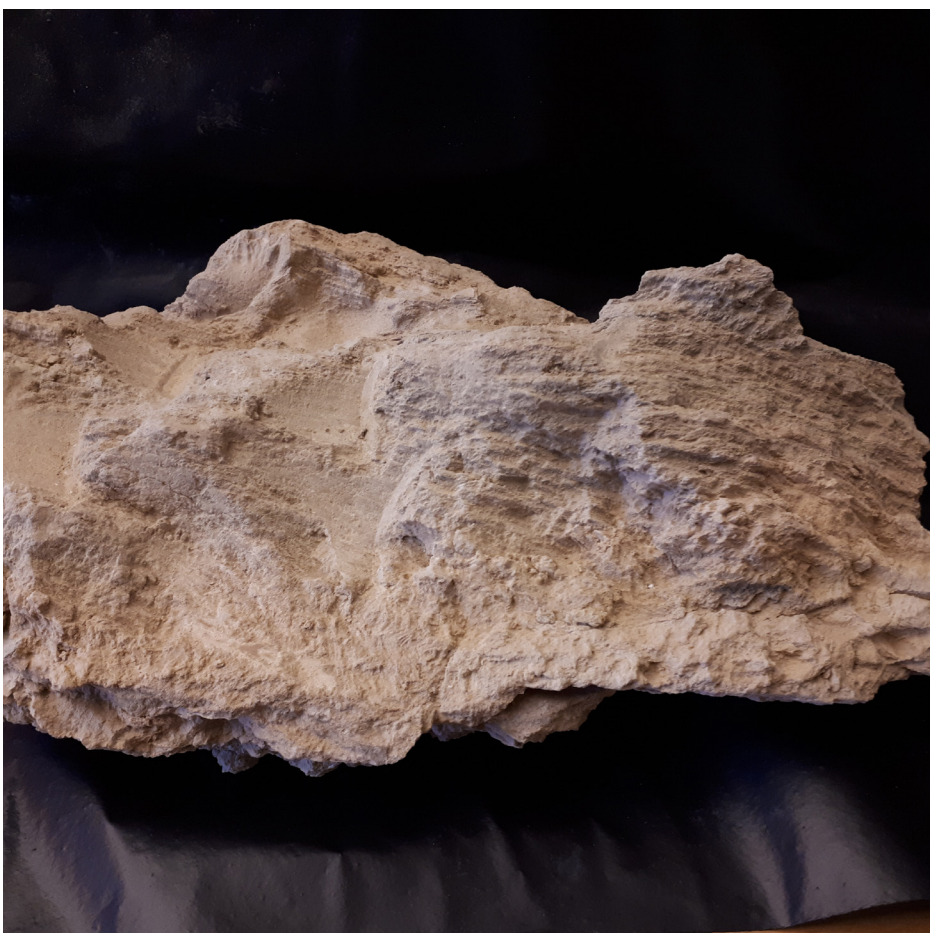


BELÄGGNINGSBILDNING OCH BRÄNSLESAMMANSÄTTNING I AVFALLSPANNOR

RAPPORT 2019:635



BRÄNSLEBASERAD EL-
OCH VÄRMEPRODUKTION



Beläggningssbildning och bränslesammansättning i avfallspannor

**KENT DAVIDSSON, BENGT-OLOF ANDERSSON, PER ANUNDI, LIA DETTERFELT,
ANNA HINDERSON, PETER LUNDBLAD, MARIE-LOUISE MARKLUND, MATTIAS MATTSSON,
JO RAVNSBORG, ANNIKA STÅLENHEIM**

ISBN 978-91-7673-635-7 | © Energiforsk mars 2020

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

**Denna rapport är slutrapportering av projekt A 43454
Beläggningsbildning och bränslesammansättning i avfallspannor
(Energimyndighetens projektnummer P 43454) inom SEBRA,
samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.**

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik. Programmet är en samverkan mellan Energiforsk och Energimyndigheten. Ingående projekt finansieras alltså av Energimyndigheten och av de parter som Energiforsk samlar i programmet.

Detta projekt har studerat relationen mellan bränslesammansättning och beläggningsbildning i avfallspannor. Genom ökad förståelse för sambandet kan drift och bränsleval anpassas vilket i sin tur leder till ökad flexibilitet i energisystemet.

Projektet har genomförts av RISE Research Institutes of Sweden med Kent Davidsson som huvudprojektledare. Projektet har följts av en referensgrupp bestående av:

Sven Wallin, Söderenergi
Hamid Moradpour, E.ON
Per Örvind, Eskilstuna Strängnäs Energi och Miljö
Hanna Kinnunen, Valmet
Sonja Enestam, Valmet

Stockholm december 2019

Helena Sellerholm
Områdesansvarig
Termisk energiomvandling, Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Avfallsförbränning ger på grund av bränslets innehåll upphov till beläggningar på värmeöverförande ytor. Beläggningarna hindrar värmeöverföring och rökgasernas passage samt gynnar korrosion. Förbränningsanläggningarna ägnar stor möda åt att avlägsna beläggningar under drift med olika sotningssystem, och med manuellt arbete vid revisionsstopp. I det senare fallet kan beläggningarna utgöra ett arbetsmiljöproblem. Det vore alltså önskvärt att hindra själva bildningen av beläggningarna. Målet med föreliggande projekt är att besvara frågan om bränslemixen kan väljas så att beläggningsbildningen vid avfallsförbränning minskar.

En litteraturgenomgång gjordes avseende beläggningsmekanismer, bränsleparametrar, beläggningars sammansättning, korrosion, motåtgärder och klassning av avfall. Prov av beläggningar (s.k. långtidsbeläggningar) från åtta förbränningsenheter togs ut från olika provpunkter och analyserades. I två av enheterna togs beläggningar genom exponering av sonder i 3 timmar (s.k. korttidsbeläggningar). I det ena fallet var bränslet valt så att värmevärde och klor- och svavelinnehåll varierades systematiskt.

Litteraturen visar att beläggningar bildas i nästan hela förbränningsenheten, och att de består av typiska askbildande ämnen som kalcium, kalium, natrium, bly, zink, aluminium, kisel, svavel och klor. För att undvika korrosion har svavel tillsatts i olika former. Det leder inte nödvändigtvis till mindre beläggningar men svavlet tränger undan klor så att mer sulfater och mindre klorider bildas. Utöver att tillsätta ämnen som innehåller svavel kan man samelda avfall med ett bränsle som innehåller svavel. Exempelvis avloppsslam har prövats med gott resultat. Det vore användbart för anläggningarna att kunna förutse bränslets egenskaper ur beläggningssynpunkt men någon klassning av bränslen efter sådana kriterier finns inte.

Alla förbränningsanläggningar i projektet har beläggningsproblem men i olika positioner. Någon ingående undersökning av orsakerna till beläggningarna har inte gjorts, men de av anläggningarna vidtagna åtgärderna, såsom att undvika bränslen med högt klorinnehåll och värmevärde, är rimliga med hänsyn till vad som är känt från litteraturen. Resultatet av att anpassa bränslemixen för att tillföra mer svavel när klorrika bränslen eldades fungerade såtillvida att koncentrationen av HCl i rökgaserna kunde styras. Det var svårare att styra svaveltillförseln vilket medförde att SO₂ varierade mer oförutsägbart; förmodligen beroende på att svavelhalten i bränslet varierade. Effekterna på sammansättningen av korttidsbeläggningarna blev begränsade. Det finns en potential att utnyttja svavelrika bränslen samtidigt som klorrika eldas men svaveltillförseln måste kontrolleras bättre.

Summary

Because of the content of waste, incineration of waste gives rise to deposits on heat-exchanging surfaces. The deposits impede heat transfer and the passage of the flue gases, and they favour corrosion. The combustion facilities make efforts to remove the deposits during operation by different soot blowing systems, and by manual work during shutdown. In the latter case, the deposits may constitute a safety problem. Thus, it would be desirable to prevent the formation of the deposits. The objective of the present project is to answer the question if the fuel mix can be chosen such that the deposit formation is decreased.

A literature survey was carried out regarding deposit formation mechanisms, fuel parameters, deposit composition, corrosion, counteractions and classification of waste. Samples of deposits (so called long-term deposits) from eight incineration units and from different spots were taken and analysed. In two of the units deposit probes were exposed for 3 hours (so called short-term deposits). In one of these cases, the fuel was chosen so that the heating value, chlorine content and sulphur content were varied systematically.

The literature shows that deposits are formed in almost the whole combustion unit, and that they consist of typical ash-forming elements such as calcium, potassium, sodium, lead, zinc, aluminium, silicon, sulphur and chlorine. To avoid corrosion, sulphur has been added in different forms. It does not necessarily lead to less deposits, but it may lead to the formation of sulphates instead of chlorides. In addition to adding substances with sulphur, co-firing with a fuel that contains sulphur has been done. For example, sewage sludge has been tried with good results. It would be useful for the facilities to be able to predict the deposit-forming properties of the waste, but no such classification of the waste exists.

All incineration units have deposit problems but in different positions. Thorough investigations of the causes of deposits are lacking, but the actions taken by the facilities, such as avoiding waste with high chlorine content and heating value are reasonable with respect to the literature. The results from adjusting the fuel mix in order to supply more sulphur when chlorine-rich waste was fired worked in the sense that the concentration of HCl in the flue gas could be controlled. It was more difficult to control the supply of sulphur, which caused the SO₂ in the flue gas to vary more unpredictably; probably because of variations of the sulphur content of the waste. The effects on the composition of the short-term deposits were limited. There is a potential to fire sulphur-rich waste with chlorine-rich waste but the sulphur supply must be well controlled.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Mål	9
2	Genomförande	10
2.1	Anläggningarnas förbränningsenheter	10
2.2	Anläggningarnas erfarenheter	13
2.3	Provtagning	14
2.3.1	Långtidsbeläggningar	14
2.3.2	Korttidsbeläggningar	14
2.4	Analysmetoder	15
2.4.1	Röntgenfluorescens (XRF)	15
2.4.2	Labmetod	16
3	Resultat	17
3.1	Litteraturstudie	17
3.1.1	Beläggningsmekanismer	17
3.1.2	Bränsleparametrar	18
3.1.3	Beläggningar	19
3.1.4	Korrosion och motåtgärder	20
3.1.5	Klassning av avfall	20
3.1.6	Sammanfattning	21
3.2	Anläggningarnas erfarenheter	22
3.2.1	Beläggningsbildning	22
3.2.2	Bränslen	23
3.2.3	Sammanfattning	24
3.3	Långtidsbeläggningar	24
3.3.1	Vattenfall Uppsala	25
3.3.2	Renova Sävenäs	26
3.3.3	Umeå Energi	30
3.3.4	Lidköping Energi	32
3.4	Korttidsbeläggningar	35
3.4.1	Vattenfall Uppsala	35
3.4.2	Renova	37
4	Diskussion	39
4.1	Anläggningarnas åtgärder jämfört med litteraturstudien	39
4.2	Beläggningarnas beskaffenhet jämfört med litteraturen	39
4.2.1	Långtidsbeläggningar	39
4.2.2	Korttidsbeläggningar	40
4.3	Beläggningarnas hårdhet	42
4.4	Går det att med styrning av bränslet påverka beläggningarna?	43

4.4.1	Vattenfall Uppsala	43
4.4.2	Renova Sävenäs	44
4.4.3	Sammanfattning	44
5	Slutsatser	45
6	Referenser	46
Bilaga 1. Frågor till anläggningarna		49
Bilaga 2. Fotografier av beläggningar		51
Bilaga 3. Långtidsbeläggningar mätdata		55
Bilaga 4. Driftdata Vattenfall Uppsala block 5 under tagning av korttidsbeläggningar.		58

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Avfall är ett viktigt bränsle i de svenska fjärrvärmesystemen. 2018 utvanns totalt 17 TWh energi, fördelat på 15 TWh värme och 2,2 TWh el [1]. Styrmedel, nya insamlingssystem och förändrad konsumtion påverkar avfallssystemet och leder till förändringar i avfallshanteringen. Bland annat påverkas den avfallsfraktion som går till energiåtervinning – både med avseende på mängd och på sammansättning. Detta leder till ökad användning av förbränningstekniskt svåra bränslen såsom så kallat fluff (restfraktion från metallåtervinning), monofraktioner, byggavfall och rötslam. En ökad andel förbränningstekniskt svåra bränslen gör att bränslet blir än mer heterogent än tidigare. Det, i sin tur, gör att bränsleberedning och blandning blir viktigare än idag, liksom övervakning, kontroll och beredskap för variationer som påverkar förbränningen. Avfallsbränslen i allmänhet, och nämnda svårare bränslen i synnerhet, ger upphov till mycket aska som dessutom kan vara särskilt besvärlig på grund av innehåll av klor och alkalimetaller. Dessa ämnen gynnar beläggningar på kylta ytor som ång- och vattentuber, och vissa väggar. Andra ämnen som ofta återfinns i beläggningarna är kalcium, zink, bly, kisel och svavel. Beläggningsbildning i avfallspannor är vanligt förekommande och kan orsaka oplanerade stopp som är kostsamma, men leder också till kostnader för sotning, askutmatning och försämrad värmeöverföring. Ett exempel är en oväntat kraftig beläggningsbildning (200–300 ton) i Vattenfalls avfallsförbränningsanläggning i Uppsala, vilken orsakade ett längre stopp under våren 2016. Stora mängder hårda beläggningar och stopp i en askutmatare ledde till att man fick genomföra ett omfattande saneringsarbete. Förutom kostnader för själva hanteringen så blir effekten av dylika stopp produktionsbortfall om produktionen inte kan ersättas med en, oftast kostsam, reservprocess. För att kunna planera och anpassa bränsleblandningen i en avfallsanläggning så att beläggningsbildningen minskar vore det önskvärt med kunskap om hur olika avfall påverkar bildningen av beläggningar. Kännedom om den kemiska sammansättningen skulle här vara en hjälp men det vore ett mycket omfattande arbete att ta fram en representativ analys och resultatet kommer ändå inte att vara representativt för bränslet i andra anläggningar, eller ens för framtida bränslen i den aktuella anläggningen. Dessutom måste sammansättningen vara känd och åtgärder vidtas innan bränslet förbränns. Mer fruktbart vore att definiera klasser av bränslen efter, ur beläggningshänseende, intressanta egenskaper som kan avgöras med kännedom om leverantör och/eller direkt visuell eller annan snabb observation. Då skulle ges möjlighet att anpassa bränslemixen så att beläggningsproblematiken minskade. Även om bränslen blandats i detta syfte i tidigare projekt så har det ofta varit fråga om ett nytt bränsle som tillförts i mängder som närmast gör det till en sorts additiv. Så har till exempel varit fallet med avloppsslam. I detta projekt angrips problemet på ett nytt sätt: de ordinarie bränslena blandas i syfte att minska beläggningsproblemen. Detta skulle öka bränsleflexibiliteten, driftsäkerheten och tillgängligheten samt möjliggöra energiåtervinning av förbränningstekniskt svåra bränslen.

1.2 MÅL

Målet med projektet är att öka kunskaperna om relationen mellan bränslesammansättning och beläggingsbildning i avfallspannor, för att möjliggöra anpassning av drift och bränsleval så att beläggingsproblemen minskas, samt att möjliggöra jämförelser av kostnader för beläggingsproblem mot intäkter från besvärliga bränslen.

2 Genomförande

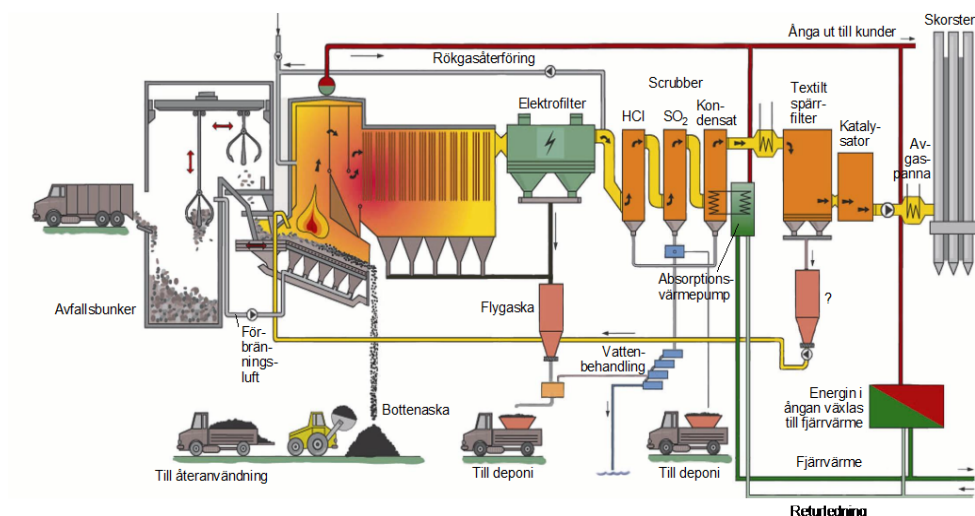
Deltagande anläggningar i föreliggande projekt är Vattenfall Uppsala, Renova Sävedalen, Umeå Energi och Lidköping Energi. Varje anläggning har en eller flera förbränningsenheter – ofta kallade pannor eller liknande.

2.1 ANLÄGGNINGARNAS FÖRBRÄNNINGSENHETER

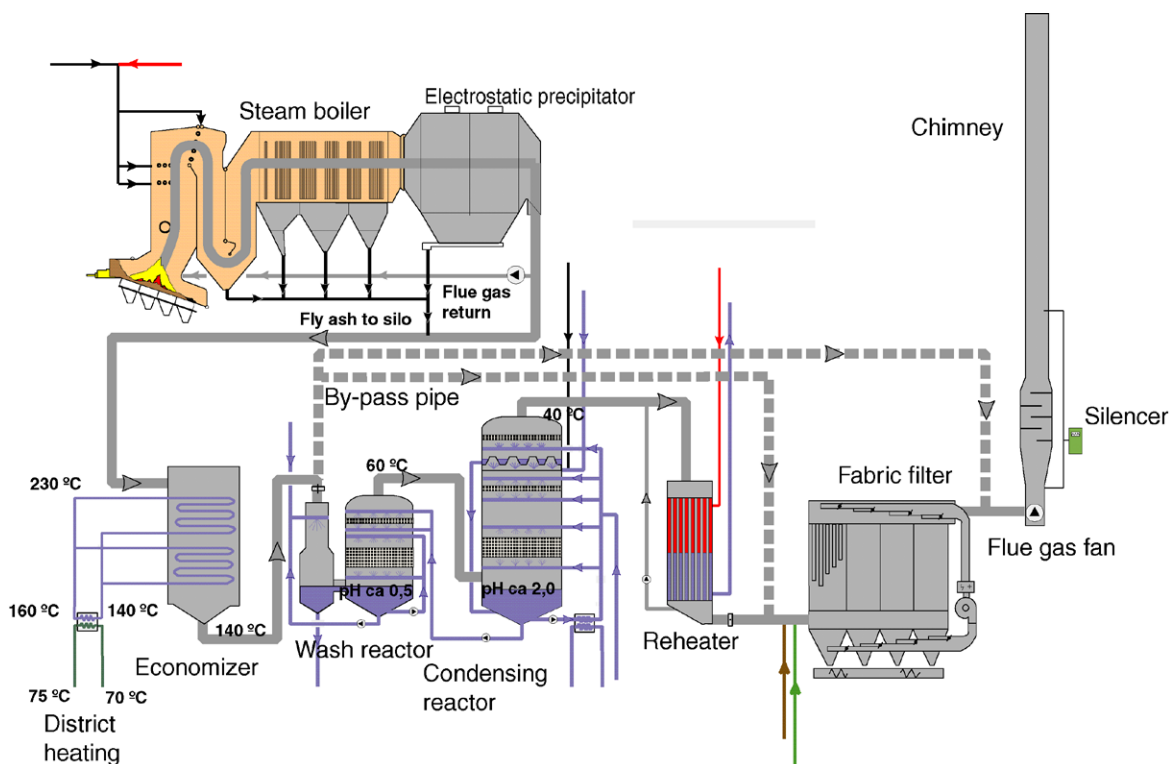
Anläggningarnas förbränningsenheter sammanfattas i Tabell 1. Figur 1-6 visar schematiska bilder av enheterna. Alla enheterna är av typen rost utom en som är en bubblande fluidbädd, och deras effekter är i intervallet 20–85 MW.

Tabell 1 Förbränningsenheternas typ, effekt och bränslen. (H = hushållsavfall, V = verksamhetsavfall, RDF = Refuse Derived Fuel, F = farligt avfall)

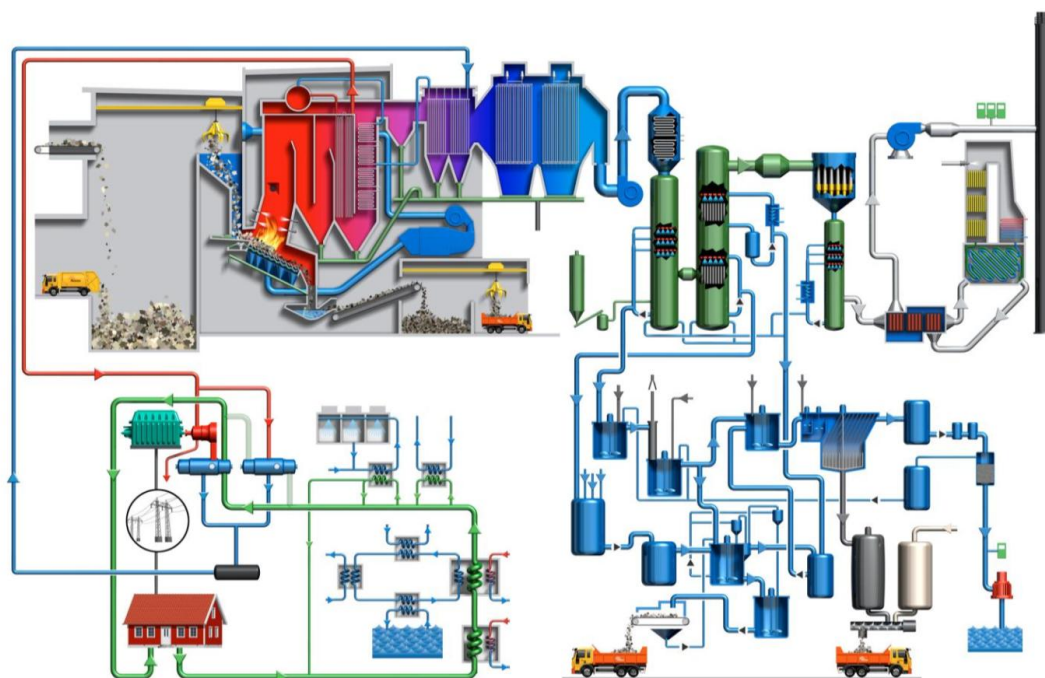
Anläggning	Förbränningsenhet	Typ	Termisk effekt (MW)	Leverantör	Bränslen
Vattenfall Uppsala	block 5	rost	85	Von Roll	H, V
Renova Sävedalen	panna 1	rost		Martin	H, V, RDF, F
	panna 4	rost		Von Roll	
	panna 5	rost		Von Roll	
	panna 7	rost		Martin	
Umeå Energi	Dåva 1	rost	60	Von Roll	H, V, F
Lidköping Energi	panna 5	BFB	20	Kvaerner	V, RDF
	panna 6	rost	21	Völund	H, V, RDF



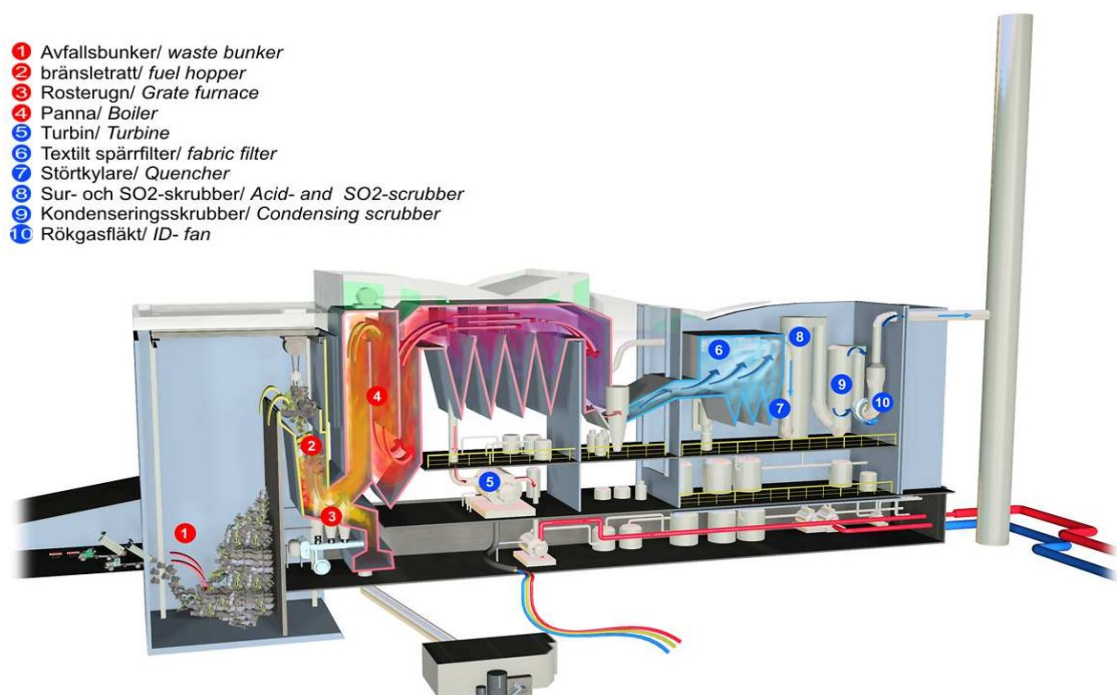
Figur 1 Schematisk bild av Vattenfall Uppsala block 5.



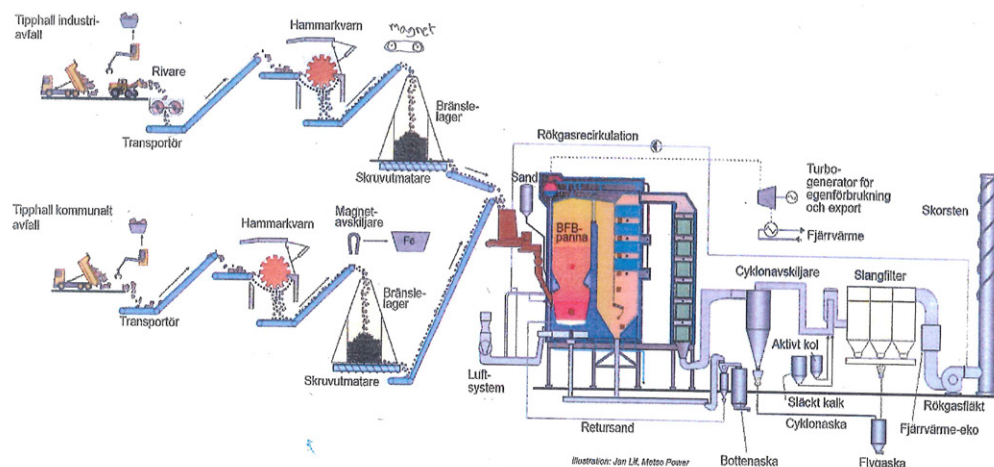
Figur 2 Schematisk bild av Renova Sävedalen panna 1, 4 och 5.



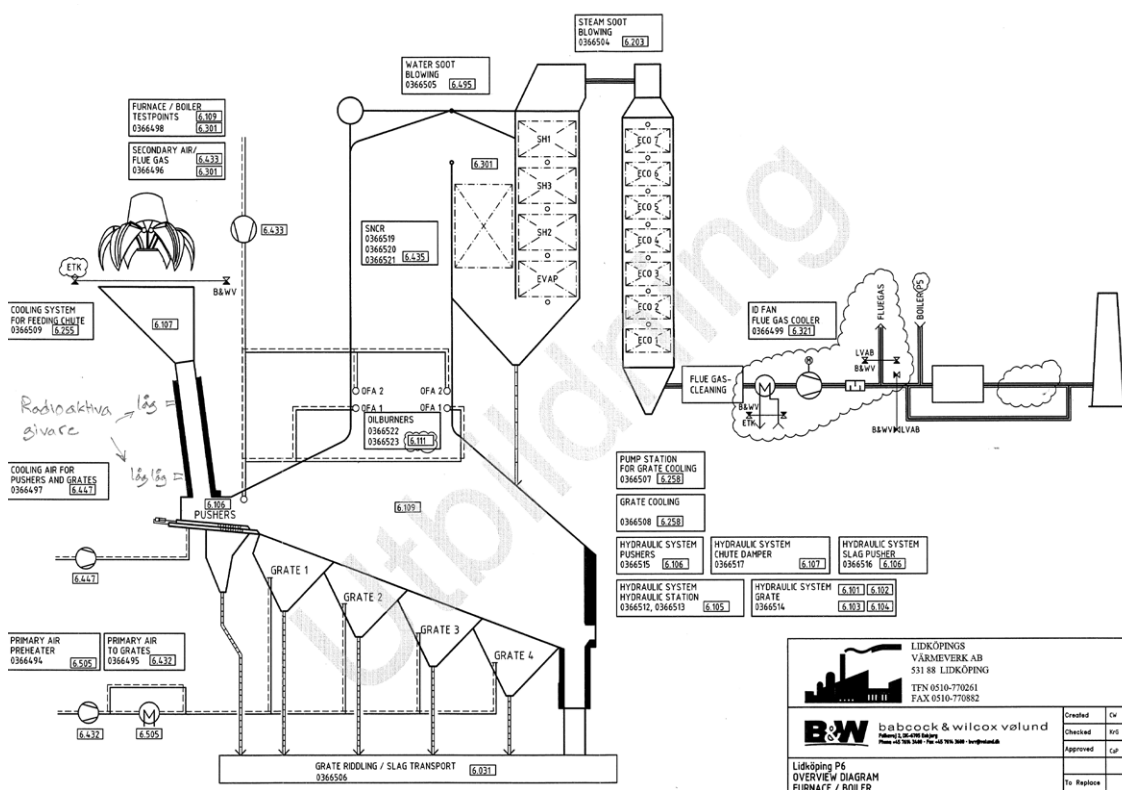
Figur 3 Schematisk bild av Renova Sävedalen panna 7.



Figur 4 Schematisk bil av Umeå Energi Dåva 1.



Figur 5 Schematisk bild av Lidköping Energi panna 5



Figur 6 Schematisk bild av Lidköping Energi panna 6.

2.2 ANLÄGGNINGARNAS ERFARENHETER

Anläggningarnas erfarenheter samlades in genom att de fick fylla i ett frågeformulär. Frågeformuläret återfinns i Bilaga 1. Ett frågeformulär per förbränningsenhet fylldes i.

2.3 PROVTAGNING

Man kan dela in beläggningar i långtids- och korttidsbeläggningar efter hur lång tid de har haft på sig att växa till. Generellt kan man säga att det är långtidsbeläggningarna som är problemet men att korttidsbeläggningarna ger förutsättningar för den tillväxt och eventuella korrosiva miljö som långtidsbeläggningarna ger upphov till.

2.3.1 Långtidsbeläggningar

Långtidsbeläggningar uppstår under en tidsperiod på veckor och längre. Dessa kan plockas ut vid driftstopp, såsom revision, och ibland under drift. Oftast är beläggningens ålder endast ungefärligt känd. Detsamma gäller beläggningens position. Ibland kan de tas från precis den yta där de bildats men ofta är positionen svårbestämd. Det gäller exempelvis när beläggningarna har avlägsnats med sprängsothning eller lossnat och fallit ner på botten i ett schakt. Anläggningarna tog ut prover av långtidsbeläggningar från förbränningsenheter varefter punkter på proverna analyserades med röntgenfluorescens.

2.3.2 Korttidsbeläggningar

Korttidsbeläggningar uppsamlades på beläggningsringar monterade på sonder. Beläggningssondernas uppgift är att kyla och hålla beläggningsringarna i den avsedda positionen i rökgasen. Kylningen sker med tryckluft. I Renova Sävedalen panna 5 användes en beläggningssond med en beläggningsring. I Vattenfall Uppsala block 5 användes en beläggningssond med 3 beläggningsringar som kylde separat. Härigenom kunde 3 olika temperaturer på beläggningsringarna testas samtidigt. Beläggningarna vägdes och analyserades med röntgenfluorescens i olika punkter på ringarna. Vissa beläggningar analyserades i sin helhet med mer exakta laboriemetoder.

Vattenfall Uppsala

3 beläggningsringar vid 230, 260 respektive 290 °C exponerades samtidigt under 3 timmar vid varje driftfall. Temperaturerna valdes för att representera vissa delar av de kylda ytorna i konvektionsdelen. Beläggningsringarna var placerade i rökgasen vid nedre delen av drag 2. Driftfallen var 5 till antalet, och karaktäriseras av bränslets klor- och svavelinnehåll jämfört med ett referensfall. Klor- och svavelinnehållet har varierats genom att andelen klorfattig och klorrik plast samt andelen gips i bränslet varierats. Tabell 2 sammanfattar driftfallen och beläggningsringarnas beteckningar.

Tabell 2 Förteckning över beläggningsringar och medelvärden av några driftparametrar under tagandet av korttidsbeläggningar och i ungefär samma position i Vattenfall Uppsala block 5.

Ringbeteckning	Temperaturer på ringar (°C)	Driftfall	Temperatur rökgas (°C)	HCl (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)
Ref230	230	Referensbränsle	609	1116	340
Ref260	260				

Ringbeteckning	Temperaturer på ringar (°C)	Driftfall	Temperatur rökgas (°C)	HCl (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)
Ref290	290				
P-Cl230	230	låg Cl + plast	633	740	95
P-Cl260	260				
P-Cl290	290				
P+Cl230	230	hög Cl + plast	559	1739	95
P+Cl230	260				
P+Cl230	290				
P+Cl+S230	230	hög Cl och S + plast	622	1359	372
P+Cl+S260	260				
P+Cl+S290	290				
RefH230	230	referensbränsle + hushållsavfall	636	876	635
RefH260	260				
RefH290	290				

Renova Sävedalen

En beläggningssring exponerades för rökgaser i 3 timmar i Renova Sävedalen panna 5. Temperaturen på ringen var 500 °C vilket motsvarar överhettare. Bränslemixen bestod av 40 % hushållsavfall och 60 % verksamhetsavfall varav 3 % RDF (Refuse Derived Fuel). Koncentrationen av SO₂ var uppströms reningen 350±180 mg/Nm³.

2.4 ANALYSMETODER

Proverna av beläggningar analyserades kemiskt med röntgenfluorescens och i laboratorium. Ingen provtagning och analys av bränslen genomfördes eftersom det inte bedömdes möjligt att ta ut representativa prover inom ramen för projektet.

2.4.1 Röntgenfluorescens (XRF)

Provernans sammansättning avseende grundämnen gjordes med ett handhållet röntgenfluorescensinstrument (ThermoFischer Scientific, Niton XL3t GOLDD+). Dessa analyser är snabba och billiga men har inte samma noggrannhet som avancerade laboriemetoder. En fördel som utnyttjats här är att man kan mäta på olika positioner på exempelvis beläggningssringarna. Således kan man skilja på vindsidan, som är den position som vetter mot den riktning varifrån rökgaserna kommer, läsidan, som är den position som vetter åt diametralt motsatt håll, och

tangentialsidan, som är mittemellan vind- och läsidan. Vind-, lä- och tangentialsidan kallas 0, 180 respektive 90°. Grundämnen lättare än magnesium detekteras inte med instrumentet och svavel har visat sig överskattas [2]. Vid mätningen belyses ett område med några mm sida till ett djup som varierar beroende på objektets natur.

2.4.2 Labmetod

Beläggningsringarna lakades med vatten (vid 80 °C i 24 h) och utlakad mängd klorid (Cl⁻) bestämdes med jonkromatografi med konduktivitetsdetektor. Ringarna togs bort och vätskan indunstades sedan till torrhet i värmeskåp. Den erhållna resten uppslöts med en syrablandning av salpetersyra, saltsyra och fluorvätesyra i mikrovågsugn. Utlakad mängd aluminium, barium, kalcium, järn, kalium, magnesium, mangan, natrium, fosfor, bly, svavel, kisel, titan och zink bestämdes med induktivt kopplad plasma-optisk emissionsspektrometri. Metoden är jämfört med ovan beskrivna XRF-mätning, långsam och dyr men har betydligt högre noggrannhet. Järn och andra komponenter som finns i stålet som ringarna är tillverkade av riskerar att komma med vid lakningen.

3 Resultat

3.1 LITTERATURSTUDIE

Avfallsbränslen är ofta komplicerade bränslen eftersom de är heterogena och varierar över tid. Exempelvis varierar värmevärde och fukthalt vilket försvårar förbränningen och medför att driften måste anpassas för att klara svängningar. Avfallsbränslen innehåller dessutom relativt höga halter av askbildande ämnen varav alkalimetaller och andra metaller är särskilt problematiska. Avfallets innehåll av exempelvis polyvinylklorid och gips gör också att klor- respektive svavelhalterna kan bli höga. Höga halter av askbildande ämnen, klor och svavel gör att det bildas påslag på främst kylda ytor vid förbränningen. Denna litteraturstudie syftar till att klargöra forskningens kunskapsläge avseende beläggingsbildning vid avfallsförbränning. Följande tas upp:

- Beläggingsmekanismer
- Bränsleparametrar
- Beläggningarnas sammansättning
- Korrosion och motåtgärder

3.1.1 Beläggingsmekanismer

Beläggningar bildas av gasformiga ämnen och ämnen i partikelform i rökgasen när dessa fastnar på kylda ytor såsom ång- och vattenbärande tuber i förbränningsanläggningen. Masstransporten från rökgas till yta sker genom impaktion, diffusion och termofores [3][4]. Impaktion innebär att partiklar som är tillräckligt tunga träffar ytan när rökgasströmmen böjer av kraftigt. Det kan ske med flygaskpartiklar på vindsidan av en ångtub som är placerad tvärs rökgasriktningen. Sannolikheten för att den impakterande partikeln skall fastna på ytan ökar om ytan har en klibbig beläggning. Vid exempelvis stråförbränning har flygaskpartiklar visat sig klibba fast i KCl [5]. Diffusion är effekten av en koncentrationsgradient. Det kan ske om koncentrationen av ett ämne är mindre vid ytan än i rökgasen. Då sker mot ytan en masstransport som är en följd av många molekylers eller små partiklars slumpmässiga rörelse. Masstransporten fortgår tills koncentrationerna är utjämnade. Om ämnet kondenserar eller reagerar kemiskt på ytan upprätthålls koncentrationsgradienten och masstransporten fortsätter. Termofores innebär att partiklar sätts i rörelse i en temperaturgradient. Temperaturgradienten innebär att gasmolekylerna är snabbare på den varmare sidan om en partikel än på den andra. Vid kollisioner mellan molekyler och partikel uppstår alltså en nettokraft i riktning från varmt till kallt i temperaturgradienten. Härigenom kan partiklar drivas från den varma rökgasen mot ytan.

Partiklar bildas bland annat av föreningar som inte förångas vid normala förbränningstemperaturer. Exempel på det är kalcium-, magnesium- och kiselföreningar. Även alkalioxider och alkalikarbonater kan ingå sådana partiklar. Dessa partiklar är supermikrona ($> 1 \mu\text{m}$), och utgör en stor andel av det som kallas flygaska. Ämnen som föreligger som gas i rökgasen är sådana som har högt ångtryck, d.v.s. är flyktiga vid förbränningstemperaturen såsom många klorider.

Speciellt alkaliklorider är kända för att övergå till gasfas. Gasformiga ämnen kan kondensera på kylda ytor, kondensera på andra partiklar eller själva kondensera och bilda submikrona ($< 1 \mu\text{m}$) partiklar. Kylda ytor finns det gott om i förbränningsanläggningar. När rökgasen träffar på en sådan yta kan gasformiga ämnen kondensera direkt på ytan eller kylas så pass att submikrona partiklar bildas nära ytan. Dessa kan sedan transporteras mot ytan med till exempel diffusion eller termofores. Kondensation på supermikrona partiklar kan ske när temperaturen i rökgasen successivt sjunker på vägen genom förbränningsanläggningen. När kondensationspunkten är nådd börjar oftast kondensationen på en tillgänglig yta såsom en partikel.

3.1.2 Bränsleparametrar

Rökgasens innehåll bestäms till stor del av bränslets sammansättning och temperaturer i rökgas och på ytor. De ämnen som kan bilda beläggningar överförs till rökgasen vid förbränningen. Främst är det askbildande ämnen samt klor och svavel, som tillsammans med syre bildar beläggningar. Ämnena frigörs och övergår till rökgasen vid förbränningen när den brännbara delen av bränslet förbränns. I rökgasen kan de föreligga som partiklar eller gas. Askbildande ämnen är för det mesta en källa till problem. De bidrar inte till värmeutvecklingen vid förbränningen och innebär därför en dödsvikt som följer med bränslet. Aska från avfallsbränslen saknar idag oftast avsättning. Den måste dock tas om hand och det orsakar kostnader. Med detta sagt så finns det mer eller mindre gynnsamma bränslen ur beläggningssynpunkt. Ett bra bränsle ger upphov till torr flygaska; d.v.s. askpartiklar i fast fas. Dessa kan förväntas bli transporterade till partikelavskiljningen i form av ett filter utan att fastna på vägen. De partiklar som ändå fastnar är inte särskilt reaktiva och kan lätt avlägsnas med befintliga sotningssystem. Ämnen som gynnar bildningen av denna typ av partiklar är exempelvis alkaliska jordartsmetaller som kalcium och magnesium. Kalcium kan dock bilda beläggningar [6] till exempel i form av CaSO_4 . Ett dåligt bränsle ger upphov till höga gaskoncentrationer av askbildande ämnen. Klor kan generellt betraktas som en bärare av alkalimetaller [7][8], zink och bly från bränsle till kylda ytor, eftersom kloriderna är flyktigare än de flesta andra föreningar. Bly kan kondensera som klorid eller sulfat i närvaro av HCl(g) respektive $\text{SO}_2(\text{g})$ [9]. Kloriderna kan kondensera på kylda ytor och partikelytor. Ytorna riskerar att bli klibbiga på grund av smältpunktssänkning [10], vilket gynnar beläggningssbildningen eftersom även torra partiklar kan fastna på den [4]. Smältpunktssänkning är en effekt av att två eller flera ämnen blandas och får en smältpunkt ibland åtskilliga hundra grader lägre än de ingående ämnena var för sig. Typiska ämnen som kan ge en kraftfull sådan effekt är klorider av alkalimetaller, zink och bly [6]. Beläggningarnas klubbighet gör att det behövs mer kraft för att få bort dem, och ibland räcker inte sotningssystemen till.

Sammanfattningsvis är alltså bränslen där de askbildande ämnena domineras av kalcium med låga halter av alkalimetaller och klor mindre problematiska ur beläggningssynpunkt än de där alkalimetaller, zink, bly och klor har relativt höga halter. Avfallsbränslen är i många fall relativt rika på denna senare grupp av ämnen.

Källorna till de problematiska grundämnena varierar. Natrium ingår i natriumklorid och därmed i livsmedel varav rester förekommer i hushållsavfall. Det ingår även i tvål, tandkräm och liknande produkter. Kalium är också en beståndsdel i tvål och liknande. Kalium förekommer annars i växtdelar eftersom det är ett makronäringsämne. Zink förekommer i gummi, textilier, plast, vissa livsmedel, färg och hygienprodukter samt används för galvanisering och i batterier. Innehållet av zink har visats vara större i verksamhetsavfall än i hushållsavfall [11]. Bly används i batterier, och till strålningsskydd, färg och glas. Klor ingår som sagt i livsmedel. Det återfinns även i textilier, läkemedel och plast. Polyvinylklorid utgörs till 57 vikt-% av klor. Svavel finns bland annat i livsmedel och vulkaniserat gummi. Det är en av huvudbeståndsdelarna i gips som kan utgöra en påtaglig del i vissa avfall. Om sortering och materialåtervinning fungerade som tänkt så skulle ganska lite av ovanstående ämnen hamna i det avfall som går till förbränning. Verkligheten visar att det finns potential för förbättring. Exempelvis fanns i avfall, bestående av lika delar hushållsavfall och verksamhetsavfall, 0,65 % natrium, 0,39 % kalium, 630 mg/kg zink, 231 mg/kg bly, 0,42 % klor och 0,57 % svavel räknat på torrt bränsle [12]. Det kan låta som låga halter men dels är de betydligt högre än i de flesta andra bränslen, och dels skall man betänka att tiotals ton bränsle förbränns varje dygn i en normal förbränningsanläggning. Vissa avfallsbränslen har ännu högre halter av vissa ämnen. Exempelvis fluff är rikt på klor och metaller, och eldas därför med begränsad inblandning i vanligt avfall. Ökningen av påslag och dess korrosiva tendenser är dock påtaglig [12][13][14].

3.1.3 Beläggningar

Litteraturen omfattar flera studier av beläggningsbildning vid avfallsförbränning. Ofta urskiljs ett mönster i den aktuella anläggningen. Ett visst ämne kan ha en tendens att finnas i högre koncentrationer i eldstaden medan ett annat återfinns längre bak. Problemet är att mönstren är olika; i en annan anläggning kan det vara tvärtom. Det är alltså svårt att generalisera utifrån litteraturen och det beror förmodligen på att anläggningarna och bränslet är olika. Nedan följer några exempel på resultat från undersökningar av beläggningar.

Innehållet i beläggningar på vattenväggar i eldstäder utgörs exempelvis av kisel, kalium, natrium, kalcium, bly, zink, klor och svavel i kraftigt varierande proportioner [15]. Typiska föreningar som identifierats är sulfater och klorider av dessa metaller [15]. I eldstäder i rostanläggningar har det visats att beläggningar i de nedre delarna domineras av kalcium, aluminium och kisel vilket tyder på att de består av ickeflyktiga föreningar som härstammar direkt från bränslet, medan beläggningar i de övre delarna innehåller svavel, klor och alkalimetaller, vilket tyder på att de kondenserat ut från rökgasen [16]. Jämviktsberäkningar vid returträförbränning i bubblande fluidiserad bädd visar att zink och bly förångas i elementär form [10]. I nedre delen av eldstaden förblir zink i elementär form medan bly bildar sulfid. Under mer oxiderande förhållanden bildas oxid eller, beroende på klorhalten, klorid. Oxiderna kondenserar främst i de övre delarna av eldstaden. Beläggningar på överhettare innehåller bly, zink, natrium, kalium, kalcium, magnesium och svavel [15][17], och klor [18] och identifierade föreningar är sulfater av alkalimetaller, kalcium och bly samt silikater av zink [15].

Beläggningar i konvektionsdelen och ekonomisern har visats innehålla kalcium, aluminium, kalium, natrium, svavel, zink [17], klor [18] i överensstämmelse med jämviktsberäkningar [10], och kisel [19]. Identifierade föreningar är CaSO_4 , KCl , och kalcium-aluminiumsilikat [19]. Sammanfattningsvis kan de problematiska grundämnena förekomma nästan varsomhelst i anläggningarnas olika delar.

3.1.4 Korrosion och motåtgärder

Ett av de stora problemen med beläggningar är att de ofta utgör en miljö gynnsam för korrosion [20]. Beläggningar som är delvis smälta är mer reaktiva och därmed korrosiva dels på grund av att kemiska reaktioner går fortare om molekyler lättare kan transporteras och dels på grund av sitt innehåll av reaktiva ämnen som klor, alkalimetaller, bly och zink [15]. Särskilt klorider men även sulfater av kalium, natrium [21], zink och bly [20][22][23][24] kan ge upphov till korrosiva påslag. I avfallsbränslen förekommer ovan nämnda grundämnen i höga halter relativt de flesta andra bränslen.

För att minska bland annat påslags- och korrosionsproblemen har olika tillsatser provats. Dolomit [25] och avsvärtnings slam [26] hade begränsad effekt, men svavel [21] och avloppslam [26][27] minskade problemen avsevärt. Svavel har tillförts i form av ammoniumsulfat [28][29] och i elementär form [30]. Även lyckade försök att recirkulera svavel från den våta rökgasreningen har genomförts [31]. Svavlet tränger undan klor från metallklorider så att det bildas metallsulfater och HCl i stället [32]. Detta är bättre än metallklorider ur korrosionssynpunkt. Slammet innehåller svavel men också fosfor samt en aluminiumrik aska med hög smältpunkt som kan ha positiva effekter i detta sammanhang [33]. Även sameldning med torv, som också innehåller svavel, har visat på positiva resultat [28][29]. Ett helt annat sätt att angripa problematiken är att sänka bäddtemperaturen så att avgången av flyktiga klorider minskar [34].

3.1.5 Klassning av avfall

Klassning innebär att ett avfallet anses tillhöra en kategori med en viss definition. I föreliggande fall är definitionen ett antal egenskaper. Klassningen har inget egenvärde utan uppfyller ett eller flera syften. Ett övergripande syfte är ofta att det är enklare att benämna avfallet med en sammanfattande term än med en lång flerordig beskrivning. En nackdel kan vara att väsentlig information då inte uttrycks. Vad som är väsentlig information bestäms av det mer specifika syftet med klassningen. Exempel på sådana syften är att ge underlag för åtgärder för att minska risken för

- arbetsmiljöproblem
- miljökonsekvenser
- driftstörningar.

Dessa tre syften kan specificeras ytterligare. Hälsovådlighet kan bero på direkt toxiska substanser, cancerogena ämnen, dammbildning och många andra egenskaper. Risker för miljön kan vara förurning, klimatpåverkan eller uppkomsten av en svårhanterlig återstod. Driftproblem kan utgöras av kvalitetsvariationer, påslagsbildning, agglomering, utsläppskontroll med mera.

Exempel på klassning

Svensk lag [35] föreskriver att avfall klassas enligt ett system av avfallskoder som anger avfallets ursprung. Denna klassning är ett bra exempel på att benämningen av avfallet förenklas. Det är enklare att säga "19 01 14" än *annan flygaska från avfallshanteringsanläggning än sådan som innehåller farliga ämnen enl. 13 b §*, men sifferkoden är i sig inte särskilt informativ. SRF (solid recovered fuels), som är avfallsbränslen framställda av ickefarligt avfall, klassas med hjälp av parametrarna värmevärde och klor- och kvicksilverinnehåll enligt en europastandard [36]. Syftena är flera: underlätta handel, underlätta myndigheters tillståndspedurer och underlätta rapportering kring användning av SRF. Ett fåtal försök att klassa avfall är beskrivna i litteraturen. I dessa fall är syftet att minska hälsorisker med främst farligt avfall [37]. Indelningen i avfall och farligt avfall kan juridiskt göras skarp men i praktiken kan den anses för grov eftersom skalan mellan ofarligt och farligt är kontinuerlig [38]. I syfte att prognosticera avfallsmängder har klassning efter verksamhet inom ett begränsat geografiskt område föreslagits [39]. I förbränningssammanhang är föga vunnet med klassningar som inte explicit har med avfallets förbränningsegenskaper att göra. Vid en första betraktelse är det tydligt att en stor del av kommunalt avfall och verksamhetsavfall består av papper, trä och plast. Denna indelning har inte direkt med förbränningsegenskaper att göra eftersom det finns olika träsorter och delar av träd samt olika plastsorter med olika egenskaper, men man kan använda denna typ av klassning för materialåtervinning [40][41]. Generellt kan man dock säga att om man vet sammansättningen med avseende på dessa komponenter så vet man en del om avfallet även ur bränslesynpunkt. Därför har försök gjorts att bestämma avfallets innehåll av trä, plast och annat med optiska metoder [42] med fördelen att sammansättningen blir känd innan avfallet går till förbränning vilket i möjliggör tidiga åtgärder för att justera driften. Utöver papper, trä och plast kan avfallets innehåll kategoriseras som matrester, textilier och gummi. Ett försök att klassa dessa grupper efter egenskaper som är av stor betydelse för förbränning har gjorts [43]. Genom statistisk analys (cluster analysis) av parametrar från vanliga bränsleanalyser och termogravimetrisk analys kunde avfallet indelas i grupper med olika förbränningsegenskaper. Syftet var i detta fall inte att minska problemen med påslag men det finns inget principiellt hinder att välja andra parametrar ur bränsleanalysen vilka är mer bestämmande för påslagsprocessen.

3.1.6 Sammanfattning

Litteraturstudien visar hur beläggningar bildas med olika mekanismer. Bränslets sammansättning är avgörande för hur det kommer att bete sig vid förbränningen. Med kännedom om denna kan man i ett enskilt fall bedöma vilken typ av beläggning som troligen bildas och var i förbränningsenheten den mest sannolikt hamnar. Sett över ett större antal bränslen och enheter är det dock så att alla de askbildande grundämnena påträffas i de flesta aktuella positionerna. Kända åtgärder mot askrelaterade problem är tillsats av svavel i olika former. Det fåtal kända klassningssystem av avfallsbränslen som finns är inriktade främst på ifall avfallet är farligt. Således saknas klassning med syfte att förhindra beläggningsproblem.

3.2 ANLÄGGNINGARNAS ERFARENHETER

Här sammanfattas anläggningarnas svar på frågorna i frågeformuläret (Bilaga 1) om beläggningsbildningen och bränslena.

3.2.1 Beläggningsbildning

Olika enheter har beläggningsbildning i olika delar. I det följande beskrivs för respektive enhet beläggningarna och omständigheterna kring dessa så långt de är kända.

Vattenfall Uppsala

Vattenfall Uppsala block 5 har främst beläggningsbildning i tomdragen, men beläggningsbildningen har ökat även i eldstaden och konvektionsdelen. Bildningstiden är månader. Temperaturerna på de ytor där beläggningar bildas är okända. Rökgasttemperaturen i eldstadens topp ökar under eldningssäsongen från ca 1000 till drygt 1200 °C. I utloppet från drag 2 ökar rökgasttemperaturen från drygt 600 till drygt 750 °C. I inloppet till konvektionsdelen ökar temperaturen från 550 till 700 °C. I början efter revisionsstart är ökningen mycket snabb: ca 100 °C på ett par månader. Därefter är ökningstakten långsammare resten av säsongen. Mängden beläggning under en eldningssäsong uppskattas grovt till 50 ton. Det mesta kan avlägsnas med sprängsotning vid stopp men viss bilning behövs också.

Ett omfattande arbete gjordes för att ta reda på orsakerna till beläggningsproblemen 2016 men utan att kunna identifiera mekanismer som var möjliga att åtgärda. Ett resultat blev dock att sotningsutrustning installerades i drag 2 vilket haft god inverkan på driftsituationen. Vattenfalls teori är att bränslets innehåll är den viktigaste orsaken. För att minska problemen har Vattenfall gjort kemiska analyser på beläggningar och informerat leverantörer om problematiken. Nya titthål i block 5 har tagits upp för att visuellt kunna följa beläggningstillväxten men sikten har visat sig för dålig.

Renova Sävenäs

Renova Sävenäs har i alla sina enheter beläggningsbildning främst i eldstäderna och på överhettarna. Dessa positioner måste alltid rengöras vid revisionsstopp. Då görs helt rent; under eldningssäsongen sprängsotas en gång per månad. Temperaturerna på de ytor där beläggningar bildas är okända. Rökgasttemperaturen är drygt 800–900 °C i eldstadens topp och 550–600 °C i ingången till konvektionsdelen.

Någon särskild utredning av orsakerna till beläggningarna har inte gjorts. Renovas teori är att bränslen med högt värmevärde och hög askhalt gynnar beläggningsbildningen. Även lokala temperatursänkningar på ytor orsakade av olika avvikelser anges som förklaring. För att minska problemen har Renova slutat ta emot beläggningsbildande bränslen som fluff. Förebyggande åtgärder som att laga luft- och tubläckage har vidtagits. Man har löpande uppföljning avseende temperaturer som påverkas av beläggningsbildningen samt funktionen hos sotningsutrustningen. Man genomför sedan ett tiotal år regelbunden sprängsotning.

Umeå Energi

Umeå Energi Dåva 1 har beläggningarsbildning på alla värmeupptagande ytor. I eldstaden blir det beläggningar som på den murade delen kan bilda smältor. Vid övergång från panelvägg till drag 2 bildas beläggningar som inte enkelt tas bort med vattensotning, som dock klarar beläggningarna i resten av drag 2. Beläggningar bildas också i övergången mellan drag 2 och 3 samt i drag 3. Beläggningarna bildas på 2–3 veckor. Temperaturerna på de ytor där beläggningar bildas är okända. Rökgastremperaturerna är 1100 – 1200 °C i eldstadens övre del. När de nått konvektionsdelarna har temperaturen sjunkit till knappt 500 °C. I konvektionsdelen sjunker temperaturen ytterligare till ca 200 °C varefter ekonomisern tar ner temperaturen till ca 140 °C. Beläggningarnas tjocklek uppskattas till mellan 5 och 100 mm. Beläggningarna plockas bort för hand.

Någon särskild utredning av orsakerna till beläggningarna har inte gjorts. Umeå Energis teori är att temperaturvariationer orsakade av oplanerade stopp, bränsleinmatningsproblem och variationer i bränslets värmevärde gynnar beläggningstillväxten. För att minska problemen har Umeå Energi de senaste femton åren utökat sotningen med vattensotning och explosionsgenerator samt förbättrat slagsotningen. Slangfiltret har också utökats. Åtgärder har också vidtagits för att förbättra bränsleblandningen i bunkern och bränslets spridning på rosten. Materialavverkning i Dåva 1 förekommer i form av korrosion och erosion; det senare till följd av tubläckage.

Lidköping Energi

Lidköping Energi panna 5 och 6 får mest beläggningar i de första tubpaketen i konvektionsdelen och ekonomisern. Dessa beläggningar bildas på 6–10 veckor, som är tiden mellan sprängsotningar. Yttertemperaturerna i panna 5 och 6 uppskattas till 225–250 °C i konvektionsdelarna och 130–225 °C i ekonomiserna. Motsvarande rökgastremperaturer är 340–500 °C respektive 160–340 °C. Mängden beläggning är inte känd. Tjockleken är svårbestämd eftersom beläggningarna kan beskrivas som stalaktiter som växer mot rökgasriktningen och småningom kan växa ihop. De kan bli flera dm långa. De går ganska lätt att få bort med sprängsotning om de inte vuxit ihop och fått fäste mellan tuberna.

Någon särskild utredning av orsakerna till beläggningarna har inte gjorts. Lidköping Energis teori är att bränslen med högt värmevärde och klorinnehåll gynnar beläggningstillväxten. För att minska problemen har Lidköping Energi infört regelbunden sprängsotning och anpassning av bränsleblandningen.

3.2.2 Bränslen

Här beskrivs för respektive enhet vilka bränslen som accepteras, vad anläggningarna vet om sina bränslen samt åtgärder som vidtas med bränslet för att minska beläggningarsbildningen.

Vattenfall Uppsala

Vattenfall vidtar inte några särskilda åtgärder för att behandla bränslet då bränsleberedning saknas. I stället arbetas systematiskt med att blandad olika

avfallsfraktioner och leveranser från kunder i bunkrarna för att få en så homogen bränslemix som möjligt. Gips är ej tillåtet och fluff tas emot i begränsad omfattning. Kunskapen om bränslet baseras på kravspecifikationer i kontrakt med leverantörerna och på stickprov med visuell inspektion.

Renova Sävenäs

Renova bortsorterar, blandar och krossar verksamhetsavfall på särskilda sorteringsanläggningar medan motsvarande åtgärder med hushållsavfall sker i insamlingsfordonen och på omlastningsstationer. Bränslet blandas sedan i bränslebunkern. Bränslen som inte uppfyller kravspecifikationen bortsorteras. Kunskap om nya bränslen erhålls genom kemisk analys och provförbränningar. Kravspecifikation reglerar bränslets värmevärde, form och andra egenskaper som plastinnehåll, gipsinnehåll, träinnehåll med mera.

Umeå Energi

Umeå Energi bortsorterar sällan bränslen. Krossning sker av för stora plastbitar, bränslebitar som är mer än 3 m långa och av verksamhetsträ och tryckimpregnerat trä. Blandning sker i bränslebunkern. Bränslen som inte eldas är animaliska biprodukter, slamprodukter och fluff. Man försöker undvika att få in gips, isolering, och PVC. Kunskap om bränslena erhålls genom stickprovskontroller för att tillse att leverantörerna håller sig till avtalet.

Lidköping Energi

Bränslet till panna 5 krossas och magnetiskt material utsorteras varpå bränslet blandas delvis. Bränslet till panna 6 blandas endast. Oavsett panna undviks stora mängder bränsle med högt värmevärde och klorinnehåll. Det finns riktvärden för fukthalt, värmevärde, klorhalt, svavelhalt samt en rad mer eller mindre miljöfarliga metaller. Därtill undviker man bränslen med en form som kan ge problem såsom band, slangar, presenningar och balar. För att upprätthålla dessa krav på bränslena finns kravspecifikationer och görs visuella stickprovskontroller.

3.2.3 Sammanfattning

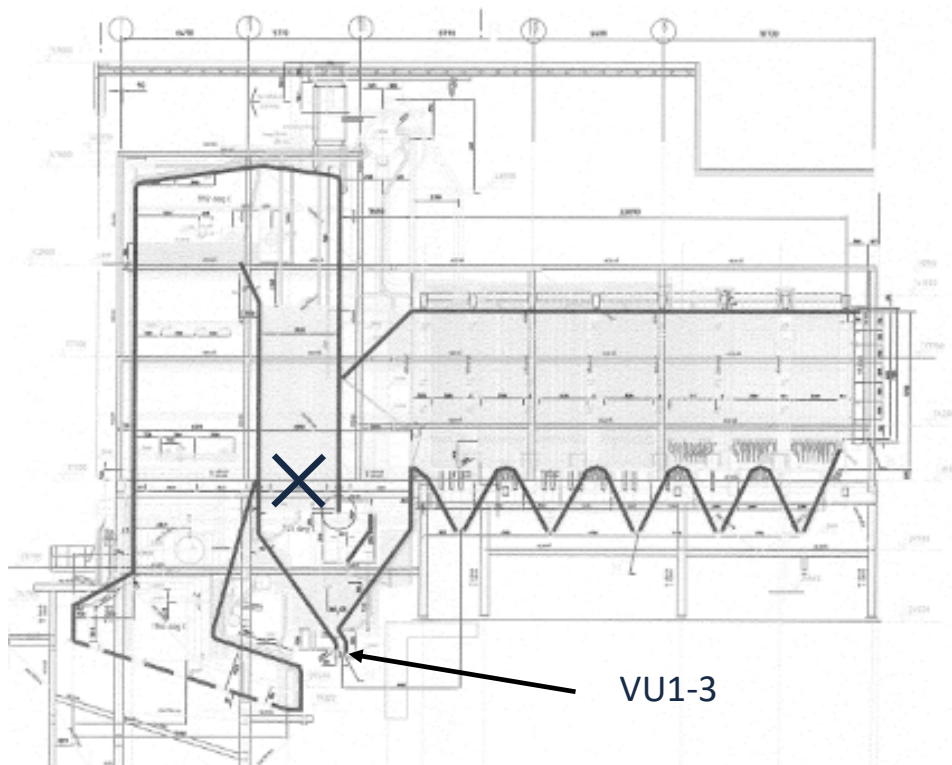
Alla förbränningsenheter i projektet har beläggningsproblem men olika enheter har problem i olika positioner. Någon ingående undersökning av orsakerna till beläggningsarna har inte gjorts, men de, av anläggningarna, framförda teorierna är rimliga med hänsyn till vad som är känt från litteraturgenomgången. De åtgärder som vidtas i bränslehanteringen är också rimliga ur denna synpunkt.

3.3 LÅNGTIDSBELÄGGNINGAR

Prover av långtidsbeläggningar togs i olika *provpositioner* i förbränningsenheterna. Från varje provposition togs minst ett prov. Om flera liknande prover togs i samma position vid samma tillfälle har de fått samma *provbeteckning*, och tilläggsbeteckningar om de uppvisat någon särskild visuell karaktäristik annan än den allmänt förekommande blandningen av grått, brunt och beige. Proverna analyserades med XRF i minst en *mätpunkt*.

3.3.1 Vattenfall Uppsala

Figur 7 visar en pannskiss med provpositioner i Vattenfall Uppsala block 5.



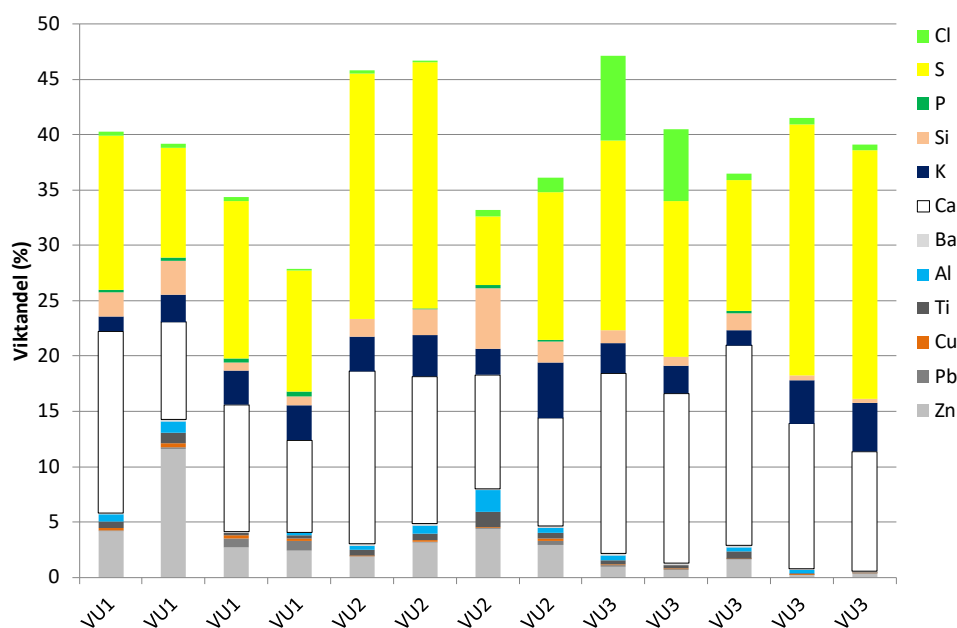
Figur 7 Pannskiss med provpositioner och position för beläggningssond för korttidsbeläggningar markerad med kryss i Vattenfall Uppsala block 5.

Tabell 3 sammanfattar prover av långtidsbeläggningar tagna i Vattenfall Uppsala block 5 vid tre olika tillfällen. Proverna togs från en utmatningstratt mellan drag 2 och 3 varför det inte med säkerhet går att säga från vilket drag det kommer. Vattenfalls teori är dock att det mesta kommer från drag 2, vilket bland annat baseras på att installation av sotningsutrustning där har givit gott resultat.

Tabell 3 Prover av långtidsbeläggningar tagna i Vattenfall Uppsala block 5.

Provbeteckning	Provposition	Mätpunkter (XRF)	Kommentar
VU1	utmatningstratt mellan drag 2 och 3	4 mätpunkter fördelade på 2 prover	-
VU2		4 mätpunkter fördelade på 2 prover	Ett större ras (tonvis) med material från drag 2 eller 3. Se Bilaga 2 för fotografi.
VU3		5 mätpunkter fördelade på 2 prover	Se Bilaga 2 för fotografi.

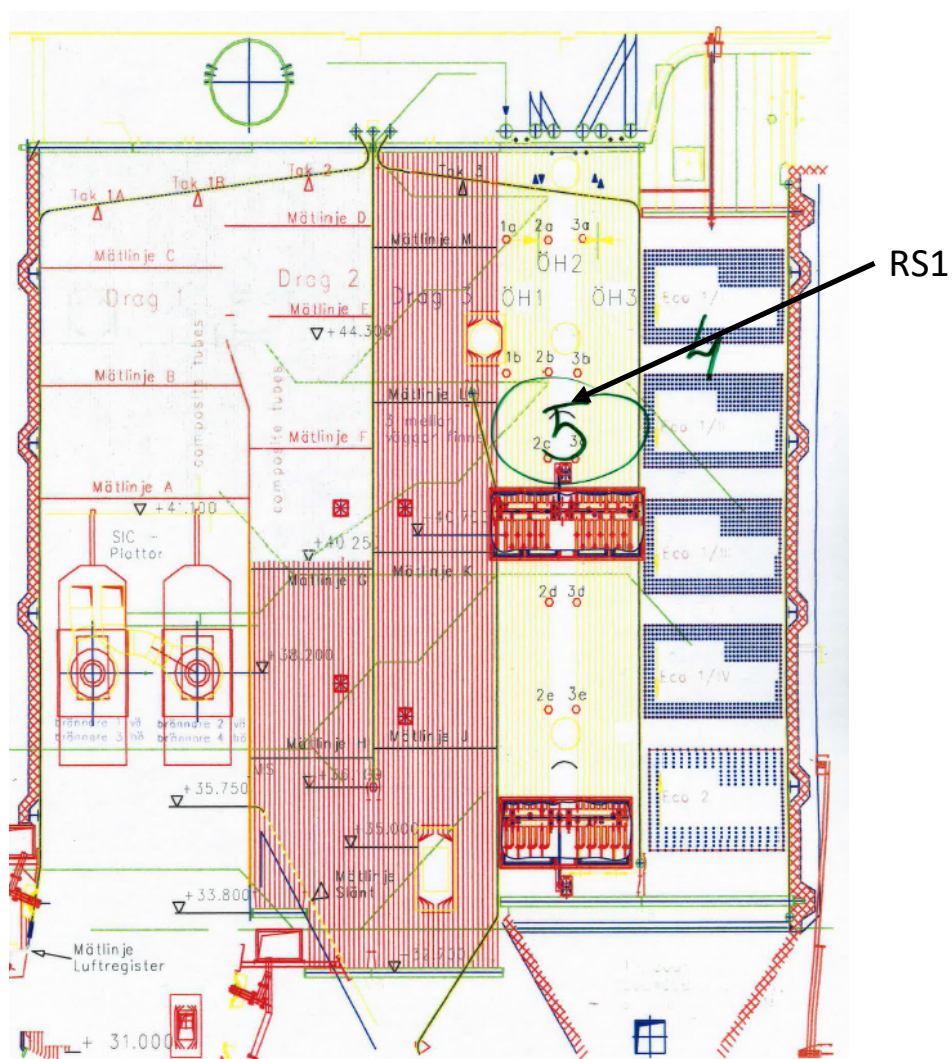
Figur 8 visar sammansättningen av långtidsbeläggningar i block 5. Se Bilaga 3 för mätvärden. Dominerande ämnen är kalcium och svavel även om man vet att svavel överskattas. Klor förekommer endast i ett par av beläggningarna vid ett tillfälle. I övrigt återfinns kalium och, typiskt för avfall, zink. Summan av viktandelarna sträcker sig från knappt 30 till knappt 50 %. De ca 70 till 50 % som inte tagits med här utgörs dels av sådana ämnen som XRF-instrumentet inte ser, som exempelvis syre, och dels en lång rad spårämnen som förekommer i små andelar.



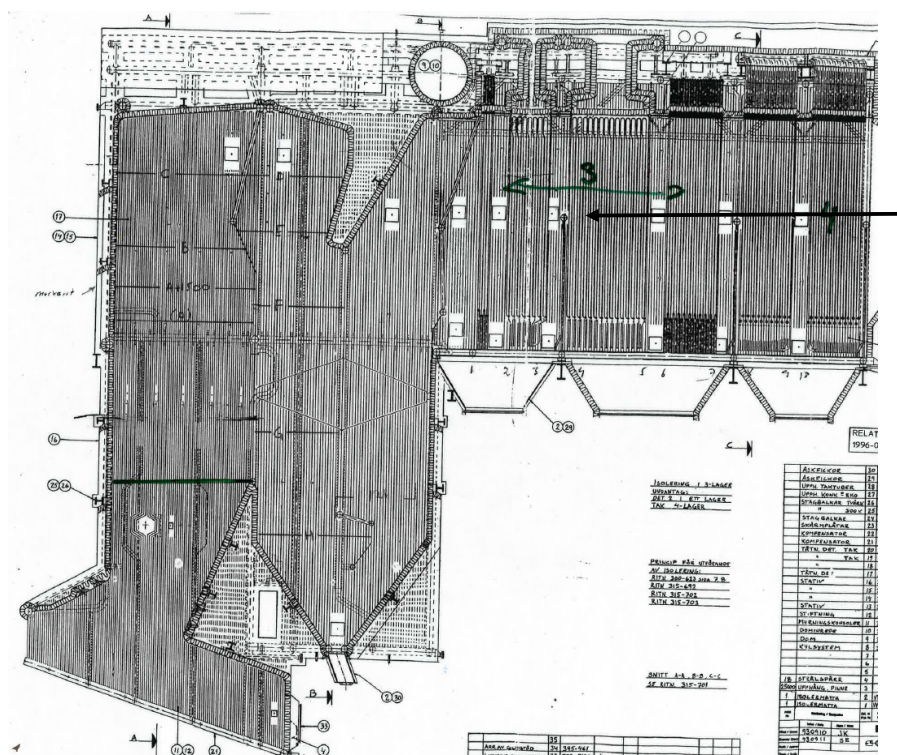
Figur 8 Sammansättning av långtidsbeläggningar i Vattenfall Uppsala block 5.

3.3.2 Renova Sävenäs

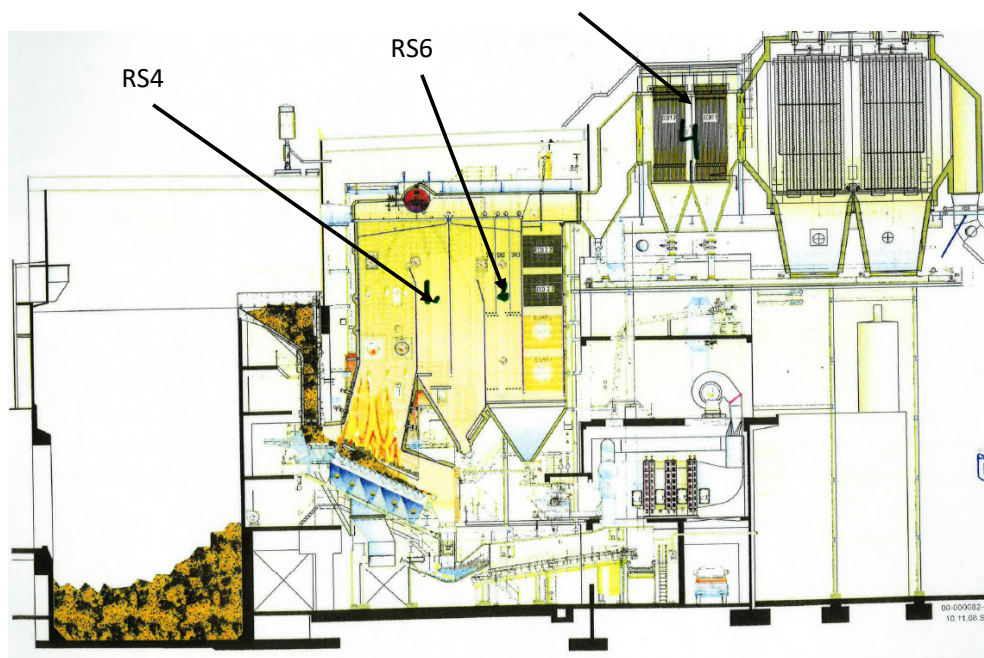
Figur 9-11 visar pannskisser av Renova Sävenäs panna 1, 5 respektive 7 med provpositioner.



Figur 9 Pannskiss med provpositioner i Renova Sävénäs panna 1.



Figur 10 Pannskiss med provpositioner i Renova Sävsnäs panna 5.



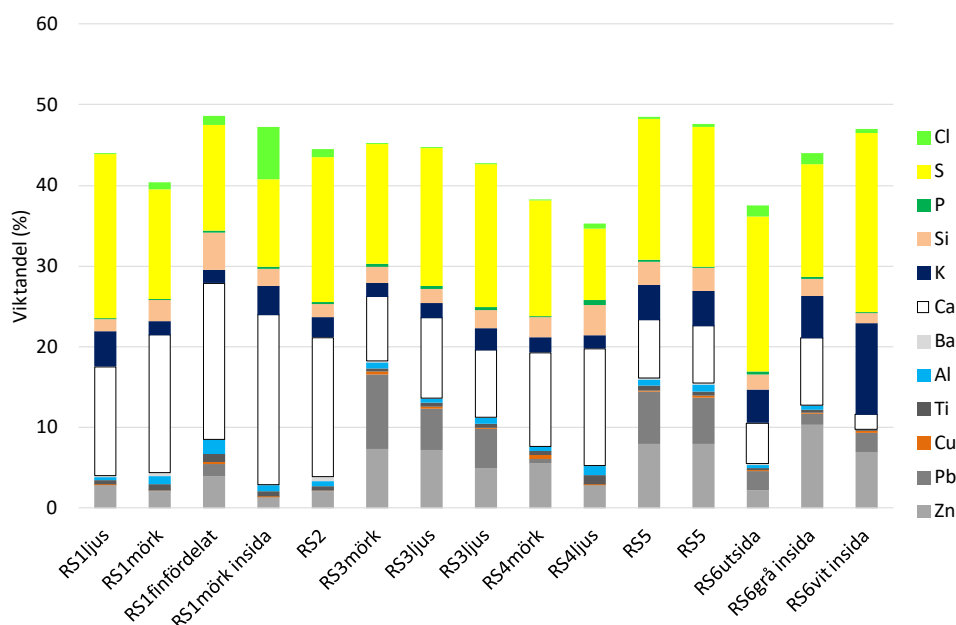
Figur 11 Pannskiss med provpositioner i Renova Sävenäs panna 7.

Tabell 4 sammanfattar prover av långtidsbeläggningar tagna i Renova Sävenäs förbränningsenheter.

Tabell 4 Prover av långtidsbeläggningar tagna i Renova Sävenäs förbränningsenheter.

Provebeteckning	Provposition	Mätpunkter (XRF)	Kommentar
RS1ljus	Panna 1	ljus yta	-
RS1mörk	Överhettare	mörk yta	-
RS1finfördelat	Sprängsotning	småbitar	-
RS1mörk insida		mörk yta mot tub	-
RS2	Panna 5		-
RS3mörk	Överhettare	mörka fläckar	Se Bilaga 2 för fotografi
	Sprängsotning		
RS3ljus		ljus yta mellan mörka fläckar	Se Bilaga 2 för fotografi
RS3ljus		ljus yta	-
RS4mörk	Panna 7	mörk yta	Se Bilaga 2 för fotografi
	Drag 2		
RS4ljus		ljus yta	Se Bilaga 2 för fotografi
RS5	Panna 7	-	-
RS5	Överhettare 2	-	-
RS6utsida	Panna 7	utsida av beläggning mot tub	-
	Matarvatteneconomiser		
RS6grå insida		grå yta mot tub	-
RS6vit insida		vit yta mot tub	-

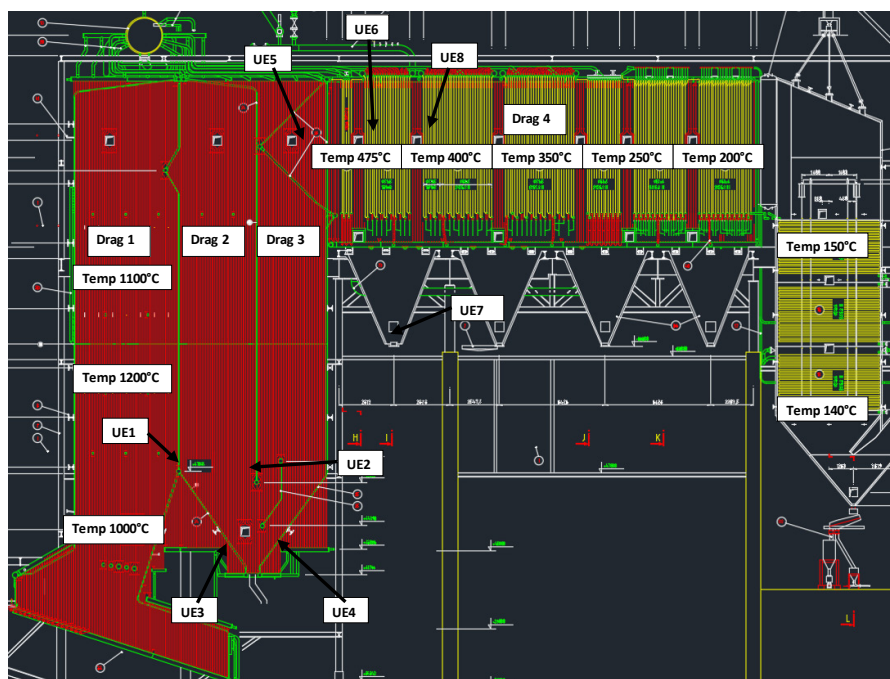
Figur 12 visar sammansättningen av långtidsbeläggningar i Renova Sävenäs enheter. Se Bilaga 3 för mätvärden.



Figur 12 Sammansättning av långtidsbeläggningar i Renova Sävenäs enheter.

3.3.3 Umeå Energi

Figur 13 visar en pannskiss med provpositioner och temperaturer i Umeå Energi Dåva 1.



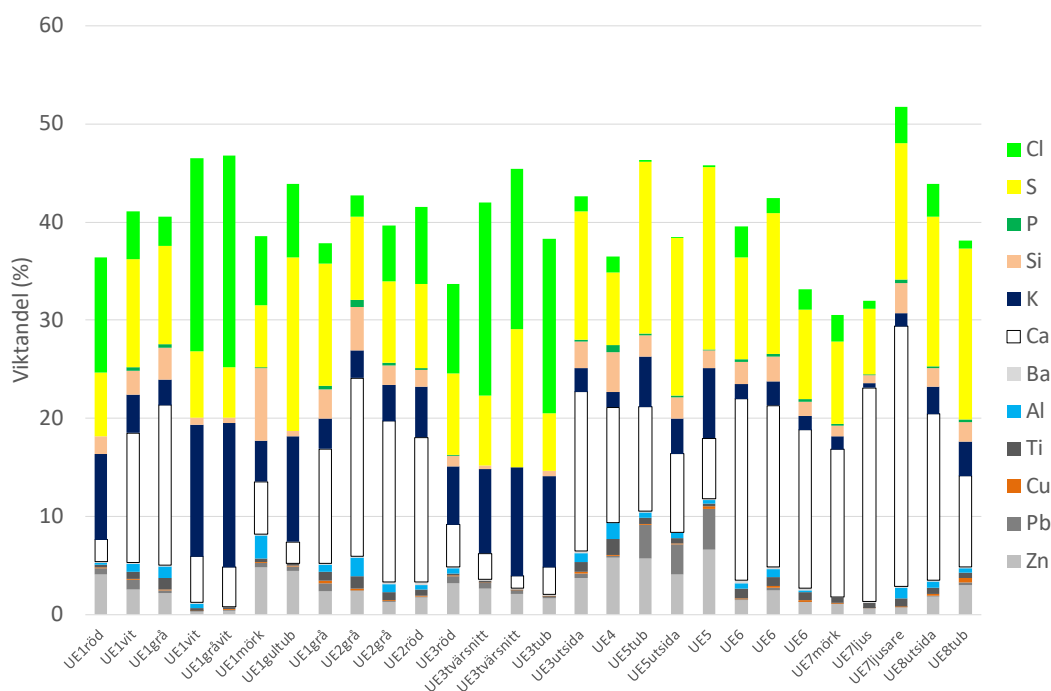
Figur 13 Pannskiss med provpositioner och temperaturer i Umeå Energi Dåva 1.

Tabell 5 sammanfattar prover av långtidsbeläggningar tagna i Umeå Energi Dåva 1.

Tabell 5 Prover av långtidsbeläggningar tagna i Umeå Energi Dåva 1.

Provbeteckning	Provposition	Mätpunkter (XRF)	Kommentar
UE1röd	Drag 2 främre vägg, just ovanför tratten	röd yta	Beläggningsbildning vanligt mot slutet av driftsäsongen. Se Bilaga 2 för fotografi av UE1röd, UE1 vit och UE1gul.
UE1vit		vit yta	
UE1grå		grå yta	
UE1vit		vit yta	
UE1gråvit		gråvit yta	
UE1mörk		mörk yta mot tub	
UE1gul		gul yta mot tub	
UE2grå	Drag 2 bakre vägg, just ovanför tratten	grå yta	Beläggningsbildning vanligt.
UE2grå		grå yta	
UE2röd		rödaktig yta	
UE3röd	Tratt stoftutmatning vändschakt drag 2/3. Främre vägg i höjd med manlucka	röd yta	Beläggningsbildning vanligt. Se Bilaga 2 för fotografi av UE3röd.
UE3tvärsnitt		yttre del av tvärsnitt vinkelrätt mot tub	
UE3tvärsnitt		inre del av tvärsnitt vinkelrätt mot tub	
UE3tub		yta mot tub	
UE3utsida	Tratt stoftutmatning vändschakt drag 2/3. Bakre vägg i höjd med manlucka, under/vid mellanvägg	utsida mot rökgas	Beläggningsbildning vanligt.
UE4		-	
UE5tub		yta mot tub	
UE5utsida	Drag 3 övergång mot drag 4 gittertuber i höjd med manlucka	utsida mot rökgas	Beläggningsbildning vanligt.
UE5		-	
UE6		-	
UE6	överhettare under manlucka mellan första konvektionsdelen och och överhettare 3	-	Beläggningar i område som sprängsotas med jämna intervall
UE6		-	
UE6		-	
UE7mörk	utmatningsstupet under överhettare 3 (första)	mörk	-
UE7ljus		ljus	
UE7ljusare		ljusare	
UE8utsida	manlucka mellan överhettare 3 och 2, hängade tuber. Snett uppåt mot överhettare 2	utsida mot rökgas	Beläggningar i område som sprängsotas med jämna intervall. Se Bilaga 2 för fotografi av UE8tub.
UE8tub		yta mot tub	

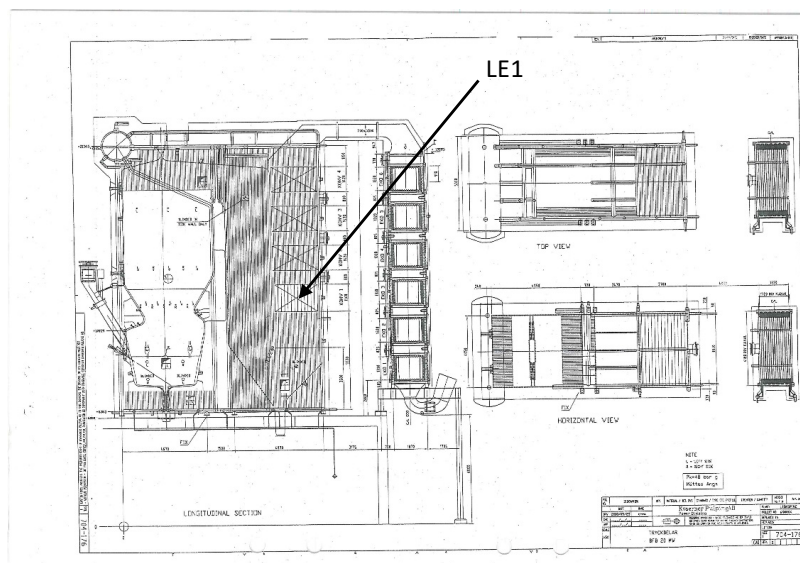
Figur 14 visar sammansättningen av prover från Umeå Energi Dåva 1. Se Bilaga 3 för mätvärden. De innehåller de typiska ämnena i beläggningar. Variationen mellan prover – även från samma eller närliggande positioner – är stor. Det är svårt att hitta några klara samband men det är i genomsnitt mer klor och kalium i beläggningar fram till vändschaktet. Längre bak dominerar kalcium och svavel såsom på överhettartuber och andra konvektionsdelar. Något särskilt samband mellan provernas utseende och innehåll kan inte observeras.



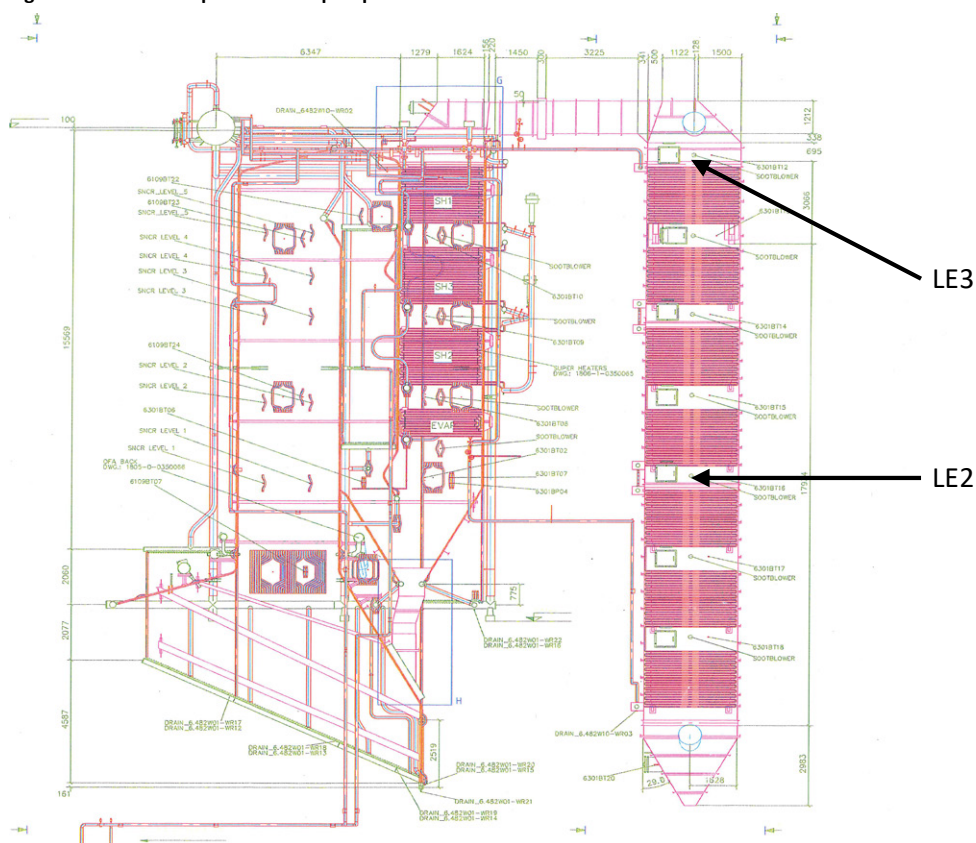
Figur 14 Sammansättning av långtidsbeläggningar i Umeå Energi Dåva 1.

3.3.4 Lidköping Energi

Figur 15 och 14 visar skisser av panna 5 respektive 6 med provpositioner.



Figur 15 Pannskiss av panna 5 med provposition.



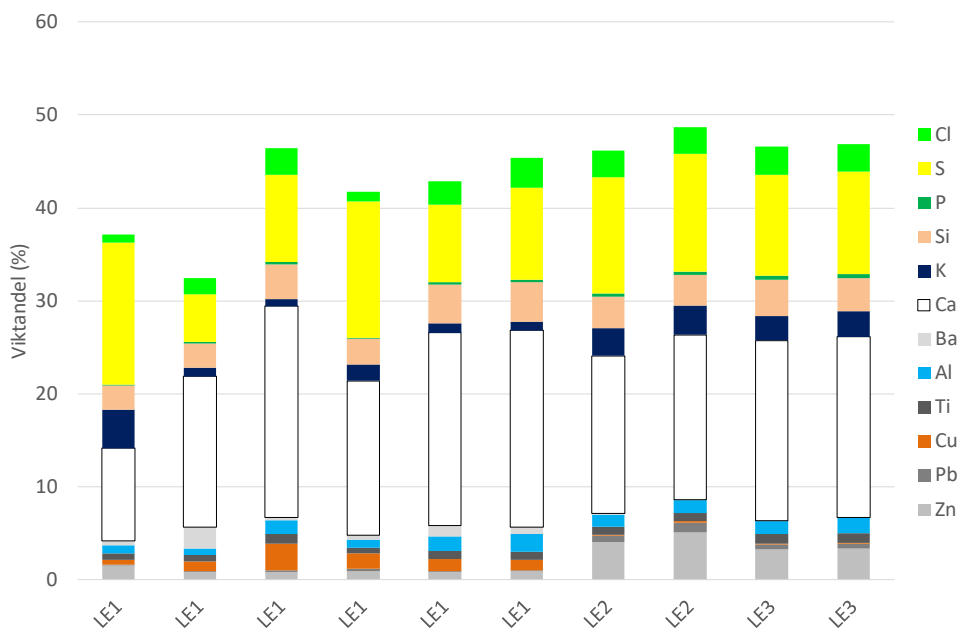
Figur 16 Pannskiss panna 6 med provpositioner.

Tabell 6 sammanfattar prover av långtidsbeläggningar tagna i Lidköping Energi panna 5 och 6.

Tabell 6 Prover av långtidsbeläggningar tagna i Lidköping Energi panna 5 och 6.

Provbeteckning	Provposition	Mätpunkter (XRF)	Kommentar
LE1	Panna 5 Första konvektionspaketet	6 mätpunkter fördelade på tre prover	-
LE2	Panna 6 Economiser före första paketet	2 mätpunkter fördelade på 1 prov	-
LE3	Panna 6 Economiser mellan paket 4 och 5.	2 mätpunkter fördelade på ett prov	-

Figur 17 visar sammansättningen av långtidsbeläggningar i Lidköping Energis panna 5 och 6. Se Bilaga 3 för mätvärden. Trots att proverna är från konvektionspaketet i en fluidbäddpanna och economisern i en rostpanna så är det inga tydliga skillnader. Svavel och kalcium dominerar. Det enda som skiljer något är att det är mer koppar i fluidbäddproverna.



Figur 17 Sammansättning av långtidsbeläggningar i Lidköping Energis enheter.

3.4 KORTTIDSBELÄGGNINGAR

3.4.1 Vattenfall Uppsala

Tabell 2 visar driftdata i Vattenfall Uppsala block 5 under tagande av korttidsbeläggningar vid de olika driftfallen. Se Bilaga 4 för mer driftdata. Ambitionen att ta bort och lägga till klor i bränslet har fungerat väl. Det är betydligt lägre koncentration HCl i rökgaserna i P-Cl än i Ref, och det är högre koncentration i P+Cl. Det är lägre koncentration HCl i RefH vilket kan vara rimligt om detta hushållsavfall innehåller mindre klor än bränslet i Ref.

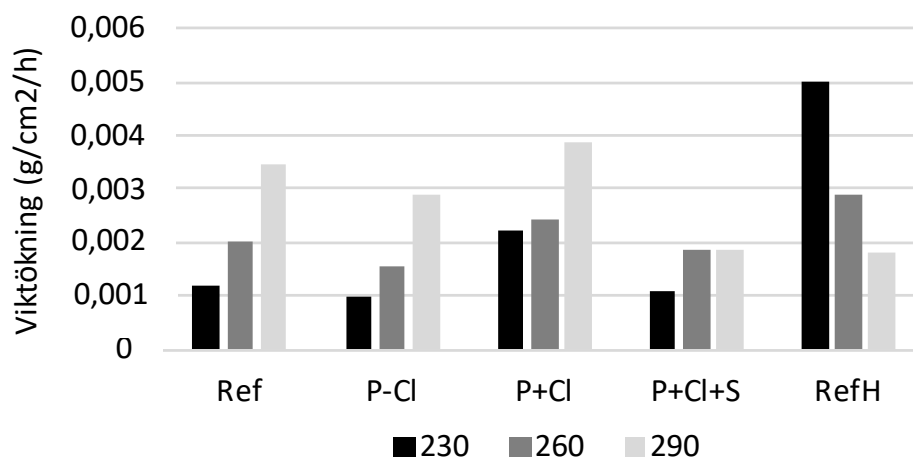
Svaveldioxidkoncentrationerna varierar mellan driftfallen, och var inte högre i fallet P+Cl+S. P-Cl och RefH avviker med betydligt lägre respektive högre koncentrationer. Under P+Cl inträffade en kraftig nedgång av lasten just när beläggningssonden exponerades. Den viktigaste skillnaden jämfört med om lasten varit normal är att rökastemperaturen sjönk. Se Bilaga 4 för fler detaljer.

Tabell 8 visar beläggningstillväxten vid korttidsexponeringar i Vattenfall Uppsala block 5. Allmänt ger en ökande yttemperatur mer tillväxt men i RefH är det tvärtom där ökande temperatur ger mindre tillväxt, som vid 260 och i synnerhet 230 °C yttemperatur är relativt hög.

Tabell 7 Beläggningstillväxt (g) vid tagande av korttidsbeläggningar i Vattenfall Uppsala block 5.

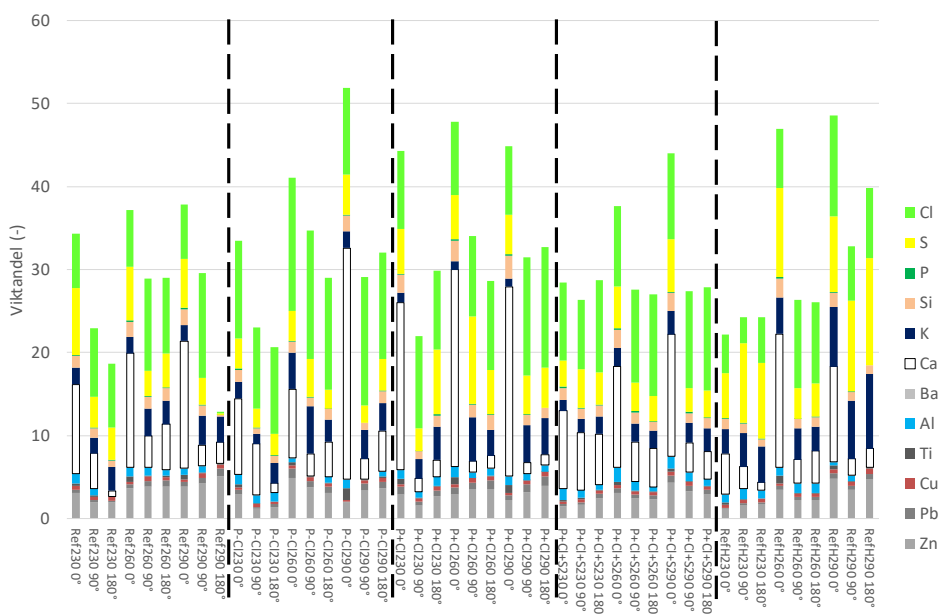
Temperatur (°C)	Ref	P-Cl	P+Cl	P+Cl+S	RefH
230	0,11	0,091	0,20	0,10	0,45
260	0,18	0,14	0,22	0,17	0,26
290	0,31	0,26	0,35	0,17	0,16

Figur 18 visar beläggningstillväxten per yt- och tidsenhet för korttidsbeläggningar i Vattenfall Uppsala block 5. Tillväxten är likartad i alla fall utom i RefH.



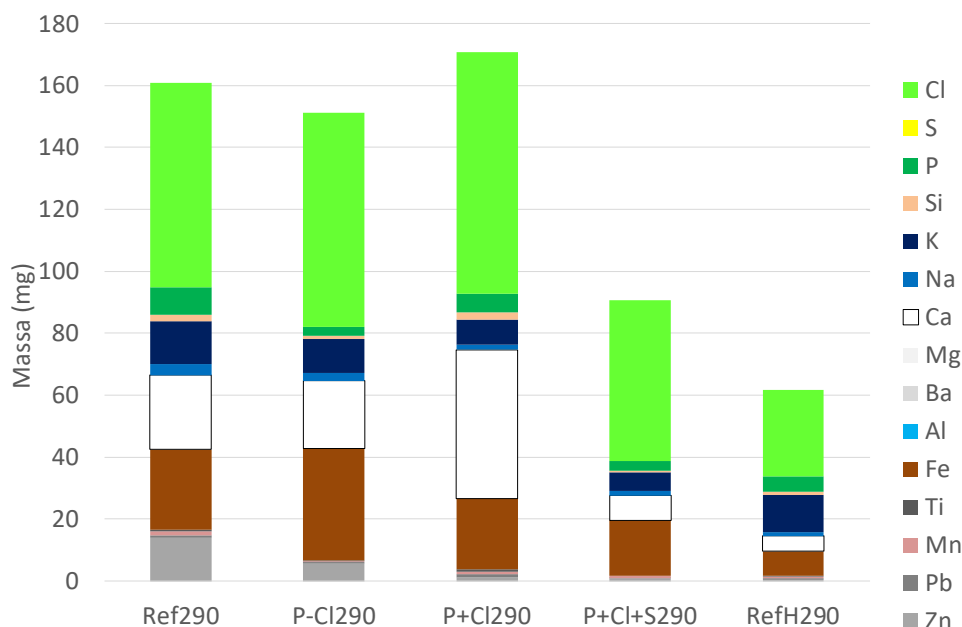
Figur 18 Beläggningstillväxten vid 3 timmars exponering i rökgas vid 3 olika temperaturer och 5 driftfall i Vattenfall Uppsala block 5.

Figur 19 visar sammansättningen på alla beläggningsringar och olika positioner på dessa. Skillnaden mellan beläggningarna från olika driftfall är inte slående. Exempelvis är det inte mer klor i beläggningar från driftfallet P+Cl än P-Cl, eller mer svavel i beläggningar från P+Cl+S än i P+Cl. Det är stor spridning av viktandelarna mellan olika positioner på ringarna inom ett givet driftfall. Framförallt vindsidan (0 °) innehåller ofta betydligt mer kalcium.



Figur 19 Sammansättning av korttidsbeläggningar uppsamlade i rökgas i Vattenfall Uppsala. Under varje driftfall har 3 ringar vid olika yttemperaturer exponerats, och 3 positioner på varje ring analyserats med XRF.

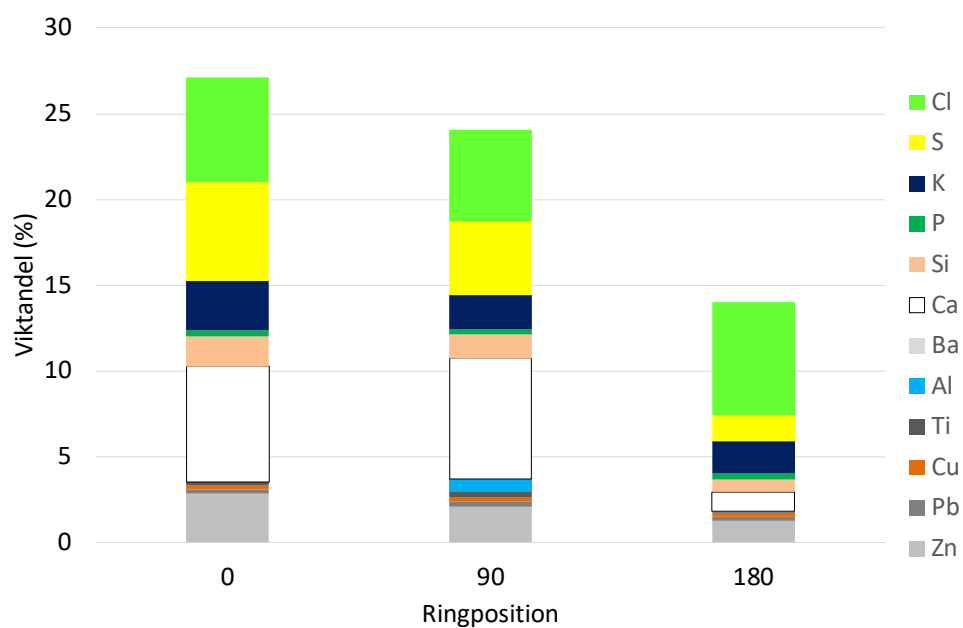
Figur 20 visar totala sammansättningen (mg) av beläggningar på ringar med yttemperaturen 290 °C. Noteras bör att andelen svavel är mycket låg. XRF-mätningen (Figur 19) överskattar visserligen svavel men troligen är en delförklaring att XRF:en mäter på beläggningens ytskikt och en bit in, medan Figur 20 visar totala sammansättningen. Järn förekommer rikligt men det kan härstamma från ringmaterialet. Natrium förekommer inte i större mängder. Det är relativt små skillnader mellan beläggningarna i Ref, P-Cl och P+Cl. Den sistnämnda innehåller dock betydligt mer kalcium. I fallen P+Cl+S och RefH innehåller beläggningarna mindre av de ämnen som mäts. Det är tydligt mindre kalcium men även mindre klor.



Figur 20 Totala sammansättning av beläggningar på ringar med yttemperaturen 290 °C i rökgas i Vattenfall Uppsala.

3.4.2 Renova

Korttidsbeläggning uppsamlades på ring med yttemperaturen 500 °C. Tillväxten av beläggning var 0,0176 g/cm²/h. Figur 21 visar sammansättningen i olika ringpositioner av beläggningen. Vid 0 och 90° är sammansättningen likartad och domineras av klor, svavel, kalium, kalcium och zink. Vid 180° är det relativt sett mer klor medan det är betydligt mindre kalcium och svavel.



Figur 21 Sammansättning av beläggning uppsamlad i rökgas i Renova Sävenäs panna 5. 4 positioner på varje ring har analyserats med XRF.

4 Diskussion

4.1 ANLÄGGNINGARNAS ÅTGÄRDER JÄMFÖRT MED LITTERATURSTUDIEN

Av litteraturstudien framgår att de inte finns någon etablerad klassning av avfallsbränsle som kan användas i syfte att minska beläggningsbildningen. Det framgår också att tillsats av svavel i olika former är en metod syftande till att minska beläggningsbildningens korrosiva egenskaper. Det man vill undvika med svaveltillsats är bildning av klorider – främst av alkali, men även andra metaller i kloridform gynnar uppkomsten av beläggningar med låg smältpunkt. Dessa deponeras då genom diffusion följt av kondensation, eller impaktion av partiklar med en åtminstone delvis smält yta. Smältor på partiklar och ytor gynnar påbyggnaden av beläggningen då även torra flygaskpartiklar med betydligt högre smältpunkt fastnar på ytan genom impaktion. Sänkning av bäddtemperaturen är också en metod som testats. En lägre temperatur ger en minskad avgång från bränslet i bädden av flyktiga ämnen såsom alkaliklorider och borde därför minska kloridhalten i beläggningarna. Av det ovanstående kan man alltså föreslå följande åtgärder

- undvik klorrika bränslen (för att minska kloridbildningen)
- undvik bränslen med högt värmevärde eller blanda bränslet väl (för att undvika lokalt höga temperaturer i bädden med ökad kloridavgång)
- öka svavelhalten om klorrika bränslen används (för att tränga undan klor från metallatomer och därigenom undvika bildning av metallklorider).

Av intervjuerna med anläggningarna framgår att de i stor utsträckning använder sig av de två förstnämnda åtgärderna. De undviker eller begränsar andelen fluff och liknande bränslen eftersom dessa är klorrika och har högt värmevärde. Åtgärd tre skulle kunna bestå i att man sparar ett gipsrikt rivningsrejekt till dess man skall elda ett klorrikt avfall som exempelvis innehåller mycket polyvinylklorid. Denna åtgärd har dock inte tillämpats av de intervjuade anläggningarna men försök i fullstora anläggningar har gjorts [44].

En fråga som man kan ställa är hur anläggningarna vet när ett bränsle är klorrikt eller har högt värmevärde. Troligen vet man inte det säkert utom när det gäller fluff, som är känt för dessa egenskaper. Det är betydligt enklare och billigare att avstå från fluff än att kemiskt analysera alla bränslen. En viss kännedom om leverantörernas avfall har man dock, men denna är inte baserad främst på kemiska analyser utan på erfarenhet eller på kännedom om högre avfallets plastinnehåll och liknande. Det var exempelvis denna typ av kunskap som möjliggjorde försök med korttidsbeläggningar i Vattenfall Uppsala.

4.2 BELÄGGNINGARNAS BESKAFFENHET JÄMFÖRT MED LITTERATUREN

4.2.1 Långtidsbeläggningar

En slutsats från litteraturstudien är att de viktigaste askbildande ämnena återfinns i beläggningar i hela förbränningsenheten. Det överensstämmer med den föreliggande studien. Beläggningarna från de fyra anläggningarna domineras

oftast av kalcium och svavel. Ofta finns det mycket zink. I några beläggningar finns det mycket klor och kalium. Detta avspeglar förmodligen bränslets innehåll över en period som minst sträcker sig från förra sprängsotningen till dess att proverna togs, men eftersom inte ens sprängsotningar gör helt rent så är delar av beläggningarna äldre.

Litteraturstudien visar att ett tänkbart scenario när en beläggning byggs upp är att det först bildas en klibbig yta av exempelvis smälta eller halvsmälta alkaliklorider som flygaskpartiklar kan fastna i på värmeöverförande ytor. Utan den klibbiga ytan skulle dessa partiklar ha studsat av. När det väl bildats en ojämn yta av impakterade flygaskpartiklar ökar sannolikheten för att en partikel skall fastna även om det initiala klibbiga lagret är täckt av flygaska. Eftersom asklagret också isolerar den relativt kalla värmeöverförande ytan så blir beläggningens ytemperatur successivt högre och det kan i sig orsaka smältor. Beläggningen kan byggas på till ibland flera decimeter. Ett beläggningsprov från initiala fasen skulle troligen ha innehållit mycket alkaliklorider. När beläggningspåbyggnaden pågått under en längre tid kommer beläggningen alltmer att avspegla bränslets sammansättning.

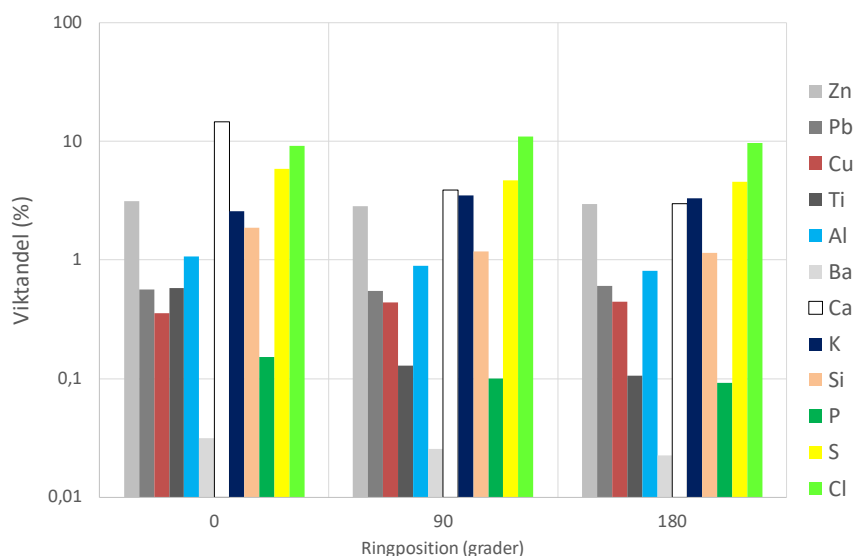
Av litteraturen kunde man vänta sig att alkalimetaller i beläggningar från fluidbäddenheter kunde vara underrepresenterat jämfört med bränslesammansättningen eller rostenheter eftersom alkali gärna bildar alkalilikater med kiselbaserad bäddsand. Prover från Lidköping Energi panna 5 – projektets enda fluidbäddenhet – innehåller relativt lite kalium så det är möjligt att det finns en sådan trend men den är inte entydig eller särskilt tydlig om man jämför med prover från samma anläggnings panna 6 eller de andra rostenheterna i projektet.

4.2.2 Korttidsbeläggningar

Korttidsbeläggningar från Vattenfall Uppsala block 5 och Renova Sävenäs panna 5 innehåller mer kalium än långtidsprover från motsvarande positioner i enheterna. Det stöder den ovan beskrivna mekanismen med en initialfas med deponi av alkaliklorider, men det är också tydligt att det redan på 3 timmar hinner ansamlas en hel del kalcium, svavel och zink.

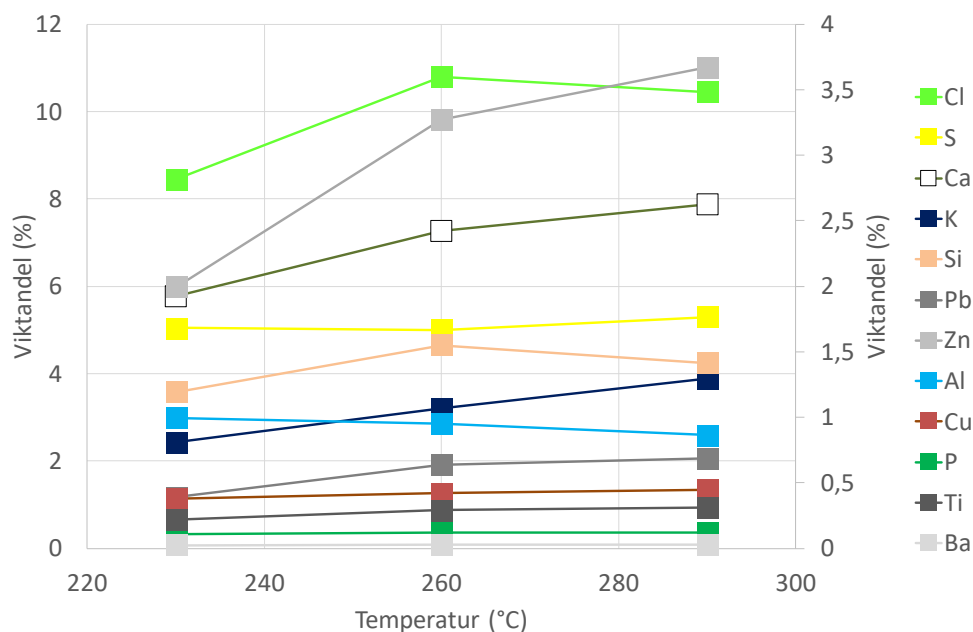
Eftersom korttidsbeläggningarna togs på ringar som har en vind- och en läsida, så kan även beläggningsmekanismer studeras. Det bör vara olika beläggningsmekanismer på vind- och läsida. En hypotes är att det på vindsidan, sedan väl ett klibbigt lager bildats, byggs upp en beläggning av impakterade flygaskpartiklar som innehåller kalcium, svavel med mera, medan det på läsidan främst, eller i alla fall lite längre tid, skulle ske uppbyggnad genom diffusion följt av kondensation, och då av gasformiga flyktiga ämnen såsom alkaliklorider. Man kan även tänka sig termofores av submikrona partiklar av alkaliklorider beroende på rökgastemperaturen. Resonemanget om vind- och läsida är mindre tillämpligt på väggar i tomschakt såsom är fallet i drag 2 och 3 i Vattenfall Uppsala block 5. Den huvudsakliga rökgasriktningen relativt väggen borde vara tangentiell men åtminstone i topp och botten av tomdrag uppstår troligen turbulens som gör det svårt att bestämma riktningen. I Figur 22 visas sammansättningen av korttidsbeläggningar från Vattenfall Uppsala block 5 där viktandelen av olika

askbildande ämnen visas vid olika positioner på beläggningssringen. Det är intressant att konstatera att särskilt kalcium, men även svavel och kisel har betydligt högre viktandelar på vindsidan än på läsidan. Det förhåller sig omvänt, om än inte lika tydligt, med andelarna av kalium och klor. På grund av mätosäkerhet kan bortses från ämnen som förekommer i halter neremot 0,1 %. Korttidsbeläggningar från Renova Sävenäs panna 5 uppvisar en ännu tydligare skillnad mellan vind- och läsida (Figur 21). Det är viktigt att hålla ytor rena för att undvika beläggningar och det tycks särdeles viktigt på vindsidan.



Figur 22 Askbildande ämnens viktandel (uppmätt med XRF) av korttidsbeläggningar i Vattenfall Uppsala block 5 i olika positioner på beläggningssringar (0° = vindsida och 180° = läsida med avseende på rökgasriktningen). Observera logaritmisk skala.

Ett annat sätt att åskådliggöra korttidsbeläggningarnas sammansättning är att avsätta viktandelar mot beläggningssringarnas ytemperatur. Figur 23 visar medelvärden av viktandelar vid de olika ytemperaturerna för ett antal ämnen. Klor, kalium, kalcium och zink uppvisar ökad viktandel med ökande temperatur. Olika beläggningsmekanismer kan antas påverkas olika av temperaturen på ytan och temperaturskillnaden mellan rökgas och yta. Impaktion bör inte påverkas nämnvärt men diffusion bör gå snabbare om gastemperaturen är högre. Termofores bör gå långsammare om temperaturgradienten är mindre vilket blir fallet vid en högre ytemperatur eftersom skillnaden mot rökgastemperaturen då blir mindre. Diffusion bör alltså gynnas och termofores missgynnas. Diffusionen driver gasformiga ämnen mot ytan medan termofores driver små partiklar. Resonemanget kompliceras av att gasformiga ämnen kan nukleera och bilda partiklar på väg mot ytan. Det blir alltså svårt att utan omfattande beräkningar ha en etablerad åsikt om hur olika ämnen påverkas av ytemperaturen. Exempelvis alkaliklorid skulle kunna befinna sig i gasfas och drivas av diffusion mot ytan. Kalcium å andra sidan bör företrädesvis existera som supermikrona flygaskpartiklar vilket gör det svårare att förklara dess ökning.



Figur 23 Viktandel i korttidsbeläggningar (Vattenfall Uppsala block 5) avsatt mot beläggningens temperatur. Viktandelar Pb, Zn, Al, Cu, P, Ti och Ba avläses på högra y-axeln.

Tillväxthastigheten (Figur 18) varierade systematiskt främst med yttemperaturen på beläggningens ringen. Av sammansättningen i olika positioner på ringen verkar det som att kalcium på vindsidan (0°) står för den mesta ökningen. En förklaring skulle kunna vara att 290 °C ger en klibbigare yta som skyndar på tillväxten. Temperaturen är dock ganska låg och temperaturskillnaden ganska liten jämfört med de andra ringarna. Dessutom visar Figur 18 att även i fallet RefH ökar kalcium med temperaturen trots att RefH är det enda fall där tillväxten minskar med ökande yttemperatur.

4.3 BELÄGGNINGARNAS HÄRDHET

Det saknas en etablerad metod att undersöka beläggningarnas hårdhet. I detta projekt har undersökningen stannat vid en högst kvalitativ analys. Den enklaste jämförelsen man kan göra är den mellan korttids- och långtidsbeläggningar. Medan korttidsbeläggningar oftast är lösa, så att man ganska lätt kunde blåsa bort dem från provringarna, kan långtidsbeläggningar vara betydligt hårdare. Detta är nu inte sensationellt eftersom man använder ångsotning för att blåsa bort beläggningar med några timmars ålder medan långtidsbeläggningarna är just sådana som inte gått att sota bort. I stället avlägsnas de med sprängsotning eller med kraftfullare metoder vid revisionsstopp.

Långtidsbeläggningar skiljer sig avsevärt åt avseende hårdhet. En del är mycket bräckliga och kan lätt smulas sönder med handkraft medan andra kräver hårdare behandling för att sönderfalla. Kanske ännu mindre än avseende sammansättningen kan man finna ett samband mellan position och hårdhet. Det finns också den osäkerheten att betrakta hårdheten hos ett prov vid

rumstemperatur när det egentligen är dess hårdhet vid åtskilliga hundra grader som är det intressanta. Med detta sagt kan man ändå spekulera i vad som skiljer en porös från en hård beläggning om de består av i stort sett samma grundämnen. Man kan tänka sig att en porös beläggning består av flygaskpartiklar som sammanbinds av små bryggor mellan partiklarna. Bryggorna kan vara resultatet av kemiska reaktioner i en kontaktyta mellan partiklarna. Om bryggorna är små jämfört med partiklarna så blir beläggningen bräcklig. Med tiden kan bryggorna växa till. Faktorerna som påverkar det är många. Bränslets sammansättning är naturligtvis en viktig faktor men även panntyp, temperaturer på ett stort antal platser, sotningsmetoder och frekvens samt naturligtvis beläggningens position. Om bryggorna växer så att de helt omsluter partiklarna – här kan även tänkas att diffusion och kemiska reaktioner kan göra att massutbytet mellan partikel och omgivning med tiden gör det omöjligt att identifiera den ursprungliga partikeln – så kan en kompakt struktur med stor hållfasthet erhållas.

4.4 GÅR DET ATT MED STYRNING AV BRÄNSLET PÅVERKA BELÄGGNINGARNA?

Eftersom det saknas klassning av bränslet med avseende på benägenheten att bilda beläggningar (jämför 3.1.6) så förutsätter styrning av bränslet att det finns någon annan kunskap om bränslet att styra efter. Denna kunskap, om den finns, utgörs av erfarenhet och avtal med kunder (jämför 3.2.2). I föreliggande projekt gjordes ett försök att i Vattenfall Uppsala block 5 styra klor- och svavelhalterna eftersom litteraturen visar att de kan påverka beläggningsbildningen (jämför 3.1). Korttidsbeläggningarnas sammansättning är resultatet. I Renova Sävenäs togs en korttidsbeläggning för att jämföra med långtidsbeläggningar under perioder då mycket fluff eldats.

4.4.1 Vattenfall Uppsala

Ett tydligt resultat av styrningen av bränslet är att koncentrationen HCl i rökgaserna påverkats på avsett vis (Tabell 2). Koncentrationen SO₂ varierar dock på ett icke förutsägbart vis. Dels samkorrelerar SO₂ med HCl i fallet P-Cl, och dels är det troligt att det, trots ambitionen, har kommit in svavelhaltigt bränsle slumpmässigt under försöken. Orsaken till samkorrelationen är svår att uttala sig om. Det kan bero på att när man tar bort bränsle som innehåller klorrik plast så tar man också bort svavel. Det kan också vara en tillfällighet just på grund av att svavel kan ha tillförts slumpmässigt. Det kan betraktas som ett misslyckat försök men illustrerar kanske en realitet: att det är svårt att styra svavelhalten.

Nästa fråga är hur beläggningarna påverkats. Fallet P-Cl har minst beläggningstillväxt så det verkar ha gjort någon nytta att ta bort klorrik plast. Däremot är det inte mindre andel klor i beläggningarna. Med tanke på den kraftiga ökningen av HCl i rökgaserna under fallet P+Cl kunde man vänta sig höga halter klor i beläggningarna. Så är icke fallet men det blev relativt kraftig beläggningstillväxt. Klor tycks alltså öka beläggningstillväxten utan att för den skull dominera i den bildade beläggningen. Det överensstämmer med litteraturen, som säger att det kan bildas en yta av klorid med låg smältpunkt som gynnar fortsatt tillväxt, som i sig inte behöver innehålla höga halter klor.

4.4.2 Renova Sävenäs

Eftersom korttidsbeläggningarna togs med en yttemperatur på 500 °C, vilket motsvarar överhettartemperatur, så skall dessa jämföras med långtidsbeläggningar på överhettare. En tydlig skillnad är att det är mer klor i korttidsbeläggningarna (Figur 21) än i långtidsbeläggningarna (Figur 12). Det kan tolkas som att klor är viktigt i den initiala fasen vilket överensstämmer med litteraturen och erfarenheterna från motsvarande försök i Vattenfall Uppsala block 5.

4.4.3 Sammanfattning

Det går att minska eller fördröja beläggningstillväxten genom att undvika klor. Om svavel har en positiv effekt, vilket är känt, så måste tillsatsen styras hårdare än i föreliggande projekt så att det säkert tillförs mycket respektive lite då det är avsett. Angående klor finns en möjlig alternativ förklaring. Klor återfinns i avfall ofta som polyvinylklorid. Det är en plast och sådana har högt värmevärde och utvecklar vid förbränning hög effekt jämfört med det andra avfallet. Lokalt skulle man alltså i bädden kunna få områden med betydligt högre temperatur, vilket skulle gynna övergången till gasfas av vissa ämnen som vid den genomsnittliga bäddtemperaturen skulle förbli i fast form. Dessa kunde sedan fastna på kylda ytor och orsaka beläggningar.

5 Slutsatser

- Anläggningarna tillämpar ofta en strategi som går ut på att undvika klorrikt bränsle och bränslen med högt värmevärde. Detta är motiverat med hänsyn till vad litteraturen säger om beläggningsbildningen och dess mekanismer.
- Styrning av bränslet så att svavelrikt bränsle tillförs för att motverka effekten av klorrika bränslen tillämpas normalt inte på anläggningarna.
- Sammansättningarna av de beläggningar som studerats här styrker litteraturens bild av att klor gynnar den initiala tillväxten av beläggningar. Korttidsbeläggningar innehåller därför mycket klor jämfört med långtidsbeläggningar vars sammansättning mer avspeglar bränslets askbildande element.
- Den initiala fasen är maximalt ett par timmar. Sedan börjar kalcium, kisel och andra askbildande ämnen, som inte förväntas föreligga i smält form, att deponeras på ytan. Föreningar av dessa ämnen impakterar företrädesvis (på vindsidan av en tub i detta fall).
- Ytans temperatur spelar troligen roll för beläggningsmekanismerna men det är en komplex process där vissa mekanismer gynnas och andra missgynnas av högre temperatur. Högre temperatur i intervallet 230–290 °C har i föreliggande fall gynnat beläggning av kalium, kalcium, zink och klor, men det är svårt att entydigt förklara det.
- Korttidsbeläggningar är relativt enkla att avlägsna. Långtidsbeläggningar kan vara väldigt bräckliga men också kompakta och hårda. Det tar förmodligen tid för en beläggning att bli hård och svåravlägsnad. En slutsats blir alltså att ju tidigare man angriper beläggningen desto enklare är det att få bort den.
- Anläggningarna har tillräcklig kännedom om sitt bränsle för att undvika sådana med klor och högt värmevärde. Alltså kan man motverka den initiala beläggningsfasen. I vissa fall finns kunskap också om bränslets svavelinnehåll; i alla fall om det innehåller gips. Det finns alltså en potential att styra svaveltillförseln till de tillfällen då man ha klorrikt bränsle.

6 Referenser

- [1] Svensk avfallshantering 2018, Avfall Sverige (www.avfallsverige.se)
- [2] König, L. X-Ray Fluorescence – The use of handheld XRF analyzers for a quick measurement of elements in waste incineration ashes and waste fuel. Examensarbete, Högskolan i Borås, 2013.
- [3] Baxter, L. Biomass and Bioenergy, 4, 85-102, 1993.
- [4] Zbogor, A., Frandsen, F., Jensen, P.A., Glarborg, P. Progress in Energy and Combustion Science 35, 31-56, 2009.
- [5] Frandsen, F.J. Fuel 84, 1277-1294, 2005.
- [6] Bryers, R.W. Progress in Energy and Combustion Science 22, 29-120, 1996.
- [7] Wu, H., Laurén, T., Yrjas, P., Vainikka, P., Hupa, M. Fuel 128, 390-395, 2014.
- [8] Olsson, J. Jäglid, U., Pettersson, J.B.C., Hald, P. Energy & Fuels 11, 779-784, 1997.
- [9] Jiao, F., Yi, C., Zhang, L., Yamada, N., Atsushi, S., Yoshihiko, N. Proceedings of the Combustion Institute 33, 2787-2793, 2011.
- [10] Enestam, S., Backman, R., Mäkelä, K., Hupa, M. Fuel Processing Technology 105, 161-169, 2013.
- [11] Jones, F., Bisailon, M., Hupa, M. Waste Management 33, 2675-2679, 2013.
- [12] Gyllenhammar, M., Davidsson, K., Jonsson, T., Pettersson, J., Victorén, A., Andersson, H., Widén, C. Waste Refinery, rapport nr. 23. 2010.
- [13] Davidsson, K. Waste Refinery, rapport nr. 47. bilaga J, 2011.
- [14] Stålenheim, A., Mattsson, M. Johansson, K. Energiforsk, rapport nr. 2015:197, 2015.
- [15] Otsuka, N. Corrosion Science 53, 222269-2276, 2011.
- [16] Wang, L., Bjarte, Ø., Skreiberg, Ø., Becidan, M., Vatland, P.S., Fossum, M., Stuen, J. Energy Procedia 142, 630-635, 2017.
- [17] Phongphiphat, A., Ryu, C., Finney, K.N., Sharifi, V.N., Swithenbank, J. Journal of Hazardous Materials 186, 218-226, 2011.
- [18] Ma, W., Chen, G., Rotter, S. Zhang, N., Du, G. Energy Procedia 61, 2359-2362, 2014.
- [19] Tang, Z., Chen, X., Liu, D., Zhuang, Y., Ye, M., Sheng, H., Xu, S. Journal of Environmental Sciences 48, 169-178, 2016.
- [20] Stålenheim, A., Henderson, P. Värmeforsk, rapport nr. 887, 2004.

- [21] Berg, M., Andersson, C., Ekvall, A., Eskilsson, D., de Geyter, S., Helgesson, A., Myringer, Å., Wikman, K., Öhman, M. Värmeforsk, rapport 917, 2005.
- [22] Viklund, P., Hjörnhede, A., Henderson, P., Stålenheim, A., Pettersson, R. Fuel Processing Technology 105, 106-112, 2013.
- [23] Kinnunen, H., Hedman, M., Engblom, M., Lindberg, D., Uusitalo, M., Enestam, S., Yrjas, P. Fuel 196, 241-251, 2017.
- [24] Verbinnen, B., De Greef, J., Van Caneghem, J. Waste Management 73, 307-312, 2018.
- [25] Rudling, L. Värmeforsk, rapport nr. 305, 1987.
- [26] Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Davidsson, K., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M., Folkesson, N., Pettersson, J., Svensson, J.-E., Boss, A., Johansson, L., Kassman, H. Värmeforsk, rapport nr. 1037, 2007.
- [27] Herstad Svärd, S., Åmand, L.-E., Bohwalli, J., Öhlin, J., Steenari, B.-M., Pettersson, J., Svensson, J.-E., Karlsson, S., Larsson, E., Johansson, L.G., Davidsson, K., Bäfver, L., Almark, M. Värmeforsk, rapport nr. 1167, 2011.
- [28] Kassman, H., Broström, M., Berg, M., Åmand, L.-E. Fuel 90, 1325-1334, 2011.
- [29] Kassman, H., Pettersson, J., Steenari, B.-M., Åmand, L.-E. Fuel Processing Technology 105, 170-180, 2013.
- [30] Davidsson, K., Eskilsson, D., Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Kassman, H., Steenari, B.-M., Åmand, L.-E. Värmeforsk, rapport nr. 997, 2006.
- [31] Andersson, S., Blomqvist, E.W., Bäfver, L., Jones, F., Davidsson, K., Froitzheim, J., Karlsson, M., Larsson, E., Liske, J. Waste Management 34, 67-78, 2014.
- [32] Iisa, K., Lu, Y., Salmenoja, K. Energy & Fuels 13, 1184-90, 1999.
- [33] Davidsson, K., Gustafsson, G., Herstad Svärd, S., Jones, F., Niklasson, F., Ryde, D. Waste Refinery, rapport nr. 38, 2012.
- [34] Pettersson, A., Niklasson, F., Moradian, F. Fuel Processing Technology 105, 28-36, 2013.
- [35] Sveriges Lag, Avfallsförordning 2011:927
- [36] SS-EN 15359:2011
- [37] Musee, N., Lorenzen, L., Aldrich, C. Journal of Hazardous Materials 154, 1040-1051, 2008.
- [38] Moghissi, A.A. Waste Management 10, 83, 1990.
- [39] Buenrostro, O., Bocco, B., Cram, S. Resources, Conservation and Recycling 32, 29-42, 2001.
- [40] Pericot, N.G., Sáez, P.V., Del Río Merino, M., Carrasco, L.O.

- [41] Xia, H., Bakker, M.C.M. *Talanta* 120, 239-247, 2014.
- [42] de Groot, P.J., Postma, G.J., Melssen, W.J., Buydens, L.M.C. *Analytica Chimica Acta* 453, 117-124, 2002.
- [43] Zhou, H., Long, Y., Meng, A., Li, Q., Zhang, Y. *Fuel* 145, 151-157, 2015.
- [44] Paulrud, S., Hjörnhede, A., Öhman, M. Energiforsk, rapport nr. 2015:149, 2015.

Bilaga 1. Frågor till anläggningarna

ANLÄGGNINGSBESKRIVNING

Vilken anläggning gäller svaren? (Ange en vedertagen beteckning så att det framgår vilken anläggning som avses.)

Vilken typ av anläggning är det? (Alternativen är bl.a. rost, CFB och BFB)

Vem har levererat anläggningen?

När levererades anläggningen?

Vilka effekter karaktäriserar anläggningen? (Effekter är den nominella effekten – d.v.s. vad anläggningen är utlagd för – och eleffekten).

Vilka komponenter finns i anläggningen? (Komponenter är överhettare, rökgasrening, filter m.m.)

Vad är rökgastemperaturen på olika platser i från eldstad till skorsten?
(Temperaturangivelserna blir med nödvändighet genomsnittliga och i den mån de är kända. Det skulle vara intressant med temperaturer i eldstadstopp, tomdrag, mellan alla tubpaket inklusive economiser, och skorsten)

Vilka sotningssystem finns och var sitter de?

Finns det en schematisk skiss på anläggningen? (Bifoga den i så fall)

BELÄGGNINGSBILDNING

Var i anläggningen uppstår beläggningar? (Ange vilka ytor som får beläggningar och var i anläggningen ytorna finns.)

Vilken temperatur har ytan under beläggningen? (Frågan besvaras för varje ovan angiven yta)

Vilken är rökgastemperaturen vid beläggningen? (Frågan besvaras för varje ovan angiven yta)

Under hur lång tid har beläggningen bildats? (Här avses tiden från föregående rengöring i form av t.ex. sprängsotning eller revisionsstopp till dess att beläggningen anses vara ett problem.)

Hur mycket beläggning var det? (Detta kan anges t.ex. som total massa och/eller tjocklek.)

Hur lätt gick beläggningen att ta bort? (Ange hur beläggningen togs bort och hur svårt det var vid manuell borttagning)

Har ni någon teori om orsaken till beläggningsbildningen? (Ange t.ex. om det kan vara kopplat till bränslet eller driftparametrar)

Har ni gjort någon utredning om orsaken till beläggningsbildningen?

Vilka åtgärder har vidtagits för att motverka beläggningsbildningar?

BRÄNSLEN

Gör ni någon beredning av bränslet? (Med beredning avses t.ex. krossning, bortsortering, blandning och inblandning av t.ex. additiv)

Vilka bränslen används inte?

Vad vet ni om bränslena och hur har den informationen erhållits? (Kunskapen om bränslet rör här främst dess sammansättning, men även andra egenskaper kopplade till driftproblematik är intressanta)

Har ni någon kravspecifikation? (En sådan specifikation kan vara det som anläggningen är specificerad för enl. tillverkaren eller egen spec.)

Vilken bränslemix används och hur görs den?

Materialavverkning kopplad till beläggningar

Har ni problem med korrosion under beläggningar?

Har ni problem med erosion? (Det kan vara svårt att koppla erosionen till beläggningar men om ni gjort den kopplingen är det särskilt intressant.)

Bilaga 2. Fotografier av beläggningar



Figur 24 Långtidsbeläggning VU2.



Figur 25 Långtidsbeläggning VU2



Figur 26 Långtidsbeläggning VU3



Figur 27 Långtidsbeläggning RS1ljus och RS1mörk.



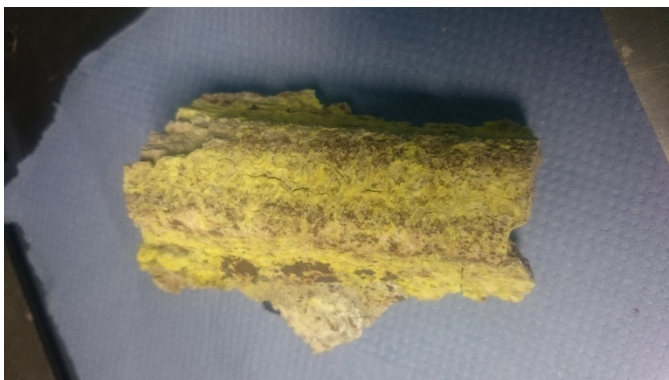
Figur 28 Långtidsbeläggning RS3mörk och RS3ljus.



Figur 29 Långtidsbeläggning RS4mörk och RS4ljus.



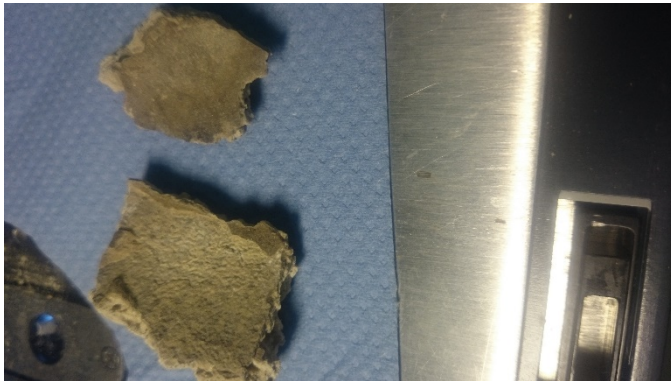
Figur 30 Långtidsbeläggning UE1röd och UE1vit.



Figur 31 Långtidsbeläggning UE1gul.



Figur 32 Långtidsbeläggning UE3röd.



Figur 33 Långtidsbeläggning UE8tub.

Bilaga 3. Långtidsbeläggningar mätdata

Tabell 8 Sammansättning av beläggningar i Vattenfall Uppsala block 5 (vikt-%). "<" = under detektionsgränsen.

	Pb	Zn	Cu	Ti	Al	S	P	Si	Ba	Ca	K	Cl
VU1	0,093	4,1	0,19	0,64	0,63	14	0,23	2,17	0,1	16	1,3	0,34
VU1	0,12	12	0,35	0,97	1,1	9,9	0,32	3,0	0,13	8,8	2,5	0,36
VU1	0,84	2,7	0,25	0,27	<	14	0,34	0,72	0,1	11	3,1	0,34
VU1	0,83	2,5	0,21	0,35	0,15	11	0,44	0,78	0,09	8,3	3,2	0,20
VU2	0,03	1,9	0,091	0,45	0,41	22	<	1,6	0,21	16	3,1	0,36
VU2	0,05	3,2	0,14	0,56	0,75	22	0,08	2,3	0,19	13	3,7	0,13
VU2	0,014	4,4	0,092	1,4	1,9	6,2	0,26	5,5	0,13	10	2,3	0,54
VU2	0,34	2,9	0,22	0,54	0,45	13	0,11	1,9	0,18	9,7	5,0	1,3
VU3	0,14	0,94	0,088	0,34	0,46	17	<	1,2	0,19	16	2,7	7,6
VU3	0,071	0,69	0,058	0,30	<	14	<	0,81	0,16	15	2,5	6,5
VU3	0,011	1,6	0,034	0,65	0,36	12	0,24	1,52	0,18	18	1,4	0,55
VU3	0,01	0,25	0,014	0,11	0,25	23	<	0,41	0,16	13	4,0	0,58
VU3	0,006	0,37	0,011	0,088	<	22	<	0,33	0,12	11	4,4	0,54

Tabell 9 Sammansättning av beläggningar i Renova Sävenäs panna 1, 5 och 7 (vikt-%). "<" = under detektionsgränsen.

	Pb	Zn	Cu	Ti	Al	S	P	Si	Ba	Ca	K	Cl
RS1ljus	0,076	2,8	0,071	0,50	0,44	20	0,12	1,5	0,15	13	4,4	0,18
RS1mörk	0,064	2,1	0,079	0,69	1,0	13	0,20	2,6	0,45	17	1,7	1,0
RS1 finfördelat	1,5	4,0	0,20	1,0	1,7	13	0,27	4,6	0,082	19	1,7	1,2
RS1mörk insida	0,086	1,3	0,055	0,66	0,70	11	0,25	2,2	0,091	21	3,5	6,5
RS2	0,069	2,1	0,062	0,51	0,62	18	0,22	1,7	0,51	17	2,5	1,0
RS3mörk	9,2	7,3	0,33	0,45	0,74	15	0,37	1,9	0,15	7,9	1,8	0,094
RS3ljus	5,02	7,3	0,26	0,52	0,53	17	0,31	1,8	0,12	9,9	1,9	0,071
RS3ljus	4,8	5,0	0,21	0,50	0,66	18	0,45	2,2	0,12	8,3	2,7	0,18
RS4mörk	0,55	5,6	0,44	0,53	0,45	14	0,19	2,5	0,14	12	1,9	0,077
RS4ljus	0,031	2,9	0,12	1,0	1,2	8,9	0,57	3,8	0,12	14	1,7	0,58
RS5	6,5	7,9	0,19	0,54	0,86	17	0,21	3,0	0,14	7,2	4,3	0,34
RS5	5,8	7,9	0,20	0,48	0,91	17	0,17	2,9	0,13	7,1	4,3	0,35
RS6utsida	2,3	2,3	0,058	0,35	0,36	19	0,35	1,8	0,11	5,1	4,2	1,4
RS6grå insida	1,4	10	0,079	0,47	0,46	14	0,35	2,1	0,11	8,3	5,2	1,4
RS8vit insida	2,4	6,9	0,19	0,10	<	22	0,22	1,1	0,061	1,9	11	0,52

Tabell 10 Sammansättning av beläggningar i Umeå Energi Däva 1 (vikt-%). "<" = under detektionsgränsen.

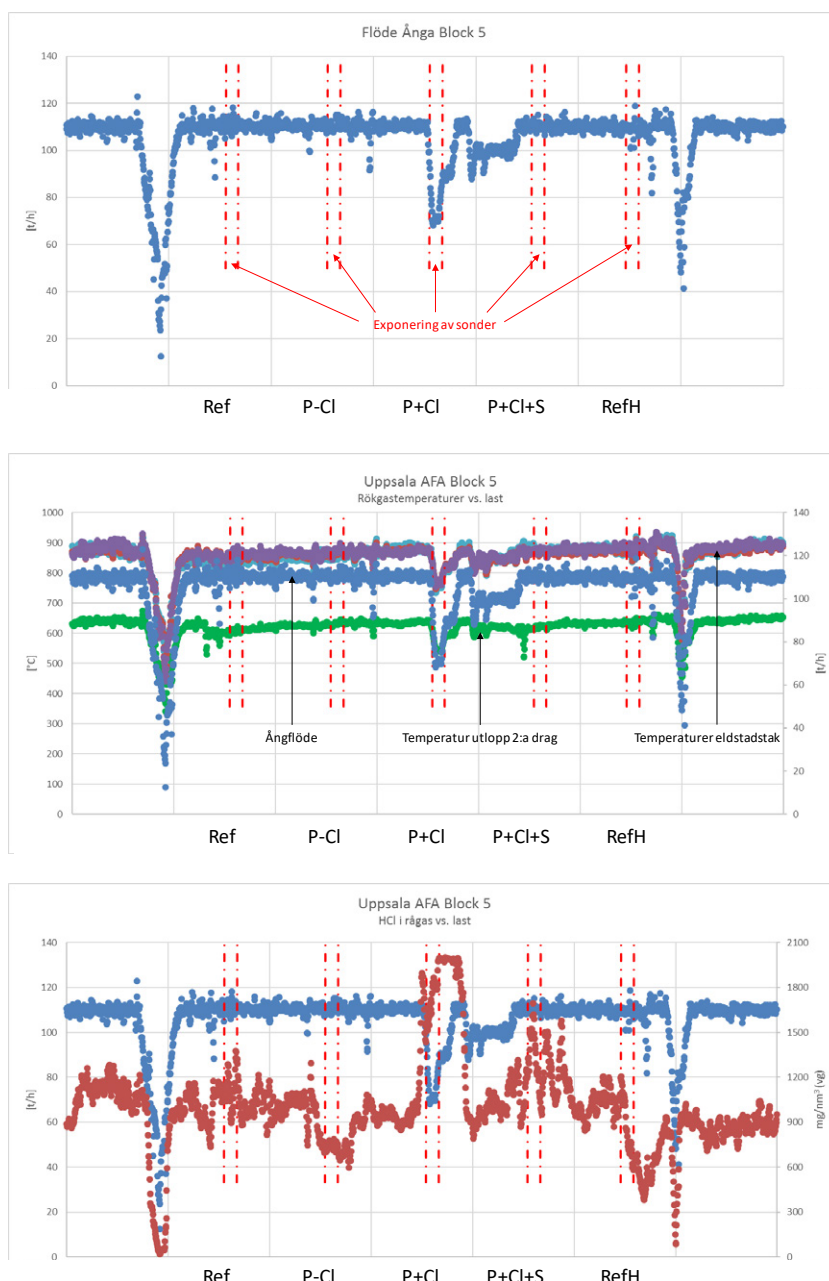
	Pb	Zn	Cu	Ti	Al	S	P	Si	Ba	Ca	K	Cl
UE1röd	0,64	4,1	0,11	0,20	0,27	6,5	<	1,8	0,10	2,2	8,8	12
UE1vit	0,93	2,6	0,12	0,74	0,79	11	0,33	2,4	0,12	13	3,9	4,9
UE1grå	0,25	2,2	0,15	1,2	1,1	10	0,38	3,3	0,12	16	2,6	3,0
UE1vit	0,11	0,30	0,019	0,26	0,47	6,7	<	0,71	0,05	4,7	13	20
UE1gråvit	0,12	0,39	0,022	0,20	<	5,2	<	0,52	0,06	4,1	15	22
UE1mörk	0,45	4,8	0,099	0,41	2,34	6,3	0,12	7,4	0,16	5,3	4,2	7,0
UE1gultub	0,42	4,5	0,14	0,12	<	18	<	0,48	0,08	2,2	11	7,5
UE1grå	0,79	2,4	0,26	0,94	0,69	12	0,34	3,0	0,18	12	3,1	2,1
UE2grå	0,024	2,5	0,097	1,3	1,9	8,5	0,78	4,4	0,09	18	2,8	2,1
UE2grå	0,075	1,3	0,094	0,83	0,79	8,3	0,28	2,0	0,26	16	3,7	5,7
UE2röd	0,11	1,7	0,079	0,62	0,48	8,5	0,22	1,7	0,26	15	5,2	7,9
UE3röd	0,70	3,2	0,13	0,19	0,54	8,3	0,066	1,1	0,14	4,3	6,0	9,1
UE3	0,60	2,7	0,042	0,15	<	7,2	<	0,35	0,11	2,7	8,6	20
tvärsnitt												
UE3	0,40	2,071	0,022	0,058	<	14	<	<	0,11	1,3	11	16
tvärsnitt												
UE3tub	0,099	1,693	0,023	0,149	<	5,9	<	0,55	0,06	2,8	9,3	18
UE3	0,50	3,712	0,177	0,93	0,96	13	0,27	2,6	0,17	16	2,4	1,5
utsida												
UE4	0,16	5,82	0,121	1,621	1,59	7,4	0,78	4,0	0,10	12	1,6	1,7
UE5tub	3,4	5,706	0,161	0,622	0,55	17	0,25	2,1	0,11	11	5,1	0,19
UE5	3,1	4,087	0,077	0,494	0,51	16	0,25	2,1	0,12	8,0	3,6	0,10
utsida												
UE5	4,2	6,603	0,235	0,313	0,37	19	0,17	1,7	0,12	6,1	7,2	0,12
UE6	0,093	1,498	0,1	0,997	0,54	10	0,34	2,3	0,27	18	1,5	3,2
UE6	0,25	2,48	0,173	0,881	0,87	14	0,35	2,5	0,22	16	2,5	1,6
UE6	0,051	1,286	0,111	0,812	0,22	9,1	0,23	1,5	0,22	16	1,4	2,1
UE7mörk	0,013	1,124	0,107	0,457	<	8,4	0,19	1,0	0,11	15	1,4	2,8
UE7ljus	0,009	0,657	0,041	0,507	<	6,7	0,1	0,78	0,10	22	0,47	0,87
UE7	0,011	0,775	0,1	0,803	1,1	14	0,36	3,1	0,13	26	1,3	3,8
ljusare												
UE8	0,13	1,821	0,119	0,636	0,67	15	0,23	1,9	0,14	17	2,7	3,3
utsida												
UE8tub	0,24	3,031	0,463	0,577	0,42	17	0,21	2,0	0,13	9,3	3,5	0,78
UE8tub	<	<	<	1,659	1,2	45	0,48	1,2	0,64	29	14	4,2

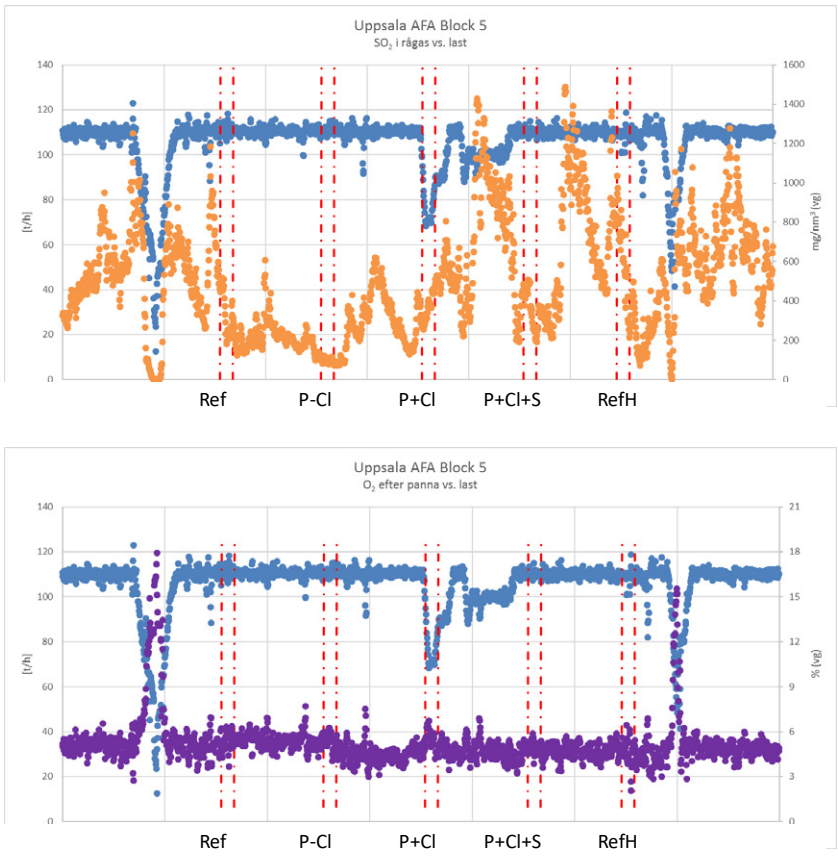
Tabell 11 Sammansättning av beläggningar i Lidköping Energi panna 5 och 6 (vikt-%).

	Pb	Zn	Cu	Ti	Al	S	P	Si	Ba	Ca	K	Cl
LE1	0,14	1,52	0,53	0,65	0,87	15	0,14	2,6	0,46	10	4,1	0,89
LE1	0,087	0,83	1,0	0,75	0,69	5,1	0,15	2,62	2,3	16	0,95	1,75
LE1	0,19	0,85	2,9	1,0	1,53	9,3	0,32	3,7	0,31	23	0,78	2,8
LE1	0,20	0,98	1,7	0,64	0,80	15	0,13	2,8	0,51	17	1,7	1,0
LE1	0,087	0,84	1,3	0,90	1,5	8,4	0,24	4,2	1,2	21	1,0	2,5
LE1	0,057	0,96	1,1	0,84	2,0	9,9	0,27	4,2	0,70	21	1,0	3,2
LE2	0,69	4,03	0,14	0,88	1,3	13	0,36	3,4	0,13	17	3,0	2,8
LE2	1,0	5,1	0,17	0,90	1,4	13	0,34	3,3	0,078	18	3,2	2,9
LE3	0,50	3,3	0,11	1,07	1,3	11	0,42	3,9	0,12	19	2,7	3,0
LE3	0,51	3,4	0,11	1,0	1,7	11	0,42	3,6	0,097	19	2,7	3,0

Bilaga 4. Driftdata Vattenfall Uppsala block 5 under tagning av korttidsbeläggningar.

Nedanstående figur visar driftdata från tagning av korttidsbeläggningar.





Figur 34 Driftdata vid tagande av korttidsbeläggningar Uppsala block 5.

BELÄGGNINGSBILDNING OCH BRÄNSLESAMMANSÄTTNING I AVFALLSPANNOR

Avfallsförbränning ger upphov till beläggningar i förbränningsanläggningarna. Dessa måste avlägsnas vilket medför betydande driftkostnader. De kan också orsaka materialverkning genom korrosion. I detta projekt har litteraturen undersökts och erfarenheter från förbränningsanläggningar sammanställts. Baserat på detta har det ingående avfallet anpassats så att klorrika avfall eldats tillsammans med svavelrika för att minska beläggningsbildningen. Försöken visar att det finns en potential att styra bränslet så att klorrelaterade problem kan minska.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se