

Förbränning av en bränslemix bestående av animaliskt avfall, industri- och hushållsavfall i FB-pannor

Anita Pettersson

Solvie Herstad Svärd

Farzad Moradian

**Förbränning av en bränslemix bestående av
animaliskt avfall, industri- och hushållsavfall i FB-
pannor**

**Combustion of a fuel mix containing animal waste,
industry and household waste in FB-boilers**

Anita Pettersson, Solvie Herstad Svärd, Farzad Moradian

Projektnummer WR-40
År: 2012

WASTE REFINERY
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
www.wasterefinery.se
wasterefinery@sp.se
ISSN 1654-4706

Sammanfattning

Detta projekt syftar till att utvärdera hur driftbetingelserna och förbränningskemin förändras i en Bubblande Fluidiserad Bädd (BFB) panna vid inblandning av ca 20 vikt-% biomal. Frågeställningarna som undersöktes var bland annat:

- Hur påverkar den nya kemiska sammansättningen bäddagglomerering, påslag, askflöden, askkvalitet, emissioner och partikelstorleksfördelning?
- Är det möjligt att med den ökade fukthalten, som inblandning av biomal innebär, köra pannan med en sänkt bäddtemperatur på ca 750 °C?

Projektet baseras på försök som genomförts på Borås Energi och Miljös två 20 MW_t BFB avfallspannor i Borås. Dessutom har resultat som tagits fram inom tidigare Waste Refinery-projekt, "Sänkt bäddtemperatur" WR19, använts som jämförelse i vissa fall. Normalt eldas pannorna med en bränsleblandning som består av 80 % sorterat brännbart verksamhetsavfall och 20 % sorterat hushållsavfall. Denna blandning består till största delen av papper, plast och trä. Med inblandningen av biomal, som är animaliska biprodukter som krossas till en pumpbar massa, förändras till viss del den kemiska sammansättningen på bränslemixen.

Resultaten från försöken visade att inblandningen av biomal påverkade bränslets kemiska sammansättning men att variationen i sammansättningen på det ordinarie avfallsbränslet kan vara stora. Det som tydligt slog igenom var att inblandning av biomal:

- Ökade fukthalten
- Sänkte värmevärdet
- Ökade halten av kväve, kalcium och fosfor
- Minskade halten bly på grund av den låga koncentrationen i biomal

Det gick dock inte att se några stora skillnader på grund av biomalinblandningen i halterna av natrium, kalium, svavel och klor, element som är betydelsefulla för uppkomsten/motverkan av bränslerelaterade driftsproblem.

De ökade halterna av kalcium och fosfor berodde till största delen på biomalens innehåll av krossat benmaterial och påverkade till viss del sammansättningen på de olika sand/askströmmarna där de största förändringarna var att halten kalcium och fosfor ökade. Dessutom kunde man notera en minskning av blyhalten i samtliga askströmmar. Kalcium-fosforföreningarna visade sig vara stabila vid de temperaturer som råder i förbränningen och inga tecken på reaktioner mellan fosfor och andra föreningar kunde påvisas. Resultaten visade att samförbränning med biomal hade följande positiva effekter på driften:

- Bäddtemperaturen sjönk, men det krävs >20 % inblandning för att nå ca 750 °C.
- Risken för bäddagglomerering minskade.
- Emissionen av NO_x minskade samtidigt som förbrukningen av ammoniaklösning sjönk.
- Mängden beläggningar på tempererade provtagningsringar, som exponerats i rökgasen, minskade d.v.s. ingen ökad risk för påslag på överhettartuber.

Slutsatsen är att pannorna gick att köra på ett säkert sätt med inblandning av biomal.

Nyckelord: Avfallsförbränning, Fluidiserad bädd, Animaliskt avfall, Biomal, Bäddtemperatur, Agglomerering, Beläggningar

Summary

The aim of this project is to evaluate how the operation conditions and the combustion chemistry is changed in a Bubbling Fluidized Bed (BFB) Boiler when adding approx. 20 wt-% Biomal into the fuel mixture. The following issues were addressed in the project:

- How does the new chemical composition of the fuel mix influence bed agglomeration, deposit growth, ash flows, flue gases and particle size distribution?
- Is it possible to run the boiler at a reduced bed temperature of about 750 °C due to the increased moisture content originating from the biomal fuel?

The project is based on combustion tests in the two Waste to Energy boilers at 20 MWth each owned by Borås Energy and Environment AB (BEM). Furthermore, results from the Waste Refinery Project “Reduced bed temperature in FB-boilers burning waste – part II” has been used as reference in some cases. At normal conditions the boilers are run on a fuel mixture containing 80 % sorted industrial waste and 20 % household waste. This fuel mixture consists mainly of paper, plastics and wood. In Borås the organic part of the household waste is sorted out and used for biogas production. With the addition of biomal, which consists of animal by-products crushed to a pumpable fuel, the chemical composition of the fuel mixture is changed to some extent.

The results from the combustion tests shows that biomal influences the chemical fuel composition, but also that there are large variations in the ordinary waste fuel composition as well. The most evident changes with addition of biomal are:

- Increased moisture
- Reduced heat value
- Increased amount nitrogen, calcium and phosphorus
- Decreased amount lead due to the low concentration in biomal

However, there were no changes in sodium, potassium, sulphur and chlorine, elements important for increased/reduced fuel related problems, derived from biomal.

The increase of calcium and phosphorus with biomal derive from bone and the calcium-phosphates influenced to some extent the sand/ash flows were the largest change was an increase in the amount of phosphorus and calcium. In addition a decrease of the amount of lead was seen in all ash flows. The calcium-phosphates were stable during combustion and no reactions of phosphorus with other elements were detected. The results from the trials in this project show that co-combustion of biomal had the following positive effects on the boiler performance:

- The bottom bed temperature decreased, but > 20 % biomal is needed to reach 750 °C.
- The risk for bed agglomeration was decreased.
- The NO_x emission was reduced at the same time as the addition of ammonia was reduced.
- The deposition rate of the deposits collected on the test probe was reduced, thus no increased risk in deposit formation on the superheater tubes.

The conclusion is that the boiler could be operated in a safe way with addition of biomal.

Keywords: Waste combustion, Fluidized bed, Animal waste, Biomal, Bed temperature, Agglomeration, Deposits.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	SYFTE OCH MÅL	1
1.2	AVGRÄNSNINGAR	2
1.3	ORGANISATION	2
2	BAKGRUND	4
3	MATERIAL OCH METODER	7
3.1	FÖRSÖKSPANNA	7
3.2	FÖRBRÄNNINGSFÖRSÖK	7
3.3	INSAMLING AV BRÄNSLE OCH ASKOR	9
3.4	ANALYSER	10
4	RESULTAT OCH DISKUSSION	14
4.1	DRIFT OCH HÄNDELSER UNDER REFERENS PROV REF OCH SVAVEL, 2010-01-16	14
4.2	DRIFT OCH HÄNDELSER UNDER FÖRSÖK BIOMAL 1 OCH BIOMAL 2, 2011-01-13	15
4.3	BRÄNSLEANALYSER	15
4.4	DRIFTDATA FRÅN MÄTNINGARNA	17
4.5	EMISSIONER	20
4.6	RÖKGAS OCH ÅNGTEMPERATUR	26
4.7	ANALYSRESULTAT	26
5	RESULTATANALYS	43
5.1	UPPFYLLELSE AV FÖRVÄNTADE RESULTAT	45
5.2	EKONOMISK UPPSKATTNING	46
6	SLUTSATSER	48
7	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	49
8	LITTERATURREFERENSER	50

Bilagor

A	DRIFTSBETINGELSER
B	ASKANALYSER
C	SEM-EDX
D	UTÖKAT ABSTRACT, NTNU

1 Inledning

I december 2010 introducerade Borås Energi och Miljö AB (BEM) biomal som ett tilläggsbränsle till det ordinarie bränslet i Fluidbäddpannorna på Ryaverket, Borås. Pannorna är designade för en bränslemix av verksamhetsavfall och hushållsavfall bestående av i första hand papper, plast och trä kontaminerat med matrester, metaller och annat. Denna bränslemix innehåller höga halter oorganiskt material bl.a. alkali och klor som innebär en risk för alkalirelaterade driftsproblem t.ex. sintring av bäddmaterial och överhettarkorrosion vilket ställer höga krav på pannorna. Pannorna är därför konstruerade för detta bl.a. genom att de har ett tomdrag för att kyla ned rökgaserna innan de träffar tuberna i bakre drag. Dessutom är ångdata anpassade för att minimera överhettarkorrosion. Med den nya bränsleströmmen tillförs i första hand mer fukt, fosfor, kväve samt fettsyror och ändrar därmed sammansättningen på bränsleblandningen.

Fosfors förbränningskemi är ett av de områden inom förbränning som är minst utforskat, dels för att den är komplex och dels för att de traditionella bränslena som kol, olja och träbränslen generellt inte innehåller några högre halter fosfor. Detta medför att man i dag inte riktigt vet hur olika bränslesammansättningar med höga fosforkoncentrationer påverkar förbränningsmiljön, driftbetingelser och i förlängningen pannors livslängd. Det medför också att det saknas viktig information för modellering av förbränning med fosforrika bränslen som t.ex. biomal, MBM (meat and bone meal), olika typer av slam och rapskaka. Ökad kvävehalt riskerar att öka emissionen av kväveoxider från en förbränningsanläggning. Tidigare erfarenheter från samförbränning med biomal har dock visat att NO_x-emissionen inte ökar utan i flera fall minskat.

En fråga som uppstod inför introduktion av biomal var om bränslet skulle öka eller minska risken för bränslerelaterade driftsproblem. Hur kommer den ändrade kemiska sammansättningen att påverka risken för att bäddmaterial sintrar ihop, olika askströmmars sammansättning och egenskaper, samt mängden beläggningar och sammansättning på beläggningar på värmeöverförande ytor?

Andra frågor var hur bränslets ökade fukthalt skulle påverka temperaturprofilen i pannan samt om den ökade kvävehalten skulle innebära ökade NO_x utsläpp.

1.1 Syfte och mål

Projektet har omfattat fullskaleförsök med och utan tillsats av biomal till det ordinarie bränslet, 80 % verksamhetsavfall och 20 % hushållsavfall.

Projektets mål är att:

- Fastställa hur inblandning av biomal påverkar driften av pannorna t.ex. temperaturprofil i pannorna, emissioner till luft mm.
- Utvärdera om det går att hålla en lägre bäddtemperatur, utan någon ombyggnad av anläggningen, där biomalinblandningen förväntas bidra med en del av den totala temperatursänkningen.
- Utvärdera om den erhållna temperatursänkningen då också ger samma driftfördelar som med den gamla bränslemixen [1].
- Fastställa hur den nya bränslekemin påverkar agglomereringstendenser hos bäddaskan där det under ordinarie drift bildas agglomerat upp till en storlek av 50-70 mm.

- Studera beläggningstillväxten och beläggningarnas sammansättning för att kartlägga hur mängden korrosiva ämnena, fosforkemin och beläggningarnas struktur förändras.
- Analysera hur bäddaskornas kemi och partikelstorleksfördelning förändras och hur detta påverkar askornas egenskaper.
- Undersöka om biomalinblandning kan påverka miljöklassningen av askorna. (Eftersom biomal inte innehåller några större föroreningar av tungmetaller och har hög askhalt är det möjligt att biomalinblandningen kan leda till en bättre miljöklassificering av askorna.)
- Med hjälp av analysdata, gasmätningar, bränsle och askflöden räkna ut ämnesbalanser över pannan för att fastställa om det sker ämnesförflyttningar på grund av den nya bränslekemin.
- Med hjälp av belägnings-, ask- och gasanalyserna bedöma hur pannan påverkas både kort- och långsiktigt på grund av den förändrade bränslesammansättningen.

Projektet förväntades resultera i följande:

1. Ge svar på hur de olika askflödena påverkas
2. Fastställa askkvaliteten
3. Visa hur beläggningstillväxten på värmeöverförande ytor påverkas
4. Visa om det är möjligt att hålla en lägre bäddtemperatur med den nya bränslemixen
5. Visa hur ämnessammansättningen av beläggningarna påverkas
6. Öka förståelsen för fosfors förbränningskemi
7. Ge nya input till termodynamiska jämviktsprogram
8. Visa förändringar i ämnesbalanser över pannan
9. Ligga till grund för en Licentiatrapport
10. Skapar tillsammans med tidigare projekt på avfallspannorna en kunskapsbank där det är möjligt att jämföra andra parametrar för olika försök när nya frågor uppstår.

1.2 Avgränsningar

Resultaten från projektet är till största delen representativa för förbränning i fluidiserade bäddpannor. I dag finns det sju kommersiella pannor i Sverige förutom Borås som samförbränner biomal och alla dessa är fluidbäddar. Rostpannor har helt andra förutsättningar och varken luft-bränsle-blandningen eller temperaturer överensstämmer med fluidbäddar. Tester med biomal har gjorts i rosterpannor men dessa har inte varit så lyckosamma. Antagligen skulle det dock gå bra att blanda in mindre mängder biomal i en panna med en rörlig rost t.ex. Martinrosten där man har god omblandning. När man väl kommer till beläggningsbildning och korrosion så går resultaten sannolikt att överföra till rosterpannor förutsatt en god omblandning av bränslemixen. Men temperaturen och syrehalten i rökgaserna är också av stor betydelse.

1.3 Organisation

Förbränningsförsöken har planerats av BEM, SEP och Högskolan i Borås. Utförandet av försöken, provtagningar och mätningarna leddes av Solvie Herstad Svärd, S.E.P. och utfördes av SP (Fredrik Niklasson) med hjälp av Högskolan i Borås (Anita Pettersson) medan panndriften leddes av BEM och utfördes av Dalkia. Metso och E.ON är med i arbetsgruppen och har bistått ekonomiskt och kunskapsmässigt till projektet. Arbetsgruppen (Referensgrupp) består av representanter från alla medverkande parter. I

Tabell 1 visas en lista på de personer förutom författarna till denna rapport som arbetat tillsammans i projektet.

Tabell 1. Projektets arbetsgrupp.

Table 1. The project working group.

Namn	Organisation
Bengt-Åke Andersson	E.ON Värme Sverige
Margareta Lundberg	Metso Power AB
Fredrik Niklasson	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Per Karlsson	Borås Energi och Miljö AB
Göran Gustafsson	Borås Energi och Miljö AB
Anders Gunnarsson	Dalkia
Tobias Richards	Högskolan i Borås

Gruppen har träffats kontinuerligt under projektets gång och utbytt erfarenheter och åsikter, planerat för det fortsatta arbetet och tagit ställning till nya frågor som uppkommit.

Projektet är en del i ett licentiatarbete. Högskolan i Borås har haft en doktorand som arbetar med forskning i projektet under handledning av seniora forskare. Projektet kommer att utgöra hälften av det arbete som krävs för en licentiat avhandling genom analyser av bland annat askor och beläggningar [8] [9].

2 Bakgrund

Efter utbrotten av BSE (Bovine spongiforme encephalopathy) bland nötkreatur på 1990-talet och upptäckten av Creutzfeldt-Jakobs sjukdom gjordes en del forskning på förbränning av MBM (Meat and Bone Meal) [5]. De flesta av dessa studier är gjorda i labbreaktorer och oftast med samförbränning av kol men också med biobränslen [6] [7]. Kunskapen inom området är dock begränsad och studier i konventionella anläggningar är fåtaliga. Det faktum att nästan alla studier på animaliskt avfall grundas på MBM är i sig en brist, eftersom MBM är torrt och därför skiljer markant från andra typer av animaliska restprodukter som inte förbehandlats lika mycket t.ex. biomal som bl.a. har en hög fukthalt.

Råvaran till biomal består av animaliska biprodukter, det vill säga restprodukter från slakterier och hela djurkroppar. Vissa animaliska biprodukter får man använda till biogas efter viss förbehandling och det gör man också. Råvarorna till biomal innehåller djurdelar som man klassar som högrisk när det gäller spridande av galna kosjukan, det vill säga hjärna, ryggrad samt självdöda djur och detta klassas som kategori 1 enligt ABP, Jordbruksverket. Dessa råvaror skall förbrännas och får inte användas till biogas. Därmed är alternativet till att tillverka biomal tillverkning av kött- och benmjöl vilket är en mycket mer komplicerad process som dessutom kostar betydligt mer energi.



Figur 1. Kort på biomal i distributionssystemet in till pannorna.

Figure 1. Picture of biomal in the distribution system to the boilers.

Det finns mycket lite forskning gjord på området samförbränning av sorterat brännbart avfall och pumpbart animaliskt avfall. Däremot har samförbränning av kött- och benmjöl (MBM) med olika bränslen som kol och RDF (Refuse Derived Fuel) etc. studerats [5] [6]. Större delen av den forskning som gjorts på MBM är dock gjord i labbskala medan detta

projekt utförs i en konventionell avfallsförbränningsanläggning. Det har rapporterats fullskaleprojekt med samförbränning av biomal med träflis, torv och RDF [8] som utförts av S.E.P. och Konvex. Det kommer också att publiceras drifterfarenheter från samförbränning av biomal i den kommande upplagan av Värmeforsks bränslehandbok som publiceras under 2012.

Dagens produktion av biomal i Sverige ligger på drygt 100 000 ton per år vilket är i en mängd som gör det till ett bränsle värt att studera.

Erfarenheten från de fyra ångpannor (totalt sju pannor utöver Borås) som hittills eldar eller har eldat biomal i Sverige är att de inte haft några problem med överhettarkorrosion. I Perstorp, som är den panna som har högst ångdata (65 bar och 475 °C) hade man vissa indikationer till korrosion när man samtidigt tillsatte kalk till bädden. Kalken adsorberade därmed allt svavel. Utan kalktillsats har man inte några problem. Tvärtom så undersöker man där om Biomals innehåll av kalciumfosfat bildar skyddande beläggningar. Inom detta projekt genomfördes beläggningsmätningar för att analysera sammansättningen på beläggningarna. Detta ger oss en första indikation om beläggningarna vid inblandning av ca 20 % biomal innehåller korrosiva salter.

Samförbränning med biomalbränslet medför bland annat en ökning av mängden fukt, kväve och fosfor in till förbränningen. Svavel och fosfor är kända för att förändra beläggningsbildningen vid förbränning. Till skillnad från effekten av svavel är fosfors roll fortfarande dåligt utredd. Ett tidigare forskningsprojekt, "Sänkt bäddtemperatur..." [1], visade att mängden bäddkorn i bäddmaterialet som sintrat ihop till större partiklar samt beläggningsbildningen reducerades om temperaturen i bädden sänktes med 100-150 °C. Att nå denna temperatur med enbart rökgasrecirkulation är dock problematiskt eftersom pannorna ej konstruerats för detta. En lösning är att tillsätta vatten men samförbränning med det fuktiga bränslet biomal bidrar till en sänkning av bottenbäddtemperaturen.

På Borås Energi och Miljö pågår en utredning för att se om det finns möjlighet att få en ändrad klassificering av vissa askflöden till bättre miljöklass vilket skulle sänka deponikostnaderna. Resultat från detta projekt kan bidra till denna utredning.

2.1 WR19

Som nämnt ovan har det gjorts ett Waste Refinery-projekt där man tittat på effekterna av sänkt bäddtemperatur i samma pannor som använts i detta projekt, WR19 [1]. I det projektet användes rökgasrecirkulation och vattenbegjutning för att sänka bäddtemperaturen med 100-150 °C. Referensfallet i WR19 utfördes på samma sätt som i detta projekt och flera av resultaten i de två projekten ligger nära varandra. Vi har därför valt att jämföra vissa delar i projekten i denna rapport. Några av slutsatserna hämtade från WR19s slutrapport finns nedan:

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.

3 Material och metoder

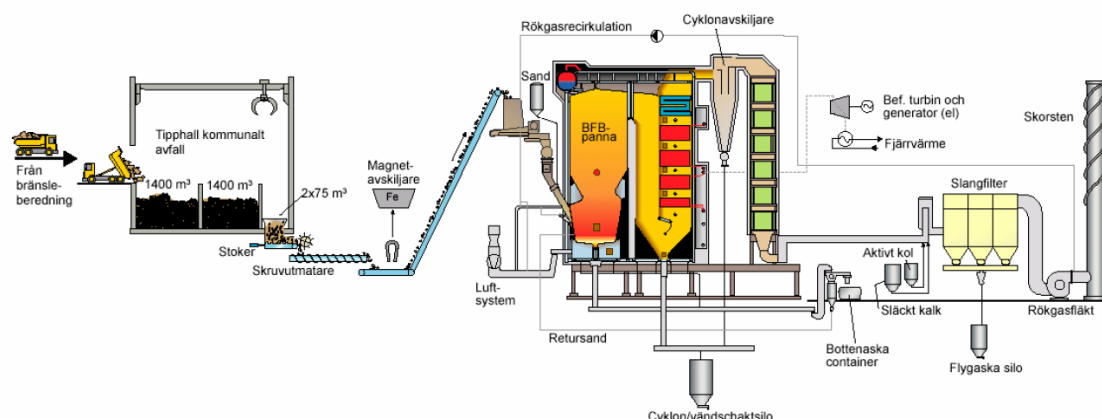
Projektet utgår från praktiska fullskaleförsök i Borås Energi och Miljö ABs avfallspannor på Ryaverket i Borås. Pannorna är designade för en bäddtemperatur på 870 °C men efter de positiva resultaten från WR19 [1] försöker man hålla en bäddtemperatur på ca 750 °C. Som ett led i detta har man även introducerat biomal som ett extrabränsle till den normala avfallsblandningen.

3.1 Försökspanna

Försöken utfördes på två 20 MW_t Bubblande Fluidiserad Bädd (BFB) pannorna, se Figur 1, med ångdata 405 °C och 49 bar [1]. Pannorna är separata enheter men delar bränslematnings- och askhanteringssystem. Samtliga uttag av fasta prover samt exponering av tempererade sonder gjordes enbart på den ena pannan, P1, men driftdata loggades på båda pannorna under försöken.

I den aktuella anläggningen sällas bottenmaterialet som kontinuerligt tas ut under bädden. Sällningen resulterar i en finare fraktion, retursand och en grov, bottenaska. Retursanden återförs sedan till bädden som bäddmaterial.

Pannorna är utrustade med SNCR-system för NO_x reduktion. Ammoniak sprutas in i eldstadens övre del där temperaturen normalt ligger på 900 till 950 °C.



Figur 2. Schematisk bild över en av de två 20 MW_t avfallseldade BFB pannorna.

Figure 2. Sketch of one of two 20 MW_{th} waste fired BFB boilers used for the experiments.

3.2 Förbränningsförsök

Försöken utfördes under två heldagar som delades upp i ett förmiddagsförsök och ett eftermiddagsförsök. Den första dagen skulle representera normalfall och driften skedde med något sänkt bäddtemperatur (835 °C) jämfört med designtemperaturen 870 °C. Bränslet utgjordes av den ordinarie bränsleblandningen med 80 % verksamhetsavfall och 20 % hushållsavfall beräknat på energivärdet. Den andra förbränningsdagen gjordes med en inblandning av ca 20 vikt-% Biomal och 80 vikt-% av den ursprungliga bränslemixen.

3.2.1 Bränslematning

Det ordinarie avfallsbränslet matas in via ett stup till pannan och inga förändringar gjordes här under försöken, utan bränslematningen skedde som under ordinarie drift. Biomalen hanteras i ett separat slutet system med en förvaringstank på utsidan av kraftvärmeverket, varifrån det sedan pumpas via ett rörsystem och sprutas in i pannan med hjälp av tryckluft. Matningen påminner om matningen av svartlut i sodapannor. Benmaterialet i biomalen är malt till en maxstorlek på 19 mm och det är relativt lättflytande i jämförelse med avvattnat avloppsslam eller köttfärs. Biomalen matas in i övre delen av bädden i höjd med den ordinarie bränslematningen men från en av de långsgående pannväggarna, vinkelrät mot ordinarie bränslematning.

3.2.2 Driftbetingelser

Innan försöken inleddes kördes pannorna med jämn drift och aktuell bränsleblandning i minst tre dygn för att säkerställa att jämvikt nåtts innan provtagningar startade. Samma försöksschema användes för båda förbränningsfallen.

Utvärderingen baserades på att man jämförde driften vid de två försöksdagarna där två provtagningsperioder definierats under respektive provdag; ett på förmiddagen och ett på eftermiddagen. Planen var att man skulle få två referens prov och två biomalprov men eftersom svavelhalten i bränslet ökade under referensdagen beslutades att endast förmiddagsprovet skulle användas som referens. Som ett komplement användes därför också ett äldre referensfall från ett tidigare Waste Refinery-projekt, WR19, där samma driftbetingelser används som vid detta referensfall:

- Referensförsök med ordinarie bränsle 2010-11-16. Ref (förmiddagsförsöket) och Svavel (eftermiddagsförsöket), se Tabell 2.
- Försök med inblandning av 15-20 % biomal där försöken betecknas Biomal 1 och Biomal 2
- Data från fallet sänkt bäddtemperatur från WR19 [1] betecknas som Ref WR19. Även fallet med sänkt bäddtemperatur används som jämförelse på några ställen i denna rapport och betecknas som SBT WR19.

Tabell 2. Försöksmatris.

Table 2. Test matrix.

Försök	Avfalls-blandning	Biomal	Datum
Ref	100 %		101116 fm
Svavel	100 %		101116 em
Biomal 1	80 %	20 %	110113 fm
Biomal 2	80 %	20 %	110113 em
Ref WR19	100 %		090428
SBT WR19	100 %		090422

Referensförsöken (Ref och Svavel) genomfördes 2010-11-16, vilket var efter genomförd revision på pannan och innan driften med biomal startades. De genomfördes med ordinarie bränsle och ordinarie driftinställningar. Bäddtemperaturen justerades inte speciellt under försöken utan pannorna har körts med automatik som utnyttjar rökgasrecirkulation.

Efter att samförbränning med biomal tagits i drift och driften trimmats in genomfördes motsvarande prov med ca 20 % biomalinblandning 2011-01-13. Pannan var därmed något mer försmutsad än under referensförsöken.

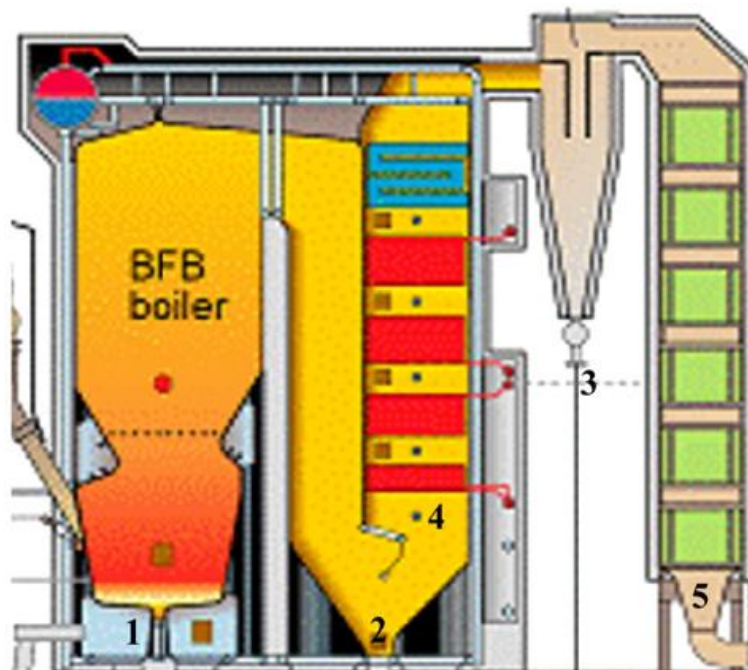
Under de två provdagarna genomfördes följande provtagningar och registreringar:

- Prover togs ut på bränsle, bottenbäddmaterial, retursand, vändschaktsaska, cyklonaska och filteraska.
- Ordinarie driftparametrar och emissionsdata loggades.
- Förbrukningar av ammoniak och kalciumhydroxid registrerades.
- Tempererade sonder sattes in i vändschaktet före överhettare för provtagning av beläggningar.

3.3 Insamling av bränsle och askor

De prov som togs vid försöken var; bränsleprov, bottenaska, retursand, vändschaktsaska, cyklonaska, textfilteraska och beläggningsprover, se Figur 2.

Bränsle- och askprov togs upprepade gånger under försöken för att samlingsproven skulle bli så representativa som möjligt. Provtagningarna skedde via provtagningsslussar/luckor avsedda för ändamålet. Under försöken gjordes också beläggningmätningar med provringar som tempererats till 435 °C (i ett fall var temperaturen 500 °C). En yttemperatur på 435 °C representerar dagens ångdata på pannorna. Sonderna som används är desamma som användes i projektet WR19 och är två likadana luftkylda beläggningssonder med en längd av 2 meter och en ytterdiameter av 38 mm. Två provringar av 253 Ma, ett höglegerat stål för olika högtemperaturapplikationer, placerades ca 10 cm från sondspetsen. I sondmaterialet precis invid provringarna uppmäts den materialtemperatur som styr tryckluftflödet och kontrollerar materialtemperaturen. Vid varje mätning förses beläggningssonden med två korrosionsbeständiga beläggningsringar för provtagning av beläggning (mängd och olika analyser). Sonderna placerades i rökgasstråket före den första överhettaren som rökgasen passerar. Under försöken gjordes också rökgasmätningar i rögasstråket efter ekonomisern där HCl och SO₂ analyserades med våtkemisk metod. Övriga rökgasdata är hämtade från anläggningens kontinuerliga rökgasanalys som sker med hjälp av en FTIR som är installerad efter rökgasreningen.



Figur 3. Positioner för askprovtagning och mätningar, 1: bottenaska, 2: Vändschaktsaska, 3: cyklonaska, 4: beläggningssond, uppströms överhettarna, 5: SO₂ och HCl mätningar nedströms ekonominisern

Figure 3. Ash sampling and measurement Positions 1: bed ash, 2: boiler ash, 3: cyclone ash, 4: deposit probes upstream of the superheater, 5: measurement of SO₂ and HCl downstream the economizer

Bottenaskflödet har uppmäts med hjälp av en container som är invägd och tom vid försökets start, fylls under en bestämd tid och sedan vägs in efter försöket. Textilfilteraskflödet fastställdes med hjälp av loggad vikt på asksilon och vändschaktsaska och cyklonaska vägdes tillsammans och beräkningar och tidigare erfarenheter användes för att beräkna de två flödena på samma sätt som i WR19 [1].

3.4 Analyser

För att identifiera vilka ämnen och föreningar som återfinns i de fasta proven (bränslen, askor och beläggningar) används analysmetoderna; Elementaranalys, Siktning, SEM-EDX, XRD och Kemisk fraktionering. Elementaranalys ger en ämnesanalys och den totala sammansättningen, Siktning ger storleksfördelning, SEM-EDX ger ytstruktur, ämnen och föreningar, XRD ger de kristallina föreningarna. Kemisk fraktionering ger lösligheten av olika ämnen vilket oftast också visar reaktiviteten vid förbränning. Kemisk fraktionering är också bra för att stödja SEM-EDX resultaten.

De fasta proverna analyserades enligt nedan:

Bränsle: Elementaranalys, Pyrola+GC-MS

Bottenaska: Elementaranalys, siktning, SEM-EDX

Retursand: Elementaranalys, Agglomereringstest, SEM-EDX, XRD, Kemisk fraktionering

Vändschaktsaska: Elementaranalys, Siktning, SEM-EDX, XRD, Kemisk fraktionering, Laktest; L/S 2 och 10

Cyklonaska: Elementaranalys, Siktning, SEM-EDX, XRD, Kemisk fraktionering Laktest; L/S 2 och 10

Textilfilteraska: Elementaranalys, SEM-EDX

Beläggingsringar: Elementaranalys, SEM-EDX, XRD

Efter samråd i arbetsgruppen fastslogs att det inte var möjligt att genomföra agglomereringstest på bottenaska (som det ursprungligen var tänkt) utan man gjorde istället dessa på retursandsprov. Pyrola+GC-MS gjordes men resultaten kunde inte utvärderas. En ytterligare avvikelse från ansökan är att kemisk fraktionering inte utfördes på de olika avfallsfraktionerna eftersom det ansågs hälsovådligt att laka biomalprover.

SP har genomfört siktningen av proverna samt agglomereringstest medan Högskolan i Borås stod för analyserna SEM-EDX, XRD, Kemiskfraktionering. De olika metoderna beskrivs nedan.

De ämnen som analyserades var de vanligaste askbildande ämnena Si, Ca, K, Na, Mg, Fe, S, Ti och S samt Cl ur korrosions och miljö synpunkt. Även ämnen som Mn, Ba, Cu, V, Cr, Co, Ni, Zn, Pb, Cd, Mo och As som är viktiga ur miljösynpunkt analyserades för de olika bränslena för att få en bild av hur sammansättningen förändrades med inblandning av biomal, dessa kommer igen i lakanalysen L/S = 10. Spårelementen finns också med i analyserna med SEM-EDX men de som inte kunde detekteras på grund av låga/inga halter togs ej med i resultatredovisningen.

3.4.1 Kemisk fraktionering

Kemisk fraktionering (Åbo metoden) är en stegvis lakningsmetod med olika lösningsmedel som har visat sig mycket användbar för att avgöra om närvarande ämnen är reaktiva eller inerta under förbränningen och som stöd till SEM-EDX. Metoden används för karakterisering av bränslen och askor. Metoden togs initialt fram för karakterisering av lignit och subbituminöst kol [11]. Den utvecklades för att även passa biobränslen [12] [13] och har sedan ytterligare applicerats på flygaskor [15]. Kemisk fraktionering sker i tre lakningssteg. I det första steget används avjoniserat vatten som lösningsmedel vilket löser alkalialter i provet. I steg två används 1 M ammoniumacetat för att lösa jonbytbara organiskt bundna ämnen som Na, Ca och Mg och i steg tre 1 M saltsyra för att lösa karbonater och sulfater av andra metaller. I detta projekt är både bränsle och aska av stort intresse. Fraktionering av bränslet ger en bild av i vilken omfattning ämnen sitter bundet i reaktiva föreningar i bränslet respektive askorna vid de två försöken. Det visar t.ex. hur mycket reaktivt alkali som förekommer och även andra ämnen som Ca och S som kan ha en alkalireducerande effekt vid förbränningen vilket är intressant med tanke på korrosion. Kemiskfraktionering är också ett utmärkt verktyg för att studera hur asksammansättningen förändras med den ändrade bränslemixen eftersom man på samma sätt som med bränslen får en bild av lösligheten av olika ämnen efter förbränning. Man kan t.ex. se om det finns mer eller mindre klorider i askan med förändrad bränslemix.

3.4.2 SEM-EDX

Elektronmikroskopi (SEM-EDX) är en kraftfull metod som lämpar sig väl för analys av förbränningsaskor och beläggingsringar. Elektronmikroskopet är utrustat med tre

detektorer. SE-detektorn ger information om provets ytstruktur, BSE-detektorn eller SSD-detektorn, ger bilder som visar skillnader i täthet hos det fotograferade materialet. Ljusare färg innebär högre densitet vilket antingen betyder tätare material eller innehåll av ämnen med högre atomvikt. EDX-detektorn ger elementfördelningar över provet. Detektorn scannar över provytan enligt en förprogrammerad procedur vilket resulterar i elementkartor. Man kan även utföra punkt (spot-) och area-analyser som ger elementsammansättningen i en punkt eller mindre area vilket gör det möjligt att avgöra vilken förening en kristall eller partikel sannolikt innehåller.

3.4.3 XRD

Röntgendiffraktion (XRD) detekterar kristallina föreningar i provet. XRD är en beprövad metod för att bestämma vilka kristallina faser som fanns i askfraktionerna. 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 1-2 vikt-%) gjordes med hjälp av JCPDS databas version 2010.

3.4.4 Lakteter (L/S 2 och 10)

Askprover lakas med avjoniserat vatten i två steg, först med L/S (liquid to solid) kvoten 2 liter/kg och sedan med kvoten 8 liter/kg [15]. Laklösningarna analyseras och svaret ger den kortsiktiga utlakningen L/S=2 och den långsiktiga L/S =10.

3.4.5 Våtkemisk analys av HCl och SO₂

Mätning av rökgasens koncentration av HCl och SO₂ gjordes nedströms efter ekonomisern (position 5 i Figur 3). Mätningen sker genom att en uppmätt mängd rökgas sugs ut under 2 timmar och bubblas genom en lösning som binder HCl och SO₂ med 0,1 M NaOH (aq) respektive 0,3 % H₂O₂. Lösningen analyseras och ger en genomsnittskoncentration över de 2 timmar som mätningen pågått.

3.4.6 Agglomereringstest

Agglomereringstester genomfördes av SP [16]. Provet som ska testas (Retursand) placeras i en reaktor omgärdad av en temperaturstyrd elektriskt uppvärmd ugn som kan nå upp till ca 1100°C. Själva reaktorn består av ett vertikalt metallrör (ca 70 mm diameter) som ungefär i mitten är försedd med en luftfördelare av porös sintrad metall på vilket det studerade provmaterialet vilar. Bädden fluidiseras med gas som tillsätts i reaktorns botten av massflödesregulatorer. Tryckfallet över provbädden mäts av en mikromanometer (Furnace FCO12) och bäddtemperaturen med ett termoelement av typen K.

Bäddmaterialet (180 g) placeras i reaktorn och temperaturen i reaktorn stabiliseras till 750°C. Därefter tillsätts en fluidiseringsgas (85 % N₂ och 15 % CO₂) samtidigt som temperaturen ökas med 3,5°C/min. För dessa relativt grovkorniga prover valdes ett totalt fluidiseringsflöde av 50 l/min vilket var det minsta flöde som krävdes för visuellt god och jämn fluidisering. Tryckfallet över bädden och bäddtemperaturen mäts och loggas under temperaturstegringen. Då bädden agglomererar sjunker tryckfallet och den temperatur där detta sker anges som bäddagglomereringstemperaturen.

Vissa prover har en tydlig agglomereringstemperatur, där tryckfallet sjunker mycket snabbt, medan andra prover har ett mer utdraget förlopp. Därför anges tre temperaturer, som visar när och hur snabbt materialet agglomererar:

- Partiell agglomerering – där tryckfallet börjar ändras
- Tydlig agglomerering – där tryckfallet minskar kraftigt, ca 2 % per minut
- Total agglomerering – där minskningen av tryckfall avtar

Noggrannheten på bäddagglomereringstemperaturen bedöms vara ± 10 °C.

4 Resultat och diskussion

4.1 Drift och händelser under referensprov Ref och Svavel, 2010-01-16

Målsättningen med försöken var att genomföra mätningarna vid fullast och vid stabila förhållanden. På morgonen den 16 november var man dock tvungen att gå ned i last vilket riskerade att påverka referensförsöken. Det var problem med hämtning av flygaska som var anledningen till att lasten reducerades med start ca 7:40.

Flygaskan hämtades dock kl. 8:00 varvid lasten ökades igen. Vid 9:00 var lasten uppe i fullast och temperaturerna i eldstaden stabila och det bedömdes att provtagningar kunde starta.

De två provperioderna Ref och Svavel definierades som de tidsperioder som beläggningssonden exponerades. Prov Ref pågick mellan 9:02 och 12:02 (med beläggningssonden tempererad till 435 °C) och därefter startades prov Svavel som pågick mellan kl. 12:32 och 15:32 (med beläggningssonden tempererad till 500 °C). Tanken var att jämföra beläggningstillväxten och sammansättningen på beläggningarna vid två olika materialtemperaturer. Senare insåg vi att vi var tvungna att göra avsteg från försöksmatrisen i ansökan vad det gäller två yttemperaturer på beläggningsringarna. Eftersom bränslekvaliteten varierade så mycket var det bättre att göra dubbelprov vid normal driftstemperatur. (Beläggningssonden höll därmed en temperatur av 435 °C under båda biomalförsöken.)

Lasten låg mycket jämt på ca 20 MW termiskt, se Figur 4A och B i avsnitt 4.4, och allt såg mycket bra ut. Under fallet Svavel hände dock något med bränslet vilket märktes på att SO₂-halten och kalkdoseringen ökade drastiskt, se Figur 7A och B i avsnitt 4.6.

Den ökade SO₂-halten efter rökgasreningen indikerade att det antagligen hade varit mycket olika rökgaskemi vid överhettarna under Ref- och Svavelfallet d.v.s. mer svavel i rökgasen under Svavelfallet. Det skulle därmed vara svårt att dra några slutsatser om den ökade materialtemperaturen på provringarna under Svavelfallet jämfört med Reffallet påverkade mängd och sammansättning på beläggningarna.

Det diskuterades då om vi skulle avbryta referensprov 2 och genomföra ett till prov under kvällen. Det visade sig dock att SO₂-halten höll i sig och ingen extra provtagning genomfördes.

En anledning till de höga SO₂-halterna skulle kunna vara stora mängder gips i bränslet. En annan orsak skulle kunna vara leverans av hundmat. Vid diskussion med driftoperatörerna framkom det att det kommit in lass med hundmat under dagen. Ett lass på morgonen och två lass vid 14-tiden.

4.2 Drift och händelser under försök Biomal 1 och Biomal 2, 2011-01-13

Biomalförsöken genomfördes 2011-01-13 med ett biomalflöde på 2 m³/h och panna (eller 2 ton/h och panna - densiteten på biomal är ungefär 1kg/dm³). Detta flöde ställdes in på bägge pannorna ett par dagar innan biomalförsöken för att få sammansättningen på bäddmaterial och askor i jämvikt.

Biomaldoseringen hade varit mycket jämn och bra till bägge pannorna under natten innan försöken. Matningen blev dock något oroligare under försöksdagen, speciellt till panna 1. Det uppstod två kortare stopp i inmatningen till panna 1; 09:39-09:57 och 12:08-12:15.

Biomal 1-provet (08:46-11:23) stoppades något i förtid då det blev en kortare störning i biomalflödet även mot slutet av provperioden och den totala tiden blev 2 timmar och 37 minuter i stället för 3 timmar.

Det andra provet pågick mellan 12:00-15:00 och även här förekom ett kortare stopp i biomalflödet. Dessa stopp i biomalinmatningen förekom endast i panna 1 - i panna 2 var biomalflödet stabilt under hela dagen.

Totalt sett bedöms inte det något oroliga biomalflödet påverka jämförelsen mellan de olika driftsfallen med undantag för CO- och TOC-värdena, se avsnitt 4.4.

4.3 Bränsleanalyser

Det togs ut fyra delprov av avfallsbränslet under de bägge testdagarna och fyra prov biomal under biomalförsöken. Proven togs med två timmars mellanrum kl 8, 10, 12 och 14. Två prover slogs samman till samlingsprov (kl. 8 och 10 = 1; kl. 12 och 14 = 2). Resultaten från bränsleanalyserna visas i Tabell 1, tillsammans med beräknade ämneskoncentrationer för den aktuella bränslemixen i biomalfallen.

Vid Ref- och Svavelförsöket bestod bränslet av den ordinarie bränslemixen 80 % verksamhetsavfall och 20 % sorterat hushållsavfall. Som nämnts ökade svavelhalten i bränslet kraftigt under denna provdag. I det ordinarie avfallet ingår även hundmat, som till stor del består av animaliska råvaror. Dessa leveranser är ej jämt fördelade i tiden och går direkt till bränslebunkern på Ryaverket. Den aktuella dagen hade tre lass hundmat levererats och periodvis bestod därför bränslet till viss del av hundmat.

Efter att detta uppmärksammats så stoppades hundmatleveranserna inför biomalförsöken för att utvärderingen inte skulle försvåras. I projektet bestämdes också att man skulle använda referensfallet från WR19 som extra referens, se Tabell 3.

Under provdagen med biomalförbränning var bränslet 80 energi-% av den normala bränslemixen och 20 energi-% Biomal (22 vikt-% biomal), se Tabell 4.

Tabell 3. Analys av bränsleprover från de två försöksdagarna samt WR19 [1].

Table 3. Analysis of fuel samples taken during the two test days in addition to WR19 [1].

Prov	Ref	Svavel	Biomal 1	Biomal 2	Biomal 1	Biomal 2	Biomal 1	Biomal 2	Ref	SBT
typ	Avfall	Avfall	Avfall	Avfall	Biomal	Biomal	Blandning	Blandning	WR19	WR19
									Avfall	Avfall
Fukt, % br	37,5	36,3	44,7	39,4	61,4	60,4	48,4	44,4	33,1	35,7
Aska, % br	12,7	13,6	10,2	12,2	5,3	5,4	9,1	10,6	12,0	12,2
Aska, % ts	20,3	21,3	18,4	20,2	13,7	13,7	17,6	19,1	17,9	19,0
Elementaranalys		[%-av ts]								
Kol, C	46,9	45,1	47,5	43,9	53,4	55,1	48,5	45,8	46,0	46,0
Väte, H	6,2	5,8	6,3	5,6	7,7	8,0	6,5	6,0	6,1	6,0
Svavel, S	0,46	0,83	0,44	0,49	0,29	0,27	0,42	0,45	0,20	0,35
Kväve, N	1,2	1,1	1,0	1,0	6,6	5,9	1,9	1,8	1,1	1,1
Klor, Cl	0,7	0,6	0,9	0,6	0,4	0,3	0,9	0,5	0,5	0,49
Syre, O	24,3	25,2	25,5	28,3	17,9	16,8	24,2	26,3	28,0	27,0
Värmevärdet		[MJ/kg]								
H _i , br	10,9	10,6	9,9	9,7	8,2	8,3	9,5	9,4	11,6	10,9
H _s , ts	18,8	18,1	19,8	17,6	25,2	24,8	20,7	18,8	18,6	18,8
Huvudelement		[mg/kg ts]								
S	4 600	8 300	4 400	4 900	2 900	2 700	4 157	4 528	2 000	3 500
Cl	6 600	6 300	9 300	5 600	4 400	2 600	8 506	5 093	4 700	4 900
K	3 898	3 706	3 000	3 200	2 000	2 100	2 838	3 014	4 400	3 600
Na	6 557	7 370	6 700	5 900	5 200	3 900	6 457	5 562	6 400	8 100
Ca	27 405	28 755	31 000	32 300	44 600	45 600	33 204	34 549	26 000	26 900
Al	11 612	9 308	12 000	10 600	100	100	10 072	8 824	11 000	11 500
Mg	2 741	2 961	3 200	3 600	1 000	1 000	2 844	3 160	2 900	3 100
Ti	1 604	1 470	3 200	2 600	100	100	2 698	2 177	2300	2 500
Mn	223	170	200	200	100	100	184	183	e. a.	e. a.
Ba	244	298	400	400	100	100	351	349	e. a.	e. a.
P	954	809	700	800	21 800	22 000	4 119	4 386	2 100	1 400
Fe	4 994	4 196	8 000	6 300	300	500	6 752	5 319	4700	9 800
Si	38 367	43 026	45 300	39 400	800	600	38 089	32 838	35000	45 500
Spårelement		[mg/kg ts]								
Cu	609	383	420	230	6,0	4,0	353	192	1200	960
V	14	12	13	12	e. a.	e. a.	11	10	11	12
Cr	71	70	160	90	2,0	3,0	134	75	100	110
Co	6,9	7,5	9,0	8,0	0,7	0,7	7,7	6,8	5	5
Ni	20	143	27	21	0,7	1,0	23	18	16	22
Zn	893	543	670	830	1 300	3 700	772	1 315	530	600
Pb	1 482	554	180	660	2,0	0,8	151	549	120	120
Cd	3,7	2,1	4,0	1,0	0,2	0,2	3,4	0,9	1	0,4
Mo	3,2	7,7	9,0	4,0	0,0	0,0	7,5	3,3	4	4
As	7,7	9,4	13,0	7,0	3,0	3,0	11,4	6,3	13	29

br = färskt prov, ts = torrt br. prov, Avfall = 80 % verksamhetsavfall + 20 % hushållsavfall,

Blandning = 80 % Avfall + 20 % Biomal e. a. = ej analyserat

De största skillnaderna om man jämför biomal med ordinarie avfall är att biomal har:

- Högre fukthalt
- Lägre askhalt
- Något lägre värmevärde
- Högre kvävehalt
- Innehåller betydligt mer fosfor

Från tabellen kan man notera att fukthalten på det ordinarie avfallet var något lägre under referensförsöken än under biomalförsöken. Inblandningen av biomal ökade dessutom fukthalten på totala bränsleblandningen med ca 5-% enheter.

Biomal innehåller ca hälften så mycket aska som ordinarie avfall om man jämför fuktigt bränsle. Askhalten minskade därmed något vid inblandning av biomal.

Värmevärdet på bränsleblandningen som eldades under biomalförsöken (9,4 MJ/kg fuktigt bränsle) är något lägre än värmevärdet på det ordinarie avfallet som eldades under referensförsöken i november (10,7 MJ/kg fuktigt bränsle). Hela skillnaden beror inte på inblandning av biomal utan det ordinarie avfallet som eldades tillsammans med biomalen var fuktigare än det avfall som eldades under referensproven.

Inblandningen av biomal ger en ökning av fosforinflödet med 4 gånger jämfört med den normala bränslemixen vilket borde vara mer än tillräckligt för att få genomslag i förbränningen. Flera olika nyckeltal har tagits fram i andra studier för att försöka bedöma olika effekter och dessa varierar efter bränsletyp. I Agglobelägg 3 där RDF pellets samförbränts med bark används bland annat kvoten $(2S+3P)/(Na+K)$ (som ska vara >1) för att bedöma om det finns S och P tillräckligt för att man teoretiskt skall kunna ersätta allt klor i alkaliföreningar med svavel eller fosfor. Utan biomalinblandning är kvoten $(2S+3P)/(Na+K)$ 0,7-1,0 och med 20 vikt-% biomal ca 2. Man bör dock vara försiktig hur man tolkar dessa nyckeltal.

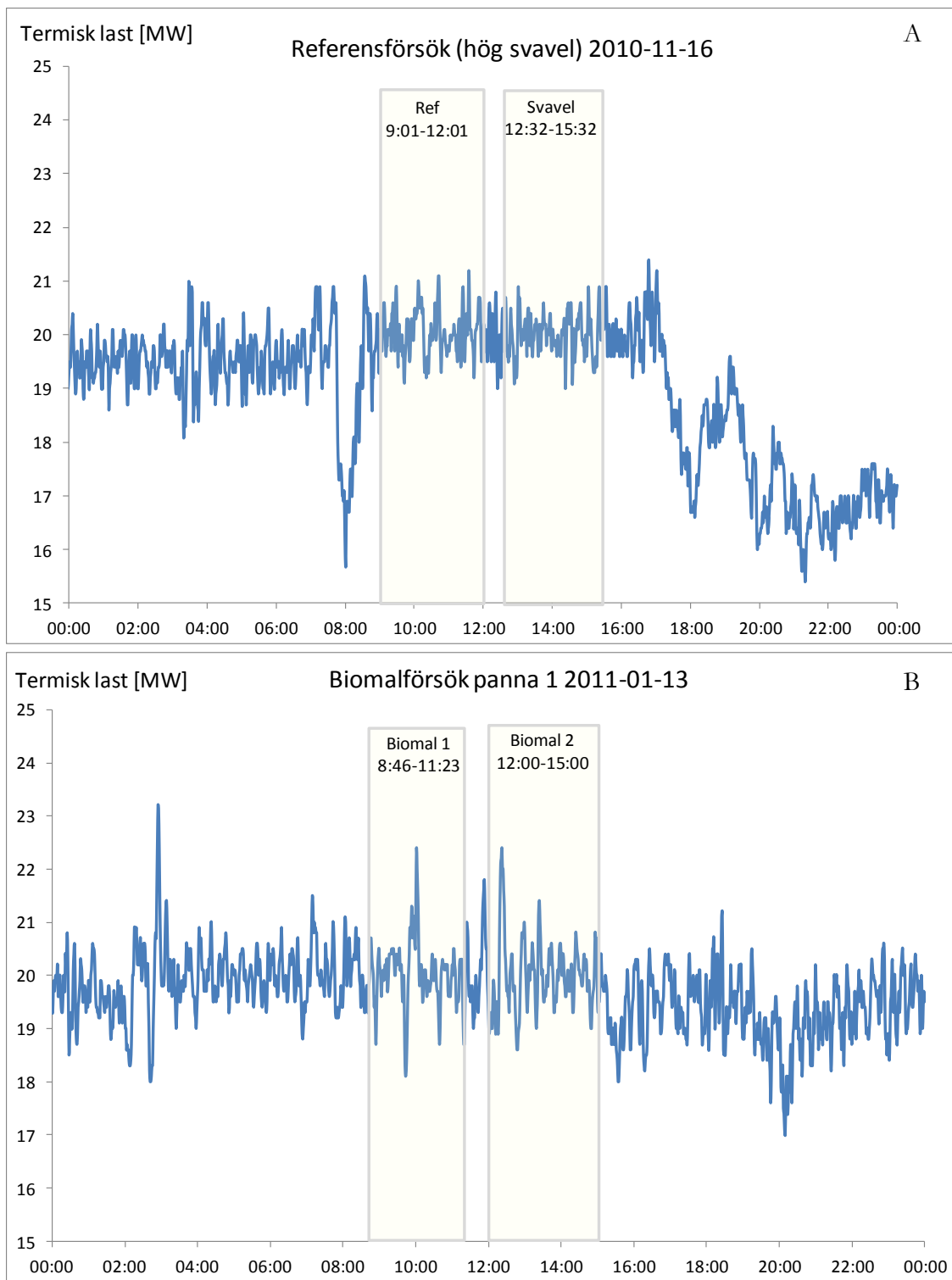
4.4 Driftdata från mätningarna

Driftdata från pannorna finns sammanställda i Tabell 4. En av de effekter man var ute efter när man valde att addera biomal till den ursprungliga bränslemixen var att man ville få ner bäddtemperaturen till ca 750 °C utan att behöva använda rökgasåterföring och vattenbegjutning. Detta lyckades inte helt under försöken men bäddtemperaturen sänktes med ca 70 °C till runt 765 °C. Lite av denna sänkning måste dock tillskrivas en något högre fukthalt i den ordinarie bränslemixen under Biomalförsöken jämfört med Ref- och Svavelfallet.

Tabell 4. Driftdata från försöken

Table 4. Operating conditions during the combustion tests

		Ref	Svavel	Biomal 1	Biomal 2
Termisk last	MW	20,0	20,0	20,0	20,0
Flöde utgående ånga	t/h	27,4	27,4	27,1	27,1
O ₂ mätning panna	% fuktig	6,0	6,0	6,0	6,0
CO	mg/Nm ³ @11 % O ₂	6,1	6,4	25,8	17,2
Beräknat avfallsflöde	ton/h	7,4	7,5	6,5	6,5
Biomalflöde	m ³ /h			1,9	2,0
Andel Biomal	Energi %			19,4	21,3
Andel Biomal	Vikt %			22,3	23,9
Totalluftflöde	Nm ³ /s	9,5	9,4	8,3	8,2
Primärluftflöde	Nm ³ /s	6,4	6,4	5,2	5,3
Totalt recirk flöde	Nm ³ /s	3,7	3,7	4,7	4,7
Bädd temperatur VB	°C	848	851	791	791
Bädd temperatur VF	°C	793	796	746	745
Bädd temperatur HB	°C	844	847	785	785
Bädd temperatur HF	°C	844	847	750	745
Mv bädd temp		832	835	768	766
Temperatur under näsa	°C	937	945	918	922
Temperatur över näsa	°C	895	902	908	910
Eldstadstemp 2 sek	°C	998	1004	999	994
Vald toptemp	°C	895	900	896	890



Figur 4. Termisk last under försöken. A; Ref och Svavel, B; Biomal 1 och Biomal 2.

Figure 4. Thermal load during the tests. A; Ref and Sulphur, B; Biomal 1 and Biomal 2.

4.5 Emissioner

Loggade emissionsdata efter rökgasrening redovisas i Tabell 5. Ur tabellen syns tydligt att samförbränning med biomal sänker NO_x-emissionerna. Trots den betydligt högre kvävehalten i bränsleblandningen under Biomalfallen jämfört med Ref- och Svavelfallet så minskar NO_x-emissionerna från pannan med ca 50 % vid samförbränning med biomal, se Figur 5A och B. Samtidigt minskas doseringen av ammoniak med 50 %. Denna NO_x-reducerande effekt av samförbränning med biomal har noterats vid andra pannor som eldar biomal t.ex. Karlskoga KVV. Sågtandsformen på NO_x kurvan i Figur 5B beror sannolikt på mätningen av O₂-torr i skorstenen som använts för omräkning till aktuellt O₂. Detta eftersom även O₂-torrs kurva visade denna sågtandsform.

Pannor är dock inte identiska även om de tillhör samma system så jämför vi NO_x-värden och ammoniakflöden för panna 2 så blir bilden inte lika tydlig, se Figur 6A och B. NO_x-värdena låg kring 70-80 mg/Nm³ för bägge provdagarna d.v.s. med och utan biomal. Det fanns dock en tydlig skillnad i ammoniakdoseringen för panna 2 som sänktes från 45 till 30 l/h.

Tabell 5. Kalk och ammoniak tillsats samt gasanalyser.

Table 5. Lime and ammoniac addition together with gas analyses.

		Ref	Svavel	Biomal 1	Biomal 2
Ammoniakflöde	l/h	40	41	19	20
Kalkflöde	kg/h	102	185	77	76
H ₂ O	mg/Nm ³ aktuellt O ₂	16	15	18	18
CO	mg/Nm ³ 11 % O ₂	6,1	6,4	26	17
TOC	mg/Nm ³ 11 % O ₂	1,8	2,0	2,9	2,3
NO _x	mg/Nm ³ 11 % O ₂	96	102	53	53
N ₂ O	mg/Nm ³ 11 % O ₂	1,4	1,3	3,0	3,1
NH ₃	mg/Nm ³ 11 % O ₂	6,3	6,4	4,2	4,1
SO ₂	mg/Nm ³ 11 % O ₂	11	87	0,7	0,3
HCl	mg/Nm ³ 11 % O ₂	8,1	16	8,1	7,9

CO- och TOC-halterna var högre under Biomalförsöken jämfört med Ref- och Svavelfallet pga. ojämn biomalinmatning, se Tabell 5.

NO_x-reduktionen beror sannolikt på att det frigörs ammoniak vid förbränningen av biomal men också på lägre temperaturer och lägre lokal stökiometri. Kvävet i biomalen sitter till största delen bundet i aminosyror från mjuk animalisk vävnad. Aminosyror är uppbyggda av amin- och karboxylgrupper och vid förbränningen bryts de sönder och aminergrupperna (NH₂) frigörs och reagerar med NO på samma sätt som vid tillsats av urea eller ammoniak som brukar beskrivas enligt den förenklade reaktionen, se reaktion 1. Men i den verkliga reaktionen är det NH₂ radikaler som agerar [17]. Under Biomalförsöken användes ingen vattenbegjutning för att hålla nere bäddtemperaturen. Men med det biomalflöde man har tänkt sig (1 ton/h och panna) behöver man tillsätta 1 ton vatten/h för att hålla en bäddtemperatur runt 750 °C.

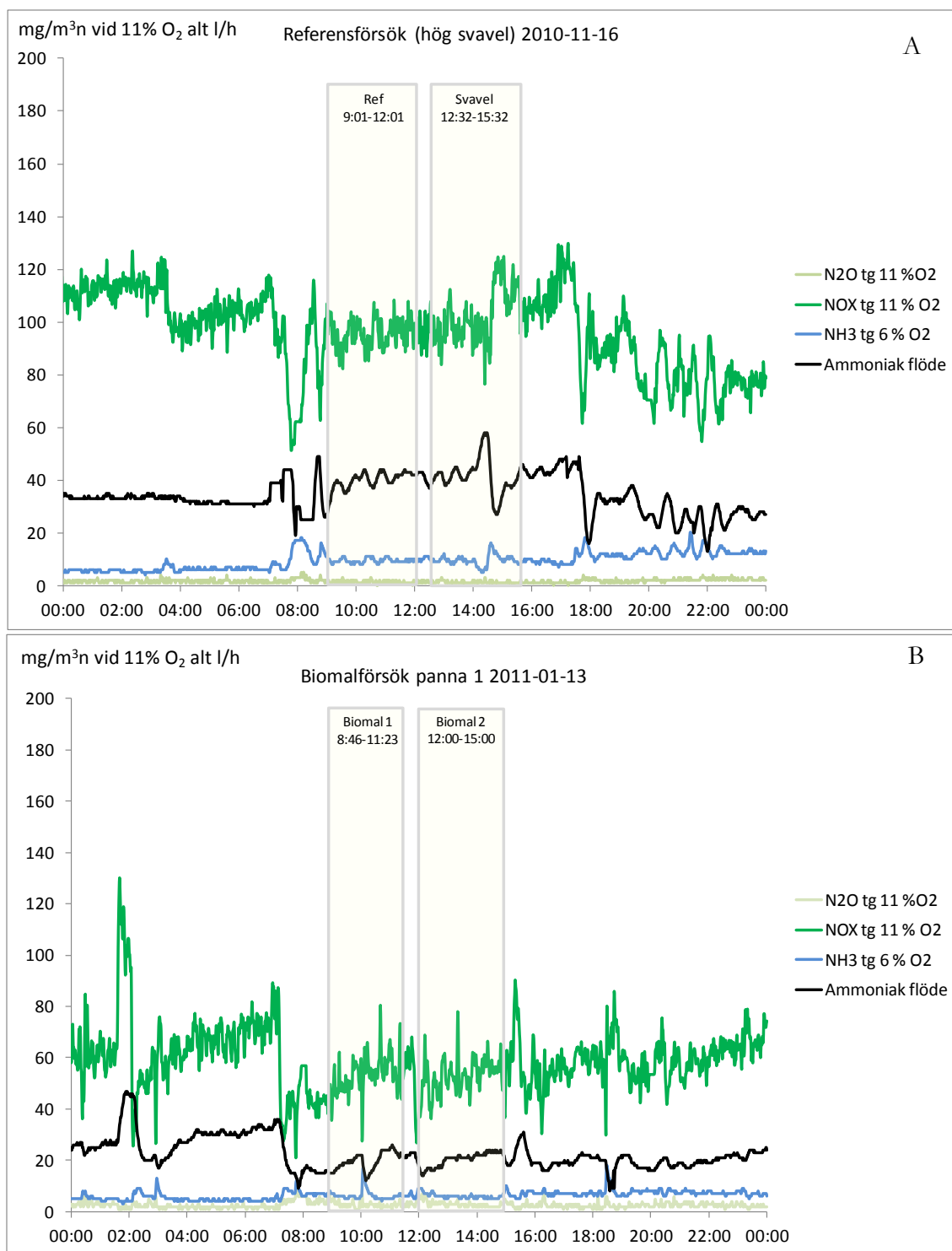


Hösten 2011 gjordes en ombyggnad av biomalinmatningen som innebar en bättre och jämnare spridning av biomalen i bädden och man fick en ytterligare sänkning av NOx koncentrationen till rekordlåga nivåer. Några medelvärden från driftloggar presenteras i Tabell 6. Man kunde stänga av tillsatsen av ammoniak helt och ändå se ammoniak slip i mätningarna, se Tabell 6 resultat för Biomal 111105-111106, där de uppmätta NOx koncentrationerna i rökgasen samt ammoniak slipet, NH₃, redovisas. Andelen biomal var lägre än i dessa försök (10-15 %). Förutom de låga NOx emissionerna med enbart biomalinblandning utan ammoniak fanns inga NOx spikar i de loggade värdena, vilket det gjorde både i biomal+ammoniakfallet och ammoniakfallet. Detta betyder att man inte behöver någon ammoniaktillsats i dessa pannor när man samförbränner med biomalen [18].

Tabell 6. Uppmätta medelvärden på NOx och NH₃ i rökgaser med och utan biomal och ammoniak tillsats.

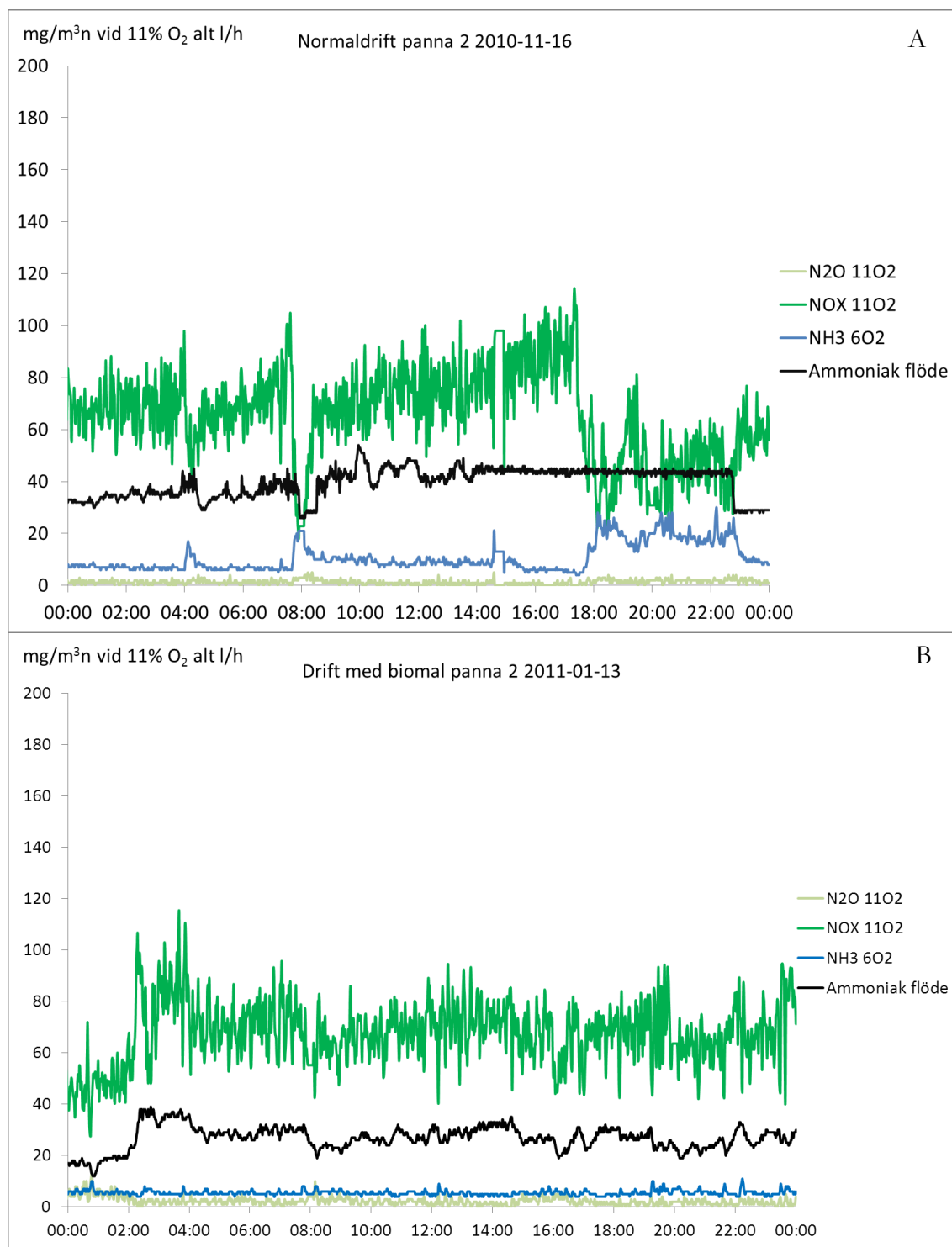
Table 6. Measured mean values of NOx and NH₃ emissions with and without biomal and ammoniac addition.

Tillsats		Panna 1	Panna 2		Datum
Biomal+Ammoniak	NOx	60	65	mg/Nm ³ @ 11 % O ₂	110904-110906
Biomal	NOx	45	50	mg/Nm ³ @ 11 % O ₂	111105-111106
Ammoniak	NOx	55	50	mg/Nm ³ @ 11 % O ₂	120109-120111
Biomal+Ammoniak	NH ₃	3	4	mg/Nm ³ @ 11 % O ₂	110904-110906
Biomal	NH ₃	3	2	mg/Nm ³ @ 11 % O ₂	111105-111106
Ammoniak	NH ₃	3	5	mg/Nm ³ @ 11 % O ₂	120109-120111



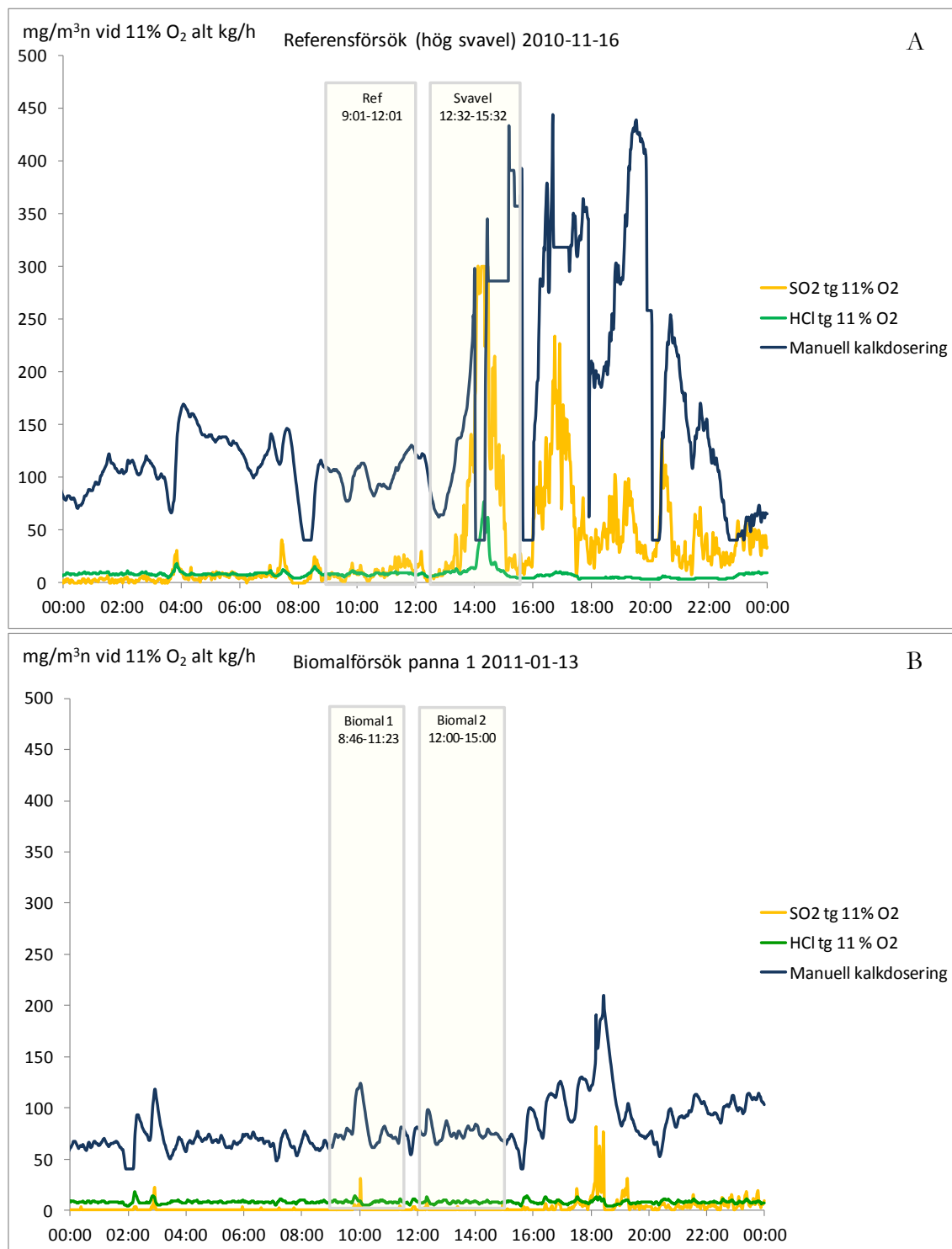
Figur 5. Emissionen av N₂O, NO_x och NH₃ samt ammoniak flöde till panna 1. A; Ref och Svavel, B; Biomal 1 och Biomal 2.

Figure 5. Emission of N₂O, NO_x and NH₃ together with ammoniac addition to boiler 1. A; Ref and Sulphur, B; Biomal 1 and Biomal 2.



Figur 6. Emissionen av N₂O, NO_x och NH₃ samt ammoniak flöde till panna 2. A; Ref och Svavel, B; Biomal 1 och Biomal 2.

Figure 6. Emission of N₂O, NO_x and NH₃ together with ammoniac addition to boiler 2. A; Ref and Sulphur, B; Biomal 1 and Biomal 2.

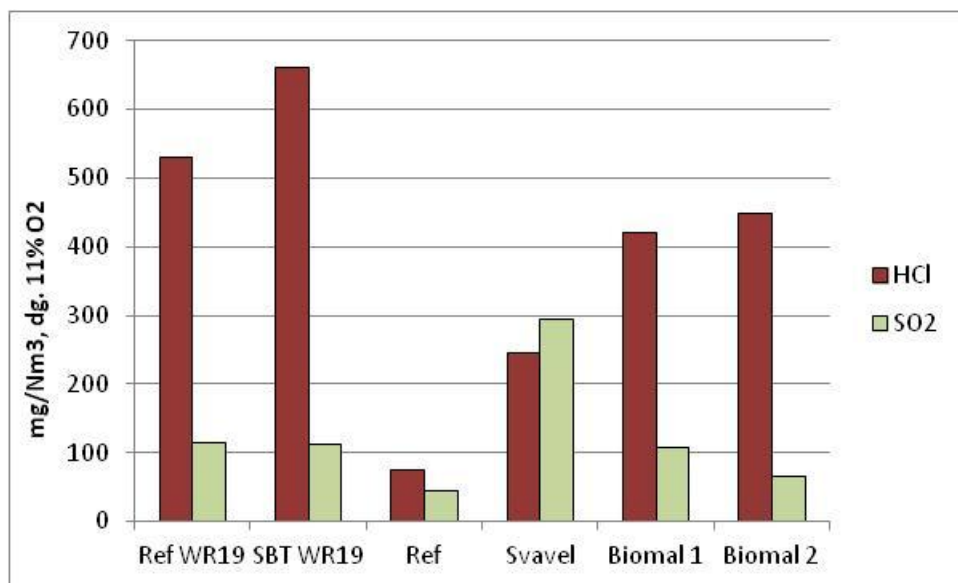


Figur 7. Emissionen av svaveldioxid och väteklorid efter rökgasreningen samt kalkdosering för panna 1. A; Ref och Svavel, B; Biomal 1 och Biomal 2.

Figure 7. Emission of sulphur dioxide and hydro chloride after flue gas cleaning in addition to lime addition to boiler 1. A; Ref and Sulphur, B; Biomal 1 and Biomal 2.

Även SO_2 och HCl halterna efter rökgasreningen var lägre under Biomalförsöken. HCl och SO_2 är intressanta eftersom de bland annat påverkar korrosionshastigheten på överhettarytor. En högre halt HCl indikerar lägre halt alkaliklorider och därmed bättre miljö. SO_2 visar svavelhalten vilken indikerar sulfatering av alkali och därmed också bättre miljö. Man vill dock inte ha för höga svavelhalter i rökgaserna eftersom svavlet måste tas om hand i rökgasreningen. Svavelhalten i bränslet var dock högre under Ref- och Svavelfallet vilket också nämnts tidigare, se Tabell 3. Detta i sin tur ledde till 25 % högre kalkdosering i Reffallet för att hålla nere SO_2 . I Svavelfallet sköt den uppmätta SO_2 halten i höjden och kalkdoseringen ökade med 100 % jämfört med Reffallet, se Figur 7.

Resultaten från de våtkemiska rökgasanalyserna av HCl och SO_2 , som provtogs före rökgasreningen, redovisas i Figur 8. Dessa mätningar gjordes för att underlätta beräkningen av elementbalansen av Cl och S över pannan eftersom det är intressant att veta hur mycket Cl som är i HCl form och därmed inte i alkaliklorid form före textilaspärffiltret samt att filteraskor kan vara svåra att analysera. Resultaten från analyserna gjorda i projektet WR19 och Biomalfallen stämmer ganska väl överrens även om HCl koncentrationen i rökgaserna var högre i de två fallen från WR19. Resultaten från Reffallet är dock märkligt. Både HCl och SO_2 verkar alldeles för låga här. Eftermiddagsmätningarna, Svavelfallet, är mer rimligt när det gäller SO_2 analysen men HCl ser ut att vara orimligt lågt. Tittar man på bränsleanalysen, Tabell 3, ser man att Cl in till pannorna var högre på förmiddagen än på eftermiddagen vilket gör gasanalysen än mindre trovärdig.



Figur 8. Resultat från våtkemisk analys av HCl och SO_2 i rökgasmätningar efter ekonomiser. Resultaten från Ref- och Svavelfallet är osäkra, se text.

Figure 8. Results from wet chemical analyses of HCl and SO_2 in the flue gases after the economizer. The results for Ref and Sulphur is uncertain.

4.6 Rökgas och ångtemperatur

När Ref- och Svavelförsöket genomfördes i november var pannan nyligen rengjord medan Biomalförsöken genomfördes 2 månader senare. Detta syns om man jämför rökgastremperaturerna t.ex. temperaturen i vändschaktet som var högre under Biomalförsöken, se Tabell 7. Temperaturen efter ekonomisern var också högre i januari och man var tvungen att sota ekonomisern mellan beläggningsmätningarna för att inte rökgastremperaturen skulle öka för mycket.

Tabell 7. Temperatur rökgas och ånga samt eldstadstryck och tryck före fläkt.

Table 7. Temperature on flue gas and steam in addition to boiler pressure and pressure before the flue gas fan.

		Ref	Svavel	Biomal 1	Biomal 2
Temperatur vändschakt	°C	536	542	566	566
Temperatur efter konvektion		345	351	368	371
Temperatur efter eco		169	175	181	178
Temperatur ånga efter primär ÖH		384	383	394	393
Temperatur ånga efter insprutning		338	341	337	339
Temperatur ånga efter sekundär ÖH		399	399	399	399
Eldstadstryck	kPa	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80
Tryck rökgas innan fläkt		-5,10	-5,12	-5,65	-5,64

4.7 Analysresultat

4.7.1 Kemisk analys av askor

Fem olika askfraktioner analyserades, se Tabell 8 och Figur 9. Jämför man samtliga uttagna askprover, Figur 9, ser man att ju längre bak i systemet man kommer så ökar S och Cl halterna tillsammans med Ca. Samtidigt minskar Al, Si och alkali som kommer från sanden.

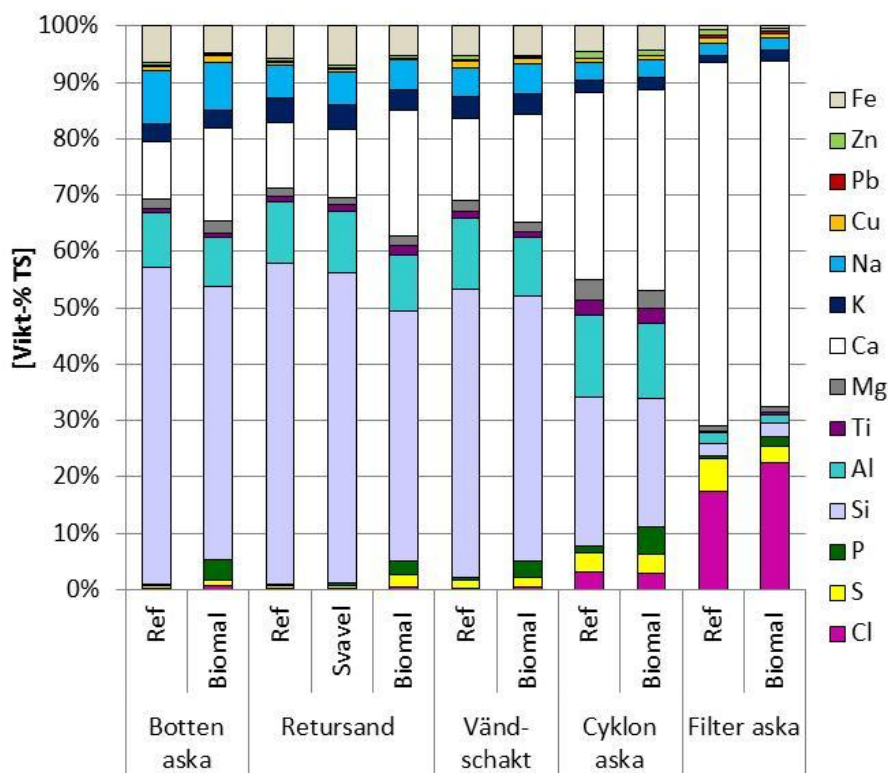
Biomalens högre Ca och P koncentration slog igenom i alla askfraktionerna från Biomalfallen. Koncentrationen av Cl är nästan 3 ggr så hög i bottenaska och retursand i Biomalfallen jämfört med Ref- och Svavelfallet. Detta liknar resultaten från WR19 där Cl koncentrationen var 3 ggr högre i bäddaskan i Sänkt bäddtemperaturfallet (SBT) än i Reffallet och skillnaderna mellan retursanden i de två fallen var hela 6 ggr. Även svavelkoncentrationen är högre i bottenaskan, retursanden och vändschaktsaskan för Biomalfallen och störst är skillnaden i retursanden med nästan 4 ggr så mycket svavel i jämförelse med Ref- och Svavelfallet. Detta trots att koncentrationerna av Cl och S in i Reffallet och Biomalfallen var oerhört lika och S in i Svavelfallet dubbelt så högt som i de två förra fallen. Detta tyder på en adsorption i bädden av Cl och S i Biomalfallen troligtvis tillsammans med Ca och P. Däremot var S koncentrationen i Biomalfallen lägre i cyklon och filteraskorna än i Reffallet vilket också tyder på en adsorption av S och Cl i bädden.

Pb var lägre i alla askorna för Biomalfallen och enligt bränsleanalysen, Tabell 3, tillfördes det också mindre Pb med bränslet i Biomalfallen. Zn koncentrationen var också lägre i alla askorna trots att halterna i bränslet in till pannan i genomsnitt var högre. Minskad mängd Zn och Pb minskar också deras lättflyktiga klorider $ZnCl_2$ och $PbCl_2$ [1].

Tabell 8. Ämnesanalys av askfraktioner [g/kg aska]

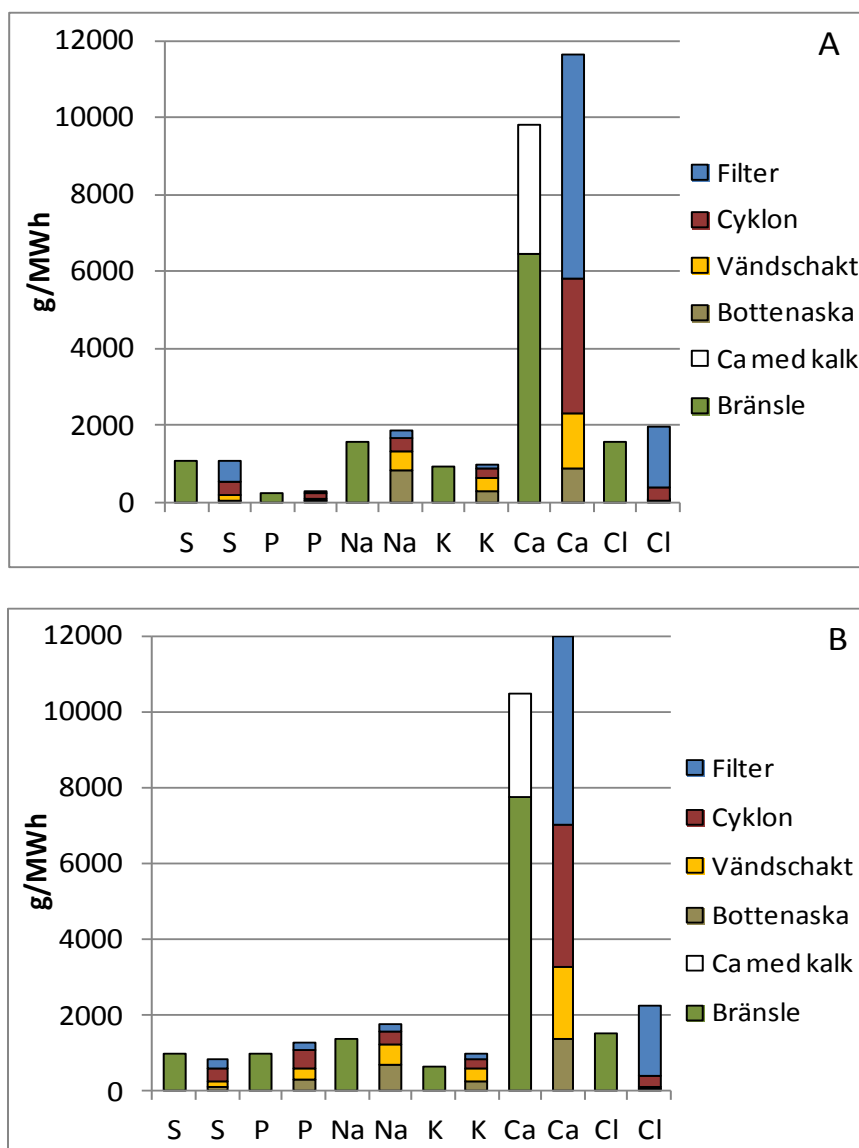
Table 8. Element analysis of ashes [g/kg ash]

	Botten aska		Retursand		Vändschakt		Cyklon aska		Filter aska		
	Ref	Biomal	Ref	Svavel	Biomal	Ref	Biomal	Ref	Biomal	Ref	Biomal
Cl	1,0	3,0	0,9	0,8	2,4	1,4	2,0	18	17	99	137
S	2,6	5,8	3,1	3,4	13	7,2	9,3	21	19	33	17
P	1,9	18	1,8	1,8	13	3,4	17	6,2	28	2,1	11
Si	287	241	307	296	244	277	258	156	132	13	14
Al	49	43	60	59	56	68	57	84	77	11	10
Ti	3,1	3,3	5,5	5,6	8,4	6,2	6,0	16	15	1,0	1,7
Mg	10	11	7,6	7,5	10	12	9,3	21	18	6,1	6,7
Ca	52	82	63	64	123	79	105	196	206	365	373
K	16	15	24	23	20	21	20	12	12	7,4	11
Na	48	42	31	31	30	28	30	19	19	12	14
Cu	4,6	7,0	3,0	3,3	1,4	6,6	5,3	4,1	3,5	5,3	4,8
Pb	0,7	0,4	0,7	0,7	0,3	0,6	0,4	0,9	0,7	3,5	2,4
Zn	2,5	1,9	3,0	3,3	2,1	3,8	2,5	7,0	5,8	5,2	3,3
Fe	33	23	31	37	29	29	28	26	24	3,4	2,3



Figur 9. Elementanalys av bottenaska, retursand, vändschaktsaska, cyklonaska och filteraska från Ref- och Biomalfallet samt för retursand även i Svavelfallet.

Figure 9. Element analysis of bed ash, return sand, boiler ash, cyclone ash and filter ash from the Ref and Biomal case and for return sand also in the Sulphur case.

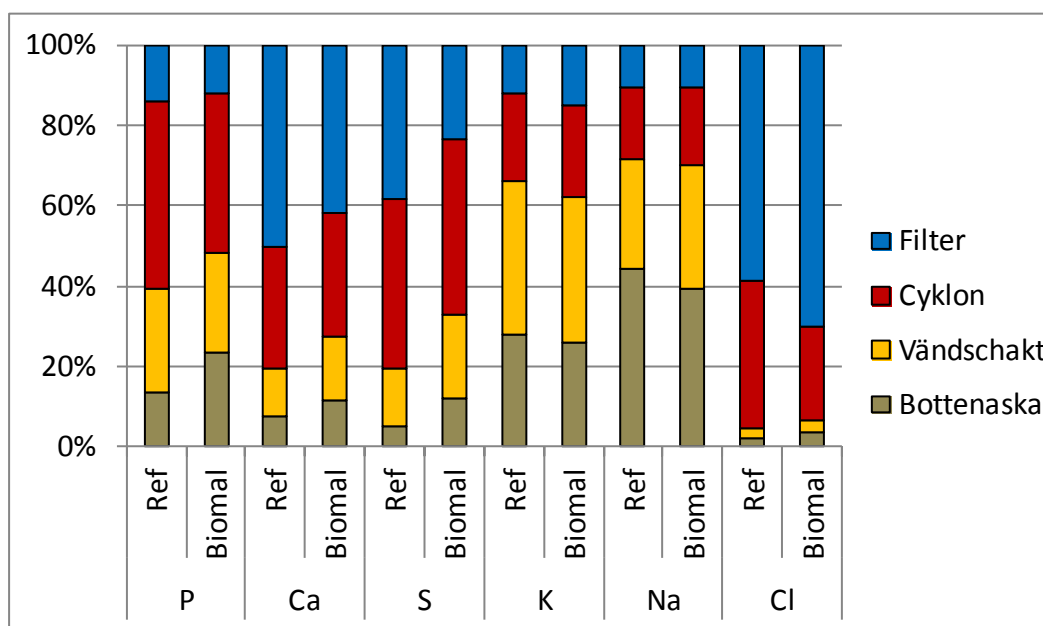


Figur 10. Elementbalans över pannan för: A; Reffallet och B; Biomalfallet. IN: Bränsle och kalk (grön+vit), UT: Bottenaska, vändschaktsaska, cyklonaska och filteraska (brun+gul+röd+blå).

Figure 10. Element balance over the boiler for A; Ref case and B; Biomal case. IN: Fuel and lime (green+white), OUT: The four ashes (brown+yellow+red+blue).

I Figur 10A och B visas ämnesbalanser över Ref- och Biomalfallen. Den har beräknats med hjälp av de uppmätta askflödena och beräknade bränsleflödena tillsammans med de kemiska sammansättningarna av bränslen och askor samt tillsatt bäddsand och kalk, se Bilaga B, Tabell 16. Resultatet av ämnesbalansen stämmer bra för en panna i denna storleken och med den varierande bränslesammansättning som avfallsförbränning innebär. Ämnesbalansen gjordes även i en variant där analysen av S och Cl i filteraskan byttes mot resultatet från rögasanalysen före rökgasreningen. Denna balans stämde mycket sämre,

vilket stärker tvivlen på att de våtkemiska analysvaren på SO₂ och HCl var korrekta, se avsnitt 4.5.



Figur 11. Flödesbalans mellan de olika askorna [Vikt-% fördelning].

Figure 11. Flow balance of the ashes [wt-% distribution].

I Figur 11 visas vikt-% fördelningen av ämnen mellan de olika askorna beräknat på askflöden och askanalyser. En större % -andel P, Ca, S och Cl återfinns i bottenaskan i Biomalfallen jämfört mer Ref-fallet men i vändschaktaskan kan inte samma trend ses, där är skillnaderna mindre och P och Cl % -andelen istället lägre i Biomalfallet. Andelen P, Ca och S minskade både i cyklon- och filteraskan medan Cl minskade i cyklonaskan och ökade i filteraskan. Resultatet för Na och K är väldigt lika i Ref- och Biomalfallen.

4.7.2 Agglomereringstemperatur- Risk för sintring

För att få en uppfattning om inblandning av biomal påverkar risken för bäddagglomerering/sintring av bäddmaterialet genomfördes agglomereringstester på retursanden [16]. Retursandssystemet är gemensamt för bägge fluidbäddpannorna men eftersom driften var lika i bägge pannorna under de två försöksdagarna bedömdes det att retursanden var representativ för panna 1.

Prov på retursand testades i en fluidiserad bäddreaktor på SP. Det sandprov som skall testas placeras i en fluidbäddreaktor där temperaturen successivt ökas från 750-1100 °C samtidigt som man registrerar tryckfallet över bädden. När bäddpartiklarna börjar bakas samman minskar tryckfallet. Man kan då registrera vid vilken temperatur detta sker. Testet är främst en jämförande mätning mellan prov i en mätserie och kan inte direkt översättas till vad som sker i fullstor skala. Den uppmätta agglomereringstemperaturen ger dock en indikation om vid vilken temperatur man kan riskera att bäddmaterialet agglomererar/sintrar.

*Tabell 9. Agglomereringstemperatur från test med retursand**Table 9. Agglomeration temperatures from tests with return sand*

		Ref	Svavel	Biomal 1	Biomal 2
Partiell agglomerering	°C	953	946	981	982
Tydlig agglomerering	°C	981	977	1049	1056
Total agglomerering	°C	993	997	1070	1088

Resultaten visar att inblandning av biomal ger en positiv effekt när det gäller risken för bäddagglomerering, Tabell 9. Agglomereringstemperaturen var 80-90 °C högre i Biomalfallen.

Jämför man prov på bottenaska från de två försöksdagarna ser man tydligt att bottenaskan från referensförsöket innehöll betydligt mer agglomerat av bäddmaterial än bottenaska från fall Biomal 1, se Figur 12 och Figur 13. Okulärt ser resultaten ut att vara identiska med resultaten från WR19 [1] där bottenaskan också innehöll betydande mängder agglomerat i referensfallet men inga i SBT-fallet. Den sänkta temperaturen är troligen en viktig faktor här men också skillnaden i gassammansättningen i förbränningskammaren samt bränslets sammansättning. Både i SBT- och Biomalfallen var syrehalten i bädden lägre än i de två referensfallen och en större del av gasförbränningen skedde ovanför näsorna istället för i bädden. Även sammansättningen av partiklarnas beläggningar har betydelse här vilket den höjda agglomereringstemperaturen visar.

*Figur 12. Bottenaska från Ref-fallet.**Figure 12. Bed ash sample from the Ref case.*



Figur 13. Bottenaska från Biomal 1

Figure 13. Bed ash sample from Biomal 1

I Figur 13 och Figur 14 syns tydliga benfragment från biomalbränslet i bottenaskan respektive retursanden. I Figur 14 syns också tydligt skillnaden i färg på de två retursandproven från Ref- och Biomalfallen. Även denna färgskillnad är identisk med proven från WR19.



Figur 14. Retursand från Ref- och Biomalfallen. Tydliga benbitar syns i biomalprovet.

Figure 14. Return sand sample from Ref case and Biomal case. Bone pieces are seen in the Biomal sample.

4.7.3 Partikelstorleksfördelning och askflöden

Partikelstorleksfördelningen och askflöden redovisas i Bilaga B.

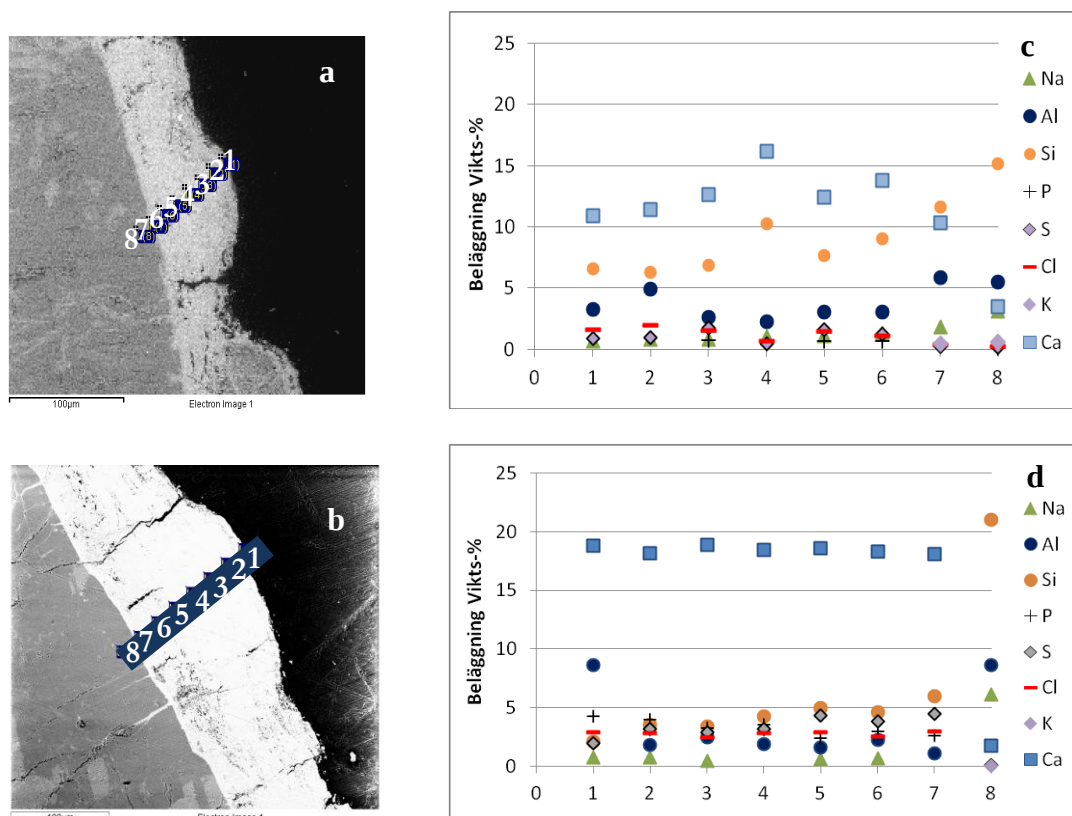
4.7.4 SEM-EDX av retursand och vändschaktsaska

Bottenaska, retursand och vändschaktsaska analyserades med hjälp av SEM-EDX och det visade sig att partiklarna i alla tre fraktionerna hade beläggningar av liknande slag. Samma typ av beläggningar hittades också på partiklarna i WR19[1]. EDX användes för att göra en närmare studie av den kemiska sammansättningen i olika områden i beläggningarna och fokuserades på retursanden från de olika försöken.

Figur 15a och b är SEM bilder av delar av retursandspartiklar från Ref respektive Biomalfallen där man ser tydliga beläggningar. Resultatet från punktanalyser gjorda med EDX finns i Figur 15 c och d och visar koncentrationerna av Na, Al, Si, P, S, Cl, K och Ca från beläggningens yta, genom genomskärningen av beläggningen, till skarven mellan beläggning och partikel. Analysen visade att koncentrationen av Ca, S, P och Cl var högre i beläggningarna på partiklarna i Biomalfallen jämfört med Ref fallet, Figur 15c och d. Däremot var koncentrationerna av Si och Al något lägre. Man kunde också se att i Reffallet såg beläggningen ut att ha flera lager med olika sammansättning medan i Biomalfallen var de olika ämneskoncentrationerna väldigt jämna över hela tvärsnittet.

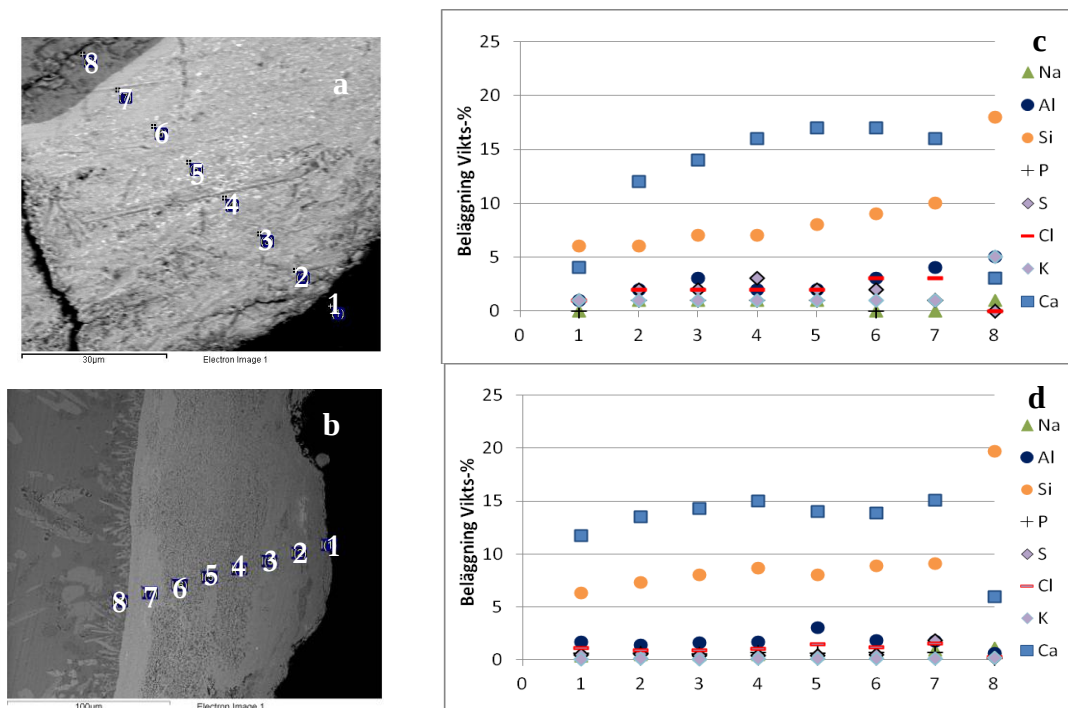
Det syns också att koncentrationerna av Si, Al, K and Na är högre inuti partiklarna än i beläggningarna i båda fallen. Beläggningarna på tre partiklar med olika sammansättning (en kiseloxid och två fältspater) analyserades för de olika fallen och resultatet visade samma resultat som i Figur 15. Det finns därmed inget som tyder på att sandens innehåll av alkali, bundet i fältspater, deltar i någon reaktion med de asklager som bildas runt sandkornen.

Retursand från WR19[1] analyserades på samma sätt som i det här projektet och resultaten visas i Figur 16 a-d. Också här var ämneskoncentrationen i tvärsnittet av beläggningarna på de undersökta partiklarna jämt fördelat och resultaten skiljde sig mindre mellan de två fallen, Ref WR19 och SBT WR19 än mellan Ref och Biomal.



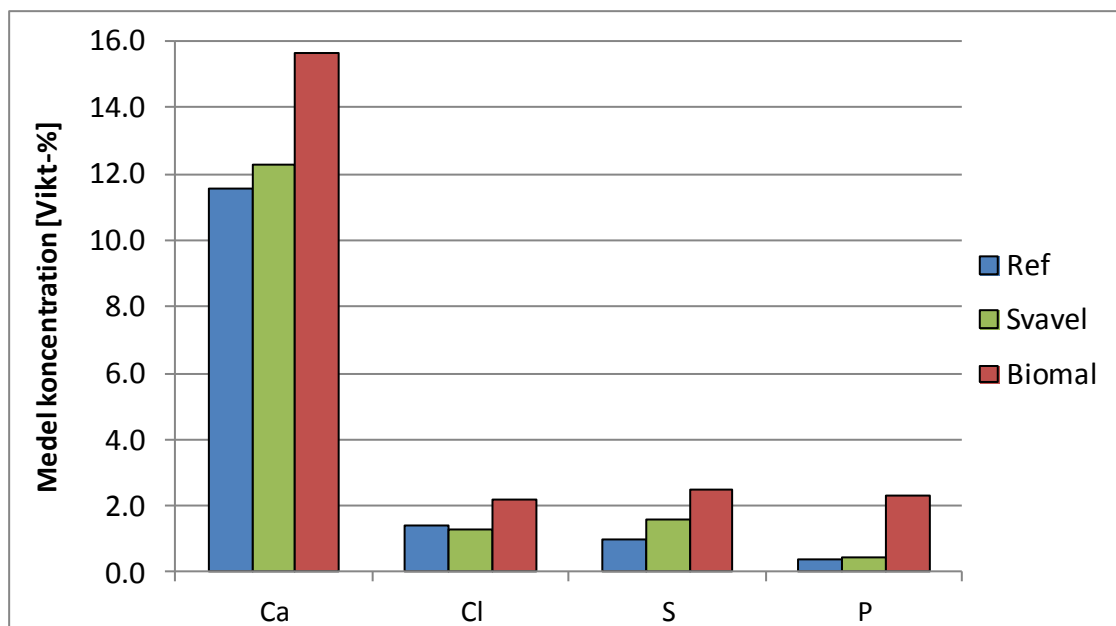
Figur 15. SEM-EDX-analys av beläggningar på retursandspartiklar; a och b: SEM bilder på Ref respektive Biomal fallet, c och d: Element koncentrationer i olika punkter av beläggningarna där punkt 1 är i ytan av beläggningen och punkt 8 i skarven mellan beläggning och partikel.

Figure 15. SEM-EDX analysis of coatings on the return sand particles; a and b: SEM pictures of the Ref and Biomal case, c and d: Element concentrations in different spots in the coating where spot 1 are the surface of the coating and spot 8 the junction between coating and particle.



Figur 16. SEM-EDX-analys av beläggningar på retursandspartiklar från WR19; a och b: SEM bilder på Ref respektive SBT fallet, c och d: Element koncentrationer i olika punkter av beläggningarna där punkt 1 är i ytan av beläggningen och punkt 8 i skarven mellan beläggning och partikel.

Figure 16. SEM-EDX analysis of coatings on the return sand particles from WR19; a and b: SEM pictures of the Ref and RBT case, c and d: Element concentrations in different spots in the coating where spot 1 are the surface of the coating and spot 8 the junction between coating and particle.

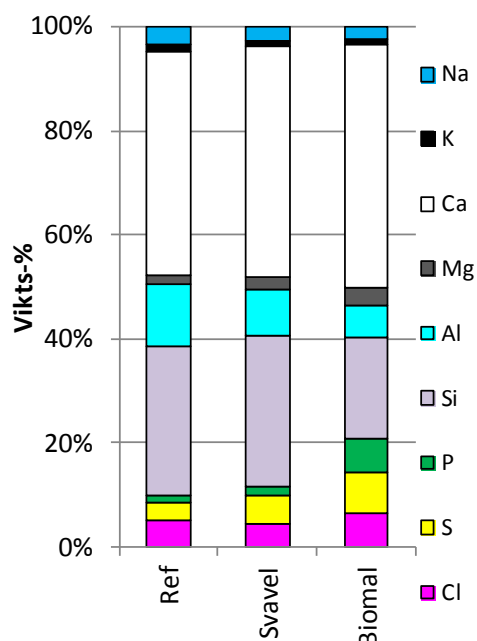


Figur 17. SEM-EDX-analys: Medelkoncentration i beläggningarna runt retursandpartiklarna. Övriga analyserade ämnen var C, O, Na, Mg, Al, Si och K

Figure 17. SEM-EDX analysis: Mean concentrations of elements in the coatings on the return sand particles. Additional analysed elements were C, O, Na, Mg, Al, Si and K.

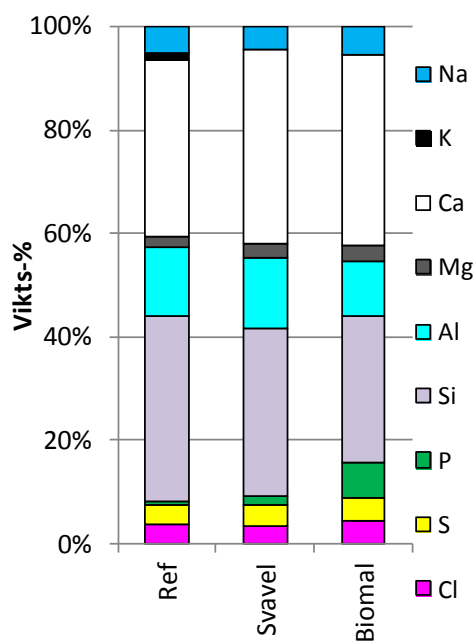
Figur 17 och Figur 18 visar medelkoncentrationer i beläggningar från de tre fallen Ref, Svavel och Biomal, och bekräftar att Ca, Cl, S och P är högst i Biomalfallet. Svavelfallet har något högre koncentrationer av Ca, S och P än Reffallet men lägre än Biomalfallet.

Stora delar av vändschaktsaskan består av samma typ av sandpartiklar från bäddmaterialet som retursanden men med mindre partikelstorlek. Resultaten från SEM-EDX av beläggningarna på vändschaktsaskans partiklar visade ungefär samma resultat som retursanden, se Figur 19. Även här syntes en ökning av Ca, S, Cl och P i Biomalfallen i jämförelse med Reffallet även om alla utom P visade mindre skillnader än i retursanden. Koncentrationen Si och Al var däremot lägre vilket också överensstämmer med resultaten för retursanden. I Reffallet finns lite K i beläggningen vilket inte fanns i varken Biomal eller Svavelfallet.



Figur 18. SEM-EDX-bulkanalys av partikelbeläggningarna på Retursanden från Ref, Svavel och Biomal.

Figure 18. SEM-EDX mean values from the coating on the return sand particles in the Ref, Sulphur and Biomal case.



Figur 19. SEM-EDX-bulkanalys av partikelbeläggningarna på vändschaktsaskan från Ref, Svavel och Biomal.

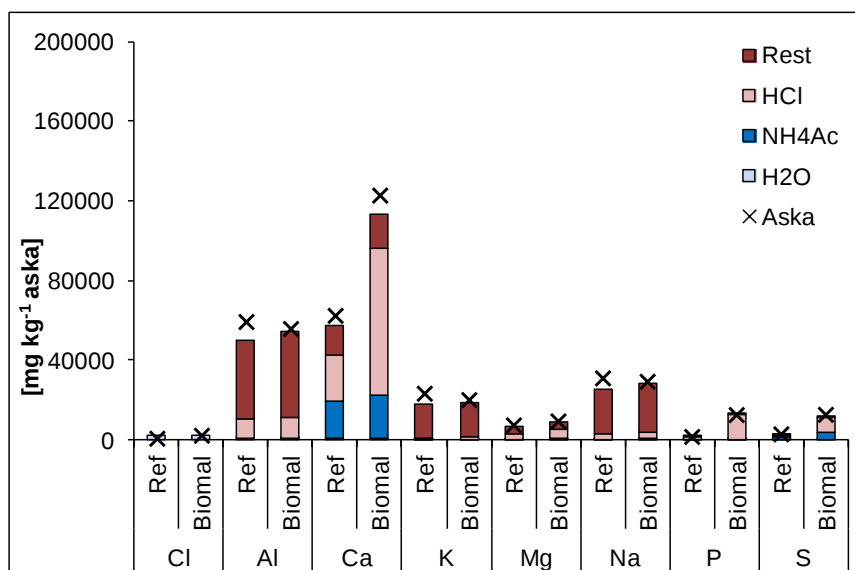
Figure 19. SEM-EDX mean values from the coating on the boiler ash particles in the Ref, Sulphur and Biomal case.

4.7.5 Kemisk fraktionering

Kemisk fraktionering är en flerstegs lakning av material där olika lösningsmedel används. Eftersom ett lösningsmedel är HCl saknas resultaten för Cl eftersom det inte går att skilja provets Cl från Cl i syran. Kemisk fraktionering utfördes på retursand, vändschaktsaska och cyklonaska.

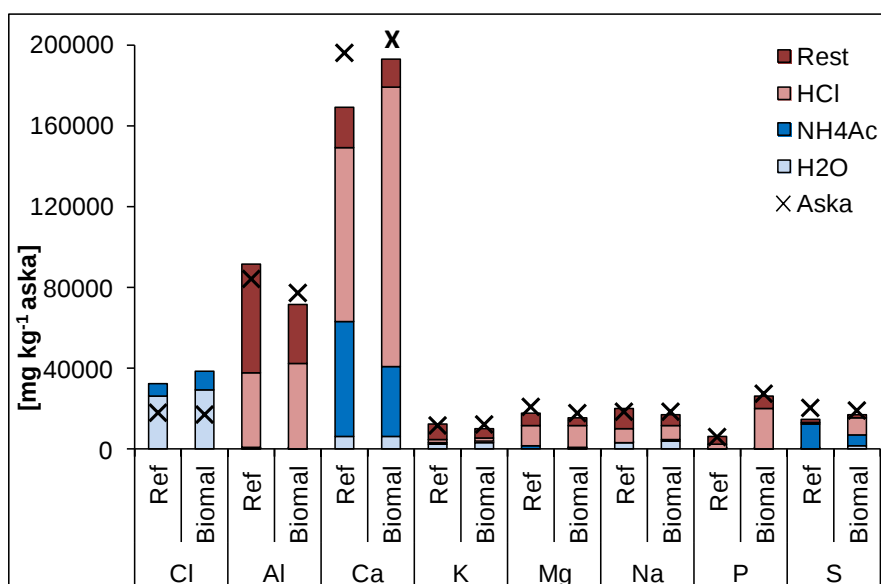
Resultatet från den kemiska fraktioneringen av retursand, se Figur 20, stöder resultaten från SEM-EDX. Här ses också högre halter Ca, P och S i Biomalfallen. Skillnaden i Ca, P och S mellan de båda fallen hittades till största delen i den syralösliga fraktionen. Detta kan delvis bero på kalciumfosfaterna från de krossade benen i biomal som innehåller $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ och $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ [8][19] vilka är syralösliga.

Inga skillnader i löslighet av Na och K kunde ses vilket också stödjer SEM-EDX resultaten och att det mesta av det alkali som hittas i elementanalysen av bottenaska och retursand sitter bundet i fältspater.



Figur 20. Kemisk fraktionering av retursand för Ref och Biomal. Koncentrationen löst Cl, K, Na, P, S och Ca i de tre lösningsmedlen avjoniserat vatten, 1M ammoniumacetat och 1M HCl. X markerar koncentrationen i den obehandlade askan. Alla resultat presenterade som mg per kg torr aska.

Figure 20. Chemical fractionation of return sand for the Ref and Biomal case. Concentrations of dissolved Cl, K, Na, P, S and Ca in the three solvents, deionised water, 1M ammonium acetate and 1M HCl. X marks the concentration found in the untreated ash sample. All results presented as mg per kg dry ash.



Figur 21. Kemisk fraktionering av cyclonaska för Ref- och Biomalfallet. Koncentrationen löst Cl, K, Na, P, S och Ca i de tre lösningsmedlen avjoniserat vatten, 1M ammoniumacetat och 1M HCl. X markerar koncentrationen i den obehandlade askan. Alla resultat presenterade som mg per kg torr aska.

Figure 21. Chemical fractionation of the cyclone ashes from the Ref case and Biomal case. Concentrations of dissolved Cl, K, Na, P, S and Ca in the three solvents, deionised water, 1M ammonium acetate and 1M HCl. X marks the concentration found in the untreated ash sample. All results presented as mg per kg dry ash.

Resultaten från kemisk fraktionering av cyklonaskorna visas i Figur 21. Även här syns en tydlig ökning av syralösligt Ca och P. Tillsammans ger resultaten från SEM-EDX och de kemiska fraktioneringarna en bild av att kalciumfosfaten från biomalen inte påverkas under förbränningen utan är tillräckligt stabilt bundet för att klara de temperaturer det utsätts för. Andelen NH_4Ac -lösligt Ca och S var betydligt lägre i Biomalfallen vilket kan bero på mindre CaSO_4 . Kryssen i Figur 20 och Figur 21 visar koncentrationen av de olika ämnena i askan. Resultaten stämmer bra överens med undantag av Cl, Ca, Fe och Si. Eftersom den analyserade askmängden är liten är dessa dock normala avvikelser och det är bara Cl analysen som känns osäker. Koncentrationen och lösligheten för Na och K visade inga skillnader i de två fallen. Fraktioneringsresultaten för Cl är troligen för höga eftersom askanalysen visade 18 respektive 17 g/kg aska vilket endast är hälften av vad lakresultaten gav. Överlag stämmer de flesta av de analyserade ämnena väldigt bra överens med det totala lakresultatet.

Det gjordes även XRD analyser på askorna och färksand (bäddmaterial), dessa resultat finns i Bilaga B.2.

4.7.6 Askkvalitet

Resultaten av analysen för bestämning av klassificering vid deponi, lakning L/S 2 och 10 redovisas i Tabell 10. Eftersom lakningen görs i två steg är resultaten från de två lakningarna adderade. Resultaten visar att vändschaktsaskan ligger under gränsvärdena för alla angivna ämnen. De skillnader som finns mellan Reffallet och Biomalfallen är så små i jämförelse med gränsvärdena att de saknar praktisk betydelse. Detta visar att vändschaktsaskan från dessa pannor väl möter kraven för ickefarligt avfall enligt 30§ SNF 2004:10, men då måste man också tänka på att vi i denna studie inte tittat på alla kriterier för avfallsklassificering.

Resultaten från cyklonaskan överensstämmer i huvudsak med de från vändschaktsaskan med undantag för Cl. De utlakade halterna ligger över gränsvärdet i alla fallen men lägre i Biomalfallen än i Reffallet. Om man hamnar över gränsvärdet för Cl och/eller SO_4 finns det möjlighet att använda ett annat kriterium, ”torrsubstans för lösta ämnen, TDS” som då har gränsvärdet 60 000 för ickefarligt avfall. Denna extra analys gjordes dock inte i detta projekt.

Tabell 10. Resultat från lakning L/S = 10 l/kg. Röd text markerar över gränsvärdet.

Table 10. Results from leaching with L/S = 10 l/kg. Red text marks value above limit point.

L/S = 10 Analys	Gränsvärde Icke-farligt avfall	Vändschaktaska		Cyklonaska		
		Ref	Biomal	Ref	Biomal	
As	2	<0,01	<0,01	<0,03	<0,02	mg/kg TS
Cd	1	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	mg/kg TS
Cu	50	<0,13	<0,11	0,07	<0,04	mg/kg TS
Hg	0,2	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	mg/kg TS
Ni	10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	mg/kg TS
Pb	10	1,7	0,20	0,10	0,03	mg/kg TS
Mo	10	1,45	2,13	1,27	2,67	mg/kg TS
Sb	0,7	0,32	<0,05	0,18	0,03	mg/kg TS
Se	0,5	0,02	0,01	0,16	0,07	mg/kg TS
Zn	50	1,50	1,07	0,55	0,10	mg/kg TS
F	150	5,5	<8,0	17,1	<12,0	mg/kg TS
Cr	10	4,24	6,67	1,89	4,27	mg/kg TS
Ba	100	2,81	1,77	37,6	5,16	mg/kg TS
DOC	800	25,8	20,8	23,7	27,0	mg/kg TS
Cl	15000	2400	3030	47100	38300	mg/kg TS
SO ₄	20000	4090	8060	1591	9430	mg/kg TS

4.7.7 Beläggningssringar

Mätningar med beläggningssringar genomfördes uppströms överhettarytorna i panna 1 (position 4 i Figur 3). Den tempererade sonden var placerad i hålet längst till höger i manluckan. Beläggningssringar, som vägdes före och efter exponering, exponerades 3 timmar vid 435 °C med undantag för Svavelprovet som exponerades vid 500 °C, Tabell 11. På korten ser man tydligt skillnaden i beläggningstillväxt för de olika fallen. En stor del av beläggningarna, speciellt i Svavelfallet men även i Reffallet, var porösa och man var tvungen att handskas mycket försiktigt med dessa för att inte förlora beläggningssmaterial.

I Figur 22 och Figur 23 samt Tabell 12 visas total beläggningshastighet och sammansättning på beläggningen för de fyra exponeringarna under de två försöksdagarna. Posten övrigt omfattar bl.a. syre. Figuren visar att för exponeringarna i Ref- och Svavelfallet var det betydligt mer påslag på provringarna än i Biomalfallen, Biomal 1 och Biomal 2. Beläggningarna innehöll dessutom betydligt mer kalcium och svavel. För att få en bredare referens jämfördes biomalförsöken även med data framtagna under projektet "Sänkt bäddtemperatur", dessa visas till vänster i figuren, Ref WR19 och SBT WR19. Här ser man att beläggningstillväxten är betydligt lägre än vad som uppmättes under referensförsöket i detta projekt men något högre än för biomalförsöken. Beläggningarna från "Sänkt bäddtemperatur" innehöll också betydligt mer klor.

Beläggningstillväxten varierar mycket bland annat beroende på variationer i bränslesammansättningen. Andra avgörande faktorer är hur smutsig pannan är, last och rökgastemperatur. Detta sammantaget kan man dock säga att inblandning av biomal sannolikt inte förvärrar beläggningssituationen.

Tabell 11. Två beläggningsringar från varje försök fotograferade från vindsidan, 0°, och läsidan, 180° samt beläggningstillväxten på varje ring i $\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$.

Table 11. Two deposit rings from each test pictured from two angles; wind side, 0° and lee side, 180°, together with the deposition rate on each ring in $\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$.

	Ref		Svavel	
0°				
180°				
Bel. tillväxt $\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$	27.1	33.4	45.1	41.8
	Biomal 1		Biomal 2	
0°				
180°				
Bel. tillväxt $\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$	10.8	10.6	11.5	12.0

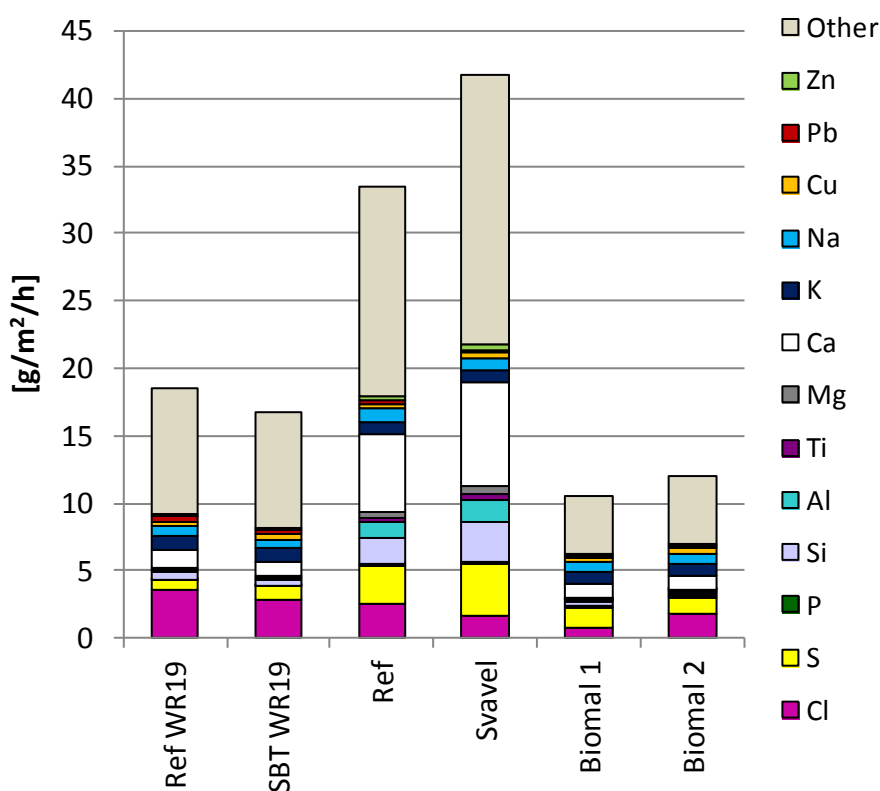
I Figur 23 visas elementkoncentrationerna i beläggningsarna. Resultatet visade att beläggningsskemin i WR19 och Biomalfallen var relativt lika med undantag att WR19 innehöll mer Cl. De två referensfallen Ref och Svavel, avvek mer från de andra fallen. I Ref- och Svavelfallet var Ca, Al, Si koncentrationerna högre medan Cl och Alkali var lägre. Om detta innebär att risken för korrosion på överhettartuberna är lägst i Ref- och Svavelfallet är oklart eftersom den totala mängden Cl är högre än i Biomalfallen, Figur 22. Det är svårt att enbart från elementarsammansättningen avgöra hur biomalinblandningen påverkar risken för korrosion på överhettarna. Man kan dock konstatera att resultaten inte indikerar någon ökad risk. Observationer vid revisionen som gjordes efter drift med biomal i 10 månader visade ingen ökad korrosion och enligt ansvariga var tuberna lättare att rengöra än någonsin tidigare [18].

Punktanalyser på beläggningsringarna visar att i Ref-fallet finns mycket Cl både på vind och läsidan men också S, Ca och i några analyserade punkter Na, Al och Si. I Svavelfallet dominerade S och Ca helt på vindsidan men på läsidan var sammansättningen den samma som i Ref-fallet. På ringen Biomal 1 hittades Ca, S, P, Na och i någon punkt även Si men nästan inget Cl. Däremot fanns punkter med upp till drygt 20 vikt-% Cl på läsidan där

sammansättningen annars var den samma som på vindsidan. På ringen Biomal 2 var förhållandet nästan det motsatta, all Cl hittades på vindsidan tillsammans med Ca, S, Na och K men ingen Si, Al eller P. Vad som kan ha orsakat denna skillnad är svårt att veta. Den totala Cl koncentrationen i beläggningen var högre i Biomal 2 jämfört med Biomal 1 trots att Cl koncentrationen in med bränslet var lägre under Biomal 2.

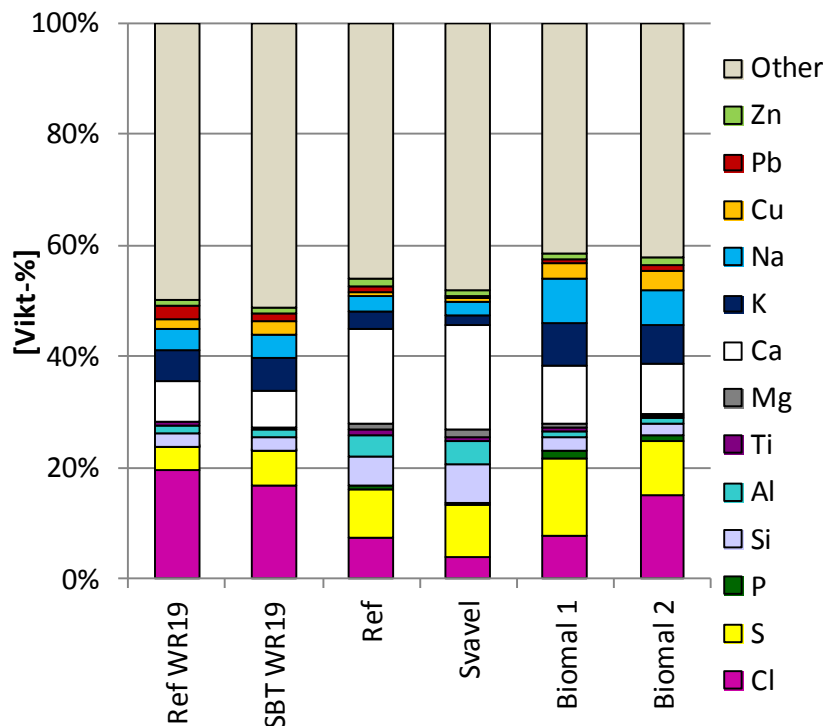
En liten del av den P som tillförs med bränslet återfinns i beläggningarna. Koncentrationen är högre i Biomalfallen än i Ref- och Svavelfallen från WR19. Trots det är depositionshastigheten av P densamma i Biomal-, Ref- och Svavelfallet, Tabell 12. Det verkar som om kalciumfosfatet som tillsätts med Biomalen är så hårt bundet att det inte påverkas och reagerar med andra ämnen under sin väg genom pannan. En mindre del P och även en del Ca i bränsleblandningen (biomalen och avfallsbränslet) är dock inte kalciumfosfat och kan reagera.

Jämför man resultaten från WR19 med fallen i detta projekt ser man att i WR19 var P in med avfallsbränslet högre, se Tabell 3, än i Ref- och Svavelfallet men depositionshastigheten av P, lägre, Tabell 12. Detta beror också sannolikt på hur P varit bundet i de olika avfallsbränslena och att konkurrensen om Ca är mindre i WR19 än i detta projekt eftersom S halten i avfallsbränslet är lägre. Detta gör att P då lättare reagerar med andra ämnen och bildar mindre stabila föreningar.



Figur 22. Elementsammansättning och tillväxthastighet

Figure 22. Element composition and deposition rate.



Figur 23. Elementsammansättning i vikt-%.

Figure 23. Element composition in wt-%.

Tabell 12. Sammansättning av beläggningar i $\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$.

Table 12. Element composition of deposits in $\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}$.

		Ref WR19	SBT WR19	Ref	Svavel	Biomal 1	Biomal 2
Cl	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	3,63	2,79	2,50	1,67	0,83	1,81
S	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,73	1,02	2,92	3,89	1,48	1,17
P	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,04	0,04	0,13	0,15	0,13	0,12
Si	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,45	0,42	1,81	2,92	0,27	0,26
Al	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,26	0,19	1,29	1,67	0,11	0,11
Ti	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,10	0,09	0,31	0,38	0,07	0,06
Mg	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,00	0,00	0,42	0,57	0,06	0,05
Ca	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	1,37	1,12	5,69	7,78	1,11	1,06
K	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	1,03	0,95	0,94	0,86	0,83	0,85
Na	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,73	0,70	0,99	0,92	0,83	0,75
Cu	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,28	0,45	0,28	0,39	0,3	0,43
Pb	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,45	0,22	0,31	0,12	0,09	0,13
Zn	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	0,19	0,14	0,42	0,43	0,11	0,14
Other	$[\text{g}(\text{m}^2\text{h})^{-1}]$	9,22	8,57	15,4	20,1	4,38	5,07

5 Resultatanalys

Resultaten visade att den ökade fukthalten in till pannan via biomalen bidrog till att sänka bäddtemperaturen under Biomalförsöken till ca 770 °C. En del av sänkningen under Biomalförsöken berodde dock även på en högre fukthalt i den ordinarie bränsleblandningen jämfört med referensfallen.

Inom WR19 [1] har det tidigare visats att en sänkning av bäddtemperaturen minskar mängden agglomerat i bäddmaterialet. Resultaten från försöken i detta projekt är därmed mycket nära de som sågs i WR19 [1]. I båda projekten hade man ett referensfall med den ”normala” bränslemixen av 80 % verksamhetsavfall och 20 % hushållsavfall där bäddtemperaturen låg kring 830-870 °C samt ett förbränningsförsök med sänkt bäddtemperatur. I WR19 hade man dock ingen förändring av bränslesammansättningen. Båda projekten visade att vid normal drift och normal temperatur (Ref WR19 och referensfallen) sker agglomerering i bädden. Agglomereringen i den omfattning som påvisats ger inte någon direkt risk för produktionsproblem men resulterar i ett onödigt stort färsksandsbehov. De flesta av agglomeraten består till största delen av sand från bäddmaterialet som agglomererat.

Vid de förbränningsförsök där bäddtemperaturen sänkts till 700-770 °C har inga agglomerat återfunnits (SBT WR19 och Biomalfallen). Detta är sannolikt till största delen en effekt av den sänkta temperaturen i bädden. Men till skillnad från biobränslen, där den huvudsakliga förklaringen till agglomerering relateras till alkali, kan även CaCl_2 vara en viktig förening här tillsammans med CaSO_4 . Forskning har visat att CaO och SiO reagerar i närvaro av HCl och att Ca binder Cl som $\text{CaCl}_2(\text{s})$ i temperaturer från 350 °C och uppåt. Störst bindningsförmåga rapporteras vid en temperatur runt 600 °C [20][21]. Vid temperaturer runt 750 °C börjar CaCl_2 smälta och bidrar till agglomerering. Även vid temperaturer lägre än 750 °C rapporteras det att CaCl_2 partiklarna kan vara kladdiga och bidra till beläggingsbildning på andra partiklar. Den normala bränslemixen som används i pannorna har relativt hög Ca koncentrationer, se Tabell 3, vilket kan betyda att det bildas CaCl_2 även här. Det skulle då också stämma med WR19 och den ökning av Cl i beläggningarna på partiklarna som ses när bäddtemperaturen sänks.

Även resultaten från detta projekt visar en ökad inbindning av Cl i bädden, även om den bara är 1,5 % av totala Cl , när bäddtemperaturen sänks i Biomalfallen. Denna ökade inbindning av Cl påverkar dock inte miljön i överhettarregionen eftersom den totala mängden Cl som binds i askan är liten jämfört med vad som återfinns i rökgasen. I detta projekt har det dock inte varit möjligt att mäta hur stor del av Cl som föreligger som alkaliklorider i rökgasen och som därmed utgör korrosionsrisk. I bägge fallen (Biomal och SBT WR19) ser man även en ökad inbindning av svavel i bädden.

Även om P har visats kunna öka risken för bäddagglomerering [22], så visar bäddmaterialet i detta fall förhöjd sintringstemperatur trots ökat P -innehåll i partikelbeläggningarna. Fosfor bundet som kalciumfosfat har mycket högre smältpunkt än många andra fosfater. Därmed är det viktigt i vilken form P introduceras med bränslet och/eller om det finns kalcium närvarande. I biomalen sitter det mesta av P bundet i benmaterial vilket består av $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ and $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ som är termiskt stabila upp till höga temperaturer.

Ovanstående resonemang indikerar att risken för bäddagglomeringar inte borde öka vid inblandning av biomal i bränslet. Detta visades också med hjälp av agglomereringstester av retursand från de olika fallen där agglomereringstemperaturen för bottenaska och retursand var ca 85 °C högre i Biomalfallen. Detta hänger sannolikt ihop med det höga Ca innehållet i bäddmaterialet. Den högre agglomereringstemperaturen visar att trots höga halter P och Cl i partikelbeläggningarna har smältpunkten höjts.

Inblandning av biomal visar inga tecken på att öka mängden beläggningar eller risken för korrosion. Projektet har visat att det är svårt att bedöma beläggningarnas tillväxthastighet utifrån enstaka försök. Sannolikt har sammansättningen på ordinarie bränsleblandning större betydelse för sammansättningen av beläggningar och beläggningstillväxt än inblandning av biomal.

Jämfört med referensfallen, Ref och Svavel, ökade inte mängden P i beläggningarna utan var av samma storleksordning trots att P halten var högre i Biomalbränslet. Detta visar att P i huvudsak hamnar i askorna och stöder slutsatsen att kalciumfosfaterna från biomalen är inerta under förbränningen.

Biomalens högre Ca och P koncentration slog igenom i alla askorna. Koncentrationen Cl och S var också högre i Biomalfallen jämfört med referensfallen. Biomalens lägre innehåll av tungmetaller, speciellt Pb, har inneburit lägre blyhalter i askorna, vilket till viss del också gäller Zn och Cu. Partikelstorleksfördelningen förändrades inte nämnvärt utom för vändschaktaskan där benbitar från biomalen bidrog till en ökad partikelstorleksfördelning.

Biomalens höga kväveinnehåll ökade inte NO_x emissionerna utan tvärtom minskade de med ca 50 % under försöken vilket också observerats i tidigare projekt [8]. Vid en senare justering av biomalinmatningen och byte av en dålig O₂-lans gick NO_x ner i rekordlåga nivåer trots att ammoniaktilförseln helt stängdes av. Rökgasanalyserna visade att med till och med fick en mätbar ammoniakslip utan ammoniakdosering då man eldade 10-15 % biomal och samtidigt tillsatte 1 ton vatten per timma (för att sänka bäddtemperaturen). NO_x reduktionen beror sannolikt på att det faktum att den största delen N i biomalen sitter bundet i aminosyror i vävnad. Dessa syror består av en amin- och en karboxylgrupp och när syrorna bryts sönder vid förbränningen frigörs aminen (NH₂) och reagerar på samma sätt som tillsats av ammoniak eller urea.

Eftersom bäddmaterialet inte agglomererade vid biomalinblandning blir effekterna på sandförbrukningen densamma som i försöken med sänkt bäddtemperatur i WR19 [1], dvs en minskning med ca 3 kg/MWh.

Lakanalysen L/S 2 och 10 visade att kvalitén på vändschaktaskan från både Refallet och Biomalfallen var god, man klarade alla gränsvärden för ickefarligt avfall med marginal. Det ska dock tilläggas att för klassning krävs fler analyser.

Resultatet från cyklonaskorna var det samma med undantag för Cl som överskred gränsvärdet för alla fallen men var lägre i Biomalfallen än i Refallet. Cl och SO₄ analysen kan dock bytas ut mot ”Torrs substans för lösta ämnen”(TDS) som då har ett gränsvärde på 60 000 mg/kg, men denna analys gjordes inte här.

5.1 Uppfyllelse av förväntade resultat

Projektet förväntades resultera i följande:

1. Ge svar på hur de olika askflödena påverkas:
Mängden Botten- Cyklon- och Vändschaktsaskor påverkas inte av biomalinblandningen. Mängden aska in med bränslet och mängden doserad kalk minskar vid inblandning av biomal vilket också minskar mängden filteraska.
2. Fastställa askkvaliteten
Askekvaliteten försämrades inte med inblandning av biomal. Laktesten visade att vändschaktaskan hade god kvalitet både i Ref- och Biomalfallen. Askanalys och agglomereringstest visade på en minskning av tungmetaller och ökad agglomereringstemperatur med inblandning av biomal. Ur deponeringssynpunkt gjorde dock inte inblandningen av biomal någon större skillnad eftersom askorna redan innan biomalinblandningen klarade kraven för ickefarligt avfall.
3. Visa hur beläggningstillväxten på värmeöverförande ytor påverkas
Det är svårt att med få prover få tillförlitliga resultat när det gäller mängd beläggning. Men i dessa försök ger biomalinblandning en lägre beläggningstillväxt jämfört med resultat från WR19 och Ref- och Svavelfallet från detta projekt. Enligt ansvariga för driften har man med biomalinblandning minskat antalet sprängsotningar av pannorna med två ggr per år 2011.
4. Visa om det är möjligt att hålla en lägre bäddtemperatur med den nya bränslemixen
Biomalen sänker bäddtemperaturen men det behövs en dosering på 2-3 ton per timma och panna för att komma ner till den önskade temperaturen 750 °C.
5. Visa hur ämnessammansättningen av beläggningarna påverkas
Se avsnitt 4.7.7.
6. Öka förståelsen för fosforns förbränningskemi
I detta projekt tillfördes fosfor till största delen som kalciumfosfat från ben och var stabilt bundet. Det innebär att fosfor återfanns i de olika askfraktionerna bundet till kalcium. Inga tecken på reaktioner med andra ämnen kunde påvisas.
7. Ge nya input till termodynamiska jämviktsprogram
Resultaten från SEM-EDX på beläggningar på partiklarna kommer att vara intressanta data för jämförelser med t.ex. FactSage.
8. Visa förändringar i ämnesbalanser över pannan
Den ökade mängden Ca och P in med bränslet i Biomalfallet fördelades mellan de fyra askfraktionerna. Cl ökade procentuellt sett i filteraskan och även i bottenaskan men andelen Cl i bottenaskan var endast 4 vikt-% av den totala Cl mängden. Andelen av Cl som hamnade i cyklonaskan var lägre och liksom koncentrationen Cl i cyklonaskan vilket också återspeglade sig i laktestet L/S 10.
9. Ligga till grund för en Licentiatrapport
Projektet har hittills resulterat i ett utökat abstract och en presentation på The Scandinavian-Nordic section of the Combustion Institute, NTNU, Trondheim, Norge, se Bilaga D, en konferensartikel till FBC21, Neapel, Italien, 3-6 juni, 2012, samt en tidskriftsartikel som är under production. Producerade artiklar kommer att ingå i en licentiatrapport.
10. Skapar tillsammans med tidigare projekt på avfallspannorna en kunskaps bank där det är möjligt att jämföra andra parametrar för olika försök när nya frågor uppstår
Till exempel har vi nu kunnat jämföra med WR19 vilket har varit till stor hjälp och i vissa fall avgörande, t ex beläggningstillväxten som annars hade misstolkats.

5.2 Ekonomisk uppskattning

Den stora ekonomiska vinsten av biomalinblandning beror på skillnader i mottagningsavgift men diskuteras inte här. De extra kostnader som uppkommit med biomalinblandningen har bestått av initiala problem som lett till driftsstopp och diskuteras inte heller här.

Utöver ovan nämnda är det främst följande besparingar som identifierats:

- Minskade kostnader för NO_x och ammoniak
- Minskad kalkförbrukning
- Minskad mängd filteraska
- Minskad sandförbrukning
- Minskat antal sprängsotningar

Med inblandning av biomal till den normala avfallsblandningen minskade NO_x-halten och ammoniakdoseringen jämfört med Refallet. Skillnaden var olika stor om man jämför de olika pannorna. För panna 1 så sänktes NO_x halterna från ca 95 till 53 mg NO₂/Nm³ om man jämför värdena från provdagarna. Samtidigt minskade ammoniakflödet från 40 l/h till ca 20 l/h. För panna 2 så var det ingen markant skillnad mellan NO_x-värdena mellan drift med och utan Biomal. Det var dock en skillnad i ammoniakflöde från 45 till 30 l/h.

En grov uppskattning av den potentiella kostnadsminskningen baseras på en kostnad för NO_x på 50 kr/kg och ammoniak på 1900 kr/ton och 7500 fullasttimmar för bägge pannorna per år. I Tabell 13 sammanfattas kostnadsbesparingar baserade på två olika exempel - data från panna 1 och panna 2. Dessa har sedan ansett gälla för de två pannorna.

Tabell 13. Uppskattad kostnadsbesparing med reducerad NO_x och Ammoniak.

Table 13. Estimation of reduced costs by decrease of NO_x and ammoniac.

		Ref	Biomal
Beräknat på torrt rökgasflöde normerat till 11 % O2	Nm³/h	54 382	54 844
NOx Panna 1	mg/Nm³ tg @11 % O2	95	53
NOx Panna 2		72	72
Ammoniakflöde Panna1	l/h	40	20
Ammoniakflöde Panna 2		45	30
NOx Panna 1	kg/år	38 747	21 800
NOx Panna 2		29 366	29 616
Besparing NOx	Baserat på 2 pannor		
Exempel Panna 1	MSEK/år	1,7	
Exempel Panna 2	MSEK/år	-0,025	
Besparing ammoniaklösning	Baserat på 2 pannor		
Exempel Panna 1	MSEK/år	0,6	
Exempel Panna 2	MSEK/år	0,4	

Som exemplen visar så varierar kostnadsbesparingen utgående från NO_x-data mycket stort från att inte ge någon besparing alls till en besparing på 1,7 MSEK/år. Besparingen i ammoniaklösning är dock säkrare där fick vi en minskning i bägge fallen och

kostnadsbesparingen ligger kring 0,4-0,6 MSEK/år. Data från hösten 2011 har visat att med förbättrad spridning av biomal in till bädden samt sänkning av bäddtemperatur med hjälp av vattenbegjutning har ammoniakdoseringen helt kunnat stängas av. Samtidigt har NO_x-värdena ytterligare sjunkit ner mot 45-50 mg/Nm³ tg @ 11 % O₂. Med dessa data från hösten 2011 kan kostnadsbesparing ligga på 1-2 MSEK.

Kalkförbrukningen sjönk i Biomalfallen, se Tabell 14, och hamnade på samma nivå som i Ref WR19. Om detta verkligen är en sänkning eller inte är svårt att veta om man inte gör en långtidsstudie. Men man kan i alla fall dra slutsatsen att det inte sker någon ökning av kalkförbrukningen. Om man ändå senare kan visa att man får en sänkning av kalkförbrukningen med 1 kg/MWh finns en kalkyl i Tabell 15. Här tas även minskade kostnader pga minskad sandförbrukning baserad på resultatet från WR19 med, samt minskat behov av sprängsotning. I Svavelfallet syns en kraftig ökning av kalkförbrukningen som nästan fördubblas jämfört med Refallet.

Ett minskat behov av färsksand till bädden har också noterats av driftspersonalen [18], men eftersom sandinmatningen är automatisk och enbart tidsstyrd sker ingen minskad inmatning utan man får istället en ackumulering av bäddmaterial som man får backa ut ur bädden manuellt. Det finns dock inga siffror på hur stort detta överskott är och därför går det inte att göra någon beräkning på hur mycket sandkostnaden skulle kunna minskas.

Tabell 14. Uppmätt kalkförbrukning för rökgasrening. Resultat från WR19 är medelförbrukning för de två pannorna.

Table 14. Measured limestone flow for flue gas cleaning. Results from WR19 are mean values from the two boilers.

		Ref	Svavel	Biomal	Biomal	RefWR19	SBTWR19
Panna 1	kg/MWh	4.8	8.7	3.6	3.7	3.6	4.8
Panna 2	kg/MWh	4.7	8.0	3.9	4.0	3.6	4.8

Tabell 15. Kalkyl för förändrad driftskostnad med biomal.

Table 15. Calculation on changes in costs with biomal addition.

	Förändring med biomal	Specifik kostnad	2011	SEK/GWh	kSEK/år
Kalk, Sorbacal	-1 kg/MWh	2395	SEK/ton	-2395	-623
Sand, Baskarp	-3 kg/MWh	480	SEK/ton	-1440	-346
Sprängsotning	2 ggr per år	250	kSEK		-500

6 Slutsatser

- Det är viktigt att bränslekvaliteten på biomalen är så jämn som möjligt och att bränsleinmatningen fungerar tillfredställande för att undvika ojämn förbränning med CO spikar som följd.
- Biomalinblandning med 20 vikt-% bidrog till att sänka bäddtemperaturen men för att komma ner till 750 °C behövs ytterligare komplettering med vatten eller annat fuktigt bränsle.
- Med biomalinblandning och en bäddtemperatur på 770 °C bildades inga agglomerat i bäddmaterialet.
- Inblandning av biomal ökade agglomereringstemperaturen på retursanden och minskade halten Zn och Pb i askorna.
- Biomal leder inte till ökad beläggningstillväxt vid samförbränning med avfall. Koncentrationen av P ökar men inte mängden P i beläggningarna om man jämför med referensfallen. Görs jämförelsen med resultaten från WR19 är däremot halten högre.
- Inblandning av biomal minskar NO_x emissionen och behovet av ammoniaktillsats, i bästa fall behövs ingen ammoniaktillsats alls.
- Laktest för klassificering av avfall visade att både vändschakt- och cyklonaskorna före och efter biomalinblandning hade god kvalitet och med marginal mötte kraven för ickafarligt avfall med ett undantag, Cl i cyklonaskorna.
- Efter kontinuerlig drift med biomalinblandning i tio månader var de värmeöverförande ytorna lättare att rengöra jämfört med tidigare.
- Sandinmatningen förändrades inte eftersom den endast är tidsstyrd. Men man får, under körning med biomalinblandning, då och då ”backa ut” bäddmaterial eftersom det fylls på mer än vad som behövs.
- Bara positiva effekter av biomalinblandningen kunde hittas och slutsatsen är att biomal kan samförbrännas på ett säkert sätt.

7 Rekommendationer och användning

Resultaten visar att biomal kan ha många positiva effekter när det samförbränns med avfallsbränslen. Till exempel minskad NO_x emission, mindre mängd beläggningar, lägre halter tungmetaller i askor.

För framtida arbeten skulle det vara intressant att studera om CaCl₂ har en viktig roll när det gäller bäddagglomerering vid avfallsförbränning. Det vore också intressant att undersöka effekten av biomalinblandning på högtemperaturkorrosion vid långtidsexponering av tempererade sonder.

8 Litteraturreferenser

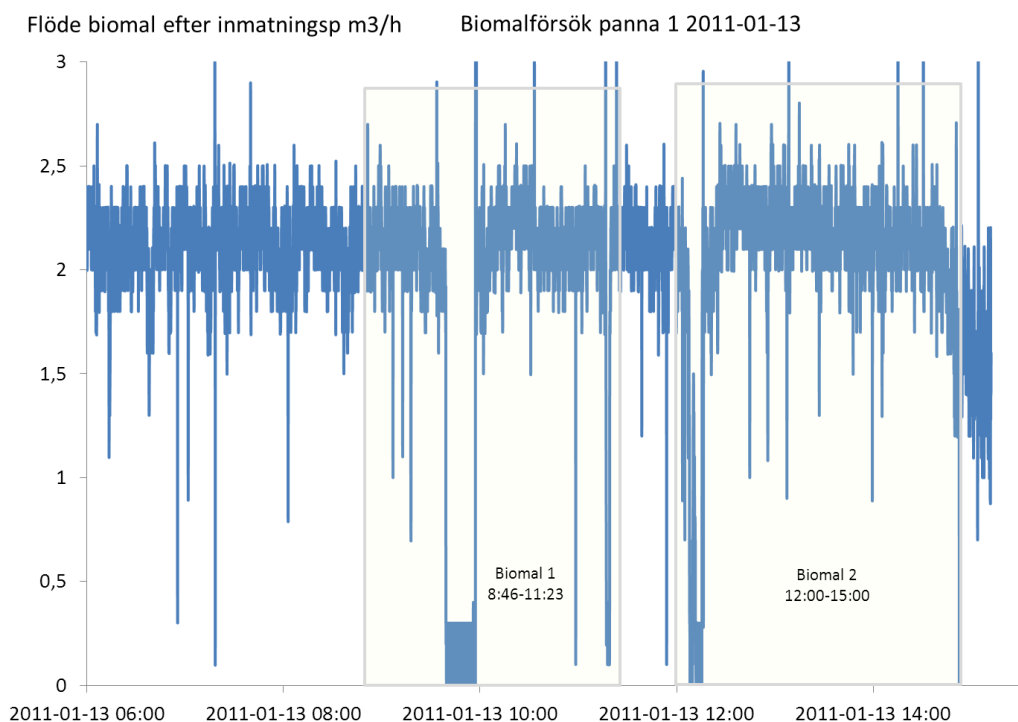
- [1] Niklasson F, Pettersson A, Claesson F, Johansson A, Gunnarsson A, Gyllenhammar M, Victorén A, Gustafsson G. Sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning – etapp 2. Waste Refinery-rapport, WR-19, 2010.
- [2] Beck J, Brandenstein J, Underberger S, Hein K. Effects of sewage sludge and meat and bone meal Co-combustion on SCR catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2004 49:15-25.
- [3] Lindström E, Sandström M, Boström D, Öhman M. Slagging Characteristics during Combustion of Cereal Grains Rich in Phosphorus. *Energy & Fuel*, 2007 21:710-717.
- [4] Elled A-L, Åmand L-E, Leckner B, Andersson B-Å. Influence of phosphorus on sulphur capture during co-firing of sewage sludge with wood or bark in a fluidised bed. *Fuel*, 2006 85:1671-1678.
- [5] Öhman M, Nordin A, Lundholm K, Broström D, Hedman H, Lundberg M. Ash Transformation During Combustion of Meat-, Bonemeal, and RDF in a (bench-scale) Fluidized Bed Combustor. *Energy & Fuel* 2003;17:1153-1159.
- [6] Fryda L, Panopolos K, Vourliotis P, Kakaras E, Pavlidou E. Meat and Bone Meal as Secondary fuel in Fluidized Bed Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute* 2007 31:2829-2837.
- [7] Lopes H, Gulyurtlu I, Abelha P, Crujeira T, Salerna D, Freier M, Pereira R, Cabrita I. Particulate and PCDD/F Emissions from Coal Co-Fieing with Solid Biofuels in a Bubbling Fluidised Bed Reactor. *Fuel* 2009 88:2373-2384.
- [8] Herstad Svärd S, Backman S, Kullendorff A, Tilly H-Å, Virta L, Sterngård E. Co-combustion of Animal Waste in a Fluidized Bed Boiler - Operating Experiences and Emission Data. *Proceedings of the 17th International (ASME) Conference on Fluidized Bed Combustion*, May 18-21, 2003, Jacksonville, Florida.
- [9] Pettersson A, Zevenhoven M, Steenari B-M, Åmand L-E. Application of chemical fractionation methods for characterisation of biofuels, waste derived fuels and CFB co-combustion fly ashes. *Fuel* 2008 87:3183-3193
- [10] Grimm A, Skoglund N, Eriksson G, Boström D, Boman C, Öhman M. Effekter av fosfortillsats vid förbränning av biomassa. *Värmeforskrapport* 1157, 2010
- [11] Benson S A, Holm, P L. Comparison of Inorganic Constituents in Three Low-Rank Coals. *Ind. Eng.Chem. Prod. Res. Dev.*1985;24:145-149.

-
- [12] Baxter L L, Miles T, Miles jr. T, Jenkins B, Milne T, Dayton D, Bryers R, Oden L. The behaviour of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiments. *Fuel Processing Technology*. 1998;54:47-78.
- [13] Zevenhoven-Onderwater M. Ash-Forming Matter in Biomass Fuels. PhD thesis. Department of Chemical Engineering, Åbo Akademi University, Finland, 2001. ISSN 1457-7895, ISBN 952-12-0813-9.
- [14] Pettersson A. Characterisation of Fuels and Fly Ashes from Co-Combustion of Biofuels and Waste Fuels in a Fluidised Bed Boiler, A Phosphorus and Alkali Perspective. PhD thesis. Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Sweden, 2008. ISBN 978-91-7385-174-9, ISSN 0346-718X.
- [15] Naturvårdsverket. Sammanställning av laktester för oorganiska ämnen. Rapport 5207, Maj 2002, ISBN 91-620-5207-1.pdf.
- [16] Strömberg B. Bränslehandboken. Värmeforskrapport nr. 911, Projektkod F4-324, 2005, Värmeforsk.
- [17] Gohlke O, Weber T, Seguin P, Laborel Y. A new process for NO_x reduction in combustion systems for the generation of energy from waste. *Waste Management* 2010;30:1348-1354.
- [18] Muntlig information från Anders Gunnarsson, Dalkia och Göran Gustafsson, projektmöte 2011-10-21.
- [19] Deydier E, Guilet R, Sarda S, Sharrock P. Physical and chemical characterization of crude meat and bone meal combustion residue: waste or raw material?, *Journal of Hazardous Materials*. 2005;B121:141-148.
- [20] Partanen J, Backman P, Backman R, Hupa M. Absorption of HCl by limestone in hot flue gases. Part I: the effects of temperature, gas atmosphere and absorbent quality. *Fuel* 2005;84:1664-1673.
- [21] Partanen J, Backman P, Backman R, Hupa M. Absorption of HCl by limestone in hot flue gases. Part II: importance of calcium hydroxychloride. *Fuel* 2005;84:1674-1684.
- [22] Grimm A, Skoglund N, Boström D, Öhman M. Bed agglomeration characteristics in fluidized quartz bed combustion of phosphorus-rich biomass fuels. *Energy and Fuels* 2011;25(3):937-947.

A Driftsbetingelser

A.1 Driftsbetingelser

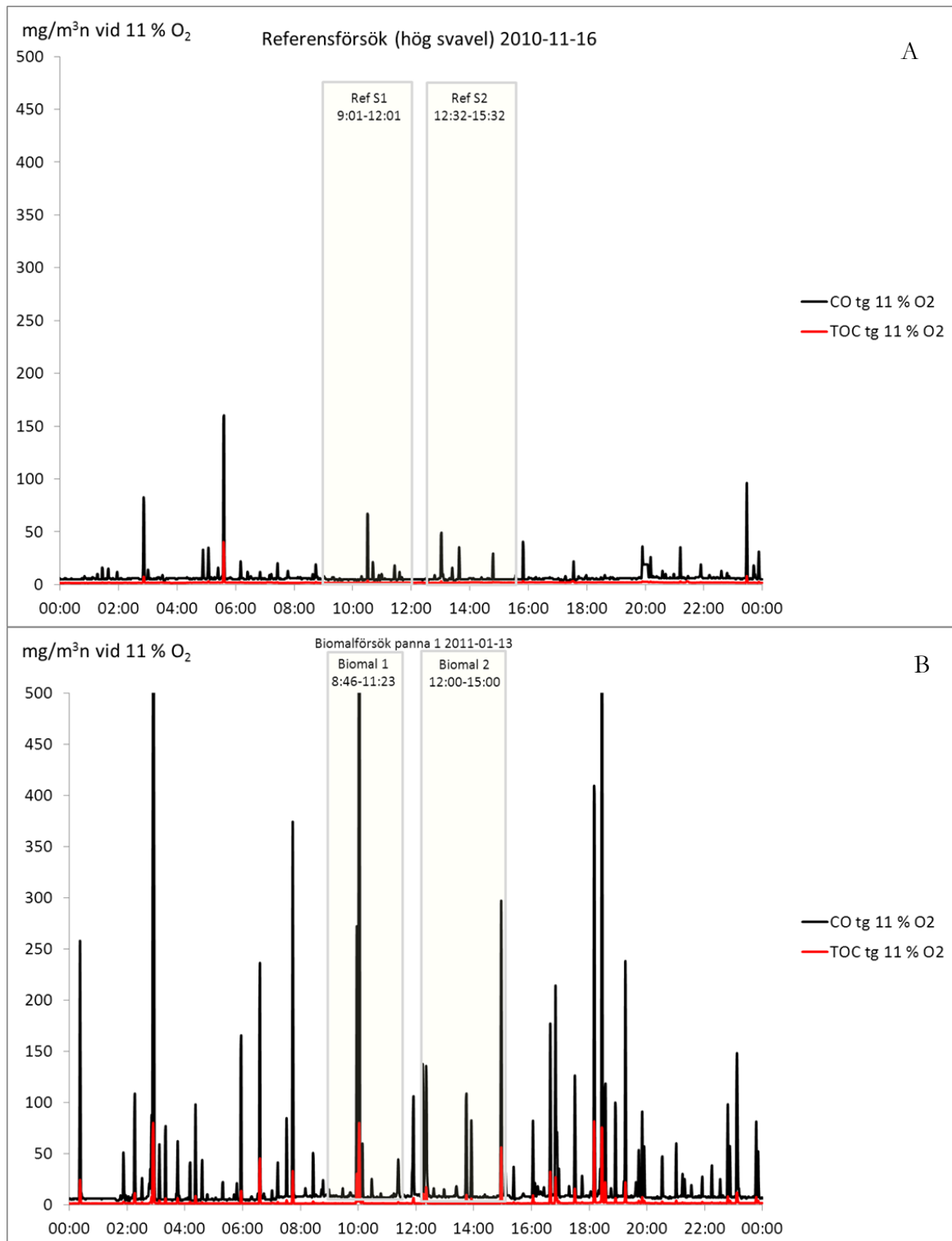
Biomalflödet under provdagen illustreras i Figur 24. Två kortare stop skedde men ansågs inte påverka resultaten.



Figur 24. Biomalflöde till panna 1 under försöken 2011-01-13.

Figure 24. Biomal flow to boiler 1 during the tests 13th of January 2011.

Resultaten från emissionsmätningarna av CO och TOC illustreras i Figur 25A och B. Eftersom utrustningen för biomalinmatning var nyinstallerad hade man i början problem med att få ett jämnt flöde in i pannan, detta återspeglas också i CO och TCO koncentrationerna. Efter att biomallansen byggts om och man också åtgärdat en dålig O₂-sond sjönk CO och TOC till samma nivå som i Reffallet.



Figur 25. CO- och TOC från A; Ref och Svavel, B; Biomal 1 och Biomal 2.

Figure 25. CO and TOC from A; Ref and Sulphur, B; Biomal 1 and Biomal 2.

B Askanalyser

De uppmätta flödena av material in och ut från pannan redovisas i Tabell 16. Sandmatningen till pannan är numera automatisk och tidsstyrd vilket gör att sandmatningen in var densamma vid de fyra förbränningsfallen i detta projekt. När försöken i WR19 gjordes sköttes regleringen manuellt.

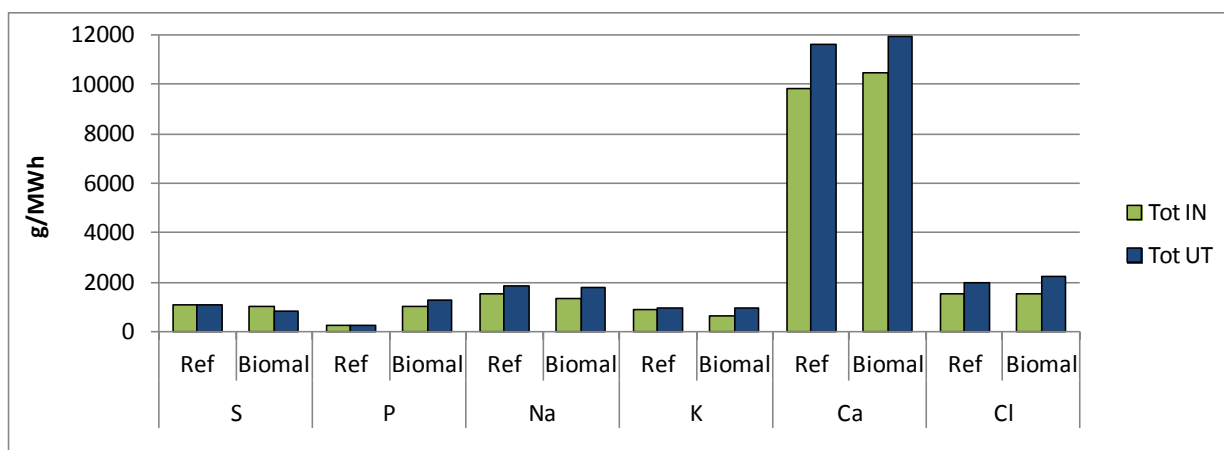
Materialbalansen visar att det inte sker några stora förändringar i askflödena med inblandning av biomal. Den största skillnaden var en minskning av filteraskflödet i Biomalfallen jämfört med Ref- och Svavelfallet. Oturligt nog skedde en tömning av filterasksilon under Svavelfallet och siffrorna är hämtade från kl 12:02 till 14:18. Efter detta skedde tömningen fram till kl 18:00. Tittar man sedan på filteraskflödet efter kl 18:00 ligger det på 17,5 kg/MWh vilket med tanke på kalktillsatsen på 16,7 kg/MWh före textiltfiltret är mer rimligt än 13,9 kg/MWh som uppmättes i början av försöket.

Tabell 16. Askflöden för de olika förbränningsfallen

Table 16. Ash flows from the different combustion tests.

		Cyklon+		Summa	Aska in med	Kalk	Sand	Tot IN
		Bottenaska	Vändschakt		Bränsle			
RefWR19	kg/MWh	16.4	29.0	11.0	56.3	42	7.2	59
SBTWR19	kg/MWh	17.3	19.5	9.9	46.7	45	9.6	60
Ref	kg/MWh	16.9	35.8	16.0	68.8	54	9.5	70
Svavel	kg/MWh	16.9	33.6	13.9	64.5	57	16.7	81
Biomal 1+2	kg/MWh	16.5	36.3	13.3	66.1	45	7.6	60

Figur 26 visar ämnesbalansen över de två pannorna. Det är samma siffror som i Figur 10 men här presenterat på totalflöde in och ut i g/MWh. Mer information finns i stycke 4.7.1.



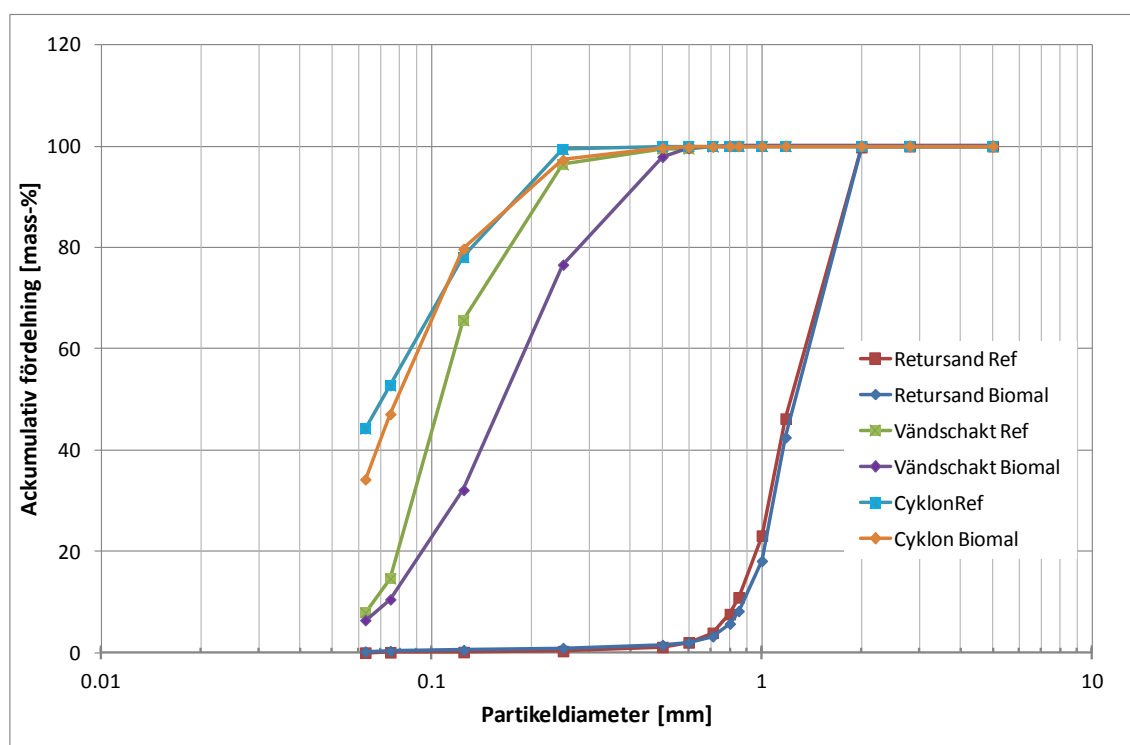
Figur 26. Gemensam ämnesbalans över de två pannorna.

Figure 26. Joint element balance over the two boilers.

B.1 Partikelstorleksfördelning i retursand, vändschakt- och cyklonaska

Partikelstorleksfördelningen på retursand, vändschaktsaska och cyklonaska bestämdes genom siktning av proven. För retursanden och cyklonaskan kunde ingen skillnad påvisas mellan de bägge körfallen. Vändschaktsaskan var däremot något grövre vid samförbränning med Biomal se Figur 27, och askanalysen, Tabell 8, visar även att P och Ca ökar kraftigast i denna aska. Detta tyder på att det är benbitar som står för ökningen av de större partiklar som följer gaserna och fångas upp före överhettarna. Minskningen av de mindre partiklarna var störst för partiklar i storleken 0,06-0,3 mm.

Partikelstorleken i denna analys är för grov för att man ska kunna dra slutsatser om fördelningen av t.ex. alkali klorider, för en sådan bedömning måste man titta på partiklar i storleksordningen 0,001-0,0001 mm (mikrona och submikrona).



Figur 27. Partikelstorleksfördelning för Retursand, Vändschaktsaska och Cyklonaska

Figure 27. Particle size distribution of Return sand, Boiler ash and Cyclone ash

B.2 XRD resultat

Analyser med XRD gjordes på vändschaktsaska, cyklonaska och filteraska, samt på den färska sanden (Baskarpsand) som utgör sandbädden. Resultaten visas nedan i Tabell 17. Skillnaderna mellan de tre fallen i projektet är mycket små. Med en vanlig svensk sand av mineraler och fältspater är det svårt att få tydliga resultat och skilja på vad som är sand och vad som är aska. Kvarts (SiO_2), Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Microklin (KAlSi_3O_8) och Klinoklor ($(\text{Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) hittades vid XRD analysen av färksanden. Flera av dessa föreningar hittades också i askorna. Till exempel hittades Kvarts, Albit och Microklin, i vändschaktsaskan.

Tabell 17. XRD-resultat för Ref och SBT från WR19 samt Ref, Svavel och Biomalfallen i detta projekt.

Table 17. XRD-results from the project WR19: Ref and SBT, in addition to the results from this project: Ref, Sulphur and Biomal.

	Vändschaktaska					Cyklonaska					Textilfilteraska				Baskarp
	Ref WR19	SBT WR19	Ref	Sulfur	Biomal	Ref WR19	SBT WR19	Ref	Sulfur	Biomal	Ref WR19	SBT WR19	Ref+ Sulf	Biomal	Sand
Ca(OH) ₂			L	L	L						M	M	M	M	
CaClOH											M	M	M	M	
CaCO ₃	S	S				L	L ⁻	L	L	L	L	L	L	L	
CaO			L	L ⁻	L	S	S	S		S					
CaSO ₄	L	L	M	M	M	L	L	L	L	L	L	L ⁻	L	L	
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,Cl,F)										M					
Na ₄ Ca(SO ₄) ₃											S/L	S/L			
Ca ₃ Al ₂ O ₆	L	L	M	M	M	L	L	M	M	M	L	L ⁻			
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	L	S			
CaSiO ₃															
NaCl						L	L	L		L	M	M	M	M	
KCl						S	S	L			M	M	M	M	
SiO ₂	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	S	S			M
NaAlSi ₃ O ₈	M	M	M	M	M	L/M	L/M								M
KAlSi ₃ O ₈	M	M	L	L	M	L	L								M
Na ₂ Si ₂ O ₅						S	S								
Fe ₂ O ₃	L	L	S			L	L				S	S			
Al metall	L	L				L	L ⁺	L	L	L					
Fe metall	L	L	L			S	S								
MgO	L	L	M	M	M										
(Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄															
O ₁₀ (OH) ₈ Clinochlore															M

M= Mycket, L= Lite, S= Spår

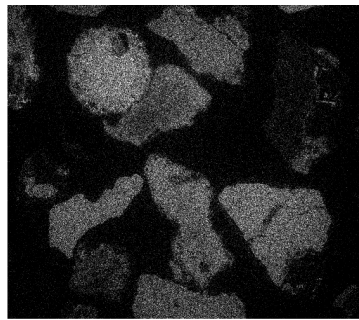
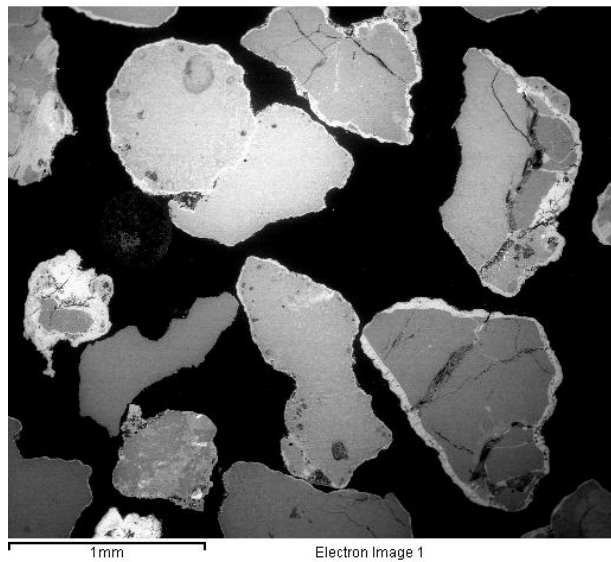
⁻ mindre än i Ref, ⁺ mer än Ref, [?] osäkert resultat

Cyklonaskorna analyserades två ggr, en gång före och en gång efter vattentvätt. Första analysen gav väldigt lite information och det misstänktes att det berodde på stora mängder små kristaller av NaCl och KCl. Efter vattentvätten hittades fler föreningar men bara en fosforförening, apatit. Alla tre cyklonaskorna hade ganska höga NaCl koncentrationer men bara Refallet innehöll KCl. Dominerande i alla tre fallen var kalciumaluminiumoxid, kalciumaluminiumsilikat och kvarts.

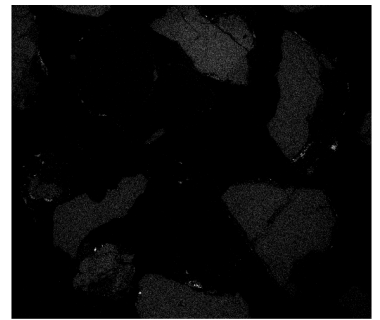
Resultatet från filteraskorna gav ingen information mer än att det i alla tre fallen var gott om KCl och NaCl samt kalcium- hydroxid, klorid, karbonater och sulfater.

C SEM-EDX

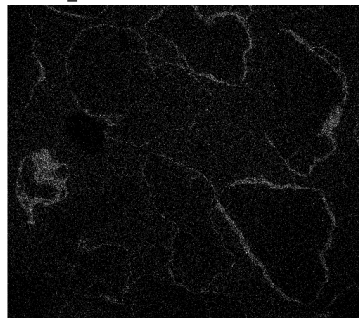
C.1 Retur sand, Ref



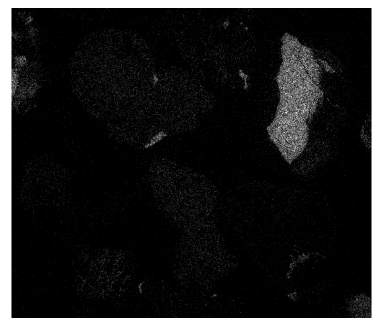
Na Ka1_2



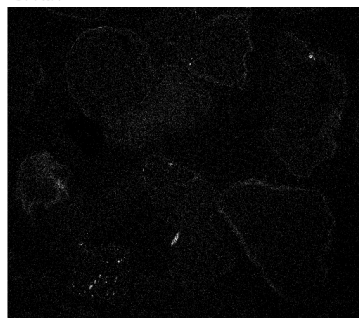
Al Ka1



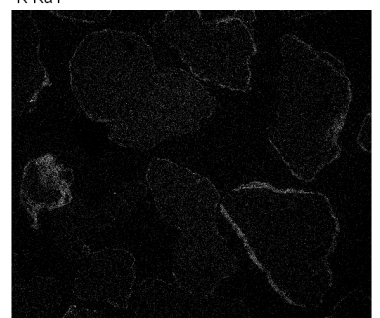
Cl Ka1



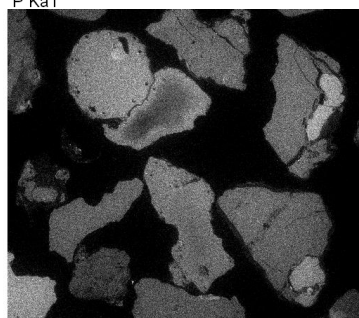
K Ka1



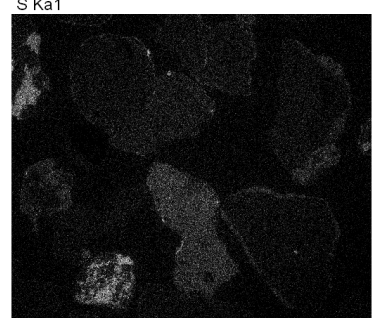
P Ka1



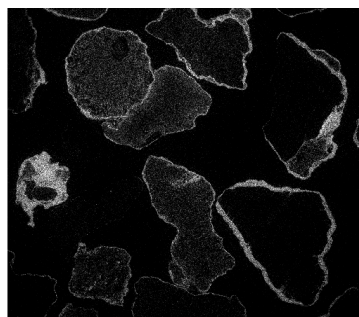
S Ka1



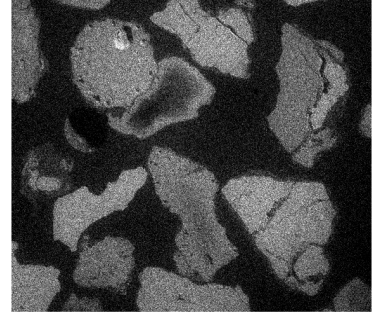
Si Ka1



Mg Ka1_2



Ca Ka1

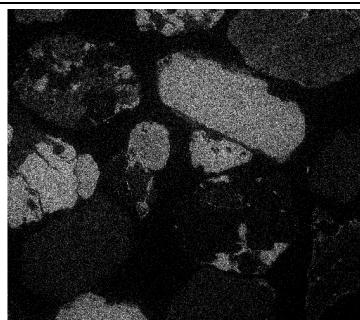
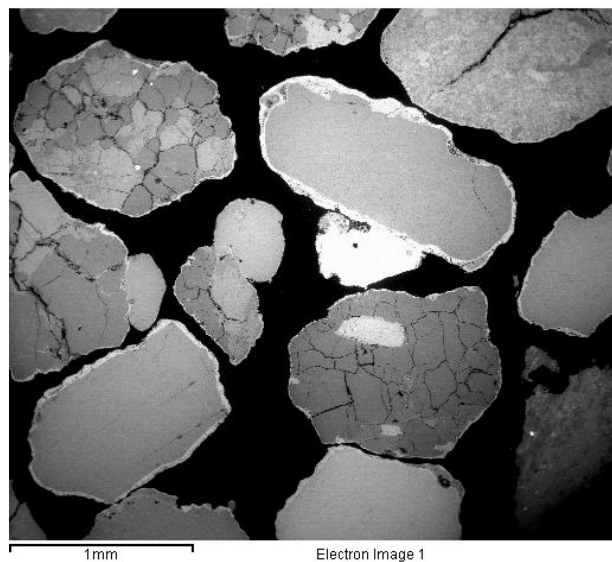


O Ka1

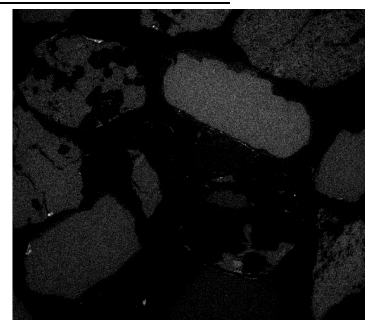
Figur 28. SEM-EDX Mapp av Retursand från Refallet.

Figure 28. SEM-EDX Mapp of Return sand, Ref case.

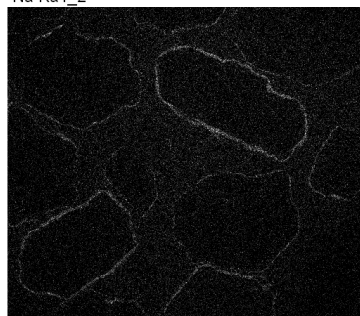
C.2 Retur sand, Svavel



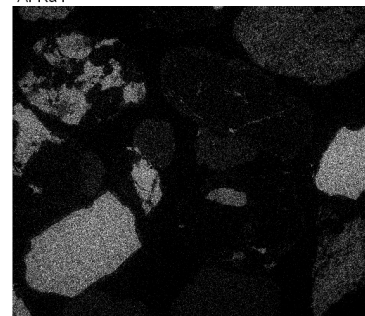
Na Ka1_2



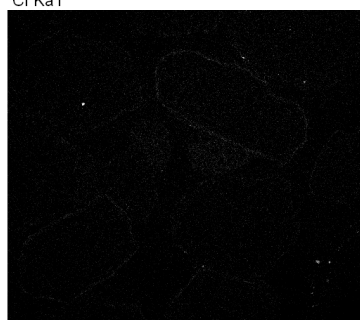
Al Ka1



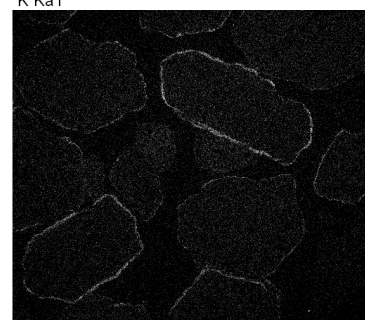
Cl Ka1



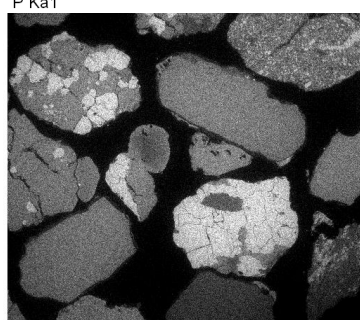
K Ka1



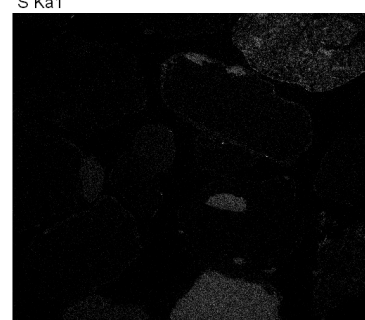
P Ka1



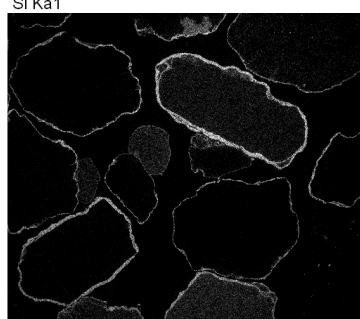
S Ka1



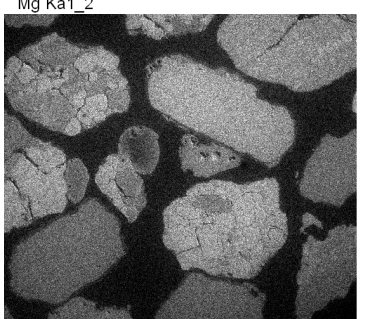
Si Ka1



Mg Ka1_2



Ca Ka1

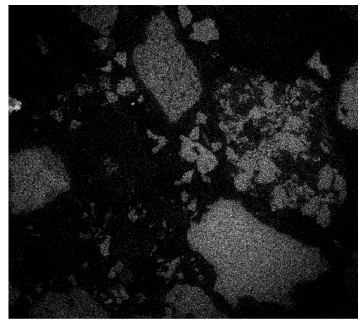
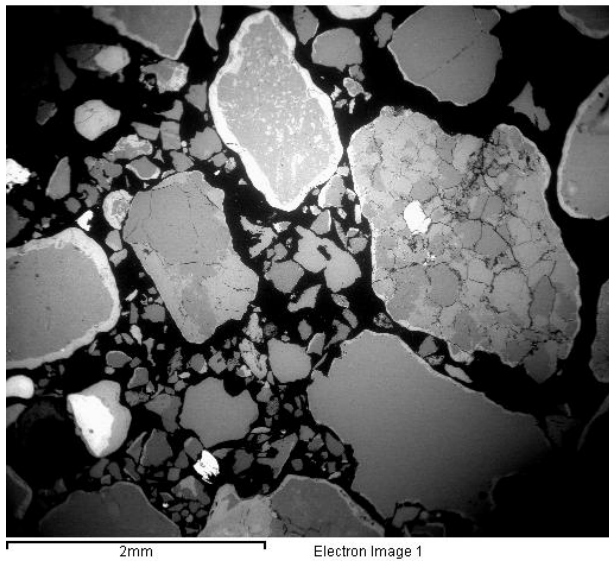


O Ka1

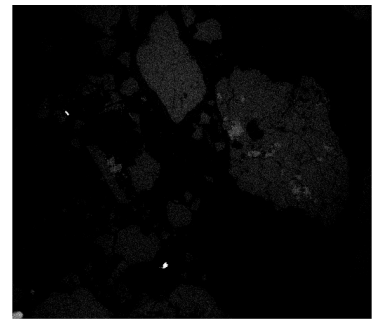
Figur 29. SEM-EDX Mapp av Retursand från Svavelfallet.

Figure 29. SEM-EDX Mapp of Return sand, Sulphur case.

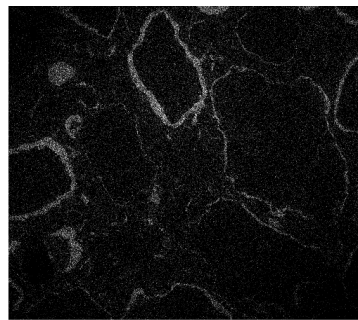
C.3 Retur sand Biomal 2



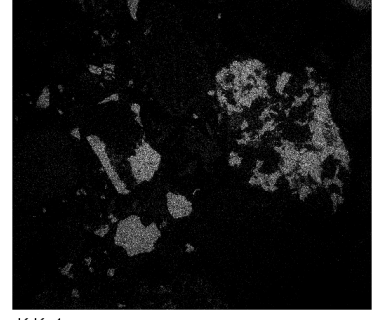
Na Ka1_2



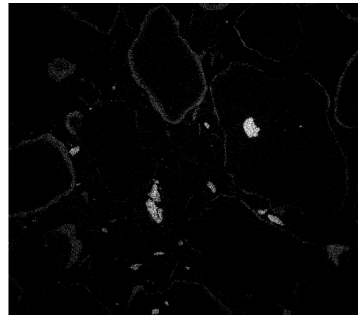
Al Ka1



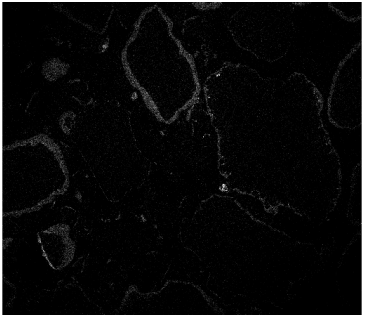
Cl Ka1



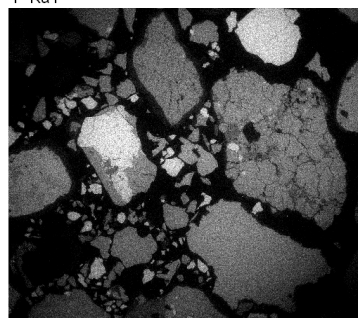
K Ka1



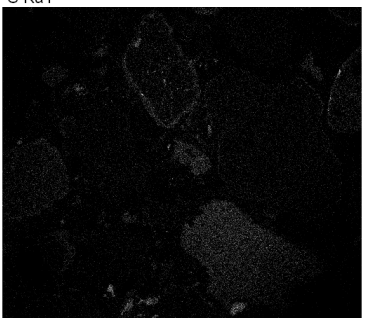
P Ka1



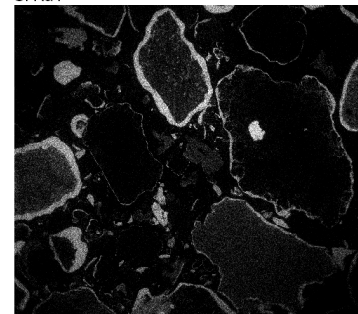
S Ka1



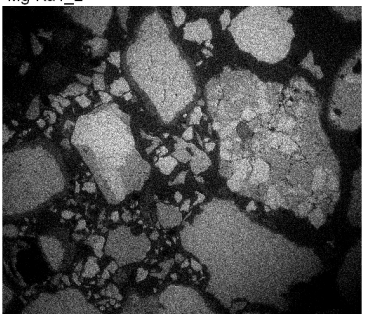
Si Ka1



Mg Ka1_2



Ca Ka1

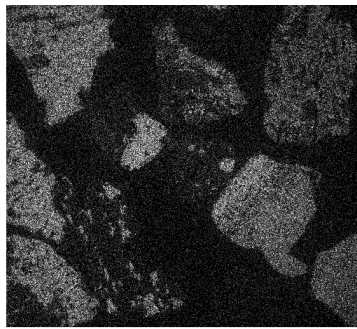
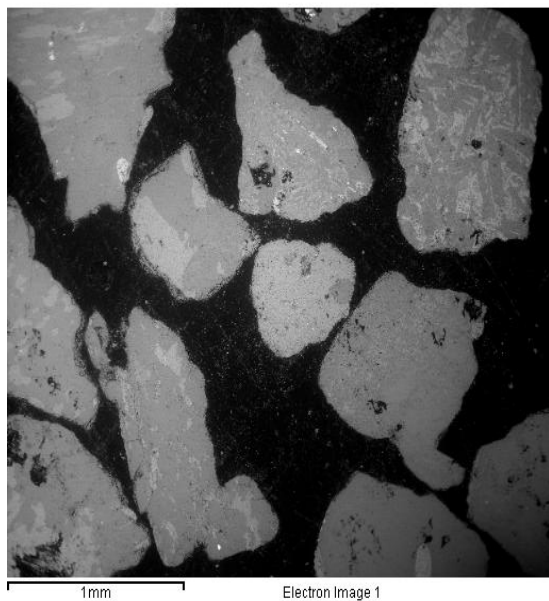


O Ka1

Figur 30. SEM-EDX Mapp av Retursand från Biomalfallet.

Figure 30. SEM-EDX Mapp of Return sand, Biomal case.

C.4 Baskarpsand, färsk



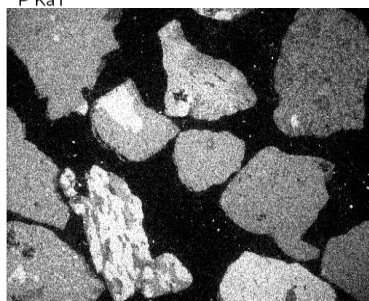
Na Ka1_2



Cl Ka1



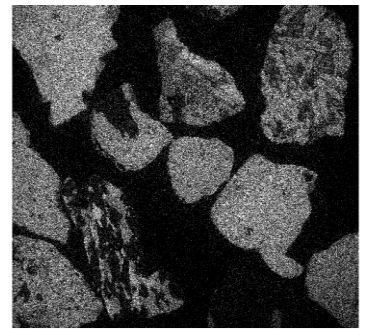
P Ka1



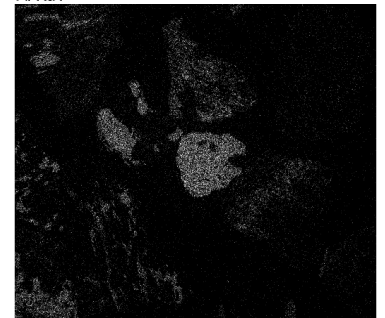
Si Ka1



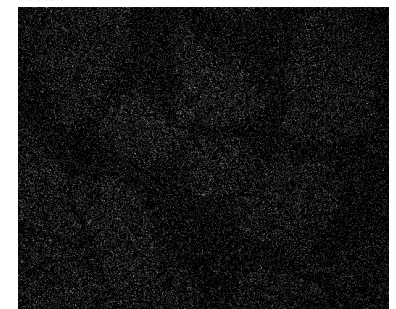
Ca Ka1



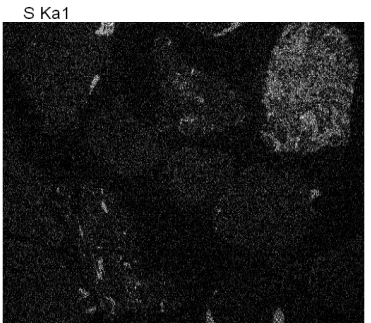
Al Ka1



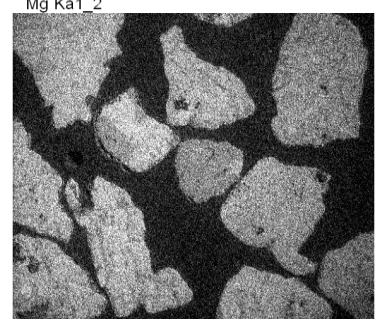
K Ka1



S Ka1



Mg Ka1_2



O Ka1

Figur 31. SEM-EDX Mapp av färsk bäddsand.

Figure 31. SEM-EDX Mapp of fresh bed material.

D Abstract och presentation, NTNU.

Full-Scale Research on Co-Combustion of Animal Waste as Additional Fuel in a Waste to Energy BFB Boilers

Farzad Moradian^{1}, Anita Pettersson¹, Tobias Richards¹*

1. University of Borås, Sweden

** Corresponding author: farzad.moradian@hb.se*

As a result of the bovine spongiform encephalopathy (BSE) outbreak in Europe, animal by products such as crushed animal carcasses, slaughterhouse rest products etc. classed with “risk of infection” were considered for destruction by combustion, since November 2000 [1]. Sweden, as one of the pioneer countries regarding usage of renewable fuels, is co-combusting animal waste in selected waste incineration plants over the country [2]. The heat and power supplier in the city of Borås launched co-combustion of animal waste with municipal solid waste in their twin 20MW_{th} bubbling fluidized bed (BFB) boilers in the autumn of 2010. Apart from having acceptable heating value, the high moisture content of animal waste could decrease the bed temperature, which showed improved operation conditions in previous research [3]. The aim of this research was to investigate how the changed fuel chemistry influences ash chemistry, deposit growth and emissions. In this part of the study, the proceedings of the full scale measurements are presented along with some early results.

A series of full-scale measurements were carried out in the two 20MW_{th} BFB boilers in Borås. It was investigated how the addition of animal waste affects the combustion chemistry inside the furnace and consequently issues like deposition growth, corrosion, bed agglomeration and emission were investigated. The measurements were conducted with two different fuel mixes, which are denoted as; reference case and animal waste case. In the reference case, the fuel mix used consisted of the normal blend of municipal solid waste (MSW) that the boilers are designed for. This MSW consists of a mix of 70% industrial waste and 30% household waste. In the animal waste mix, the fuel mix consisted of 80% of the normal MSW and 20% animal waste. The full-scale measurements include sampling of fuel mixes, ashes; bed ash, return sand, cyclone ash and filter ash plus deposits collected on a measurement probe, in addition to analyzes of the emitted flue gas. Different laboratory techniques such as chemical fractionation and SEM-EDX were used to analyze the solid samples quantitatively and qualitatively, respectively, for the elemental and compound compositions.

The rate of deposit formation in the super heater area was considerably reduced, during the animal waste case compared to the reference case. The elemental analysis of the collected deposits show much higher amount of Ca associated compounds in reference case than the animal waste case. For return sand, the SEM-EDX and chemical

fractionation results also confirm higher capture of Ca, Cl and S in the bed for the animal waste case. The phosphorus concentration in both deposits and bed materials is much higher for the animal mix case, which is expected considering the chemical composition of the fuel. Despite high concentration of nitrogen in animal waste, the emission data show lower NO_x emission in the flue gas compared with the reference case.

References:

E. Deydier, R. Guilet, S. Sarda, P. Sharrock. *Physical and chemical characterization of crude meat and bone meal combustion residue: "waste or raw material?"* Journal of Hazardous Materials 121(2005)141–148.

S. H. Svärd, A. Kullendorff, L. Virta, S. Backman, H-Å Tilly, E. Sterngård. *Co-combustion of animal waste in fluidized bed boilers-operating experiences and emission data*. The 17th international conference on fluidized bed combustion, Florida May 18-21, 2003

A. Pettersson, F. Niklasson, F. Moradian. *Reduced bed temperature in a commercial waste to energy boiler – Impact on ash and deposit formation*. Journal of Fuel Processing Technology, Submitted December 2010.



WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
wasterefinery@sp.se
www.wasterefinery.se