

**Rökgasbrunn vid
spannmålseldning**

**Flue gas well during
combustion of energy grain**

Marie Rönnbäck, Olof Arkelöv,
Mathias Johansson, Henrik Persson

SP Rapport 2007:02

Borås 2007

**SP Sveriges Tekniska
Forskningsinstitut**
SP Rapport 2007:02
ISBN 91-85533-66-1
ISSN 0284-5172
Borås 2007

**SP Technical Research Institute
of Sweden**
SP Report 2007:02

Postal address:
Box 857,
SE-501 15 BORÅS, Sweden
Telephone: +46 10 516 50 00
Telefax: +46 33 13 55 02
E-mail: info@sp.se

Förord

Denna rapport är resultatet av ett samarbete mellan SP Sveriges Provnings och forskningsinstitut, enheten för energiteknik, och Olof Arkelöv Åfab Älvdalens Fastbränsleteknik AB. Projektet har letts av Marie Rönnbäck på SP, där även Mathias Johansson och Henrik Persson har deltagit.

Projektet har skett i samarbete med Energigården, ett västsvenskt initiativ med Agroväst som huvudman, och har finansierats med LBU-medel från Jordbruksverket.

Vi vill framföra ett stort tack till Sören Eriksson på Valdemars Maskinstation i Vara som ställde sin anläggning till förfogande vid mätningarna.

Borås i januari 2007.

John Rune Nielsen

Enhetschef Energiteknik

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Sammanfattning

Intresset är stort för spannmålseldning, då spannmål är en inhemsk och förnyelsebar energigröda, är lätt att elda och har ett relativt lågt pris. Spannmål har, såsom liknande snabbväxande energigrödor, högre ask-, svavel- och klorhalter än rent stamträ. Vid spannmålseldning bildas svaveldioxid (SO_2), som i sin tur bildar svavelsyra (H_2SO_4), och väteklorid (HCl , saltsyra). Om fukten i rökgasen tillåts kondensera, är det bildade kondensatet mycket surt och aggressivt med höga halter av svavel och klor, och korrosionsskador kan snabbt uppstå, även på rostfritt material. Svaveldioxid och väteklorid bidrar även till försurning av miljön. Höga askhalter leder till utsläpp av stoft (flygaska), som kan orsaka hälsoproblem.

Detta projekt har syftat till att demonstrera och utvärdera möjligheten att undvika korrosionsproblem och att minimera utsläpp av sura ämnen och stoft vid eldning av spannmål genom att använda rökgasbrunn. En rökgasbrunn innebär att rökgaserna leds genom en rökgasledning i mark till en brunn. Genom att temperaturen på rökgasen sänks i det markförlagda röret, kommer fukten i rökgasen att kondensera och en del av de sura ämnena och stoftet följer då med och samlas upp i brunnen.

Projektet har bestått av dels en orienterande studie, dels av mätning och utvärdering av en befintlig rökgasbrunn. Den orienterande studien visar att en spannmålspanna kan kopplas till rökgasbrunn med relativt enkla modifieringar av de rökgasbrunnar som idag finns anslutna till oljeeldade torkar. Rätt materialval krävs dock för att undvika korrosionsskador. Som rör kan förslagsvis syraresistenta markavloppsrör användas, alternativt glaserade betongrör. Eventuellt kan betongrör användas i en första del, och övergå i plaströr när temperaturen fallit. En ejetektorfläkt minskar risk för korrosion i fläkten. Röret bör förses med anordning för rengöring pga spannmålseldningens höga stofthalter. En undertrycksgivare rekommenderas för att stänga pannan om draget försvinner, exempelvis vid strömavbrott eller om röret blockeras.

Kostnaden för att installera en rökgasbrunn uppskattas till 5000 – 10 000 kr plus gräv-kostnader och tryckvakt. Kostnaden beror på anläggningens storlek.

Det sura kondensatet bör hindras från att rinna ut i omgivande mark. För detta ändamål kan, vid mindre anläggningar, kalkstensmjöl läggas i brunnen botten, och det krävs enligt teoretiska beräkningar minst 75 kg/år, men ökad erfarenhet krävs för att rekommendationer av mängd ska kunna ges. Vid större anläggningar bildas stora mängder kondensat som måste infiltreras i mark eller omhändertas på annat sätt. Det finns idag inga regler eller rekommendationer från myndigheter om hur kondensatet ska tas om hand.

Ingen kalkinblandning i bränslet bör ske när man använder rökgasbrunn vid spannmålseldning, eftersom risken finns att stoftet i brunnen härdar.

Kondensationsvärmets i röret är betydande, och kan orsaka med tiden försämrade avskiljning.

Mätningar utfördes vid en befintlig rökgasbrunn, både efter pannan och efter brunnen. Resultaten visade en reduktion av klor med 67 %, av stoft med 42 % och av svavel med 40 %.

Som fortsatt arbete rekommenderas fortsatt utvärdering av större anläggningar, från 100 kW upp till några MW, avseende speciellt möjliga lösningar för ökad avskiljning genom indysning av vattendroppar i röret, riktlinjer för omhändertagande av kondensatet i större anläggningar via infiltration i mark och inverkan över tid av kondensationsvärmets på avskiljningsgraden.

Summary

The interest for cereal grain as a fuel is large today. It's a domestic fuel, renewable, easy to combust and relatively cheap. Energy grain has, as similar fast growing energy crops, higher contents of ash, sulphur and chlorine than virgin wood. During combustion of grain, sulphur dioxide (SO_2), which can form sulphuric acid (H_2SO_4), and hydrochloric acid (HCl) are formed. If the moisture in the flue gas is allowed to condense, it is very aggressive with, and corrosion damages may appear in a short time, also on stainless steel. Sulphur dioxide and hydrochloric acid also contribute to acidification of the environment. High content of ash leads to high content of dust (fly ash) in the flue gas, which may cause health problems.

The aim of this project has been to demonstrate and evaluate the possibility to avoid corrosion problems and to minimise emissions of acid species and dust during combustion of grain by the use of a flue gas well. A flue gas well means that the flue gases are lead through a flue gas channel in the ground to a well. The flue gas temperature is lowered, moisture is condensed and some of the acid species and the fly ash is also condensed and gathers in the well.

The project consisted of an informatory part and of measurements at an existing flue gas well. The informatory part shows that a boiler for energy grain can be connected to a flue gas well after relatively simple modification of the flue gas wells that today are connected to driers heated with oil burners. Right choice of materials is important to avoid corrosion. As flue gas channels, acid resistant plastic or glazed concrete channels may be used. An ejector fan may be used to avoid corrosion in the fan. The channels should be equipped with a cleaning device because of the high dust content in the flue gas. A pressure sensor is recommended to close the burner if the draught disappears, for example if the electricity disappears or if the channel is blocked.

The cost to install a flue gas well is estimated to 5000 – 10 000 SEK plus the cost for digging and for the pressure sensor. The cost depends of the size of the appliance.

The acid condensed moisture should be prevented from reaching the surrounding grounds. To this end, at smaller boilers, limestone can be put in the bottom of the well. For a smaller boiler, at least 75 kg/year is estimated theoretically, but more experience is needed to know how much limestone is needed. At larger boilers, large amounts of condensed moisture must be infiltrated in the ground or taken care of in some other way. Today, there exists today no recommendations or rules from the authorities of how this could be done.

When a flue gas well is used, limestone should not be added to the fuel to avoid the risk of hardening of the fly ash.

The latent heat from condensation is considerable, and may deteriorate the separation of acid species and fly ash in the flue gas channel and the well.

Measurements were performed at an existing flue gas well, both after the boiler and after the well. Results showed a reduction of chlorine with 67 %, of dust with 42 %, and of sulphur with 40 %.

Continued evaluations are recommended of larger appliances, from 100 kW to a few MW, especially concerning possible solutions for increased reduction through the use of nozzles providing water droplets, recommendations for taking care of the condensed moisture by infiltration and the effect of the latent heat on the long time efficiency of reduction.

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND.....	8
1.1	Projektets syfte.....	8
1.2	Genomförande	8
2	RÖKGASBRUNNAR.....	9
2.1	Rekommenderade val av material och övrig utrustning vid spannmålseldning	10
2.1.1	Fläkt.....	10
2.1.2	Säkerhetsutrustning	10
2.1.3	Material i rökgasledning.....	10
2.1.4	Brunn.....	11
2.1.5	Rengöring av rökgasledningen.....	11
2.2	Flygaska från spannmål.....	11
2.2.1	Inblandning av kalk i bränslet vid spannmålseldning.....	12
2.2.2	Återföring av flygaska till åkermark	12
2.3	Beräknad möjlig avskiljning av svavel och klor	12
2.3.1	Lämpliga sätt att slutomhänderta condensatet.....	14
2.4	Värmeförluster till mark.....	15
2.5	Krav från kommunen vid installation.....	15
3	KOSTNADSBERÄKNING.....	16
4	UTFÖRDA MÄTNINGAR	16
4.1	Resultat från mätningar	18
5	SLUTSATSER.....	20
6	FORTSATT ARBETE.....	20
7	REFERENSER	20

1 Bakgrund

Intresset för spannmålseldning ökar för närvarande, då spannmål som energigröda är ett inhemskt och förnyelsebart bränsle, lätt att elda och med ett relativt lågt pris. Spannmål, och liknande snabbväxande åkergrödor, skiljer sig dock från rent stamträ genom bl.a. betydligt högre halter av aska och av svavel, klor och kväve. Svavlet i spannmålet bildar vid förbränning svaveldioxid (SO_2), som i sin tur bildar svavelsyra (H_2SO_4), och klorer bildar väteklorid (HCl , saltsyra). Tidigare undersökningar har visat att om fukten i rökgasen tillåts kondensera, är det bildade kondensatet mycket surt och aggressivt med höga halter av svavel och klor. Korrosionsskador kan snabbt uppstå, även på rostfritt material (Rönnbäck och Arkelöv 2005; Rönnbäck m fl. 2005). Korrosionsskador har även rapporterats i närmiljön (plåttak, hängrännor osv), och dessa ämnen bidrar även till försurning av miljön (Olsson m fl. 2004). Höga askhalter leder till utsläpp av stoft (flygaska). Stoft i luften kan orsaka hälsoproblem. Från förbränningsanläggningar större än 500 kW finns rekommendationer för stoftutsläpp (Naturvårdsverket 1987). Vanliga gränsvärden är idag 100 mg/Nm³ eller lägre (Naturvårdsverket 2005), beroende på t.ex. läge i förhållande till bebyggelse

Spannmål eldas idag framförallt i småskalig teknik < 50 kW på lantgårdar. LRF förutser i sitt energiscenario (LRF 2005) en expansion av spannmålseldning från dagens ca 0,1 TWh till 1 TWh, varvid eldning kommer att ske även i pannor för större fastigheter och i närvärmecentraler, storleksordning något 100-tal kW till några MW. I den här storleksordningen är sekundär rening av rökgas dyrt att installera och enkla och billiga metoder för rening kan vara en förutsättning för att få ekonomin att gå ihop. Installation av en rökgasbrunn är en enkel och prisvärd teknik, där rökgaserna leds genom en rökgasledning i mark till en rökgasbrunn där delar av de sura ämnena kondenserar ut. Det är även troligt att flygaskan samtidigt till viss del faller ut.

1.1 Projektets syfte

Syftet är att demonstrera och utvärdera möjligheten att undvika korrosionsproblem och att minimera utsläpp av sura ämnen vid eldning av spannmål genom att använda rökgasbrunn. Genom att temperaturen på rökgasen sänks i det markförlagda röret, kommer fukten i rökgasen att kondensera och en del av de sura ämnena och stoftet följer då med och samlas upp i brunnen.

1.2 Genomförande

Projektet bestod dels av en orienterande studie, dels av mätning och utvärdering av en befintlig rökgasbrunn.

I den orienterande studien ingick:

- inventering av lämpliga material i rökgasledning och rökgasbrunn, och lämpligt val av fläkt,
- inventering av övrig utrustning exempelvis säkerhetsutrustning (automatisk avstängning av lufttillförsel vid elavbrott krävs),
- teoretisk beräkning av avskiljningsgrad av svavel och klor,
- teoretisk beräkning behov av neutraliserande ämne,
- inventering av lämpliga sätt för slutomhändertagande av kondensatet,
- kostnadsberäkning av installation av rökgasbrunn och kostnad för drift jämfört med konventionell skorsten,
- inventering av de speciella förutsättningar och krav som kan komma att gälla vid en närvärmecentral belägen i tätbebyggt område (krav från kommunen).

I mätstudien ingick:

- mätning av förbränningsparametrar (syre, koldioxid och kolmonoxid) efter pannan och efter rökgasbrunnen,
- mätning av svaveldioxid, väteklorid och pH i kondensat efter pannan och efter brunnen,
- mätning av stofthalten i rökgasen efter pannan och efter brunnen.

2 Rökgasbrunnar

Rökgasbrunnar har sedan länge använts istället för skorsten i t.ex. spannmålstorkar, där kostnaden för ett rökrör med en avslutande brunn blir lägre än för en skorsten som måste nå övernock på torken. Bränslet till torken är vanligen eldningsolja. Rökgasbrunnar finns beskrivna i den pärm som Lantbrukets Brandskyddskommitté, LBK, har författat. Pärmerna innehåller rekommendationer och övrigt informationsmaterial till grund för brandskyddet och den brandskadeförebyggande verksamheten i lantbruket (Brandskyddskommitté 2006).

Följande text och bilder är från LBKs pärm Flik 4:

4.8 Rökgasledning med rökgasbrunn

Rökgasledning med rökgasbrunn får anslutas till eldstad belägen i alla slags byggnader. Rökgaserna avleds via rökgasledning till rökgasbrunn med rökgasfläkt.

4.8.1 Rökgasfläkt

Rökgasfläkt kan antingen placeras så att rökgaserna passerar fläkten enligt figur 4.8.1 eller också ingå i en rökgasinjektor enligt figur 4.8.1. Vid oljeeldning skall anordning finnas för automatisk avstängning av oljetillförseln om rökgasfläkten stannar. Vid eldning med fasta bränslen skall det finnas antingen anordning för automatisk avstängning av såväl primär- som sekundärluft vid elavbrott eller reservelkraft för drivning av rökgasfläkt, varmluftsfläkt och cirkulationspump.

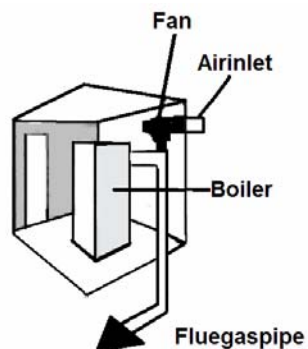


Fig 4.8.1 Rökgasledning och rökgasfläkt med injektor.

4.8.2 Rökgasledning

Rökgasledning i mark utförs av betongrör, s k muffrör. Rören centreras noga och fogarna tätas omsorgsfullt med cementbruk. Ledning läggs med rörens översida minst 0,5 m 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. Rökgasledning utförs rensbar och förses med rostfri renstråd samt med rensluckor där så erfordras.

4.8.3 Rökgasbrunn

Rökgasbrunn skall placeras på minst 15 m avstånd från byggnad eller lättantändligt utlag. Rökgasbrunn bör utföras enligt figur 4.8.3 varvid rökgasledningen ansluts till brun-

nen 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 m ovan mark och vara försedd med huv eller galler. Rökgasbrunn utförs renbar.

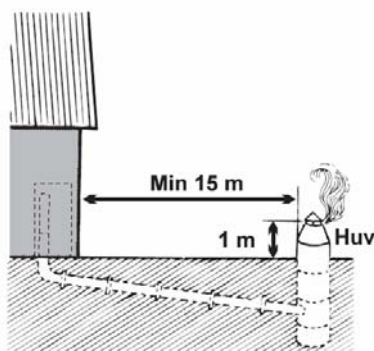


Fig 4.8.3 Rökgasbrunn

Slut på citat ur LBK.

2.1 Rekommenderade val av material och övrig utrustning vid spannmålseldning

Under projektet har vi kommit fram till följande rekommendationer för val av material och övrig utrustning då en spannmålspanna kopplas till en rökgasbrunn.

2.1.1 Fläkt

För att undvika framtida eventuella korrosionsskador på rökgasfläkten rekommenderas (Micke 2006) en så kallad ejektorfläkt. En ejektorfläkt sitter inte i rökgasledningen och kommer därför aldrig i kontakt med rökgaserna (se figur i utdraget från LBK). Fläktens motor måste anpassas till styrsystemet i aktuell pannkombination.

2.1.2 Säkerhetsutrustning

För att säkerställa att pannan slocknar om skorstensdraget av någon anledning försvinner, t.ex. vid elavbrott, rekommenderas montering av en undertrycksgivare i systemet. Givaren stänger luft- och bränsletillförseln till pannan. Genom att använda en undertrycksgivare garanteras att pannan släcks då draget försvinner, även om fläkten går. Draget kan försvinna om ledningen eller brunnen blockeras.

Ett alternativ är att utrusta fläkten med en omformare och ett bilbatteri som säkerställer att fläkten fungerar även vid strömbortfall. För mindre pannor räcker det med 30-35 W till fläkten. Den här lösningen används idag för cirkulationspumpar (Micke 2006).

2.1.3 Material i rökgasledning

Kondensatet är mycket surt, ett pH på mellan 1 och 2 är förväntat från tidigare erfarenheter (Olsson, Arkelöv och Söderqvist 2004; Rönnbäck, Persson och Segerdahl 2005). Även om spannmålssorter med lägre klor- och svavelhalter troligen kommer att tas fram, bör anläggningen dimensioneras för ett "värsta fall". LBK rekommenderar idag betongrör, vilket knappast är ett bra val vid så sura förhållanden. Det material vi helst vill använda i rökgasledningen är ett syraresistent material av typen vanliga markavloppsrör. Dessa skall enligt tillverkaren Uponor klara av de syror som kan uppkomma. LBK föreskriver betongrör med tanke på hållbarhet. Med bäring på korrosion är dock plaströr bättre än betongrör.

Ett alternativ till plaströr skulle kunna vara glaserade betongrör. Dessa tillverkas dock inte längre i Sverige, utan importereras från England. Priset för dessa rör är relativt högt (ca 300 kr/m).

Om man bedömer att plaströren utgör en brandrisk, kan betongrör användas den första sträckan av rökgasledningen, där temperaturen på rökgaserna fortfarande är hög. Lämpligt kan vara att använda betongrör fram till rensbrunnen, och plaströr därefter.

2.1.4 Brunn

Brunnen som rökgaserna leds in i kan vara av betong. Då det kondensat som rinner ned i brunnen neutraliseras, lämpligen med kalk av något slag, kommer betongen inte att skadas av lågt pH. Vi mindre anläggningar byggs brunnen tät. Erfarenheten från mindre anläggningar är att kondensatet avdunstar efter hand så brunnen fylls aldrig. Den bör förläggas med botten på frostfritt djup, och enligt LBKs rekommendationer ha en höjd av minst 1 m över mark. Brunnen täcks till skydd mot regn t.ex. med ett betonglock som läggs på distanser så att röken kommer ut. Ett tungt betonglock förhindrar nyfikna barn från att kunna trilla ned i brunnen. Problem med snö vid brunnen har rapporterats av användare. Brunnen bör därför ha en höjd över mark som säkerställer att den inte kan snöa igen.

Vid större anläggningar är det troligt att kondensatet måste tas om hand genom infiltration i mark eller dylikt, eftersom kondensatmängderna kan bli ganska stora, se kapitel nedan.

2.1.5 Rengöring av rökgasledningen

Rökgasledningen bör rengöras regelbundet från flygaska och sot. Detta kan t.ex. genomföras genom att en vajer monteras mellan rensluckan och brunnen. En sotviska kan då fästas i vajern och dras genom ledningen. Vajer måste utföras i ett rostfritt material eller dylikt som tål förhållandena i ledningen. Det måste finnas tillräcklig plats i rökgasbrunnen för att ta ut sotviskan. Det bör även finnas plats i rökgasbrunnen för att inspektera röret. Locket måste enkelt kunna lyftas av.

Erfarenhet visar att det sot och flygaska som samlas i ledningen inte härdar, utan är fluffigt och mjukt och lätt att få ut med hjälp av en sotviska.

2.2 Flygaska från spannmål

Spannmål har upp till 10 gånger högre askhalt än rena träbränslen. Uppmätta stoftemissioner ligger normalt kring 100 – 300 mg/Nm³ (Rönnbäck och Arkelöv 2005). En del av flygaskan kommer att hamna i rökröret genom att stoftpartiklar fångas upp av kondensdroppar och av rökrörets väggar.

Många biobränsle-askor innehåller stor andel kalcium som härdar vid tillsättning av vatten. Exempelvis domineras flygaska från träbränslen av kisel och kalcium, ca 17 % vardera räknat på obrännbara ämnen. pH-värdet i träaskor ligger vanligtvis mellan 11 och 13, det högre värdet gäller för bottenaskor och det lägre för flygaskor. Då en aska innehåller kalcium har den en tendens att härda, dvs att bli hård. Härdning av askor kan ske snabbt, eller långsamt under flera veckor, beroende bl.a. på temperaturen och på närvaro av aluminium och alkali. De reaktioner som sker när en färsk aska blandas med vatten beror på vilka komponenter den innehåller och vilka oxidtillstånd dessa befinner sig i.

Flygaska från spannmål domineras dock av fosfor. I (Rönnbäck, Persson och Segerdahl 2005) ges analys av botten- och flygaska vid förbränning av havre i en villabrännare. Analysen visar att i flygaskan utgör fosfor hela 87 vikt-% (räknat på obrännbara ämnen),

medan kalcium endast utgör 0,3 %. Uppmätt pH i kondensat ligger kring 2. Det låga pH som blir i blandningen kondensat/flygaska kommer att leda till att kalciumhydroxider och –karbonater löser sig, och ingen härdning sker (Steenari 2006). Det låga pH som kondensatet har kan leda till att tungmetaller faller ut. Man bör ta hand om dessa på ett genomtänkt sätt så att de inte når mark och vatten. Ett sätt kanske är att tillsätta kalciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (släckt kalk), eller kalciumoxid CaO (bränd kalk). Ingen av de användare vi talat med under projektets gång har haft problem med härdning av flygaska i rökgasledningen.

2.2.1 Inblandning av kalk i bränslet vid spannmålseldning

Vid förbränning av andra sädeslag än havre används ofta kalkinblandning i bränslet för att höja askans smälttemperatur och därmed undvika sintring i brännaren. Inblandningen sker oftast med upp till 2 % kalk, och vanligen används kalkstensmjöl (kalciumkarbonat CaCO_3), även om både bränd kalk, CaO , och släckt kalk, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kan användas. Kalkstensmjöl är billigt och lätt tillgängligt, exempelvis som foderkrita. Om 2 % kalciumkarbonat blandas i bränslet, motsvaras detta av 1,2 % kalcium i torrsubstansen (beräknad vid fukthalten 14 %). Detta kan jämföras med kisel och fosfor, som utgör endast ca 0,4 % av torrsubstansen. Kalcium vill gärna stanna i bottenaskan, men en del kommer att följa med flygaskan. Denna enkla beräkning visar att *kalk inte bör tillsättas bränslet* innan det har utvärderats om flygaskan härdar när kalk tillsätts.

2.2.2 Återföring av flygaska till åkermark

Aska från spannmålseldning innehåller fosfor och kalium som är värdefulla näringsämnen. Jämfört med aska från vedbränsle är halterna av olika tungmetaller lägre i spannmålsaska. Dock bör man se upp med givans storlek vid återföring pga dess innehåll av zink och kadmium. Det finns idag inga generella rekommendationer för återföring till åkermark av flygaska från spannmålseldning. En fingervisning kan ges av de rekommendationer som KRAV ger för högsta halter vid återföring till åker (KRAV 2006).

I Tabell 1 visas i kolumn 2 högsta giva i g/ha och år (medelvärde över 5 år) för zink, koppar, kadmium, krom, nickel och bly. I kolumn 3 visas högsta tillförsel av flygaska. Beräkningen är baserad på analysen i askan gjord i (Rönnbäck, Persson och Segerdahl 2005). En 100 kW panna (tillförd effekt) ger ca 300 mg/Nm³ stoft. Om allt stoft faller ut, och pannan går för fullt under 5000 timmar/år, blir stoftmängden ca 300 kg/år. Man ser alltså att det pga av kadmiumhalten i askan behövs drygt två hektar för att sprida 300 kg aska. Noteras bör att mängden stoft i rökgasröret lär bli lägre än 300 kg/år.

Observera att värdena i ovanstående beräkning är baserade på en enda analys, och ska endast ses som en fingervisning!

Tabell 1. Begränsningar av tillförd askmängd enligt Kravs regler, och möjlig tillförsel av flygaska baserat på analys av stoft i (Rönnbäck, Persson och Segerdahl 2005). Observera att värdena i högra kolumnen är baserade på en enda analys, och ska endast ses som en fingervisning!

Ämne	Högsta giva, medelvärde över 5 år (g/ha och år)	Möjlig tillförsel av flygaska, (kg aska/ha och år)
zink, Zn	700	221
koppar, Cu	500	11 257
kadmium, Cd	0,75	169
krom, Cr	50	14 327
nickel Ni	50	16 946
bly, Pb	50	29 185

2.3 Beräknad möjlig avskiljning av svavel och klor

En beräkning har genomförts för att uppskatta vilka mängder av kondensat som bildas och rinner ned i brunnen, och vilka mängder av svaveldioxid (SO₂) och väteklorid (HCl, saltsyra) som bildas vid förbränning och återfinns i rökgaserna. Även den värme som avges vid kondenseringen har beräknats. Beräkningarna visar dels mängder per tidsenhet, dels totala mängder efter 5000 h. Resultaten i Tabell 2 har beräknats med följande förutsättningar:

- **Svavelhalt i bränsle:** 0,25 vikt-% i torrsubstans (typiska värden för havre 0 – 0,5 % i ts (Strömberg 2005)).
- **Klorhalt i bränsle:** 0,1 vikt-% i ts (typiska värden för havre är 0,02 – 0,23 % i ts (Strömberg 2005)).
- Vid förbränningen antas **allt svavel resp. klor omvandlas till SO₂ resp. HCl** vid förbränning. Tidigare mätningar har visat att så sker i praktiken (Rönnbäck och Arkelöv 2005).
- **Bränslets fukthalt:** 14 vikt-% (spannmålet torkas till 14 % för att kunna lagras).
- **Nyttiggjord effekt:** 5 resp. 100 kW, kontinuerligt.
- **Tillfört bränsle** har beräknas med en total verkningsgrad på 80 %.
- **Fukthalten i rökgaserna efter pannan** baseras på fukt i bränslet, förbränning av väte i bränslet till vatten och fukt i tillförd förbränningsluft.
- **Fukthalten i rökgaserna** efter brunnen har beräknats vid temperaturen 10°C och trycket 1 atmosfär.
- **Kondensationsvärmets** är beräknat med antagandet att värmen avges jämnt över ett 20 m långt rörkrör
- **Värme från temperatursänkning av rökgaser** är beräknat på en temperatursänkning från 180°C till 10°C

En uppskattning av maximala mängder bildad flygaska (stoft) och av rökgasens hastighet och ryckfallet i röret har genomförts. Beräkningarna visar dels mängder per tidsenhet, dels totala mängder efter 5000 h. Resultaten i Tabell 3 har beräknats med följande förutsättningar:

- **Bildad stoftmängd:** 300 mg/Nm³ (typiska värden är 100-300 mg/Nm³).
- **Gashastighet och tryckfall** har beräknats förutsatt att inget extra flöde har tillförts via ejektorfläkten. Röret har antagits vara skrovligt. Beräkningen ger en fingervisning om minsta krav vid dimensionering av fläkt.

Tabell 2. Resultat från beräkningar vid 5 kW resp. 100 kW spannmålseldning. Förutsättningar för beräkningarna finns i texten ovan tabell.

	5 kW	100 kW
Rökgasflöde (Nm ³ /h)	12	233
Tillfört bränsle (kg/h)	1,4	27
Vatten (H ₂ O) i rökgas efter panna:		
(vol-%)	10,2	10,2
(kg/Nm ³)	0,08	0,08
(kg/h)	0,95	19,1
Vatten (H ₂ O) i rökgas efter brunnen:		
(vol-%)	1,2	1,2
(kg/Nm ³)	0,01	0,01
(kg/h)	0,11	2,3
Kondenserad vattenmängd:		
(kg/Nm ³)	0,07	0,07
(kg/h)	0,84	16,8
efter 5000 h (kg)	4 200	84 1000
Värmeavgivning vid 20 m rör:		
Kondensationsvärme (W/m ²)	112	600
Värme från temp. sänkning i rökgas (W/m ²)	0,05	0,3
Maximalt bildat SO ₂ :		
(mg/Nm ³)	500	500
(g/h)	6	117
efter 5000 h (kg)	29	583
Maximalt bildat HCl:		
(mg/Nm ³)	103	103
(g/h)	1	24
efter 5000 h (kg)	6	120

Tabell 3. Resultat från beräkningar vid 5 kW resp. 100 kW spannmålseldning. Förutsättningar för beräkningarna finns i texten ovan tabell.

Bildade stoftmängder:		
(mg/Nm ³)	300	300
(g/h)	3,5	70
(kg/vecka)	0,6	12
efter 5000 h (kg)	17	350
Rördiameter (mm)	80	300
Gashastighet vid 0 C, 1 atm (m/s)	0,64	0,92
Tryckfall per m (Pa/m)	0,14	0,05

Beräknade mängder kondensat i Tabell 2 bör överensstämma ganska väl med i verkligheten bildade kondensatmängder med det antagna bränslet. Om temperaturen vid utloppet i brunnen är lägre än 10°C (i genomsnitt under 5000 h) kommer kondensatmängden att bli större, och om temperaturen är högre blir kondensatmängden mindre. Om bränslets fukthalt är högre blir kondensatmängderna också högre.

Beräknade mängder SO₂ och HCl är maximalt *producerade* mängder med ett bränsle med de antagna ingående halterna. Hur mycket av detta *som avskiljs* i rökgasbrunnen ger de mätningar som är utförda i projektet en fingervisning om.

Beräknad mängd stoft är baserat på en stofthalt på 300 mg/Nm³ i rökgaserna, vilket är ett något högt värde. Hur mycket av bildat stoft som avskiljs i rökgasbrunnen ger de mätningar som är utförda i projektet en fingervisning om.

2.3.1 Lämpliga sätt att slutomhänderta kondensatet

För neutralisering av kondensatet i brunnen används lämpligen kalkstensmjöl (kalciumkarbonat, CaCO₃). Kalkstensmjöl är ofarligt att hantera, finns tillgängligt i handeln och är billigare än bränd eller släckt kalk. Kalkstensmjöl kan hällas i botten av rökgasbrunnen, och bytas ut med lämpliga intervall. Resultaten från mätstudien i detta projekt visade en att mellan 40 – 60 % av svavel och klor i rökgaserna fälldes ut med kondensatet. Samtidigt är det sannolikt att det behövs ett överskott av kalk, för att få en god absorption. En uppskattning ”mellan tummen och pekfingeret” av vilken kalkmängd som behövs, baserad på antagandet att allt klor och allt svavel kondenserar och att allt kalk förbrukas ser då ut så här:

- För en stökiometrisk blandning krävs 3,13 kg kalciumkarbonat per kg svavel och 2,90 kg per kg klor. Behovet av kalk blir då, om halterna av svavel respektive klor i bränslet är 0,25 respektive 0,1 viktprocent av torrt bränsle (typiska värden använda i Tabell 2), och pannan är på 5 resp. 100 kW och går vid konstant effekt, att 0,014 resp. 0,28 kg kalciumkarbonat tillsätts per timme. Per vecka blir det då 2,35 resp. 47 kg kalkstensmjöl. Efter 5000 h krävs 70 kg resp. 1400 kg kalciumkarbonat.
- De flesta spannmålspannor som finns installerade idag är ganska små och försörjer ett boningshus och ibland även andra lokaler. Räkneexemplet med 5 kW under 5000 h ger 25 000 kWh, vilket motsvarar värmebehovet hos ett äldre (ej litet) hus.

Teoretiskt bör det alltså för en mindre spannmålspanna räcka att tömma minst 70 kg kalkstensmjöl i botten av brunnen varje år, medan det vid en närvärmecentral som går kontinuerligt på 100 kW måste tillföras 47 kg/vecka. Vilka mängder som i praktiken bör rekommenderas måste utvärderas, erfarenheten från området är ännu så länge för liten.

2.4 Värmeförluster till mark

Om varm rökgas strömmar genom rökgasröret under en längre tid, kommer marken runt röret att bli uppvärmd, och kylningen av rökgasen kommer då att försämrats. Den fukt som kondenserar kommer också att kontinuerligt avge värme, se reäknexemplet i Tabell 2. Temperaturen i marken och dess värmeledningsförmåga varierar beroende på hur djupt rökgasröret läggs, och typen av mark (sand, bergmaterial, vattenflöde i mark etc.) ju högre effekt pannan har, ju större är risken att marken ska bli uppvärmd till den grad, att dess funktion avsevärt försämrats.

Ett sätt att undvika uppvärmning av marken, är att tillföra så mycket luft i ejektorfläkten, att rökgasens temperatur sjunker redan vid inloppet till rökgasledningen. Detta påverkar dock inte kondensationsvärmets, som utgör det stora värmebidraget. Ytterligare ett sätt att hålla nere temperaturen i röret skulle kunna vara att injektera vattendroppar i röret med en dysa. Ett sådant förfarande skulle även bidra till avskiljning av sura gaser och av stoft.

2.5 Krav från kommunen vid installation

Inga speciella krav på installation eller skötsel av anläggningen har framkommit i nuläget. Det är dock troligt att kommunerna i framtiden kommer att ha synpunkter på installation av större rökgasbrunnar m.a.p. omhändertagande av kondensat från dessa.

De rökgasbrunnar som är installerade idag (som vi känner till) är kopplade till en panna i storleksordning villapanna. Den brunn som samlar upp kondensatet är tät, och kondensa-

tet avdunstar efterhand. Kondensatet innehåller sulfat och klorid, som kan neutraliseras genom att krossad kalksten tillförs på botten av brunnen. Kondensatet innehåller även fosfor och metaller från det stoft som faller ut. När kalkmängderna på botten av brunnen efter ett antal år blir stora kan de lyftas ut och spridas över åkerarealer. För att undvika att koncentrationen av vissa metaller blir högre än vad som är lämpligt för återföring till åkermark, bör analyser genomföras och riktlinjer tas fram för spridning.

När rökgasbrunnar ansluts till större pannor, blir kondensatmängderna större, och det är troligt att avdunstningen inte längre blir tillräcklig, utan kondensatet måste tas om hand på något sätt. Detta kan ske t.ex. genom avledning till avloppsvatten eller via infiltration i mark eller i sandbädd. För att få släppa ut något i kommunalt avloppsnät ställer kommuner krav på innehållet. Det finns inga nationella normer, utan kraven varierar med hur kommunens avloppsreningsverk är utformat och dimensionerat. I t.ex. Borås finns vad man kallar varningsvärden för ett antal ämnen som inte får överskridas. Både halten och den utsläppta mängden har betydelse för hur utsläppet bedöms. Infiltration i mark används framförallt för BDT-vatten (bad, dusch, tvätt) från enskilda fastigheter, och dessa utformas i första hand för att omhänderta fosfor och organiska ämnen. Vid rening av kondensat från rökgasreningsanläggningar används ibland infiltration i sandbädd tillsammans med pH-neutralisering

För att ta fram lämpliga rekommendationer för hur kondensat från större rökgasbrunnar ska omhändertas, krävs erfarenhet av hur stora mängderna blir och vilka metallhalter som kan nås. Vid omhändertagande av kondensat från rökgaskondensering räcker oftast neutralisering och sandfiltrering. Är föroreningshalterna högre kan fällning, flockning, lamellseparering, sandfiltrering och kolfiltrering krävas. Erfarenhet från rökgaskondenseringsanläggningar bör utnyttjas och strategier lämpliga för omhändertagande av kondensat från en rökgasbrunn bör utarbetas.

3 Kostnadsberäkning

Komponenter i installationen:

- rökgasrör från panna till anslutning av markrör (metall),
- fläkt,
- markrör (plast),
- tryckvakt,
- vajer för rengöring av rör,
- brunn,
- brunnslock och
- grävning och nedläggning av markrör och brunn.

Befintliga installationer på Gotland har kostat ca 5000 kr exkl. moms. I denna kostnad ingår inte grävkostnader och ej heller kostnader för tryckvakt. Effekt på här installerade pannor är ca 25 kW.

För en rökgasbrunn i utförande enligt ovan och med en installerad effekt på ca 100 kW torde kostnaden totalt inte överstiga 10 000:- exkl. moms.

4 Utförda mätningar

Mätning utfördes vid en anläggning installerad vid Valdemars Maskinstation i Vara. Spannmål eldas i en Säätotuli Stoker kopplad till en Tulimax på 80 kW, en finsk panna. Rökgaserna från pannan leds via en rökgasfläkt ned i marken, se Figur 1, och via nio-tums betongrör till en brunn, bestående av ett stående cementrör med en inre diameter på 60 cm, se Figur 2. Brunnen var placerad på en åker och nåddes via en liten körväg, se Figur 3, och rökgasröret var ca 25 m långt.

Mätningen genomfördes under stabila förbränningsförhållanden samtidigt vid pannan och vid brunnen vid två tillfällen under en timme vardera. Vid första tillfället mättes stoft och vid andra tillfället mättes svaveldioxid, väteklorid och pH. Efter pannan mättes även syre (O_2), koldioxid (CO_2) och kolmonoxid (CO) kontinuerligt. Efter brunnen mättes syre kontinuerligt. Stoftprov togs som uppsamlingsprov på filter. Rökgaser absorberades även i speciella flaskor för senare våtkemisk analys av SO_2 och HCl . pH-värdet mättes i uppsamlat kondensat. Temperaturen i rökgasen mättes med termoelement. Mätinstrument med inventarienummer och mätosäkerhet finns i Tabell 4.

I pannrummet togs rökgaser ut med en sond mellan panna och rökgasfläkt. Detta var inte en idealisk provtagningspunkt eftersom en sådan egentligen kräver en viss längd på raksträcka innan provpunkt, men det var enda möjliga punkten.

För att fånga upp rökgasen efter brunnen och tillse att inte luft sögs in och blandades med rökgas, trädde ett spirorör på brunnen utlopp, och sonden stacks genom ett hål i spiroröret, se Figur 4. Det gick inte att samla kondensat från rökgaserna i brunnen, eftersom temperaturen i rökgasen i brunnen var samma som i omgivningen.

Tabell 4. Mätutrustning. Beteckningar hänvisar till SP-Energitekniks kvalitetssystem.

Instrument	Beteckning
Termoelement typ K enligt	ETf-QD Db 2
Stoftprovtagningssystem STL-Medi	Inv.nr. 200 399
Stoftprovtagningssystem STL-Combi	Inv.nr. 202 743
CO/CO_2 -analysator typ Binos	Inv.nr. 202 045
O_2 -analysator typ M&C Modell PMA 10	Inv.nr. 202 589
O_2 -analysator typ M&C Modell PMA 10	Inv.nr. 202 342
Gasur med pump för våtkemisk analys	Inv.nr. 200 619
Mätvärde	Mätosäkerhet (relativ)
Rökgastemperatur	$\pm 3^\circ C$
Stofthalt	$< 10 \%$ vid en filterrökning på ≥ 20 mg
CO_2 -halt	$\pm 0,3 \%$ CO_2
CO -halt	± 450 ppm CO
O_2 -halt	$\pm 0,46 \%$ O_2
SO_2 -halt vid våtkemisk analys	$\pm 20 \%$ SO_2
HCl -halt vid våtkemisk analys	$\pm 10 \%$ HCl



Figur 1. Bilden visar rökgaskanalens utlopp ur pannan via en rökgasfläkt och anslutningen till markkanalen.



Figur 2. Det vänstra röret visar den idag använda rökgasbrunnen.



Figur 3. Bilden visar bilen med mätutrustning vid brunnen.



Figur 4. Bilden visar mätsonden monterad i rökgasrörets mynning.

4.1 Resultat från mätningar

Resultat från mätningarna finns samlade i Tabell 5-6. Pannan brann bra, med låga utsläpp av kolmonoxid. Det använda bränslet analyserades, och halten av svavel var 0,22 vikt-% i ts, och av klor 0,4 vikt-% i ts. Askhalten var 3,5 vikt-% i ts och fukthalten 16 vikt-% i inlämnat prov. Uppmätta halter av svaveldioxid och väteklorid visar att i princip allt svavel och allt klor omvandlas till SO_2 resp. HCl (jämför med räkneexemplet i Tabell 2). Uppmätt stofthalt efter panna var något hög men inte oväntad.

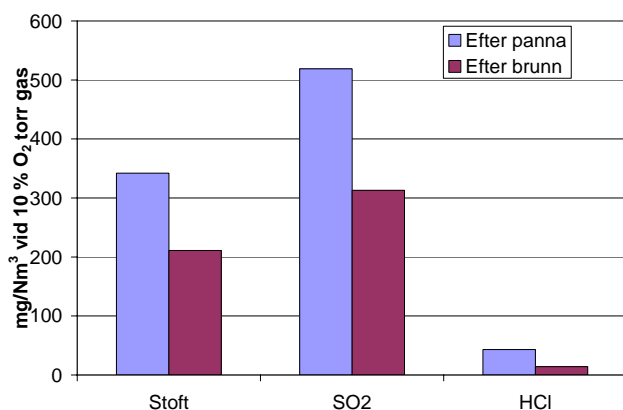
Resultaten visar att reduktionen av svavel var 40 %, av klor var 67 % och av stoft var 42 %. pH i kondensatet efter pannan var 2,09. Figur 5 visar utsläppen efter panna och efter brunn i mg/Nm^3 .

Tabell 5. Mätresultat stoft.

Vid pannan	
O ₂ (%)	11,4
CO (ppm vid 10 % O ₂ tg)	79,5
CO ₂ (% vid 10 % O ₂ tg)	9,7
CO (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	114
Rökgastemperatur (°C)	182
Stoft (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	342
Stoft (mg/MJ)	189
Vid rökgasbrunnen	
O ₂ (%)	17,8
Temperatur rökgas (°C)	20
Stoft (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	211
Stoft (mg/MJ)	117
Reduktion av stoft	
	42 %

Tabell 6. Mätresultat SO₂ och HCl

Vid pannan	
O ₂ (%)	10,1
CO (ppm vid 10 % O ₂ tg)	239
CO ₂ (% vid 10 % O ₂ tg)	9,5
CO (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	301
Rökgastemperatur (°C)	176
HCl (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	43
SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	519
pH	2,09
Vid rökgasbrunnen	
O ₂ (%)	17,8
Temperatur rökgas (°C)	16
HCl (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	14
SO ₂ (mg/Nm ³ vid 10 % O ₂ tg)	313
pH	inget kondensat
Reduktion av HCl	
	67 %
Reduktion av SO₂	
	40 %

**Figur 5. Utsläpp efter panna och efter rökgasbrunn.**

5 Slutsatser

- Projektets visar att en spannmålspanna kan kopplas till rökgasbrunn med relativt enkla modifieringar av de rökgasbrunnar som finns anslutna till oljeeldade torkar. Rätt materialval för att undvika korrosionsskador krävs. Som rör kan förslagsvis syraresistent markavloppsrör användas, alternativt glaserade betongrör. Eventuellt kan betongrör användas i en första del, och övergå i plaströr när temperaturen fallit. En ejektorfläkt minskar risk för korrosion i fläkten. Röret bör förses med anordning för rengöring pga spannmålseldningens höga stofthalter.
- Som säkerhetsutrustning rekommenderas en undertrycksgivare, som stänger pannan om draget försvinner. Draget kan försvinna vid exempelvis strömavbrott eller blockering av röret.
- Kostnaden för att installera en rökgasbrunn uppskattas till 5000 – 10 000 kr + gräv-kostnader och tryckvakt. Kostnaden beror på anläggningens storlek.
- Mätresultat visade att en reduktion på 40 % av klor och stoft, och 67 % av svavel.
- För att hindra surt kondensat från att rinna ut i omgivande mark bör kalkstensmjöl läggas i brunnens botten. För en mindre anläggning krävs enligt teoretiska beräkningar minst 75 kg/år, och vid större anläggning betydligt mer. Hur mycket kalkstensmjöl som krävs, och hur kondensatet ska tas om hand vid en större anläggning, vet man inte idag. Mer erfarenhet krävs.
- Det finns inga regler eller rekommendationer från myndigheter om hur kondensatet ska tas om hand.
- Ingen kalkinblandning i bränslet bör ske när man använder rökgasbrunn vid spannmålseldning. Risken finns att stoftet i brunnen härdar. Mer kunskap krävs.
- Kondensationsvärmets i röret är betydande, och kan orsaka med tiden försämrad avskiljning. Mer kunskap krävs.

6 Fortsatt arbete

Projektet har rönt stort intresse, inte minst finns en önskan om att använda rökgasbrunn vid större anläggningar, från 100 kW upp till några MW. Det vore av stort intresse att utvärdera en större anläggning, bl.a. avseende följande:

- möjliga lösningar för ökad avskiljning genom indysning av vattendroppar i röret,
- riktlinjer för omhändertagande av kondensatet i större anläggningar via infiltration i mark,
- inverkan över tid av kondensationsvärmets på avskiljningsgraden.

7 Referenser

Brandskyddskommitté, Lantbrukets (2006). "*LBKs rekommendationer.*" www.svbf.se.

KRAV (2006). "*Regler för KRAV-certifierad produktion.*" KRAV ekonomisk förening.

LRF, Lantbrukarnas Riksförbund (2005). LRFs energiscenario till år 2020.

Micke (2006). "*Personlig kommunikation, Pajse Maskin AB, Romakloster*".

Naturvårdsverket (1987). "*Fastbränsleeldade anläggningar 500 kW - 10 MW, Naturvårdsverkets Allmänna Råd 87:2.*"

Naturvårdsverket (2005). "*Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökgaskondensering.*" Branschfaktablad, utgåva 2.

Olsson, Maria, Arkelöv, Olof, Söderqvist, Kent-Olof (2004). "*Eldning av havre för uppvärmning.*" LRFs Länsförbund i Skaraborg.

Rönnbäck, Marie, Arkelöv, Olof (2005). "*Tekniska och miljömässiga problem vid eldning av spannmål - en förstudie.*" SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut och Äfab.

Rönnbäck, Marie, Persson, Henrik, Segerdahl, Karin (2005). "*Spannmålsbrännare - funktion, säkerhet och emissioner.*" SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås.

Steenari, Britt-Marie (2006). Inst. Oorganisk kemi, Chalmers Tekniska Högskola.

Strömberg, Birgitta (2005). "*Bränslehandboken.*" Värmeforsk 911.