

## **Sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning – etapp 2**

Fredrik Niklasson, Anita Pettersson, Frida Claesson, Andreas Johansson, Anders Gunnarsson, Marianne Gyllenhammar, Anders Victorén och Göran Gustafsson



# **Sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning – etapp 2**

## **Reduced Bed Temperature in FB-Boilers Burning Waste – part II**

Fredrik Niklasson, Anita Pettersson, Frida Claesson, Andreas Johansson,  
Anders Gunnarsson, Marianne Gyllenhammar, Anders Victorén och Göran  
Gustafsson

Projektnummer WR-19  
År: 2010

**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

Detta projekt är utfört av främst SP och Högskolan i Borås med medverkan och stöd från Dalkia, Metso Power, Stena Metall och Borås Energi & Miljö inom ramen för Waste Refinery.

Ett varmt tack vill vi rikta till alla personer som bidragit till projektets utförande. Ett stort tack till framförallt driften på anläggningen, och då speciellt Anders Gunnarsson på Dalkia som har bidragit med stor entusiasm och engagemang.



## Sammanfattning

Detta projekt syftar till att utvärdera om sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning ger driftfördelar såsom minskad beläggingsproblematik i konvektionsstråket. Om så är fallet, skulle en sådan drift kunna ge färre oplanerade driftstopp, minskat behov av sotblåsning och ökad livslängd för överhettarna vid oförändrad ångtemperatur, eller eventuellt ett ökat elutbyte genom höjd överhettartemperatur.

Grunden för projektet utgörs av praktiska försök vid Ryaverket i Borås. Försökspannorna är två stycken parallella 20 MW<sub>t</sub> FB-pannor. Studien baseras på jämförande driftdata och mätresultat från två olika drifttillstånd av pannorna. Förutom de mätdata som normalt loggas i driftsystemet provtogs och analyserades bränsle, askor, partiklar samt bildade beläggningar.

Bäddaskans egenskaper förändras vid sänkt bäddtemperatur. De små agglomerat som finns i riklig mängd vid normal bäddtemperatur (här ca 870°C) hade försvunnit i proverna tagna vid sänkt bäddtemperatur. Detta har medfört att sandförbrukningen i anläggningen kunnat minskas med ungefär 25 % vid sänkt bäddtemperatur.

Vid sänkt bäddtemperatur ökade koncentrationen av klor i bäddaska och retursand medan den sänktes i askan från cyklon och textilfilter. I vändschaktsaskan uppmättes en svag ökning av klorinnehållet. Koncentrationen av HCl i rökgasen ökade när bäddtemperaturen sänktes. Detta kan vara en konsekvens av att mindre klor binds upp som alkaliklorider. Dessutom visar partikelmätningarna att andelen submikrona partiklar minskade under sänkt bäddtemperatur, vilket är en indikation på att mängden alkaliklorider i rökgasen minskat.

Mätningarna med beläggningssonder vid överhettarna visade generellt ca 20 % mindre påslagsmängder då bäddtemperaturen i medel minskats från 876 till 714°C. Klormängderna i beläggningarna hade också minskat. Vid materialtemperaturen 500°C (som motsvarar en ångtemperatur av ca 465°C) återfanns avsevärda mängder KCl i beläggningarna oavsett bäddtemperatur.

Den ekonomiska uppskattningen visade en besparing på ca 1000 kSEK per år genom att sänka bäddtemperaturen i pannorna i Borås. Det måste dock poängteras att det är en osäker uppskattning.

Resultatet är av intresse för anläggningsägare som kan förbättra driften i befintliga anläggningar genom att justera driftpunkten. Dessutom kan resultaten användas av panntillverkare för att modifiera designen av nya anläggningar.

Nyckelord: Avfallsförbränning, Fluidiserad bädd, Bäddtemperatur, Klor, Alkali

## Summary

This project focuses on evaluating whether lowered bed temperature in FB-boilers for waste combustion gives operational benefits, such as reduced fouling in the convection pass. If so, this mode of operation could reduce the number of unplanned boiler outages, reduce the need for soot blowing, and extend the lifetime of the superheaters at unaltered steam temperature.

The project is based on full-scale experiments performed at Ryaverket in Borås. The plant has two waste-fired 20 MW<sub>t</sub> FB-boilers. The study is based on a comparison between operational data and measurement results from two different operating conditions of the boilers. In addition to the data that normally are logged by the control system, samples of fuel, ashes, particles, and deposits were taken and subsequently analyzed.

The structure of the bed ash was altered by lowering the bed temperature. Under normal boiler operation, the bed ash contains many small agglomerates that disappeared when the bed temperature was lowered. Due to this, the sand consumption of the plant could be reduced by roughly 25 %.

At lowered bed temperature, the concentration of chlorine increased in the bed ash and in the recycled sand while it decreased in the ashes from the cyclone and fabric filter. The concentration of HCl in the flue gas increased as the bed temperature was lowered. This is considered a consequence of less chlorine forming alkali chlorides. Moreover, the particle measurements showed that the amount of submicron particles decreased during lowered bed temperature, which also is an indication of less alkali chlorides in the flue gas.

The deposit probes showed an approximate 20 % reduction of the fouling rate when the bed temperature was lowered from 876 to 714°C. The chlorine content also decreased in the deposits. For the deposit probes at 500°C, (corresponds to a steam temperature of 465°C) significant amounts of KCl were found in the deposits, even when the bed temperature was lowered.

An economical estimation of the consequences from lowering the bed temperature showed a saving of ca 1000 kSEK per year for the boilers in Borås. Please note that this is an uncertain estimate.

The results are of interest for plant owners that may improve the operation of existing plants by adjusting the operating point. Furthermore, the results can be used by boiler manufacturers to further improve the design of new facilities

Keywords: Waste combustion, Fluidised bed, Bed temperature



## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b>1</b>
1.1	PROBLEMDISKUSSION	1
1.2	PROBLEMFÖRMULERING OCH MÅL	1
1.3	AVGRÄNSNINGAR	2
<b>2</b>	<b>BAKGRUND</b>	<b>3</b>
2.1	BÄDDTEMPERATUR	4
2.2	FÖRSTUDIE	5
<b>3</b>	<b>MATERIAL OCH METODER</b>	<b>6</b>
3.1	FÖRSÖKSPANNA	6
3.2	FÖRSÖKSUPPLÄGG	8
3.3	MÄTMETODER	10
<b>4</b>	<b>RESULTAT OCH DISKUSSION</b>	<b>16</b>
4.1	DRIFT UNDER MÄTKAMPANJ	16
4.2	UPPMÄTTA BELÄGGNINGSMÄNGDER	19
4.3	KONCENTRATIONER AV HCL OCH SO <sub>2</sub> I GAS	23
4.4	PARTIKELSTORLEKSFÖRDELNINGAR	24
4.5	ÅSKANALYSER	26
4.6	ÅBO-METODEN	27
4.7	SEM-EDX	33
4.8	XRD	46
4.9	MASSBALANS AV FASTA MATERIAL UNDER MÄTNINGAR	48
<b>5</b>	<b>KEMISKA JÄMVIKTSBERÄKNINGAR</b>	<b>52</b>
5.1	BERÄKNINGSRESULTAT	53
<b>6</b>	<b>JÄMFÖRELSE AV DRIFTEN 2008 OCH 2009</b>	<b>59</b>
6.1	EKONOMISK UPPSKATTNING	67
<b>7</b>	<b>SLUTSATSER</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>LITTERATURREFERENSER</b>	<b>72</b>

## Bilagor

### A SEM-EDX ANALYER

- A.1 ASKOR
- A.2 BELÄGGNINGSRINGAR
- A.3 ECONOMISER

### B DRIFTDATA UNDER MÄTNINGAR



# 1 Inledning

## 1.1 Problemdiskussion

Avfallsförbränning är i de flesta fall betydligt mer krävande än förbränning av mer konventionella bränslen eftersom avfall ofta innehåller många olika material med varierande egenskaper. Om avfallet ska förbrännas för energiåtervinning ställs generellt stora krav på både förbränningsanläggning och rökgasrening. Även förbehandling av bränslet kan vara krävande, särskilt för FB-pannor som ställer högre krav på en jämn bränsletillförsel. Ett vanligt problem i avfallspannor är korrosion och påslag på överhettartuber vilket begränsar pannans ångdata och eventuellt dess tillgänglighet. Om tubpaketen har en kort livslängd i den svåra miljön ger detta upphov till en betydande underhållskostnad.

## 1.2 Problemformulering och mål

Detta projekt syftar till att utvärdera om en sänkt bäddtemperatur i avfallsförbränningspannor ger driftsfördelar såsom mindre slitage och påslag på värmeöverförande ytor (bla överhetarre) samt ändrade askflöden, ändrad förbrukning av additiv och en minskad risk för bäddagglomerationer. Målen med projektet i projektuppdraget har delats upp som:

- 1) Noggrant beskriva hur komponenter som alkali och klor påverkas av bäddtemperaturen genom: massbalanser, termodynamiska jämviktsberäkningar (Fact Sage), kemisk fraktionering av bränslen och askor, analys av askor med bland annat SEM-EDX.
- 2) Visa hur beläggingsbildningen och kvaliteterna på askorna påverkas av bäddtemperaturen med hjälp av bland annat beläggningssonder, partikelutsugssonder samt analyser av beläggningar, partiklar och askor.
- 3) Demonstrera effekter av kontinuerlig drift vid sänkt bäddtemperatur.
- 4) Utredda ekonomiska och miljömässiga konsekvenser av kontinuerlig drift av en avfallspanna vid låg bäddtemperatur. Detta resultat är nödvändigt för att anläggningsägare skall kunna fatta beslut om ändrade driftsbetingelser

Om den provade driftförändringen medför att överhettaren får ett minskat slitage skulle det kunna medge ett ökat elutbyte genom höjd överhettartemperatur, alternativt ökad livslängd för överhettarna vid oförändrad ångtemperatur.

Utvärderingen baseras på praktiska försök vid två 20 MW<sub>t</sub> bubblande fluidiserade bäddpannor för avfallsförbränning i Borås. Pannorna är levererade av Metso Power. Pannorna är pga. den svenska lagstiftningen, gällande NO<sub>x</sub> avgift, designade och driftmässigt optimerade för att minimera utsläppet av NO<sub>x</sub>.

Resultat från experimenten är intressanta för anläggningsägare som kan förbättra driften i befintliga anläggningar genom att justera driftsinställningarna. Dessutom skulle resultaten kunna användas av panntillverkare för att modifiera designen eller åtminstone optimera driftinställningen av nya anläggningar.

### **1.3 Avgränsningar**

Föreliggande arbete baseras på försök i avfallspannorna i Borås. Under försöken omkvotades luft och rökgasåterföringsflöden vid normal last utan att kringgå avfallsdirektivet att förbränning ska ske vid minst 850°C under minst två sekunder. Från en akademisk synvinkel skulle det ha varit önskvärt om bäddtemperaturen hade kunnat sänkas ytterligare samt hållits mer stabil än vad som åstadkoms under försöken. Men å andra sidan är resultaten som redovisas i föreliggande rapport hämtade direkt från fullskaleförsök under verkliga förhållanden, till skillnad mot noggrant kontrollerade experiment i laboratorieskala. Dock kan en del resultat vara anläggningsspecifika.

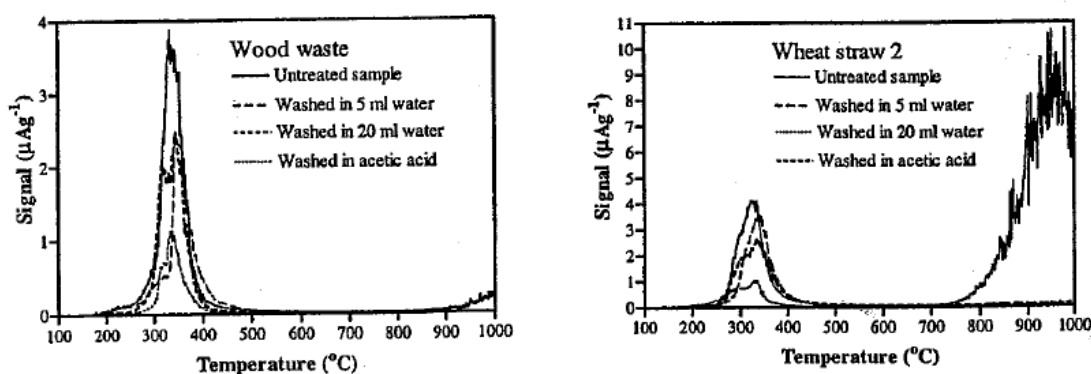
Utvärderingen bygger på direkt mätbara parametrar, även om avfallsbränslets heterogena karaktär (dvs egenskaper som varierar) begränsar resultatens noggrannhet.

## 2 Bakgrund

Avfallsförbränning har två huvudsakliga syften; kvittblivning av avfall samt energiåtervinning (främst el och värme). Vid avfallsförbränning begränsas ångtemperaturen från överhettarna av kraftig beläggingsbildning och korrosionsangrepp vid höga materialtemperaturer. Dessa problem förknippas ofta med relativt höga halter av främst alkaliklorider i flygaskan, men även bly- och zinkklorider kan ge bekymmer. Vanligtvis ökar överhettarnas beläggningstillväxt och korrosionsangrepp med materialtemperaturen (som följer ångtemperaturen). Temperaturen på den överhettade ångan begränsar pannans maximala elutbyte. Därför är en ökad ångtemperatur önskvärd, i synnerhet för avfallsförbränningsanläggningar i regioner där fjärrvärmesystem saknas.

Detta projekt syftar till att utvärdera om sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning ger lägre halter av alkaliklorider i konvektionsstråket. Om så är fallet, skulle en sådan drift kunna ge ett ökat elutbyte genom höjd överhettartemperatur, minskat behov av sotblåsning och eventuellt ökad livslängd för överhettarna vid oförändrad ångtemperatur.

Vid avfallsförbränning av rent hushållsavfall används ofta en bäddtemperatur runt 800-850°C, men i avfallspannorna i Borås som eldas med 70 % industriavfall och 30 % hushållsavfall är temperaturen ofta ca 870°C på grund av relativt stor andel industriavfall i bränslet. Kokpunkterna för kalium och natrium är under dessa temperaturer (774°C respektive 883°C) men eftersom alkalimetallerna i bränslet oftast inte återfinns i ren metallisk form så varierar temperaturen som alkalimetaller avgår vid beroende på bränslen. En del alkalimetaller är organiskt bundna och avgår med de flyktiga beståndsdelarna vid temperaturer mellan 300 och 400°C, se exemplen i Figur 1. Ytterligare alkalimetaller finns bundna i askan och avgår vid högre temperaturer (600-1000°C) [1].



Figur 1. Temperaturberoende avgång av alkali vid pyrolys av träbränsle (vänster) och vetehalm (höger), från ref. [1].

Figure 1. Temperature dependent release of alkali compounds during pyrolysis of wood (left) and wheat straw (right), from ref. [1].

Som exempel kan nämnas att alkalimetaller till största delen är organiskt bundna i trä, medan det är avsevärt mycket mer alkalimetaller bundna i askan i halm. Hur fördelningen är i ett blandat avfallsbränsle är osäkert. Efter avgången från bränslet kan alkalimetallerna

påverkas av sekundära reaktioner i bädden, där de flesta processer är temperaturberoende. På grund av systemets komplexitet, med många ingående kemiska element och faser som påverkas av både homogena och heterogena reaktioner är det svårt att teoretiskt förutsäga hur stor påverkan en sänkt bäddtemperatur får på alkalikoncentrationen i rökgasen. Därför är föreliggande projekt baserat på praktiska försök i full skala.

Förutsatt att sänkt bäddtemperatur minskar mängden alkalimetaller som följer med rökgasen så ökar alkalikoncentrationen i bottenbädden, vilket möjligtvis skulle kunna ge problem med agglomerering och sintringar. Å andra sidan motverkas detta av att bäddens sintringstendens generellt minskar med sänkt temperatur.

Det finns redan några pannleverantörer som designat och driftoptimerat sina FB-pannor för en sänkt bäddtemperatur, till exempel Lentjes avfallspanna Rowitec (ca 650°C) och Austrian Energy and Environments EcoFluid panna (630-830°C). (Lentje köptes upp av AE&E i december 2007.) Dessa låga bäddtemperaturer motiveras med att man vill undvika att smälta aluminiumfraktioner (Rowitec) och minska risken för bäddagglomerering (EcoFluid).

Det saknas tillgängliga arbeten där effekterna av sänkt bäddtemperatur studeras. Om en sänkt bäddtemperatur ger mindre överhettarkorrosion och ändrade emissioner (av exempelvis NO<sub>x</sub>) vore intressant att veta för anläggningsägare, både inför upprustning av befintliga FB-pannor och vid inhandling av nya. Slutsatser från projektet är också av intresse för panntillverkare vid design och optimering av framtida anläggningar.

## 2.1 Bäddtemperatur

Temperaturen i bottenbädden bestäms i huvudsak av tre olika processer: 1) Uppvärmning av fluidiseringsgasen till bäddtemperatur (primärluft + eventuell rökgas), 2) Uppvärmning och torkning av inkommande bränsle och 3) Värme som frigörs vid förbränning av bränslet. Av dessa processer är det den sista som är svårast att beräkna eftersom en okänd andel av bränslet brinner nere i bäddzonen och en stor del av de flyktiga beståndsdelarna brinner uppe i fribordet. En del av primärluftflödet passerar också bädden utan att ha tagit del av förbränningsreaktionerna, beroende på att luft och bränsle inte blir helt jämnt fördelat över bäddens horisontella tvärsnitt. Primärluften kan också passera bädden i bubblor och genom kortvariga kanaler i bädden som uppstår just när större bubblor ”briserar”.

Bränslet matas in i eldstaden över bädden, varvid en del bränsle börjar förgasas redan innan det når bädden (t.ex. tunnare plastbitar). En del finare kokspartiklar dras med av gasflödet och lämnar bädden, vilket innebär att inte heller all koks brinner där. Det är således svårt att veta hur mycket bränsle som når bädden, och ännu svårare att uppskatta hur mycket som faktiskt brinner där.

Från bädden slungas bäddmaterial, primärluft och bränslepartiklar upp i skvalpzonen där det skapas en anseelig omblandning som kan medföra en kraftig förbränning. Förbränningstemperaturen i zonen kan delvis styras med hjälp av rökgasåterföring i nedåtriktade register. Det är oftast varmare ovanför än i bädden när högflyktiga bränslen eldas. Till exempel visar uppmätta temperaturer i Boråspannorna att temperaturen i zonen ovanför bädden oftast är ca 100 till 150°C högre än i bädden. Temperaturskillnaden leder till att värme transporteras från skvalpzonen ner till bädden med strålning samt med

bäddmaterial som faller tillbaka efter att ha blivit uppkastat av briserande bubblor. Denna värmetransport är väsentlig för upprätthållandet av bäddtemperaturen men är svår att kvantifiera.

## 2.2 Förstudie

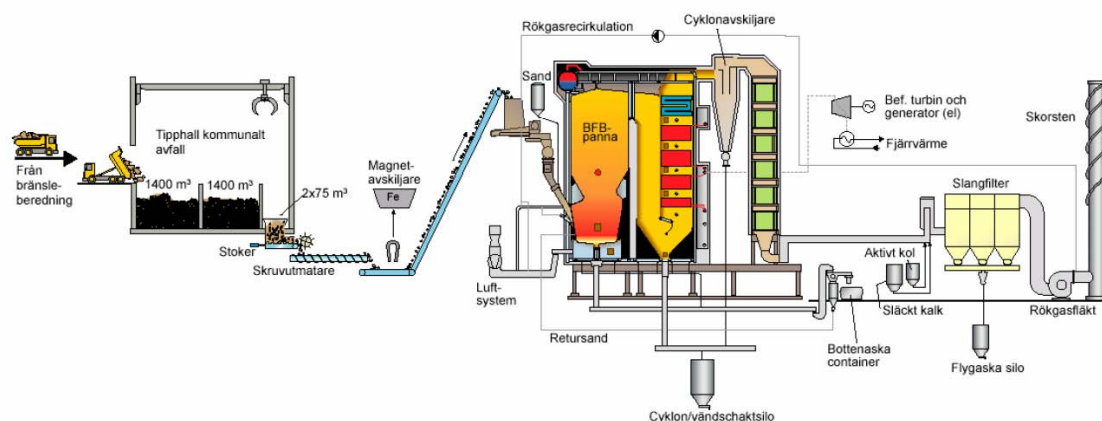
I en förstudie undersöktes möjligheterna att sänka bäddtemperaturen i avfallspannorna i Borås [2]. Flera metoder att sänka bäddtemperaturen testades. Som lägst var bäddtemperaturen nere på 630°C jämfört med normalt 870°C. Försöken utfördes under juni (2008) som var ovanligt varm vilket begränsade värmebehovet och medförde att det inte var konstant maxlast på avfallspannorna. Generellt så påverkade inte den sänkta bäddtemperaturen driftens stabilitet och vid samtliga driftsfall var temperaturen i eldstadens övre delar tillräckligt hög för att uppfylla avfallsdirektivets krav. Sammantaget så erhöles de förväntade resultaten från förstudien och slutsatsen är således att de aktuella pannorna i Borås kan köras på önskvärt sätt med bibehållen stabil drift och med tillräcklig temperatur i eldstadens övre delar. Med enbart omkvotning av luft och rökgasåterföring kunde bäddtemperaturen i försökspannorna sänkas mot 700°C, (630-730°C) beroende på bränslets fukthalt. För att hålla bäddtemperaturen under 700°C även då relativt torra bränslefraktioner kommer in krävs att omkvotningen kompletteras med vattenbegjutning av bränslet. Andra provade åtgärder, såsom att stänga av luftförvärmaren och öka askkyllningen, påverkade bäddtemperaturen i betydligt mindre omfattning.

### 3 Material och metoder

Grunden för projektet utgörs av praktiska försök vid avfallspannorna i Borås. Avfallspannorna är designade för bäddtemperaturer runt 850°C och det finns därför en viss begränsning av möjligheten att sänka bäddtemperaturen utan att göra en ombyggnad av anläggningen. I projektet sänktes bäddtemperaturen genom ökad rökgasåterföringen (rgå) till bädden samtidigt som en del av den ursprungliga primärluften istället tillfördes sekundär- och tertiärluftsregistren.

#### 3.1 Försökspanna

På Ryaverket i Borås finns två parallella likadana avfallseldade ”bubblande” fluidiserade bäddpannor på vardera ca 20 MW<sub>t</sub> med ångdata 50 bar och 405°C, se Figur 2. Pannorna som togs i drift 2005 levererades av Metso Power AB och är av den s.k. typen ACZ (Advanced Combustion Zone). Avfallspannorna betecknas internt som PVA1 och PVA2, dessa beteckningar kommer även att användas senare i rapporten för att skilja på data från de olika pannorna.



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

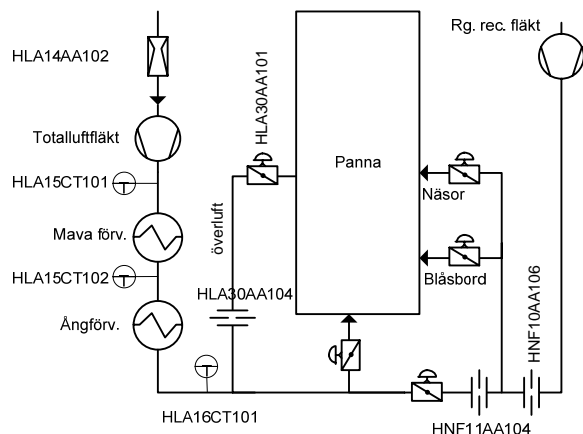
Figure 2. Sketch of one of two 20 MW<sub>th</sub> waste incinerators used for the experiments.

Bränslet som eldas är vanligtvis en blandning av 70 % verksamhetsavfall och 30 % hushållsavfall. På Sobacken utanför Borås bereds bränslet innan det transporteras med lastbilar till en tippshall vid Ryaverket. Komposterbart material har sorterats ut från hushållsavfallet vilket gör bränslet aningen torrare (med högre värmevärde) än från en motsvarande anläggning i en kommun där sådan utsortering inte sker. Från tippshallen 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 avfallsbränslet in till pannorna med Metsos så kallade ”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 bakåttändning. Varje panna har en bränsleinmatning. Vid inloppet till pannan är bränslestupet försett med ett blåsbord som sprider ut bränslet över bädden. För att



upprätthålla ångproduktionen och avfallsdirektivets krav  $850^{\circ}\text{C}/2\text{ s}$  även under en bränslestörning är pannorna försedda med varsin oljeeldad stödbrännare på 12 MW. I luftskåpet under eldstaden finns även uppstartsbrännare på 6 MW.

Förbränningsluften som tas från tipphallen (och eventuellt från pannhuset) transporteras via en totalluftfläkt genom två luftförvärmare innan flödet delas upp mellan primärluft och överluft, där det senare flödet fördelas mellan sekundär-, tertiär- och tvärluft. En förenklad schematisk skiss av gasflödena in till pannan ges i Figur 3 som ett komplement till Figur 2. Normalt hålls primärluftflödet tillräckligt högt för att säkerställa att ett minsta fluidiseringsflöde upprätthålls även om ingen rökgasåterföring tillförs eldstaden via botten. Primärluften går via en luftlåda under eldstaden in i eldstaden genom ett stort antal dysor i pannbotten. För att förbättra utmatningen av större obrännbara bitar som följt med bränslet används luftdysor som har sitt utblås riktat mot ett askutmatningsschakt vid mitten av pannbotten. Med syftet att ytterligare underlätta utflödet av bottenaska sluttar eldstadens botten svagt mot utmatningsschaktet. Vid normal drift börjar temperaturen regleras med hjälp av rökgasåterföring som blandas in med primärluften under dysbotten när bäddtemperaturer överstiger  $870^{\circ}\text{C}$ .



Figur 3. Förenklad schematisk skiss över luft och gasflöden in till pannan.

Figure 3. Simplified sketch of air and gas flows into the boiler.

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  $\text{NO}_x$ . Här är rökgastemperaturen typiskt mellan  $900$  och  $950^{\circ}\text{C}$ .

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, följt av en kokyta. Rökgasen har en temperatur av ca:  $350^{\circ}\text{C}$  när den passerar cyklonen uppströms de sex tubpaketen i ekonomisern där gasen kyls ned emot  $150^{\circ}\text{C}$ . Slutligen följer ett system för rökgasrening innan gasen går ut genom skorsten via rökgasfläkten.

En del av rökgasen återförs och fördelas till eldstaden via en separat rökgasåterföringsfläkt med tillhörande spjäll. Rökgasåterföringen till bädden går in till luftlådan under eldstaden och reglerar bäddtemperaturen. Rökgas tillförs även vid näsorna för att blanda om gaserna och hålla nere förbränningstemperaturen i zonen.

Grova askpartiklar och annat obrännbart material matas ut tillsammans med bäddmaterial via ett vertikalt vattenkyld utlopp centralt beläget i eldstadens botten. Materialet transporteras därifrån med en vattenkyld skruv till en trumsikt där grovt material avskiljs. 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 dessutom regelbundet från en gemensam sandsilo för att upprätthålla bäddhöjden och omsätta bäddmaterialet. Askan från vändschaktet (under tomschaktet) blandas med aska från cyklonavskiljaren och transporteras till en lagringssilo i väntan på deponi.

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. Insprutning av matarvatten mellan överhettarna sker för att hålla konstant utgående ångtemperatur.

### 3.2 Försöksupplägg

Försöken baseras på jämförande mätningar som genomförs under två driftfall:

- Sänkt bäddtemperatur, i texten nedan förkortat **SBT**
- Normaldrift som referensfall, i texten förkortat med **Ref.**

Under försöken med sänkt bäddtemperatur ställdes rökgasåterföringsflöden samt överluftkvoten manuellt. Totalluften reglerades från önskad respektive aktuell last vilken i sin tur styr bränsledoseringen. Syrekoncentrationen i rökgasen finjusterar bränsledoserarens utsignal.

Eldstadstemperaturerna varierar med bränslets värmevärde, som främst beror på fukthalten i bränslet. Normalt regleras bäddtemperaturen automatiskt med rökgasåterföring till bädden. Under föreliggande tester med SBT styrdes rökgasåterföringsflödet till bädden istället manuellt.

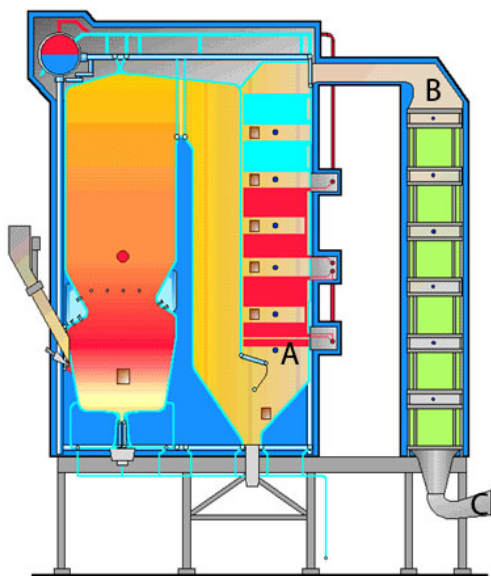
För att motverka alltför stora temperatursvängningar under långtidstestet av SBT krävdes manuella ändringar av luft och rökgasflöden, vilket ställde krav på observant driftpersonal. Ursprungligen var avsikten att modifiera styrsystemet så att bäddtemperaturen skulle regleras automatiskt även under de nya förutsättningarna med sänkt bäddtemperatur. Tyvärr visade sig en sådan förändring vara en mer omfattande uppgift än planerat. För att inte äventyra driftstabiliteten för anläggningen användes återigen den manuella styrning som visat sig fungera väl under förstudien.

Försöken inleddes med att pannorna ställdes om till drift med sänkt bäddtemperatur. Eftersom retursanden som cirkulerar i pannorna går via en gemensam silo, och därigenom

blandas, sänktes bäddtemperaturen i båda pannorna samtidigt. Pannorna gick sedan med en bäddtemperatur omkring 700°C i mer än tre dygn innan sondmätningarna och askprovtagningen skedde. Därefter ställdes pannorna om till normaldrift varefter likadana mätningar och provtagningar utfördes igen, en vecka senare. Förutom dessa provtagningar loggades panndriften kontinuerligt med befintligt styr- och loggsystem.

Mätningar med beläggningssonder och partikelutsugssonder utfördes närmast uppströms överhettarytorna i panna PVA1. Mätporten som användes är markerat med (A) i Figur 4. Utsug av gas för bestämning av HCl och SO<sub>2</sub> i gasfas skedde efter ekonomisern, position (C) i Figur 4. Dessutom genomfördes beläggningssondmätningar uppströms ekonomisern, position (B) i Figur 4. Då det uppkom problem med driften i PVA1 (pga. krånglande emissionsmätinstrument) när dessa mätningar skulle genomföras så skedde ekonomiserns beläggningssondmätningar i PVA2. Mätmetoder och analysmetoder beskrivs mer utförligt nedan.

Eftersom erfarenheterna från sänkt bäddtemperatur överlag var goda fortsatte pannorna att köras med sänkt bäddtemperatur efter det att försöken var avklarade. Det möjliggjorde en utvärdering av mer långsiktiga effekter genom att jämföra driftparametrar från 2008 (med normaldrift) med 2009, med sänkt bäddtemperatur. Dock valde verket att inte köra vid fullt så låg temperatur utan siktade in sig på lite under 800°C, vilket berodde på att den automatiska bäddtemperaturregleringen inte kunde användas. Jämförelsen mellan driftperioderna ges i kapitel 6.



Figur 4. Positioner för mätningar: A) Beläggningssonder och partikelstorleksmätning uppströms överhettare, B) Beläggningssond innan ekonomisern och C) position nedströms ekonomisern för mätning av HCl och SO<sub>2</sub>.

Figure 4. Positions for measurements: A) Deposit probes and particle size measurements, B) Deposit probes upstream of the economiser, C) Sampling to determine HCl and SO<sub>2</sub> in flue gas.

### 3.3 Mätmetoder

#### 3.3.1 Beläggningssond

Vid de jämförande mätningarna av beläggningstillväxt användes två likadana luftkylda beläggningssonder med en längd av 2 meter och en ytterdiameter av 38 mm. Ca 10 cm från sondspetsen placerades två provringar som under föreliggande mätningar var gjorda av 253 Ma, vilket är ett höglegerat stål för olika högttemperaturapplikationer. I sondmaterialet precis invid provringarna uppmäts den materialtemperatur som styr tryckluftflödet och kontrollerar materialtemperaturen. Under försöken kördes prover med materialtemperaturerna 435 och 500°C vid överhettarna. Temperaturen 435°C motsvarar nuvarande ångdata och 500°C är en förhoppning för framtiden. Då det fanns tillgång till två parallella mätportar användes två sonder samtidigt, inställda på olika materialtemperaturer. Vid beläggningmätningarna uppströms ekonomisern användes materialtemperaturen 230°C vilket är i nivå med nuvarande materialtemperaturer. Exponeringstiden var 2 timmar för samtliga beläggningmätningar.



Figur 5. Beläggningssonder som använts vid mätningarna.

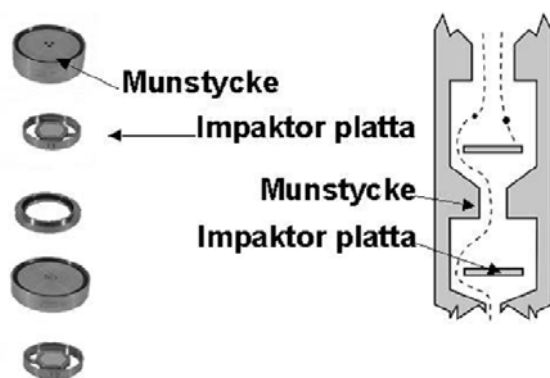
Figure 5. Deposit probes used in experiments.

Innan exponeringen i rökgasen har beläggningssringarna vägts på en kalibrerad våg med 0,1 milligrams noggrannhet. Efter beläggningmätningarna har de exponerade provringarna förvarats samt konditionerats i en excikator med silikagel innan de återigen vägs på samma våg.

Varje sondexponering gav två provringar vars beläggningstillväxt fastställdes genom vägning. En av ringarna analyserades med hjälp av SEM-EDX (se avsnitt 3.3.6). På den andra ringen analyserades beläggningen med avseende på grundämnen genom att beläggningssringarna först tvättades i vatten och sedan i en syrablandning. Vattenlösningen analyseras jonkromatografiskt (S, Cl) och de båda lösningarna analyseras med ICP-OES. Denna analysmetod kan detektera mycket små mängder av de analyserade ämnena, förutom kisel (Si) vars löslighet i syra inte kan garanteras vilket medför relativt stor mätosäkerhet av detta ämne. Följande ämnen har analyserats i dessa försök: Cl, S, Al, Ba, Ca, Cu, K, Mn, Na, P, Pb, Ti, Zn och Si.

### 3.3.2 Lågtrycksimpaktorn (LPI)

Den impaktor som använts under mätningarna är en DLPI (Dekati Low Pressure Impactor) som bygger på principen för en kaskadimpaktor. Genom att sänka trycket (med en sugpump) kan partiklar av betydligt mindre storlek avskiljas jämfört med vanliga kaskadimpaktorer. En impaktor ger en genomsnittlig masstorleksfördelning under den mätperiod under vilken partiklar samlas in. Före mätning prepareras impaktorplattorna (se Figur 6) med vägda folier. Efter mätningen vägs återigen folierna som nu blivit belagda med partiklar. DLPI:n fraktionerar upp rökgasens partiklar i olika partikelstorleksfraktioner på olika impaktorplattor som ligger i serie. I det första steget fastnar de största partiklarna och sedan avskiljs successivt mindre och mindre partiklar genom att rökgasen accelereras. Ett impaktorsteg utgörs av ett väldefinierat munstycke och en därpå följande impaktionsplatta. Partiklar större än en viss storlek impakterar (fastnar) på plattan. Övriga, mindre partiklar följer rökgasen till nästa stegs munstycke och impaktionsplatta på vilken partiklar större än en viss storlek (mindre än den förra storleken) fastnar. Därefter följer fler impaktorsteg med samma princip.



Figur 6. DLPI, principskiss.

Figure 6. DPLI, schematics.

Impaktorer delar upp partiklarna efter aerodynamisk diameter. Partiklar kan ha olika form och densitet. En partikel av en godtycklig form och densitet har en aerodynamisk diameter som motsvarar diametern hos en sfär med densitet  $1 \text{ g/cm}^3$  och samma sedimentationshastighet som den godtyckliga partikeln.

Vid impaktormätningen samlas askpartiklarna upp på en impaktorplatta på vilket det sitter en folie av polykarbonat. Efter provtagningen lossas folien med det uppsamlade materialet från plattan och vägs varefter folien förvaras i en kemiskt ren provburk som placeras i en excikator. De insamlade proverna analyseras sedan på samma sätt som beskrivits för beläggningsringarna ovan (3.3.1).

### 3.3.3 Gasanalys av HCl och SO<sub>2</sub>

Mätning av rökgasens koncentration av HCl och SO<sub>2</sub> gjordes nedströms efter ekonomisern (C i Figur 4). Mätningen sker genom att en uppmätt mängd rökgas sugs ut under 2 timmar och bubblas genom en lösning som binder HCl och SO<sub>2</sub> med 0,1 M NaOH (aq) respektive

0,3 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Lösningen analyseras och ger en genomsnittskoncentration över de 2 timmar som mätningen pågått.

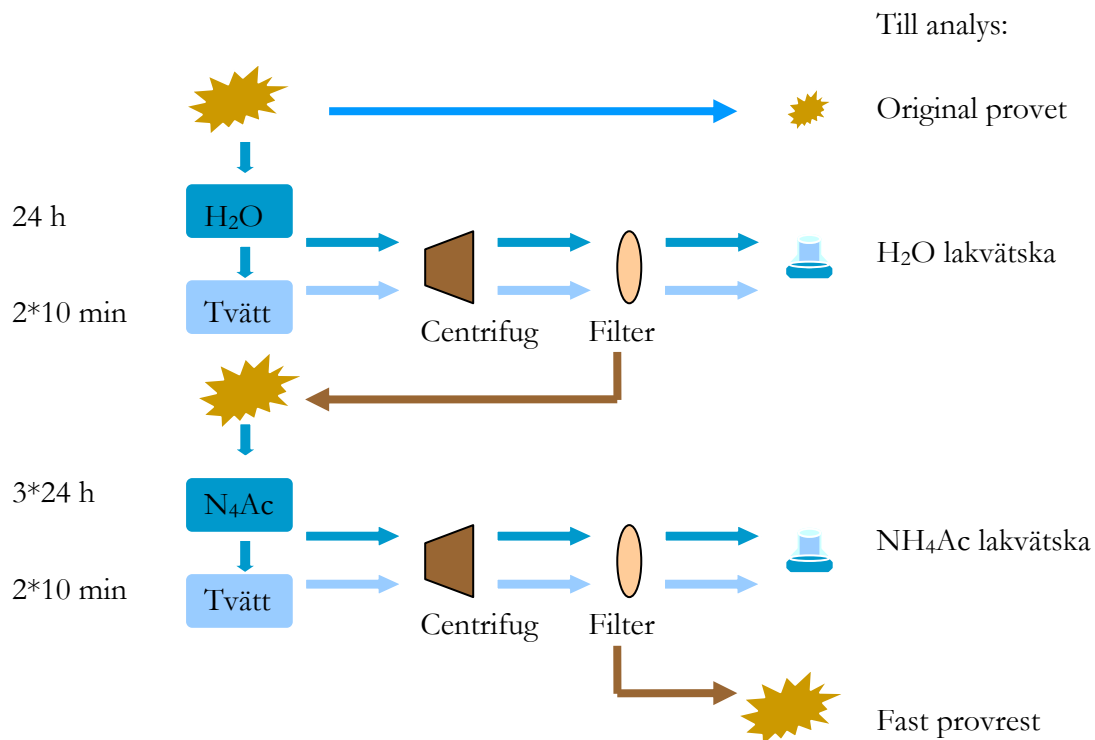
### 3.3.4 Insamling av bränsle och askor

Under mätdagarna insamlades bränsle- och askprover. För att erhålla representativa bränsleprover skedde provtagning av bränslet fyra gånger per dag i ungefär lika stora mängder. Proverna från samma dag blandades och skickades till analys. Askprover från bottenaska, retursand, vändschakt, cyklon och textilfilter togs en gång på förmiddagen och en gång på eftermiddagen per provdag. Alla askprover och bränsleprover delades i två lika delar, där en del analyserades av SP med standardiserade kemiska analysmetoder, och den andra delen analyserades av Högskolan i Borås med SEM-EDX och med en kemisk fraktioneringsmetod ("Åbometoden") vilken beskrivs nedan.

### 3.3.5 Åbometoden

Beroende på bränslets sammansättning får det olika egenskaper vid förbränning. Vanliga ämnen som orsakar problem i pannor är Cl och alkali (Na och K). Vid avfallsförbränning är det oftast Cl och Na som återfinns i höga koncentrationer medan det i biobränslen är Cl och K som skapar problem. Ett bränsles karakteristik beror inte bara på de ämnen som skapar problem utan även på ämnen eller föreningar som motverkar dessa.

Åbometoden eller kemisk fraktionering är en flerstegs lakningsmetod där man med hjälp av olika lösningsmedel kan förutse hur reaktiva olika ämnen är vid förbränning. Metoden som från början kallades "kemisk fraktionering" eller "utökad bränslekaraktärisering" utvecklades först av Benson [3] under mitten av åttiotalet för karaktärisering av olika brunkol (ligniter). Metoden användes senare av Baxter [4] och Miles [5] för brunkol och vissa biobränslen och slutligen vidareutvecklades metoden av Zevenhoven [6] till den metod (Åbo-metoden) som används idag och som passar olika biobränslen samt avfall. Metoden är även utvärderad för olika flygaskor vid samförbränning av olika bio- och avfallsbränslen [7]. Åbometoden består av tre lakningssteg med lösningsmedlen; H<sub>2</sub>O, 1 M Ammoniumacetat (NH<sub>4</sub>Ac) och 1 M HCl. I detta projekt var det de ämnen som är lösliga med H<sub>2</sub>O och NH<sub>4</sub>Ac som var av intresse eftersom de anses reaktiva under förbränningen. På grund av detta och att lakningarna är tidskrävande, utslöts HCl-steget och de ämnen som är syralösliga hamnade därmed i den fasta lakresten, Figur 7.



Figur 7. Schematisk bild av Åbometoden

Figure 7. Schematics of the Åbo methodology.

#### Steg 1: H<sub>2</sub>O

Ett bränsle/askprov på ca 35 g blandas med 6\*35 g destillerat vatten i en 250 ml centrifugflaska. Provet skakas på skakbord i 24 timmar i rumstemperatur. Provet centrifugeras/filtreras och hålls i uppsamlingskärl. Det fasta provet tvättas två ggr genom att 150-200 ml destillerat vatten tillsätts och provet skakas 5 min varefter det centrifugeras/filtreras. Tvättvattnet tillförs lakprovet och tvättproceduren genomförs en gång till. Lakprov + tvättvatten vakuumfiltreras genom 0,45 µm filter. Filtratets vikt och volym mäts och två 100 ml prov mäts upp och pH-justeras till pH 1 genom tillsats av HNO<sub>3</sub> och sparas för analys.

#### Steg 2: NH<sub>4</sub>Ac

Detta laksteg tar 3\*24 timmar och laktlösningen byts ut var 24:e timma. Det våta provet från steg 1 vägs och återförs till centrifugflaskan varefter 150-200 ml NH<sub>4</sub>Ac tillsätts. Provet skakas på skakbord 24 timmar vid rumstemperatur. Efter 24 timmar centrifugeras alternativt filtreras provet och lakvätskan hålls av till ett uppsamlingskärl. Ny NH<sub>4</sub>Ac tillsätts provet som sedan skakas ytterligare 24 timmar innan laktlösningen hålls av och ny NH<sub>4</sub>Ac tillsätts igen. Efter de tre extraktionerna med NH<sub>4</sub>Ac tvättas det fasta provet med vatten som i steg 1. Laktlösningen filtreras med 0,45 µm filter, vägs och volymmäts och två

100 ml prov mäts upp och pH-justeras på samma sätt som i steg 1 till pH 1 och sparas för analys.

Det fuktiga fasta provet vägs och torkas i ugn med temperaturen 105°C i minst 48 timmar. Det torra provet vägs och sparas för analys.

I steg 1 med H<sub>2</sub>O som lösningsmedel lakas vattenlösliga föreningar ut som t.ex. alkalialter. I steg två med ammoniumacetat som lösningsmedel lakas i första hand organiskt bundna ämnen som är jonbytbara ut som t.ex. Na, K, Ca och Mg när det rör sig om bränslen och karbonater och sulfater när det är askor som lakas. I den fasta lakresten återfinns karbonater och sulfater av andra metaller samt silikater, oxider och andra mineraler.

### 3.3.6 SEM-EDX

Elektronmikroskopi-elektron dispersive x-ray (SEM-EDX) kombinerar mikroskopi med elementanalys och ger på så sätt en bild av vilka grundämnen som återfinns i olika partiklar. Grundtekniken för elektronmikroskopi är att en tunn elektronstråle sveper över provet och att elektronerna som träffar provet ger upphov till olika händelser i provets översta atomlager. Vissa elektroner studsar mot atomytan och intensiteten i de reflekterade elektronerna motsvarar atomnumret på ämnena i provet och ger därmed en god bild av ämnesfördelningen över provet. Dessa elektroner detekteras med hjälp av en "back-scattered electrons" (BSE) detektor. Energin i elektronerna från ekeltronstrålen som träffar provytan leder också till att andra elektroner frigörs, sekundära elektroner, och dessa detekteras med en "secondary electrons" (SE) detektor och är de signaler som ger själva SEM bilden.

EDX-detektorn, se Figur 8A, detekterar röntgenstrålning som emitteras när energin i elektronstrålen exciterar en elektron i ett inre atomskal i provet. När en elektron från ett yttre skal med högre energi sedan faller ner och fyller det uppkomna elektronhållet frigörs energi i form av röntgenstrålning som detekteras. Varje ämne har sin specifika våglängd och på så sätt får man en elementanalys av provet. De olika analyserna kan göras på flera sätt:

1. I små punkter (spot) eller mindre areor (area), då får man en större noggrannhet av elementsammansättningen just i det området
2. Som en scanning över hela det valda provområdet, då får man en karta för varje ämne där ljusa områden visar förekomst av det specifika ämnet. På så sätt kan man se vilka ämnen som återfinns i olika partiklar och hur de korrelerar men andra ämnen.

Prov från bäddaska, retursand och vändschaktsaska togs ut och göts in i epoxy, Figur 8C. Provytan slipades ned och polerades för att få en genomskärning av askpartiklarna, Figur 8D. Slipning och polering gjordes antingen helt utan smörjmedel eller med 98%-ig alkohol eftersom flera av de föreningar som finns i askan är vattenlösliga eller reagerar med vatten. De finare askorna, cyklonaska och textfilteraska, går inte att gjuta in i epoxy på grund av sin finkornighet men lämpar sig bra för provhållare (stubbar) med kladdigt kolpapper. Även beläggningsringarna analyserades med SEM-EDX. Analyserna gjordes på en provyta mitt på vindsidan (0°) och en på läsidan (180°).





Figur 8. A) Elektronmikroskop, SEM B) Provkammare, öppen C) Epoxiingjutna prov D) Slip och polermaskin för provberedning.

Figure 8. A) SEM (Scanning Electron Microscope), B) Test chamber, C) Epoxy molded samples, D) Grinding and polishing tool for sample preparation.

### 3.3.7 XRD

För att bestämma vilka kristallina faser som fanns i askfraktionerna användes röntgendiffraction (XRD). De XRD data som redovisas här är framtagna med pulverdiffraktometer Siemens D5000, röntgenrör med Cu karakteristisk strålning med våglängden 1.54 Å och scintillationsdetektor. Data samlades i 2theta området 10-70 grader. Identifiering av möjliga kristallina föreningar (detektionsgräns 1-2vikt%) gjordes med hjälp av JCPDS databas version 2010.

## 4 Resultat och diskussion

### 4.1 Drift under mätkampanj

Pannans last och temperaturerna i bädden och eldstaden visas i Figur 9 med sänkt bäddtemperaturfallet (SBT) till vänster och normaldrift (Ref) till höger. Det skilde en vecka mellan försöken. I figuren är tidsperioderna när beläggningssonder var införda markerat överst med blått, samplingsstiderna för partikelstorleksfördelningar är markerat med grönt och samplingsstiderna för mätning av HCl och SO<sub>2</sub> är markerat med rött.

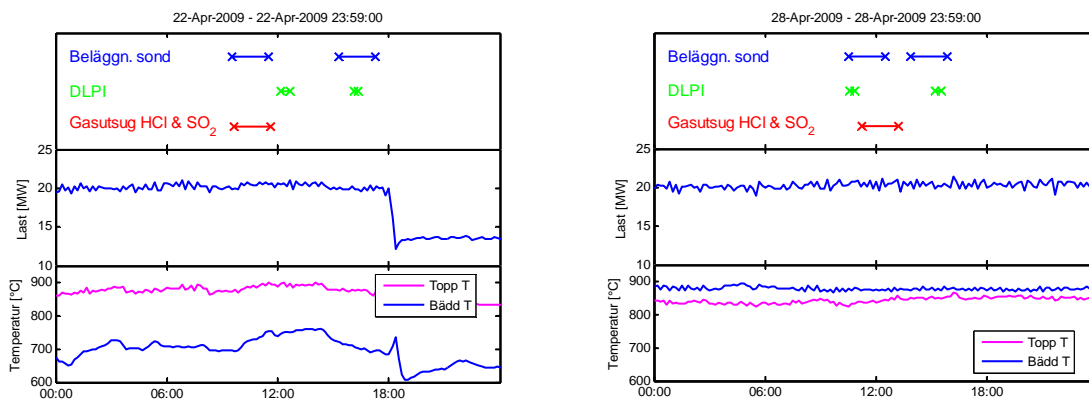
Figur 9 visar att pannlasten var relativt konstant. Efter det att mätningarna var klara SBT-dagen gick pannan över till oljedrift vid 18:00, på grund av servicearbete på emissionsmätsystemet, vilket förklarar nedgången i last. Eftersom det skedde efter de dubbla överhettarmätningarna var klara påverkas inte resultaten av detta. Däremot flyttades beläggningsmätningarna vid ekonomisern till PVA2 eftersom de skedde dagen efter driftstörningen på PVA1. För att undvika alltför många figurer redovisas inte driften grafiskt för PVA2, men driftdata under beläggningsmätningarna vid ekonomisern finns i Appendix B (Tabell 14)

De undre graferna visar med blå linjer bäddtemperaturen, som varierade en del under SBT eftersom den automatiska bäddtemperaturregleringen var fränkopplad. Oturligt nog inträffade dessutom ett brandtillbud vid en annan del av anläggningen under förmiddagen, vilket påkallade driftpersonalens uppmärksamhet. Därför noterades och motverkades inte en bäddtemperaturökning förrän temperaturen nått upp till ca 750°C. Med inkopplad reglering låg bäddtemperaturen avsevärt högre (och jämnare) under normaldrift till höger. Under förmiddagens mätning (SBT) med beläggningssonder och provtagning för HCl och SO<sub>2</sub> steg temperaturen i bädden ungefär 60°C. Under eftermiddagens beläggningsmätningar sjönk däremot bäddtemperaturen. I samma grafer visar den röda linjen uppmätt temperatur under eldstadens tak. Trendmässigt följer temperaturerna i bädd och eldstadstopp varandra, men topptemperaturen varierar mindre än bäddtemperaturen vid SBT. Topptemperaturen var något lägre vid normaldrift jämfört med drift med sänkt bäddtemperatur.

Tillförd mängd luft och rökgas visas i Figur 10. Inga större variationer inträffade under dagarna, dock ökade rökgasåterföringen något på bekostnad av luftflödet under eftermiddagen vid SBT före den andra beläggningsmätningen. En jämförelse mellan försöksdagarna visar att det totala gasflödet var högre under normaldriftfallet (Dag 2). Rökgasåterföringsflödet till bädden var dock högre Dag 1, vilket krävdes för att kyla bädden.

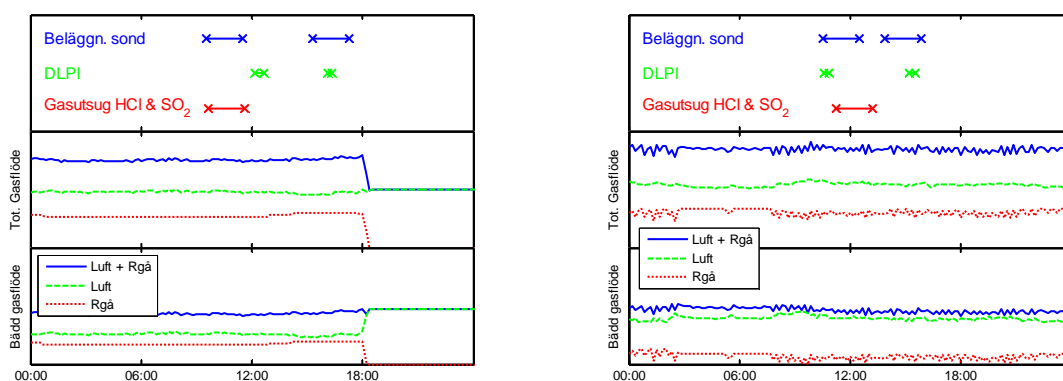
Figur 11 visar uppmätta gaskoncentrationer under försöksdagarna. En jämförelse visar att syrenivån var lite högre under referensfallet. Även NO<sub>x</sub> och ammoniak var högre under referensfallet. Dock steg NO<sub>x</sub> emissionen under försöket med sänkt bäddtemperatur. Notera att emissionsmätningarna slutade att fungera någon timma innan lasten gick ned vid försöken med sänkt bäddtemperatur, detta syns tydligast på NO<sub>x</sub>, vars koncentration minskar kraftigt. Medelvärden för panndriften under mätperioderna återfinns i tabellform i Appendix B.

Bränsleanalyserna från mättagarna finns i Tabell 1. Bränslet var lite fuktigare under SBT försöken och innehöll då också mer svavel, mer natrium men mindre kalium. Totala mängden alkalimetaller (kalium + natrium) i bränslet var aningen högre under försöken med sänkt bäddtemperatur.



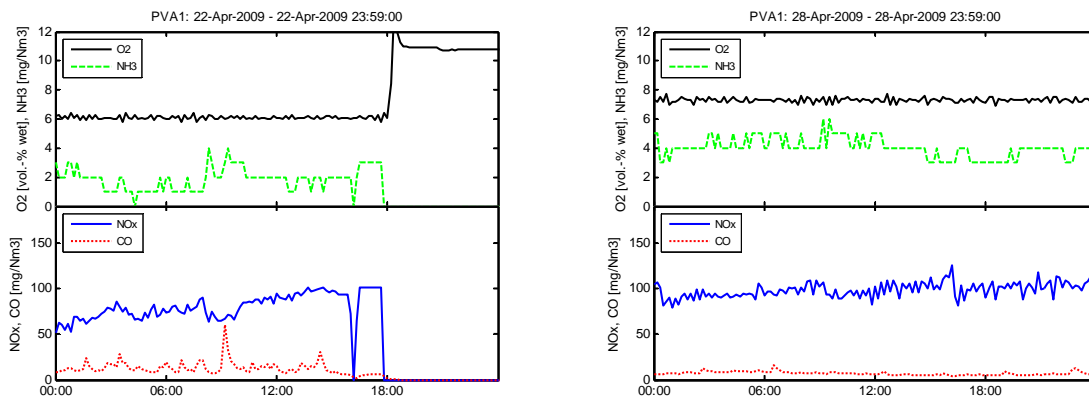
Figur 9. Last och temperaturer i eldstaden under de olika mätningarna som genomfördes i PVA1 under de tidsperioder som visas i översta rutan. Vänster) SBT, Höger) Ref.

Figure 9. Boiler load and temperatures in furnace during measurements in PVA1 during the time intervals shown on top of the graphs. Left) SBT, Right) Ref.



Figur 10. Gasflöden in till eldstaden, totalt (mitten) och genom bädden (underst) Vänster) SBT, Höger) Ref.

Figure 10. Gas flow into furnace, total (middle) and through bed (bottom). Left) SBT, Right) Ref.



Figur 11. Uppmätta gaskoncentrationer i PVA1 från pannans loggssystem. Vänster) SBT, Höger) Ref.

Figure 11. Measured gas concentrations in PVA1 from boiler log system. Left) SBT, Right) Ref.

Tabell 1. Bränsleanalys på torrt bränsle där inget annat anges.

Table 1. Fuel analysis, on dry basis unless stated otherwise ("vått" = wet).

BränsleProv		SBT	Ref
<b>Total Fukt (vått)</b>	Vikt-%	35,7	33,1
<b>Värmevärde (vått)</b>	MJ/kg	10,92	11,63
<b>Torrt prov</b>			
<b>Aska</b>	Vikt-%	19	18
<b>Svavel</b>	Vikt-%	0,35	0,20
<b>Klor</b>	Vikt-%	0,49	0,47
<b>Kol</b>	Vikt-%	46	46
<b>Väte</b>	Vikt-%	6,0	6,1
<b>Kväve</b>	Vikt-%	1,1	1,1
<b>O (diff)</b>	Vikt-%	27	28
<b>Värmevärde</b>	MJ/kg	18,4	18,6
<b>Al</b>	g/kg	12	11
<b>Si</b>	g/kg	46	35
<b>Fe</b>	g/kg	9,8	4,7
<b>Ti</b>	g/kg	2,5	2,3
<b>Mg</b>	g/kg	3,1	2,9
<b>Ca</b>	g/kg	27	26
<b>Na</b>	g/kg	8,1	6,4
<b>K</b>	g/kg	3,6	4,4
<b>P</b>	g/kg	1,4	1,2
<b>Spårämnen</b>			
<b>As</b>	mg/kg	29	13
<b>Cd</b>	mg/kg	0,4	1
<b>Pb</b>	mg/kg	120	120
<b>Cu</b>	mg/kg	960	1200
<b>Cr</b>	mg/kg	110	100
<b>Ni</b>	mg/kg	22	16
<b>Zn</b>	mg/kg	600	530
<b>Mo</b>	mg/kg	4	4
<b>V</b>	mg/kg	12	11
<b>Co</b>	mg/kg	5	5
<b>Sb</b>	mg/kg	15	13

## 4.2 Uppmätta beläggningsmängder

Vid mätningar av beläggningstillväxten vid överhettarna användes två likadana sonder som stacks in nästan samtidigt i port A och B i manluckan som visas i Figur 12. Denna lucka är placerad i pannan som position A i Figur 4. De två sönerna stacks in 1,0 m från väggens insida (vidden på rökgasstråket är ca 4 meter). Sönerna reglerades mot olika materialtemperaturer (435 och 500°C). Avsikten med den simultana mätningen var att bägge sönernas provringar skulle utsättas för samma exponering vid händelse av driftändringar och bränslevariationer. Resultaten visar dock att det under alla mätningar blev avsevärt mer beläggningar på provringar från position B. Snedfördelningen beror antagligen på en ojämn strömningsbild eftersom porten är placerad ganska snart efter det att rökgasströmmen vänt uppåt. För att det inte ska bli fel när bäddtemperaturens och materialtemperaturens inverkan på beläggningstillväxten studeras kan således bara provringar från samma position jämföras med varandra.

För varje driftfall gjordes två beläggningmätningar vid överhettarna. Tidsperioderna framgår av Figur 9 till Figur 11. Driftparametrarnas medelvärden (samt min och max) framgår av Tabell 13 i Bilaga B. Ingen sotblåsning genomfördes under beläggningmätningarna, vilket skulle kunna ha påverkat resultaten. Foton av provringar från de olika positionerna och deras viktökning visas i Tabell 2. Foton är tagna från vindsidan (0°).











Figur 12. Mätportar i manlucka under överhettarna.

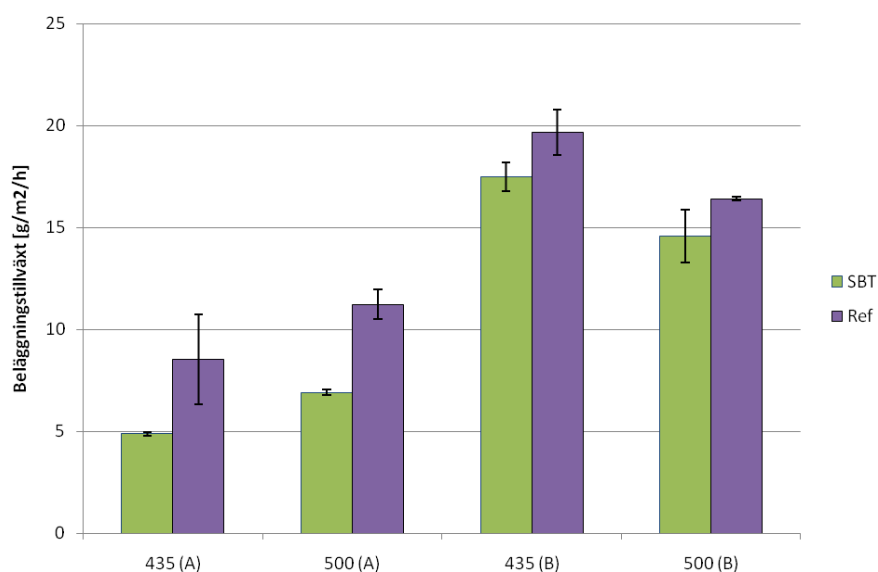
Figure 12. Measurements ports below super heaters.

Viktökningarna av båda ringarna som satt på sönerna har omräknats till beläggningstillväxter i Figur 13. Det framgår tydligt att beläggningstillväxten beror kraftigt på vilken mätport som studeras. Av större intresse är att i samtliga positioner och materialtemperaturer minskade beläggningstillväxten vid sänkt bäddtemperatur. I medeltal minskade beläggningstillväxten vid överhettarna med drygt 20 %. Bäddtemperaturen under försöksperioderna hade då i medel minskats från 876 till 714°C. En annan observation från Figur 13 är att i Position (A) ökade, som väntat, beläggningstillväxten med materialtemperaturen, men av någon anledning minskade tillväxten med temperaturen i Position (B).

Tabell 2. Foton och viktökning av provringar efter exponering vid överhettare i två olika mätportar (A och B i Figur 12). Olika materialtemperaturer radvis.

Table 2. Photos and gained weight of sample rings after exposure at the super heaters in two different ports (A and B in Figure 12). Different material temperatures by row.

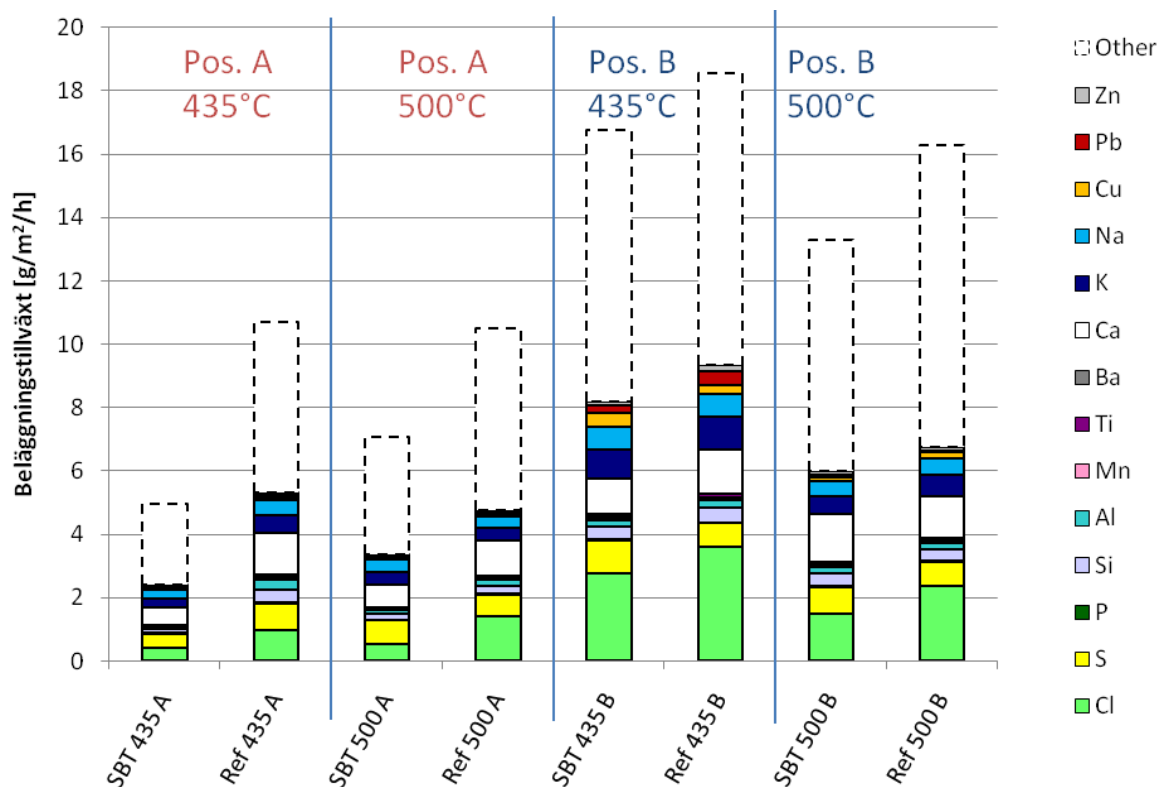
	Port A		Port B	
	SBT	Ref	SBT	Ref
<b>435°C</b>				
<b>Vikt (mg)</b>	17,8	38,4	60,1	66,5
<b>500°C</b>				
<b>Vikt (mg)</b>	25,3	37,6	47,6	58,4



Figur 13. Uppmätta beläggningstillväxter uppströms överhettarna. Referensfall med blå staplar och sänkt bäddtemperatur med gröna. Staplarna grupperade efter mätport och materialtemperaturer. Felstaplarna anger variationen mellan provringar.

Figure 13. Measured deposit growths upstream of super heaters. Reference case with blue bars and reduced bed temperature (SBT) in green. Bars grouped by measurement port and material temperatures. The error bars indicate the difference between test rings.

De kemiska analyser som utfördes på belägningarna, med standardiserade analysmetoder, gav resultat som redovisas i Figur 14. För att nå upp till uppvägda totalvikter har staplarna fyllts på med streckade segment ("other"). Denna okända del består antagligen av en hel del syre bundet som oxider. I botten av staplarna ligger klor (Cl) och det är värt att notera att klormängden har sjunkit i alla jämförbara positioner och materialtemperaturer när bäddtemperaturen har sänkts.

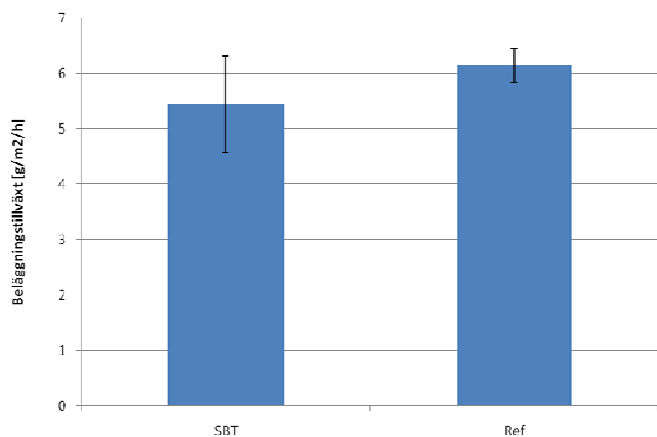


Figur 14. Beläggningstillväxter vid överhettarna uppdelat på analyserade ämnen. De olika driftfallen jämförs med varandra parvis efter position och materialtemperatur.

Figure 14. Deposit growth at superheaters divided by elements analyzed. The different modes of boiler operation compared in pairs by position and material temperature.

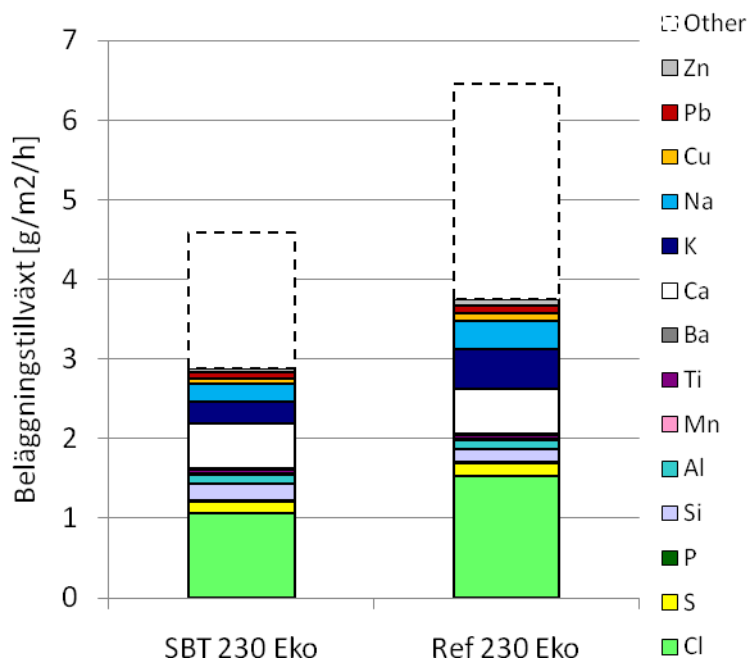
Viktökningarna av beläggningarna som exponerats uppströms ekonomisern (PVA2, driftdata i Bilaga B, Tabell 14) med en materialtemperatur av 230°C visas i Figur 15. Staplarna i figuren är medelvärdet av de två ringarna som samtidigt satt på sonden och de individuella värdena indikeras med felstaplarna i figuren. Den kemiska analysen av beläggningarna från ekonomisern visas i Figur 16. De två ringar som analyserades kemiskt och jämförs i Figur 16 uppvisade en större viktskillnad än de två andra ringarna som exponerades samtidigt (jämför Figur 15), vilket möjligtvis orsakats av att en del av beläggningen kan ha fallit av vid uttagandet av sonden. Om klormängden i beläggningarna räknas om till massandel av beläggningen så blir skillnaden mellan driftfallen inte lika stor som i Figur 16, men fortfarande tydlig (>10% reduktion av Cl vid SBT). Alkaliandelen minskade också (med ca 25 %) samtidigt som svavelinnehållet ökat. Zinkandelen var samma för fallen medan kalciumandelen ökat med mer än 25 %.

En parameter som ger information om beläggningens beskaffenhet är förhållandet mellan svavel och klor. Ett högt värde är oftast ett föredra då svavelföreningar i allmänhet är något mindre kladdiga och korrosiva än klorföreningar. Svavel till klorkvoten i de analyserade beläggningarna visas i Figur 17. Denna kvot var betydligt större vid drift med sänkt bäddtemperatur, vilket ger en indikation på att beläggningarnas egenskaper förbättrats, även om de fortfarande är att klassas som mycket besvärliga.



Figur 15. Uppmätta beläggningstillväxter vid ekonomiser.

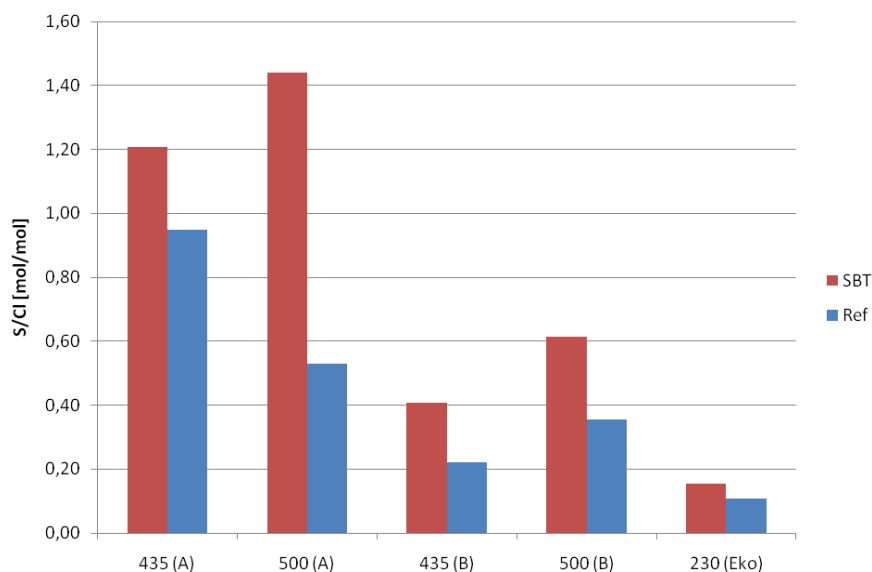
Figure 15. Measured deposit growths at economizer.



Figur 16. Beläggningstillväxter vid ekonomisern uppdelat på analyserade ämnen

Figure 16. Deposit growth at economizer divided by elements analyzed.





Figur 17. S/Cl kvoter i analyserade beläggningar. På horisontella axeln anges materialtemperatur och position.

Figure 17. S/Cl ratios of deposits analyzed. On horizontal axis, the material temperatures and positions are given.

### 4.3 Koncentrationer av HCl och SO<sub>2</sub> i gas

Mätningar av HCl och SO<sub>2</sub> under två timmar varje försöksdag gav koncentrationer enligt Tabell 3 som också visar loggade driftparametrar under mätperioderna. Vid sänkt bäddtemperatur uppmättes avsevärt högre koncentrationer av HCl i gasen (660 mg/Nm<sup>3</sup> respektive 530 mg/Nm<sup>3</sup> vid 11% O<sub>2</sub>). Värt att notera här är att bäddtemperaturen steg med 60°C under mätningen i sänkt bäddtemperaturfallet. Detta kan ha drivit av klor som funnits bundet i bädden och därmed gett högre koncentration än vad som är representativt. Det verkar ändå som att sänkt bäddtemperatur förhöjer koncentrationen av HCl i rökgasen, möjligtvis som en konsekvens av att det bildas mindre alkaliklorider (vilket är ett viktigt syfte med att sänka bäddtemperaturen). Den klor som inte bildar alkaliklorider binds delvis in i bäddmaterial och bottenaska, men om inget additiv tillförs bädden blir utflödet av Cl med bottenaskan ändå lite i förhållande till inkommande klormängd i bränslet. Eftersom emissioner av HCl är oönskade behöver mer HCl fångas i rökgasreningssystemet om bäddtemperaturen sänks. Rökgasreningssystemet vid Borås pannorna utgörs av ett halvtorr system där kalktillförseln regleras utifrån uppmätta emissioner av HCl och SO<sub>2</sub>. Med detta rökgasreningssystem förbrukas märkbart mer kalk som en negativ konsekvens av den sänkta bäddtemperaturen. Emissionsnivån efter rökgasreningen förblev oförändrad.

Den uppmätta koncentrationsskillnaden vad gäller SO<sub>2</sub> är för liten för att denna enstaka mätning ska föranleda några slutsatser. Dessutom var svavelinnehållet i bränslet högre vid SBT proverna, se Tabell 1.

Tabell 3. Uppmätt HCl och SO<sub>2</sub> (vid aktuell O<sub>2</sub>) med driftparametrar under mätningen.

Table 3. Measured SO<sub>2</sub> and HCl (at actual O<sub>2</sub>) with operational parameters during sampling.

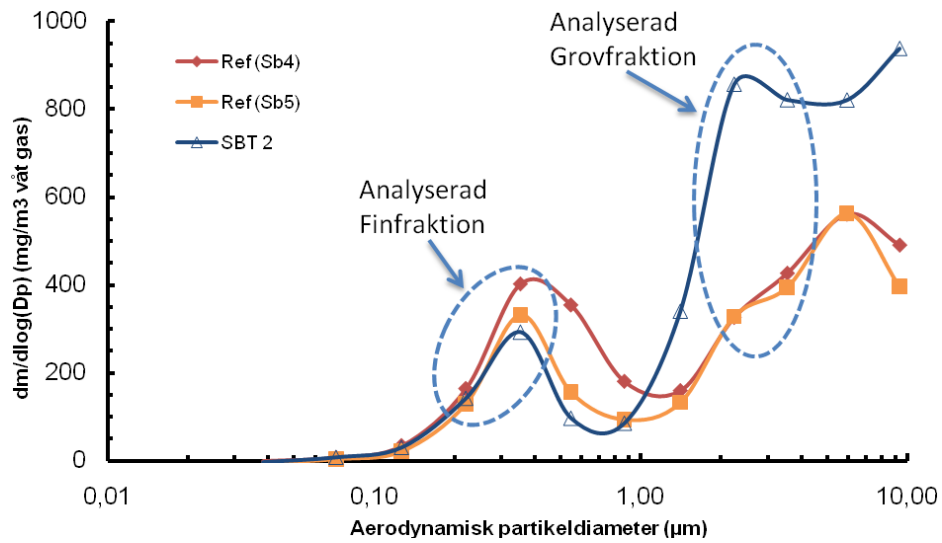
	SBT			Ref		
	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max
T <sub>bädd</sub> (°C)	725	694	754	874	870	883
O <sub>2</sub> (vol.-%, tg)	7,9	7,6	8,1	9,9	9,5	10,3
CO (mg/Nm <sup>3</sup> tg, 11% O <sub>2</sub> )	13	8	19	6	5	9
H <sub>2</sub> O (vol.-%)	16	16	17	13	13	14
Totalluft (Nm <sup>3</sup> /s)	7,3	7,0	7,4	8,3	8,0	8,5
Rgå Totalt (Nm <sup>3</sup> /s)	4,0	4,0	4,0	4,4	3,9	4,9
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> , tg, 11% O <sub>2</sub> )	<b>660</b>			<b>530</b>		
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , tg, 11% O <sub>2</sub> )	<b>111</b>			<b>114</b>		

## 4.4 Partikelstorleksfördelningar

### 4.4.1 DLPI mätning

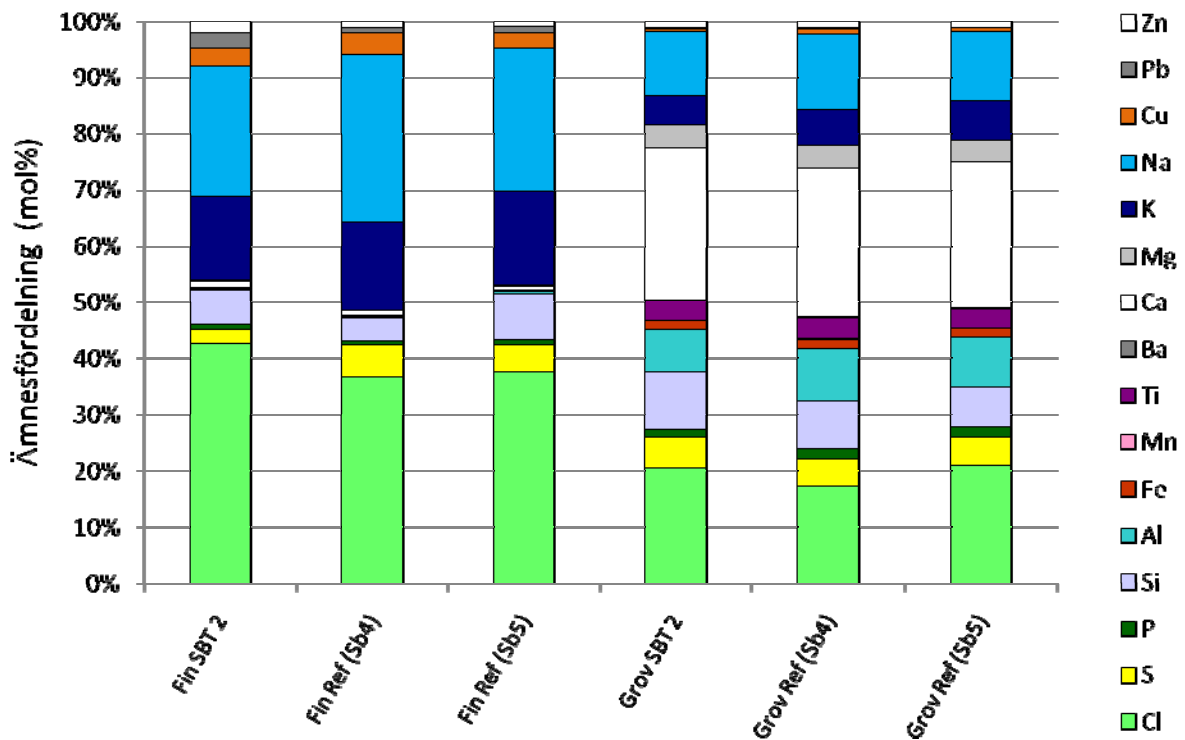
I vändschaktet, precis uppströms (nedanför) första överhettaren sögs partiklar ut till en lågtrycksimpaktor (DLPI). Sonden fördes in genom port (C) i Figur 12 med ett insticksdjup på 1,1 m. För varje driftfall gjordes två mätningar där utsugna partiklar samlades upp på folier i en uppvärmd impaktor. Den första mätningen utfördes under sänkt bäddtemperatur. När denna provtagning var klar visade det sig att det fångats för mycket partiklar vilket medfört överbäring mellan impaktorstegen. Vid efterföljande provtagningar minskades den utsugna gasmängden, men resultaten från första mätningen vid sänkt bäddtemperatur blev dessvärre oanvändbara (därav endast en mätning vid sänkt bäddtemperatur i Figur 18). Uppmätta partikelstorleksfördelningar redovisas i Figur 18 som visar att mängden submikrona partiklar (< 1 µm) var lägre under försöken med sänkt bäddtemperatur. Å andra sidan ökade mängden supermikrona partiklar (> 1 µm). Då alkaliklorider främst återfinns som submikrona partiklar är det kanske främst den fraktionen som är viktig för beläggingsbildningen. Orsaken till den ökade mängden supermikrona partiklar är oklar, men kan möjligtvis bero på att retursandflödet ökats vid driften med sänkt bäddtemperatur.

Två utvalda storleksfraktioner som avser representera submikrona och supermikrona partiklar analyserades kemiskt. Dessa analyserade storleksfraktioner är inringade och benämns ”Finfraktion” respektive ”Grovfraktion” i Figur 18. (”Grovfraktion” kanske är en missledande benämning då det fortfarande är fina partiklar i förhållande till bäddmaterialet som är mer än 100 ggr grövre.) Analysresultaten från de olika storleksfraktionerna redovisas som procentuell molfördelning i Figur 19. Det framgår tydligt att det som väntat finns betydligt mer av både alkalimetaller (natrium och kalium) och klor i finfraktionen. I grovfraktionen återfinns större andelar av aluminium, kalcium och magnesium. Detta är ämnen som antagligen inte blivit förångade i eldstaden. Koppar och bly finns det mer av i finfraktionerna. Det återfanns något högre andel klor i partiklarnas finfraktion från fallet med sänkt bäddtemperatur och ungefär samma andel i grovfraktionen. Att det finns något större andel i finfraktionen vid sänkt bäddtemperatur kanske hänger samman med att den totala mängden submikrona partiklar minskat. Alkaliinnehållet i partiklarna var överlag mindre i provet från sänkt bäddtemperatur. De relativt små skillnaderna i partikelsammansättning mellan driftfallen föranleder inte några långtgående slutsatser. Analysmetoden ger tyvärr inte någon information hur de kemiska bindningsformerna påverkats.



Figur 18. Uppmätta partikelstorleksfördelningar med DLPI före överhettarna.

Figure 18. Measured particle size distributions using DLPI upstream of super heaters.



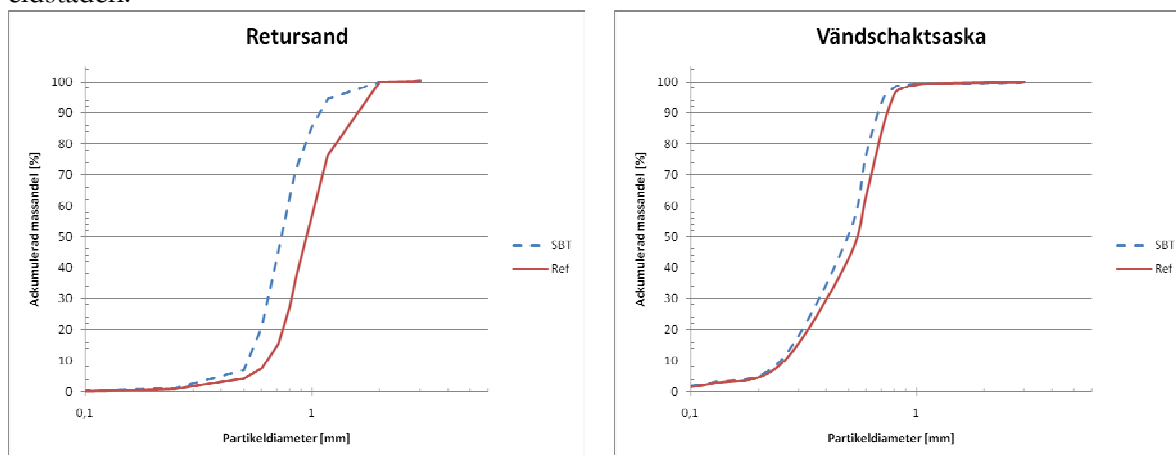
Figur 19. Fördelning av kemiskt analyserade ämnen i utvalda storleksfraktioner i Figur 18.

Figure 19. Distribution of chemically analyzed elements of selected size fraction in Figure 18.

#### 4.4.2 Retursand och vändschaktsaska

Storleksfördelningar bestämdes även för uttagna prover av retursand och vändschaktsaska, med resultat enligt Figur 20. Det blev en markant förskjutning mot finare partiklar i retursanden när pannorna kördes med sänkt bäddtemperatur, medan vändschaktsaskan bara blivit marginellt finare. Vid sänkt bäddtemperatur hade retursanden betydligt färre partiklar med diameter över 1 mm, vilka delvis består av agglomerat i referensfallet. Att retursanden fått en finare storleksfördelning kan förutom minskad agglomerering också bero på att retursandflödet ökades när pannorna kördes med sänkt bäddtemperatur. Ett ökat transportflöde kan nöta på partiklarna och ge en ökad finfraktion. Retursandens flöde beror på manuella inställningar av driftpersonalen som upptäckt ökande mängd bäddmaterial i pannan när bäddtemperaturen sänkts, vilket föranledde en ökad bottenaskutmatning med ökat flöde av retursand som följd. En alternativ åtgärd hade kunnat vara att ytterligare minska tillförseln av färsksand, men det började man inte med förrän efter det att testerna var genomförda.

Att inte vändschaktsaskans storleksfördelning påverkats mer än den gjort beror antagligen på att den mest bestäms av strömningsbilden i pannan, där endast partiklar under en viss aerodynamisk diameter lämnar eldstaden. Av de partiklar som följt med rökgasen ut ur eldstaden faller de största partiklarna ned i vändschaktet medan de allra finaste partiklarna följer med gasströmmen upp mot överhettarna. Kanhända består den ökade ”finandelen” i retursanden mest av partiklar som trots allt är för grova för att följa med rökgasflödet ut ur eldstaden.



Figur 20. Partikelstorleksfördelningar bestämda med siktning. Vänster) Retursand, Höger) Vändschaktsaska.

Figure 20. Particle size distributions determined by sieving. Left) Recycled bed material, Right) Ash from flue gas duct.

#### 4.5 Askanalyser

Askanalyserna i Tabell 4 visar att klorkoncentrationerna var högre i bäddaska, retursand och vändschaktsaska vid SBT medan den var oförändrad i cyklonaskan och lägre i textilfilteraskan. Vid sänkt bäddtemperatur ökade koncentrationen S, Fe och Mg i alla askor medan P och Ti ökade i alla askor förutom bäddaskan. Som redan har nämnts var svavelflödet in i pannan med bränslet högre under körningen av SBT-fallet än i Ref-fallet vilket delvis förklarar de förhöjda koncentrationerna. Men varför de största skillnaderna i

svavelkoncentration återfinns i retursanden är inte lika självklart. Det troligaste är dock att det sitter som  $\text{CaSO}_4$  eftersom även Ca koncentrationerna är höga. Na koncentrationen ökade i alla askor förutom retursand och cyklonaska och K minskade i alla askor förutom textilfilteraskan.

Tabell 4. Analyser av askor.

Table 4. Analysis of ash fractions.

Prov	Huvudelement	Bottenaska		Retursand		Vändschakt		Cyklonaska		Textilfilter	
		SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref
S	g/kg	2,6	1,3	9,1	1,4	6,6	3,4	17	13	16	15
Cl	g/kg	0,8	0,3	2,4	0,4	1,8	1,5	20,1	21,8	142	170
Al	g/kg	55	63	59	65	70	68	112	100	21	16
Si	g/kg	302	312	277	304	295	316	162	171	32	28
Fe	g/kg	16	15	24	17	31	25	31	28	7,9	7,9
Ti	g/kg	2,8	4,5	8,1	6,6	6,3	5,3	16,6	16,2	9,8	7
Mn	g/kg	0,6	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	1,6	1,7	0,7	0,5
Mg	g/kg	9,1	8,8	7,4	6,3	9,2	7,4	20	19	9,9	7,3
Ca	g/kg	59	62	86	70	71	53	159	160	313	325
Ba	g/kg	1,3	2,7	1,9	1,8	1,6	1,5	2,8	2,6	1,3	1
Na	g/kg	50	42	30	30	27	24	22	23	15	13
K	g/kg	19	24	22	24	20	23	12	15	3,0	1,8
P	g/kg	1,4	1,7	2,5	1,7	3,1	3,1	6,1	6,2	4,2	2,5
<b>Spårelement</b>											
As	mg/kg	23	46	49	65	32	20	30	34	48	77
Cd	mg/kg	1	1	1	1	1	1	9	6	49	65
Co	mg/kg	18	14	14	8	6	8	32	42	11	6
Cr	mg/kg	230	320	600	420	270	200	520	330	330	230
Cu	mg/kg	5600	4300	2000	1800	4700	6100	5000	3500	7500	6600
Mo	mg/kg	24	20	23	22	20	20	22	22	19	16
Ni	mg/kg	180	52	120	66	110	90	160	140	67	46
Pb	mg/kg	730	1300	380	920	500	340	1000	670	3400	3700
V	mg/kg	40	40	40	36	38	36	60	55	29	20
Zn	mg/kg	2500	3000	2500	3100	2900	2700	7500	5500	5200	4600
Sb	mg/kg	76	190	350	300	130	120	200	210	400	440

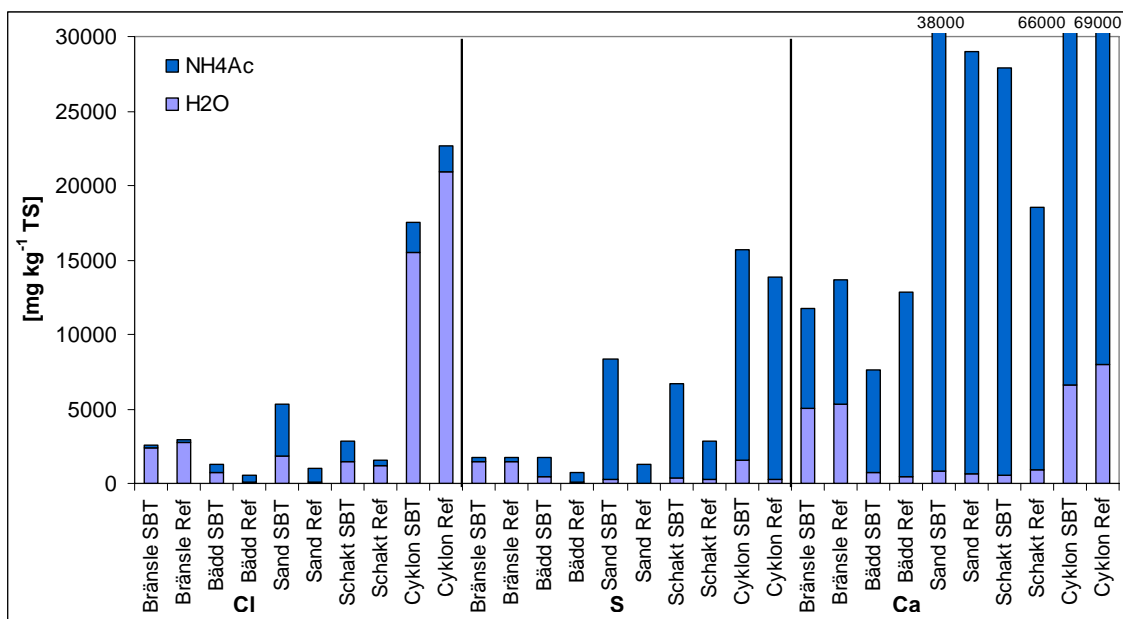
Tabell 1, visar att As var den av metallerna som varierade mest i bränslet mellan Ref- och SBT-fallet. Koncentrationen mer än fördubblades i bränsleflödet in för SBT-fallet och ändå var det bara i vändschaktsaskan som koncentrationerna ökade. Kadmium ökade något i cyklonaska men minskade i textilfilteraskan. Krom ökade i alla askor utom bäddaskan och fanns också i lite högre koncentration i bränslet in. Koppar däremot fanns i lägre koncentration i bränslet från SBT-fallet men ökade ändå i de flesta askorna. Bly koncentrationen sänktes i bädd, retursand och textilfilter och ökade i vändschakt- och cyklonaska. Zink som fanns i högre koncentration i SBT bränslet ökade i vändschakt-, cyklon-, och textilfilteraskan.

## 4.6 Åbo-metoden

Kemisk fraktionering (Åbo-metoden) användes för karaktärisering av avfallsbränsleprover från de två förbränningsförsöken samt på fyra av de fem olika askfraktionerna i vardera fallet. De fyra askfraktioner som analyserades var bäddaska, retursand, vändschaktsaska och

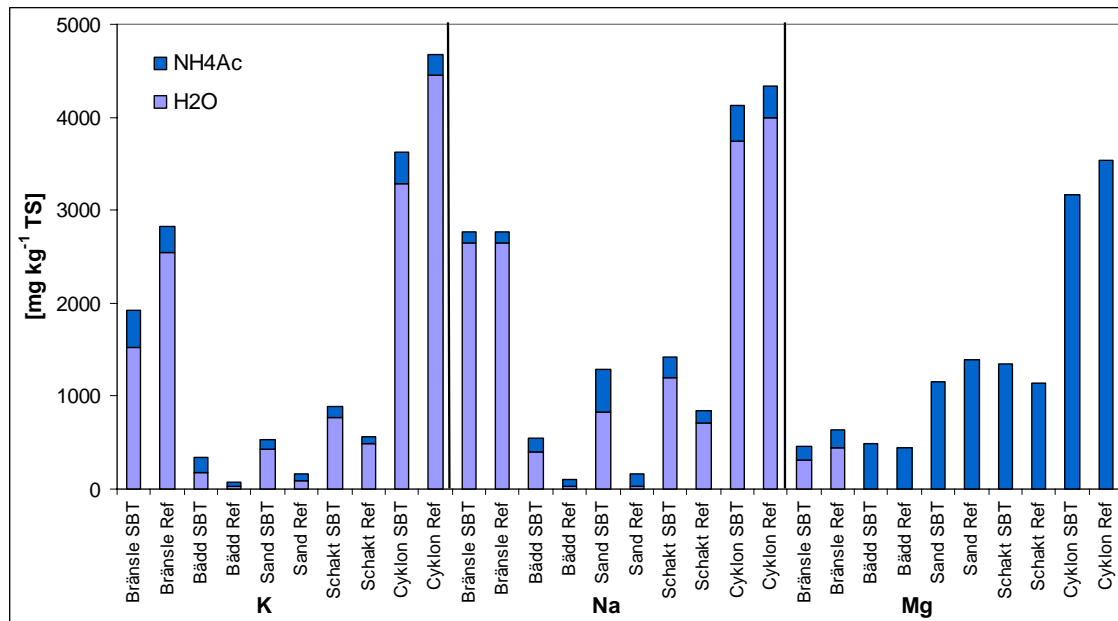
cyklonaska. Textilfilteraskan lakades inte på grund av sitt höga innehåll av bränd kalk och sin mycket fina partikelstorlek (submikron). Resultaten av Åbometoden visade att nästan all Cl löste sig i fraktioneringen förutom en liten mängd som återfanns i den fasta resten i Ref falllets bädd, retursand och vändschaktsaska. Detta beror på att i de tre askfraktionerna (bädd, retursand och till viss del vändschaktsaska) med hjälp av Åbometoden ger svar på vad som sitter på sandpartiklarna och inte vad som finns i dem eftersom sanden inte är löslig i varken vatten eller acetat. Fraktioneringarna av avfallsbränslet visar att det fanns något mer H<sub>2</sub>O och NH<sub>4</sub>Ac-lösligt Cl in med bränslet i Ref-fallet än i SBT-fallet. Koncentrationen löst Cl var högre både i bäddaska, retursand och vändschaktsaska i SBT-fallet, Figur 21. Även koncentrationen löst Na, K och S var högre i dessa askor, se Figur 21 och Figur 22. Den lösta delen av Na och K utgör dock bara högst någon procent av det totala innehållet i dessa askor medan däremot den lösta fraktionen av S utgör 70-100% av det totala svavelinnehållet, se Tabell 5. Störst skillnad hittades i resultatet mellan retursandsproverna där koncentrationen löst Cl var över 5 ggr högre i SBT-fallet jämfört med Ref-fallet och koncentrationen S nästan 7 ggr så hög. I två av askorna, retursand och vändschaktsaska, var även koncentrationen löst Ca högre i SBT-fallet medan den i bäddaskan var lägre. Genomgående var andelen ammoniumacetatlösligt Ca stor i askorna och härstammar främst från CaSO<sub>4</sub>.

I laktlösningarna från cyklonaskan var det bara lösligheten av två ämnen som skilde sig nämnvärt mellan de två fallen; för Cl och K var koncentrationerna nästan 30 % lägre i SBT-fallet.



Figur 21. Resultat från Åbometodens H<sub>2</sub>O- och NH<sub>4</sub>Ac-steg för avfallsbränsle, bäddaska, retursand, vändschaktsaska och cyklonaska. Halter av löst Cl, S och Ca.

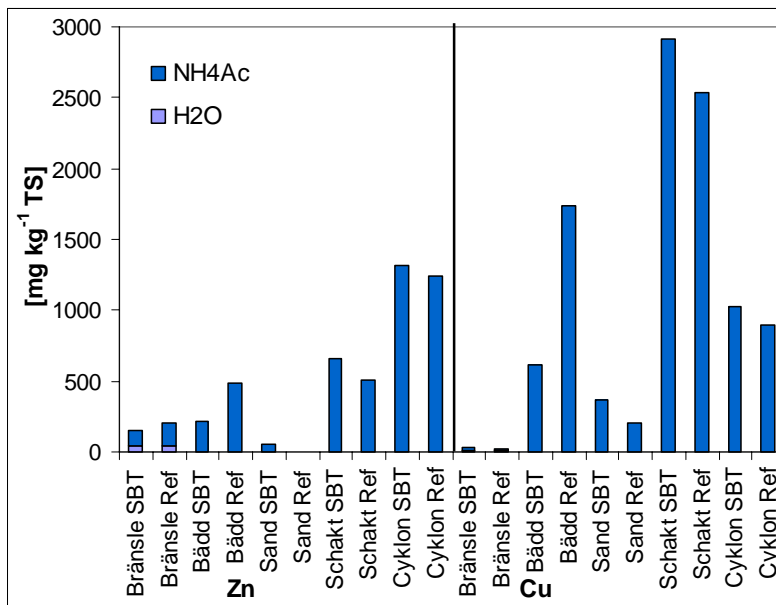
Figure 21. Results from the Åbo method H<sub>2</sub>O- and NH<sub>4</sub>Ac-steps for the fuel, bed ash, recycled bed material, gas chute ash and cyclone ash. Concentrations of Cl, S and Ca.



Figur 22. Resultat från Åbometodens H<sub>2</sub>O- och NH<sub>4</sub>Ac-steg för avfallsbränsle, bäddaska, retursand, vändschaktsaska och cyklonaska. Halter av löst K, Na och Mg.

Figure 22. Results from the Åbo method H<sub>2</sub>O- and NH<sub>4</sub>Ac-steps for the fuel, bed ash, recycled bed material, return shaft ash and cyclone ash. Concentrations of K, Na and Mg.

I analyserna av tungmetaller och spårämnen var det Zn och Cu som hittades i högst koncentrationer både i bränslen och askor, se Tabell 4, och som också löstes i hög grad i alla prov förutom retursanden se Figur 23. Både halten Zn och Cu minskade i bäddaskan vid sänkt bäddtemperatur men ökade däremot lite i retursanden. Halterna ökade också något i de finare askfraktionerna. För alla askfraktionerna hade laklösningarna från NH<sub>4</sub>Ac-steget en blå färg vilket visar förekomsten av kopparkomplex i någon form. Laklösningarna från vändschakt- och cyklonaskorna hade de djupaste blå färgerna och den högsta koncentrationen lösligt Cu hittades i NH<sub>4</sub>Ac-steget för SBT-fallet. Även Pb och Cr fanns i höga koncentrationer i bränslen och askor men löste sig inte nämnvärt, se Tabell 6 och Tabell 7. Den lilla del bly som löstes minskade i alla askor förutom vändschaktsaskan i SBT-fallet och andelen löst Cr minskade i alla askor utom vändschakt och cyklon. Ingen av de diskuterade metaller verkar dock ha någon betydelse i det här fallet.



Figur 23. Resultat från Åbometodens H<sub>2</sub>O- och NH<sub>4</sub>Ac-steg för avfallsbränsle, bäddaska, retursand, vändschaktsaska och cyclonaska. Halter av löst Zn och Cu.

Figure 23. Results from the Åbo method H<sub>2</sub>O- and NH<sub>4</sub>Ac-steps for the fuel, bed ash, recycled bed material, return shaft ash and cyclone ash. Concentrations of Zn and Cu.



Tabell 5. Analysresultat av huvudämnen från Åbometodens H<sub>2</sub>O-, NH<sub>4</sub>Ac-steg och fasta lakrest jämfört med halten i det ursprungliga askprovet för bäddaska, retursand, vändschaktsaska och cyklonaska.

Table 5. Analysis results of main elements from the Åbo Methods leaching steps and solid residue compared to the concentrations in the original samples, for bed ash, recycled bed material, return shaft ash and cyclone ash.

Bäddaska					Vändsch.						
		Aska mg kg <sup>-1</sup> TS	H2O mg kg <sup>-1</sup> TS	NH4Ac mg kg <sup>-1</sup> TS	Rest mg kg <sup>-1</sup> TS			Aska mg kg <sup>-1</sup> TS	H2O mg kg <sup>-1</sup> TS	NH4Ac mg kg <sup>-1</sup> TS	Rest mg kg <sup>-1</sup> TS
Cl	SBT	800	697	597	0	Cl	SBT	1800	1472	1403	0
	Ref	300	61	446	663		Ref	1500	1210	362	249
Al	SBT	55200	27	0	45250	Al	SBT	70100	350	3	58276
	Ref	62800	107	0	48814		Ref	68300	679	1	52733
Fe	SBT	15800	0	1	54088	Fe	SBT	30800	0	0	25236
	Ref	14900	0	0	25333		Ref	24600	0	0	21055
K	SBT	19300	184	158	18700	K	SBT	19900	764	118	16264
	Ref	23800	23	54	20461		Ref	23000	484	74	21055
Mg	SBT	9100	0	491	7131	Mg	SBT	9200	0	1348	6361
	Ref	8800	0	446	6918		Ref	7400	0	1142	5359
Na	SBT	50200	406	134	42949	Na	SBT	27000	1196	219	20732
	Ref	41700	31	77	31179		Ref	24200	717	125	19141
P	SBT	1400	0	9	1609	P	SBT	3100	0	13	2830
	Ref	1700	0	36	1169		Ref	3100	0	31	2393
Si	SBT	302000	60	448	252834	Si	SBT	295000	12	33	247167
	Ref	312000	57	607	243875		Ref	316000	5	217	258687
S	SBT	2600	464	1237	255	S	SBT	6600	359	6376	572
	Ref	1300	66	679	0		Ref	3400	279	2537	0
Ti	SBT	2800	0	1	1464	Ti	SBT	6300	0	1	4497
	Ref	4500	0	1	3508		Ref	5300	0	1	4211
Ca	SBT	58600	755	6825	40971	Ca	SBT	71000	589	27327	37031
	Ref	62500	497	12320	36050		Ref	53300	931	17577	28711
Retursand					Cyklonaska						
		Aska mg kg <sup>-1</sup> TS	H2O mg kg <sup>-1</sup> TS	NH4Ac mg kg <sup>-1</sup> TS	Rest mg kg <sup>-1</sup> TS			Aska mg kg <sup>-1</sup> TS	H2O mg kg <sup>-1</sup> TS	NH4Ac mg kg <sup>-1</sup> TS	Rest mg kg <sup>-1</sup> TS
Cl	SBT	2400	1804	3518	0	Cl	SBT	20100	15513	2045	0
	Ref	400	112	929	1140		Ref	21800	20879	1747	171
Al	SBT	58800	294	0	46231	Al	SBT	112000	2	45	50747
	Ref	64900	61	0	54243		Ref	99700	47	37	80679
Fe	SBT	23600	1	0	20517	Fe	SBT	30900	0	0	19852
	Ref	17300	0	0	15200		Ref	28400	0	0	24870
K	SBT	21500	427	98	18553	K	SBT	12100	3285	335	7969
	Ref	23600	89	72	22799		Ref	15300	4448	223	12051
Mg	SBT	7400	0	1148	5817	Mg	SBT	19700	5	3161	9684
	Ref	6300	0	1394	4275		Ref	18900	0	3530	13760
Na	SBT	30000	826	463	23198	Na	SBT	22300	3741	390	9995
	Ref	29800	29	137	24699		Ref	22800	3994	334	13760
P	SBT	2500	0	0	2673	P	SBT	6100	0	0	2942
	Ref	1700	0	12	1615		Ref	6200	0	6	5897
Si	SBT	277000	9	667	242628	Si	SBT	162000	78	0	112800
	Ref	304000	112	1187	247278		Ref	171000	24	13	137256
S	SBT	9100	237	8147	1875	S	SBT	17200	1551	14131	2267
	Ref	1400	34	1239	0		Ref	13400	300	13564	1538
Ti	SBT	8100	0	1	5814	Ti	SBT	16600	0	1	12515
	Ref	6600	1	1	5700		Ref	16200	0	1	14614
Ca	SBT	85800	788	37033	47017	Ca	SBT	159000	6570	59498	46037
	Ref	70300	601	28394	37999		Ref	160000	7989	61316	85806

Tabell 6. Analysresultat av metaller och spårämnen från Åbometodens H<sub>2</sub>O och NH<sub>4</sub>Ac steg för avfallsbränsle, bäddaska och retursand.

Table 6. Analysis results of metals and trace elements from the Åbo Methods steps and solid residue compared to the concentrations in the original samples, for bed ash, recycled bed material, return shaft ash and cyclone ash.

[mg kg <sup>-1</sup> Ts]	Bränsle			Bäddaska				Retursand				
	SBT		Ref	SBT		Ref	SBT		Ref	SBT		Ref
	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac
As	1.3	1.1	1.4	1.1	0.07	2.3	0.20	11	0.01	8.1	0.41	1.1
Cd	0.02	0.19	0.03	0.35	0.00	0.07	0.00	0.03	0.00	0.12	0.00	0.02
Pb	<b>0.29</b>	<b>3.1</b>	<b>0.53</b>	<b>6.6</b>	<b>0.01</b>	<b>0.15</b>	<b>0.05</b>	<b>7.9</b>	<b>0.00</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.70</b>
Cu	<b>9.1</b>	<b>22</b>	<b>10</b>	<b>8.4</b>	<b>0.66</b>	<b>618</b>	<b>0.04</b>	<b>1732</b>	<b>0.77</b>	<b>370</b>	<b>0.52</b>	<b>204</b>
Cr	<b>5.7</b>	<b>2.9</b>	<b>5.3</b>	<b>2.6</b>	<b>0.62</b>	<b>1.7</b>	<b>2.2</b>	<b>11</b>	<b>2.8</b>	<b>20</b>	<b>3.4</b>	<b>54</b>
Ni	1.9	0.98	1.5	0.53	0.00	4.9	0.00	2.9	0.00	8.1	0.00	9.8
Zn	<b>39</b>	<b>116</b>	<b>42</b>	<b>159</b>	<b>0.85</b>	<b>213</b>	<b>0.09</b>	<b>482</b>	<b>0.94</b>	<b>48</b>	<b>0.16</b>	<b>3.6</b>
Mo	0.49	0.37	0.33	0.25	0.46	0.68	0.29	0.89	1.7	3.1	0.33	2.2
V	0.17	0.10	0.14	0.13	0.37	0.58	0.62	1.0	0.04	4.6	0.36	3.6
Co	0.42	0.37	0.42	0.22	0.00	0.77	0.00	0.52	0.00	0.93	0.00	1.29
Sb	0.34	0.18	0.22	0.15	0.22	2.0	0.43	2.0	0.19	3.3	0.57	3.9

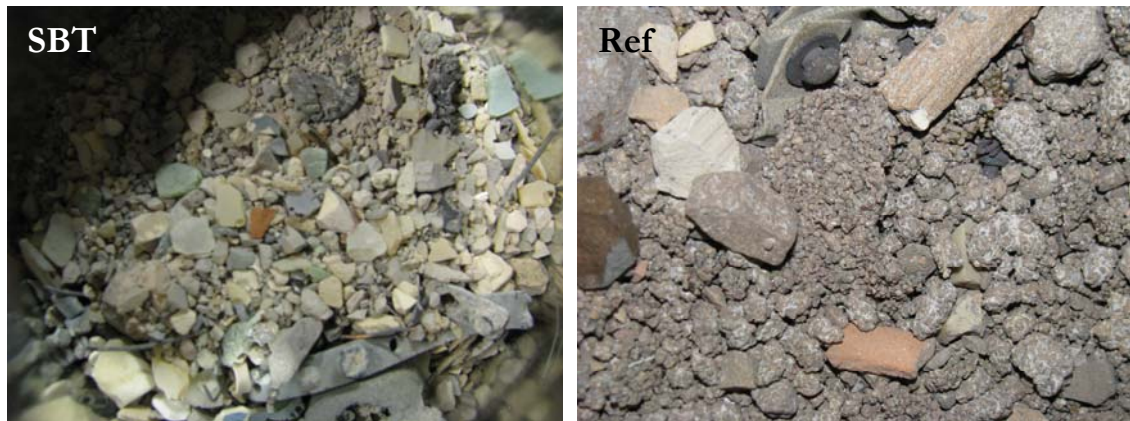
Tabell 7. Analysresultat av metaller och spårämnen från Åbometodens H<sub>2</sub>O och NH<sub>4</sub>Ac steg för vändschaktsaska och cyklonaska.

Table 7. Analysis results of metals and trace elements from the Åbo Methods steps for return shaft ash and cyclone ash.

[mg kg <sup>-1</sup> Ts]	Vändschaktsaska				Cyklonaska				
	SBT		Ref	SBT		Ref	SBT		Ref
	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> Ac	
As	0.01	2.0	0.01	5.3	0.01	0.4	0.01	0.39	
Cd	0.00	0.93	0.00	0.33	0.00	4.5	0.00	3.5	
Pb	<b>0.01</b>	<b>1.8</b>	<b>0.01</b>	<b>0.38</b>	<b>0.02</b>	<b>0.89</b>	<b>0.05</b>	<b>1.1</b>	
Cu	<b>0.07</b>	<b>2915</b>	<b>0.04</b>	<b>2537</b>	<b>0.42</b>	<b>1022</b>	<b>0.51</b>	<b>893</b>	
Cr	<b>2.6</b>	<b>0.97</b>	<b>1.0</b>	<b>0.58</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>2.0</b>	<b>7.8</b>	
Ni	0.00	11	0.00	8.2	0.00	8.9	0.00	6.1	
Zn	<b>1.7</b>	<b>656</b>	<b>0.09</b>	<b>507</b>	<b>0.06</b>	<b>1319</b>	<b>0.22</b>	<b>1245</b>	
Mo	1.4	2.0	0.69	0.98	2.1	3.5	1.1	2.4	
V	0.04	0.75	0.05	0.96	0.09	0.67	0.03	0.37	
Co	0.00	0.98	0.00	1.3	0.00	0.59	0.00	0.54	
Sb	0.11	4.2	0.28	4.7	0.10	11	0.27	15	

## 4.7 SEM-EDX

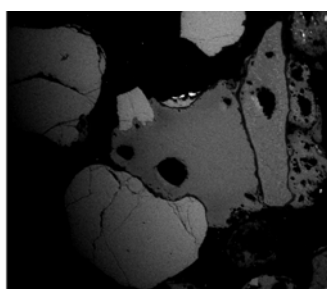
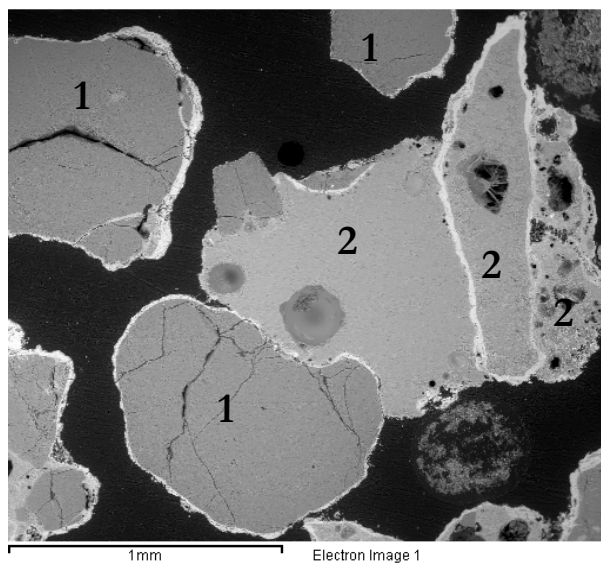
### 4.7.1 Askor



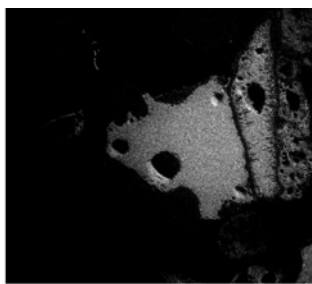
Figur 24. Kort på bäddaskan i de båda fallen. I bäddaskan från Ref-fallet (höger bild) syns agglomerat som inte återfanns i SBT-fallet (vänster bild).

Figure 24. Photos of bed ash for the two different modes of operation of the boiler, Left) Reduced bed temperature case, Right) Reference case with agglomeration.

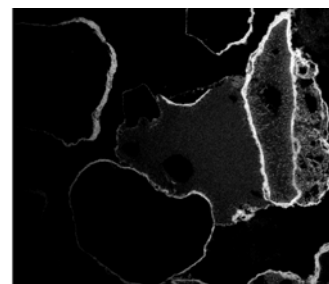
Fem askfraktioner analyserades med hjälp av SEM-EDX. Redan en okulärbesiktning av askan visade att den sänkta bäddtemperaturen påverkat askbildningen se Figur 24. Förändringen var mest tydlig i bäddaskan och i Ref-fallet syntes tydliga agglomerat av sand och askpartiklar. De större agglomeraten hade ofta en bit smält glas i mitten. I SBT-fallet fanns inga agglomerat och de glasbitar som sågs var opåverkade av förbränningen. Agglomerat och askpartiklar göts in i epoxi och genomskärningen analyserades med SEM-EDX.



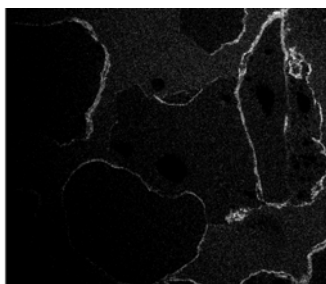
Si Ka1



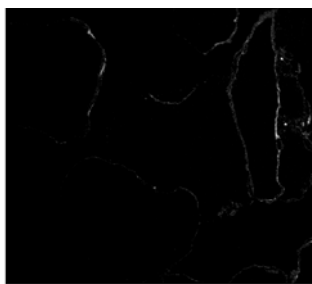
Na Ka1\_2



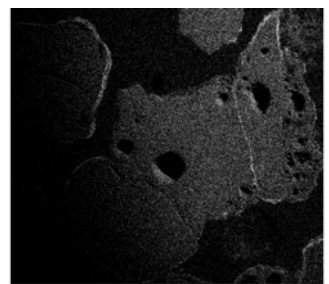
Ca Ka1



Cl Ka1



Ti Ka1

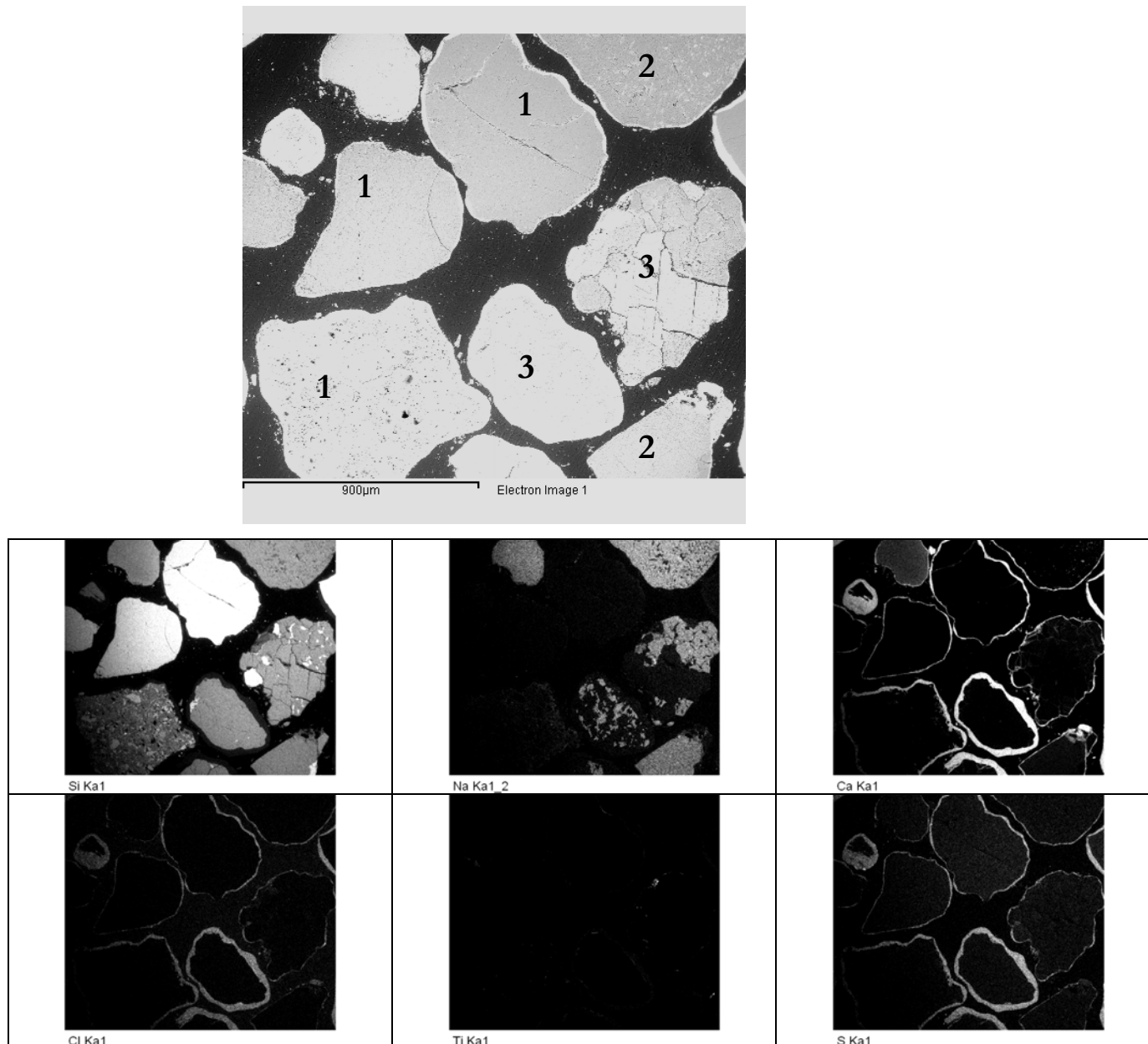


S Ka1

Figur 25. Retursand Ref, SEM-EDX bild och mapper för elementen Si, Na, Ca, Cl, Ti och S. Partiklar markerad med: 1 =  $\text{SiO}_2$ , 2 = Na-silikater.

Figure 25. Recycled bed material, reference case, SEM-EDX mapping of elements Si, Na, Ca, Cl Ti and S. Particles denominated with: 1 =  $\text{SiO}_2$ , 2 = Na-silicates.

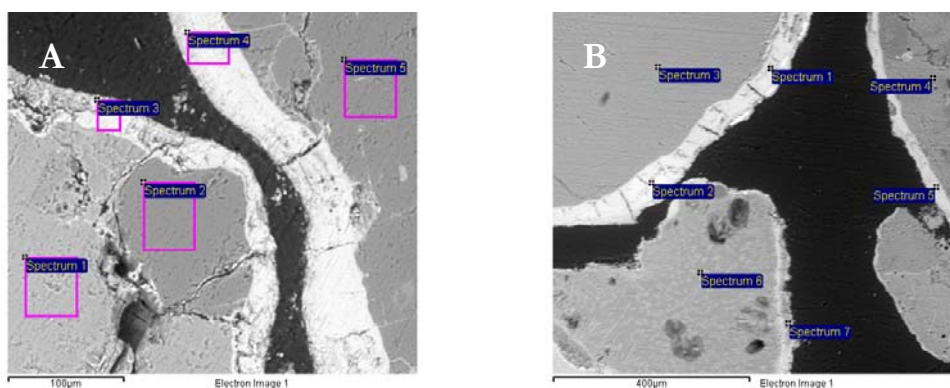
I Figur 25 kan man se att retursandspartikeln består av fyra sammanfogade partiklar. Partiklarna märkta med nr. 1 är ursprungliga bäddsandspartiklar av  $\text{SiO}_2$  och de markerade med nr. 2 Na-silikater. De svarta fläckarna i Na-silikat-partiklarna är hål efter små partiklar som lossnat vid slipningen av provet. Beläggningen på partiklarna består av Ca, Cl, Ti och S.



Figur 26. Retursand SBT, SEM-EDX bild och mappar för elementen Si, Na, Ca, Cl, Ti och S. Partiklar markerad med: 1 =  $\text{SiO}_2$ , 2 = Na-silikater, 3 = K, Na-silikater.

Figure 26. Recycled bed material, reduced bed temperature, SEM-EDX mapping of elements Si, Na, Ca, Cl Ti and S. Particles denominated with: 1 =  $\text{SiO}_2$ , 2 = Na-Al-silicates, 3 = K, Na-Al-silicates.

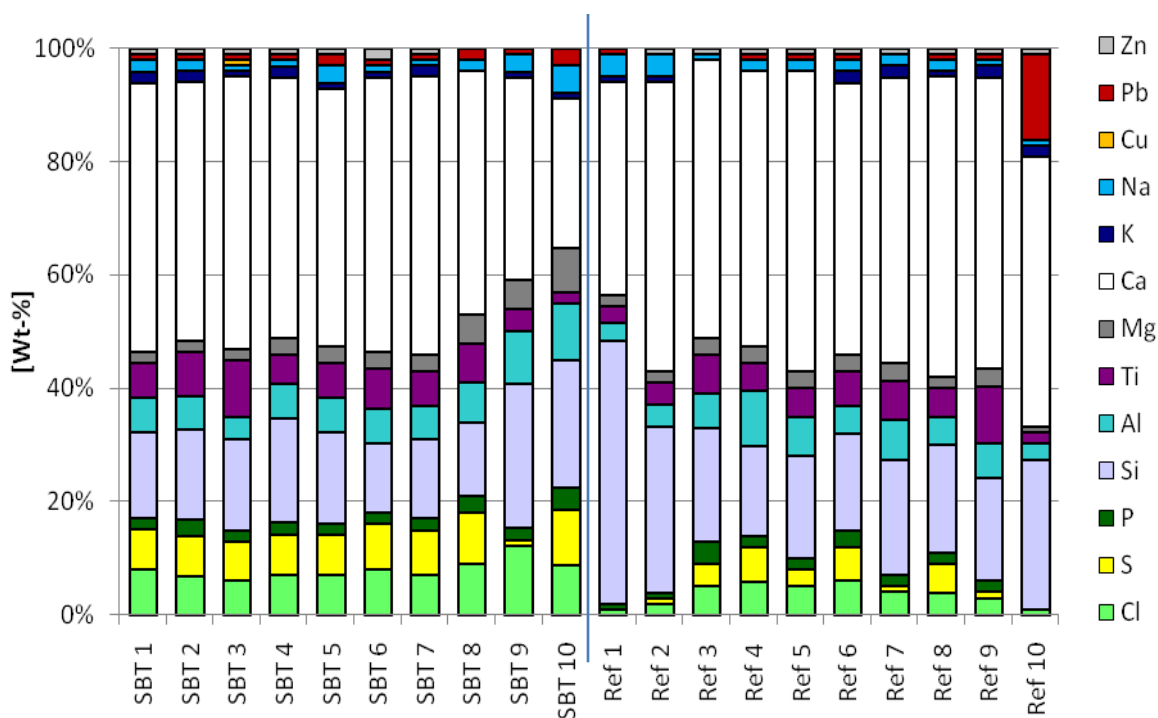
I retursanden från SBT-fallet hittades inga agglomerat men partiklarnas ursprung varierade även här, se Figur 26. Partiklar markerade med 1 är  $\text{SiO}_2$  från sanden, markerade med 2 Na-Al-silikater och 3 K, Na-Al-silikater. Att partiklarna här är alkali-aluminium-silikater och inte alkali-silikater som i Ref-fallet innebär att de har en högre smältpunkt och man får en stabilare aska. Beläggningarna i SBT-fallet är tjockare än i Ref-fallet och ämnessammansättningen inte riktigt densamma. Mindre Ti och mer S syns i dessa beläggningar.



Figur 27. Spot- respektive area-analys av retursand A) SBT B) Ref

Figure 27. Spot- and area-analysis by SEM-EDX of recycled bed material. A) SBT B) Reference.

SEM-EDX användes även för närmare studier av beläggningarna och kvalitativ analys. Figur 27 visar exempel på de analyserade områdena i respektive retursand. Arealys analyserar ett litet område, i Figur 27A markerat med rosa, elektronstrålen scannar området noggrant men tränger inte ner i provet. Med spot-analys, Figur 27B, analyseras provet i en punkt där elektronstrålen är fixerad mot sitt mål och tränger ner en bit i provet. Figur 28 ger analysresultaten från 10 spot- och area-analysen gjorda enbart på beläggningarna från respektive prov. Resultaten visar att det inte är någon stor skillnad i elementsammansättningen mellan beläggningarna men att koncentrationen S, Cl, Mg och K är något högre och Si lägre i SBT-fallet.



*Figur 28. Spot- respektive area-analys av beläggningarna på partiklarna i retursand från Ref- och SBT-fallet.*

*Figure 28. Spot- and area-analysis of deposits on the particles in the recycled bed material from the reference- and reduced bed temperature-case.*

Man kan anta att beläggningen innehåller höga koncentrationer  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  och  $\text{KCl}$  som har sina respektive smältpunkt vid  $782^\circ\text{C}$ ,  $801^\circ\text{C}$  och  $770^\circ\text{C}$  [8] vilket ligger mellan de bäddtemperaturer som undersökts i denna studie. Detta medför att vid normaldrift, Ref, ligger bäddtemperaturen ca  $100^\circ\text{C}$  över kloridernas smältpunkt medan den i SBT-fallet ligger knappt  $100^\circ\text{C}$  under och man slipper smälta. Andra tänkbara föreningar är  $\text{CaSO}_4$  som har sin smältpunkt vid  $1450^\circ\text{C}$ ,  $\text{NaSO}_4$  med smältpunkt vid  $884^\circ\text{C}$  och kalcium-silikater där smältpunkten kan variera mellan  $675$ - $2130^\circ\text{C}$  beroende på sammansättning. Alkali-silikater har en smältpunkt från knappt  $700^\circ\text{C}$  och uppåt och alkali-aluminium-silikater runt  $1200^\circ\text{C}$ . I SBT fallet ökar också andelen S i beläggningen och man får en sulfatering av delar av Ca och alkalieinnehållet vilket också höjer smältpunkten.

SEM-EDX analysen av bäddaskorna gav samma resultat som analysen av retursanden med något tjockare beläggning och inga agglomerat i SBT-fallet. Eftersom partiklarna är mycket större i bäddaskan blev bilderna inte lika tydliga, se Bilaga A.1 Figur 61. Som nämnts ovan var bäddaskan från Ref-fallet full med agglomererade klumpar där kärnan i de större agglomeraten ofta utgjordes av smält glas från avfallsbränslet med ett hölje av sand och askpartiklar. Exempel på sådana agglomerat visas i övre bilden till höger i Figur 29, medan exempel på glasbitar som inte har ett hölje av sand pekats ut i den övre bilden till vänster. De mindre agglomeraten bestod däremot endast av sand och askpartiklar sammanfogade som i Figur 25.

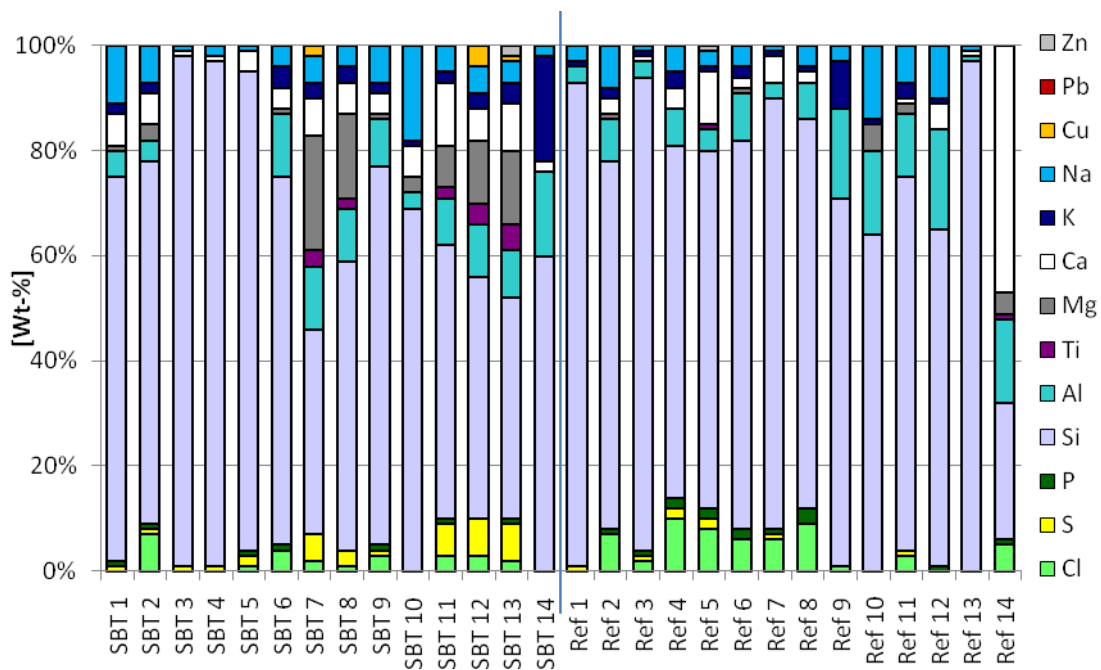


Figur 29. Bäddaska och retursand från Ref- respektive SBT-fallet.

Figure 29. Bed ash and recycled bed material from Ref and SBT case

Vissa partiklar i vändschaktsaskan från Ref-fallet hade tunna beläggningar av  $\text{CaCl}_2$  medan beläggningarna i SBT-fallet var något kraftigare och innehöll Ca, Cl, S och Mg, se Bilaga A.1 Figur 62. Inga agglomerat hittades i någon av dessa askor. Spot- och area-analyser visar, Figur 30, att koncentrationen av S och Mg är högre i SBT-fallet vilket också askanalysen visade, Tabell 4. Också koncentrationen av Ti och Ca ökar men däremot hittades mindre Cl i SBT-fallet vilket strider mot resultatet av askanalysen. Gemensamt för båda fallen är att koncentrationen Si är hög vilket till stor del beror på att små sandpartiklar följer med rökgaserna och hamnar i vändschaktsaskan.

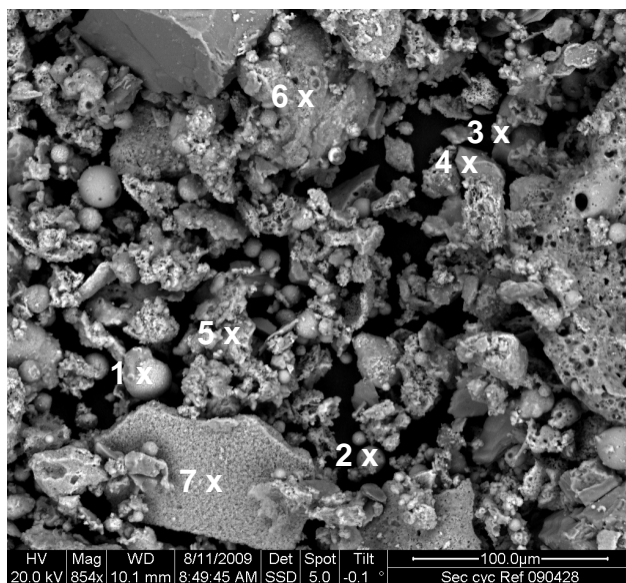




Figur 30. Spot- respektive area-analys av Vändschaktsaska för Ref- och SBT-fallet.

Figure 30. Spot and area analysis of return shaft ash from the reference and reduced bed temperature case.

Cyklonaskan är tacksam att analysera med SEM-EDX på grund av sina små väl avgränsade partiklar, Figur 31 och Figur 32. Varken i mappingen av cyklonaskorna, Bilaga A.1 Figur 63, eller i resultaten från spot- och area-analyserna, Figur 31 och Figur 32 kan några speciella skillnader ses mellan de två fallen. Resultaten visar dock att cyklonaskorna består av partiklar med vitt skilda elementsammansättningar från rena kalciumfosfater till natrium-kalcium-aluminiumsilikater.

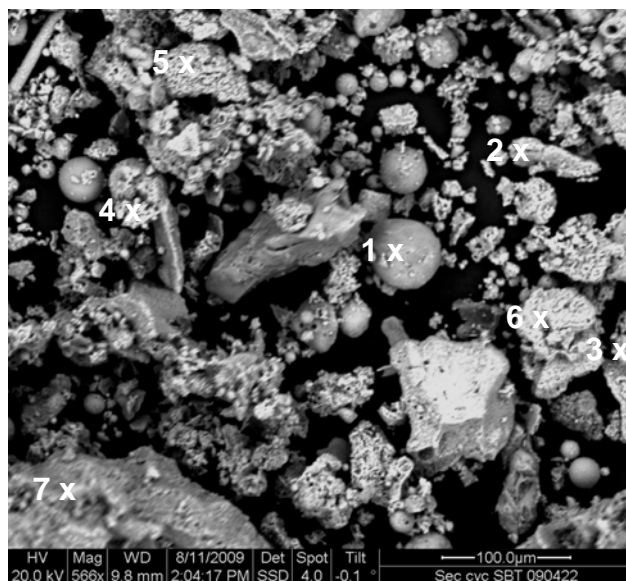


Wt-%	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Zn	Pb	Total
<b>Ref 1</b>	3	1	4	11	1	0	1	1	33	42	2	1	100
<b>Ref 2</b>	5	0	19	27	0	1	1	7	33	3	4	0	100
<b>Ref 3</b>	6	6	3	50	1	0	1	3	23	3	3	1	100
<b>Ref 4</b>	0	0	1	2	26	0	1	0	70	0	0	0	100
<b>Ref 5</b>	1	3	1	4	0	36	3	1	47	1	0	3	100
<b>Ref 6</b>	1	1	1	3	0	7	18	1	65	0	0	3	100
<b>Ref 7</b>	1	1	3	7	0	3	11	2	70	0	0	2	100

Figur 31. Spot och area-analyser (kryss) av cyclonaskepartiklar från Ref-fallet med elementanalys presenterad i vikt-% av aska. Syre uteslutet.

Figure 31. Spot and area analysis (crosses) of cyclone ash particles from the reference case with element analysis presented in Wt-% of ash. Oxygen excluded.

I spot-analyserna, Figur 31, syns partiklar bestående av Ti, Ca-Al-silikater, Ca-silikater, (K, Na)-Al-silikater,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{CaSO}_4$  och  $\text{CaCl}_2$ . Dessa föreningar hittas också i SBT-fallet med undantag av  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ . Denna analys är dock gjord på en begränsad yta och bevisar inte att kalciumfosfat saknas i askan. Åbometoden, Tabell 5, visade att det fanns en mindre del vattenlösligt K och Cl i cyclonaskan från SBT-fallet men mer S. Detta tyder på att mer alkali är bundet som sulfater och silikater i SBT-fallet.

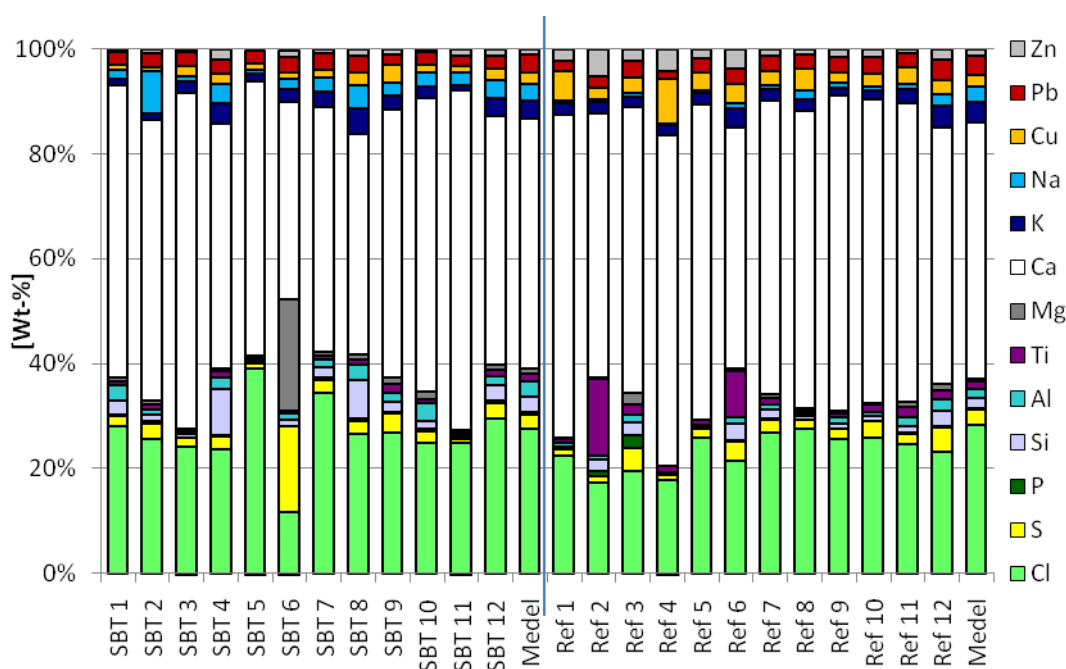


Wt.-%	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Zn	Pb	Total
<b>SBT 1</b>	5	10	11	44	1	0	1	3	19	3	2	1	100
<b>SBT 2</b>	2	1	7	12	0	5	7	1	60	2	1	2	100
<b>SBT 3</b>	1	0	1	0	0	29	4	1	61	1	0	2	100
<b>SBT 4</b>	4	3	4	15	1	7	11	2	49	1	1	2	100
<b>SBT 5</b>	1	2	4	7	0	24	4	1	51	1	1	4	100
<b>SBT 6</b>	1	1	9	11	0	3	3	1	50	20	1	0	100
<b>SBT 7</b>	3	4	7	24	2	3	8	3	34	6	3	3	100

Figur 32. Spot och area-analyser (kryss) av cyclonaskepartiklar från SBT-fallet med elementanalys presenterad i Wt-% i aska. Syre uteslutet.

Figure 32. Spot- and area-analysis (crosses) of cyclone ash particles from the reduced bed temperature case with element analysis presented in Wt-% of ash. Oxygen excluded.

Textilfilteraskan analyserades också med SEM-EDX och mappin-resultaten finns i Bilaga A.1 Figur 64. Här kunde också enskilda partiklar med varierande sammansättning ses men inga särskilda variationer mellan de två fallen. Spot- och area-analyserna visade samma resultat och medelvärde för mappingen var i det närmaste identisk i de två fallen, se Figur 33. Askanalysen visade dock att det fanns skillnader i sammansättningen. Koncentrationen av Cl var 16% lägre i SBT-fallet medan K och P ökade med 67% respektive 68% och även koncentrationerna av Na, Mg, Si och Al ökade. Förändringen i tungmetallkoncentration var också stor, As och Cd minskade med 38% respektive 25% medan Pb och Sb minskade med knappt 10%. Co, Ni och Cr ökade däremot med 83%, 46% respektive 43% medan Cu och Zn ökade med 13%.

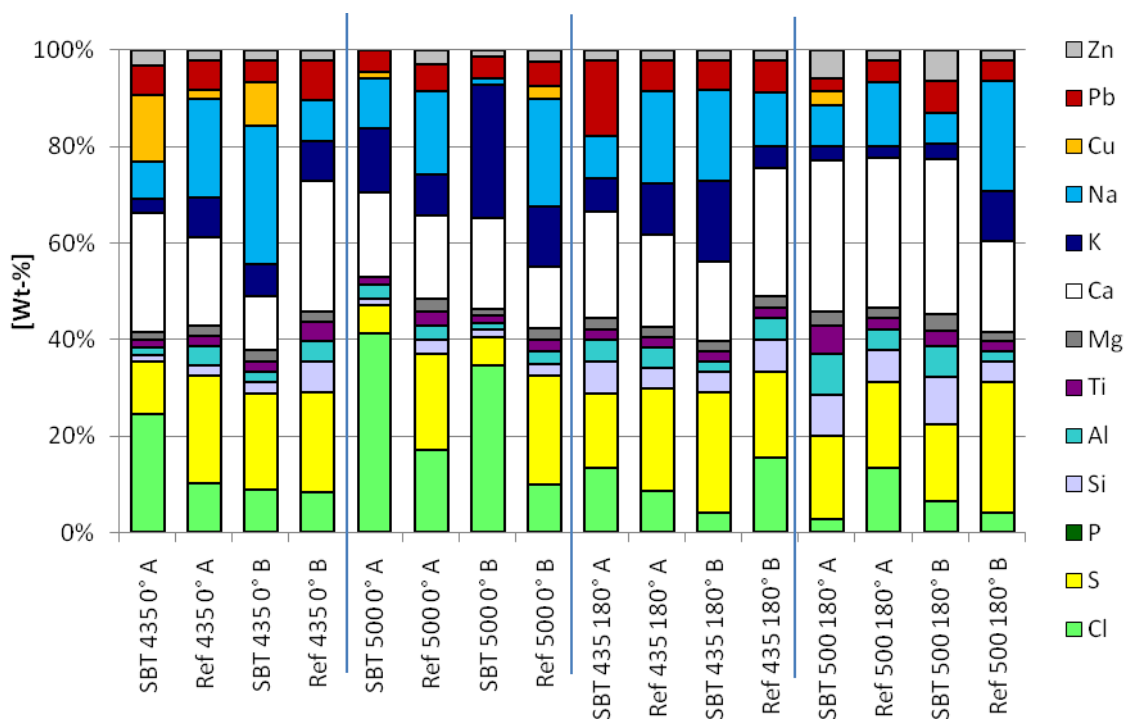


Figur 33. Spot respektive area analys av Textilfilteraska för Ref- och SBT-fallet.

Figure 33. Spot and area analysis of filter ash from the reference- and reduced bed temperature-case.

#### 4.7.2 Beläggningssringar

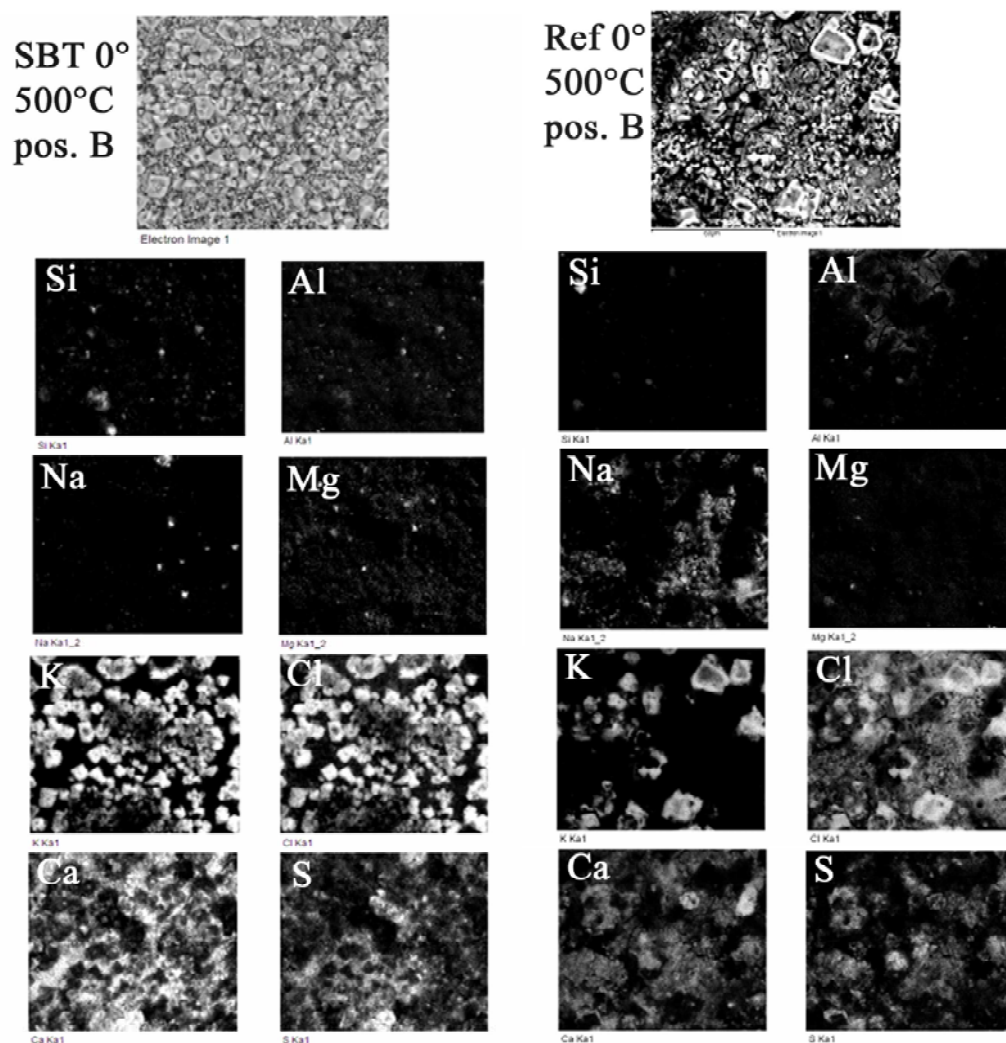
Beläggningssringarna analyserades på samma sätt som askorna. Proven behövde inte monteras eftersom analysen skedde direkt på beläggningssringens yta. En provyta på beläggningssringens vind- respektive läsida analyserades med mapping, spot- och area-analys. Figur 34 visar resultat från dessa analyser på de olika beläggningssringarna med olika temperatur, position (A eller B se Figur 12) och vindsidan ( $0^\circ$ ) respektive läsida ( $180^\circ$ ). Resultaten visar att sondens temperatur ger mindre skillnad i beläggningssammansättning än vad positionen gör. De svåraste beläggningarna bildades på vindsidan på sondringarna med temperaturen  $500^\circ\text{C}$  och i position B, Figur 34, där beläggningssringen både i SBT- och Ref-fallet innehåller höga halter alkaliklorider vilket indikerar att beläggningarna är korrosiva. På vindsidan i  $435$ -graders fallen minskade Cl koncentrationen i SBT-fallet och S ökar. På läsidan var beläggningarna mycket tunna och analyserna visade tydligt stålets sammansättning av Fe, Ni och Cr vilket ej visas här. De tunna beläggningarna gör att resultaten inte blir lika tillförlitliga som i de tjockare beläggningarna.



Figur 34. Mappingresultat från beläggningsringar från de två fallen med olika sondtemperatur (500 resp. 435°C) olika positioner i pannan (A resp. B) och analyser på två sidor av sonden (0° resp. 180°).

Figure 34. Mapping results from deposit rings from the reference- and reduced bed temperature-case with different probe temperatures (500 and 435°C) different positions (A and B) and analysis on two sides of the ring (0° and 180°).

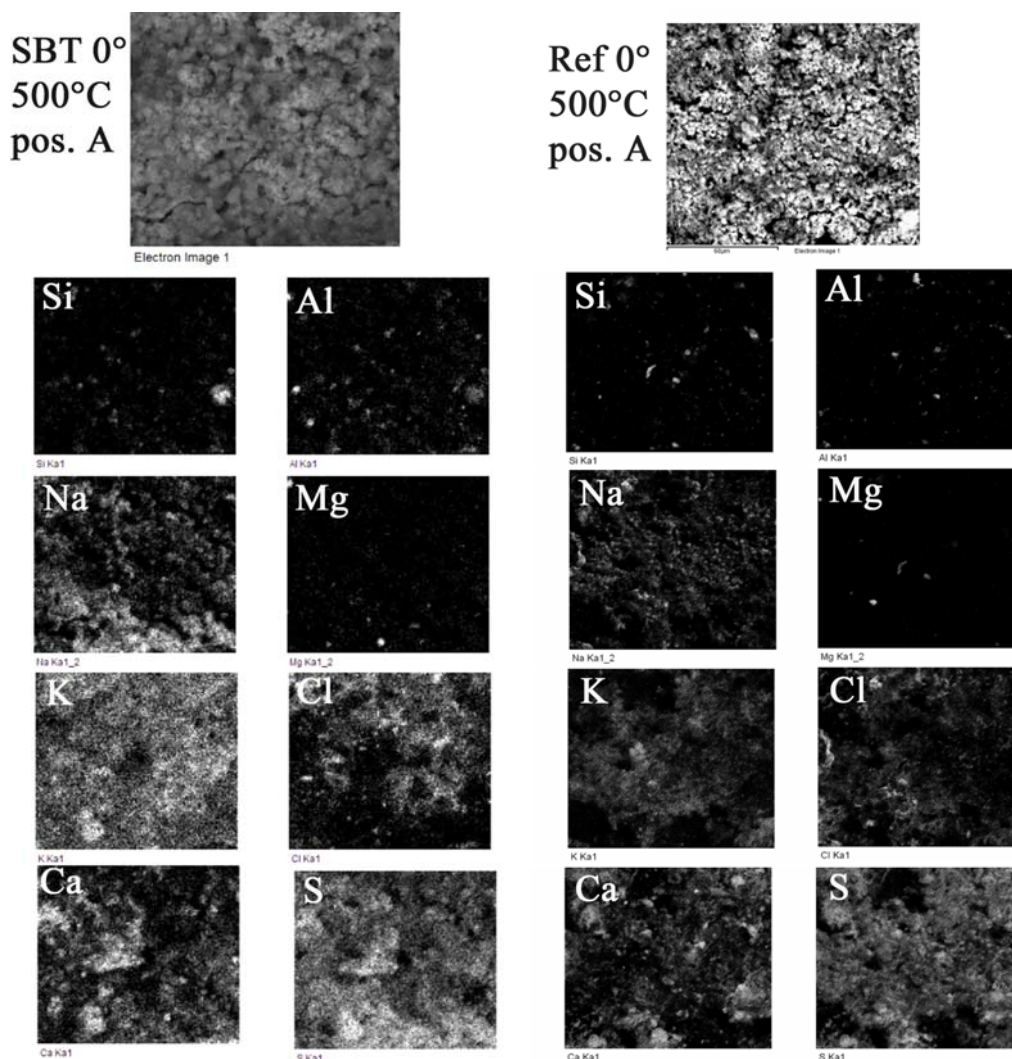
Mappingresultaten från beläggningsringarna från position B och sondtemperatur 500°C visar tydliga KCl kristaller i båda fallen, se Figur 35. Även Ca och S syns tydligt i mapparna och i Ref-fallet också Na. I Ref-fallet syns en korrelation mellan Ca och Cl som är borta i SBT-fallet där beläggningen nästan helt består av ren KCl och CaSO<sub>4</sub>. Den minskade koncentrationen Na syns också tydligt i Figur 35.



Figur 35. Mappingresultat från beläggningsringar på vindsidan ( $0^\circ$ ), position B och sondtemperatur  $500^\circ\text{C}$  A) SBT och B) Ref

Figure 35. Mapping results of the deposit rings on the windward side ( $0^\circ$ ), position B and probe temperature  $500^\circ\text{C}$  A) SBT B) Ref.

Figur 36 visar mappingresultatet från samma sond som Figur 35 men efter insättning i position A. En jämförelse mellan Figur 35 och Figur 36 visar att skillnaden på beläggningsstruktur är stor. Inga större kristaller syns i Figur 36 och koncentrationen S är mycket högre i position A än i beläggningsarna från position B, vilket även framgår av Figur 34.



Figur 36. Mappingresultat från beläggningsringar på vindsidan ( $0^\circ$ ), position A och sondtemperatur  $500^\circ\text{C}$  A) SBT och B) Ref

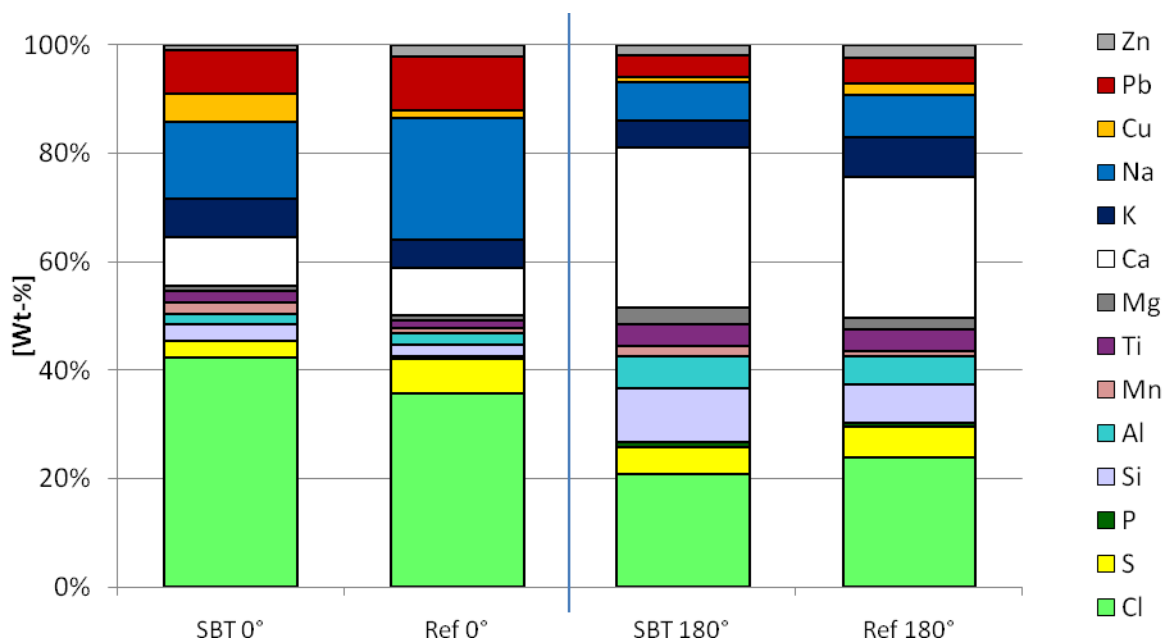
Figure 36. Mapping results of the deposit rings on the windward side ( $0^\circ$ ), position A and probe temperature  $500^\circ\text{C}$  A) SBT and B) Ref

I Bilaga A.2 Figur 65 och Figur 66 finns mappingresultat från beläggningsringarna från Ref och SBT-fallet med en sondtemperatur på  $435^\circ\text{C}$  och i position A och B. Här är resultatet mer överrensstämmande med beläggningsringarna i position A och  $500^\circ\text{C}$ , Figur 36. Man ser en jämnare beläggningsstruktur i SBT-fallen och elementkompositionen visar på mindre korrosiva komponenter än i Ref-fallen, Figur 34.

#### 4.7.3 Economiser

Beläggningsringarna från economisern ger ett tvetydigt svar eftersom beläggningstillväxten minskade och den totala elementsammansättningen såg bättre ut vilket diskuterats i avsnitt 4.2. Men vid analyser av beläggningsringarnas olika sidor ser man att beläggningen på vindsidan innehåller mer Cl i SBT-fallet medan förhållandet är omvänt på läsidan, se Figur 37. Koncentrationen av alkalimetaller minskar dock något i SBT-fallet. Vad den ökade Cl

koncentrationen på vindsidan beror på är svårt att säga. Eftersom alkali minskar något är det mest troligt att Cl återfinns som HCl i rökgaserna. HCl fastnar oftast inte i belägningarna utan följer gaserna men det kan tänkas att det sker en kemisk reaktion här mellan belägningen på beläggningringen och HCl i den förbiströmmande rökgasen. Mappingresultaten av beläggningarna på sondens vindsida finns i Bilaga A.3 Figur 67. Det går inte att urskilja några förändringar i belägningarnas struktur i de två fallen.



Figur 37. Mappingresultat från beläggningarna från mätningarna framför ekonomisern, Figur 4, i Ref- respektive SBT-fallet med sondtemperaturen 230°C och analyser från två sidor av sonden (0° resp. 180°).

Figure 37. Mapping results from deposit rings from the position prior to economiser, Figure 4, results from reference- and reduced bed temperature-case with a sond temperature of 230°C and analyses of two sides of the ring (0° and 180°).

## 4.8 XRD

Tabell 8 visar resultaten från XRD-analysen av askorna. Förekomsten av de olika kristallina föreningarna som påträffades har betecknats med M, L och S. M betyder tydligt framträdande kristallin komponent, L mindre tydligt identifierbar komponent och S kristallin komponent för vilken man bara kan se enstaka, svaga diffraktioner. XRD-analys gjordes på retursand, vändschaktsaska, cyklonaska och textfilteraska. I bäddaskan var det bara den tunna belägningen på de grova skapartiklarna som var intressant att studera och det bedömdes att denna beläggning var lättare att se på retursanden eftersom proven ska malas till pulver före analys.

Generellt gav XRD-analyserna mindre information än förväntat. Skillnaderna i sammansättningen av kristallina komponenter var mycket liten i de två fallen. Retursand och vändschaktsaska innehåller stora mängder kiseloxid från sanden vilket troligen gör att



övriga kristallina ämnen finns i för låga koncentrationer i provet för att kunna detekteras ordentligt.

Retursanden består mest av kvartspartiklar ( $\text{SiO}_2$ ) på vilka det bildats en beläggning, vilket diskuterats i de föregående avsnitten. Det är i första hand komponenter i denna beläggning som är intressant att analysera med XRD. I retursandsprovet från SBT-fallet hittades mer  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  än i Ref provet och man fann också  $\text{CaSiO}_3$  i SBT-fallet men inte i Ref-fallet. Båda dessa är silikater med höga smältpunkter vilka man föredrar att ha i askor framför många andra silikater med låg smältpunkt. För övrigt var den enda skillnaden med avseende på kristallina komponenter i askan att det möjligen fanns klorapatit i SBT-askan. Analyserna av vändschaktsaskan visade inga skillnader mellan de båda fallen. Däremot fanns det några toppar i analyserna som inte kunde förklaras. Inte heller cyklonaskan visade några större skillnader med avseende på kristallina material. De enda skillnader som noterades var att i SBT-fallet hittades mindre kalciumkarbonat och mer aluminium i metallform än i Ref-fallet.

Textilfilteraskor med sin finkornighet (submikrona partiklar) ger generellt diffraktionstoppar med svag intensitet vilket tyder på att föreningarna föreligger i form av små kristalliter med få reflekterande kristallplan. Topparna är breda och det visar att föreningarna inte är väl kristalliserade, dvs. troligen nybildade. Det kan också vara så att en del av partiklarna är amorfa dvs. stelnad smälta. I analyserna av textilfilteraskorna hittades mindre mängder kalciumhydroxid, kalciumsulfat och kalciumaluminiumoxid i SBT-fallet.

*Tabell 8. XRD resultat för de fyra askfraktionerna: Retursand, Vändschaktsaska, Cyklonaska och Textilfilteraska*

*Table 8. XRD analysis results of the four ash fractions: return sand, return shaft ash, cyclone ash and textile filter ash.*

	Retursand		Vändschaktaska		Cyklonaska		Textilfilteraska	
	SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref
Ca(OH) <sub>2</sub>							M	M
CaClOH							M	M
CaCO <sub>3</sub>			S	S	L	L	L	L
CaO					S	S		
CaSO <sub>4</sub>			L	L	L	L	L	L
Na <sub>4</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>							S/L	S/L
Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>			L	L	L	L	L	L
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub>	M	L	M	M	M	M	S	L
CaSiO <sub>3</sub>	L							
NaCl					L	L	M	M
KCl					S	S	M	M
SiO <sub>2</sub>	M	M	M	M	M	M	S	S
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	M	M	M	M	L/M	L/M		
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	M	M	M	M	L	L		
Na <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>					S	S		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L	L	L	L	L	L	S	S
Al metall			L	L	L <sup>+</sup>	L		
Fe metall			L	L	S	S		
MgO			L	L				
Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	L <sup>?</sup>							

M= Mycket, L= Lite, S= Spår

<sup>-</sup> mindre än i Ref, <sup>+</sup> mer än Ref, <sup>?</sup> osäkert resultat

#### 4.9 Massbalans av fasta material under mätningar

Massflödena av fasta material till och från pannorna kan uppskattas från loggade viktändringar av sand-, kalk- och asksilos, som är gemensamma för de bägge pannorna, samt bränsleflödet som beräknas från pannornas levererade effekt och bränslets värmevärde i Tabell 1. Från beräknat bränsleflöde och bränslets askhalt erhålls ett inkommande askflöde.

Ungefärliga materialflöden av sand, aska, och kalk i systemet summeras i Tabell 9 nedan. Värdena som redovisas i tabellen är ganska grova uppskattningar under en period av mindre än tio timmar. Sandförbrukningen beräknades från en nivågivare i sandsilon med förhållandevis grov upplösning. Detsamma gäller kalkflödet. Askorna från cyklon och vändschakt går till gemensam asksilo vilket medför att endast det sammanlagda flödet från dessa källor mäts. Inom ett tidigare internt arbete uppmättes ungefär lika stora flöden från vändschaktet som från cyklonen. Därför antas här att dessa källor är lika stora, även om fördelningen borde påverkas av exempelvis förändrad partikelstorleksfördelning. Under mättagarna leddes bottenaskan till en särskild container som sedan vägdes. Från dess viktändring beräknades bottenaskflödet. Under försöksdagarna förändrades även mängden material i bäddarna vilket uppskattats från uppmätt tryckfall. Denna mängd tas med i balansen som ”bäddförändring” och är egentligen inget flöde.

*Tabell 9. Specifika mängder av aska, sand och kalk.*

*Table 9. Specific amounts of ashes, sand and limestone.*

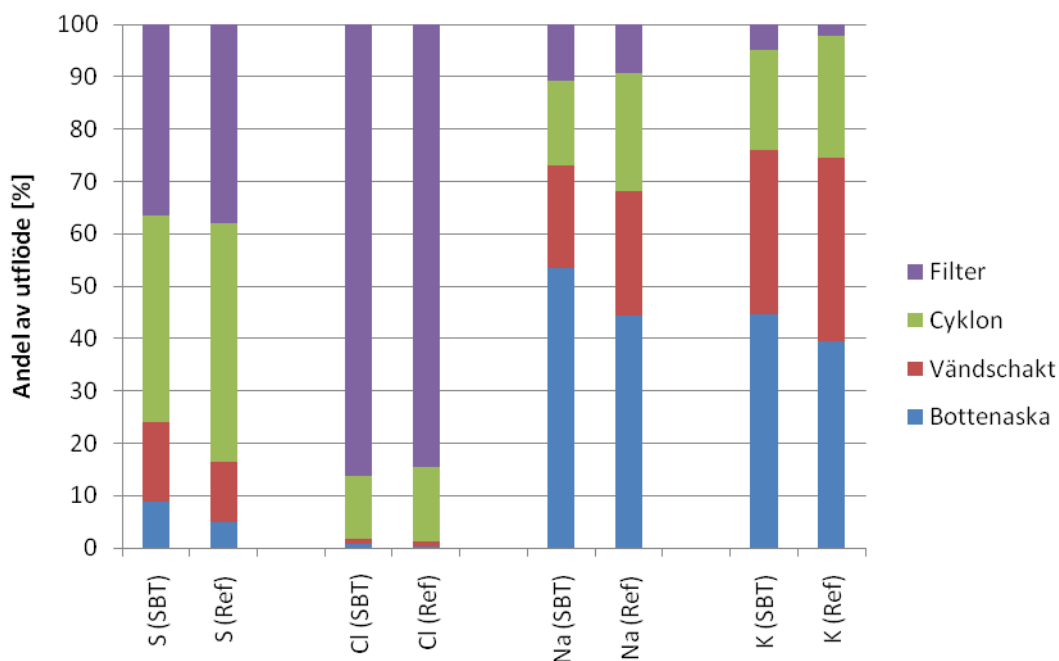
	SBT kg/MWh	Ref kg/MWh
<b>Aska in</b>	44,8	41,3
<b>Bäddsand</b>	6,8	13,7
<b>Kalk</b>	5,6	4,1
<b>Bottenaska</b>	-18,9	-14,4
<b>Vändschaktsaska</b>	-12,9	-13,2
<b>Cyklonaska</b>	-12,9	-13,2
<b>Textilfilteraska</b>	-13	-10
<b>Bäddförändring</b>	0,4	-3,1
<b>Summa</b>	-0,1	5,2

Balansen går i hop väl för SBT men inte för Ref där det verkar som att tillförsel av bäddsand kanske överskattats samtidigt som bäddaskan underskattats. Utgående från materialflödena i Tabell 9 och analyser av bränsle och askor (Tabell 1 och Tabell 4) har flöden av olika ämnen beräknats i de olika materialströmmarna i Tabell 10. Här kan utläsas att svavelmängderna var större under testdagen med sänkt bäddtemperatur (SBT) både ingående och utgående flöden. Dock var skillnaden i utgående flöden inte lika stor, vilket kan bero på att de stickprover som tagits till bränsleanalysen inte var helt representativa. Klorhalterna var totalt ganska lika mellan dagarna, men uppmätta flödet ut från anläggningen var av okänd anledning avsevärt högre än det beräknade inflödet. Flödet av klor ut med bottenaskan flerfaldigas vid sänkt bäddtemperatur, men utgör ändå bara en väldigt liten del av det totala klorflödet, vilket illustreras i Figur 38 som visar hur ämnens totala utflöden fördelas mellan olika utgående strömmar. Figuren visar att en större andel av svavlet går ut med bottenaska och vändschaktsaska när bäddtemperaturen sänks. Alkalimetallerna lämnar pannan främst med bottenaskan och det flödet ökar när bäddtemperaturen har sänkts. Däremot minskar alkaliflödet från vändschakt och cyklon när bäddtemperaturen sänkts.

Tabell 10. Specifika mängder av utvalda ämnen i flödena av fasta material.

Table 10. Specific amounts of chosen elements in flows of solid materials.

Ämne	S		Cl		Na		K	
	SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref	SBT	Ref
Driftfall								
Bränsle (g/MWh)	807	449	1174	1104	1626	1446	730	983
Bäddsand (g/MWh)	0	0	0	0	150	303	239	481
Kalk (g/MWh)	0	0	0	0	0	0	0	0
Bottenaska (g/MWh)	-49	-19	-15	-4	-949	-600	-365	-343
Vändschakt (g/MWh)	-85	-45	-23	-20	-348	-321	-256	-305
Cyklon (g/MWh)	-221	-178	-259	-289	-287	-302	-156	-203
Filter (g/MWh)	-204	-147	-1846	-1700	-192	-126	-39	-18
Bäddförändring (g/MWh)	4	-4	1	-1	13	-92	9	-73
<b>Summa ut (g/MWh)</b>	<b>-556</b>	<b>-393</b>	<b>-2142</b>	<b>-2014</b>	<b>-1763</b>	<b>-1442</b>	<b>-807</b>	<b>-941</b>
Kvot, flöden Ut/In %	69	88	182	182	99	82	83	64
Kvot, inflöden (SBT/Ref), %		180		106		102		66
Kvot, utflöden (SBT/Ref), %		142		106		122		86



Figur 38. Fördelning av utflöden från pannan för några grundämnen.

Figure 38. Distribution of streams from the boiler for some elements.

Experiment i fullskala vid anläggningar där det förbränns avfallsbränslen har den nackdelen att det är närmast omöjligt att kontrollera alla driftparametrar. Främst är det bränslets egenskaper som inte går att styra och kan variera ganska kraftigt på relativt kort tid. Det medför en osäkerhet vid denna typ av jämförande efterföljande mätningar vid olika driftinställningar: Är de uppmätta skillnaderna en effekt av ändrad driftinställning eller beror de till största delen på bränslevariationer?

Under föreliggande försök visade det sig i efterhand att svavelhalten i bränslet var högre under SBT-fallet än under referensfallet. Även i askorna uppmättes ca 40 % mer svavel under SBT-fallet. En jämförelse med tidigare bränsleanalyser visar att svavelhalten under referensmätningarna var ovanligt låg (0,20 %), medan det var ett mer normalt värde under SBT-mätningarna. Då svavel har visat sig ha en hämmande effekt på beläggningstillväxt från klorrika bränslen infinner sig frågan om den här uppmätta minskade beläggningstillväxten är orsakad av den sänkta bäddtemperaturen eller den högre svavelhalten i bränslet? Det som talar mot att den högre svavelhalten skulle ha påverkat beläggningstillväxten betydligt är:

- Svavel reagerar främst med Ca som det finns ett överskott av i bränsleaskan.
- I analysen av beläggningarna (Figur 14) har svavelmängderna inte förändrats med något tydligt mönster, jämfört med klorinnehållet som genomgående var lägre vid SBT.
- Gaskoncentrationerna av SO<sub>2</sub> var närmast desamma under de två mät dagarna se Tabell 3.

Trots detta kan det inte uteslutas att bränslets varierande egenskaper kan ha påverkat resultaten. För att ge statistiskt säkerställt underlag skulle det krävas ett flertal upprepade beläggningmätningar för varje driftfall, men det skulle bli både tidsödande och kostsamt. I framtiden skulle det därför vara fördelaktigt att använda någon metod som mäter on-line under längre perioder, vilket skulle ge ett större statistiskt underlag och dessutom ge möjlighet att studera dynamiken i förloppen, exempelvis vid temperaturändringar.

## 5 Kemiska jämviktsberäkningar

Termodynamiska jämviktsberäkningar bygger på minimering av Gibbs fria energi. Uttrycket för Gibbs fria energi vid konstant tryck och absolut temperatur visas i ekvation 1.

$$\frac{G^t}{R \times T} = \sum_{i=1}^N n_i \times \left( \frac{G_i^0}{R \times T} + \ln(a_i) \right) \quad \text{Eq. 1}$$

$G^t$  = Gibbs fria energi (kJ)

$R$  = Universella gaskonstanten ( $\text{JK}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

$T$  = Temperatur (K)

$n_i$  = antal mol av komponenten  $i$

$a_i$  = aktiviteten för komponenten  $i$

$f_i$  = aktivitetskoefficienten (fugacitet) av komponenten  $i$

$G^0$  = Gibbs fria energi för den rena substansen i grundtillstånd (kJ)

$N$  = Det totala antalet kemiska komponenter

Kemiska reaktioner når sällan jämvikt vilket innebär att resultaten från termodynamiska jämviktsberäkningar endast indikerar möjliga utfall för de reaktioner som sker och inte ett verkligt scenario. Beräkningarna ger information om huruvida jämvikten ligger till förmån för reaktanter eller produkter under vissa villkor [9]. Det är ett användbart verktyg för studier av olika bränslen (vilka ses som olika koncentrationer av elementära beståndsdelar) och utvärdering av förändringar i temperatur och/eller tryck. Dock har termodynamiska jämviktsberäkningar klara begränsningar. Till exempel utesluter beräkningarna fysiska fenomen som kinetik, masstransport och partiklar (aerosobildning, ytreaktioner, adsorption och absorption). Dessutom tas ingen hänsyn till yttre förhållanden som uppehållstid, reducerande zoner i pannan eller omblandning i beräkningarna. Utöver detta är den tillgängliga termodynamiska datan en begränsande faktor.

I detta projekt användes datorprogrammet Factsage™ 6.0 med modulen EQUILIB. Den termodynamiska datan hämtades från databaserna FACT53, FTsalt och FToxid, allt ingår i programvaran. Villkoren i beräkningarna har valts att likna villkoren i den fullskaliga Boråspannan (syrehalt, tryck och temperatur). Indatan som användes var den genomsnittliga mängden av två bränsleprover som togs under projektet. De parametrar som användes var C, H, N, O, Cl, S, Na, K, Ca, Zn, Pb, Mg, Si, Fe och Al från en kemisk analys av de båda proverna.

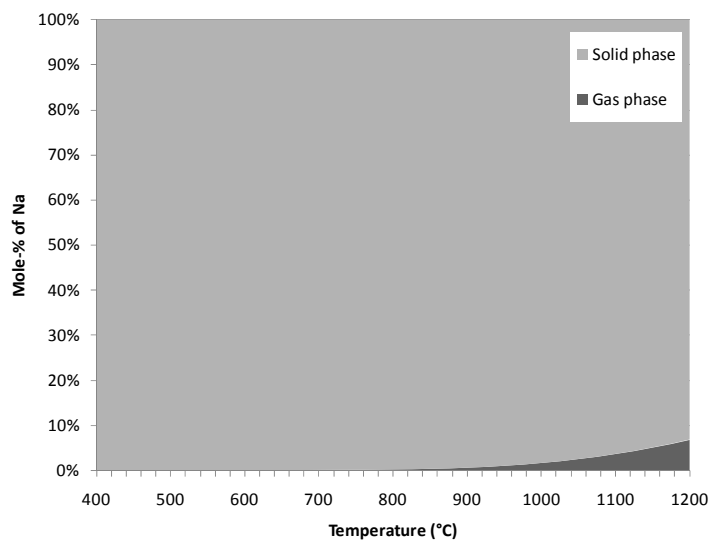
Vissa delar i en panna kan vara syrefria och skapa en reducerande miljö för kemiska reaktioner. För att vara medveten om en eventuell bildning av andra möjliga reaktionsprodukter på grund av syrebrist beräknas även ett fall där det enda syret tillgängligt är det syre som finns i bränslet. Från de två beräkningarna studerades det termodynamiska jämviktsbeteendet hos Na, K, Zn, S och Cl. Dessa element har valts på grund av deras benägenhet att bilda korrosiva produkter.

## 5.1 Beräkningsresultat

Resultaten för Na, K och Zn presenteras i fasdiagram (Figur 39 till Figur 44) där den termodynamiska jämvikten visas genom procentuell fördelning av stabila fastillstånd. På x-axeln visas temperaturen och för varje enskilt temperatursteg visar y-axeln den procentuella fördelningen av faserna det studerade ämnet befinner sig i. I Figur 39 är det tydligt att Na i gasfas ökar med ökande temperatur och att det endast bildas några få procent vid 850 °C. Om man studerar beräkningarna som ligger till grund för figuren blir det tydligt att den gasformiga delen av Na utgörs helt av NaCl, vilket är en oönskad förening i förbränning. Även om det endast bildas några få procent vid den ursprungliga bäddtemperaturen visar figuren att en lägre temperatur ger upphov till mindre NaCl(g) vilket är önskvärt. Figur 40 visar hur fördelningen ser ut i reducerande miljö. Här är det tydligt att en syrefri miljö gör att Na till större del befinner sig i gasfasen och därmed antas reducerande zoner i pannan vara utsatt för högre risk. Även här ser man en förbättring vid lägre temperatur. För K (Figur 41 och Figur 42) är trenden densamma. Lägre temperatur ger upphov till mindre andel gasformiga produkter och även för K utgör KCl nästan 100 % av den gasformiga delen. Vid reducerande förhållanden ökar den gasformiga delen ännu kraftigare än för Na och skillnaden på 850°C och 750°C är tydlig. För Zn är trenden annorlunda. Som Figur 43 visar är det ingen stor skillnad på mängden gasformiga Zn-produkter (nästan 100 % ZnCl<sub>2</sub>) vid de två olika temperaturerna. Vid reducerande miljö syns en kraftig förändring (Figur 44) där all Zn befinner sig i gasfas över ca 700°C. Största delen är Zn(g) och till skillnad mot Na och Zn minskar andelen ZnCl<sub>2</sub> i detta fall. Detta markeras i figuren med en streckad linje, där all yta under linjen representerar andelen ZnCl<sub>2</sub>.

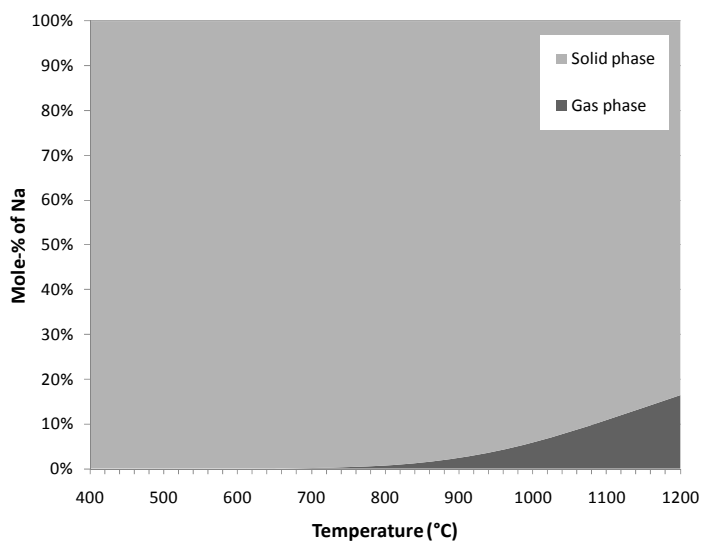
Resultaten för S och Cl presenteras i linjediagram i Figur 45 till Figur 48 där alla bildade produkter redovisas. Under 900°C är CaSO<sub>4(s)</sub> stabil och vid högre temperaturer återfinns S i SO<sub>2</sub> eller SO<sub>3</sub>. Utan syretillgång bildas istället uteslutande gasformig H<sub>2</sub>S (samt några få procent COS) vid temperaturer över 800°C och vid lägre temperaturer är S stabil ihop med metallerna Fe och Zn. För Cl är det tydligt att bildningen av alkaliklorider ökar med ökad temperatur eller vid syrebrist (Figur 47 och Figur 48).

Det tydligaste resultatet från beräkningarna är att de oönskade alkalikloriderna minskar om man sänker bäddtemperaturen från 850°C till 750°C och detta skulle då innebära att man utsätter pannan för en mindre korrosiv miljö. För ZnCl<sub>2</sub> förändras inte avgången mellan de två temperaturerna.



Figur 39. Den procentuella molfördelningen för Na vid oxiderande miljö.

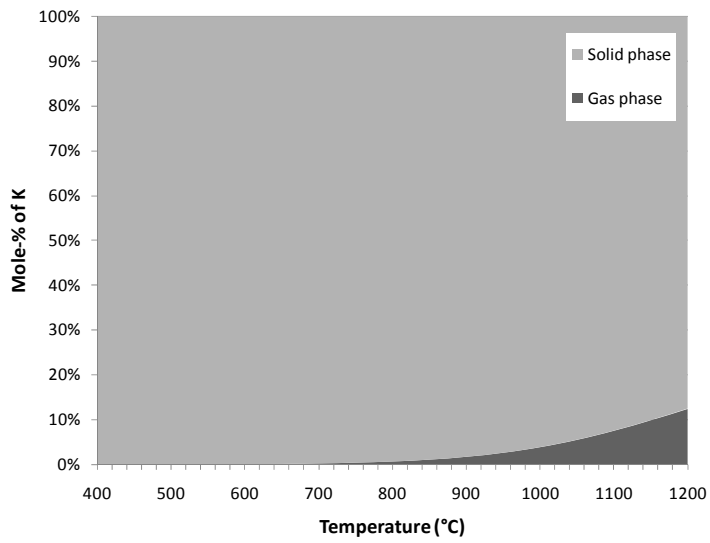
Figure 39. The distribution of Na in an oxidising environment expressed in percentage.



Figur 40. Den procentuella molfördelningen för Na vid reducerande miljö.

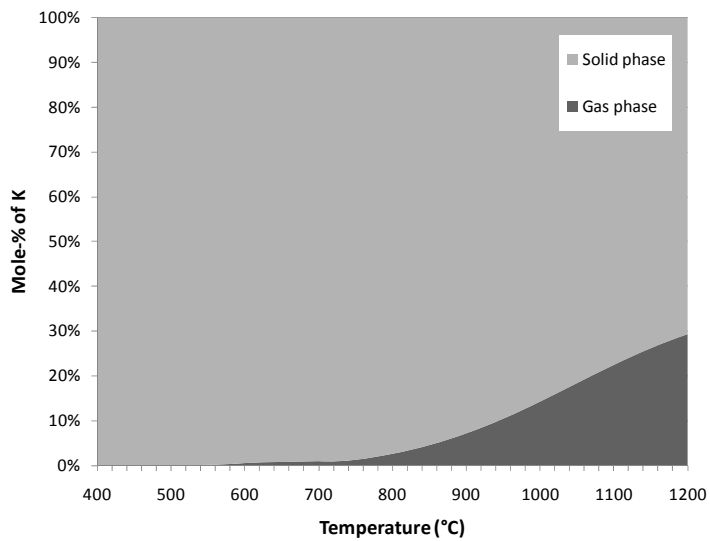
Figure 40. The distribution of Na in a reducing environment expressed in percentage.





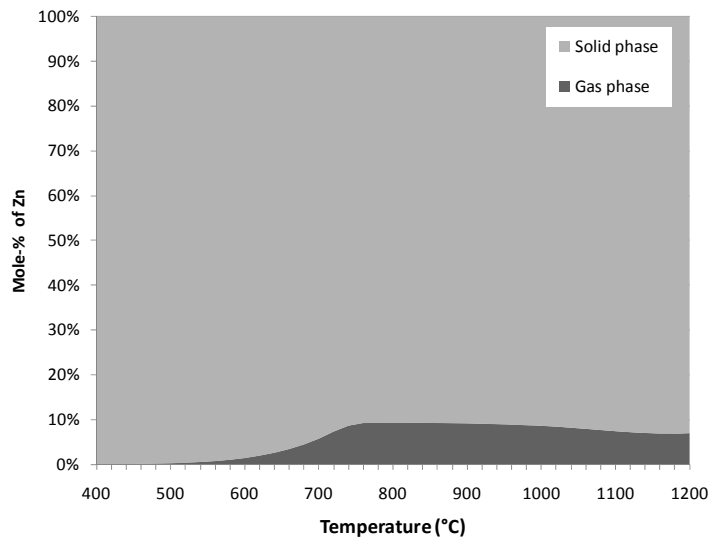
Figur 41. Den procentuella molfördelningen för K vid oxiderande miljö.

Figure 41. The distribution of K in an oxidising environment expressed in percentage.



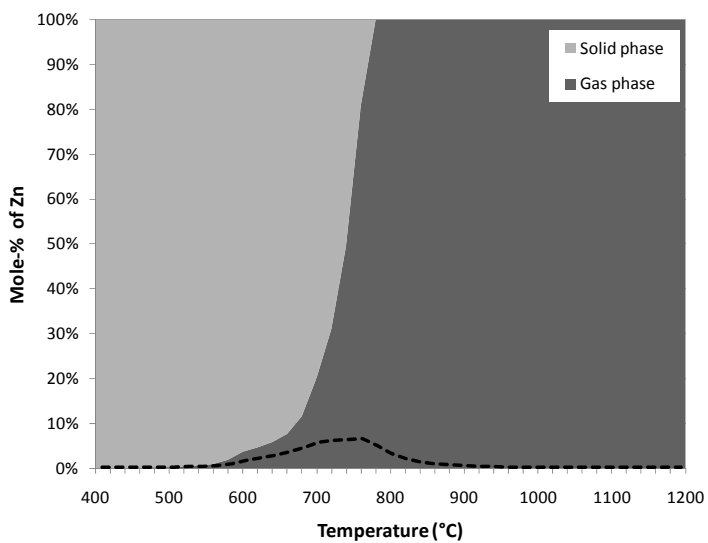
Figur 42. Den procentuella molfördelningen för K vid reducerande miljö.

Figure 42. The distribution of K in a reducing environment expressed in percentage.



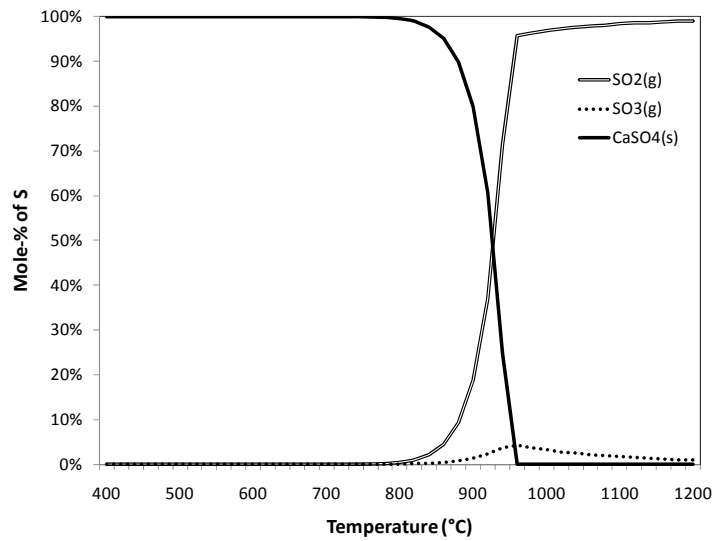
Figur 43. Den procentuella molfördelningen för Zn vid oxiderande miljö.

Figure 43. The distribution of Zn in an oxidising environment expressed in percentage.



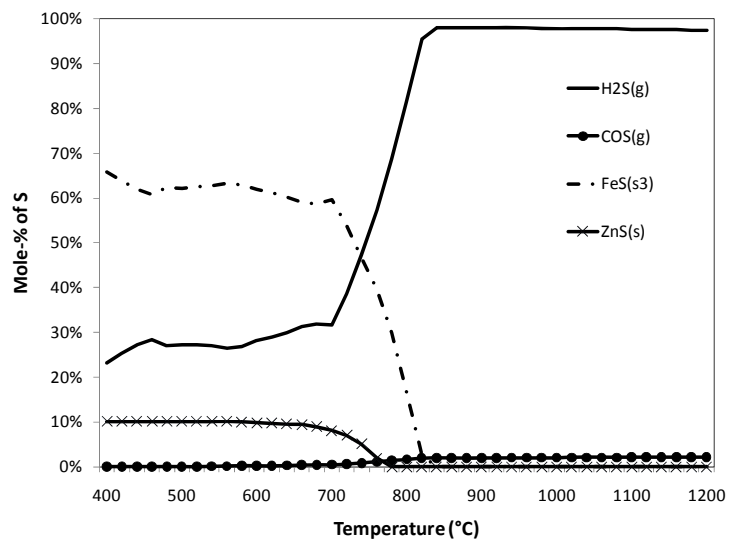
Figur 44. Den procentuella molfördelningen för Zn vid reducerande miljö.

Figure 44. The distribution of Zn in a reducing environment expressed in percentage.



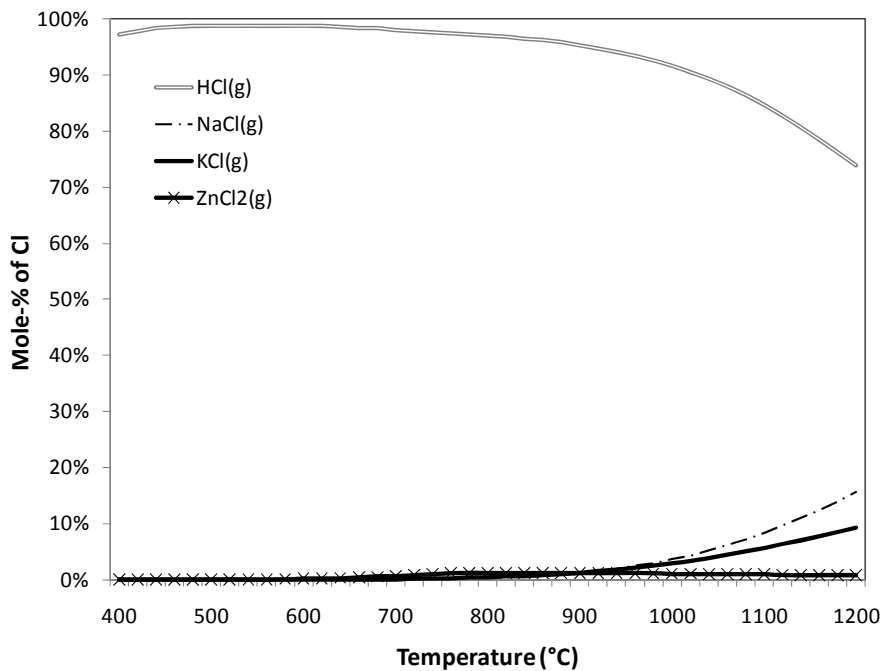
Figur 45. Den procentuella molfördelningen för S vid oxiderande miljö.

Figure 45. The distribution of S in an oxidising environment expressed in percentage.



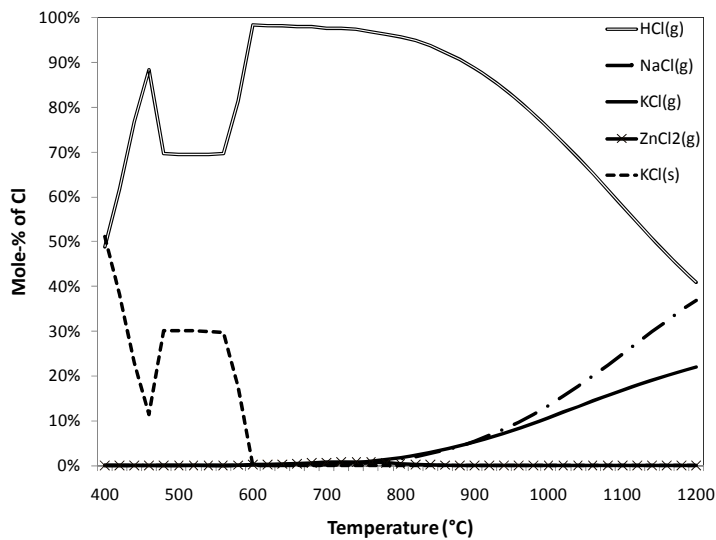
Figur 46. Den procentuella molfördelningen för S vid reducerande miljö.

Figure 46. The distribution of S in a reducing environment expressed in percentage.



Figur 47. Den procentuella molfördelningen för Cl vid oxiderande miljö.

Figure 47. The distribution of Cl in an oxidising environment expressed in percentage.



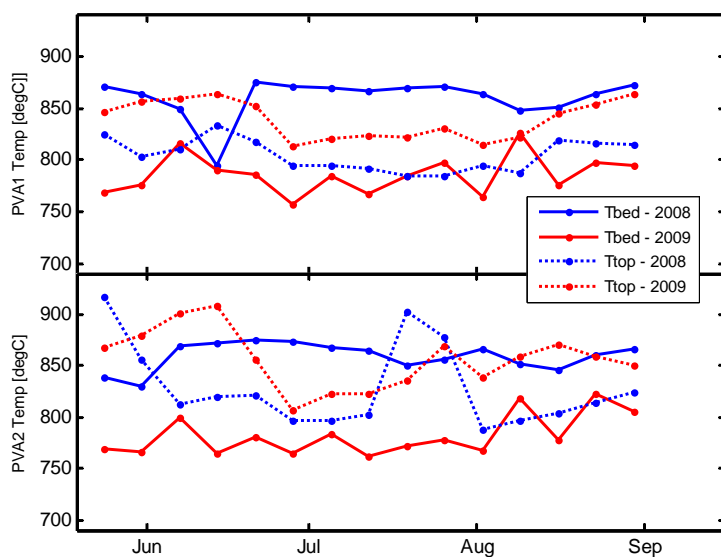
Figur 48. Den procentuella molfördelningen för Cl vid reducerande miljö.

Figure 48. The distribution of Cl in a reducing environment expressed in percentage.

## 6 Jämförelse av driften 2008 och 2009

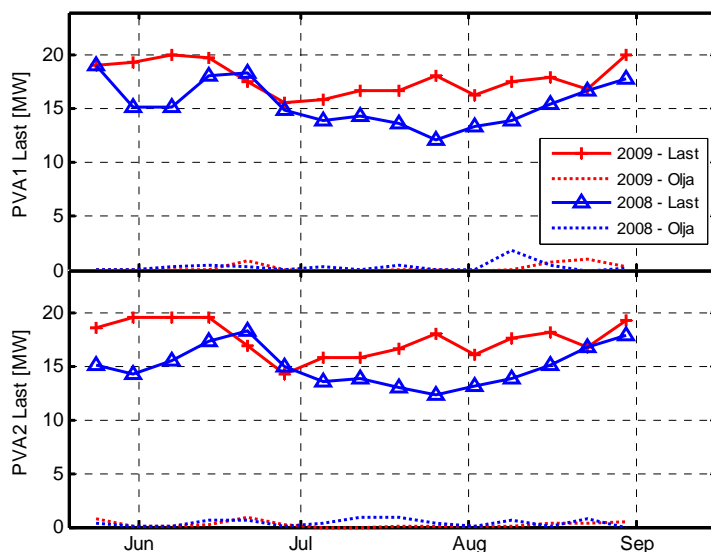
Under sommarhalvåret 2009 kördes avfallspannorna manuellt med sänkt bäddtemperatur. För att studera effekter av detta körsätt jämförs nedan driftdata från en period 2009 med motsvarande driftdata från 2008, då pannorna kördes ”normalt”. Det bör dock påpekas att denna typ av jämförelse kan påverkas av andra faktorer än driftinställningar. Det kan vara någon komponent i pannan som inte fungerar optimalt (exempelvis igensättning av dysor eller drift av givare). Bränslet kan också ha förändrats, det finns helt enkelt en mängd parametrar som man inte har kontroll över. Jämförelsen nedan bör därför endast ses som en fingervisning.

Den genomsnittliga bäddtemperaturen hade sänkts med ca 80°C från 860°C till ca 780°C, vilket visas i Figur 49 för PVA1 överst och PVA2 underst. Som en konsekvens steg temperaturen i toppen av eldstaden med ca 30°C vilket visas med de streckade linjerna i figuren. Vid normaldrift uppmättes lägre temperatur vid eldstadstoppen än i bädden, men vid sänkt bäddtemperatur var förhållandet motsatt. Veckomedelvärden av pannlasterna visas i Figur 50. Under de studerade tidsperioderna var lasten i genomsnitt ca 15 % högre under 2009 än den var samma period 2008.



Figur 49. Medeltemperaturer i bädden (heldragna linjer) och i eldstadens tak (streckade linjer) under 2008 (blått) och 2009 (rött). Panna 1 överst och Panna 2 underst.

Figure 49. Average temperatures in the bottom bed (solid lines) and at the top of the furnace (dashed lines) during 2008 (blue) and 2009 (red). Boiler PVA1 on top and PVA2 below.

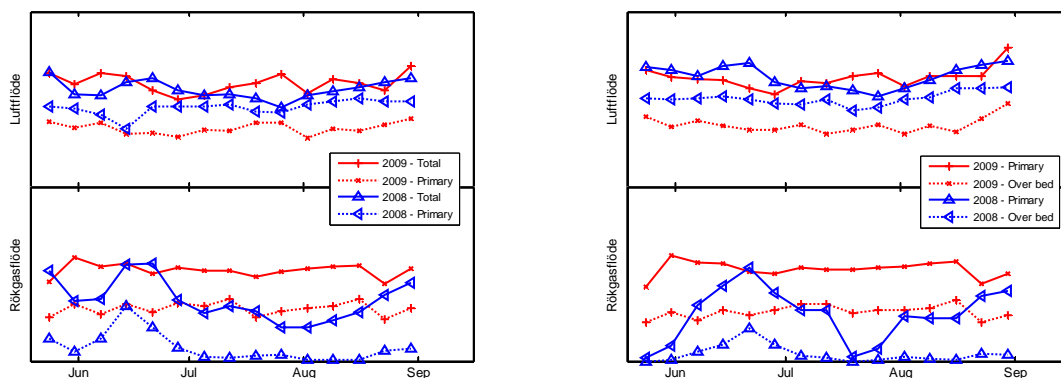


Figur 50. Pannornas last i veckomedelvärden (heldragna linjer) och eventuell effekt av stödbrännare (streckade linjer) under 2008 (blått) och 2009 (rött). Panna 1 överst och Panna 2 underst.

Figure 50. Average boiler loads (solid lines) and the power from oil fired supporting burners (dashed lines) during 2008 (blue) and 2009 (red). Boiler PVA1 on top and PVA2 below.

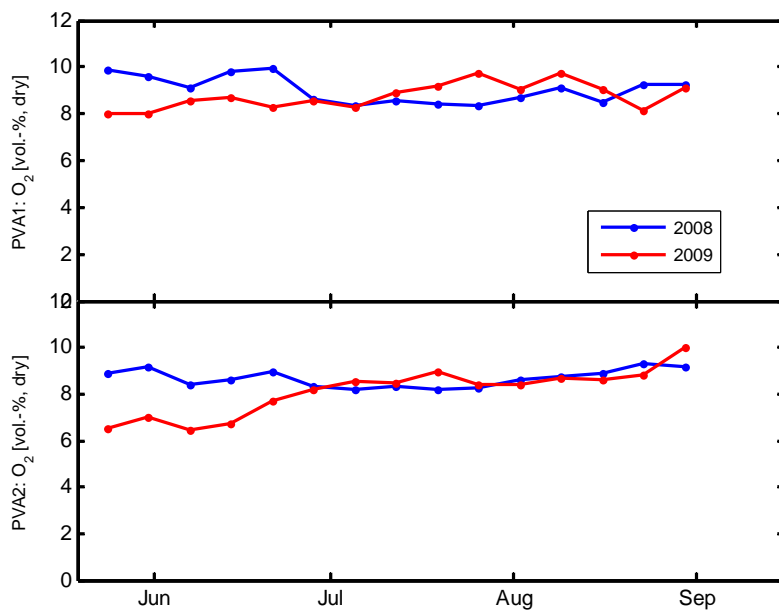
Luftflödena in till pannan visas överst i Figur 51 för PVA1 respektive PVA2, uppdelat på totalluft och primärluft som går genom bädden. Av figurerna kan utläsas att mellan 2008 till 2009 hade totalluften ökat med 6 % för PVA1 men var i stort sett oförändrad i PVA2, trots att lasten var ca 15 % högre 2009 (enligt Figur 50). Luftflödena genom bädden hade minskats 2009 för att lokalt kunna tillföra mer rökgas med syfte att sänka bäddtemperaturen. De minskade primärluftflödena ersätts med råge av ökad rökgasåterföring genom bädden vilket kan utläsas i de nedre graferna i Figur 51.

Med tanke på att lasten var högre under 2009 och att totalluftflödena inte ökat i motsvarande mängd är det lite underligt att syrekoncentrationerna efter eldstaden inte sjunkit i PVA1, vilket visas överst i Figur 52. För PVA2 ökar  $O_2$  under säsongen 2009 av någon anledning.



Figur 51. Överst) Luft till eldstaden, Underst) Rökgasåterföring till eldstaden. Flödena är uppdelade på flödet genom bottenbädden (streckat) och totalt (heldragna linjer). Data från PVA1 till vänster och PVA2 till höger.

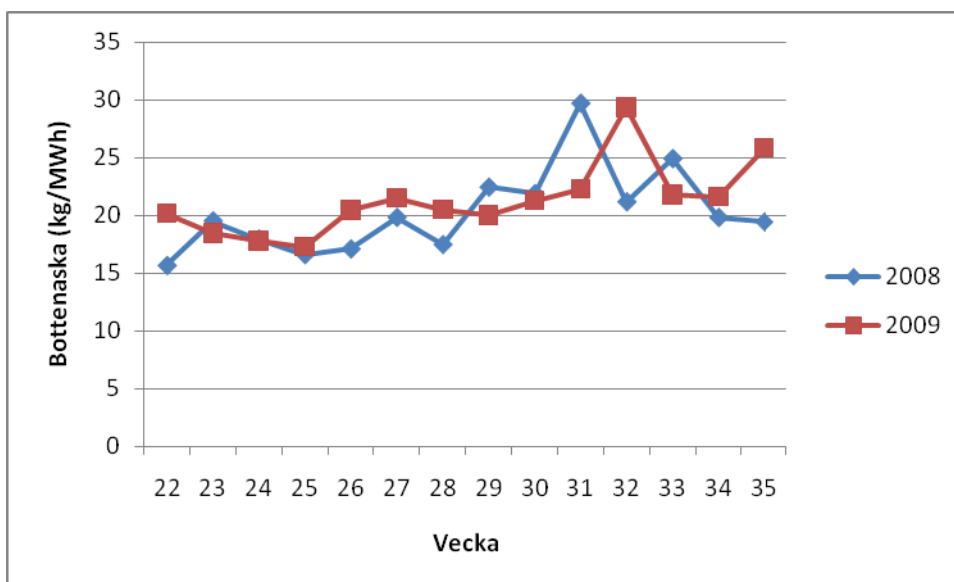
Figure 51. Top) Combustion air. Below) Recycled gas flow to furnace. The flow rates are divided in flow through bottom bed (dashed) and total flows (solid lines). Left) Data from Boiler PVA1, Right) Data from Boiler PVA 2.



Figur 52. Veckomedelvärden av syrekoncentrationer i torr rökgas från pannorna i under 2008 (blått) och 2009 (rött). Panna 1 överst och Panna 2 underst.

Figure 52. Weekly averages of oxygen concentrations in dry flue gas from the boilers during 2008 (blue) and 2009 (red). Boiler PVA1 on top and PVA2 below.

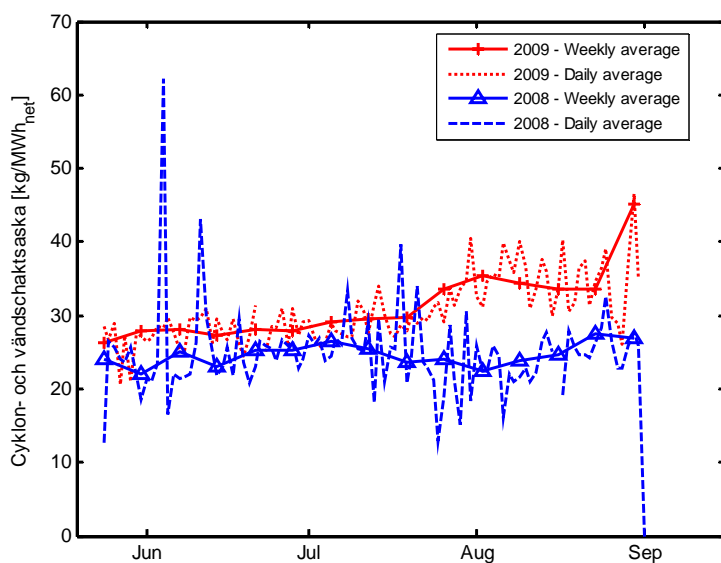
Mängderna bottenaska som lämnat de två pannorna, invägt av Stena Metall, visas veckovis skalat mot levererad energi från pannorna i Figur 53. De uppmätta mängderna är gemensamma för PVA1 och PVA2. Figuren visar att flödet bottenaska per producerad MWh varit ganska lika under de bägge driftsäsongerna. Det sammanslagna askflödet från cyklon och vändschakt ökade under 2009, enligt Figur 54. Även askflödet från textilfiltret har ökat (Figur 55), vilket till en del beror på att kalkdoseringen ökat (Figur 56). Däremot har förbrukningen av färsksand minskas avsevärt under 2009, vilket illustreras av Figur 57. Åtgången av färsksand har beräknats utifrån en nivågivare i sandsilon som tyvärr inte direkt ger någon massenhet, men efter skalning mot kända levererade sandmängder erhålls ändå förbrukningen i absoluta tal. Det bör dock noteras att från och med slutet av juni 2009 förändrades egenskaperna hos färsksand (Baskarp B95) genom att sandens finfraktion siktats bort, vilket minskar sandförbrukningen genom att en mindre mängd sand följer med rökgasen ut ur eldstaden mot vändschakt och cyklon. Jämförande sandstorleksfördelningar visas i Figur 58. Den minskade sandförbrukningen 2009 i Figur 57 har alltså två orsaker och kan inte helt tillskrivas den sänkta bäddtemperaturen. En liknande sandstorleksändring genomfördes vid systerpannorna i Lidköping och resulterade där i en sandbesparing på ca 30 % [10].



Figur 53. Veckomedelvärden av flödet bottenaska från pannorna under 2008 (blått) och 2009 (rött).

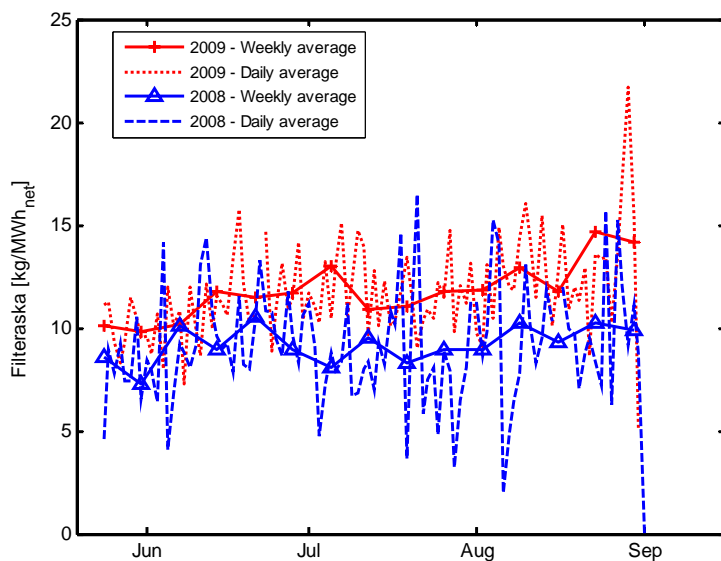
Figure 53. Weekly averages of bottom ash leaving the boilers during 2008 (blue) and 2009 (red).





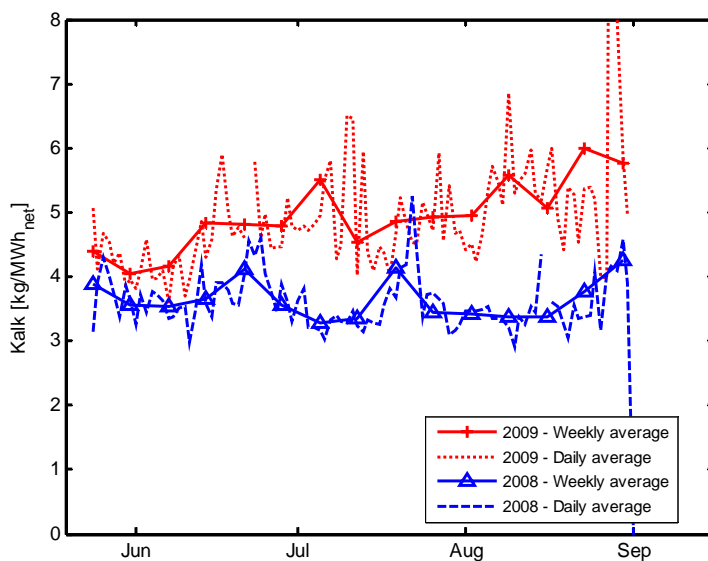
Figur 54. Medelvärden av askflöden från vändschakt och cyclon från pannorna under 2008 (blått) och 2009 (rött). Mängderna är sammanslaget från PVA1 och PVA2.

Figure 54. Averages of fly ash collected in gas pass and cyclone leaving the boilers during 2008 (blue) and 2009 (red).



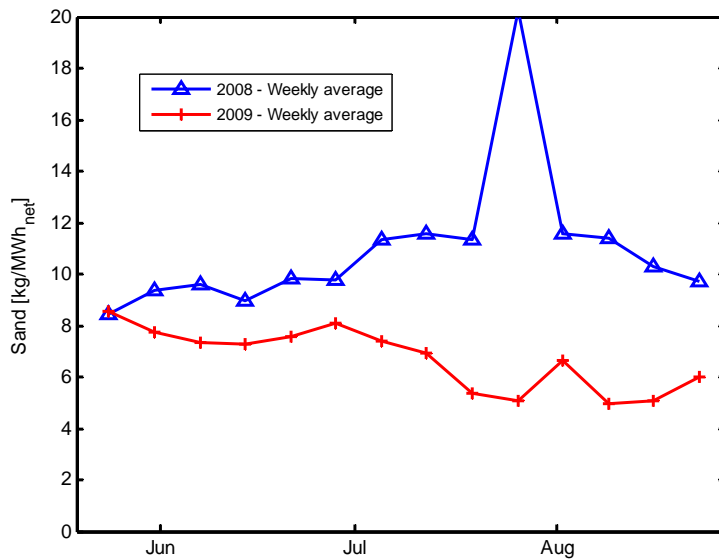
Figur 55. Medelvärden av askflöden från textilfilter under 2008 (blått) och 2009 (rött). Mängderna är sammanslaget från PVA1 och PVA2.

Figure 55. Averages of fly ash collected in fabric filters during 2008 (blue) and 2009 (red).



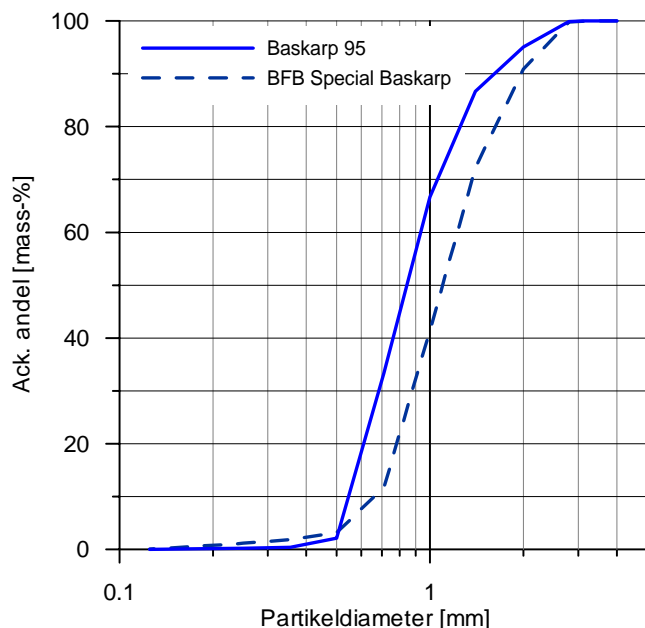
Figur 56. Medelvärden av inmatad mängd kalk under 2008 (blått) och 2009 (rött). Mängderna är sammanslaget från PVA1 och PVA2.

Figure 56. Averages of limestone consumption during 2008 (blue) and 2009 (red).



Figur 57. Veckomedelvärden av inmatad mängd sand under 2008 (blått) och 2009 (rött). Mängderna är sammanslagna från PVA1 och PVA2.

Figure 57. Weekly averages of sand consumption during 2008 (blue) and 2009 (red).

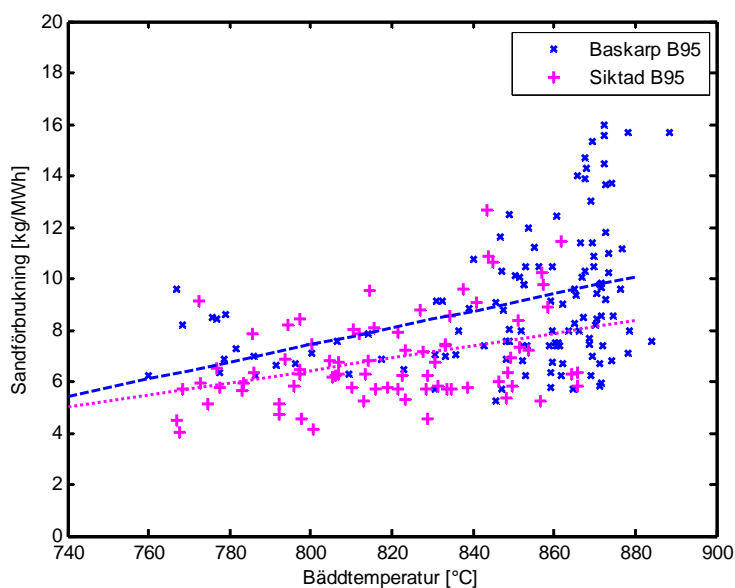


Figur 58. Ackumulerade sandstorleksfördelningar. Under sommaren 2009 byttes från "Baskarp 95" till "BFB Special Baskarp".

Figure 58. Accumulated sand size distributions. During summer 2009 the sand was changed from "Baskarp 95" to "BFB Special Baskarp".

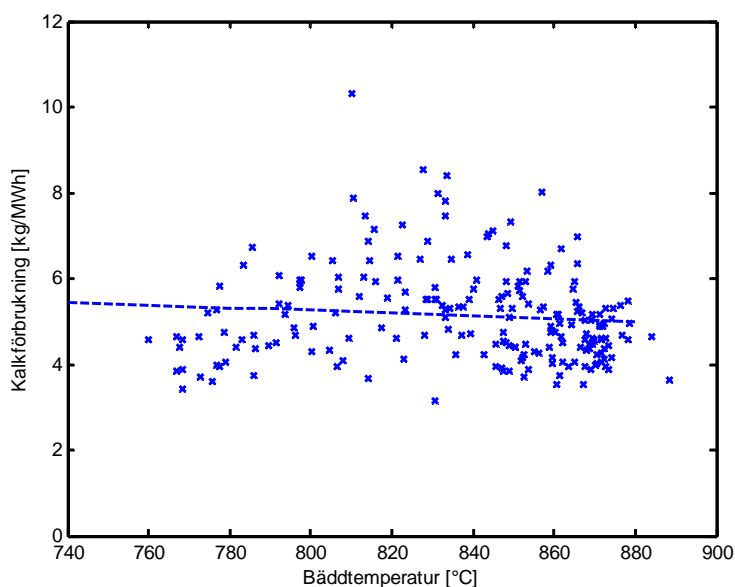
För att studera bäddtemperaturens verkan på sand- och kalkförbrukning har dagsmedelvärden ritats in som punkter i Figur 59 och Figur 60. Figurerna visar enbart data från dagar där medelvärdet av pannornas sammanlagda last var över 38 MW och bäddtemperaturerna var över 670°C för att gallra bort ickerepresentativa värden. Särskilda symboler i Figur 59 illustrerar värden efter det att färsksandens egenskaper förändrats. Linjära anpassningar av datapunkter från respektive sandtyp visar att sandförbrukningen i medeltal sjunker ca 3 kg/MWh vid en bäddtemperatursänkning av 100°C. De linjära anpassningarna visar också att sandförbrukningen minskar när siktad sand används; uppskattningsvis ca 20 % minskning vid normal bäddtemperatur.

Den specifika kalkförbrukningen (Figur 60) varierar betydligt mellan dagarna och antagligen är det varierande bränsleegenskaper med olika klorinnehåll som mest påverkar kalkförbrukningen. Trots den stora spridningen ger en linjär anpassning av datapunkterna i Figur 60 att kalkförbrukningen ökar med ca 0,4 kg/MWh om bäddtemperaturen sänks 100°C.



Figur 59. Dagsmedelvärden av sandförbrukning under 2008 och 2009 som funktion av bäddtemperatur. Förändrad sandkvalitet indikerat med symbolernas form.

Figure 59. Daily average sand consumption during 2008 and 2009 as a function of bed temperature. Altered sand quality indicated by shape of symbols.



Figur 60. Dagsmedelvärden av kalkförbrukning under 2008 och 2009 som funktion av bäddtemperatur.

Figure 60. Daily average sand consumption during 2008 and 2009 as a function of bed temperature.

En summering av massflödena under veckorna 23 till 34 under 2008 respektive 2009 som skalats mot producerad energi under perioden sammanställs i Tabell 11. Resultatet kan synas lite märkvärdigt, eftersom alla utgående askflöden hade ökat 2009, medan ingående sandmängd minskat. En liten del av förklaringen till det ökade filteraskflödet är en ökad kalkförbrukning, som nämnts ovan. Men det är en mindre del av den totala skillnaden mellan säsongerna. Om det inte föreligger något mätfel så är den troligaste förklaringen att askinnehållet i bränslet var högre 2009.

Tabell 11. Flöden av sand, kalk och askor under juni till augusti 2008 respektive 2009.

Table 11. Flows of sand, limestone and ash during June to August in 2008 compared to 2009.

	2008 (v23-v34)	2009 (v23-v34)
<b>Bottenaska (kg/MWh)</b>	20,3	20,9
<b>Cyklon + vändschakt (kg/MWh)</b>	25,1	30,5
<b>Filteraska (kg/MWh)</b>	9,3	11,6
<b>Summa Ut (kg/MWh)</b>	<b>54,7</b>	<b>63,0</b>
<b>Kalk (kg/MWh)</b>	3,6	4,8
<b>Sand (kg/MWh)</b>	10	6
<b>Bränsleaska (beräknat, kg/MWh)</b>	(41)	(52)

## 6.1 Ekonomisk uppskattning

Rent ekonomiskt är det väldigt svårt att sätta siffror på konsekvenserna av förändrad driftpunkt eftersom långtidseffekterna är osäkra. En grov uppskattning baserad på jämförelse mellan driftsäsong 2008 och 2009 följer nedan för de två avfallspannorna i Borås. Baddtemperatursänkningen mellandriftperioderna var i genomsnitt endast ca 80°C medan det i kalkylen nedan antas en sänkning av 100°C. Uppskattningen baseras på en drifttid av 6500 ekvivalenta fullasttimmar per år vilket motsvarar 260 GWh levererad energi. De besparingar som kan göras fördelas på posterna:

- + Sandförbrukningen minskar (se Figur 59)
- + Den minskade sandförbrukningen ger även minskad deponikostnad för vändschakt/cyklonaska
- + Förväntar minska rengöringsbehovet med en styck sprängsotning per år, där kostnaden inklusive driftbortfall grovt skattas till 250 kSEK.
- + Förväntat minskat korrosionsslitage, svårbedömt, kanske 150 kSEK.

De ökade kostnaderna fördelas på:

- Kalkförbrukning (Sorbacal) ökar (se Figur 60)
- Ökat kalkflödet ger ökad deponikostnad för filteraska
- Ökad elförbrukning från rökgasfläkt pga. ökad rökgasåterföring

Dessa poster sammanfattas i Tabell 12 nedan. Summerat blir besparingen ca 1000 kSEK per år, vid drift med sänkt baddtemperatur, men det är många osäkerheter i denna uppskattning. De specifika kostnaderna är starkt anläggningsberoende och påverkas till exempel av vilka möjligheter man har för deponi. Kostnaden för kalkförbrukningen beror på vilken stökiometri som rökgasreningssystemet kan uppvisa. De höga deponikostnaderna för askorna från vändschakt, cyklon och textilfilter beror här på att dessa askor skickas till

deponi i Norge (Langøya). Avslutningsvis kan det också påpekas att drift med sänkt bäddtemperatur förväntas minska risken för oplanerade driftsstopp – inte minst genom den minskade risken för agglomereringar och korrosiva beläggningar. Sådana driftsstopp är förknippade med höga omkostnader men har inte kunnat värderas och inkluderas därför inte i Tabell 12.

Tabell 12. Uppskattning av förändrade driftkostnader vid SBT

Table 12. Estimation of changed costs when altering the boiler operation to SBT.

	Förändring vid SBT	Specifik kostnad	SEK/GWh	kSEK/år
<b>Sand</b>	-3 kg/MWh	460 SEK/ton	-1380	-359
<b>Deponi Cyklon+Vändschakt</b>	-3 kg/MWh	850 SEK/ton	-2550	-663
<b>Besparing, sprängsotning</b>	1 ggr per år	250 kSEK		-250
<b>Minskat korrosions slitage</b>	150 kSEK/år			-150
<b>Kalk, Sorbacal</b>	+0,4 kg/MWh	2300 SEK/ton	920	239
<b>Deponi</b>	+0,4 kg/MWh	850 SEK/ton	340	88
<b>Rökgasåterföring, fläktarbete</b>	+0,5 kWh/MWh	500 SEK/MWh	250	65
<b>Summa:</b>				<b>-1030</b>

## 7 Slutsatser

Försöken har visat att det med befintlig utrustning och omkvotning av luft och rökgasflöden går att erhålla en bäddtemperatur runt 700°C vid full last och normal bränslemix.

Bäddaskans egenskaper förändras synbarligen vid sänkt bäddtemperatur. De agglomerat som finns i riklig mängd vid normal bäddtemperatur har försvunnit i proverna tagna vid låg bäddtemperatur. Analyserna visar också att klor, svavel och kalcium-aluminium-silikat ökar i beläggningen på retursanden vid sänkt bäddtemperatur samt att det finns kalciumsilikat. Kalcium-aluminium-silikat och kalciumsilikat har relativt höga smältpunkter och kan bidra till att bäddsanden inte agglomererar i SBT-fallet. Men den kemiska förändringen av beläggningarna på bäddaskan och retursand är nog inte den främsta förklaringen. Trolig orsak till den stora skillnaden i agglomerering hos bäddaska och retursand är istället temperatursänkningen i sig, eftersom flera föreningar som finns i beläggningarna har smältpunkt mellan de analyserade bäddtemperaturerna. Det gäller även delar av det glas som återfinns i avfallsbränslat.

Vid sänkt bäddtemperatur ökade koncentrationen klor i bäddaska och retursand medan den sänktes i cyklon- och textilfilteraskan. I vändschaktsaskan uppmättes en svag ökning av klorinnehållet. Tittar man på Cl-flödet som g/MWh blir resultaten de samma förutom att Cl-flödet istället ökar i textilfilteraskan.

Partikelmätningarna visade att man fick en minskning av submicrona partiklar och istället en ökning av supermicrona partiklar när bäddtemperaturen sänktes. De submicrona partiklarna är ofta klorider vilket betyder att det är ett mindre flöde av alkaliklorider runt överhettarna i SBT-fallet. Detta styrktes också med resultatet av Åbometoden vilken visade att det fanns lägre koncentrationer av både lösligt alkali och Cl i cyklonaskan vid SBT.

Koncentrationen av HCl i rökgasen ökade när bäddtemperaturen sänktes, vilket skulle kunna vara en konsekvens av att mindre klor binds som alkaliklorider.

Resultaten stöds också av jämviktsberäkningarna som visar att alkaliavgången ökar med ökad temperatur både i oxiderande och reducerande miljö. De visar också att CaSO<sub>4</sub> är den dominerande svavelföreningen vid oxiderande miljö och temperaturer under 900°C och H<sub>2</sub>S vid reducerande miljö och temperaturer över 800°C. Bildandet av ZnCl<sub>2</sub> påverkades inte av varken miljö eller temperatur i det aktuella området mellan 700-850°C.

Mätningarna med beläggningssonder vid överhettarna visade generellt ca 20 % mindre påslagsmängder då bäddtemperaturen i medel minskats från 876 till 714°C. Beläggningarna innehöll då också mindre mängd alkali och klor. Vid materialtemperaturen 500°C (som motsvarar en ångtemperatur av ca 465°C) återfanns avsevärda mängder KCl i beläggningarna oavsett bäddtemperatur.

Analyserna av beläggningsringar som exponerats med en temperatur av 230°C före ekonomisern visade minskad beläggningstillväxt och totalt mindre klor i beläggningen i SBT-fallet. SEM-EDX resultaten visar dock att beläggningen på vindsidan innehåller mer klor i SBT-fallet än i Ref-fallet. Vad detta beror på är svårt att säga men en möjlig förklaring

kan vara att det sker en kemisk reaktion mellan HCl i rökgasen och beläggningen på beläggningssonden. Beläggningstillväxt sker med fyra mekanismer där kemisk reaktion är en. Denna typ av beläggningstillväxt sker företrädesvis på den sida av överhettartuben som möter rökgasflödet, vilket stämmer bra överrens med resultaten här.

Resultaten av beläggningssondproverna kan ha påverkats av varierande bränsleegenskaper, vilket är svårt att undvika vid fullskaletester i avfallsförbränningsanläggningar. Analysresultat av såväl bränsle som askor visar att bränslet innehöll mer svavel när sondmätningarna genomfördes med sänkt bäddtemperatur jämfört referensfallet. Hur stor påverkan det har på beläggningstillväxten är svårt att uppskatta men den största ökningen av S hittades i retursanden och svavelbalansen visade att det mesta svavlet följde med botten- och vändschaktsaskan ut ur pannan.

Försökspannorna har kört i flera månader med sänkt bäddtemperatur utan några problem med ackumulering av oförbränt i bädden.

Den sänkta bäddtemperaturen har medfört att sandförbrukningen i anläggningen kunnat minskas. Det är dock svårt att kvantifiera besparingen eftersom verket också har förändrat sandens storleksfördelning under driftsäsongen 2009, men en uppskattning ger att den förändrade driften sänkte sandförbrukningen med cirka 25 %.

Sänkt bäddtemperatur skulle kanske minska alkaliavgången och beläggningsskiktet mer än de här redovisade resultaten om styrautomatik tillåts kontrollera bäddtemperaturen eftersom försök i labbskala visat att alkalimetaller i bottenaska drivs av vid höjning av bäddtemperaturen. De alkalimetaller och klorider som ansamlas i bäddaska och på bäddmaterial vid SBT riskerar att delvis drivas av vid temperatursvängningar.

Effekter av kontinuerlig drift med sänkt bäddtemperatur kan summeras som:

- + Minskad sintringsbenägenhet av bäddmaterial i bottenbädden
- + Minskad sandförbrukning
- + Minskad beläggningstillväxt i eldstad och på överhettare
- + Lägre vändschakt- och cyklonaskflöden pga minskad sandförbrukning
- + Minskad mängd alkali (Na och K) i höjd med överhettare
  
- HCl i gasen ökade och medförde en ökad kalkförbrukning i rökgasreningssystemet.
- Temperatursänkning med rökgasåterföring medförde högre totalt rökgasflöde genom pannan.

Den ekonomiska uppskattningen av konsekvenser från drift med sänkt bäddtemperatur visade en besparing på ca 1000 kSEK per år med att köra pannorna i Borås med sänkt bäddtemperatur. Det måste dock poängteras att det är en osäker uppskattning.

Den miljömässiga påverkan från SBT är främst att sandförbrukning och därmed askflöde minskar och kalkförbrukningen ökar vid SBT. Totalt innebär det mindre transporter och mindre deponerade mängder.



## 8 Rekommendationer och användning

Överhettartemperaturen bör ej höjas till 465°C eftersom resultaten visar att vid denna temperatur bildas KCl-kristaller på beläggningssonden även då bäddtemperaturen sänkts.

En eventuell fortsättning till projektet kan vara att undersöka olika behandlingsmetoder för att rena bäddaskan från beläggningarna av Cl, Ca, S och Si.

Resultaten från föreliggande studie visar att det finns flera drift fördelar med att ställa om driften mot SBT i avfallseldade FB-pannor:

- Minskad sintringsbenägenhet av bäddmaterial i bottenbädden
- Minskad sandförbrukning
- Minskad beläggningstillväxt i eldstad och på överhettare
- Lägre vändschakt- och cyklonaskflöden pga minskad sandförbrukning
- Minskad mängd alkali (Na och K) i höjd med överhettare

Det finns dock några nackdelar som bör beaktas

- HCl i gasen kan öka och medföra en ökad kalkförbrukning i rökgasreningsystemet och därmed ge mer filteraska som behöver deponeras.
- Temperatursänkning med rökgasåterföring medför högre fläktarbete för rökgasåterföringsfläkt och högre totalt rökgasflöde genom pannan. Ett ökat gasflöde genom pannan förskjuter förbränningen uppåt i förbränningsrummet, vilket kan, beroende på anläggningens design, försämra NO<sub>x</sub> reduktionen.

Det vore troligtvis mer fördelaktigt att sänka bäddtemperaturen med andra metoder än enbart rökgasåterföring, exempelvis genom ökat värmeupptag i botten eller genom att använda ett fuktigare bränsle. Tidigare har pannans drift optimerats för att minimera NO<sub>x</sub>, men vid SBT optimeras driften mot minskad beläggning och minskad sandagglomerering av sandkorn.

Hur lågt bäddtemperaturen bör sänkas för optimal drift är inte ännu fastställt. Klart är i alla fall att det blir märkbart mindre agglomerat av sintrade sandkorn i bottenbädden redan när den sänkts under 800°C. Försöken har visat de studerade pannorna går bra även vid bäddtemperaturer strax under 700°C.

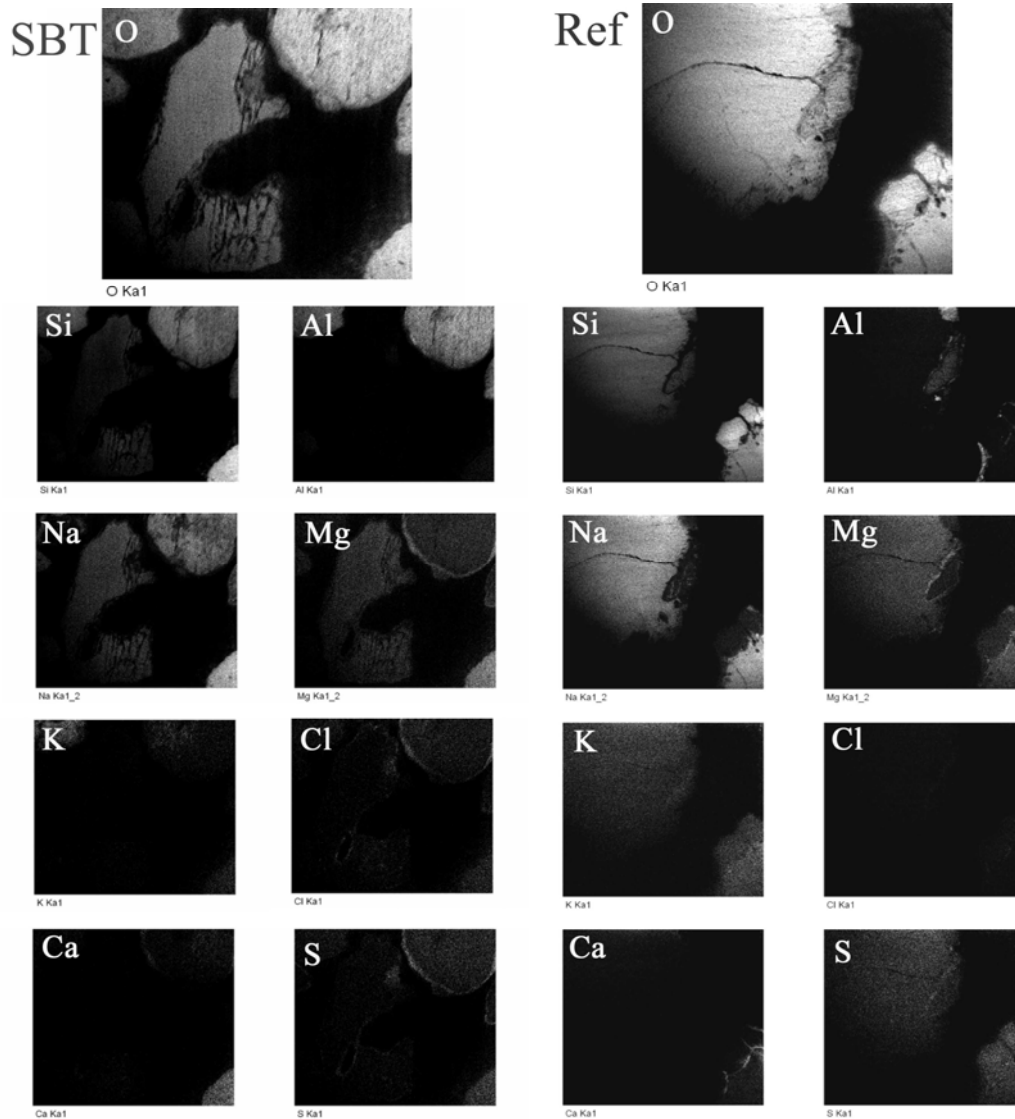
## 9 Litteraturreferenser

1. Davidsson, K. Biofuel pyrolysis and on-line alkali measurements. PhD thesis, Göteborg University Göteborg, 2002.
2. Niklasson, F. *Pre-study – Reduced temperature of the bed in fluidized bed boilers burning waste* Rapport WR-13; Waste Refinery: Borås, 2009.
3. Benson, S.A. and P.L. Holm, *Comparison of Inorganic Constituents in Three Low-Rank Coals*. Ind. Chem. Prod. Res. Dev., 1985. **24**: p. 145-149.
4. Baxter, L.L., et al., *The behaviour of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiments*. Fuel Processing Technology, 1998. **54**: p. 47-78
5. Miles, T., et al., *Boiler deposits from firing biomass fuels*. Biomass and Bioenergy, 1996. **10**(2): p. 125-138.
6. Zevenhoven-Onderwater, M. Ash-firring Matter in Biomass Fuels. PhD thesis., Åbo Akademi University, Finland, 2001.
7. Pettersson, A. Characterization of fuels and fly ashes from co-combustion of biofuels and waste fuels in a fluidized bed boiler. PhD thesis, Chalmers university of technology, Sweden, 2008.
8. Linde, R., *Handbook of Chemistry and Physics*. 75th ed. 1995, USA: CRC Press Inc. .
9. Elled, A.-L. Co-combustion of Biomass and Waste Fuels in a Fluidised Bed Boiler - Fuel Synergism. Chalmers tekniska högskola, 2008.
10. Andersson, B.-O. Driftchef, LVAB. Personlig kommunikation med A. Victorén, 2010.

## A SEM-EDX analyser

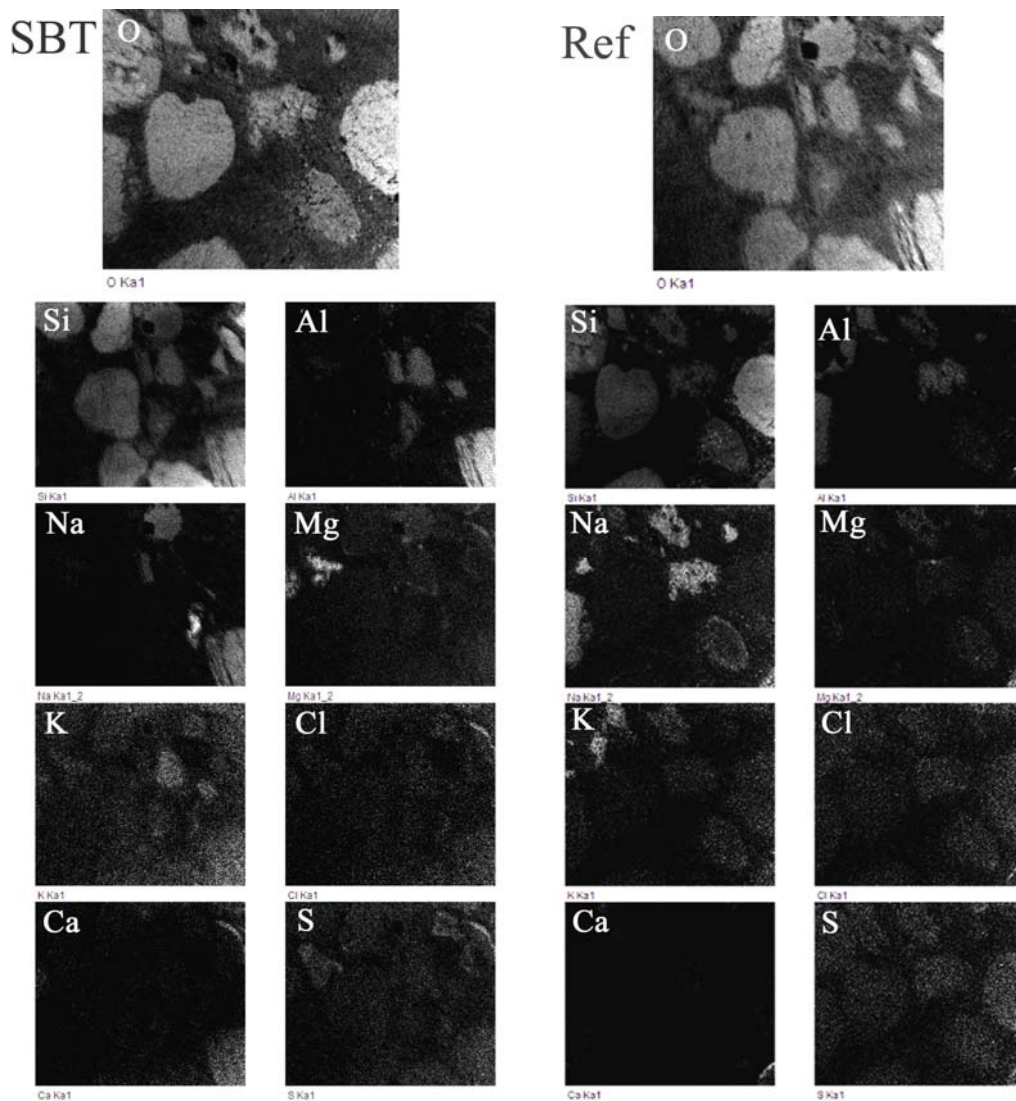
Utförliga mätdata, diagram och analysresultat läggs som bilagor.

### A.1 Askor



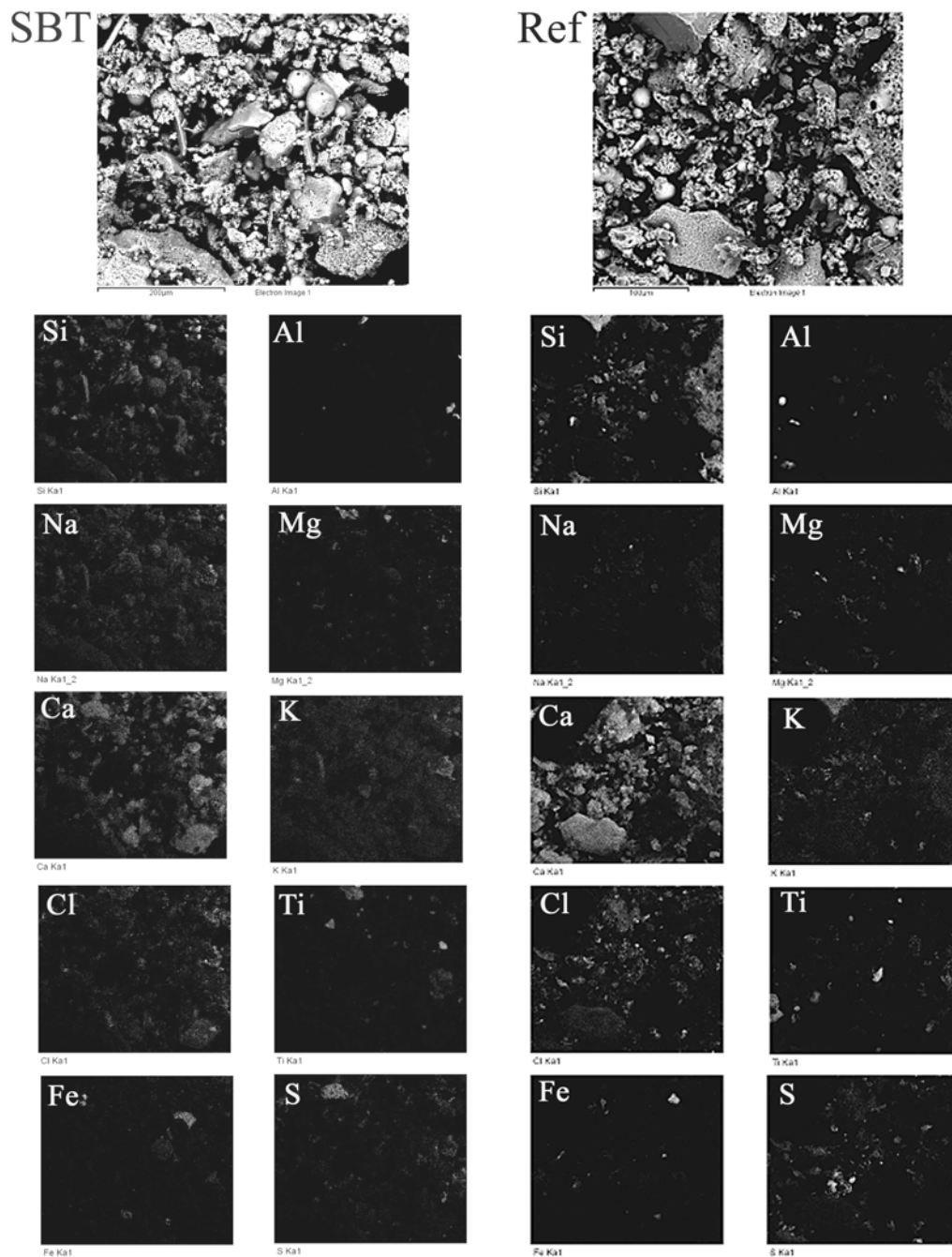
Figur 61. Sem-EDX mappar på Bäddaska från SBT- och Ref- fallet.

Figure 61. SEM-EDX mapping on bed ash from the STB- and Ref-case.



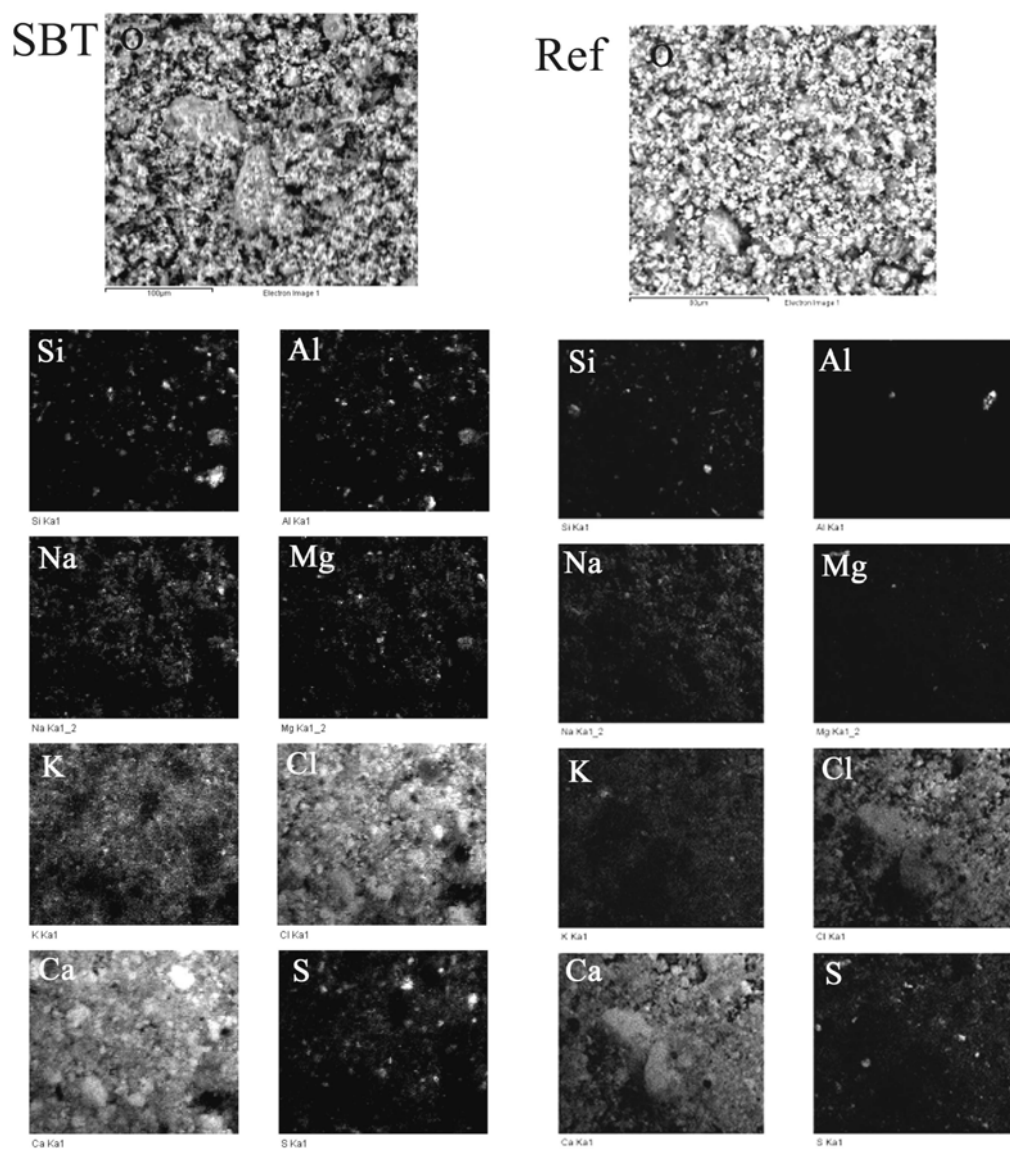
Figur 62. SEM-EDX mappar på Vändschaktsaska från SBT- och Ref- fallet.

Figure 62. SEM-EDX mapping on return shaft ash from the STB- and Ref-case.



Figur 63. SEM-EDX mappar på Cyklonaskorna från SBT- och Ref- fallet.

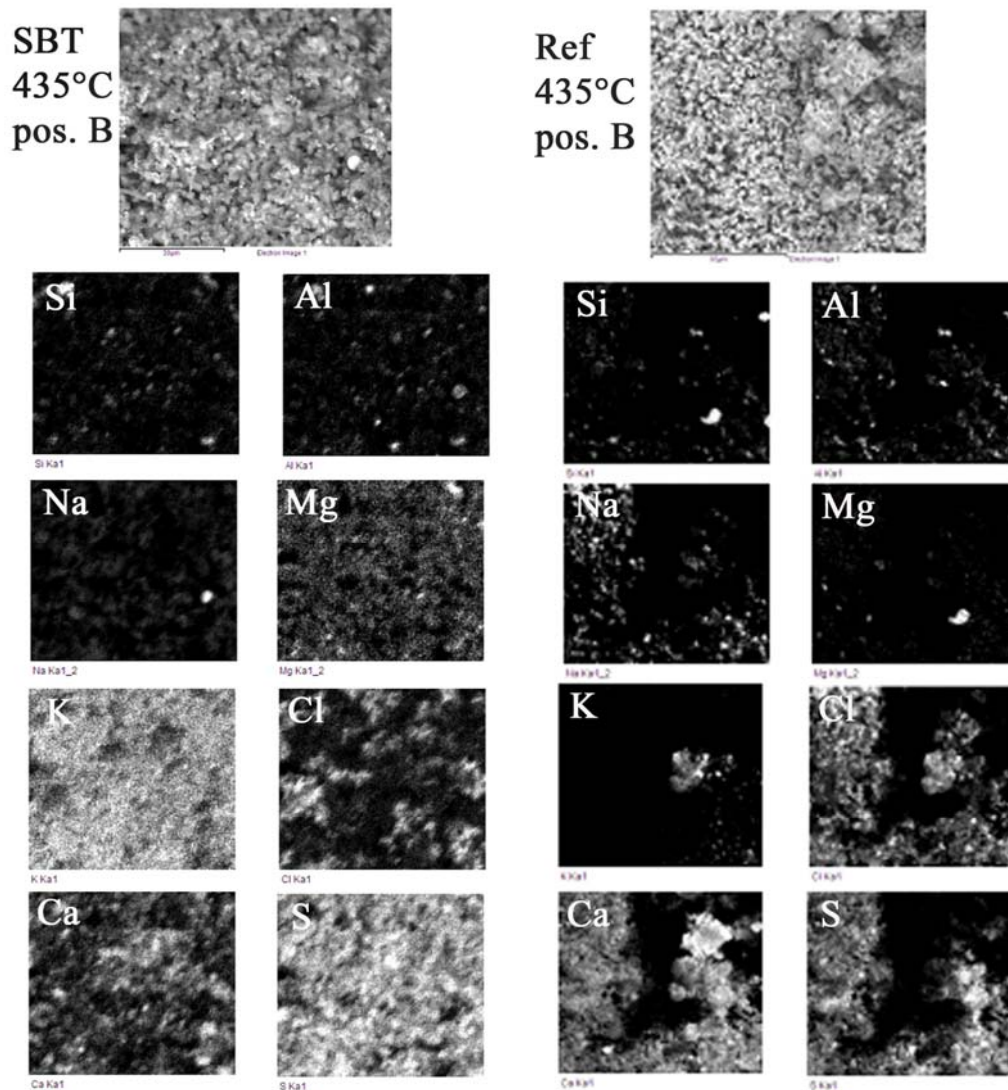
Figure 63. SEM-EDX mapping on cyclone ash from the STB- and Ref-case.



Figur 64. SEM-EDX mappar på textilfilteraska från SBT- och Ref- fallet.

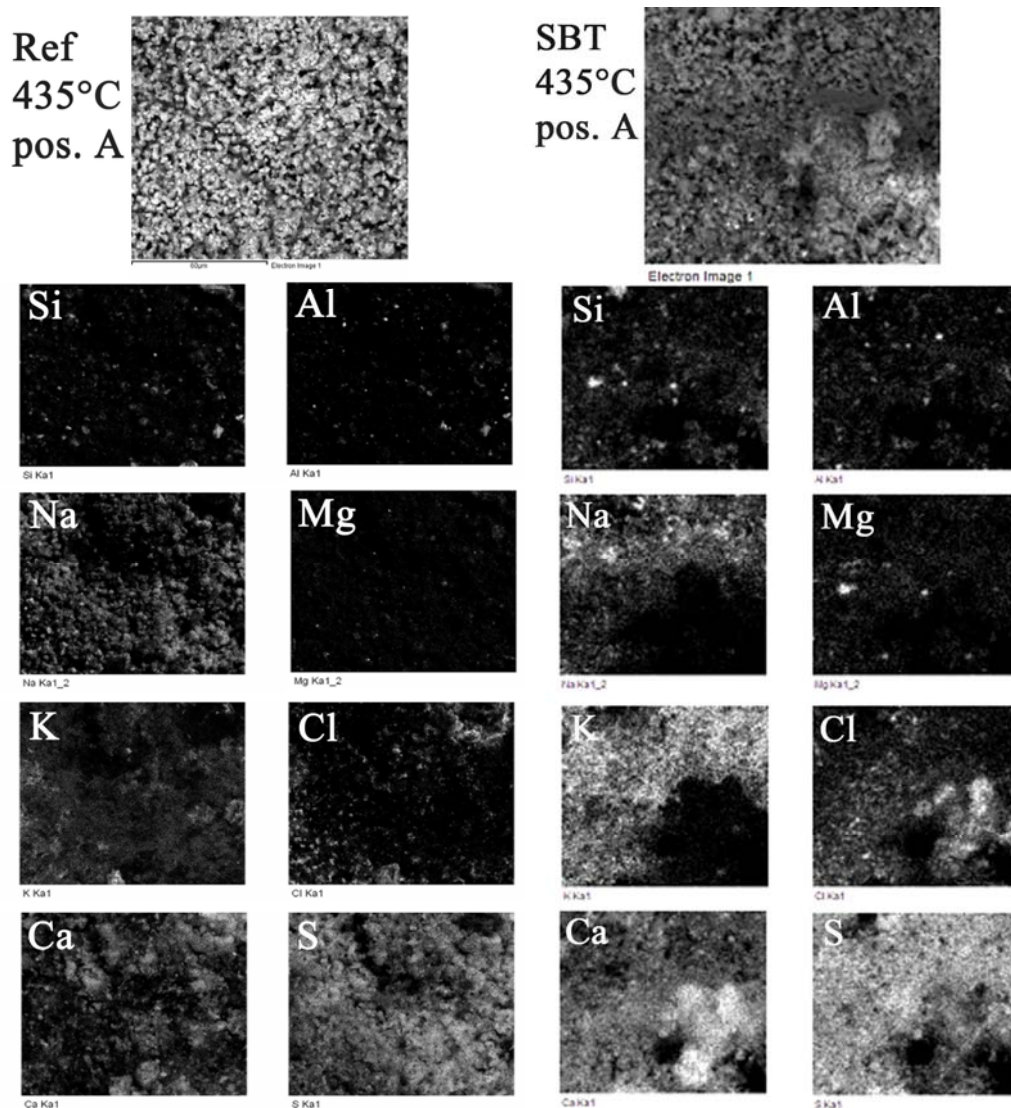
Figure 64. SEM-EDX mapping on textile filter ash from the STB- and Ref-case.

## A.2 Beläggningssringar



Figur 65. Mappingresultat från beläggningssringar på vindsidan ( $0^\circ$ ), position B och sondtemperatur  $435^\circ\text{C}$  för A) STB och B) Ref-fallet.

Figure 65. Mapping results of the deposit rings on the windward side ( $0^\circ$ ), position B and probe temperature  $435^\circ\text{C}$  A) STB and B) Ref-case.

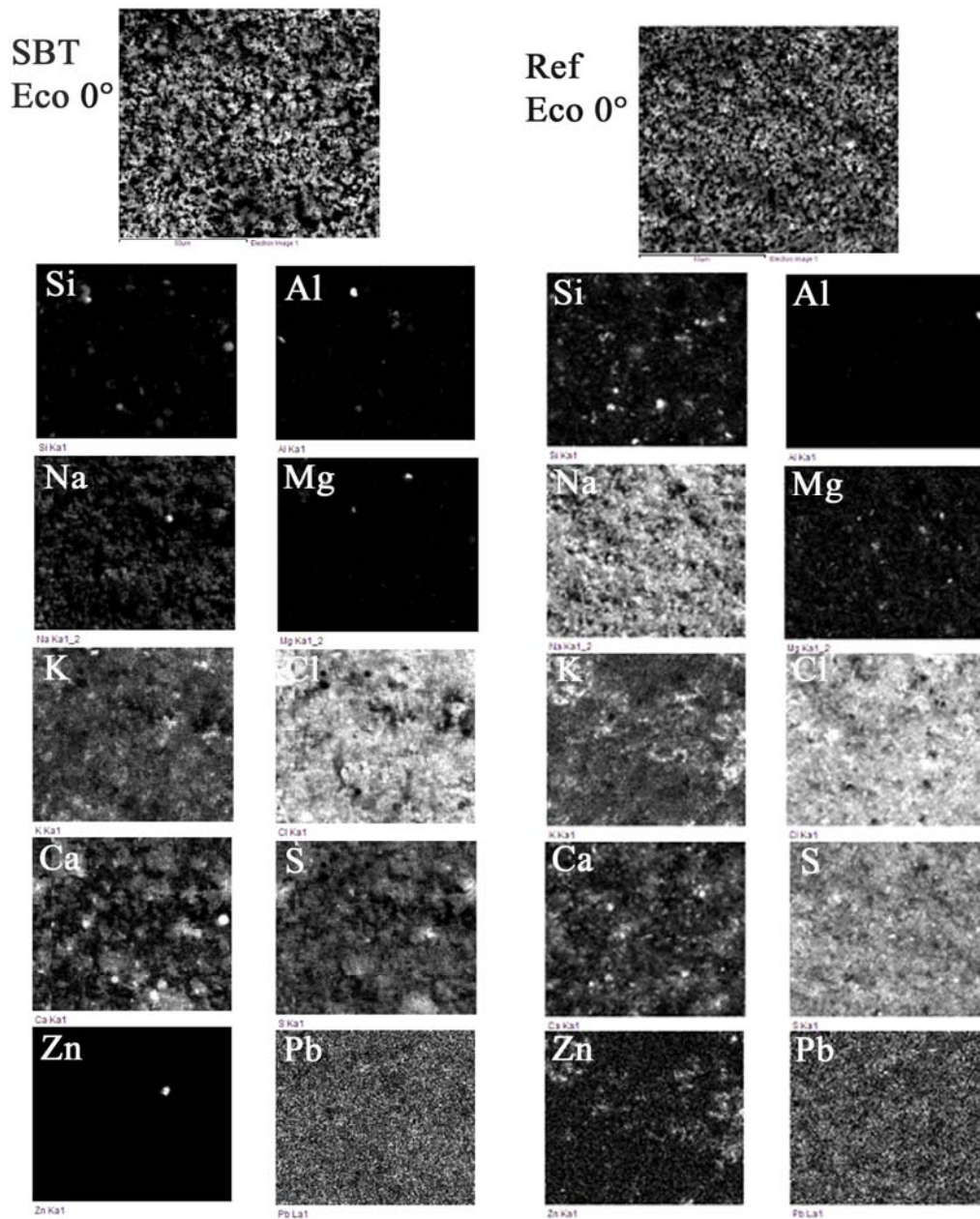


Figur 66. Mappingresultat från beläggningsringar på vindsidan (0°), position A och sondtemperatur 435°C för A) STB och B) Ref-fallet.

Figure 66. Mapping results of the deposit rings on the windward side (0°), position A and probe temperature 435°C A) STB and B) Ref-case.



### A.3 Economiser



Figur 67. Mappingresultat från beläggningsringar på vindsidan ( $0^\circ$ ), före economisern med sondtemperatur  $230^\circ\text{C}$  för A) STB och B) Ref-fallet.

Figure 67. Mapping results of the deposit rings on the windward side ( $0^\circ$ ), prior to economiser with probe temperature  $230^\circ\text{C}$  A) STB and B) Ref-case.

## B Driftdata under mätningar

Tabell 13. Driftparametrar under beläggningssondförsöken vid överhettare PVA1.

Table 13. Operational parameters of boiler during deposit probe tests at super heaters PVA1.

	1 (9:30-11:30)			2 (15:17-17:17)			3 (10:30-12:30)			4 (13:50-15:50)		
	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max
T <sub>bädd</sub> (°C)	722	694	754	705	691	719	875	871	881	877	871	885
O <sub>2</sub> (vol.-%)	6,1	6,0	6,2	6,1	6,0	6,2	7,3	7,1	7,5	7,3	7,0	7,6
CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	14	8	21	(5)	-	-	7	6	9	6	5	7
H <sub>2</sub> O (vol.-%)	16	16	17	(15)	-	-	13	13	14	13	12	13
Totalluft (Nm <sup>3</sup> /s)	7,3	7,0	7,4	7,0	6,8	7,3	8,4	8,2	8,7	8,1	7,9	8,3
Rgå Totalt (Nm <sup>3</sup> /s)	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	4,4	4,1	4,7	4,6	3,9	5,0

Tabell 14. Driftparametrar under beläggningssondförsöken vid ekonomiser PVA2.

Table 14. Operational parameters of boiler during deposit probe tests at economiser PVA2.

	1 (12:18-14:18)			2 (16:48-18:48)		
	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max
T <sub>bädd</sub> (°C)	704	659	765	872	867	878
O <sub>2</sub> (vol.-%)	5,4	4,8	6,1	6,8	6,6	6,9
CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	38	8	116	5	5	6
H <sub>2</sub> O (vol.-%)	17,2	14	20	14,1	14	15
Totalluft (Nm <sup>3</sup> /s)	7,8	7,3	8,3	8,6	8,4	8,7
Rgå Totalt (Nm <sup>3</sup> /s)	4,5	4,4	4,6	5,0	5,0	5,0

Tabell 15. Driftparametrar under partikelstorleksmätningar PVA1.

Table 15. Operational parameters of boiler during particle size distribution sampling PVA1.

	1 (12:10-12:40)			2 (16:05-16:20)			3 (10:35-10:50)			4 (15:11-15:31)		
	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max	Medel	Min	Max
T <sub>bädd</sub> (°C)	750	746	752	703	701	719	875	871	881	877	871	885
O <sub>2</sub> (vol.-%)	6,1	6,0	6,2	6,1	6,1	6,2	7,3	7,1	7,5	7,3	7,0	7,6
CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	9	7	11	2	2	-	7	6	9	6	5	7
H <sub>2</sub> O (vol.-%)	15,8	15	16	-	-	-	13	13	14	13	12	13
Totalluft (Nm <sup>3</sup> /s)	7,2	7,1	7,3	6,9	6,9	7,3	8,4	8,2	8,7	8,1	7,9	8,3
Rgå Totalt (Nm <sup>3</sup> /s)	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	4,4	4,1	4,7	4,6	3,9	5,0



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