



Rökgasbrunn för minimering av stoft och sura komponenter vid småskalig förbränning av åkerbränslen, vidareutveckling

Johan Yngvesson, Marie Rönnbäck, Olof Arkelöv

Rökgasbrunn för minimering av stoft och sura komponenter vid småskalig förbränning av åkerbränslen, vidareutveckling

Johan Yngvesson, Marie Rönnbäck, Olof Arkelöv

Abstract

Agricultural derived solid fuels are more problematic to combust in small-scale heating plants than conventional wood fuels. Their high content of ash, chlorine and sulphur leads to increased emissions of dust, sulphur dioxide and hydrogen chloride in the flue gases. By transporting the flue gases to a flue gas well where it condenses, and separates dust and sour components, enables a cost effective flue gas purification for small-scale heating plants (50 kW – 10 MW) of agricultural derived solid fuels. This project have studied two heating plants using flue gas wells with the aim to add to the knowledge about how a flue gas wells may look like and to quantify how much emissions of dust, chlorine and sulphur in the flue gases are reduced. The project also aimed to summon regulations and laws regarding the handling of the condensate that develop in the flue gas well.

In the project measures were conducted on two different heating plants with mounted flue gas wells: a 60 kW biofuels boiler combusting grains and red canary grass and a 1 MW batch fired boiler combusting wheat straw. Measurements on flue gases were conducted with and without water injection in the flue gases. The flue gas wells reduced dust emissions of up to 80 %. The best reduction was achieved at the 60 kW heating plant when firing red canary grass. Firing grains in the same plant lead to 7 % reduction of the dust emissions. In the 1 MW heating plant firing wheat straw the flue gas well accomplished 40 % reduction of dust emissions. The boiler ability to achieve complete combustion, hence minimize the content of volatile and semi-volatile components in the flue gas, is largely affecting the flue gas well ability to reduce dust emissions. This did not, however, affect the reduction of dust in the flue. Chlorine emissions was reduced by up to 88 % by a flue gas well. Water injection made a big difference on reduction of chlorine emission from grain combustion. Sulphur emissions was reduced by 50 %, from wheat straw combustion, by a flue gas well. No reduction of sulphur was achieved from grains combustion in the 60 kW heating plant and water injection had little or no effect on the reduction rate.

As the condensate was very acetic and potentially erosive an ejector fan was used to cool down the flue gases enough to enable acid resilient plastic pipes to be used for the flue gas canal. The well was drained of condensate continuously and the piping must be swept with regular intervals to prevent blockage of the flue gas.

Plants below 20 MW is excluded from national regulations on activity emission regarding flue gas condensate. The Swedish Environmental Code does however place the responsibility for preventing harm to nature upon the practicer. The possibilities of managing the condensate from the flue gas well are spillage to a manure reservoir for spreading it as fertilization on farmland, or spillage directly to receiving waters. The later method require neutralization of the pH, commonly by using sodium hydroxide, but possibly also limestone.

Key words:

Flue gas well, ejector fan, agricultural fuels, dust emission, chlorine emission, sulphur emission, flue gas condensate

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2011:02
ISBN 987-91-86622-26-8
ISSN 0284-5172
Borås 2011

Innehållsförteckning

Abstract	3
Innehållsförteckning	4
Förord	5
Sammanfattning	6
1 Inledning	7
1.1 Syfte och mål	9
2 Beskrivning av anläggningar med rökgasbrunn	9
2.1 Rökgasbrunnen på Gullbringa Säteri	9
2.2 Rökgasbrunnen på Ormebacken	12
3 Beskrivning av mätförsök och metoder	14
3.1 Utförda mätningar	14
3.1.1 Rökgasanalyser	16
3.2 Bränsle och askanalyser	16
3.3 Analys på rökgaskondensat	17
4 Resultat	18
4.1 Bränsleanalyser	18
4.2 Rökgasbrunnens avskiljning av stoft ur rökgaser	19
4.2.1 Mätningar av stoft på Gullbringa	21
4.2.2 Mätningar av stoft på Ormebacken	21
4.2.3 Stoftanalyser	23
4.2.4 Övriga rökgasanalyser	25
4.3 Rökgasbrunnens avskiljning av sura komponenter	27
4.3.1 Avskiljning av klor i rökgaserna	27
4.3.2 Avskiljning av svavel i rökgaserna	29
4.4 Aska	30
4.5 Rökgaskondensat	31
5 Hantering av rökgaskondensat	33
5.1 Spridning på åkermark	33
5.2 Utsläpp till recipient	35
5.3 Inkoppling på kommunalt avloppsreningsverk	35
6 Uppvärmning av mark	36
7 Diskussion	36
8 Slutsatser	38
9 Referenser	39
Bilaga 1	

Förord

Rapporten redovisar resultaten från projektet ”Rökgasbrunn för minimering av utsläpp vid förbränning av åkerbränslen, vidareutveckling” som ingår i Energimyndighetens program ”Småskalig värmeförsörjning med biobränsle”. Energimyndigheten har finansierat projektet tillsammans med Länsstyrelsen i Västra Götaland. Dessutom har medverkande aktörer Synneröd Maskin och Hålltorps Säteri Maskin AB bidragit med egen medfinansiering och konstruktionsmaterial. Projektet har genomförts av SP och Kanenergi Sweden AB. Projektet bygger till stor del på resultat från en tidigare utvärdering av rökgasbrunn vid spannmålseldning som genomfördes med finansiering från Jordbruksverket.

Från SP har Johan Yngvesson, Marie Rönnbäck, Kent Davidsson, Magnus Holmgren och Fredrik Niklasson medverkat och från Kanenergi har Olof Arkelöv medverkat. Vid förbränningsförsöken har Per-Uno Karlsson från Synneröd Maskin samt Christofer Carlander från Hålltorps Säteri Maskin AB och Jonas Carlander medverkat.

Vi vill tacka deltagare och finansiärer som har bidragit till att projektet har gått att genomföra. Vi vill även tacka de båda anläggningsägarna, Gullbringa Säteri och Ornebacken Lantbruk som ställt sina anläggningar till vårt förfogande under mätningarna.

Johan Yngvesson
SP Borås, januari 2011

Olof Arkelöv
Kanenergi Skara, januari 2011

Sammanfattning

Eldning av åkerbränslen är mer problemfyllt än träbränslen. Deras innehåll av aska, klor och svavel innebär generellt högre emissioner av stoft, svaveloxider och klorid. Genom att kyla rökgaserna och låta dem kondensera i en brunn kan man erhålla en kostnadseffektiv rökgasrening på små förbränningsanläggningar och minimera utsläppen av stoft och sura komponenter vid förbränning av åkerbränslen. I detta projektet har man utvärderat två anläggningar med rökgasbrunnar med syftet att öka kunskapen kring hur en rökgasbrunn kan se ut och hur mycket den kan reducera emissionerna av stoft, svavel och klor. Dessutom har projektet syftat till att klargöra vilka regelverk som omgärdar hanteringen av det kondensat som samlas i rökgasbrunnen.

Rökgasbrunnarna i projektet var monterade på två olika pannor för eldning av åkerbränslen: en 60 kW biobränslepanna eldad med havre eller rörflen samt en 1 MW halmeldad panna för satsvis eldning. Rökgasbrunnarna visade sig kunna reducera stoftemissionerna med upp emot 80 %. Bäst reduktion erhöles vid förbränning av rörflen i pannan på 60 kW. Vid halmförbränning i den satseldade pannan på 1 MW avskiljdes som bäst knappt 40 % av stoftet. Pannans förmåga att åstadkomma fullständig förbränning och därmed minimera halterna av oförbrända flyktiga komponenter i rökgaserna är viktig för rökgasbrunnens förmåga att reducera stoftutsläppen. Mätningarna utfördes med och utan vatteninsprutning i rökgaserna men det gick inte att påvisa någon positiv effekt av vatteninsprutningen på reduktionen av stoftemissioner.

Klor-emissionerna (HCl) reducerades med upp mot 88 % med rökgasbrunnen. Reduktionen av HCl var något sämre på den havreeldade pannan på 60 kW där vatteninsprutning krävdes för att erhålla en riktigt bra reduktion. I den satsvis eldade halmpannan reducerades svavelemissionerna (SO₂) med 50 % och vatteninsprutningen gjorde endast en liten skillnad. I pannan på 60 kW var reduktionen av SO₂ i rökgaserna däremot obetydlig vid eldning av havre och vatteninsprutningen i rökgaserna hade liten eller ingen påverkan på avskiljningen av SO₂.

Genom att använda en ejektorfläkt för att transportera rökgaserna till brunnen kylades rökgaserna ner så mycket att kulverten i marken kunde byggas med syrafasta plaströr. Detta är en bra lösning för att undvika att rören förstörs genom korrosion på grund av det mycket sura rökgaskondensatet, som hade pH 2,5. Det kondensat som samlas i brunnen måste ledas ut på ett effektivt sätt så den inte fylls upp med vatten. Hela rökkanalen måste dessutom sotas med ett visst intervall för att inte slamma igen.

Det finns inga myndighetskrav avseende hantering av rökgaskondensat för förbränningsanläggningar < 20 MW, men Miljöbalken lägger ansvaret på verksamhetsutövaren att försiktighetsåtgärder genomförts och att skada på naturen undviks. De möjligheter att hantera kondensatet på som har framkommit i projektet är utsläpp till gödselbrunn för återföring till åkermark samt utsläpp till recipient. Kondensat har mycket lågt pH som kan skada natur och material om det inte neutraliseras innan hantering/utsläpp. Detta sker vanligtvis med lut men kan eventuellt även åstadkommas med kalk. Spridningen av rökgaskondensat på åkermark bör kunna ske enligt samma rekommendationer som finns för askor från biobränslegrödor. Det innebär i så fall anmälningsplikt gentemot kommunens miljökontor innan spridning sker. Genom att släppa kondensatet till en gödselbrunn behöver det inte neutraliseras och kan återföras till åkern vid gödsling. Möjligheten att släppa rökgaskondensat till det kommunala spillvattennätet avgörs av respektive reningsverk och kräver ofta omfattande analyser av kondensatets innehåll.

1 Inledning

Det finns en stor potential av ”nya” biobränslen, såsom halm, perenna gräs, mm. Nya snabbväxande bränslen har generellt högre askhalt och högre innehåll av surgörande komponenter som klor och svavel än rent stamträ, varvid utsläpp av stoft, svaveldioxid och väteklorid blir högre. Rökgasens fukt kan bli mycket sur och aggressiv om halterna av svavel och klor är höga. Vid spannmålseldning har korrosionsskador uppstått snabbt då fukt kondenserat, även på rostfritt material. Korrosionsskador i närmiljön (plåttak, hängrännor osv) har rapporterats, och dessa ämnen bidrar även till förorening av miljön.

Genom att leda rökgaserna genom en rökgasledning i mark till en rökgasbrunn, har det i den föregående studien (Rönnbäck, Arkelöv et al., 2007) konstaterats att det går att minska stoftutsläppen och att kondensera ut stora delar av de sura ämnena. Konceptet erbjuder en prisvärd och tekniskt enkel metod till utsläppsreduktion.

Eldning av bränslen från åker är mer problemfylld än de mer etablerade skogsbränslena. Det mest använda åkerbränslet är idag halm. För de mindre anläggningarna (upp till 1MW) är det oftast batcheldad utrustning som används. Denna typ av utrustning är kostnadseffektiv men kanske inte den mest effektiva förbränningsmässigt. Det är ofta svårt att i den här typen av utrustning nå ner till låga värden på framför allt stoft nivåer. Reglerna för emissioner- och stoftutsläpp regleras av Boverket för utrustning upp till 300kW. För anläggningar över 500kW är det Naturvårdsverkets föreskrifter som gäller. För ett par år sedan så gjordes en förändring i BBR där man tog bort tätortsbegreppet vad gäller emissioner till luft från förbränningsanläggningar. Tidigare så ställdes högre krav på utrustning som befanns inom tätort än på utrustning utanför tätort. Förändringen innebar att all utrustning, oavsett placering, skulle klara de hårdare reglerna för tätort. I Naturvårdsverkets föreskrifter finns tätortsbegreppet kvar vilket ger olika gränsvärden för olika placeringar. Vid placering utanför tätort ställs lägre krav.

Idag används rökgasbrunnar i första hand för oljebrännare vid spannmålstorkar, men på de senaste åren har minst ett 10-tal rökgasbrunnar installerats för mindre spannmåls pannor. Ett askrikt bränsle med högt innehåll av sura ämnen ställer andra krav på val av fläkt, säkerhetssystem, omhändertagande av kondensat mm. Tekniken finns beskriven och utvärderad i den föregående studien (Rönnbäck, Arkelöv et al., 2007), där förslag tas fram till förbättringar och man pekar på problemet med stora mängder rökgaskondensat vid större anläggningar. Vid mindre anläggningar (<50 kW) kan brunnen göras tät, kondensatet pH-stabiliseras enkelt med kalkstensmjöl, och mängden minskas i tillräcklig mån genom avdunstning. Vid större anläggningar måste kondensatet dräneras ut i marken och/eller omhändertas på annat sätt. Det finns också frågetecken kring hur uppvärmning av mark påverkar funktionen om anläggningens effekt ökar.

Tidigare utföranden av rökgasbrunnar har varit utförda av cement / betong. En rökgasbrunn faller inte under de ordinarie reglerna för sotning och återkommande kontroller av sotarfejarmästare så mycket av reglerna för dess utförande har funnits att hämta från LBK (Lantbrukets Brandskyddskommitté) rekommendationer. Att rökgasledning och rökgasbrunn har varit utförda i cement / betong (eller annat material med hög motståndskraft mot mekanisk förslitning) har varit för att kondensat från använda bränslen har varit mindre korrosivt. LBK har i sin senare skrivning ändrat utförandekraven enligt nedan (www.brandskyddsforeningen.se).

5.9 Rökgasledning med rökgasbrunn

Rökgasledning med rökgasbrunn får anslutas till eldstad belägen i alla slags byggnader.

Rökgaserna avleds med rökgasfläkt via rökgasledning till rökgasbrunn.

5.9.1 Rökgasfläkt

Rökgasfläkt kan antingen placeras så att rökgaserna passerar fläkten enligt figur eller också ingå i en rökgasinjektor enligt figur 5.9.1.

Vid automatisk eldning ska anordning finnas för automatisk avstängning av bränsletillförseln om rökgasfläkten stannar (förregling).

Vid eldning med fasta bränslen ska det finnas antingen anordning för automatisk avstängning av såväl primär- som sekundärluft vid elavbrott eller reservelkraft för drivning av rökgasfläkt, varmluftsfläkt och cirkulationspump.

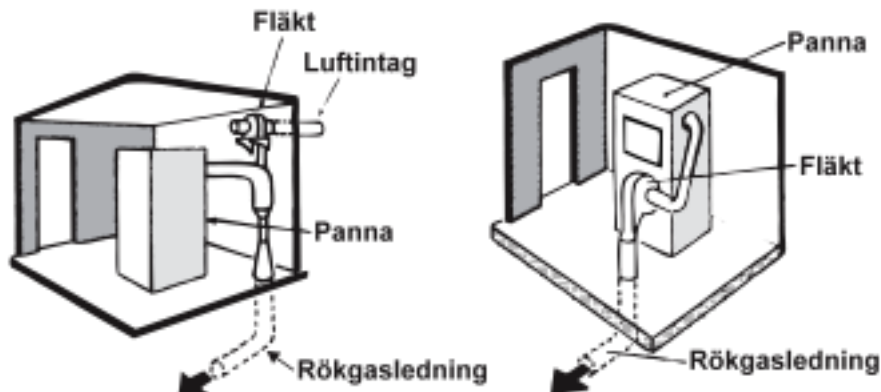


Fig 5.9.1 Rökgasledning och rökgasfläkt med respektive utan injektor.

© SBF-LBK November 2005 5.9.2 Rökgasledning

Rökgasledning i mark utförs av rör med god motståndskraft mot förväntat kondensat och mekaniska belastningar. Betongrör, så kallade muffrör ska centreras noga och fogarna tätas omsorgsfullt med cementbruk. Vid spannmålseldning bör keramiska rör användas. Alternativt kan betongrören infordras med rör av syrafast stål avsett för spannmålseldning.

Ledning läggs med rörens översida minst 0,5 meter under markytan och med jämn lutning ned mot rökgasbrunnen. Ledningen kan dock behöva läggas djupare eller isoleras, om risken för tjälskador eller skador av tung trafik motiverar detta.

5.9.3 Rökgasbrunn

Rökgasbrunn ska placeras på minst 15 meter avstånd från byggnad eller lättantändligt upplag.

Rökgasbrunn bör utföras enligt figur 5.9.3 varvid rökgasledningen ansluts till brunnen excentriskt med snedskuren mynning och på sådant sätt att rökgaserna leds ut längs med brunnsväggen så att önskvärd rotation kan uppstå.

Rökgasbrunn bör mynna minst 1 meter ovan mark och vara försedd med huv eller galler. Rökgasbrunn utförs rensbar.

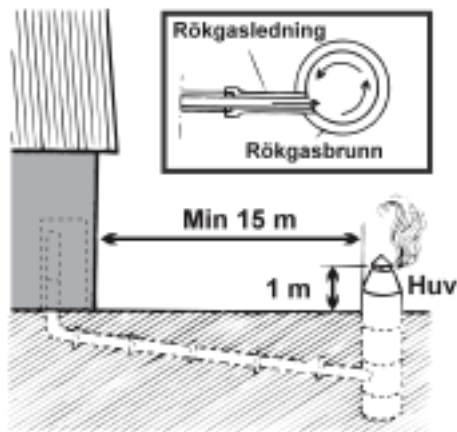


Fig 5.9.3 Rökgasbrunn

1.1 Syfte och mål

Det övergripande syftet med detta projektet är att öka kunskapen kring hur en rökgasbrunn kan se ut och verifiera dess förmåga att avskilja stoft och sura komponenter i rökgaserna samt redogöra för hur rökgaskondensatet bör hanteras.

I projektets mål ingår att beskriva två värmeanläggningar mellan 50 kW och 5 MW för förbränning av åkerbränslen med rökgasbrunnar installerade och vilka komponenter som ingår i dessa konstruktioner. Vidare skall projektet leda till att klargöra vilka regelverk som omgärdar rökgaskondensatet och ge exempel på hur det kan hanteras för att uppfylla eventuella krav. Dessutom ingår att visa på avskiljningen av stoft och sura komponenter i rökgaserna för två olika konstruktionskoncept av rökgasbrunnen (med och utan vatteninsprutning i rökgaserna) samt på vilket sätt uppvärmningen av marken kan påverka funktionen på lång sikt.

2 Beskrivning av anläggningar med rökgasbrunn

2.1 Rökgasbrunnen på Gullbringa Säteri

Anläggningen på Gullbringa Säteri består av en bioenergipanna på 60 kW med en ejektorfläkt och rökgasbrunn installerade på rökgasröret istället för en skorsten. Pannan är en undermatad rosterpanna av modell Catfire. Den är utrustad med PLC styrning av bränsleinmatning, askutmatning och primär- och sekundärluft. Den eldas med havre men provades även för rörlensbriketter under några dagar i ett projekt som studerade förutsättningarna för förbränning av bl.a. rörlensbriketter (Paulrud och Hedman, 2010). Rökgasflödet beräknas till $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ vid nominell effekt.

Rökgasröret består av rostfritt stål och är monterat efter rökgasfläkten vågrätt ut ur pannrummet. Cirka två meter efter rökgasfläkten sitter en ejektorfläkt monterad på ett anslutningsrör. Där vänder även rökröret ner mot marken och övergår till ett 250 mm plaströr, se Figur 1. Plaströret ligger nergrävt på cirka 30 cm djup och leder till en brunn av betong 20 meter bort. Brunnen avslutas med en kort skorsten på 1 meter som sitter monterad på brunnslocket. På det rostfria rökgasröret strax innan ejektorfläkten sitter en dysa för vattenbesprutning av rökgaserna. Dysan är av märket Hardi och saluförs som en dysa för användning till ogräsbesprutning och den har en konisk sprutbild. Ejektorfläkten har en märkeffekt på 200 W och ger ett luftflöde på cirka $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ under drift. Den blåser in omgivningsluft i rökröret som kyler ner rökgaserna. Rökröret är även utrustat med en motdragslucka strax efter rökgasfläkten. Den släpper in luft i rökröret när

undertrycket ökar vilket förhindrar att den ostyrda ejektorfläkten påverkar tilluften till pannan vilket kan påverka förbränningen. Motdragsluckan öppnas dessutom automatiskt vid ett eventuellt strömavbrott för att släppa ut rökgaserna.

Anläggningen är utrustad med två mätuttag. Det första, *mätpunkt A*, sitter strax efter pannans rökgasfläkt, se Figur 2. Det andra, *mätpunkt B*, sitter på rökgasbrunnens skorsten, se Figur 3.



Figur 1: Bilden visar det rostfria rökröret som övergår till plaströr förlagt i mark.



Figur 2: Bilden visar hur rökröret från pannan kommer ut genom väggen. Strax efter väggen sitter mät punkt A. Ejektorfläkten, högst upp i bild, är monterad där rökröret vinklas 90 grader ner mot marken. Vatteninsprutningen sker strax innan T-kopplingen.



Figur 3: Rökgasbrunnen på Gullbringa Säteri är utrustat med ett mätuttag på skorstenen, mät punkt B.

2.2 Rökgasbrunnen på Ormebacken

Anläggningen omfattar en satseldad halmpanna på 950 kW (omnämns här efter som 1 MW panna) som utrustats med en tillfälligt monterad rökgasbrunn. Pannan är en Hålltorppanna och eldas normalt med massaved. För mätförsöken användes dock halm som pannan hade injusterats för några dagar innan mätningarna. Pannan är utrustad med PLC styrning och lambdasond. Den har en rökrörsdiameter på 400 mm. Efter rökgasfläkten sitter *mätuttag A* monterat, se Figur 4. Rökröret går sedan lodrätt upp genom en ackumulatortank. I toppen av tanken leds rökgaserna mer mot marken i spirorör på utsidan av tanken, se Figur 5. Två meter över marken sitter en ejektorfläkt monterad på ett sidorör, se Figur 6 och en dysa för vatteninsprutning i rökgaserna sitter monterad strax efter ejektorfläkten, i samma anslutningsrör. Efter ejektorfläkten tar ett plaströr vid som leder rökgaserna, ovan mark, till en betongbrunn. Brunnen har en diameter på 600 mm och är utrustad med en kort skorsten, cirka en meter hög, där *mätuttag B* sitter monterad, se Figur 7. I botten på brunnen ligger ett dräneringsrör. Rökgasflödet vid nominell effekt beräknas till $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Ejektorfläkten ger ett luftflöde på cirka $2 \text{ m}^3/\text{s}$ under drift. Vatteninsprutningen består av en dysa avsedd för befuktning av djurstallar.



Figur 4: Från pannan går rökröret till ackumulatortanken. På rökröret sitter mätuttag A placerat.



Figur 5: Halmpannan på Ormebacken med ackumulatortank. Rökröret går först upp i mitten av tanken och sedan nedåt igen på utsida av tanken, ner till marken och bort till rökgasbrunnen.



Figur 6: Rökröret möter plaströret vid marknivå. Ejektorfläkten sitter på ett anslutningsrör strax före liksom dysan till vatteninsprutningen.



Figur 7: Rökgasbrunnen och mätuttag B som sitter monterad på brunnens skorsten. Brunnen är dränerad för att bli av med det kondensat som bildas.

3 Beskrivning av mätförsök och metoder

I projektet undersöktes två värmeanläggningar med rökgasbrunnar installerade. De båda anläggningarna testades för två driftfall på rökgasbrunnen, med och utan vatteninsprutning i rökgaserna. Mätningar på rökgaser har utförts före och efter brunnen samtidigt för att kvantifiera brunnens avskiljning av stoft, svavel och klor i rökgaserna. Prov på rökgaskondensat samlades in för analys och information kring regelverk som kan påverka hanteringen av rökgaskondensat sammanställdes liksom förslag på möjliga metoder för omhändertagande av kondensatet efter brunnen. För beräkning av markuppvärmningens påverkan på rökgasbrunnens funktion mättes rökgastemperaturen i rökröret efter ejektorfläkten.

3.1 Utförda mätningar

Totalt i projektet genomfördes fyra mätningar av sura komponenter samt fyra mätningar av stoft i rökgaserna. Dessutom tillkom tre stoftmätningar ifrån ett annat projekt "Förutsättningar för användning av rörlensbriketter och hackad rörlens i mindre värmecentraler" (Paulrud och Hedman, 2010). En matris över samtliga mätningar visas i Tabell 1. Mätningarna utfördes vid nominell effekt på spannmålspannan och vid en tillförd effekt på cirka 550 kW på den satseldade halmpannan. De genomfördes under två olika driftfall för de båda rökgasbrunnarna, med och utan vatteninsprutning i rökgaserna. Svaveldioxid och väteklorid i rökgaserna mättes den första dagen på anläggningen och den andra dagen mättes stoft. Varje mätning omfattade två mätpunkter på anläggningarna, en placerad efter pannan (mätpunkt A) och en placerad på skorstenen efter brunnen (mätpunkt B). Mätningarna i de båda mätpunkterna skedde samtidigt. Även rökgastemperaturen mättes i respektive mätpunkt.

Tabell 1 visar den mätmatris som användes vid de båda anläggningarna. Matrisen är uppdelad på åtta plus tre mättillfällen utspridda på totalt fem mättdagar. Den anger driftfall, mätpunkter samt mätparametrar. Plustecknet indikerar mätning av respektive parameter.

Gullbringa, 60 kW, havre			Dag 1				Dag 2			
	Mätning: Driftfall:		<u>1</u> Utan vatten-insprutning		<u>2</u> Med vatten-insprutning		<u>3</u> Utan vatten-insprutning		<u>4</u> Med vatten-insprutning	
	Mätpunkt		<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn
Parameter			1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
Våtkemisk, SO ₂ och HCl			+	+	+	+	-	-	-	-
Stoft			-	-	-	-	+	+	+	+
CO			+	-	+	-	+	-	+	-
CO ₂			+	-	+	-	+	-	+	-
O ₂			-	+	-	+	-	+	-	+
Rökgastemperatur			+	+	+	+	+	+	+	+

Ornebacken, 1 MW, halm			Dag 3				Dag 4			
	Mätning: Driftfall:		<u>5</u> Utan vatten-insprutning		<u>6</u> Med vatten-insprutning		<u>7</u> Utan vatten-insprutning		<u>8</u> Med vatten-insprutning	
	Mätpunkt		<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn
Parameter			5A	5B	6A	6B	7A	7B	8A	8B
Våtkemisk, SO ₂ och HCl			+	+	+	+	-	-	-	-
Stoft			-	-	-	-	+	+	+	+
CO			+	-	+	-	+	-	+	-
CO ₂			+	-	+	-	+	-	+	-
O ₂			-	+	-	+	-	+	-	+
Rökgastemperatur			+	+	+	+	+	+	+	+

Gullbringa, 60 kW, rörfilen			Dag 5					
	Mätning: Driftfall:		<u>9</u> Utan vatten-insprutning		<u>10</u> Utan vatten-insprutning		<u>11</u> Med vatten-insprutning	
	Mätpunkt		<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn	<u>A</u> Panna	<u>B</u> Brunn
Parameter			9A	9B	10A	10B	11A	11B
Stoft			+	+	+	+	+	+
CO			+	-	+	-	+	-
CO ₂			+	-	+	-	+	-
O ₂			+	+	+	+	+	+
Rökgastemperatur			+	+	+	+	+	+

3.1.1 Rökgasanalyser

Rökgasanalyser utfördes samtidigt i båda mätpunkterna, A och B. Dubbla uppsättningar av mätutrustning användes för samtidig mätning vid panna och brunn för att ta reda på reduktionen av stoft respektive surgörande komponenter i rökgasen.

Stoftmätningen utgick ifrån metod EN13284-1 och mättes med isokinetiskt gasuttag genom uppsamling på kvartsfiler. Metoden är avsedd att mäta stoft i varma rökgasar på större förbränningsanläggningar. Avsteg från metoden som berodde på omständigheterna vid mätningarna omfattade svårigheter i att säkerställa en homogen och stabil hastighetsprofil och möjligheten till mätning över rökgasens daggpunkt i Mätpunkt B, efter brunnen. En faktor som kan öka osäkerheten för resultaten vid brunnen är att stoftmätningar i en utspädningstunnel är förenat med större variationer (Johansson och Ryde, 2007). Detta har dock inte tagits i beräkning i rapportens resultatpresentation.

För ta reda på halterna av svavel och klor i rökgaserna användes två metoder för våtkemisk mätning av svaveldioxid (SO_2) och mätning av väteklorid (HCl). Båda metoderna finns beskrivna i Värmeforsks Mäthandbok (Gustavsson och Nyquist, 2005). Metoderna ger ett medelvärde av respektive komponent för den undersökta tidsperioden och är bl.a. avsedda för mätningar i rökgasar i samband med utsläppskontroller. De bygger på våtkemisk absorption och vätskan analyserades senare i SP Kemi- och Materialtekniks laboratorium.

Rökgaserna analyserades även avseende CO , CO_2 med NDIR-instrument och O_2 med paramagnetiskt instrument. Dessa mätningar gjordes kontinuerligt och värden lästes av varje 15:e sekund. CO -halten i rökgaserna efter pannan studerades för att upptäcka eventuella försämringar i förbränningen. Gasinstrumenten kalibrerades före och efter mätningarna. Tabell 2 anger de typer och mätosäkerheter som gäller för instrumenten. Samtliga mätutrustningar ingår i SP's kvalitetssystem.

Tabell 2: Mätutrustning. Beteckningar hänvisar till SP Energitekniks kvalitetssystem.

Instrument	Beteckning
Termoelement typ K	ETf-QD Db 2
Stoftprovtagningssutrustning STL-Medi	Inv. nr. 200 399
Stoftprovtagningssutrustning STL-Combi	Inv. nr. 202 743
Gasur med pump för våtkemisk analys	Inv. nr. 200 721
Gasur med pump för våtkemisk analys	Inv. nr. 300 633
CO / CO_2 -analysator typ Binos	Inv. nr. 201 668
O_2 -analysator typ M&C modell PMA 10	Inv. nr. 202 589
Mätvärde	Mätosäkerhet
Rökgastemperatur	± 3 °C
Stofthalt	< 10 % vid en filterviktökning på ≥ 20 mg
SO_2 -halt vid våtkemisk analys	± 15 % SO_2
HCl -halt vid våtkemisk analys	± 10 % HCl
CO_2 -halt	$\pm 0,4$ % CO_2
CO -halt (mg/Nm^3)	± 15 % CO
O_2 -halt	$\pm 0,5$ % O_2

3.2 Bränsle och askanalyser

Bränsleanalyser utfördes på havren respektive halmen. Bränsleprovet på havre togs direkt ur spannmålspannans bränslelager samma dag som mätningarna genomfördes. På anläggningen på Ormebacken togs bränsleprovet ur halmbalarna när de lastades in i

pannan. Halm plockades ur balarna på olika radiella avstånd och djup. På grund av balarnas täthet var det mycket svårt att djupare än 20 cm. Analysmetoder för bränslet visas i Tabell 3. Även prover på bottenaska togs på de båda anläggningarna. Askprovet på spannmålspannan togs i slutet av den tredje mät dagen. På halmpannan togs askprovet innan den laddades den andra mät dagen. Det var återigen svårt att få ett representativt prov, varför aska plockades på flera platser inne i brännkammaren. Brännkammaren innehöll samtidigt mycket oförbränt material som blivit kvar när tilluften stängts av och pannan slocknat. Analysmetoderna omnämns i Tabell 4. Bränsleanalyser och askanalyser gjordes vid SP Kemi- och Materialtekniks laboratorium.

Tabell 3: Metoder för bränsleanalyser.

Bränsleanalys	Metod
Total fukt:	SS-EN 14774-2
Aska:	SS-EN 14775
Svavel:	CEN/TS 15289 (svavelanalysator)
Klor:	CEN/TS 15289 A (jonkromatografi)
Kol, väte, kväve:	CEN/TS 15104
Syre:	Beräknat som differens
Värmevärde:	SS-EN 14918
Huvudelement: -Al, Si, Fe, Mn, Ti, Ca, Mg, Ba, Na, K, P	mod. ASTM D 3682
Spårelement: -As, Pb, Cd, Cr, Cu, Co, Ni, Zn, V, Mo:	mod. ASTM D 3683

Tabell 4: Metoder för askanalyser.

Fukt:	SP 0516 (Torkning vid 105 °C)
Huvudelement: - Al, Si, Fe, Mn, Ti, Ca, Mg, Ba, Na, K, P	mod. ASTM D 3682
Spårelement: -As, Pb, Cd, Cr, Cu, Co, Ni, Zn, V, Mo	mod. ASTM D 3683
Klor:	Kvantifierat med jonkromatograf.*
Svavel:	SS 18 71 86

*Ej ackrediterad metod

3.3 Analys på rökgaskondensat

Rökgaskondensat togs från utsugna rökgaser under stoftmätningarna. Gaserna sögs ut isokinetiskt och tilläts kondensera helt genom kylning i en glasbehållare. Det uppsamlade kondensatet analyserades senare med avseende på pH, metallinnehåll samt innehåll av klorid, nitrat och sulfat. Producerade volymer beräknades och sammanställdes i en tabell där de jämfördes med funna gränsvärden avseende spridning på åkermark.

4 Resultat

4.1 Bränsleanalyser

Resultatet av bränsleanalyserna för de råvaror som användes vid försöken visas i Tabell 5. Havren uppvisar högre halter av flera metaller som krom, zink och nickel än halmen gör. Havren innehåller även mer svavel än halmen medan det omvända gäller för klor. Förhållandet mellan svavel och klor i bränslet påverkar mängden klor som finns i gasfas i rökgaserna. Havre har ett förhållande med två gånger mer svavel än klor vilket skapar förutsättningar för högre mängder klor i gasfas för detta bränslet. Vedanalysen är tagen ur Bränslehandboken (Strömberg, 2005).

Tabell 5: Bränsleanalyser på (torra) prover av havre och halm i projektet samt analys av ved (Strömberg, 2005).

	Havre	Halm	Ved
Kalorimetriskt värmevärde, MJ/kg	19,16	19,12	20,3
Effektivt värmevärde, MJ/kg	15,40	14,38	18,97
Aska, vikt-%	3,3	3,5	0,6
Svavel, S, vikt-%	0,14	0,1	0,03
Klor, Cl, vikt-%	0,07	0,15	0,01
Kol, C, vikt-%	46,7	47,6	50,6
Väte, H, vikt-%	6,5	5,9	6,2
Kväve, N, vikt-%	1,8	0,50	0,1
Syre, O, (diff) vikt-%	41,5	42,2	42,9
Arsenik, As, mg/kg aska	<0,6	<1	
Kadmium, Cd, mg/kg aska	<0,1	0,1	
Bly, Pb, mg/kg aska	0,7	0,7	
Koppar, Cu, mg/kg aska	10	5	98
Krom, Cr, mg/kg aska	12	0,2	81
Nickel, Ni, mg/kg aska	2	0,2	57
Zink, Zn, mg/kg aska	39	11	2570
Molybden, Mo, mg/k aska g	2	<0,5	
Vanadin, V, mg/kg aska	4	<0,2	
Kobolt, Co, mg/kg aska	<0,2	<0,2	
<u>På inaskat prov vid 550 °C</u>			
Aluminium, Al, vikt-%	0,05	0,09	
Kisel, Si, vikt-%	16,2	18,7	
Järn, Fe, vikt-%	0,57	0,18	
Titan, Ti, vikt-%	<0,01	<0,01	
Mangan, Mn, vikt-%	0,19	0,10	
Magnesium, Mg, vikt-%	4,37	2,60	
Kalcium, Ca, vikt-%	3,16	4,31	
Barium, Ba, vikt-%	<0,01	0,09	
Natrium, Na, vikt-%	0,4	0,19	
Kalium, K, vikt-%	15,2	22,1	
Fosfor, P, vikt-%	13,3	1,44	

4.2 Rökgasbrunnens avskiljning av stoft ur rökgas

Resultaten från rökgasanalyserna och stoftmätningarna på de båda pannorna presenteras i Tabell 6. Angivna värden är medelvärden från respektive mätningar. Resultaten från mätningarna skiljer sig åt mellan de båda anläggningarna, men också mellan bränsleslag i samma anläggning. Vid förbränning av rörlan i 60 kW pannan på Gullbringa kunde rökgasbrunnen reducera stoftemissionerna med upp emot 80 %. Vid förbränning av havre i samma anläggning var reduktionen mindre än 10 %. Skillnaden mellan havre och rörlan var tydlig endast för stoftemissionerna efter brunnen. Övriga mätparametrar i rökgasanalysen var snarlika för de båda bränsleslagen. Man kan alltså konstatera en påtaglig skillnad i rökgasbrunnens förmåga att avskilja stoft ur rökgaserna beroende på vilket bränsleslag som eldas.

På anläggningen med den satseldade halmpannan på 1 MW på Ormebacken gav stoftmätningarna två helt olika resultat. Ett försök resulterade i drygt 30 % lägre stoftemissioner efter brunnen och ett försök visade på en ökning av stoft med 14 %. En förklaring till ökningen av stoftemissioner tros vara ett fenomen som inträffar vid utspädning och kylning av rökgas med omgivningsluft. Det beskrivs mer ingående i kapitel 4.2.2 men innebär kortfattat att oförbrända komponenter kondenserar ut på stoftpartiklarna och tillför massa, vilket ger en högre vikt efter brunnen än efter pannan. Skillnaden kan vara uppemot en faktor tio vilket innebär att även en effektiv avskiljning av stoft i rökgasbrunnen kan döljas i mätresultatet. Fenomenet förstärks av dålig förbränning och höga halter av oförbrända halvflyktiga komponenter i rökgaserna.

Försöken på Gullbringa visar att vattenbesprutning av rökgaserna inte påverkar avskiljningen av stoft nämnvärt. På Ormebacken är det osäkert om det är vatteninsprutningen som resulterar i den förbättrade avskiljningen av stoft eller om den istället kan tillskrivas det koaguleringsfenomen orsakas av dålig förbränning i utspädda rökgas, se kapitel 4.2.2.

För pannor från 500 kW upp till 10 MW finns NVVs rekommenderade gränsvärden 100 mg/Nm³ vid 13 % CO₂ inom tätbebyggt område (~45 mg/MJ). Pannor under 300 kW regleras utav Boverket. För pannor mellan 300 kW och 500 kW saknas idag lagstiftning eller allmänna rekommendationer som begränsar utsläppen av stoft, svaveldioxid eller väteklorid. Det gör det svårt att bedöma om utsläppen är acceptabla eller inte för dessa anläggningar men i ett förslag från Energimyndigheten anges 70 mg/MJ (ca 155 mg/Nm³ vid 13 % CO₂) för anläggningar 0,3 – 2,5 MW och 30 mg/MJ (ca 70 mg/Nm³ vid 13 % CO₂) för anläggningar 2,5 till 10 MW (Gulliksson, Fogelström et al., 2004).

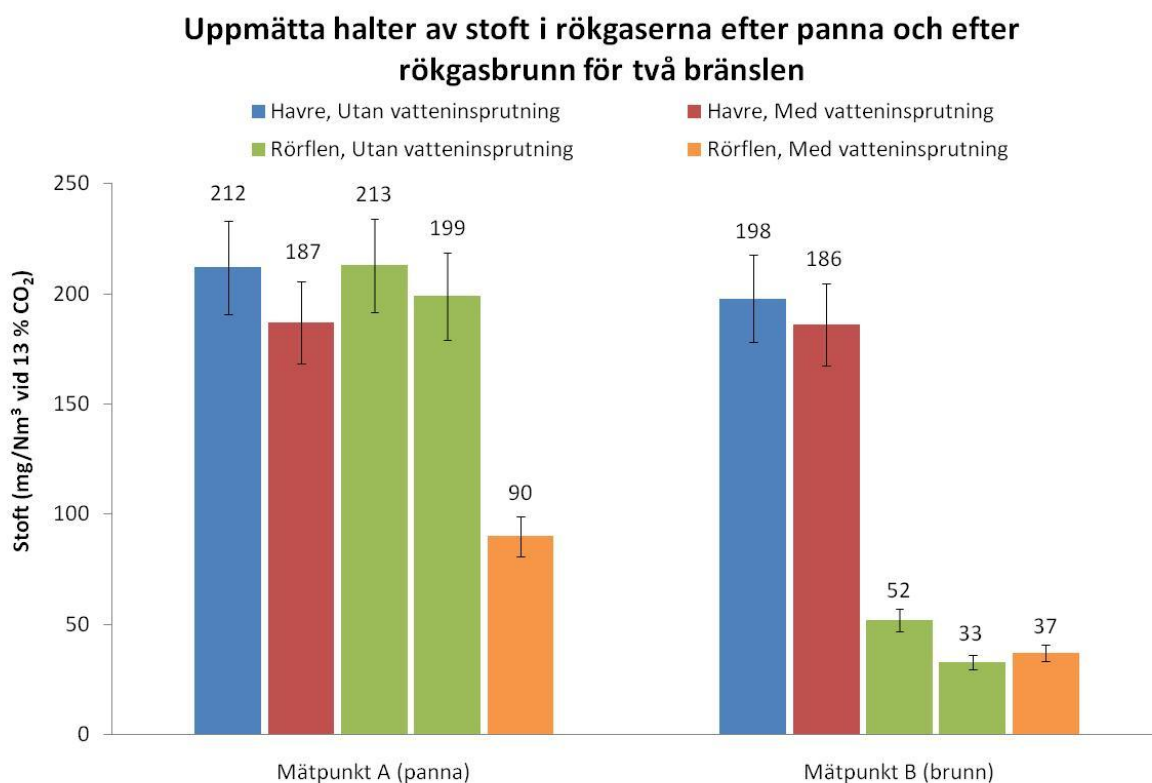
Tabell 6: Sammanställning av resultat från stoftmätningar på Gullbringa och Ormebacken inklusive rökgasanalyser.

	Rgt ^A (°C)	CO ^A (mg/Nm ³ t.g. vid 13 % CO ₂)	CO ^A (mg/MJ)	CO ₂ ^A (%)	O ₂ ^A (%)	Rgt ^B (°C)	CO ₂ ^B (%)	O ₂ ^B (%)	Stoft ^A (mg/Nm ³ t.g. vid 13 % CO ₂)	Stoft ^B (mg/Nm ³ t.g. vid 13 % CO ₂)	Reduktion av stoft (%)
Gullbringa, Havre ej vatteninsprutn.	165	35	14	9,8	10,5	32	2,8	17,9	212	198	7
vatteninsprutning	165	36	14	9,5	10,8	31	2,8	17,9	187	186	1
Gullbringa, Rörflen ej vatteninsprutn.	145		27	10,5	9,7	29		17,9	213	52	76
	144			10,2	10,1	30		17,9	199	33	83
vatteninsprutning	107			9,3	11	28		18,1	90	37	59
Ormebacken, Halm ej vatteninsprutn.	181	1280	500	9,8	10,9	39	4,7	16,1	271	309	-14
Vatteninsprutning	143	13770	4970	4,1	16,7	30	2,3	18,6	218	135	38

^A efter pannan^B efter brunnen

4.2.1 Mätningar av stoft på Gullbringa

Spannmålspannan på Gullbringa brann stabilt och bra under hela mätförloppet. Ejektorfläkten spädde ut rökgaserna med en faktor tre, beräknat på den uppmätta CO_2 halten i rökgaserna vid pannan och brunnen. Detta sänkte rök Gastemperaturen från omkring $160\text{ }^\circ\text{C}$ till cirka $30\text{ }^\circ\text{C}$. Syrehalten i rökgaserna efter brunnen var stabil kring 18 %. Mätningarna utfördes först utan vatteninsprutning och därefter med vatteninsprutning i rökgaserna. Av de stoftprover som togs på Gullbringa efter pannan, mätpunkt A, innehöll fyra av fem prover mellan $187 - 213\text{ mg/Nm}^3$ (torr gas vid 13 % CO_2), se Figur 8. Ett stoftprov avviker från detta och ligger på 90 mg/Nm^3 . Samma figur visar också stofthalterna efter rökgasbrunnen, mätpunkt B, som mättes samtidigt. Dessa skiljer sig tydligt åt beroende på om pannan eldats med havre eller med rörflen. Vid förbränning av havre uppmättes stofthalterna vid brunnen till 198 respektive 186 mg/Nm^3 . Det innebär en reduktion av stoftemissioner med 1 – 7 %. Vid förbränning av rörflen uppmättes stofthalter till mellan 33 – 52 mg/Nm^3 vid brunnen vilket innebär en reduktion av stoftemissioner med 83 % från panna till brunn. Mätningarna visar samtidigt att vatteninsprutningen i rökgaserna inte innebär någon förbättring avseende stoftemissionerna efter brunnen.



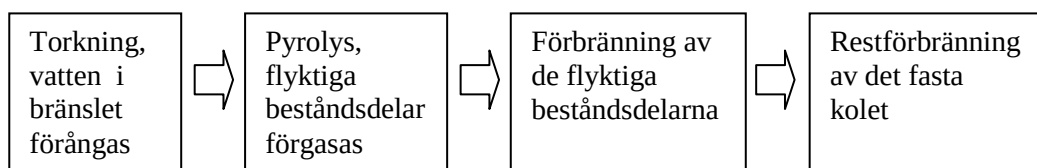
Figur 8: Uppmätta halter av stoft efter pannan och efter brunnen på anläggningen på Gullbringa, mätningar 3 och 4 samt mätningar 9, 10 och 11. Mätningar gjordes för havre respektive rörflen samt med och utan vatteninsprutning i rökgaserna.

4.2.2 Mätningar av stoft på Ormebacken

Halmpannan på Ormebacken laddades med tre halmbalar och brann därefter i ca fem timmar. Förbränningsförloppet följde balarna och kunde uppdelas i tre tydliga etapper. Den första etappen var upptändningsfasen, då brann framförallt den första balen. Det tog lång tid för pannan att nå upp till en väl fungerande temperatur, innan dess var förbränningen bitvis dålig med många kraftiga CO -spikar. Mätningarna genomfördes efter cirka två timmar när pannan erhållit en stabilare förbränning.

Mätning 7 genomfördes utan vatteninsprutning i rökgaserna, därefter följde mätning 8 med vatteninsprutning. Ejektorfläkten spädde ut rökgaserna med omgivningsluft med en faktor två, beräknat på den uppmätta CO_2 -halten i rökgaserna vid pannan och brunnen. På Ormebacken gav stoftmätningarna i mätpunkt A, efter pannan, förhållandevis likvärdiga resultat, 271 och 218 mg/Nm^3 (torr gas vid 13 % CO_2), se Figur 9. I mätpunkt B, efter brunnen, skiljer sig dock de båda mätresultaten tydligt åt. För driftfallet utan vatteninsprutning i rökgaserna uppmättes stofthalten efter brunnen till 309 mg/Nm^3 . Det innebär en ökning av stoftemissioner med 14 %, från pannan till brunnen. För driftfallet med vatteninsprutning minskade stoftemissionerna efter brunnen till 135 mg/Nm^3 vilket innebär en reduktion med 38 %. Diagram från rökgasanalysen från mätningarna visas i Figur 16 och Figur 17.

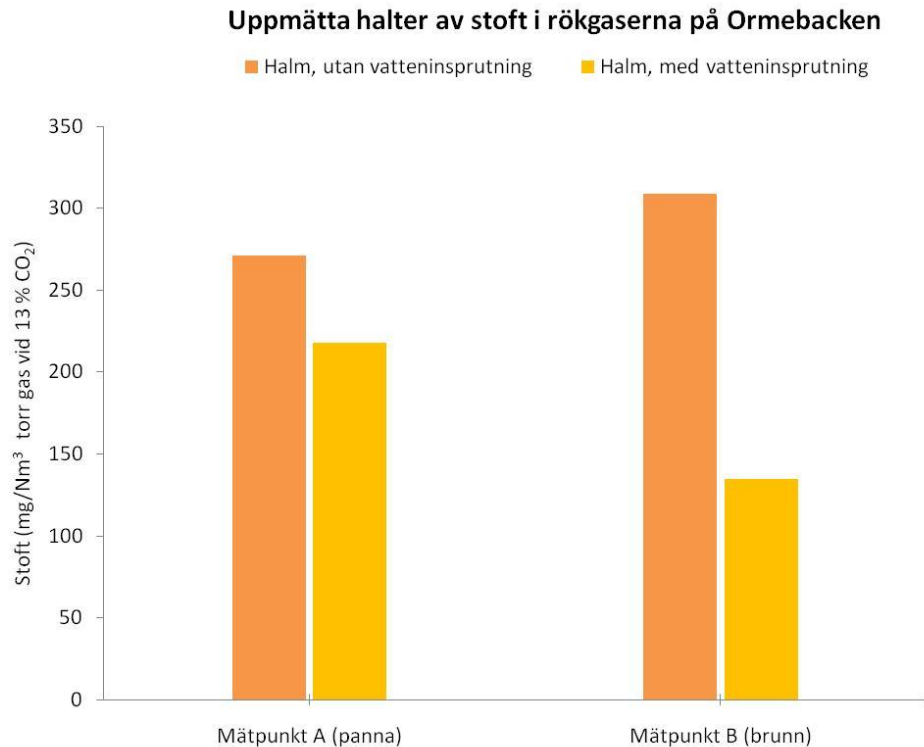
Anläggningen på Ormebacken är en satsvis eldad halmpanna och det är viktigt att ta i beaktande hur de olika förbränningsfaserna i en sådan kan påverka mätresultaten. Under de första förbränningsfaserna avgår de mesta av flyktiga och halvflyktiga produkter från förbränningsprocessen. Det som inte förbränns följer med rökgaserna ut och bidrar till utsläppen av bland annat stoft och kolväten, exempelvis PAH. Avgången av dessa flyktiga ämnen minskar därefter till att vara låga i slutförbränningsfasen, som istället domineras av koksförbränning. Nedan visas en schematisk beskrivning av förbränningsprocessens förlopp. Varje bränslepartikel genomgår alla fyra stadierna. De flyktiga beståndsdelarna är huvudsakligen kolmonoxid, metan, lätta kolväten och tjäror. Vid fullständig förbränning, d.v.s. vid tillräckligt med syre och tillräckligt hög temperatur och omblandning i rökgaserna, omvandlas de flyktiga beståndsdelarna till koldioxid och vattenånga.



Ökningen av stoft vid brunnen under det första mätförsöket på Ormebacken (Mätning 7B) kan vara en effekt av ett fenomen som uppstår vid ofullständig förbränning när varma rökgaser späds ut av kallare omgivningsluft. Halvflyktiga organiska partiklar eller polycykliska aromatiska kolväten, PAH (Particulate Aromatic Hydrocarbons), kan under sådana förhållanden kondensera ut på omgivande sot- och askpartiklar i rökgaserna, vilket bidrar till att massan på dessa partiklar ökar. I en studie gjord på SP jämförs stoftmätningar i skorsten med samma mätningar i en utspädningstunnel vid vedeldning (Johansson och Ryde, 2007). Resultaten i rapporten visar att partikelemissionerna i utspädningstunneln, där rökgaserna blandats med omgivningsluft och kylts ner till 25 °C, är två till tio gånger större än de är i skorstenen. Vidare konstateras i rapporten att ökningen i den kalla mätpunkten förstärks genom försämrade förbränning. Författarna kopplar därför ihop resultaten med höga stoftemissioner i spädtunneln till halten oförbrända produkter i rökgaserna, som uppstår vid ofullständig förbränning. På Ormebackens anläggning innebär detta att rökgasbrunnens avskiljning av partiklar (stoft) osynliggörs av den ökade vikten på de kvarvarande partiklarna, som alltså kan vara mellan två till tio gånger större.

Mätning 8 på Ormebacken visade en reduktion på 38 % av stoftemissionerna. Detta tros bero på att denna mätning utfördes under restförbränningen, då halterna av flyktiga kolväten är minimala. Däremot ökar CO -halten i slutfasen då rökgastemperaturen sjunker. Denna mätning avspeglar hur väl rökgasbrunnen kan avskilja stoft vid bra förbränning utan oförbrända halvflyktiga komponenter i rökgaserna. Skillnaderna mellan mätningarna framgår i diagrammet i Figur 17 där CO_2 och rökgastemperatur är stadigt

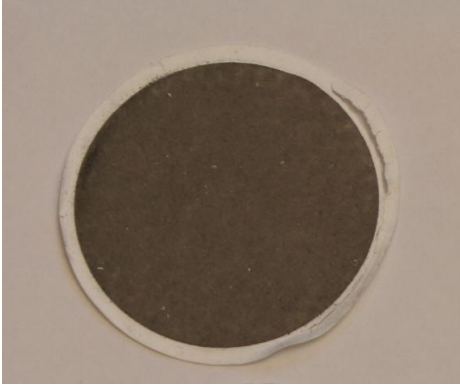
sjunkande under den senare mätperioden på grund av att bränslet börjar ta slut. Utseendet på stoftet mellan de båda mätningarna 7 och 8 skiljer sig också åt, se Figur 12 och Figur 13.



Figur 9: Uppmätta halter av stoft i rökgaserna efter pannan och efter brunnen anläggningen på Ormebacken, mätning 7 och 8. Mätningar gjordes för halm som bränsle, med och utan vatteninsprutning i rökgaserna

4.2.3 Stoftanalyser

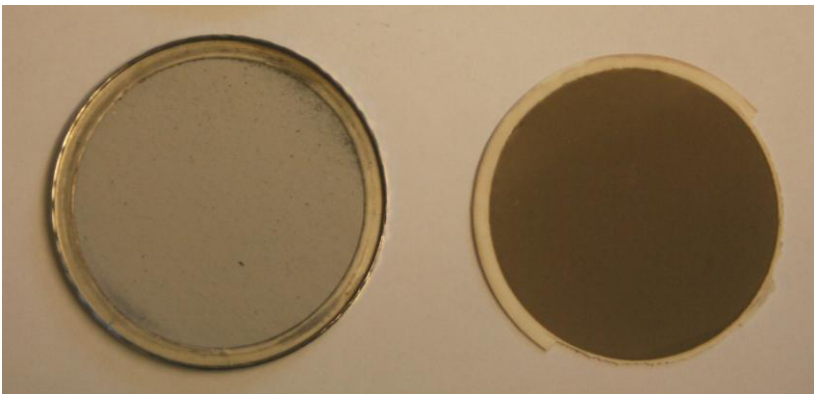
Stoftet hade väldigt olika utseende för olika bränslen och förbränningsförhållanden. Figur 10 visar ett filter med ett fint gråbrunt stoft från mätning 3A från spannmålspannan på Gullbringa. Figur 11 visar ett filter med svart stoft och delvis stora synliga partiklar från mätning 9A, förbränning av rörflen på Gullbringa. Figur 12 visar filterprover från mätning 7A och 7B på halmpannan, där skillnaden mellan panna och brunn är tydlig. Filtret från pannan har en ljus grå färg medan filtret från brunnen är brunt. Figur 13 visar ett filter från mätning 8A på halmpannan. Stoftet var svart och sotigt och skilde sig tydligt från stoftet från mätning 7A. Stoftet från två av filtren (3A och 4A) analyserades även med röntgenfluorescens (XRF) och resultatet beskrivs i Bilaga 1.



Figur 10: Stoftfilter efter spannmålsspanna vid förbränning av havre, mätning 3A.



Figur 11: Stoftfilter efter spannmålsspanna vid förbränning av rörflen, mätning 9A.



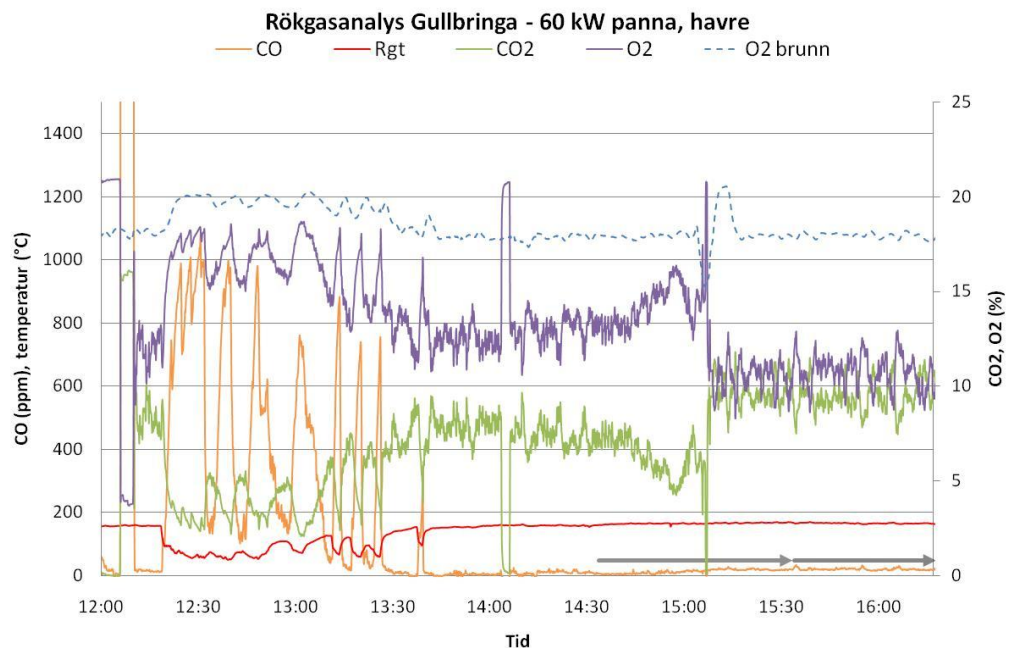
Figur 12: Filterprover från första stoftmätningen på Ormebackens satseldade halmpanna, mätning 7A och 7B. Vänster filter är från mätningen efter pannan, mätpunkt A, och höger filter är från mätningen efter brunnen, mätpunkt B.



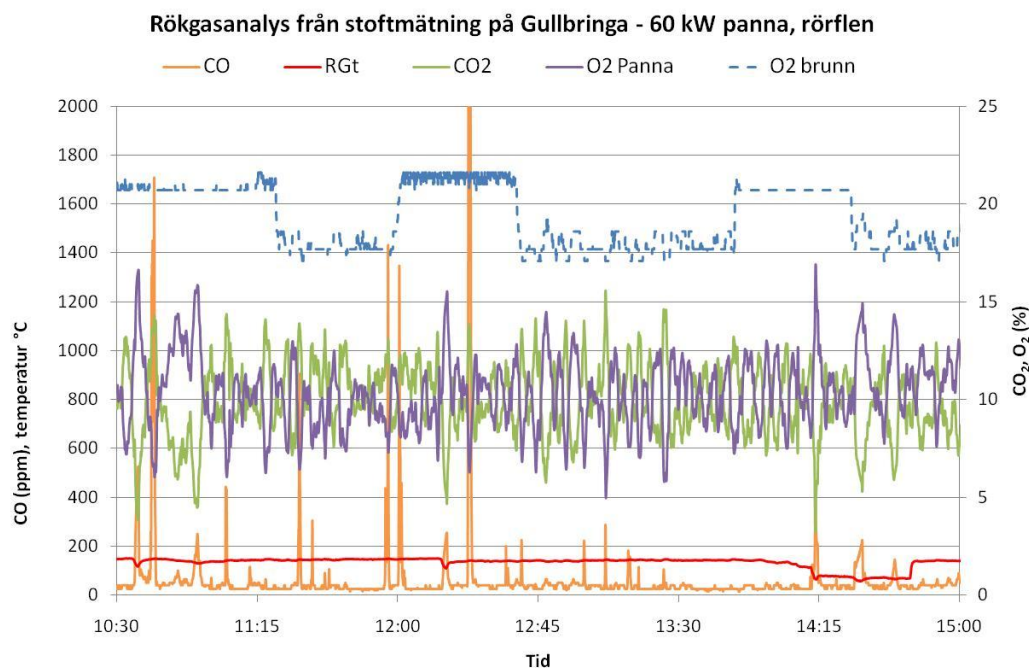
Figur 13: Filterprov från den andra stoftmätningen efter halmpannan, mätning 8A. Filtret är svart av sot.

4.2.4 Övriga rökgasanalyser

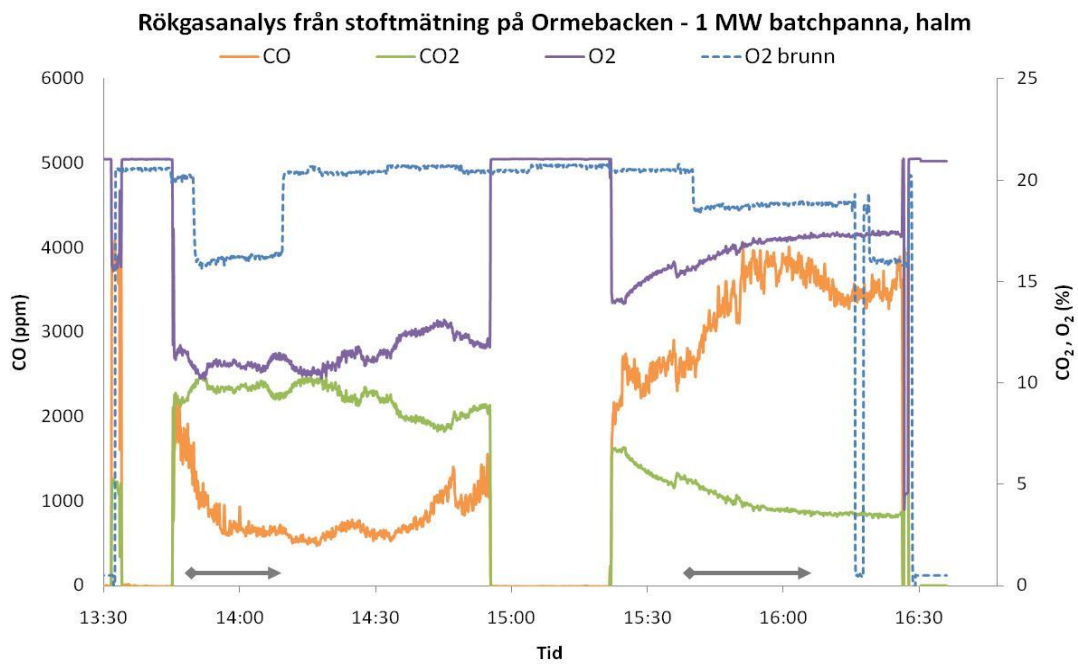
Rökgasanalyser avseende temperaturer, halter av CO/CO₂ och O₂ gjordes för samtliga mätningar på de båda anläggningarna. Pannan på Gullbringa uppvisade stabila förbränningsvärden i rökgaserna under hela mätperioden med endast små fluktuationer. Rökgasanalyserna på havre innehåller mindre fluktuationer i CO än de gör på rörflen, se Figur 14 och Figur 15. Även CO₂ varierar inom snävare halter. Pannan på Ormebacken varierade tydligt mellan olika förbränningsfaser med högre halter av CO mot slutet, se Figur 16 och Figur 17.



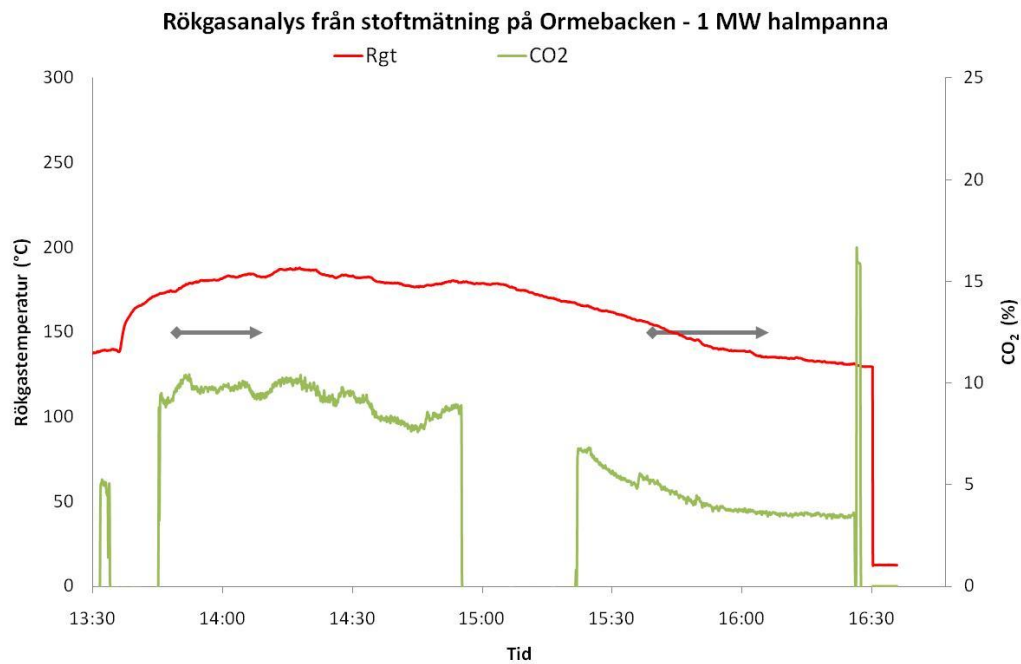
Figur 14: Rökgasanalys på Gullbringa, 60 kW panna eldad med havre. Pilen visar tidsintervallet för stoftmätning 3. Ett läckage i mätkretsen åtgärdades kl.15, hänsyn till detta läckage har tagits i medelvärdesberäkningarna.



Figur 15: Rökgasanalys på Gullbringa, 60 kW panna eldad med rörflen. Mätningen av O₂ vid brunnen avbröts mellan varje stoftmätning. Diagrammet visar rökgasanalysen för mätningar 9, 10 och 11.



Figur 16: Rökgasanalys från Ornebacken, 1 MW panna satseldad med halm. Stoftmätningarna 7 och 8 är markerade med grå pilar. Pannan tändes kl 11:30 och mätning 7 startade kl 13:40 och mätning 8 kl.15:40 . Ett mätavbrott, vid pannan, inträffade mellan kl. 14:50 – 15:20.



Figur 17: Analys av CO₂ och rökgastemperatur från Ornebacken, 1 MW panna satseldad med halm. Stoftmätningarna 7 och 8 är markerade med grå pilar.

4.3 Rökgasbrunnens avskiljning av sura komponenter

Rökgasbrunnen lyckades reducera mängden klor i rökgaserna med mellan 77 - 88 % när vatten sprutades in i rökgaserna. Utan vatteninsprutning var reduktionen 81 % på halmpannan men endast 12 % på havrepannan. Reduktionen av svavel var som bäst 50 % på halmpannan på Ormebacken medan den var obetydlig på Gullbringa vid eldning av havre. Svavelemissionerna påverkades inte av vattenbesprutningen. En sammanställning av mätresultaten visas i Tabell 7.

Tabell 7: Resultat från våtkemiska mätningar av väteklorid och svaveldioxid samt tillhörande rökgasanalyser på Gullbringa och Ormebacken.

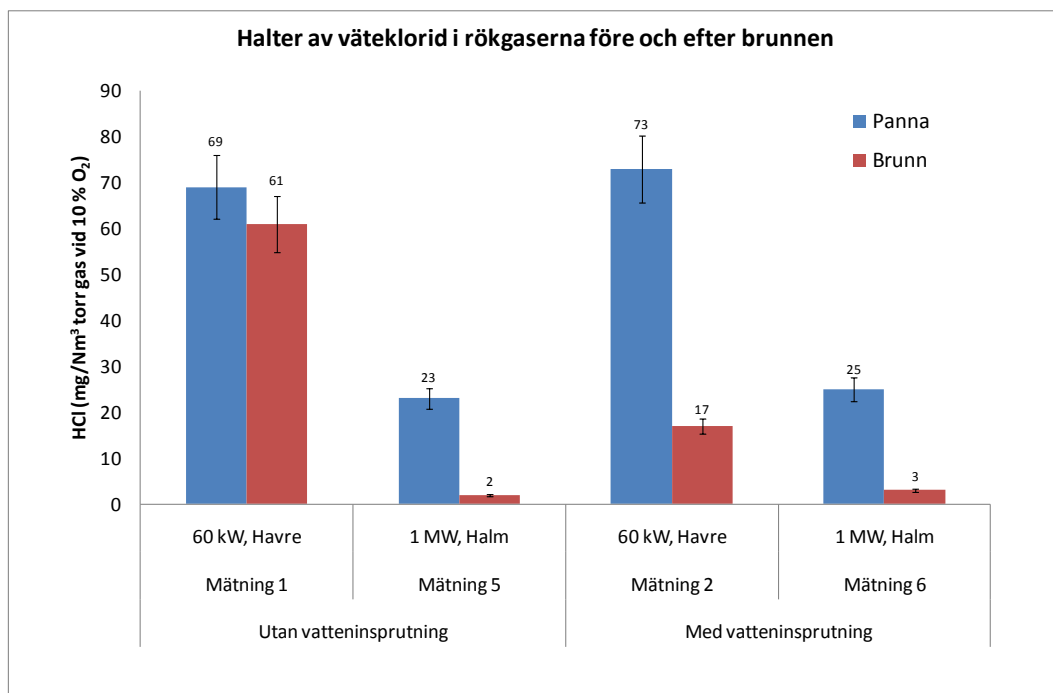
Resultat från våtkemiska mätningar	60 kW panna med havre: Mätning 1 och 2		1 MW panna med halm: Mätning 5 och 6	
Mätning: <i>driftfall rökgasbrunn</i>	Mätning 1: <i>utan vatten- insprutning</i>	Mätning 2: <i>med vatten- insprutning</i>	Mätning 5: <i>utan vatten- insprutning</i>	Mätning 6: <i>med vatten- insprutning</i>
Mät punkt A (panna):				
O ₂ (%)	10,3	12	12,9	8,7
CO ₂ (%)	9,9	8,7	7,8	11,8
CO (ppm)	35	67	3360	1460
CO (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ tg)	45	97	5735	1633
Rökgastemperatur (°C)	160	153	156	190
Temperatur gasur (°C)	11	10	24	24
HCl (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ tg)	69	73	23	25
HCl (mg/MJ)	24,5	27	7,2	8,2
SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ tg)	331	324	40	48
SO ₂ (mg/MJ)	180	179	19,6	24
Mät punkt B (brunn):				
O ₂ (%)	17,8	17,9	17,3	16,7
CO ₂ (%)	3,0	2,8	3,5	4,1
Rökgastemperatur (°C)	31	31	38	39
Temperatur gasur (°C)	11	1	26	26
Temperatur ute (°C)	-2	0	12	12
HCl (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ tg)	61	17	2	3
HCl (mg/MJ)	24	6,7	0,7	0,9
SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10% O ₂ tg)	381	322	20	27
SO ₂ (mg/MJ)	227	190	10,2	13,3
Reduktion av HCl	12%	77%	81%	88%
Reduktion av SO₂	-15%	1%	50%	44%

4.3.1 Avskiljning av klor i rökgaserna

Mätningarna visade att kloridemissionerna i rökgaserna i mät punkt A var relativt lika stora på de båda mätningarna på samma panna. Denna mät punkt skulle inte heller påverkas av driftfallet på rökgasbrunnen. Emissionerna vid brunnen uppvisade stora skillnader mellan driftfallen på Gullbringa, men inte på Ormebacken. Figur 18 visar uppmätta emissioner av väteklorid på de båda anläggningarna.

På 60 kW anläggningen med spannmålspanna på Gullbringa var de uppmätta emissionerna efter pannan 69 respektive 73 mg/Nm³ (torr gas vid 10 % O₂) för mätning 1 och mätning 2. Efter brunnen hade de minskat till 61 respektive 17 mg/Nm³. Reduktionen av kloridemissioner utan vatteninsprutning i rökgaserna var 12 % och med vatteninsprutning var den 77 %. Vid mätning 2, med vatteninsprutning, gick provet vid brunnen förlorat och ett nytt prov togs därför dagen efter (2B-X).

På 1 MW anläggningen, med satseldad halmpanna på Ormebacken, var de uppmätta halter vid pannan 23 respektive 25 mg/Nm³ (torr gas vid 10 % O₂) för mätning 5 och mätning 6. Vid brunnen var uppmätta emissioner 2 respektive 3 mg/Nm³. Reduktionen av kloridemissioner var således 81 % utan vatteninsprutning och 88 % med vatteninsprutning i rökgaserna. Tabell 8 visar en klor-balans över respektive anläggning.



Figur 18: Uppmätta emissioner av väteklorid (HCl) i rökgaserna på Gullbringa och Ormebacken. Emissionerna mättes efter pannan respektive efter rökgasbrunnen för två olika driftfall på rökgasbrunnarna, med respektive utan vatteninsprutning i rökgaserna.

Tabell 8: Klorinnehållet i bränsle, aska och rökgaser på de båda anläggningarna. Medan allt klor avgått i rökgaserna hos havrepannan har det mesta klor stannat kvar i bottenaskan hos halmpannan. *Provet togs vid ett senare tillfälle än motsvarande prov på pannan.

Analyserat	Klorinnehåll Havre	Klorinnehåll Halm
Bränsle	600 mg Cl/kg bränsle	1300 mg Cl/kg bränsle
Bottenaska	<3 mg Cl/kg bränsle	890 mg Cl/kg bränsle
Rökgaser panna -medelvärde	522 mg Cl/kg bränsle	165 mg Cl/kg bränsle
Rökgaser, brunn -utan vatteninsprutning	447 mg Cl/kg bränsle	15 mg Cl/kg bränsle
-med vatteninsprutning	168 mg Cl/kg bränsle *	18 mg Cl/kg bränsle

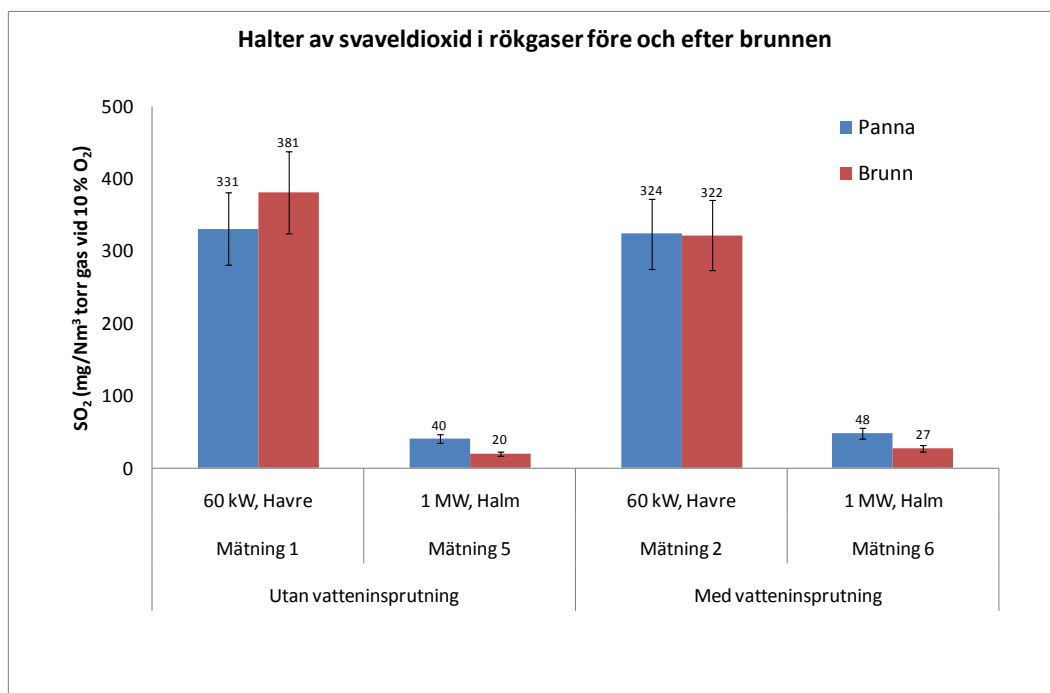
4.3.2 Avskiljning av svavel i rökgaserna

Resultaten uppvisar relativt små variationer mellan driftfallen på samma anläggning. Däremot var skillnaderna mellan anläggningarna stora. Figur 19 visar ett stapeldiagram över resultatet från mätningarna av svaveldioxid i rökgaserna på de båda anläggningarna.

På Gullbringa var svavelemissionen i rökgasen efter pannan omkring 331 respektive 324 mg/Nm³ (torr gas vid 10 % O₂). I rökgaserna efter rökgasbrunnen var svavelemissionerna 380 respektive 322 mg/Nm³. En ökning med 15 % respektive en minskning med 1 %. En ökning av svavel från mätpunkt A till mätpunkt B är dock inte möjlig. Vid mätning 2 gick provet vid brunnen förlorat och ett nytt togs därför dagen efter (2B-X).

På Ormebacken visade de båda mätningarna svaveldioxidhalter på 40 respektive 48 mg/Nm³ (torr gas vid 10 % O₂). Minskningen av svavelemissioner efter rökgasbrunnen var mellan 44 - 50 % och halterna vid brunnen hamnade på 20 respektive 27 mg/Nm³. Vattenbesprutning av rökgaserna gav inte någon förbättrad avskiljning av svavel.

Mycket svavel har stannat kvar i bottenaskan i halmpannan, se analysen av bottenaska i Tabell 10. Massbalansen av svavel visas i Tabell 9.



Figur 19: Uppmätta halter av svaveldioxid (SO_2) i rökgaserna efter panna respektive efter rökgasbrunn för två olika driftfall på rökgasbrunnarna, med respektive utan vattenbesprutning av rökgaserna.

Tabell 9: Svavelinnehållet i bränsle, aska och rökgaserna på de båda anläggningarna. Medan nästan allt svavel avgått i rökgaserna hos havrepannan har det mesta stannat kvar i bottenaskan hos halmpannan. *Provet togs vid ett senare tillfälle än motsvarande prov på pannan.

Analyserat	Svavelinnehåll Havre	Svavelinnehåll Halm
Bränsle, S	1200 mg S/kg bränsle	800 mg S/kg bränsle
Bottenaska, S	20 mg S/kg bränsle	750 mg S/kg bränsle
Rökgaserna panna, SO_2-medelvärde	1200 mg S/kg bränsle	160 mg S/kg bränsle
Rökgaserna brunn, SO_2-utan vatteninsprutning	1400 mg S/kg bränsle	70 mg S/kg bränsle
-med vatteninsprutning	1600 mg S/kg bränsle *	90 mg S/kg bränsle

4.4 Aska

Askanalyserna från spannmålspannan och halmpannan presenteras i Tabell 10. Tabellen presenterar även de inaskade bränsleproven. Medan halmaskans analys ligger i närheten av det inaskade bränsleprovet blir det vid samma jämförelse av askan på Ormebacken tydligt att halmpannan innehöll något annat än bara halmaska. Flera metaller såsom kadmium bly, krom och zink visar högre halter i bottenaskan än i det inaskade bränsleprovet. Inte minst kadmium överskred det inaskade provet med en faktor fyra. Det beror troligtvis på att det askprov som togs ur pannan var förorenat (pannan var inte ordentligt rengjord före den genomförda eldningen). Bottenaskan från halm uppvisar betydligt lägre halter av fosfor än spannmålet vilket följer bränsleanalysen. I bottenaskan från halmpannan återfinns stora mängder av klor och svavel. Producerad möjlig mängd

aska, utifrån bränsleanalyserna, är 1 ton havreaska vid 2000 timmar nyttjandetid av 60 kW pannan samt 2 ton halmaska vid 200 timmar nyttjandetid av 1 MW pannan.

Tabell 10: Kemisk sammansättning av askor från havre och halm i projektet.

	Havre Bottenaska	Havre Bränsleanalys Inaskat prov 550 °C	Halm Bottenaska*	Halm Bränsleanalys Inaskat prov 550 °C
Svavel, vikt-%	0,06		2,13	
Klor, vikt-%	<0,01		2,54	
Aluminium, Al, vikt-%	0,04	0,05	0,18	0,09
Kisel, Si, vikt-%	16,0	16,2	12,8	18,7
Järn, Fe, vikt-%	0,23	0,57	0,74	0,18
Titan, Ti, vikt-%	<0,03	<0,01	0,07	<0,01
Mangan, Mn, vikt-%	0,14	0,19	0,12	0,10
Magnesium, Mg, vikt-%	3,36	4,37	1,89	2,60
Kalcium, Ca, vikt-%	2,42	3,16	4,05	4,31
Barium, Ba, vikt-%	<0,05	<0,01	0,07	0,09
Natrium, Na, vikt-%	0,29	0,40	0,19	0,19
Kalium, K, vikt-%	10,1	15,2	15,0	22,1
Fosfor, P, vikt-%	8,82	13,3	1,22	1,44
Arsenik, As, mg/kg	<20	<20	<20	<20
Kadmium, Cd, mg/kg	<1	1,7	13	3
mg Cd/kg P	11	13	1065	208
Bly, Pb, mg/kg	6	21	68	20
Koppar, Cu, mg/kg	100	300	60	140
Krom, Cr, mg/kg	30	380	8	5
Nickel, Ni, mg/kg	50	67	5	5
Zink, Zn, mg/kg	400	1200	440	300
Molybden, Mo, mg/kg	20	65	<10	<10
Vanadin, V, mg/kg	<5	130	<5	<5
Kobolt, Co, mg/kg	<5	<5	5	<5

* Provet var troligen förorenat.

Anläggningen på Gullbringa producerar vid 2000 timmar nyttjandetid maximalt 88 kg stoft/år och halmpannan på Ormebacken kan vid nominell effekt och 200 timmar nyttjandetid maximalt producera 220 kg/år. De båda siffrorna är beräknade utifrån antagna stofthalter på 300 mg/Nm³ och 100 % stoftavskiljning i brunnen. Under mät försöken var dock stofthalterna från spannmåls pannan under 200 mg/Nm³ och stoftavskiljningen var som bäst 70 % (för rörflöden). Det innebär att de verkliga mängderna avskilt stoft är betydligt lägre.

4.5 Rökgaskondensat

Mängden rökgaskondensat som produceras på anläggningen på Gullbringa har beräknats utifrån en nyttjandetid på 2000 timmar/år och bränsleanalysen i Tabell 5. Vid nominell effekt producerar den då 5,4 kg rökgaskondensat per timma eller 11 ton/år. Det motsvarar 92 kg/MWh. Halmpannan beräknas utifrån en nyttjandetid på 200 timmar/år. Den

producerar då 64 kg kondensat per timma eller 13 ton/år. Det motsvarar 65 kg/MWh. Kondensatet måste således tömmas ur brunnen för att inte på kort tid fylla den. Brunnarna var dränerade på båda anläggningarna. Kondensatet är mycket surt och det uppmättes till pH 2,5.

Prov på rökgaskondensat togs på utsugna rökgaserna och inte på kondensatet i brunnen (eftersom ämnen ackumuleras i kondensatet i brunnen). Tabell 11 visar innehållet av metaller i rökgaskondensatet från havre- respektive halmförbränning på de båda anläggningarna, samt beräknade metallmängder i kondensatet per år vid en nyttjandetid på 2000 timmar per år för 60 KW pannan och 200 timmar per år för 1 MW pannan. Metallhalterna är genomgående lägre i kondensatet än de är i askan, räknat i mg per kg.

Tabell 11: Kolumn 2 och 3 visar metallinnehållet i mg/kg rökgaskondensat från förbränning av havre på Gullbringa respektive halm på Ornebacken. Kolumn 4 och 5 visar beräknad total metallmängd med 11 respektive 13 ton producerad mängd rökgaskondensat per år.

	Havre (mg/kg)	Halm (mg/kg)	Havre (kg/år)*	Halm (kg/år)**
Aluminium, Al	0,1624	0,0110	0,0018	0,0001
Barium, Ba	0,0083	0,0007	0,0001	0,0000
Kalcium, Ca	0,9595	0,0588	0,0104	0,0008
Kadmium, Cd	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kobolt, Co	0,0868	0,0084	0,0009	0,0001
Krom, Cr	1,3866	0,0816	0,0150	0,0011
Koppar, Cu	0,1172	0,0009	0,0013	0,0000
Järn, Fe	9,3102	0,8027	0,1005	0,0104
Mgnesium, Mg	0,2223	0,0091	0,0024	0,0001
Mangan, Mn	0,3950	0,0312	0,0043	0,0004
Molybden, Mo	0,0975	0,0044	0,0011	0,0001
Nickel, Ni	2,4232	0,1782	0,0262	0,0023
Bly, Pb	0,1063	0,0038	0,0011	0,0000
Titan, Ti	0,0093	0,0003	0,0001	0,0000
Vanadin, V	0,0059	0,0006	0,0001	0,0000
Zink, Zn	187,9479	16,5516	2,0298	0,2135
Natrium, Na	4,1702	0,0125	0,0450	0,0002
Kalium, K	0,2760	0,0164	0,0030	0,0002
Klorid	189,8170	47,1215	2,0500	0,6079
Nitrat	4,3612	1,1288	0,0471	0,0146
Sulfat	254,6123	37,8022	2,7498	0,4876

*Avser en nyttjandetid på 2000 timmar vid nominell effekt, 60 kW.

** Avser en nyttjandetid på 200 timmar vid nominell effekt, 1 MW.

5 Hantering av rökgaskondensat

I projektet ingick att undersöka och sammanställa de regler som kan tänkas omgärda rökgaskondensatet och hanteringen av detta. Analyser av rökgaskondensatet visar att metallhalterna är mindre än i askan (i viktprocent). Dock har kondensatet ett mycket lågt pH och måste neutraliseras för att inte skada natur och material. Här följer en sammanställning av de regler som omfattar kondensatet samt några möjliga sätt att hantera detta på:

- Återföring till åkermark
- Utsläpp till recipient
- Inkoppling på kommunalt avloppsreningsverk

I TPS rapport ”Hantering av rökgaskondensat från biobränsleanläggningar” (Strömberg, 2008) görs bland annat en sammanställning av ett tiotal ämnen som kan förekomma i vatten från förbränningsanläggningar och som klassas som prioriterade ämnen i EUs Vattendirektiv, vilket innebär att de därmed ska fasas ut från industrin och annan verksamhet. Åtminstone tre av dessa ämnen kan vara förekommande i rökgaskondensat från bioenergigrödor: kadmium, nickel och polyaromatiska kolväten. Samma rapport utvärderar även de vattenreningstekniker som är mer eller mindre förekommande på förbränningsanläggningar med rökgaskondensering. Inga analyser av polyaromatiska kolväten i kondensatet har utförts i detta projektet.

Lämpligaste tekniker för vattenrening på förbränningsanläggningar, enligt en rapport från Värmeforsk är sandfiltrering eller lamellseparering med pH justering. pH justeras vanligtvis med lut (NaOH), (Axby och Hansson, 2004). Eftersom många lantbruk ofta använder sig av kalk i sin verksamhet kan ett sådant material vara att föredra. Detta förutsätter dock att det går att tillämpa med funktionell och billig teknik.

På anläggningar med tillgång till en gödselbrunn finns möjligheten att släppa kondensatet dit och då är varken pH eller temperatur några problem.

5.1 Spridning på åkermark

En jämförelse av analyser på rökgaskondensatet och aska från de båda anläggningarna i projektet visar att koncentrationen av metaller per viktenhet är mindre i rökgaskondensatet än i askan. I brist på specifika rekommendationer gällande rökgaskondensat kan man titta på vad som finns för askor från samma bränslen.

I Hushållningssällskapets rapport ”Återföring av aska från bioenergigrödor odlade på åkermark” (Gruvæus och Marmolin, 2007) har författarna analyserat aska från spannmål och halm och konstaterat att den har högt växtnäringsinnehåll, hög fosfortillgänglighet och ett lågt innehåll av tungmetaller och PAH. I rapporten jämförs askan med mineralgödsel med 10 % fosfor (P), 10 % kalium (K) och 4 % magnesium (Mg). Halmaskan innehåller naturligt mindre fosfor men detta ses inte som något hinder för spridning på åkermark. Författarna konstaterar att fosforhalten är högre i flygaskan än i bottenaskan och att flygaskor från samma bränslen kan blandas i bottenaskan utan att kvaliteten försämras. I rapporten rekommenderas en tillförsel på maximalt 1 – 2 ton aska per hektar för bästa utnyttjande och för att undvika att få för höga växtnäringskoncentrationer.

Bränsleanalyserna i Tabell 5 visar små skillnader mellan havre och halm i askhalt och askbildande ämnen som kisel, kalium och kalcium. Halten fosfor är betydligt lägre i halmen. Enligt bränslehandboken (Strömberg, 2005) kan innehållet i halm variera kraftigt beroende på variationer i kvalitet och växtplats. Dessutom lakas vattenlösliga ämnen som klor och kalium relativt snabbt ur halm om det får ligga ute.

Anläggning på Ormebacken, som eldas med halm, producerar 35 gram aska per kg torrt bränsle vilket blir 1,9 ton aska per år vid en utnyttjandetid på 200 timmar på nominell effekt. För detta krävs en spridningsareal på 2 – 4 ha per år om man följer de rekommendationer som ges i Hushållningssällskapets rapport ”Återföring av aska från bioenergi grödor odlade på åkermark” av (Gruvaeus och Marmolin, 2007). Samma anläggning producerar ungefär 200 gram kondensat per kg bränsle (65 kg kondensat per producerad MWh) vilket med samma utnyttjandetid blir 13 ton kondensat per år. Om man Hushållningssällskapets rekommendationer för återföring av aska även tillämpas för kondensatet uppgår arealbehovet för en sådan anläggning till 13 - 26 ha per år. Samma beräkningar på Gullbringa ger vid en nyttjandetid på 2000 timmar ett arealbehov på 11 – 22 ha per år för att sprida kondensatet och 2,5 – 5 ha för att sprida askan.

Miljöbalkens 2 kap. Allmänna hänsynsregler, SFS 1998:808 (www.riksdagen.se), omfattar alla och om man vill sprida aska från spannmål och halm åkermark ligger ansvaret på verksamhetsutövaren att askan inte innehåller några farliga ämnen. Aska klassas som ett avfall enligt Avfallsförordning, SFS 2001:1063 (www.riksdagen.se), vilket innebär att man måste anmäla till kommunen innan man ska sprida den. Samma regler kan rimligtvis även tillämpas på rökgaskondensat då detta bland annat innehåller aska, om än i utspädd form.

Enligt Miljöbalken ska verksamhetsinnehavaren iakttaga de försiktighetsåtgärder som krävs, vilket kan vara svårt när det saknas rekommendationer om gränsvärden eller innehåll. Det finns dock reglerat hur gödsel och avloppsslam får användas i jordbruket och i avsaknad av särskilda rekommendationer för spridning av rökgaskondensat och aska på åkermark kan dessa regler och gränsvärden tillämpas. I Jordbruksverkets regler om miljöhänsyn i jordbruket avseende växtnäring, SJVFS 2004:64 och 2005:74 med tillhörande allmänna råd 2005:1, regleras tillförsel av näringsämnen (www.jordbruksverket.se). Över en femårsperiod är en maximal fosforgiva motsvarande 22 kg totalfosfor per hektar spridningsareal och år räknat som ett genomsnitt per år. Dessutom ställs krav på dokumentation på jordbruksföretag som tar emot organiska gödselmedel, krav på spridning och spridningstider samt särregler inom känsliga områden. I Naturvårdsverkets föreskrift om skydd för miljön, särskilt marken, när avloppsslam används i jordbruket, SNFS 1994:2, regleras tillförsel av både näringsämnen och metaller samt krav på markkartering (www.naturvardsverket.se). För näringsämnen hänvisas till SJVFS 2006:64. För metaller finns följande gränsvärden uppsatta, se Tabell 12 och Tabell 13:

Tabell 12 visar gränsvärdena för halten metaller i åkermark vid användning av avloppsslam. Tabell 13 anger gränsvärdena för tillförsel av metaller vid spridning av avloppsslam samt beräknade mängder metaller från rökgaskondensat (kolumn 4 och 5 i Tabell 11), maximalt producerad mängd stoft och askanalyser från respektive anläggning i Tabell 10 Tabell 5. De beräknade värdena ska dock tas med en nypa salt eftersom de utgår från endast en analys av respektive aska och rökgaskondensat. Med utgångspunkt från Tabell 13 bör metallhalter inte innebära några inskränkningar avseende spridningsgiva av gödsel, om rökgaskondensat utspäds i en så stor volym som en gödselbrunn ofta utgör, det vill säga $> 500 \text{ m}^3$.

Tabell 12: Gränsvärden för halten metaller i åkermark vid användning av avloppsslam enligt SNFS 1994:2

Metall	(mg/kg torrs substans i jord)
Bly	40
Kadmium	0,4
Koppar	40
Krom	60
Kvicksilver	0,3
Nickel	30
Zink	100

Tabell 13: Gränsvärden för tillförsel av metaller som gäller vid spridning av avloppsslam enligt SNFS 1994:2. Kolumn 3 och 4 visar producerade mängder metaller per år beräknat utifrån metallmängder i analyser av rökgaskondensat och aska i projektet.

Metall	Gränsvärde, medelvärde över 5 år (g/ha och år)	Gullbringa, havre (g/år)	Ormebacken, halm (g/år)
Bly	25	1,7	6,0
Kadmium	0,75	0,09	1,14
Koppar	300	10,1	5,3
Krom	40	17,6	1,8
Kvicksilver	1,5	-	-
Nickel	25	30,6	2,7
Zink	600	2065	252

5.2 Utsläpp till recipient

De krav som idag finns som gäller hanteringen av rökgaskondensat omfattar anläggningar på 20 MW eller mer. Där utnyttjas rökgaskondensering för att höja verkningsgraden och utvinna mer värme. Detta görs inte normalt sett inte på små anläggningar. Kraven på förbränningsanläggningar som omfattas i förordningen om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd (FMH) 1998:899, Miljöbalkens bilaga 3, omfattar rening av suspenderade ämnen i kondensatet, pH och temperatur, när inget annat än skogsbränsle eldas. Vanligen gäller neutralisering av pH till en nivå som är acceptabel för recipient, pH 6 – 10, och en temperatur < 40 °C samt rening av suspenderade ämnen till 10 mg/l (Länsstyrelsen, 2010). För anläggningar från 500 kW finns endast anmälningsplikt och för biobränsleeldade anläggningar <500 kW sakas specifika krav på hantering av rökgaskondensat.

5.3 Inkoppling på kommunalt avloppsreningsverk

I Svenskt Vattens publikation P95 ”Råd vid mottagande av avloppsvatten från industri och annan verksamhet” (Svenskt, 2009) står det att avloppsvatten från förbränningsanläggningar inte ska släppas till spillvattennätet (avloppsreningsverket) utan i första hand återanvändas i processen och i andra hand, efter effektiv rening, släppas direkt till recipient. Svenskt Vattens grundförslag till ABVA, som är respektive kommuns ”Allmänna bestämmelser för brukande av den allmänna vatten och avloppsanläggningen”, är att kommunens reningsverk inte är skyldiga att ta emot avloppsvatten som väsentligt avviker från innehållet i hushållsspillvatten. Även om definitionen på vad hushållsspillvatten innehåller kan variera mellan olika kommuners ABVA så ges här inget utrymme för rökgaskondensat. I fall där utsläpp till kommunalt

avloppsreningsverk ändå är det enda alternativet är det VA-huvudmannen (reningsverket) som, utifrån omfattande analyser bekostade av verksamhetsutövaren, avgör om kondensatet kan släppas till avloppsreningsverket.

På reningsverken avskiljs suspenderade ämnen, fosfor, kväve och lättnedbrytbart organiskt material. Förutom att rena avloppsvattnet producerar reningsverket ett slam i sina reningsprocesser. I takt med att kraven ökar på reningsverken att producera ett slam med högre kvalitet, för att det ska kunna användas som växtnäring, så ökar reningsverkens krav på anslutna verksamheter. Det kan bland annat innebära ökade krav på rening hos verksamheten innan vattnet får släppas till spillvattennätet eller helt enkelt bortkoppling.

6 Uppvärmning av mark

Eftersom man genom utspädning kyler rökgaserna till omkring 40 °C, för att inte riskera att smälta plaströren i marken, bedöms en eventuell markuppvärmning sakna betydelse för konstruktionens funktion.

7 Diskussion

På Gullbringa erhöles en bra reduktion av stoftemissioner när man eldade rörfilen men väldigt liten när man eldade havre. Detta kan ha att göra med att stoftpartiklarna som bildades vid havreförbränning var mycket mindre än de som bildades vid förbränning av rörfilen på grund av medryckning av bottenaska i rörfilensfallet. Stoftfiltren från mätningarna från havreeldning och rörfileldning skiljer sig också åt, se Figur 10 och Figur 11, vilket indikerar medryckning. Tidigare mätningar har visat på reduktion av stoft från havreeldning (Rönnbäck, Arkelöv et al., 2007), men i det projektet användes inte någon ejektorfläkt i konstruktionen och det är möjligt att utspädningen från ejektorfläkten bidragit till försämrade avskiljning på Gullbringa.

Ökningen av stoft för mätning 7 på Ormebacken tros bero på koaguleringsfenomen som påverkar stoftmätningar på utspädda rökgaser där ofullständig förbränning varit närvarande. Mätningarna på halmpannan visar att denna, under en förbränningsfas med normalt hög andel flyktiga kolväten, inte uppnådde fullständig förbränning. Samtidigt har forskning visat att tillgången på flyktiga kolväten kombinerat med utspädning av rökgaserna orsakar koagulering av kolvätena på tillgängliga partiklar med ökade stoftemissioner som följd (Johansson och Ryde, 2007). Stoftemissionerna från halmpannan var omkring 220 – 270 mg/Nm³ (t.g. vid 13 % CO₂), vilket är jämförbart med uppmätta stofthalter för halmpannor i Danmark, sammanställda av Danish Institute of Agricultural Sciences (Kristensen och Kristensen, 2004).

Här är det dock viktigt att påpeka att dessa fenomen inträffar i alla stoftutsläpp från anläggningar som lider av dålig förbränning, men att det då sker i närmiljön efter att utsläppen skett från skorstenen.

Det är viktigt att rökgasbrunnens konstruktion är utformad på ett korrekt sätt för att nå en hög avskiljning av stoft. Brunnen skall reducerar gashastigheten tillräckligt mycket för att stoftet ska falla till botten och inte följa med gasströmmen ut. Detta var möjligen ett problem på Ormebacken där brunnens diameter bara var 50 % större än rökrörets. Därmed sänktes rökgashastigheten från cirka 23 m/s till 10 m/s, vilket är högre hastighet än vad rökgaserna hade före ejektorfläkten. Det kan ha inneburit att mycket av stoftet följde med ut genom skorstenen istället för att falla till botten och att den eventuella avskiljning av stoft som ändå uppmättes lika gärna kan ha skett i rökröret före ejektorfläkten och inte i brunnen. För att sänka hastigheten tillräckligt krävs att brunnens

diameter är minst dubbelt så stor som rökrörets diameter. Rökröret bör dessutom anslutas till brunnen på ett sånt sätt att rökgaserna utsätts för en cyklonverkan i brunnen. Så var inte fallet på varken Gullbringa eller Ormebacken.

En reflektion som gjordes i studien var att fläktarna möjligen var överdimensionerade. De spädde rökgaserna två till tre gånger volymflödet och sänkte temperaturen från 160 °C till 40 °C (Gullbringa) respektive från 80 °C till 30 °C (Ormebacken). En konstruktion med plaströr kräver endast att rökgastemperaturen minst understiger rörens smälttemperatur vilket innebär omkring 80 °C. Mindre utspädningsluft på anläggningarna skulle innebära lägre gashastigheter och ökad uppehållstid i rökröret, vilket i sin tur ökar möjligheten att stoftpartiklarna kolliderar med vattendroppar och avskiljs. Dessutom innebär en lägre rökgashastighet att brunnsarean kan hållas nere och ändå reducera hastigheten mot noll för bättre avskiljning i brunnen. Dessutom minskar elbehovet hos ejektorfläkten. Optimeringsmetoder är bland annat att styra ejektorfläkten mot exempelvis gastemperaturen i rökröret så den späder minimalt utan att riskera att plaströret skadas.

Halmen innehåller dubbelt så mycket mer klor än havren. Att Gullbringa ändå uppvisar högre kloridemissionsnivåer än Ormebacken tros bero på förhållandet mellan svavel och klor i bränslet, se bränsleanalysen i Tabell 5. Havrens höga svavel/klor förhållande ($S/Cl = 2$) gör att klorer tvingas avgå i gasfas till skillnad från halmpannan ($S/Cl = 1$) där det istället bildar salter som återfinns i bottenaskan och i stoftet. Detta kan man se både i rökgasanalysen av sura komponenter och i analysen av bottenaskorna, se Tabell 8.

Den stora skillnaden i uppmätta SO_2 -halter mellan anläggningarna beror till viss del på att havre innehåller cirka 40 % mer svavel än halm, se bränsleanalysen i Tabell 5, men framför allt att svavlet på Ormebacken verkade stanna kvar i bottenaskan eller återfanns i stoftet i form av salter, se balansberäkningen i Tabell 9.

När det gäller vatteninsprutningen så skiljer sig de båda anläggningarna åt avseende placeringen och / eller utformningen av dysan, se kapitel 2. Det är även möjligt att detta påverkar effekten den har på avskiljningen av klor, svavel och stoft. På Ormebacken satt dysan placerad långt bak i rökgaskanalen, där gastemperaturen redan passerat en ackumulatortank och sänkts till under 100 °C (konstruktörens uppgift). På Gullbringa satt dysan placerad strax efter pannan men före ejektorfläktens anslutningsrör. Rökgastemperaturen var där omkring 160 °C. Vatteninsprutningens effekt på reduktionen av klor på Gullbringa är tydlig men det är mindre osäkert om den hade någon effekt på svavel eller stoft. På Ormebacken hade vatteninsprutningen ingen påtaglig förbättrande effekt utom möjligen på stoft, vilket dock också är osäkert. Dessutom skiljer sig även mängdförhållandet mellan vatten och rökgas åt på de båda anläggningarna. De vattenanslutningar som användes (0,5") gav möjligen likvärdiga vattenflöden, men rökgasflödet på Ormebacken var mycket högre än på Gullbringa, 0,7 Nm^3/s på halmpannan respektive 0,04 Nm^3/s på spannmålspannan. Vatteninsprutning kan möjligen även användas för att neutralisera pH i rökgaskondensatet.

Halten oförbränt i askan analyserades inte på havre och halm men däremot på rörfbensaska från Gullbringa som uppvisade höga halter på 19-27 % oförbränt (Paulrud och Hedman, 2010). Detta berodde dock bl.a. på att pannan inte var konstruerad för att elda rörfben och att man tvingades maximera askutmatningen för att kunna elda rörfben i pannan. Askan från havre kan anses innehålla betydligt lägre halter av oförbränt. De båda bränslena uppvisade likartade resultat i rökgasanalyserna, se Figur 14 och Figur 15.

Med anledning av att provet av bottenaska från Ormebacken befaras blivit förorenat av andra askor måste detta analysresultatet tas med en nypa salt. Det är således inte möjligt att dra några slutsatser enbart från denna analys.

Rökgaskondensatet är mycket surt men tros inte innehålla högre koncentrationer av metaller än vad aska från biobränslegrödor gör, detta kräver dock mer omfattande studier och analyser för en generell bedömning av rökgaskondensat från åkerbränslen.

Analyserade prover på rökgaskondensat har tagits från utsugna rökgaser efter pannan, som filtrerats innan de kylts ner och kondenserat. Dessa prover innehöll således ingen flygaska (stoft) vilket kondensatet naturligtvis gör i botten på rökgasbrunnen. Analysen bör därför kompletteras med motsvarande analyser av flygaska. I jämförelsen med gränsvärden för slamspridning i Tabell 13 har därför de beräknade metallmängderna från rökgaskondensaten i Tabell 11 kompletterats med värden från askanalyser i Tabell 10.

Rökgaskondensatets innehåll av polyaromatiska kolväten och suspenderad substans har inte studerats i detta projektet.

Eftersom kalk är vanligt förekommande på bl.a. lantbruk kan det vara av intresse att ta reda på om kalk kan ha en flockningsverkan på vissa metaller som sedan kan separeras ut i ett filter eller genom sedimentering.

8 Slutsatser

Resultaten från mätningarna visar att rökgasbrunnarna i projektet reducerar stoftemissioner från förbränning av biobränslen såsom rörflen och halm, men dock inte från havre. Hela 80 % av stoftet kunde avskiljas i rökgasbrunnen på 60 kW pannan vid eldning av rörflen och nästan 40 % av stoftet avskiljdes på den satsvis eldade halmpannan. Rökgasbrunnen fungerar dock inte vid ofullständig förbränningen av halm. Då uppstår koaguleringsfenomen som ger ökade stoftemissioner. Rökgasbrunnen på 60 kW pannan reducerade stoftemissionerna med knappt 10 % vid havreeldning.

Båda anläggningarna som ingick i mätkampanjen var utrustade med en ejektorfläkt som spädde ut rökgaserna med luft på dess väg mot brunnen. Denna utspädning fungerar väl för att sänka rökgastemperaturen så pass att man kunde använda plaströr i konstruktionen, vilket eliminerar korrosionsproblematiken och dessutom är ekonomiskt fördelaktigt vid installation.

Mätningarna kunde inte påvisa någon positiv inverkan från vatteninsprutningen på stoftavskiljningen.

Reduktionen av kloremissioner i gasfas, räknat som väteklorid, var mycket bra på båda anläggningarna. Det mesta, 75 till 90 % av allt klor i gasfas, kunde avskiljas i rökgasbrunnen. På Gullbringas havreeldade anläggning var påverkan från vatteninsprutningen av stor betydelse för reduktionen av kloremissioner medan den inte påverkade Ormebackens halmeldade anläggning nämnvärt.

Svavelemissionerna, räknat som svaveldioxid, kunde minskas med så mycket som 50 % på halpannan på Ormebacken. På Gullbringa uppmättes dock ingen reduktion av svavelemissionerna.

Hanteringen av rökgaskondensat är inte omgärdad med specifika regler som gäller småskaliga förbränningsanläggningar <20 MW. För anläggningar >500 kW gäller anmälningsplikt om utsläpp. För spridning av rökgaskondensat på åkermark gäller möjligen samma anmälningsplikt före spridning som gäller för aska.

- Metallhalterna i rökgaskondensatet är inte ett problem för spridning av rökgaskondensat på åkermark om man följer de gränsvärden som finns för spridning av avloppsslam. Kondensatets låga pH-värde (2,5) är ett problem som innebär att

det måste neutraliseras innan det sprids, för att inte försura marken. Möjligheten att släppa kondensatet till en gödselbrunn är ett intressant alternativ som innebär både en neutralisering av pH och temperatur genom utspädning. Det innebär samtidigt att man eventuellt måste kontakta kommunen innan man kan sprida gödsel från en sådan gödselbrunn.

- Det finns inte några specifika krav eller gränsvärden för utsläpp från småskaliga biobränsleeldade förbränningsanläggningar. Detta innebär att man i praktiken kan släppa ut kondensatet till recipient utan vidare behandling. Dock bör man åtminstone först neutralisera pH till 6-10 och sänka temperaturen till <40 °C för att förhindra risken för personskador och stora skador på naturen i närområdet. Neutralisering sker vanligtvis med lut men kan möjligen fungera med kalk. Anläggningar med rökgasbrunn bör kompletteras med billiga konstruktioner för neutralisering av rökgaskondensatet före utsläpp till recipient.
- Möjligheten att få släppa rökgaskondensatet till ett kommunalt avloppsreningsverk är liten.

9 Referenser

"Avfallsförordning." SFS 2001:1063 Retrieved December, 2010, from www.riksdagen.se.

"Föreskrifter om skydd för miljön, särskilt marken, när avloppsslam används i jordbruket." SNFS 1994:2, Retrieved December, 2010, from www.naturvardsverket.se.

"LBKs rekommendationer." Retrieved December, 2010, from www.brandskyddsforeningen.se.

"Miljöbalk (1998:808) 2 kap. Allmänna hänsynsregler." Miljöbalken, Retrieved December, 2010, from www.riksdagen.se.

"Statens jordbruksverks föreskrifter om miljöhänsyn i jordbruket vad avser växtnäring med tillhörande allmänna råd 2005:1." SJVFS 2004:64, 2005:74, Retrieved December, 2010, from www.jordbruksverket.se.

Axby, Fredrik, Hansson, Christina (2004). "Praktiska konsekvenser för förbränningsanläggningar vid införandet av vattendirektivet - Nya reningstekniker och förbättringsåtgärder vid utsläpp till vatten". Värmeforsk, Stockholm.

Gruvaeus, I., Marmolin, C. (2007). "Återföring av askor från bioenergigrödor odlade på åkermark". Rapport HS Skaraborg. Hushållningssällskapet Skaraborg, Skara.

Gulliksson, H., Fogelström, P., Zethraeus, B., Johansson, B.-Å. (2004). "Underlag för utformning, ansökan / anmälan, tillsyn och uppföljning av biobränslebaserade värmeanläggningar, 0,3 - 10 MW -- miljökrav och tekniska råd". Energikontor Sydost, Växjö.

Gustavsson, L., Nyquist, G. (2005). Värmeforsks Mäthandbok, Utgåva 3. Stockholm, Värmeforsk.

Johansson, Linda, Ryde, Daniel (2007). "Partikelmätning vid vedeldning - Jämförelse mellan provtagning i skorsten och spådtunnel". SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Kristensen, Erik Fløjgaard, Kristensen, Jens Kristian (2004). "Development and test of small-scale batch-fired straw boilers in Denmark." Biomass and Bioenergy **26**(6): 561-569.

Länsstyrelsen i Västra Götaland, 2010-11-10. (2010) Göteborg

Paulrud, S., Hedman, H. (2010). "Förutsättningar för användning av rörflensbriketter och hackad rörflen i mindre värmecentraler". SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Rönnbäck, Marie, Arkelöv, Olof, Johansson, Mathias, Persson, Henrik (2007). "Rökgasbrunn vid spannmålseldning". SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Strömberg, Birgitta (2005). Bränslehandboken. Stockholm, Värmeforsk Service AB.

Strömberg, Birgitta (2008). "Hantering av rökgaskondensat från biobränsleanläggningar". TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 2007/2008. TPS, Nyköping.

Svenskt Vatten (2009). "P95 Råd vid mottagande av avloppsvatten från industri och annan verksamhet". Svenskt Vatten, Stockholm.

Bilaga 1

**Analys av aska uppsamlat på glasfilter:
från mätning 3A och 4A av rökgaser (efter panna) på en 60 kW bioenergipanna
eldad med havre.**

Metod:

Översiktsanalys på material uppsamlat på glasfilter gjordes med röntgenfluorescens (XRF) enligt metod SP 4343. Metoden är en semikvantitativ analys av ytskiktet och är applicerbar på ca 70 av de 80 allmänt förekommande grundämnena i periodiska systemet och ger en ungefärlig uppskattning av halten. Viktiga grundämnen som inte mäts är bor, kol, kväve, syre och fluor. Inte heller kisel mäts eftersom provet är uppsamlat på glasfilter.

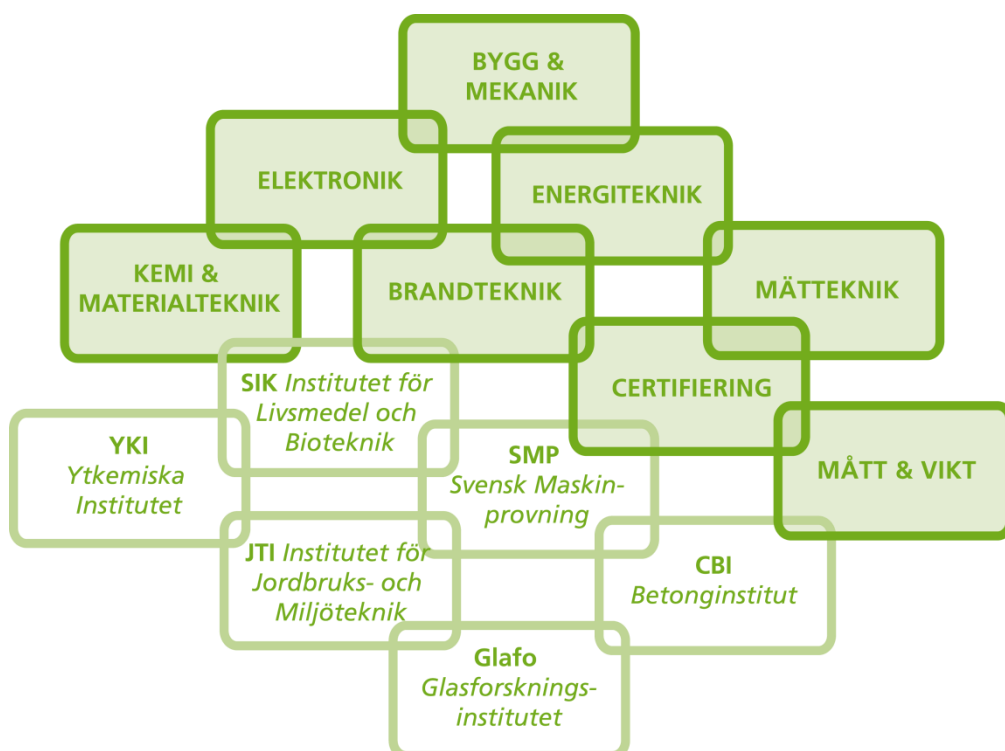
Resultat:

Översiktsanalys med XRF (endast halter > ca 1 % rapporteras).

Mätning:	3A	4A
Fosfor, P (vikt-%)	Ca. 20	Ca. 20
Kalium, K (vikt-%)	Ca. 25	Ca. 30
Klor, Cl (vikt-%)	Ca. 3	Ca. 4

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Vi arbetar med innovation och värdeskapande teknikutveckling. Genom att vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling har vi stor betydelse för näringslivets konkurrenskraft och hållbara utveckling. Vår forskning sker i nära samarbete med universitet och högskolor och bland våra cirka 9000 kunder finns allt från nytänkande småföretag till internationella koncerner.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Mer information om SP:s publikationer: www.sp.se/publ

Energiteknik

SP Rapport 2011:02

ISBN 987-91-86622-26-8

ISSN 0284-5172

