VÄRMEFORSK

# TPS BRANSCHFORSKNING FÖR ENERGIVERK 98/99

## Sammanfattning av genomförda projekt

N Berge, K Engvall, M Landtblom, J Larfeldt, B Ljungdahl, A Malmgren, F Zintl

DELPROGRAM
TILLÄMPAD FÖRBRÄNNINGSTEKNIK 711

# TPS BRANSCHFORSKNING FÖR ENERGIVERK 98/99

## Sammanfattning av genomförda projekt

**N Berge, K Engvall, M Landtblom, J Larfeldt, B Ljungdahl, A Malmgren, F Zintl**
**TPS Termiska Processer AB**

B8-801

**VÄRMEFORSK Service AB**
**101 53 STOCKHOLM - TEL 08/677 25 80**
**November 2000**
**ISSN 0282-3772**

## Abstract

A one-year research program, TPS Branschforskningsprogram för Energiverk, financed by a group of Swedish district heating companies and Swedish government through Värmeforsk has been completed. The program is focused on improving both environmental and operational properties of plants firing renewable fuels. Areas for investigation have been ash properties, bed sintering and fouling problems when burning biofuels. Measures to correct aerodynamic malfunction for grate fired furnaces and part load operation for pulverised fuel furnaces have been developed. Improved initial fuel distribution in fluidised bed boilers has been another area. A new method for injecting NOx-reducing agents in CFB-boilers is demonstrated as well as a method for on-line improvement of the operation of a multi-burner pulverised fuel boiler.

## SAMMANFATTNING

TPS Branschforskningsprogram för Energiverk är ett årligt FoU-program som styrs av en grupp svenska energiverk och företag, vilka också svarar för huvuddelen av finansieringen. Verksamheten administreras och genomförs av TPS inom ramen för Värmeforsks delprogram för tillämpad förbränningsteknik med cirka 40% statlig finansiering. Verksamheten inriktas mot att ta fram bättre metoder och utrustning för att medverka till en mer miljövänlig och effektiv produktion vid de svenska fjärrvärmeverkan. Programmet styrs i huvudsak mot användning av förnybara bränslen.

I denna rapport ges ett sammandrag av de tio projekt som genomförts under verksamhetsåret 98/99 och deras resultat. Programmet har indelats i fyra huvudområden Rostteknik, FB-teknik, Brännarteknik och Teknikoberoende FoU. Det senare området omfattar projekt som är generellt tillämpliga oavsett förbränningsteknik.

De askrelaterade problemen har stor betydelse för drifttillgängligheten i pannor som eldas med förnybara bränslen. Området har och fått en ganska tung inriktning inom programmet med en genomgånga av askegenskaper och påslag på några av de deltagande verken. Denna kompletteras med en relativt ingående undersökning av metoder att förutsäga askproblem vid fluidbädd förbränning. Tre olika metoder provades varav den bästa men också mest komplicerade och dyra är proveldning i fluidbädd i labskala. I detta arbete såväl som i ett inriktat mot påslag i pannornas konvektionsstråk har additiv som minskar askproblemen provats. Arbetet om Sintring av Bäddmaterial redovisas i sin helhet som en enskild Värmeforskrapport då den innehåller en stor mängd allmängods beträffande hur askrelaterade problem skall kunna angripas både från en teoretiskt och en experimentell utgångspunkt.

En aerodynamisk metod för att kontrollera slutförbränningen i rost och FB-pannor har utvecklats i modell. För att skapa den nödvändiga kontrollen över lufttillförseln har strömningen i luftlådor vidare studerats och metoder för att minska inducerade snedfördelningar provats i fysisk modell. Likande angreppssätt har också använts för att identifiera och till en del lösa generella problem vid dellasteldning i brännarpannor. Framför allt har åtgärder för att minska sneda termiska belastningar på pannorna visats.

Tillsatseldning med olja i avfallspannor krävs i avfallseldningsdirektivet. Här har en metod som förenklar tillsatseldningen och eliminerar flera av problemen med konventionella stödbrännare demonstrerats. Med hjälp av oljetillsats kan det också vara möjligt att lättare identifiera konditionen hos enskilda brännare i pulvereldade flerbrännarpannor.

I fluidbäddar har under en följd av år problemet med snedfördelning av förbränningen över eldstadens tvärsnitt varit ett återkommande tema. Här presenteras modifieringar för bränsletillförseln för att förbättra den initiala spridningen av bränslepartiklarna över tvärsnittet. En konsekvens av den ojämna förbränningen över tvärsnittet är att för vissa CFB-pannor kommer cyklonen att vara nödvändig för slutförbränning av gaserna.. Om ammoniak injiceras i cykloninloppet kommer de-$NO_x$-reaktionerna och CO-utbränningen att konkurera. Genom att tillsätta ammoniaken inne i cyklonen kan detta problem i stort elimineras.

**Keywords:** Combustion, biofuels, fluid dynamics, fouling, sintering, supplementary firing, burner control.

## SUMMARY

TPS Branschforskningsprogram för Energiverk is an annual R&D programme governed by a group of Swedish district heating utilities, which are also the major financier of the programme. The work is administrated by TPS who is also the major performer of the research. It is included in the Värmeforsk programme for applied combustion technology an has a 40% support from public funding. The TPS projects are focusing on improving methods and equipment to reduce environmental impact and increase the production efficiency of district heating from renewable fuels.

The report summarise the work done within ten projects under the one year period of summer -98 to summer -99. The programme is split in four project areas, grate-firing, FB-combustion, pulverised fuel burners and one complementary area independent of combustion technology.

Ash related problems have a major influence on the operation of boilers firing renewable fuels. This area have also achieved a special attention in this years programme. Fuel and ash analysis are collected from some of the participating utilities. Also samples from deposits collected was analysed and compositions compared. In parallel to this investigation was another one where three separate methods for predicting sintering problems in fluidised beds were developed. The one giving the best, most realistic, results was to test fire fuels and or bed material in a lab scale FB-combustor. A third project was oriented to fouling problems in convective heat transfer surfaces and additives to reduce this kind of problems. The work on sintering problems in FB-combustors is published as a separate report as it contains a good summary of available know-how on how to attack ash related problems both theoretically and experimentally. It is also published as a Värmeforsk report.

An aerodynamic method to control the burn out in grate and FB-fired combustors is developed as a model. To create the necessary control over the air supply the flow fields in wind-boxes have been further investigated. A method to reduce the induced mal-distribution has been demonstrated in a full scale physical model. A similar method has been used to identify and solve some of the general problems when operating a burner boiler at part load. In particular methods of how to avoid or reduce thermal stress have been investigated.

Supplementary firing of fuel oil or natural gas is needed in waste burning boilers. In one of the projects a simplified method has been demonstrated which solves several of the problems with ordinary burners. By means of addition of oil a method for in-operation optimisation of individual burners in multi-burner pulverised fuel boilers has been demonstrated.

Problems with mal-distribution of the combustion inside the furnace of FB- and CFB-boilers have been a topic for the programme for several years. This year a method to spread the fuel particles over a reasonably big part of the furnace superficial area thus reducing the problem. A consequense of the poor distribution is that the CFB-cyclone is of great importance for burning out the combustible gases reaching it. When ammonia is injected before the cyclone there is a competition between the SNCR reactions and the CO-burn-out reaction. If the ammonia is injected in inside the cyclone most of these problems can be avoided while the $NO_x$-reduction is unaffected..

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

**INLEDNING** ..... **7**

**ROSTTEKNIK** ..... **8**

**1 AERODYNAMISK GASHALS** ..... **8**
**1.1 Bakgrund** ..... **8**
**1.2 Målsättning** ..... **9**
**1.3 Genomförande** ..... **9**
1.3.1 Tillämpningsstudie ..... 9
**1.4 Datorsimuleringar av gashals** ..... **13**
**1.5 Diskussion** ..... **14**
**1.6 Slutsatser** ..... **15**
**1.7 Referenser** ..... **15**

**2 BRÄNSLEPROVTAGNING/ANALYS.** ..... **16**
**2.1 Bakgrund** ..... **16**
2.1.1 Målsättning ..... 16
2.1.2 Metod ..... 16
2.1.3 Bränsleanalyser ..... 18
2.1.4 Bottenaskanalyser ..... 18
2.1.5 Erfarenheter av beläggningsproblemet ..... 20
2.1.6 Resultat/diskussion ..... 23

**3 TILLSATSELDNING I AVFALLS-/BIOBRÄNSLEPANNOR MED OJÄMN BRÄNSLEKVALITET.** ..... **24**
**3.1 Bakgrund** ..... **24**
**3.2 Målsättning och genomförande** ..... **24**
**3.3 Provanläggningen** ..... **24**
3.3.1 Provinstallationen ..... 25
3.3.2 Driftförsök och resultat ..... 26
**3.4 Slutsatser** ..... **28**
**3.5 Referenser** ..... **29**

**FB-TEKNIK** ..... **30**

**4 SINTRING AV BÄDDMATERIAL (FORTSÄTTNING)** ..... **30**
**4.1 Bakgrund** ..... **30**
**4.2 Målsättning** ..... **30**
**4.3 Sammanfattning av projektet** ..... **31**

**5 SNCR I HETA CFB/FB-CYKLONER.** ..... **32**
**5.1 Bakgrund** ..... **32**
5.1.1 SNCR reaktioner ..... 32
**5.2 Målsättning** ..... **32**
**5.3 Experimentellt** ..... **32**
5.3.1 Laboratorietest ..... 32
5.3.2 Försök i full skala ..... 33
**5.4 Modellering av SNCR-reaktionerna** ..... **34**
**5.5 Resultat** ..... **34**
5.5.1 Gasblandning i experimentcyklon ..... 34
5.5.2 Simulering av SNCR reaktionerna ..... 35
5.5.3 Fullskala prov ..... 37
**5.6 Diskussion** ..... **39**
**5.7 Slutsatser** ..... **40**
**5.8 Referenser** ..... **40**

**6 FÖRBÄTTRAD BRÄNSLESPRIDNING I FB-/CFB-PANNOR MED BRÄNSLESTUP** ..... **41**
**6.1 Bakgrund** ..... **41**
**6.2 Målsättning och genomförande** ..... **43**
**6.3 Resultat** ..... **43**

6.3.1 Modellformulering ... 43
6.3.2 Generell utformning av bränslestup ... 45
6.3.3 Experimentellt bestämda förlopp i bränslestup ... 46
**6.4 Diskussion ... 49**
**6.5 Slutsatser ... 51**
**6.6 Referenser ... 52**
**BRÄNNARTEKNIK ... 53**
**7 DELLASTOPTIMERING ... 53**
**7.1 Bakgrund ... 53**
7.1.1 Allmänt ... 53
**7.2 Viktiga faktorer vid nedreglering ... 54**
**7.3 Målsättning och genomförande ... 54**
**7.4 Numeriska strömningssimuleringar ... 55**
7.4.1 Panna med en brännare ... 55
7.4.2 Panna med fyra takmonterade brännare ... 56
7.4.3 Panna med motstående väggmonterade brännare ... 57
**7.5 Diskussion ... 59**
**7.6 Slutsatser ... 59**
**8 IN SITU ÖVERVAKNING AV FUNKTION HOS BRÄNNARE ... 61**
**8.1 Bakgrund ... 61**
**8.2 Målsättning ... 61**
**8.3 Projektets genomförande ... 61**
8.3.1 Ökat bränsleflöde i enskilda brännare ... 61
8.3.2 Spårgasanalys ... 63
**8.4 Diskussion ... 66**
**8.5 Slutsatser ... 67**
**8.6 Referenser ... 68**
**TEKNIKOBEROENDE FoU ... 69**
**9 ASKSINTRINGSPROBLEM I KONVEKTIONSPAKET (FORTSÄTTNING) ... 69**
**9.1 Bakgrund ... 69**
**9.2 Målsättning ... 69**
**9.3 Teori ... 69**
9.3.1 Mekanismer vid påslagsbildning ... 69
9.3.2 Åtgärder för att förhindra påslagsbildning ... 70
**9.4 Genomförande ... 71**
9.4.1 Sammanställning – påslagserfarenheter ... 71
9.4.2 Enkla tester av metoder för bränslekarakterisering ... 71
9.4.3 Påslagstester i laboratorieuppställning ... 71
9.4.4 Påslagstester i pannor i drift ... 73
9.4.5 Nyckeltal ... 73
**9.5 Resultat och diskussion ... 73**
9.5.1 Påslagserfarenheter i svenska kraft/värmepannor ... 73
9.5.2 Degelförsök ... 74
9.5.3 Försök i laboratorieuppställning ... 74
9.5.4 Försök i verken ... 76
9.5.5 Nyckeltal ... 77
**9.6 Slutsatser ... 77**
**10 OPTIMERING AV LUFT/RÖKGASREGISTER OCH MUNSTYCKEN (DEL 2) ... 79**
**10.1 Bakgrund ... 79**
**10.2 Målsättning ... 79**
**10.3 Saxade dysor ... 79**
**10.4 Inflytande av olika typer av störningar i kanaler uppströms luftlådan ... 81**
10.4.1 Inflytande från krökar omedelbart före luftlåda ... 81
10.4.2 Inflytande från spjäll omedelbart före luftlåda ... 82
10.4.3 Inflytande från roterande flöde i luftlåda ... 84
10.4.4 Slutsatser ... 84

**10.5 Modifieringar för att förbättra befintliga luftlådor ..... 85**
10.5.1 Instickande luftdysor ..... 85
10.5.2 Ökad volym i luftlådan ..... 85
10.5.3 Ökat tryckfall i luftdysor ..... 85
10.5.4 Avsmalnande luftlåda ..... 86
10.5.5 Inlopp från båda ändar eller på mitten ..... 86
**10.6 Slutsatser ..... 86**
**10.7 Referenser ..... 86**
**BILAGA: NYCKELTAL ..... 87**

# INLEDNING

TPS Branschforskningsprogram för Energiverk är en del av Värmeforsks program för tillämpad förbränningsforskning. Programverksamheten leds av en styrgrupp bestående av representanter för alla deltagande energiverk, Fjärrvärmeföreningen och Värmeforsk. Arbetssättet inom forskningsprogrammet finns väl beskrivet i rapporten för den tidigare perioden 93/96 (Värmeforsk rapport nr. 606). Verksamheten 96/97 finns sammanfattad i Värmeforskrapporten 652 och 97/98 i rapport 685. I nedanstående årsredovisning fokuseras i första hand på det genomförda FoU-arbetet och de uppnådda resultaten.

I programmet 98/99 deltog följande energiverk och företag :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Bodens Energi AB | Borlänge Energi AB | Borås Energi AB | ENA Kraft AB |
| Eskilstuna Energi och Miljö AB | Falun Energi AB | Gällivare Värmeverk AB | Gävle Energi AB |
| Hedemora Energi | Helsingborg Energi AB | Hudik Kraft AB | Härnösand Energi & Miljö AB |
| Jämtkraft AB | Jönköping Energi AB | Kalmar Energi AB | Karlstad Energi AB |
| Köpings Kommun | Tekniska Verken i Linköping AB | Ljungby Energi | Mjölby Svartådalens Energiverk AB |
| Norrköping Miljö & Energi AB | Brista Kraft AB | Skellefteå Kraft AB | Stockholm Energi AB |
| StoraEnso Nymölla AB | Svenska Fjärrvärmeföreningen | Trollhättan Energi AB | Umeå Energi AB |
| Uppsala Energi AB | Vattenfall Drefviken Väme AB | Växjö Energi AB | Örebro Energi AB |

Programmet har till ca 60% finansierats av deltagande företagen och TPS. Staten bidrar, genom Värmeforsk, med upp till 40% i denna typ av delkollektiva forskningsprogram.

Under programmet 98/99 genomfördes projekt inom fyra huvudområden Rostteknik, FB-teknik, Brännarteknik och Teknikoberoende FoU. Det senare området omfattar projekt som är generellt tillämpliga oavsett förbränningsteknik.

Delvis omfattar det genomförda programmet uppföljningar till tidigare insatser riktade mot att åtgärda problem med snedbelastningar och stråkbildning i eldstäder. Förbättrad kontroll av aerodynamiken i pannorna är ett sätt att lösa dessa problem. Ett annat speciellt för fluidbäddar är att förbättra spridningen av bränslet över eldstadens tvärsnitt. För att ha full kontroll över strömningsförhållandena i eldstaden måste också luften i luftlådorna fördelas på avsett sätt. Låglastförhållandena är ett speciellt och viktigt område då fjärrvärmepannor ofta måste köras så att de anpassas till den aktuella lastsituationen.

Ur tillgänglighetsaspekten är de askrelaterade problemen av stor betydelse. Påslag i pannornas konvektionsdelar är en typ av problem som drabbar alla panntyper medan bäddsintring är förbehållet fluidbäddarna. Båda dess områden har bearbetats inom programmet. En omfattande genomgång av faktorer som påverkar sintring och hur dessa kan testas, publiceras som en separat Värmeforskrapport och kommer endast att summariskt beskrivas i denna sammanställning.

Ansvarig programledare under verksamheten 98/99 har varit Niklas Berge. Ansvariga projektledare inom respektive teknikområde har varit Jenny Larfeldt (Rostteknik), Boo Ljungdahl (FB-teknik), Alf Malmgren (Brännarteknik) och Per Kallner som under verksamhetsåret ersattes med Klas Engvall (Teknikoberoende FoU).

# ROSTTEKNIK

Traditionella rostpannan skiljer sig från annan eldningssteknik genom att förbränningsförloppet i så hög grad är sekventiellt. Bränslet matas in, torkas, förbränningen startar med de flyktiga beståndsdelarna för att sedan övergå till kolresten och till sist bränns askan ur och kyls ner. Redan i ett av de allra första Branschforskningsprojekten togs en teknik med gashals fram för att eliminera den stråkbildning som blir en följd av den sekventiella förbränningen. Metoden demonstrerades i Östersund, Jämtkraft, och visade sig ha en positiv effekt på både effektuttag och emissioner men krävde en omfattande ombyggnad av pannan. Senare aerodynamiska studier av pannorna visar att samma effekt borde kunna gå att åstadkomma enbart med hjälp av luft- eller rökgasstrålar.

Förslaget till nytt avfallsdirektiv har skapat en farhåga bland de svenska avfallseldarna att man skall tvingas använda teknik som kan skapa mer problem än den löser. Ett sådant är kravet på stödbrännare som skall användas om temperaturen i eldstaden sjunker under 850°C. Ett försök att hitta en enkel lösning att komma runt avigsidorna med stödbrännare har visats inom årets program.

I ett tredje arbete undersöktes kopplingen mellan bränsleaskans sammansättning och påslagsbildningen i eldstäder.

## 1 AERODYNAMISK GASHALS

### 1.1 Bakgrund

Som en del av Branschforskningsprogrammet 1994/95 installerades en gashals i en rostpanna på 25 MW [1]. Installationen gav pannan bättre förbränningsegenskaper men eftersom den bestod av en avsevärd modifiering med byte av stora delar av dess tubväggar så var det en kostsam modifiering.

Ett av projekten i rostteknikgruppen 1996/97 var en undersökning av ofullkomligheter hos strömningen i ett stort antal pannor [2]. Det framkom då att i de fall där man har luftregister med många tätt sittande dysor kan man få en effekt som bäst beskrivs som en aerodynamisk vägg. Då luftstrålarna sitter nära varandra finns det inte någon möjlighet för underifrån kommande gas att passera genom raden av luftstrålar utan den böjs av längs den skärm som luftstrålarna bildar. Om denna typ av luftregister placeras på alla fyra väggarna skapas ett centralt stråk av samma typ som i en gashals.

Det är denna effekt som ligger till grund för det koncept som undersökts i detta projekt och som fått namnet "Aerodynamisk gashals". Grundkomponenten i konceptet är en skärm av tätt sittande strålar av recirkulerad rökgas som trycker ihop de nedifrån kommande gaserna i ett centralt stråk. I och med hopträngningen i eldstadens mitt kommer dessa gaser att homogeniseras med en starkt reducerad stråkbildning som följd.

För att detta stråk av homogeniserade brännbara gaser från eldstadens bränslebädd skall kunna brännas ut i form av en gasflamma över gashalsen krävs att luft blandas in i de brännbara gaserna i en gasflamma. Lufttillsatsen görs så att flamman utnyttjar en stor del av eldstadens tvärsnitt och volym över halsen genom att luftstrålar med en tangentiell hastighetskomponent tillsätts över rökgasstrålarna.

## 1.2 Målsättning

## 1.3 Genomförande

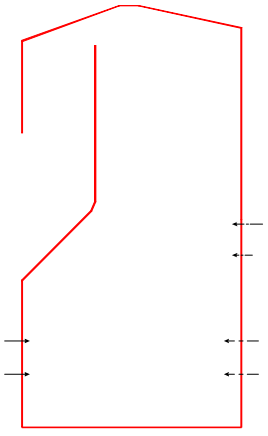
I detta projekt har metoden med "Aerodynamisk gashals" tillämpats på två väsentligen olika typer av pannor, dels en bubblande fluidbäddspanna dels en typisk rostpanna. Olika typer av numeriska strömningsmodeller har utnyttjats i studien och dessutom fysisk modellering i syra/basmodell rostpannan. Orsaken till valet av de två förbränningsteknikerna är att fluidbäddpannorna oftast är utförda med raka eldstadsväggar medan rostpannor nästan undantagslöst har en kontraktion, näsa eller valv i eldstaden. För att närmare definiera villkoren för gashalskonceptet har mer avancerad datormodellering använts.

### 1.3.1 Tillämpningsstudie

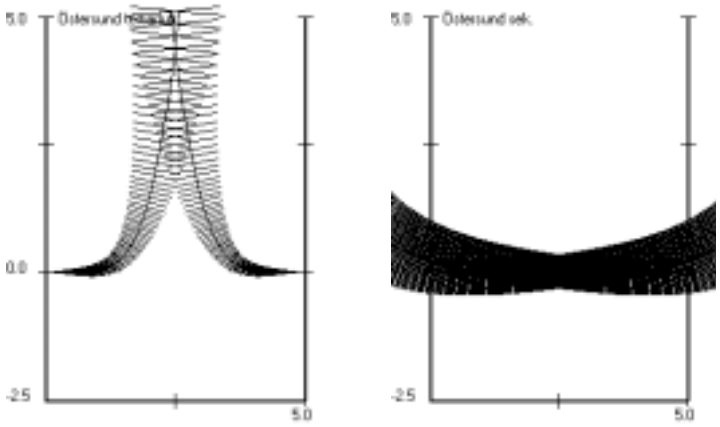
**Fluidbäddpanna**

Som exempel användes Jämtkrafts bubblande fluidbäddpanna i Lugnvik. Pannan har en nominell effekt på 25 MW. Bränslebäddens ytbelastning är 935 kW/m$^2$ och pannans volymsbelastning är 113 kW/m$^3$, dess totalvolym är 220 m$^3$. Gasernas genomsnittliga uppehållstid efter sekundärlufttillsatsen är 3,5 s. Sekundär och tertiärluft tillsätts genom 26 st dysor med diametern 50 mm och 12 st som är 89 mm i diameter. Sekundärluftsregister finns på front och bakvägg och tertiärluftsregister på front och sidor, d.v.s. tre väggar. Bränslet består av spån, bark, hyggesrester och torv.

Beräkningen av luftstrålarnas inträngning i Figur 2 visar att sekundärluften tränger in mycket kraftigt och bildar en starkt turbulent zon med intensiv förbränning (se den högra bilden). Tertiärluften introduceras från tre sidor och beräkningen som ses i den vänstra bilden avser bara två strålar. De tränger inte in lika kraftigt som sekundärluften men verkar ge en bra täckning av pannans tvärsnitt utan att skapa alltför mycket turbulens. De eventuella stråk som kommer upp från sekundärluftsnivån tas effektivt om hand av tertiärluften.



**Figur 1.** Eldstadsgeometri
*Geometry of furnace*.



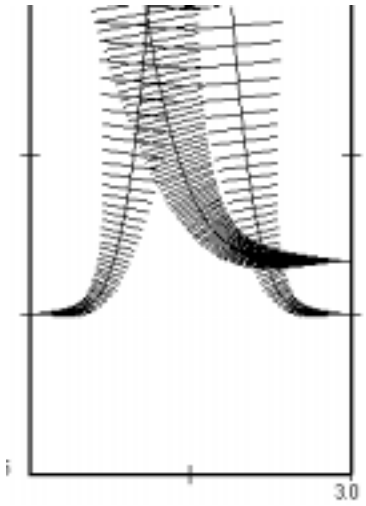

**Figur 2.** Inträngning och avböjning av sekundärluftstrålarna (till höger) och tertiärluftstrålarna (till vänster).
*Penetration and deflection of secondary air (right) and tertiary (left)*

Figur 3 visar inträngning och avböjning hos rökgas och luftstrålar i ett tänkbart utförande av den aerodynamiska gashalsen installerad i Jämtkrafts bubblande fluidbäddspanna i Lugnvik.

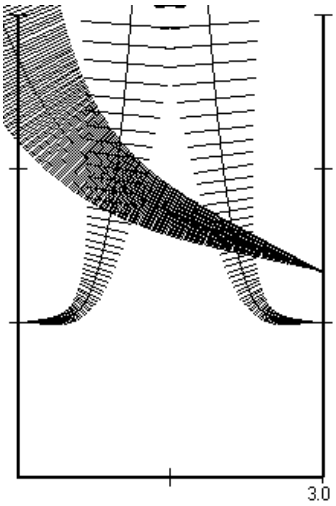
Pannan har ett tvärsnitt på 5 x 5,4 m i den nedre delen. Själva gashalsfunktionen åstadkommes med hjälp av tätt placerade små dysor för recirkulerad rökgas. Sekundärluften tillsätts sedan med ett litet antal grövre dysor som "skjuter" genom rökgasskärmen.

Om luftstrålarna ges en tangentiell komponent så kan en swirlflamma som kommer ur gashalsen skapas. För detta krävs hög impuls i luftstrålarna. Detta medför att det troligen går att sänka sekundärluftfaktorn något och vid behov öka tertiärluftsflödet. Sekundärluftdysorna fördelas jämnt på sidoväggarna och ges en placering så ett roterande gasflöde skapas.

Figur 4 visar inträngningen och avböjningen av sekundärluften (övre strålen) om den fördelas på 44 st dysor med en diameter på 100 mm.




**Figur 3.** Beräkning av strålarnas inträngning och avböjning i en aerodynamisk gashals.
*Calculated penetration and deflection of jets in an aerodynamic gas-throat.*



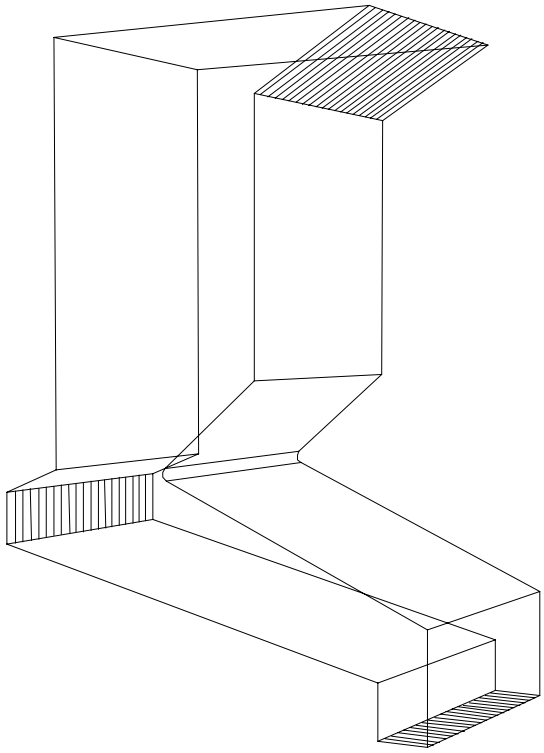

**Figur 4.** Möjlig aerodynamisk gashals med 15 mm dysor för rökgas i gashalsen och 100 mm sekundärluftsdysor.
*Possible aerodynamic gas-throat with 15 mm flue-gas nozzles and 100 mm secondary air nozzles.*

**Rostpanna**

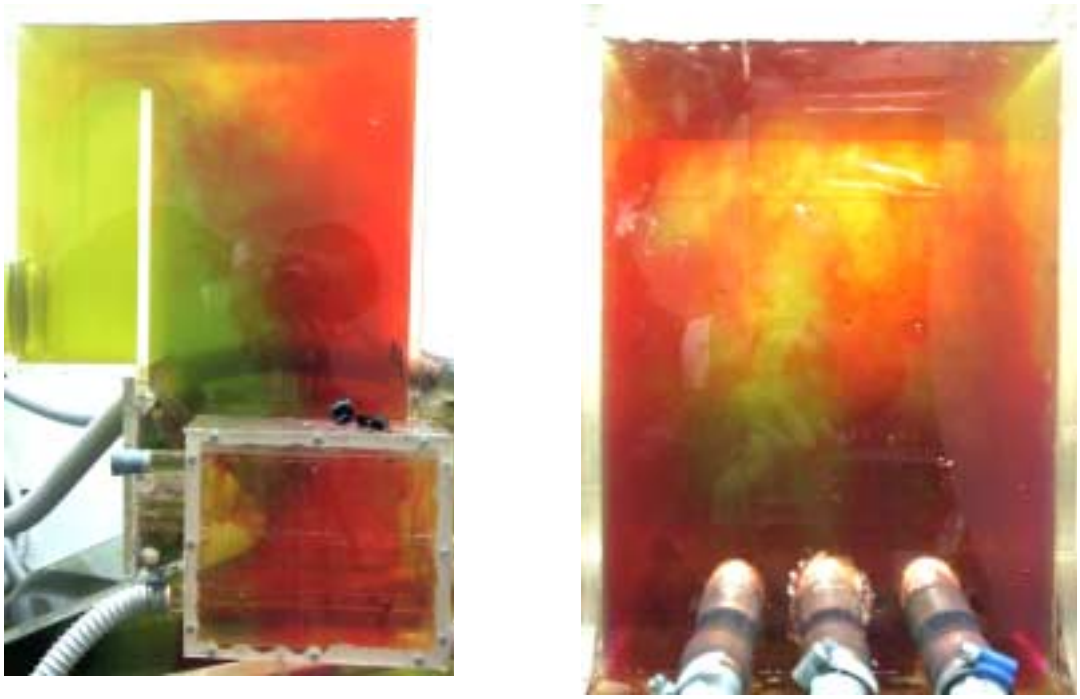
I en rostpanna som inte har sekundärluftsregister i näsnivån styrs strömningen av flödet upp från rostsektionen. Den har en förskjutning mot frontväggen med ett kraftigt stråk med uppåtgående gaser. Detta stråk ger gaserna en hög hastighet, en kort uppehållstid och en sämre möjlighet att blanda sig med andra gaser. Vid bakväggen bildas en stor kraftig virvel som tar upp en avsevärd del av övre eldstadsvolymen. En sådan virvel är ofta onyttig eller till och med skadlig för pannans prestanda. Bortsett från att eldstadsvolymen slösas bort på en relativt inaktiv zon så kan virveln transportera ner ammoniak eller urea vid en eventuell SNCR-injektion till de heta flamzonerna där de bränns till $NO_x$. Denna situation kan till och med förstärkas vid tillsats av sekundärluft eller recirkulerade rökgaser.

Förutom att sekundärluften används för att dela upp förbränningen i två steg så kan den användas för att styra gasströmmen så stråkbildningen och virveln minskas. Som tillämpningsexempel har en 12 MW rostpanna i Mjölby använts. Pannans principiella utseende framgår av Figur 5.För att studera strömningsförhållandena i denna panna användes fysisk modellering i syra/basmodell. I Figur 6 visas flödet vid en grundinställning som ungefär motsvarar normal drift vid full last före modifiering. Till höger ses tydligt kraftiga stråk av oförbränd gas vid sidoväggarna. De sekundärluftsdysor som syns i bilden används inte i detta fall. I sidovyn till vänster syns den kraftiga stråkbildningen och en recirkulationsvirvel över näsan.

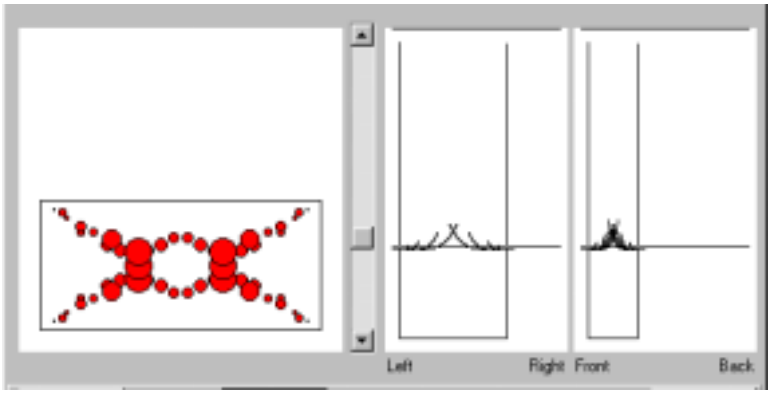
Nästa steg var att modellera strömningen i och över en aerodynamisk gashals där rökgas introduceras genom register på alla fyra väggarna i näsnivån. Figur 7 visar en tänkbar konfiguration av en aerodynamisk gashals som består av 58 dysor med olika diametrar.



**Figur 5.** Rostpannans utseende.
*Lay-out of the grate fired boiler.*



**Figur 6.** Grundinställning av flöden utan gashals. Sett från sidan(vänster) och från frontväggen(höger).
*Base case without gas-throat. From the side (left) and from the front wall (right).*




**Figur 7.** Förenklad datorsimulering av en tänkbar aerodynamisk gashals.
*Simplified simulation of a possible aerodynamic gas throat.*

I den fysiska modell av Mjölbypannan som visas i Figur 8 kan man tydligt se hur rökgasstrålarna tränger in i eldstaden från alla fyra sidorna. Gaserna från pannans undre delar skapar ett centralt stråk av ofullständigt utbrända gaser. Man kan också se den stora recirkulationsvirvel som skapas över näsan som ett mörkt område då den delvis fylls med de rökgaser som kommer från gashalsdysorna. Det går också att ana det grundläggande problem med en gashalsinstallation i denna panna nämligen dess starkt rektangulära tvärsnitt i näsnivån, vilket också framgår av Figur 7. Avståndet är nästan dubbelt så långt mellan sidoväggarna som mellan front och bakvägg i näsnivån.



**Figur 8.** Inträngning och avböjning av de rökgasstrålar (mörkblå färg) som utgör den aerodynamiska gashalsen.
*Penetration and deflection of the flue gas jets (dark blue) in an aerodynamic gas-throat.*





**Figur 9.** Blandningsmöster efter erodynamisk gashals.
*Mixing pattern after aerodynamic gas-throat.*

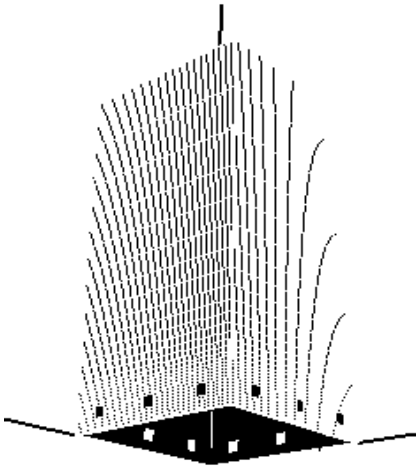
I Figur 9 tillsätts sekundärluft genom dysor som placerats ungefär 500 mm över rökgasdysorna och som förskjutits i sidled så de ger en tangentiell hastighetskomponent vilken skapar en rotation i eldstadens övre del. Man kan tydligt se att detta fungerar och ger en långsam blandning av brännbara gaser och luft som fyller förbränningsrummet väl samtidigt som blandningen är fullständig innan gaserna lämnar eldstaden.

## 1.4 Datorsimuleringar av gashals

Datorsimuleringarna har genomförts med en förenklad eldstadsgeometri för att renodla resultaten. Ett kvadratiskt schakt med ett homogent gasflöde nedifrån med en hastighet på 1 m/s och en temperatur av 900°C har försetts med olika konfigurationer av dysor på alla fyra sidoväggar, se Figur 10. Dysorna har alla varit kvadratiska med en sida av 100 mm. Hastigheten på gasen som kommer ur dysorna har varit 10 m/s och temperaturen 25°C.

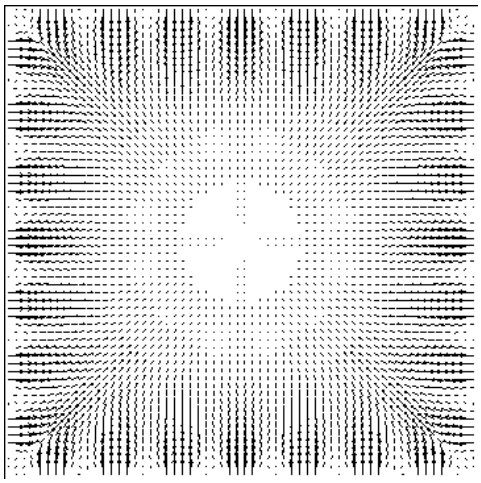
Avståndet mellan dysorna på sidoväggarna har varierats från 100 mm till 400 mm. Datorsimuleringarna visar tydligt att det är den recirkulationsvirvel med en nedåtgående gasström längs väggen som bildas över strålarna från sidoväggarna som hindrar gas nedifrån att passera mellan strålarna. För att gas skall kunna passera mellan strålarna så måste motståndet från det nedåtgående gasflödet brytas.

När avståndet mellan dysorna ökar så blir nedåtströmmen vid väggen svagare samtidigt som arean mellan strålarna blir större då både avståndet mellan närliggande strålar och sträckan innan de möts ökar.

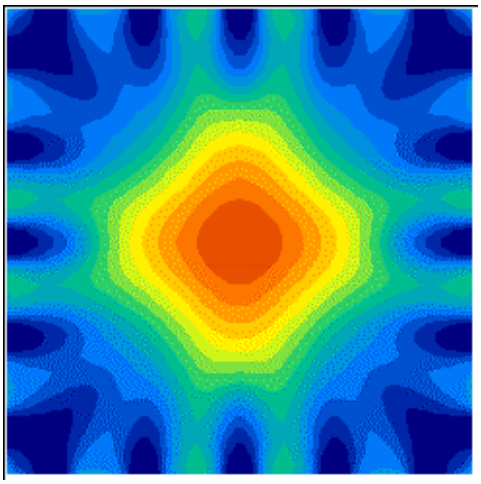


**Figur 10.** Den geometri som använts vid datorsimuleringarna.
*Geometry used for computer simulation*

Strömningsmönstret i ett horisontellt snitt i dysnivån med 100 mm avstånd mellan dysorna visas i Figur 11 och koncentrationerna av brännbara gaser visas i Figur 12. Det framgår där hur gaserna trycks ihop i en cirkulär "öppning" i eldstadens mitt.



**Figur 11.** Strömningen i dysplanet. 100 mm mellan dysorna.
*Flow pattern in the nozzle plane. 100 mm between nozzles.*

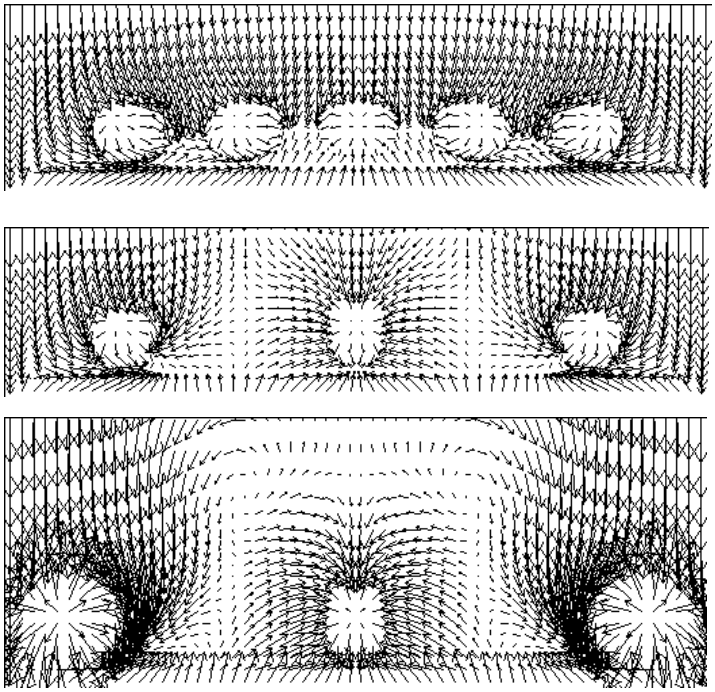


**Figur 12.** Gaskoncentrationen i dysplanet. Orange = hög halt brännbar gas.
*Concentration of gas in the nozzle plane. Orange=high content of combustible gases.*

Strålarna har även en ejektoreffekt som suger in gaser från omgivningen till gasstrålarna från sidoväggarna. Denna insugning skapar de recirkulationsvirvlar som kan bildas över

strålarna. Virvlarna har en nedåtgående hastighet närmast väggarna vilken fortsätter ner mellan strålarna och hindrar gaser som kommer nedifrån att passera upp mellan strålarna. Ökande avstånd mellan dysorna på sidoväggarna kommer att göra denna nedåtströmning svagare och det blir lättare för gaserna nedifrån att tränga upp. En effektiv aerodynamisk gashals bör bestå av så få dysor som möjligt av kostnadsskäl samtidigt som blockeringseffekten för de brännbara gaserna måste vara intakt.

Figur 13 visar hastigheterna runt strålarnas inlopp vid sidoväggen. Man kan där se hur gaserna nedifrån orkar tränga längre upp i mellanrummet mellan strålarna när avståndet mellan dem ökar. Om man använder antalet dysdiametrar mellan dysorna som mått så ser vi att ingen gas tränger upp mellan strålarna när avståndet är mindre än 2 dysdiametrar. Vid fyra dysdiametrar är blockeringseffekten fortfarande tämligen effektiv. När avståndet ökas till 5 diametrar blir dock passagen av gaser nedifrån påtaglig.



**Figur 13.** Hastighetsvektorer närmats ena sidoväggen. Dysor är placerade med ett avstånd på 150 mm överst, 400 mm i mitten samt 500 mm underst.
*Velocity vectors close to a wall. Nozzles with a distance of 150 mm top, 400 mm middle and 500 mm bottom.*

## 1.5 Diskussion

Datorsimuleringen har visat att för kvadratiska dysor med en sida på 100 mm (samma area som cirkulära dysor med diametern 112 mm) är blockeringsfunktionen god vid ett avstånd på 400 mm, dvs 3,5 dysdiametrar men påtagligt sämre vid 500 mm avstånd, dvs 4,5 diametrar. Man kan anta att ett lämpligt maximalt avstånd då är 3,5 - 4 dysdiametrar. Det är allmänt vedertaget att de flesta karakteristika för gasstrålar är knutna till deras dimensionslösa storheter, uttryckta som antal dysdiametrar, snarare än deras absoluta mått. Därför är det rimligt att detta resultat kan tillämpas på andra dysdimensioner även om det inte är visat i strikt vetenskaplig anda.

En teoretisk studie av hur konceptet skulle kunna tillämpas på den undersökta fluidbäddpannan visar att genom att sätta in små dysor i fenorna mellan väggtuberna skulle 230 st

dysor med en diameter på 15 mm, matade med ett flöde av recirkulerad rökgas på 2360 $m^3$n/h räcka. Detta är ett helt rimligt flöde då det utgör storleksordningen 5% av rökgasflödet vid 25 MW last i pannan. Rökgasdysorna måste kompletteras med ett antal luftdysor högre upp för att blanda in den luft i det centrala stråket som är nödvändig för en effektiv och fullständig slutförbränning. Även här är det fördelaktigt med ett relativt stort antal dysor för att undvika att blandningen blir alltför intensiv. I exemplet valdes att tillsätta luften genom 44 dysor som placeras i grupper om 11 st på var vägg. Dessa dysgrupper placeras förskjutna från väggens centrum för att skapa en rotation på gaserna.

Slutligen genomfördes även en fysisk modellstudie av en installation av aerodynamisk gashals i en 12 MW rostpanna. Här placerades själva gashalsdysorna i pannans trängsta del i "näsans" spets med luftdysorna ungefär en halv meter högre upp. Det var möjligt att åstadkomma en strömningssituation i eldstaden som väl motsvarade förväntningarna med en god homogenisering av gaserna nedifrån och en kontrollerad långsam inblandning av den luft som tillsattes över rökgasdysorna. De kraftiga väggstråk som fanns tidigare försvann liksom den kraftiga virveln över näsan.

Det visade sig dock att den kraftigt rektangulära forman hos eldstaden i näsnivån gav en sämre flexibilitet då ju rökgasstrålarna från sidoväggarna måste tränga in nästan dubbelt så långt som de från fram och bakväggarna. Studien visade dock att det med praktiska flöden av rökgas var möjligt att åstadkomma gashalseffekten även i denna panna.

Resultatet från denna undersökning visar att konceptet fungerar som tänkt och det är helt realistiskt att installera i de typer av pannor som studerats i tillämpningsexemplen.

## 1.6 Slutsatser

Teoretiska beräkningar och fysiska modellförsök visar att det är möjligt att få en aerodynamisk gashals att fungera både i en bubblande fluidbäddspanna och en rostpanna.

Blockeringseffekten uppstår tack vare den nedåtgående gasström som bildas nära väggen strax över luft eller rökgasstrålarna. Nedifrån kommande gaser som vill passera mellan strålarna måste först bryta ner detta nedåtgående väggnära gasflöde och vända det till ett uppåtgående flöde.

Om avståndet mellan dysorna i den aerodynamiska gashalsen är max 4 dysdiametrar så verkar principen fungera som tänkt.

Starkt rektangulära geometrier gör konceptet mer komplicerat att tillämpa på grund av de olika inträngningsdjupen som krävs av strålarna från de olika väggarna.

## 1.7 Referenser

1 **Gashalsbrännare för minskning av emissioner av $NO_x$ och kolväten i befintliga rostpannor.**
TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 94/95. TPS, Studsvik 1995.

2 **Identifiering av ofullkomligheter i slutförbränningszonen.**
Slutrapport inom området Rost/FB-teknik, TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 96/97.
TPS-97/28, Studsvik 1997.

# 2 BRÄNSLEPROVTAGNING/ANALYS.

## 2.1 Bakgrund

Beläggningar i eldstaden tros initieras av fina partiklar som antingen genom ytkrafter orsakade av temperaturskillnader eller genom partikelimpaktion fastnar på en yta i eldstaden. I det första fallet (termofores) är partikeln inte ”klibbig”, dvs delvis eller helt i smält fas, i eldstaden men kan bidra till smälta sedan den fastnat på ytan, vilket ju är en förutsättning för att beläggningen ska fortsätta växa. I det andra fallet, partikelimpaktion, fastnar partiklarna på grund av att de är klibbiga och således har smält redan i eldstaden. Beläggningen växer sedan genom att större partiklar, som flygaska, fastnar och blir så att säga ”fyllnadsmassa” för beläggningen. Då flygaska alltid finns närvarande i eldstaden, oavsett om beläggningstillväxt sker eller inte, blir beläggningens kemiska sammansättning ofta identisk med flygaskans. Orsaken till initiering och tillväxt av en beläggning kan därför, tråkigt nog, oftast inte hittas i analysen av beläggningen. Själva ”klistret” i beläggningen drunknar i flygaskans sammansättning.

En grundförutsättning för beläggningsbildning enligt ovan är en klibbig yta eller klibbiga partiklar. Vilket förutsätter ämnen eller föreningar med kritiska smältpunkter vilket i rosteldade sammanhang spänner mellan tubytans temperatur av omkring 400°C till eldstadstemperaturen av omkring 1000°C. Alkalimetaller ingår ofta i föreningar med relativt låg smälttemperatur. Alkalikloriderna har smältpunkter kring 700-800°C. Alkalikarbonater har bryts kring 900°C ned till oxider vilka har mycket hög smälttemperatur. Sulfater återfinns ofta i beläggningar och har högre smälttemperatur än klorider.

Försök att förutsäga bildningen av beläggningar har hittills varit relativt fruktlösa. Det förklaras av att bildning och tillväxt av beläggningar är en komplicerad process där flera steg är ingår:

- beläggningsbildande ämnen avges från bränslet
- ämnena transporteras upp i eldstaden till lämplig partikel- eller tubyta
- ämnena kondenserar eller klibbar fast
- ytan förblir klibbiga varpå den fångar in mer partiklar
- beläggningen kan förändras genom kemiska reaktioner

Arbetet att överhuvudtaget förstå beläggningsbildningen försvåras av att gruppen av potentiella beläggningsbildare är mycket stor. Analyser av beläggningar ger inte information om initieringen och askanalyser ger inte information om i vilka föreningar ämnen är bundna i bränslet.

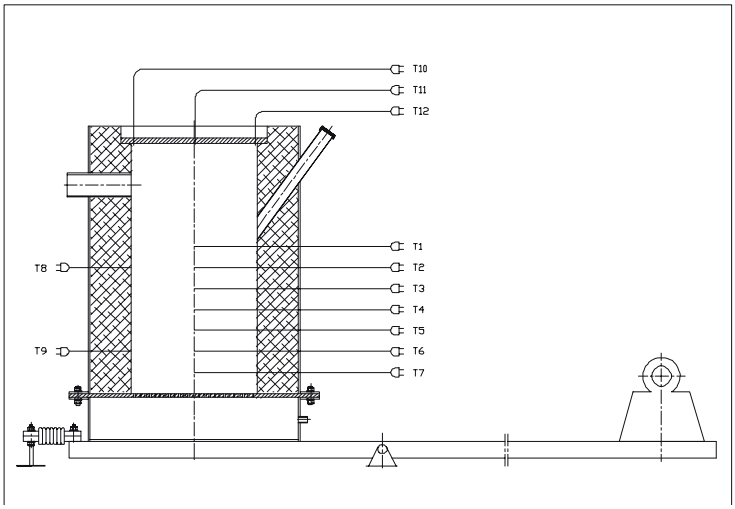
### 2.1.1 Målsättning

Att baserat på bränsle- och askanalyser och med hjälp av kända mekanismer för beläggningsbildning och tillväxt, relateras analyserna till de beläggningsproblem som rapporterats i rosteldade pannor.

### 2.1.2 Metod

De bränslen som analyserats ovan eldades i en försöksugn bestående av ett stålrör i vilket ett inre rör av lättkeramik med en innerdiameter av 0,3 meter monterats, Figur 14. Vid försöken fylls ugnen med bränsle upp till det översta termoelementet vilket betyder en bäddhöjd av cirka 0,35 meter vilket är av samma storleksordning som den i rostpannor. Primärluft tillsätts i luftlådan under rostplattan som har en area av 0.07 $m^2$. Rosten har 3

mm hål och en total hålarea av 0,8% av den totala rostarean. Primärluftflödet registreras och varierades under försöken för att efterlikna förloppet i en fullskaleanläggning. För torra bränslen innebär det att ett lågt luftflöde på rosten närmast bränslematningen. Det ökar sedan till ett högt flöde mitt på rosten och minskas mot askutmatningen. För fuktiga bränslen, GROT och salix flis, startades försöken istället med ett högt flöde som sedan minskades under återstoden av försöket, Tabell 1.




**Figur 14.** Försöksugn för rostsimulering/*Experimental furnace for simulation of grate firing.*

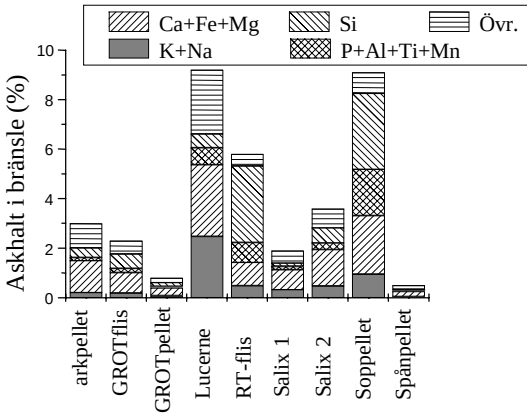
För att efterlikna den värmestrålning bränslebädden utsätts för i en verklig rostpanna används ett gasolvärmt strålningselement med temperaturen 900°C placerat på toppen av ugnen. På detta sätt utsätts bädden för värmestrålning ovanifrån varvid den torkas och avgasning startar. Den följs sedan av träkolsförbränning. Under försöken registreras temperaturer och viktsändring för att karakterisera och kontrollera förbränningsförloppet. Rökgasens syrehalt analyseras kontinuerligt. Vid två av försöken togs påsprover med gas för att analysera rökgasens innehåll av alkali. Försöken har avbrutits då syrehalten i rökgaserna stigit till omkring 18 %. Den totala försökstiden varierar mellan 147 och 350 minuter. Efter försöket samlades den bildade bottenaskan in för vägning och analys. De genomförda försöken sammanställs i Tabell 1.

**Tabell 1.** Genomförda försök./*Experiments performed*

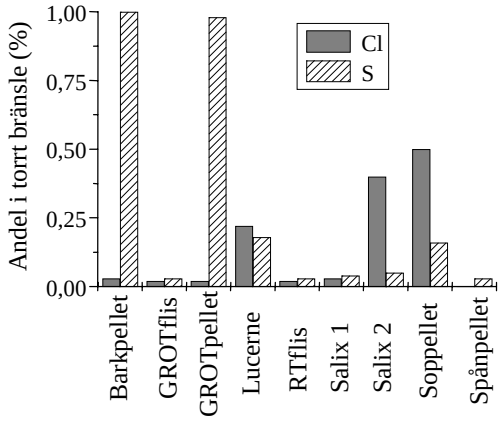
| **Bränsle** | **Mängd** | **Fukt** | **Primärluft** | | | | | | **Försökstid** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **[kg]** | **[%]** | **[nm$^3$/h]** | **[min]** | **[nm$^3$/h]** | **[min]** | **[nm$^3$/h]** | **[min]** | **[min]** |
| Barkpellets | 14,4 | 9 | 5 | 15 | 30 | 60 | 20 | 110 | 200 |
| GROTflis | 10,5 | 59 | 10 | 15 | 5 | 340 | | | 345 |
| GROTp | 15,8 | 10 | 5 | 15 | 30 | 83 | 20 | 65 | 163 |
| Lucernp | 16,0 | 10 | 5 | 15 | 30 | 78 | 20 | 102 | 195 |
| RTflis | 5,9 | 34 | 5 | 15 | 12 | 132 | | | 147 |
| Salix 1 | 7,6 | 51 | 10 | 15 | 5 | 222 | | | 237 |
| Salix 2 | 6,5 | 61 | 10 | 15 | 5 | 236 | | | 251 |
| Spånp | 16,3 | 7 | 5 | 15 | 30 | 69 | 11 | 192 | 276 |
| Salix/NaCl | 7,18 | 61 | 10 | 15 | 5 | 245 | | | 260 |
| SalixLuc. | 11,76 | 30 | 10 | 15 | 5 | 328 | 20 | 7 | 350 |

### 2.1.3 Bränsleanalyser

Nio bränslen har analyserats. I Figur 15 visas de testade bränslenas asksammansättning. Staplarnas höjd svarar mot askhalten i bränslet. Förutom mineraler är svavel- och klorhalterna i bränslet av betydelse för beläggningsbildningen. I Figur 16 visas halten av svavel och klor i bränslet.



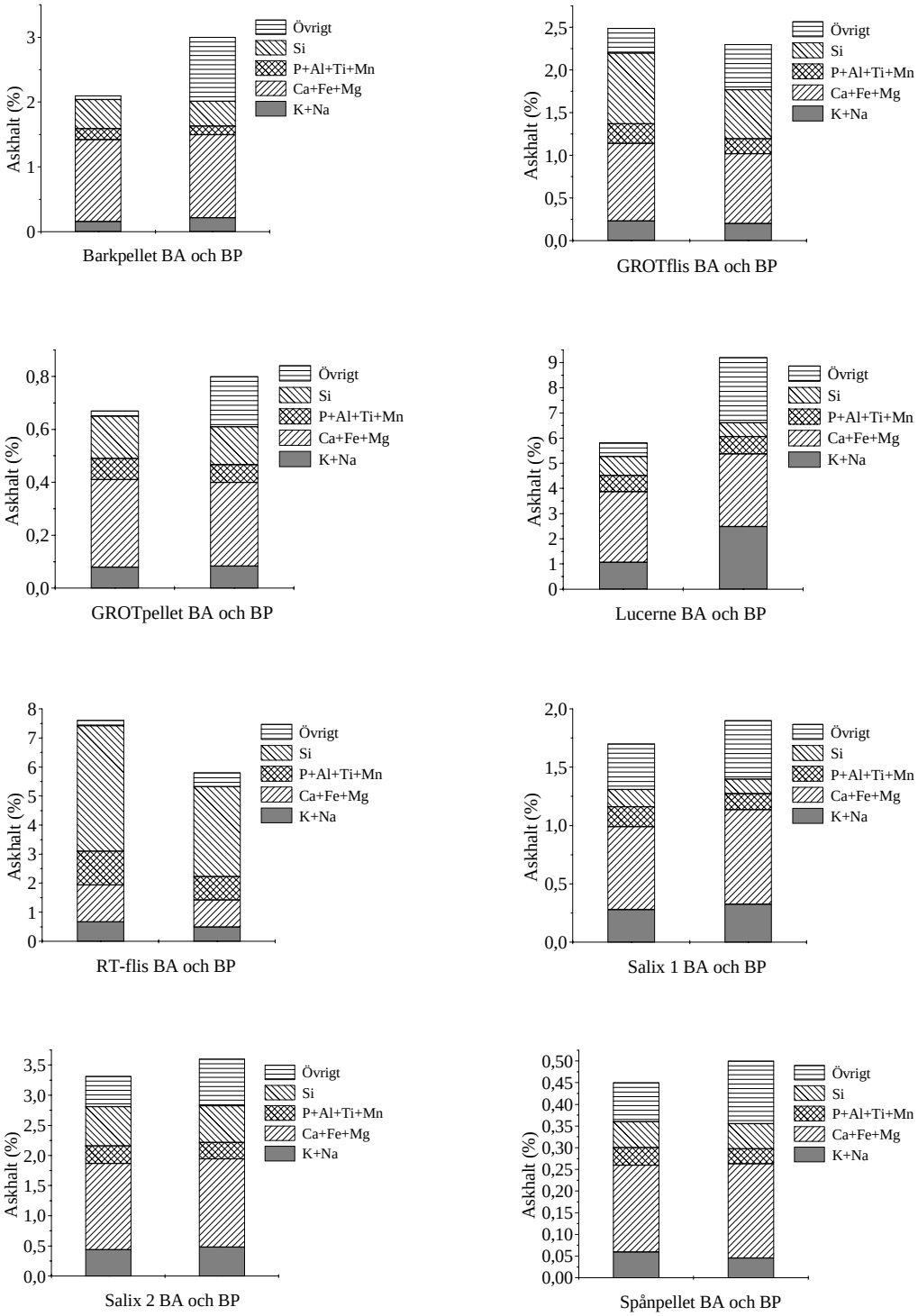

**Figur 15.** Askhalt och askans sammansättning för testade bränslen.
*Ash content and composition of ash for examined fuels.*




**Figur 16.** Andel klor och svavel i testade bränslen.
*Content of chlorine and sulphur in examined fuels.*

### 2.1.4 Bottenaskanalyser

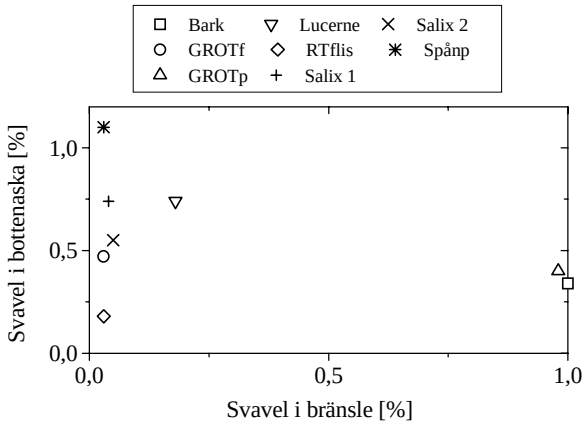
I Figur 17 visas bottenaskans sammansättning bredvid bränsleanalysen för respektive bränsle. I de flesta fallen är mängden aska i försöksugnen mindre än vad askhalt och bränslemängd motsvarar. Detta förklaras dels av osäkerheten i analyserna men också av att aska kan ryckas med som flygaska ut ur ugnen. För svavelrika pellets av bark, GROT och Lucerne noteras att summan av mineraloxiderna är nära 100% för bottenaskan, i bränsleprovet däremot utgörs omkring 20-30% av askan av andra föreningar än mineraloxider. En möjlig förklaring är olika typer av svavelföreningar i askan som avges från bränslet under förbränningen. För Lucerne är alkalihalten lägre i bottenaskan än i bränsleprovet vilket förklaras av att den förångas under förbränningen.



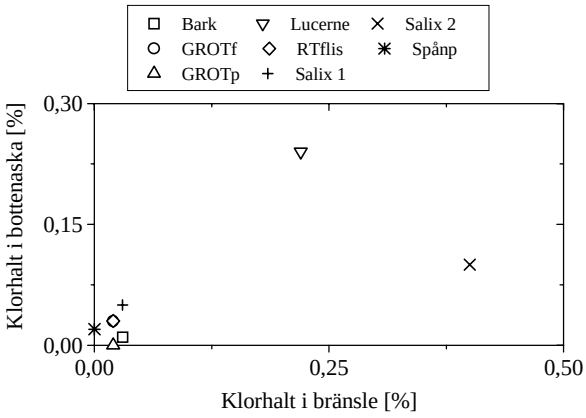

**Figur 17.** Askhalt och sammansättning för bottenaska (BA) och testade bränslen (BP).
*Ash content and composition of bottom ash (BA) and examined fuels(BP).*

Även askans innehåll av klor och svavel har analyserats och visas i Figur 18 och Figur 19 som funktion av bränslets initialhalt av klor och svavel. Bränslen med en högre svavelhalt visade sig ge lägre svavelhalt i bottenaskan i jämförelse med bränslen med låg svavelhalt. Detta förklaras troligen av hur svavel finns bundet i bränslet där svavelrika bränslen, bark och GROT-pellets, har större andel lättflyktigt svavel än övriga bränslen. För klor är bil-

den inte lika enhetlig då klor avges från Salix 2 men stannar i Lucerne. Övriga bränslen har låga klorhalter både i bränsle och den resulterande bottenaskan. Troligen skulle även klor- och svavelavgivningen från bränslet öka om medryckningen ökade.




**Figur 18.** Halt av svavel i bränsle och bottenaska för undersökta bränslen.
*Content of sulphur inbottom ash and examined fuels.*




**Figur 19.** Halt av klor i bränsle och bottenaska för undersökta bränslen.
*Content of chlorine in bottom ash and examined fuels.*

### 2.1.5 Erfarenheter av beläggningsproblemet

I de fall som beskrivs nedan kan den plötsliga tillväxten av beläggningar förklaras av en ändring i bränslets sammansättning eller en ändring i bränslets storleksfördelning och fukthalt. Den första punkten rör kemin hos beläggningarna medan den andra punkten främst rör temperaturerna i eldstaden. Båda dessa faktorer påverkar beläggningstillväxten.

**Borås**

Bränsle

Bränslet utgörs av skogsflis från olika leverantörer. Siktkurvorna för representativa bränslen eldade i ÅP2 under driftsäsongen 98/99 visar på en onormalt hög finandel. Andelen partiklar under 5 mm är omkring 45-60% vilket ska jämföras med 31% för referensbränslet. Den stora andelen av fina partiklar hänförs till den ”dåliga” sommaren 1998 som lett till att barr, som i normala fall släpper från bränslet, sitter kvar. Borås egna undersökningar visar också på en kraftigt förhöjd askandel i finfraktionen med högre halter av Mg, Al, N, Ca och Si än det genomsnittliga bränslet.

Förbränningsförhållanden

För att öka omblandningen i eldstaden installerades ROFA under sommaren 1998. Efter installationen uppkom problem med kraftiga påslag vid vissa driftsinställningar, troligen framkallade av en ogynnsam kombination av hög finandel i bränslet och roterande strömning i eldstaden. ROFA installationen har lett till en ökad temperatur i eldstaden utan att syrehalten i rökgaserna ändrats.

Beläggningar

I ÅP 2 i Borås uppkom periodvis kraftiga beläggningar i eldstaden hösten 1998. För att klara driften av pannan har periodvis finfraktionen av bränslet sållats bort. Hårda beläggningar bildades under problemperioder längs efter hela eldstadens omkrets från bränsleinkastet och cirka 5 meter uppåt, Figur 20 och Figur 21. Ovanför de hårda beläggningarna upp till den nedersta överhettaren bildades mjukare beläggningar på eldstadens väggar.

Inga beläggningar finns under bränsleinmatningen. Analyser av beläggningarna visar att de domineras av kalcium men att kalium och fosfor förekommer samt natrium, aluminium och magnesium. Före ombyggnaden var beläggningarna i eldstaden några mm tjocka, stoftliknande och lätta att avlägsna.



**Figur 20.** Beläggningar ovanför bränslematningen på frontväggen, ÅP2.
*Deposits above the fuel-chute in the front wall of ÅP2, Borås.*



**Figur 21.** Beläggningar under näsa vid bakväggen i Borås, ÅP2.
*Deposits under the furnace contraction, back wall of ÅP2, Borås.*

**Enköping**

Bränsle

Bränslet utgörs av en blandning av GROT, bark, spån och salix. Då bränslet lagras i en stor lada sker en utjämning av fukthalten till omkring 50%. Vid låglast eldas en mix bestående av cirka 40% GROT, 25% sågspån och 35% bark. Vid höglast eldas 54% GROT, 14% spån, 20% bark och 12% salix. Bränslet tillförs med pneumatiska kastapparater på fyra ställen.

Förbränningsegenskaper

Den vattenkylda vibrationsrosten är indelad i tre sektioner. Rostskakningen sker med intervall på ca 6 min och varar 7 sekunder. Intervallen på skakningarna beror på lasten och regleras därefter. Ångsotning av pannan sker ca 3 ggr per dygn och en sotningssekvens tar omkring 1,5 timmar. Driftsäsongen 98/99 startades i september med en eldstad fri från beläggningar. Efter 1:a november eldas pannan på låglast på natten och höglast under dagtid. Temperaturbilden i eldstaden varierar med laständringar och rostvibrationer. Tidvis har bränslet en större andel finfraktion vilket kan ge en lokalt förhöjd temperatur intill inkastarna.

Beläggningar

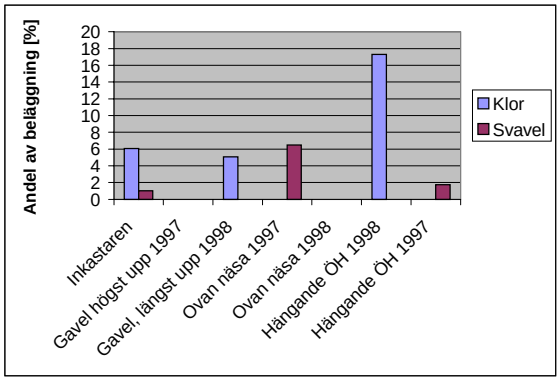
Strax efter nyår, närmare bestämt den andra veckan i januari 1999, skedde en kraftig tillväxt av beläggningar på eldstadsväggarna i Ena Krafts vibrationsrostpanna. Det växande påslaget märktes först på en förhöjd rökgastemperatur ut ur eldstaden. Figur 22 visar beläggningen som bildats strax ovanför bränsleinkastaren. Ett prov från detta påslag skrapades loss och skickades på analys. En misstanke riktades genast mot bränsleblandningen varför även prover av de aktuella bränslena togs för analys. Efter några dygn avtog dock tillväxten och beläggningarna eroderade bort.

Analysen av beläggningen jämfördes med analyser från prover som tagits i samband med sommarrevision av pannan 1997 och 1998. Vid sommarrevisionerna togs prover i fyra positioner i pannan; ovanför näsan, högst upp på panngaveln och på de hängande över-

hettarna. Alla beläggningar har bildats på kylda ytor i eldstaden. I Figur 23 visas den analyserade klor och svavelhalten i beläggningarna. I de äldre beläggningarna ökar klorhalten med ökad höjd i eldstadsrummet medan det omvända gäller för svavelhalten. I problembeläggningen är svavelhalten lägre.

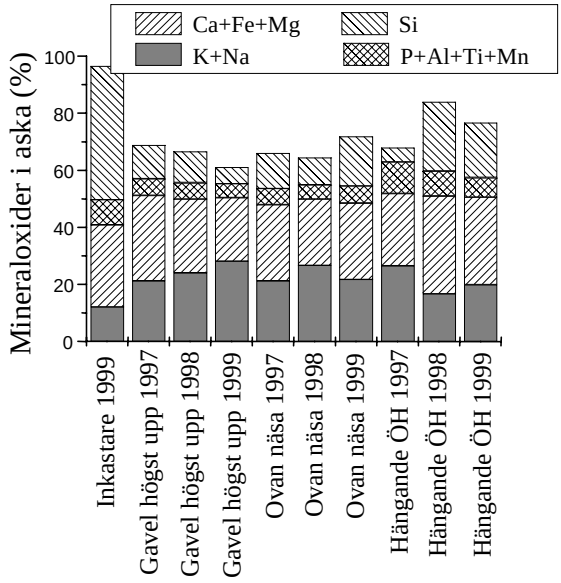


**Figur 22.** Beläggning ovanför bränsleinkastare i ENA Krafts vibrationsrostpanna.
*Deposits above stoker in ENA Krafts vibrating grate boiler.*

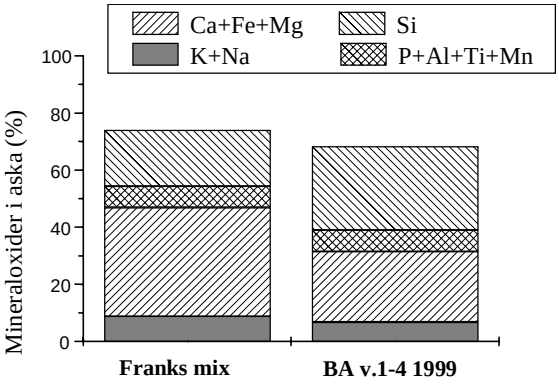



**Figur 23.** Klor- och svavelhalt i analyserade beläggningar.
*Chlorine and sulphur in analysed deposits.*

I Figur 24 visas mineraloxidernas sammansättning för de sju olika beläggningarna. I den nya beläggningen, ”Inkastaren”, är andelen alkali (kalium och natrium) lägre än i de gamla beläggningarna. Andelen kisel, kalcium och aluminium är däremot högre i jämförelse med de gamla beläggningarna. Detta kan jämföras med bottenaskans sammansättning där kaliumandelen ökat något medan kalcium minskat sedan årsskiftet, Figur 25 dvs bottenaskan uppvisar den omvända trenden mot beläggningarna. Aluminium är den komponent som ökat i både beläggningen och bottenaskan. En undersökning med röntgendiffraktion visar att nyckelkomponenten i beläggningen troligen är $K_2Ca_2(SO_4)_3$.




**Figur 24.** Analyserade mineraloxider i beläggningar i ENA Krafts eldstad.
*Mineral oxides in deposits from ENA Krafts furnace.*




**Figur 25.** Jämförelse av uppskattad bottenasksammansrättning och analyserade.
*Comparison of estimated composition of bottom ash and analysed.*

En visuell bedömning av beläggningen visar på en ”blomkålsliknande” struktur vilket tyder på att beläggningen har uppkommit ur agglomerat av ”sammanklibbade” askpartiklar. Flera orsaker till en förändring i beläggningsbilden kan tänkas;

- Den totala mängden askpartiklar i eldstaden har ökat orsakat av GROT med hög finandel och med en hög andel mineraler till exempel jord, sand eller dylikt.
- Temperaturen och temperaturfördelningen i eldstaden kan ha förändrats som en följd av en ändrad partikelstorleksfördelning och därmed ändrat förbränningsbilden. Möjligen kan temperaturen ha varit så hög att alkaliklorider förångats.
- Askpartiklarnas sammansättning och därmed smälttemperatur har ändrats.
- Klor kan ha spelat en (osynlig) roll i bildningsmekanismen – en plötsligt ökad klorhalt i något av bränslena i mixen.

### 2.1.6 Resultat/diskussion

I föreliggande arbete kan det, i endast ett fall, visas att askans kemiska sammansättning påverkar avgången av beläggningsbildande ämnen. Det är för fallet med Lucernepellet där en hög halt av både klor och alkali leder till en alkaliavdrivning. I övriga testade bränslen varierar halterna av alkali och klor, trots detta kan ingen avdrivning konstateras vid rostförbränning. Skillnaden kan förklaras av alkali och klor är bundet på olika sätt i vedartade bränslen och i gräs, Lucerne.

Att beläggningar förekommer i rosteldade pannor är känt och i föreliggande arbete redovisas erfarenheter från Borås och Enköping. Snarare än förändringar i bränslets kemiska sammansättning, har man vid båda verken konstaterat en ökad askhalt och ökad andel finfraktion i bränslet i samband med att beläggningsproblem uppkommer. Fler askpartiklar och fler fina partiklar ger en förhöjd partikelkoncentration i gasfasen i eldstaden.

Sammanfattningsvis visar laboratorieförsöken att beläggningsinitierande ämnen inte förångas från bränslebädden i speciellt hög utsträckning under förbränning, samtidigt som erfarenheter från drift i stor skala visar på betydelsen av partiklar i gasfasen. Slutsatsen blir att medryckning av ask- och bränslepartiklar samt förbränning av de senare i gasfasen utgör en förutsättning för kraftig beläggningsbildning i eldstaden. En ökad andel bränslepartiklar i eldstaden leder till en ändrad förbränningsbild och lokalt förhöjda temperaturer, vanligen en förhöjd temperatur i övre delen av eldstaden. Detta kan i sin tur dels underlätta avgången av beläggningsinitierande ämnen från bränslepartikeln, dels leda till att omgivande flygaskpartiklar smälter och i olyckliga fall klibbar vid tubväggar.

Rekommendationer för att minska beläggningstillväxten i eldstaden blir utifrån föreliggande arbete att undvika bränslen med hög askhalt och framför allt att undvika bränslen med en onormalt hög andel finfraktion. Lufthastigheten i den sista sektionen av rosten kan hållas låg för att undvika medryckning av aska. Vidare bör strömningsbilden i eldstaden utformas så att medryckta partiklar inte hamnar nära eldstadens väggar. Ytterligare arbetet krävs för att visa vilka av bränslets egenskaper som påverkar beläggningsbildning i eldstaden. Är det bränslets asksammansättning, partikelstorleksfördelningen eller den totala askhalten som har störst inflytande på beläggningstendenser. Det är även av intresse att studera mekanismerna vid beläggningsbildning i detalj.

# 3 TILLSATSELDNING I AVFALLS-/BIOBRÄNSLE-PANNOR MED OJÄMN BRÄNSLEKVALITET.

## 3.1 Bakgrund

Enligt förslaget till EU-direktiv för avfallseldning som föreligger hösten 1998 [1] krävs att anläggningarna ska uppfylla kravet om en uppehållstid för rökgasen vid 850ºC under minst 2 sekunder efter den sista lufttillsatsen. Pannorna ska även vara försedda med stödbrännare som ska kunna sättas in om temperaturen sjunker. Det förefaller dock som om Kommissionen också kommer att acceptera alternativa lösningar som gör att emissionskraven klaras.

Det finns flera nackdelar med stödbrännarna, bland annat att de kan leda till en ökad emission då de inte är i drift men ändå måste kylas. Dessutom är installationen onödigt dyr och underhållskrävande. Enligt en utredning som TPS/ÅF gjort för RVF [2] kan ett alternativ vara att man tillför ett prima bränsle, till exempel flis, då temperaturen blir för låg. Problemet med flistillförseln är dock att det tar i storleksordningen en timme innan flisen passerat genom bränslestup, kommit ner på rosten och aktivt bidrar till att höja temperaturen i eldstaden.

För att slippa installera stödbrännare - med de nackdelar dessa medför – föreslår TPS att exempelvis enbart olja eller gas ska blåsa in i anslutning till pannans flamförbränningszon. Man bör kunna utnyttja exempelvis portar för låg sekundärluft eller rökgasåterföring strax över bäddnivån. Med detta tillvägagångssätt får man en mycket snabb metod att klara av kortvariga temperatursvackor. Metoden kan givetvis - vid långvariga störningar - kompletteras med inblandning av prima bränsle i det fuktiga bränslet.

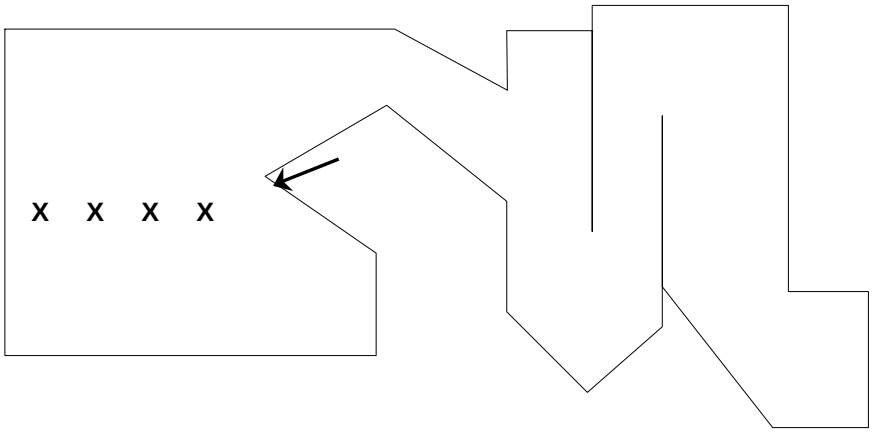
Om tillsatsbränslet tillförs zonen där flamförbränningen normalt sker får man dessutom fördelen av att temperaturen på bränslebädden och inmurningen bibehålles samt att den termiska belastningen i princip behålls oförändrad. Detta är en klar fördel jämfört med alternativet med stödbrännare. Dessa måste troligtvis installeras i övre delen av eldstaden för att inte störa förbränningen på rosten och höjer då endast rökgastemperaturen, utan gynnsamma effekter på bädden och inmurningen i nedre delen av eldstaden.

Eftersom metoden inte förefaller att kräva några omfattande ombyggnader av pannan/-ugnen kan man också tänka sig att utnyttja den i biobränsleeldade pannor där man ofta har problem med störningar på grund av till exempel bränslepartier med för hög fukthalt.

## 3.2 Målsättning och genomförande

## 3.3 Provanläggningen

Borlänge Energis AB avfallspanna P6 i Bäckelundsverket valdes som provanläggning. Pannans effekt är 18 $MW_{th}$ och den är utrustad med en rörlig planrost. Rostarean är 27 $m^2$ och eldstadens totala volym är cirka 220 $m^3$. Bränslet består av källsorterat avfall, däck och plast. Ugnen är kopplad till en oljepanna vars konvektionsytor utnyttjas (Figur 26). Den sitter asymmetriskt monterad via en kanal som expanderar i höjdled och smalnar av från ena sidan.




**Figur 26.** Skiss av pannsystem fram till pannans konvektionsdel. X och pil markerar möjliga positioner för bränslemunstycke.
*Layout of combustor up to convective section of boiler. X and arrow marks possible locations for fuel nozzle.*

### 3.3.1 Provinstallationen

Vid installationen i panna P6 användes en oljelans med munstycke som monteras i nederkant på en av de centralt placerade sekundärluftdysorna på pannans baksida/näsa (Figur 27). Den installerade oljeeffekten är 5 MW, dvs drygt 25% av pannans levererade värmeeffekt.



**Figur 27.** Luftdysorna i näsan inifrån pannan. Lansen för tillsatseldning är installerad vid ringen.
*Air nozzles from inside furnace. Location for added fuel nozzle marked with a ring.*

Det bränsle som används för tillsatseldning ska ha relativt högt värmevärde. Vid försöken valdes olja eftersom det finns tillgängligt vid anläggningen. Den nödvändiga installerade effekten fastställs till 5 MW baserat på trolig ökning av fukthalten i bränslet och effektbortfallet från rosten.

För att välja position för lansarna och vilka munstycken som ska användas utnyttjades erfarenheter från driften (under försöken), fysisk modellering (Figur 28) och bestämning av oljedroppars storlek och spridningsvinkel.



**Figur 28.** Syra-/basmodellering av panna P6 med befintliga luftregister. Röda (mörka) områden är ej slutförbränd gas (från tidigare Branschforskningsprogram [3]).
*Acid-/base simulation of boiler P6 with existing air supply. Red (dark) area is not completely burnt out gas. From previous Branschforskningsprogram [3].*

### 3.3.2 Driftförsök och resultat

TPS och Borlänge Energi AB genomför driftförsök med eldningsolja 1 VRD-olja. Försöken visar att VRD-olja fungerar på motsvarande sätt som eldningsolja 1.

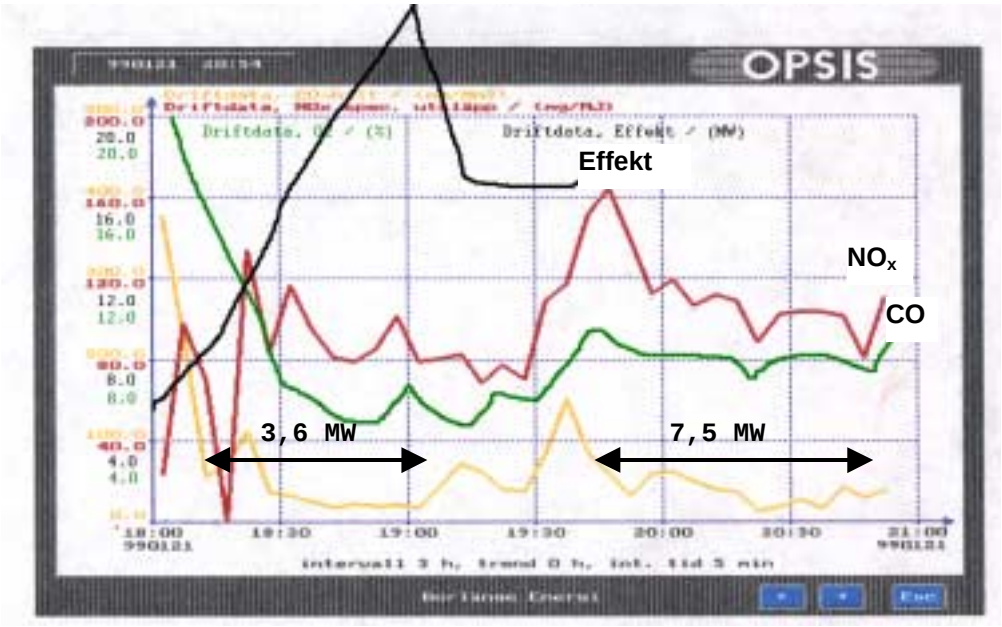
Försöken i panna P6 visar att man kan få gynnsam effekt av tillsatseldningen vid relativt små effekttillskott. Redan vid 2 MW (10-15% effekttillskott) stabiliseras $NO_x$- och CO-nivåerna och förbränningen av det fuktiga/dåliga bränslet på rosten förbättras. Försöken visar även att det är möjligt att tillsätta stora mängder tillsatsbränsle (5 MW) utan att mängden $NO_x$ och CO i avgaserna ökar.

Begränsande för effekttillskott är pannans förbränningsegenskaper och storleken på de värmeupptagande ytorna samt anläggningens fläkt- och filterkapacitet.

Försöken visar inte någon momentan höjning av temperaturen i eldstaden när tillsatseldning sätts in. Däremot höjs temperaturen i eldstaden med mellan 100°C och 200°C, beroende på effekttillskott, under 15 minuter efter det att tillsatseldningen satts in. En förklaring till detta kan vara att såväl driftinstrumenten och den sugpyrometer vi använde mäter på pannans högra sida, medan lansen för tillsatseldningen är placerad något till vänster om pannans centrum. De varmare förbränningsgaserna kan passera ut ur pannan på den sida där temperaturen inte mäts. Tidigare studier av anläggningen visar att man även utan tillsatseldning har en snedfördelning i temperatur ut ur pannan.

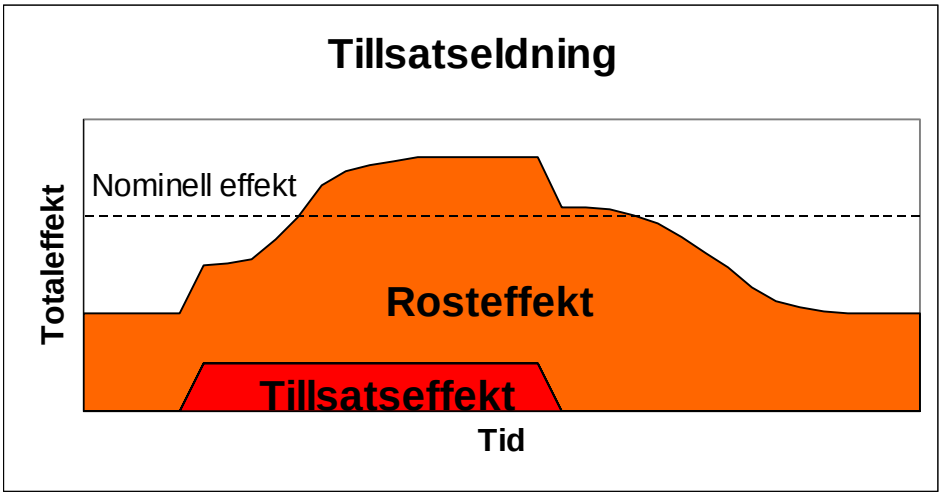
Med fuktigt/dåligt bränsle på rosten minskar emissionen av $NO_x$ och CO vid tillsatseldning (Figur 29). Dessutom stabiliseras nivåerna och svängningar jämnas ut.

Med torrt/bra bränsle på rosten ökar emissionen av $NO_x$ och CO vid tillsatseldning. En tänkbar orsak till detta är att man får en lokalt hög temperatur i oljeflamman vilket bidrar till $NO_x$-bildning.




**Figur 29.** Minskning och stabilisering av $NO_x$- och CO-emissionerna vid tillsatseldning. Det framgår även att effekten påverkas högst avsevärt (mer än tillförd oljeeffekt).
*The diagram illustrates how $NO_x$- and CO-emissions drops and stabilises when co-firing. The output is increase more than what could be accounted for by the added oil.*

Tillsatseldning gör det möjligt att snabbt öka produktionen när bränslet på rosten är fuktigt/dåligt. Inledningsvis erhåller man en momentan effektökning. Allt efter som bränslet på rosten torkar - till följd av tillsatseldningen - ökar effekten ytterligare utan att mängden oförbränt i bottenaskan ökar. Det är möjligt att bibehålla den högre effekten trots att bränslet är fuktigt. Driftförsöken visar att den levererade effekten kan öka med upp till 100% inom en timme. Vid det aktuella fallet låg den maximalt möjliga effekten utan tillsatseldning - utan att få oförbränt i askutmatningen - långt under pannans maxeffekt. Försöken visar också att det är möjligt att öka pannans kapacitet med hjälp av tillsatseldning. Med maximal effekt på rosten visar ett kortvarigt försök att effekten går att höja ytterligare om fläkt- och filterkapaciteten räcker till (Figur 30).




**Figur 30.** Diagrammet visar hur tillsatseldning fungerar principiellt.
*A principal illustration of the effect of co-firing.*

Observationer i eldstaden visar att förbränningen av tillsatsbränslet sker i flamförbränningszonen, vilket är önskvärt. Värmen från förbränningen kommer bränslet på rosten och inmurningen i nedre delen av eldstaden till godo. Temperaturen på inmurningen behålls eller ökar och bränslet torkar upp snabbt och brinner därmed bättre.

Vidare ser man att flamman går ner mot bränslebädden (Figur 31). Det går inte att säga om någon del av oljan når ända ner till bränslebädden, men det viktiga är att förbränningen sker i nära anslutning till bränslebädden.



**Figur 31.** Den nedåtgående lysande flamma från tillsatseldningen samverkar med de brinnande pyrolysgaserna från rosten. Bilden är tagen från askutmatningen mot bränslestupet. *Co-firing flame from above interact with burning volatile products from solid fuel. Picture from ash-end of furnace.*

## 3.4 Slutsatser

Projektet visar att tillsatseldning fungerar på avsett sätt i panna P6 vid Borlänge Energi AB. Det är möjligt att höja eldstadstemperaturen med 100°C till 200°C beroende på tillsatseffektens storlek. Enligt de temperaturmätningar som genomförts i eldstaden sker detta inte momentant vilket det teoretiskt bör göra. När systemet inte är i drift påverkas inte förhållandena i eldstaden på något sätt och det är sannolikt så att strömningsförhållandena i eldstaden inte påverkas när tillsatseldningen är i drift. Tillsatseldning stabiliserar eller sänker $NO_x$- och CO-emissionerna främst vid eldning av fuktigt bränsle.

Driftförsöken visar också att det är möjligt att öka den uttagna effekten med upp till 100% utan ökade mängder bottenaska vid förbränning av fuktigt bränsle. Det beror på att bränslet på rosten torkas upp med hjälp av den temperaturhöjning tillsatseldningen ger i nedre delen av eldstaden. Detta leder till att det går att förbränna samma mängd fuktigt bränsle som torrt. Det går också att snabbt öka effektuttaget genom att använda tillsatseldning vid normala driftförhållanden. På så vis är det möjligt att fånga upp tillfälliga effekttoppar utan att behöva ta ytterligare produktionsanläggningar i drift.

Förutom de praktiska resultaten från driftförsöken har en metod för att utforma system för tillsatseldning tagits fram. Tillsammans med de erfarenheter projektet givit är det fullt möjligt att utforma system för tillsatseldning i de flesta rosteldade anläggningar med syfte att kompensera variationer i bränslekvaliteten eller för att ge ett extra effekttillskott under en kortare eller längre tid.

Det förefaller också vara möjligt att göra en installation av tillsatseldning robust, säker och kostnadseffektiv och underhållskostnaderna ser ut att vara låga. Munstycken kan installeras i befintliga luftportar och/eller i fenorna mellan tuberna och skyddas av luftströmmen speciellt vid montering i luftportar.

I detta projekt har syftet varit att visa på en möjlig metod att förenkla tillsatseldning för i första hand avfallspannor. Undersökningen har dock inte varit uttömmande och några frågeställningar återstår att besvara. Det har dock varit omöjligt att inom de tillgängliga projektramarna belysa dessa.

## 3.5 Referenser

1 **Förslag till rådets direktiv om avfallsförbränning**.
(98/C 372/07)

2 *R. Schuster, N. Berge, B. Strömberg*
**Environmental Optimisation of Waste Combustion**.
RVF Project. Avfallsförbränningsgruppens rapport nr 3, 1998.

3 *A. Malmgren, B. Ljungdahl*
**Flerstegsförbränning i avfallspanna på Bäckelundsvägen i Borlänge.**
TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 1997/98.
TPS-98/16, Studsvik 1998.

# FB-TEKNIK

Inom Branschprogrammet 96/97 belystes strömningsrelaterade problem i eldstaden på både FB- och CFB-pannor. Orsaken till dessa beror till stor del på sned flyktavgång i bädden. Förbränningen sker ofta över en begränsad del av eldstadens tvärsnitt medan luften tillförs så jämnt som möjligt över den. Konsekvensen kan bli ökad korrosions-errosion och ojämn effektfördelning med lokala övertemperaturer som i sin tur kan leda till sintringar och påslag men även ökad emission av $NO_x$. Cyklonen kommer till en del att få vara barriären för slutförbränning av koloxid, kolväten och små medryckta bränsle-partiklar. Detta medför i sin tur att temperaturen kan vara ganska hög även i cyklonen vilket ökar risken för påslag och $NO_x$-bildning även där.

Det finns fler observationer av att SNCR i CFB-pannor ofta leder till ökad emission av CO. Inom ett av projekten undersöks möjligheten att förändra SNCR-systemet så att den goda $NO_x$-avskiljningen behålls men utan den negativa effekten på CO-emissionen.

Alkali från biobränsleaskan ackumuleras i bädden och vid en tillräcklig koncentration och temperatur kan en bäddsintring uppkomma. Detta problem har bearbetats inom ett projekt där syftet har varit att ta fram enkla metoder att förutsäga problembränslen men också att identifiera motmedel mot sintring.

Av årets projekt har styrgruppen beslutat att projektet Sintring av Bäddmaterial skall redovisas i sin helhet då den innehåller en stor mängd allmängods beträffande hur askrelaterade problem skall kunna angripas både från en teoretiskt och experimentell utgångspunkt. Detta projekt publiceras i en separat Värmeforskrapport med samma titel som projektet. I denna rapport finns enbart ett kort sammandrag.

# 4 SINTRING AV BÄDDMATERIAL (FORTSÄTTNING)

## 4.1 Bakgrund

Vid förbränning av kol eller torv i fluidbäddpannor, bubblande (BFB) eller cirkulerande (CFB) förekommer sällan eller aldrig agglomererings- och sintringsproblem. Vid en övergång till biobränslen har dock risken ökat. Asksammansättningen i många biobräns-len är sådan att delar av askan kan föreligga som smälta redan vid de låga bäddtem-peraturer som vanligen tillämpas vid FB-förbränning (typiskt 850°C). Även reaktioner mellan askkomponenter och bäddmaterialet kan förekomma och har funnits ligga bakom en del fall av bäddagglomerering med defluidisering och bäddsintring till följd. En bra sammanfattning av bäddsintring och mekanismerna finns i Värmeforskrapport 607.

Det är därför angeläget att kunna bedöma risken för en bäddagglomerering i förväg. Detta möjliggör i så fall anpassningar av driften, t.ex. sameldning och bränsledosering, val av bäddtemperatur, användning av additiv, val av alternativt bäddmaterial etc.

## 4.2 Målsättning

Målet med projektet har varit att finna metoder att enkelt kunna förutse benägenheten till sintring för ett bränsle. I första hand eftersträvas en enkel experimentell eller analytisk metod som kan användas på fjärrvärmeverken. I andra hand en enklare experimentell metod som kan utföras utan allt för stora kostnader. För problembränslen undersöks också möjligheterna att förbättra situationen genom sameldning eller tillsats av additiv.

## 4.3 Sammanfattning av projektet

Tre metoder att prediktera risken för bäddagglomerering vid biobränsleeldning har studerats. Två av metoderna har varit experimentella, den tredje en teoretisk ansats.

Den första metoden, ”degeltester”, är en enkel undersökningsmetod för karaktärisering av bränslen till en låg kostnad. Metoden indikerar var och när det finns problem men saknar önskad reproducerbarhet. Den innehåller ett metodbetingat element av subjektivitet och operatörsberoende. Den troligt allvarligaste formen av agglomerering, sandkorn bundna till varandra utan synligt inslag av aska, är den form som lättast kan diagnostiseras med metoden. Metoden och kan användas för att enkelt sortera ut speciellt svåra problembränslen.

Den andra metoden där bränslen provas vid förbränningsförsök i sintringsreaktor är i högsta grad användbar och resultaten är relevanta för verkliga driftsituationer, dock till priset av större tidsåtgång och betydligt dyrare provutrustning. Metoden lämpar sig dock inte, åtminstone inte utan vidare utveckling, som rutinmässig analys på verken. Prover bör genomföras i en och samma apparatuppställning där fasta rutiner används och där en viss grad av automatisering kan användas. Detta medför begränsningar i hur snabbt provresultat kan tas fram. Det största värdet med metoden torde vara vid undersökning av nya bränslekvaliteter och additiv eller för att identifiera orsaken till redan uppkomna problem. Det finns en potential för utveckling av utrustning som kan användas för automatiserade prover och i sådan skala att den skulle kunna införlivas med provutrustningen på större värmeverk. Ett skäl skulle kunna vara att det ökar möjligheterna att köpa spotbränslen med minskad risk för driftproblem.

Den tredje teoretiska metoden är att utvärdera bränsle- och askanalysdata genom en rad nyckeltal. Idén har hämtats från koleldning, där liknande tal finns definierats som slaggnings- och foulingindex. Ett stort antal presumtiva nyckeltal har provats mot experimentella resultat och erfarenheter från drift. Vissa av dem kan verkligen ha ett prediktivt värde, men någon enkel algoritm för ”beräkning” av kritiska temperaturer utifrån nyckeltalen har ej hittats.

Bland undersökta biobränslen har det konstaterats att snabbväxande bränslen och energigrödor ofta har en tendens till sintring vid låg temperatur. Minst problem erhölls med torv samt med vissa typer av träavfall (flis, GROT, bark). Odlade träbränslen (salix) låg däremellan. Sameldning är en utmärkt metod att minska problemen vid användning av högriskbränslen. Så kan t.ex. 30% lusern (omöjligt att elda ensamt ens vid 800°C) eldas tillsammans med 70% GROT vid 850°C.

Av tre provade additiv visade sig kaolin vara bäst, kalcit (kalk) var sämre och kyanit overksammat. Jämförelsen mellan kaolin och kyanit har visat att det troligen är kaolinets särskilda struktur som ligger bakom den positiva effekten. Olivinsand visades vara mer motståndskraftigt mot bäddagglomerering än Baskarpsand och silversand.

Detta arbete publiceras i sin helhet som en separat Värmeforskrapport med samma titel.

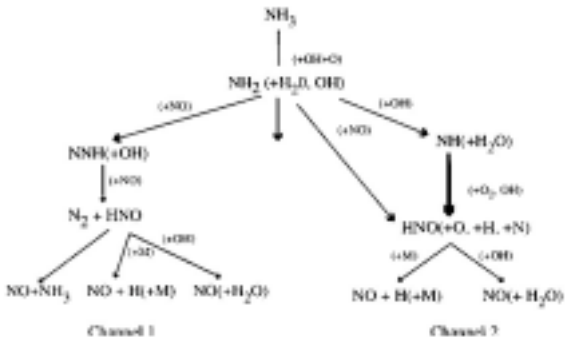
# 5 SNCR I HETA CFB/FB-CYKLONER.

## 5.1 Bakgrund

Vanligen reduceras NOx-emissionen från förbränning genom tillsats av ammoniak eller Urea till de heta rökgaserna (SNCR). I CFB-pannor injiceras ammoniaken oftast i cyklon-inloppet. Emellertid visar erfarenheten att NOx-reningen ibland är mycket ineffektiv, speciellt för pannor med höga koncentrationer av CO och THC i inloppet som en följd av stråkbildning eller dålig omblandning i eldstaden. Då gaserna blandas i cyklonen kommer CO och kolvätena att brinna och orsaka höga lokala temperaturer och radikaler vilka båda kommer att påverka SNCR reaktionen. Detta leder till låg reduktion av NO eller i värsta fall till en bildning av NO från den tillsatta ammoniaken. I detta projekt har gasblandningen i cykloner studerats i en experimentuppställning och kombinerats med modellberäkningar av SNCR-reaktionen. Projektresultaten har sedan verifierats genom försök i en kommersiell CFB-panna.

### 5.1.1 SNCR reaktioner

Tillsatt ammoniak reduceras av OH-radikaler till $NH_2$-radikaler enligt det förenklade reaktionsschemat i Figur 32 [1]. Beroende på den lokala gastemperaturen och sammansättningen finns två möjliga reaktionsvägar som visas i figuren. NO-reduktionen har ett optimum inom ett snävt temperaturfönster runt 900°C [2]. Vid låga temperaturer då förbränningen upphört och radikalkoncentrationen är relativt låg favoriseras den vänstra reaktionsvägen i figuren. Detta är den önskvärda reaktionsvägen då varje tillsatt ammoniakmolekyl reducerar en NO.




**Figur 32.** Schema för $No_x$-reduktion.
*Reaction path for $NO_x$-reduction.*

Vid höga temperaturer då förbränningen fortfarande pågår och då radikalkoncentrationen är hög kommer den högra reaktionsvägen att favoriseras vilken i värsta fall leder till att NO bildas av tillsatt ammoniak. Noterbart är att det första steget när $NH_3$ omvandlas till $NH_2$-radikaler beror av OH-radikaler som bildas vid förbränningen. Resten av reaktionerna enligt väg 1 eller 2 är självförsörjande på radikaler.

## 5.2 Målsättning

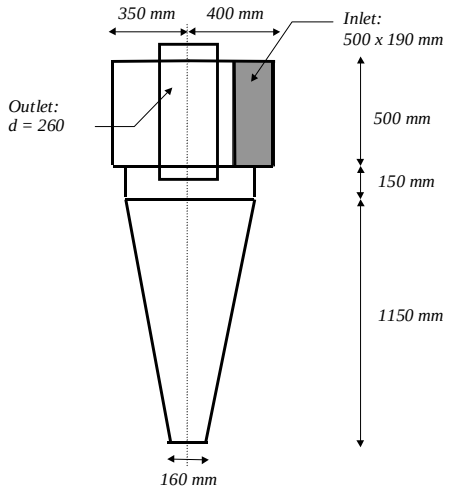
Syftet med detta projekt är att undersöka möjligheten att förbättra $NO_x$-reduktionen med SNCR i CFB-pannor genom att optimerad placeringen av injicering av reduktionsmedel i cyklonen.

## 5.3 Experimentellt

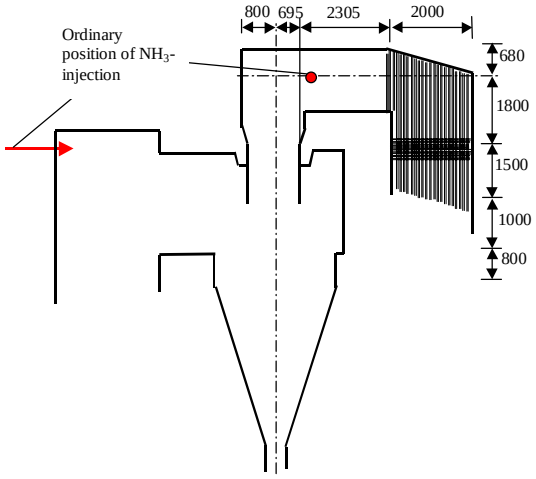
### 5.3.1 Laboratorietest

Gasomblandningen undersöktes i en modellcyklon vid rumstemperatur (Figur 33). För att få samma omblandning i makroskala som i en fullstor CFB cyklon var experiment-utrustningen konstruerad för ett Reynoldstal, *Re*, av samma storleksordning i båda. ($Re \approx$ 180 000 – 250 000). Vid testen användes ett centralrör som täckte 2/3 av cykloninloppet. För att förenkla förhållandena genomfördes försöken utan partiklar i gasen.

Med hjälp av spårgasförsök med metanpulser, som tillsattes i cykloninloppet och i cyklonens yttre och inre virvel, kunde gasomblandningen utvärderas som ett Peclettalet, *Pe*. Koncentrationsprofilen mättes även på tre nivåer vid kontinuerlig spårgastillsats i diskreta punkter i inloppet.




**Figur 33.** Experimentcyklon.
*Experimental cyclone.*




**Figur 34.** Läge för ammoniakinjektion i CFB-cyklon i Jämtkraft-pannan.
*Positions for ammonia injection in full scale CFBC cyclone.*

### 5.3.2 Försök i full skala

Ammoniak tillfördes i olika positioner i cyklonen till Jämtkrafts CFB-panna. Eldstadshöjden är 11,8 m och tvärsnittet har måtten 3,1 x 3,1 m. Pannan har en okyld helt keramikinklädd cyklon. Bränsletillförseln sker i återmatningen från cyklonen vilken mynnar i eldstaden 0,3 m över bäddbotten. Bäddtemperaturen kan styras med rökgasåterföring och är vanligen 800-870°C. Cyklonen har en diameter på 3,2 m och en total höjd på 7,3 m. Vid proven kördes pannan vid 15-20 MW last och bränslet bestod av en blandning av GROT, torv, bark och sågverksavfall.

I Figur 34 ses läget för den förskjutbara ammoniaklansen som användes vid försöken men också den fasta ammoniakinsprutningen som används vid normal drift. Vid fullast är cyklontemperaturen typisk mellan 900 och 925°C. Gasflödet är ca 41 000 $m^3_n/h$ och uppehållstiden ca 0,75 sekunder. Cyklonens inloppssnäcka har en höjd av 2,5 m och en bredd på 1 m. Reynoldstalet blir där ca 180 000.

Ammoniaklansen bestod av en vattenkyld sond som kunde skjutas ner i centrum av cyklonen från taket. En 25%-ig ammoniaklösning sprutades in i cyklonen genom munstycken i sondspetsen.

Rökgasens halt av $O_2$, CO och $NO_x$ och gastemperaturen i cyklonutloppet mättes kontinuerligt och lagrades som 10 sek medelvärden. Ammoniakslippet mättes med våtkemisk metod sedan rökgasen kylts till ca 150°C. Last, luftfördelning, bäddtemperatur och ammoniakflöde mättes var 15 min.

## 5.4 Modellering av SNCR-reaktionerna

Programpaketet CHEMKIN [3] användes för att modellera reduktionen av $NO_x$. Vi denna förutsattes att det råder fullständigt omblandning vid reaktionen. Tre fall med olika gassammansättning enligt Tabell 2 undersöktes. Eftersom Jämtkraftpannan har rökgaskondensering och befuktning är vattenhalten i rökgasen hög i alla undersökta fall. Temperaturen varierades i intervallet 800-1100°C och uppehållstiden mellan 0,3 och 1,1 sekunder. Däremot hölls $NH_3$/NO-förhållandet konstant till 2. För att undersöka inverkan av initialhalten av OH-radikaler provades tillsatser av 10 och 100 ppm till rökgasen.

**Tabell 2.** Rökgas vid CHEMKIN simulering.
*Fluegas at CHEMKIN-simulation*

| | | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|---|---|---|---|---|
| $O_2$ | [%] | 2,32 | 2,36 | 3,00 |
| $H_2O$ | [%] | 22,33 | 22,32 | 22,00 |
| $CO_2$ | [%] | 14,07 | 13,98 | 13,00 |
| $N_2$ | [%] | 61,23 | 61,20 | 60,86 |
| CO | [ppm] | 100 | 1 000 | 10 000 |
| $CH_4$ | [ppm] | 0 | 0 | 1 000 |
| NO | [ppm] | 133 | 133 | 133 |

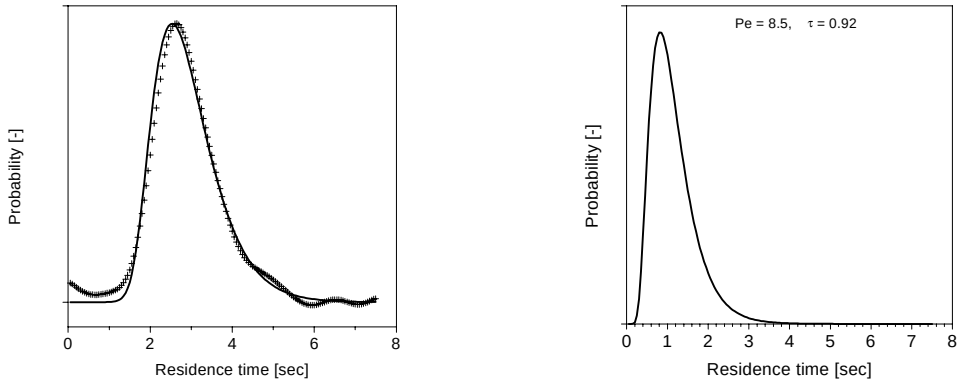
## 5.5 Resultat

### 5.5.1 Gasblandning i experimentcyklon

Peclettalet utvärderades från de uppmätta pulssvaren i cyklonutloppet. Genom att ta hänsyn till utjämningen i provtagningssystemet kunde *Pe* successivt anpassas till den förväntade uppehållstidsfördelningen för ett öppet system [4] som:

$$C(t) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{Pe\,\tau}{\pi t}}\, e^{-\left[\frac{Pe\tau}{4t}\left(1-\frac{t}{\tau}\right)^2\right]} \qquad (1)$$

där $C$ är gaskoncentrationen, $t$ är uppehållstiden i sekunder och $\tau$ är en tidskonstant. Det var möjligt att åstadkomma en mycket god överensstämmelse mellan den mätta och anpassad uppehållstidsfördelning vilket kan ses av exemplet i Figur 35.




**Figur 35.** Exempel på mätt och anpassad uppehållstidsfördelning genom cyklon och provtagningssystem till vänster. Till höger finns uppehållstidsfördelningen för enbart cyklonen.
*Example of measured and fitted residence time distribution through cyclone and sampling system (left) and residence time distribution within cyclone alone (right).*

Medelvärde för de utvärderade *Pe*-talen visas i Tabell 3. Resultatet visar att den totala omblandningen i cyklonen beskrivs med *Pe*=9. Spårgas i den yttre virveln resulterade i *Pe*=4,5 till 5 medan injektion i den inre virveln gav ett tio gånger lägre *Pe*. Den uppmätta koncentrationsprofilen i cyklonen visade på en ganska långsam omblandning i den yttre

virveln och att den huvudsakliga omblandningen skedde vid gasens övergång från den yttre till den inre virveln.

**Tabell 3.** Korrelerade modelkonstanter för olika positioner för spårgasinjektion.
*Correlated model constants (average) for different locations of tracer injection.*

| | Distance from cyclone roof [mm] | *Pe* [-] | τ [s] | Average time [s] |
|---|---|---|---|---|
| Total cyclone | - | 8.9 | 1.04 | 1.27 |
| From cyclone | 600 | 4.46 | 0.70 | 1.01 |
| outer vortex | 850 | 5.15 | 0.58 | 0.81 |
| From cyclone | 1300 | 0.40 | 0.04 | 0.24 |
| inner vortex | 1600 | 0.46 | 0.04 | 0.23 |

De experimentellt funna *Pe*-talen för den inre virveln, 0,4, kan jämföras med det störst möjliga värdet vilket uppstår under isotropa förhållanden enligt [5]:

$$Pe_{\max} = \frac{d_h L}{s^2} \qquad (2)$$

där $d_h$ är den hydrauliska diametern för den inre viveln, $L$ är längden för omblandningszonen och $s$ är det avstånd gasmolekylerna statistisk rör sig sidleds.

Då $Pe_{max}$ beräknas för den inre virveln och ersätter avstånden s och L med centralrörets diameter och längd får $Pe_{max}$ ett värde 2 för experimentcyklonen. Detta värde är av samma storleksordning som det för kommersiella CFB-cykloner. Detta innebär att inom den inre virveln är omblandningen tillfredsställande.

### 5.5.2 Simulering av SNCR reaktionerna

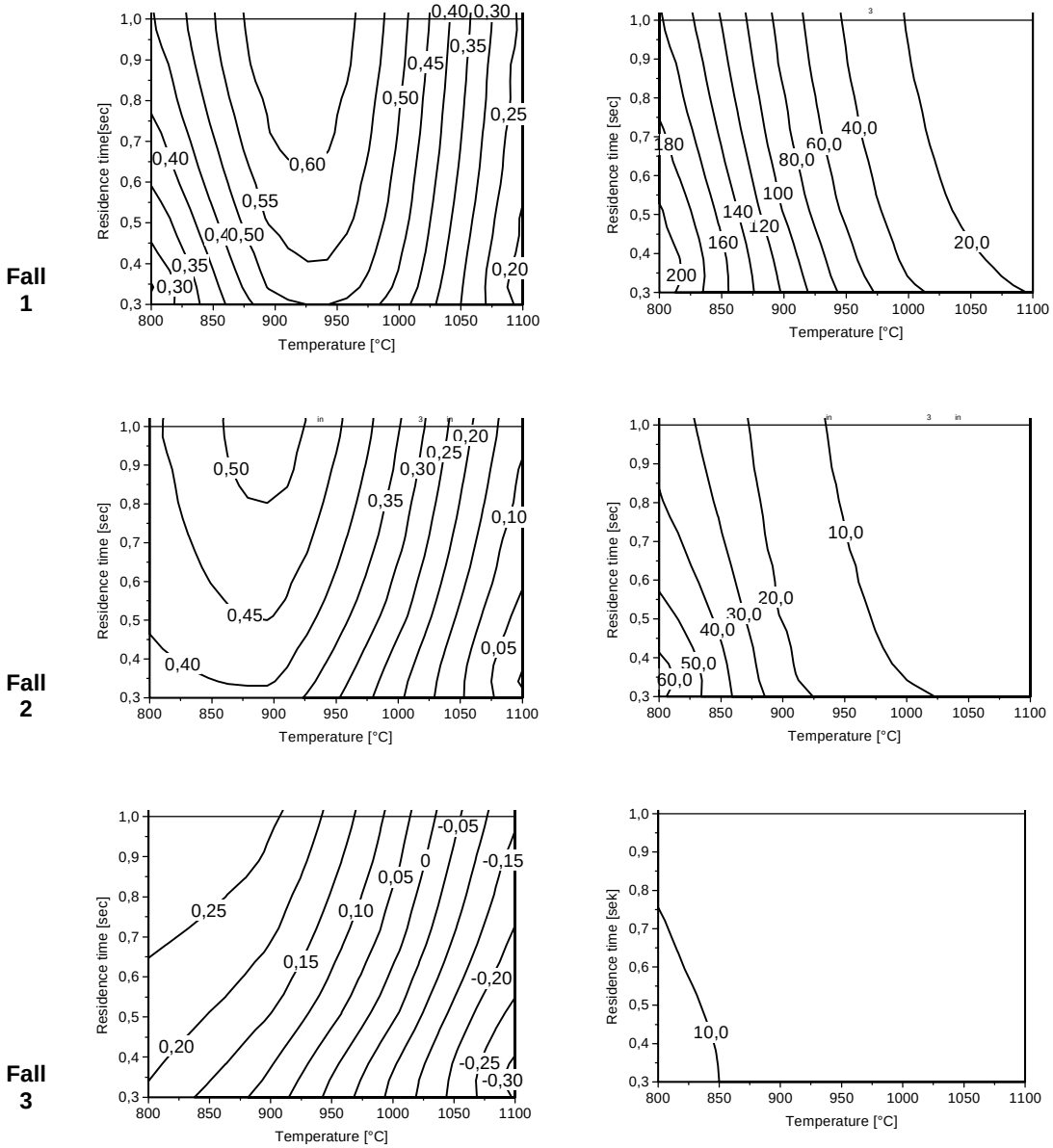
$NO_x$-reduktionen och ammoniakslippet beräknat enligt förutsättningarna i Tabell 2 visas som anpassade isometriska kurvor i Figur 36. Fall 2 fick det mest gynnsamma resultatet vid simuleringen, optimala förhållanden för reduktion finns vid 900°C. Vid den temperaturen är $NO_x$-reduktionen 40% vid 0,3 sek uppehållstid och ökar till 50% när tiden ökar till 1 sek. Motsvarande ammoniakslip är 30 ppm. Då halte CO och kolväten i gasen ökas i gasen, fall 3, flyttas det optimala temperaturfönstret till lägre temperaturer, med optimum utanför beräkningsområdet. Om CO-halten minskas, fall 1, flyttas temperaturfönstret mot högre temperaturer och optimum påträffas för detta fall vid ca 925°C. Samtidigt syns en trend till ökat ammoniakslip. Om den initiala halten OH-radikaler ökas leder till en minskad optimal temperatur och en minskande ammoniakslip. I Tabell 4 finns den beräknade $NO_x$-reduktionen och ammoniakslippet för två uppehållstider, 0,3 och 1 sek.

Sammanfattningsvis är den bästa $NO_x$-reduktionen 40-50% vid en cyklontemperatur på 900°C och mindre än 1000 ppm CO. Vid dessa förhållanden kommer en ökad förekomst av OH-radikaler att öka reduktionen av NO.

**Tabell 4.** Beräknad $NO_x$-reduktion och ammoniakslip.
*Calculated $NO_x$-reduction and $NH_3$-slip.*

| | Temperatur | Fall 1** $t_1/t_2$ | Fall 2 $t_1/t_2$ | Fall 3 $t_1/t_2$ | Fall 1a* $t_1/t_2$ | Fall 1b* $t_1/t_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $NO_x$-reduktion | 800°C | 25/45 | 35/45 | 20/25 | 30/50 | 55/60 |
| [%] | 900°C | 50/60 | 40/50 | 20/25 | 50/65 | 55/65 |
| | 100 °C | 45/50 | 20/35 | -10/5 | 45/50 | 40/50 |
| $NH_3$-slip | 800°C | 210/160 | 60/35 | 15/10 | 180/150 | 110/90 |
| [ppm] | 900°C | 120/80 | 25/20 | <10 | 110/70 | 60/40 |
| | 1000°C | 40/20 | 10/<10 | <10 | 40/20 | 30/10 |

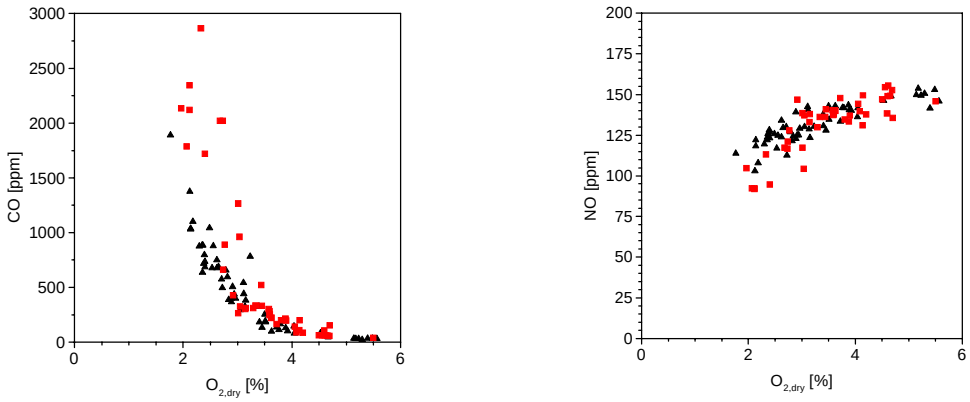
** a – 10 ppm OH added, b – 100 ppm OH added; ** $t_1$ = 0.3 second, $t_2$ = 1.0 second*




**Figur 36.** Beräknad $NO_x$-reduktion (till vänster) och ammoniak slip (till höger), Tabell 2.
*Calculated $NO_x$-reduction (left) and $NH_3$-slip (right) versus temperature and residence time for gas compositions, Table 2*.

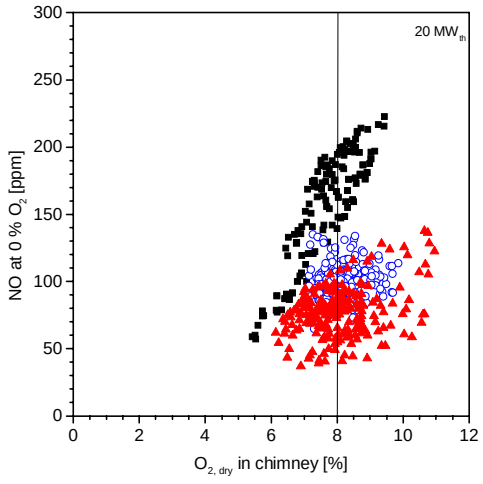
### 5.5.3 Fullskala prov

Koncentrationen av $O_2$, CO och $NO_x$ mättes i cyklonutloppet i två positioner (1,3 och 2,1 m nedströms om centralrörets inlopp) vid 20 MWth last, se Figur 37. Under provperioden ökade gastemperaturen ca 80°C från inlopp till utlopp på cyklonen vilket förklaras av förbränningen. Kombinationen av gastemperatur och gassammansättning hade i beräkningarna resulterat i en $NO_x$-reduktion på 50% och en låg ammoniakslip.




**Figur 37.** CO och $NO_x$ mot $O_2$ mätt i cyklonens centralrör vid 20 MWth last; ■ 1.3 m nedströms om centralrörets inlopp, ⑩ 2.1 m nedströms om centralrörets inlopp.
*CO and $NO_x$ versus $O_2$ measured in the cyclone vortex finder at 20 MWth load; ■ 1.3 m downstream vortex finder inlet, ⑩ 2.1 downstream vortex finder inlet.*

Prov med tillsatts av ammoniak 1 m nedströms om centralrörets inlopp genomfördes vid 20 $MW_{th}$ last. I Figur 38 har mätt och normaliserad NO-koncentration ställts mot $O_2$ mätt i skorsten för fallen med ingen ammoniaktillsats, med en $NH_3$-tillsats av 3,5 kg/h och med en tillsats av 4,7 kg/h.




Evaluation in range 7 – 9 % $O_2$
(95% confidence level)

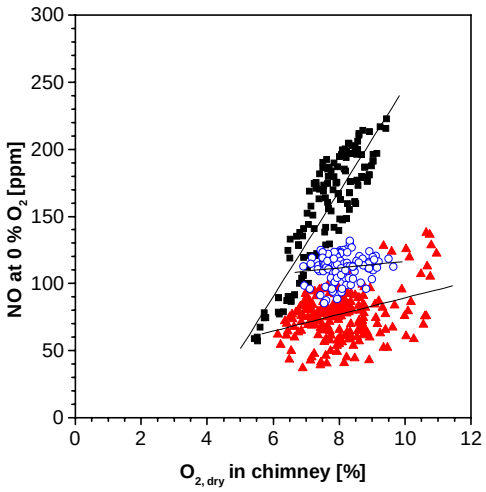
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Reference | | | | |
| Outlet Temperature | 994 | ± | 2 | °C |
| NO (0% $O_2$) | 172 | ± | 4 | ppm |
| CO (0% $O_2$) | 46 | ± | 4 | ppm |
| 3.5 kg/h ammonia added | | | | |
| Outlet Temperature | 983 | ± | 1 | °C |
| NO (0% $O_2$) | 102 | ± | 1 | ppm |
| CO (0% $O_2$) | 40 | ± | 1 | ppm |
| $NH_3$-slip | 10 | | | ppm |
| $NO_x$ reduction | 41 | | | % |
| 4.7 kg/h ammonia added | | | | |
| Outlet Temperature | 987 | ± | 2 | °C |
| NO (0% $O_2$) | 76 | ± | 2 | ppm |
| CO (0% $O_2$) | 52 | ± | 4 | ppm |
| $NH_3$-slip | 13 | | | ppm |
| $NO_x$ reduction | 56 | | | % |

**Figur 38.** Normaliserad $NO_x$=f($O_2$) i skorstenen vid ammoniakinjektion 1 m nedströms om centralrörets inlopp; $NH_3$-tillsats ■ ingen, ■ 3.5 kg/h, ■ 4.7 kg/h.
*Normalised $NO_x$=f($O_2$) in chimney and $NH_3$ injected 1 m downstream vortex finder inlet; $NH_3$ added, ■ no ■ 3.5 kg/h, ■ 4.7 kg/h.*

På grund av inläckning av luft i rökgaskanalen motsvarar 6-11% $O_2$ i skorstenen 2,5-5% i cyklonutloppet. Ammoniaktillsatsen motsvarade en molekylförhållande $NH_3$/NO på 1,6 respektive 2,1. Effekten av ammoniaktillsatsen blev 41% respektive 56% $NO_x$-reduktion

jämfört med fallet utan tillsats. Alla värden har omräknats till basen 8% $O_2$. Reduktionen ökade med ökande tillsatts av ammoniak men samtidigt ökade medelvärdet för slipet från 10 ppm till 13 ppm.

I Figur 39 jämförs $NO_x$-reduktionen då 4.7 kg $NH_3$/h tillsätts med ett fall då samma mängd ammoniak tillsätts med det ordinarie SNCR-systemet (3/4 av ammoniaken tillsätts i eldstadstoppen och 1/4 efter cyklonutloppet). Tillsats av ammoniak i den inre cyklonvirveln förbättrade $NO_x$-reduktionen med ca 30% (ca 20 mg $NO_2$/MJ) samtidigt som $NH_3$-slippet var opåverkat.

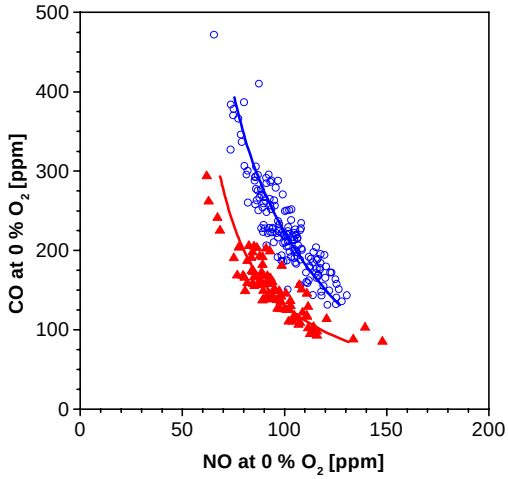



Evaluation in range 7 – 9 % $O_2$
(95% confidence level)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Reference | | | | |
| Outlet Temperature | 994 | ± | 2 | °C |
| NO (0% $O_2$) 172 | | ± | 4 | ppm |
| CO (0% $O_2$) | 46 | ± | 4 | ppm |
| Existing system | | | | |
| Outlet Temperature | 975 | ± | 2 | °C |
| NO (0% $O_2$) | 112 | ± | 2 | ppm |
| CO (0% $O_2$) | 40 | ± | 1 | ppm |
| $NH_3$-slip | 9 | | | ppm |
| $NO_x$ reduction | 35 | | | % |
| Injection in vortex finder | | | | |
| Outlet Temperature | 987 | ± | 2 | °C |
| NO (0% $O_2$) | 76 | ± | 2 | ppm |
| CO (0% $O_2$) | 52 | ± | 4 | ppm |
| $NH_3$-slip | <13 | | | ppm |
| $NO_x$ reduction | 56 | | | % |

**Figur 39.** Jämförelse av nytt och ordinarie SNCR-systemet. $NO_x$ = f($O_2$) ■ ingen $NH_3$, ○ 4.75 kg/h $NH_3$ tillsatt i ordinarie system, ■ 4.75 kg/h $NH_3$ tillsatt i centralröret
*Comparison of new and existing SNCR-system. $NO_x$ = f($O_2$) in chimney; ■ no $NH_3$ added, ○ 4.75 kg/h $NH_3$ added in existing system, ■ 4.75 kg/h $NH_3$ in vortex finder.*

Prov genomfördes också vid 60% last (15 $MW_{th}$). Vid denna last ökades luftöverskottet för att hålla nere emissionen av oförbrända gaser. Detta tillsammans med en ökad uppehållstid medför en sänkt temperatur i cyklonen, en inloppstemperatur på 850°C sjönk till 825°. Inga signifikanta förbränningsreaktioner sker följaktligen i cyklonen vid dessa förhållanden. Ammoniaklansen traverserades axiellt i cyklonen och den optimala tillsatspunkten bestämdes till centralrörets inlopp. Vid denna last förbättrades inte $NO_x$-reduktionen men däremot blev det en betydligt mindre påverkan på CO-emissionen på grund av ammoniaktillsatsen (se Figur 40). Jämfört med det ordinarie SNCR-systemet minskades CO med 35%. Ingen inverkan på ammoniakslipen kunde iakttas. I båda fallen var den mindre än 10 ppm.




Evaluation
(95% confidence level)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Reference | | | | |
| $O_2$ | 9.5 | ± | 0.1 | [%] |
| CO (0%$O_2$) | 113 | ± | 12 | [ppm] |
| NO (0%$O_2$) | 169 | ± | 6 | [ppm] |
| Outlet temperature | 838 | ± | 1 | [°C] |
| Injection through existing system | | | | |
| $O_2$ | 9.5 | ± | 0.1 | [%] |
| CO (0%$O_2$) | 228 | ± | 10 | [ppm] |
| NO (0%$O_2$) | 101 | ± | 2 | [ppm] |
| Outlet temperature | 828 | ± | 1 | [°C] |
| Injection in vortex finder | | | | |
| $O_2$ | 9.4 | ± | 0.1 | [%] |
| CO (0%$O_2$) | 151 | ± | 8 | [ppm] |
| NO (0%$O_2$) | 95 | ± | 3 | [ppm] |
| Outlet temperature | 826 | ± | 1 | [°C] |

**Figur 40.** Jämförelse mellan nytt SNCR-system och det ordinarie vid 15 MW last. CO som funktion av $NO_x$; ○ 3.5 kg/h $NH_3$ i ordinarie system, ▲ 3.5 kg/h $NH_3$ i centralröret.
*Comparison with existing system at 15 $MW_{th}$. CO as function of $NO_x$; ○ 3.5 kg/h $NH_3$ in existing system, ▲ 3.5 kg/h $NH_3$ in vortex finder.*

## 5.6 Diskussion

Teoretiskt sätt skall det vara möjligt att driva reaktionen enligt väg 1 (Figur 32) och utnyttja all ammoniak till att reducera NO. I praktiken visar det sig att väg 2 med ingen nettoproduktion eller i värst fall en viss bildning av NO konkurrerar. Det är nödvändigt att välja temperaturen så att reaktionshastigheten är tillräckligt hög och så att all ammoniak förbrukas. Detta tillstånd infinner sig då hastigheten är av samma storleksordning för väg 1 och väg 2. Detta förklarar också varför det är nödvändigt att alltid tillsätta ett överskott av ammoniak. En hög temperatur är nödvändig för att förse ammoniak med radikaler samtidigt som detta förskjuter det optimala temperaturfönstret mot lägre temperatur.

I CFB-pannor kan stråkbildning eller kort uppehållstid orsaka att slutförbränningen sker i cyklonen. Vid denna blir både radikalkoncentrationen och temperaturen hög. Vid traditionell tillsats i cykloninloppet finns risken att ammoniak bidrar till en nettobildning av $NO_x$. Genom att ammoniak tillsätts inne i cyklonen kan bildningen av $NH_2$-radikaler säkerställas samtidigt som förhållandena överensstämmer med det effektiva reaktionsfönstret. Försöken i labskala visar att omblandningen är nära perfekt i den inre cyklonvirveln. Detta tillsammans med de goda reaktionsförhållandena med radikaler som bildas vid slutförbränningen och en rimligt låg temperatur gör att NO-bildning av ammoniaken undviks. Samtidigt är både temperatur och uppehållstid tillräcklig för SNCR-reaktionen.

Under förhållanden då en betydande förbränning sker i cyklonen fås en effektivisering av SNCR-reaktionerna med ca 30% om ammoniaken tillförs i centralröret i stället för cykloninloppet. Givetvis kan inte denna effekt påräknas om ingen efterförbränning sker i cyklonen, vilket ofta är fallet vid låglast. Den sena tillförseln av ammoniak medförde dock att CO-emissionen minskar betydligt. Detta förklaras av att bildningen av $NH_2$-radikaler inte konkurrerar med CO-utbränningen om OH radikaler. Utbränningen är i huvudsak avklarad innan rökgasen går in i centralvirveln i cyklonen.

## 5.7 Slutsatser

Den inre cyklonvirveln visade sig utifrån laboratorieexperiment och reaktionsberäkningar vara den mest optimala positionen för ammoniaktillsats på grund av mycket god omblandning, tillräcklig temperatur och tillräcklig uppehållstid.

Vid hög last kunde $NO_x$-reduktionen förbättras med ca 30% genom att flytta ammoniaktillsatsen till cyklonens centrum utan några negativa effekter på ammoniakslip.

Vid låg last kunde CO-utbränningen förbättras med denna tillsatsposition för ammoniaken på grund av att konkurrens mellan CO-utbränning och ammoniakaktivering undviks. Vid låglast var NO-reduktionen samma vid ammoniaktillsats i cykloncentrum och cykloninlopp.

## 5.8 Referenser

1 *I. Glassman*
**Combustion (third edition).**
Academic Press Limited, London (1996). ISBN 0-12-285852-2

2 *S.C. Stultz, J.B. Kitto*
**STEAM its generation and use.**
Babcock & Wilcox (1992). ISBN 0-9634570-0-4

3 *Glarborg, Kee, Grcar, Miller*
**PSR: A FORTRAN program for modelling of well-stirred reactors.**
SANDIA report 86-8209 (1986).

4 *O. Levenspeil*
**Chemical reaction engineering, second edition.**
John Wiley & Sons (1972).

5 *B. Zethraeus*
**Spårgasteknik.**
TPS Branschforskningsprogram för Energiverk (1994).

# 6 FÖRBÄTTRAD BRÄNSLESPRIDNING I FB-/CFB-PANNOR MED BRÄNSLESTUP

## 6.1 Bakgrund

Branschforskningsprogrammet identifierade tidigt att den snabba flyktavgången ifrån biobränslen i fluidiserade bäddar (FB) leder till att kraftiga stråk med brännbara gaser kan uppkomma i eldstaden. Olika metoder att lösa detta problem har varit ett återkommande tema i tidigare Branschforskningsprojekt. Samtidigt har olika panntillverkare också identifierat problemet och idag installeras normalt flera bränsleinlopp runt om eldstaden för att undvika stråkbildningen. Problemet återstår dock i äldre pannor, och behöver kunna lösas med enklare och ej så kostsamma lösningar.

I många FB- och CFB-pannor tillförs bränslet gravimetriskt via ett bränslestup. Det är därför intressant att studera om dessa genom enklare omformning kan förbättras så att bränslet redan från början sprids över en större yta. För att åstadkomma detta behövs någon form av spridare. Troligen är ett pneumatiskt blåsbord att föredra framför ett mekaniskt på grund av miljön av sandbelastad gas den ska arbeta i.

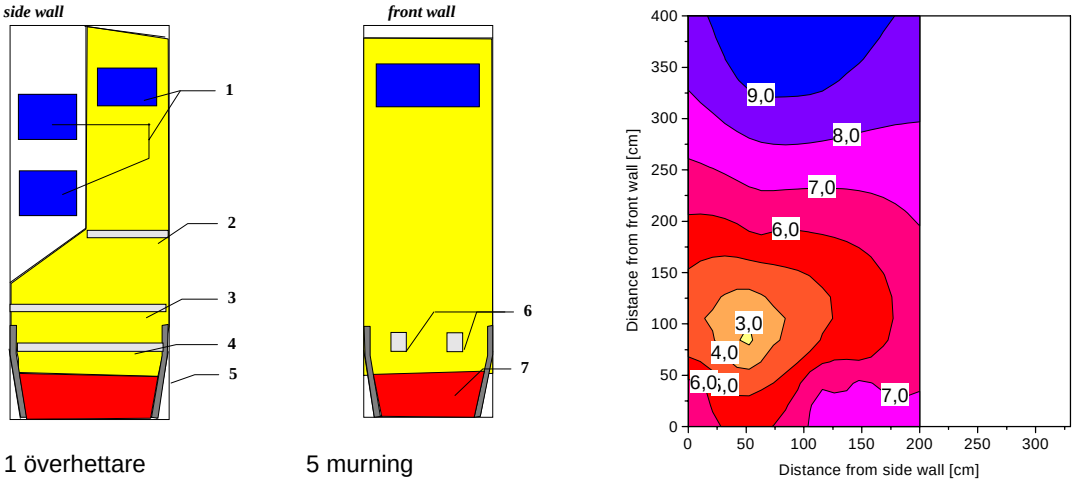
Stråkbildning av brännbara gaser kan ge upphov till flera problem i eldstaden. Förhöjda utsläpp av koloxid och kolväten blir effekten av att tiden är för kort för att bränna ut gaserna efter det att stråket väl blandats med förbränningsluft. Detta får ofta till följd att pannan måste eldas vid ett högt luftöverskott för att öka förbränningshastigheten. Olyckligtvis innebär det att reaktionshastigheten och jämviktshalten för kväveoxider ökar, och ofta kan samtidigt höga halter av både CO och $NO_x$ ses. Lokalt kan $NO_x$-bildningen dessutom gynnas i och omkring gasstråken genom en kombination av hög temperatur och högt luftöverskott.

Stråkbildningen kan också ge sekundära problem i form av lokalt höga temperaturer i eldstaden eller att en onödigt stor del av slutförbränningen flyttas upp till cyklonen, vilka kan initiera bäddsintring och påslagsbildning.

- Graden av stråkbildning beror på tre huvudfaktorer:
- Hur lokalt bränslet tillförs
- Hur snabbt bränslet sprids i bädden
- Hur snabbt bränslet pyrolyseras (avger sina flyktiga beståndsdelar)

För biobränslen är flyktavgången normalt mycket snabbar än bränslepartiklarnas spridning i bädden, vilket belyser vikten av att sprida bränslet väl från början. Vid en ringa spridning av bränslet uppkommer stråk av brännbara gaser i närområdet av bränsleinloppet, och konsekvent stråk med högt luftöverskott i andra delar av eldstaden. Omblandningen ovanför bädden är i många fall inte tillräckligt effektiv för att snabbt jämna ut dessa stråk. I t.ex. CFB-pannor sker en slutförbränning ofta först i cyklonen. Tidigare mätningar av lokala förhållanden inne i eldstaden utförda inom branschforskningsprogrammet har tydligt visat stråkbildningens omfattning. Ett exempel från FB-pannan i Malå ges i Figur 41 nedan. I figuren redovisas uppmätt syrehalt 1.8 m ovanför pannans botten i form av anpassade isometriska kurvor.

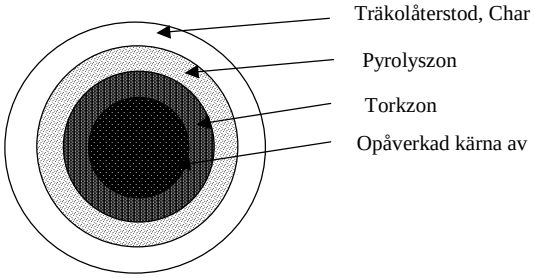
Bränslepartiklarnas storlek, form och fuktighet bestämmer hur snabb flyktavgången kommer att vara när den tillförs bädden. Processen är begränsad av värmetransporten in i partikeln, inte av reaktionskinetik. Är partiklen fuktig kommer uppvärmningen att gå långsammare och flyktavgången sträcks ut över en längre period.




1 överhettare
2 tertiärluft
3 övre sekundärluft
4 undre sekundärluft
5 murning
6 bränslestup
7 bädd

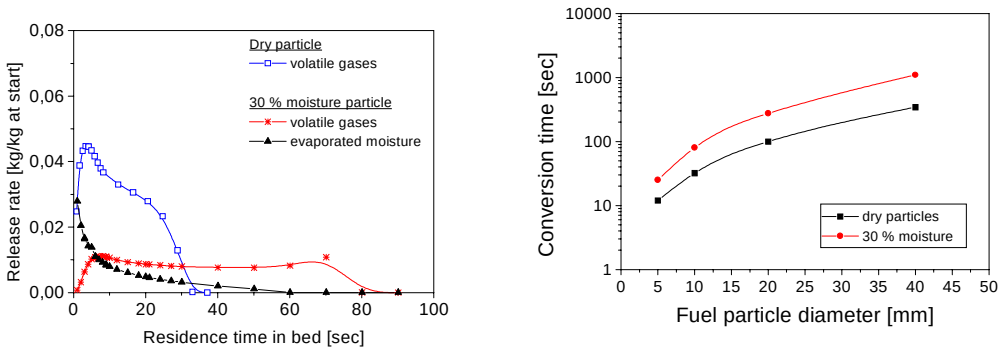
**Figur 41.** Lokal $O_2$-koncentration 1.8 m över eldstadsbotten. Malå 15 $MW_{th}$ FB-panna. 5 MW last.
*Local $O_2$-concentration 1.8 m above furnace bottom. Malå 15 $MW_{th}$ FB-boiler. Load 5 MW.*

Normalt är bränslets styckestorlek i en FB så pass liten att avgasningen inte är mass-transportbegränsad. Bränsleporernas storlek är tillräckligt stora för att inte utgöra något hinder. I ett sådant fall kan pyrolys-hastigheten uppskattas genom en enkel ansats baserad på värmetransport in i partikeln. TPS har tidigare utvecklat en modell [1] för successiv torkning och pyrolys med en kvalitativ uppskattning av förloppet. Bränsle-partikeln delas upp i ett flertal skikt så att den samtidig kan torka och avgasas fast i olika skikt (Figur 42).



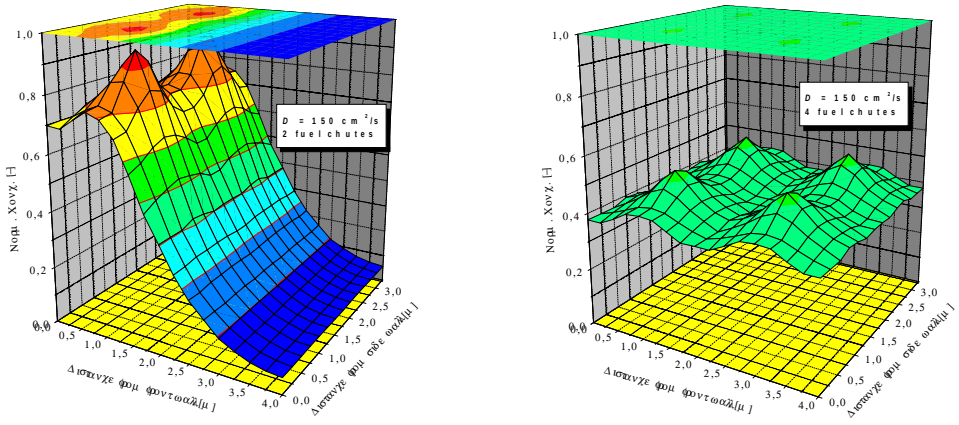

**Figur 42.** Illustration av torknings- och pyrolys-process i bränslepartikel.
*Illustration of processes for drying and pyrolysis of a fuel particle.*

I Figur 43 ges ett beräknat exempel för torkning och pyrolys av en torr och 30% fuktig partikel med formen av en cylinder med 1 cm diameter och 3 cm längd. I samma figur visas också hur den totala pyrolystiden påverkas av partikeldiameter (längd:diameter 3:1) och fukthalt.




**Figur 43.** Beräknad avgångstid för pyrolysprodukter som funktion av partikelstorlek och fukthalt. Partiklar som cylindrar med d: L = 1:3.
*Calculated pyrolysis time vs. particle size and MC. Cynlindrical particles with d:L = 1:3*

I vilken utsträckning som den snabba flyktavgången leder till en stråkbildning av brännbara gaser beror på hur snabbt bränslet blandas i sidled och hur väl det sprids från början. Bränslespridningen i sidled kan beskrivas med en tvådimensionell dispersionsmodell. Genom att beräkna flyktavgången samtidigt med bränslepartiklarnas spridning är det möjligt att få en bild av hur omfattande stråkbildning som kan förväntas i olika situationer. TPS har tidigare ställt samman ett datorprogram för detta [2]. I figuren nedan visas beräknad stråkbildning under samma förhållanden som för mätresultaten i Figur 41. Till vänster visas beräknad stråkbildning då två bränslestup i frontväggen används, alltså samma förhållanden som vid mätningarna. Överensstämmelsen är god. Till höger visas hur denna situation kan förbättras kraftigt genom att tillföra bränsle via ytterligare två bränslestup i pannas bakvägg.




**Figur 44.** Beräknad relativ koncentration av flyktiga brännbara gaser i FB-panna med tvärsnitt 4.0 x 3.3 m. Effekt av att ändra antalet inmatningar för bränsle i en fiktiv FB-panna. *Calculated concentration (relative) of pyrolysis gases in an FB-boiler. Cross section 4.0 x 3.3 m. Effect of increasing number of fuel injection points.*

## 6.2 Målsättning och genomförande

Att ta fram underlag för att kunna bedöma om bränslespridningen för ett enskilt bränslestup kan förbättras på ett enkelt sätt i sådan utsträckning att stråkbildning av brännbara gaser kan undvikas eller minskas kraftigt.

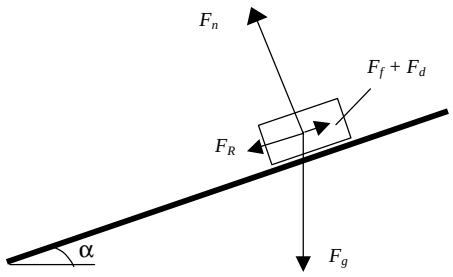
Spridning av bränslepartiklar från bränslestup har studerats genom att formulera modeller för transporten längs stupet samt kastparabel. Modellerna har verifierats experimentellt i laboratorieutrustning varefter en parameterstudie genomförts med hjälp av modellen.

## 6.3 Resultat

### 6.3.1 Modellformulering

För att uppskatta bränslets hastighet längs bränslestupet och dess kastbana ut i eldstaden har två datormodeller ställts samman.

Principiellt består ett bränslestup av a) ett första nära vertikalt stup direkt efter cellmatare, b) en avlänkning ifrån vilket bränsle förs in i eldstaden. I det första stupet får partiklarna fart, för att vid omlänkningen få en hastighet i horisontell riktning. För båda delarna kan en kraftbalans enligt figur 45 formuleras. Det vertikala stupet utgör ytterligheten att vinkeln $\alpha$ är 90°.




**Figur 45.** Krafter verkande på partikel som glider mot en lutande plan.
*Forces on a particle sliding on a sloping plane.*

Friktionen mot plåten är proportionell mot normalkraften ($F_N$). När partiklarna är stilla är proportionalitetsfaktorn μ något större än när de väl kommit i rörelse. Luftmotståndet är proportionellt mot den relativa hastigheten mellan partikel och omgivande gas i kvadrat. Nettokraften i glidplåtens riktning (α) kan skrivas som:

$$F_R = m\frac{\delta U_R}{\partial t} = mg\left[\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha)\right] - kC_d\rho_g A_p U_r^2 \qquad \text{(I)}$$

För en helt frilagd partikel är konstanten k = ½, men är då den glider mot en plåt mindre eftersom inte hela partikeln exponeras för omgivande gas. Ett värda nära ½ är dock troligt.

En analytisk lösning kan inte enkelt formuleras eftersom luftmotståndet, Cd, i sig är en funktion av den relativa hastigheten mellanpartikel och omgivande gas. Om den ändå antas vara konstant fås följande analytiska lösning:

$$U_R(S) = \sqrt{\frac{a}{b}\left[1 - e^{-2bS}\right] + U_{ro}^2 e^{-2bS}}$$

$$a = g\left[\sin(\alpha) - \mu_k\cos(\alpha)\right] \qquad \text{(II)}$$

$$b = kC_d\rho_g\frac{A_p}{m_p}$$

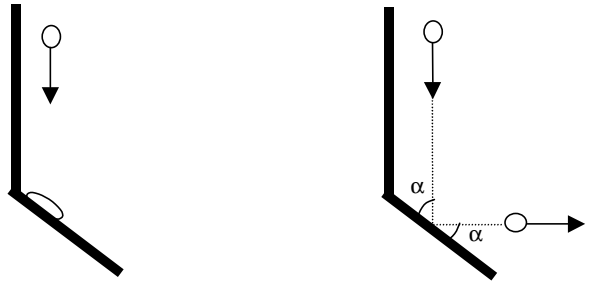
För att ta hänsyn till varierande luftmotstånd kan följande uttryck användas:

$$U_R\frac{\delta U_R}{\delta S} = g\left[\sin(\alpha) - \mu_k\cos(\alpha)\right] + kC_d(U_r)\rho_g\frac{A_p}{m_p}U_R^2\frac{\left|U_g - U_p\right|}{U_g - U_p} \qquad \text{(III)}$$

Friktionskoefficienten $\mu_k$ är normalt i storleksordningen 0.6-0.7 för torrt trä. Detta innebär att den minsta möjliga lutningen för glidplåten (rasvinkel) är mellan 30-35°.

Ur ovanstående samband framgår det tydligt att framför allt små partiklar snabbt kommer att bromsas upp av luftmotståndet. Det är därför rimligt att anta att det är andelen finfraktion som i praktiken bestämmer vilken hastighet som bränsleflödet kommer att få..

Vid en avlänkning utförs samma beräkning, fast nu med en ny starthastighet $U_{Ro}$. Hastigheten precis innan avlänkningen kan enkelt beräknas med hjälp av samband II eller III. Hur denna hastighet sedan omsätts är däremot inte helt enkelt att uppskatta. Som ytterligheter kan all rörelsemängd omsättas till deformation av partikeln eller så är stöten fullständigt elastisk. De två ytterligheterna illustreras i Figur 46 nedan.




**Figur 46.** Illustration av deformation och elastisk stöt.
*Illustration of deformed and elastic hit.*

Om deformation är övervägande kommer partikeln efter avlänkning att fortsätta glida längs plåten och ekvation (II) eller (III) kan tillämpas. Om däremot elasticiteten är övervägande kommer partiklarnas hastighet först beskrivas av en kastparabel. GROT, huggen stamved och liknande förväntas vara dominerad av deformation medan hårdare bränsle som pellets till stor del får en elastisk stöt.

Hur långt in i eldstaden som bränslepartiklarna slutligen kommer bestäms av deras kastbana. Hänsyn måste tas till bränslepartiklens begynnelsehastighet men också till gashastigheten inne i eldstaden. För en FB-panna kan en tvådimensionell lösning en enfas tvärström vara tillräcklig (höjd och djupled). Kraftvektorerna verkande på partikeln uttrycks som:

$$F_X = m_p \frac{dU_p}{dt} = Cd_x \frac{1}{2} A_p \rho_g \left(U_g - U_p\right)\left|U_s - U_{po}\right| \qquad \text{(IV)}$$

$$F_Z = m_p \frac{\delta W_p}{\delta t} = Cd_z \frac{1}{2} A_p \rho_g \left(W_s - W_p\right)\left|W_s - W_p\right| - m_p g \Delta\rho \qquad \text{(V)}$$

Luftmotståndet *Cd* är i sig en funktion av partiklarnas relativa hastighet vilket komplicerar en analytisk lösning av kastbanan. Enklast används därför en numerisk lösningsmetod. Små och lätta partiklar kommer att följa med gasströmmen medan kastdjupet för större och tyngre partiklar endast till en underordnad del blir avhängig av rådande gashastighet. I en partikelbelastad tvärström blir kastbanan kortare.

### 6.3.2 Generell utformning av bränslestup

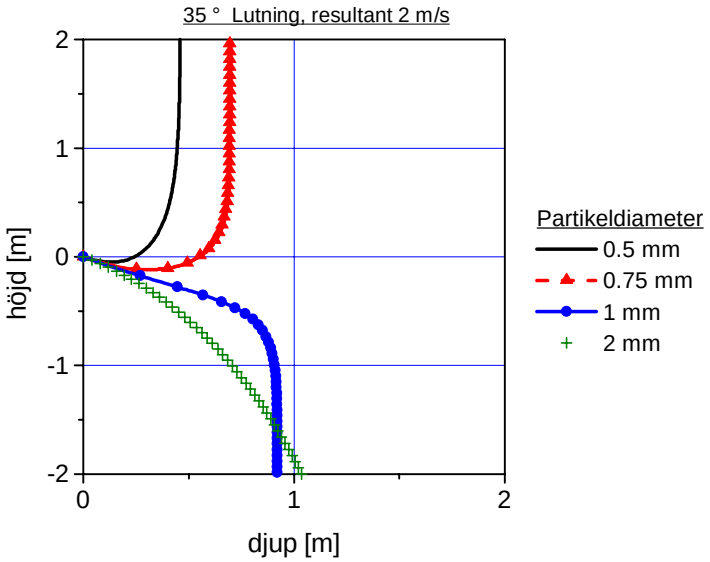
Hur långt in i eldstaden som bränslepartiklarna kommer innan de träffar bäddytan är dels beroende av förhållandena i eldstaden och dels på vilken ursprunglig hastighet som partikeln har. Det senare är som vi sett avhängigt av fallschaktets utformning samt bränslet fysiska egenskaper. Det som eftersträvas är att uppnå en så hög starthastighet i horisontell riktning som möjligt samtidigt som den vertikala hastigheten (nedåt) minimeras. Om partiklarna studsar elastiskt åstadkoms detta bäst genom att använda ett vertikalt stup avslutat med en 45° vinklad studsplåt. Med trä/GROT/bark/torv som bränsle kan man utgå från att studsen är rätt oelastisk. Rörelsemängden används till stor del för att deformera bränslepartiklarna och erfarenhetsmässigt finns en stor risk att bränslet ska bakas samman vid träffytan, speciellt vid fuktiga bränslen. Risken för driftstörningar blir överhängande.

Om vi istället tänker oss att bränslepartiklarna glider längs fallschaktet så kommer större delen av rörelsemängden att ha överförts till riktningen av den sista plåten. En del rörelsemängd förloras som deformation vid avlänkningen. Detta innebär att bränslepartikeln när den passerar ut ur fallschaktet har både horisontell och vertikal

hastighet. Detta påverkar naturligtvis hur långt in som partiklarna kommer. En sådan utformning är tämligen vanlig. Den sista glidplåten brukar ha en lutning som är något större än rasvinkeln, oftast är den lutad ca 35°.

För att komma så långt in i eldstaden som möjligt ska pariklarnas hastighet vara så stor som möjligt samtidigt som utkastet ska vara flackt. Detta visas enkelt genom att beräkna kastbanor för partiklarna. Detta kan bäst åstadkommas om fallschaktet byggs på samma sätt som en ”backhoppningsbana”, med en slutlig horisontell ramp.

Små eller lätta partiklar har liten tröghet och kommer snabbt att böja av i rökgasernas riktning. I Figur 47 visas ett exempel på beräknade kastbanor för träpartiklar som tillförs med 35° riktning mot en gasström med hastigheten 3 m/s vid 850°C. Alla partiklars begynnelsehastighet är 2 m/s. Som framgår kommer partiklar mindre än ca 1 mm att ryckas med gasströmmen. Stora partiklar har så stor tröghet att för normala FB/CFB förhållanden blir kastbanan tämligen oberoende av både partikelstorlek och gashastighet.




**Figur 47.** Kastbana som funktion av partikelstorlek i tvärström med 3 m/s vid 850°C.
*Particle trajectory vs. particle size. In crossflow of 3 m/s at 850°C.*

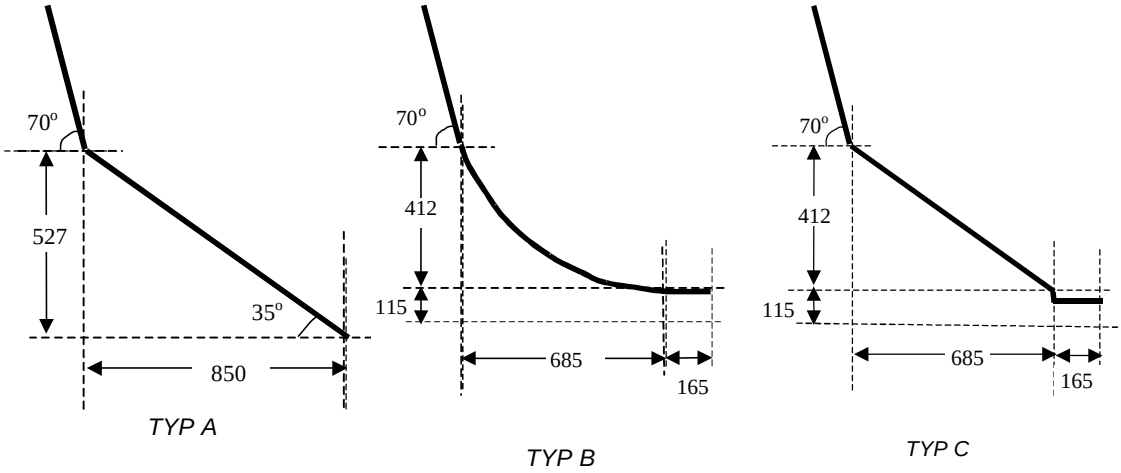
### 6.3.3 Experimentellt bestämda förlopp i bränslestup

Alla samband som har använts vid modellformuleringarna är grundläggande mekanistiska samband. Det finns alltså ingen anledning att verifiera dessa. I stället kan modellerna användas för att förstå och beskriva skeendet I bränslestupet. Metoden bygger helt enkelt på att utifrån slutresultaten fastställa begynnelsevillkoret.

Ett begränsat antal försök med huggen stamved utfördes. Rasvinkeln för bränslet bestämdes till ca 30°. Bränslet tillfördes i jämn takt till ett första 1.4 m långt stup med 70° lutning. Det avlänkades sedan in till alternativt tre olika utformningar av stup se figur 48

I det första fallet användes en traditionell utformning av bränslestup. En första brant sektion följs av en flackare för att avlänka bränslet in till pannan. I det andra fallet följ det första branta stupet av en successiv avböjning mot en horisontell avslutning. I det tredje fallet användes i princip samma uppställning som i det första fallet, men med skillnaden att den sista sektionen består av ett horisontellt utkast med möjlighet att använda luftstrålar för att öka partiklarnas hastighet.

Vid försöken bestämdes bränslets spridning 1 meter nedanför stupets mynning genom att samla bränslepartiklarna i en serie fack ställda i stupets förlängning. Bränslets medelstorlek var ganska stor vilket gör det möjligt att enkelt bestämma hur stor begynnelsehastigheten ut från stupet har varit. Baserat på detta är det möjligt att uppskatta tillståndet högre uppströms i bränsleschaktet.




35° avlänkning.

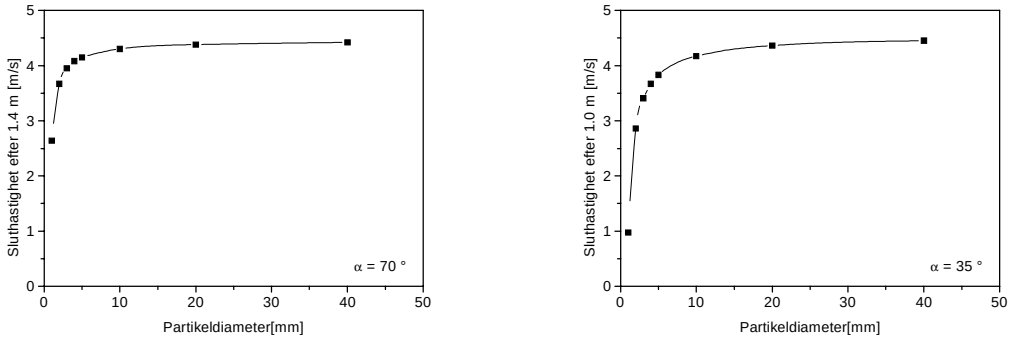
Successiv avlänkning avslutad med horisontellt utkast.

35° avlänkning avslutat med horisontellt blåsbord.

**Figur 48.** Uformning av bränslestup som undersökts./*Layout of examined fuel chutes.*

**Traditionellt utformat stup**

Baserat på uppmätt kastlängd för bränslestup typ A beräknades utloppshastigheten från stupet ha varit mellan 1.5-2 m/s. Detta kan tyckas vara en låg hastighet och kan förklaras av att partiklarna deformeras kraftigt vid övergången från 70° lutning till 30°. Stora partiklarna kan också bromsas av de mindre. För att deformation ska kunna förklara fenomenet måste partiklarnas hastighet ha bromsats till mellan 1.2-2 m/s vid övergången men det är troligare, som senare kommer att diskuteras, att det är finfraktionen som bromsar upp de större partiklarna. Beräknad sluthastighet ut från respektive del av schaktet, förutsatt att begynnelsehastigheten varit 0 m/s, redovisas i figur 49 nedan.



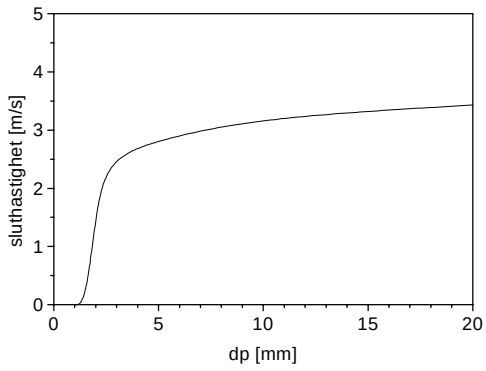

Beräknad sluthastighet efter 1.4 meter lång plåt med lutning 70° som funktion av partikelstorlek. Starthastighet 0 m/s.

Beräknad sluthastighet efter 1.0 meter lång plåt med lutning 35° som funktion av partikelstorlek. Starthastighet enligt figur till vänster.

**Figur 49.** Beräknad sluthastighet från bränslestup som funktion av partikelstorlek.
*Calculated final velocity from fuel chute vs. particle size.*

**Stup med successiv avlänkning**

Tanken med utformning av stup typ B var att förbättra det slutliga utkastet genom att dels undvika deformation vid avlänkningen och dels få ett horisontellt utkast. Baserat på beräknade sluthastigheter efter schaktet med 70° lutning beräknades sluthastigheter enligt Figur 50. Som framgår finns det en uppenbar risk att stupet blockeras om finfraktionens hastighet är begränsande. Om de grövre partiklarna däremot drar med de mindre skulle ett signifikant bättre utkast etableras.




**Figur 50.** Beräknad sluthastighet som funktion av partikeldiameter stup Typ B.
*Calculated final velocity vs. paricle size, fuel chute type B.*

Vid försök med denna utformning visade det sig att utformningen inte fungerade, utan stopp uppstod i schaktet eller på den avslutande 16 cm långa horisontella plåten. Detta visar att det är finfraktionen som är begränsande och bromsar upp övriga bränslepartiklar.

**Lutande schakt avslutat med blåsbord**

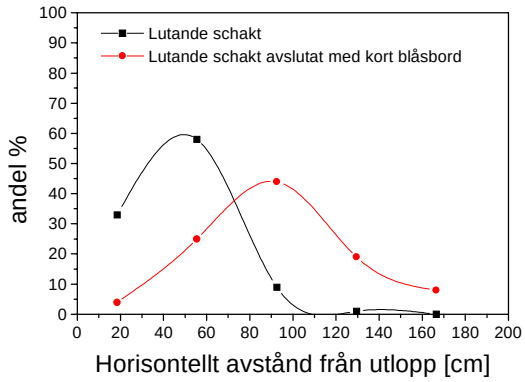
Ett sätt att överbrygga problemen med avstannande flöde i en avslutande horisontell avsats är att använda luftstrålar för att blåsa bort partiklarna. Ett minsta krav är då att dragkraften mellan gas och partiklar ska vara större friktionskraften mellan partiklarna och glidplåten.

En enklare form av blåsbord provades. Utformning var den samma som för stupet typ A med skillnaden att de sista 200 mm av den lutande plåten ersatts av en horisontell avsats (se figur 48). Övergången till avsatsen sker via ett ca 10 mm steg där åtta dysor med $\phi_{in}$ 8mm och c/c 18.75 mm placerats. Vid försöken var lufthastigheten ut ur varje dysa i ca 65 m/s.

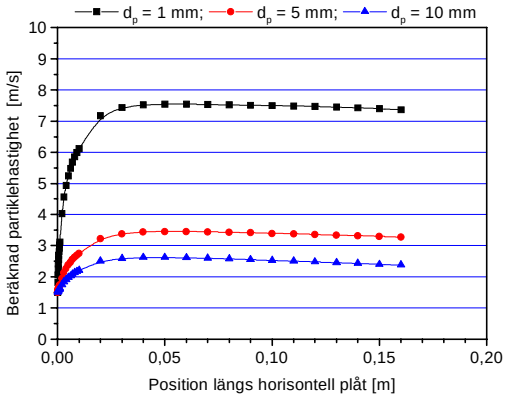
Bränslespridningen blev betydligt bättre med hjälp av blåsbordet än med det traditionella stupet, vilket visas i Figur 51. Det bör dock påpekas att med blåsbordet så ökar andelen fina partiklar ju längre från utkastet man mäter, vilket är motsatt resultaten från de två andra stupen. Då bränslet tillförs i en eldstad där gasen rör sig, kommer de mindre partiklarna inte att tränga lika djup utan istället böja av och följa gasströmmen. Men även med hänsyn till detta förväntas en betydligt bättre spridning med blåsbord.

En av blåsbordets viktiga funktioner är att hålla undan de mindre pariklarna som annars bromsar flödet på den horisontella sektionen. Provet med det traditionella stupet visade en sluthastighet på mellan 1 och 2 m/s. Med den uppmätta spridningen måste de grövre bränslepartiklarnas hastighet ut ifrån blåsbordet varit 2-3 m/s. En betydande acceleration måste alltså ha skett.

I Figur 52 nedan visas beräknad hastighet längs den horisontella plåten då partiklarna accelereras. Som framgår stämmer beräknad sluthastighet väl överens med den som uppskattats baserat på uppmätt spridning. Ekvation (III) ger en god beskrivning av hur partikelhastigheten längs en glidplåt och blåsbord. Baserat på detta kan vi t.ex. se för den undersökta uppställningen kan kastlängden fördubblas (1->2m) om också gashastigheten fördubblas (65->125 m/s).




**Figur 51.** Jämförelse mellan traditionellt utformat stup och stup avslutat med horisontellt blåsbord.
*Comparison of traditional chute and chute finished with horizontal aerodynamic spreader.*




**Figur 52.** Beräknad partikelhastighet längs horisontellt plan. Gasens starthastighet satt till 65 m/s.
*Calculated particle velocity along horizontal plane. Original gas jet velocity 65 m/s.*

## 6.4 Diskussion

Detta arbete har syftat till att undersöka om det med relativt enkla modifieringar går att få en signifikant bättre spridning av bränslet från vanliga bränslestup. Arbetet har drivits på så sätt att teoretiska samband ställts upp och verifieras i ett begränsat antal försök. Med hjälp av de verifierade modellerna kan sedan parameterstudier göras för att undersöka vilka åtgärder som är nödvändiga för att åstadkomma en tillräcklig förbättring i en kommersiell panna.

**Traditionellt bränslestup**

Med ett ”traditionellt” bränslestup menas här ett stup som består av ett första brantare schakt följt av en avlänkning med mindre lutning. Meningen med den första delen är att bygga upp en hastighet för bränslepartiklarna. I avlänkningen är meningen att den vunna rörelsemängden till så stor del som möjligt ska överföras till avlänkningens riktning.

Modellen visar att luftmotståndet har en stor betydelse för vilken sluthastighet som partiklarna uppnår. Mindre partiklar får en lägre hastighet än stora. Friktionen bränslepartiklar emellan är också större än mot glidplåten. Detta har betydelse för en blandning av olika partiklar då de mindre partiklarna kommer att bromsa upp de större. I praktiken betyder detta, åtminstone för mera flacka lutningar, att det räcker med att beräkna hastigheten för partiklar säg mindre än 1-2 mm för att bestämma sluthastigheten.

Trögheten för de mindre partiklarna rutschande på glidplåten är ganska liten vilket betyder att de ganska snabbt bromsas upp. Detta har till följd att den hastighet som vinns i ett första brantare stup bäst utnyttjas om den efterkommande avlänkningen är kort. Ofta är det svårt att bygga denna kortare än ca 1 meter på grund av att luftlådor, isolering och dylikt ska kunna få plats mellan bränsleschaktet och eldstaden. Detta betyder att för en given lutning på den sista avlänkningen så åstadkoms egentligen största skillnaden i bränslets spridning av vid vilken höjd som bränslet tillförs i eldstaden, se t.ex. Figur 47. Hur högt som bränslestupen kan placeras begränsas främst av att finfraktionen kommer att följa med gasströmmen. Om stupet då placeras för högt kommer problem med utbränningen av dessa partiklar att uppstå, ett problem som blir speciellt uttalat i FB-pannor där temperaturen snabbt kan avta med höjden.

Bränslestupen i befintliga pannor är ofta luftkylda genom att stupet är dubbelmantlat. I många fall släpps kylluften ut i en hylla i den sista avlänkningens glidplåt. Därmed introduceras en luftström i bränsleflödets riktning som dels kommer att minska luftmotståndet och som dels transporterar ut finfraktionen i eldstaden. Detta får då till följd att bränsleflödets hastighet inte bromsas upp i den utsträckning som diskuteras ovan. Exakt hur stor effekt blir är vanskligt att bedöma då den är beroende på var längs glidplåten luften tillförs och hur mycket. Är lutningen flack bromsas inte partiklarna upp ytterligare. Sluthastigheten blir då ungefär den hastighet som de har i den position där luften tillförs. Om stora flöden luft tillförs så kommer partiklarna att accelereras. Därmed kommer partiklarna att kastas ytterligare längre in i eldstaden.

I många FB-pannor är bränslestupen placerade ca 2 meter ovanför botten av eldstaden. Detta betyder att bränslet kommer att kastas in 1-1.5 meter ovanför bäddytan. Med en avlänkning större än rasvinkel kan det tyvärr visa sig att det egentligen inte spelar så stor roll vilken hastighet partiklarna har ut ur schaktet. Vid 35° lutning medför en ökning från 1 m/s till 4 m/s att kastlängden ökar från ca 0.5 till ca 1 meter. Förvisso en fördubbling men eldstadens djup är ofta i storleksordningen 4-5 meter. Det är egentligen bara vid mycket flacka vinklar som kasthastigheten får en stor betydelse. Detta kommer att diskuteras i följande avsnitt. Vi kan här konstatera att den kylluft som släpps in i bränslestupen främst får till uppgift att förhindra att stupen blockeras. Den fungerar alltså som ett slags ”smörjmedel”.

**Horisontellt utkast och blåsbord**

För att åstadkomma en signifikant förbättrad spridning av bränslet måste utkastet vara så flackt som möjligt och partiklarnas hastighet ökas. I praktiken kan ett horisontellt utkast bara användas om det kombineras med ett blåsbord för att förhindra att främst finfraktionen stannar upp.

Modellerna visar att det krävs höga hastigheter för strålarna för att åstadkomma signifikanta hastighetsökningar. De mindre partiklarna accelereras snabbt upp till höga hastigheter, men dessa partiklar kommer ändå snabbt att böja av och följa med gasströmmen. Av större betydelse är därför vad som händer med de lite grövre partiklarna.

I en verklig panna kan stora dysor användas utan att en allt för stor gasmängd (luft eller rökgas) tillförs genom bränslestupen. Med stora dysor avtar inte gashastigheten lika snabbt. Detta gör att inte fullt lika höga starthastigheter är nödvändiga. Då flödena ändå blir betydande är den en klar fördel om luften kan tas från förbränningsluftfläktarna vilket begränsar maximal hastighet genom dysorna till omkring 100-125 m/s eftersom tryckfallet sedan blir allt för högt.

Det är bara de första ca 100 mm längs ett blåsbord som de grövre partiklarna accelereras. Samtidigt kan mycket vinnas genom att öka partiklarnas starthastighet. Av detta skäl kan en första brant stup med en avböjning med relativt liten radie till ett kort blåsbord rekommenderas.

Erforderlig mängd luft eller rökgas kan skattas. Vi utgår från att hastigheten maximalt behöver vara 100 m/s och att största nödvändiga dysor är 20 mm. Vidare kan vi utgå ifrån att dysorna placeras med ett c/c = 2 diametrar. Med ett 0.5 meter brett schakt blir då antalet dysor 12 och den maximala mängden luft ca 1350 $m^3$/h. Sannolikt räcker dock gashastigheten 75 m/s vilket begränsar luftflödet till ca 1000 $m^3$/h. I större pannor, där antalet bränslematningar per MW är mindre, är inte denna mängd luft besvärande. I mindre pannor kan mängden blåsluft dock utgöra en betydande del av förbränningsluften. Som ett överslag kan vi utgå ifrån riktvärdet 1250$m^3$/h luft per MW. Flertalet mindre FB-pannor i storleken 10-30 MW har två bränslestup. Blåsluften skulle därmed motsvara ca 5-16 % av det totala luftbehovet. Eftersom denna luft inte kommer att tränga in lika långt

som bränslet finns det en risk för ett högt lokalt luftöverskottet. I ett sådant fall kan det vara intressant att istället använda rökgas som blåsmedium.

Ett blåsbord konstruerat enligt ovanstående verkar vara en enkel modifiering för att åstadkomma en signifikant bättre spridning av bränslet, framför allt dess grövre fraktion. Den nackdel som kan identifieras är beroendet av att hela tiden tillföra blåsluft. Risken är annars uppenbar att hela bränsleflödet stannar i den mjuka avböjningen eller den avslutande horisontella delen. Detta beroende förefaller dock vara ett själigt pris för en bättre spridning. Ett alternativ är naturligtvis en mekanisk spridare, men tillförlitligheten för en sådan är knappast större.

För bränslets finfraktion förefaller den bästa metoden vara den som visades i ett tidigare Branschforskningsprojekt där bränslets finandel avskiljdes och blåstes in från pannans bakvägg [3].

Sammanfattningsvis verkar dock den föreslagna utformningen av blåsbord vara en så enkel modifiering med hög potential till förbättrade emissioner att den snarast borde demonstreras i någon av deltagarnas FB-pannor.

## 6.5 Slutsatser

Det kan konstateras att:

- De framtagna modellerna för partiklarnas rörelse i stup och eldstad beskriver väl de verkliga förloppen. För små partiklar begränsar luftmotståndet hastigheten i bränslestupen. Detta är inte lika markant för grövre partiklar. Även partikelhastigheten i bränslestup begränsas av de små partiklarnas hastighet, detta då friktionen mellan bränslepartiklarna är hög.

- För normala bränslestup med en slutvinkel större än bränslets rasvinkel betyder fallhöjden till bäddytan mer än utloppshastigheten för att åstadkomma ett längre utkast.

- För att åstadkomma signifikant längre utkast så måste det slutliga utkastet i det närmaste vara horisontellt. Problemet med horisontella utkast och mjuka avböjningar är att så snart vinkeln är mindre än bränslets rasvinkel så avstannar bränsleflödet mycket snabbt om inga andra åtgärder vidtas. Om luftstrålar med hög hastighet tillförs längs botten av ett horisontellt utkast (blåsbord) motverkas stagnation av flödet och bränsleflödet kan accelereras.

- En kombination av en brant tillförsel, snabb mjuk avböjning, och ett avslutande kortare blåsbord ger goda förutsättningar för en signifikant bättre spridning av bränslepartiklarna. Den föreslagna utformningen är framför allt mest lämpad för en grövre bränslefraktion. Bränslets finfraktion kommer snabbt att böja av och följa med gasströmmen. För bränslen med mycket hög finandel måste därför andra åtgärder vidtas.

- Om volymflödet av blåsmedium blir så stor att den påverkar luftfördelningen i eldstaden kan det vara gynnsamt att använda rökgas istället för luft.

Den bättre spridning av bränslet som kan åstadkommas med detta koncept för blåsbord bör skapa goda förutsättningar för att kunna förbättra pannas prestanda med avseende på $NO_x$ och CO. Förekommande problem med påslagsbildning och sintring bör också kunna undvikas.

## 6.6 Referenser

1 *T. Nilsson*
**Modell för pyrolys av en våt partikel i FB.**
TPS-98/38, (1998).

2 *B. Ljungdahl*
**Conversion of coal fired FB and CFB boilers to co-fire high volatile fuels – improving the original distribution of the fuel.**
OPTEB Final report, Contract JOR3-CT95-0057, (1998).

3 *B. Ljungdahl*
Slutrapport FB/CFB-teknik, TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 95/96 (1996).

# BRÄNNARTEKNIK

I tidigare Branschforskningsprogram har vi konstaterat att strömningsmönstret i eldstäderna på fjärr- och kraftvärmepannorna ibland är långt från idealisk. Ofta finns det stora recirkulationszoner som genom sin form snarare försämrar förbränningsförhållandena i stället för att stabilisera dem. Ett annat problem som identifierats speciellt för flerbrännarpannor är den bristande möjligheten att under drift kontrollera och finjustera enskilda brännares funktion. Det har internationell genomförts flera olika studier där avancerade akustiska och optiska tomografiska metoder utnyttjats föra att bestämma det tredimensionella temperaturfältet i eldstaden. Med hjälp av mikrofoner i eldstaden har man försök särskilja bruset från olika brännare med flera förhållandevis komplexa metoder. Inom detta programområde undersöks två relativt enkla metoder för att få en uppfattning om brännarnas kondition.

Ett generellt problem för fjärrvärmepannor speciellt i relativt små nät eller under låglastssäsong är att de i allmänhet får lova att styras efter lastbehovet på distributionsnätet. Även med ackumulator tvingas pannan under långa perioder gå på dellast, ofta med högre emissioner och lägre verkningsgrad. I brännarpannor beror detta på att brännare och strömningsförhållandena normalt är utlagda för bästa prestanda vid nominell last. I ett projekt undersöks vilka övergripande modifieringar av strömningsförhållandena som kan göras för att förbättra dellastegenskaperna för pannan.

# 7 DELLASTOPTIMERING

## 7.1 Bakgrund

### 7.1.1 Allmänt

För brännarpannor med flera brännare finns några olika metoder att klara driften vid dellast, givetvis beroende på dellastområde. Dels kan brännarna regleras ner parallellt vilket leder till att den övergripande strömningsbilden förändras mycket lite även om uppehållstiden ökar och temperaturen sjunker. Däremot kommer strömningsfälten nära brännarna att förändras ganska radikalt då hastigheterna i de olika registren sjunker, speciellt då nediregleringen som regel inte sker i samtliga register. Till exempel kan inte transportluften för bränslet dras ner under en lägsta gräns på grund av risken för tillbakabrand. En annan metod för dellast är att endast reglera ner till en given minimilast för varje brännare, varefter en eller fler brännare tas ur drift så de återstående kan arbeta närmare full last.

Oavsett vilken reglermetod som utnyttjas så förändras strömningsfältet jämfört med det dimensionerande fullastfallet. Eftersom lasten för brännarpannor i fjärrvärmenät bestäms av den efterfrågade värmebehovet kommer dessa pannor i många fall gå vid dellast en stor del av den totala drifttiden. Försämrade förbränningsförhållanden med förhöjd syrehalt och dålig utbränning vid dellast slår hårt mot ekonomin för dessa pannor och stödjer behovet av att ha en bra metod för nedreglering av lasten.

Att utveckla generella metoder för nedreglering av enskilda brännare blir mycket specifikt för varje modell. Däremot är det möjligt att ta fram några regler för hur brännare skall regleras ner och i vilken ordning de skall plockas ur drift för att förhållandena i eldstaden skall vara så gynnsamma som möjligt.

Målet med detta projekt var att visa några metoder att optimera dellastdriften i brännarpannor med flera brännare med avseende på driftförhållanden och miljöegenskaper.

Under tidigare Branschforskningsprojekt studerades ett antal oönskade strömningsfenomen i brännarpannor och hur de kan undvikas. Denna erfarenhet är utgångspunkt för det fortsatta arbetet.

Ett antal eldstadsgeometrier som är representativa för de deltagande pannorna har använts vid datorsimuleringar av olika driftsituationer. Vid dessa simuleringar har effekten på strömningen, temperaturfördelningen och värmeöverföringen till värmeupptagande ytor i eldstaden undersöks. Avsikten har varit att titta på val av antal och position för de brännare som tas ur drift vid dellast. Detta för att åstadkomma bästa möjlig värmeavgivnings- och förbränningsförhållande.

## 7.2 Viktiga faktorer vid nedreglering

Det är många viktiga faktorer som påverkas av en laständring. De flesta av dessa parametrar måste ligga inom vissa gränser för att förbränningsresultatet skall bli tillfredsställande och driften fungera bra. Nedan listas några av dessa parametrar:

- Flamtemperaturerna måste vara tillräckligt höga för en fungerande antändning och förbränning av bränslepartiklarna.
- Bränslepartiklarnas uppehållstid i flammorna måste vara tillräckligt lång för en fullständig utbränning.
- Fördelningen av luft och bränsleflöde mellan de olika registren i brännaren får inte förskjutas för kraftigt. Sådana förskjutningar resulterar i att impulsförhållandena och rotationsgraderna mellan de olika delströmmarna förändras och flammans funktion påverkas.
- Turbulensnivåerna måste vara tillräckligt höga för att flamman strömningstekniskt skall fungera som avsett.
- Värmeöverföringen till pannans värmeupptagande ytor måste vara tillfredsställande.
- Gastemperaturen i den del av eldstaden där eventuell SNCR-injektion sker får inte ligga utanför det aktiva fönstret.

## 7.3 Målsättning och genomförande

Målet med detta projekt är att visa på några metoder för optimerad dellast i brännarpannor med flera brännare för att förbättra driftförhållandena och miljöegenskaperna.

Tre olika brännargeometrier har studerats. Som grundkoncept har valts en panna med endast en brännare symetriskt placerad i eldstaden. Som nästa steg i komplexitet har valts en panna med flera brännare på samma vägg. Ur strömningsteknisk synvinkel torde det mest komplicerade fallet vara en väggeldad panna med brännare på två motstående väggar. De pannor som simulerats är:

- 20 MW takeldad hetvattenpanna med en brännare
- 80 MW takeldad hetvattenpanna med fyra brännare
- 400 MW väggeldad ångpanna med 10 brännare

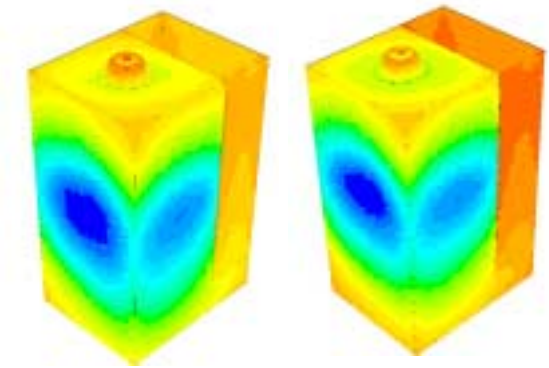
I samtliga fall handlar det om pulverbrännare där bränslet är trä i de takeldade pannorna och torv med inblandning av trä i ångpannan. Arbetet har i huvudsak genomförts som en simuleringsstudie.

## 7.4 Numeriska strömningssimuleringar

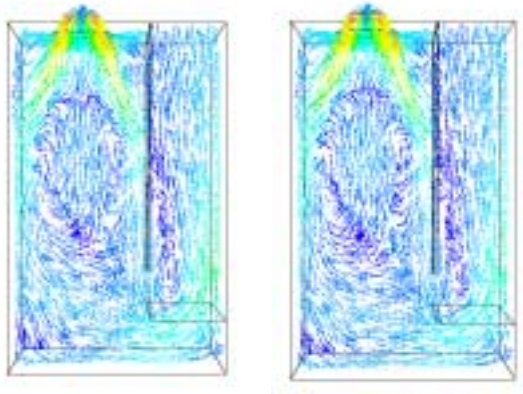
### 7.4.1 Panna med en brännare

I en eldstad som bara har en brännare har man ingen valmöjlighet vid nedregleringen, reglerområdet är detsamma som för brännaren. Dessa simuleringar avser den 20 MW träpulverpanna som finns hos Värmeverket i Enköping. Det pulver man eldar är pellets som malts i en egen kvarn.

Värmeflödet till väggarna visas i Figur 53. Färgskalan är olika så samma färg i den högra bilden (halv last) representerar halva det värmeflöde som den representerar i den vänstra bilden (full last). Blå färg indikerar högt värmeflöde. Fördelningen av värmeöverföring eldstadens väggar är lika men vid olika nivå i de två fallen.

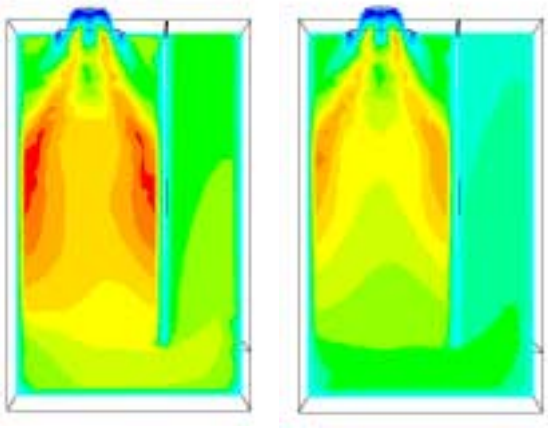


**Figur 53.** Värmeflöde vid fullast (vänster) och halv last (höger) i Enköping. Olika färgskalorna.
*Heat flux at full (left) and half (right) load in Enköping boiler. Different scale.*



**Figur 54.** Hastighetsfältet vid fullast (vänster) och halv last (höger) i Enköping.
*Velocity field at full (left) and half (right) load in Enköping boiler.*

I Figur 54 visas hastighetsfältet i samma två fall och Figur 55 visas gastemperaturfältet. Det framgår här att de högre hastigheterna vid fullast ger en kortare och mer sammanhållen flamma med något högre temperaturer. Skillnaden i längd är dock måttlig, vilket framgår av att värmeöverföringsbilden ser likadan ut och bara skiljer i frågan om absoluta nivån på flödet. På grund av de förenklingar som gjorts bör man dock vara försiktig att dra slutsatser om flammans interna struktur. Denna påverkas av det faktum att pulverpartiklar brinner under en längre tid än gasen och att partiklarna färdas i en ballistisk bana som inte alltid följer gasströmmen fullständigt.



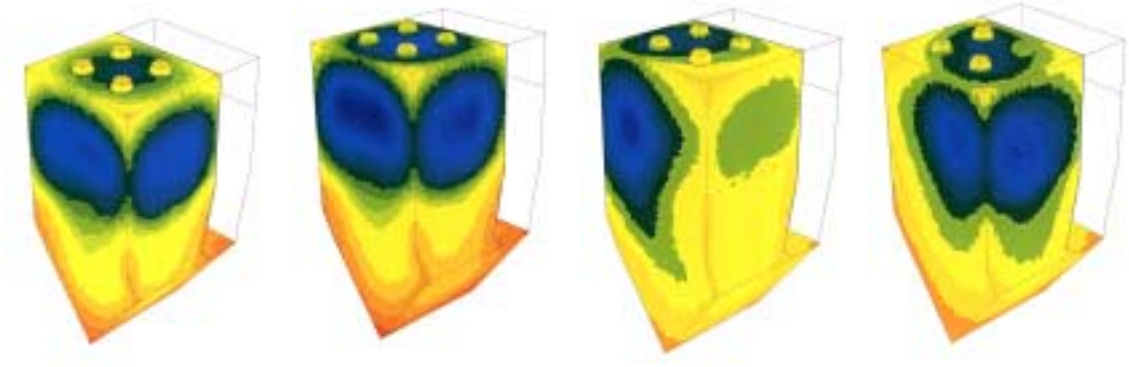
**Figur 55.** Temperaturfältet vid fullast (vänster) och halv last (höger).
*Temperature field at full (left) and half (right) load.*

### 7.4.2 Panna med fyra takmonterade brännare

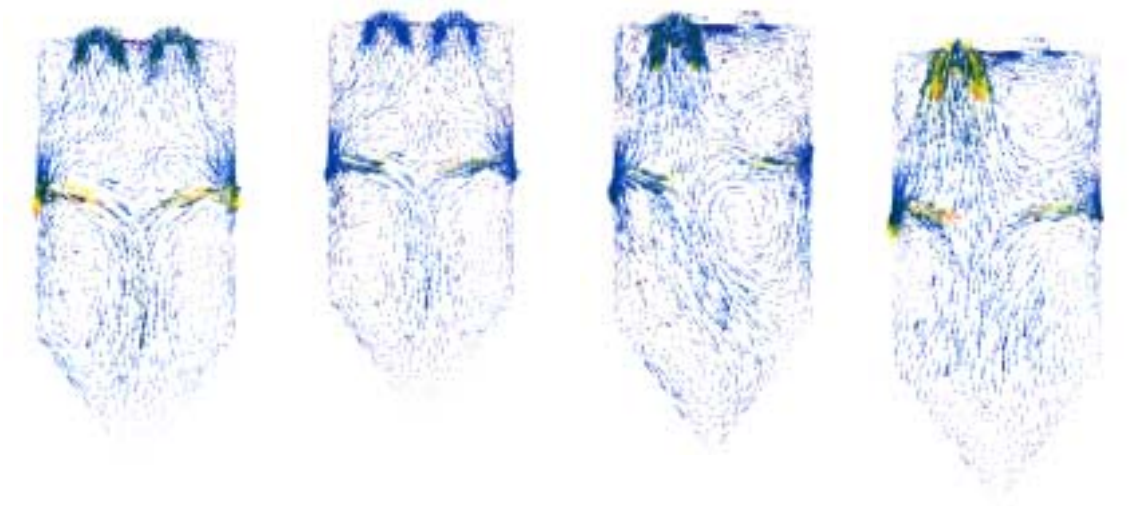
Denna panna drivs inom lastområdet från fullast omkring 80 MW ned till 12 MW. Någonstans i effektläget 30-40 MW väljer man normalt att stänga av två brännare som tas ut och ersätts med keramiska pluggar. På det viset undviker man problemet med kylluft från avstängda brännare som lätt kan bilda kalla stråk i eldstaden, vilket kan orsaka förhöjda CO-utsläpp.

Den strömningstekniska problematiken kring vilka två brännare som skall väljas för avstängning har studerats. Vid simuleringarna har endast det undre av de tre OFA-registren tagits med i modellen.

Värmeöverföringen till väggarna i Jordbropannan visas i Figur 57 för ett fullastfall och tre driftsfall vid 50% last. Dellastfallen är: fyra brännare vid 50% last, två brännare placerade vid samma sidovägg vid 100% last, två diagonalt placerade brännare vid 100% last. Figur 57 visar hastighetsfältet i ett snitt genom två brännare vid samma driftsfall.



**Figur 56.** Värmeöverföring till eldstadens väggar. Från vänster, full last fyra brännare. Halv last fyra brännare, två brännare vid samma sidovägg, två diagonalt placerade brännare.
*Heat distribution to furnace walls. From left, full load, half load four burners, two parallel burners and two diagonal burners. Different heat flux scale at full and part load.*

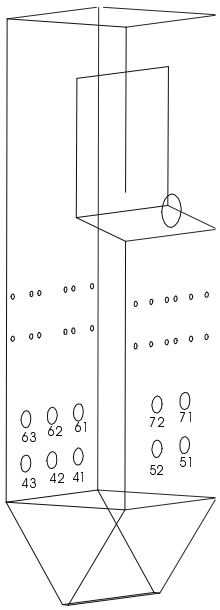


**Figur 57.** Hastighetsfältet i ett snitt genom eldstaden vid. Från vänster, full last fyra brännare. Halv last fyra brännare, två brännare vid samma sidovägg, två diagonalt placerade brännare.
*Gas velocities in a plane through furnace. From left, full load, half load four burners, two parallel burners and two diagonal burners. Different heat flux scale at full and part load.*

Man kan se i Figur 57 att hastighetsfältet är kvalitativt närmast identiskt i de två fallen med fyra brännare. Dessutom framgår det tydligt att strömningen blir mycket mer förvrängd vid drift med två brännare vid samma sidovägg än med diagonalt placerade brännare. Även värmeöverföringen till väggarna blir kraftigt snedfördelad med brännarna vid samma vägg.

### 7.4.3 Panna med motstående väggmonterade brännare

Normal full effekt på denna panna är 400 MW fördelat på 10 st brännare om 40 MW vardera. Det finns ytterligare tre identiska brännare som normalt inte används. Bränslet är torvpulver med en viss inblandning av trä. Vid nedreglering sänker man lasten ungefär lika på alla brännarna tills en eller två brännare kan tas ur drift fullständigt. Vanligen är det de övre brännarna på bakväggen (71 och 72) som stängs av först. Sedan tas de övre yttre brännarna på frontväggen ur drift. De fall som modellerats är 100%, 80% och 60% last med alla brännare i drift vid full last, brännare 71 och 72 urkopplade vid 80% och dessutom 2 fall med 60% last varvid förutom brännare 71 och 72 också brännare 61 och 63 var urkopplade i det ena fallet och 41 och 43 i det andra.



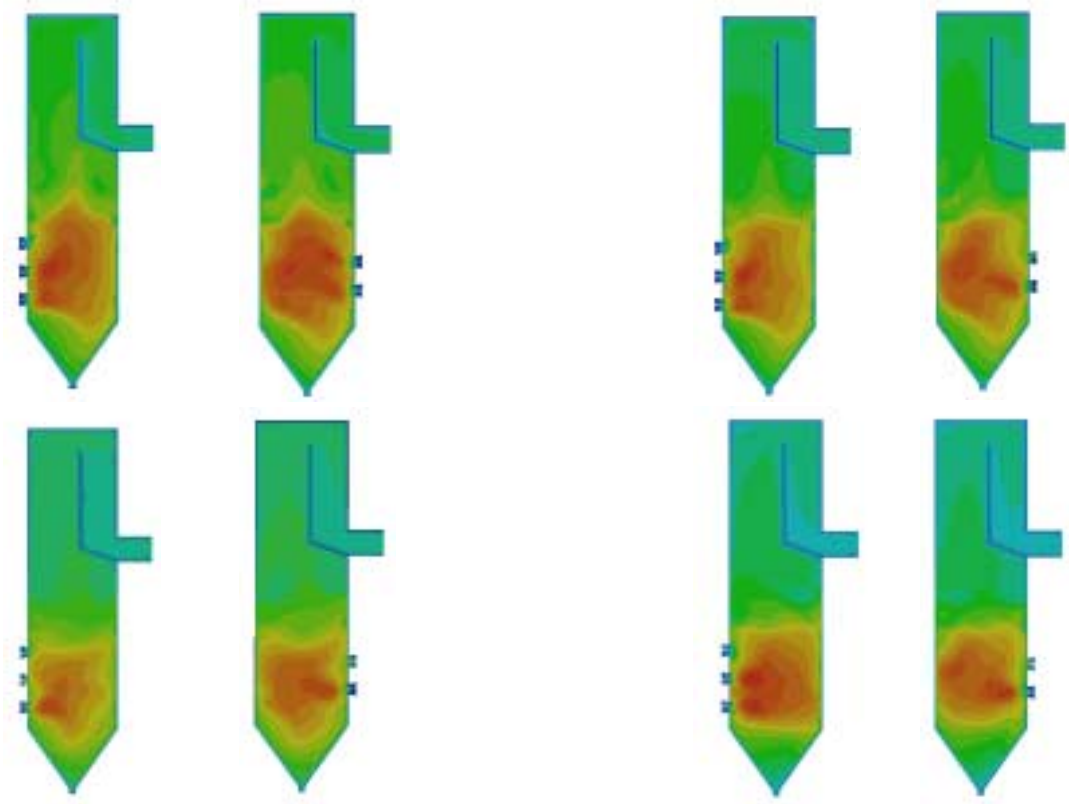

**Figur 58.** Brännarnas placering och numrering.
*Position of burner and their number.*

Strategin vid val av vilka brännare som tas ur drift är att skapa en så väl sammanhållen het zon som möjligt för att upprätthålla goda förutsättningar för fullständig utbränning av bränslepartiklarna. Personalen uppger dessutom att de försöker behålla de undre brännarna i drift så länge som möjligt för att stora bränslepartiklar som faller ner från de övre flammorna skall brinna ut när de passerar de lägre flammorna.

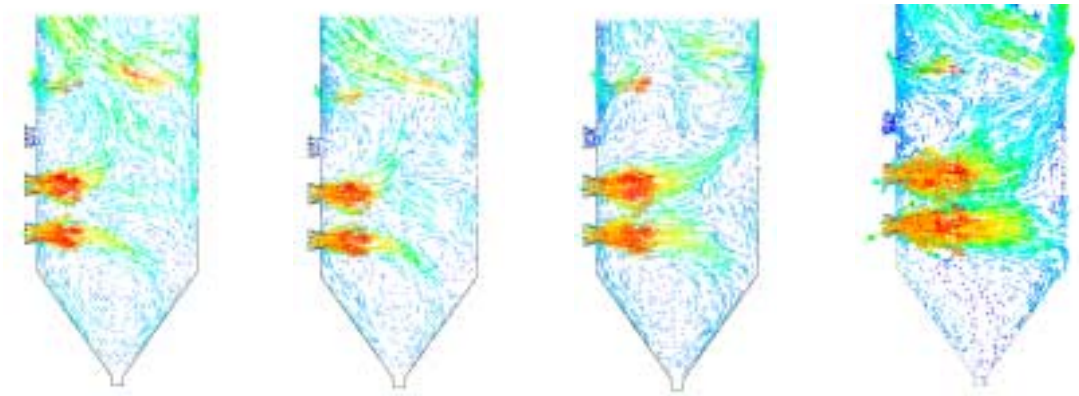
En nackdel med att ta brännare på bakväggen ur drift först är att det endast blir två flammor kvar från bakväggen. Det framgår av Figur 59att temperaturen sjunker nära bakväggen med en förskjutning av den varma zonen mot fronten och nedåt. Lägre temperaturer ökar brinntid för bränslepartiklarna och därmed ökas risken för förhöjda CO-emissioner. En överslagsberäkning visar att en 1 mm bränslepartikel behöver ungefär 20% längre tid för att brinna ut om temperaturen sänks från 1000°C till 900°C. De lägre hastigheter som blir resultatet när lasten och därmed luft och bränsleflödena sänks ger en längre uppehållstid som i viss mån motverkar detta problem. Minskade hastigheterna ger också lägre turbulensgrad och en mindre effektiv blandning vilket ökar risken för stråkbildning och CO-utsläpp.

När lasten sänks till 60% och även två av brännarna på fronten tas ur drift krymper det heta området ytterligare och förskjuts framför allt nedåt. Temperaturerna under brännarna förefaller inte påverkas i någon stor omfattning så länge brännare 41-43 är aktiva, vilket kan ses i Figur 59. Detta beror troligen på att gasen som strömmar ner i denna del av eldstaden huvudsakligen kommer från den undre brännarnivån på fronten, brännare 41-43, vilket kan ses i Figur 60. Då brännarna 41 och 43 kopplas bort i det andra 60% lastfallet kan man se en förändring av både strömningen och temperaturen under brännarna. Temperaturen sjunker och den virvel som bildas då flammorna från brännare 41-43 trycks ner förlorar i intensitet. Det förefaller som om flammorna från brännarna 51 och 52 kan passera utanför övre delen av flamma 42 istället för att som tidigare trycka ner flammorna från den undre brännarraden.

Det framgår av Figur 60 att strömningsmönstret i de nedre brännarnivåerna påverkas kraftigt av det minskade antalet flammor. När brännare 71 och 72 släcks förändras strömningen i ett snitt genom pannans centrumlinje förvånansvärt lite. Det tyder på att den huvudsakliga inverkan på flammorna 61-63 kommer från flammorna 51 och 52 som ju böjer av uppåt och i sin tur trycker upp flammorna 61-63. Därför förefaller det bästa valet vara att stänga av brännarna 71 och 72 som de två första vid en nedreglering om man eftersträvar en minimal inverkan på strömningsfältet i eldstaden. Denna metod resulterar dock i en lägre temperatur i eldstadens övre del.



**Figur 59.** Temperaturfördelning från övre vänstra, 400 MW/10 brännare, 320 MW/8 brännare, 240 MW/6 brännare (61 och 63 ur drift), 240 MW/6 brännare (41 och 43 ur drift).
*Temperature distribution from upper left, 400 MW/10 burners, 320 MW/8 burners, 240 MW/6 burners (61 and 63 out of service), 240 MW/6 burners (41 and 43 out of service).*



**Figur 60.** Strömningsfältet i pannan från vänster, 400 MW/10 brännare, 320 MW/8 brännare, 240 MW/6 brännare (61 och 63 ur drift), 240 MW/6 brännare (41 och 43 ur drift).
*Velocity field from left, 400 MW/10 burners, 320 MW/8 burners, 240 MW/6 burners (61 and 63 out of service), 240 MW/6 burners (41 and 43 out of service).*

Ur $NO_x$-synpunkt kan det vara fördelaktigt att i samband med nedregleringen också stänga brännarna 61-63 och istället tända brännare 81-82. Detta skulle sannolikt ge en oförändrad situation under de undre flammorna och en höjd temperatur i eldstadens övre del samtidigt som förbränningen delas upp i två steg som kan utnyttjas för att få en reburningeffekt.

## 7.5 Diskussion

Ett antal faktorer som är viktiga vid en nedreglering nämns i kapitel 7.2. Som alltid i förbränningssammanhang gäller det att finna en lämplig kompromiss mellan olika faktorer som god förbränning och låga emissioner etc.

Genom att sänka lasten lika mycket i alla brännare blir det storskaliga strömningsmönstret i stort sett oförändrat men med längre uppehållstider på grund av det lägre gasflödet och lägre temperaturer på grund av den sänkta effekten. Internt i brännarna kan man inte sänka alla flöden lika mycket och det finns en nedre gräns då de inte fungerar optimalt längre, se de fyra första punkterna i kapitel 7.2. Därför är det lämpligt att så långt som möjligt reglera alla brännarna lika mycket ner till en undre gräns då en eller flera brännare kopplas ur.

I en ångpanna kommer inte mindre skevheter i värmeupptagningen mellan olika väggar att påverka den termiska expansionen i någon högre grad. Så länge värmeflödet är tillräckligt högt för att säkerställa kokning i alla tuber kommer vattnets koktemperatur att vara dominerande för materialtemperaturen. I självcirkulationspannor kommer strömningsriktningen för vatten och ånga att vara den rätta så fort ånga produceras i alla tuber. En hetvattenpanna kan dock vara mer känslig för en rimligt jämn värmebelastning i alla väggarna för att minimera de termiska spänningarna i pannan.

Förändrad temperatur i eldstadens övre del kommer även att påverka funktionen av eventuell SNCR-injektion då denna teknik kräver att temperaturerna hålls inom ett ganska snävt temperaturfönster. Detta är ett skäl till att försöka driva pannan på sånt sätt att gastemperaturen före överhettare och eldstadsutlopp hålls jämn och hög.

Driftspersonalen i pannan med tio väggbrännare har erfarenheten att stora bränslepartiklar som faller ner ur de övre flammorna har bättre förutsättningar att brinna färdigt om de undre brännarna är igång. Strömningen i eldstadens undre del påverkas minimalt om de övre brännarna kopplas in eller ur så länge de undre flammorna är där. Den del av eldstaden, i fallet med väggbrännare, som är under de undre flammorna är tämligen inaktiv i fråga både om förbränningsreaktioner och om värmeöverföring. Därför är det inte viktigt att upprätthålla strömningsmönstret här.

I fallet med fyra takbrännare regleras alla brännare till omkring 50%, varefter två stängs. Valet är att stänga två brännare vid ena sidoväggen eller två diagonalt placerade. Det första alternativet resulterar i en asymmetrisk strömningssituation i eldstaden, men även i en termisk asymmetri på grund av det snedfördelade värmeflödet till väggarna. En sådan termisk snedfördelning kan medföra oönskade påfrestningar på pannkroppen.

## 7.6 Slutsatser

I en panna med en takbrännare lasten bara regleras genom att pådraget i den enda brännaren. Värmeöverföringen till eldstadens väggar beror då helt på egenskaperna hos den flamman. Pannans regleromräde är identiskt med brännarens.

Två takbrännare ger möjligheten att släcka en brännare och därmed utsträcka reglerområdet till den brännarens lägsta pådrag. Denna konfiguration har inte studerats men en asymmetri i temperaturfält, gasströmning och värmeöverföring till väggarna blir resultatet. En virvel med kalla gaser kommer att bildas under den avstängda brännaren.

Med två takbrännare har man teoretiskt möjligheten att reglera hela vägen från fullast på fyra brännare till minimilast på en brännare. I praktiken är det nog sällan som det är möjligt att få en ensam flamma att fungera bra i en så stor eldstad, därför bör man inte förvänta sig att kunna använda mindre än två brännare. Minsta förvrängning av strömningsfältet och värmeöverföringen till väggarna fås om två diagonalt placerade brännare används vid tvåbrännardrift. Om två parallellt placerade brännare används bildas en stor virvel som upptar halva eldstadens tvärsnitt under de inaktiva brännarna. Denna virvel innehåller kall delvis oförbränd gas som kan ge upphov till bl.a. CO-emissioner.

I eldstäder med väggmonterade brännare påverkas strömningen under de undre flammorna mycket lite av hur brännarna högre upp körs så länge de undre flammorna är aktiva. När de övre flammorna tas ur drift sjunker temperaturen i eldstadens övre delar vilket kan ha en menlig inverkan på värmeöverföringen till överhettarytorna. Det kan också innebära att gastemperaturen hamnar utanför det temperaturfönster där eventuell SNCR fungerar bäst. Av detta skäl är det fördelaktigt att ta de undre brännarna ur drift först. Att strömningen under dem påverkas har troligen en försumbar effekt på förbränningsresultatet.

Bäst funktion hos flammorna uppnås om den heta zonen hålls samman och de brännare som tas ur drift befinner sig i denna zons periferi. Å andra sidan borde man kunna åstadkomma en reburningeffekt om den heta zonen delas upp i en övre och en undre del, vilket bara kan ske om pannan har minst tre brännarnivåer.

Av de tre geometrier som simulerats var det bara i fallet med fyra takbrännare som en signifikant snedfördelning av värmeöverföringen till pannväggarna kunde iakttas. Då två brännare bredvid varandra togs ur drift blev resultatet en så kraftig förskjutning av värmeflödet till väggarna att pannkonstruktionen riskerar att utsättas för termiska spänningar som på sikt kan vara skadliga. Om två diagonalt placerade brännare tas ur drift istället finns det fortfarande en snedfördelning men den är inte lika kraftig.

# 8 IN SITU ÖVERVAKNING AV FUNKTION HOS BRÄNNARE

## 8.1 Bakgrund

Det är ofta svårt att identifiera vilken brännare i en panna som fungerar dåligt även då det är uppenbart att det finns ett problem. Målsättningen med detta projekt är att undersöka vilka praktiska resultat man kan få från två olika metoder att detektera förändringar i enskilda brännares funktion under drift. Med de föreslagna metoderna bör det vara möjligt att inte bara identifiera vilken brännare som fungerar dåligt utan även göra det innan det har gått så långt att det påverkar hela pannans prestanda.

I projektet var avsikten att använda dels en traditionell spårgasanalys och dels att temporärt sänka mängden tillgängligt syre i en brännare genom att tillsätta mer bränsle i form av propan eller lättolja. Denna bränsletillsats bedömdes kunna ge liknande information som spårgastillsats. Helium är inert och lätt att detektera vid mycket låga koncentrationer med en masspektrometer. Propan och lättolja är billiga och lätta att anskaffa och hantera. Systemets svar mättes i det senare fallet med hjälp av befintliga gasanalysatorer.

Grundidén är att man genomför någon av testerna regelbundet, t.ex. en gång om dagen. Svarskurvan sparas och jämförs med tidigare resultat. En gradvis försämring av brännarens funktion kan då detekteras i form av en långsam förändring av kurvans utseende. Ett plötsligt påslag eller liknande kan identifieras som en plötslig förändring i svaret från en brännare.

## 8.2 Målsättning

Projektet syftar till att utvärdera olika metoder för att med hjälp av regelbundna injektioner av en spårgas eller extra bränsletillsats i brännarna undersöka hur dess kondition och intrimning förändras.

## 8.3 Projektets genomförande

Projektet genomfördes i två olika anläggningar, spårgasanalys i Uppsala och ökad bränsletillförsel i Jordbro, trots att det i den ursprungliga planeringen var tänkt att prova båda metoderna i samma panna. Orsaken var att det inte visade sig möjligt att köra pannan i Uppsala utan OFA varför metoden med ökad bränsletillförsel inte bedömdes genomförbar på ett framgångsrikt sätt.

I Uppsala användes Helium som spårgas och en heliumläcksökare för detektering. I Jordbro användes lättolja för att sänka luftöverskottet i den brännare som skulle undersökas och en extra datalogger anslöts för att få tillräckligt god upplösning på framför allt CO- och $O_2$-signalerna. Propan har inte används inom projektet då det visade sig enklast att injicera lättoljan i de befintliga oljemunstyckena i brännarna.

### 8.3.1 Ökat bränsleflöde i enskilda brännare

Försöken genomfördes i panna 34 vid Vattenfall Drefvikens anläggning i Jordbro. Pannan är på nominellt 78 MW bränsleeffekt och har levererats av Kvaerner. Den är träpulvereldad och har fyra takbrännare från PetroKraft. Eldstadens dimensioner är 16,5*5,5*6,5 m. På vardera sidoväggen sitter tre OFA-register med sex dysor i varje. På två nivåer under OFA-registren tillsätts ammoniak för SNCR.

## Olja

Vid försöken samlades driftdata enligt Tabell 5 in från den befintliga instrumenteringen med hjälp av en separat logger. Mätvärden samlades in varje sekund Värdena medelvärdesbildades och sparades som tvåsekundersmedelvärden.

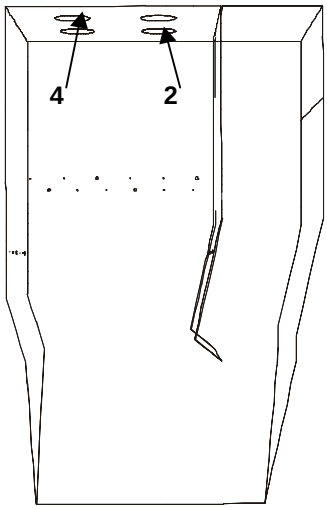
**Tabell 5.** Data som loggades / *Logged data.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| CO | (ppm) | Effekt nätet | (MW) |
| $O_2$ | (%) | Domtryck | (bar) |
| NO | (ppm) | Sekundärluft 1 & 2 | (kPa) |
| $H_2O$ | (%) | Sekundärluft 3 & 4 | (kPa) |
| $NH_3$ | (ppm) | | |

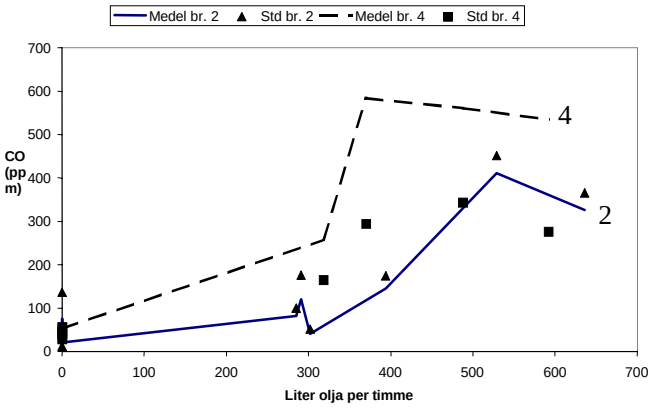
För att inte resultatet av oljetillsatsen skulle störas/spädas ut onödigt mycket användes den instrumentering för gasanalys som installerats närmast själva eldstaden.

## Mätresultat

Mätningar genomfördes med dosering av olja i brännare 2 och 4, placeringen framgår av Figur 61.




**Figur 61.** Brännarnas placering i Drefvikenpannan. *Burners in the Drefviken pulverised wood boiler.*

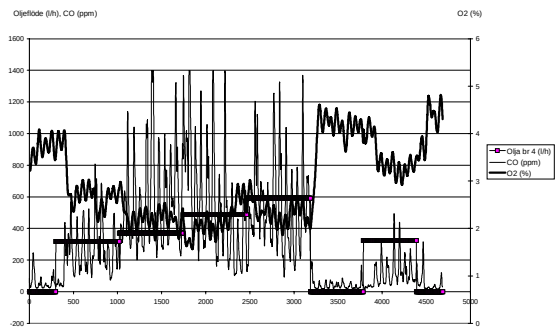



**Figur 62.** Uppmätta CO-halter i rökgasen vid olika oljedosering till brännare 2 och 4. (Utan OFA). *Registered CO-emission vs. oil supplied to burner 2 and 4. (No OFA)*

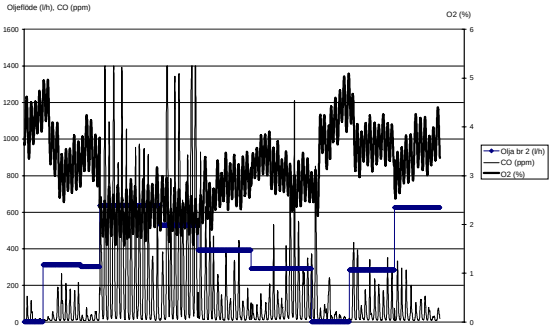
I Figur 62 visas medelvärden av uppmätta CO-halter vid olika oljedosering till brännarna 2 och 4. Man ser tydligt att CO-halten blir väsentligt högre när en viss mängd olja doseras i brännare 4 jämfört med om samma mängd tillsätts i brännare 2. Dessutom ökar CO-halten mer i brännare 4 än i brännare 2 när oljetillsatsen ökas (kurvan lutar brantare uppåt). Brännare 4 går enligt driftspersonalens erfarenheter sämre än nr 2. Vid okulär inspektion genom ett av de siktglas som finns på pannan kunde en klar instabilitet i flamman från brännare 4 iakttas. Flamman försvann vid flera tillfällen under en till två sekunder, detta kunde inte observeras i flamman från brännare 2.

Figur 63 och Figur 64visar de loggade värdena för syre och CO-halter vid oljedosering i brännarna 2 och 4. Man kan lätt se att CO-halterna vid en måttlig oljedosering i brännare 4 lägger sig på en nivå som har sitt minimum någonstans mellan 100 och 200 ppm. Vid samma oljedosering i brännare 2 ligger minimivärdena för CO hela tiden på 0 ppm,

topparna ligger på samma nivå i båda fallen men medelvärdet är påtagligt lägre vid dosering i brännare 2, vilket kan ses i Figur 64.



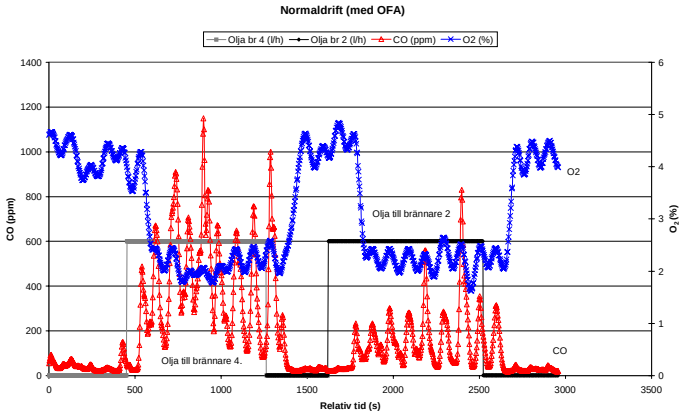

**Figur 63.** Syre och CO i rökgasen vid dosering av olja till brännare 4. (Utan OFA.)
*Oxygen and CO at oil supplied to burner 4.*




**Figur 64.** Syre och CO i rökgasen vid olika dosering av olja till brännare 2. (Utan OFA.)
*Oxygen and CO at oil supplied to burner 2.*

Vid mätningarna som diskuteras ovan var OFA-registren inte i drift, all luft tillsattes genom brännarna. I Figur 65 kan man se att samma fenomen kan iakttas även om OFA-luft tillsätts genom de undre OFA-registren. Till vänster i diagrammet (Figur 65) tillsätts 600 l/h genom brännare 4 och till höger går samma flöde till brännare 2. I båda fallen sjunker syrehalten till samma nivå vid oljedoseringen.

Det finns en tydlig skillnad i CO-nivåerna som kan iakttas trots att OFA-luften kan förväntas ha en maskerande effekt tack vare den omblandning den skapar. $O_2$- och CO-nivåerna blir betydligt stabilare vid denna (normala) drift vilket gör resultaten tydligare.




**Figur 65.** Jämförelse mellan förändringen i syre och CO-halter vid dosering av samma mängd olja i brännare 2 respektive 4. (Med OFA.)
*Comparison of changes in $O_2$ and CO at supply of the same flow of oil to burner 2 and 4. (OFA).*

### 8.3.2 Spårgasanalys

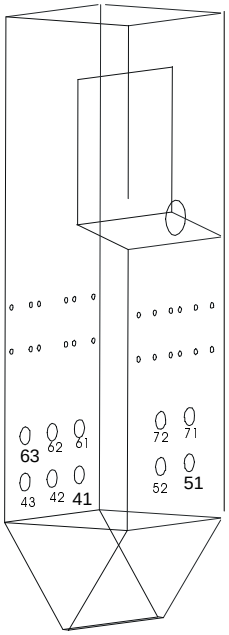
Kraftverkspannan i Uppsala har tio brännare och en effekt på 400 MWth vid full last. Bränslet är torv med 20% inblandning av spån. En bränsleanalys som tagits ur rapporten från en fysisk modellering av pannan vilken utförts på avdelningen för Värme och Ugnsteknik på KTH [1] visas nedan.

| Bränsleanalys (Torv + 20% spån) | |
|---|---|
| C (%ts) | 42 |
| H (%ts) | 4,6 |
| O (%ts) | 28,5 |
| N (%ts) | 1,7 |
| S (%ts) | 0,2 |
| Aska (%ts) | 3,9 |
| Fukt (%) | 19,0 |
| Effektivt värmevärde i leveranstillstånd (MJ/kg) | 14,74 |

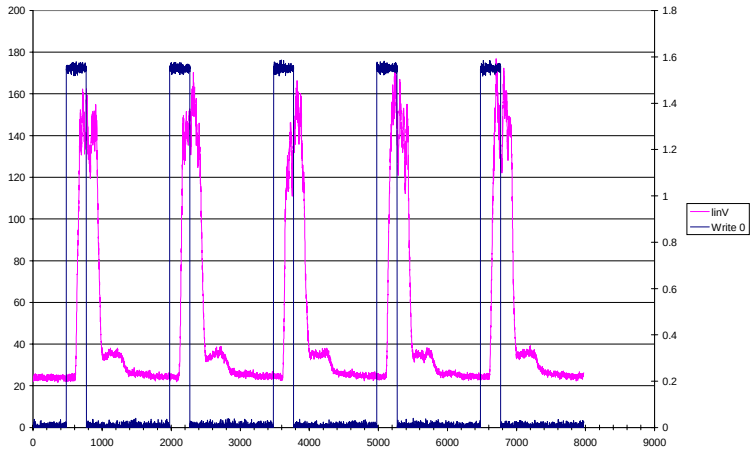
Rökgasflödet vid fullast är omkring 710 000 $m^3$n/h vid 5% (fuktigt) $O_2$ i rökgaserna. Med en rökgasåterföring på 100 000 $m^3$n/h blir det totala flödet ur eldstaden 810 000 $m^3$n/h.

**Mätresultat**

Mätningar genomfördes med dosering av Helium i brännarna 41, 51 och 63. Deras placering kan ses i Figur 66. Läcksökarens provtagningspunkt var på panntaket. Gasprover togs i tre positioner längs linjer på djupen 2,5 och 3,5 m ner från pannans innertak. Ett exempel på mätdata visas i Figur 67. Svaret från läcksökaren analyseras genom att en kurva anpassas till mätdata och från dess matematiska form kan man utvärdera medeluppehållstid, tidskonstant och Pecles tal (Pe-tal) som är ett mått på blandningen i eldstaden. Ur rent teoretiska resonemang kan man från eldstadens geometri härleda ett maximalt Pe-talet som om det överskrids indikerar att blandningen inte fungerar tillfredsställande.

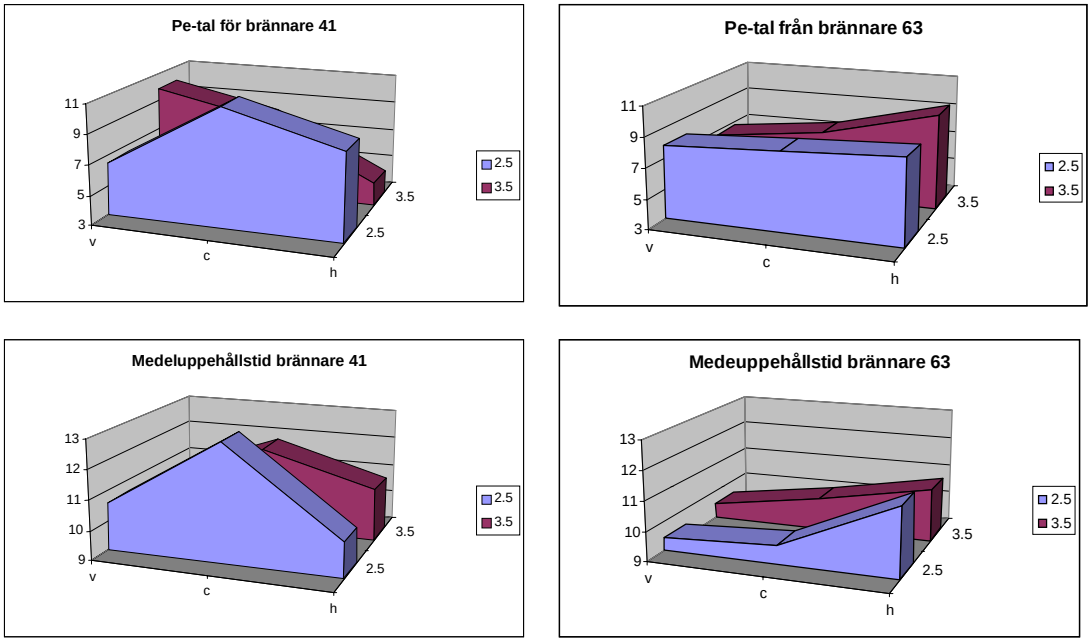



**Figur 66.** Brännarnas placering i Uppsalapannan.
*Burners in the Uppsala boiler.*




**Figur 67.** Data från spårgasprov, svart är He-puls och röd pulssvar i eldstadsutlopp.
*Trace gas test, black is He-puls and red the puls responce in furnace exit.*

Utvärderingen av Pecles tal (Figur 68 och Tabell 6) visar att gaserna från samtliga testade brännare, ur ett teoretiskt perspektiv, blandar sig tillfredsställande med de omgivande eldstadsgaserna. Pe-talet är mindre än Pe-max. (Pe-max är beräknat utifrån panngeometrin).



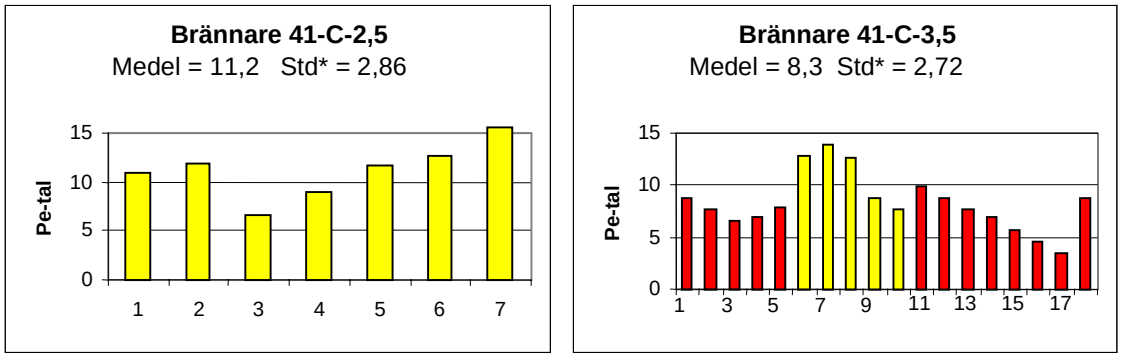

**Figur 68.** Pe-tal och medeluppehållstider för heliumpulser till brännarna 41 och 63 i mätplan på 2,5 och 3,5 m avståndet till eldstadens tak. V, c och h står för de tre mätöppningarna i taket. *Pe-number and mean residence time for He-pulses to burner 41 and 63 in the plane at 2.5 and 3.5m distance from furnace roof. v, c and h are the accesports to the furnace.*

Diagrammen visar att man får större Pe-tal (sämre blandning) när provet tas ut på samma sida som brännaren är monterad än när provet tas ut på den motsatta sidan. Det är logiskt att omblandningen blir bättre om gasen har transporterats en längre sträcka och därmed haft en längre uppehållstid i eldstaden. Det syns också en ganska stor skillnad i medeluppehållstid. För brännare 63 i det övre planet är den kortare än för brännare 41 i det undre brännarplanet. Trots den kortare uppehållstiden för 63 är gasen från den bättre fördelad över tvärsnittet än gasen från den undre brännaren.

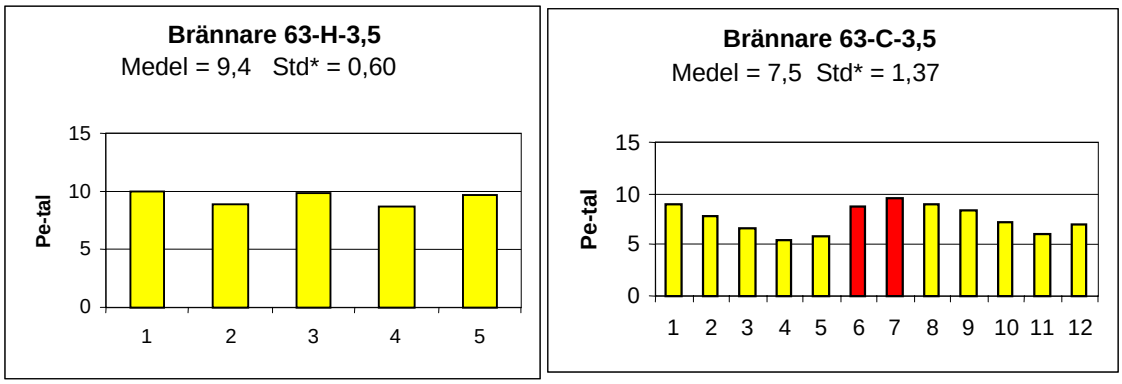
**Tabell 6.** God omblandning då mätt Pe-tal, Pe-medel, är mindre högsta önskvärda Pe-max. *Good mixing when measured Pe-number, Pe-medel, is less than Pe-max*.

| Brännare | Pe-max | Pe-medel |
|---|---|---|
| 41 | 14,1 | 8,2 |
| 51 | 13,4 | 10,1 |
| 63 | 12,8 | 8,1 |

Metodens användbarhet för att detektera förändringar i enskilda brännare är inte tydlig och det krävs ytterligare arbete för att få metoden användbar. Diagrammen nedan (Figur 69 och Figur 70) visar att repeterbarheten i vissa fall är mycket god, men i andra fall ser man att Pe-talet stiger eller sjunker i en och samma mätserie. Om resultaten från flera heliumpulser medelvärdebildas ligger värdena på Pe-talet rimligt nära varandra. Det är positivt att Pe-talen inte varierar helt slumpmässigt. Det tyder på att det är fråga om variationer, troligen mycket små, i driften som påverkar resultatet förhållandevis mycket. Genom att göra ett större antal försök i varje brännare och medelvärdebilda resultatet kan det vara möjligt att detektera funktionsförändringar.




**Figur 69.** Pe-tal beräknat ur He-puls till brännare 41. De ljusa = 280 MW, de mörka = 180 MW.
*Pe-number evaluated from He-puls to burner 41, light = 280 MW and dark = 180 MW.*
*) Standardavvikelse/*standard devaition*




**Figur 70.** Pe-tal beräknat ur He-puls till brännare 63. De ljusa = 280 MW, de mörka = 180 MW.
*Pe-number evaluated from He-puls to burner 41, light = 280 MW and dark = 180 MW.*
*) Standardavvikelse/*standard devaition*

## 8.4 Diskussion

Båda metoderna har potential att utvecklas till användbara metoder för att under drift bedöma tillståndet för enskilda brännares i pannor med flera brännare.

**Resultaten från försöken med oljetillsats i Jordbro** visar att metoden bör gå att använda i denna anläggning såväl när det gäller att under drift finna enskilda brännare med problem som när det gäller att individuellt optimera driftbetingelserna för varje brännare. Det återstår att testa metoden på en och samma brännare med och utan störning.

Det skulle vara fördelaktigt om det var möjligt att använda standardbränslet i pannan, träpulver istället. Problemet med pulverbränslen är dock osäkerheten i doserad mängd. För att metoden skall vara reproducerbar måste noggrannheten i bränsledoseringen vara god vilket medför att i första hand flytande bränslen är aktuella. Givetvis är det då önskvärt att det befintliga tjockoljesystemet kan användas i stället för ett extra oljesystem för lättolja. Rimligtvis kan sameldning av trä och tjockolja ske under korta perioder utan några problem med askan (jämför också sameldningen olja/träpulver i Hässelby).

Eftersom det fortfarande fanns tydliga skillnader i rökgasens CO-halt även då OFA-luften användes bör metoden kunna vara användbar även i pannor som den i Uppsala med flera. Pannorna i Uppsala och Jordbro har dessutom liknande uppehållstider och Pe-tal enligt tidigare undersökningar inom Branschforskningsprogram vilket ytterligare understryker möjligheten att använda metoden med oljetillsats i pannan i Uppsala.

Metoden har potential att utvecklas till en automatisk kontinuerlig optimeringsprocedur för brännarnas drift. Genom att kontinuerligt justera bränsle/luftförhållandet i en brännare i taget tills CO-halterna börjar öka, varefter luftfraktionen ökas något för att ge en marginal för naturliga variationer i flöden och bränsleegenskaper skulle det vara möjligt att driva varje enskild brännare i sin optimala driftpunkt. Det blir dock nödvändigt att erfarenhetsmässigt identifiera det "säkra" luftöverskott som måste tillföras varje brännare för att undvika överhettning, påslagsproblem etc. Genom att utnyttja ett väldefinierat bränsletillskott blir det dessutom möjligt att se om brännaren har en förväntad marginal mot störningar eller om denna nedsatts genom skador, askpåslag eller dyligt.

**Resultaten av spårgasmätningarna i Uppsala** visar att metoden ger repeterbara resultat i vissa brännare och att den information mätningarna i övrigt ger stämmer överens med vad man kan förvänta sig. I en eldstad med mindre komplex strömning bör metoden vara praktiskt användbar med en mindre utvecklingsinsats.

Det finns flera tänkbara utvecklingsvägar för denna metod. En möjlighet är att göra ytterligare försök med spårgas för att fastställa hur olika driftförhållanden påverkar resultatet av mätningarna och om det är möjligt att få bättre noggrannhet i utvärderingen. I dagsläget verkar det som det krävs ett relativt stort antal mätpunkter (10-20 st) som medelvärdebildas för att ge ett användbart resultat. Kostnaden för spårgas vid ett sådant mätsätt blir tyvärr hög med den använda metoden, cirka 500 kr/brännare vid varje testcykel. Det finns två möjligheter att hålla gaskostnaden på en rimlig nivå, dels kan man minska antalet testtillfällen och dels kan man använda en utvärderingsmetod i vilken pulsernas längd kan göras betydligt kortare.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att båda metoderna behöver viss vidareutveckling. Med en extra bränsletillsats fås en metod där befintlig driftsutrustning och instrumentering kan utnyttjas vilket torde vara en fördel om den skall användas av driftpersonal eller automatiseras och läggas in i styr och övervakningssystemet. Spårgasmetoden kräver en avsevärt mycket mer avancerad mätutrustning och speciella inerta provgaser. Den är framför allt användbar för att karaktärisera förhållandena i en eldstad vid särskilda mät/provkampanjer.

## 8.5 Slutsatser

Metoden med ökad bränsletillsats (olja) – och därmed lokalt sänkt luftöverskott - för att detektera olikheter i brännarnas funktion fungerar bra i anläggningen i Jordbro, även när OFA används. Vår bedömning är att metoden är i det närmaste praktiskt användbar. Eftersom metoden inte kräver någon komplicerad mätutrustning utöver en CO-mätare är den enkelt applicerbar på de flesta brännarpannor. Genom att bränsletillsatsen ger olika svar på ökat bränsleflöde beroende på brännarens status kan metoden även vara av intresse för pannor med en brännare.

Har man god kontroll på bränsle och luftflöden till varje enskild brännare är det inte nödvändigt att tillföra något ytterligare bränsle såsom olja eller propan. Testerna kan då utföras genom att öka bränsleflödet till en enskild brännare. Olja användes i försöken endast för att det är lätt att reglera och flödet är kontrollerbart och reproducerbart. Metoden kan speciellt i detta fall automatiseras och användas för kontinuerlig brännartrimning.

Spårgasmätningarna är svårtolkade. Pe-talet skiljer sig åt i samma brännare vid olika mätningar. Metoden bedöms vara användbar, men det behövs ytterligare arbete för att få den robust. Troligen är det nödvändigt att använda flera pulser som medelvärdebildas för att uppnå ett fullgott resultat. Resultaten vissa att mätningarna i vissa brännare har givit god repeterbarhet vilket tyder på att metoden med måttliga utvecklingsinsatser är användbar i eldstäder med mindre komplex strömning.

## 8.6 Referenser

1 *J. Vaclavinek, P. Lidegran, C. Hellen, J. Bång, W. Blasiak*
**Fysisk modellering av Fyriskrafts värmekraftpanna.**
KTH, Stockholm (1997).

# TEKNIKOBEROENDE FoU

Inte bara för bäddsintring utan även ur påslagsynpunkt har användningen av biobränslen medfört ökade problem med påslag i pannans konvektionsdelar. Detta gäller speciellt för snabbväxande bränslen och återvinningsbränslen. I ett parallellprojekt till det om sintring av i fluidbäddar har samma metoder använts för att förutsäga påslagsproblem i en panna utifrån askanalyser och experimentella undersökningar. Även här har tillsats av additiv för att minska problemen undersökts.

Även en fortsättning på 97/98-års arbete med att förbättra funktionen i luftlådor och hur sekundär/tertiärluft kan tillföras effektivare till eldstäder har genomförts. Här lämnas förslag på hur, med relativt enkla medel, luftfördelningen i en luftlåda kan förbättras men även hur inblandningen av sekundärt tillförd luft kan göras mer optimalt.

# 9 ASKSINTRINGSPROBLEM I KONVEKTIONSPAKET (FORTSÄTTNING)

## 9.1 Bakgrund

Bildning av påslag i högtemperaturdelen i en panna är ett ganska vitt begrepp och formen av påslagen, t.ex. smälta, sintrade och lösa, varierar väsentligt från fall till fall, vilket beror på en mängd olika faktorer. Den kanske viktigaste faktorn är halterna av komponenter i bränslet, först och främst K, Cl, och S samt även Ca och Si, som spelar en central roll vid bildningen av påslaget längre ner i pannan. De förstnämnda bildar i ogynnsamma fall lågsmältande föreningar, s.k. eutektika, med låga smältpunkter på askpartikelytorna i rökgasen. Rökgasens temperatur ligger i många fall inom samma temperaturområde eller högre vilket ger ett klibbigt ytskikt som lätt fastnar på kallare ytor, t.ex. på tuber i överhettare och konvektionsdelar, längre ner i pannan. På grund av kloridernas höga ångtryck vid dessa temperaturer kommer alkaliklorider till en del att finnas i gasform i eldstaden. Dessa kan sedan kondensera på panntuberna. Detta kan snabbt leda till kraftiga påslag som kan ge problem med tryckfall och värmeöverföringen till tuberna. Om förhållandena är de rätta sker en fortsatt kemisk omvandling av påslaget till sintrat material eller om temperaturen är tillräckligt hög bildas även smälta glasartade material. De senare materialen innehåller ofta höga halter av Cl och K (kanske även S) vilket ofta leder till korrosion på tubmaterialet.

Genom att sätta till material som neutraliserar effekten av de klibbiga föreningarna eller som adsorberar de ämnen som är orsaken, kan problemen med påslagen reduceras. Olika typer av problem förväntas dock kräva olika lösningar.

## 9.2 Målsättning

Målsättningen med det föreliggande projektet var att utveckla enkla metoder för att förutsäga sintringsbenägenheten i högtemperaturdelen vid eldning av olika bränslen. Undersökningen inriktades även mot att identifiera lämpliga additiv till problembränslen för att minska påslagriskerna vid eldning med dem.

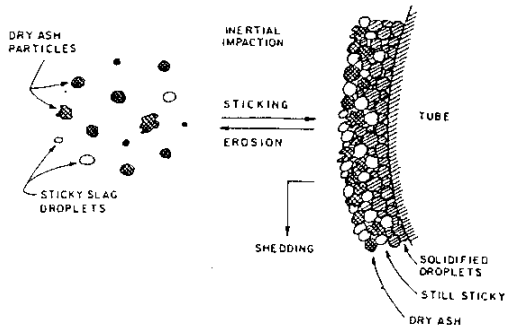
## 9.3 Teori

### 9.3.1 Mekanismer vid påslagsbildning

Det finns ingen enhetlig mekanism för påslagsbildningen, och för att underlätta förståelsen vid diskussioner bör man skilja mellan olika faser:

- Frigörelsen av påslagsbildande komponenter ur bränslet vid förbränningen.
- Kemisk omvandling (oxidation, salt- och glasbildning, mm) av askkomponenterna.
- Transport av påslagsbildande komponenter (atomer, molekyler och partiklar) till pannytorna för påslagsbildningen.
- En initieringsperiod då ett första lager av t.ex. alkalisalt eller mjuka eller kladdiga partiklar deponeras på underlaget.
- En tillväxtperiod där ytterligare askpartiklar fastnar, vilket leder till ett tjockare och tyngre påslag. Efterhand som påslaget växer till kommer det också att isolera den underliggande kylytan vilket medför att temperaturen i ytan blir högre och högre. Så småningom kan detta leda till att påslaget får en hårt sintrad eller smält yta.
- När påslaget har växt kraftigt inträder ett jämviktsförhållande som beror på att den mekaniska hållfastheten inte är tillräckligt hög för att motstå påslagets ökande vikt, de allt högre gashastigheterna eller att temperaturen blir så hög att ytan smälter bort.

Bakom dessa olika faser döljer sig ofta ett flertal olika mekanismer. De mekanismer som initierar påslagsbildningen är sällan identiska med dem som bidrar till påslagets tillväxt (Figur 71).




**Figur 71.** Exempel på tillväxt av påslag genom partikelimpaktion.
*Example of the growth of ash-layer on tube-surface by impaction.*

### 9.3.2 Åtgärder för att förhindra påslagsbildning

Tänkbara alternativ för att åtgärda påslagsbildning är tillsats av additiv till bränslet eller olika metoder för att tvätta eller blåsa bort bildade påslag. Det mest attraktiva alternativet är tillsats av additiv där man försöker styra askans sammansättning på ett sådant sätt att askans smälttemperatur höjs för att undvika att smälta bildas, vilket i sin tur minskar risken för påslag. Möjliga additiv kan indelas i två huvudgrupper:

- Additiv som reagerar kemiskt med de askbildande ämnena i bränslet för att förhindra att lättsmältande föreningar bildas
- Additiv som i sig är inerta men med stor tillgänglig yta, som kan adsorbera kondenserande föreningar i rökgasen (medför att askan inte fäster på värmeöverföringsytor).

Tidigare studier av additivtillsats har visat att följande material kan ha positiv effekt:

- Bränd kalksten. Adsorbera och samtidigt passivisera vissa besvärliga ämnen, t.ex. alkalisalter.
- Kalcinerad dolomit. En kalksten med liknande funktion som kalk men inte lika reaktiv.

- Kaolin. Ett lermineral med en stor specifik yta, som adsorberar besvärlig ämnen på liknande sätt om kalk och dolomit. Neutraliserar effekten av alkali genom att bilda föreningar med högre smälttemperatur till exempel kaliophilit (KAlSiO4) med kalium.

Alternativ till tillsats av additiv är att bland besvärliga bränslen med ett eller några andra bränslen med mindre besvärliga egenskaper för att späda ut eller komplettera de besvärliga påslagsbildande komponenterna. Torv används ofta för att minska påslagsproblem. Torv anses påverka både genom att tillföra svavel till systemet dels genom att tillföra lermineral och ökar andelen kisel och aluminium i mineralblandningen.

## 9.4 Genomförande

### 9.4.1 Sammanställning – påslagserfarenheter

Den nuvarande undersökningen bygger vidare på undersökningar som första gången startades under hösten 1997 och sedan fortsatte under 1998/1999. En bra bas till sammanställningen i denna rapport är Värmeforskrapport nr 607, vilken ger en bra bild av problemen både nationellt och internationellt.

Undersökningen baseras på utskick av frågeformulär till deltagare i projektet samt även uppföljning genom personliga samtal. I några fall har prover på bränsle och påslag inkluderats i sammanställningen.

### 9.4.2 Enkla tester av metoder för bränslekarakterisering

Utvecklingen av enkla testmetoder fokuserade i första degelförsök att användas som ett verktyg för att påvisa risken för sintring för givna blandningar av bränslen och bäddmaterial i FB och CFB-pannor.

Degelförsöken går förenklat ut på att inaska bränsleprover vid förbestämda temperaturnivåer i vanliga öppna porslinsdeglar och i vanliga laboratorieugnar. Vanligen inaskas enbart bränslet där askan sedan analyseras visuellt med ljusmikroskop och eventuellt med någon kemisk analys. I den nuvarande undersökningen utfördes även kompletterande inaskning i närvaro av bäddmaterial. Metoden är densamma som finns beskriven i FB/CFB-projektet kapitel 4. De bränslen som användes vid proven var, Lusern (ett åkerbränsle med välkänt besvärliga askegenskaper), bark och GROT som representanter för vanligt förekommande bränslen.

### 9.4.3 Påslagstester i laboratorieuppställning

Påslagstesterna utfördes i en laboratorieuppställning med en bränsleeffekt på 10-20 kW (termisk effekt). Uppställningen är utrustad med brännare för simulering av både pulverförbränning (PF) och bubblande fluidbädd (BFB) (Figur 73). Vid PF simuleringen användes en brännare av flatflamstyp. BFB-försöken genomfördes med ett fåtal undantag uteslutande med Baskarpsand som bäddmaterial.

Påslagsprov samlandes in på luftkylda påslagssonder placerade i rökgasflödet. Dessa var försedda med provringar av lämpligt tubmaterial (Figur 72). Två sonder användes samtidigt vid försöken.

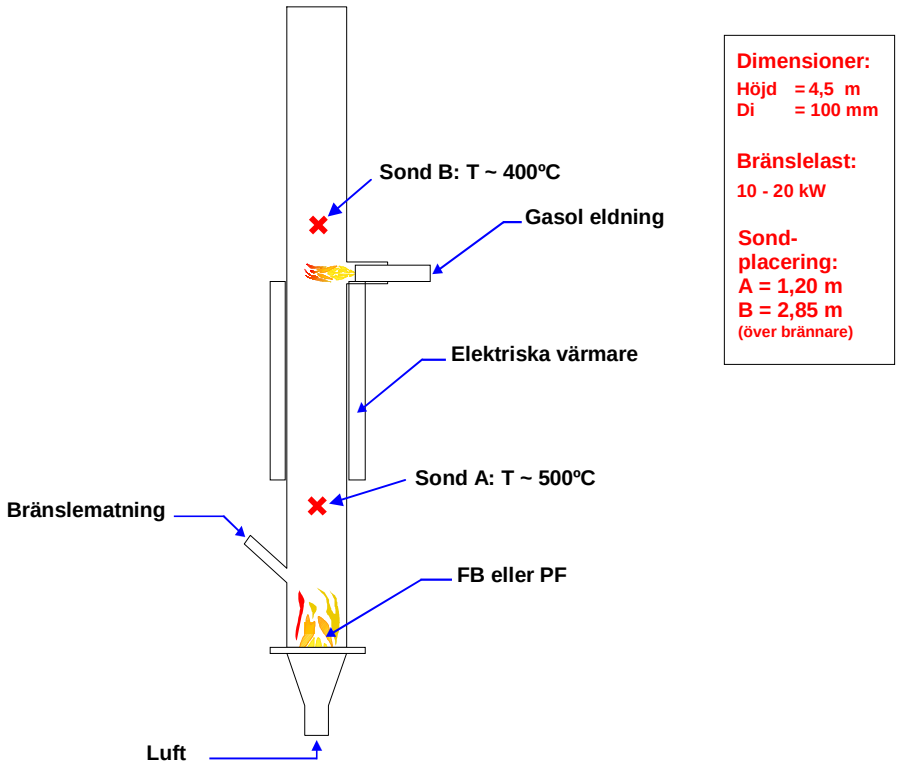


**Figur 72.** Påslagssonderna som användes vid laboratorieförsöken. Pilen motsvarar ca 220 mm i verkligheten. Infällt i bilden syns två provringar efter exponering.
*Fouling probe used in the laboratory experiments. The length indicated by the arrow is c 220 mm. In the picture is also two exposed test pieces.*

Provringarnas temperatur valdes med hänsyn till typiska övertemperaturer i biobränsle- och avfallspanna till ca 400 och 500ºC. Dessa temperaturer användes genomgående i försöken förutom vid ett fåtal fall. Försökstiden maximerades till 3 timmar p.g.a. begränsningar i utmatning av bäddaska. Förbränningsgasens temperatur (uppmätt strax efter brännare och i bädden) var ca 850ºC vid BFB och >1100ºC vid PF-försöken.

Ett fåtal av påslagsmätningarna kunde inte genomföras p.g.a. begränsningarna i askutmatning som tidigare nämnts ovan.

Påslagsproven analyserades optiskt (inkl. fotografering) och kemiskt med SEM/EDX. Den senare metoden gav en ungefärlig och genomsnittlig kemisk sammansättning av påslaget nära ytan (huvudkomponenter). Några av proverna undersöktes även genom vägning respektive med s.k. kemisk fraktionerad analys där mängden bildat påslag respektive andelarna vattenlösliga och olösliga komponenter bestämdes.




**Figur 73.** Påslagsprov togs med sonder i rökgasflödet i punkterna A och B.
*Fouling samples captured by probes in position A and B*

### 9.4.4 Påslagstester i pannor i drift

I studien ingick fyra olika verk Hässelbyverket (Birka Energi AB), Västermalmsverket (Falun Energi), Drefviken (Vattenfall AB) och Åbyverket (Örebro Energi AB).

Påslagstesterna utfördes med en s.k. trippelavlagringssond (Vattenfall Utveckling AB) med plats för tre provringar samtidigt. Provringarnas temperaturer var 400, 500 och 600ºC vid försöken, vilket valdes som en lämplig avvägning mellan verklig material-temperatur och möjlighet att ”tvinga fram” klorkondensation

Den kemiska analysen av det bildade påslaget analyseras av Åbo Akademi på samma sätt som vid påslagsförsöken i laboratorieuppställningen.

### 9.4.5 Nyckeltal

Nyckeltal kan förenklat beskrivas som ett verktyg för grova förutsägelser av vilka ämnen som kan ställa till problem i en förbränningsanläggning, d.v.s. vilka ämnen som möjligen orsakar t.ex. bildning av påslag i vitala delar.

I stora drag bygger nyckeltalen (kvotbildningar) på direkta jämförelser mellan olika ämnen, som t.ex. finns i bränslen, askor eller andra ämnen som ingår i förbränningen. För att åstadkomma en korrekt stökiometrisk jämförelse beräknas lämpligen relativa moltal för de ingående ämnena. Nyckeltal, baserade på de relativa moltalen, ger en möjlighet att ”vaska fram” kritiska mängdförhållanden mellan olika ämnen, som direkt kan relateras till riskkomponenter eller riskabla blandningar av komponenter. En sammanställning över de olika nyckeltalen finns i bilaga 1.

## 9.5 Resultat och diskussion

### 9.5.1 Påslagserfarenheter i svenska kraft/värmepannor

Påslagserfarenheterna från insamlat material kan i stora drag summeras på följande sätt:

**Rosteldade pannor**

Fyra pannor av denna typ ingick i undersökningen. Två operatörer rapporterade bildning av lösa påslag i ekonomisern och på näsan i eldstaden. Påslagen i ekonomisern hade även inslag av smälta. Driftproblemen i samband med påslagen var tryckfall och förhöjd rökgastemperatur. Två fall av sintrade påslag lokaliserade i början av konvektionsdelen, d.v.s. i överhettardelen, har inrapporterats. I båda fallen uppgavs det största driftstekniska problemet vara korrosionsskador på tubmaterialen.

**Pulvereldade pannor**

Tre pulvereldade pannor deltog i undersökningen. I två fall rapporterades problem med sintrade påslag i eldstaden där den ena av pannorna även observerat sintrade påslag på skärm och lösa påslag nedströms i ekonomisern. Problem i anslutning till påslag är tryckfall och fallande slagg. I det andra fallet, med enbart sintrade påslag i eldstaden, rapporteras problem med igensättning av brännare.

**Fluid-bädd pannor**

Sju pannor deltog i undersökningen. Operatörerna rapporterar mestadels smälta påslag i konvektionsdelarna. Höga alkalihalter har hittats i två påslagsprover och hög klorhalt i ett fall. Generellt upplever operatörerna att påslagen inte är några problem men i ett fall har punktkorrosion påträffats under ytan av det smälta påslaget.

### 9.5.2 Degelförsök

Vid degelförsöken gjordes följande observationer gjordes för de olika bränslen som användes inom påslagsprojektet:

- Lusern; agglomerat observerades vid temperaturer ner till 650ºC. Vid försök med bäddsand uppvisade Baskarpsand agglomerat vid en temperatur av 950ºC. Olivin gav ett något bättre resultat. En svag agglomeratbildning observerades vid 950ºC.
- Bark; visar svaga tecken på agglomering vid 650ºC.
- GROT; svaga tecken på agglomerat observerades vid 800ºC.

Arbetshypotesen vid de enkla degelförsöken var att resultaten grovt och kvalitativt möjligen kan kopplas till bränsle- och askegenskaper, som resulterar ur bränslenas eller blandningarnas kemiska sammansättning. Vid en utvärdering av resultaten är det därför viktigt att ta hänsyn till skillnaderna mellan sintring i bädden där bränsle och askprodukter ständigt är närvarande och sintring påslag längre ner i pannan, som initialt kräver en transport av komponenterna. Detta innebär att det existerar ett stort antal faktorer som påverkar komponenterna på vägen från förbränningen i eldstaden till påslagsplatsen. Detta göra det mycket svårt att se någon direkt användning av degelmetoden för att förutsäga sintring- och påslag i högtemperaturdelen.

### 9.5.3 Försök i laboratorieuppställning

Ett flertal påslagsförsök har utförts under projektet, och tabell 1 nedan visar de olika bränslen, bränsleblandningar och additiv som användes i försöken.

Den direkta kemiska analysen av påslagsringarna, utförd med hjälp av SEM, gjordes endast på vindsidan av provringarna.

I alla försöken exponerades två sonder, en kall vid ca 400ºC och en varmare vid ca 500ºC, för rökgasen från förbränningen under tre timmar.

**Tabell 7.** Sammanställning av undersökta bränslen, bränsleblandningar och additiv.
*Compilation of fuels, fuel mixtures and additives used in the experiments.*

| **Bränslen** | **Additiv** |
|---|---|
| Lusern | Ingen (PF och FB)<br>Kaolin; 1,4% (PF), 2% (FB) och 4,7% (FB)<br>CaO; 5% (FB)<br>Torv; 30% (FB) |
| GROT | Ingen (PF och FB)<br>Kaolin; 2% (FB)<br>CaO; 2% (FB) |
| Trä/bark | Ingen (PF och FB) |
| Lusern/GROT (50/50) | Ingen (FB) |
| Lusern/GROT (30/70) | Ingen (FB) |



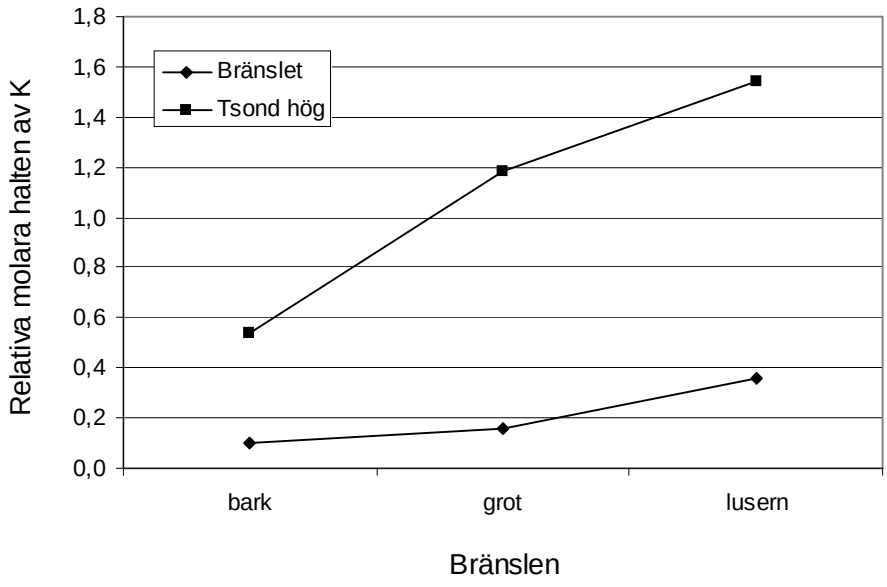
**Figur 74.** Exempel på betydelsen av ytans temperatur för påslagsbildningen. Höger ringen hade en temperatur av 580ºC och vänster 350ºC.
*An example of the importance of surface temperature on the fouling process. Left ring 580°C and the right 350°C.*

Bilden i Figur 74 visar ett exempel från ett FB test med lusern på hur yttemperatur påverkar påslagsbildningen. Provet insamlat vid 580ºC visar på ett påslag huvudsakligen bestående av grova partiklar, som troligen troligtvis fastnat i en smälta av KCl. Vid 350ºC karakteriseras påslaget av ett fint ljusare material. Den kemiska analysen visar att båda påslagen innehåller höga halter KCl men att vid den högre temperaturen finns även en större andelar kisel, som sannolikt härrör från bränslets aska eller från bäddmaterialet olivin. Resultatet visar tydligt att den högre temperaturen medför en ökad klibbighet då KCl bildar en smält yta där aska eller bädd lätt fastnar.

Ett andra exempel som direkt visar den betydelse bränslets alkalimetallhalt har på alkalimetallhalten i det påslag som bildas vid användningen av bränslet. Diagrammet i Figur 75 visar en trend med stigande halt av kalium inbundit i påslaget från bark till GROT, d.v.s. alkalimetallhalten i bränslet och i påslaget ökar med ordningen:

bark < GROT < lusern

Detta visar partialtrycket av K (i form av t.ex. KCl) betydelse för kondenseringen av kaliumföreningar på ytan.




**Figur 75.** Alkalihalten i påslaget som variation av alkalihalten i provade bränslet.
*Alkali content in the fouling sample and in the fuels tested.*

De viktigaste resultaten med hänsyn till påslagsproblem kan sammanfattas på följande sätt:

- Vid eldningsförsöken (FB och PF) i laboratorieuppställningen med de rena bränslena bildades genomgående påslag med förhållandevis höga halter av saltbildande komponenter, speciellt ämnena kalium, kalcium, klor och svavel. Det fanns en klar överensstämmelse mellan andelen alkali (kalium) i bränslet och mängden alkali inbunden i påslag som bildades på sonderna. Ordningen var bark < GROT < lusern.

- En högre temperatur på sonden ger en snabbare tillväxt av påslagen p.g.a. av en ökande klibbighet vilket i större utsträckning leder till att askpartiklar fastnar på sonden. En högre förbränningstemperatur medför att en större andel alkali kan finnas i gasfas och också en ökad andel smälta salter på sonderna.

- Sameldning av lusern och GROT visade inte på några positiva effekter däremot medförde en tillsats av torv att mängden lågsmältande salter på provytorna minskade. Till en del ersattes klorider med sulfater. Inbindning av kisel och aluminium är liten vilket indikerar att den infångade mängden bäddmaterial är liten vilket i sin tur betyder att beläggningen på provytorna inte varit speciellt klibbig vid temperaturer upp till drygt 500°C.

- Kaolintillsats uppvisade en positiv effekt och resulterade i en minskning av mängden bildat påslag. Halterna av kalium minskade i påslagen jämfört med försöken utan tillsats p.g.a. inbindning av kalium i kaolin till kaliophilit. Även halten klor minskade, speciellt i fallet med lusern i FB-eldning med kaolintillsats. Bildning av lågsmältande saltblandningar går förmodligen inte helt att undvika men mängden är lägre. Ur korrosionshänseende bör de lägre halterna kalium och klor innebära en positiv effekt med minskande korrosionsproblem.

- Kalktillsats resulterade i en ökad inbindning av kalcium i påslagen, vilket hade en positiv effekt på halten kalium i påslaget. I närvaron av den stora mängder klor kan dock inte bildning av lågsmältande salter uteslutas, vilket gör att kalk inte kan anses som lämpligt additiv för att minska påslagsproblem i system där svavel och klor föreligger i samma saltblandning.

Försöken i laboratorieuppställningen simulerar i första hand påslagsbildningens initieringsfas.

### 9.5.4 Försök i verken

Vid provtagningarna i tre av verken Hässelby, Västermalmsverket och Drefviken observerades effekter av sulfatering av påslagen i provserier med extra tillskott av svavel. I alla fallen minskade förekomsten av klor och för vissa högre materialtemperaturer hittades överhuvudtaget inget klor. Sulfateringen av påslagen leder till höjda smälttemperaturer och därmed till påslag med mindre klibbighet. Detta är positivt i den initiala fasen av påslagets uppbyggnad eftersom det minskar möjligheten för partiklar att fastna, vilket leder till en långsammare fortsatt uppbyggnad av påslaget.

Påslagsmätningarna med påslagssond i Åbyverket visade hur klorhalten i påslagen ökade med sjunkande materialtemperatur samtidigt som det motsatt beteendet observerades för svavelhalten. Resultatet stämmer väl överens med den serie prover som samlades in från ett antal luckor längs med rökgasstråket i konvektionsdelen. Detta visar att sondmätningar med provringar med olika temperaturer direkt kan relateras till prover tagna direkt från tuberna i konvektionsdelen.

### 9.5.5 Nyckeltal

Tanken med nyckeltalen var ursprungligen att de med bränsleanalyser som utgångspunkt skulle användas för att prediktera risker för bildning av påslag eller för sintring av aska. Talen kan i sådana fall användas för att visa hur samtidig eldning av flera bränslen eller hur tillsats av additiv påverkar askegenskaper. Vid en sådan användning är nyckeltalen ett prediktionsverktyg, det måste dock användas med omdöme och förståelse av de elementära processerna vid påslagsbildning. Det är dessa faktorer som leder till slutsatsen att nyckeltalen framtaget för ett bränsle har ett mindre prediktivt värde för påslagsrelaterade problem än för sintringsproblem vid FB-eldning.

Nyckeltalen spelar en stor roll vid förståelsen av uppkomsten av påslagen då talen används som ett utvärderingsverktyg för påslag uppkommit i en panna. I detta fall ger nyckeltalen en ökad förståelse över bildningsmekanismer vilket ger en möjlighet att sätta in lämpliga motåtgärder för att minska problemen.

Nyckeltalens användning kan exemplifieras med utvärderingen av resultat från t.ex. försöken i Hässelby där effekten av svaveltillsats i form av stödeldning med olja visade på ett mycket stort värde på kvoten 2S/Cl. Vid försöken med rent träbränsle är kvoten avsevärt mindre, vilket direkt visade effekten av svaveltillsats med sulfatering av påslag som följd.

## 9.6 Slutsatser

**1 Metoder att förutsäga påslagsproblem**

1. Påslagsbildningen i högtemperaturdelen styrs av en mängd faktorer, t.ex. transportprocesser och temperaturgradienter. Därför kan de enkla degelmetoderna som provades inom projektet inte användas som ett test för att förutsäga problem med påslagsbildning i pannans högtemperaturdel.

2. Försöken i laboratorieuppställningen simulerar problemen vid FB-eldning med gott resultat. Däremot var överensstämmelsen sämre mellan resultaten av pulvereldningsförsöken och verkligheten, sannolikt beroende på att temperaturen var något för låg och att utbränningen inte var helt avslutad vid provsonderna.

3. Nyckeltalens prediktiva värde är begränsat till fall där bränslet innehåller extrema mängder av en komponent, t.ex. svavel eller klor, däremot kan de ha ett värde för att förutsäga effekten av en förändring i bränslets sammansättning.

4. Sondtekniken har en del brister som i många fall komplicerar utvärderingen av påslagsbildning simulerade i laboratorieförsök eller tagna från mätningar i verken. Slutsatserna i föreliggande studier är att sondmetoden måste förbättras för att kunna ge mer tillförlitliga svar.

**2 Erfarenheter och praktiska konsekvenser**

1. Låg materialtemperatur ger högre halter av klor i påslagen.

2. Hög materialtemperatur >550ºC ger en snabbare bildning av klibbiga påslag vilket leder till en fortsatt snabb tillväxt av påslaget genom impaktion.

3. Tillväxtprocessen är inte linjär med tiden på grund av isoleringen från påslaget, vilket beror på förändringar av påslagets yttemperatur.

4. Halten alkalimetall i bränslena speglar direkt halterna i påslaget, d.v.s. alkalimetallhalten i bränslet och i påslaget ökar med ordningen:

bark < GROT < lusern

Skillnaderna beror på att ett högre partialtryck för KCl i gasen ökar utfällning på ytan. Detta bör leda till en snabbare tillväxt då ytan lättare blir klibbig.

5. Höga halter svavel i bränslet leder till sulfatering av påslaget med följden att smälttemperaturer ökar och därmed till ett påslag med mindre klibbighet.

6. Påslagsmätningarna med sond i Åbyverket visade hur klorhalten i påslagen ökade med sjunkande materialtemperatur samtidigt som det motsatta beteendet observerades för svavelhalten.

**3 Användning av additiv och sameldning**

1. Tillsats av kaolin sänker partialtrycket av kalium och minskar därmed hastigheten för kondensering av kaliumklorid och därmed mängden påslag. Mängden tillfört kaolin skall vara av samma storleksordning som bränslets askhalt för att ha en betydande effekt på påslagsbilden.

2. Närvaron av den stora mängden klor i påslagen tillsammans med kalcium vid tillsats av kalk gör att kalk inte kan anses som ett lämpligt additiv för att minska påslagsproblem.

3. Sameldning av olja (detsamma som tillsats av svavel) med biobränsle har i ett fall resulterat i en minskning i mängden påslag.

Användning av svavel som additiv kan medföra en ökad risk för saltsyrakorrosion i bakre rökgasdraget.

# 10 OPTIMERING AV LUFT/RÖKGASREGISTER OCH MUNSTYCKEN (DEL 2)

## 10.1 Bakgrund

Det arbete som beskrivs här är en fortsättning på tidigare studier av luftlådor inom Branschforskningsprogrammet 1996/97 [1] och 1997/98 [2]. Under 1996/97 studerades luftstrålarnas inträngning i pannan. Detta gjordes med hjälp av både en fysisk vattenmodell och datorberäkningar. Datorberäkningarna gjordes med ett beräknings- och visualiseringsprogram [3] som utvecklades av TPS. Inom Branschforskningsprogrammet 1997/98 studerades flödet inne i luftlådorna och hur detta påverkade fördelningen av flödet ut ur luftlådans dysor. Mätningar av utgående hastigheter och datorsimuleringar av flödet inne i och ut ur en luftlåda utfördes.

Arbetet med optimal utformning av luftlådor har fortsatt inom det nuvarande Branschforskningsprogrammet 1998/99, med att undersöka hur störningar omedelbart före luftlådan påverkade fördelningen av luft ut genom dysorna och hur snedfördelningen i befintliga luftlådor kan minskas genom mindre omfattande modifieringar. Dessutom har konceptet ”saxade dysor”, som var ett resultat av förra årets projekt, undersökts vidare och kommer att demonstreras i full skala i en 50 MW rostpanna i Hudiksvall och en 12 MW rostpanna i Mjölby.

## 10.2 Målsättning

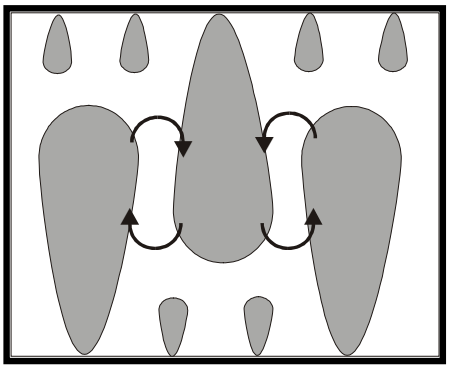
Arbetet med optimering av luft/rökgasregister och munstycken inom Branschforskningsprogrammet 1998/99 har delats in i tre delar med målsättningen att:

- Vidareutveckla och demonstrera konceptet med ”saxade” dysor som tagits fram av TPS.
- Studera inflytandet från krökar och störningar i luftledningar strax innan de ansluter till luftlådan.
- Studera möjligheten att med små modifieringar förbättra situationen i befintliga luftlådor.

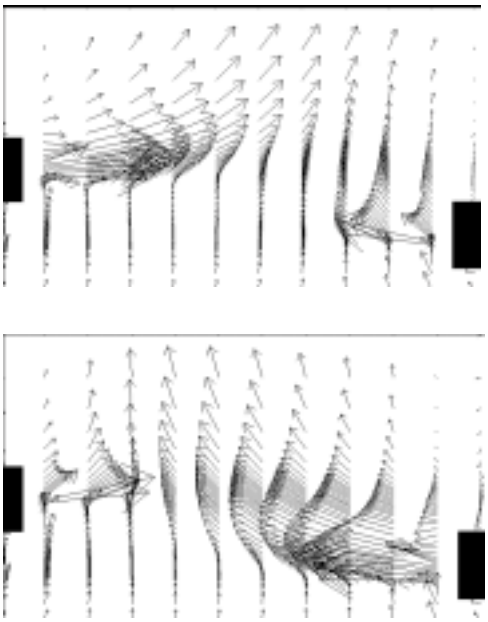
## 10.3 Saxade dysor

Stråkbildning beror ofta på att tillsatsen av sekundärluft eller recirkulerad rökgas inte sker på ett riktigt sätt. Om luft eller rökgasstrålarna inte klarar av att täcka hela eldstadens tvärsnitt så bildas stråk av gaser som inte har fått den inblandning av luft eller rökgas som avsetts och följaktligen har en felaktig sammansättning och temperatur för en väl fungerande utbränning.

Den traditionella utformningen av ett sekundärluftsregister är en rad av dysor med samma dimension, ofta på samma nivå på två motstående väggar. Resultatet är att alla strålarna tränger ungefär lika långt in i eldstaden. Med motriktade register krockar strålarna lätt i pannans mitt. Detta innebär att man får ett område i eldstadens mitt med mycket kraftig blandning på grund av de krockande strålarna och en hög syrekoncentration. Om strålarna har en dålig inträngning kan man istället få ett område i mitten utan inblandning av sekundärluft eller rökgas. Båda fallen ger stråkbildning vilket resulterar i en felaktig gassammansättning och temperaturfördelning.

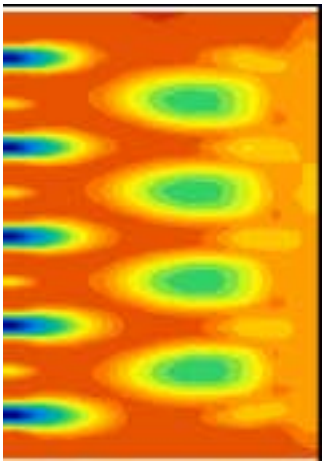


**Figur 76.** Saxade dysors principiella funktion.
*The function of staggered jets*



**Figur 77.** Hastighetsvektorer i ett snitt genom grov dysa till vänster och fin till höger överst och motsatt nederst.
*Velocity vectors in a plane through a course nozzle, left, and fine, right, top picture and opposite in the lower figure.*

Det koncept som studerats i årets Branschforskningsprogram bygger på användning av omväxlande grova och fina dysor i samma luftregister. På detta sätt vill vi uppnå en bättre areatäckning genom att få luftregistren på motstående väggar att samverka snarare än att motarbeta varandra vilket är vanligt. Grova dysor som ger en kraftig inträngning blandas med fina dysor som ger strålar som inte orkar tränga in speciellt långt in i eldstaden. Figur 76 visar hur det är tänkt att fungera. De grova dysorna sitter mitt emot en eller flera fina dysor vilket resulterar i att de grova strålarna går förbi varandra och skapar en blandning i sidled som indikeras av pilarna i bilden. För att inte tillåta stråk med oförbrända gaser att passera längs väggarna mellan de grova dysorna så placeras ett antal fina dysor i mellanrummen.



**Figur 78.** Koncentrationen av luft i horisontellt tvärsnitt strax över dysnivån.
*Concentration of air in plane just above nozzles.*

Denna dyskonfiguration är mindre känslig för variationer i lasten. Eftersom strålarna tränger in och passerar varandra så påverkas inte blandningsfunktionen lika mycket av att inträngningsdjupet förändras något vid en laständring.

Figur 77 och Figur 78 visar resultatet av en CFD-beräkning som genomförts med programmet Cinar ICE. Beräkningen avser en konfiguration med omväxlande fina och grova dysor. Detta ger en lagom inträngning (Figur 77) och en effektiv blandning mellan gaserna från eldstadens nedre del och överluften över hela tvärsnittet (Figur 78).

## 10.4 Inflytande av olika typer av störningar i kanaler uppströms luftlådan

En av målsättningarna inom detta projekt var att studera inflytandet av krökar och störningar i luftledningar strax innan de ansluter till luftlådan. Dessa studier har omfattat både experiment och teoretiska beräkningar vilka redovisas här.

### 10.4.1 Inflytande från krökar omedelbart före luftlåda

**Experiment**

Den flexibla luftlåda i laboratorieskala som byggdes under Branschprogrammet 97/98 [2], har använts för att undersöka känsligheten för avståndet mellan en 90° krök i tillförselledningen och inloppet till själva luftlådan. Luftlådans utformning kan ses i Figur 79.



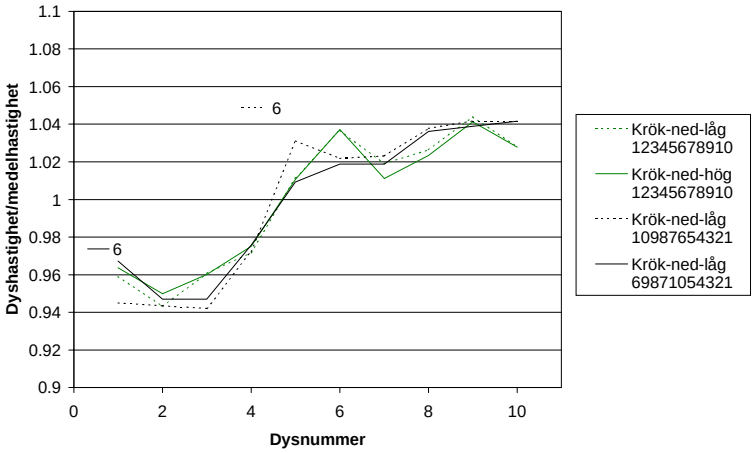
**Figur 79.** Utformning av koceptluftlåda./ *The design of a conceptual wind-box.*

Vid försöken placerades en 90° krök dels omedelbart före inloppet till luftlådan (dvs. 270 mm), dels på ett avstånd av 1850 mm från inloppet. Detta motsvarar 1,5 diametrar hos tilloppsröret som hade en diameter på 160 mm. I Figur 79 är inloppet till luftlådan placerat på den vänstra gaveln. En tumregel är att en rörledning behöver ha en längd på tio gånger sin diameter för att inflytandet från en störning av typen krök eller förträngning skall hinna försvinna fullständigt. Två olika varianter av en 90° krök omedelbart före inloppet testades. De två krökarna skilde sig åt genom att böjen var riktad åt två olika håll. I det ena fallet är böjen riktad åt samma håll som dysorna på luftlådan, i det andra fallet åt det motsatta hållet. På luftlådan satt 10 dysor med diametern 41 mm.

Hastigheten i centrum av varje dysutlopp mättes för varje typ av tilluftkanal. Två olika massflöden användes så att hastigheten ut ur dysorna var ca 50 m/s och ca 90 m/s. Skillnader i uppmätt utloppshastighet kunde också ev. orsakas av att dysorna inte såg exakt likadana ut vilket kunde påverka resultaten. För att ta reda på hur mycket dysornas individuella skillnader påverkade hastighetsfördelningen ut ur luftlådan gjordes ytterligare två mätningar då ordningen på dysorna var ändrad. Mätningarna upprepades en gång för varje fall. De redovisade hastigheterna är medelvärden av de två mätningar som gjordes. Feluppskattningen är halva skillnaden mellan de två mätningarna.

**Resultat**

De framgår av Figur 80 att variationerna av hastigheten inte påverkas av vilken typ av tilluftkanal som används. I samtliga fall ökar hastigheten i dysutloppen med ca 10% från dysa 1 till dysa 10. Expansionen av luften medför också att det statiska trycket ökar i den bortre delen av luftlådan. I den främre delen av lådan vid dysa nr 1 t.o.m. 3 kommer ett område med recirkulerande luft att bildas där det statiska trycket är lägre.




**Figur 80.** Normerade hastigheter med dysorns i olika ordning.
*Normalised velocities for different kind of nozzles.*

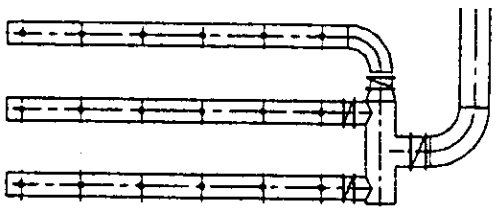
Sammanfattningsvis har dessa försök visat att luftfördelningen från en luftlåda inte påverkas nämnvärt av en 90° krök placerad omedelbart innan luftlådan. Detta framgår av Figur 80 där hastigheten ut dysorns visserligen ökar något med ökande dysnummer men ökningen är inte större än 10%.

### 10.4.2 Inflytande från spjäll omedelbart före luftlåda

**Problembeskrivning**

1. I moderna pannor med de ökande kraven på låga emissioner och hög effektivitet finns i allmänhet goda möjligheter att kontrollerat tillföra förbränningsluften i flera steg. Eftersom driftsförhållandena sällan är kända i detalj vid designtillfället förses dessa luftregister med spjäll för att det skall finnas möjligheter att styra luften på önskat sätt vid intrimningen. Till exempel har spjäll monterade i anslutning till luftlådorna orsakat problem med sönderbrända luftdysor.

2. Det fall som tagits som exempel här gäller en panna med tre OFA-register med sex dysor var på vardera sidoväggen. Figur 81 är en skiss som visar de tre OFA-registren och placeringen av reglerspjäll.



**Figur 81.** OFA-system./ *OFA-system*

Under eldningssäsongen 98/99 upptäcktes att den första dysan i den mittersta OFA-fördelningslådan på båda sidorna av pannan bränts sönder. Av utseendet att döma är det en process som pågått under flera års tid. Misstankar fanns att det kunde vara felaktig utformningen av OFA-systemet som orsakade en ojämn fördelning av luft till de olika dysorna. Redan tidigt koncentrerades misstankarna mot spjäll som placerats i luftlådorna.

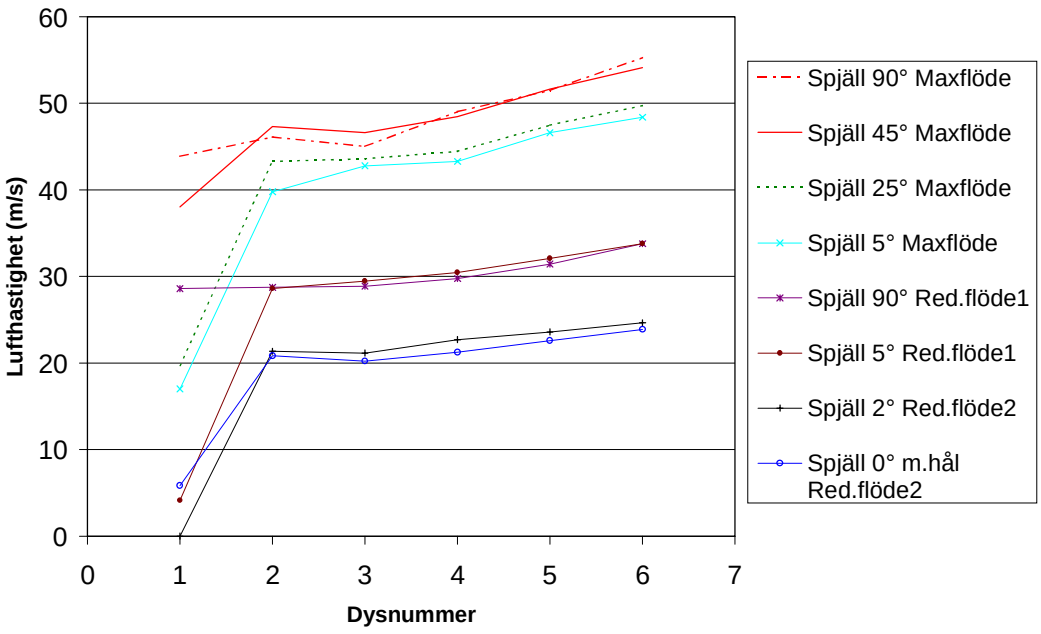
**Experiment**
En fysisk modell av den mellersta fördelningslådan, på vilken skadorna har konstaterats, byggdes i full skala, se Figur 82. Hastighetsfördelningen mellan de sex dysorna har mätts vid olika flöden och inställningar på vridspjället.



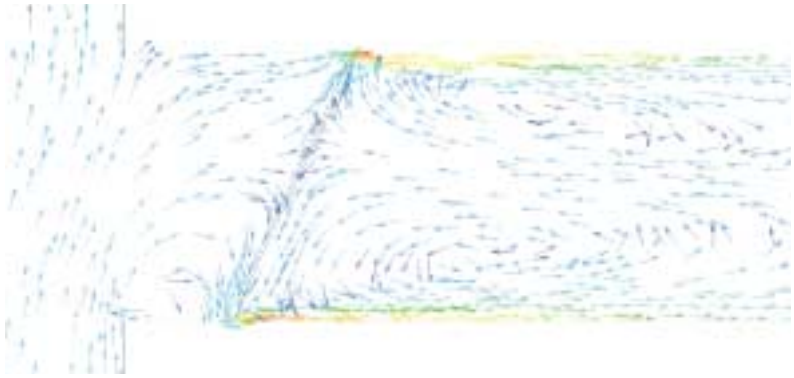
**Figur 82.** Experimentmodell av luftlåda i full skala. *Experimental windbox in full scale.*

**Flödesberäkningar**
Datorsimuleringarna av strömningen kring spjället genomfördes för ett tvådimensionellt snitt genom luftsystemet. Avsikten med beräkningarna var att få en uppfattning om hur luften strömmade i närheten av spjället och första dysan och att på ett enkelt sett kunna testa olika modifieringar av luftlådan och hur dessa påverkade strömningen.

**Resultat**
I Figur 83 visas hastighetsfördelningen mellan de olika dysorna vid olika flöden och spjällinställningar. I fallet "Spjäll 2° Red. Flöde 2" uppmättes ett nollflöde i den första dysan. Genom att lägga ett papper på dysans utlopp var det möjligt att se en pulsation mellan ett svagt utflöde och ett svagt insug genom dysan.




**Figur 83.** Uppmätta hastigheter ur de sex dysorna vid olika flöden och spjällinställningar. Flöde 1 = 50% av maxflöde, flöde 2 = 30% av maxflöde.
*Measured velocity from the six nozzles at different airflows and valve openings. 1= 50% of maximum and 2=30% of maximum.*



**Figur 84.** Förstoring av området runt spjället. Fördelningslådans diameter ökad till 390 mm. *Zooming in on the area around the valve. The diameter of the box increased to 390 mm*.

### 10.4.3 Inflytande från roterande flöde i luftlåda

**Problembeskrivningar**

Datorsimuleringar av strömningen kring spjället genomfördes för ett tvådimensionellt snitt genom OFA-systemet. Vid fullast är strömningsbilden ungefär den som visas i Figur 84. Man kan se den återströmning nedströms spjället som skapas av det undertryck som bildas på spjällets läsida. Återströmningszonen och därmed undertrycksområdet sträcker sig en bra bit förbi den första luftdysan.



**Figur 85.** Hastighetsfält med ett roterande flöde i inloppet till luftlådan.
*Velocity field for a rotating flow in the entrance to the windbox.*

**Flödesberäkningar**

Den simulerade fördelningslådorna matar 8 dysor med en diameter på 205 mm. En tre-dimensionell CFD-simulering gjordes av flödet i hela fördelningslådan med snablar och dysor. Resultatet var dock att det inte går att se någon snedfördelning som skapas på grund av luftens rotation.

### 10.4.4 Slutsatser

Av de undersökta typerna av störningar visade sig felplacerade spjäll ha den största inverkan på luftfördelningen ut ur luftlådan. Generellt motsvarar ett spjäll en så kraftig störning av flödet att det alltid bör följas av en ledningslängd motsvarande helst tio men minst fem diametrar innan första dysan kan placeras. Även kraftiga krökar direkt före en luftlåda kan åstadkomma betydande snedfördelningar. I princip behövs även i detta fall en sträcka på ca tio rördiametrar för att återställa en fullt utvecklat ostörd rörströmning. Eftersom störningarna dock inte är lika kraftiga som vid spjäll räcker det ofta med ca fem diametrars raksträcka för att hastighetsfältet skall vara rimligt ostört.

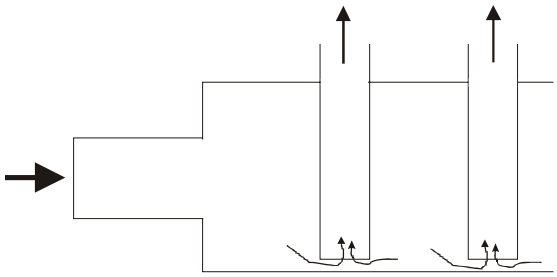
I tveksamma fall och i fall där det inte finns möjligheter att lägga in dessa raksträckor kan en numerisk strömningssimulering användas för att minimera effekterna av störningen.

## 10.5 Modifieringar för att förbättra befintliga luftlådor

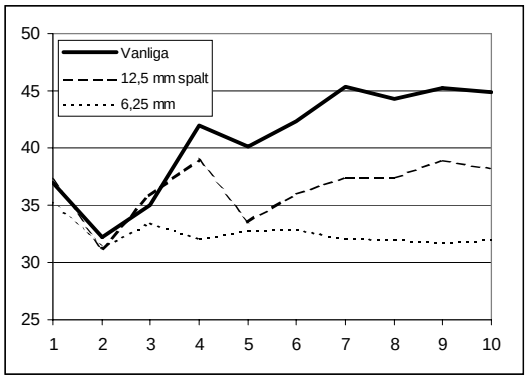
### 10.5.1 Instickande luftdysor

Ett sätt att minska inverkan av strömningsförhållandena i luftlådan är att skapa ett kontrollerat ökat tryckfall vid inloppet till de olika dysorna. Detta ordnas genom att låta varje dysa sticka in så det bildas en smal spalt mellan dysans bakkanten och luftlådans bakre vägg. Figur 86 visar hur det kan se ut.

En experimentell undersökning genomfördes i den flexibla luftlåda som byggdes i Branschforskningsprogrammet 1997/98 [2]. Resultatet kan ses i Figur 87 där den heldragna linjen visar den snedfördelning som uppstår med traditionell dysutformning och de två streckade linjerna visar hur snedfördelningen minskar ju smalare spalten mellan dysan och luftlådans bakvägg är.



**Figur 86.** Principiellt utseende och funktion hos de instickande dysorna.
*General lay out and function of nozzles extended into the windbox.*




**Figur 87.** Hastighetsfördelning mellan dysorna i en luftlåda. Heldragen linje är traditionella dysor och de två streckade instickade dysor med två olika spalter.
*Velocity distribution from windbox with ordinary nozzles (black line) and nozzles extended into the box at two levels.*

Den ojämnhet som alla kurvorna uppvisar nära inloppet beror på den kraftiga luftstråle som kommer in genom luftlådans inlopp och bildar virvlar nära de två första dysorna [2].

En annan fördel med denna dysutformning är den ökade dyslängden vilken medför att luftstrålen får en riktning som överensstämmer med dysans. I vissa tillämpningar är dysan så kort att strålens riktning i huvudsak kommer att bestämmas av strömningen i luftlådan.

### 10.5.2 Ökad volym i luftlådan

Om skillnaden i statiskt tryck mellan luftlådans ändar är mycket mindre än tryckfallet i dysorna kommer snedfördelningen att vara liten. Ett sätt att minska skillnaderna i statiskt tryck är att ha låga hastigheter i luftlådan vilket blir fallet om dess volym är stor.

### 10.5.3 Ökat tryckfall i luftdysor

På samma sätt som en ökad volym hos luftlådorna minskar det relativa inflytandet från skillnader i statiskt tryck, kommer ett ökat tryckfall över dysorna att ge samma effekt. Om tryckfallsökningen åstadkommes genom att sätta in en strypning i dysan är det som vid alla typer av störningar i strömningen viktig att återställa ett rimligt väl utvecklat rörströmningsfält innan dysans mynning. Detta medför att dysan helst skall var tio rördiametrar lång efter strypningen.

### 10.5.4 Avsmalnande luftlåda

De variationer i det statiska trycket som ger upphov till snedfördelningar uppstår då det dynamiska trycket sjunker när hastigheten i luftlådan sjunker vid den gradvisa avtappningen av luft genom dysorna. En avsmalnande luftlåda som är rätt dimensionerad kan minska hastighetsvariationen till ett minimum. Detta kommer då att ge ett relativt stabilt statiskt tryck och små snedfördelningar.

### 10.5.5 Inlopp från båda ändar eller på mitten

Genom att leda in luften genom luftlådans båda ändar kommer hastighetsskillnaderna att halveras då halva mängden luft går genom respektive inlopp. Detta ger kraftigt minskade snedfördelningar då det dynamiska trycket är proportionellt mot hastigheten i kvadrat. Ett centralt placerat inlopp ger samma effekt. I det senare fallet är det dock viktigt att inte luftstrålen från inloppet är riktad rakt mot de dysor som sitter i mitten av registret.

## 10.6 Slutsatser

Mätningar och beräkningar har gjorts på tre olika typer av luftlådor. Påverkan av olika typer av störningar i luftkanalerna till luftlådorna på hastighetsfördelningen ut ur dysorna har studerats. Erfarenheter och slutsatser har sammanställts i följande punkter:

- Att montera en 90° krök omedelbart innan luftlådan har en måttlig inverkan på fördelningen av luft till dysorna.
- Inloppsrör som abrupt övergår till en stor volym i inloppslådan bidrar till en liten snedfördelning av flödet om de första dysorna sitter nära inloppet.
- Reglerspjäll som monteras nära dysorna har stor påverkan på fördelningen av flödet ur dysorna. Under vissa omständigheter kan ett returflöde uppstå i dysor nära spjället.
- Roterande flöde eller med ojämn hastighetsprofil i inloppet pga rörkrökar har i denna studie inte visat sig ha någon stor betydelse på fördelningen av luft från dysorna.
- Ökat tryckfallet ger jämn hastighetsfördelning. Detta kommer dock att medföra ett större fläktarbete och därmed ett ökat energibehov.
- För att minska effekten av störningar i luftledningar och luftlådor på fördelningen mellan olika dysgrupper är en enkel regel att alltid låta en kraftig störning följas av minst fem kanaldiametrars raksträcka innan första dysan placeras. Detta innebär att varje dysa skall ha en minst fem diametrar lång raksträcka strax före utloppet.

## 10.7 Referenser

1 *A. Malmgren, B. Ljungdahl, T. Andersson, J. Elofsson*
**Identifiering av ofullkomligheter i slutförbränningszonen.**
Slutrapport inom området Rost/FB-teknik, TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 1996/97. TPS-97-28, Studsvik (1997).

2 *A. Malmgren*
**Förbättrad luftlådeutformning.**
TPS Branschforskningsprogram för Energiverk 1997/98. TPS-98/14, Studsvik (1998).

3 *A. Malmgren*
**Luftlådan 1.1, Beräkningsprogram för snedfördelning i luftlådor samt inträngning och avböjning hos luftstrålen – Användarmanual.**
TPS-98/27, Studsvik (1998).

# BILAGA: NYCKELTAL

Nyckeltal kan förenklat beskrivas som ett verktyg för grova förutsägelser av vilka ämnen som kan ställa till problem i en förbränningsanläggning, dvs vilka ämnen som möjligen orsakar t.ex. bildning av påslag i vitala delar.

I stora drag bygger nyckeltalen (kvotbildningar) på direkta jämförelser mellan olika ämnen, som t.ex. finns i bränslen, askor eller andra ämnen som ingår i förbränningen. För att åstadkomma en korrekt stökiometrisk jämförelse beräknas lämpligen relativa moltal (mtr) för de ingående ämnena. Nyckeltal, baserade på de relativa moltalen, ger en möjlighet att ”vaska fram” kritiska mängdförhållanden mellan olika ämnen, som direkt kan relateras till riskkomponenter eller riskabla blandningar av komponenter.

| **Nyckeltal** | **Benämning** | **Nyckeltalet betyder** |
|---|---|---|
| $\frac{2Ca+3Fe+Na+2Mg+K}{2Si+Al+3P+2Ti}$ | Alkalinitetstal 1a | < 1: Underskott av alkalinitet<br>> 1: Överskott av alkalinitet |
| $\frac{Na+K}{2Si+Al+3P+2Ti}$ | Alkalinitetstal 1b | < 1: Underskott av alkalinitet<br>> 1: Överskott av alkalinitet |
| $\frac{2Ca+K+2Mg+Na}{2Si+Al+3P+2Ti}$ | Alkalinitetstal 2 | < 1: Underskott reaktiv alkalinitet<br>> 1: överskott reaktiv alkalinitet |
| $\frac{Na+K}{2Ca+K+2Mg+Na}$ | | Andel starkt alkaliska ämnen i totalalkalinitet (alltid < 1) |
| $\frac{Cl+2S}{K+Na}$ | Saltkvot 1 | > 1: all fri alkalimetall kan bindas som klorid eller sulfat<br>< 1: all klor och svavel kan bindas till alkali (om all alkali är fritt) |
| $\frac{Cl+3P+2S}{K+Na}$ | Saltkvot 2 | > 1: all fri alkalimetall kan bindas som vattenlöslig salt |
| $\frac{2S}{Cl}$ | Sulfateringstal | < 1: all klorid kan inte överföras till sulfat<br>> 1: all klorid kan överföras till sulfat |
| $\frac{Cl}{K+Na}$ | Förångningskvot | > 1: all fri alkali kan förångas som klorid (Visar andelen alkali som lätt kan förångas som flyktig klorid) |
| $\frac{2Si}{Al}$ | Fältspattal 1 | < 6: all silikat kan föreligga som eller bilda aluminosilikat eller fältspat<br>> 6: delar av kiselsyra kan bilda lågsmältande alkalisilikat |
| $\frac{Al}{K+Na}$ | Fältspattal 2 | > 1: All alkali är bunden eller kan bindas till de relativt högsmältande aluminosilikaterna av fältspattyp |
| $\frac{2(K+Na)}{3Si}$ | Förglasningstal (sodaglastal) | 0,5-1: Stor risk för bildning av lågsmältande glasfaser (smältpunkt kring 750°C)<br>0,25-0,5 och > 1: mindre risk<br>< 0,25: liten risk (liten andel smälta) |
| $\frac{K}{K+Na}$ | Eutektikumtal 1 | Nära 1 eller nära 0: ”bra<br>0,2-0,9: dåligt |
| $\frac{Ca}{Ca+Mg}$ | Eutektikumtal 2 | Nära 1 eller nära 0: bra<br>Nära 0,5: mindre bra. |

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrierna
- Övrig Industri

Värmeforsk samarbetar med Statens Energimyndighet.

**VÄRMEFORSK Service AB**

101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80 ● Fax 08-677 25 35
http://www.varmeforsk.se