

Minskade askrelaterade driftsproblem genom inblandning av torv i åkerbränslen

Marcus Öhman, Dan Boström, Nils Skoglund, Alejandro Grimm, Christoffer Boman, Marie Kofod-Hansen

**Minskade askrelaterade driftsproblem genom
inblandning av torv i åkerbränslen**

**Reduced ash-related operational problems by
co-combustion peat and agricultural fuels**

Marcus Öhman, Dan Boström, Nils Skoglund, Alejandro Grimm,
Christoffer Boman, Marie Kofod-Hansen

E06-623

Abstract

Resultaten visar att inblandning av typisk starrbaserad brännstovv i salix och rörflen med låg askhalt ger positiva effekter vad avser bäddagglomerering och beläggning/bildning/(korrosion) i pannors konvektionsdelar redan vid relativt låga inblandningsgrader (15 vikts-% på TS basis). En starrbaserad brännstovv med relativt högt Ca/Si förhållande bör väljas för sameldning med salix i rosteranläggningar för att inte öka slaggningsrisken. Samma stovvtyp kan också i rosteranläggningar nyttjas i sameldning med rörflen med låg askhalt (relativt låga inblandningsgrader räcker) och vetehalm (höga inblandningsgrader krävs) för att reducera slaggningsrisken. Vid val av stovvslag för att maximera de ovanstående positiva effekterna vid förbränning kan därför en allmän rekommendation göras att stovv med hög askhalt (starrinnehållande stovv), och gärna med högt inslag av svavel, ger de bästa sameldningsegenskaperna med det tilläget att vid rostereldning bör en stovv med relativt högt Ca/Si förhållande väljas (gärna upp mot 1 på vikts-% basis).

Sammanfattning

Torvbränslen används ofta i kombination med trädbränslen i värme- och kraftvärmeverk. Den kombinationen har visat sig ge förbränningstekniska fördelar kanske främst minskad risk för askrelaterade driftsproblem. Erfarenheter saknas dock vad gäller eventuella positiva sameldningseffekter/erforderliga inblandningsgrader av torv i många kommande åkerbränslen såsom salix, rörflen och halm. Projektets mål har därför varit att: i) bestämma vilka typiska inblandningsgrader av torv i olika åkerbränslen (halm, salix och rörflen) som krävs för att uppnå positiva effekter m a p slaggnings-, beläggingsbildning/(högtemperaturkorrosion) och bäddagglomerering, samt ii) demonstrera möjligheterna att minska uppkomsten av askrelaterade driftsproblem i förbränningsanläggningar genom inblandning av torv till intressanta åkerbränslen.

Termokemiska modellberäkningar utfördes för att bestämma effekter av torvinblandning till halm, salix och rörflen med hög och låg askhalt på reduktionen av slaggnings-, beläggingsbildnings-/(korrosion)- och bäddagglomereringsrisken vid förbränning. Dessa resultat och tidigare utförda försök i bänkskala låg sedan till grund för valda bränslekombinationer, torvinblandningsgrader och torvprov i de sedan utförda demonstrationsförsöken. Dessa demonstrationsförsök utfördes i en rosteranläggning på 4 MW (rörflen/rörflensmixar och salix/salixmixar) och i en pelletsbrännare/-panna i bänkskala (20 kW) (halm/halmmixar).

Resultaten visar att inblandning av typisk starrbaserad bränntorv i salix och rörflen med låg askhalt ger positiva effekter vad avser bäddagglomerering och beläggingsbildning/(korrosion) i pannors konvektionsdelar redan vid relativt låga inblandningsgrader (15 vikts-% på TS basis). En starrbaserad bränntorv med relativt högt Ca/Si förhållande bör väljas för sameldning med salix i rosteranläggningar för att inte öka slaggningsrisken. Samma torvtyp kan också i rosteranläggningar nyttjas i sameldning med rörflen med låg askhalt (relativt låga inblandningsgrader räcker d v s 15 vikts-% på TS basis) och vetehalm (höga inblandningsgrader krävs d v s upp mot 40 vikts-% på TS basis) för att reducera slaggningsrisken.

Vid val av torvslag för att maximera de ovanstående positiva effekterna vid förbränning kan därför en allmän rekommendation göras att torvar med hög askhalt (starrinnehållande torv), och gärna med högt inslag av svavel, ger de bästa sameldningsegenskaperna med det tilläget att vid rostereldning bör en torv med relativt högt Ca/Si förhållande väljas (gärna upp mot 1 på vikts-% basis). Rörflen med hög askhalt förväntas inte ge upphov till några större problem med beläggings- och slaggnings-/bäddagglomereringsproblem och är därför i första hand inte intressant att samelda med torv utifrån ett askrelaterat driftsproblemperspektiv. För att reducera beläggningstendensen till låga nivåer vid sameldning med vetehalm krävs troligen så höga nivåer att detta inte är praktiskt intressant.

Nyckelord: Åkerbränslen, torv, askrelaterade driftsproblem, slaggnings-, beläggingsbildning

Executive Summary

Background

The utilization of certain crop fuels (i.e. Salix and straw) may cause problematic ash related operational problems. Recently, deposit formation, high temperature corrosion, slagging and bed agglomeration in power plants has been reported in connection with combustion of various bio-fuels. The problems increases the costs, reduces the availability and thus the overall efficiency of the energy resources. Many of the "new" types of bio-fuels that are being introduced to the market contain high levels of such troublesome ash-forming elements that operational problems can be anticipated.

A significant utilization of peat as fuel in district heating production has been going on since the late 1980s. The motivations have been price, availability and also the various favourable combustion technical properties of peat. However, peat as a fuel has recently been questioned from a renewable point of view. Since 2006, the peat is subjected to the trading of CO₂ emissions, which has led to a substantial increase of cost for plants larger than 20 MW.

The research area

In Sweden, a relative large number of heat- and heat and power plants are today co-firing peat and bio-fuels. Operational experience and earlier research has shown that co-firing woody fuels and peat considerably extends the life of super heater and minimizes the occurrence of bed-agglomeration in fluidized beds. Positive effects have been reached at admixing levels of 5-30-weight% (on DS basis). Apart from the climate aspects, peat as a co-firing fuel (additive) can be motivated and recommended from an availability and economical point of view, taking the utilization of whole bio-energy system in account.

Operational experiences and research of effects of co-firing peat and energy crops are scarce. Some previous tests in bench scale indicated though, on a strong reduction of the agglomeration tendency and lowering of the agglomeration temperature for straw and Salix at a peat admixing level corresponding to 15 - 20 weight% (on DS basis). A reduction in the amount of emitted fine particles was also observed in these experiments. However, care must be taken in the choice of peat. Some Carex dominated peats with high Si contents may cause problems with slagging. Another conclusion from the mentioned bench scale tests was that peats with relative high Ca/Si ratios should be selected to minimize the risk of slagging and bed agglomeration.

The role of the project in the perspective of the research area

More specific and detailed experiences concerning admixing levels of peat in the co-firing with energy crops to obtain positive effects on operational problems are, however, lacking. Thus, the advantages needs to be investigated more generally, involving more energy crops of future interest.

The objectives of the project were therefore:

- i) To determine the admixing levels for different peat classes to various energy crops (straw, Salix and Reed canary grass) that are required to reach positive effects regarding slagging, deposit formation/(high temperature corrosion) and bed agglomeration.
- i)) To demonstrate the possibilities to reduce the occurrence of ash related operational problems in combustion of energy crops upon admixing peat.

MethodsThermochemical modelling

Thermochemical modelling was performed to determine the effects of peat admixture, on slagging-, deposit formation- (corrosion)- and bed agglomeration tendencies during combustion of straw, willow and reed canary grass with high and low ash content. These results and previously conducted bench scale experiments were used as a basis for determining combinations of fuel and peat admixtures for the demonstration experiments.

The calculations were performed with admixing levels of 0-, 5-, 15, 25-, and 40 weight% (on DS basis) of four peat samples to the investigated four crop fuels. The used peat samples were typical carex-containing Swedish peat with differences in e.g. silicon-, calcium- and sulfur contents. In addition to the composition of the main fuel elements, the concentration of the ash forming elements were also used as input data for the calculations. The modelling was performed with FACTSage - 5.4. This program utilizes the method of minimization of Gibb's free energy of studied system. Thermodynamic data for gas species, stoichiometric condensed species, two non ideal melts (salt and slag) and 7 non ideal solid solutions were used. The thermodynamic data were extracted from the FACT-data base integrated with the FACTSage program. An air surplus corresponding to $\lambda = 1.2$ was applied in the calculations that were carried out in the temperature interval 700 - 1300 °C at 1 bar atmospheric pressure. The calculations were carried out to simulate the combustion in a grate fired boiler and in a fluidized bed boiler.

From the calculations the following information were evaluated:

- i) The fraction of melt in terms of mol-% of the total condensed matter, as the function of temperature. These were used as a measures of slagging - and bed-agglomeration tendencies for the different fuels and fuel/mixtures.
- ii) The fraction of potassium in the fuel that was volatilized and carried away with the flue- gas, as the function of the temperature. This fraction together with the S/Cl ratio, were used as a measure of the deposit formation tendency of the fuels.

A number of the model calculations were qualitatively validated against previously conducted controlled combustion experiments in bench scale (grate/fluidized bed). Good agreement between the theoretical and practical results on critical ash-chemical sub-processes was observed.

Demonstration combustion experiments in full- and bench scale combustion plants

Full scale experiments

Combustion tests were carried out during approximately 2 days in a 4 MW grate fired boiler, using;

- briquetted reed canary grass (RCG) fuel with high ash content (totally 25 ton DS).
- a RCG with low ash content, co-briquetted with peat (85/15 % on DS basis, totally 25 tons).
- Salix chips (approx. 40 tons).
- Salix chips admixed with peat (15% on DS basis, totally approx. 40 tons).

The overall conclusions of the model calculations concerning the ash content of a "good peat" was that high ash content, high Si content, high S content and high Ca/Si ratio were favourable. Therefore the peat that mostly corresponded to these requirements (peat "3B fält") was chosen for the demonstration tests.

Bench-scale experiments

Combustion tests were also performed in a 20 kW underfed pellets burner attached to a pellets boiler. Pelletized straw (50 kg) and straw co-pelletized with peat (60/40% on DS basis, totally 50 kg), were used as fuel. The Straw originates from Swalövs heat plant in Skåne. The peat was the same as in the full scale tests.

Results

Thermo-chemical model calculations

The results of the thermo-chemical model calculations showed that the reed canary grass with high ash content is not expected to cause any major problems with respect of deposit formation, slagging and bed-agglomeration. Therefore, co-firing this fuel with peat is not motivated from the perspective of ash related operational problems.

Reed canary grass with low ash content exhibits relatively high slagging tendencies while the risk of deposit formation should be fairly low. The results of the calculations show that already relatively low admixing levels (15 weight % on DS basis) of carex based peat provides a significant reduction in the slagging- /bed-agglomeration tendency.

Salix is likely, according to the model calculations, to cause deposit problems. However, already moderate peat admixing levels would significantly decrease the amounts of potassium in the flue gas phase, subsequently resulting in reduced amounts of deposits. The results of the calculations also show that peats with relatively high Ca/Si ratios should be selected to counteract slagging tendencies.

Wheat straw are known to exhibit very high slagging -, bed-agglomeration - as well as deposit formation tendencies. The admixture of peat to this fuel would significantly reduce the amounts of potassium in the gas phase at lower temperature ranges (<1000 °C) but not at higher temperature ranges (> 1000 °C). Very high admixing levels are probably required to obtain these results and the dilution effect was the strongest observed contribution. The admixture of peat to straw, can also be useful for reducing

bed-agglomeration - and slagging tendencies, requiring high levels of peat, though (above 40 weight%), with high Ca/Si ratio).

Demonstration combustion experiments

The demonstration experiments showed that the reed canary grass with high ash content exhibited relatively low slagging tendencies. The admixing of 15 weight-% carex rich peat (with high Ca/Si ratio) to reed canary grass with low ash content, which normally is problematic from a slagging point of view, did not reveal any significant slag formation during 40 h test firing. The Salix fuel showed low slag formation tendencies, but the formed amount of fine potassium-rich particles ($<1 \mu\text{m}$) in the raw flue gas before the cyclone were high. This can give rise to deposit formation in boiler convection parts, especially since the formed coatings contained KCl. The incorporation of 15 weight-% carex based peat with relatively high Ca/Si ratio to Salix did not reveal any significant increase in slagging tendency, but contributed to a halving of the amount of fine particles ($<1 \mu\text{m}$) in the raw flue gas before the cyclone which is positive both from deposit formation as well as from particle emission point of views (for establishments with no advanced gas treatment equipment).

The high slagging tendency of the wheat straw fuel was significantly reduced at a 40 weight% (on DS basis) incorporation of carex based peat with high Ca/Si ratio. The amount of fine ($<1 \mu\text{m}$) potassium-rich particles could also be reduced but the effect was mainly due to dilution effects.

Recommendations

The results shows that admixing a typical carex based peat into Salix and Reed canary grass with low ash content gives positive effects concerning both bed agglomeration and deposit formation (corrosion) in the convection parts of the boiler, already at low levels (15 weight% on DS basis). A carex based peat with a relative high Ca/Si ratio is recommended for co-firing with Salix in grate fired boilers, to avoid slagging. The same type of peat should also be utilized in co-firing Reed canary grass with low ash content (relative low admixing levels is sufficient) and wheat straw (high levels are required) to reduce the risk of slagging.

In the choice of peat, a general recommendation can be made that peat with high ash content (carex based peat), preferably with high S content and a high Ca/Si ratio (a wt-ratio around 1 is desirable).

Reed canary grass with high ash content is not expected to cause any substantial operational problems such as deposit formation and slagging/ bed agglomeration. Thus, from an operational perspective there is no need to apply co-firing this fuel with peat.

To significantly reduce the fine particulate emission/deposit formation tendency in straw combustion with peat co-firing, would require such high levels of admixture that it not is interesting in the practice.

Key words: *Agricultural fuels, peat, ash related operational problems, slagging, fouling*

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	1
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	2
1.4	MÅL	2
2	GENOMFÖRANDE	3
2.1	ETAPP 1: TERMOKEMISKA MODELLBERÄKNINGAR OCH VALIDERING AV ERHÅLLNA RESULTAT MOT TIDIGARE BÄNKSKALEFÖRSÖK	3
2.1.1	VALDA BRÄNSLEPROV/-SAMMANSÄTTNINGAR	3
2.1.2	BERÄKNINGSSTRATEGI/-UTFÖRANDE	5
2.2	ETAPP 2: DEMONSTRATIONSFÖRSÖK I FULL- OCH BÄNKSKALA	6
2.2.1	VAL AV TORV- OCH BRÄNSLEPROV, INBLANDNINGSGRADER OCH FÖRBRÄNNINGSANLÄGGNINGAR	6
2.2.2	FÖRBRÄNNINGSFÖRSÖK	9
3	RESULTAT & DISKUSSION.....	13
3.1	TERMOKEMISKA MODELLBERÄKNINGAR OCH VALIDERING AV ERHÅLLNA RESULTAT MOT TIDIGARE BÄNKSKALEFÖRSÖK	13
3.1.1	SAMMANSÄTTNING HOS BRÄNSLEMIXAR.....	13
3.1.2	UPPSKATTADE/BERÄKNADE SLAGGNINGSTENDENSER	16
3.1.3	UPPSKATTADE/BERÄKNADE BÄDDAGGLOMERERINGSTENDENSER	22
3.1.4	UPPSKATTADE/BERÄKNADE BELÄGGNINGSTENDENSER	26
3.2	DEMONSTRATIONSFÖRSÖK I FULL- OCH BÄNKSKALA	32
3.2.1	SLAGG- OCH BOTTENASKBILDNING	32
3.2.2	PARTIKEL- OCH BELÄGGNINGSBILDNING	38
4	SLUTSATSER.....	47
5	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	49
6	LITTERATURREFERENSER	50

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Användningen av vissa åkerbränslen (t ex salix och halm) kan orsaka besvärande askrelaterade driftsproblem varav beläggingsbildning, högtemperaturkorrosion och bäddagglomerering i kraftvärmeverkens anläggningar uppmärksammas under senare år. Flertalet biobränsleeldade kraftvärmeverk i Sverige rapporterar mer eller mindre omfattande korrosionsproblem i överhettare som ger oacceptabelt kort livslängd [1, 2]. Problem med slagning i brännarutrustning och på rooster i anläggningar av fastighets- och närvärme-/fjärrvärmestorlek har också rapporterats vid biobränsleeldning. Problemen bidrar till en reducerad tillgänglighet hos utrustningen, vilket ökar behovet av tillsyn. De ”nya” typer av åkerbränslen (salix, halm och rörflen) som idag, p g a rådande knappa tillgång och ökande pris på mer traditionella träbränslen, kommer att ta sig in på marknaden innehåller sådana askbildande element, bl a höga alkalihalter, att besvärande driftsproblem och totala driftsstopp kan förväntas [3-6].

Torv har i större omfattning använts som bränsle i fjärrvärmeproduktion sedan början av 80-talet. Torv används flitigt i många förbränningsanläggningar av flera skäl bl.a. pris, tillgång och förbränningstekniska aspekter. Torvbränslen används ofta i kombination med träbränslen i värme- och kraftvärmeverk. Den kombinationen har visat sig ge förbränningstekniska fördelar kanske främst minskad risk för askrelaterade driftsproblem [1]. Produktionen av energitorv i Sverige har varit relativt konstant, omkring 3 TWh årligen, under de senaste tio åren. Sverige har stora torvtillgångar och en potential att utöka användningen kraftigt.

Torv som bränsle har under senare år dock ifrågasatts utifrån aspekter som förnybarhet och klimatpåverkan. En utredning som såg över torvens framtida förutsättningar som bränsle presenterades under hösten 2002. Sedan januari 2006 ingår torven dessutom i handeln om utsläppsrätter vilket har lett till en klar kostnadsökning för de verk som nyttjar torv i anläggningar större än 20 MW.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Ett relativt stort antal värme- och kraftvärmeverk i Sverige sameldar idag torv och biobränslen. Driftserfarenheter [1, 7] och tidigare utförd forskning har visat att sameldning av träbränslen med torv väsentligt förlänger livslängden hos överhettare [8] och minimerar uppkomsten av bäddagglomerering i fluidiserade bäddar [9, 10]. Positiva effekter vid sameldning med träbränslen har visats kunna uppnås redan med inblandningsgrader på 5-30 % på basis av bränslets torrsubstans [1]. Bortsett från diskussionerna kring klimatfrågan kan därför torv som sameldningsbränsle (additiv) vara motiverad i ett mera långsiktigt perspektiv om detta skulle innebära fördelar ur tillgänglighets- och ekonomisk synpunkt i hela bioenergisystemet.

Driftserfarenheter och tidigare forskning gällande effekter rörande sameldning av åkerbränslen med torv är relativt få. Tidigare arbete i bänkskala [11] visade dock på en kraftig reduktion av agglomereringstendensen/-temperaturen för halm och salix vid en

torvinblandning motsvarande 15-20 vikts-% av bränslemixens TS-halt. Resultaten från tidigare försök [11] både i fluidbädd och brännarutrustning i bänkskala visade dessutom på kraftig reduktion i mängden emitterade fina partiklar ($<1 \mu\text{m}$) och därmed en kraftig reduktion av beläggingsbildningen och troligen även överhettarkorrosion vid inblandning av torv i salix (15-20 vikts % av TS). Dock krävdes en högre inblandningsgrad än vad som ingick i denna studie (40 vikts-%), för att uppnå sådan effekt vid förbränning av halm. Vid nyttjande av vissa starrdominerade torvar (dominerande torvtyp i typisk bränntorv) med relativt höga kiselhalter för sameldning med biobränslen i roster/pelletsbrännare, t ex som närvärme och fastighetsanläggningar, finns dock indikationer på en ökad slaggningstendens. Detta kan i sådana fall leda till ökade drifts- och skötselkostnader i dessa typer av anläggningar. Tidigare studier visar därför att man vid sameldning mellan skogsbränslen och starrbaserad torv bör välja torv med relativt höga Ca/Si förhållanden för att minimera slaggning i rosters/brännare [11].

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Erfarenheter saknas dock vad gäller eventuella positiva sameldningseffekter/erforderliga inblandningsgrader av torv i många kommande åkerbränslen såsom salix, rörflen och spannmål. Erforderliga mängder torv vid halmeldning är heller inte klarlagd. Fördelarna har därmed ej visats generellt och brett såväl som demonstrerats för flera typiska/intressanta åkerbränslen.

1.4 Mål

Projektets mål är att:

- i) Bestämma vilka typiska inblandningsgrader av olika torvklaser i olika åkerbränslen (halm, salix och rörflen) som krävs för att uppnå positiva effekter m a p slaggning, beläggingsbildning/(högtemperaturkorrosion) och bäddagglomerering.
- ii) Demonstrera möjligheterna att minska uppkomsten av askrelaterade driftsproblem i förbränningsanläggningar genom inblandning av torv till intressanta åkerbränslen.

2 Genomförande

Arbetet genomfördes i två etapper. Etapp 1 behandlar termokemiska modellberäkningar och bänkskaleförsök vars resultat ligger till grund för valda bränslekombinationer, torvinblandningsgrader och valda torvprov till demonstrationsförsöken som utfördes i etapp 2. Etapp 2 behandlar demonstrationsförsök i full och bänkskala.

2.1 Etapp 1: Termokemiska modellberäkningar och validering av erhållna resultat mot tidigare bänkskaleförsök

Termokemiska studier rörande slaggnings, beläggning/bildning/(korrosion) och bäddagglomerering utfördes för att föreslå intressanta inblandningsgrader av olika torvklaser till olika åkerbränslen för nyttjande i olika förbränningsanläggningar. De åkerbränslen som studeras var halm, salix och rörflen med hög och låg askhalt.

2.1.1 Valda bränsleprov/-sammansättningar

Typiska bränslesammansättningar som väl representerar respektive åkerbränsle nyttjades. Som utgångspunkt för denna studie nyttjas tidigare arbetens sammanställning på åkerbränslen och olika torvklasers innehåll, och variation i innehåll, av askbildande element. Den valda halm och salixbränslet sammansättningen-/provet såväl som vissa halm/torv- och salix/torv mixar har också tidigare nyttjats i kontrollerade bänkskaleförsök i fluidbädd (5 kW) respektive roster/pelletsbrännare (15 kW). Detta medgav möjligheter till att validera de termokemiska modellberäkningarna för att därmed med större säkerhet ge bättre d v s säkrare resultat vid val av torvprov och inblandningsgrader vid fullskaleförsöken.

I tabell 1 framgår de bränsleprov/-sammansättningar som nyttjats i de termokemiska modellberäkningarna.

Tabell 1. Bränslekaraktäristik - askbildande huvudelement hos studerade torv- och åkerbränsleprover/-sammansättningar (etapp 1 termokemiska modellberäkningar).

Table 1. Fuel characteristics – ash forming main elements in the studied peat- and agricultural fuel samples/compositions (phase 1 thermo chemical model calculations).

	Torvprover/-sammansättningar				Åkerbränsleprover/-sammansättningar			
	Brunns - kölen	Norrheden	Stentjärn D	3 B fält	Halm	Salix	Rörflen låg askhalt	Rörflen hög askhalt
Askhalt*	10.4	4.0	6.3	6.2	5.7	2.1	3.1	10.7
Si*	3.25	0.45	1.41	0.81	0.80	0.086	0.68	3.8
Al*	0.34	0.26	0.19	0.17	0.006	0.017	0.081	0.31
Ca*	0.46	0.39	0.74	0.93	0.40	0.50	0.34	0.29
Fe*	0.76	0.69	0.50	0.73	0.005	0.010	0.031	0.11
K*	0.08	0.01	0.05	0.01	1.25	0.25	0.23	0.36
Mg*	0.07	0.05	0.07	0.06	0.10	0.044	0.078	0.073
Na*	0.03	0.01	0.02	0.006	0.03	0.011	0.0089	0.052
P*	0.07	0.04	0.03	0.052	0.13	0.059	0.13	0.090
S*	0.22	0.26	0.51	0.59	0.19	0.04	0.12	0.09
Cl*	0.05	0.03	0.03	0.04	0.26	<0.01	0.02	0.05
Torvslag*	SC-t	SC-t	SC-t	SC-t	-	-	-	-
Hum. Grad***	H6	H4-5	H4-5	H4-5	-	-	-	-

*) % av TS.

**) S=Sphagnum torv (vitmosstorv); C=Carex (starrtorv). Vid angivande av torvslaget är det sistnämnda det dominerande torvslaget exempelvis SC, vilket innebär att starrtorv dominerar.

***) *Humifieringsgrad* (enl. von Post) H1-H3 är låghumifierad torv där endast färgat vatten avgår vid kramning. H4-H6 är medelhumifierad torv där vattnet är mycket grumligt och viss andel dy och grötig massa passerar mellan fingrarna vid kramning. H7-H10 är höghumifierad torv där övervägande del av torvmassan passerar vid kramning mellan fingrarna.

De torvprov som valdes ut var de torvprov som ur sameldningsmekanistisk synpunkt (utifrån de tidigare studierna) väl representerar en torvsammansättning/-prov som ger positiva effekter m a p askrelaterade driftsproblem. Utifrån resultaten från de tidigare utförda arbeten, bl a [11] har slutsatsen dragits att torvar med hög askhalt (t ex starrinnehallande), gärna även med höga inslag av svavel, ger de bästa sameldningsegenskaperna.

De torvprov som därför nyttjades i modellberäkningarna var torvprov från Brunnskölen, Norrheden och Stentjärn D (sammansättning se Tabell 1). Dessa har också tidigare nyttjats i några enstaka sameldningsförsök i bänkskalanläggningar. Bränsleaskans sammansättning varierar väsentligt i de föreslagna proverna då Norrheden även innehåller lermineral, Brunnskölen är relativt rik på Si och har en hög askhalt och Stentjärn D är relativt rik på Ca och S. De valda torvproverna/sammansättningarna representerar också väl variationerna i bränsleaskan hos typisk starrbaserad energitorv.

Då tidigare studier visat att mängden torvaska är viktig för att erhålla positiva egenskaper [11] m a p sameldning nyttjades ej torv som domineras av vitmossa. Då dessa torvprov hade relativt höga Si/Ca förhållanden och då detta visat sig i rosteranläggningarna kunna bidra till ökad slaggningsstendens vid inblandning av dessa torvprover i vissa biobränslen (t ex salix), så utfördes även modellberäkningar med ett torvprov benämnd 3 B Fält som har ett lägre Si/Ca förhållande (nära 1). Detta torvprov är en typisk blandtorv med höga inslag av starrtorv och anses vara relativt representativ för normal bränntorv.

Salixprovet/-sammansättningen som nyttjats i etapp 1 härstammar från försöksodlingar vid inst. för norrländsk jordbruksvetenskap (NJV), SLU Umeå. Halmen härrör från Swalövs värmeverk i Skåne där driftspersonalen tagit ut ett representativt halmmaterial. De valda rörfbensproverna var båda vårskördade. Provet med hög askhalt har vuxit på mer lerjordsbetonad åker i Umeå medan provet med låg askhalt har vuxit på mer mullbetonad mark i Glommersträsk.

Valda åkerbränsleprov/-sammansättningar representerar väl de olika energigrödernas sammansättning enligt de uppgifter som ges rörande medianvärden och typiska variationer i sammansättning enligt Värmeforsks bränslehandbok [12].

2.1.2 Beräkningsstrategi/utförande

Termokemiska modellberäkningar utfördes vid inblandningsgraderna 0, 5, 15, 25 och 40 vikts-% på TS-basis av de olika torvproverna till de studerade åkerbränslena. Som ingångsdata vad gäller ingående huvud- och askbildande element nyttjades bränsledata från tabell 1.

Modellberäkningar utfördes med programmet FACTSage-5.4 [13]. Programmet bygger på en minimering av Gibb's fria energi för det system man undersöker. I beräkningarna har termodynamiska data för gaskomponenter såväl som stökiometriska kondenserade faser, 2 icke ideala lösningar (salt och oxid/slagg) och 7 icke ideala fasta lösningar använts (se tabell 2). Termodynamiska data hämtades från FACT-databasen som medföljer programmet.

Tabell 2. Nyttjade element och lösningsmodeller vid de termokemiska modellberäkningarna.

Table 2. Elements and solution models used in the chemical equilibrium model calculations. The designations of the solution models are the ones used in FactSage 5.4.1.

Elements	C, H, O, N, Si, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S, Cl	
Solution models	<i>Slag:</i>	SLAGA (liquid; CaO, MgO, K ₂ O, FeO, Na ₂ O, SiO ₂)
	<i>Salt:</i>	SALTA (liquid)
	<i>Chloride:</i>	ACL (solid solution)
	<i>CO₃SO₄:</i>	CSOB (solid solution)
		liq-K,Ca/CO ₃ ,SO ₄ (LCSO)
		s-K,Ca/CO ₃ ,SO ₄ (SCSO)
		liq-Ca,Mg,Na/(SO ₄) (LSUL)
		s-Ca,Mg,Na/(SO ₄) (SSUL)

Ett luftöverskott motsvarande en luftfaktor på 1.2 nyttjades vid beräkningarna som utfördes mellan 700-1300 °C vid normalt lufttryck (1 bar). Beräkningar utfördes för att simulera förbränningsförloppet i dels en rosteranläggning dels i en fluidiserad bädd. Vid beräkningarna som avsågs att simulera förloppet i en fluidbädd antogs att 5 µm av kvartskornets yta (kvartskornets diam=250 µm) var reaktionsbenägen d v s deltog i reaktionen med bränslets askbildande huvudkomponenter d v s det Si som nyttjades i beräkningarna kom både från bränslet och delar av kvartsbäddkornen. Detta motsvarar den bäddkornslagertjocklek som i medeltal uppmätts under de tidigare utförda kontrollerade fluidbäddsförsöken [11]. Utifrån beräkningarna och bränslesammansättningen bestämdes: i) andelen bildad smälta i mol-% av kondenserade faser (askkomponenter) som funktion av temperaturen vilket nyttjades som ett mått på slaggnings- respektive bäddagglomereringstendensen för bränslet/bränslemixen, samt ii) andelen kalium i bränslet som avgick till gasfasen som funktion av temperaturen vilket tillsammans med S/Cl förhållandet i bränslet/bränslemixen nyttjades som ett mått på beläggningstillväxttendensen.

2.2 Etapp 2: Demonstrationsförsök i full- och bänkskala

2.2.1 Val av torv- och bränsleprov, inblandningsgrader och förbränningsanläggningar

De åkerbränslen som valdes att studeras i detta arbete var salix, halm och rörfilen med låg respektive hög askhalt. Dessa bränslen är idag de mest aktuella åkerbränslena på den svenska bränslemarknaden. Utifrån tidigare erfarenheter [11] och resultaten från de termokemiska modellberäkningarna i etapp 1 från detta projekt valdes en typisk starrbaserad torv ut (för samtliga sameldningsprov) med relativt höga Ca/Si förhållanden. Denna torvsammansättning, vad gäller askbildande element, ger en bra uppbindning av kalium till bottenaskan/större askpartiklar vilket bidrar till reduktion av uppkomsten av beläggningar i konvektionsdelen samtidigt som eventuella negativa effekter vad gäller slaggbildning i rosterns p g a torvens innehåll av reaktivt kisel vid salixeldning minimeras då det valda torvprovet har relativt hög halt Ca. Torven uppskattades också utifrån modellberäkningarna att ge reducerad slaggbildning för rörfilensprov med låg askhalt och för typisk halm. Det är allmänt känt att dessa båda åkergrödor har relativt hög slaggnings-tendens vid eldning på roster. Inblandningsgraderna valdes för att erhålla signifikanta effekter med utgångspunkt från modellberäkningarna/tidigare erfarenhet och bestämdes till 15 vikts-% av TS i rörfilens- och salixblandningarna samt 40 vikts-% av TS i halmblandningarna.

De anläggningar som valdes att nyttjas till förbränningsförsöken var samtliga av rostertyp då denna är den dominerande anläggningstypen hos anläggningar under 20 MW. Det är troligen främst i anläggningar under 20 MW som åkerbränsleinblandningarna kan komma att dominera i den bränslemix som nyttjas därför bestämdes det i projektet (beslut av referensgruppen) att försöken skulle utföras i rosteranläggningar.

Bränsleprov - Fullskaleförsök

Förbränningsförsök utfördes under ca 2 dygn per prov i en 4 MW rosterpanna (brant trappstegsrost) med ett briketterat rörfilensprov med hög askhalt (25 ton TS), ett

rörflensprov med låg askhalt som sambriketterats (85/15% på TS basis) med ett torvprov (3 B Fält) (totalt 25 ton TS), salixflis (ca 40 ton fuktig flis) samt med en blandning av samma salixflis med ca 15% (på TS basis) inblandning av frästörv (3 B Fält) (ca 40 ton).

Rörflenet med hög askhalt var vårskördat i Umeåregionen (lerjord) och rörflenet med låg askhalt kom från Glommersträsk i Norrlands inland (mulljord). Typiskt för just rörflen är att bränslen som växer på lerjordar ger höga askhalter och bränslen som växer på mulljordar ger låga askhalter. Tidigare utförda förbränningsförsök med rörflensprov tagna från samma region och jordart i Glommersträsk har visat sig ge upphov till kraftig slaggningstillväxt i rosterpannor [14]. De båda rörflensbriketterna tillverkades vid Bränsletekniskt Centrum i Umeå. Frästörvprovet som nyttjades i rörflensbriketten med låg askhalt samt vid sameldning med salix i fuktig lös form kom från samma torvstack men härrörde från olika provuttagstillfällena. Provet är taget från samma del av torvtakten som det tidigare provet som nyttjats i de termokemiska modellberäkningarna och benämns 3 B Fält. Torvprovet och salixflisen blandades väl på en asfalterad ren yta med hjälp av en hjullastare i mindre proportioner innan mixen tippades i bränslefickan. Lastarens skopa användes som mått på volym. Ett flertal prov på bulkdensitet och fukthalt utfördes på respektive bränsleprov.

Den nyttjade rosterpannan har en brant trappstegsrost och är normalt optimerad för fuktigare bränslen (ca 30 vikts-% fukt) då eldstaden är murad. Detta medförde att briketter av rörflen och rörflen/torv hade en tendens att både rulla nedför rosten samt ge en för hög ugnstemperatur. Genom att tillföra träflis till rörflensbriketterna med en inblandningsgrad av 40 vikts-% på TS basis kunde uppehållstiden av briketter hållas tillräckligt lång för att utbränningstiden skulle vara acceptabel och ugnstemperaturen (mäts högst upp i eldstaden) kunde hållas på en acceptabel temperatur dvs ca 1000 °C. Den nyttjade träflisen innehöll till största delen ren stamved och endast till en mindre andel av bark. Dess askhalt uppskattade därför till att variera mellan 0,5 till max 1 vikts-% av TS och torrhalten var på ca 63 vikts-%. Detta innebär att andelen askbildande element som kommer från träflisen är låg i jämförelse med den som kommer från de båda rörflensbriketterna. Bränsleaskans sammansättning kommer därför klart att domineras av rörflensaskan. I texten kommer därför hädanefter försöken med de båda rörflensbriketterna att benämnas ”rörflen med hög askhalt” samt rörflen med låg askhalt-3B Fält 15%. Av tabell 3 och 4 framgår sammansättningen m a p askbildande huvudelement för de nyttjade bränslena i rosterpannan.

Bränsleprov-bänkskaleförsök

Förbränningsförsök utfördes även i en 20 kW:s undermatad pelletsbrännare dockad till en pelletspanna med ett pelleterat halmprov (50 kg) samt en pelleterad halm (samma halmprov) och torvmix (60/40% på TS basis, 50 kg). Halmen härrörde från Swalövs värmeverk i Skåne där driftspersonalen tagit ut ett representativt halmmaterial. Torven var av samma uttagsbatch (3 B Fält) som den som nyttjades vid sambriketteringen av rörflen med låg askhalt. Pelletering utfördes vid Bränsletekniskt Centrum i Umeå. Av tabell 3 och 4 framgår sammansättningen m a p askbildande huvudelement för de nyttjade bränslena i pelletsbrännaren.

Tabell 3. Bränslekaraktäristik-nyttjade bränsleråvaror till brikettering/pelletering och sameldning.

Table 3. Fuel characteristics-used fuels samples for briquetting/pelletizing and co-combustion.

	Rörflen hög askhalt	Rörflen n låg askhalt	Halm	Salix	3 B Fält-Batch 1 Sambrikettering/ -pelletering	3 B Fält-Batch 2 Sameldning med salix
Askhalt*	7.8	2.3	5.7	1.7	7.0	6.4
C*	42.3	48.3	46.2	48.9	52.3	n.a.
H*	6.1	6.0	5.6	6.2	5.5	n.a.
O*	42.1	42.0	41.6	42.8	32.7	n.a.
N*	0.9	1.1	0.9	0.4	2.1	n.a.
Si*	3.7	0.40	0.80	0.014	1.36	0.76
Al*	0.045	0.0083	0.06	0.0034	0.32	0.20
Ca*	0.38	0.31	0.40	0.43	0.93	0.92
Fe*	0.04	0.02	0.005	0.0029	0.67	0.67
K*	0.25	0.20	1.25	0.23	0.045	0.013
Mg*	0.073	0.074	0.10	0.066	0.084	0.065
P*	0.15	0.15	0.13	0.062	0.046	0.044
S*	0.1	0.13	0.19	0.04	0.44	0.57
Cl*	0.02	0.03	0.26	0.04	0.03	0.06

*) Vikts% av TS; n.a.) ej analyserat.

Tabell 4. Bränslekaraktäristik- nyttjade bränslen/bränslemixar vid förbränningsförsöken

Table 4. Fuel characteristics – used fuels/fuel mixtures in the combustion experiments

	Rörflen -hög askhalt (brikett)	Rörflen låg askhalt -3 B Fält 15% (brikett)	Halm (pellets)	Halm-3B Fält 40% (pellets)	Salix (flis)	Salix-3B Fält 15% (blandning av salixflis och frästörv)
Torrhalt** *	86	88	92	91	63	59*
Askhalt**	7.8	2.9	5.7	6.2*	1.7	2.4*
C**	42.3	n.a.	46.2	n.a.	48.9	n.a.
H**	6.1	n.a.	5.6	n.a.	6.2	n.a.
O**	42.1	n.a.	41.6	n.a.	42.8	n.a.
N**	0.9	n.a.	0.9	n.a.	0.4	n.a.
Si**	3.7	0.53	0.80	1.0*	0.014	0.13*
Al**	0.045	0.048	0.06	0.16*	0.0034	0.033*
Ca**	0.38	0.40	0.40	0.61*	0.43	0.50*
Fe**	0.04	0.097	0.005	0.27*	0.0029	0.10*
K**	0.25	0.19	1.25	0.78*	0.23	0.20*
Mg**	0.073	0.077	0.10	0.09*	0.066	0.066*
P**	0.15	0.15	0.13	0.10*	0.062	0.059*
S**	0.1	0.18	0.19	0.29*	0.04	0.12*
Cl**	0.02	0.03	0.26	0.17*	0.04	0.043*

*) Beräknad utifrån bränsleråvarornas sammansättning och vald inblandningsgrad av torrv.

***) Vikts-% av TS

***) Vikts-% av prov
n.a.) Ej analyserat

Halmprovet som nyttjats i förbränningsförsöken är samma bränsleprov som nyttjats vid de termokemiska modellberäkningarna i etapp 1. Salix och röflen med låg respektive hög askhalt har en bränsleasksammansättning som är mycket lik den som återfanns i de bränsleprov som ingick i de termokemiska beräkningarna (jämför tabell 1 och 3). Torven som nyttjats (3 B Fält) såväl vid de termokemiska modellberäkningarna som vid förbränningsförsöken är tagen från samma delområde från samma torvtäkt. Skillnaderna i bränsleasksammansättningen är mycket liten mellan batch 2 och det prov som nyttjats vid de termokemiska modellberäkningarna. Batch 1 har i jämförelse med de två andra torvproven av 3 B Fält en något högre Si, Al och K halt och annars mycket lik sammansättning. Tidigare analyser av skandinavisk torv har visat att K och Al ofta återfinns i torven som olika fältspat d v s mineral [15]. Det är därför troligt att skillnaderna mellan batch 2 och de övriga två batcherna beror på kontaminering vid skörd/lagring/transport. Dessa mineral är inte lika reaktiva som torvens övriga innehåll av askbildande element/askkomponenter [15].

2.2.2 Förbränningsförsök

Fullskaleförsök i rosterpanna (4 MW)

Genomförande

Förbränningsförsök om 2 dygn (40 ± 3 h) utfördes för respektive försök (rörflen hög askhalt-briketter, rörflen låg askhalt med torvinblandning 15% - briketter, salixflis samt salixflis med inblandning av frästortv 15% i en 4 MW:s rosterpanna som levererats av Järforsen Energisystem AB. Anläggningen återfinns i Silverdalen som ligger i nordvästra Eskilstuna och tillhör Eskilstuna Energi & Miljö AB. Försöken utfördes under v 40 och 41, 2009.

Grunduppgifter för anläggningen enligt pannstillverkaren finns i Tabell 5. Anläggningen är kopplad till Eskilstuna stads fjärrvärmenät.

Tabell 5. Uppgifter om anläggningen Silverdalen i Eskilstuna enligt Järforsen Energisystem AB.

Table 5. Data of the used combustion plant Silverdalen in Eskilstuna according to Järforsen Energisystem AB.

Byggår	1996
Kapacitet	4 MW
Konstruktionstryck	16 bar
Konstruktionstemperatur	140°C
Rökgastemperatur	200°C
Framledningstemperatur	95°C
Returtemperatur	70°C
Pannverkningsgrad	84 %
Bränsle	Skogsflis
Bränslefukthalt	45 %
Askhalt	1 – 5 %
NOx-halt	120 mg/MJ
Totalt installerad eleffekt	140 kW

Anläggningen består (i grova drag) av en rosterugn, avgaspanna, cyklon och ett elfilter. Cyklonaska blandas med bottenaska medan elfilteraska transporteras separat.

Rökgaserna återförs till pannan, delvis under rosten med primärluft och delvis med sekundärluft. Bränslet tippas i en bränsleficka och doseras med en skraptransportör som transporterar bränslet från bränslefickan, genom bränslekanalen, till pannan. En pusher matar in bränslet i pannan.

Varje försök utfördes vid en konstant last på 2 MW och utgående syrehalt på 6-8%. Utgående CO emissioner var i samtliga experiment lägre än 100 ppm. Pannan eldades enligt sin normala driftinställning för skogsflis under alla försök förutom vid de båda rörflens(brikett)försöken då bränslepusher-frekvensen sänktes något och bottenaskskruvens gångtid ökades (pulsar oftare). Dessutom minskades luftmängden till rostrets torkzon något samtidigt som luftmängd till rostrets pyrolyszon ökade något.

Provtagning och kemisk analys av uttagna prov

Provtagning av gasemissioner, partiklar och olika askfraktioner utfördes under dag 2 för respektive försök. Rökgasernas innehåll av CO, NO och O₂ analyserades med ett analysinstrument av märket Testo XL 350 (elektrokemiska celler) i rökgaskanalen efter elfiltret.

Totalstoftprov togs i rökgaskanalen mellan avgaspannan och cyklon (d v s före cyklon) enligt standardmetod för totalstoftprovtagning (SS-EN 13284-1). För att även bestämma partiklarnas storleksfördelning och kemisk sammansättning för de olika partikelstorlekarna användes en 13-steps lågtrycksimpaktor från Dekati Ltd där partiklar i intervallet 0,03-10 µm separeras. Även denna provtagningen utfördes i rökgaskanalen mellan avgaspanna och cyklon. Aluminiumfolie utan infettning användes som substrat i impaktorn. Halter av SO₂ och HCl mättes (efter ett totalstoftsfilter) genom absorption i en vattenlösning (0,3% väteperoxid med efterföljande ICP-SFMS- respektive våtkemisk analys. Denna provtagning skedde också mellan avgaspanna och cyklon.

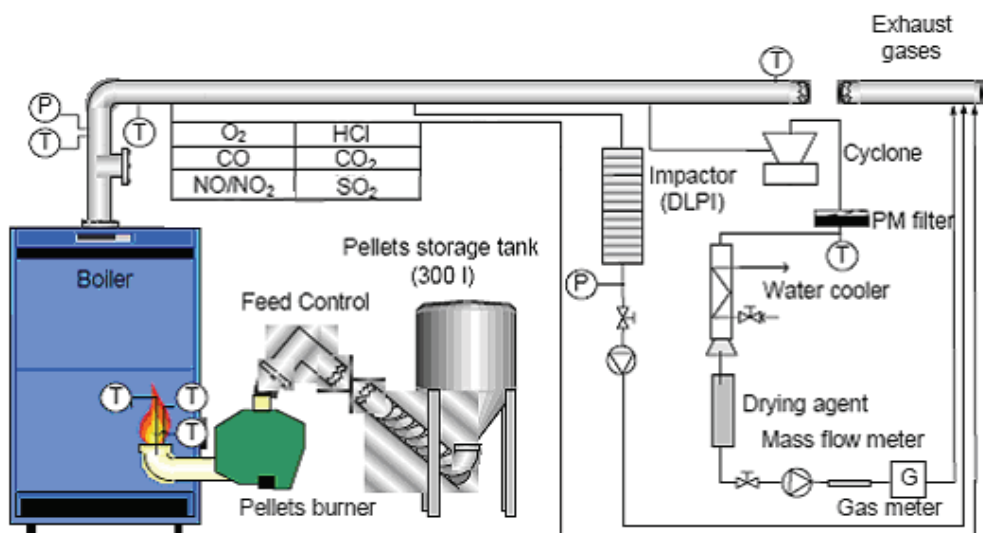
Beläggningsprov togs även på en simulerad konvektionstub under 6 h med hjälp en luftkyld sond med en löstagbar provring (rostfritt stål, SS 2343). Den kylda provringen var belägen i avgaspannans nedre drag där rökgaserna vänder (gaspannan består av två stående tubpaket). Røkgastemperaturen vid provstället var 650-700 °C och yttemperaturen på sonden var 450 ± 10 °C under försöken. Provringarna sparades för vidare kemisk analys. Under denna provtagning var ljudsotningen av anläggningen avstängd.

Cyklon-, bottenask- och elfilteraskprov togs dessutom under varje försöks andra dag. Prover på bildade askfraktioner och samplade partikelprov i impaktor och beläggningssondringar (läsida) analyserades m a p dess kemiska sammansättning både semi-kvantitativt med svepelektronmikroskop (SEM) och energidispersiv röntgenanalys (EDS) för att bestämma elementarsammansättning och kvalitativt (kristallina faser) m h a pulverröntgendiffraktion (XRD).

Bänkskaleförsök i pelletsbrännare/-panna (20 kW)

Genomförande

För att efterlikna förhållandena vid rostereldning utfördes försök med den rena halmpelletsen samt halm-torv pelletsen (60/40 vikts-% TS) i en för teknikområdet representativ och P-märkt undermatad brännare (Eco-Tech A3). Försöksuppställningen visas schematiskt i figur 1. Försöken utfördes under en arbetsdag per pellets kvalitet (eller tills att brännaren stannade p g a svår slaggbildning) under kontinuerlig drift (ej intermittert) vid en konstant bränsleeffekt på 12 kW. Brännaren var utrustad med temperaturmätning (termoelement typ N) vid tre positioner omkring rostret. De uppmätta maximala temperaturerna i området där eventuell aska avsätts uppskattades därigenom till 1200-1250 °C och visade ej på några signifikanta skillnader mellan de olika pelletsvalitéerna. Brännaren var under försöken dockad till en panna av märket Combifire. Brännaren eldades med ett luftöverskott motsvarande 8-10 % O₂ t.g. (medelvärde under försöksperioden) under båda försöken och utgående CO emissioner var under 1000 ppm för samtliga prov.



Figur 1. Schematisk bild över nyttjad pelletsbrännaruppställning och rökgasprovtagningsutrustning.

Figure 1. Illustration over the used pellet burner equipment and flue gas sampling set-up.

Efter provperiodens slut inspekterades utrustningen med avseende på beläggingsbildning (slag). Mängden avsatt slag (partiklar > 0,3 mm) och aska (bottenaska) bestämdes genom vägning. Slagg- och askprover sparades för analys med avseende på utseende och kemisk sammansättning (kvalitativt och kvantitativt).

Provtagning och kemisk analys

Rökgaserna analyserades med avseende på CO, CO₂ och NO med ett analysinstrument av märket Testo XL 350 (elektrokemiska celler) och HCl och SO₂ mättes med ett FTIR instrument. O₂-halten registrerades även med en lambdasond samt med analysinstrument

av märket Testo XL 350 (elektrokemiska celler). Gasprovtagningen utfördes efter pannan vid en rökgastemperatur på ca 150 °C (markerad i figur 1).

Stoftprov togs isokinetiskt i rökgaskanalen vid 120-140 °C och i övrigt enligt standardmetod (SS-EN 13284-1). För att även bestämma partiklarnas storleksfördelning och kemisk sammansättning för de olika partikelstorlekarna användes en 13-stegs lågtrycksimpaktor från Dekati Ltd där partiklar i intervallet 0,03-10 µm separeras. Provtagningen utfördes vid en rökgastemperatur på 120-140 °C, och impaktorn värmdes till ca 120 °C under provtagningen. Aluminiumfolie utan infettning användes som substrat i impaktorn. Provtagningen av partiklar till impaktorn utfördes isokinetiskt för att erhålla ett representativt urval av partiklarna i den varma rökgasen.

Prover på bildad slagg och bottenaska och samplade partikelprov i impaktor och analyserades m a p dess kemiska sammansättning både semi-kvantitativt med svepelektronmikroskop (SEM) och energidispersiv röntgenanalys (EDS) för att bestämma elementarsammansättning och kvalitativt (kristallina faser) m h a pulver-röntgendiffraktion (XRD).

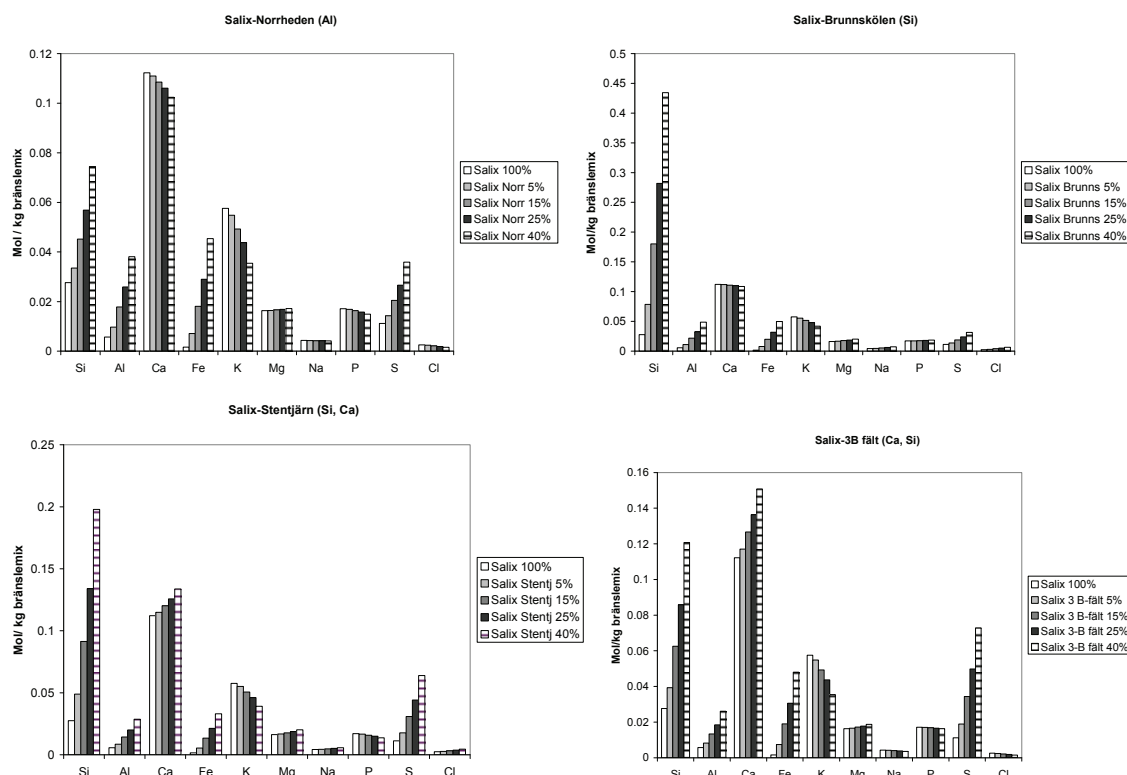
3 Resultat och diskussion

3.1 Termokemiska modellberäkningar och validering av erhållna resultat mot tidigare bänkskaleförsök

I kapitlet 3.1 redovisas resultaten från de termokemiska modellberäkningarna. En sammanfattning av dessa ges i början av kapitel 4. Läsare som är mindre intresserade av de detaljerade resultaten hänvisas till kapitel 3.2, där fortsättningsvis resultaten av de experimentella arbetena beskrivs.

3.1.1 Sammansättning hos bränslemixar

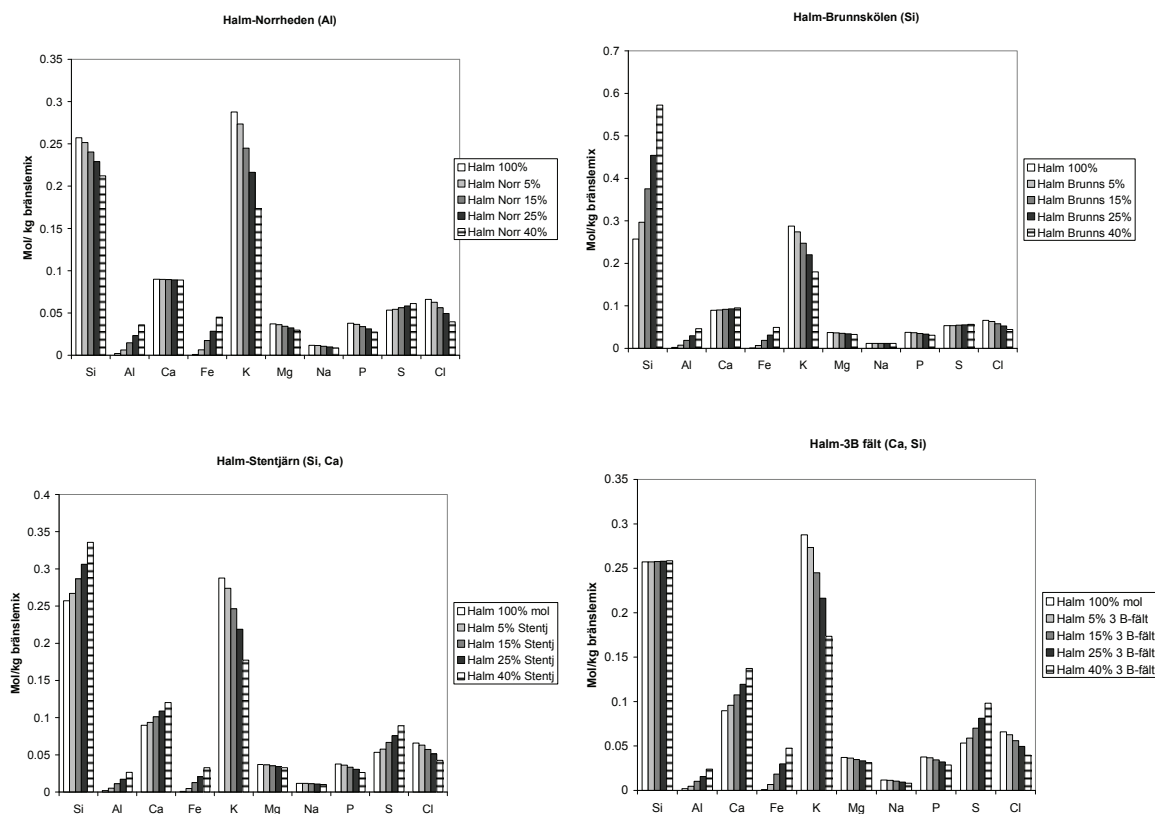
Vid inblandning av torv sjunker generellt kaliumhalten i bränslemixen för samtliga studerade åkerbränslen då kaliumhalten i torven är mycket låg. Det kalium som återfinns i skandinavisk torv är till största delen bunden i olika fältspat och är därmed mindre reaktiv [15]. Vid inblandning av samtliga studerade torvprov i salix ökar kiselhalten markant emedan kalciumhalten endast ökar vid inblandning av torvproverna från Stentjärn och 3B-Fält (se figur 2). Aluminium- och järnhalterna ökar dessutom vid inblandning av samtliga torvprov i salix. Svavelhalten ökar också kraftigt vid inblandning av samtliga studerade torvprov utom Brunnskölen vilket bidrar till kraftigt ökade svavel/klor kvoter.



Figur 2. Bränslesammansättning (askbildande huvudelement) för salix och salix/torvmixarna.

Figure 2. Fuel composition (ash forming main elements) for willow and willow/peat mixtures.

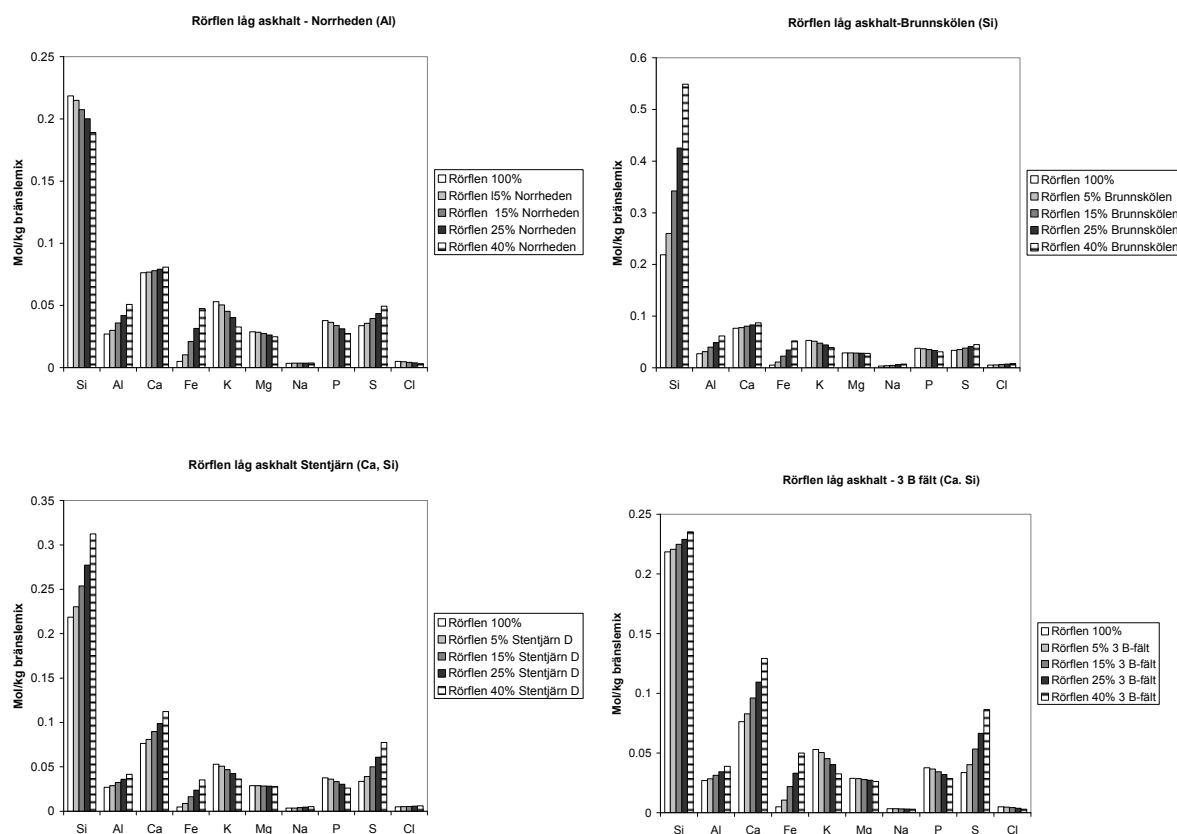
Då kiselhalten är relativt hög i halmen ökar endast denna i halmmixar innehållande torvprov med relativt höga kiselhalter d v s prov från Stentjärn och Brunnskölen (figur 3). Kalciumhalten ökar också vid inblandning av torvproverna Stentjärn och 3 B Fält. Klorhalten i torv är negligerbar vilket generellt bidrar till minskade klorhalter vid inblandning av torv till halm som oftast är rik på klor. Svavel/klor kvoten ökar starkt vid inblandning av främst de både svavelrika torvproven Stentjärn och 3 B-Fält. Aluminium- och järnhalterna ökar dessutom vid inblandning av samtliga torvprov.



Figur 3. Bränslesammansättning (askbildande huvudelement) för halm och halm/torvmixarna.

Figure 3. Fuel composition (ash forming main elements) for straw and straw/peat mixtures.

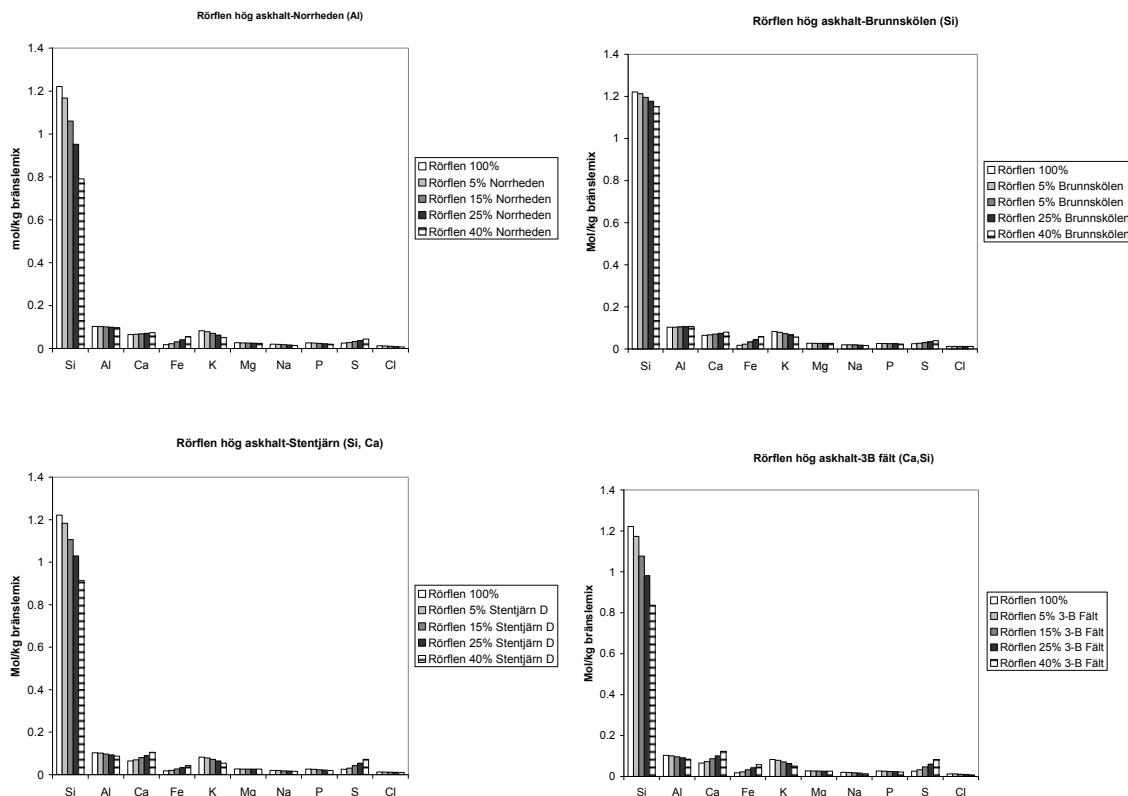
I bränslemixar mellan rörlensprovet med låg askhalt och samtliga torvprov utom Norrheden ökar kiselhalten vid torvinblandning (se figur 4). Kalcium och svavelhalten ökar vid inblandning av de båda torvproverna från Stentjärn och 3B Fält. Aluminium- och järnhalterna ökar dessutom vid inblandning av samtliga torvprov.



Figur 4. Bränslesammansättning (askbildande huvudelement) för rörflen med låg askhalt och rörflen med låg askhalt/torvmixarna.

Figure 4. Fuel composition (ash forming main elements) for reed canary grass low ash content and reed canary grass low ash content/peat mixtures.

I bränslemixar mellan rörlensprovet med hög askhalt och samtliga torvprov reduceras kiselhalten vid torvinblandning (se figur 5). Kalcium och svavelhalten ökar vid inblandning av de båda torvproverna från Stentjärn och 3B Fält. Aluminium och järnhalten ökar dessutom vid inblandning av samtliga torvprov.



Figur 5. Bränslesammansättning (askbildande huvudelement) för rörflen med hög askhalt och rörflen med hög askhalt/torvmixarna.

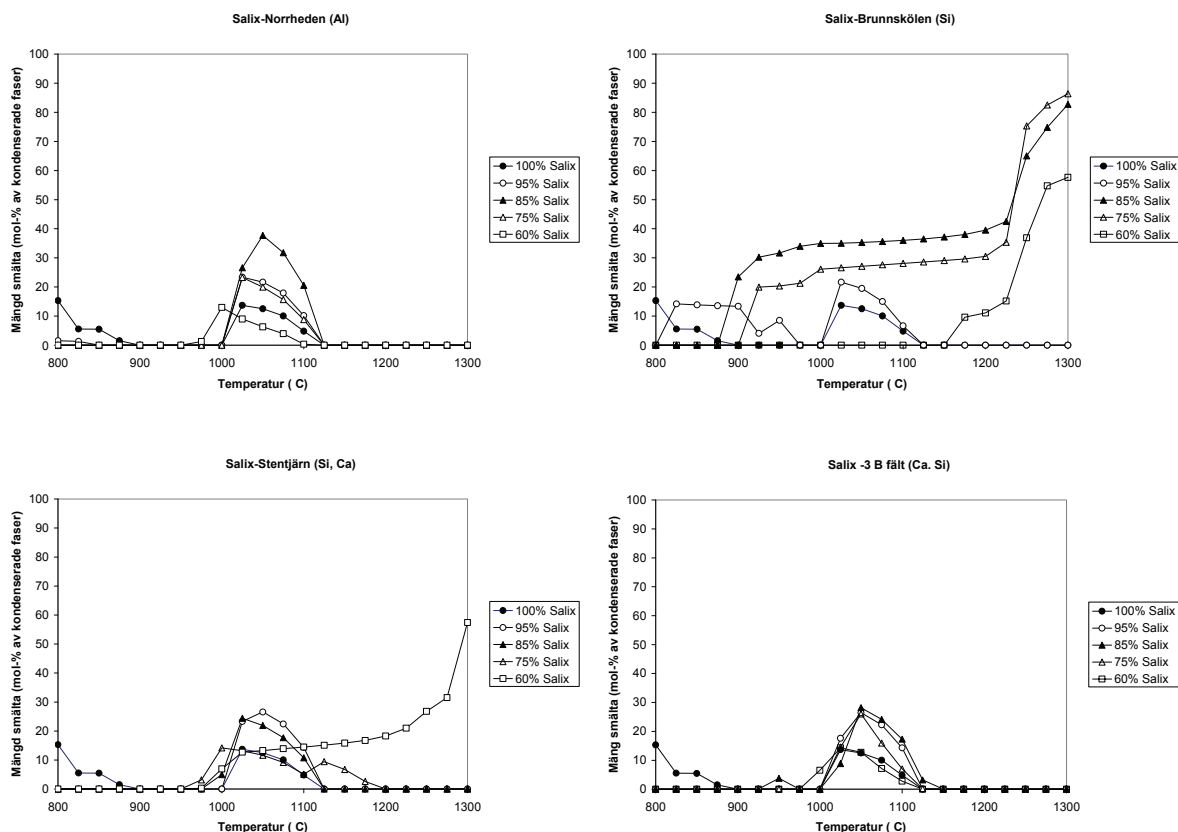
Figure 5. Fuel composition (ash forming main elements) for reed canary grass high ash content and reed canary grass high ash content/peat mixtures.

3.1.2 Uppskattade/beräknade slaggingstendenser

I tidigare arbeten har diskussioner förts om de mekanismer som ligger bakom slaggningsprocesserna vid förbränning av biobränslen med ett relativt lågt innehåll av fosfor [16-19]. Resultaten från dessa arbeten pekar mot att det under själva utbränningsförloppet i och på de enskilda bränslepartiklarna bildas kaliumsilikatsmältor i vilka omkringliggande kalcium- och magnesiumföreningar kan lösas in. Tillgången till kisel, antingen i form av mer reaktivt (i växters organiska matris) och/eller sandpartiklars ytor är en förutsättning för att dessa silikatsmältor initialt skall bildas. Dessa silikatsmältor föreslås också vara en förutsättning för bildandet av slagg hos fosforfattiga biobränslen. Tillgången till kalcium och magnesium minskar dock problematiken vad gäller slaggbildning då dessa ämnen markant höjer smälttemperaturen hos den bildade smältan. Att genom termokemiska modellberäkningar bestämma andelen smält aska av totala mängden bildad aska under

förbränningsförloppet är därför intressant för att bedöma ett bränsle/bränslemix slaggningsstendens. Den smälta askan kan vid förbränning av bränslen med relativt lågt fosforhalt (de bränslen som studerades i detta arbete) antingen bestå av en saltsmälta (t. ex en blandning av smält KSO_4 , KCl , K_2CO_3) och/eller en silikatsmälta där olika oxider och silikater har bildat en smälta. Saltsmältorna är lågviskösa och är därför inte så klibbiga emedan silikatsmältorna är högviskösa och är därför mer klibbiga. I förbrännings-sammanhang är det framförallt silikatsmältorna som gett upphov till slaggbildningen [17-19]. I tidigare arbeten har därför mängden bildad silikatsmälta bestämts och detta modellerings-förfarande har gett god kvalitativ överensstämmelse med slaggningsstendenser som bestämts i förbränningsförsök [19]. I beräkningarna har både förekomsten av en salt- och silikatsmälta predikterats. Saltsmältan har dock bara förekommit i ett av de studerade fallen; det vid inblandning av torv i salixbränslet (figur 6).

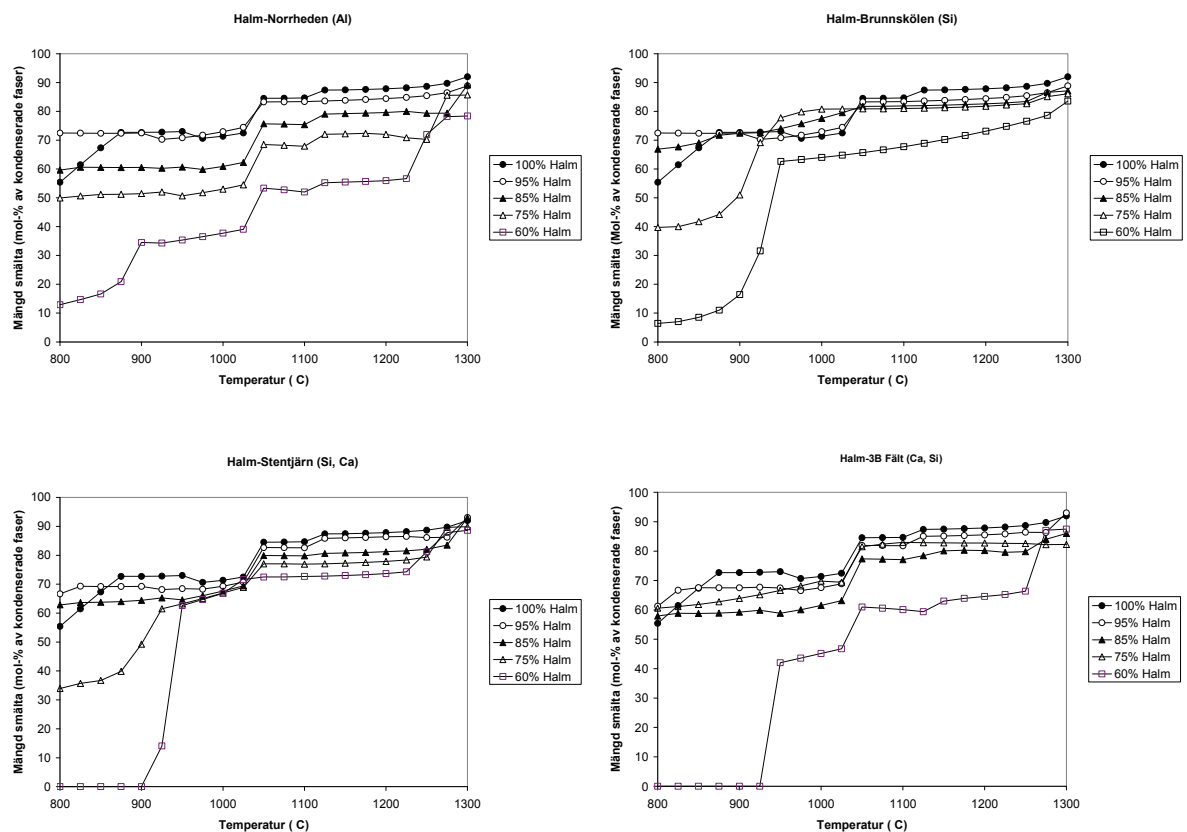
Inblandning av torv till det kiselfattiga salixbränslet ger ökade smältamängder (se figur 6). Vid inblandning av Norrheden och 3 B Fältprovet återfinns dock bara en saltsmälta ("hajfenan") i temperaturintervallet mellan ca 1000-1100 °C. Vid inblandning av den kiselrika starrtorven Brunnskölen återfinns en silikatsmälta i relativt stor utsträckning redan vid 900 °C vid en inblandningsgrad om 15 och 25 vikts % av TS. För Stentjärnprovet som har högre Ca/Si kvot än Brunnskölen krävs högre inblandningsgrader för att en silikatsmälta skall bildas i temperaturer relevanta för rostereldning.



Figur 6. Beräknad mängd bildad smälta vid rosterförbränning av salix och salix/torvmixar.

Figure 6. Calculated amount of formed melt during grate combustion of willow and willow/peat mixtures.

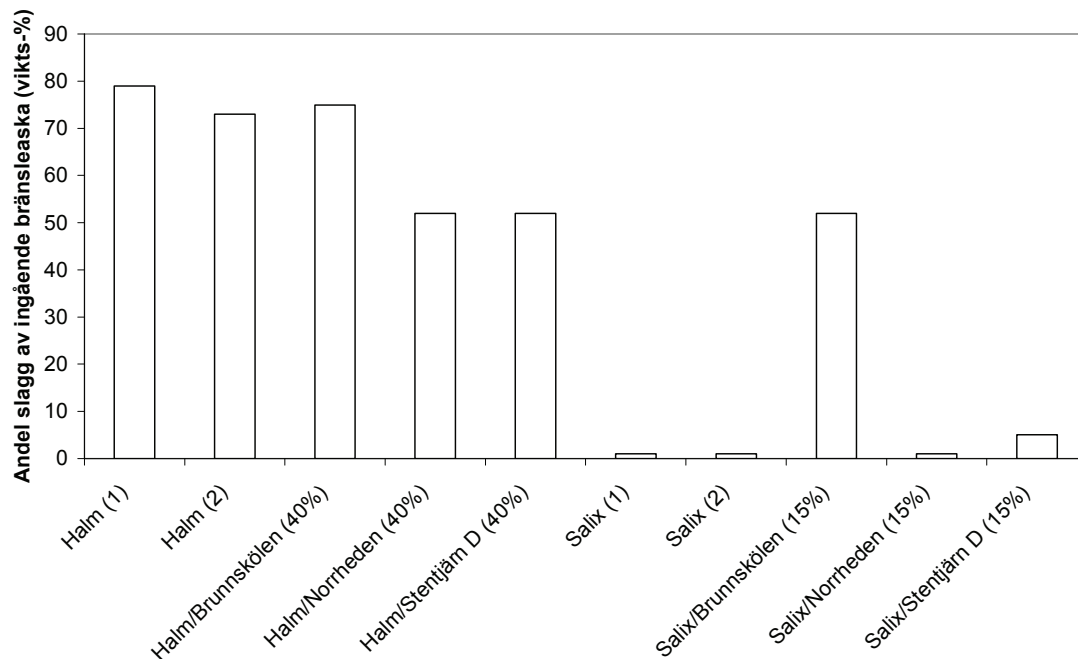
Vetehalm innehåller höga halter av kisel och kalium och är känt för sin höga slagnings- och agglomereringstendens redan vid relativt låga temperaturer ($< 800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Av beräkningarna framgår detta också då andelen silikatsmälta av totala mängden kondenserade faser (aska) är hög redan vid $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. För att signifikant kunna reducera denna smältamängd, vid temperaturer relevanta för rostereldning, krävs inblandningsgrader om 40 vikts-% och nyttjande av den relativt Ca rika starrbaserade torven 3B Fält (se figur 7).



Figur 7. Beräknad mängd bildad smälta vid rosterförbränning av halm och halm/torvmixar.

Figure 7. Calculated amount of formed melt during grate combustion of straw and straw/peat mixtures.

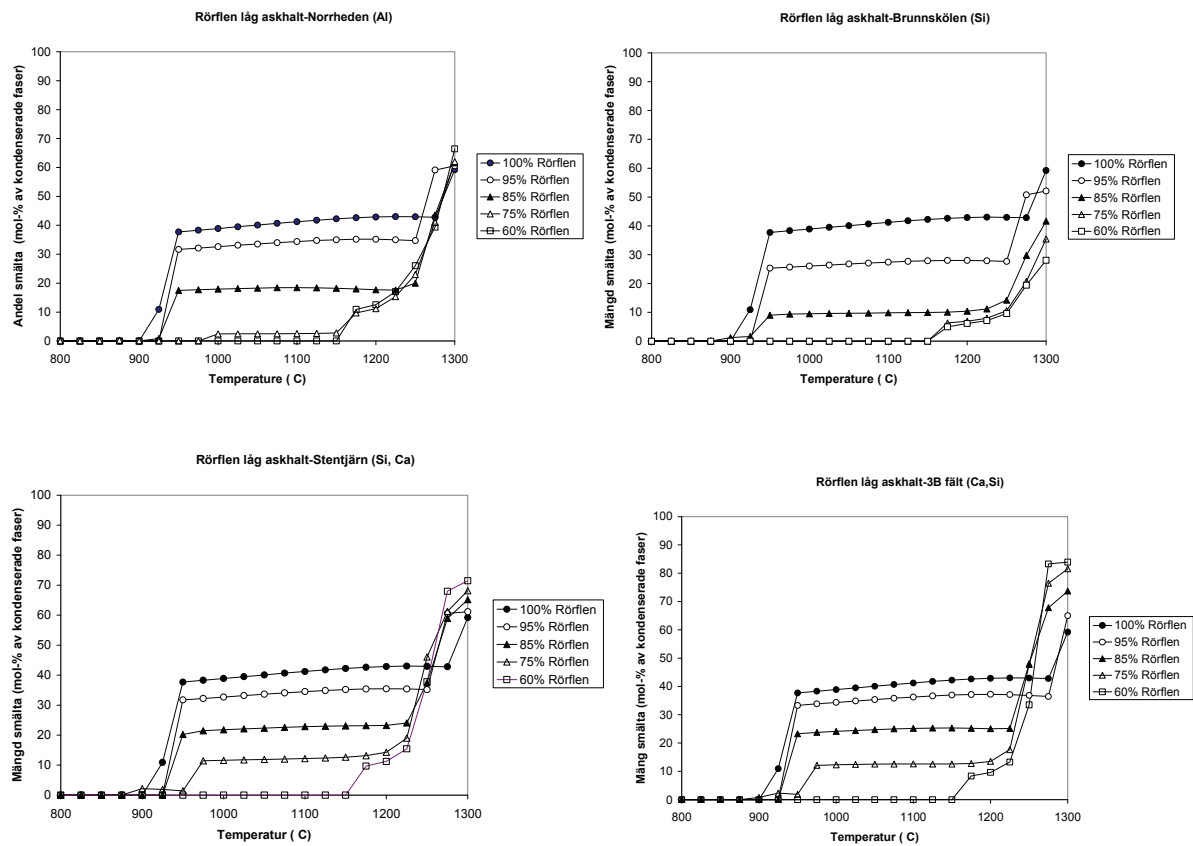
Resultaten från de termokemiska modellberäkningarna stämmer kvalitativt bra överens med de effekter som de olika torvproven (Norrheden, Brunnskölen och Stentjärn) haft på slaggnings-tendensen vid inblandning i Salix och Halm i pelletsbrännarutrustning (15 kW) (se figur 8), d v s samtliga torvar har gett en ökad slaggnings-tendens vid inblandning av torv till salix och att torvprovet från Brunnskölen gett den kraftigaste ökningen samt att kraftiga inblandningar av utvalda torvprov krävs för att reducera slaggnings-tendensen för vetehalm.



Figur 8. Andel bildad slagg i eldningsutrustningen uttryckt i vikt-% av ingående mängd bränsleaska vid förbränning av halm och halm/torvmixar, och salix och salix/torvmixar i en pelletsbrännare (roster) [11].

Figure 8. Fraction of fuel ash that form slag (wt-% during combustion of straw and straw/peat mixtures and willow and willow/peat mixtures in a pellet burner (grate) [11].

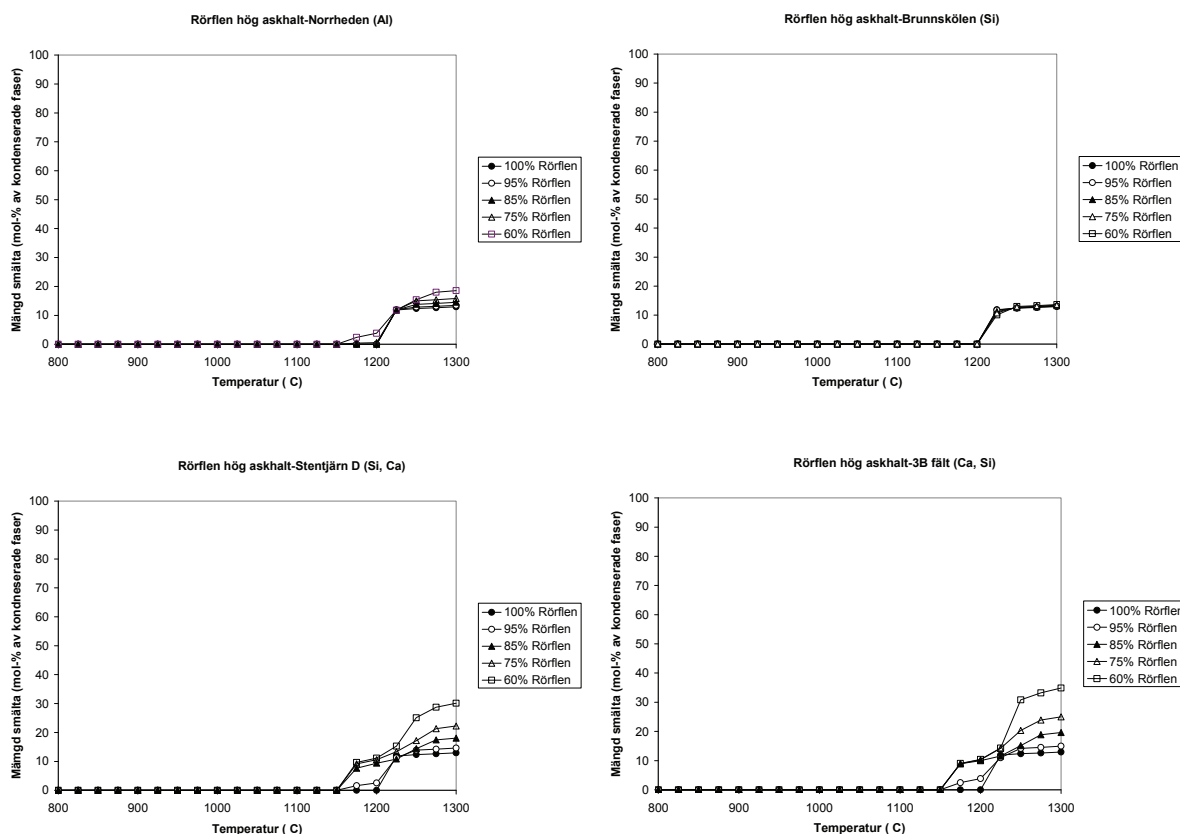
Resultaten från modellberäkningarna visar på uppkomsten av silikatsmälta i relativt moderata nivåer från ca 900 °C och uppåt för rörlensprovet med låg askhalt (se figur 9). En inblandning av 15 vikts-% på TS basis av samtliga torvprover ger en signifikant reduktion av andelen silikatsmälta.



Figur 9. Beräknad mängd bildad smälta vid rosterförbränning av rörflen med låg askhalt och rörflen med låg askhalt/torvmixar.

Figure 9. Calculated amount of formed melt during grate combustion of reed canary grass with low ash content and reed canary grass with low ash content/peat mixtures.

Rörflensprovet med hög askhalt visar på låga slaggningsstendenser då silikatsmälta först uppkommer (i relativt små mängder) i temperaturer över 1200 °C. Torvinblandning ger generellt något ökad andel smälta ovan 1200 °C (se figur 10).



Figur 10. Beräknad mängd bildad smälta vid rosterförbränning av rörflen med hög askhalt och rörflen med hög askhalt/torvmixarna.

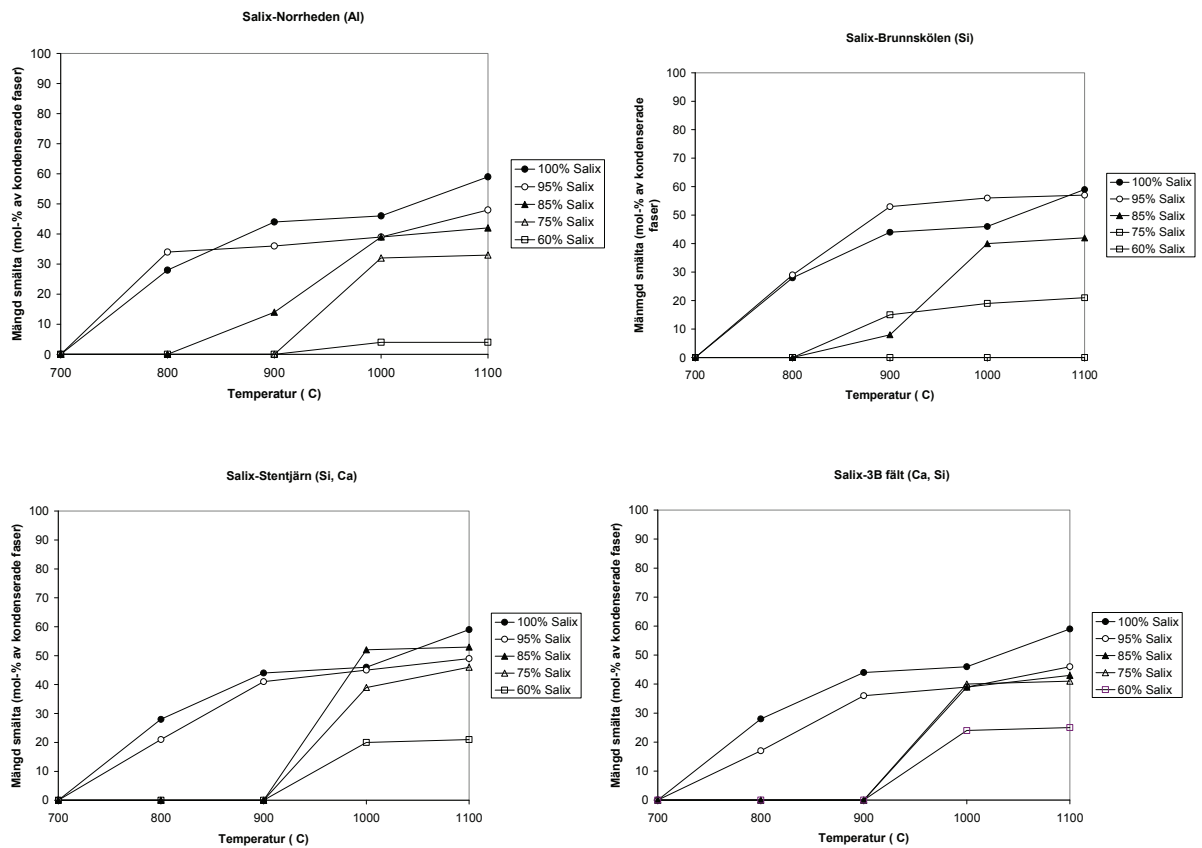
Figure 10. Calculated amount of formed melt during grate combustion of reed canary grass with high ash content and reed canary grass with high ash content/peat mixtures.

3.1.3 Uppskattade/beräknade bäddagglomereringstendenser

I fluidiserade bäddar uppkommer ofta lager runt bäddkornen vid biobränsleldning. Detta lager består ofta av material som kommer både från bäddkornet och från bränslets innehåll av oorganiska element. För fosforfattiga bränslen består dessa lager av olika silikater, ofta Ca-K-Al-Mg-silikater. När dessa lager smälter kan bäddkornen adderas ihop, bädden agglomerera, och i värsta fall uppstår en kraftig defluidisering av bädden. Även här har tidigare forskning visat att andelen smälta av mängden fast material hos denna beläggning har stor påverkan på bäddagglomereringsprocessen, se bl a [20]. Ofta behövs en signifikant andel smält material för att de adhesiva krafterna skall upphäva de separativa krafterna uppkomna p.g.a. fluidiseringen av bäddkornen och därmed ”få bädden på fall”.

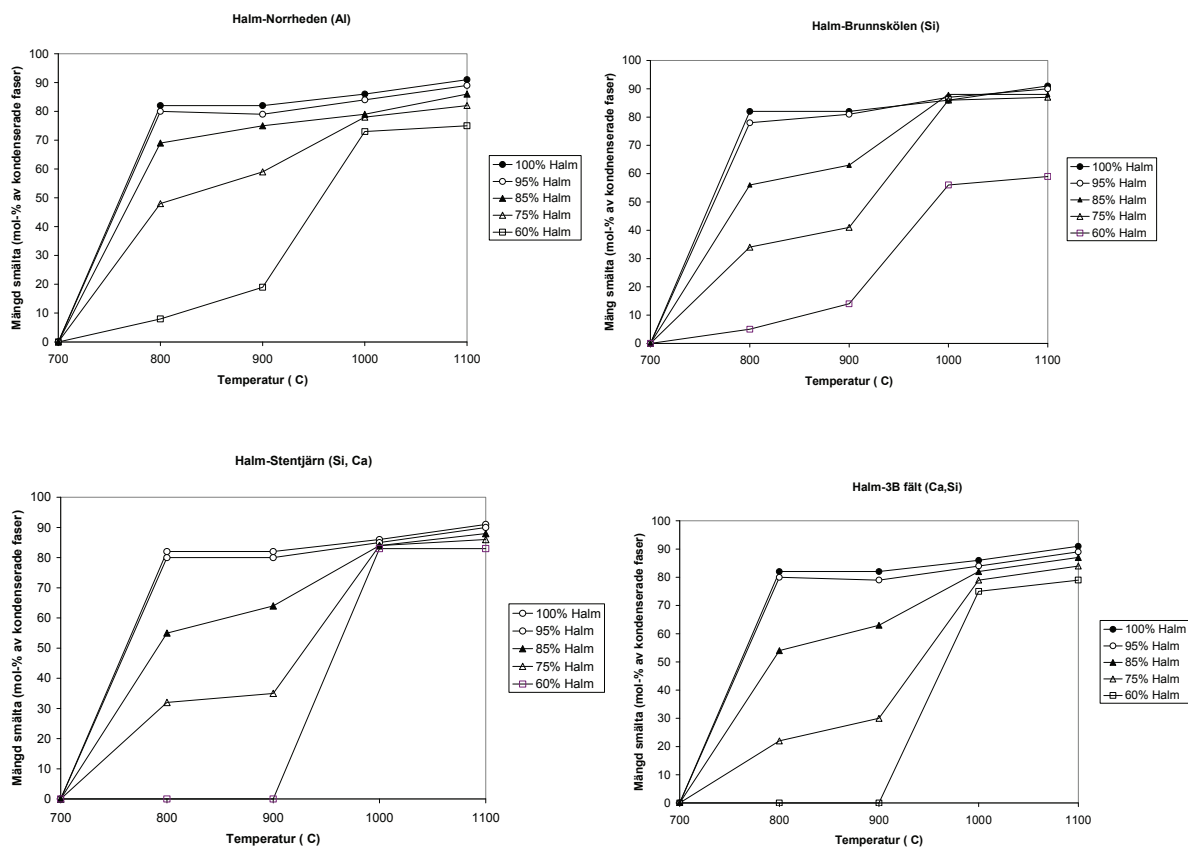
Av figur 11 och 12 framgår att andelen smälta signifikant minskar vid inblandning av samtliga torvprover i både salix och halm men att det krävs kraftig torvinblandning i halm för att reducera agglomereringsrisken till moderata nivåer. Resultaten från modellberäkningarna stämmer kvalitativt bra överens med resultat från tidigare utförda

kontrollerade bäddagglomereringsförsök i bänkskala där kvarts nyttjats som bäddmaterial (jämför resultaten i figur 11 och 12 med resultaten i figur 13). Resultaten från dessa beräkningar är tillämplbara i anläggningar som nyttjar typiska natursandbaserade material som domineras av kvartskorn.



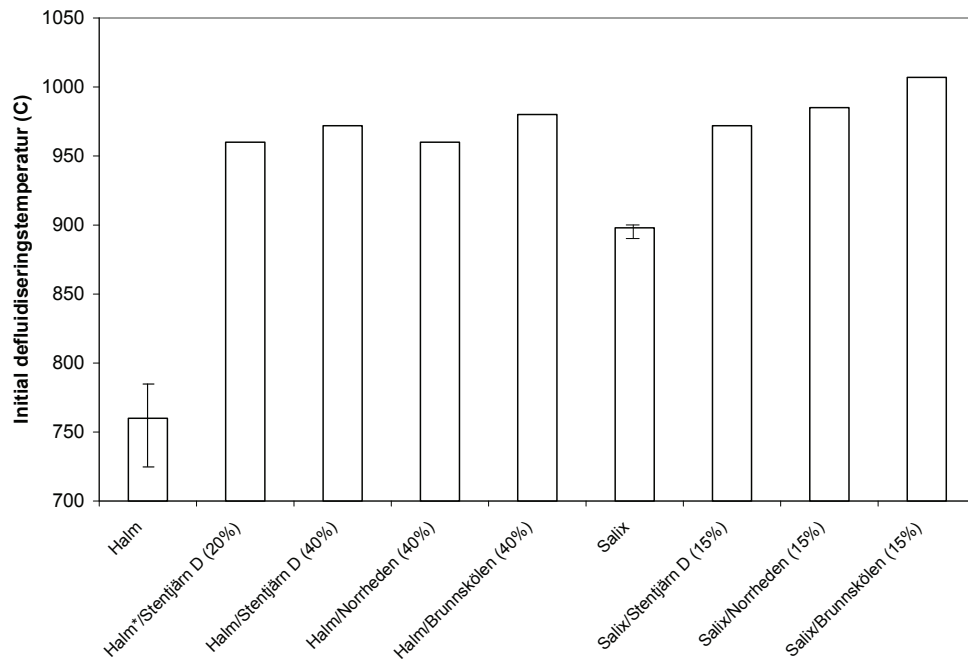
Figur 11. Beräknad mängd bildad smälta vid fluidbäddförbränning av salix och salix/torv mixar.

Figure 11. Calculated amount of formed melt in fluidised bed combustion of willow and willow/peat mixtures.



Figur 12. Beräknad mängd bildad smälta vid fluidbäddförbränning av halm och halm/torv mixar.

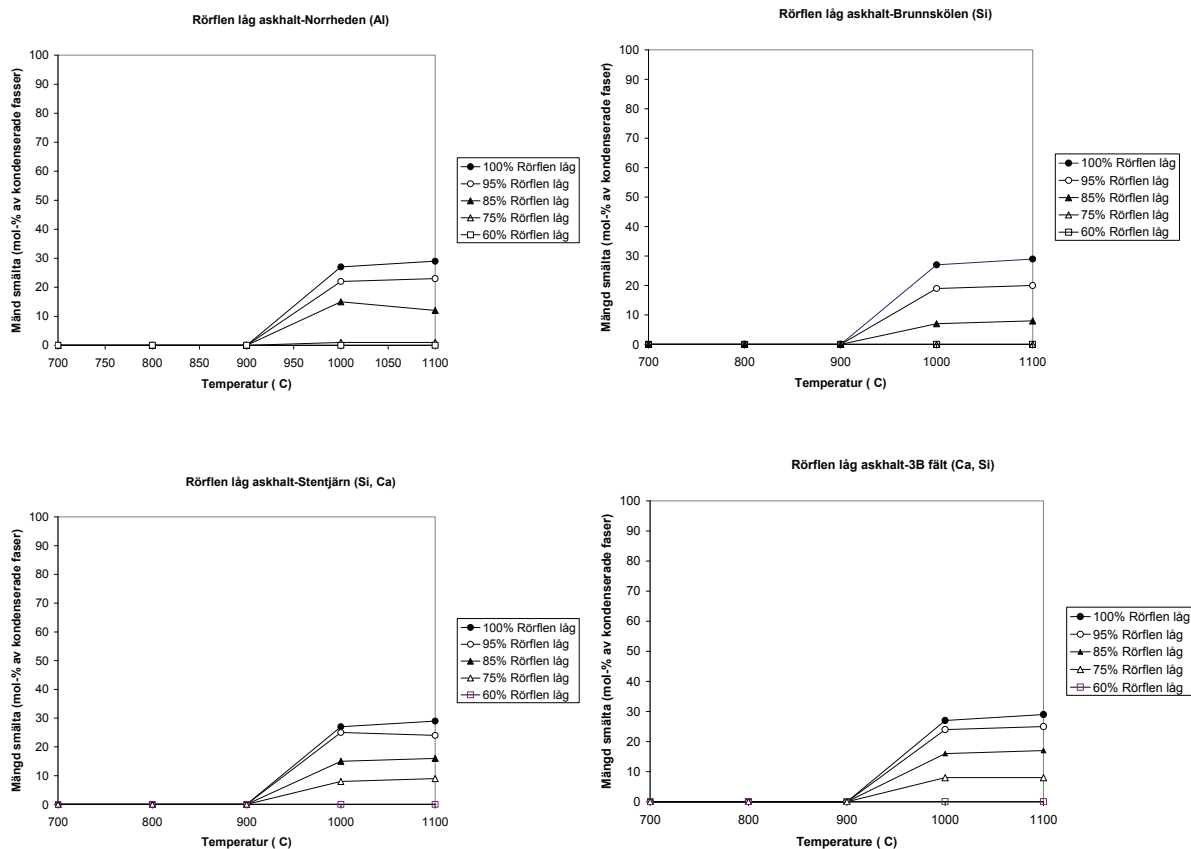
Figure 12. Calculated amount of formed melt in fluidised bed combustion of straw and straw/peat mixtures.



Figur 13. Erhållna initiala defluidiseringstemperaturer i tidigare utförda försök i fluidbädd i bänkskala (5 kW) [11].

Figure 13. Resulting defluidization temperatures from previous experiments in a bench scale fluidized bed (5 kW) [11].

Rörflen med låg askhalt gav relativt moderat mängd silikatsmälta under 1000 °C och en relativt låg inblandningsgrad av samtliga torvprov gav signifikant reduktion av andelen smälta, se figur 14. Vid beräkningar med rörflen med hög askhalt uppkom ingen smälta under hela det beräknande temperaturintervallet (700-1100 °C), varken med eller utan, inblandning av torvproven.



Figur 14. Beräknad mängd bildad smälta vid fluidbäddsförbränning av rörflen med låg askhalt och rörflen med låg askhalt/torv mixar.

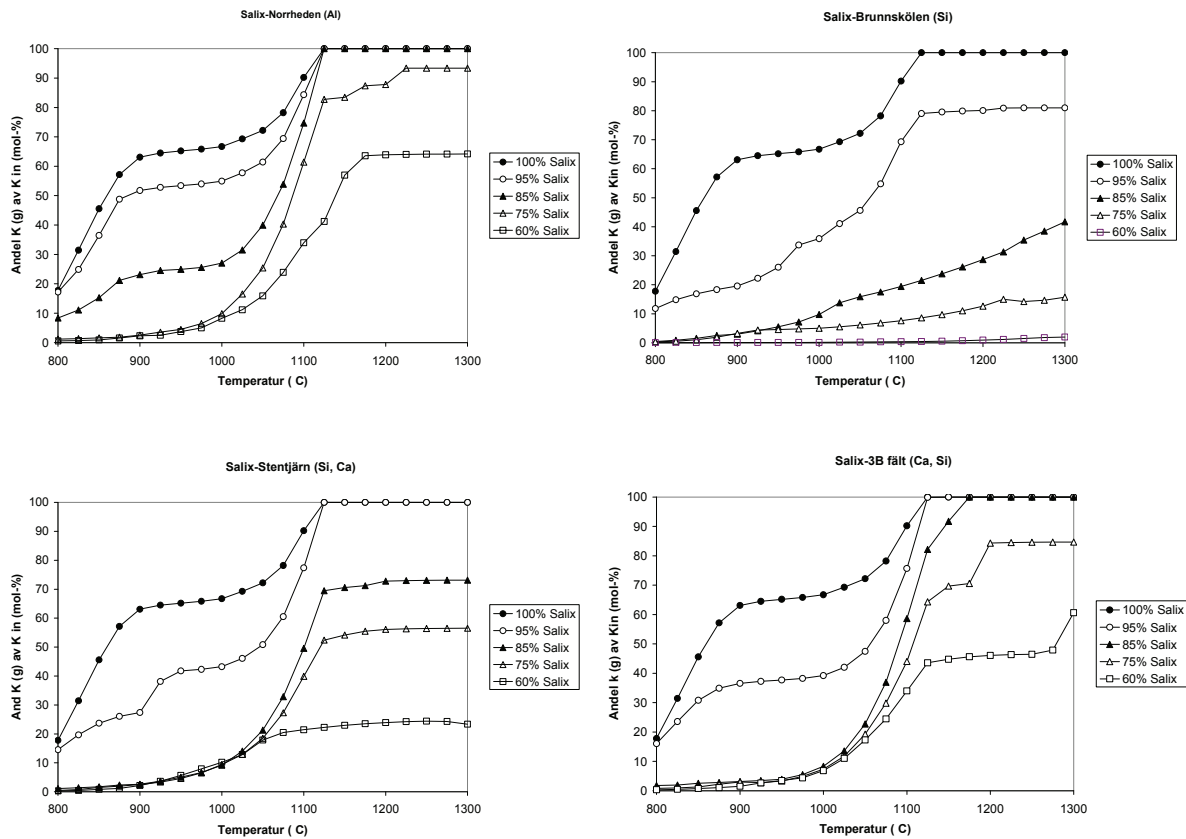
Figure 14. Calculated amount of formed melt in fluidised bed combustion of reed canary grass with low ash content and reed canary grass with low ash content/peat mixtures.

3.1.4 Uppskattade/beräknade beläggningstendenser

Flertalet tidigare utförda arbeten har visat både på betydelsen av mängden smält material hos den finpartikulära fraktionen för beläggningstillväxten [21] i anläggningars konvektionsdel och på betydelsen av smälta klorinnehållande alkaliföreningar för klorinducerad korrosion [22] vid nyttjande av fosforfattiga biobränslen. Den finpartikulära fraktionen domineras av kaliumföreningar och om mängden kaliumföreningar kan reduceras, och då kanske främst klorinnehållande kaliumföreningar (KCl), bör detta generellt leda till minskad beläggningsproblematik. För att uppskatta effekten av torvinblandning till de studerade åkerbränslena bestämdes andelen kalium som avgick till gasfasen (dessa kan sedan kondensera till fina partiklar) i jämförelse med mängden kalium som återfanns i bränslet/bränslemixen vid varierande processtemperatur.

Generellt gav torvinblandning i salix större effekt på reduktionen av kaliumavgången vid det lägre temperaturintervallet (< 1000 °C) än vid de högre (> 1000 °C), se figur 15. En inblandning av torv gav dock generellt god effekt på reduktionen av alkaliavgången

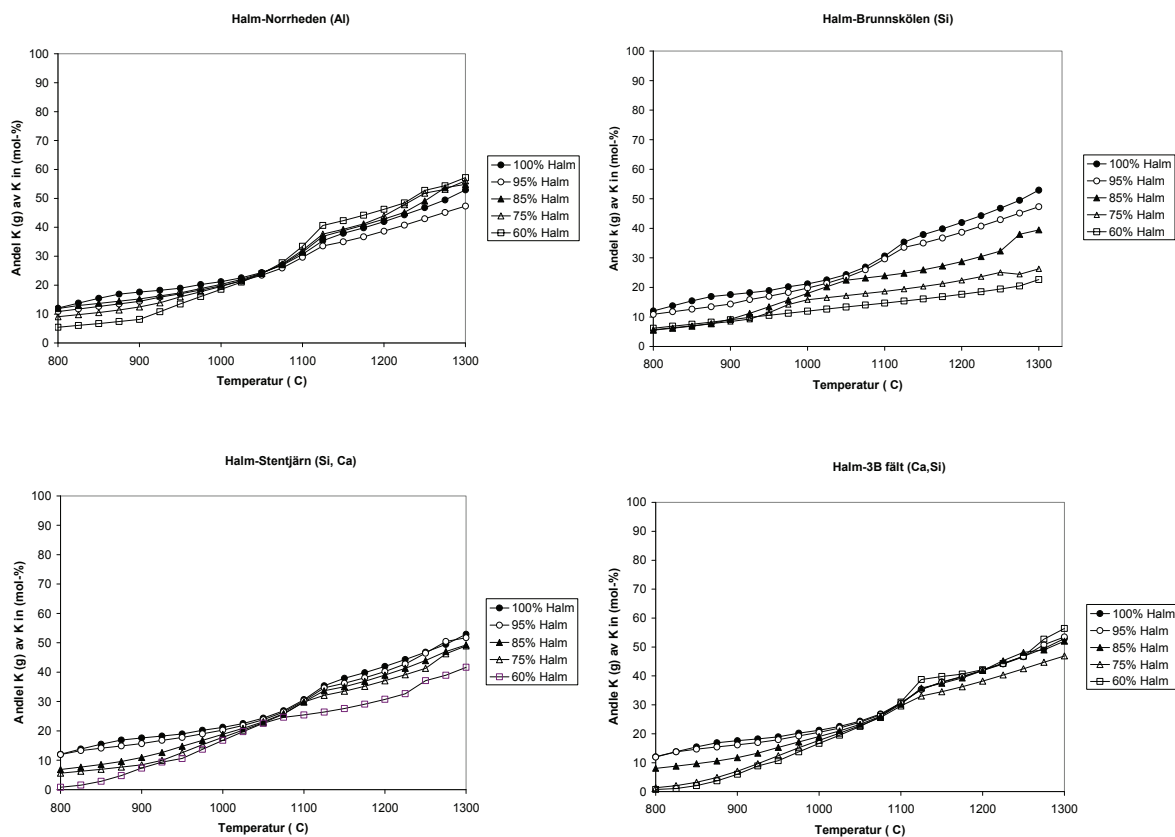
för samtliga prover. Torvprov med höga kiselhalter (Brunnskölen) gav dock de största effekterna. Torvproverna från Stentjärn och 3 B Fält har dock de högsta svavelhalterna varvid dessa kan ge en högre sulfatiseringsgrad av den K som avgår till gasfasen vilket är positivt ur beläggings- och korrosionssynpunkt.



Figur 15. Beräknade andelen av tillförd kalium i bränslet som återfanns i gasfas vid varierande temperatur för de olika salix och salix/torv mixarna.

Figure 15. Calculated fraction of in-going potassium with the fuel that were found in the gas phase within varying temperatures for the willow and willow/peat mixtures.

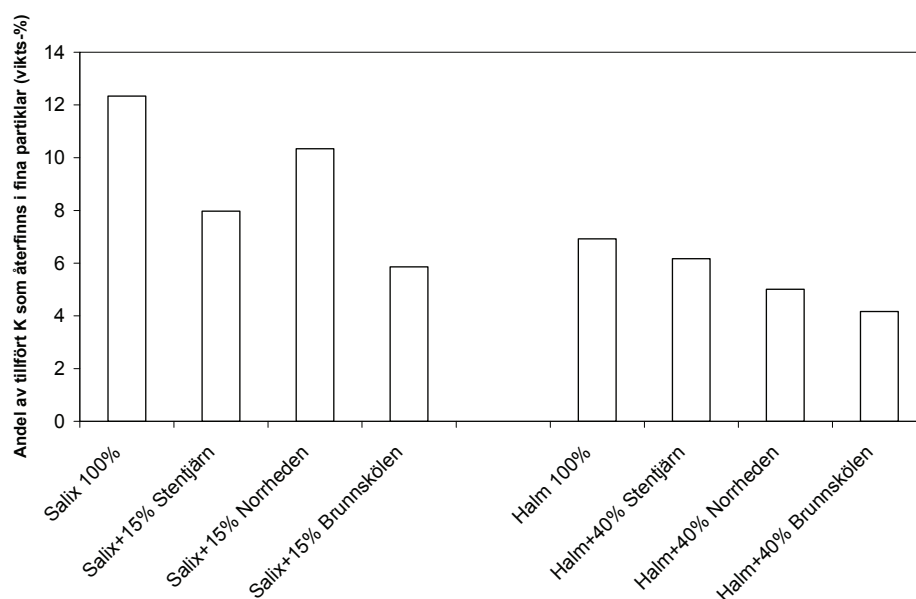
Inblandning av torv till halm i det lägre temperaturintervallet (< 1000 °C) gav en signifikant reduktion av kaliumavgången även om relativt höga inblandningsgrader generellt krävdes för att ge effekt (se figur 16). Återigen så kan torvprov med högt svavelinnehåll medge en högre sulfatiseringsgrad hos det kalium som avgår till gasfasen än torvprov med lägre svavelinnehåll. I det högre temperaturintervallet (> 1000 °C) gav alla torvprov, utom det extremt kiselrika provet från Brunnskölen, upphov till en ökad kaliumavgång till gasfasen.



Figur 16. Beräknade andelen tillförd kalium i bränslet som återfanns i gasfas vid varierande temperatur för de olika halm och halm/torv mixarna.

Figure 16. Calculated fraction of in-going potassium with the fuel that were found in the gas phase within varying temperatures for the straw and straw/peat mixtures.

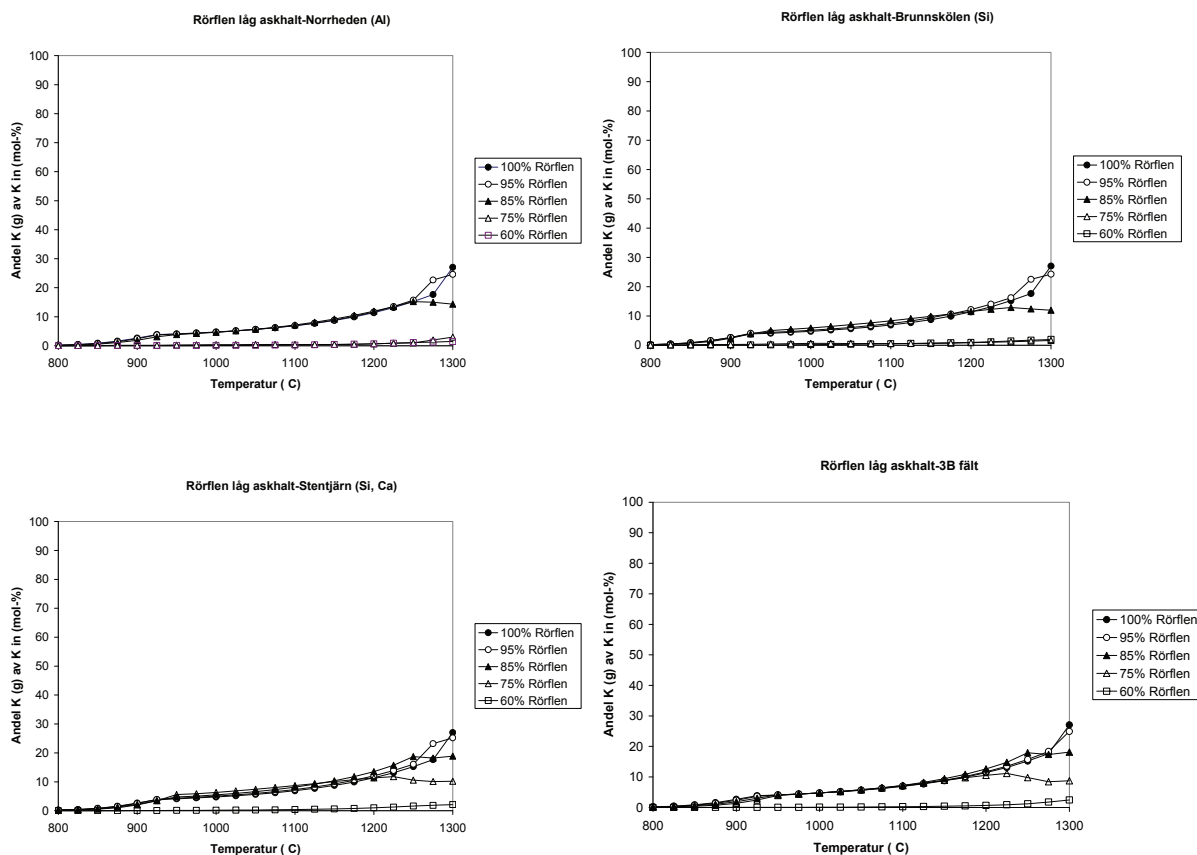
Av figur 17 framgår att salix-och halmmixar innehållande torvprovet från Brunnskölen generellt gav bäst effekt på kaliumavgången vid förbränning i pelletsbrännare (15 kW). Detta är i kvalitativ överensstämmelse med resultaten från de utförda modellberäkningarna.



Figur 17. Andelen av totalt tillfört (i bränslet) kalium som återfinns i fina partiklar vid förbränning av salix och salix/torvmixar samt halm och halm/torvmixar i en pelletsbrännare (roster) [11].

Figure 17. Fraction of totally supplied (from the fuel) potassium that were found in the fine particles during combustion of, willow and willow/peat mixtures as well as straw and straw/peat mixtures in a pellet burner (grate) [11].

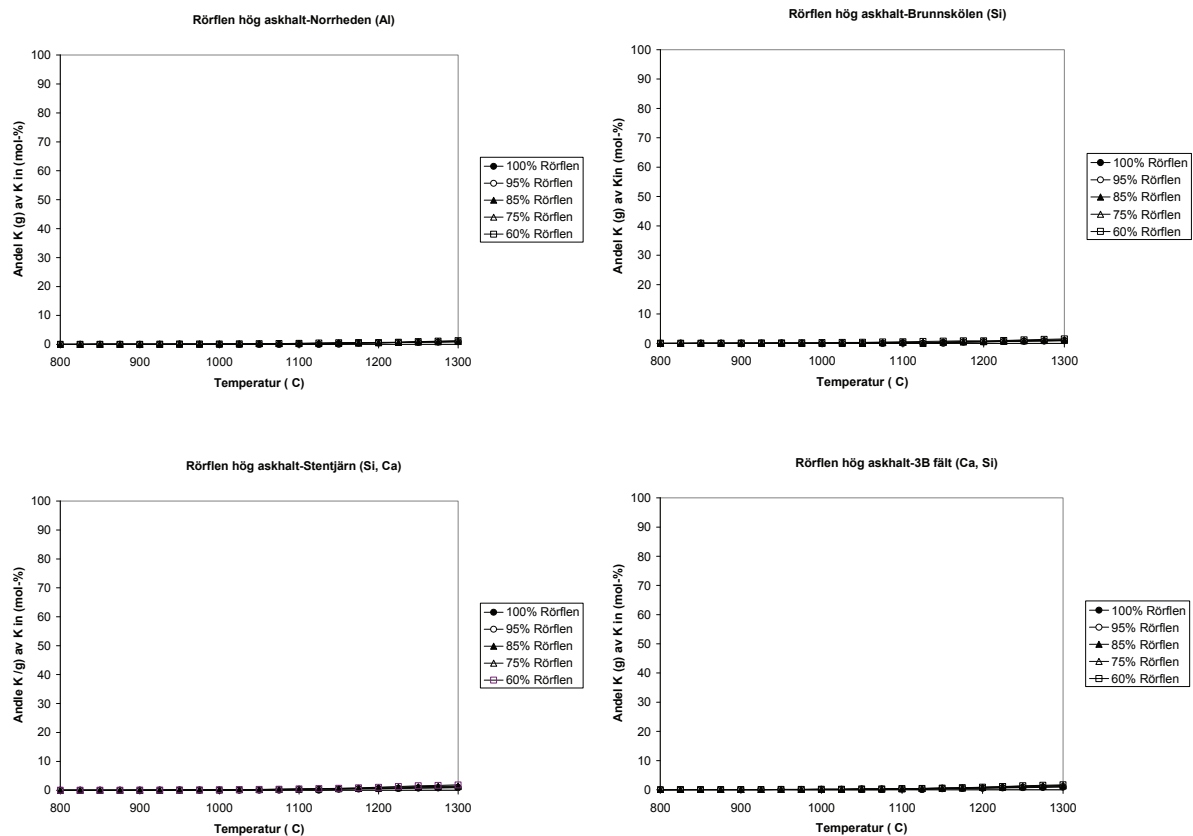
Av figur 18 framgår att en låg andel av bränslets kalium beräknas avgå till gasfasen vid förbränning av rörflen med låg askhalt. Även här ger torvprov med relativt höga andelar kisel upphov till den bästa reduktionen.



Figur 18. Beräknade andelen av tillförd kalium i bränslet som återfanns i gasfas vid varierande temperatur för de olika rörflen med låg askhalt och rörflen med låg askhalt/torv mixarna.

Figure 18. Calculated fraction of in-going potassium with the fuel that were found in the gas phase within varying temperatures for the reed canary grass with low ash content and reed canary grass with low ash content/peat mixtures.

Av figur 19 framgår att nästan all kalium beräknas återfinnas i kondenserade faser, d v s ej avgå till gasfasen, vid förbränning av rörflen med hög askhalt. Dessa rörflenskvalitéer har mycket hög kisel- i jämförelse med kaliumhalt i bränslet.



Figur 19. Beräknade andelen av tillförd kalium i bränslet som återfanns i gasfas vid varierande temperatur för de olika rörflen med hög askhalt och rörflen med hög askhalt/torv mixarna.

Figure 19. Calculated fraction of in-going potassium with the fuel that were found in the gas phase within varying temperatures for the reed canary grass with high ash content and reed canary grass with high ash content/peat mixtures.

3.2 Demonstrationsförsök i full- och bänkskala

3.2.1 Slagg- och bottenaskbildning

Fullskaleförsök

Vid försök med det rena salixbränslet bedömdes, av erfaren driftpersonal genom okulär besiktning av ugnsvägg och roster under drift (slutet av experimentet), slaggningsstendensen vara lägre än vid normal skogsfliseldning, d v s låg. Väldigt få slaggkakor återfanns från dessa försök i den bottenaska som efter transportskruv återfanns i botten/cyklonaskcontainern. Vid inblandning av 15 vikts-% (TS basis) av frästorv (3 B Fält) bedömdes slaggningsstendensen (genom den okulära besiktningen i eldstaden under drift) vara i samma storleksordning som under normal skogsfliseldning. Ett flertal (mindre) slaggkakor återfanns jämt fördelat från detta försök i botten/cyklonaskcontainern.

Under försöket med rörlensbriketten med hög askhalt bildades väldigt mycket bottenaska men denna var mycket porös och kunde utan problem matas ut med den befintliga askskruven. Gångtiden för skruven fick dock ökas rejält i jämförelse med då skogsflis nyttjas. Slaggningsstendensen bedömdes vara låg d v s i samma eller något lägre storleksordning än vid ren skogsfliseldning. Ett fåtal (mindre) slaggkakor återfanns jämt fördelat från detta försök i botten/cyklonaskcontainern.

Vid förbränningsförsöket med briketten innehållande rörflen med låg askhalt och torvprovet 3B Fält (15 vikts-% på TS basis) bedömdes slaggningsstendensen vara låg och av samma storleksordning som vid eldning av rörlensbriketten med hög askhalt. Ett fåtal (mindre) slaggkakor återfanns jämt fördelat från detta försök i botten-/cyklonask containern. Tidigare försök med liknande rörflen, som är skördad från samma områden i Glommersträsk, har visat sig ge upphov till svår slaggbildning i liknande pannor [14].

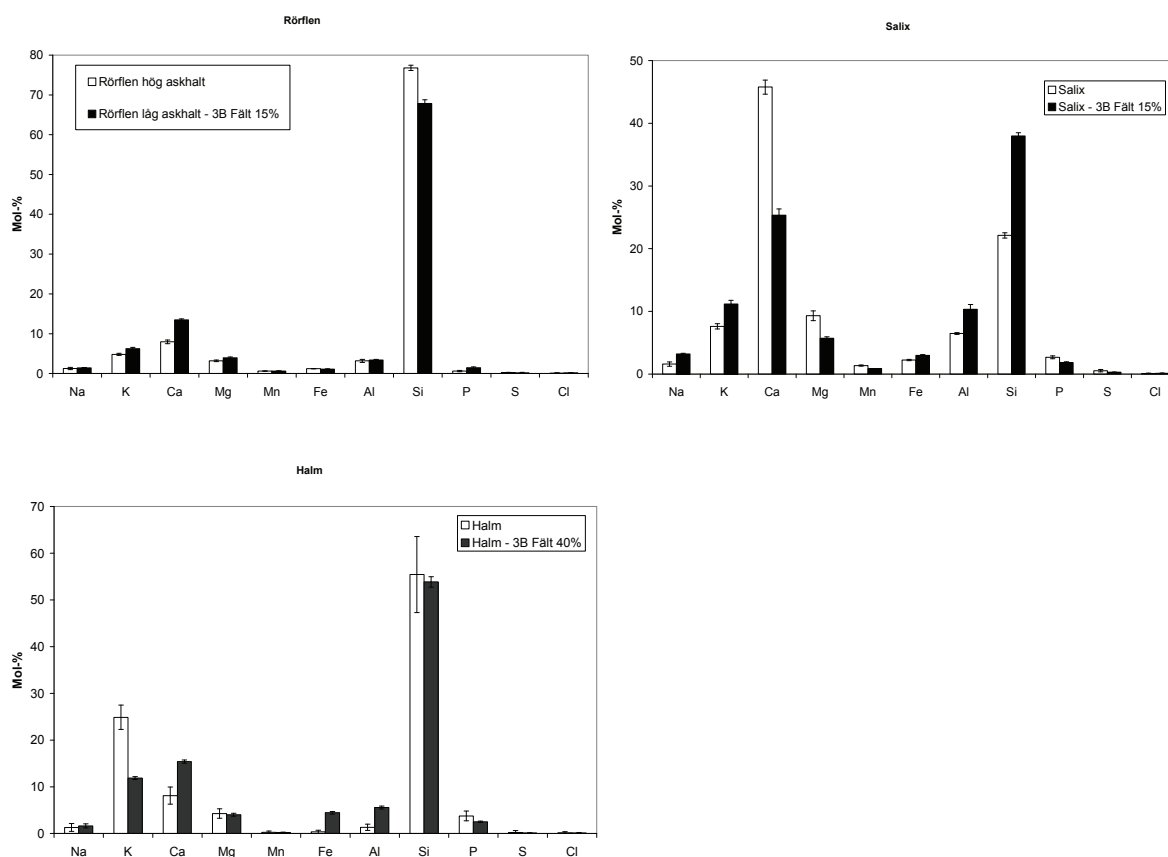
I figur 20 framgår att slaggkakorna som återfanns i askcontainern vid salixförbränning innehåller framförallt elementen Ca, Si, Mg och K (förutom O). Identifierade faser med XRD i dessa slaggprov var olika Ca-Mg-silikater och CaO (se tabell 6). Den uttagna botten+cyklonaskan har i jämförelse med slaggprovet en högre Ca-koncentration och en lägre Si-koncentration samtidigt som S-koncentrationen är något högre (se figur 21). Identifierade faser i botten+cyklonaskan var främst CaO, Apatite, MgO och K₂SO₄. Påpekas bör att man med XRD endast kan identifiera kristallina föreningar i provet, medan föreningar som föreligger i amorf (icke-kristallin) form inte kan identifieras.

Vid inblandning av torv i salixflisen ökar Si-halten i den bildade slaggen emedan Ca-halten sjunker och slaggen innehåller framförallt elementen Si, Ca, K och Al (se figur 20). Identifierade faser med XRD i dessa slaggprov var främst olika Ca-Mg-silikater, olika K-Al-silikater och Apatite (Ca₅(PO₄)₃(OH), se tabell 6. Den uttagna botten+cyklonaskan har relativt lik elementarsammansättningen som slaggen (se figur 21). Identifierade faser i detta prov var främst Ca-Mg-silikater, CaO och Apatite. Förutom att torvinblandning ger en ökad Si-halt i slaggen så ökar K/Ca förhållandet.

Tidigare arbeten har visat att vid träbränsleledning ger en ökning av K/Ca förhållandet en ökning av bränslets slaggningsstendens [23].

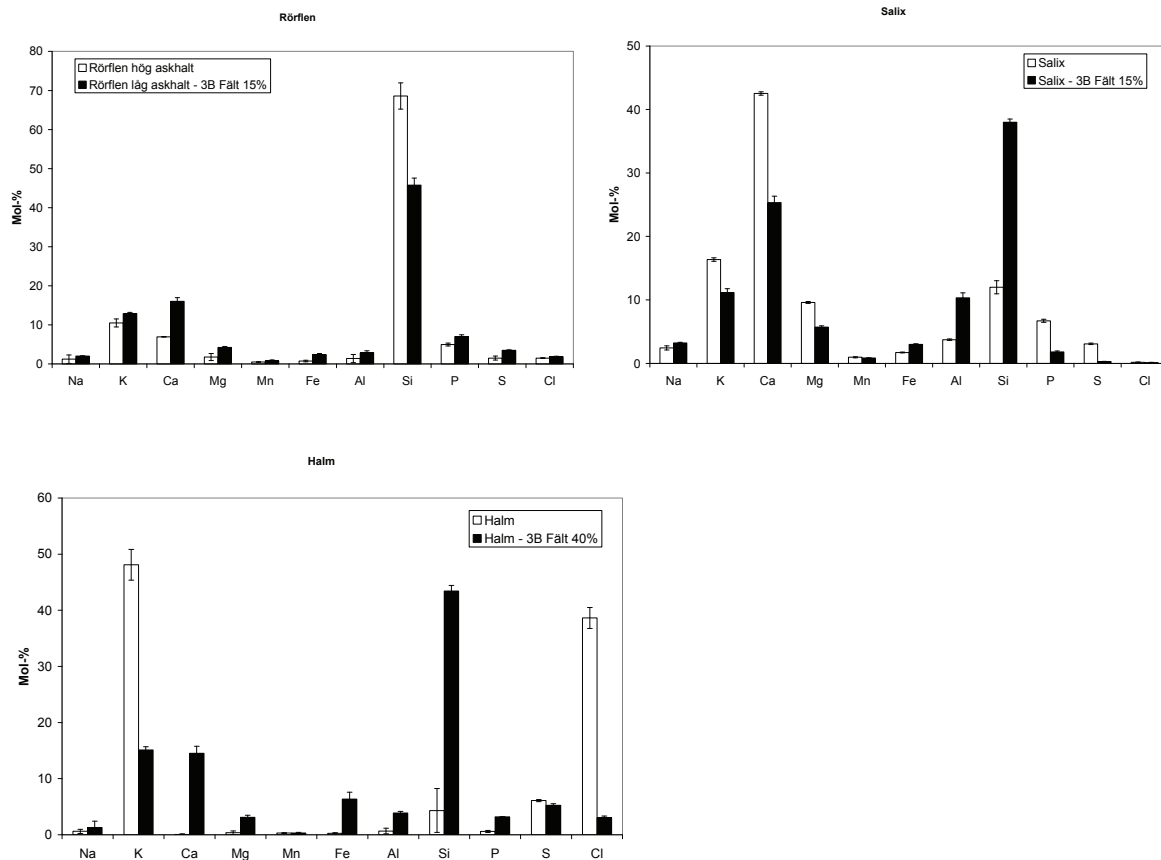
De analyserade slagkakorna och botten+cyklonaskan vid försöken med rörflen med hög askhalt hade liknande elementsammansättning och bestod främst av Si, K och Ca (se figur 20 och 21). Identifierade faser i de båda askfraktionerna var främst de två högtemperaturmodifikationerna av SiO_2 d v s kristobalite och tridymit.

Elementarsammansättningen hos slaggen och botten+cyklonaskan som bildats vid försök med rörflen (låg askhalt) mixad med torv innehöll främst Si, Ca och K (förutom O). Identifierade faser var främst kristobalite (SiO_2) och tridymite (SiO_2) i slaggen och förutom dessa även K_2SO_4 , Apatite och Ca-Mg-silikat i botten+cyklonaskan.



Figur 20. Elementarsammansättning (medelvärde +/- stdav) hos den bildade slaggen presenterad på syre- och kolfri basis (mol-%) vid förbränning av rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning (ovan t. v.), salix och salix-torvmix (ovan t.h.) samt halm och halm med torvinblandning (nedan t.v.).

Figure 20. Elemental composition (average value +/- stdev) on oxygen and carbon free basis (mole-%) of the produced slags during combustion of reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat (upper left), willow and willow mixed with peat (upper right) and wheat straw and wheat straw mixed with peat (lower left).



Figur 21. Elementarsammansättning (medelvärde \pm stdav) hos den bildade bottenaskan+cyklonaska (endast bottenaska hos halm/halmtorvförsöken) presenterad på syre- och kolfri basis (mol-%) vid förbränning av rörlfen med hög askhalt och rörlfen med låg askhalt med torvinblandning (ovan t. v.), salix och salix-torvmix (ovan t.h.) samt halm och halm med torvinblandning (nedan t.v.).

Figure 21. Elemental composition (average value \pm stdev) on oxygen and carbon free basis (mole-%) of the produced bottom+cyclone ash (only bottom ash for the wheat straw/wheat straw-peat experiments) during combustion of reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat (upper left), willow and willow mixed with peat (upper right) and wheat straw and wheat straw mixed with peat (lower left).

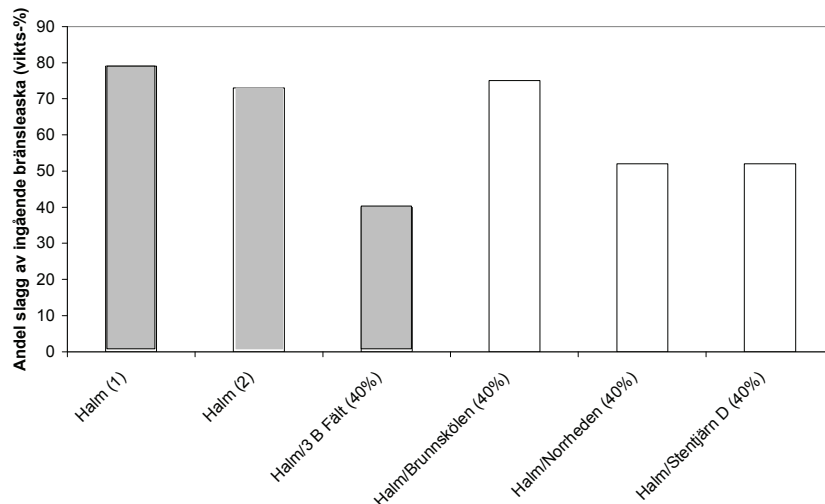
Tabell 6. Identifierade faser med XRD i uttagna slagg och cyklon+bottenaskprov (halm och halmtorvmix endast bottenaskprov) vid förbränningsförsök med rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning, salix och salix-torvmix samt halm och halm med torvinblandning

Table 6. Identified phases with XRD in the bottom + cyclone ash samples (only bottom ash for the wheat straw/wheat straw-peat experiments) from combustion experiments with reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat, willow and willow mixed with peat and wheat straw and wheat straw mixed with peat.

		Rörflen hög ask.		Rörflen låg ask.-3B Fält 15%		Salix		Salix-3B Fält 15%		Halm		Halm-3B Fält 40%	
		Slagg	Cykl+Botten-aska	Slagg	Cykl+Botten-aska	Slagg	Cykl+Botten-aska	Slagg	Cykl+Botten-aska	Slagg	Botten-aska	Slagg	Botten-aska
SiO ₂	(kvarts) (cristobalite)	94	3	6	13		3	7	2	6	11	20	29
	(tridymite)	6	86	90	11							7	11
NaAlSi ₃ O ₈	(albite)		11	4	14								16
KAlSi ₃ O ₈	(mikrokline)												
CaO	(lime)				6	3	36		23				
CaCO ₃	(calcite)						5						
MgO	(periclase)				4		14		8				
Ca(OH) ₂	portlandite						1						
CaSO ₄	(anhydrite)												
K ₂ SO ₄	(arcanite)				22		11			12	40		
K ₃ Na(SO ₄) ₂	(aphtitalite)									10	49		3
KCl	(sylvite)				5								
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	(apatite)				12		30	9	21	72			
CaKPO ₄													
K ₃ PO ₄													
Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	(merwinite)				12	26		28	24			6	39
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	(åkermanite)							32	11				
Ca ₂ SiO ₄						71							
Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	wollastonite pseudo-"											30	
K(AlSi ₂ O ₆)	(leucite)							13				37	
KAlSiO ₄	(kalsilite)							12					
Fe ₂ O ₃	(hematite)								2				
	(maghemite)								8				3
SUM		100	100	100	99	100	100	101	99	100	100	100	101

Bänkskaleförsök

Båda försöken resulterade i bildning av beläggningar i form av slagg, framförallt ovanpå brännarens primärluftsring (rostret). Dessa beläggningar bestod av oorganiskt material (aska) som till stor del var smält. Kvar i brännkoppens återfanns också oförbränt material. Slagg återfanns även på pannbotten. Vid försöket med den rena halmpelletsen stannade brännaren under försöket p.g.a. kraftig slaggbildning. Av figur 22 framgår att det rena halmbränslet hade hög slaggningsdensitet d v s mer än 70 vikts-% av ingående bränsleaskan bildade slag. Vid inblandning av 40 vikts-% (på TS basis) av torvprovet 3 B Fält sänktes denna slaggningsdensitet kraftigt. Även för de tidigare studerade torvproverna sänktes slaggningsdensiteten, dock inte lika kraftigt [11].



Figur 22. Andel bildad slagg i eldningsutrustningen uttryckt i vikt-% av ingående mängd bränsleaska vid förbränning av halm och halm-3B Fält 40% i pelletsbrännare/-pannan (grå staplar) och jämförelse med liknande försök med samma inblandningsgrad av andra torvprov i samma halmprov (vita staplar).

Figure 22. Fraction of fuel ash that form slag (wt-%) during combustion of straw and straw-3B Fält in the pellet burner/boiler (grey bars) and comparison with similar experiments with the equal co-pelletizing ratio of other peat samples in the same straw sample (white bars).

Resultaten från SEM/EDS-analyserna visar att de bildade slaggerna (se figur 20) framförallt innehöll kisel, kalium och kalcium, troligen olika K/Ca-silikater. Vid inblandning av torvprovet 3 B Fält ökade Ca-halten emedan K-halten sjönk. Även Al och Fe halten ökade vid torvinblandningen. Identifierade faser i slaggen vid ren halmeldning var främst Ca-K-fosfat. Den största mängden askelement föreligger dock med största sannolikhet i smält fas (glas) i slaggen som producerats från ren halmeldning. Vid inblandning av torvprovet kunde främst Ca-silikater, K-Al-silikater och kvarts identifieras i slaggen

Allmän diskussion och jämförelse med resultat från termokemiska modellberäkningar och i tidigare litteratur föreslagna nyckeltal

Av resultaten framgår tydligt att den nyttjade salixflisen och rörlensbriketten med hög askhalt hade en låg slaggningstendens och torde inte ge upphov till slaggningssproblem i den nyttjade (typiska) rosteranläggningen (4 MW). Dessa resultat överensstämmer väl med de slaggningstendenser som de termokemiska modellberäkningarna visade/predikerade i kapitel 3.1. Torvinblandningen i salixflisen ökade slaggningstendensen något men inte till några nivåer som bedömdes vara problematiska utifrån denna studie. Av de termokemiska modellberäkningarna framgår också att torvprov med relativt högt Ca/Si kvot (det nyttjade torvprovet) bör kunna sameldas med salix (i alla fall i mindre proportioner) utan någon större slaggningssrisk/-problem medan andra torvprov med lägre Ca/Si kvot troligen ger upphov till en större slaggningssrisk.

Rörflensbriketten innehållande 15% av torvprovet 3 B Fält visade på relativt låga slaggningsstendenser under fullskaleförsöken samtidigt som tidigare studier av liknande rörflensprover men utan torvinblandning från samma region och vuxen på samma jordart har visat på relativt höga slaggningsstendenser i liknande rosteranläggning [14]. Av modellberäkningarna framgår också att andelen silikatsmälta halveras vid inblandning av 15% av det nyttjade torvprovet.

Halmbränslet gav upphov till svår slaggbildning vid förbränning i bänkskaleanläggningen och en inblandning av det nyttjade torvprovet i denna studie reducerade kraftigt slaggningsstendensen. Även detta kunde kvalitativt predikteras genom modellberäkningarna. Av modellberäkningarna framgår att höga inblandningsgrader av torv, och då främst med relativt höga Ca/Si förhållanden, krävs för att erhålla en signifikant reduktion av slaggningsstendensen. Utifrån jämförelser med tidigare försök med liknande metodik och samma halmprov [11] framgår att torvprov med relativt hög Ca/Si förhållande gett kraftigast reduktion av slaggningsstendensen vilket därmed också överensstämmer väl med resultaten från de utförda modellberäkningarna.

I bränslehandboken [12] redovisas karakteristiska nyckeltal för biobränslen och deras detaljerade betydelse. De är baserade på bränsleanalyser och möjliggör en enkel jämförelse nya biobränslets nyckeltal med riskvärden.

Tabell 7. Urval av nyckeltal relevanta för prediktion av slaggningsbeteende [12] applicerade på de nyttjade bränslena/bränsleblandningarna i denna studie. Värdena i riskområde är markerade med fet stil.

Table 7. A selection of key numbers for prediction of slagging tendencies [12] applied on the used fuels/fuel mixtures in this study. Values within the hazardous regions are marked with bold text.

Nyckeltal	Betydelse	Risk	Rörflen- hög askhalt	Rörflen- låg askhalt- 3B Fält 15%	Salix	Salix- 3B Fält 15%	Halm	Halm- 3B Fält 40%
Alkaliandel	Nivå på smältpunkter i salter och silikater	> 0.3	0.2	0.16	0.17	0.14	0.53	0.34
Fältspattal 1	Förekomst eller bildning av lättmetallaluminosilikater	> 6	158	21	8	8	26	12
Förglasnings-tal	Risk för bildning av lågsmältande sodaglas i askan	0.2-1	0.03	0.17	7.9	0.74	0.75	0.37

Nyckeltalen visar att halm och halmtorvblandningen har flest riskbedömda nyckeltal (3 av 3 nyckeltal), vilket också stämmer överens med de faktiska resultaten från förbränningsförsöken, och kan därför förväntas vara mest problematiska när det gäller

asksmältning. Nyckeltalen bedömer även att salix-torvmixen kan ge upphov till problem (2 av 3 tal) vilket kvalitativt stämmer sämre med de faktiska förbränningsförsöken däremot så påvisar nyckeltalen att inblandning av torv till salix kan ge problem med slaggnig vilket kvalitativt överensstämmer med såväl modellberäkningarna och förbränningsförsöken.

3.2.2 Partikel- och beläggingsbildning

Fullskaleförsök

Resultaten från försöken i 4 MW:s anläggningen visar att NO halterna ökade något vid inblandning av 15% torv i salix (tabell 8). Utsläppsnivåerna på NO var dock relativt låga vid samtliga försök. Här får man dock komma ihåg att en inblandning av träflis på 40 vikts-% på TS basis utfördes vid de båda rörflensförsöken. Då svavelhalten är relativt lik mellan rörflen med hög och låg askhalt samtidigt som mängden tillgänglig K och Ca för svaveluppbinding borde vara högre i rörflensprovet med låg askhalt än med hög askhalt torde SO₂-utsläppen från eldningsförsöken med rörflen med låg askhalt var i samma, eller lägre, utsläppsnivå som den som redovisas för rörflen med hög askhalt. Inblandningen av torv medför därför relativt kraftig ökning av SO₂-halterna. Tendenser till ökad HCl-emissioner vid inblandning av torv framgår också av försöken även om de totala nivåerna är mycket låga.

Tabell 8. NO-, SO₂- och HCl-koncentration i rökgaserna (medelvärde under försöksperioden) samt totalstoffhalt i rökgaserna (före cyclon) vid förbränningsförsöken i fullskala.

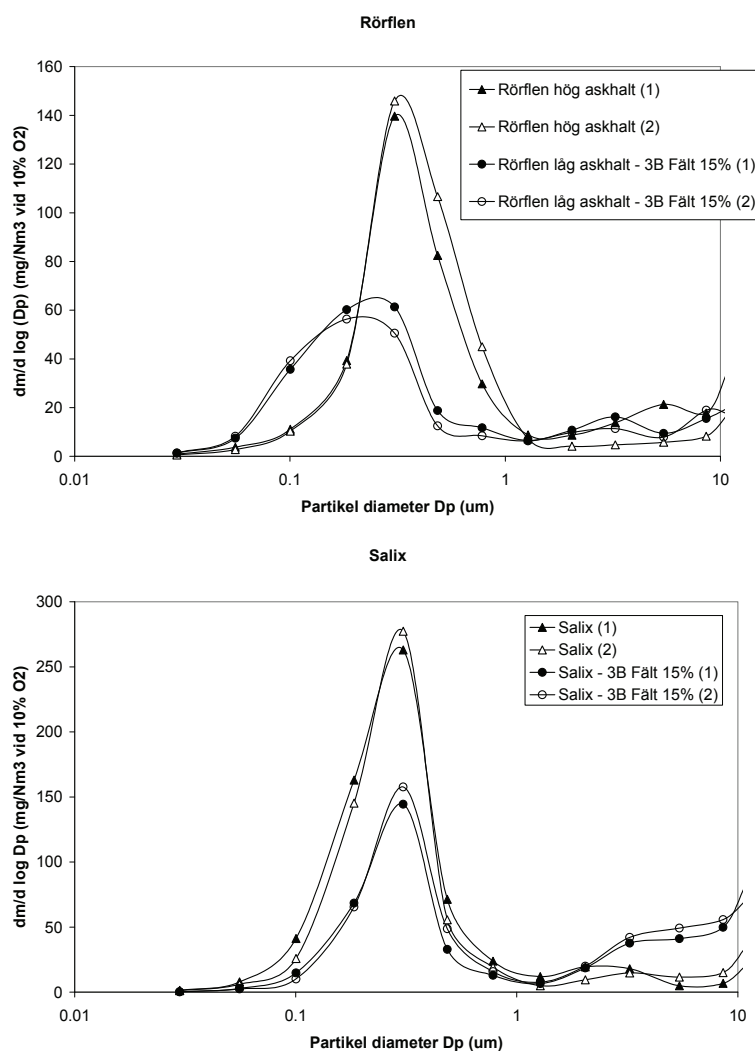
Table 8. NO-, SO₂- and HCl-concentrations in flue gas (average values during the experimental period) and total particle mass concentrations in the flue gas (before the cyclone) during the full scale combustion experiments.

	NO (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)	HCl (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)	SO ₂ (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)	Totalstoffhalt (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)
Rörflen hög askhalt	210	<1.1	6	150
Rörflen låg askhalt - 3B Fält 15%	220	2.7	55	50
Salix	150	<1.6	<2	580
Salix - 3B Fält 15%	200	4.4	16	890

Totalstoffhalterna i rågasen innan första cyclon framgår också av tabell 8. Dessa är relativt låga vid eldningen med rörflen med hög askhalt mixad med träflis och mycket låga vid förbränning av rörflen låg askhalt/torv briketten mixad med träflis. Vid salix eldning är partikelhalterna i rågasen betydligt högre och en 15 vikts-% inblandning av torvprovet ökar dessa ytterligare.

Av figur 23 framgår att partikelhalterna i rågasen före cyclon domineras, inom storleksområdet 0.02-10 µm, av de fina partiklarna (< 1 µm) i samtliga försök. Vid biobränsleeldning bildas generellt de fina partiklarna av askämnen som förångats från bränslet (typiskt K, Cl och S) och kondenserar då rökgaserna kyls av eller av produkter från ofullständig förbränning (sot och kolväten). Det senare är inte aktuellt i detta fall då i de flesta fall CO halter under 10 ppm uppmättes. Av resultatet framgår tydligt att en 15 %-ig inblandning av torv till salixflisen kraftigt reducerat mängden fina partiklar (halvering).

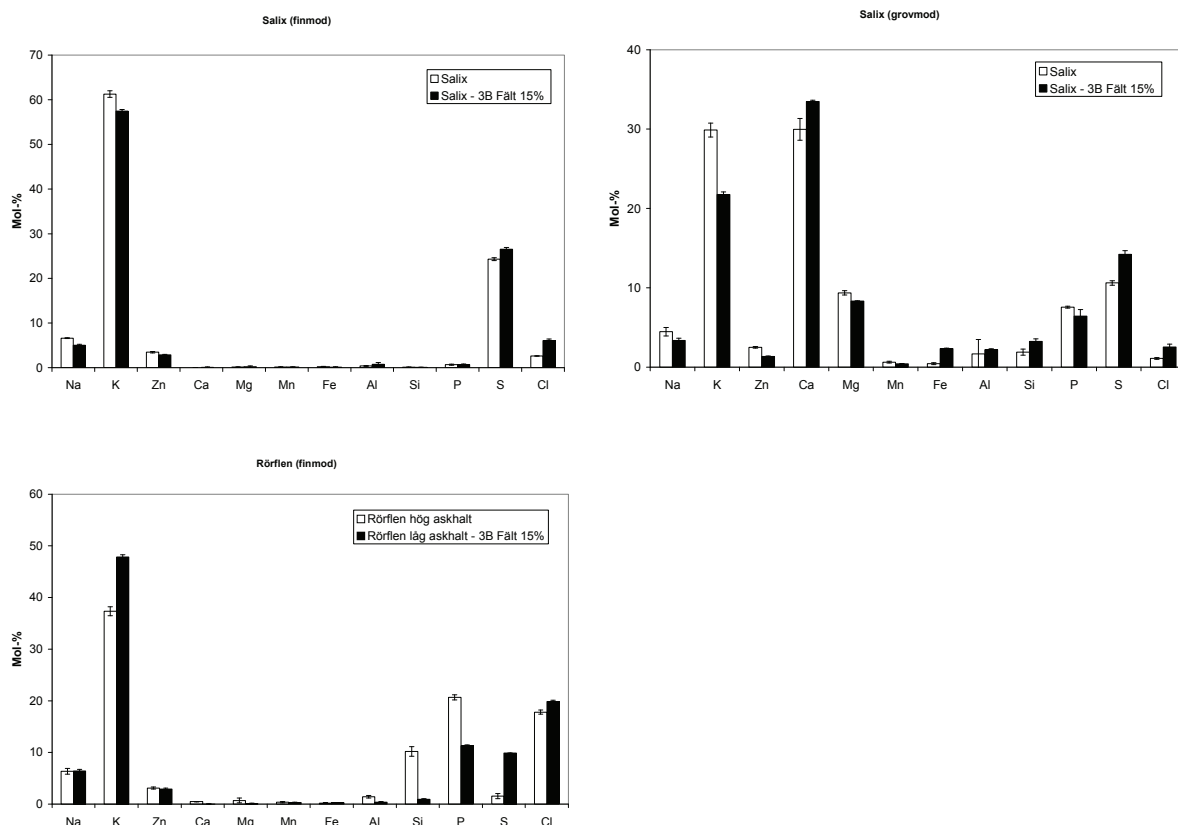
Vid förbränning av salix, och särskilt salix med torvinblandning, återfinns grova partiklar i storleksområdet $> 5 \mu\text{m}$ i signifikanta mängder även om dessa halter är små i jämförelse med halten fina partiklar. Vid en jämförelse mellan totalstoffhalter (tabell 8) och resultaten i figur 23 kan man också skönja att en trolig ökning av partiklar med storlekar $> 10 \mu\text{m}$ vid torvinblandning i salix torde föreligga. Av resultaten framgår att torvinblandningen i salixförsöket leder till en väsentligt reduktion av de fina partiklarna men en ökning av de grövre partiklarna i storleksordningen $> 5 \mu\text{m}$. Huvuddelen av de grova partiklarna torde dock gå att fånga i cyklonavskiljare. De grövre partiklarna består vid biobränseeldning (generellt) i huvudsak av fast eller smält material som följer med rökgaserna direkt från bränslet, t ex mindre korn från bottenaskfraktionen, bildade smältardroppar och eventuella mineralkorn (typiskt kontaminerar t ex sand).



Figur 23. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna (före cyclon) från försöken med förbränning av rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning (ovan) och salix och salix med torvinblandning (nedan).

Figure 23. Particle mass size distributions in the flue gases (before the cyclone) during combustion of reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat (upper) and willow and willow mixed with peat (lower).

Av figur 24 framgår att de fina partiklarna vid förbränning av rörflen med hög askhalt domineras av K, P och Cl (förutom O). Vid förbränning av rörflen med låg askhalt/torvmixen återfinns även S. Identifierade faser i de båda fallen är främst KCl vid eldning med rörflen med hög askhalt och K_2SO_4 och KCl vid eldning med rörflen/torvbriketten (se tabell 9). P ingår därför mest troligt i föreningar som är i amorf/smält form. På grund av för små erhållna provmängder har inga kemiska analyser kunnat utföras på grovmoden från dessa experiment.



Figur 24. Elementarsammansättning (medelvärde +/- stdav), presenterad på syre- och kolfri basis, för fina partiklar/finmod (impaktorsteg nr 4, GMD $0.19 \mu\text{m}$, eller nr 5, GMD $0.32 \mu\text{m}$) och grova partiklar/grovmod (impaktorsteg nr 9 (GMD $2.0 \mu\text{m}$) – nr 11 (GMD $5.4 \mu\text{m}$)) samplade vid förbränningsförsök med salix och salix med torvinblandning (ovan t.v. fina partiklar, ovan t.h. grova partiklar) och rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning (nedan t.v.).

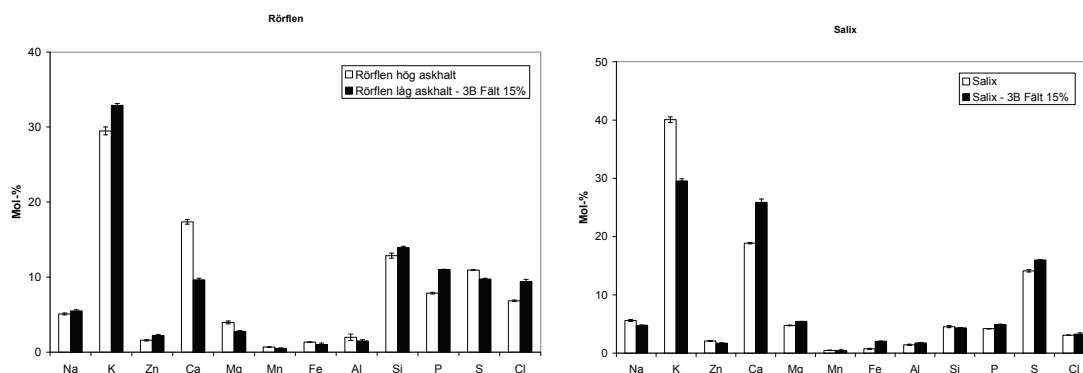
Figure 24. Elemental composition (average values +/- stdev), presented on oxygen and carbon free basis, of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD $0.19 \mu\text{m}$, or stage 5, GMD $0.32 \mu\text{m}$) and the coarse mode particles (impactor stage nr 9 (GMD $2.0 \mu\text{m}$) – nr 11 (GMD $5.4 \mu\text{m}$)) sampled during combustion of willow and willow mixed with peat (upper left fine mode particles and upper right coarse mode particles) and reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat (lower left).

Vid försök med och utan torvinblandning i salix består de fina partiklarna av främst K, S, Cl och Na (förutom O). Inga större skillnader i sammansättning med och utan torvtillsats föreligger förutom att Cl-halten är signifikant högre utan torvtillsats.

Identifierade faser är K_2SO_4 och KCl (mindre mängder), se tabell 9. De ökade HCl -halterna som uppmätts vid torvinblandning till salix beror troligen till största delen på reduktionen av K -avgången till gasfasen.

De grövre partiklarna 2-5.4 μm innehåller främst Ca , K , S , Mg och P vid såväl salix som salix/torv förbränning. Vid torvinblandning ökar koncentrationen av Ca och S något och K -koncentrationen minskar något. På grund av för små provmängder kunde ej XRD analys utföras på grovmoden.

Vid rörlenseldning domineras elfilteraskan av K , Si , Ca , P , S och Cl (se figur 25) och identifierade dominerande faser i proven är K_2SO_4 , KCl , Apatite, $CaO/CaCO_3/Ca(OH)_2$ (endast rörlens hög askhalt) samt $CaSO_4$ (endast för rörlens/torvmixen), se tabell 9. För de båda salixförsöken domineras elfilteraskan av K , Ca och S (förutom O). Identifierade dominerande faser är främst K_2SO_4 , Apatite och $CaO/CaCO_3/Ca(OH)_2$.



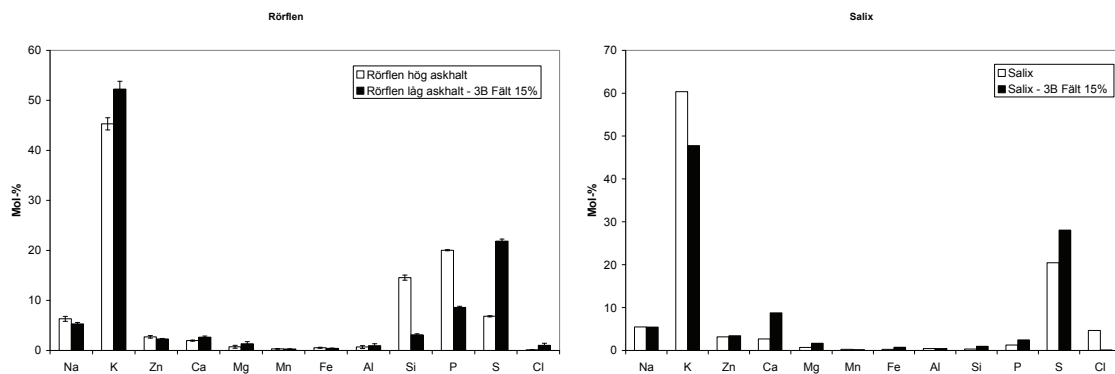
Figur 25. Elementarsammansättning (medelvärde \pm stdav) hos den bildade elfilteraskan presenterad på syre- och kolfri basis vid förbränning av rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning (t. v.) samt salix och salix-torvmix, (t.h.).

Figure 25. Elemental composition (average values \pm stdev) on oxygen and carbon free basis of the produced electrostatic precipitator ash during combustion of reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat (left) and willow and willow mixed with peat (right).

Av figur 26 framgår elementarsammansättningen av den beläggning som uppkommit på beläggningssondens läsida (baksida). Eftersom tidigare arbeten kring beläggningssondens läsida (baksida) har fokuserats på de beläggningar som uppkommer på panntubers läsida har så även i detta arbete analyser endast utförts på sondringarnas läsida och ej på dess vindsida. Elementarsammansättningen på de bildade beläggningarna på den kylda sondens läsida utgjordes framförallt av finpartikulärt K - och S -innehållande material vid de båda salixförsöken (K_2SO_4 den dominerande identifierade fasen med XRD, se tabell 9) och finpartikulärt K -, S - och P -innehållande material vid rörlensförsöken (K_2SO_4 den enda identifierade fasen med XRD, se tabell 9). Vid inblandning av torv i salix tenderade svavelhalten att öka medan klorhalten minskade. Sammansättningen hos den beläggning som avsattes på sondens

läsida liknade således relativt väl sammansättningen hos den fina partikelfractionen (<1 μm).

Eftersom tidigare arbeten kring beläggingsbildning och högtemperaturkorrosion har fokuserats på de beläggningar som uppkommer på panntubers läsida har så även i detta arbete analyser endast utförts på sondringarnas läsida och ej på dess vindsida.



Figur 26. Elementarsammansättning (medelvärde +/- stdav) på O- och C-fri sammansättning avsatt på sondens läsida vid förbränning av rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning (t. v.) samt salix och salix-torvmix (t.h.).

Figure 26. Elemental composition (average values +/- stdev) of lee-side deposits on O- and C-free basis during combustion of reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat (left) and willow and willow mixed with peat (right).

Tabell 9. Identifierade faser med XRD i uttagna elfilteraskprov, partikelprov (fina partiklar < 1 µm) och beläggningssondprov (läsida) vid förbränningsförsök med rörflen med hög askhalt och rörflen med låg askhalt med torvinblandning, salix och salix-torvmix samt halm och halm med torvinblandning

Table 9. Identified phases with XRD in the electrostatic precipitator ash sample, particle sample (fine particles < 1 µm) and deposit probe sample (lee side) from combustion experiments with reed canary grass with high ash content and reed canary grass with low ash content mixed with peat, willow and willow mixed with peat and wheat straw and wheat straw mixed with peat.

	Rörflen hög askhalt			Rörflen låg askhalt-3B			Salix			Salix-3B Fält 15%			Halm	Halm-3B- Fält 40%
	Elfilter-aska	IP-Fin-mod	Bel.-sond	Elfilter-aska	IP-Fin-mod	Bel.-sond	Elfilter-aska	IP-Fin-mod	Bel.-sond	Elfilter-aska	IP-Fin-mod	Bel.-sond	IP-Fin-mod	IP-Fin-mod
SiO ₂ (kvarts) (cristobalite) (tridymite)				4										
NaAlSi ₃ O ₈ (albite)														
KAlSi ₃ O ₈ (microcline)														
CaO (lime)	7						8			12				
CaCO ₃ (calcite)	8						6			7				
MgO (periclase)														
Ca(OH) ₂ portlandite	6									10				
CaSO ₄ (anhydrite)				12			9							
K ₂ SO ₄ (arcanite)	48		100	51	57	100	60	97	93	45	95	100	16	35
K ₃ Na(SO ₄) ₂ (aphthalite)										6				
KCl (sylvite)	14	97		27	43		4	3	7	2	5		84	65
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH) (apatite)	18			6			14			17				
CaKPO ₄														
K ₃ PO ₄		3												
Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ (merwinite)														
Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (åkermanite)														
Ca ₂ SiO ₄														
Ca ₃ (Si ₃ O ₉) wollastonite pseudo-"														
K(AlSi ₂ O ₆) (leucite)														
KAlSiO ₄ (kalsilite)														
Fe ₂ O ₃ (hematite)										1				
(maghemite)														
SUM	101	100	100	100	100	100	101	100	100	100	100	100	100	100

IP-Finmod = Impaktor fina partiklar (< 1 µm)
Bel. Sond = Beläggningssond (läsida)

Bänkskaleförsök

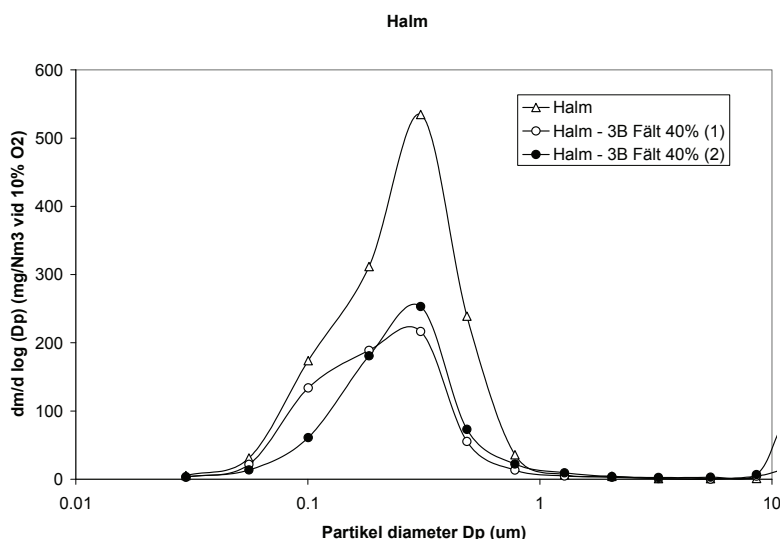
Resultaten från försöken i bänkskaleanläggningen visar att SO₂-halten ökade kraftigt vid inblandning av torv till halmpelletsen. Uppehållstiden och temperaturprofilen är dock väldigt annorlunda i en pelletsbrännare/panna i jämförelse med en normal rosteranläggning och förutsättningarna för svaveluppbinding i denna utrustning torde vara relativt dålig i jämförelse med en normal rosterpanna. Även HCl-halterna i rökgaserna ökade vid torvinblandning.

Tabell 10. SO₂- och HCl-koncentration i rökgaserna (medelvärde under försöksperioden) samt totalstoffhalt i rökgaserna vid förbränningsförsök i bänkskala.

Table 10. SO₂- and HCl-concentrations in flue gas (average values during the experimental period) and total particle mass concentrations in the flue gas during the bench scale combustion experiments.

	HCl (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)	SO ₂ (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)	Totalstoffhalt (mg/Nm ³ vid 6 % O ₂ t.g.)
Halm	22	110	630
Halm – 3B Fält 40%	37	400	260

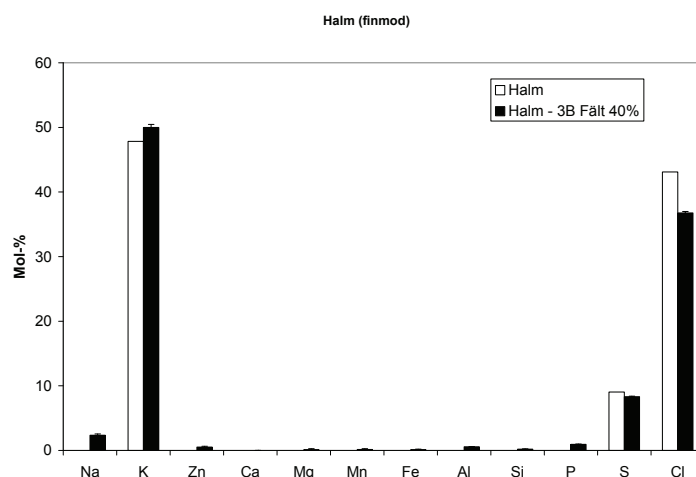
Totalstofthalterna i rökgaserna framgår också av tabell 10. Av resultaten framgår en mycket tydlig reduktion vid inblandning av torv. Av figur 27 framgår att partikelhalterna fullständigt domineras, inom storleksområdet 0,02-10 μm , av de fina partiklarna ($< 1 \mu\text{m}$) i samtliga försök. Resultaten visade också på en tydlig sänkning av mängden (massan) fina partiklar vid inblandning av torvprovet 3 B-Fält även om nivåerna fortfarande är relativt höga. Reduktionsgraden är snarlik de som erhållits vid inblandning av den mer kiselrika torvprovet Brunnskölen i en tidigare studie [11].



Figur 27. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna från försöken med förbränning av halm och halm med torvinblandning.

Figure 27. Particle mass size distributions in the flue gases during combustion of wheat straw and wheat straw mixed with peat.

Av figur 28 framgår att de fina partiklarna innehåller främst K, Cl och S (förutom O). Inga större skillnader i sammansättningen med och utan torvtillsats föreligger även om Cl-koncentrationerna är lägre vid torvtillsats. Av tabell 9 framgår att identifierade faser i finmoden är KCl och K_2SO_4 .



Figur 28. Elementarsammansättning (medelvärde +/- stdav), presenterad på syre- och kolfri basis, för fina partiklar/finmod (impaktorsteg nr 4, GMD 0.19 μm , eller nr 5, GMD 0.32 μm) samplade vid förbränningsförsök med halm och halm med torvinblandning.

Figure 28. Elemental composition (average values +/- stdev), presented on oxygen and carbon free basis, of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD 0.19 μm , or stage 5, GMD 0.32 μm) sampled during combustion of wheat straw and wheat straw mixed with peat.

Allmän diskussion och jämförelse med resultaten från de termokemiska modellberäkningar och tidigare i litteraturen föreslagna nyckeltal

De bildade fina partiklarna vid förbränning av de olika bränslena/bränslemixarna dominerades nästan fullständigt av kaliuminnehållande partiklar (K_2SO_4 och KCl). Vid inblandning (15 vikts-%) av det nyttjade torvprovet i salix erhöles en halvering av mängden fina partiklar i rågaserna före cyklon. Samtidigt har en tendens till lägre klorhalt i beläggningarna som uppkommit på sondens läsida kunnat skönjas. Detta torde ha positiva effekter på såväl beläggningsbildning som klorinducerad korrosion vid förbränning. Detta har skett utan en något större ökning av slaggningsrisken. Resultaten från de termokemiska modellberäkningarna visar på en kaliumreduktion till gasfasen inom temperaturspannet 1000-1100 $^{\circ}\text{C}$ på ca 50-80% vid en 15%-ig inblandning av torvprovet 3 B Fält i salix vilket är i kvalitativ överensstämmelse med resultaten från fullskaleförsöken. Resultatet visar också på möjligheterna att kraftigt reducera emissionerna av PM 1 i de råa rökgaserna vid torvinblandning samtidigt som det kan vara möjligt att fånga de bildade grova partiklarna i cyklonavskiljare. En viktig information från dessa fullskaleförsök är att de olika bränslepartiklarna (torv/salixflis) är tillräckligt nära varandra under utbränningen på rostret för att en mycket god K-uppbinding till bottenaskan erhållits. Tidigare har endast försök som påvisar detta utförts där torv och biobränslet har sampelleterats/-briketterats.

Resultatet från försök med de båda rörfbensproverna är något svårare att tolka då de sameldats med träflis. Halten fina partiklar vid rörfbenseldning med låg askhalt med torvinblandning är dock väsentligt lägre än vid förbränning av rörfbensbriketten med hög askhalt med stor sannolikhet kan bero på torvinblandningen då kaliumhalten i de båda rörfbensproverna är relativt lika.

Resultaten från torvinblandning till hampelletsen visar också på möjligheter till en kraftig reduktion av mängden K som avgår och bildar fina partiklar samtidigt Cl-halten i de fina partiklarna och slaggningsstendensen kan reduceras. En stor del av reduktion (dock inte all) av halten K och Cl i rökgaserna som fina partiklar beror dock på utspädningseffekter. Vid inblandning av torv i halm för nyttjande i rosteranläggningar är det därför nog snarare effekter på slaggbildningen som är de främsta skälen till varför sameldning torde utföras. Det senare framgår också av modellberäkningarna som visar att det är svårt att erhålla någon större uppbindningsgrad av K till bottenaskan i de temperaturer som är relevanta för rostereldning (se figur 16) men att man genom att välja att samelda med rätt torvkvalité (starr-baserad torv med relativt högt Ca/Si förhållande och vid relativt höga iblandningsgrader) får effekter vad gäller minskad risk för slaggningsproblem.

Tabell 11. Urval av nyckeltal relevanta för prediktion av påslag/beläggningar [12] applicerade på de nyttjade bränslena/bränsleblandningarna i denna studie. Värdena i riskområde är markerade med fet stil

Table 11. A selection of key numbers for prediction of deposit formation [12] applied on the used fuels/fuel mixtures in this study. Values within the hazardous regions are marked with bold text.

Nyckeltal	Betydelse	Risk	Rörflen- hög askhalt	Rörflen låg askhalt- 3B Fält 15%	Salix	Salix- 3B Fält 15%	Halm	Halm- 3B Fält 40%
Alkaliandel	Nivå på smältpunkter i salter och silikater	> 0.3	0.2	0.16	0.17	0.14	0.53	0.34
Förångningskvot	KCl-bildning och problem med bl a Cl-inducerad korrosion	>0.3	0.09	0.17	0.19	0.23	0.23	0.24

Några nyckeltal med relevans mot påslag/beläggingsbildning som hämtats från bränslehandboken [12] och applicerats på de studerade bränslena återfinns i tabell 11. Utifrån dessa nyckeltal bedöms både halmen och halm/torvblandningen kunna ge problem med beläggingsbildning vilket är mycket möjligt då de fina partiklarna är rika på KCl.

4 Slutsatser

Termokemiska modellberäkningar utfördes för att bestämma effekter av torvinblandning till halm, salix och rörflen med hög och låg askhalt på reduktionen av slaggnings-, beläggingsbildnings-/ (korrosion)- och bäddagglomereringsrisken vid förbränning. Dessa resultat och tidigare utförda försök i bänkskala låg sedan till grund för valda bränslekombinationer, torvinblandningsgrader och torvprov i de sedan utförda demonstrationsförsöken. Dessa demonstrationsförsök utfördes i rosteranläggning på 4 MW (rörflen/rörflensmixar och salix/salixmixar) och bänkskala (20 kW) (halm/halmmixar).

Ett flertal av de utförda modellberäkningarna validerades kvalitativt mot tidigare utförda kontrollerade förbränningsförsök i bänkskala (roster/fluidbädd) och god överensstämmelse mellan modellbaserade och experimentella resultat rörande kritiska askkemiska delprocesser kunde påvisas.

Utifrån resultaten från de termokemiska modellberäkningarna framgick att:

- Rörflen med hög askhalt förväntas inte ge upphov till några större problem med beläggings- och slaggnings-/bäddagglomereringsproblem och är därför i första hand inte intressant att samelda med torv utifrån ett askrelaterat driftsproblemperspektiv.
- Rörflen med låg askhalt har relativt hög slaggnings- och beläggningstendens men att beläggningsrisken för detta bränsle bör vara tämligen lågt. Resultaten från beräkningarna visar att redan relativt låga inblandningsgrader (15 vikts-% på TS basis) av starrbaserad torv ger en signifikant minskning av slaggnings-/bäddagglomereringstendensen.
- Salix torde kunna ge upphov till beläggingsproblem och att redan måttliga torvinblandningsgrader skulle ge signifikanta effekter på mängden kalium som avgår till gasfasen vilket torde reducera mängden beläggningar. Resultaten från dessa beräkningar visar dock att torvprov med relativt högt Ca/Si förhållande bör väljas för att inte slaggnings- och beläggningstendensen skall öka.
- Vetehalmen uppskattas ha mycket hög slaggnings-, bäddagglomerering- såväl som beläggingsbildningstendens. Inblandning av torv ger en signifikant reduktion av andelen kalium som avgår till gasfasen vid lägre temperaturintervall (< 1000 °C) men ej vid högre temperaturintervall (> 1000 °C). Mycket höga inblandningsgrader krävs troligen för att erhålla dessa resultat. Utspädningseffekter är de starkaste bidraget till de effekter som kan påvisas. Torvinblandning till halm kan dock vara intressant för att reducera bäddagglomererings- och slaggnings- och beläggningstendensen (detta kräver torv med relativt hög Ca/Si förhållande) men även för detta krävs också höga inblandningsgrader (över 40 vikts-%).

Utifrån resultaten från demonstrationsförsöken framgick att:

- Rörflen med hög askhalt hade relativt låg slaggningsdens.
- Inblandning av 15 vikts-% starrbaserad torv med relativt högt Ca/Si förhållande till rörflen med låg askhalt, som normalt är ett problematiskt bränsle ur slaggningsynpunkt, gav inte upphov till någon signifikant slaggbildning under 40 h:s proveldning.
- Salixbränslet hade låga slaggbildningstendenser men mängden bildade fina kaliumrika partiklar ($< 1 \mu\text{m}$) i de råa rökgaserna innan cyklon var höga. Detta kan ge upphov till beläggningsslaggbildning i pannors konvektionsdelar särskilt då de bildade beläggningarna innehöll KCl.
- Inblandning av 15 vikts-% starrbaserad torv med relativt högt Ca/Si förhållande till salix gav inte upphov till någon markant ökning av slaggningsdensen men bidrog till en halvering av mängden fina partiklar ($< 1 \mu\text{m}$) i de råa rökgaserna innan cyklon vilket är positivt både ur beläggningsslaggbildnings- såväl som emissionsynpunkt (för de anläggningar som saknar avancerad rökgasrening).
- Halmbränslets höga slaggningsdens kunde signifikant reduceras vid en 40%-ig (på TS basis) inblandning av starrtorvprovet med hög Ca/Si förhållande. Mängden fina ($< 1 \mu\text{m}$) kaliumrika partiklar kunde också reduceras men effekten var framförallt orsakad av utspädning.

5 Rekommendationer och användning

Resultaten visar att inblandning av typisk starrbaserad brännstovv i salix och rörflen med låg askhalt ger positiva effekter vad avser bäddagglomerering och beläggning/bildning/(korrosion) i pannans konvektionsdelar redan vid relativt låga inblandningsgrader (15 vikts-% på TS basis). En starrbaserad brännstovv med relativt högt Ca/Si förhållande bör väljas för sameldning med salix i rosteranläggningar för att inte öka slaggningsrisken. Samma stovvtyp kan också i rosteranläggningar nyttjas i sameldning med rörflen med låg askhalt (relativt låga inblandningsgrader räcker) och vetehalm (höga inblandningsgrader krävs) för att reducera slaggningsrisken.

Vid val av stovvslag för att maximera de ovanstående positiva effekterna vid förbränning kan därför en allmän rekommendation göras att stovvar med hög askhalt (starrinnehållande stovv), och gärna med högt inslag av svavel, ger de bästa sameldningsegenskaperna med det tilläget att vid rostereldning bör en stovv med relativt högt Ca/Si förhållande väljas (gärna upp mot 1).

Rörflen med hög askhalt förväntas inte ge upphov till några större problem med beläggning- och slaggnings-/bäddagglomereringsproblem och är därför i första hand inte intressant att samelda med stovv utifrån ett askrelaterat driftsproblemperspektiv. För att reducera beläggningstendensen till låga nivåer vid sameldning med vetehalm krävs troligen så höga nivåer av stovv att detta inte är praktiskt intressant.

6 Litteraturreferenser

- [1] Burvall, J., Öhman, M., Systemstudie över askegenskaper i förbränningsanläggningar vid samförbränning av torv och biobränslen, 2006, Utredning utförd åt Statens Energimyndighet, ER 2006 33, ISSN 1403-1892.
- [2] Värmeforsks driftserfarenhetsseminarium, 19-20 mars 1998, Norrköping.
- [3] Viktoren, A., Förbränning av Salix, 1991, SVF-416.
- [4] Öhman, M., Nordin, A., Skrifvars, B.J., Backman, R., Hupa, M., Bed agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of biomass fuels, *Energy & Fuels*, 2000, 14, 169-178.
- [5] Öhman, M., Lundholm, K., Nordin, A., Boström, D., Hedman, H., Ash transformations during combustion of meat-bonemeal and RDF in a bench-scale fluidized bed combustor. *Energy&Fuels*, 2003, 17, 1153-1159.
- [6] Baxter, L.L., Miles, T.R., Jenkins, B.M., Milne, T.A., Dayton, D.C., Bryers, R.W., Oden, L.L., Sandia report SAND96-8587*UC-1301, 1996.
- [7] Wrangensten, L., Förbränningstekniska aspekter på torv, 2002, Utredning utförd åt Statens Energimyndighet.
- [8] Hämäläinen, J., Markku Orjala, VTT Energy. 2001. Characterization of combustion behaviour of wood-based fuel to increase power plant availability. Paper for The First Biennial Meeting of The Scandinavian-Nordic Section of the Combustion Institute, Gothenburg, Sweden 18 – 20 April 2001.
- [9] Lundholm, K., Nordin, A., Öhman, M., Burvall, J., Näslund, B.O., Experimental studies on the role of peat fuel in preventing bed agglomeration during fluidized bed combustion of biomass fuels, 2002, Proc of 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam.
- [10] Boström, D. et al. ”Minskad bäddagglomerering i fluidbäddpannor genom sameldning av torv”, 2003, Slutrapport inom FoU programmet Network Institute for Future Energy Systems (NIFES).
- [11] Öhman, M., Boman, C., Erhardsson, T., Gilbe, C., Pommer, L., Boström, D., Nordin, A., Samuelsson, R., Burvall, J. Minskade askrelaterade driftsproblem (beläggning, slaggning, högtemperaturkorrosion, bäddagglomerering) genom inblandning av torv i biobränslen. SVF 999, 2006.
- [12] Strömberg, B., Bränslehandboken, SVF 911, 2005.
- [13] Bale C.W, Pelton A.D, FACT-database of FACT-Win version 3.05, CRCT École Polytechnique de Montréal, Quebec, Canada, 1999
- [14] Jan Burvall, Skellefteå Kraft AB, Personlig kommunikation, 2009.
- [15] Pommer, L, Öhman, M., Boström, D., Burvall, J., Olofsson, I., , Nordin, A. Responsible mechanisms for the positive effects on bed agglomeration and deposit formation during co-combustion of peat with forest residue. *Energy&fuels*. 2009, 23, 4245–4253.
- [16] Nyström, I., Boström, D., Boman, C. Öhman, M. Effect of peat addition to woody biomass pellets on slagging characteristics during combustion in residential pellet

- burners. Proc of the 17th European Biomass Conference & Exhibition, June, 2009, Hamburg.
- [17] Gilbe, C., Öhman, M., Lindström, E., Boström, D., Backman, R., Samuelsson, R., Burvall, J. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. *Energy&Fuels*, 2008, 22, 3536-3543.
- [18] Gilbe, C., Lindström, E., Backman, R., Samuelsson, R., Burvall, J., Öhman M. Predicting slagging tendencies for biomass pellets fired in residential appliances: a comparison of different prediction methods. *Energy&Fuels*, 2008, 22, 3680-3686.
- [19] Öhman, M., Hedman, H., Boström, D., Nordin, A. Effect of kaolin and limestone addition on slag formation during combustion of wood fuels. *Energy & Fuels*, 2004, 18, 1370-1376.
- [20] Öhman, M., Nordin, A., Skrifvars, B-J., Backman, R., Hupa, M. Bed agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of biomass fuels. *Energy & Fuels*, 2000, 14, 169-178.
- [21] Zevenhoven-Onderwater, M., Backman, R., Skrifvars, B-J., Hupa, M. The ash chemistry in fluidised bed gasification of biomass fuels. Part I: predicting the chemistry of melting ashes and ash-bed material interaction. *Fuel*, 2001, 80, 1489-1502.
- [22] Nielsen, H. P., Frandsen, F. J., Dam-johansen, K., Baxter, L. L. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26, 283-298.
- [23] Lindström, E., Öhman M, Boström, D. Backman R. Influence of sand contamination on slag formation during combustion of wood derived fuels. *Energy & Fuels*, 2008, 22, 2216-2220.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGI MYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80

Fax 08-677 25 35

www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker

Fax 08-677 25 35