

ANLÄGGNINGS- OCH FÖRBRÄNNINGSTEKNIK

## Minskade askrelaterade driftsproblem (beläggning, slagging, högtemperatur- korrosion, bäddagglomerering) genom inblandning av torv i biobränslen

Marcus Öhman, Christoffer Boman, Thomas Erhardsson, Carl Gilbe, Linda Pommer,  
Dan Boström, Anders Nordin, Robert Samuelsson, Jan Burvall





**Minskade askrelaterade driftsproblem (beläggning,  
slagging, högtemperatur-korrosion,  
bäddagglomerering) genom inblandning av torv i  
biobränslen**

**Reduced ash related operational problems  
(slagging, bed agglomeration, corrosion and  
fouling) by co-combustion biomass with peat**

Marcus Öhman, Christoffer Boman, Thomas Erhardsson, Ram Gilbe,  
Linda Pommer, Dan Boström, Anders Nordin, Robert Samuelsson, Jan  
Burvall

A5-514



## Abstract

Projektet behandlar effekter av torvinblandning i problematiska biobränslen (grot, salix, halm) med avseende på uppkomsten av askrelaterade driftsproblem (beläggning, slagning, högtemperatur-korrosion och bäddagglomerering). Studien visar att inblandning av torv i de problematiska biobränslen som studerats ger tydligt positiva effekter vad avser bäddagglomerering och beläggning/bildning/korrosion i pannans konvektionsdelar redan vid relativt låga inblandningsgrader (15-20 vikts-%) i salix och grot, samt vid inblandningsgrader upp mot 40 vikts-% i halm. Resultaten indikerar dock även att vissa torvslag i vissa bränslesammansättningar ger upphov till ökade slagningstendenser på brännarrosters. De bakomliggande askkemiska och processmässiga mekanismerna till de observerade effekterna diskuteras i rapporten.

## Sammanfattning

Förbränningsstudier har utförts för att bestämma vilka egenskaper hos torv och de bakomliggande processmekanismerna som kan inverka positivt på uppkomsten av askrelaterade driftsproblem (slaggnings, beläggingsbildning/högtemperaturkorrosion och bäddagglomerering) vid förbränning av flera olika typiskt problematiska biobränslen (grot, salix och halm). Även vilka inblandningsgrader som krävs för att uppnå tydliga positiva effekter på eventuellt uppkomna problemen har undersökts.

Kontrollerade förbränningsförsök genomfördes i en fluidiserad bädd (5 kW) samt i en undermatad pelletsbrännare (20 kW) (rosterförbränning). Tre typiska carex innehållande svenska torvprover (Brunnskölen, Norrheden och Stentjärn) med variationer i bl a kisel-, kalcium- och svavelinnehåll, samlades med typisk grön grot, salix och halm i proportioner om 15-40 vikts % baserat på bränslemixens torrsubstanshalt. Denna typ av torvar har i tidigare arbete visat sig vara effektiva vad gäller att minimera uppkomsten av bäddagglomerering och beläggingsbildning/högtemperaturkorrosion.

Resultaten från de kontrollerade bäddagglomereringsförsöken visade på en kraftig reduktion av agglomereringstendensen för samtliga försök vid en inblandning motsvarande 15-20 vikts-% av bränslemixens TS-halt. En ökning av den bränslespecifika defluidiseringstemperaturen på 150-170 °C för halm och ca 70-100 °C för salix och grot kunde således detekteras. Dessa positiva effekter kan vid salix och grotförbränning förklaras av att sammansättningen på det inre beläggningsskiktet runt bäddkornen (kvartssanden) förändras då torv blandas in med det problematiska biobränslet. I samtliga fall med torvinblandning i såväl grot som salix innebar förändringen att kaliumhalten minskade samtidigt som kalciumhalten ökade i det inre beläggningsskiktet, vilket i sin tur innebar att smältpunkten höjdes och agglomereringstendensen minskade. Denna viktiga förändring av sammansättningen på det inre bäddkornskiktet orsakas av att reaktivt kalcium tillförs via torven samtidigt som borttransport och/eller överföring av alkali till mindre reaktionsbenägen partikulär form sker via sorption eller reaktion med kvarvarande reaktiv torvaska (innehållande kisel, kalcium m.m.) under bildande av partiklar med en storlek på >1µm. Till skillnad mot salix- och grotförbränning återfanns bränsleaskan i bädden i form av enskilda askpartiklar vid förbränning av halm. Vid inblandning av torv i halm ökade innehållet av järn, svavel och kalcium hos de bildade askpartiklarna. En utspädning och/eller faktisk reduktion av kalium hos de enskilda askkomponenterna påverkar sannolikt smältbeteendet och därmed agglomereringsrisken positivt.

Utifrån förbränningsförsöken i pelletsbrännare kunde vidare konstateras att inblandning av de studerade torvarna till de relativt kiselfattiga grot- och salixbränslena ökade slaggningsstendensen vid rostereldning, framförallt för det relativt kislerika torvbränslet (Brunnskölen). Vid inblandning av torv i halm som är rikt på kalium och kisel, reducerades däremot slaggningsstendensen. Samtliga av de studerade torvproverna hade relativt höga kisel/kalciumkvoter. Tidigare forskning har visat att tillförsel av reaktivt kisel till kiselfattiga bränslen ökar slaggningsstendensen samt att höga kalcium/

---

kiselkvoter i ett bränsle är att föredra för att minimera uppkomsten av slagning på rosters.

Resultaten från försöken både i fluidbädd och brännarutrustning visade på kraftig reduktion i mängden emitterade fina partiklar ( $<1 \mu\text{m}$ ) vid inblandning av torv i salix och grotfractionerna redan vid dom inblandningsgrader som studerats (15-20 vikts % av TS). Dock krävs en högre inblandningsgrad än vad som ingick i denna studie (40 vikts-%), för att uppnå sådan effekt vid förbränning av halm. Mängden emitterat kalium och klor som avgått från bränslet och återfanns i den fina partikelfractionen minskade i samtliga sameldningsförsök. Även en reduktion av kalium- och klorhalterna hos den uppkomna belägningen observerades vid inblandning av torv. Resultaten från tidigare utförda termokemiska modellberäkningar indikerade dessutom att andelen smälta i den finpartikulära fraktionen och i beläggningar reducerades vid inblandning av torv. Tidigare utförda arbeten har visat på betydelsen av mängden smält material hos den fina partikelfractionen för beläggningstillväxten på kylda panntuber. Även betydelsen av klorinnehållande alkaliföreningar för klorinducerad korrosion har visats i tidigare arbeten och ovanstående resultat kan anses förklara de bakomliggande mekanismerna som leder till de positiva effekterna vad gäller minskning av beläggningstillväxt och högtemperaturkorrosion.

Vid förbränningsförsöken i fluidbädden ökade den totala emitterade mängden grova partiklar ( $>1 \mu\text{m}$ ) vid inblandning av samtliga torvar. Denna partikelfraktion består till stor del av kalium, kalcium och kisel. En ökning av en sådan grov partikelfraktion kunde dock inte detekteras vid försöken i pelletsbrännarutrustningen. Orsaken till detta kan för fluidbädden förklaras av de ovan beskrivna processerna där överföring av alkali i gasfas sker till partikulär form via sorption och/eller reaktion med reaktiv torvaska och/eller via svavelrika föreningar vid nyttjande av svavelrika torvar, under bildande av grövre partiklar med en storlek på  $>1 \mu\text{m}$ . Även vid rostereldning, i detta fall i form av en pelletsbrännare, kan alkalisorption och -reaktion med reaktiv torvaska antas ske under bildande av grövre partiklar, s k restaska. Dock förefaller dessa askpartiklar inte följa med rökgaserna utan hålls antingen kvar på rostret och inkluderas i slaggen eller deponeras som bottenaska i panna.

## Summary

Combustion studies were performed to elucidate the responsible mechanisms for the positive effects on ash related operational problems (i.e. slagging, fouling, corrosion and bed agglomeration) during co-combustion of several problematic biomass with peat. The objective was also to quantify how much peat fuels is needed to significantly reduce the formation of ash related operational problems.

Controlled combustion experiments were performed in both a fluidized bed (5 kW) and in an under-feed pellets burner (20 kW). Three typical carex-containing Swedish peat samples with differences in e.g. silicon-, calcium- and sulfur contents were co-fired with logging residues, willow and straw in proportions corresponding to 15-40 weight %<sub>d.s.</sub> of the fuel mixture. The used peat fuels have in a previous study shown to significantly reduce the bed agglomeration and fouling/corrosion tendencies.

Mixing of corresponding 20 weight-% of peat significantly reduced the bed agglomeration tendencies for all fuels. The fuel specific agglomeration temperature were increased by 150-170 °C when adding peat to the straw fuel and approximately 70-100 °C when adding peat to the logging residue- and the willow fuel. When using peat in the fuel mixture the level of potassium in the inner layer around the bed particles decreased for all peat/logging residues- and peat/willow mixtures compared to when these fuels were combusted without peat. Simultaneously the level of calcium increased in this inner layer, which together with the decreased level of potassium increased the melting point of the coating, resulting in a decreased agglomeration tendency. The conclusion from this is that a relatively low melting inner layer probably has a large influence on the agglomeration tendency, and that knowledge of the element composition of this layer can give information about the agglomeration tendency of the fuel. During straw combustion, the ash forming matter were found as individual ash sticky (partial melted) particles in the bed. The iron, sulphur and calcium content of these individual ash particles were significantly increased when adding peat to the fuel mix thereby decreasing the stickiness of these particles i.e. reducing the agglomeration tendencies.

The increased level of calcium in the inner bed particle layer caused by the added reactive calcium from the peat and/or removing alkali in the gas phase to a less reactive particular form via sorption and/or reaction with reactive peat ash (containing calcium, silica etc.) during which larger particles (>1µm) are formed where collected potassium is present in a less reactive form, is considered to be the dominated reason for the increased agglomeration temperatures during combustion of logging residues and willow.

Adding peat to the relatively silicon-poor fuels (willow and logging residues) resulted in higher slagging tendencies, especially when the relative silicon rich peat fuel (Brunnskölen) was used. However, when co-combusting peat with the relatively silicon and potassium rich straw fuel the slagging tendencies were reduced. All the used peat fuels had relatively high silicon to calcium ratios. Previous research has shown that addition of reactive silicon to silicon-poor fuels significantly increase the slagging

tendencies whereas high calcium to silicon ratios in a fuel is preferred if slagging on the grates will be avoided.

The results from both the fluidized bed- and the burner experiments showed a considerable reduction of the emitted amounts of fine particles when adding peat to the loggings debris and willow fuel already at mixes corresponding to 15-20 weight-% of peat. For the straw fuel proportions higher than 40 weight-% of peat is needed to get a similar reduction in emitted amounts of fine particles. The amount of emitted potassium, chlorine and sulfur found in the fine fraction were significantly reduced in all co-combustion experiments. A reduction in the potassium and chlorine content of the deposits were also detected during peat addition. The results from the thermo chemical calculations indicated that the amount of melt in the fine particle fraction decreased when peat was added to the fuel. Several earlier studies have demonstrated the importance of the amount of melted material in the fine particle fraction on deposit formation on super heater tubes, and of the importance of compounds containing earth metals and chlorine, on chlorine-induced corrosion. The result from the current study therefore points out the underlying causes that could contribute to the earlier observed positive effects when co-firing biomass with peat concerning reduction of deposit formation and high temperature corrosion.

The total emitted amount of potassium and calcium in the coarse particle fraction increased during fluidized bed combustion of all peat/fuel mixes. An increased emission of the coarse particle fraction upon peat addition could, however, not be seen during the burner experiments. The underlying mechanisms for the considerable reduced emission of the potassium and chlorine containing fine particle fraction in the fluidized bed experiments is probably transfer and/or removing alkali in the gas phase to a less reactive particular form via sorption and/or reaction with reactive peat ash (containing silica, calcium etc.) during which larger particles ( $>1 \mu\text{m}$ ) are formed. In the case for the burner experiments the underlying reason for the reduced emission of the potassium and chlorine rich fine particle fraction were alkali sorption and/or reaction with the reactive peat fuel ash during the formation of the fuel particle residual ash.

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>11</b>
1.1	BAKGRUND.....	11
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET .....	12
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET .....	14
1.4	MÅL.....	14
<b>2</b>	<b>METOD OCH UTFÖRANDE.....</b>	<b>15</b>
2.1	NYTTJADE TORVKLASSER-/PROVER OCH BIOBRÄNSLEN .....	15
	2.1.1 TORVPROV.....	15
	2.1.2 BIOBRÄNSLEN.....	17
2.2	FÖRBRÄNNINGSFÖRSÖK .....	20
	2.2.1 KONTROLLERADE BÄDDAGGLOMERERINGSFÖRSÖK OCH BELÄGGNINGSPROVTAGNING .....	20
	2.2.2 KONTROLLERADE SLAGGNINGSFÖRSÖK I UNDERMATAD PELLETSBRÄNNARE .....	22
	2.2.3 BÄDD-, SLAGG-, BELÄGGNINGSPROVS- OCH PARTIKELANALYSER.....	23
<b>3</b>	<b>RESULTAT OCH DISKUSSION.....</b>	<b>25</b>
3.1	BÄDDAGGLOMERERING .....	25
	3.1.1 KONTROLLERADE BÄDDAGGLOMERERINGSFÖRSÖK.....	25
	3.1.2 SEM EDS-ANALYSER PÅ BÄDDMATERIAL PÅ BÄDDMATERIAL OCH AGGLOMERAT .....	26
3.2	BELÄGGNINGSBILDNING FLUIDBÄDDSFÖRSÖK .....	31
	3.2.1 PARTIKELSTORLEKSFÖRDELNING OCH HCL-EMISSIONER.....	31
	3.2.2 PARTIKELSAMMANSÄTTNING.....	34
	3.2.3 BELÄGGNINGSBILDNING PÅ KYLD PROVSOND .....	39
3.3	SLAGGBILDNING I BRÄNNARE .....	42
	3.3.1 AVSATTNA MÄNGDER .....	42
	3.3.2 KEMISK SAMMANSÄTTNING.....	43
3.4	PARTIKELEMISSIONER/BELÄGGNINGSBILDNING-BRÄNNARFÖRSÖK .....	47
	3.4.1 PARTIKELSTORLEKSFÖRDELNING OCH HCL-EMISSIONER.....	47
	3.4.2 PARTIKELSAMMANSÄTTNING.....	50
<b>4</b>	<b>SLUTSATSER.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSPÅRBEJDE .....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>LITTERATURREFERENSER.....</b>	<b>58</b>

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Användningen av vissa biobränslen (t ex grot, salix, 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 rosters i fastighets- och närvärmeskalan har också rapporterats vid biobränsleledning. Problemen bidrar till en reducerad tillgänglighet hos utrustningen, vilket ökar behovet av tillsyn. De ”nya” typer av bränslen t ex hyggesavfall och åkerbränslen (salix, halm och rörflen) som idag, p g a rådande tillgång och pris på mer traditionella trädbränslen, kommer att ta sig in på marknaden innehåller sådana askbildande element, bl a höga alkalihalter, att besvärande driftsproblem och totala driftsstopp kan förväntas [3,4,5,6].

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. 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 med anledning av aspekter som förnybarhet och klimatfrågan. 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. 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 trädbränslen med torv väsentligt förlänger livslängden hos överhettare [8] och minimerar uppkomsten av bäddagglomerering i fluidiserade bäddar [9,10] Positiva effekter vid sameldning med trädbränslen 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.

Det är av stort värde att förstå vilka mekanismer som ligger bakom de positiva egenskaper som tidigare uppmärksammas. Därigenom kan man förstå vilka torvtyper och torvsammansättningar som har de mest positiva effekterna och därigenom göra rätt urval av vilka torvmarker som är bäst lämpade för sameldning med biobränslen. Detta resonemang stöds också av Torvutredningen (SOU 2000:100) som påpekar att torvens användning kräver ett bättre urval av torvmarker för utvinning eftersom torvmarken ibland representerar omistliga miljövärden. Vidare har det påtalats att särskilda torvförsörjningsområden bör preciseras och avgränsas.

## 1.2 Beskrivning av forskningsområdet

En förutsättning för att klargöra mekanismerna bakom de positiva effekter som uppkommit vid torvinblandning är att förstå i vilken form de olika oorganiska elementen återfinns i torven. Torv är dock ett mycket heterogent material speciellt m a p oorganisk elementsammansättning, som påverkas av torvklass (bland-/vitmosse-/starrtorv), geologisk omgivning, historisk topografi, hydrologi och meteorologi. Studier av förekomstformen av de oorganiska elementen i torv är relativt få. Ett fåtal torvar från bl a Costa Rica [11], Georgia [12], Brittish Colombia [13], Grekland [14] och Sverige [10] har undersökts m a p mineralinnehåll. Kvarts, fältspater, glimmer, pyrit, apatite, kaolinit, gips, karbonat och olika lermineral har kunnat påvisas. Mängd och andel lättlösliga och jon-utbytbara oorganiska komponenter i olika torvar, som i tidigare studier refererats återfinnas i förbrännings-sammanhang i s k ”reaktiv form” [15], har också undersökts genom speciella lakningstudier. Andelen av totalt vattenlösligt K och Ca hos sju studerade finska torvaskor (producerade vid 550°C) varierade mellan 2-14 respektive 17-30 % [16]. Andelen utbytbar Ca och Na i ammoniumacetat i ett 70-tal studerade finska torvaskor var upp mot 60 respektive 80 % [17]. I en annan utförd studie på 4 olika finska torvprov visades att Si, Al, Fe, S och P som återfanns i torv var svårösliga, d v s löste sig föga i vatten och ammoniumacetat, medan Ca, Mg, Na och Mn var lättlösliga [18]. Ovanstående lakningsstudier indikerar därmed att flera komponenter i torv (t ex Ca, Mg, Na och Mn) är potentiellt högreaktiva vid förbränning. Det bör dock påpekas att även ytor hos mineralkorn och i processen bildade partiklar kan vara ”reaktiva” i de askbildande mekanismerna.

I ett tidigare STEM-finansierat projekt [19] (2003-05) studerades de bakomliggande mekanismerna för torvslags positiva effekter vad gäller minskade askrelaterade driftsproblem vid sameldning med skogsbränslen. I det projektet, som det föreliggande projektet till stora delar utgår ifrån, framgick att svensk torv varierar kraftigt i innehåll av huvudaskbildande komponenter (Ca, Si, Fe, S, Mg, Al, P, K, Cl). Endast ett fåtal kristallina föreningar (framförallt kvarts och olika fältspater) identifierades i de torvprov som valts ut för att representera den varierande sammansättningen hos svensk torv. Resultaten från den omfattande kemiska karaktäriseringen av torvproverna visade att en relativt stor andel av torvens oorganiska innehåll förelåg i amorf form. Resultaten indikerade dessutom att huvuddelarna av elementen kalium och natrium återfanns som fältspater som i normala förbrännings-sammanhang anses vara mindre reaktionsbenägna. Vidare framgick att en stor andel av torvens övriga oorganiska huvudelement, framförallt kalcium, kisel, svavel och eventuellt aluminium återfanns i mer reaktiva former.

De positiva resultat vad gäller minskningen av bäddagglomerering i tidigare utförda projekt [9, 10] kan sannolikt förklaras med att asksammansättningen i bädden ändras så att den bildade askan, som vid biobränsleldning till största delen återfinns som lager runt bäddkornen, börjar smälta vid en högre temperatur. Eftersom sammansättningen i torven varierar mellan de olika torvtäkterna, skiljer sig därmed också orsakerna till temperaturhöjningen av de bildade askornas smälttemperatur (bäddagglomereringstemperaturen). Tänkbara orsaker är: i) tillförsel av svavel (svavelrika torvar) som binder upp kalium och natrium i form av sulfater; ii) inblandning av torvaska i sig, vilken p g a av sin sammansättning höjer smältpunkten för den bildade askan genom en ökning av

t ex kalcium-, järn- eller aluminiuminnehållet, eller iii) tillförsel av lermineraler (kaolinit eller andra aluminiumsilikater), vilka kan binda kalium och natrium och därmed minska andelen av dessa ämnen i beläggningspartiklarna runt bäddkornen.

Mekanismerna bakom de kraftigt reducerade agglomereringsriskerna vid sameldning av torv i skogsbränslen (grot) har därefter klargjorts inom det nyligen avslutade projektet [19], föregångaren till detta arbete. Vid torvinblandning minskade kaliumhalten i det inre skiktet runt bäddkornen samtidigt som kalciumhalten ökade varvid agglomereringstendensen minskade. Denna förändring i sammansättning hos det inre skiktet resulterade i att smältpunkten höjdes betydligt [20]. Detta är av stor betydelse då resultaten från tidigare undersökningar visat att sammansättningen och därmed smältförloppet hos de bildade inre bäddkornsskikten starkt påverkar bäddagglomereringstendensen. De troligaste bakomliggande mekanismerna som föreslagits är via; i) borttransport och/eller överföring av alkali till en mindre reaktionsbenägen partikulär form via fasta svavelrika föreningar vid nyttjande av svavelrika torvar och/eller ii) sorption och/eller reaktion med kvarvarande reaktiv torvaska (innehållande kisel, kalcium m.m.) under bildande av partiklar med en storlek på  $>1 \mu\text{m}$ . Den ökade halten kalcium i det inre bäddkornsskiktet orsakat av tillförsel av reaktivt kalcium via torven var också av betydelse för den ökade agglomereringstemperaturen.

Möjliga förklaringar till de positiva resultat vad gäller minskning av korrosion och beläggningstillväxt har i tidigare utförda studier fokuserats på svavlets roll [8,21,22] där huvudhypotesen varit att torvens innehåll av svavel förhindrar alkalimetallerna att förflyktigas som klorider och/eller hydroxider och att natrium och kalium istället binds upp till mer harmlösa sulfater. Indikationer att torvaska även kan ha en mild eroderande (rengörande) effekt som därmed kan reducera beläggningstillväxten på pannrör har också föreslagits [23]. Svavelhalten varierar dock starkt mellan olika torvar och dessutom kan troligen även torvens innehåll av övriga askbildande komponenter påverka både beläggningstillväxten och sammansättningen på beläggningspartiklarna.

Resultaten från det relativt nyligen avslutade projektet [19], där sameldning av torv med skogsbränslen i fluidiserad bädd studerades, visade att inblandning av torv reducerade mängden fina partiklar ( $<1 \mu\text{m}$ ) samtidigt som mängden grova ( $>1 \mu\text{m}$ ) partiklar och HCl-halten i rökgaserna ökade. Mängden emitterat kalium, klor och svavel återfunnet i den fina partikelfraktionen minskade samtidigt som den totala emitterade mängden kalium och kalcium återfunnit i den grova partikelfraktionen ökade vid inblandning av samtliga torvar. Resultaten från de termokemiska modellberäkningarna indikerade att andelen smälta i den finpartikulära fraktionen reducerades vid inblandning av torv. De bakomliggande mekanismerna antas även här vara borttransport/överföring av alkali i gasfas till en mindre reaktionsbenägen partikulär form via sorption och/eller reaktion med reaktiv torvaska (innehållande kisel, kalcium m.m.) under bildande av partiklar med en storlek på  $>1 \mu\text{m}$  och/eller via svavelrika föreningar vid nyttjande av svavelrika torvar. Flertalet tidigare utförda arbeten har visat på betydelsen av mängden smält material hos den fina partikelfraktionen för beläggningstillväxten på kyllda pannrör och på betydelsen av klorinnehållande alkaliföreningar för klorinducerad korrosion. Ovanstående resultat visar därmed på bakomliggande mekanismer som kan bidra till de positiva effekterna, vad gäller minskning av beläggningstillväxt och

högtemperaturkorrosion, som tidigare erhållits vid sameldning med torv och skogsbränslen.

### **1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet**

Tidigare forskning har således fokuserats på sameldning mellan torv och problematiska trädbränslen medan sameldning mellan torv och typiska strå- (halm) och åkerenergigrödor (salix) inte tidigare studerats. Det torde därför vara av särskilt intresse att studera vilka inblandningsgrader av torv som krävs för att dessa besvärliga bränslen skall kunna introduceras i stor skala. Påverkan av torvinblandning till biobränslen på slagningstendensen i rosteranläggningar/-brännare har heller ej tidigare studerats. Ytterligare forskning är nödvändig för att bättre förstå bakomliggande mekanismer vid förbränning av andra biobränslen än specifikt problematiska skogbränslen och därmed ytterligare kvantifiera olika torvars positiva egenskaper vid sameldning med en rad olika biobränslen. Utifrån resultaten kan man sedan föreslå vilka torvslag/täkter som framförallt bör nyttjas för att få bästa sameldningseffekt utifrån specifika förutsättningar vad gäller aktuellt askrelaterat problem, anläggningstyp och nyttjat biobränsle.

### **1.4 Mål**

Projektets mål har därför varit att:

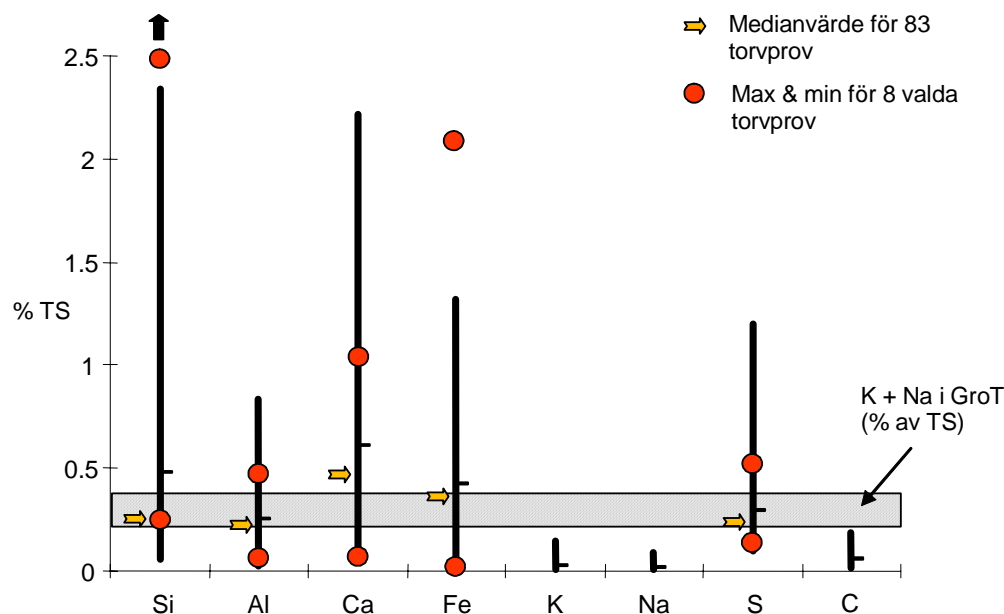
- i)* Bestämma vilka egenskaper hos torven och de bakomliggande processmekanismerna som kan inverka positivt på respektive askrelaterat problemområde vid förbränning av flera olika typiskt problematiska biobränslen (grot, halm, salix)
- ii)* Kvantifiera vilka inblandningsgrader i olika typiska biobränslen som krävs för att uppnå tydligt positiva effekter m a p slagning, beläggning/bildning/högtemperaturkorrosion och bäddagglomerering

## 2 Metod och utförande

### 2.1 Nyttjade torvklaser/-prover och bibränslen

#### 2.1.1 Torvprov

I tidigare projekt (etapp 1) [19] har åtta olika torvprov nyttjats. Dessa prov valdes ut utifrån en principalkomponentanalys av 83 olika skandinaviska torvprov för att representera så stor variation som möjligt av innehållet av de askbildande ämnena hos skandinaviska torvar. Figur 1 visar variationer i respektive huvudaskelement hos dessa 83 insamlade torvanalys/-prov. Av figur 1 framgår att halten alkali uttryckt som % av torrsubstanshalten (TS) i bränslet hos normal grot oftast är i motsvarande mängd som halterna Si-, Al-, Ca-, Fe- och S i torv. Salix har oftast en alkalihalt motsvarande den hos grön grot medan halm ofta har högre alkalihalter upp mot 1 % av TS eller över. Vid de låga inblandningsgrader som visat sig ge positiva effekter (ofta < 20 % baserat på TS-halten i bränslena) vid sameldning av torv och skogsbränslen torde därför framförallt elementen Si, Al, Ca, Fe och S återfinnas i sådana mängder i torv att dessa skulle kunna inverka på uppbindningen av det alkali som återfinns i skogsbränslen och salix till mer harmlösa föreningar. Alkalihalten hos halm är dock relativt hög varvid högre inblandningsgrader borde vara aktuella för att binda upp halmens alkali till harmlösa komponenter.



Figur 1. Variationer i respektive huvudaskelement hos de tidigare 83 insamlade torvanalyserna [19].

Figure 1. Variations in the main ash forming elements of the earlier peat samples [19].

De i det tidigare arbetet nyttjade torvproverna inaskades vid temperaturer lägre än 120 °C i en reaktiv plasma. Denna inaskningsteknik valdes för att till så stor del som

möjligt undvika att torvmineralernas ursprungliga identitet förstördes men att den största delen av det organiska materialet oxiderades och förflyktigades. Mineralkaraktärisering utfördes sedan på återstoden av det lågtemperaturinaskade materialet m h a pulverröntgendiffraktion (XRD) för identifiering av kristallina faser. Kompletterande undersökningar med röntgenfotoelektron-spektroskopi (XPS) och svepelektronmikroskop (SEM) med tillhörande energidispersiv röntgenanalys (EDS) utfördes för semikvantitativ elementanalys.

Endast ett fåtal kristallina föreningar detekterades med XRD hos de lågtemperaturinaskade torvproven och den största andelen av bränsleaskan bestod därmed av icke kristallint (amorft) material. De kristallina föreningar som identifierades var SiO<sub>2</sub> (Kvarts), CaSO<sub>4</sub>\*0.67H<sub>2</sub>O, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (Mikroclin/Fältspat) samt NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (Albit/Fältspat). I ett av torvproven (Norrheden) detekterades även lermineralen Halloysite. Då syrehalten vid lågtemperaturinaskningen visat sig påverka mängden detekterad CaSO<sub>4</sub>\*0.67H<sub>2</sub>O är troligen denna fas till stor del producerad under inaskningsförfarandet genom oxidation av t ex Pyrite, och förekommer sannolikt därmed ej i någon större omfattning naturligt i torven. De i det tidigare projektet studerade torvarnas bränslekaraktäristik, t ex innehåll av askbildande huvudelement, framgår av tabell 1.

Tabell 1. Bränslekaraktäristik-askbildande huvudelement hos tidigare och i detta arbete studerade torvprover (Brunnskölen, Norrheden och Stentjärn D) [19].

Table 1. Fuel characteristics-ash forming main elements in previous and in this study used peat samples (Brunnskölen, Norrheden och Stentjärn D) [19].

	<b>Brunns - kölen</b>	Bådhus	Flobomyren	Forellmossen	Krypkölen	<b>Norrheden</b>	Stentjärn A	<b>Stentjärn D</b>
Askhalt*	10,4	7,9	4,0	1,6	7,5	4,0	6,9	6,3
Si*	3,25	0,96	0,52	0,36	2,20	0,45	0,35	1,41
Al*	0,34	0,32	0,10	0,09	0,47	0,26	0,09	0,19
Ca*	0,46	0,92	0,76	0,11	0,40	0,39	1,05	0,74
Fe*	0,76	1,76	0,23	0,07	0,39	0,69	2,04	0,50
K*	0,08	0,06	0,02	0,03	0,13	0,01	0,03	0,05
Mg*	0,07	0,08	0,09	0,08	0,04	0,05	0,07	0,07
Na*	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
P*	0,07	0,05	0,03	0,03	0,08	0,04	0,05	0,03
S*	0,22	0,28	0,15	0,17	0,19	0,26	0,35	0,51
Cl*	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03	-	0,02	0,03
Torvslag**	CS-t	CS-t	CS-t	S-t	CS-t	SC-t	SC-t	SC-t
Hum. Grad***	H6	H6	H6	H 7-8	H6	H4-5	H5	H4-5

\*) % av TS

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

Utifrån resultaten från det tidigare arbetet där samtliga torvprov (8 stycken) sameldats med grön grot med inblandningsgrader motsvarande 20 vikts-% TS har tre av de tidigare torvproverna valts att sameldas med olika typiska biobränslen. Torv som ur sameldningsmekanistisk synpunkt väl representerar ett bränsle som ger positiva effekter m a p askrelaterade driftsproblem har valts ut. Utifrån tidigare projektetapps resultat [19] har slutsatsen dragits att torvar med hög askhalt (t ex carexinnehållande), gärna även med höga inslag av svavel, ger de bästa sameldningsegenskaperna.

De torvprov som därför ingick i detta arbete var torvprov från Brunnskölen, Norrheden och Stentjärn D (sammansättning se Tabell 1). Dessa torvprov gav, vid sameldning (20 vikts-% av TS) med grön grot i en fluidbädd i bänkskala (5 kW), de mest positiva effekterna (bland de 4 bästa) m a p lägre bäddagglomereringstendens, mindre mängd alkali i den fina partikelfractionen (< 1 µm) och högre uppbindning (sorption) av alkali till den grövre partikelfractionen (>1 µm). Dessutom varierar bränsleaskans sammansättning 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.

### **2.1.2 Biobränslen**

De utvalda torvproven sameldades i det föreliggande projektet med grot (grön), salix och vetehalm. Den gröna groten levererades av SCA Skog AB Norrbränslen till forskningspiloten Biobränsletekniskt Centrum (BTC) vid enheten för biomassateknologi och kemi (BTK), SLU Umeå och härrörde från ett granbestånd i Västerbotten. Salixen härstammade från försöksodlingar vid inst. för norrländsk jordbruksvetenskap (NJV), SLU Umeå. Halmen härrörde från Swalövs värmeverk i Skåne där driftspersonalen tagit ut ett representativt halmmaterial. Bränslesammansättningen hos de nyttjade biobränslena m a p askbildande huvudelement framgår av tabell 2. Den nyttjade halmen härrörde från samma område som den som nyttjades i det tidigare projektet [19] och sammansättningen (m a p askbildande element) är relativt lik den tidigare nyttjade halmen. Skillnader mellan den tidigare nyttjade groten och den nyttjade i detta arbete föreligger i framförallt Si-, Al-, K- och Cl-innehåll. Skillnaderna i innehåll av Al, Si och till viss del även K kan bero på att tidigare nyttjad grot sannolikt innehöll sand som kontaminerat provet.

Pellets-kvalitéer med varierande inblandningsgrad (5, 15, 40 vikts-%) togs fram och rena fraktioner (100 %) av valda sameldningsbränslen pelleteras även var för sig. I figur 2-4 redovisas sammansättningen m a p askbildande element för de olika pellets-kvalitéerna.

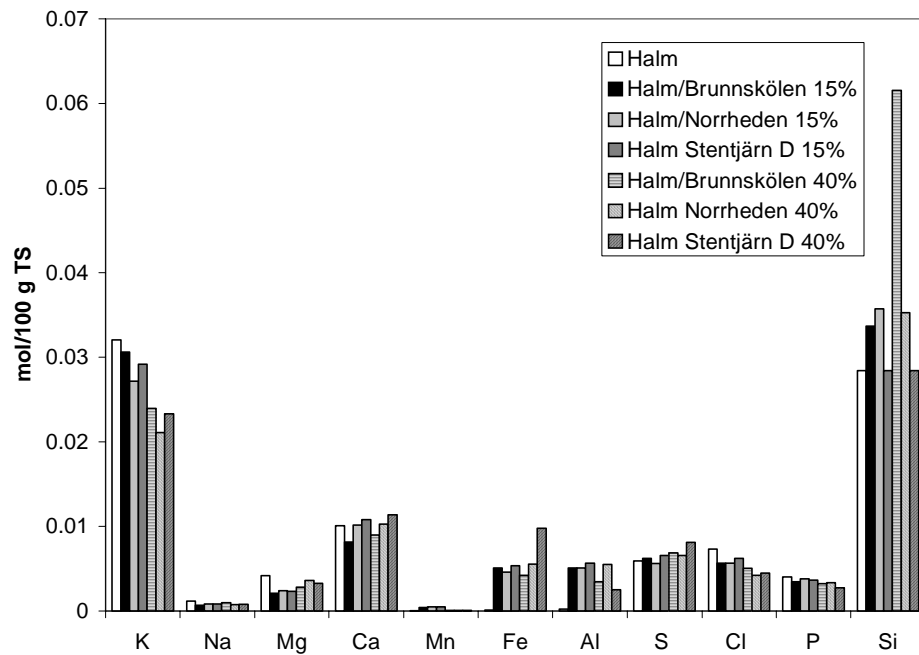
Tabell 2. Bränslesammansättning hos bränslena som sameldades med torv - askbildande huvudelement och askhalt (vikts-% av TS)

Table 2. Fuel composition of the biomass fuels used for co-combustion with peat – main ash forming elements and ash content (weight-%).

	Grot *	Grot	Halm*	Halm	Salix
Askhalt	3.7	2.4	5.9	5.7	2.1
Si	0.68	0.29	0.84	0.80	0.086
Al	0.13	0.036	0.02	0.006	0.017
Ca	0.55	0.50	0.33	0.40	0.50
Fe	0.09	0.024	0.02	0.005	0.010
K	0.28	0.17	1.39	1.25	0.25
Mg	0.07	0.06	0.07	0.10	0.044
Na	0.04	0.014	0.03	0.03	0.011
P	0.05	0.046	0.12	0.13	0.059
S	0.04	0.04	0.17	0.19	0.04
Cl	0.04	<0.01	0.22	0.26	<0.01

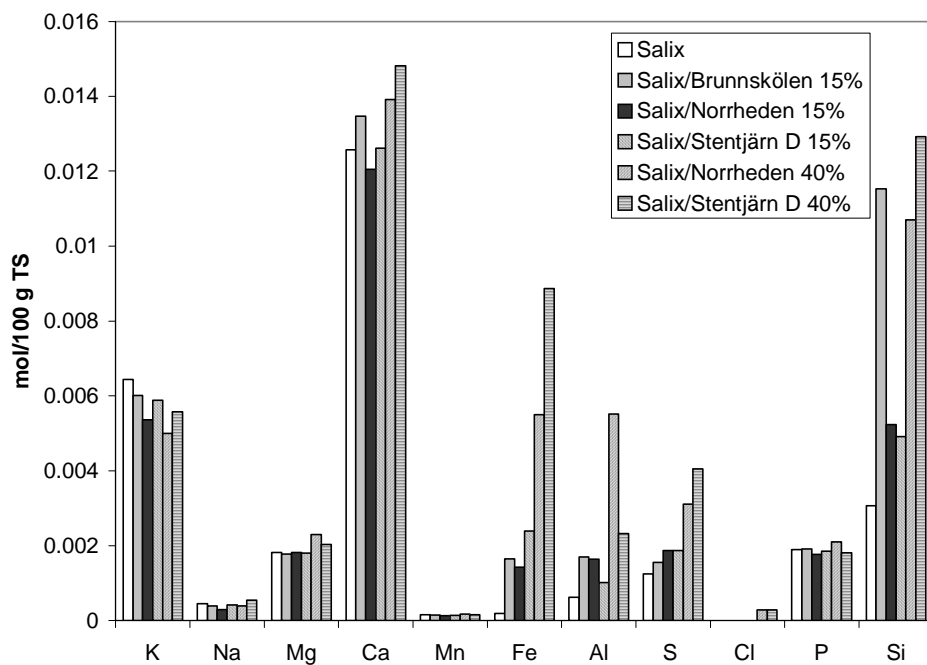
\*) Bränslen markerad med en \* nyttjades i den tidigare utförda studien[19].

Pelletering av bränslena och bränslemixarna genomfördes vid BTC. Materialen maldes först i en grovkvärn (Lindner Micromat MS 2000) med 15 mm såll varefter bränslena torkades till en ungefärlig fukthalt på 12-14 % enligt standardmetoden SS 18 71 70. Respektive torvprov och biobränsle mixades väl i olika proportioner på basis av torrsubstanshalten hos bränslena. Blandningen utfördes i säckar genom vägning och med spade om 25 kg åt gången för att minimera risker för segregering. Säckarna tömdes i en matarficka med transportör kopplad direkt till pelletspressen för att minimera risk för kontaminering. Därefter pelleterades respektive mix till en diameter av 8 mm i en pelletspress av märket SPC 300 med en kapacitet av 200-300 kg/h utrustad med en finkværn med 4 mm såll.



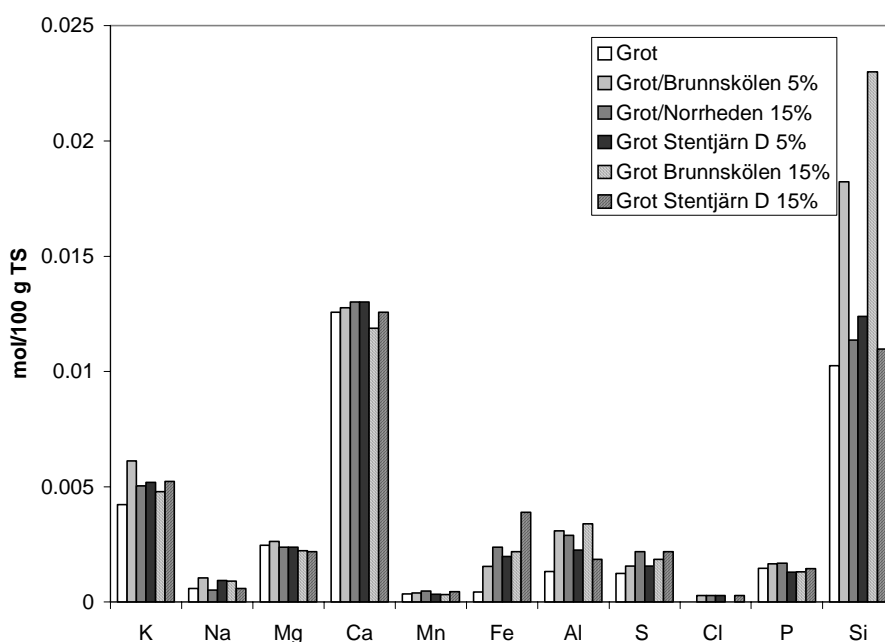
Figur 2. De olika pelleterade bränslenas sammansättning för halm och halm/torvmixar m a p askbildande huvudelement uttryckt i mol/100 g TS.

Figure 2. Fuel characteristics - ash forming elements for straw and straw/peat mixtures).



Figur 3. De olika pelleterade bränslenas sammansättning för salix och salix/torvmixar m a p askbildande huvudelement uttryckt i mol/100 g TS.

Figure 3. Fuel characteristics - ash forming elements for willow and willow/peat mixtures).



Figur 4. De olika pelleterade bränslenas sammansättning för grot/torvmixar m a p askbildande huvudelement uttryckt i mol/100 g TS

Figure 4. Fuel characteristics - ash forming elements for logging debris and logging debris/peat mixtures.

## 2.2 Förbränningsförsök

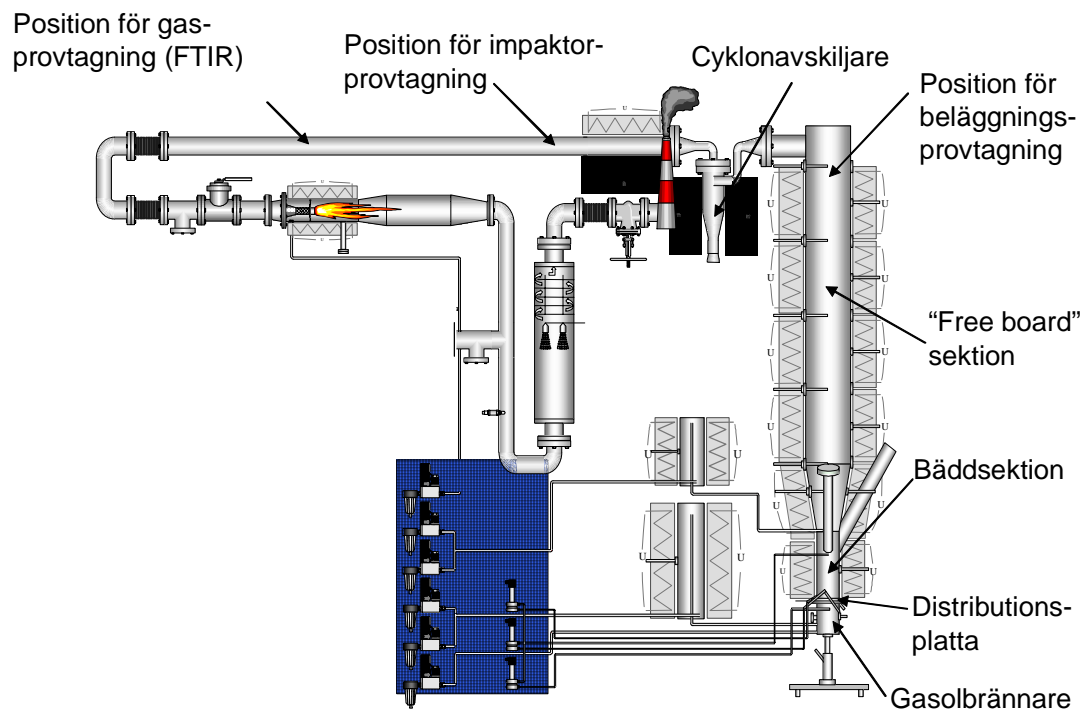
Förbränningsförsök utfördes, dels i en fluidiserad bubblande bädd i bänkskala (5 kW) under liknande förhållande som i tidigare utfört arbete [19], dels i en undermatad pelletsbrännare (20 kW). Utifrån tidigare erfarenheter [19] och utifrån de bränsleanalyser som utfördes på respektive sameldningskvalité valdes blandningar om 40 vikts-% torv i halmbränslet, 15 vikts-% torv i salixbränslet samt 15 vikts-% torv i grotbränslet att studeras i första hand. Då tidigare arbete i detalj studerat det kemiska förbränningsförloppet under liknande förutsättningar med 20 %-ig inblandning av torv i en tidigare nyttjad grön grot, med liknande sammansättning och med goda resultat vad gäller minimering av uppkomsten av olika askrelaterade driftsproblem, utfördes ej försök i fluidbädden med 15 %-ig inblandning av torv i grot. Resultaten från den tidigare studien av torvinblandning i grot har istället inkluderats i denna rapport då man från Värme-/Torvforsk ansett att resultaten även från tidigare STEM-projekt skall tas med i redovisningen.

### 2.2.1 Kontrollerade bäddagglomereringsförsök och beläggningsprovtagning

Försöken utfördes under liknande förhållanden som i den tidigare etappen i en fluidbäddreaktor av typ bubblande bädd i liten bänkskala (5 kW) [24], se figur 5. Anläggningen, som är byggd i rostfritt stål (253 MA), är 2 m hög och har en diameter på 100 mm i bäddregionen och en diameter på 220 mm i fribords-sektionen. En

perforerad rostfri platta med 1 % öppen hålarea (90 hål) användes som distributionsplatta. Som bäddmaterial användes 540 gram kvartssand (>98 % SiO<sub>2</sub>) per försökstillfälle med en storleksfraktion på 200-250 µm.

Samtliga bränslemixar innehållande salix samt tidigare försök med grot förbrändes vid en bäddtemperatur på 800 °C medan samtliga bränslemixar innehållande halm förbrändes vid en bäddtemperatur på 730 °C. I samtliga försök förbrändes bränslet under 8 h vilket motsvarade en total eldad bränslemängd på 5 kg/försök. Under hela förbränningsfasen hölls en fluidiseringshastighet på 10\*Umf (80 Nlprim.luft/min) vilket motsvarar en hastighet om ca 1 m/s samt en utgående syrgashalt på i medel 8-10 %. Bäddprover togs ut med en luftkyld cyklonprovtagare efter 8 h och allt bäddmaterial/agglomerat togs dessutom tillvara (se fig. 5) efter varje experiment. Temperaturen i fribordet var 800 °C med en maximal avvikelse av ±10 °C i höjddled och kontrollerades genom separat temperaturreglering av eleffekten till de fem väggvärmarsektionerna.



Figur 5. Schematisk bild över fluidbäddreaktorn samt provtagningspunkter

Figure 5. Illustration of the bench scale fluidized bed reactor and the different sampling positions

Efter att allt bränsle förbränts (efter 8 timmars eldning) höjdes bäddtemperaturen isotermt med 3 °C/min med luftförvärmare och elektriska väggvärmare till dess bäddagglomerering, eller första tendens till sådan, erhöles. En gasolflamma nyttjades under denna fas för att simulera rätt förbränningsatmosfär. Maximal möjlig bäddtemperatur under de olika försöken var 1050 °C. Vid initial agglomerering

förändras fluidiseringsförhållandena så att bäddtemperaturer och differenstryck över bädden ändras. I försöken registrerades kontinuerligt två bäddtemperaturer och två differenstryck och på så sätt kunde temperaturen bestämmas med god precision när processen ”skenar iväg”. Den slutgiltiga agglomereringen/defluidiseringen identifierades tydligt genom att en snabb tryckfallssänkning över bädden uppstod.

Under inmatningsfasen (normal förbränning) kvantifierades också beläggningstillväxten på en simulerad överhettartub under 6 h med hjälp av ett s k "kallt finger", bestående av en luftkyld sond med en löstagbar provring (rostfritt stål, SS 2343). Den kylda provringen var belägen 200 mm från reaktortoppen (figur 5) vilket motsvarar en uppehållstid hos rökgaserna på ca 12 sekunder under rådande förhållande. Gastemperaturen vid provstället var  $800 \pm 5$  °C under provtiden vid alla experiment. Yttemperaturen på sonden var i medeltal 440 °C under försöken och bibehölls under hela provtiden. Provringsarna sparades för vidare semikvantitativ (SEM/EDS) och kvalitativ (XRD) kemisk analys av beläggningarnas sammansättning.

Under inmatningsfasen analyserades rökgaserna med avseende på CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, CH<sub>4</sub> och H<sub>2</sub>O med FTIR medan O<sub>2</sub>-halten registrerades med en lambdasond. Gasprovtagningen utfördes efter reaktorns cyklonavskiljare vid en rökgastemperatur på ca 200 °C och är markerad i figur 5.

För att bestämma partiklarnas (mass)storleksfördelning m a p aerodynamisk diameter<sup>i</sup> såväl som kemisk sammansättning hos respektive partikelstorlek användes en 13-steps lågtrycksimpaktor (LPI) från Dekati Ltd, som separerar partiklar i intervallet 0.03-10 µm. Provtagningen utfördes efter reaktorns cyklonavskiljare (cut-size ca 10 µm) (figur 5) vid en rökgastemperatur på ca 160 °C och impaktorn värmdes till ca 120 °C under provtagningen. Icke infettad aluminiumfolie användes som substrat i impaktorn. Provtagningen av partiklar till impaktorn utfördes isokinetiskt för att erhålla ett representativt urval av partiklarna i den varma rökgasen. Vidare bestämdes partiklarnas antalskoncentration och storleksfördelning m a p mobilitetsdiameter i intervallet 0.03-0.8 µm med en elektrisk mobilitetspektrometer (SMPS) från TSI Inc.

### ***2.2.2 Kontrollerade slaggningsförsök i undermatad pelletsbrännare***

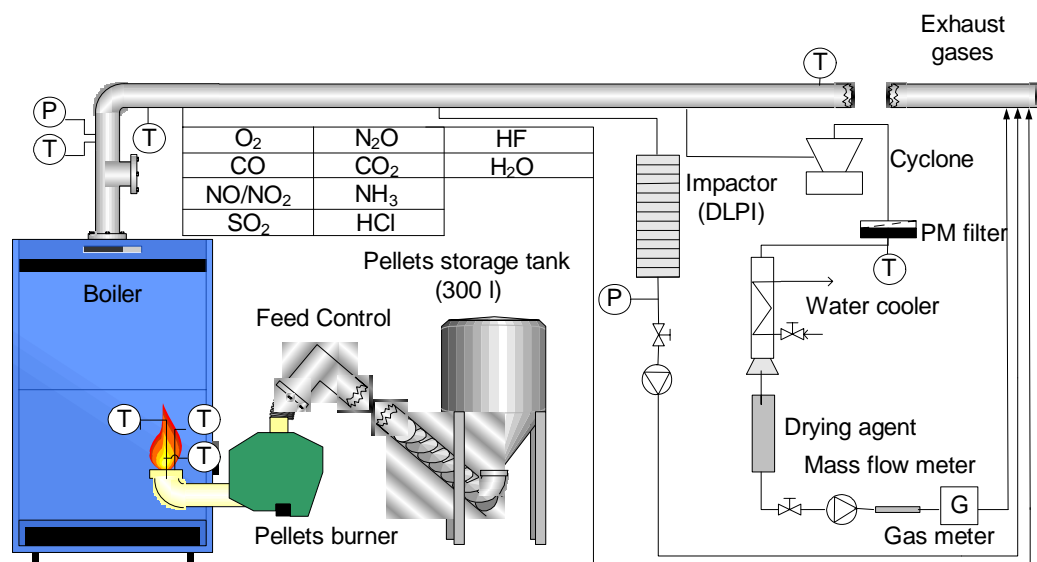
Försöken utfördes i en för teknikområdet representativ och P-märkt undermatad brännare. Försöken utfördes under 1 dygn per pelletskvalité under kontinuerlig drift (ej intermittent) vid en konstant bränsleeffekt på 12 kW. Brännaren var utrustad med temperaturmätning (termoelement typ N) vid tre positioner omkring rostret. De uppmätta maximala temperaturerna i området där eventuell aska avsätts uppskattades därigenom till 1200-1250 °C och visade ej på några signifikanta temperaturskillnader mellan de olika pelletskvalitéerna. Brännaren var under försöken dockad till en panna av märket Combifire. Gasanalyser (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO) utfördes med standardinstrument (elektrokemiska celler) samt med ett FTIR instrument (CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O). Provtagning av stoft skedde isokinetiskt i rökgaskanal vid ca 120 °C och i övrigt enligt principer i standardmetod (SS-EN 13284-1) med tillägget att en cyklon med cut-size ~8 µm var placerad innan stoffiltren. Även i dessa försök utfördes mer

---

<sup>i</sup> Aerodynamisk diameter = diametern på en sfärisk partikel med densiteten 1 g/cm<sup>3</sup> som har samma sedimenteringshastighet som den observerade partikeln.

specifik partikelprovtagning med såväl en LPI som SMPS enligt samma principer beskrivna ovan i 2.2.1 för att bestämma (mass)storleksfördelning respektive antalskoncentration/storleksfördelning. Den kemiska sammansättningen av partikelproverna från försöken både med fluidbädden och pelletsbrännaren analyserades med svepelektronmikroskop (SEM) med tillhörande energidispersiv röntgenanalys (EDS) vilket ger semi-kvantitativ information om elementarsammansättningen. Den nyttjade uppställningen för slaggningsförsöken och provtagningen framgår även av figur 6.

Efter provperiodens slut inspekterades utrustningen med avseende på beläggingsbildning (slagg). Mängden avsatt slagg (partiklar >0.3 mm) och aska (bottenaska) bestämdes. Slagg- och askprover sparades för analys med avseende på utseende och kemisk sammansättning (både kvalitativt och kvantitativt).



Figur 6. Schematisk bild över nyttjad pelletsbrännarupeställning och rökgasprovtagningens utrustning.

Figure 6. Illustration over the used pellet burner equipment and flue gas sampling set-up.

### 2.2.3 Bädd-, slagg-, beläggingsprovs- och partikelanalyser

#### Bäddprov från fluidbäddsförsöken

Bäddprov och agglomerat analyserades med SEM/EDS för att bestämma bäddkornslagrens elementarsammansättning och morfologi (struktur och form). Detta för att fastställa eventuella skillnader i skiktens/lagrens tillväxt och kemisk sammansättning mellan de olika studerade bränlemixarna. Inför elementaranalysen och tjockleksbestämningen med SEM-EDS göts proverna in i epoxi och torrslipades med SiC-papper innan tvärsnitten slutligen analyserades. Inre bäddkornsskiktet och yttre bäddkornslagret i tvärsnitten av ett antal bäddkorn (> 6 st) per bäddprov analyserades med flertalet sk punktanalyser. Dessutom analyserades även ett antal ”halsar” som bildats mellan bäddkornen i de producerade bäddagglomeraten.

### *Beläggningsprov*

Beläggningsen på provringens "läsida" analyserades med SEM-EDS genom ett flertal sk areaanalyser (100\*100 µm).

### *Slaggprov från brännarförsöken*

Den avsatta slaggens kemiska sammansättning analyserades både semi-kvantitativt m h a SEM-EDS och kvalitativt (kristallina faser) m h a pulverröntgendiffraktion (XRD). Även den uppsamlade pannaskan (bottenaskan) analyserades med XRD. Innan proverna analyserades med SEM-EDS göts de in i epoxi och slipades med SiC-papper.

### *Partikelprov*

Som nämnts tidigare provtogs partiklar för kemisk analys under försöken med såväl fluidbädd som pelletsbrännare. Partiklar som avsatts på impaktorplattorna nr 4 eller 5 (geometrisk medeldiameter GMD 0,19 respektive 0,32 µm) samt nr 10 (GMD 3.3 µm) och i vissa fall nr 12 (GMD 8.7 µm) analyserades genom areaanalyser (100\*100 µm) av representativa "partikelhögar" på respektive prov. Platta nr 4 eller 5 utgjorde "peaken" på den sk finmoden av submikrona (< 1 µm) partiklar och platta nr 10 och 12 bestod av partiklar i den sk grovmoden. Förutom areaanalyser för bulksammansättning gjordes även sk EDS-spotanalyser på ett flertal enskilda partiklar i grovmoden.

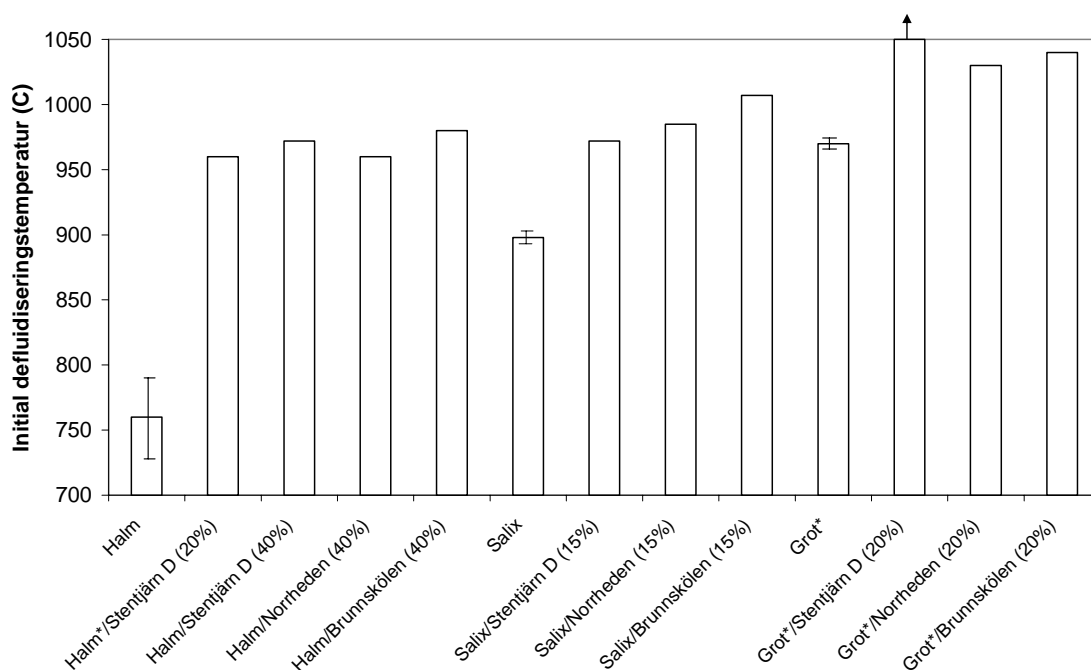
## 3 Resultat och Diskussion

### 3.1 Bäddagglomerering

#### *3.1.1 Kontrollerade bäddagglomereringsförsök*

Resultaten från bestämningen av de initiala defluidiseringstemperaturerna från respektive försök framgår av figur 7. Tidigare undersökningar med metoden har visat att agglomereringstemperaturen kan bestämmas med en precision av  $\pm 5$  °C (standardavvikelse) [25]. De ”rena” GROT-, vetehalm- samt salixbränslena resulterade i agglomereringstemperaturer på  $970 \pm 4$  °C,  $775 \pm 20$  °C respektive  $900 \pm 4$  °C. Samtliga bränslen visar därmed tendenser till bäddagglomerering i kvartsbädd vid temperaturer inom, eller i närheten av, normal drifttemperatur i fluidbäddar. Då samtliga tidigare torv/grotblandningar om 20 vikts-% inblandning av torv visat sig ge en signifikant (60-110 °C) förhöjning av den initiala defluidiseringstemperaturen och därmed kraftigt reducerat agglomereringsrisken i fluidbäddar, har inga ytterligare försök i fluidbädden med torv/grot blandningar utförts inom ramen för detta arbete. Tidigare utförda arbeten har dessutom visat att för vissa torvprov (Carex innehållande torv med höga Ca-halter; prov från Rönjoret) ger en inblandning så låg som ca 5 vikts-% på basis av mixens torrsubstans en signifikant reduktion av agglomereringsrisken vid nyttjande i typiska skogsbränslefraktioner [26].

Alla studerade salix/torvblandningar gav redan vid en inblandningsgrad om 15 vikts-% en signifikant högre (70-110 °C) initial defluidiseringstemperatur än det ”rena” salixbränslet. Vid inblandningar motsvarande 40 vikts-% av de studerade torvproverna i halm erhöles kraftigt reducerade agglomereringsrisker då den initiala defluidiseringstemperaturen ökade från 775 °C till 960-980 °C. Även vid inblandningsgrader om 20 vikts-% av TS vid nyttjande av den typiska blandtorven från Stentjärn D, erhöles en liknande reduktion i agglomereringsrisk.

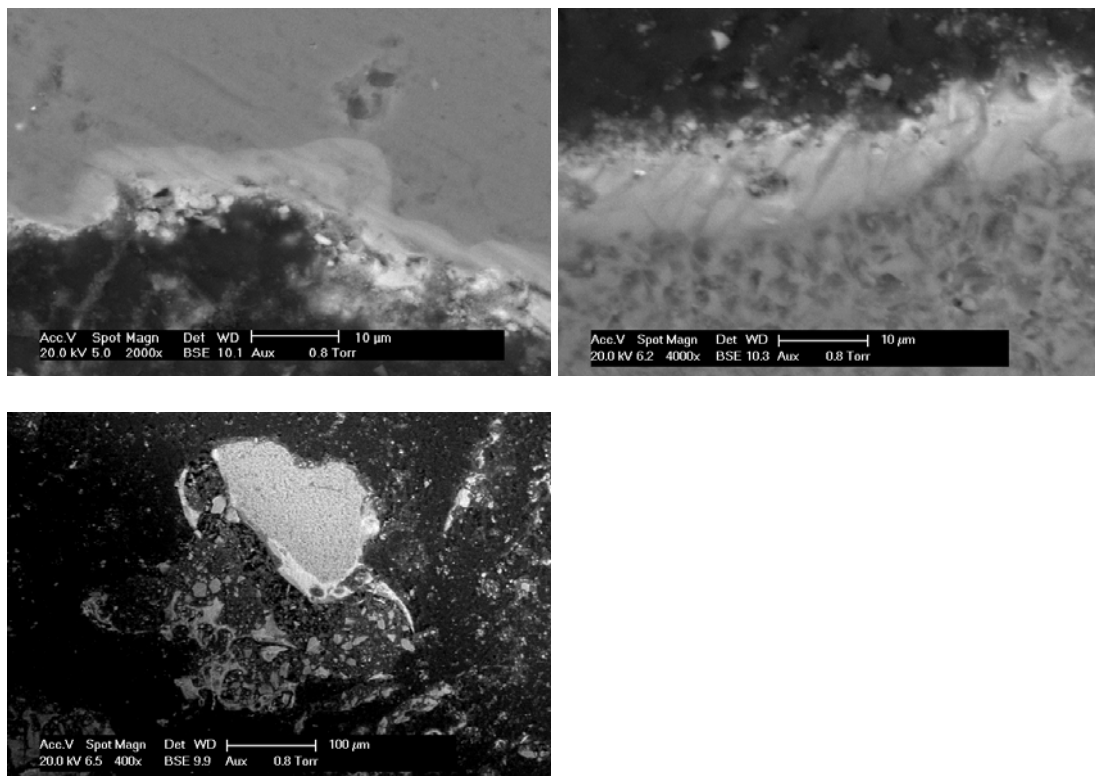


Figur 7. Erhållna initiala defluidiseringstemperaturer för de olika bränslena/bränsleblandningarna.

Figure 7. Resulting initial de-fluidization temperatures during combustion of the different fuel/fuel mixtures.

### 3.1.2 SEM/EDS analyser på bäddmaterial och agglomerat

För alla bränsletorvkombinationer återfanns lager på bäddkornen (se figur 8). Andelen återfunna bäddkorn med lagertillväxt var dock väldigt låg vid förbränning av halm och halm/torvkombinationer i jämförelse med övriga bränsle/torvkombinationer. Vid halm/torvförbränning återfanns enskilda bränsleaskkomponenter relativt frekvent som enskilda askpartiklar i bädden. Till skillnad från halm/torvförbränning återfanns lager på de flesta bäddkornen vid förbränning av alla övriga bränslekombinationer. Bäddkornslagrena var dock oftast ej heltäckande. Lagrenas tjocklek varierade och var oftast i storleksordningen 10  $\mu\text{m}$ , dock med vissa undantag. Lagrena bestod generellt av ett relativt homogent inre skikt samt ett tunnare yttre skikt med inslag av partiklar (mer heterogent). Det yttre skiktet innehöll ett större antal element och sammansättningen påminde om bränsleaskans samt var relativt tunt, oftast endast någon eller några få  $\mu\text{m}$ . Eftersom den analyserade elementsammansättningen hos det yttre lagret troligen påverkats av bakgrunden (det inre lagret) redovisas ej dess elementsammansättning specifikt i detta arbete.

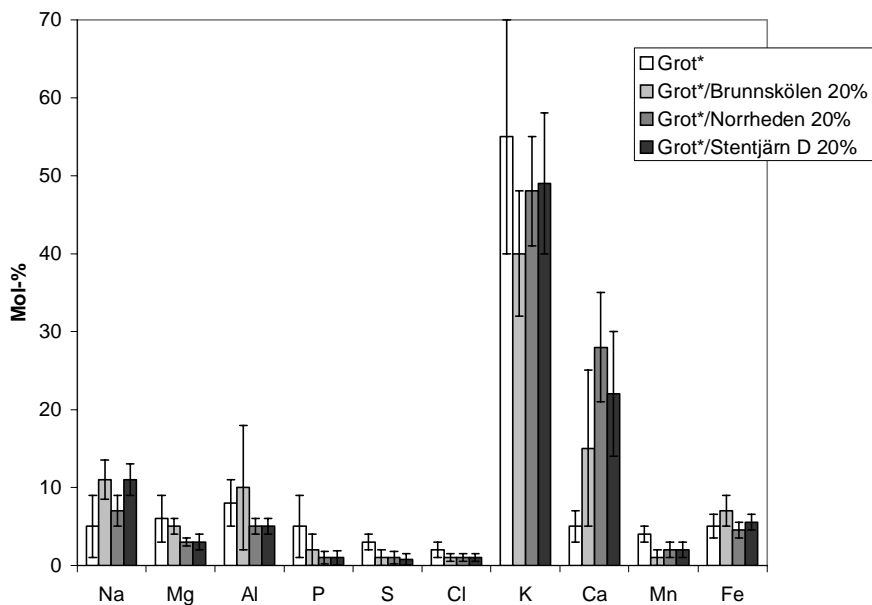


Figur 8. Typiska inre- och yttre skikt på bäddkorn vid förbränning av en grot/torvmix (ovan vänster), salix/torvmix (ovan höger) samt ham/torvmix (nedan).

Figure 8. Illustration of typical inner- and outer layers of bed particles sampled during combustion of a logging debris/peat mixture (upper left), willow/peat mixture (upper right) as well as straw/peat mixture (lower).

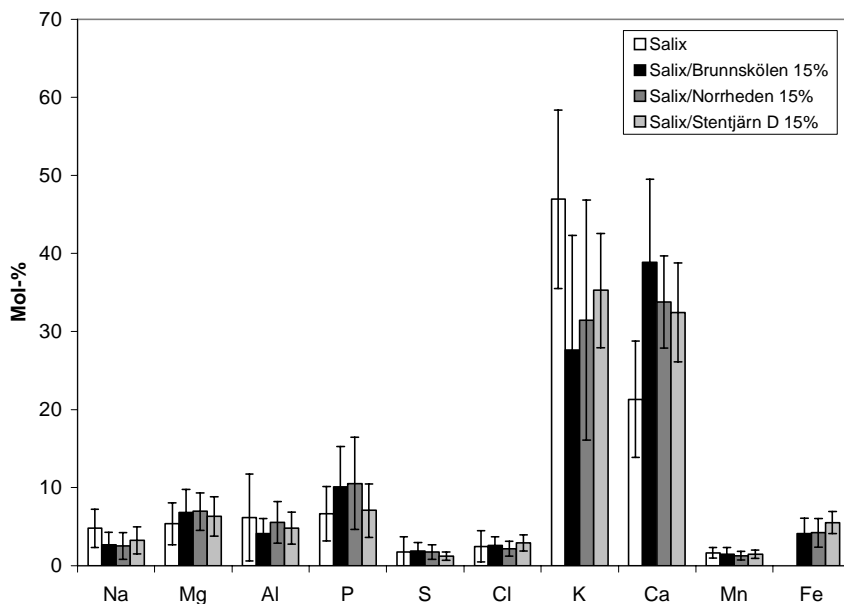
Det inre bäddkornsskiktets elementsammansättning dominerades av elementen kisel, kalium och syre vid förbränning av det tidigare studerade ”rena” grotbränslet, se figur 9 [19]. Resultaten i figur 9-11 redovisas på kisel och syrefri bas för att minimera eventuella skillnader i analyserad elementsammansättning som kan uppkomma p g a bakgrunden från kvartskornet. Vid inblandning av torv i bränlemixen återfanns även kalcium i relativt höga halter i det inre skiktet samtidigt som halten kalium minskade, vilket var en tydlig skillnad jämfört med försöken med ren grot (figur 9). Liknande resultat erhöles även vid sameldning i grot för alla de torvprover (8 st) som studerades i den tidigare etappen [19].

Vid förbränning av salix återfanns framförallt kisel, syre, kalium och kalcium i de inre bäddkornslagrena (figur 10). Även här ökade kalciumhalten signifikant vid inblandning av de nyttjade carexinnehållande torvproverna. SEM/EDS-analyser av de agglomerat som bildades vid förbränning av både ”ren” grot och salix samt mixar med torv visade att sammansättningen på ”halsarna” (figur 12) liknade sammansättningen på det inre bäddkornsskiktet. Detta stärker ytterligare hypotesen att sammansättningen av det inre skiktet runt bäddkornen har en betydande inverkan på bäddagglomereringstendensen. Även hos dessa bäddkornshalsar ökade andelen kalcium vid torvinblandning.



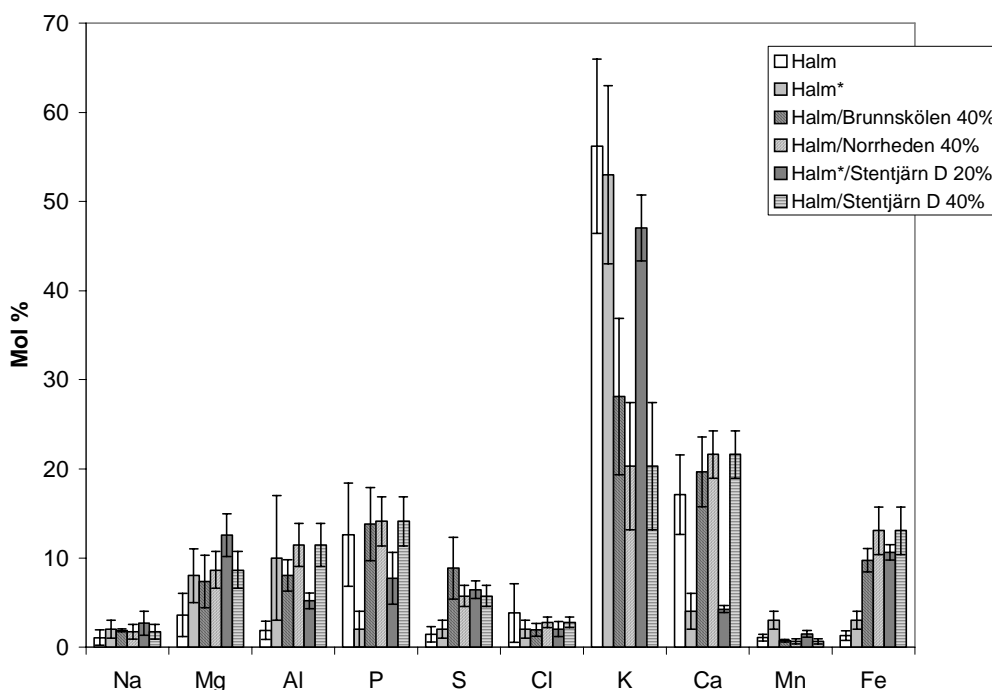
Figur 9. Elementsammansättning (syre-, kol- och kiselfri bas) hos det inre bäddkornslagret vid förbränning av grot och grot/torvmixar.

Figure 9. Elemental composition (oxygen-, carbon- and silicon free basis) of inner bed particle layers in combustion of logging debris and logging residues/peat mixtures (upper).



Figur 10. Elementsammansättning (syre-, kol- och kiselfri bas) hos det inre bäddkornslagret vid förbränning av salix och salix/torvmixar.

Figure 10. Elemental composition (oxygen-, carbon- and silicon free basis) of inner bed particle layers in combustion of willow and willow/peat mixtures.



Figur 11. Elementsammansättning (syre-, kol- och kiselfri bas) hos det inre bäddkornslagret vid förbränning av halm och halm/torvmixar (nedan).

Figure 11. Elemental composition (oxygen-, carbon- and silicon free basis) of inner bed particle layers in combustion of straw and straw/peat mixtures (lower).

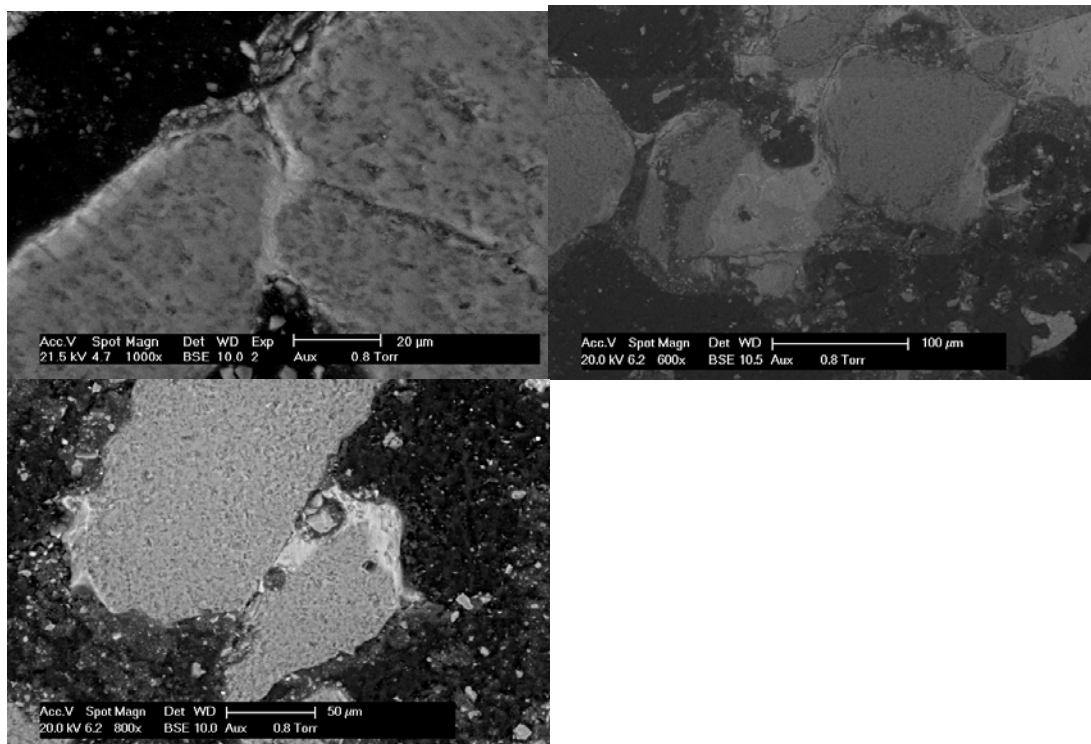
Analyserna av de bäddkornslager som återfanns på bäddkornen vid halmförbränning dominerades av kisel, syre och kalium (se figur 11). Sammansättningen liknar relativt väl sammansättningen hos bränsleaskan såväl som de enskilda askpartiklar som återfanns i bädden. Resultaten bekräftar de resultat som redovisats i tidigare arbeten, d v s att bäddagglomereringsmekanismen för kiselrika bränslen med innehåll av kalium (typiskt stråbränslen) skiljer sig mot dem där kalium och kalcium dominerar bränsleasksammansättningen (t ex i skogsbränslen och salix) vid förbränning i kvartsbädd. Halmens agglomereringsmekanism kan till stor del beskrivas med att smälta enskilda askpartiklar och kletig aska på brinnande bränslepartiklar kolliderar med bäddmaterialpartiklarna och bildar agglomerat och/eller där de smälta askpartiklarna först kolliderar med bäddpartiklarna vilket resulterar i lagertillväxt, som till viss del kan interagera med bäddmaterialet, och därefter sker eventuell agglomeratbildning. Vid inblandning av torv i halm reducerades kaliumhalten medan halten järn, svavel och i vissa fall även kalcium ökade i såväl återfunna lager som bäddkornshalsar i agglomerat. Traditionella biobränslen med relativt låg kiselhalt i bränslet agglomererar däremot oftast genom en kombination av mekanismerna där alkali och kalcium, via bl.a. reaktion med bäddmaterialet, ger en klabbig lagertillväxt på bäddmaterialet.

Eftersom långt ifrån alla korn hade ett täckande inre och/eller yttre skikt samt att täckningsgraden för skikten varierade i så stor omfattning, omöjliggjordes en kvantitativ bedömning av omfattningen av beläggingsbildningen med SEM/EDS. En totalanalys

av bäddmaterialets elementarsammansättning m h a ICP-AES analys gjordes dock i projektetapp 1 för att fastställa om det var någon signifikant skillnad mellan försöken med "ren" grot och när torv ingick i bränslemixen [19]. Utifrån de analyserna kunde tendenser till förhöjda kalciumhalter och något sänkta kaliumhalter skönjas när torv användes i bränslemixen. Detta visade på att inblandning av torv i bränslemixen resulterade i att mängden kalium från bränslet som fångades upp i bädden minskades samtidigt som torvens kalcium förekom i högre omfattning i de bildade skikten runt bäddkornen. Utifrån den regressionsmodell som anpassades till den uppmätta agglomereringstemperaturen utifrån den försöksplan där torvarna valts baserat på deras variation av huvudaskelement (Ca, Al, Si, Fe, S), framgick att kalciumhalten tillsammans med aluminium var de studerade parametrar hos de utvalda torvarna som påverkade bäddagglomereringstemperaturen mest [19].

Resultaten från denna studie visar därmed att vid inblandning av torv i grot och salixbränslet minskar halten kalium i det inre skiktet samtidigt som halten kalcium ökar. Denna förändring i sammansättning hos det inre skiktet resulterar i att smältpunkten höjs betydligt [27]. Detta är av stor betydelse då resultaten från tidigare undersökningar visat att sammansättningen och därmed smältförloppet hos de bildade inre bäddkornsskikten starkt påverkar bäddagglomereringstendensen. Den minskade totala halten kalium i bädden kan sannolikt i huvudsak förklaras av två mekanismer; i) borttransport och/eller överföring av alkali i gasfas via sorption till den kvarvarande reaktiva torvaskan (innehållande Ca, Si m.m.) under bildandet av partiklar (som transporteras bort från bädden) och/eller ii) via fasta svavelrika föreningar som vid nyttjande av svavelrika torvar fångar upp kalium så det förekommer i en mindre reaktiv form (se vidare i kap 3.2). Tidigare undersökningar har även visat att kalcium kan tränga ut kalium i silikatsmältor vilket också kan bidra med en sänkning av totala mängden kalium som återfinns i bäddkornslagrena [28]. Eftersom lermineral detekterades endast hos ett av de åtta ursprungliga studerade torvproverna [19] antas överföring av kalium i gasfas via sorption av lermineraler till mindre problematiska föreningar vara av generellt underordnad betydelse vid sameldning med svensk torv.

Vid inblandning av torv i halm ökade innehållet av järn, svavel och kalcium vilket också avspeglas i sammansättningen hos de enskilda askpartiklar som återfanns i bädden. Detta kan förändra askans smältbeteende vilket i sin tur påverkar agglomereringsrisken. En utspädning och/eller faktisk reduktion av kalium hos dessa enskilda askkomponenter samtidigt med en ökning av övriga element påverkar med all sannolikhet agglomereringsrisken positivt.



Figur 12. Typiska bäddagglomerat återfunna efter förbränning av en grot/torvmix (ovan vänster), salix/torvmix (ovan höger) samt halm/torvmix (nedan vänster).

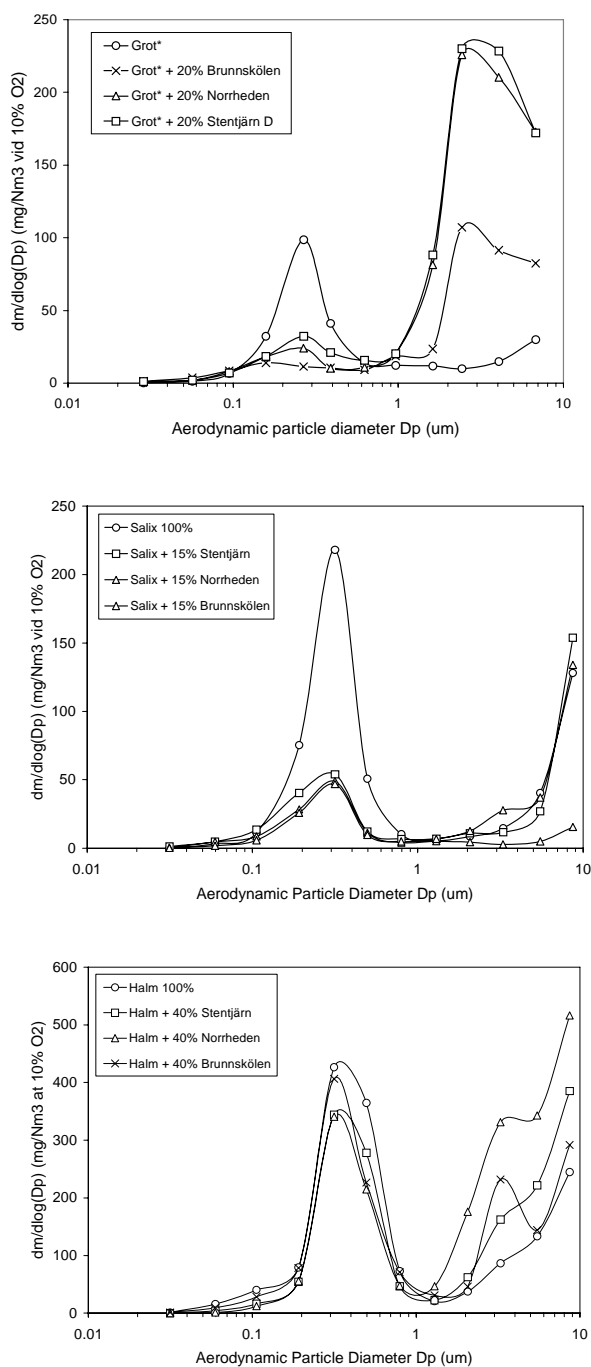
Figure 12. Illustration of produced typical agglomerates during combustion of a logging debris/peat mixture (upper), willow/peat mixture (middle) as well as straw/peat mixture (lower).

## 3.2 Beläggningssbildning fluidbäddsförsök

### 3.2.1 Partikelstorleksfördelning och HCl-emissioner

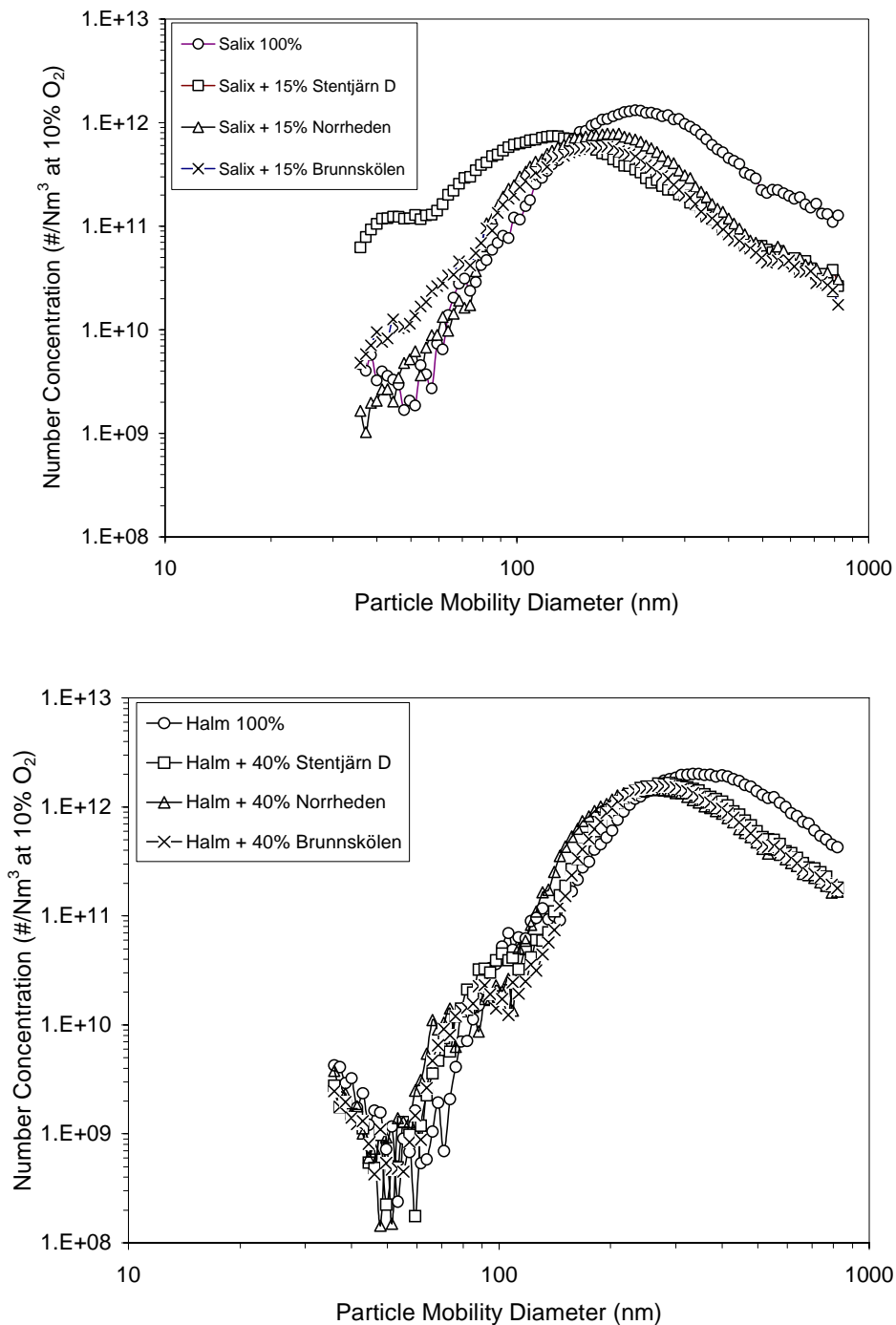
Resultaten från försöken i fluidbäddsreaktorn visar på en tydlig bimodal (mass)storleksfördelning med en mod av fina ( $<1 \mu\text{m}$ ) partiklar och en mod med grova ( $>1 \mu\text{m}$ ) partiklar (se figur 13). Detta är en typisk fördelning av partiklar i rökgaser från förbränning av fasta bränslen där de fina partiklarna bildats av askämnen som förångats från bränslet och kondenserar då rökgaserna kyls av eller produkter från ofullständig förbränning (sot och kolväten). De grövre partiklarna består i huvudsak av fast eller smält material som följer med rökgaserna direkt från bränslet, t ex mineralkorn och bildade smältadroppar. Det kan även förekomma oförbrända bränslerester i denna fraktion. Resultaten visar på en tydlig reduktion av mängden (massan) fina ( $<1 \mu\text{m}$ ) partiklar vid inblandning av torv i grot och salix medan ingen sådan tydlig effekt kan ses vid inblandning av torv i halm. För de grövre partiklarna ( $>1 \mu\text{m}$ ) tycks en tydlig ökning föreligga vid inblandning av torv i grot och halm medan denna ökning ej kunde detekteras, utifrån de utförda impaktormätningarna, vid inblandning av torv i salix (figur 13). Resultaten från SMPS-mätningarna visar också, i enlighet med resultat från impaktorn (massstorleksfördelning) att antalet fina partiklar reducerades vid inblandning av torv i salix medan denna effekt inte är lika tydlig för halm (se figur 14).

Antalsstorleksfördelningarna bestämdes ej i den föregående projektetappen varvid inga sådana resultat redovisas från förbränningsförsöken med grot/grottorv.



Figur 13. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna från försöken med förbränning av grot och grot/torvmixar [19] (ovan), salix och salix/torvmixar samt halm (mitten) och halm/torvmixar (nedan) i en BFB (pilotreaktor).

Figure 13. Particle mass size distributions in the flue gases during combustion of logging debris and logging debris/peat mixtures (upper) [19], willow and willow/peat mixtures (middle) and straw and straw/peat mixtures (lower) in a pilot BFB.

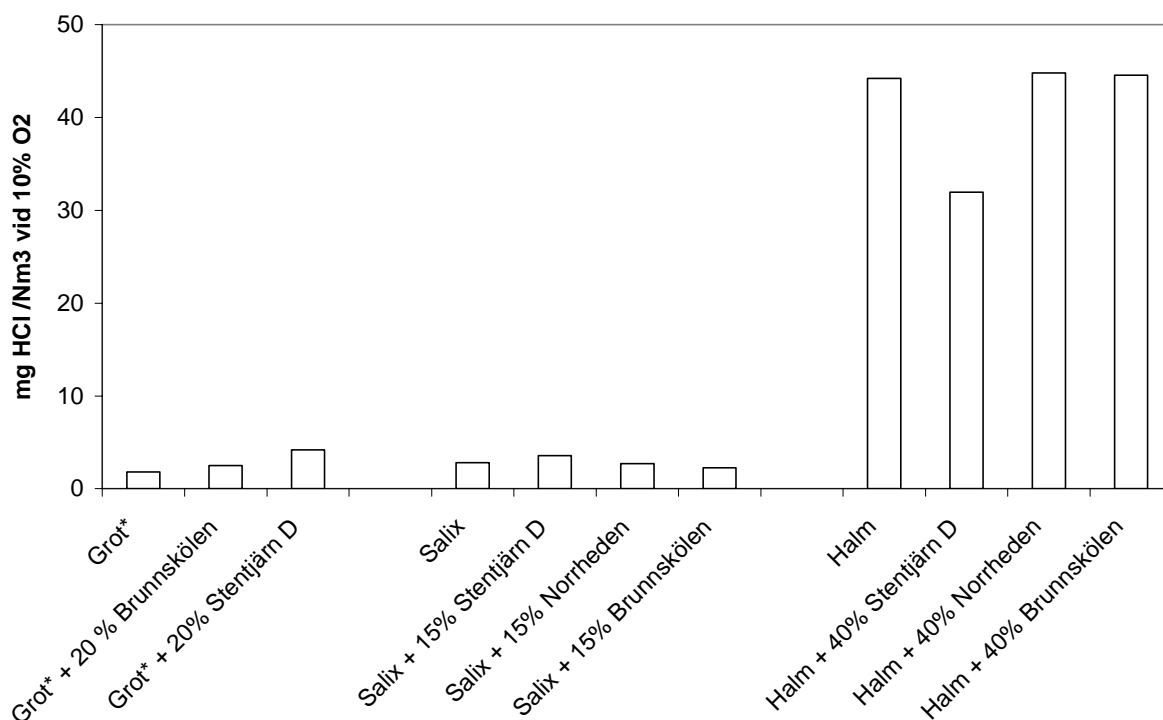


Figur 14. Partikel (antals)storleksfördelningar ( $<1\ \mu\text{m}$ ) i rökgaserna från försöken med förbränning av salix och salix/torvmixar (ovan) samt halm och halm/torvmixar (nedan) i en BFB (pilotreaktor).

Figure 14. Fine particle ( $<1\ \mu\text{m}$ ) number size distributions in the flue gases during combustion of willow and willow/peat mixtures (upper) as well as straw and straw/peat mixtures (lower) in a pilot BFB.]

Av figur 15 framgår att tendenser till ökade HCl-halter kan skönjas vid inblandning av torv i grot och i vissa fall även för salix. Då de uppmätta HCl-halterna är låga för grot/grot-torv- och salix/salix-torvförsöken är det svårt att utifrån den metodik som

nyttjas dra några definitiva slutsatser från dessa mätningar. Vid halmförbränning var dock HCl-halterna relativt höga och här ökade inte halterna vid torvinblandning.



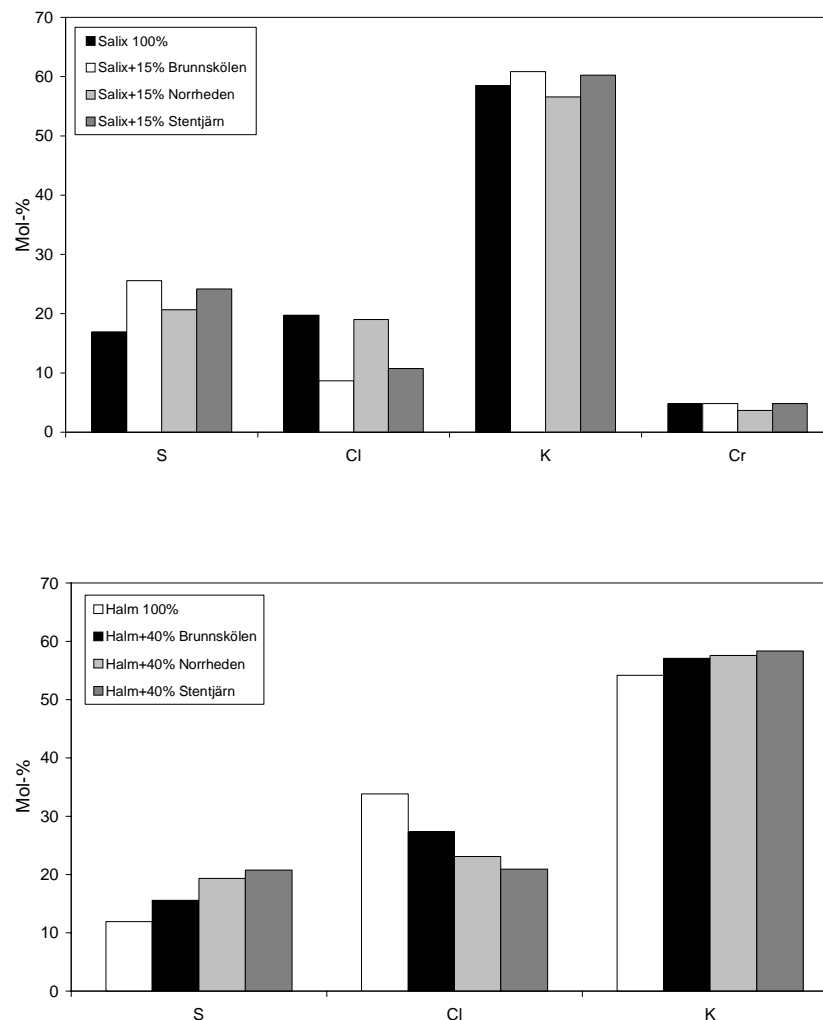
Figur 15. HCl-emissioner vid förbränning av grot och grot/torvmixar [19], salix och salix/torvmixar samt halm och halm/torvmixar i en BFB (pilotreaktor). Värden redovisade som medelvärden under typiska driftperioder från respektive försök.

Figure 15. Emissions of HCl during combustion of logging debris and logging debris/peat mixtures [19], willow and willow/peat mixtures as well as straw and straw/peat mixtures in a pilot BFB, given as average values during periods of typical operational conditions.

### 3.2.2 Partikelsammansättning

#### Fin partikel fraktion (< 1 μm)

De fina partiklarna (<1 μm) innehöll i samtliga fall låga halter (5-10 vikt-%) av elementet kol och de utgående CO-emissionerna var extremt låga (<10 ppm). Detta tyder på att förbränningen varit mycket god med lågt tillskott av oförbränt material i form av sot och kolväten till partiklarna.



Figur 16. Elementarsammansättning (mol-%) för fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD 0.19  $\mu\text{m}$ , eller nr 5, GMD 0.32  $\mu\text{m}$ ) vid försök med salix och salix/torvmixar (ovan) samt halm och halm/torvmixar (nedan) i en BFB (pilotreaktor). Al, C och O är exkluderade och övriga analyserade element (Mg, Si, P, Ca, Mn, Fe, Cu, As, Rb, Cd och Pb) förekom i lägre koncentrationer än 2 vikt-%, och redovisas därför ej p g a begränsningar i analysmetoden.

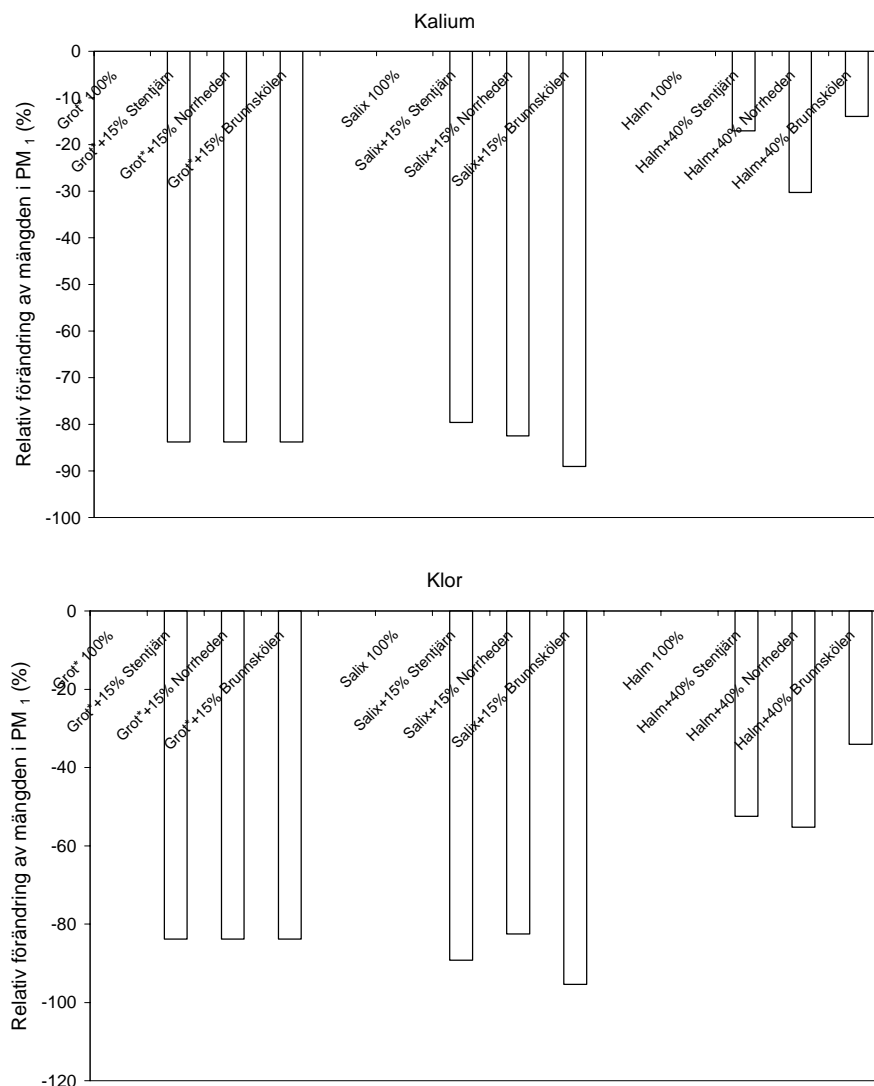
Figure 16. Elemental distribution (mole-%) of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD 0.19  $\mu\text{m}$ , or stage 5, GMD 0.32  $\mu\text{m}$ ) sampled during combustion of willow and willow/peat mixtures (upper) as well as straw and straw/peat mixtures (lower) in a pilot BFB. The elements Al, C, O were excluded and all other analyzed elements (Mg, Si, P, Ca, Mn, Fe, Cu, As, Rb, Cd and Pb) were below 2 weight-%.

Av figur 16 framgår att elementen kalium, svavel och klor dominerade den fina partikelfractionen fullständigt. Vid förbränning av salix återfanns även en mindre mängd krom. Vid torvinblandning ökade svavelhalten något medan klorhalten sjönk, framförallt vid inblandning av den svavelrika torven från Stentjärn D. Liknande resultat erhöles även i den tidigare studien då grot sameldades med torv enligt samma metodik [19]. Utifrån en analys av mol-kvoten  $(K+Na)/(2S+Cl)$  kan indikationer om huruvida det finns ett potentiellt överskott av alkali som då sannolikt föreligger som karbonater

bestämmas. Utifrån denna analys kunde inget sådant överskott skönjas vilket tyder på att provet inte innehåller några karbonater.

Vid en uppskattning (utifrån elementanalys och utgående totala massfraktion) av skillnader i den totala mängden kalium och klorrika partiklar som återfinns i finpartikelfraktion ( $<1 \mu\text{m}$ ) från respektive försök (se figur 17) framgår det tydligt att dessa minskade vid inblandning av samtliga nyttjade torvprover då grot och salix nyttjades. Även vid inblandning av torv sker en sådan reduktion, men eftersom halmen har en relativt hög kalium- och klorhalt så var effekten på (reduktionen av) halterna kalium och klor i de fina partiklarna betydligt mindre även vid en torvtillsats motsvarande 40 vikts-% av bränslmixen. Dessa beräkningar gjordes med antagandet att sammansättningen av partiklarna i hela finmoden (hela massan av  $\text{PM}_{10}$ ) var densamma, d v s överensstämmer med den som detekterats vid analysen av "peaken" i finmoden, vilket varit fallet i tidigare studier.

Resultaten utifrån tidigare utförda termokemiska modellberäkningar, där smältförloppet hos partiklarna med en storlek  $<1 \mu\text{m}$  vid grot- och grot/torvförbränning modellerats utifrån analyserad elementarsammansättning, visar att andelen smälta minskar vid inblandning av torv [19]. Då liknande tendenser vad gäller skillnader i sammansättning observerats då salix sameldats med torv i denna studie är det sannolikt att liknande resultat skulle erhållas även i salixfallet. Eftersom mängden (massan) fina partiklar reducerades vid inblandning av torv indikerar beräkningarna att mängden smälta som återfinns i finpartikulärt material kraftigt reduceras vid inblandning av torv i grot och salix. En minskad mängd smälta i partiklarna resulterar i en minskad tendens till att partiklarna deponerar, d v s impakterar på ytor i reaktorn, då "klistriheten" sänkts, vilket i sin tur naturligtvis är positivt ur en beläggningssynpunkt.

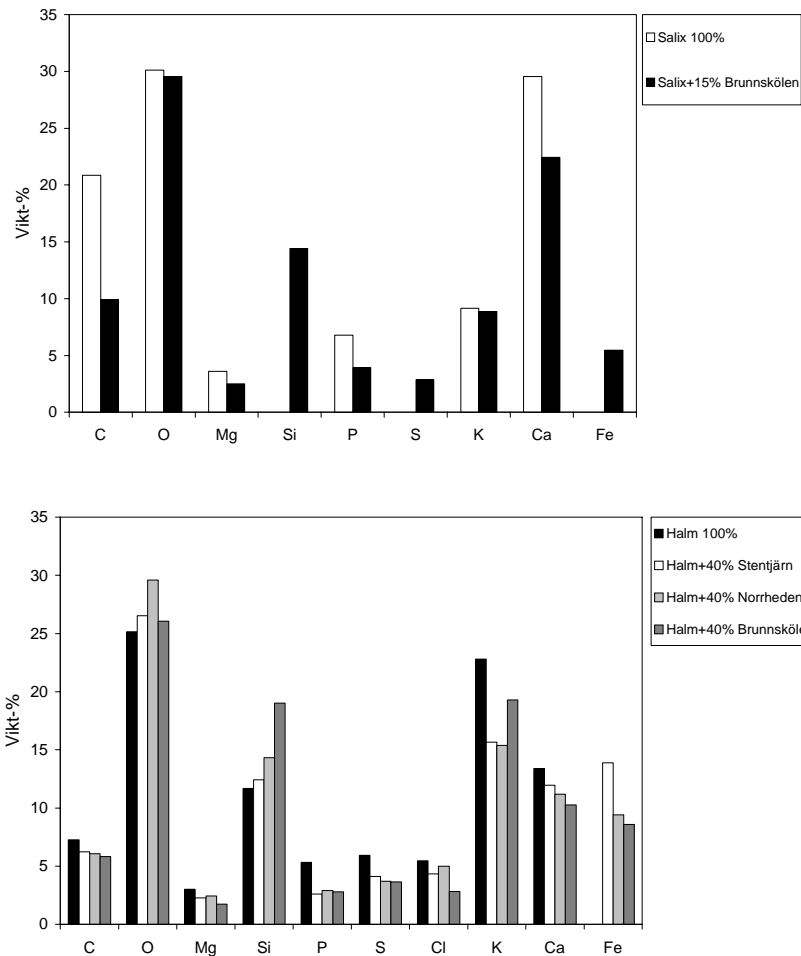


Figur 17. Relativ förändring av mängden kalium (ovan) och klor (nedan) återfunna i den fina partikelfraktionen ( $< 1 \mu\text{m}$ ), dvs avgången från bränslebädden, vid försöken i en BFB (pilottreaktor) med inblandning av torv i grot [19], salix och halm.

Figure 17. Relative differences in potassium (above) and chlorine (below) amounts found in the fine particle mode, i.e. released from the fuel bed, during co-combustion of peat in logging residues [19], willow and straw in a pilot BFB.

#### Grov partikelfraktion ( $> 1 \mu\text{m}$ )

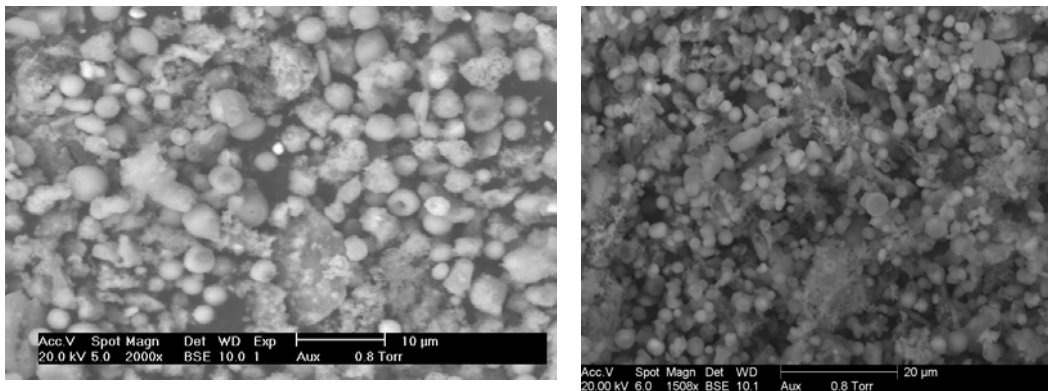
Elementarsammansättningen hos den grova partikelfraktionen (GMD  $3.3 \mu\text{m}$ ) visade att kalcium, syre, kol och kalium dominerade provet vid ren salixförbränning. Vid förbränning av halm återfanns framförallt elementen kalium, kalcium, syre och kisel, detsamma gäller vid ren grotförbränning [19]. Vid tillförsel av torv ökade kisel- och järnhalterna i samtliga analyserade prov.



Figur 18. Elementarsammansättning (vikt-%) för grova partiklar (impaktorsteg nr 10, GMD 3.3  $\mu\text{m}$ ) vid försöken i fluidbädd (pilotreaktor) med inblandning av torv i salix (ovan) och halm (nedan). Al är exkluderade och icke redovisade element (Mn, Cu, As, Rb, Cd och Pb) förekom i lägre koncentrationer än 2 vikt-%, och redovisas därför ej p g a begränsningar i analysmetoden

Figure 18. Elemental distribution (weight-%) of the coarse mode particles (e.g. impactor stage 10, GMD 3.3  $\mu\text{m}$ ) sampled during co-combustion of peat with willow (upper) and straw (lower) in a pilot BFB. Al was excluded and all other analyzed elements (Mn, Cu, As, Rb, Cd and Pb) were below 2 weight-% and therefore not accounted for because of limitations in the analytical method.

Ett mindre antal analyser av partiklar samlade på impaktorplatta nr 12 (GMD 8.7  $\mu\text{m}$ ) kunde även utföras och dessa tyder på att sammansättningen i stort (medel från areaanalys) liknar den som redovisas i figur 18 ovan från platta nr 10. Grovmoden bestod till största delen av sfäriska partiklar (se exempel i figur 19) även om mer oregelbunda partiklar och större agglomerat (sjok) av fina partiklar även återfanns. Utifrån en tidigare mer detaljerad SEM/EDS-analys av dessa sfäriska partiklar i grovmoden vid inblandning av torv i grot framgick det att de hade ett ungefärligt molförhållande mellan kalcium och kisel på 1 samt att andelen kalium i dessa partiklar var relativt hög [19].



Figur 19. SEM bilder tagna på partiklar på impaktorplatta nr 10 (GMD 3.3  $\mu\text{m}$ ) från förbränningsförok med torvinblandning i grot (vänster) samt i halm (höger) i fluidbädd (pilotreaktor).

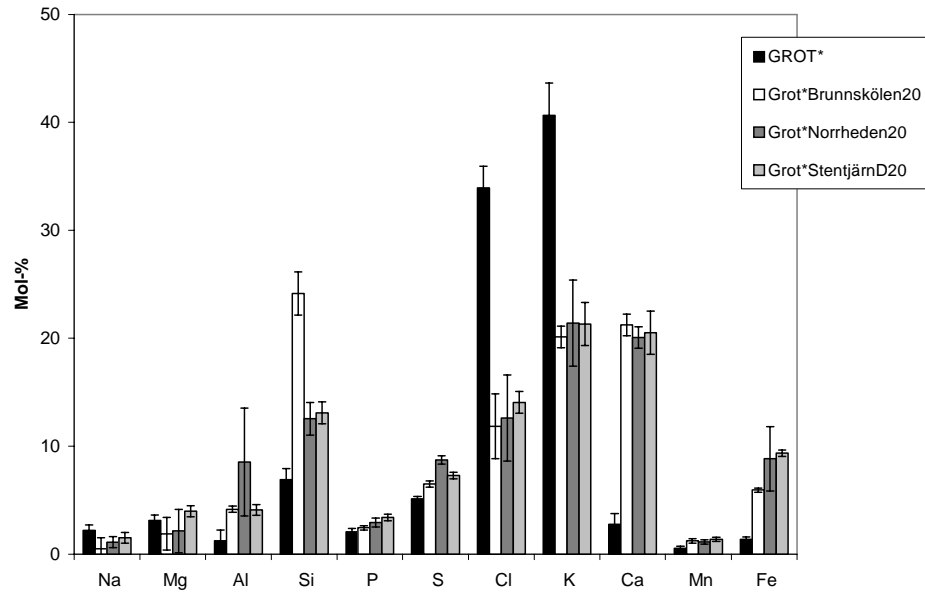
Figure 19. SEM images of particulate samples from impactor stage 10 (GMD 3.3  $\mu\text{m}$ ) sampled during co-combustion of peat with logging residues (left) and wheat straw (right) in a pilot BFB.

Vid en uppskattning av skillnader i de bildade mängderna kaliumrika partiklar från respektive försök observerades att mängden emitterat kalium ökade markant i grovmoden när torv blandades i bränslemixen med grot [19]. Utifrån tidigare utförda analyser på cyklonaskan vid inblandning av torv i grot framgick även att denna fraktion var rik på sfäriska partiklar innehållande kisel, kalcium och kalium [19]. Kaliumhalten i bädden ökade inte vid inblandning av torv i salix (snarare tvärtom). Därför är det troligt att det kalium som signifikant reducerats i den fina partikelmoden med största sannolikhet återfinns i cyklonaskan. Denna ökade mängd kalium i den grova partikelfractionen har sitt ursprung i bränslet och har troligtvis och till största delen frigjorts från bädden via sorption följt av reaktion med återstoden av torvaskan och slutligen fragmentering under bildandet av större partiklar ( $>1 \mu\text{m}$ ) där kaliumet är bundet i en mindre reaktiv form. Dessa partiklar följer sedan således med rökgaserna från bränslebädden.

### 3.2.3 Beläggningarsbildning på kyld provsönd

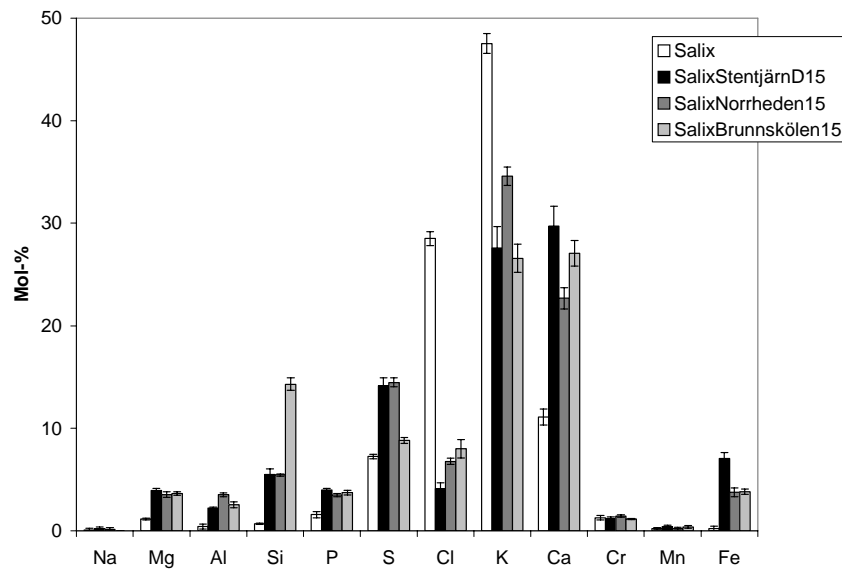
Elementarsammansättningen på de bildade beläggningarna på den kylda sondens läsida utgjordes för samtliga bränslen/bränslemixar framförallt av finpartikulärt kalium-, klor- och svavelinnehållande material. Men beläggningarna hade även, framförallt vid torvinblandning, en viss inblandning av grövre fraktioner innehållande kalcium, kisel, aluminium och järn, vilket framgår av figur 20-22. Vid inblandning av torv i grot och 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 ( $<1 \mu\text{m}$ ). Tidigare utförda XRD-analyser på grot- och grot/torvbeläggningarna har visat att kaliumklorid och kaliumsulfat är de dominerande identifierade kristallina faserna i beläggningar på sondens läsida [19]. Eftersom tidigare arbeten kring beläggningarsbildning och högttemperaturkorrosion 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.



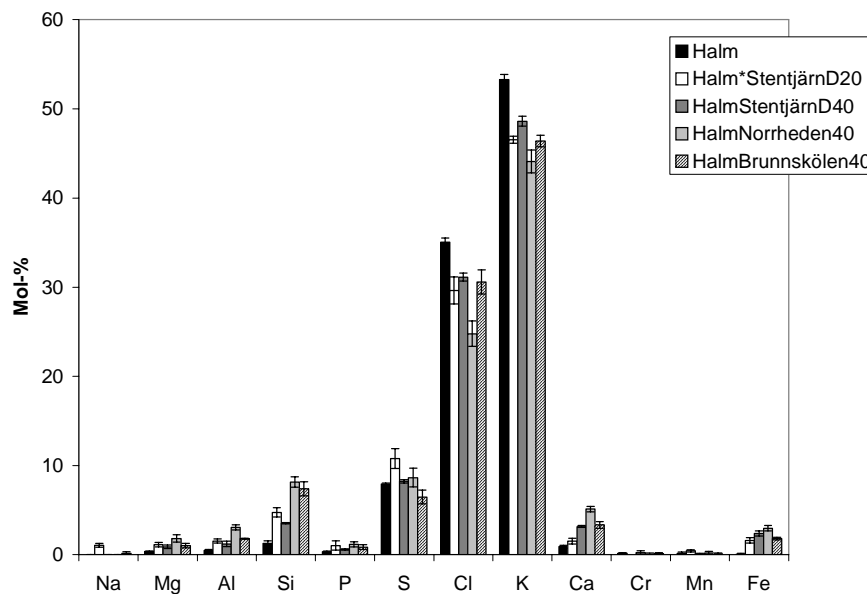
Figur 20. Elementarsammansättning på O- och C-fri sammansättning avsatt på sondens läsida vid förbränning av grot och grot/torvbränslen [19].

Figure 20. Elemental composition of lee-side deposits on O- and C-free basis at combustion of logging debris and logging debris/peat mixtures [19].



Figur 21. Elementarsammansättning på O- och C-fri sammansättning avsatt på sondens läsida vid förbränning av salix och salix/torvmixar.

Figure 21. Elemental composition of lee-side deposits on O- and C-free basis at combustion of willow and willow/peat mixtures.



Figur 22. Elementarsammansättning på O- och C-fri sammansättning avsatt på sondens läsida vid förbränning av halm och halm/torvmixar.

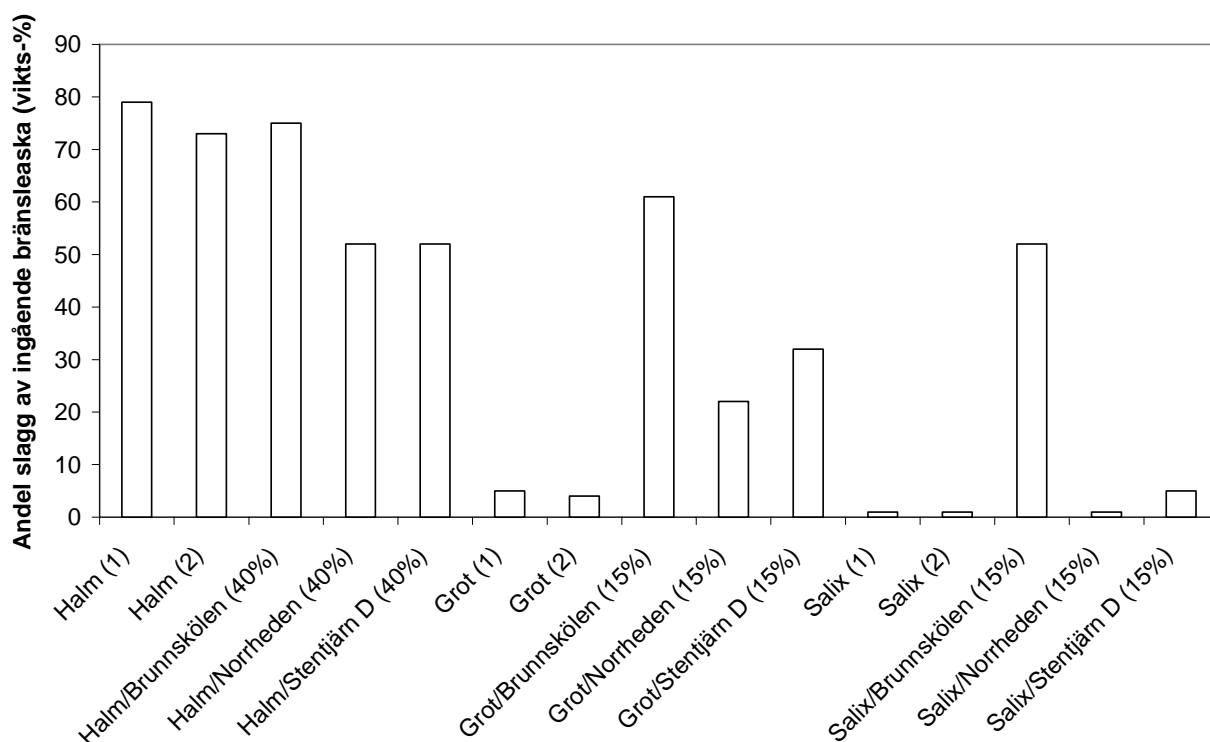
Figure 22. Elemental composition of lee-side deposits on O- and C-free basis at combustion of straw and straw/peat mixtures.

Flertalet tidigare utförda arbeten har visat både på betydelsen av mängden smält material hos den finpartikulära fraktionen för beläggningstillväxten [29] och på betydelsen av smälta klorinnehållande alkaliföreningar för klorinducerad korrosion [30]. Den beläggningstillväxt som vid förbränning av biomassa uppkommer på en panntubs läsida består ofta av något mer finpartikulärt lågsmältande material, som bl a utgörs av kondenserbara föreningar. Beläggningstillväxten som uppkommer på en panntubs vindsida ofta domineras däremot av mer grovpartikulärt material, vilket även visades i denna studie. Eftersom det material som ansamlades på beläggningssondens läsida bestod av både finpartikulärt, samt en del mer grövre partikelfraktioner var det svårare att bedöma om de uppkomna skillnaderna i den kemiska sammansättningen härrörde från skillnader i den deponerade grova eller fina/kondenserbara fraktionen. Utifrån resultaten från impaktorprovtagningen samt de kemiska analyser som utfördes på den fina partikelfractionen framgick dock klart att mängden kalium och framförallt klor som återfanns i finpartikulär fraktion reducerades kraftigt vid inblandning av torv i bränslet, framför allt för grot och salix. Resultaten från de tidigare utförda termokemiska modellberäkningarna indikerade dessutom att andelen smälta i den finpartikulära fraktionen reducerades vid inblandning av torv. En minskad mängd kalium och klor i beläggningarna totalt sätt kombinerat med en minskad andel smälta i det deponerade materialet resulterar därför både i en reducerad beläggningstillväxt generellt och dessutom lägre påverkan av klorinducerad korrosion.

### 3.3 Slaggbildning i brännare

#### 3.3.1 Avsatta mängder

Alla försök 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 brännkoppen återfanns också oförbränt material. Slagg återfanns även på pannbotten i flertalet försök. Av figur 23 framgår att de rena salix- och grotbränslena hade relativt låg slaggnings-tendens och den rena halmen relativt hög slaggnings-tendens. Vid inblandning av torv i grot- och salixbränslena ökade slaggnings-tendensen för alla de nyttjade torvproverna. Detta var särskilt tydligt vid inblandning av det relativt kiselrika torvbränslet från Brunnskölen. Vid inblandning av torv från Norrheden och Stentjärn D i halm reducerades däremot slaggnings-tendensen något.



Figur 23. Andel bildad slagg i eldningsutrustningen uttryckt i vikt-% av ingående mängd bränsleaska vid förbränning av halm och halm/torvmixar, grot och grot/torvbränslen samt salix och salix/torvmixar i en pelletsbrännare (roster).

Figure 23. Fraction of fuel ash that form slag (wt-%) during combustion of straw and straw/peat mixtures, logging residue and logging residue/peat mixtures as well as willow and willow/peat mixtures in a pellet burner (grate).

### 3.3.2 Kemisk sammansättning

Resultaten från SEM/EDS-areaanalyserna visar att de bildade slaggerna (se figur 24-26) framförallt innehöll kisel, kalcium och kalium, troligen olika K/Ca-silikater. Inga elementsammansättningar redovisas för slaggprover från salix då de producerade slaggmängderna var för små för att kunna utföra representativa analyser. Vid inblandning av torv ökade i samtliga fall järnhalten i slaggprovena. I försöket med inblandning av det kiselrika torvprovet från Brunnskölen i grot, ökade dessutom kiselhalten i slaggprovet medan kalciumhalten reducerades. Vid inblandning av torv i halm reducerades i samtliga fall kalium- och kiselhalterna i slaggprovena kalciumhalterna ökade något.

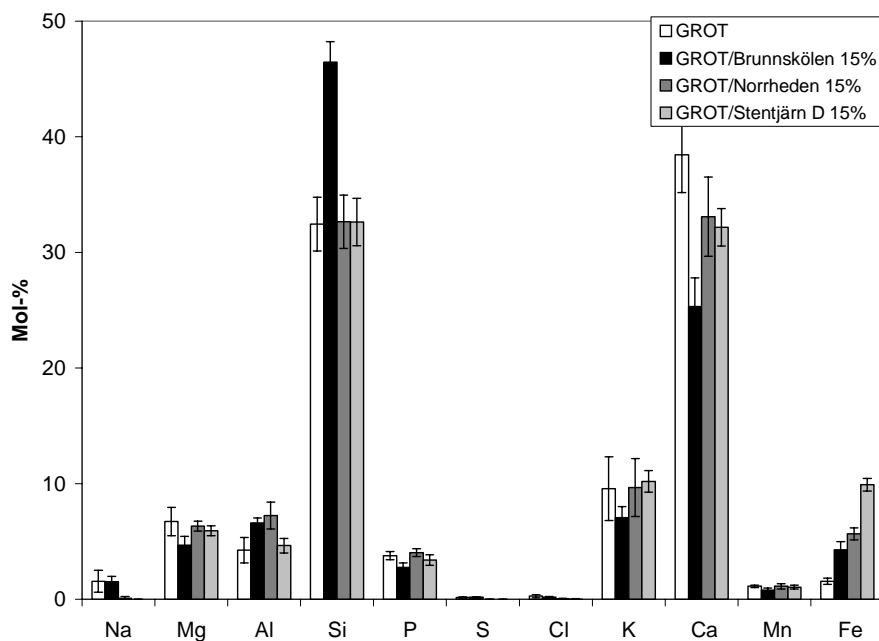
De uttagna slaggproverna analyserades även med XRD för att bestämma de bildade faserna vid förbränning av de mer problematiska råvarorna. Påpekas bör att man med XRD endast kan identifiera kristallina föreningar i provet, medan föreningar som föreligger i amorf (icke-kristallin) form inte kan identifieras. I det här fallet utgörs den amorfa delen av slaggen framförallt av smält material som ej kristalliserats när provet kylts ner efter förbränningsförsöket. I tabell 3 redovisas vilka kristallina föreningar som identifierats i de olika proven, med faserna angivna i vikts-% av den totala mängden identifierade faser. I tabell 3 anges även hur stor del av provet som bestod av amorf glasaktigt material. Eftersom den producerade slaggmängden var väldigt låg vid förbränning av ren salix kunde XRD-analys ej utföras på detta prov.

Vid tillförel av torv till halm reducerades den amorfa glasandelen i provet, vilket också är att förvänta utifrån resultaten från brännarförsöken. De fasta identifierade faser som dominerade proven i torv/halmförsöken (förutom förekomsten av vissa salter p g a oförbränt material i proven) var kalium-aluminium- och kalcium-magnesiumsilikater och kristobalit ( $\text{SiO}_2$ ). Även faser som förmodligen härrör direkt från kontaminerande sandmaterial, d v s kvarts och microcline (fältspat) återfanns i proven då torv ingått i mixen. I slaggprover från förbränning av salix/torvblandningarna återfanns också kalium-aluminium- och kalcium-magnesiumsilikater i relativt stor omfattning. Vid inblandning av torvprov från Brunnskölen i grot ökade innehållet av kalium-aluminiumsilikat i jämförelse med övriga rena grot eller grot/torvmixar. Då relativt stora skillnader i fördelning mellan kalium-aluminium- och kalcium-magnesiumsilikater erhöles vid nyttjande av grot och grot/torvmixarna kan inga direkta jämförelser mellan de praktiska försöksresultaten och andelen återfunnet glas i provet dras då viskositetsskillnader mellan dessa smältor är signifikant.

Tabell 3. Faser identifierade med XRD i de olika slaggproverna.

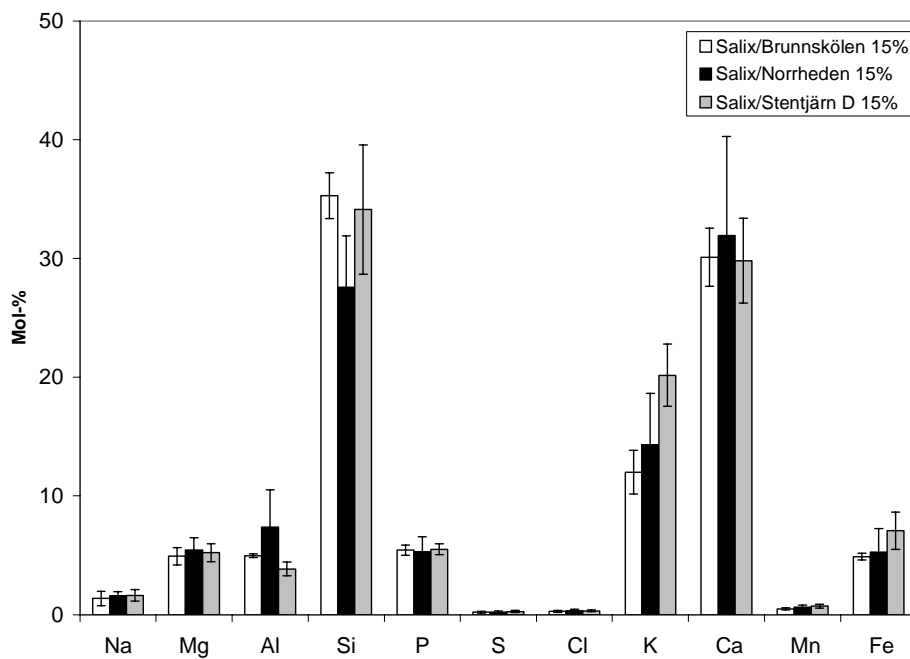
Table 3. Identified phases with XRD.

Fas		Salix/ Brunnskölen 15%	Salix/ Norrheden 15%	Salix/ Stentjärn D 15%	Halm/ Halm 40%	Halm/ Brunnskölen 40%	Halm/ Norrheden 40%	Halm/ Stentjärn D 40%	Grot/ Grot 15%	Grot/ Brunnskölen 15%	Grot/ Norrheden 15%	Grot/ Stentjärn D 15%
SiO <sub>2</sub>	Quartz	1	2			36	11	16	4	10		2
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Albite											
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Microcline					12		14				
KCl	Sylvite			2	23			3				
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Arcanite				28	19		18				
CaKPO <sub>4</sub>	HT				49	6		4				
Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	Apatite	5	5	3			8	3	3	1	8	4
SiO <sub>2</sub>	Cristobalite					19	2	9		1		
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetite		6	7		1	2	3		2	2	6
KAlSiO <sub>4</sub>	Kalsilite	24	26	18				7			3	1
KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Leucite	10	5	3			65	14	2	31		3
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Sanidine									14		
Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Merwinite		8	7				17				
Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Akermanite	37	9	9	7		12	9	27	8	57	58
CaSiO <sub>3</sub>	Wollastonite	5	2							34	5	5
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	alfa'	18	38	52				6	41		24	22
glas %		37	39	37	85	74	57	71	44	37	29	25



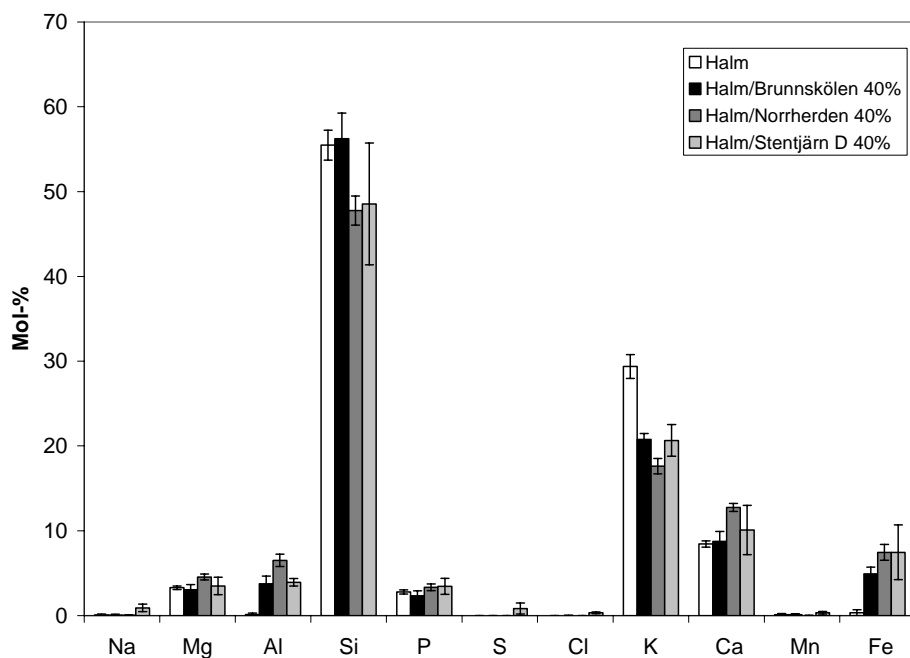
Figur 24. Elementarsammansättning hos den bildade slagen presenterad på syre- och kolfri basis vid förbränning av grot och grot/torvmixar.

Figure 24. Elemental composition (on oxygen and carbon free basis) of the produced slags during combustion of logging residues and logging residues/peat mixtures.



Figur 25. Elementarsammansättning hos den bildade slaggen presenterad på syre- och kolfri basis vid förbränning av salix och salix/torvmixar.

Figure 25. Elemental composition (on oxygen and carbon free basis) of the produced slags during combustion of willow and willow/peat mixtures.

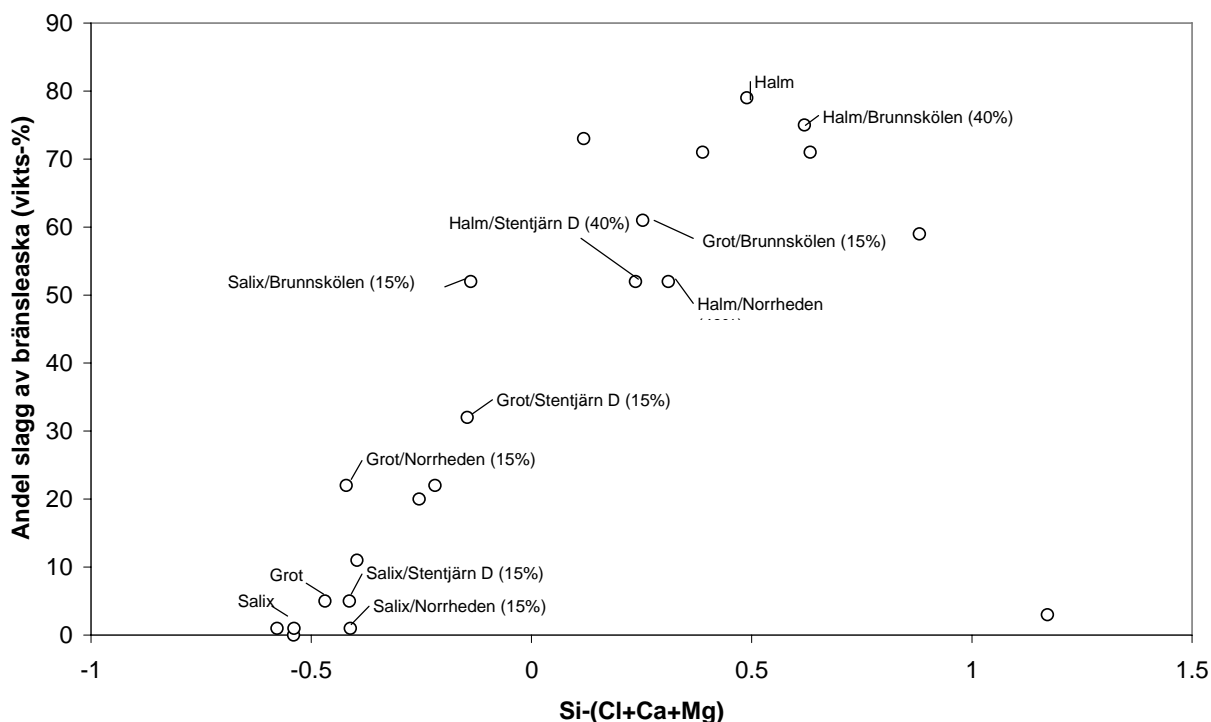


Figur 26. Elementarsammansättning hos den bildade slaggen presenterad på syre- och kolfri basis vid förbränning av halm och halm/torvmixar.

Figure 26. Elemental composition (on oxygen and carbon free basis) of the produced slags during combustion of straw and straw/peat mixtures.

I tidigare arbeten har också diskussioner förts om de mekanismer som ligger bakom slaggningsprocesserna vid förbränning av bibränslen med ett relativt lågt innehåll av fosfor [31,32,33]. Resultaten från dessa arbeten pekar mot att det under själva utbränningsförloppet hos de enskilda bränslepartiklarna bildas kletiga kaliumsilikatsmältor till vilka omkringliggande kalcium- och magnesiumföreningar kan lösas in. Tillgången till kisel, antingen i form av mer reaktivt (i växters organiska matris) och/eller adderat via sandpartiklar är en förutsättning för att dessa silikatsmältor initialt skall bildas. Dessa silikatsmältor föreslås också vara en förutsättning för bildandet av slagg hos fosforfattiga bibränslen. Tillgången till kalcium och magnesium minskar dock problematiken vad gäller slaggbildning då dessa ämnen markant höjer smälttemperaturen hos den bildade smältan. Det tycks även vara så att kalium (fluxmedlet hos silikatsmältan) ej trivs i smältor tillsammans med kalcium och magnesium varvid kalium avgår till gasfasen [28].

Utifrån denna bakgrund har slaggnings-tendensen för bränslen och bränslemixar studerats (med samma experimentella metodik) i detta och tidigare arbeten avsett mot bränsleaskans sammansättning uttryckt som molförhållandet ( $\text{Si}-(\text{Cl}+\text{Ca}+\text{Mg})$ ) i figur 27. Av denna "indexplott" framgår att bränslen med högre kisel till kalcium/magnesium förhållande tycks ha större slaggningsbenägenhet än bränslen med lägre sådant förhållande.



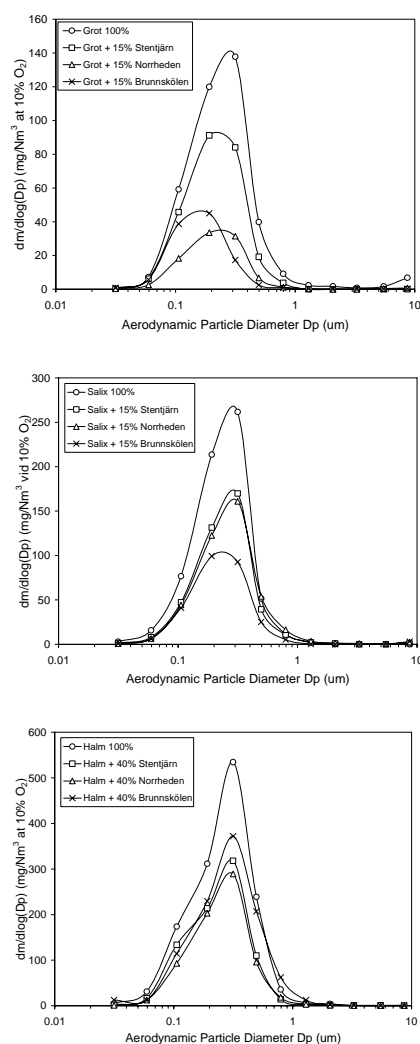
Figur 27. Andelen bildad slagg av ingående bränsleaska (vikts-%) mot bränsleaskans sammansättning, uttryckt som molförhållandet  $\text{Si}-(\text{Cl}+\text{Ca}+\text{Mg})$  i bränsleaskan.

Figure 27. Fraction of fuel ash that forms slag (wt-%) versus fuel ash composition given as the molar ratio  $\text{Si}-(\text{Cl}+\text{Ca}+\text{Mg})$  in the fuel ash.

### 3.4 Partikelemissioner/beläggingsbildning – brännarförsök

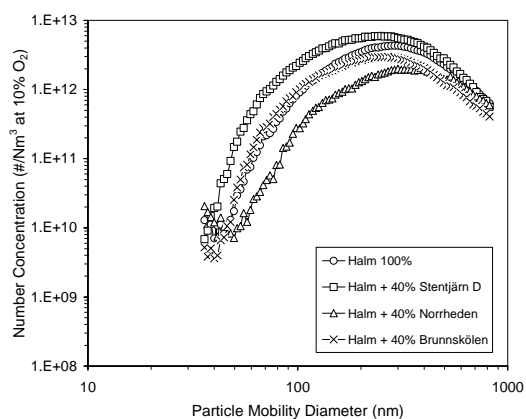
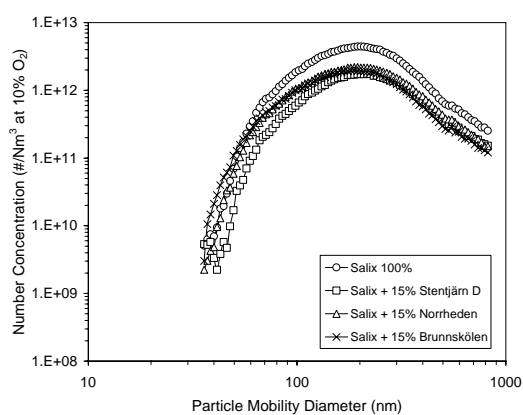
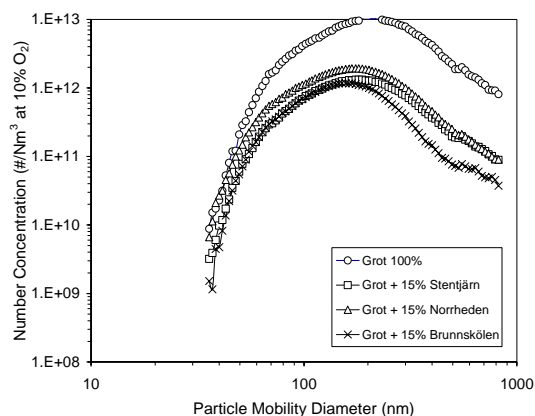
#### 3.4.1 Partikelstorleksfördelning och HCl-emissioner

Resultaten från försöken i pelletsbrännaren visade på en tydlig monomodal (mass)storleksfördelning med endast en mod av fina (<1  $\mu\text{m}$ ) partiklar (se figur 28). Resultaten visade också på en tydlig sänkning av mängden (massan) fina partiklar vid inblandning av torv i samtliga bränslen. Reduktionen var dock betydligt kraftigare vid inblandning av torv i grot och salix jämfört med inblandning i halm. Resultaten från SMPS-mätningarna styrker ovanstående resonemang då antalet fina partiklar klart reducerades vid inblandning av torv (se figur 29). Mätdata från försöket med halm+stentjärn D betedde sig dock avvikande utan rimlig förklaring.



Figur 28. Partikel (mass)storleksfördelningar i rökgaserna från försöken med förbränning av grot och grot/torvmixar [19] (ovan), salix och salix/torvmixar (mitten) samt halm och halm/torvmixar (nedan) i en pelletsbrännare (roster).

Figure 28. Particle mass size distributions in the flue gases during combustion of logging debris and logging debris/peat mixtures (upper) [19], willow and willow/peat mixtures (middle) as well as straw and straw/peat mixtures (lower) in a pellet burner (grate).

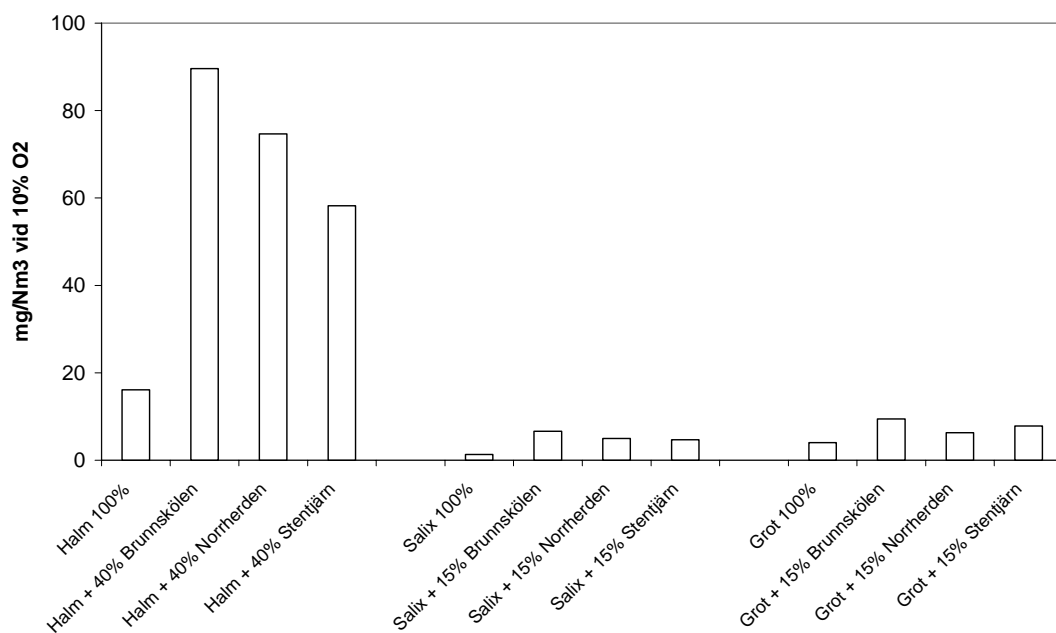


Figur 29. Partikel (antals)storleksfördelningar ( $<1 \mu\text{m}$ ) i rökgaserna från försöken med förbränning av grot och grot/torvmixar (övre), salix och salix/torvmixar (mitten) samt halm och halm/torvmixar (nedan) i en pelletsbrännare (roster).

Figure 29. Fine particle ( $<1 \mu\text{m}$ ) number size distributions in the flue gases during combustion of logging residues and logging residues/peat mixtures (upper), willow and willow/peat mixtures (middle) as well as straw and straw/peat mixtures (lower) in a pellet burner (grate).

Av figur 30 framgår att HCl-emissionerna ökade vid inblandning av torv för samtliga studerade bränslen. Anledningen till de ökade HCl-emissionerna kan sannolikt förklaras av de asktransformationsmekanismer som beskrivits tidigare (se 3.3 ovan) som innebär att alkali (främst kalium i detta fall) binds upp i askåterstoden/slaggen till större andel

vid inblandning av torv (se även figur 32). Som även diskuterats tidigare innebär detta att mängden fina partiklar reduceras, eftersom förångat kalium, som till stor del förmodligen föreligger som KOH i gasfasen, reagerar med HCl och bildar KCl (+H<sub>2</sub>O) som sedan kondenserar och bildar fina partiklar då rökgaserna kyls.



Figur 30. HCl-emissioner vid förbränning av grot och grot/torvmixar [19], salix och salix/torvmixar samt halm och halm/torvmixar i en pelletsbrännare (roster). Värden redovisade som medelvärden under typiska driftperioder från respektive försök.

Figure 30. Emissions of HCl during combustion of logging debris and logging debris/peat mixtures [19], willow and willow/peat mixtures as well as straw and straw/peat mixtures in a pellet burner (grate), given as average values during periods of typical operational conditions.

Till skillnad mot försöken i fluidbädden bildades ej några grövre partiklar (>1 µm) i någon större utsträckning vid förbränningsförsöken i brännaren. Detta kan bero på att temperaturen i brännaren är ca 300 °C varmare än i fluidbädden och såväl strömnings- som "char"fragmenteringsförhållanden sannolikt skiljer sig mellan de olika anläggningarna. Vid utförbränningen av enskilda bränslepartiklar i fluidbädden bildas förmodligen fragment av restaska rik på kisel, kalcium och kalium i form av sfäriska sintrade partiklar som följer med gasströmmen ut från eldstaden. Vid förbränning i brännaren däremot stannar förmodligen dessa kisel-, kalcium- och kaliumrika askpartiklar kvar i brännaren under bildandet av större slagpartiklar (aggregat) som antingen deponeras på brännarroret eller matas ut som bottenaska.

### 3.4.2 Partikelsammansättning

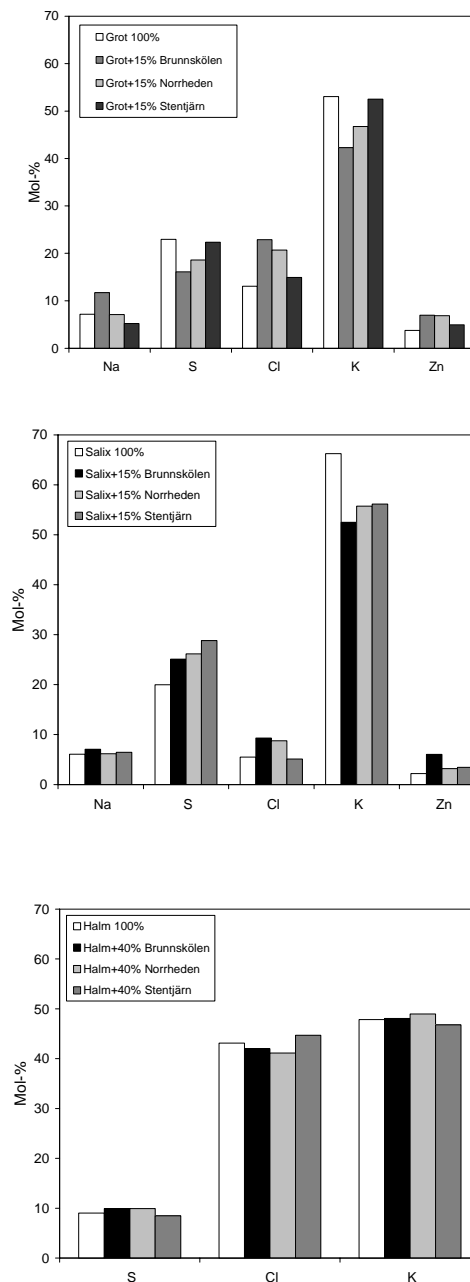
Även i förbränningsförsöken i pelletsbrännaren var det i samtliga fall låga halter (5-10 vikt-% i SEM/EDS) kol i de fina partiklarna, samt relativt låga halter CO (<1000 ppm),

vilket tyder på att förbränningen varit god med lågt tillskott av oförbränt material i form av sot och kolväten till partiklarna. Den fina partikelfractionen innehöll även i brännarförsöken framförallt kalium, svavel och klor (se figur 31). Vid förbränning av grot och salix återfanns även mindre mängder natrium och zink. Utifrån analysen av mol-kvoten  $(K+Na)/(2S+Cl)$  framgår att partiklarna i princip enbart bestod av sulfater och klorider.

Figur 32 visar andelen av totalt tillförd kalium i bränslet som bildar fina partiklar d v s andelen av tillförd mängd kalium som inte återfinns i restaska eller slagg efter utbränning. De redovisade värdena är beräknade utifrån partikelkoncentration (mg/MJ), elementaranalyser av partikelprover i SEM/EDS, bränsleanalyser, värmevärde för respektive bränsle, samt antagandet att sammansättningen av partiklarna i hela finmoden (hela massan av  $PM_{10}$ ) var densamma. Även i brännarutrustningen ses en tydlig reduktion av mängden kalium som bildar fina partiklar vid inblandning av torv. Reduktionen är kraftigast vid inblandning i de relativt kiselfattiga bränslena grot och salix eftersom andelen kalium som avgår från bränsleaskan och bildar fina partiklar redan är relativt låg för det rena kiselrika halmbränslet. Av figur 32 framgår vidare att av de studerade bränslena ger inblandning av den relativt kiselrika torven från Brunnskölen den genomsnittligt kraftigaste reduktionen av potentiellt beläggingsbildande alkalimaterial i rökgaserna.

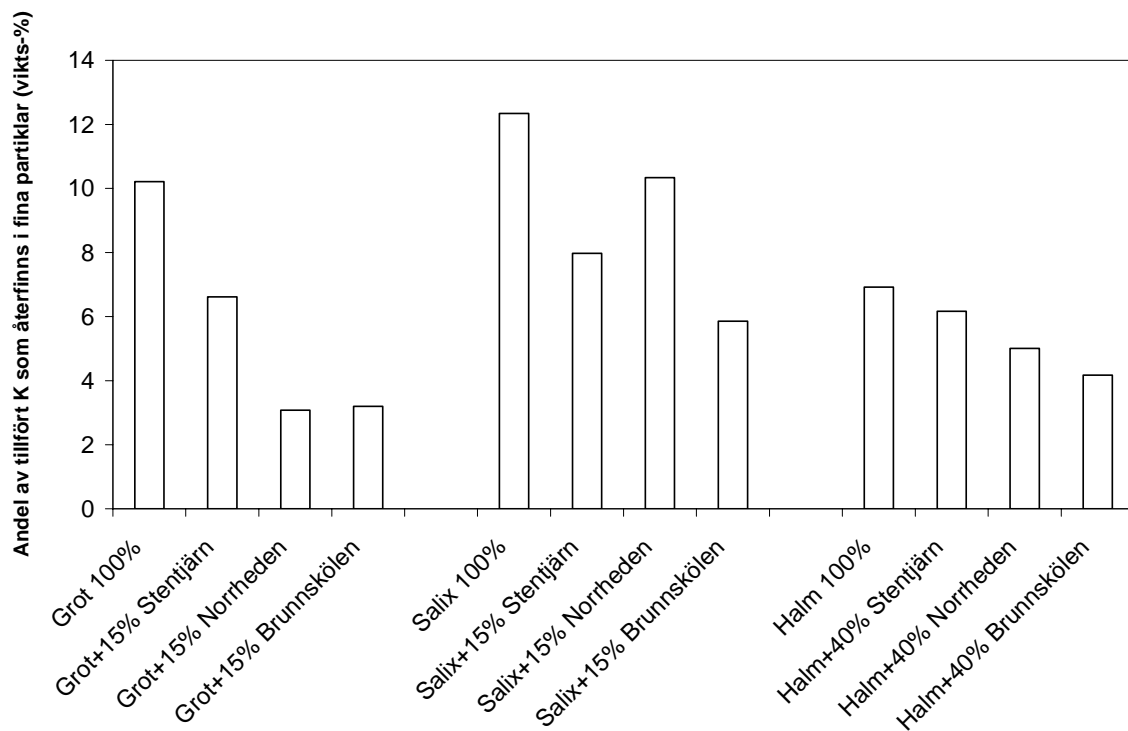
Även tidigare arbeten har visat att bränslets innehåll av kisel har en stor effekt på andelen kalium som avgår från bränslet/bränsleaskan [34,35] eftersom kalium reagerar med bränslets kisel och bildar "klibbiga" smälta kaliumsilikater. I de experimentella försöken framgår också att inblandning av torv från Brunnskölen ger de kraftigaste slaggningstendenserna.

Utifrån resultaten från impaktorprovtagningen samt de kemiska analyser som utfördes på den fina partikelfractionen framgick det således klart att mängden kalium och klor i den finpartikulära fraktionen reducerades kraftigt (ca 3-4 ggr) vilket torde ha positiva effekter på såväl beläggingsbildning som klorinducerad korrosion vid förbränning i brännar/rosteranläggningar.



Figur 31. Elementarsammansättning (mol-%) för fina partiklar (impaktorsteg nr 4, GMD 0.19  $\mu\text{m}$ , eller nr 5, GMD 0.32  $\mu\text{m}$ ) vid försök med grot och grot/torvmixar (övre), salix och salix/torvmixar (mitten) samt halm och halm/torvmixar (nedre) i en pelletsbrännare (roster). Al, C och O är exkluderade och övriga analyserade element (Mg, Si, P, Ca, Mn, Fe, Cu, As, Rb, Cd och Pb) förekommer i lägre koncentrationer än 2 vikt-%, och redovisas därför ej p g a begränsningar i analysmetoden.

Figure 31. Elemental distribution (mole-%) of the fine mode particles (e.g. impactor stage 4, GMD 0.19  $\mu\text{m}$ , or stage 5, GMD 0.32  $\mu\text{m}$ ) sampled during combustion of logging residues and logging residues/peat mixtures (upper), willow and willow/peat mixtures (middle) as well as straw and straw/peat mixtures (lower) in a pellet burner (grate). The elements Al, C, O were excluded and all other analyzed elements (Mg, Si, P, Ca, Mn, Fe, Cu, As, Rb, Cd and Pb) were below 2 weight-% and therefore not accounted for because of limitations in the analytical method.



Figur 32. Andelen av totalt tillfört (i bränslet) kalium som återfanns i fina partiklar vid förbränning av grot och grot/torvmixar, salix och salix/torvmixar samt halm och halm/torvmixar i en pelletsbrännare (roster).

Figure 32. Fraction of totally supplied (from the fuel) potassium that were found in the fine particles during combustion of logging residues and logging residues/peat mixtures, willow and willow/peat mixtures as well as straw and straw/peat mixtures in a pellet burner (grate).

## 4 Slutsatser

Resultaten från de kontrollerade bäddagglomereringsförsöken visade på en kraftig reduktion av agglomereringstendensen för samtliga försök vid en inblandning motsvarande 15-20 vikts-% av bränsemixens TS-halt. En ökning av den brännespecifika defluidiseringstemperaturen på 150-170 °C för halm och ca 70-100 °C för salix och grot kunde således detekteras. Dessa positiva effekter kan vid salix- och grotförbränning förklaras av att sammansättningen på det inre beläggningsskiktet runt bäddkornen (kvartssanden) förändras då torv blandas in med det problematiska biobränset. I samtliga fall med torvinblandning i såväl grot som salix innebar förändringen att kaliumhalten minskade samtidigt som kalciumhalten ökade, vilket i sin tur innebar att smältpunkten höjdes och agglomereringstendensen minskade. Denna viktiga förändring av sammansättningen på det inre bäddkornskiktet orsakas av att reaktivt kalcium tillförs via torven samtidigt som borttransport och/eller överföring av alkali till mindre reaktionsbenägen partikulär form sker via sorption eller reaktion med kvarvarande reaktiv torvaska (innehållande kisel, kalcium m.m.) under bildande av partiklar med en storlek på  $>1\mu\text{m}$ . Till skillnad mot salix- och grotförbränning återfanns bränseaskan i bädden i form av enskilda askpartiklar vid halmförbränning. Vid inblandning av torv i halm ökade innehållet av järn, svavel och kalcium hos dessa askpartiklar. En utspädning och/eller faktisk reduktion av kalium hos de bildade askpartiklarna påverkar sannolikt smältbeteendet och därmed agglomereringsrisken positivt.

Utifrån förbränningsförsöken i pelletsbrännare kunde vidare konstateras att inblandning av de studerade torvarna till de relativt kiselfattiga grot- och salixbränslena ökade slaggningsstendensen vid rostereldning, framförallt för det relativt kislerika torvbränset (Brunnskölen). Vid inblandning av torv i halm, som är rikt på kalium och kisel, reducerades däremot slaggningsstendensen. Samtliga av de studerade torvproverna hade relativt höga kisel/kalciumkvoter. Tidigare forskning har visat att tillförsel av reaktivt kisel till kiselfattiga bränslen ökar slaggningsstendensen samt att höga kalcium till kiselkvoter i ett bränsle är att föredra för att minimera uppkomsten av slaggnings på rosters.

Resultaten från försöken både i fluidbädd och brännarutrustning visade på kraftig reduktion i mängden emitterade fina partiklar ( $<1\mu\text{m}$ ) vid inblandning av torv i salix- och grotfraktionerna redan vid dom inblandningsgrader som studerats (15-20 vikts % av TS). Dock krävs en högre inblandningsgrad än vad som ingick i denna studie (40 vikts-%), för att uppnå sådan effekt vid förbränning av halm. Mängden emitterat kalium och klor som avgått från bränset och återfanns i den fina partikelfraktion minskade i samtliga sameldningsförsök. Även en reduktion av kalium- och klorhalterna hos den uppkomna beläggningen detekterades vid inblandning av torv. Resultaten från tidigare utförda termokemiska modellberäkningar indikerar dessutom att andelen smälta i den finpartikulära fraktionen och i beläggningar reduceras vid inblandning av torv. Då tidigare utförda arbeten har visat på betydelsen av mängden smält material hos den fina partikelfraktion för beläggningstillväxten på kyllda panntuber och på betydelsen av klorinnehållande alkaliföreningar för klorinducerad korrosion, kan ovanstående resultat anses förklara de bakomliggande mekanismerna som leder till de positiva effekterna, vad gäller minskning av beläggningstillväxt och högtemperaturkorrosion.

Vid förbränningsförsöken i fluidbädden ökade den totala emitterade mängden grova partiklar ( $>1 \mu\text{m}$ ) vid inblandning av samtliga torvar. Denna partikelfraktion består till stor del av kalium, kalcium och kisel. En ökning av en sådan grov partikelfraktion kunde dock inte detekteras vid försöken i pelletsbrännarutrustningen. Orsaken till detta kan för fluidbädden förklaras av de ovan beskrivna processerna där överföring av alkali i gasfas sker till partikulär form via sorption och/eller reaktion med reaktiv torvaska och/eller via svavelrika föreningar vid nyttjande av svavelrika torvar, under bildande av grövre partiklar med en storlek på  $>1 \mu\text{m}$ . Även vid rostereldning, i detta fall i form av en pelletsbrännare, kan alkalisorption och -reaktion med reaktiv torvaska antas ske under bildande av grövre partiklar, s k restaska. Dock förefaller dessa askpartiklar inte följa med rökgaserna utan hålls antingen kvar på rostret och inkluderas i slaggen eller deponeras som bottenaska i pannan.

## 5 Rekommendationer och användning

Resultaten visar tydligt att inblandning av torv i problematiska biobränslen ger markanta positiva effekter vad avser bäddagglomerering och beläggingsbildning/korrosion i pannors konvektionsdelar redan vid relativt låga inblandningsgrader (15-20 vikts-%) av salix och grot, men att kraftigare inblandningsgrader sannolikt krävs (upp mot 40 vikts-%) vid inblandning i halm. Vid val av torvslag för att maximera de ovanstående positiva effekterna vid förbränning kan en allmän rekommendation göras att torvar med hög askhalt (t ex carexinnehållande torv), och gärna med högt inslag av svavel, ger de bästa sameldningsegenskaperna.

Vid nyttjande av vissa carexdominerade torvar med relativt höga kiselhalter för sameldning med biobränslen i roster/pelletsbrännare, t ex som närvärme och fastighetsanläggningar, finns dock indikationer på en ökad slagningstendens. Detta kan i sådana fall leda till ökade drifts- och skötselkostnader i dessa typer av anläggningar.

## 6 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Sedan januari 2006 ingår torven i handeln om utsläppsrätter vilket har lett till en klar kostnadsökning för de verk som nyttjar torv. Denna handel om utsläppsrätter gäller endast effektområdet över 20 MW varför torvnäringens intresse har ökat vad gäller att nyttja torv i anläggningar i effektintervallet lägre än 20 MW.

De eldningsprinciper som framförallt nyttjas inom detta effektområdet (<20 MW) bygger på roster- och brännarteknik för pellets eller pulver. En stor potential, över 20 TWh årligen, för konvertering från olje- till biobräsleanvändning återfinns inom segmentet över villanivå (>50 kW) upp till ca 3 MW. Inom detta segment är intresset att använda pellets stort. En inmixning av torv till dagens råmaterial (sågspån, flis och rundvirke) vid pelletstillverkning skulle därmed relativt snabbt kunna medföra en kraftigt ökad användning av bränsletorv. Villasegmentet (<50 kW) använder idag förbränningsteknik som även fortsättningsvis bör nyttja bränslen med relativt låga askhalter, varvid torv i första hand ej bör nyttjas inom detta segment.

Inledande försök med torvinblandning med sågspån har visat att dammproblem såväl som ökat slitage i pelletspressar kan uppstå. Det är därför mycket angeläget att snabbt kvantifiera problemens storlek och därefter föreslå åtgärder för att en introduktion av torv till dessa råvaror skall kunna utföras. Vidare saknas detaljerade studier över torvinblandningens effekt på pelleteringsegenskaperna. Den stora skillnaden i densitet mellan torv och sågspån kan exempelvis ge upphov till segregering av råmaterialet med inhomogen pellets kvalitet som följd. Effekten av skillnader i fukthalt mellan torv och träråvara har ej heller studerats.

Det är viktigt att en introduktion av torv i träpelletsen utförs med målsättningen att inte försämra, utan snarare förbättra egenskaperna hos bränslepelletsen m a p emissioner och drifttillgänglighet/drifttillsyn. Anläggningar inom det diskuterade effektområdet är byggda för att producera värme under minimal drifttillsyn och för att säkerställa detta krävs att uppkomsten av såväl askrelaterade driftsproblem som bränsleinmatningsrelaterade driftstopp, undviks. Det är därför av intresse att bestämma såväl optimala inblandningsgrader som effekter av torv klass på uppkomsten och/eller reduktionen av dessa problem vid inblandning i traditionell träpellets. Stamved i form av såg- och kutterspån som normalt nyttjas i pellets har väldigt goda askegenskaper och en introduktion av torv kommer därför påverka denna. Då kvävehalten hos torv varierar kraftigt och generellt är betydligt högre än i träbränslen bör inblandning av torv med låga bränslekvävehalter eftersträvas för att minimera effekter av ökade NO<sub>x</sub>-utsläpp. Förutsättningarna för detta är således också något som bör inkluderas i kommande studier.

Diskussioner har på senare tid också förts vad gäller partikelemissionerna från små- och mellanstora förbränningsanläggningar, dels med anledning av de samband som konstaterats mellan partiklar generellt i omgivningsluften och olika hjärt/kärl- och lungrelaterade hälsoeffekter och dels den stora osäkerhet som råder vad gäller emissionernas faktiska omfattning och specifika karaktäristik på såväl befintlig som framtida teknik. Tidigare forskning har indikerat att torvinblandning påverkar partikelbildningen vid förbränningen, bl a visar de föreliggande studierna att mängden fina (ask)partiklar (<1 µm) kan reduceras vid inblandning av torv i träbränslen. Detta

kan vara av generellt intresse då den reningsteknik som främst nyttjas i effektklassen 0,2-3 MW bygger på cyklonavskiljning med låg avskiljningsgrad för de fina partiklar som normalt dominerar partikelemissionerna vid biomassaförbränning.

Slutligen kan nämnas att det inom det Europeiska Standardiseringsarbetet CEN idag finns ett 30-tal tekniska specifikationer framtagna för biobränslen, där torv ej ingår. Dock finns en speciell torvstandard framtagna inom Nordtest. För att torv ska kunna få acceptans att ingå i denna CEN-klassificering, krävs särskilda insatser för att kartlägga åtgärder och att verka för detta.

## 7 Litteraturreferenser

- [1] Burvall, J., Öhman, M., Systemstudie över askegenskaper i förbränningsanläggningar vid samförbränning av torv och biobränslen, 2002, Utredning utförd åt Statens Energimyndighet.
- [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] Hämmäläinen, 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] Raymond R.J., Cohen A., Bish, D. 1985, Ash contents of Costa Rican peat deposits. *Tropical peat resources – prospects and potential*. Helsinki Finland International Peat Society. 1985 pp 170-185
- [12] Casagrande D.J., Erchull L.D. 1976, Metals in Okefenokee peat-forming environments: relations to constituents found in coal. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 387-393
- [13] Bustin R.M., Lowe, L.E., Sulfur, low temperature ash, and minor elements in humid-temperature peat of the Fraser River Delta, British Colombia, *Geol. Soc.*, 1987, 144, 435-450
- [14] Kalaitzidis, S., Christanis, K., Scanning electrom microscope studies of the Philippi peat (NE Greece): initial aspects, *International Journal of Coal Geology*, 2003, 54, 69-77.
- [15] Zevenhoven-Onderwater, Ash-forming matter in biomass fuels, Ph D thesis, Combustion and Materials Chemistry, Åbo Akademi, Finland, 2001.

- 
- [16] Metso, J., Niinistö, L., Yliruokanen, I., Inorganic constituents in Finnish fuel peat ash, *Kemia-Kemi*, 1976, 3(9), 409-412.
- [17] Kurki, M., Main chemical characteristics of peat soils, 1982, in *Peatlands and their utilization in Finland*, Finnish peatland society, Finnish national committee of the international peat society, 37-41.
- [18] Zevenhoven, M., Yrjas, P., Backman, R., Skrifvars, B.-J., Hupa, M., The Åbo Akademi Database – Fuel Characterization, Proc of the 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion, May 22-25, 2005, Toronto.
- [19] Pommer, L., Olofsson, I., Boström, D., Lundholm, K., Backman, R., Nordin, A., Öhman, M., Burvall, J. Klargörande av bakomliggande mekanismer för torvslags positiva effekter vad gäller minskande av askrelaterade driftsproblem vid sameldning med biobränslen, *Energimyndigheten ISSN 1653-0551 ETPC report 05-06*, Umeå Augusti 2005
- [20] Morey, G. W., Kracek, F. C., Bowen, N.L. *J Soc. Glass Technol.*, 1930, 14, 158.
- [21] Orjala, M., Ingalsuo, R., Paakkinen, K., Hämläinen, J., Mäkipää M., Oksa, M., Malkow, T., Fordham, R.J., Baxter, D., How to control superheater tube corrosion in FB boilers which use wood and wood waste as fuel. Manuscript.
- [22] Henderson, P., Andersson, C., Kassman, H., The use of fuel additives in wood and waste wood-fired boilers to reduce corrosion and fouling problems, *VGB PowerTech*, 2004, 6, 58-62.
- [23] Skrifvars, B.-J., Lauren, T., Hupa, M., Korbee, R., Ljung, P. Ash behaviour in a pulverized wood fired boiler - a case study, *Fuel*, 2004, 1371-1379.
- [24] Öhman, M., Nordin, A., Brus, E., Skrifvars, B.J., Backman, R., Förbrukning av bäddmaterial i biobränsleeldade fluidbäddar p g a bäddagglomereringsrisk – beläggningbildning och möjligheter till regenerering, 2001, SVF-report 739.
- [25] Öhman, M. and Nordin, A. A new method for quantification of agglomeration tendencies - a sensitivity study, *Energy & Fuels* 12, 90-94, 1998.
- [26] Lundholm, K., Nordin, A., Öhman, M., Boström, D. Reduced bed agglomeration by co-combustion biomass with peat fuels in fluidized beds. *Energy & Fuels*, 2005, 19, 2273-2278
- [27] Morey, G. W., Kracek, F. C., Bowen, N.L. *J Soc. Glass Technol.*, 1930, 14, 158
- [28] Thy P, Leshner C E, Jenkins B M. Experimental determination of high temperature elemental losses from biomass fuels. *Fuel* 2000; 79, 693-700
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Öhman, M., Gilbe, R., Lindström, E., Boström, D., Samuelsson, R., Burvall, J. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets, Proc of Pellets 2006-2nd World Conference on Pellets, 1-2 June Jönköping, Sweden
- [32] Öhman, M., Lindström, E., Gilbe, R., Backman, R., Samuelsson, R., Burvall, J. Predicting slagging tendencies for biomass pellets fired in residential appliances:

a comparison of different prediction methods. Proc of Pellets 2006-2nd World Conference on Pellets, 1-2 June Jönköping, Sweden

- [33] 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.
  - [34] Jensen, P. A., Frandsen, J. F., Dam-Johansen, K., Sander, K. Experimental investigation of the transformation and release to gas phase of potassium and chlorine during straw pyrolysis. *Energy & Fuels* 2000; 14, 1280-128
  - [35] Knudsen, J. N., Jensen, P. A., Johansen, K. D. Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass. *Energy & Fuels* 2004; 18, 1385-1399
-