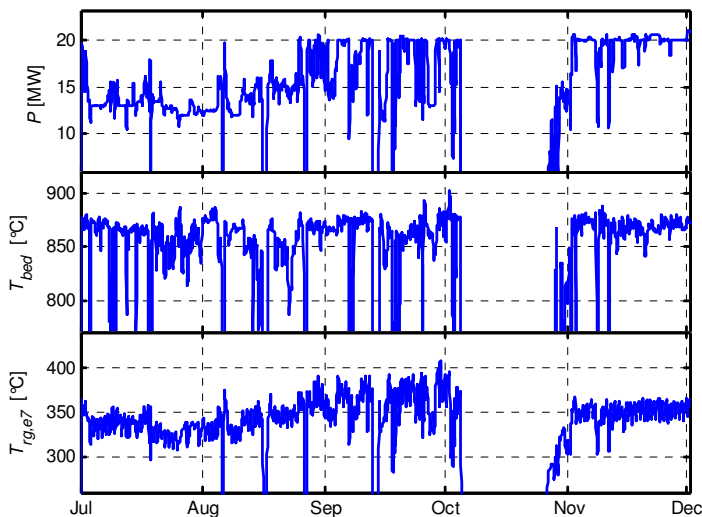
I Bilaga A, Figur 28, visas diagram över hur värmegenomgångstalen faller som funktion av tiden för de olika tubpaketen i ekonomisern under en treveckorsperiod efter revisionen. Värdena anpassades med en kombinerad linjär och exponentialfunktion som också ritats in i diagrammen. De funktionerna visar att värmegenomgångstalen initialt efter sotblåsningen faller tre gånger så fort för de två översta tubpaketen jämfört med de två nedersta, i genomsnitt. Efter denna första exponentiellt fallande trend fortsätter värmegenomgångstalen att falla mer långsamt linjärt med relativt likartad hastighet för alla tubpaket. Mätvärdena som representeras av punkter i Figur 28 är tiominutersmedelvärden som uppvisar en stor spridning, vilket återigen illustrerar svårigheten med att sätta gränsvärden där det vore lämpligt att automatiskt initiera individuella sotblåsningar.

## 5.5 Långtidstrender

Pannans drift från det att de nya termoelementen kopplats in till loggsystemet (Cactus) i juli fram till tidpunkten för rapporteringen i början av december åskådliggörs grovt i Figur 20, som visar att pannlasten var ganska låg och ojämn fram till mitten av september. Pannan stannades för årlig revision i början av oktober. Sedan kom den inte igång förrän i början av november. Tyvärr blev då inte de nya Pt100 givarna i ekonomisern återinsatta vid starten och gav inte rätt värden igen förrän i mitten av november. Under november och december har lasten äntligen varit så stabil som är önskvärt för att studera sotblåsningens inverkan på värmegenomgångstalen. Eftersom projektet ska avrapporteras i december har detta medfört en utvärderingsperiod som tyvärr blivit kortare än förväntat.

En observation från Figur 20 är att rökgastemperaturen in till ekonomisern ( $T_{rg,e7}$ ) har en ökande tendens från början av augusti fram till revisionen. Detta skulle kunna vara orsakat av en långsam beläggningstillväxt på överhettare och kokyta. Efter revisionen har dock temperaturen legat på jämn basnivå med det rippel som uppkommer från sotblåsningar av överhettare och kokyta.

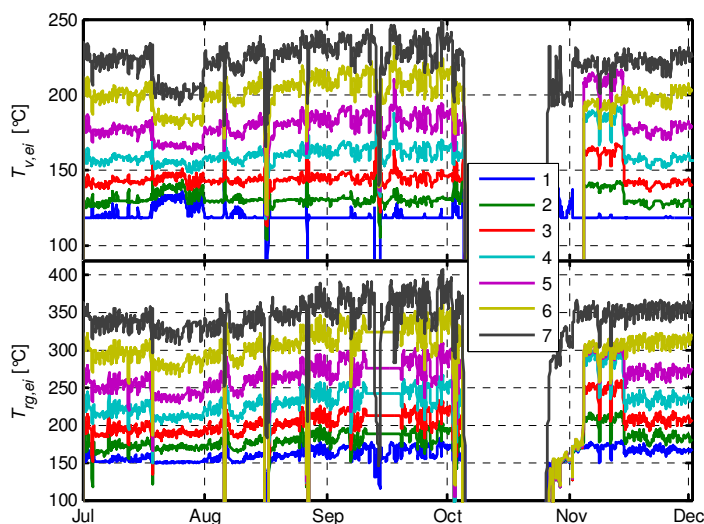
Figur 21 visar hur vatten och rökgastemperaturer i ekonomisern varierat under testperioden. Vattentemperaturen ut från ekonomisern var högre innan jämfört med efter revisionen. Det beror antagligen på att rökgastemperaturen in till ekonomisern har sjunkit efter revisionen, vilket nämnts ovan.



Figur 20. Pannlast, bäddtemperatur och rökgastemperatur före ekonomisern under driftperioden juli till början av december.

Figure 20. Boiler load, bed temperature and flue gas temperature in to the economiser from July until beginning of December.



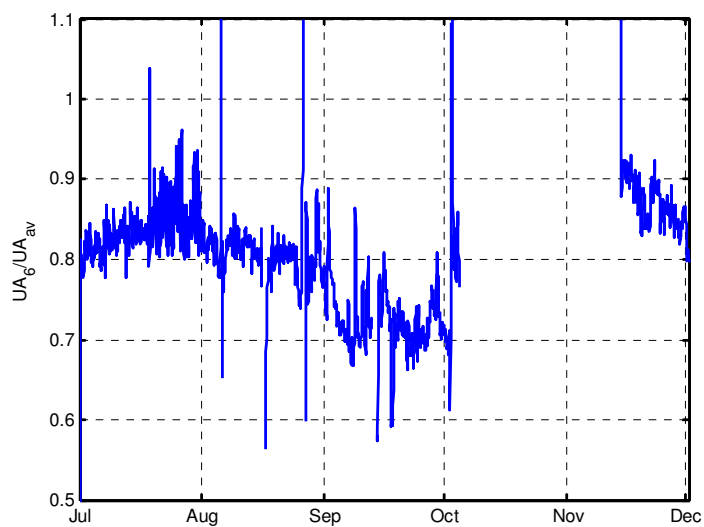


Figur 21. Vatten- och rökgastemperaturer i ekonomisern under driftperioden juli till början av december.

Figure 21. Water and flue gas temperatures in the economiser from July until beginning of December.

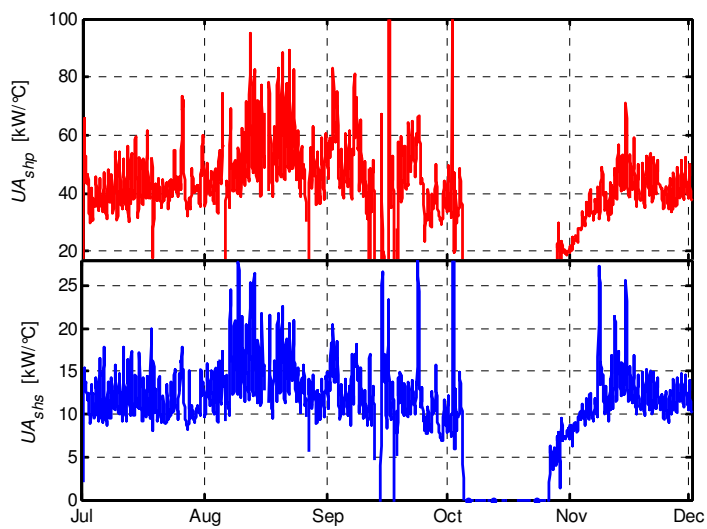
Som diskuterats ovan har tubpaket 6 i ekonomisern haft en kraftig beläggning som tydligen inte lossnat vid ordinarie sotblåsningar. Denna långsamma tillväxt av hårdare beläggningar åskådliggörs från hur värmegenomgångstalet för tubpaket 6 förhållit sig till medelvärdet av övriga tubpaket i ekonomisern i Figur 22. Där syns att kvoten sjunkit från slutet av juli fram till revisionsstoppet i början av oktober. Efter revisionen och det att loggsystemet kommit igång närmade sig värmegenomgångstalet för paket 6 de andra, men trenden är sedan dess avtagande, vilket tyder på att paket 6 återigen långsamt byggs på med mer beläggningar än övriga paket.

Den långsiktiga trenden för värmegenomgångstalen i överhettarna visas i Figur 23. Det verkar även här som att tuberna försmutsats långsamt från början av augusti fram till revisionen. Det är dock stora fluktuationer som försvårar säkra slutsatser. Den beräknade tryckfallskoefficienten  $k_d$  för kokytan visas under samma tidsperiod i Figur 24. Värdena för denna koefficient uppvisar kraftiga fluktuationer som inte härrör från beläggningar. Under tiden efter revisionen har koefficienten en svagt stigande trend som skulle kunna indikera en långsam beläggningstillväxt, men det syns ingen ökning av rökgasens temperatur efter kokytan, vilket också borde vara en konsekvens av kraftig beläggningstillväxt.



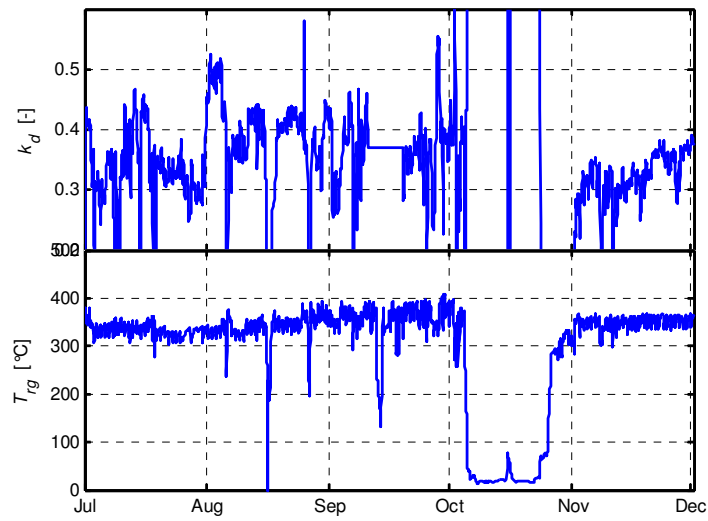
Figur 22.  $UA$  för paket 6 relativt paket 2 till 4 i ekonomisern under hela testperioden.

Figure 22.  $UA$  for bank 6 relative tube banks 2 to 4 in economiser during the whole test period.



Figur 23.  $UA$  för primär- och sekundäröverhettare under hela testperioden.

Figure 23.  $UA$  for primary and secondary superheater during the whole test period.



Figur 24. Tryckfallskoefficient för kokytan och efterföljande rökgastemperaturer under hela testperioden.

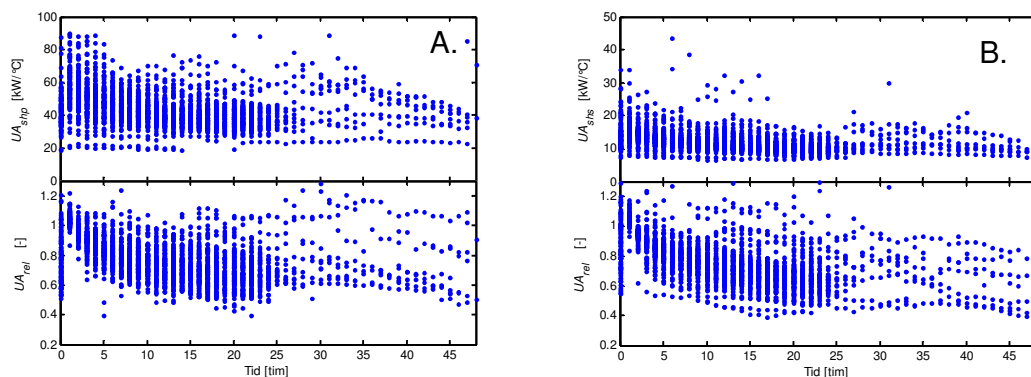
Figure 24. Drag coefficient for boiler bank and the succeeding flue gas temperature during the whole test period.

## 6 Resultatanalys

### 6.1 Diskussion av resultat

Under hela driftperioden som studerats har förhållandena varierat avsevärt och värmegenomgångstalen är under orolig drift långtifrån så jämna och fina som i exemplet i Figur 10. En sammanställning över timmedelvärden av  $UA$  för överhettarna visas i Figur 25 mot tiden sedan senaste sotblåsning. Från exemplet i Figur 10 kan tyckas att sotblåsning skulle kunna initieras automatiskt vid ett gränsvärde, exempelvis om  $UA$  faller under 38 kW/°C för primäröverhettaren. Emellertid visar Figur 25 att  $UA$  har en stor spridning och att detta gränsvärde ibland underskrids tämligen omgående efter sotblåsningen men under andra perioder har värdet inte underskridits efter 40 timmar. Denna stora variation beror på förändrade driftbetingelser, antagligen främst laständringar och driftstörningar. Spridningen blir mindre i de undre graferna i Figur 25 som visar  $UA$  relativt värdet omedelbart efter senaste sotblåsning. Men problemet kvarstår om det sker driftförändring, eller driftstörning, under tiden sedan senaste sotblåsning. Det betyder att framräknade  $UA$ -värden inte kan användas som enda villkor för initiering av sotblåsarna. Exempel på andra villkor som samtidigt ska vara uppfyllda för automatisk start av sotblåsningar kan vara:

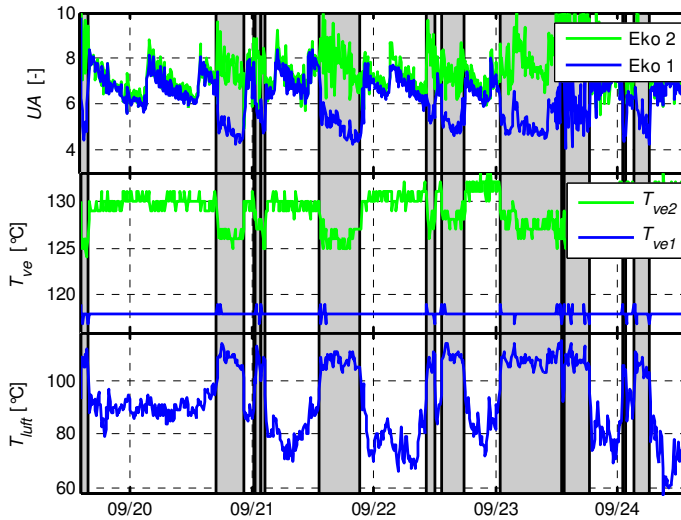
- En specificerad minsta tid ska ha gått sedan senaste sotblåsning
- Rökgastemperatur efter tubpaketen ska vara över ett minsta värde för att sotning ska starta
- Pannlast över visst värde
- Sotblåsning initieras automatiskt även om  $UA$  inte gått under gränsvärdet om specificerad maxtid gått sedan senaste sotblåsning



Figur 25. Överst) Timbaserade medelvärden av  $UA$  för primäröverhettaren (A) och sekundäröverhettaren (B) som funktion av tiden sen senaste sotblåsning, Underst) samma värden relaterade till  $UA$  direkt efter sotblåsningen

Figure 25. Top) Hourly averages of  $UA$  for primary superheater (A) and secondary superheater (B) as a function of time since last sootblowing. Bottom) same values divided by  $UA$  measured the first samples after each sootblowing.

## 6.2 Osäkerhet i mätning av vattentemperatur in till ekonomiser



Figur 26. Överst) Beräknade värmegenomgångstal för de två första paketen i ekonomisern, Mitten) Uppmätta ingående och utgående vattentemperaturer till paket 1, Nederst) Lufttemperatur uppmätt efter luftförvärmaren.

Figure 26. Top) Calculated heat transfer coefficients for the two first banks in the economiser, Middle) Measured in and outgoing water temperatures of first tube bank, Bottom) Primary air temperature measured after air preheater.

Värmegenomgångstalet ( $UA$ ) för första paketet i ekonomisern följer oftast det andra paketet, men periodvis dyker det ned till avsevärt lägre värden, se skuggade områden överst i Figur 26. Detta verkar inte bero på någon nedsmutsning och en närmare analys visade att de lägre värdena korrelerades mot de perioder då förbränningsluften blivit förvärmad, se underst i Figur 26 som visar temperaturen för luften efter luftförvärmaren. Förbränningsluften värms med matarvattnet innan det går in till första paketet i ekonomisern. Perioder med förvärmad luft borde således resultera i en sänkt temperatur för matarvattnet in till ekonomisern, men så är inte fallet för den temperatur som använts ( $T_{v,e1}$ ), vilket visas i den mellersta grafen där den ingående temperaturen är närmast konstant. Däremot uppmäts en lägre temperatur ut från första paketet ( $T_{v,e2}$ ) under de perioder när luften förvärms. Baserat på uppmätta vattentemperaturer erhålls ett lägre värmegenomgångstal under de perioder när luften förvärms, men det är troligen fel orsakat av att givaren som mäter ingående vattentemperatur  $T_{v,e1}$  antingen är placerad innan luftförvärmaren eller på annat sätt är olyckligt placerad. Detta bör utredas ytterligare inför fortsatt användning av beräknat värmegenomgångstal för ekonomiserns första paket.

### 6.3 Ekonomisk kalkyl

Nedan beskrivs nettokostnader, d.v.s. kostnader och intäkter, som uppstår p.g.a. ångsotning av värmeöverförande tuber i en förbränningsanläggning. Specifikt är det Borås Energi AB:s avfallseldade panna som betraktas.

#### 1. Kostnadsorsaker

Följande kostnadsorsaker tas hänsyn till i kostnadsmodellen:

- kostnad för utebliven elproduktion från den ånga som används till sotningen
- kostnad för ökad bränsleåtgång p.g.a. försämrade värmeöverföring mellan två sotningar; d.v.s. när rökgastemperaturen ut höjs så kompenseras den långsamt ökande rökgasförlusten med ökad bränsleförbrukning då levererad effekt regleras mot en konstant nivå
- kostnad för avjoniserat vatten som åtgår vid sotningen

Utöver ovanstående finns kostnadsorsaker som inte tagits med därför att de antingen är små eller är svåra att kvantifiera:

- kostnad för värmeförlust genom momentant ökad rökgastemperatur efter ekonomisern vid sotning
- kostnad för fläktarbete om beläggningarna påverkar tryckfallet
- kostnad för korrosion orsakat av beläggningar eller korrosion/erosion orsakat av ångsotningen

#### 2. Kostnadsmodell

De beteckningar som används i modellen anges i Tabell 4.

Tabell 4. Beteckningar i kostnadsmodell.

Table 4. Parameters used in cost model.

| Beteckning         | Innebörd                                                    | Enhet  |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| $K_{\text{tot}}$   | totala kostnaden per tidsenhet                              | kr/s   |
| $K_{\text{el}}$    | kostnad för utebliven elproduktion per tidsenhet            | kr/s   |
| $K_v$              | kostnad för ökad bränsleåtgång per tidsenhet                | kr/s   |
| $K_a$              | kostnad för förbrukat avjonat vatten per tidsenhet          | kr/s   |
| $P_{\text{tot}}$   | pannans totala effekt                                       | W      |
| $m_{\text{å}}$     | åtgång ånga vid en sotning                                  | kg     |
| $m_{\text{åprod}}$ | total ångproduktion                                         | kg/s   |
| $\eta$             | pannans elverkningsgrad                                     | -      |
| $p_{\text{el}}$    | elpris                                                      | kr/J   |
| $m_{\text{rg}}$    | rökgasflöde                                                 | kg/s   |
| $t$                | tid mellan två sotningar                                    | s      |
| $c_{\text{p,rg}}$  | värmekapaciteten i rökgasen                                 | J/K kg |
| $\frac{dT}{dt}$    | rökgasernas temperaturökning efter eco mellan två sotningar | K/s    |
| $p_b$              | nettobränslepris                                            | kr/J   |
| $k_a$              | Specifik vattenkostnad                                      | kr/kg  |

Totala nettokostnaden är summan av kostnaderna för utebliven elproduktion, ökad bränsleåtgång p.g.a. sämre värmeupptag och kostnaden för avjonat vatten. Dessa beräknas per tidsenhet där tiden är den mellan två sotningar. Denna tid inkluderar själva sotningen och tiden fram till nästa sotning:

$$K_{\text{tot}} = K_{\text{el}} + K_{\text{b}} + K_{\text{a}}. \quad (1)$$

Kostnaden för utebliven elproduktion beräknas så att den totala eleffekten divideras med ångproduktionen. Då får man ångans elproduktion per massenhet. Denna multipliceras med förbrukning av ånga vid en sotning och divideras med tiden mellan två sotningar. Då får man den uteblivna elproduktionen mellan två sotningar:

$$K_{\text{el}} = p_{\text{el}} m_{\text{a}} (\eta P_{\text{tot}} / \dot{m}_{\text{åprod}}) / t \quad (2)$$

Kostnaden för ökad bränsleåtgång beräknas genom att temperaturökningshastigheten hos rökgaserna när de lämnar pannan betraktas som konstant och multipliceras med tiden mellan två sotningar. Då får man temperaturökningen mellan två sotningar. Denna svarar mot en värmeförlust som man erhåller genom att multiplicera med rökgasflödet och dess värmekapacitet. Nettobränslepriset inkluderar alla intäkter och kostnader som uppstår i samband med bränsleinköp och hantering. I det aktuella fallet får man betalt för att förbränna bränslet och detta minskar nettobränslepriset. Hanteringen ökar priset och består av sortering, lagring, krossning, askhantering m.m.

$$K_{\text{b}} = p_{\text{b}} \dot{m}_{\text{rg}} c_{\text{p,rg}} \frac{dT}{dt} t / 2. \quad (3)$$

Det förångade matarvatten som försvinner ut med rökgasen från ångsotningen kostar också att köpa in och behandla (avjonisera). Denna kostnad blir per tidsenhet:

$$K_{\text{a}} = k_{\text{a}} m_{\text{a}} / t \quad (4)$$

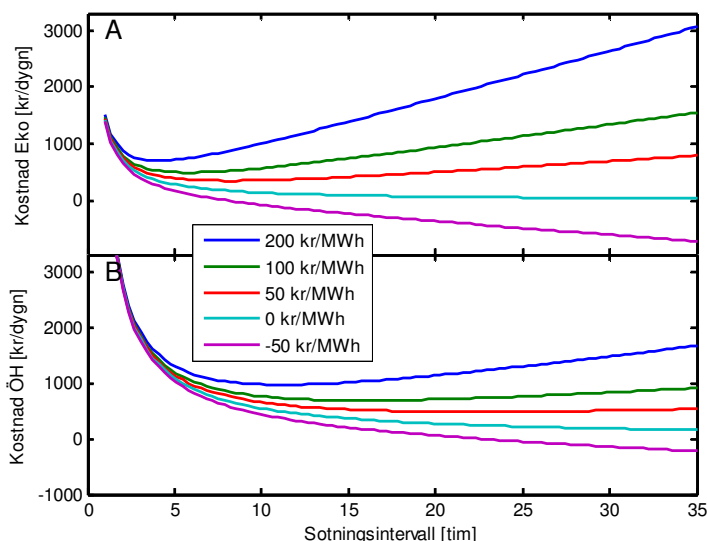
### 3. Resultat

Figur 27 a och b visar kostnaden per dygn för liten respektive stor ångsotning mot tiden mellan två sotningar för olika nettobränslepris. Beräkningarna baseras på de parametervärden som anges i Tabell 5. För olika bränslepriser (inklusive hanteringskostnader) inträffar kurvornas minimum vid olika tider mellan två sotningar. För jämförelse kan det vara bra att veta att bulkpriset för träpellets är ca 500 kr/MWh (2008). Vid höga bränslepriser lönar det sig att sota ofta för att minska värmeförluster med rökgasen. Å andra sidan visar denna krasst förenklade modell att om man får mer betalt för bränslet än det kostar att hantera så lönar det sig att sota så sällan som det är möjligt utan att riskera att tubbankarna sätts igen. Då spelar det mindre roll att pannverkningsgraden försämrats. Vid ett lågt bränslepris (50 kr/MWh) visar Figur 27 att det optimala sotblåsningsintervallen är ca 8 timmar för ekonomisern och ca 24 timmar för överhettarna.

Dock är kostnadskurvan väldigt flack, så ekonomiskt är det inte kritiskt om sotningsintervallerna ändras några timmar.

Extra driftstopp för att byta ut eroderade tuber eller för att rensa igensättningar i tubpaket kan ge en avsevärd kostnad, även utslaget per driftdygn som i Figur 27. Sambandet mellan sådana kostnader och ångsotningsintervall är emellertid väldigt svårt att uppskatta och har därför inte behandlats här.

I praktiken, för avfallsbränslen med låga eller negativa bränslekostnader, förefaller det som att lämpliga sotningsintervall blir en avvägning mellan att inte sotblåsa för ofta för att minska risken för erosionsskador och samtidigt sotblåsa tillräckligt ofta för att förhindra uppbyggnad av beläggningar som blir så stora eller hårda att de inte lossnar vid ordinarie sotblåsning. Kostnaden av ångsotning jämfört med vinsten av ökad verkningsgrad har här underordnad betydelse.



Figur 27. Uppskattad kostnad för ångsotning per tidsenhet avsatt mot tid mellan två sotningar för olika nettobränslepris. A) Sotning av endast ekonomisern. B) Sotning av överhettare och ekonomiser.

Figure 27. Estimated cost for steam sootblowing per day vs. time intervals between sootblowings for varied effective fuel prices. A) Sootblowings of economiser, B) Sootblowing of superheaters and economiser.



Tabell 5. Värden på ingående parametrar.

Table 5. Values used for parameters.

| Beteckning                      | Värde                                        | Källa                      |
|---------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| $k_a$                           | 0,015 kr/kg                                  | Dalkia och [5]             |
| $P_{\text{tot}}$                | 20 MW                                        | Driftdata                  |
| $m_{\hat{a}}$                   | 371 och 1411 kg för liten resp. stor sotning | beräknat från loggade data |
| $m_{\hat{\text{a}}\text{prod}}$ | 27.5 t/h                                     | Driftdata                  |
| $\eta$                          | 0.25                                         | Uppskattning               |
| $p_{\text{el}}$                 | 0.8 kr/kWh                                   | Gbg Energi, Borås Energi   |
| $m_{\text{rg}}$                 | 15 kg/s                                      | Driftdata                  |
| $c_{\text{p,rg}}$               | 1200 J/kg                                    | Ekvation (10)              |
| $\frac{dT}{dt}$                 | 5.555e-4 K/s                                 | Beräknat från loggade data |

## 7 Slutsatser

De beräknade värme genomgångstalen uppvisar generellt tydligt fallande trender med ökade beläggningar, men värdena uppvisar samtidigt stora fluktuationer vilket försvårar användandet av dessa tal för en styrautomatik. Eftersom bränslet till pannorna till största delen består av verksamhetsavfall så varierar bränsleegenskaperna kraftigt över tiden, vilket också påverkar beläggningstillväxten på de värmeöverförande ytorna. Ett behovsanpassat styrsystem av sotblåsningen baserat på *UA*-talen skulle då kunna initiera frekventare sotblåsningar när det behövs. Problemet som kvarstår är hanteringen av fluktuerande värden för att undvika att sotblåsningar initieras av ”falsklarm” som uppkommer vid driftstörningar och laständringar.

De korrektionsfaktorer för varierande gasflöde och temperatur som använts i detta arbete har visat sig otillräckliga för att korrigera för driftstörningar och större lastvariationer. För bättre korrigeringar skulle en mer sofistikerad analys eller en utförlig matematisk modell av pannan behöva användas.

Resultaten från projektet tyder ändå på att det skulle vara möjligt att använda de beräknade värme genomgångstalen för att automatiskt starta olika sotblåsningssekvenser. Men de stora fluktuationerna medför att det inte är trivialt att utforma ett så pass robust system som krävs. Det kvarstår alltså en del arbete för att utveckla och prova ut ett sådant system innan det skulle kunna användas i praktiken.

Vid sotblåsningar av överhettarna ökar *UA*-talen i genomsnitt med ca 50 %. När driften av pannan är jämn skulle ett tröskelvärde kunna användas för att initiera sotblåsning av överhettarna. Tyvärr varierar värdena mycket vid instabila driftförhållanden. Det är ingen större skillnad i beläggningstillväxt mellan primär- och sekundäröverhettaren vilket inte ger något motiv för att sotblåsa överhettarna individuellt. I det korta tidsperspektiv som studerats här verkar det som att överhettarna blir väl rengjorda efter varje sotblåsning.

De beräknade *UA*-värdena kan användas som indikatorer av driftpersonalen för att detektera om det sker en onormalt kraftig beläggningstillväxt vilket direkt skulle avspeglas som en sjunkande basnivå för *UA*-talen. Om de upptäcks i ett tidigt skede kan svårare beläggningstillväxt eventuellt motverkas genom att öka sotningsfrekvensen under en period.

För kokyten kunde inte värmeupptaget beräknas, utan istället mättes tryckfallet på gassidan med vilket en koefficient beräknades. Denna koefficient påverkas dock inte synligt av den beläggningsbildning som trots allt kan antas ske mellan sotblåsningarna. Detta pekar på att förträngningen orsakat av beläggningar i kokyten är för liten för att menligt påverka tryckfallet under normala förhållanden. Koefficienten skulle dock fortfarande kunna användas som en indikator för kraftiga igensättningar men i detta fall inte för att styra sotblåsningsintervallerna.

Vad gäller ekonomisern så visar mätningarna att de övre tubpaketen försmutsas i raskare takt än nedströms paket. För att jämna ut beläggningarna i ekonomisern och kanske undvika långsam hård beläggningstillväxt kan de övre paketen sotblåsas oftare än övriga. Sådana riktade sotblåsningar skulle kunna initieras automatiskt genom att studera värme genomgångstalet för detta paket jämfört med övriga. Nackdelen med ett sådant

förfarande är främst den ökade risken för erosionsskador från askpartiklar som dras med sotångan och ”blästrar” de ytterliggande tuberna. Erosionsslitaget från ångsotningen är redan i dagsläget betydande. Kanske är ljudsotning ett användbart komplement som skulle minska behovet av ångsotning.

Den ekonomiska kalkylen visar att kostnaden för ångsotning jämfört med vinsten av ökad verkningsgrad har liten betydelse så länge som bränslepriset är lågt, vilket är fallet med avfallsbränslen. Istället bestäms lämpligt sotningsintervall som en avvägning mellan att sotblåsa tillräckligt ofta för att undvika långsiktig uppbyggnad av beläggningar, men inte oftare än nödvändigt eftersom det medför onödigt erosionslitage på tuberna.

## 8 Rekommendationer och användning

Mätningarna som genomförts inom föreliggande projekt ger en grund för eventuell utveckling av ett automatiskt behovsanpassat styrsystem av sotblåsarna. Det återstår dock en del utveckling av lämplig databehandling (filtrering) och styrlogik innan ett sådant system skulle kunna implementeras. Om styrsystemet också ska kunna hantera onormala driftförhållanden (såsom låglast och driftstörningar) krävs antagligen en mer sofistikerad modell av pannan.

Eftersom man vid revisioner har observerat att det finns beläggningar kvar på ekonomiserns övre tubpaket som inte avlägsnats vid ordinarie sotblåsningar är det värt att överväga om dessa paket skulle sotblåsas någon extra gång per dygn. Eventuellt kan antalet sotblåsningar av hela ekonomisern samtidigt minska till tre gånger per dygn. Långsiktiga konsekvenser (minskad långsiktig beläggningstillväxt eller erosionsskador) av ett sådant förfarande går dock inte att förutsäga från de driftdata som loggats inom föreliggande projekt.

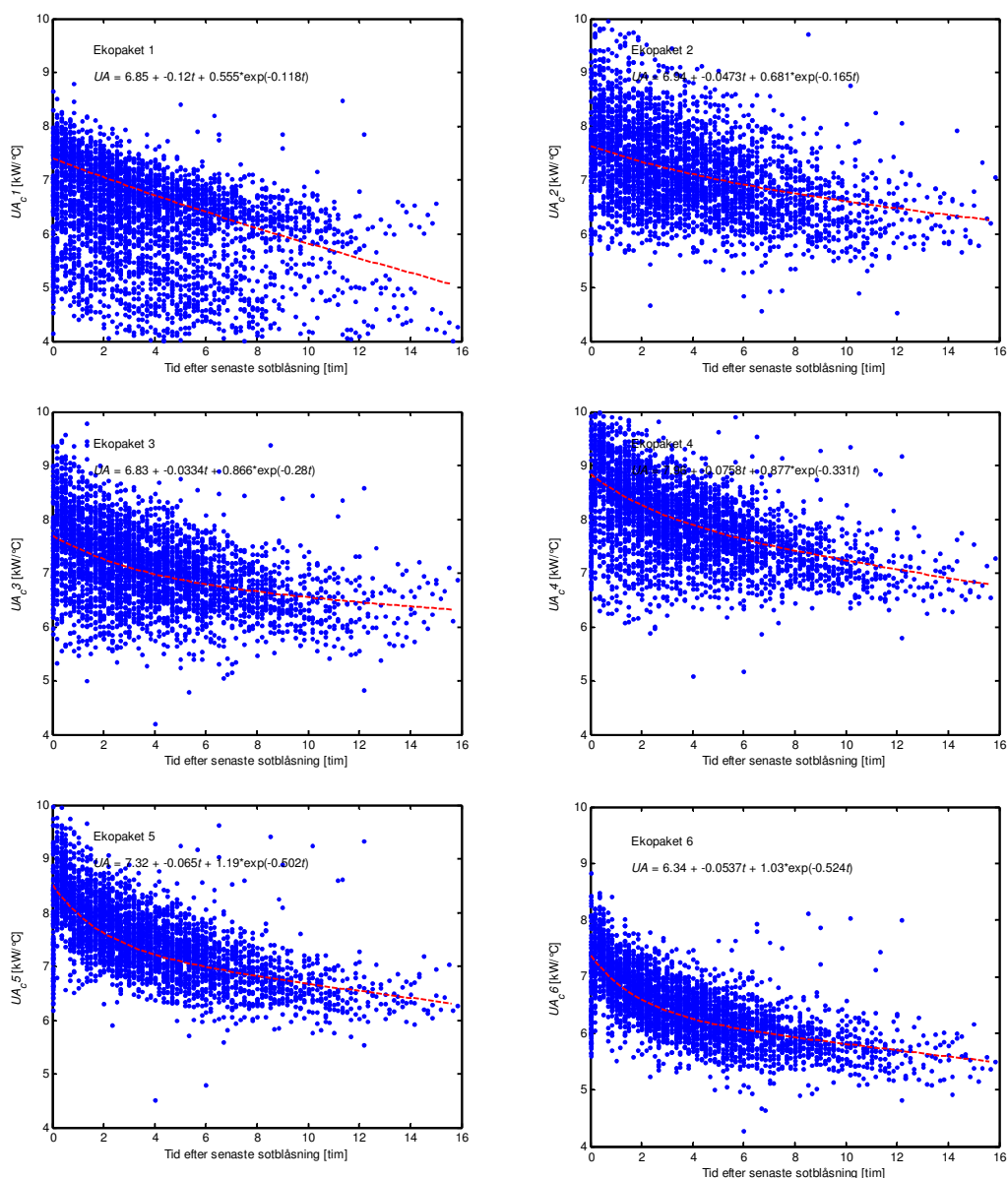
För att minska risken av erosionsskador kan ljudsotning provas. Erfarenheter av sådana system varierar, men om det fungerar skulle det minska behovet av ångsotning och minska slitaget. De temperaturgivare och beräkningsrutiner som installerats och använts inom föreliggande projekt är ypperligt lämpade för utvärdering av funktionen av ett ljudsotningssystem om det installeras. Det enda som skulle behövas för en utvärdering, utöver vad som redan finns, är en signal till pannans loggsystem som indikerar när ljudsotarna är igång.

## 9 Litteraturreferenser

1. Kjörk, A., *Behovsstyrd sotblåsning för bio- och avfallseldade pannor - inventering och teknikval*. Rapport nr. 841, Värmeforsk: Stockholm. **2003**.
2. Hjörnhede, A. and P. Henderson, *Sotningens inverkan på materialförluster för bio- och avfallseldade pannor*. Rapport nr. 970, Värmeforsk: Stockholm. **2006**.
3. Eklund, A. and Å. Rodin, *Sotningsmetodernas effektivitet och konsekvenser på förbränningsanläggningar för olika typer av bränslen*. Rapport nr. 878, Värmeforsk: Stockholm. **2004**.
4. Blom, E. and C. Ivarsson, *Förbättrad behovsstyrd sotning genom mätning av överförande tubernas egenfrekvens*. Rapport nr. 1018, Värmeforsk: Stockholm. **2007**.
5. Nilsson, T. and E. Ramström, *Optimerad sotning av pannan*. TPS-05/18, TPS Branschforskningsprogram: Nyköping. **2005**.

## A Värmegenomgångstal i ekonomisern

Loggade värden på UA-talen för de olika paketen i ekonomisern har plottats mot tiden efter senaste sotblåsning i Figur 28, för data insamlade under tre veckor med relativt stabil drift. Varje blå punkt representerar ett tiominutersmedelvärde. Avtagandet med tiden har även anpassats med hjälp av linjär regression till de röda streckade linjerna.



Figur 28. Loggade UA-värden mot tiden efter senaste sotblåsning för individuella ekopaket.

Figure 28. Logged UA-values vs. time since last sootblowing for individual banks in the economiser.





**WASTE REFINERY**

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut  
Box 857, 501 15 Borås  
[wasterefinery@sp.se](mailto:wasterefinery@sp.se)  
[www.wasterefinery.se](http://www.wasterefinery.se)