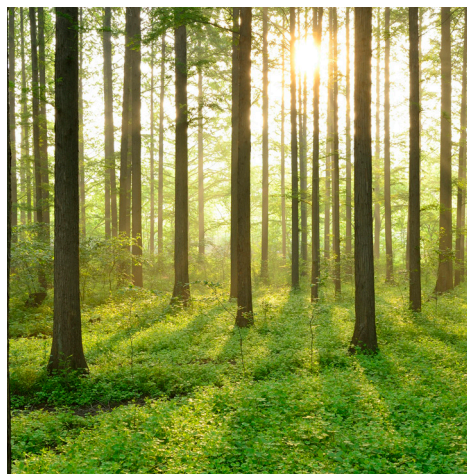


KORROSION OCH BELÄGGNINGSBILDNING VID FÖRBRÄNNING AV BRÄNSLET SLF

RAPPORT 2015:197



Korrosion och beläggningsbildning vid förbränning av bränslet SLF

ANNIKA STÅLENHEIM, MATTIAS MATTSSON, KENNY JOHANSSON

ISBN 978-91-7673-197-0 | © 2015 ENERGIFORSK

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

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt M 39182 Korrosions- och beläggningsbildning vid förbränning av SLF (Energimyndighetens projektnummer P 39182 som faller under teknikområde material- och kemiteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Linda Bäfver, Pöyry Sweden;

Rikard Norling, Swerea KIMAB AB; Kent Davidsson, SP och Solvei Herstad Svärd, WSP.

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

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.

Stockholm januari 2015

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

Författarnas förord

Författarna vill tacka Örjan Almenius, Vattenfall Heat, Uppsala och Pamela Henderson, Vattenfall Research and Development för deras ovärderliga hjälp vid genomförandet av detta projekt.

Författarna vill också rikta ett speciellt tack till referensgruppen för stöd under projektgenomförandet och för granskning av rapporten:

Linda Bäfver, Pöyry Sweden

Rikard Norling, Swerea KIMAB AB

Kent Davidsson, SP

Solvie Herstad Svärd, WSP

Sammanfattning

SLF (Shredder Light Fraction) även kallat ”fluff” är den brännbara rest som inte kan återvinnas då metallskrotet krossats och separerats i olika fraktioner för återvinning. Det består framförallt av tyg, gummi och plast. En stor andel av metallskrotet kommer ofta från bilar. Ett högt energivärde samt bra betalt för att ta emot avfallet gör SLF till ett mycket attraktivt bränsle ekonomiskt sett. Tidigare erfarenheter visar dock att eldning av SLF kan leda till stora problem med korrosion och igensättningar.

Tidigare sondförsök, genomförda bland annat inom Waste Refinery, har visat på ökad beläggningsskiktning och en ökad risk för korrosion med SLF. Ingen entydig förklaring till orsaken till problemen har dock kunnat ges. De sondförsök som har genomförts har varit relativt korta, upp till 24 timmar.

Alkalikloridorsakad (KCl, NaCl) högtemperaturkorrosion anses inte vara relevant vid de låga temperaturer som råder i avfallspannor, men närvaro av Zn- och Pb-komponenter i beläggningarna har påvisats förorsaka ökad korrosion redan vid 300-400°C. Vid förbränning kan Zn och Pb reagera med Cl och S och bilda klorider och sulfater i rökgaserna. Tungmetallrika (Pb, Zn) klorider och sulfater ökar risken för korrosion, och effekten förstärks ytterligare vid närvaro av smälta.

I detta projekt har tester med olika inblandningsgrad av SLF i bränslemixen genomförts. Både långtidstester för korrosionsmätning och korttidstester för avlagringsanalys har genomförts. Sönderna har exponerats i två olika positioner där man bedömt att risken för korrosion är stor. Dessutom har askprover tagits ut vid försöken och en analys av driftdata har genomförts. Testerna har genomförts i Vattenfalls avfallspanna, Block 5, i Uppsala. I denna panna eldas huvudsakligen en mix av hushållsavfall och industriavfall, men under senare år har man också blandat in en ökande andel SLF, idag ca 9% (vikt). Sondförsöken har genomförts med en väggsönd och det är inte säkert att resultaten är helt överförbara på förhållandena vid pannans hängande tuber.

Inblandning av SLF (9% jmf med 0%) gav en kraftig ökning av korrosionstakten, men från en mycket låg nivå. Korrosionshastigheterna i de två undersökta positionerna, med rökgastemperaturer 700°C och 500°C och metalltemperaturen 230°C, var ungefär lika. Med SLF sågs mer Cl och Zn i korrosionsprodukterna på korrosionssonden.

Sammansättning hos avlagringar och flygaska gav ingen tydlig indikation på ökad korrosivitet med ökad inblandning av SLF. En trend kunde dock ses med mer inslag av flygaska i beläggningarna från drag 3 och mer inslag av korrosiva komponenter i Eva 1 med ökad inblandning av SLF. Detta kan tyda på att korrosionsproblem skjuts framåt (i rökgasriktningen) i pannan.

Analysen av driftdata tyder på att, från ett rent processtekniskt perspektiv, kommer en ökad andel SLF inte innebära några signifikanta begränsningar på pannans drift och att eventuella skillnader bör kunna kompenseras med åtgärder som ändrad mängd rökgasrecirkulation, etc.

Förändringarna i beläggningsskiktning för korttidsproverna var komplicerade att tolka. Resultaten tyder dock på att man kan öka andelen SLF i Uppsalapannan från dagens nivå på 9% upp till max 29% utan förväntade problem. Det rekommenderas dock starkt då att långtidsskorrosionsprovning genomförs vid en ökad inblandning för att ta reda på korrosionshastigheten och beläggningsskiktning.

Summary

SLF (Shredder Light Fraction) is the non-recyclable, combustible fraction that remains after scrap metal is crushed and separated into various fractions for recycling. It consists primarily of cloth, rubber and plastic. A large proportion of the scrap metal usually originates from cars. A high energy value and a large gate fee for receiving it makes SLF an economically attractive fuel. Past experiences shows that the burning of the SLF can lead to big problems with corrosion and blockages.

Probe tests performed in other plants revealed an increased deposit formation and an increased risk of corrosion with SLF. No clear explanation for the cause of the problems, however, has been given. The probe experiments that have been conducted have been relatively short, up to 24 hours.

High temperature corrosion caused by alkali chlorides (KCl, NaCl) is not considered relevant at the low temperatures prevailing in waste incinerators, but the presence of Zn and Pb components in the deposits has been shown to cause increased corrosion even at 300-400°C. Upon combustion, Zn and Pb react with Cl and S and form chlorides and sulphates in the flue gas. Chlorides and sulphates rich in heavy metals (Pb, Zn) increase the risk for corrosion, and the effect is further enhanced by the presence of melt.

Tests with different proportions of SLF in the fuel mix have been performed in the present project. Both long-term tests for corrosion measurement and short-term tests for deposit analysis have been performed. The probes have been exposed in two different positions where it is judged that the risk of corrosion is high. Moreover, fly ash samples have been taken out for analysis and operating data has been analysed. The tests have been carried out in Vattenfall's waste incinerator, Block 5, in Uppsala. The fuel in this boiler is mainly a mix of municipal and industrial waste, but in recent years an increasing share of SLF, currently about 9% (w), has been used. Probe tests were conducted with a wall probe and it is not certain that the results are fully compatible with the conditions of the hanging tubes in the boiler.

The use of SLF (9% vs. 0%) resulted in a sharp increase in the corrosion rate, but from a very low level. The corrosion rates in the two investigated positions, with flue gas temperatures of 700°C and 500°C, and metal temperature of 230°C, were similar. More Cl and Zn were found in the corrosion products when SLF was used.

The composition of deposits and fly ash gave no clear indication of increased corrosivity due to increased proportion of SLF. One trend, however, could be seen with increasing fly ash components in the deposits from pass 3 and increasing corrosive components in evaporator 1 with increased proportions of SLF. This may indicate that the corrosion problems are pushed forward (in the direction of the flue gases) in the boiler.

The analysis of operational data indicates that, from a process technology perspective, an increased share of SLF does not pose any significant restrictions on the operation of the boiler and any differences could be compensated with measures such as changes in flue gas recirculation, etc.

The interpretation of the changes in deposit chemistry for the short term samples was complicated. However, the results indicate the share of SLF in the Uppsala boiler may be increased from the current level of 9% up to a maximum of 29% with no anticipated

problems. It is strongly recommended, though, that long-term corrosion tests are carried out at an increase, to investigate the corrosion rate and deposit chemistry.

Executive summary

Background

SLF (Shredder Light Fraction) is the non-recyclable, combustible fraction that remains after scrap metal is crushed and separated into various fractions for recycling. It consists primarily of cloth, rubber and plastic. A large proportion of the scrap metal usually originates from cars. A high energy value and a large gate fee for receiving it makes SLF an economically attractive fuel. Past experiences show that the use of SLF can lead to big problems with corrosion and blockages in the boiler.

Since a few years back, SLF is used in the fuel mix in Vattenfall's waste fired boiler, AFA Block 5, in Uppsala. However, there is concern that this will lead to increased corrosion and deposit build up in the boiler. A preliminary probe test indicated a very large increase in deposit build-up and an increase in zinc content of the deposits.

Probe tests in other plants have shown increased deposit build-up and an increased risk for corrosion when SLF is used. No unambiguous explanation to the cause of the problems has been given though. One theory that has been promoted is that the problems connected to SLF are linked to the formation of zinc chloride (ZnCl_2), which has a low melting point and thus makes deposits more sticky and hence more prone to adhere to surfaces and form melts that cause corrosion.

SLF was previously used in Renova's plant in Sävenäs but this was stopped since it led to large amounts of deposits that were difficult to remove and also to corrosion problems. Blockage of the ESP and deposits and cracking in the flue gas reheaters occurred. The deposits in the flue gas reheaters contained chlorine and zinc, probably zinc chloride (ZnCl_2). There was also material loss (several mm) in pass 2. SLF might not have been the only cause of the problems. The proportion of SLF was just under 25%. Today, only a minor proportion of SLF is used in this plant.

A comparison of fuel analyses from literature shows that SLF usually contains much more Fe, Pb, Zn and Cu than the waste normally fired in waste incinerators in Sweden. Also the Cl content is higher.

High temperature corrosion caused by alkali chlorides (KCl , NaCl) is not considered relevant at the low temperatures prevailing in waste incinerators, but the presence of Zn and Pb in the deposits has been shown to cause increased corrosion even at 300-400°C. Upon combustion, Zn and Pb react with Cl and S and form chlorides and sulphates in the flue gas. These heavy metal compounds are problematic since they form low melting salt mixtures. These low melting, gaseous or solid compounds are transported by the flue gas and can stick to or condense on cooled surfaces such as boiler walls or tubes and form aggressive deposits. Chlorides and sulphates rich in heavy metals (Pb, Zn) increase the risk for corrosion, and the effect is further enhanced by the presence of melt.

Laboratory tests indicate that ZnCl_2 causes problems at lower material temperatures, whereas PbCl_2 is expected to be problematic at temperatures occurring in the boiler walls and superheaters.

Thermodynamic equilibrium calculations have been performed comparing waste and SLF. The calculations showed that SLF increases the content of lead and zinc chlorides in the flue gases. These compounds are stable at lower temperatures (<650°C) than

alkali chlorides. This means that they will condense at lower temperatures than alkali chlorides. As the amounts of lead and zinc chlorides increase in the flue gases, the risk for corrosion at lower temperatures will increase. It is also pointed out that the risk for fouling is relatively high due to a high content of gaseous chlorides in the fuel gases that can condense on heat transfer surfaces and in this way increase the fouling of the boiler.

Thermodynamic equilibrium calculations show that condensation of PbCl_2 (g) occurs at ca 350°C and condensation of ZnCl_2 (s) at material temperatures below 250°C. However, experimental results show that ZnCl_2 can condense at temperatures as high as 350°C.

Probe tests

Corrosion and deposits have been studied in a waste fired grate boiler when burning varying proportions of SLF in the ordinary fuel. The tests have been carried out in Vattenfall's waste incinerator, Block 5, in Uppsala. The fuel in this boiler is mainly a mix of municipal and industrial waste, but in recent years an increasing share of SLF, currently about 9% (w), has been used. Block 5 was taken into service 2005. It is a water cooled grate boiler with steam data 212°C and 20 bar. The material in the tube walls and in the hanging tubes is P235 GH and the material temperature is ~230°C.

Probe tests have been performed in two positions in the boiler. (Figure 1) The probes were exposed in the positions where it was judged that the risk of corrosion would be high. Both long term tests for corrosion measurement and short term tests for deposit analysis have been performed. Moreover, fly ash samples were taken out for analysis and operating data was analysed. The probe tests were conducted with a wall probe and it is not certain that the results are fully compatible with the conditions of the hanging tubes in the boiler.

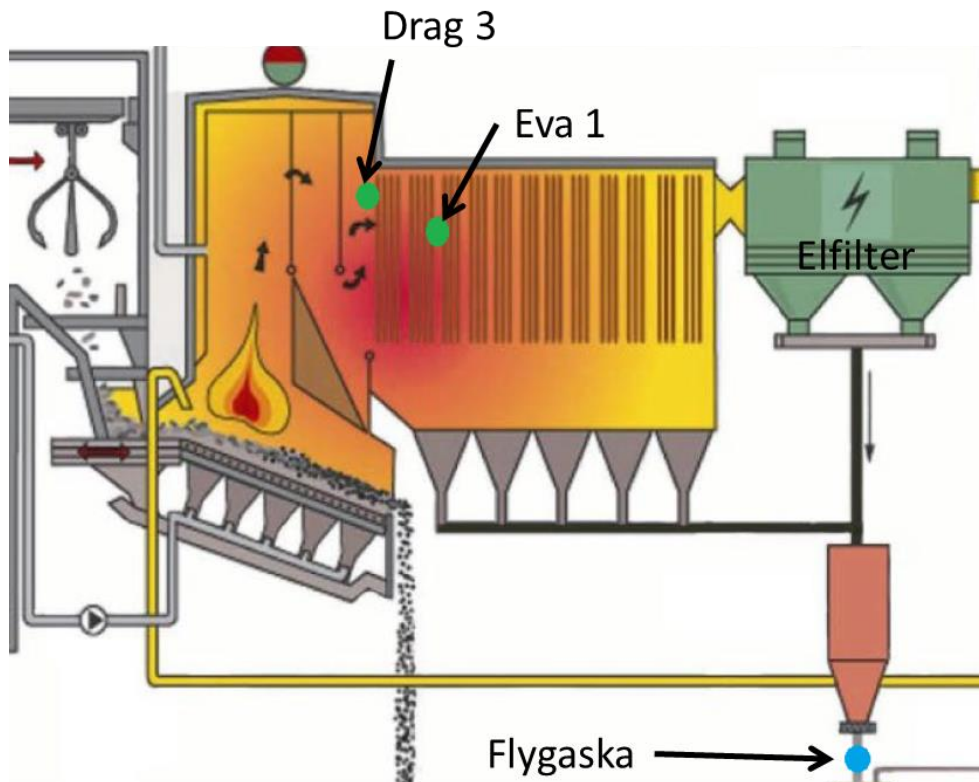


Figure 1 Positions for testing in the plant, Green dot – probe position, Blue dot – sampling of fly ash

Long term corrosion tests were performed with no SLF in the fuel mix and with 9% (w) SLF. The corrosion probes were exposed for approximately 1000 hours. The material loss of the samples was measured and the composition of the deposits mixed with corrosion products adhering to the samples were analysed.

Short term deposit tests were performed with 9, 29, 55 and 72% SLF. The short term probes were exposed for 3 hours and then the deposits on the samples were analysed with SEM-EDX. During these tests fly ash samples were also taken and operation data was analysed.

Results

Short term tests

There was a large variation in appearance between the samples when the probes were taken out of the boiler after 3 hours exposure. Differences could be seen between the different probes, but also between different samples on the same probe. The deposits were brightest on the probes that had been exposed with the least SLF and gradually darkened as the proportion of SLF increased. Especially a shift can be seen between 29% SLF and 55% SLF. The samples also looked more and more corroded.

The increase in weight was small and the differences between different samples on the same probe were large. However, in pass 3, a significant increase is seen between 29% and 55%. The weight increase is higher in evaporator 1 than in pass 3 at the two lower SLF proportions. (figure 2)

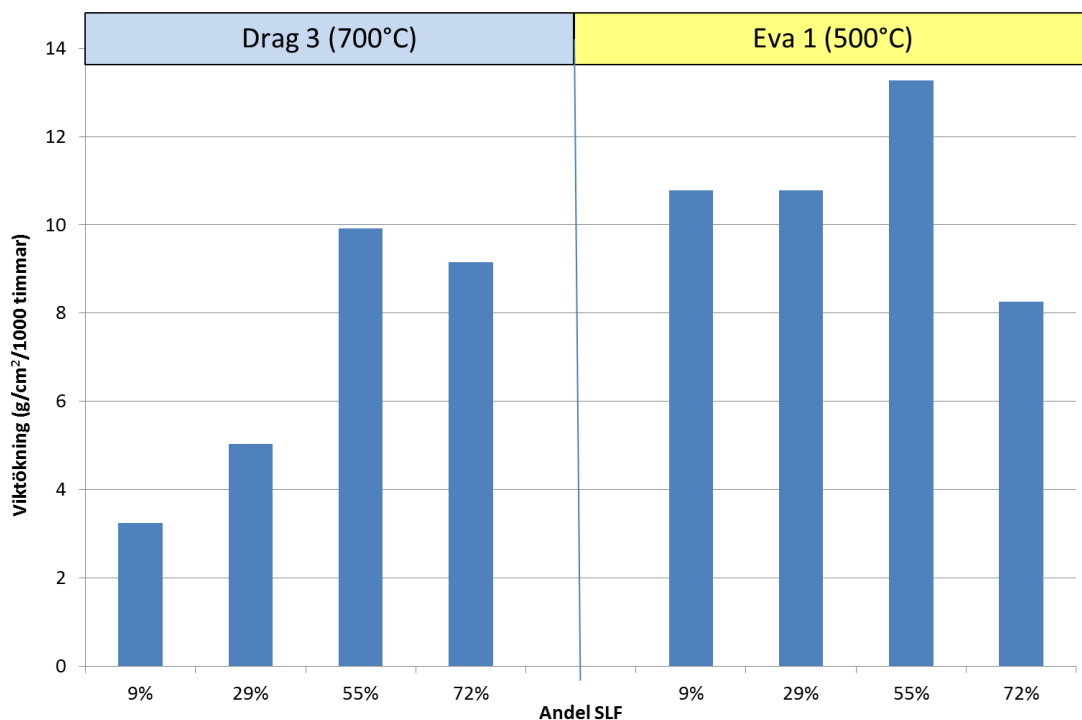


Figure 2 Weight gain for samples exposed three hours

The analysis of the composition of the deposits showed large variations between samples and also between different positions on the same sample. It is difficult to see any clear trends, but in pass 3 Cl seems to decrease whereas Zn and Ca increase with increasing SLF. In evaporator 1 a trend with increasing Cl and decreasing S and Ca with increasing SLF is seen. (figure 3)

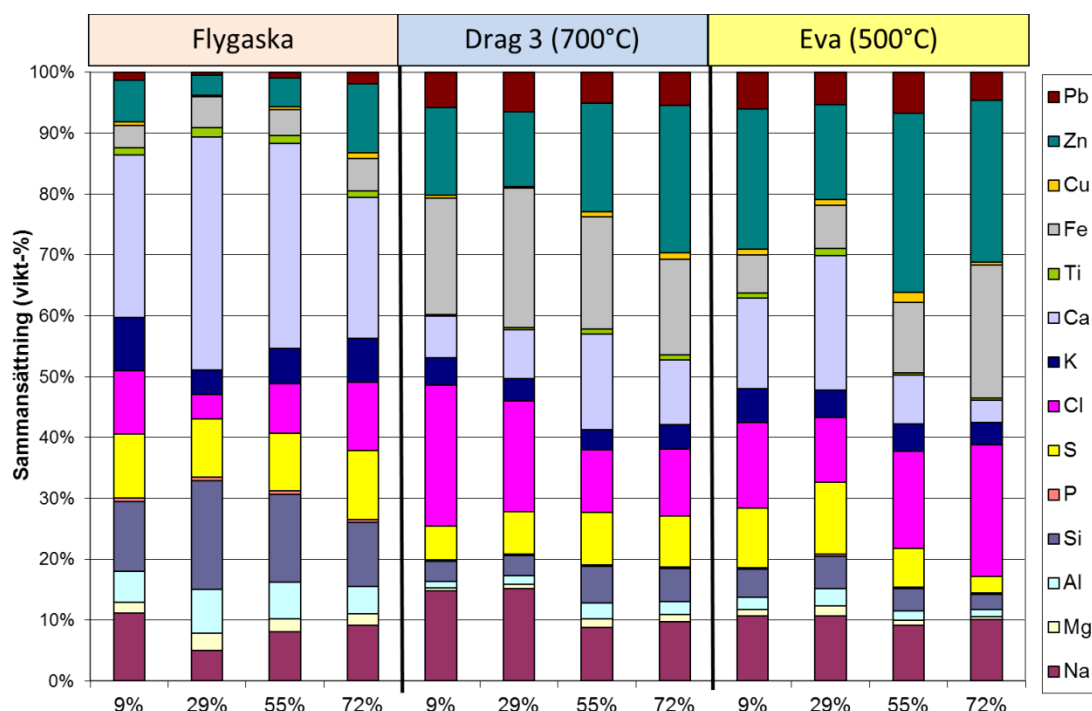


Figure 3 Composition of deposits and ashes from the short term tests. (O not included in the diagram, since it was not analysed for the ashes)

The fly ash analysis shows that Ca, Si, Al and Mg increase when SLF is increased from 9% to 29% and the decrease with further increase. The trend is the opposite for Cl, Na, K, Pb and Zn.

No significant differences could be observed in the operation data of the plant between the tests with 9, 29, 55 and 72% SLF. The flue gas flows showed a slightly increasing trend as SLF is increased, whereas the temperatures in the parts closest to the furnace showed a somewhat decreasing trend and the temperatures further back in the boiler increases slightly. Under the assumption that the fuel fractions that were used during the tests were representative, this analysis shows that, from a pure process technology perspective, an increased proportion of SLF will not pose any significant restrictions on the operation of the boiler and any differences could be compensated with measures such as changes in flue gas recirculation, etc.

Long term tests

As also observed for the short term tests, large differences in the appearance of the exposed surfaces of the samples could be seen on the long term samples. The probes that had been exposed without SLF were covered with a white deposit. The probe from pass 3 had a smooth surface that covered all of the four samples. The probe from evaporator 1 also had a white deposit, but it did not cover the entire surface. The probes that had been exposed with 9% SLF had darker and less smooth surfaces, especially the probe from evaporator 1.

The material losses were small. However, a clear increase was seen when using SLF, from ~5 $\mu\text{m}/1000$ hours to ~25 $\mu\text{m}/1000$ hours. (figure 4)

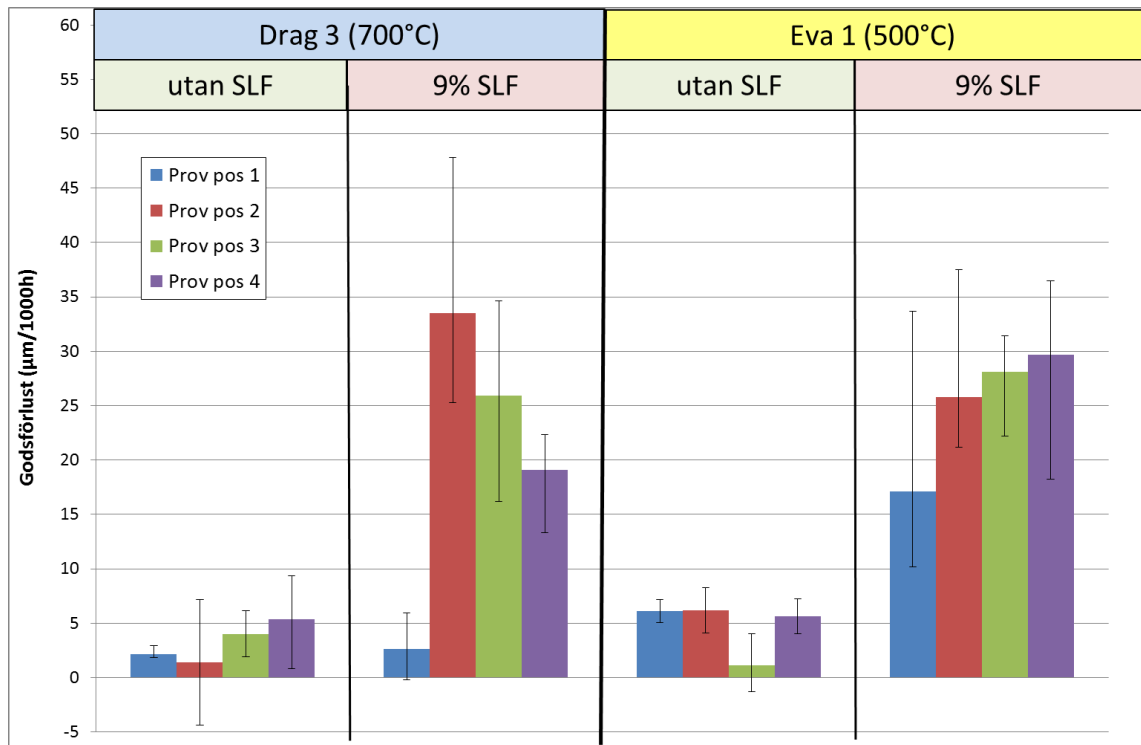


Figure 4 Material loss for the four samples on every probe (average, error bars with max and min values)

Conclusions

- The long term tests (1000 hours) showed that the use of SLF (9% vs. 0%) resulted in a considerable increase in the corrosion rate, but from a very low level ($\sim 5 \mu\text{m} / 1000 \text{ hours}$) to a that is not abnormally high in this type of plant level ($\sim 25 \mu\text{m} / 1000 \text{ hours}$).
- Corrosion rates in the two investigated positions, with flue gas temperatures of 700°C and 500°C , and a metal temperature of 230°C , are approximately equal. In the latter position (evaporator 1, 500°C) flue gases have passed some cooled surfaces with approximately the same temperature as the probe materials.
- More Cl and Zn can be seen in the corrosion products on corrosion probe when SLF is used. This is consistent with studies conducted in the past and with what results were expected.
- The composition of deposits and fly ash gives no clear indication of further increased corrosivity when SLF is increased from 9% to 72%. However, this has not been studied in a test without any SLF. A trend can be seen with more elements of fly ash in the deposits from pass 3 and more elements of corrosive components in the deposits from evaporator 1 as SLF is increased. This may indicate that the corrosion problem is pushed forward (in the direction of the flue gases) in the boiler.
- Provided the fuel fractions used during the trials were representative, the analysis of operational data indicates that, from a pure process engineering perspective, an increased share of SLF does not pose any significant restrictions on the operation of the boiler and any differences could be compensated with measures like changes in amount of flue gas recirculation, etc
- The interpretation of the changes in deposit chemistry for the short term samples was complicated. However, the results indicate the share of SLF in the Uppsala

boiler may be increased from the current level of 9% up to a maximum of 29% without anticipated increased problems. It is strongly recommended, though, that long-term corrosion tests are carried out at an increase, to investigate the corrosion rate and deposit chemistry.

- The probe tests were conducted with a wall probe and it is not certain that the results are fully compatible with the conditions of the hanging tubes in the boiler.

Innehåll

1	Inledning	16
1.1	Bakgrund	16
1.2	Beskrivning av forskningsområdet	16
1.3	Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet	4
1.4	Mål och målgrupp	4
2	Genomförande	5
2.1	Anläggningsbeskrivning, Block 5 i Uppsala	6
2.2	Vattenfalls fensond	7
2.3	Bränslen	9
2.4	Analyser	9
2.5	Testpositioner	10
3	Resultatredovisning	11
3.1	Korttidstester	11
3.1.1	Sondtester	11
3.1.2	Askanalys	18
3.1.3	Driftdata	19
3.2	Långtidstester	21
3.2.1	Sondtemperaturer	22
3.2.2	Korrosion	26
3.2.3	Sammansättning hos beläggningar och korrosionsprodukter	27
4	Resultatanalys	31
5	Slutsatser	37
5.1	Måluppfyllelse	37
6	Rekommendationer och användning	38
7	Förslag till fortsatt forskningsarbete	39
8	Litteraturreferenser	40

BILAGOR:

- A Beläggningssonder, Sammansättning för beläggningarna på proverna analyserat med SEM-EDX**
- B Utvärdering av driftdata under korttidsförsöken**

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

SLF (Shredder Light Fraction) även kallat ”fluff” är den brännbara rest som inte kan återvinnas då metallskrot krossats och separerats i olika fraktioner för återvinning. Det består framförallt av tyg, gummi och plast. En stor andel av metallskrotet kommer ofta från bilar. Ett högt energivärde samt bra betalt för att ta emot avfallet gör SLF till ett mycket attraktivt bränsle ekonomiskt sett. Tidigare erfarenheter visar dock att eldning av SLF kan leda till stora problem med korrosion och igensättningar.

I Renovas anläggning i Sävenäs har man tidigare eldat fluff, men man slutade med det eftersom det ledde till stora problem. Man fick stora mängder mycket hårt sittande beläggningar och även problem med korrosion. Bland annat drabbades man av igensättning av elfilter och beläggningar och sprickbildning i rökgasåtervärmarna. Beläggningarna i rökgasåtervärmarna innehöll klor och zink, troligen zinkklorid (ZnCl_2). Man fick också godsfortunning (flera mm) i drag 2. Det är dock inte helt säkerställt att det var endast fluffen som orsakade problemen. Inblandningsgraden var strax under 25%. Idag eldar man bilfluff med en låg inblandningsgrad. [1], [2]

Sedan några år används SLF i bränslemixen i Vattenfalls avfallspanna AFA Block 5 i Uppsala. Man är dock oroliga för om bränslets sammansättning skall ge ökad korrosion och avlagringsbildning i pannan. Ett preliminärt sondförsök visade på en mycket stor ökning av beläggningsbildningen och en ökad halt av zink i beläggningarna.

1.2 BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET

Tidigare sondförsök, genomförda bland annat inom Waste Refinery, har visat på ökad beläggningsbildning och en ökad risk för korrosion med SLF. Ingen entydig förklaring till orsaken till problemen har dock kunnat ges. De sondförsök som har genomförts har varit relativt korta, upp till 24 timmar. En teori som har framhållits är att problemen med SLF orsakas av bildande av zinkklorid (ZnCl_2) som har en låg smältpunkt och därmed dels gör beläggningar klabbigare och mer benägna att fastna på ytor och dels orsakar korrosion.

I Tabell 1 redovisas analysresultat från litteraturen för avfall som eldas i avfallsförbränningsanläggningar i Sverige och för SLF. Några framträdande skillnader är avsevärt högre halter av Fe, Pb, Zn och Cu i SLF. Även Cl-halten är ofta högre i SLF.

Termodynamiska jämviktsberäkningar [7] visar att under oxiderande förhållanden i den övre delen av eldstaden oxideras den största delen av zinken i rökgaserna till ZnO (s). Endast en liten fraktion förblir i gasfasen som Zn (g) eller ZnCl_2 (g). ZnO (s) kan deponeras på ytor genom t.ex. impaktion eller fastna i delvis smälta beläggningar. Zn (g) kan kondensera vid hög rökgastemperatur medan ZnCl_2 (g) kommer att förbli i gasfas på grund av dess låga kondenseringstemperatur. Bly förekommer i eldstadens övre del som PbO (g) och kondensering till PbO (s) på värmeväxlarytor kan förekomma. Under kylning av rökgasen förutspås bly övergå i PbCl_2 (s), zink förblir huvudsakligen i form av ZnO (s), med ett litet deltryck av ZnCl_2 (g). Kondensation av PbCl_2 (g) sker vid ca 350°C och kondensation

vid ZnCl_2 (s) vid materialtemperaturer under 250°C . Experimentella resultat visar dock att ZnCl_2 kan kondensera vid så höga temperaturer som 350°C . [7]

I [4] har termodynamiska jämviktsberäkningar gjorts, där man jämför innehållet av ett antal komponenter i rökgaserna om man eldar avfall och SLF. De termodynamiska beräkningarna visade att halterna av bly- och zinkklorider ökar ca 5-6 ggr vid förbränning med 100% SLF, jämfört med förbränning av normalt avfall. Vid inblandning av 20% SLF dubblades blykloridhalterna medan zinkkloridhalterna var oförändrade. Alkalikloridhalterna var ungefär lika höga i samtliga beräkningsfall. Beräkningarna visade att all alkali samt all bly övergår till klorider (klor fanns i överskott). Delar av zinken övergick också till klorid. Speciellt för dessa bly- och zinkklorider är att de är stabila i "kallare" rökgastemperaturer, $<650^\circ\text{C}$, till skillnad från alkalikloriderna. De kondenserar därför vid lägre temperaturer än alkaliklorider. Då bly- och zinkkloridmängderna ökar i rökgasen ökar alltså risken för korrosion vid lägre materialtemperaturer. Man påpekar också att risken för fouling är relativt hög pga. höga mängder gasformiga klorider i rökgasen som kan kondensera på värmeöverförande ytor och därmed öka nedsmutsningen i pannan. [4]

Alkalikloridorsakad (KCl, NaCl) högtemperaturkorrosion anses inte vara relevant vid de låga temperaturer som råder i avfallspannor, men närvaro av Zn- och Pb-komponenter i beläggningarna har påvisats förorsaka ökad korrosion redan vid $300-400^\circ\text{C}$. Vid förbränning kan Zn och Pb reagera med S och Cl och bilda klorider och sulfater i rökgaserna. Dessa tungmetallföreningar är speciellt problematiska på grund av att de bildar lågsmältande saltblandningar. Dessa lågsmältande gasformiga eller fasta föreningar följer rökgasen och kan sedan fastna eller kondensera på kallare ytor såsom pannväggar eller tuber för att sedan bilda aggressiva beläggningar. Tungmetallrika (Pb, Zn) klorider och sulfater ökar risken för korrosion, och effekten förstärks ytterligare vid närvaro av smälta. [9]

Utifrån laborietester antas ZnCl_2 ha större tendens att förorsaka problem vid lägre materialtemperaturer, medan PbCl_2 förväntas vara problematisk vid de temperaturer som förekommer i pannans väggar och överhettare. [9]

Tabell 1 Bränsleanalyser för "normalt" avfallsbränsle och för SLF

Table 1 Fuel analyses for "normal" waste fuel and for SLF

		Avfall 1 [3]	Avfall 2 [4]	Avfall 3 [6]*	SLF 1 [3]	SLF 2 [4]	SLF 3 [6]	SLF 4 [6]
Fukthalt	Vikt-% fuktigt	40	39	32,4	11,3	18,4	4,9	7
Askhalt	Vikts-% torrt	19	21	18,1	45	43	40,5	27,0
C	Vikts-% torrt	46	45	44,6	35	35	39	40
H	Vikts-% torrt	6,2	5,77	5,76	4,45	4,48	4,9	5
S	Vikts-% torrt	0,2	0,4	0,45	0,3	0,38	0,46	0,32
N	Vikts-% torrt	1,28	1,27	0,97	0,93	0,94	1,2	1,1
Cl	Vikts-% torrt	0,68	0,53	0,67	1,17	1,14	0,96	0,53
O	Vikts-% torrt	26,05	26,85		12,87	15,42	13	
Al	mg/kg ts	10 920	10 820	14 360	35 950	39 240	17 700	18 700
Si	mg/kg ts	39 900	40 980	41 160	59 700	56 570	64 000	26 100
Ti	mg/kg ts	1 550	2 140	2 840	3 675	3 840	3 800	2 800
Na	mg/kg ts	9 217	6 950	8 760	7 350	5 580	8 700	2 700
Mg	mg/kg ts	2 666	3 190	3 740	5 750	6 820	6 400	4 200
K	mg/kg ts	4 333	3 910	4 100	5 175	3 330	5 600	1 600
Ca	mg/kg ts	27 516	26 990	36 060	24 550	26 350	30 400	15 700
Fe	mg/kg ts	5 083	5 300	5 480	130 000	192 010	64 000	144 400
P	mg/kg ts	1 750	1 040	1 240	1 425	360		700
Mn	mg/kg ts	420	0	460	1 325	1 860	700	800
Pb	mg/kg ts	54	41	219	1 410	2 069	1 700	876
Zn	mg/kg ts	452	580	822	12 625	25 589	11 750	8 400
Ba	mg/kg ts	167		340	4 000		8600	700
Cr	mg/kg ts	42		246	1 178		430	833
Cu	mg/kg ts	220		651	26 975		11 500	39 000
Ni	mg/kg ts	15		36	605		340	527

* Medelvärde av flera analyser

Försök med förbränning av SLF har genomförts i en 15 MWth avfallseldad rostpanna med rörlig rost vid Gärstadverket Tekniska Verken i Linköping. [3] Pannan producerar mättad ånga (17 bar och 207°C) och eldar normalt en blandning av hushålls- och industriavfall. Vid försöken användes 20 vikts-% SLF (25 energi-%).

Bränsleblandningarna där SLF ingår har ca 10 ggr mer zink än i fallet med enbart avfall. Vid försöken gjordes mätningar med sonder för analys av avlagringar och initial korrosion samt rökgasmätningar. Sonder exponerades vid tre olika rökgastemperaturer (380°C, 630°C och 770°C) och med tre olika materialtemperaturer (280°C, 420°C och 500°C). Exponeringstiden var 24 timmar.

Resultaten visade att samförbränning med en så hög andel som 20% SLF (25 energi-%) gick mycket bra att hantera förbränningsmässigt i pannan. SLF-inblandningen ökade dock beläggningshastigheten framförallt i de två varmaste positionerna i rökgasstråket.

Vid 770°C rökgastemperatur och 280°C materialtemperatur minskade andelen alkali i beläggningarna medan Ca, Fe och Zn ökade vid inblandning av SLF.

Sammansättningen på beläggningarna där rökgastemperaturen var ca 630 °C liknade mycket resultaten från analyserna av beläggningar från den varmare positionen 770°C. Jämfört med fallet med enbart avfall ökade andelen Fe och Zn vid inblandning av SLF. Vid 380°C rökgastemperatur och 280°C materialtemperatur såg situationen däremot annorlunda ut. I fallet med enbart avfall bestod beläggningen i huvudsak av alkaliklorider och alkalisulfater. Vid inblandning av SLF minskade andelen alkali markant och beläggningen spädades ut med bränslets askkomponenter. Även andelen Cl och S minskade vid jämförelse mellan fall avfall och avfall+SLF, medan andelen av Si, Al, Fe, Ca och Zn ökade. [3]

Den initiala korrosionen för materialet T22 vid 770°C rökgastemperatur och 280°C materialtemperatur har också undersökts. Inblandning av SLF leder till ett tjockare skikt med korrosionsprodukter. I avfallsfallet domineras beläggningen av K, Na, S och O vilket är i överensstämmelse med XRD-analysen där den kristallina fasen KNaSO₄ detekteras. Närvaron av Cl korrelerar väl med K, Na och Zn och med XRD detekterades NaCl och K₂ZnCl₄. Utöver närvaron av klor i beläggningen detekteras klor även under det oxidskikt som bildats, troligtvis i form av FeCl₂. I SLF-fallet har inget kontinuerligt oxidskikt bildats. Järnet är heterogent distribuerat genom hela korrosionsproduktskiktet och inte som ett sammanhängande band tillsammans med O ovanför stålytan. En förklaring till bildandet av detta osammanhängande oxidskikt kan vara förekomsten av kloridsaltblandningar med låg smälttemperatur. Alldeles ovanför stålytan ses ett område där K, Zn och Cl överlappar varandra och med XRD detekteras även fasen K₂ZnCl₄. Saltblandningar av KCl och ZnCl₂ har en eutektisk smältpunkt (dvs. lägsta smältpunkt) vid ca 230°C. Närvaron av en smälta i korrosionsattacken medför kraftigt ökade diffusionshastigheter av joner (jämfört med diffusionshastigheten av joner i en oxid) samt att en smälta kan lösa upp den befintliga oxiden. Således förväntas korrosionsangreppet kraftigt förvärras då en smälta varit närvarande samt att det kan vara en möjlig förklaring till att inget kontinuerligt oxidskikt bildats. [3]

Förbränningsförsök har utförts vid Lidköpings Värmeverk i en 20 MW bubblande FB-panna för fast hushålls- och verksamhetsavfall. Pannan är en ångpanna (mättad ånga 40 bar) av självirkulationstyp. Normalt bränsle för Lidköpings värmeverk är ca 50% hushållsavfall och 50% verksamhetsavfall. Vid försöken användes en bränslemix bestående av 77% normalt bränsle + 23% SLF (% energibas, 20% vikt-bas). Vid försöken gjordes mätningar med sonder för analys av avlagringar och initial korrosion samt rökgasmätningar. Sönderna var placerade i eldstaden, i vändschaktet och

nedströms konvektionsdelen. Proverna i vändschaktet bedöms vara de som bäst motsvarar proverna i föreliggande projekt. I avlagringarna på dessa prover ökar halterna av Cu, Fe och Cl, medan halterna av S och Ca minskar vid inblandning av SLF. Beläggningsmängden ökar också. Den initiala korrosionen har analyserats på ett prov som har exponerats i vändschaktet med materialtemperatur 280°C vid inblandning av SLF. I korrosionsfronten detekteras järnklorid. Inget eller mycket låga halter Pb, Cu eller Zn detekterades i närheten av korrosionsfronten. Ingen jämförelse har gjorts med motsvarande exponering utan SLF. [5]

Inblandning av bilfluff har även testats hos Borås Energi och Miljö i deras 20 MW BFB avfallspanna, med ångdata på 49 bar och 405°C. Bränslet är (på årsbasis) ca 30% källsorterat brännbart hushållsavfall och 70% industriavfall. Totalt förbränns ca 14 ton avfall i timman. Försöken kan sammanfattas med att inblandningen av bilfluff (6 vikt-%) utfördes utan några större driftproblem med bränsleinmatning, förbränningsprocessen, beläggningstillväxt eller emissioner under den tid som det provades (ca 2 dygns drift). Inga signifikanta skillnader i mätresultat jämfört med förbränning av den normala avfallsbränsleblandningen kunde påvisas. [6]

1.3 FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET

I projektet har tester med olika inblandningsgrad av SLF i bränslemixen genomförts, för att undersöka dess inverkan på korrosion och beläggningsbildning. Sonder har exponerats i två olika positioner där man bedömt att risken för korrosion är stor. Dessutom har askprover tagits ut vid försöken och en analys av driftdata har genomförts.

Vid tidigare tester med SLF har endast kortare sondförsök gjorts. Dessutom krävs antagligen ett flertal olika tester i olika pannor för att nå en förståelse för problematiken med SLF.

1.4 MÅL OCH MÅLGRUPP

Problem med korrosion och beläggningsbildning då SLF ingår i bränslemixen i en avfallspanna beskrivs. Projektets mål är att indikera när problem kan förväntas, t.ex. vid vilken inblandningsgrad, i vilka delar av pannan och vid vilka rökgas- och materialtemperaturer. På så sätt kan framtida problem med korrosion och igensättningar undvikas och inkomsterna från att elda SLF kan maximeras.

Förhoppningen är att genomförda undersökningar ska leda till att man, då man överväger inblandning av SLF, kan förutse vilka problem som kommer att uppstå och vilka kostnader dessa kommer att medföra, så att man dels kan förebygga problemen och dels kan göra en välgrundad avvägning mellan ökade kostnader och vinst.

Projektets effektmål är att minska underhållskostnader, öka tillgängligheten och öka bränsleflexibiliteten genom att minimera de problem som uppstår vid förbränning av SLF.

Målgrupp är anläggningsägare, personer med intresse för drift och underhåll av avfallsförbränningsanläggningar, bränsleansvariga och bränsleleverantörer.

2 Genomförande

Genom sondförsök har korrosion och beläggningar studerats i en avfallseldad rosterpanna vid inblandning av olika mängder SLF i det ordinarie bränslet.

Testerna har genomförts i Vattenfalls avfallspanna, Block 5, i Uppsala (Figur 1 och Tabell 2). I denna panna eldas huvudsakligen en mix av hushållsavfall och industriavfall, men under senare år har man också blandat in en ökande andel SLF, idag ca 9% (vikt).

Sondförsöken har genomförts i två positioner i pannan. Både långtidstester för korrosionsmätning och korttidstester för avlagringsanalys har genomförts.

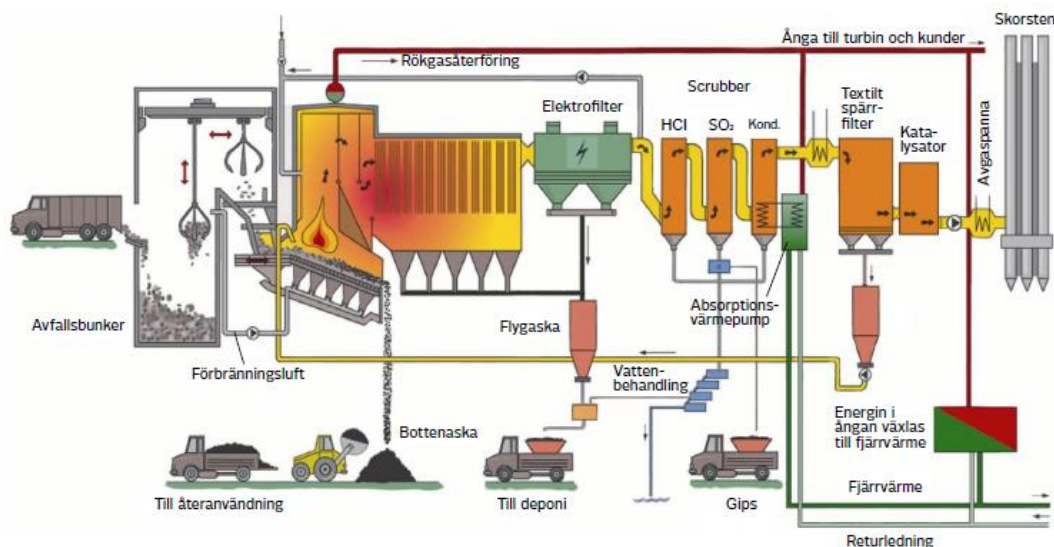
Sonderna har placerats i de positioner i pannan där man, utgående från rökgas- och materialtemperaturer, har antagit att korrosionen är som störst. Eldstadsväggarna är infodrade med eldfast material och taket har påsvets av Ni-baslegeringen Inconel 625, vilket gör att dessa ytor är skyddade mot korrosion. De senare delarna i pannan, inklusive värmeväxlarna, är däremot tillverkade av kolstål och riskerar därför att drabbas av korrosion, i synnerhet i de delar som har de högsta rökgas- och materialtemperaturerna.

Korrosionssonderna har exponerats i ca 1000 timmar och korrosionen har sedan uppmätts. De beläggningar, blandade med korrosionsprodukter, som sitter på de exponerade provbitarna har också analyserats för att försöka ge en förklaring till effekterna på korrosion och beläggningsbildning.

Korttidssonderna har exponerats i tre timmar och därefter har avlagringarna som satt sig på proverna vägts och därefter analyserats med SEM-EDX. Vid dessa tester togs också flygskprover ut för analys och driftdata har analyserats.

2.1 ANLÄGGNINGSBESKRIVNING, BLOCK 5 I UPPSALA

Förbränningsanläggningen i Uppsala producerar ånga, el, fjärrvärme och fjärrkyla. Den består av fyra block, Block 1, 3, 4 och 5. Block 5 är nyast och togs i drift 2005. Bränslet består av ungefär lika stora andelar hushållsavfall och industriavfall. Block 5 är en vattenkyld rosterpanna, levererad av von Roll Inova. Ångdata är 212°C och 20 bar och förbränningskapaciteten är 23 ton/timme. Materialet i tubväggarna och de hängande tuberna är P235 GH och materialtemperaturen är ca 220-230°C. I Figur 1 visas en skiss av Block 5 och i Tabell 2 ges mer information om pannan.



Figur 1 Översiktlig skiss av Block 5 i Uppsala [8]

Figure 1 Schematic drawing of Block 5 in Uppsala [8]

Tabell 2 Tekniska data för Block 5 i Uppsala [8]

Table 2 Technical data for Block 5 in Uppsala [8]

Förbränningskapacitet (ton avfall/timme, vid 12 MJ/kg avfall)	23
Bunkervolym (ton)	5 500
Levererad effekt (MW)	69
Panntyp	Vattenkyld roster
Ångdata	20 bar, 212°C
Leverantör	von Roll Inova
Idrifttagen	2005
Kväveoxidrening	Katalysator med ammoniak
Rökgasåterföring	Ja
Stoftrening	Elfilter
Rökgaskondensering (MW)	11 spillvärme
Absorptionskylmaskiner, ångdrivna (MW)	28 fjärrvärme, 11 fjärrkyla
Våt rökgasrening	HCl-skrubber, SO ₂ -skrubber
Vattenbehandlingskapacitet (m ³ /timme)	15
Torr rökgasrening	Slangfilter med aktivt kol

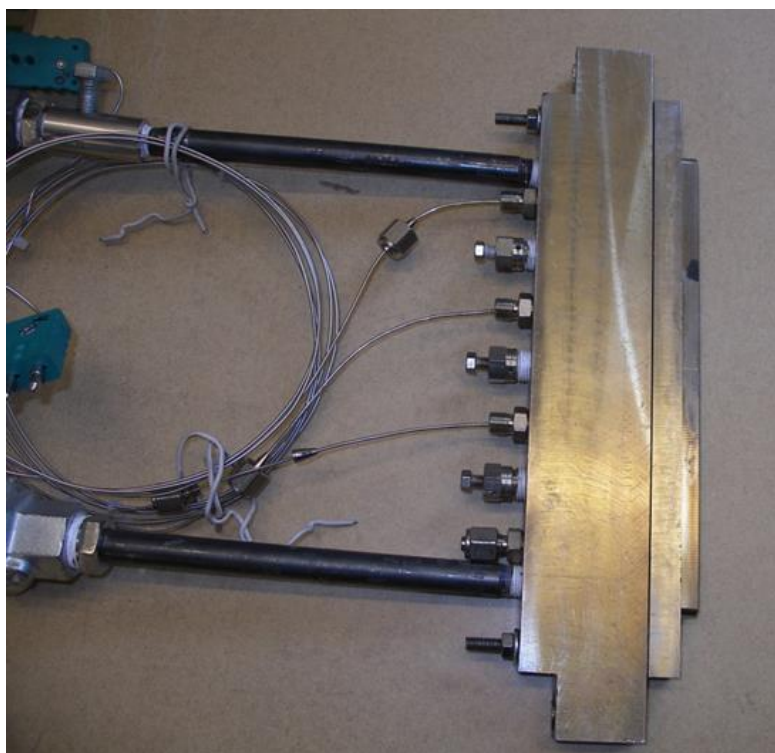
2.2 VATTENFALLS FENSOND

Sondförsöken har genomförts med den av Vattenfall utvecklade fensonden, som är speciellt framtagen för att användas i tubväggar. Den kan monteras i ett hål i fenan mellan två tuber och kräver alltså inget större ingrepp i pannan, såsom bockning av rör, för att kunna användas. På sonden finns plats för fyra prover. Sondens är luftkyld och temperaturen kan regleras till att ha samma temperatur på alla fyra proverna eller att ha en temperaturgradient med olika temperaturer på proverna. Proverna är 48 mm långa, 7 mm breda och 6 mm tjocka. Temperaturen mäts med ett termoelement i mitten av varje prov. Till korttidstesterna användes materialet 13CrMo4-5 och till långtidstesterna användes materialet 16Mo3. Dessa är låglegerade material som i korrosionshänseende liknar det material (P235GH) som används i pannan. (Tabell 3)



Figur 2 Hål för sonden i tubväggen i en panna (ej Uppsala)

Figure 2 Hole for the probe in the tube wall of a boiler (not Uppsala)



Figur 3 Vattenfalls fensond (före och efter exponering)

Figure 3 Vattenfall's fin probe (before and after exposure)

Tabell 3 Specifikation för de material som har använts

Table 3 Nominal chemical composition of materials used

	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	C
P235GH	Bal.	≤0.30	≤0.30	≤1.20	≤0.08	≤0.35	≤0.16
16Mo3	Bal.	≤0.30	≤0.30	0,40-0,90	0,25-0,35	≤0.35	0,12-0,20
13CrMo4-5	Bal.	0,7-1,15	≤0,3	0,4-1,0	0,4-0,6	≤0,35	0,08-0,18

2.3 BRÄNSLEN

I Block 5 eldas mestadels importerat bränsle klassificerat som industriavfall (RDF). Vissa leverantörer har dock ganska mycket organiskt avfall i bränslet (hushållsavfall).

SLF är den brännbara rest som ej kan återvinnas då metallskrot krossats och separerats i olika fraktioner för återvinning. Den SLF som levereras till Uppsala består framförallt av trä, plast, tyger, gummi och kabelbitar. Ursprunget är ca 1/3 bilar och ca 2/3 annat metallskrot.

SLF levereras med lastbil till Uppsala och tippas direkt i deras avfallsbunker. SLF-bränslet blandas med övrigt bränsle med hjälp av skopan (gripklon) innan blandningen lastas ner i bränsletratten som leder ner till rosten.

Under 2014 och 2015 levererades normalt två lastbilar SLF om dagen måndag till fredag, totalt 326 ton/vecka. Detta ger en inblandningsgrad på i snitt 9%. Inblandningsgraden blir lite lägre på helgerna och lite högre i veckorna.

2.4 ANALYSER

Under exponeringen ökar provbitarna i vikt, som ett resultat av deponering av avlagringar och reaktioner med rökgaser. För att mäta denna viktökning vägs proverna före och efter exponering.

Vid korttidstesterna analyserades de beläggningar som bildades på provbitarna på sönerna. Dels vägdes provbitarna före och efter exponeringen, för att bestämma mängden beläggning. Dels analyserades avlagringen med SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray analysis) för att bestämma beläggningens sammansättning.

Vid korttidstesterna togs flygaskprover ut för kemisk analys. Proverna skickades till Belab AB för analys enligt anläggningens normala rutiner. Positionen för uttag av askprov visas i Figur 4.

En analys av driftdata har också gjorts.

Vid långtidstesterna uppmättes godsförlusten på provbitarna genom att deras tjocklek mättes med mikrometer före och efter exponering. Dessutom analyserades blandningen av beläggningar och korrosionsprodukter som satt på proverna med SEM-EDX för att bestämma dess sammansättning.

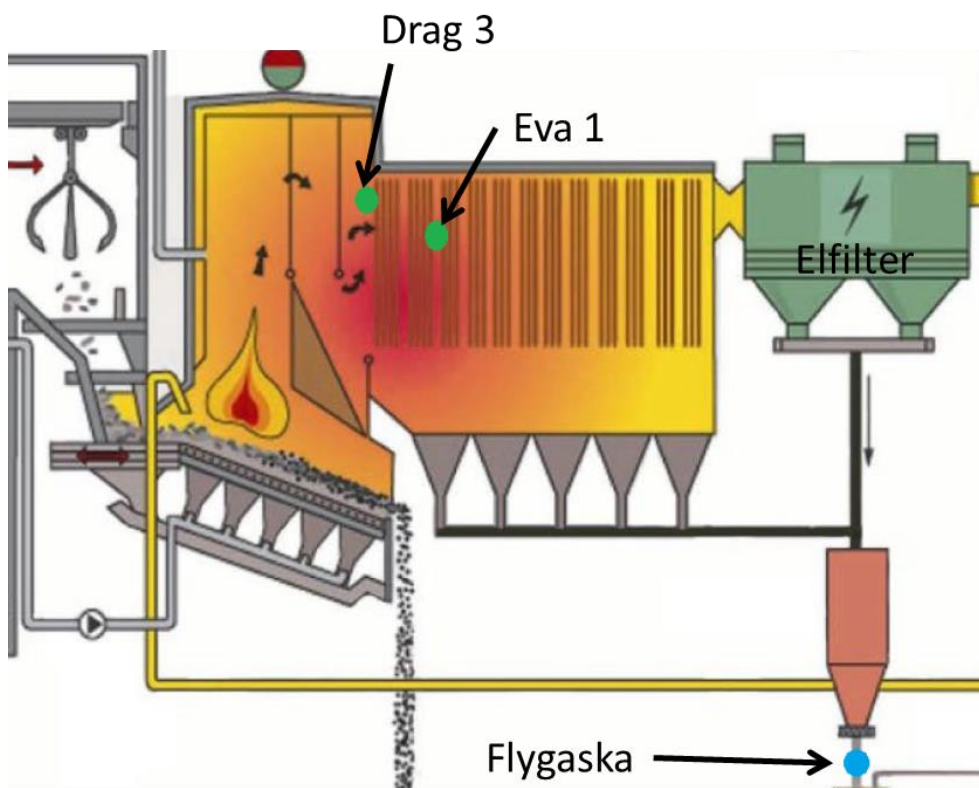
2.5 TESTPOSITIONER

Testpositionerna visas nedan i Figur 4.

Sonderna har placerats i de positioner i pannan där man, utgående från rökgas- och materialtemperaturer, har antagit att korrosionen är som störst. Eldstadsväggarna är infodrade med eldfast material och taket har påsvets av Inconel, vilket gör att dessa ytor är skyddade mot korrosion. I positionen "Drag 3" är rök Gastemperaturen ca 700°C och i positionen "Eva 1" (vid evaporator 1) är den ca 500°C.

Evaporatorerna sotas en gång i timmen med slagsotning.

Flygaska togs ut i en position där aska från tuberna och från elfiltret samlas upp.



Figur 4 Positioner för provning i pannan. Grön prick – sondposition, Blå prick – uttag av flygaska

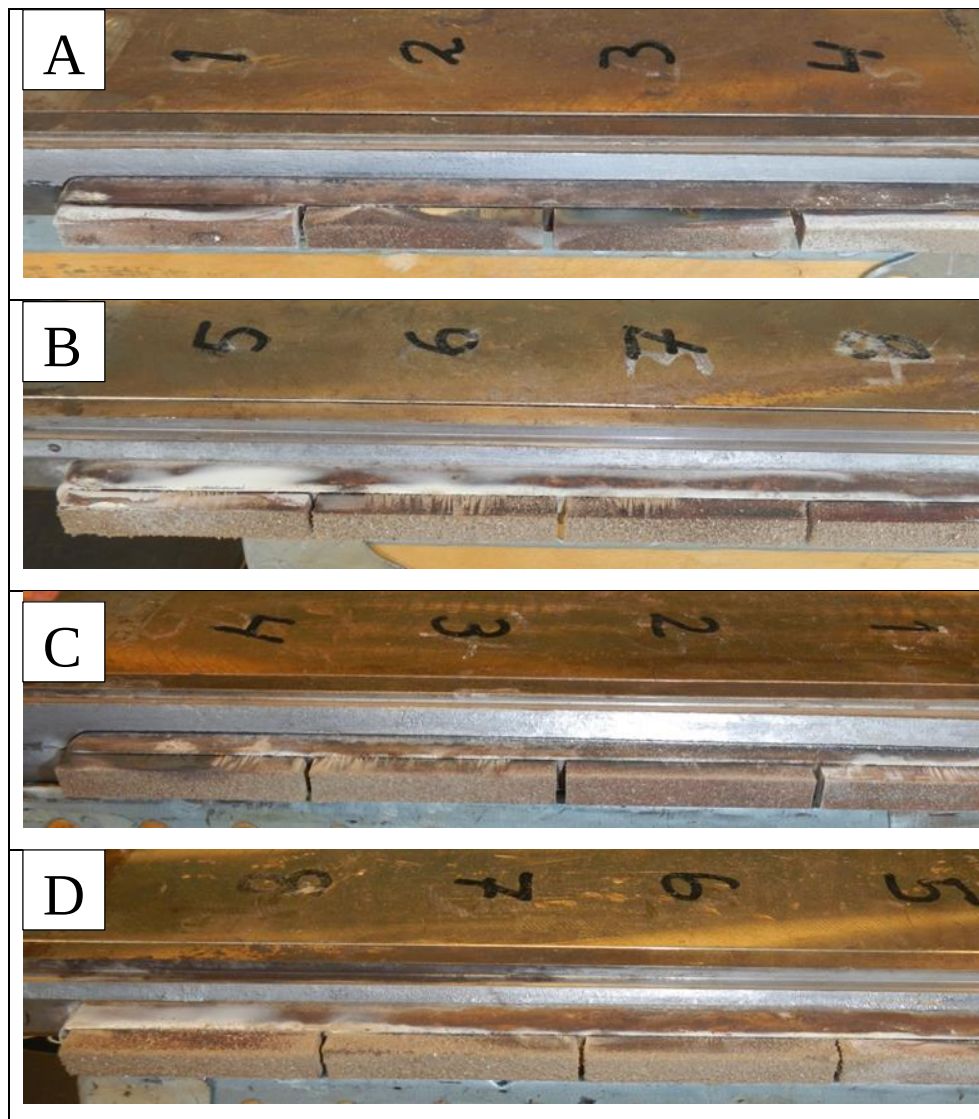
Figure 4 Positions for testing in the plant, Green dot – probe position, Blue dot – sampling of fly ash

3 Resultatredovisning

3.1 KORTTIDSTESTER

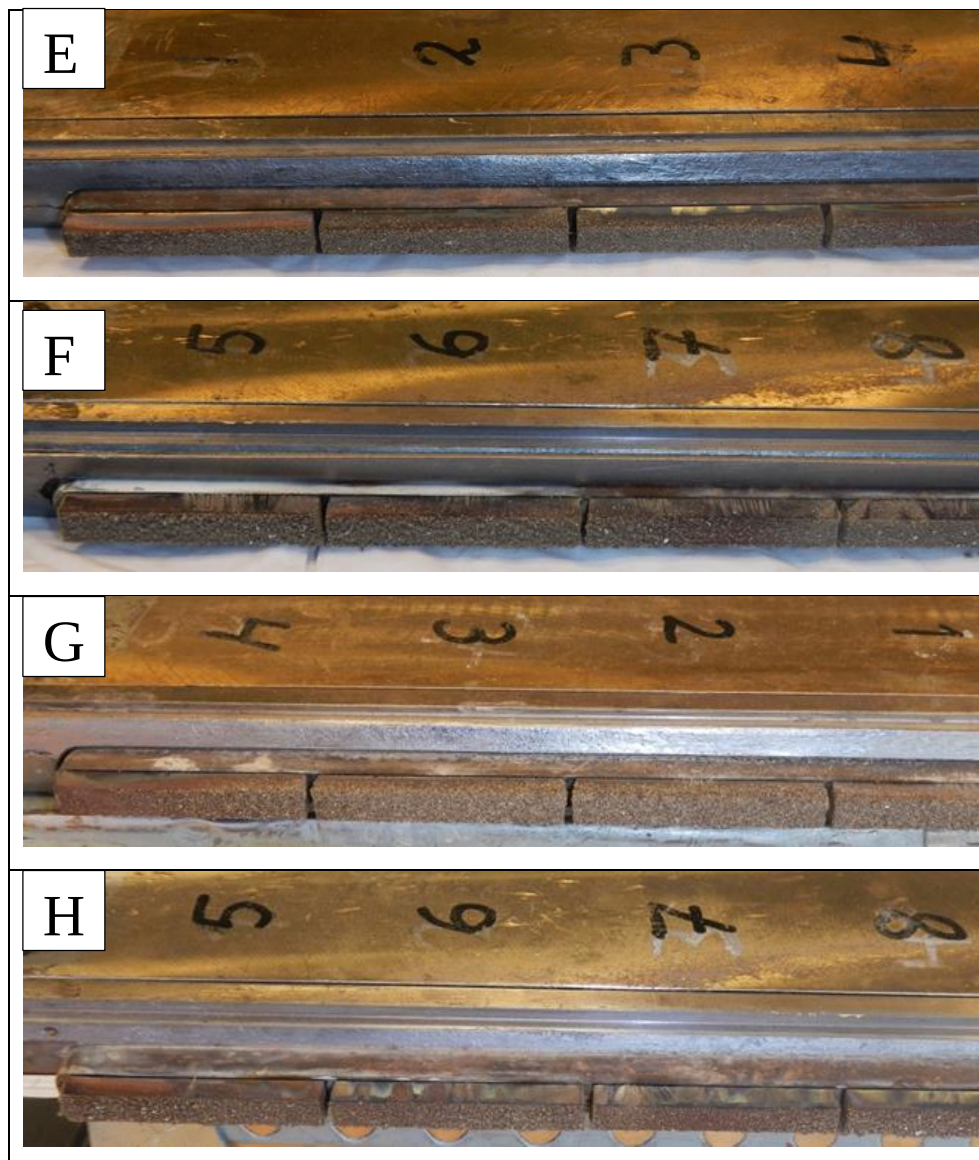
3.1.1 Sondtester

När sonderna togs ut ur pannan efter tre timmars exponering kunde man se stora skillnader i utseendet på de exponerade ytorna. Variationerna var stora på en och samma sond, men man kunde också notera skillnader mellan de olika sonderna. Beläggningen var ljusast på de sonder som exponerats med lägst dos SLF (9%) och mörknade gradvis med ökande inblandning av SLF. Framförallt ser man ett skifte mellan 29% SLF och 55% SLF. Proverna ser också mer och mer korroderade ut. (Figur 5 och Figur 6)



Figur 5 Korttidssonder efter exponering. A) 9% SLF, Drag 3 B) 9% SLF, Eva 1 C) 29% SLF, Drag 3 D) 29% SLF, Eva 1

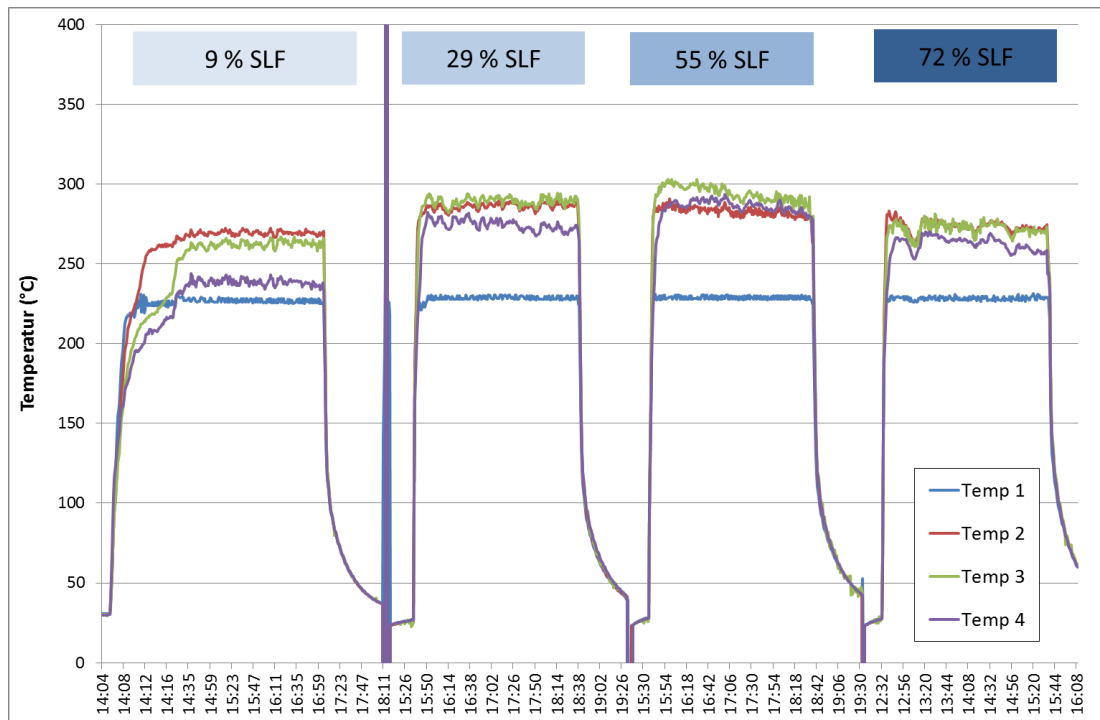
Figure 5 Probe after exposure. A) 9% SLF, Drag 3 B) 9% SLF, Eva 1 C) 29% SLF, Drag 3 D) 29% SLF, Eva 1



Figur 6 Korttidssonder efter exponering. E) 55% SLF, Drag 3 F) 55% SLF, Eva 1 G) 72% SLF, Drag 3 H) 72% SLF, Eva 1

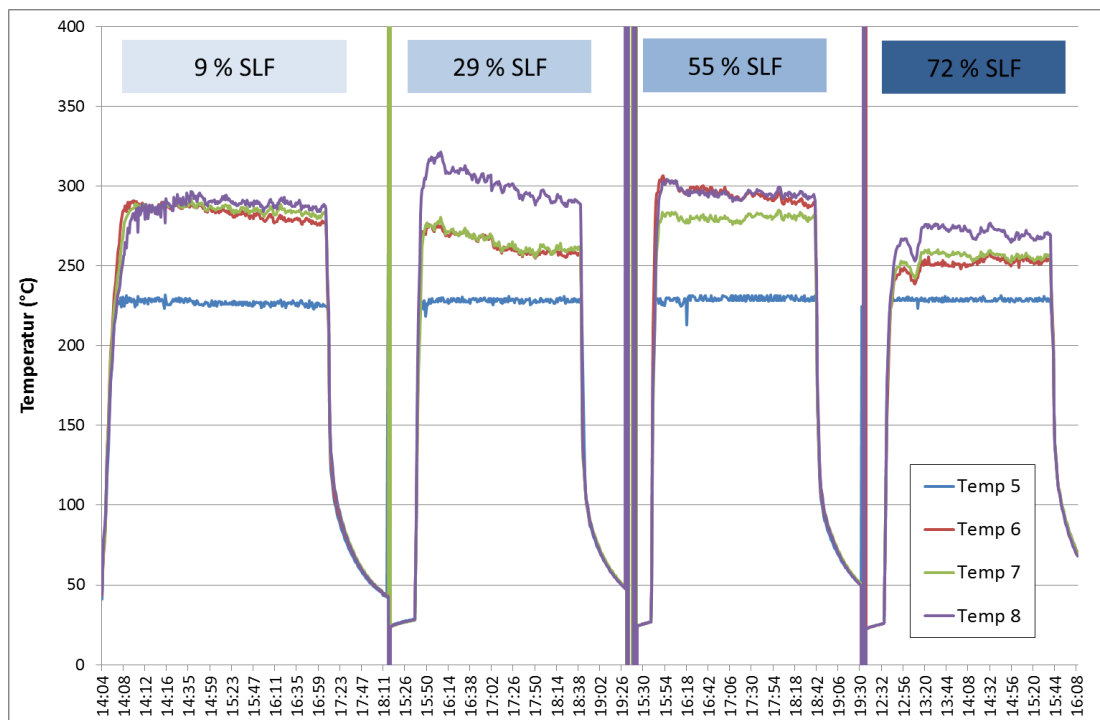
Figure 6 Probe after exposure. E) 55% SLF, Drag 3 F) 55% SLF, Eva 1 G) 72% SLF, Drag 3 H) 72% SLF, Eva 1

Ambitionen var att ha en jämn temperaturgradient över sonden, från 230°C till 300°C. Detta visade sig vara svårt att uppnå i praktiken. Provbiten som användes för reglering av temperaturen har vid alla testerna den lägsta temperaturen, men sedan är det ganska stor skillnad mellan de olika testfallen vad gäller hur stor skillnaden är mellan högsta och lägsta temperatur och hur jämn spridningen är över sonden. Detta visas i Figur 7 och Figur 8.



Figur 7 Sondtemperaturer vid korttidstester, position 1, Drag 3

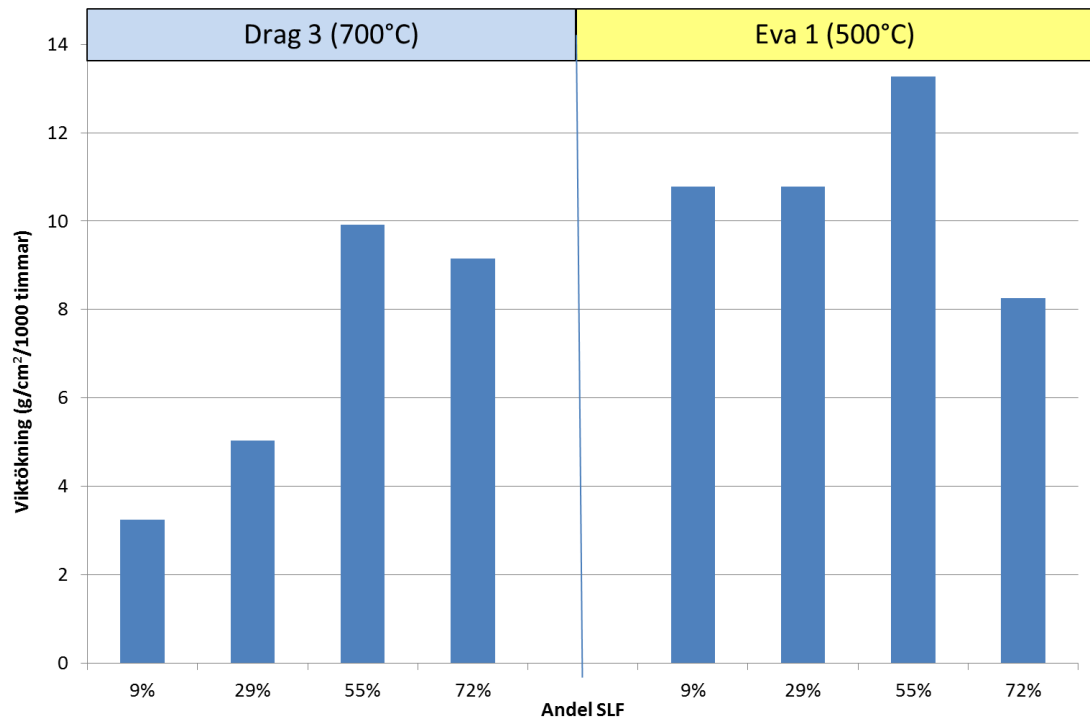
Figure 7 Probe temperatures during short term tests, position 1, Pass 3



Figur 8 Sondtemperaturer vid korttidstester, position 2, Eva 1

Figure 8 Probe temperatures during short term tests, position 2, Eva 1

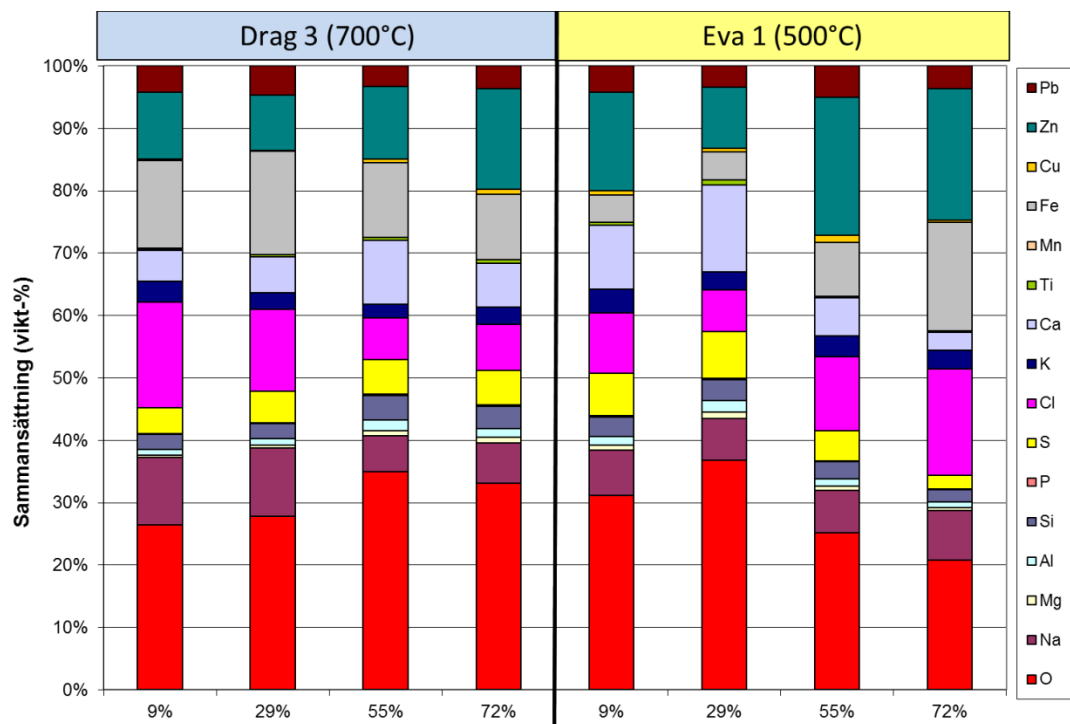
Viktökningarna vid exponering var små och det var stora skillnader mellan olika prover på samma sond. I drag 3 tycks dock en signifikant ökning ske mellan 29% och 55%. Vid de två lägre SLF-inblandningsgraderna är också viktökningen större i Eva 1 än i Drag 3.



Figur 9 Viktökning för prover som exponerats i tre timmar

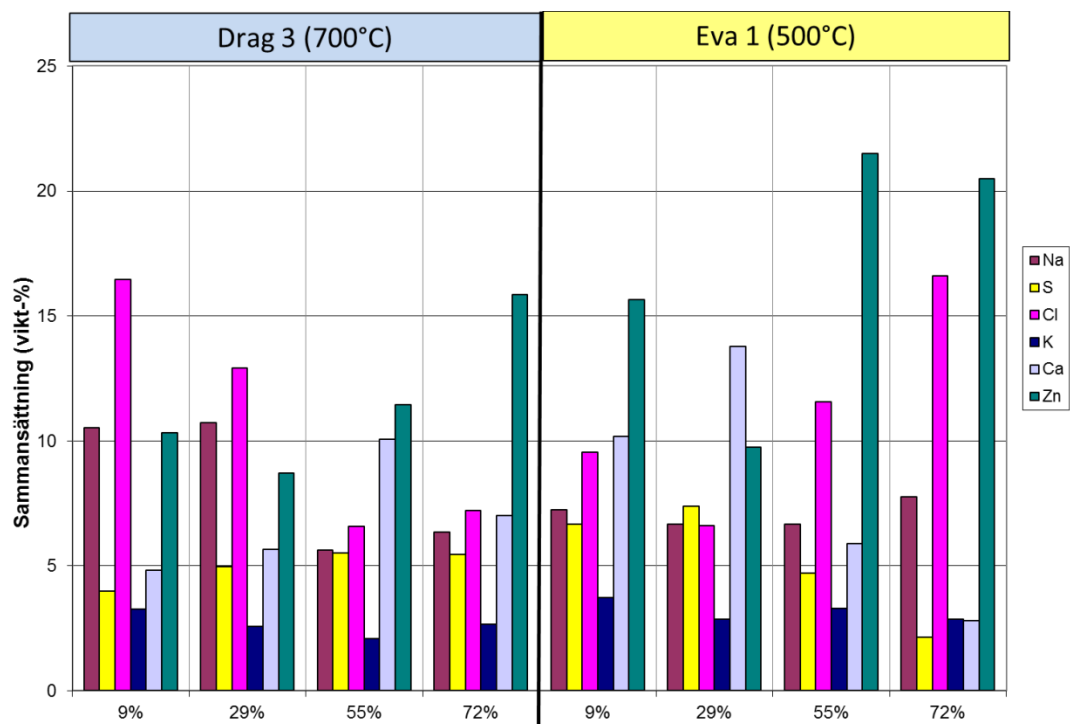
Figure 9 Weight gain for samples exposed three hours

Även analysen av sammansättningen visade i vissa fall på stora variationer mellan de olika provbitarna (se bilaga A) och också på stora variationer mellan olika positioner på en och samma provbit. Ytor har valts där beläggningen inte ser skadad ut och resultaten som redovisas är medelvärden av analyser från flera ytor. I Figur 10 och Figur 11 visas medelvärden för de olika sönerna. Det är svårt att utskilja några tydliga trender, men i Drag 3 tycks Cl minska medan Zn och Ca ökar med ökande inblandning av SLF. I Eva 1 däremot ses en trend med ökande Cl och minskande S och Ca med ökande inblandning SLF.



Figur 10 Sammansättning för beläggningarna på proverna analyserat med SEM-EDX (medelvärden)

Figure 10 Composition of deposits on samples analysed with SEM-EDX (average)

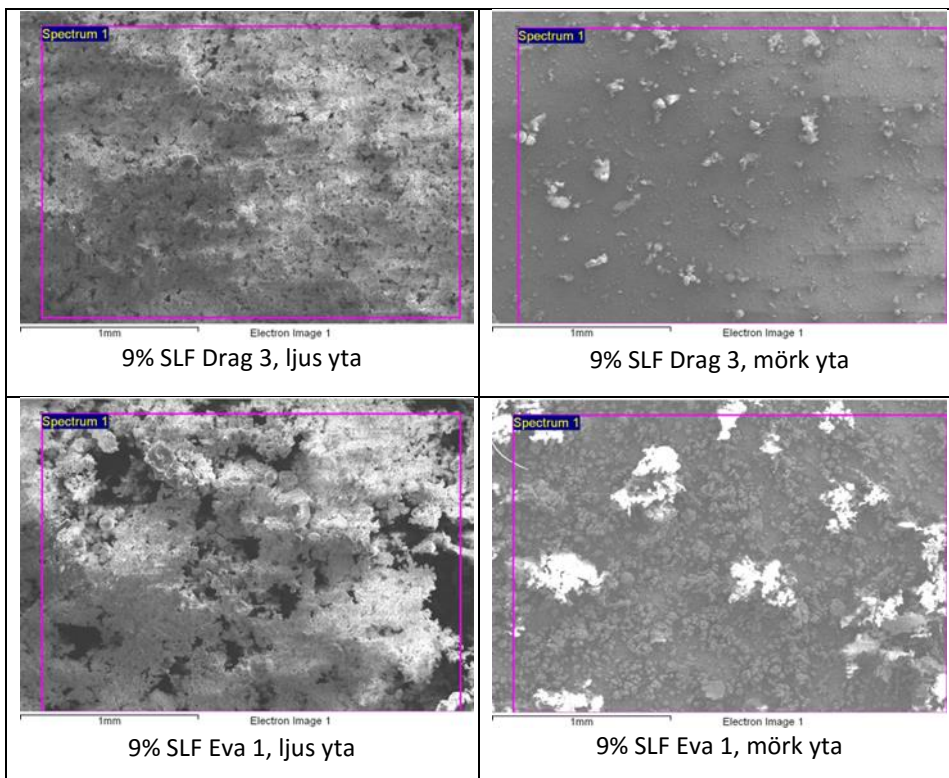


Figur 11 Sammansättning för beläggningarna på proverna analyserat med SEM-EDX (medelvärden), några utvalda element

Figure 11 Composition of deposits on samples analysed with SEM-EDX (average), a few selected elements

Liksom man kunde se på sondaerna då de togs ut ur pannan, kunde man även i SEM-et identifiera både mörka och ljusa ytor på proverna. (Figur 12) Hur ljus eller mörk en yta är för ögat har visserligen inget samband med om den ser mörk eller ljus ut i SEM-et, men i detta fall tycks även strukturen på materialet stämma överens med vad som man kunde se. Den kemiska sammansättningen för de två typerna av ytor skilde sig också åt. De ljusare ytorna hade högre halter av Ca och S och lägre halter av Cl, Na och Fe än de mörkare ytorna. (Tabell 4 och Figur 13)

De två typerna av ytor kan ses på sondaerna från alla testerna utom sonden från Eva 1 vid 72% inblandning av SLF. Det fanns dock mindre av de ljusa ytorna och mer av de mörka ytorna ju mer SLF som blandades in, i synnerhet för positionen Eva 1. Vid 72% SLF i positionen Eva 1 kunde inga ljusa ytor hittas och den lägsta analyserade halten Fe var 6%.



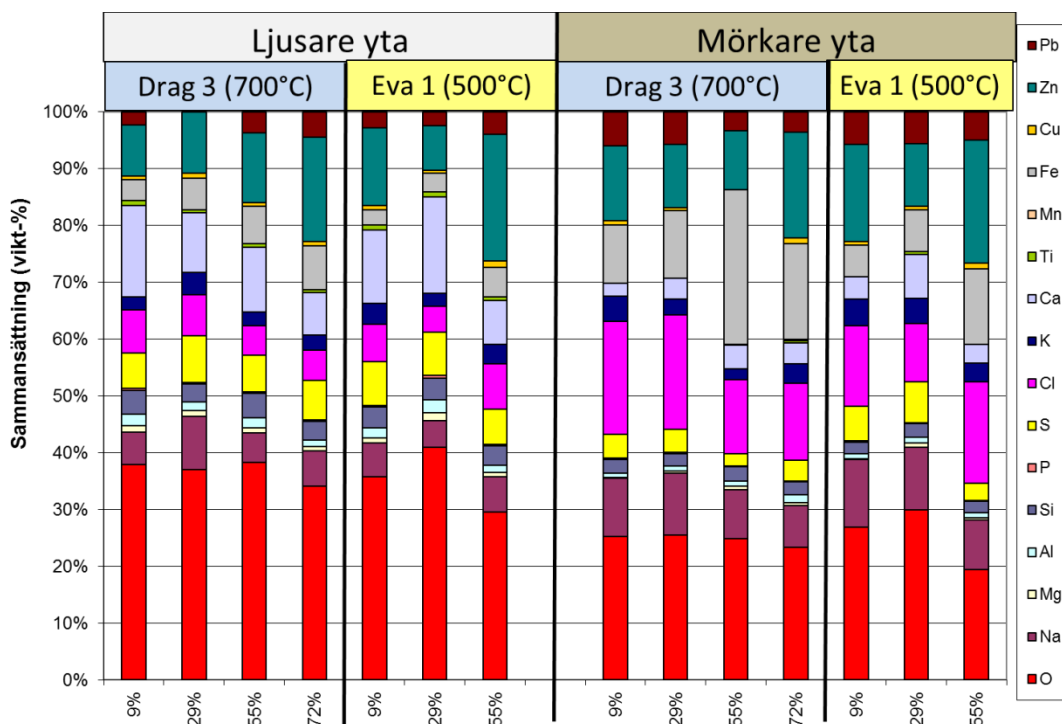
Figur 12 Exempel på de två typerna av ytor som kunde ses med SEM

Figure 12 Examples of the two types of surfaces that were seen with SEM

Tabell 4 Sammansättning för ytorna i Figur 12, analyserat med SEM-EDX

Table 4 Elemental composition of the surfaces shown in Figure 12, analysed with SEM-EDX

	9% SLF Drag 3		9% SLF Eva 1	
	Ljus yta	Mörk yta	Ljus yta	Mörk yta
C	1,70	5,27		3,46
O	37,26	23,96	35,75	25,95
Na	5,66	9,68	5,96	11,47
Mg	1,03	0,16	0,87	0,20
Al	2,08	0,66	1,78	0,84
Si	4,07	2,30	3,67	1,97
P	0,37	0,18	0,32	0,19
S	6,12	4,00	7,67	5,84
Cl	7,48	18,81	6,59	13,73
K	2,20	4,21	3,61	4,48
Ca	15,84	2,20	12,97	3,89
Ti	0,83		0,88	
Mn				
Fe	3,65	9,65	2,70	5,29
Cu	0,58	0,71	0,69	0,61
Zn	8,87	12,53	13,67	16,53
Pb	2,27	5,67	2,87	5,55

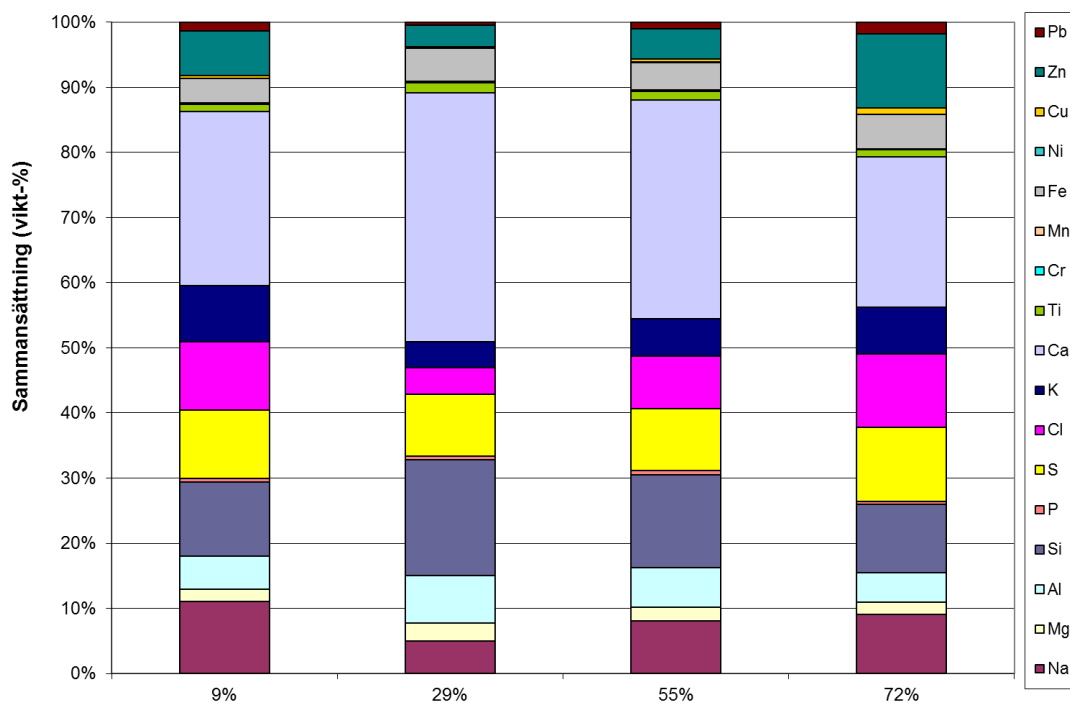


Figur 13 Sammansättning för ljusa och mörka ytor, analyserat med SEM-EDX

Figure 13 Elemental composition of fair and dark surfaces, analysed with SEM-EDX

3.1.2 Askanalys

I Tabell 5 och Figur 14 visas resultatet av analysen av flygaskan. Ca, Si, Al och Mg ökar då man går från 9% till 29% SLF, för att sedan minska med ökad inblandning. Trenden är den omvända för Cl, Na, K, Pb och Zn.



Figur 14 Sammansättning för flygaskan

Figure 14 Composition of fly ash

Tabell 5 Sammansättning för flygaska

Table 5 Composition of fly ash

	9%	29%	55%	72%	
Na	73500	32900	51200	57200	mg/kg
Mg	12400	18000	13800	12000	mg/kg
Al	33600	47700	38500	28500	mg/kg
Si	75700	116000	91200	65900	mg/kg
P	3740	4190	3980	2940	mg/kg
S	6,9	6,2	6,0	7,2	%
Cl	6,9	2,6	5,1	7,1	%
K	57500	26200	36900	45200	mg/kg
Ca	177000	250000	214000	146000	mg/kg
Ti	7680	10300	8450	6640	mg/kg
V	72,3	116	116	74,1	mg/kg
Cr	459	431	367	351	mg/kg
Mn	775	928	772	744	mg/kg
Fe	24700	32900	27100	33000	mg/kg
Ni	143	169	169	182	mg/kg
Cu	3430	1650	2800	6420	mg/kg
Zn	45400	21500	30000	71400	mg/kg
As	192	90,3	107	147	mg/kg
Pb	8750	3240	6380	11600	mg/kg
Mo	31,8	26	36,3	46	mg/kg

3.1.3 Driftdata

I samband med korttidstesterna har driftdata för pannan studerats för att säkerställa att olika grad inblandning av SLF inte får någon signifikant kritisk inverkan på temperaturnivåer, rökgasflöden, fläktarbeten, etc. i pannan som skulle kunna orsaka driftbegränsningar alternativt påverka den övergripande driftekonomin.

Då SLF generellt ses som ett ”torrare” bränsle med högre värmevärde än de fraktioner avfall som normalt eldas i block 5 finns det farhågor att temperaturprofilen i de olika avdelarna av pannan skulle kunna förskjutas på grund av ändrade volymflöden, etc.

Parametrarna som studerats summeras i Tabell 6 nedan tillsammans med resulterande medelvärden under de perioder olika fraktioner SLF testats. Några av parametrarna redovisas och diskuteras i mer detalj i Bilaga B.

Tabell 6 Medelvärden för de studerade processparametrarna vid de olika korttidsförsöken kring olika andel fraktion SLF i den ingående bränslemixen. (Andelen SLF anges i vikt-procent.)

Table 6 Average values for the studied process parameters during the short term test concerning different fractions of SLF in the used fuel mix. (The share of SLF is given in weight %)

		9% SLF		29% SLF		55% SLF		72% SLF	
		2015-02-02		2015-02-03		2015-02-04		2015-02-05	
		Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop
		10:30	19:00	10:30	19:00	10:30	19:00	10:00	14:00
Ångeffekt	[MW]	64,0		64,0		65,5		61,3	
Flöde rökgas	[m ³ /h]	182283		192109		191323		169919	
Flöde rökgas	[Nm ³ /h]	109512		117144		118673		107561	
Flöde rökgas recirk.	[Nm ³ /h]	21008		22920		23411		20596	
Arbete RG fläkt	[%]	37,0		43,8		43,4		32,3	
Arbete RG recrik. fläkt	[%]	9,5		12,4		13,1		10,6	
O2	[%vol.]	4,0		4,4		4,6		4,2	
SO2	[mg/Nm ³]	405,8		269,3		393,8		488,3	
HCl	[mg/Nm ³]	694,1		558,5		560,7		899,3	
Temperaturnivåer rökgas									
Temp. eldstad tak	[°C]	1209		1175		1176		1133	
Temp. 2:a drag ut	[°C]	605		599		604		533	
Temp. före EVAP 2	[°C]	491		481		483		435	
Temp. före EVAP 3	[°C]	456		464		469		411	
Temp. före EVAP 4	[°C]	352		359		364		325	
Temp. före ECO 3	[°C]	283		289		292		266	
Temp. före ECO 2	[°C]	221		227		228		212	
Temp. före ECO 1	[°C]	179		182		183		176	
Temp. efter panna	[°C]	160		160		161		160	

Generellt visar tabellen att skillnaderna i pannans driftdata mellan de olika försöken har varit relativt små. En större inverkan av ökad andel SLF hade förväntats. De relativt små skillnaderna i temperaturer och volymflöden indikerar att det inte varit någon signifikant skillnad i värmevärde eller fukthalt mellan den ordinarie bränslemixen och den SLF som använts under försöken.

Som konstaterats ovan så föreligger det inga signifikanta skillnader i pannans driftdata mellan försöken med 9, 29, 55 och 72% SLF i ingående bränslemix. Rökgasflöden påvisar en något ökande trend med ökande andel SLF medan temperaturerna i delarna av pannan närmast eldstaden påvisar en något minskande trend samtidigt som temperaturerna längre bak i pannan går upp marginellt.

Data för fallet med 72% sticker ut något men förklaras av ett snabbstopp av pannan i samband med det försöket vilket får som konsekvens att pannans medellast varit något lägre under det försöket (med något lägre rökgas temperaturer och flöden som följd).

Att skillnaderna är så pass små är något förvånande då SLF enligt litteratur ofta definieras som ett ”torrare” bränsle med högre värmevärde än de fraktioner avfall som normalt eldas i block 5. Ett bränsle med högre värmevärde borde logiskt sett leda till större skillnader i både temperaturnivåer samt volymflöden i pannan.

Eftersom analyserna av driftdata visar att så inte är fallet tyder mycket således på att det inte föreligger några signifikanta skillnader i fukthalt och värmevärde mellan den

SLF som använts i samband med försöken och den ordinarie bränslemixen. Då inga detaljerade bränsleanalyser är tillgängliga går detta dock inte att bekräfta.

Under förutsättning att de använda bränslefraktionerna under försöken varit representativa visar denna analys, att från ett rent processtekniskt perspektiv, så kommer en ökad andel SLF inte innebära några signifikanta begränsningar på pannans drift och att eventuella skillnader bör kunna kompenseras med åtgärder som ändrad mängd rökgasrecirkulation, etc.

3.2 LÅNGTIDSTESTER

Ambitionen var att ha en temperaturgradient över sonden, men temperaturen blev densamma för alla fyra provbitarna under nästan hela exponeringstiden, ca 230°C.

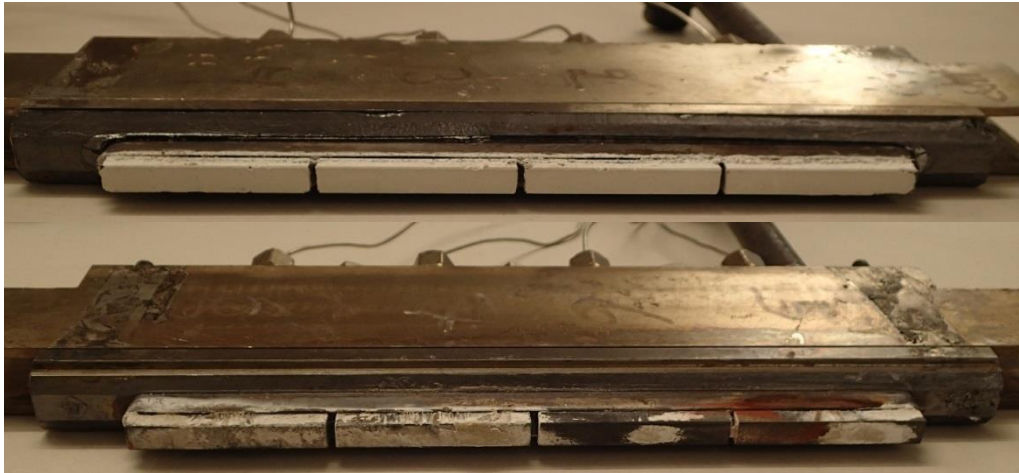
Målet var att sönerna skulle exponeras i ca 1000 timmar. Vid insättningen av sönerna i referensfallet skedde ett pannstopp som varade i några dagar och sonden kom därför inte upp i temperatur förrän pannan startade igen. Vid testfallet med SLF stoppades pannan strax innan sönerna togs ut. I Tabell 7 redovisas dels tiden som sönerna suttit inne i pannan och dels tiden då de varit uppe i "rätt" temperatur (ca 230°C). Vid beräkning av korrosionshastigheten har tiden vid rätt temperatur använts.

Tabell 7 Exponeringstider för sönerna

Table 7 Exposure times for the probes

		Exponeringstid, total	Exponeringstid, "rätt" temperatur
Referens	Drag 3	956 timmar	900 timmar
	Eva 1	956 timmar	881 timmar
SLF, 9%	Drag 3	1005 timmar	981 timmar
	Eva 1	1005 timmar	981 timmar

Liksom vid korttidstesterna exponering kunde man se stora skillnader i utseendet på de exponerade ytorna. Av sönerna som exponerats utan SLF hade den som suttit i Drag 3 en helt jämn vit yta. Den som suttit i Eva 1 också hade en vit beläggning, men den var inte heltäckande. De sonder som exponerats med 9 SLF hade en mörkare och mindre slät yta. På provet från Drag 3 kunde dock en del slät beläggning också ses. (Figur 15 och Figur 16)



Figur 15 Sond (med fyra provbitar) efter exponering utan SLF. Överst Drag 3, nederst Eva 1

Figure 15 Probe (with four samples) after exposure without SLF, Top Pass 3, below Eva 1



Figur 16 Sond (med fyra provbitar) efter exponering med 9% SLF. Överst Drag 3, nederst Eva 1

Figure 16 Probe (with four samples) after exposure with 9% SLF, Top Pass 3, below Eva 1

3.2.1 Sondtemperaturer

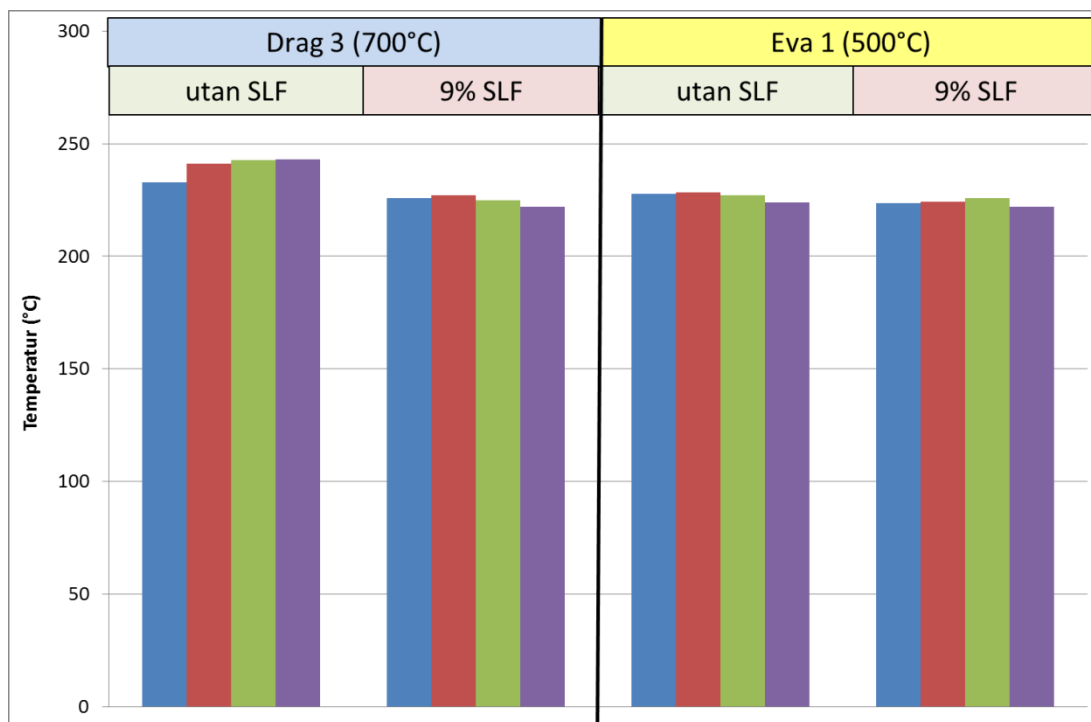
Från början var tanken att man skulle ha en temperaturgradient över sonden så att man fick olika temperatur på de fyra proverna. Målet var att gradienten skulle gå från 230°C till 300°C. Tyvärr gick det inte att få någon temperaturgradient. Detta berodde troligen dels på att sonden kylde av väggen och dels på att det snabbt bildades ett tjockt lager av beläggningar på sonden som hindrade uppvärmningen. Alla provbitar hade därför en temperatur på ca 230°C. Medeltemperaturen för vart och ett av proverna redovisas i

Tabell 8 och Figur 17. Temperaturkurvor för hela exponeringstiderna för de fyra sonderna visas i Figur 18 till Figur 21.

Tabell 8 Medelmaterieltemperaturer för sondproverna under exponeringarna för perioden då sonden haft "rätt" temperatur (siffran i parentes är värdet för hela provperioden)

Table 8 Average material temperatures for the samples on the probes during exposure, for the period when they had the right temperature (for the entire period in the boiler)

	Drag 3 (°C)				Eva 1 (°C)			
	Kanal 1	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 2	Kanal 6	Kanal 7	Kanal 8
Referensfall Ingen SLF	233 (226)	241 (234)	243 (235)	243 (236)	228 (216)	228 (217)	227 (216)	224 (214)
SLF-fallet 9% SLF	226 (225)	227 (226)	225 (224)	222 (221)	224 (222)	224 (223)	226 (224)	225 (224)



Figur 17 Medeltemperatur för varje provbit på sonderna (under perioden då sonden haft "rätt" temperatur)

Figure 17 Average temperatures for the samples (during the period when they had the right temperature)

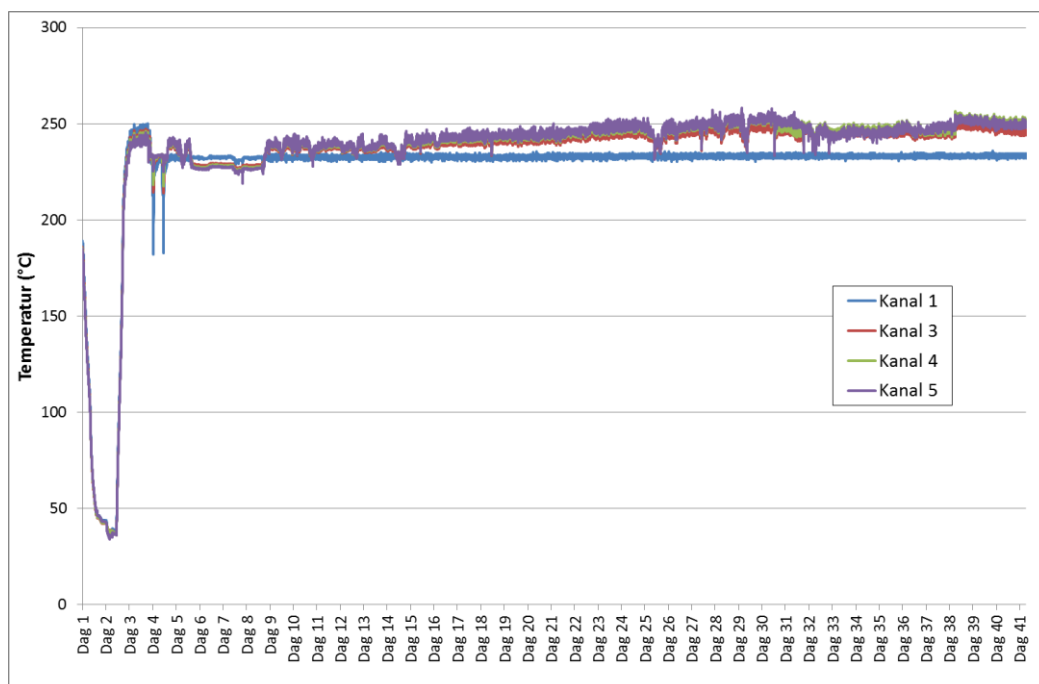


Figure 18 Sondtemperaturer, referensfall, position 1 (drag 3)

Figure 18 Probe temperatures, reference case, position 1 (pass 3)

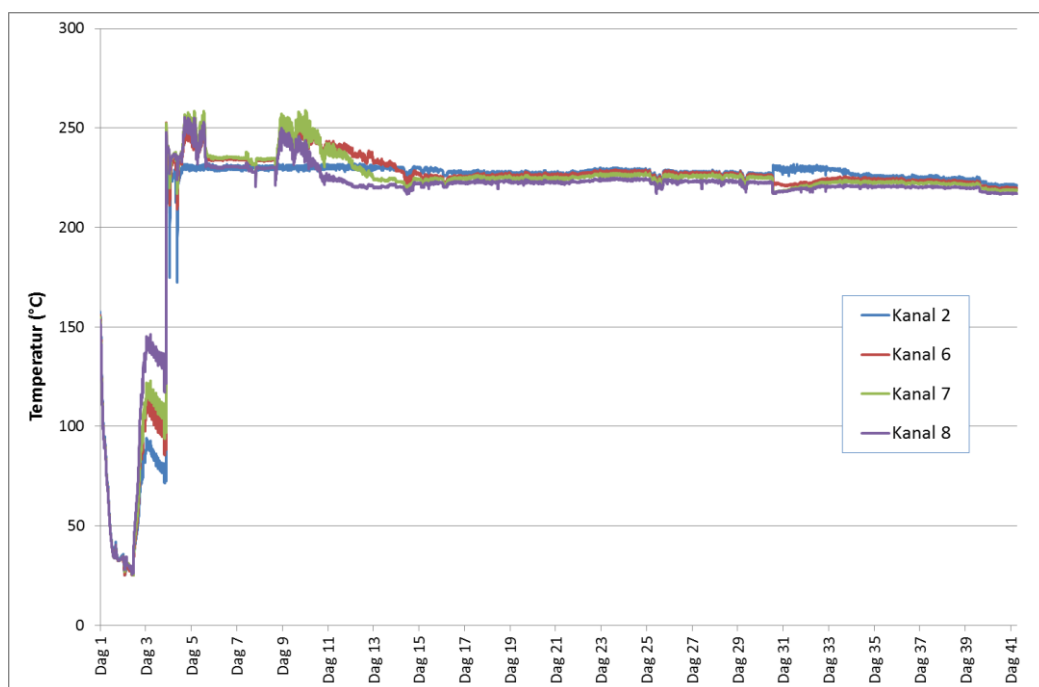


Figure 19 Sondtemperaturer, referensfall, position 2 (Eva 1)

Figure 19 Probe temperatures, reference case, position 2 (Eva 1)

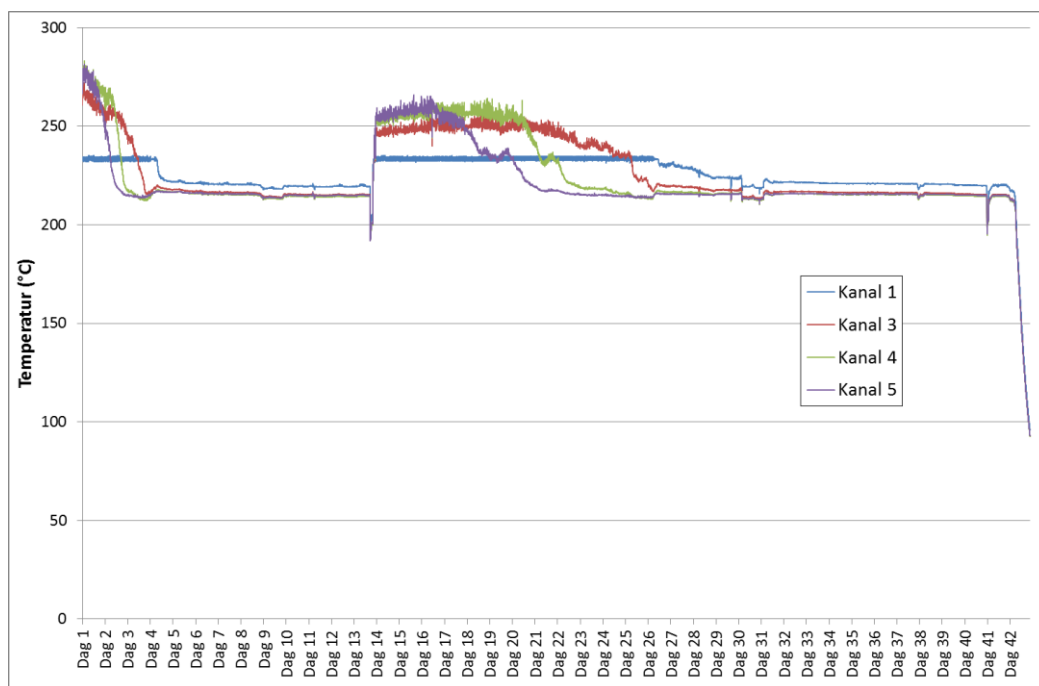


Figure 20 Sondtemperaturer, SLF-fall, position 1 (drag 3)

Figure 20 Probe temperatures, SLF case, position 1 (pass 3)

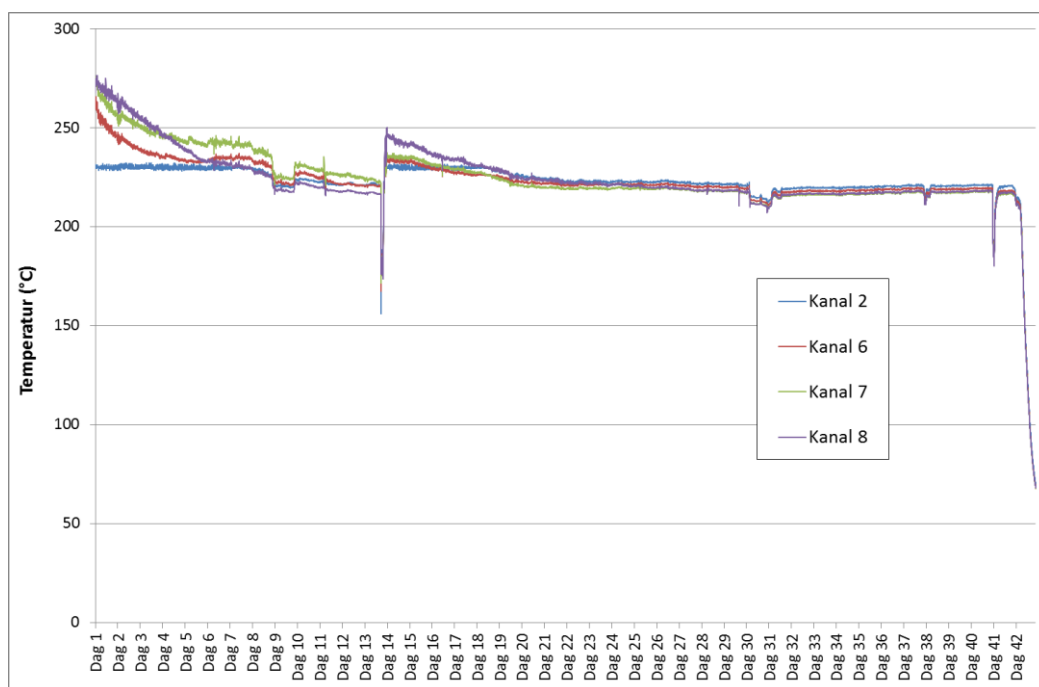
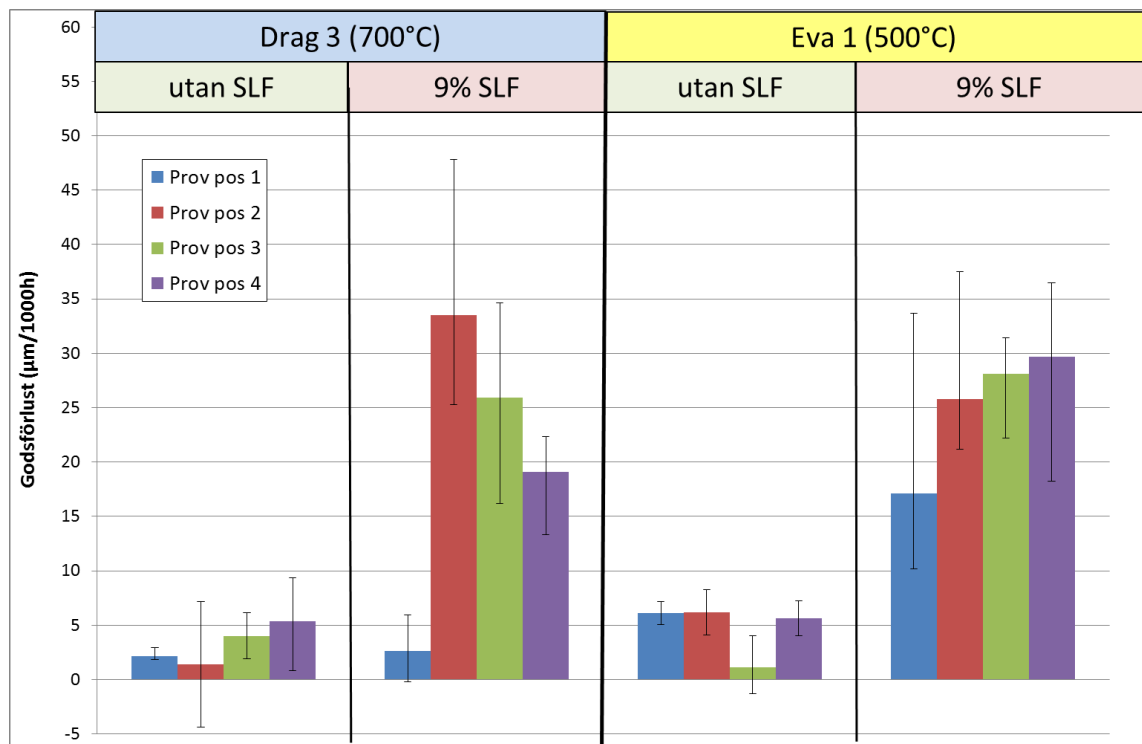


Figure 21 Sondtemperaturer, SLF-fall, position 2 (Eva 1)

Figure 21 Probe temperatures, SLF case, position 2 (Eva 1)

3.2.2 Korrosion

De uppmätta godsförlusterna var låga, dock kunde en markant ökning ses vid inblandning av SLF, från ca 5 $\mu\text{m}/1000$ timmar till ca 25 $\mu\text{m}/1000$ timmar (Figur 22 och Tabell 9). Godsförlusten har mätts upp i fyra positioner på varje provbit på sonden.



Figur 22 Godsförlust för de fyra proverna på varje sond (medelvärden, felstaplar med max- och minvärden)

Figure 22 Material loss for the four samples on every probe (average, error bars with max and min values)

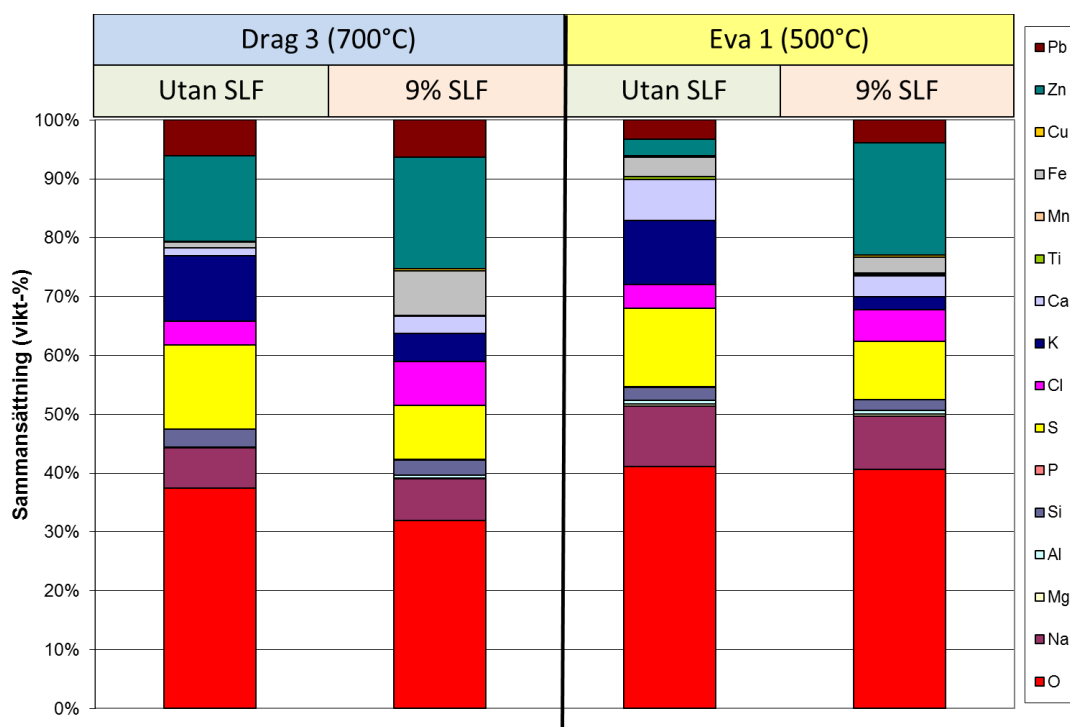
Tabell 9 Godsförlust för de fyra proverna på varje sond, medelvärden (max-värden i parentes)

Table 9 Material loss for the four samples on every probe average (maximum)

	Drag 3		Eva 1		
	Utan SLF	9% SLF	Utan SLF	9% SLF	
Prov 1	2,1 (2,9)	2,6 (5,9)	6,1 (7,2)	17,1 (33,7)	$\mu\text{m}/1000$ timmar
Prov 2	1,4 (7,2)	33,5 (47,8)	6,2 (8,3)	25,8 (37,5)	$\mu\text{m}/1000$ timmar
Prov 3	4,0 (6,1)	25,9 (34,6)	1,1 (4,0)	28,1 (31,4)	$\mu\text{m}/1000$ timmar
Prov 4	5,3 (9,4)	19,1 (22,4)	5,6 (7,2)	29,7 (36,5)	$\mu\text{m}/1000$ timmar

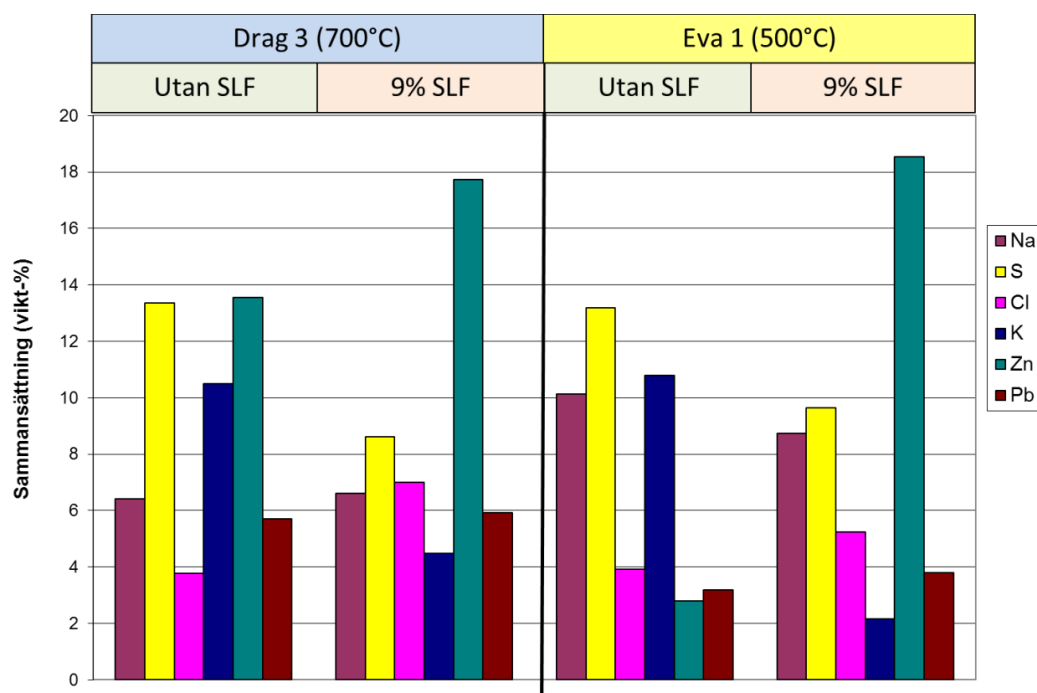
3.2.3 Sammansättning hos beläggningar och korrosionsprodukter

I Figur 23 och Figur 24 visas medelvärden för de olika sönerna. I både Drag 3 och Eva 1 ökar Cl och Zn, medan K och S minskar med inblandning av SLF. I Eva 1 är Zn-halten avsevärt lägre utan SLF än med och också avsevärt lägre än i Drag 3.



Figur 23 Sammansättning för avlagringar på korrosionsprover analyserade med SEM-EDX

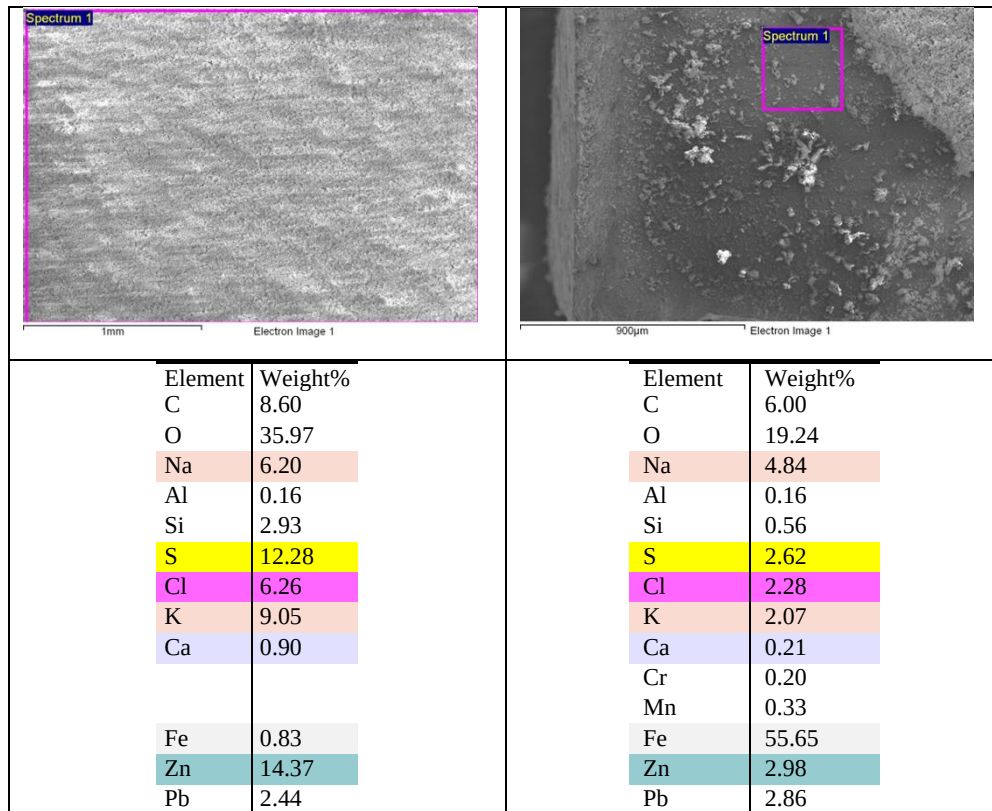
Figure 23 Composition of deposits on corrosion probe samples, analysed with SEM-EDX



Figur 24 Sammansättning för avlagringar på korrosionsprover analyserade med SEM-EDX, några utvalda element

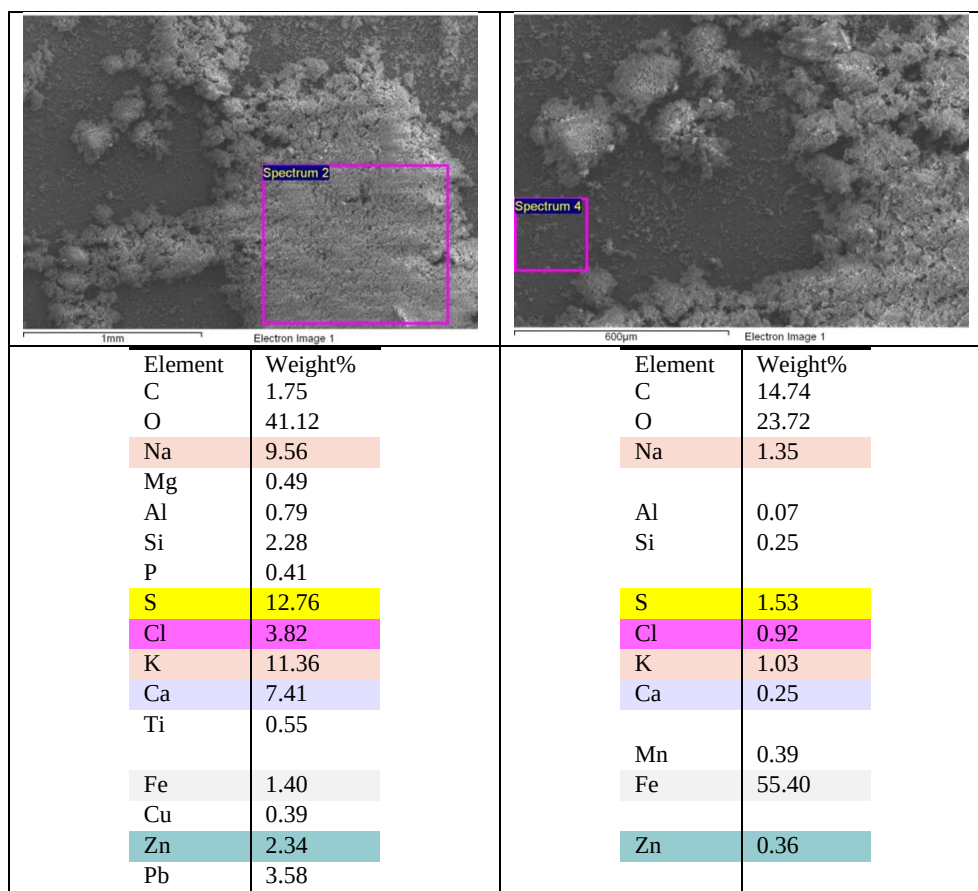
Figure 24 Composition of deposits on corrosion probe samples, analysed with SEM-EDX, some selected elements

Alla prover, utom de utan SLF från drag 3, flagade och en stor del av avlagringen hade försvunnit från proverna vid SEM-EDX-analysen. För att få så jämförbara resultat som möjligt har ytor som ser ut att ha avlagring kvar och som har en låg Fe-halt valts för jämförelsen. Detta är en felkälla, men bedömdes vara det bästa sättet att få så rättvisande resultat som möjligt. Exempel på analyser av ytor med och utan avlagring visas i Figur 25 och Figur 26.



Figur 25 SEM-EDX-analys av ytor med och utan avlagring på prov 1, Drag 3, utan SLF

Figure 25 SEM-EDX analysis of surfaces with and without deposits for sample 1, Pass 3, no SLF

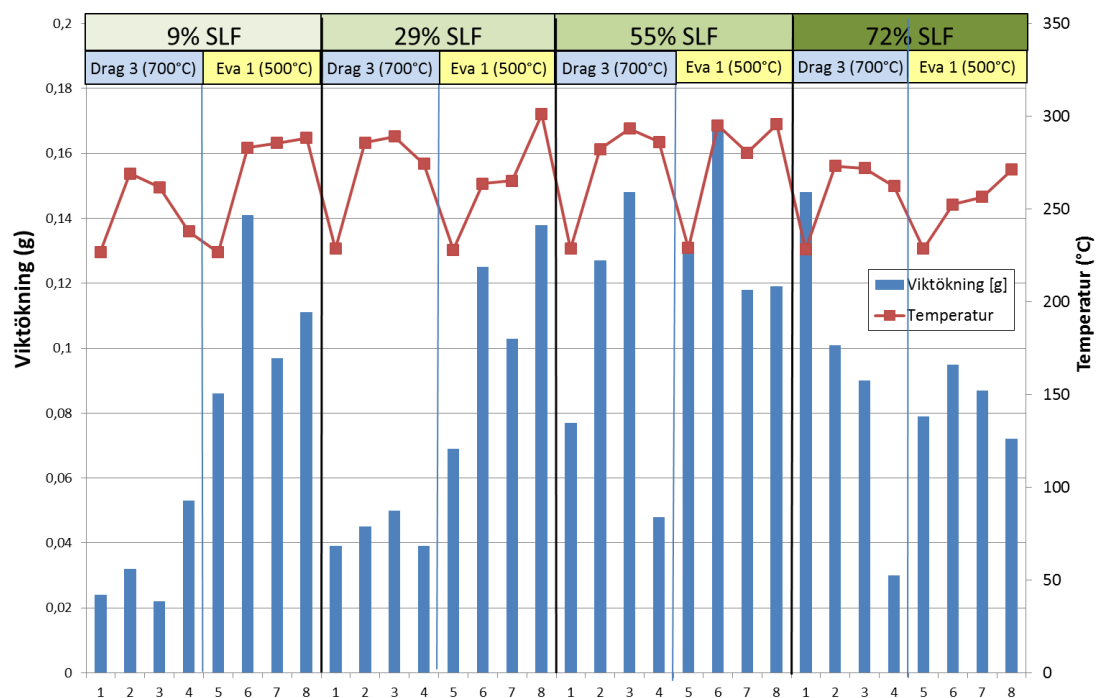


Figur 26 SEM-EDX-analys av ytor med och utan avlagring på prov 5, Eva 1, utan SLF

Figure 26 SEM-EDX analysis of surfaces with and without deposits for sample 5, Eva 1, no SLF

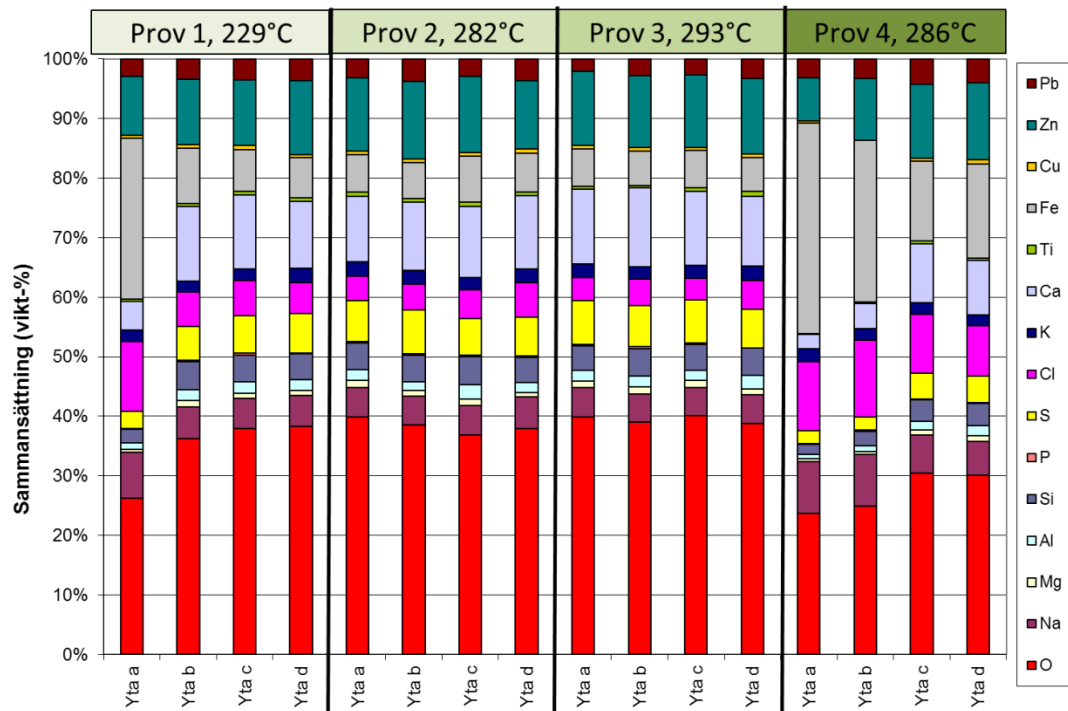
4 Resultatanalys

Vid korrosionstestet erhöles samma temperatur på fyra provbitarna, medan vid korttidstesterna var provbiten med det reglerande termoelementet kallare än övriga prover. Ingen korrelation kunde dock ses mellan provtemperatur och viktökning (Figur 27). Ingen korrelation kunde heller ses mellan provtemperatur och sammansättning på beläggningarna. Som ett exempel visas analysresultaten för de två korttidssonderna som exponerades med 55% inblandning av SLF. (Figur 28 och Figur 29)



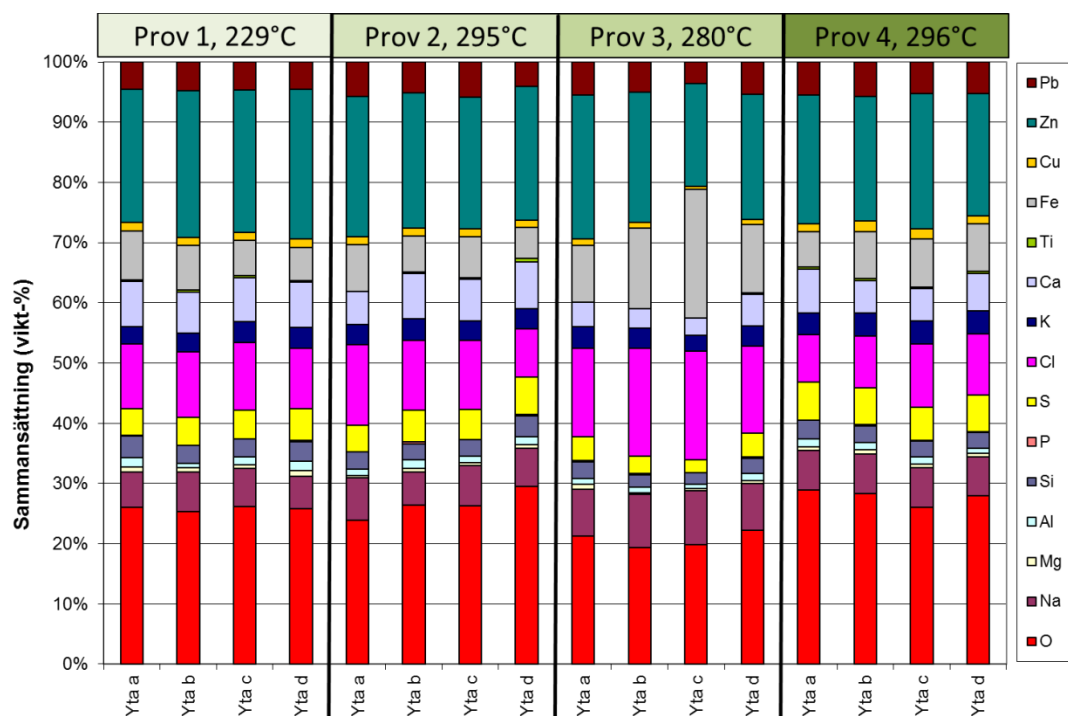
Figur 27 Viktökning för varje provbit och deras temperaturer

Figure 27 Weight gain for each sample and their temperatures.



Figur 28 Drag 3, 55% SLF, Sammansättning för avlagringar analyserade med SEM-EDX, Fyra ytor (a-d)

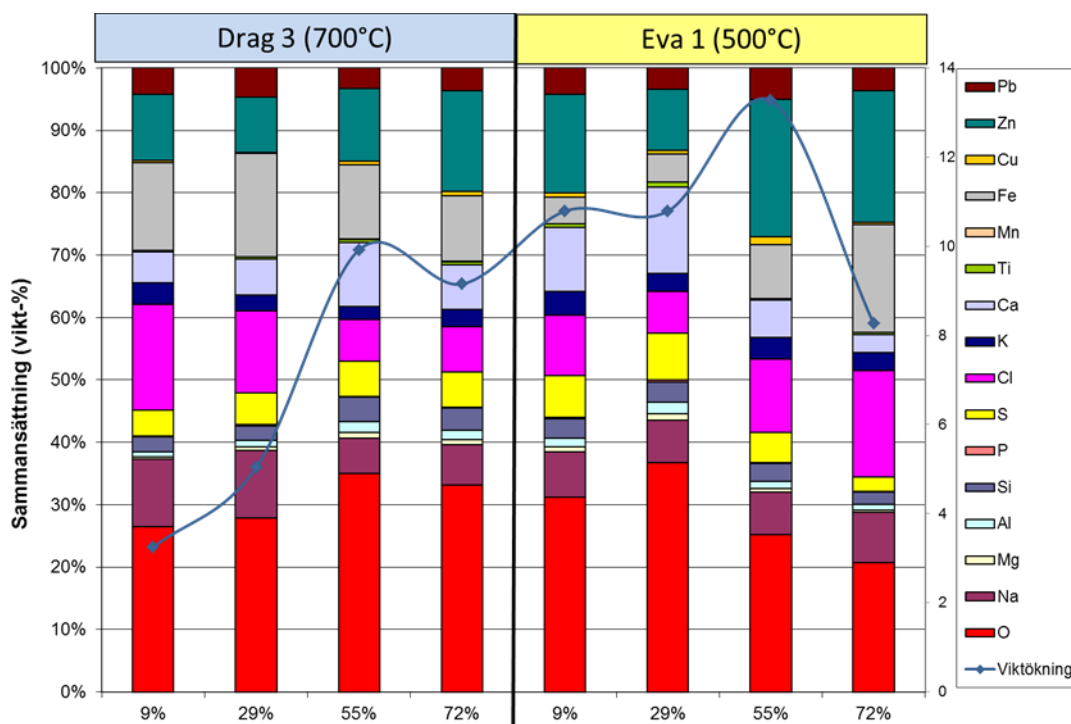
Figure 28 Pass 3, 55% SLF, Composition of deposits, analysed with SEM-EDX, Four surfaces (a-d) analysed on each sample



Figur 29 Eva 1, 55% SLF, Sammansättning för avlagringar analyserade med SEM-EDX, Fyra ytor (a-d) analyserade på varje provbit

Figure 29 Eva 1, 55% SLF, Composition of deposits, analysed with SEM-EDX, Four surfaces (a-d) analysed on each sample

Den tydligaste skillnaden i resultat är skillnaderna i utseende på sönerna, med mörkare och mindre slät beläggning med ökande inblandning av SLF. Detta kan ses både vid korttidstesterna (Figur 5 och Figur 6) och vid långtidstesterna (Figur 15 och Figur 16). Beläggningarnas mörka utseende tycks inte bero på att de är tunnare, eftersom viktökningen vid korttidstesterna ökar med ökad inblandning av SLF. (Figur 9 och Figur 30)



Figur 30 Viktökning och sammansättning (medelvärden) för avlagringarna vid korttidstesterna

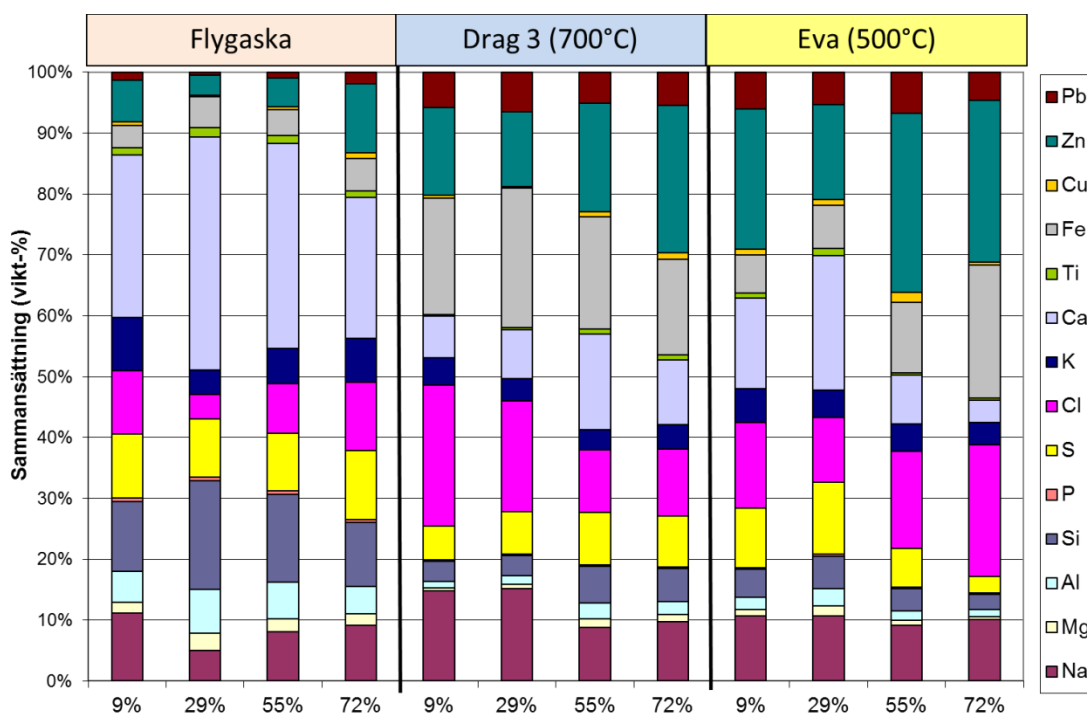
Figure 30 Weight gain and composition (averages) of deposits from short term tests

Vid en jämförelse av olika typer av ytor på kortidsproverna (ljus och mörk i SEM-et) kunde ses att ljusare ytor hade högre halter av Ca och S och lägre halter av Cl, Na och Fe än de mörkare ytorna. (Figur 12, Tabell 4 och Figur 13) Förklaringen som ligger närmast till hands är att skillnaderna beror på att mindre mängd avlagringar har deponerats på de mörkare ytorna. Skillnaderna i Fe-halt är dock inte så stora att det verkar rimligt att tro att detta är hela förklaringen. Troligare är att de olika typerna av ytor representerar olika mekanismer för deponering på ytan. De ljusare beläggningarna har en sammansättning som är mer lik den för flygaska och består troligen i större utsträckning av askpartiklar som har deponerats på ytan. De mörkare beläggningarna är rikare på alkali och klor, vilket tyder på att en större mängd alkaliklorider har kondenserat på dessa ytor. Även direkt reaktion mellan gaser och metall är tänkbart. Den högre järnhalten kan dels bero på att beläggningen är tunnare och dels på att den mer korrosiva avlagringen har orsakat mer korrosion, vilket lett till att Fe från substratet har blandats med beläggningen.

Resultaten för avlagringarnas sammansättning i Drag 3 stämmer ganska väl överens med resultaten för Gästadsverket i positionerna med rökstemperaturerna 630°C och 770°C. Där minskade andelen alkali i beläggningarna medan Ca, Fe och Zn ökade vid

inblandning av SLF. I proverna från Uppsala minskade andelen Fe, men i övrigt är resultatet detsamma.

Analysresultaten för flygaskan skiljer sig ganska mycket från den för avlagringarna. (Figur 31) Skillnaderna kan till viss del förklaras med att olika analysmetoder har använts. Framförallt kan Pb-halten bli olika med olika analysmetoder. Avlagringsproverna får också högre halt Fe, dels eftersom en del Fe från provbiten som avlagringen sitter på detekteras och dels eftersom en del Fe har blandats med avlagringen vid korrosion av provbiten. Halterna av Ca, Si och Al är högre för flygaskan än för avlagringarna, medan halterna av Cl, Zn och Pb är lägre. Medan flygaskan består av partiklar som kondenserat vid de låga temperaturer som råder i elfiltret och i tubpakten, består avlagringarna av föreningar från rökgaserna som kondenserat på den kylda ytan, reaktionsprodukter från reaktioner mellan rökgaser och metallen (och/eller avlagringarna) samt kondenserade partiklar som fastnat på ytan. Dessutom sker även reaktioner i avlagringarna efter att de har bildats. En grupp ämnen som har en tendens att kondensera på kylda ytor är klorider (Na, K, Pb och Zn). De kan också bidra till att partiklar i rökgaserna är delvis smälta och därför har en större benägenhet att fastna på olika ytor. Det är därför naturligt att sammansättningen för aska och avlagringar skiljer sig åt. Trenden för Ca, Si, Al, Mg och Cl som ses i flygaskanalyserna återkommer dock i avlagringsanalyser för Eva 1, men detta ses inte för övriga element.



Figur 31 Sammansättning för askor och avlagringar från korttidstesterna. (O ej med i diagrammet, eftersom det inte analyserades för askorna)

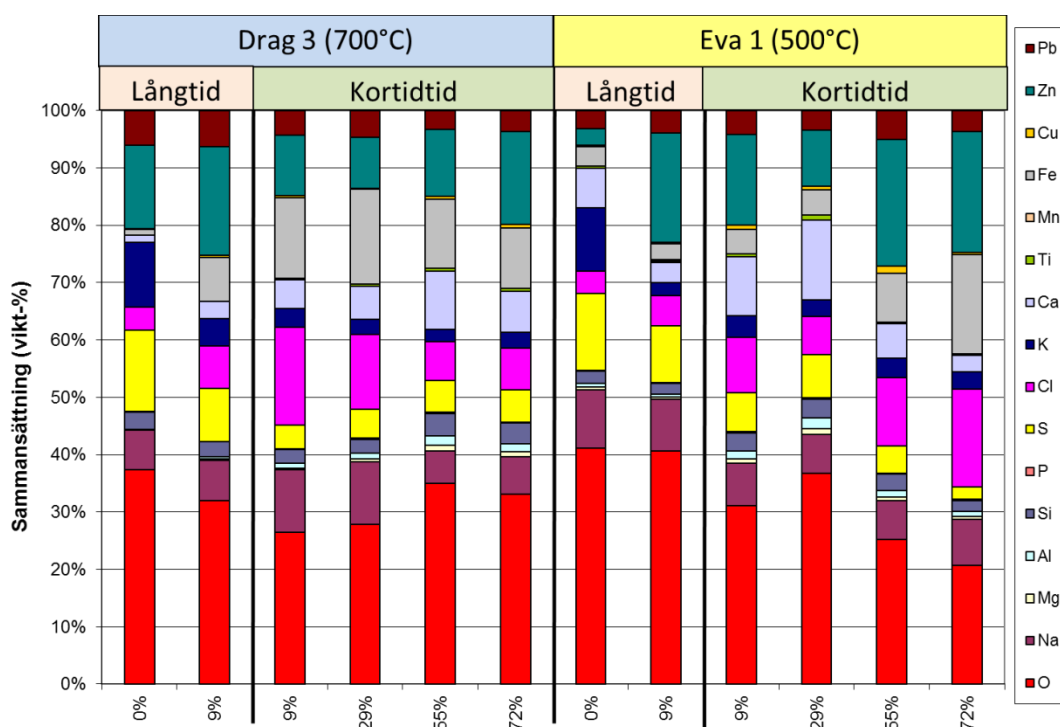
Figure 31 Composition of deposits and ashes from the short term tests. (O not included in the diagram, since it was not analysed for the ashes)

Analyserna för ”normalt” avfall som eldas i avfallsförbränningsanläggningar i Sverige och för SLF (Tabell 1) visar på avsevärt högre halter av Fe, Pb, Zn och Cu i SLF och

även en högre Cl-halt. Förväntningarna var därför att en ökad inblandning av SLF skulle leda till en ökad halt av dessa ämnen i avlagringar och flygaska. Någon sådan trend kan inte ses vid korttidstesterna. För askanalyserna minskar dessa komponenter då man går från 9% till 29% SLF, för att sedan öka. För avlagringsproverna är bilden mer komplex. Trenderna för Drag 3 och Eva 1 tycks vara varandras motsatser. I Drag 3 minskar Cl, K och Na med ökad inblandning och Ca, Zn och Si ökar, medan det motsatta ses i Eva 1. Detta skulle kunna tyda på att det sker en förskjutning av kemin i rökgasernas riktning vid ökande inblandning av SLF, så att kondensation av kritiska komponenter sker något senare. För långtidstesterna däremot, ser man en ökning av Zn-halten då SLF blandas in i bränslet jämfört med när det inte gör det.

Då man jämför avlagringarna från korttidstesterna med de från långtidstesterna (Figur 32) ser man att långtidstesterna innehåller mer S och mindre Cl än korttidstesterna. Detta kan förklaras med sulfatering av deponerade klorider av svavelföreningar i rökgaserna. Kortidsproverna innehåller också mer Ca, Si, Mg och Al.

Trenderna för kort- och långtidstester skiljer sig också lite åt. I Drag 3 ses en ökning av Cl och en minskning av S med ökande inblandning av SLF för långtidstestet, medan det motsatta ses i korttidstestet. Tyvärr kunde inget korttidstest helt utan SLF genomföras, så jämförelsen blir inte helt rättvisande. I Eva 1, däremot, är trenden för S och Cl lika för både korttids- och långtidstest, med ökande Cl och minskande S med ökande andel SLF.



Figur 32 Sammansättning för avlagringar från långtids- och korttidstester.(analys med SEM-EDX)

Figure 32 Composition of deposits long term and short term tests. (analysis by SEM-EDX)

Godsförlusten ökar från låg (~5 $\mu\text{m}/1000$ timmar) till måttlig (~25 $\mu\text{m}/1000$ timmar). En godsförlust på 25 $\mu\text{m}/1000$ timmar och en drifttid på 7000 timmar/år skulle dock

leda till att väggarnas ursprungliga tjocklek på 5 mm skulle minska till 3 mm på ca 11 år.

Den ökade godsförlusten, som kan ses i korrosionstestet (Figur 22) är troligen länkad till den ökade halten Zn och Cl som ses i beläggningarna på dessa prover.

5 Slutsatser

- Långtidsförsöken (1000 timmar) visade att inblandning av SLF (9% jmf med 0%) ger en kraftig ökning av korrosionstakten, men från en mycket låg nivå (ca 5 $\mu\text{m}/1000$ timmar) till en nivå (ca 25 $\mu\text{m}/1000$ timmar) som inte är onormalt hög i denna typ av anläggningar.
- Korrosionshastigheterna i de två undersökta positionerna, med rökgastemperaturer 700°C och 500°C och metalltemperaturen 230°C, är ungefär lika. I den senare positionen (Eva 1, 500°C) har rökgaserna passerat några kylda ytor med ungefär samma materialtemperatur som sonden.
- Med SLF ses mer Cl och Zn i korrosionsprodukterna på korrosionssonden. Detta stämmer väl överens med undersökningar gjorda tidigare och med vilka resultat som förväntades.
- Sammansättning hos avlagringar och flygaska ger ingen tydlig indikation på ytterligare ökad korrosivitet då inblandningen av SLF ökas från 9% upp till 72%. Dessa har dock inte undersökts vid test helt utan SLF. En trend kan dock ses med mer inslag av flygaska i beläggningarna från drag 3 och mer inslag av korrosiva komponenter i Eva 1 med ökad inblandning av SLF. Detta kan tyda på att korrosionsproblem skjuts framåt (i rökgasriktningen) i pannan.
- Under förutsättning att de använda bränslefraktionerna under försöken varit representativa visar analysen av driftdata att, från ett rent processtekniskt perspektiv, kommer en ökad andel SLF inte innebära några signifikanta begränsningar på pannans drift och att eventuella skillnader bör kunna kompenseras med åtgärder som ändrad mängd rökgasrecirkulation, etc.
- Förändringarna i beläggningsskemin för korttidsproverna var komplicerade att tolka, förmodligen på grund av inhomogen deponering. Resultaten (och särskilt viktöknings-resultaten) tyder dock på att man kan öka andelen SLF från dagens nivå på 9% upp till max 29% utan förväntade ökade problem. Det rekommenderas dock starkt då att långtids-korrosionsprovning (1000 h) genomförs vid en ökad inblandning för att ta reda på korrosionshastigheten och beläggningsskemin.
- Sondförsöken har genomförts med en väggsond och det är inte säkert att resultaten är helt överförbara på förhållandena vid pannans hängande tuber.

5.1 MÅLUPPFYLLELSE

Projektets mål var att beskriva problem med korrosion och beläggningsbildning då SLF ingår i bränslemixen i en avfallspanna. Projektet ska indikera när problem kan förväntas, t.ex. vid vilken inblandningsgrad, i vilka delar av pannan och vid vilka rökgas- och materialtemperaturer.

De problem med korrosion och beläggningsbildning som kan uppstå då SLF ingår i bränslemixen i en avfallspanna har beskrivits. Projektet har indikerat att problem med korrosion och beläggningsbildning kan förväntas vid en inblandningsgrad över 29%. Inga tydliga skillnader kunde iaktas mellan de två studerade positionerna. Ambitionen att undersöka olika materialtemperaturer gick inte att genomföra, dock kan konstateras att SLF har en stark inverkan på korrosionen vid den studerade materialtemperaturen (230°C).

6 Rekommendationer och användning

Om det är ekonomiskt motiverat kan en ökning av inblandningen av SLF testas, från 9% upp till max 29%. Det rekommenderas dock starkt då att långtidskorrosionsprovning (1000 h) genomförs vid en ökad inblandning för att ta reda på korrosionshastigheten och beläggningkemin.

Metoden som har använts i projektet, med sonder som monteras i väggens fena, har fungerat väl och innebär att mätningen kan göras utan ett större ingrepp i pannan. Detta ger utökade möjligheter att utvärdera korrosion och ger också ett större antal möjliga positioner för sådana mätningar.

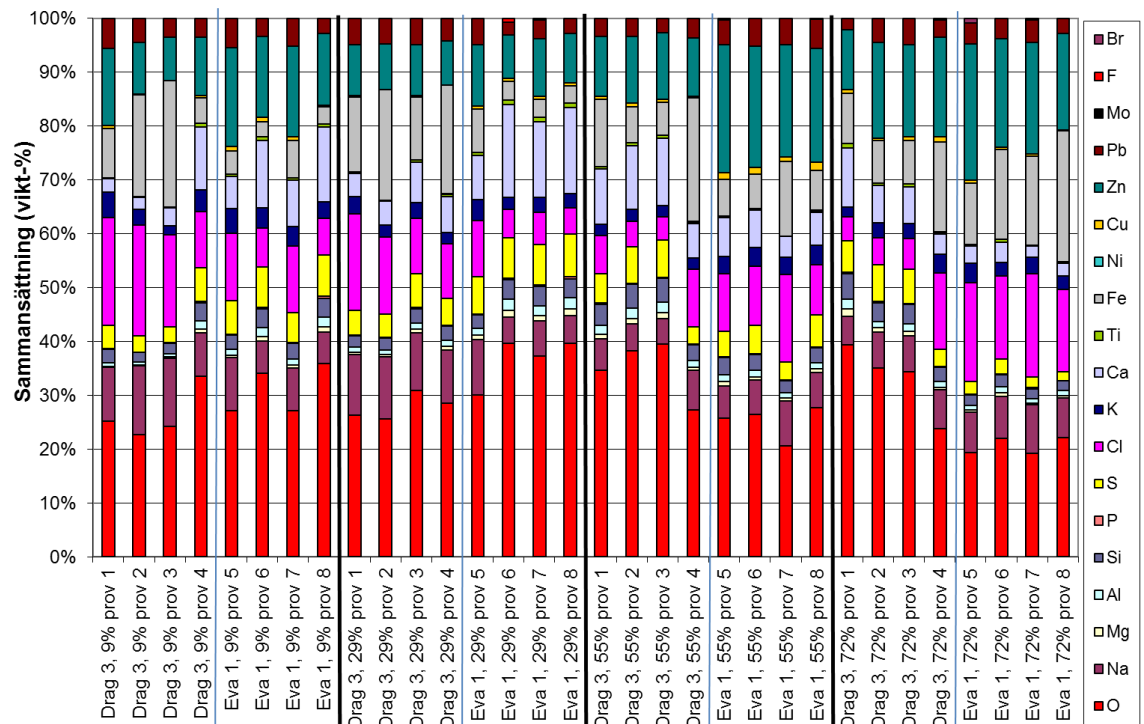
7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

- Test med korttidssond utan SLF och med 9% SLF
- Test med långtidssond (korrosionssond 1000 timmar) med högre andel SLF (t.ex. 25%)
- Test med ”tubsond”, det vill säga den mer vanligt använda typen av sond, som är tubformad och som sticker in en bit i pannan. Detta för att bättre simulera förhållandena vid värmeväxlartuberna.
- Mer detaljerad undersökning av proverna (från nya tester) för att förstå korrosionsmekanismen.
- Utvärdering av andra risker med SLF, tex igensättning i andra delar av pannan, förändrad klassning av slagg/flygaska och emissionen.
- Sameldning med avloppsslam
- Noggrann uppföljning av korrosionen i pannan
- Utredda betydelsen av de olika typerna av beläggningar (ljus/mörk) som iakttagits i dessa tester.

8 Litteraturreferenser

- [1] <http://www.inspecta.com/sv/Press/Artiklar/2012/Svenska/Dyrkopta-erfarenheter-av-att-elda-fluff/>
- [2] Lia Detterfelt, Renova, personlig kommunikation
- [3] Gyllenhammar et al., ”Additiv för att minska driftproblem vid rostförbränning av avfall” WR47, Waste Refinery, maj 2013
- [4] Gyllenhammar et al., ”Energåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall”, WR08, Waste Refinery, januari 2009
- [5] Gyllenhammar et al., ”Energåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall – Steg 2”, WR23, Waste Refinery, mars 2010
- [6] Eskilsson et al., ”Samförbränning av bilfluff, rötslam och avfall i en 20 MW fluidbäddpanna – Studier av bränslesammansättningens påverkan på beläggningsbildning”, Slutrapport Ökad bränsleflexibilitet – Bränslekraft STEM, SP rapport SP-AR 2007:11
- [7] Enestam S., ”Corrosivity of hot flue gases in the fluidized bed combustion of recovered waste wood”, ”, REPORT 11-04, Academic Dissertation, Laboratory of Inorganic Chemistry, Process Chemistry Centre, Department of Chemical Engineering, Åbo Akademi University, Åbo, Finland, 2011
- [8] ”Avfallsförbränning – faktablad”
http://www.vattenfall.se/sv/file/Avfallsf_rbr_nning_Uppsala_30898831.pdf
- [9] Bankiewicz D., ”Corrosion behaviour of boiler tube materials during combustion of fuels containing Zn and Pb”, REPORT 12-03, Academic Dissertation, Laboratory of Inorganic Chemistry, Process Chemistry Centre, Department of Chemical Engineering, Åbo Akademi University, Åbo, Finland, 2012

A Beläggningssonder, Sammansättning för beläggningarna på proverna analyserat med SEM-EDX



B Utvärdering av driftdata under korttidsförsöken

B.1 Övergripande summering

I samband med korttidstesterna har driftdata för pannan studerats för att säkerställa att olika grad inblandning av SLF inte får någon signifikant kritisk inverkan på temperaturnivåer, rökgasflöden, fläktarbeten, etc. i pannan som skulle kunna orsaka driftbegränsningar alternativt påverka den övergripande driftekonomin.

Då SLF generellt ses som ett ”torrare” bränsle med högre värmevärde än de fraktioner avfall som normalt eldas i block 5 finns det farhågor att temperaturprofilen i de olika delarna av pannan skulle kunna förskjutas på grund av ändrade volymflöden, etc.

Parametrarna som studerats summeras i Tabell 10 nedan tillsammans med resulterande medelvärden under de perioder olika fraktioner SLF testats. Några av parametrarna redovisas och diskuteras i mer detalj i avsnitt B.2-B.5.

Tabell 10: Medelvärden för de studerade processparametrarna vid de olika korttidsförsöken kring olika andel fraktion SLF i den ingående bränslemixen. Observera att andelen SLF anges i vikt-procent.

		9% SLF		29% SLF		55% SLF		72% SLF	
		2015-02-02		2015-02-03		2015-02-04		2015-02-05	
		Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop	Start	Stop
		10:30	19:00	10:30	19:00	10:30	19:00	10:00	14:00
Ångeffekt	[MW]	64,0		64,0		65,5		61,3	
Flöde rökgas	[m³/h]	182283		192109		191323		169919	
Flöde rökgas	[Nm³/h]	109512		117144		118673		107561	
Flöde rökgas recirk.	[Nm³/h]	21008		22920		23411		20596	
Arbete RG fläkt	[%]	37,0		43,8		43,4		32,3	
Arbete RG recrik. fläkt	[%]	9,5		12,4		13,1		10,6	
O2	[%vol.]	4,0		4,4		4,6		4,2	
SO2	[mg/Nm³]	405,8		269,3		393,8		488,3	
HCl	[mg/Nm³]	694,1		558,5		560,7		899,3	
Temperaturnivåer rökgas									
Temp. eldstad tak	[°C]	1209		1175		1176		1133	
Temp. 2:a drag ut	[°C]	605		599		604		533	
Temp. före EVAP 2	[°C]	491		481		483		435	
Temp. före EVAP 3	[°C]	456		464		469		411	
Temp. före EVAP 4	[°C]	352		359		364		325	
Temp. före ECO 3	[°C]	283		289		292		266	
Temp. före ECO 2	[°C]	221		227		228		212	
Temp. före ECO 1	[°C]	179		182		183		176	
Temp. efter panna	[°C]	160		160		161		160	

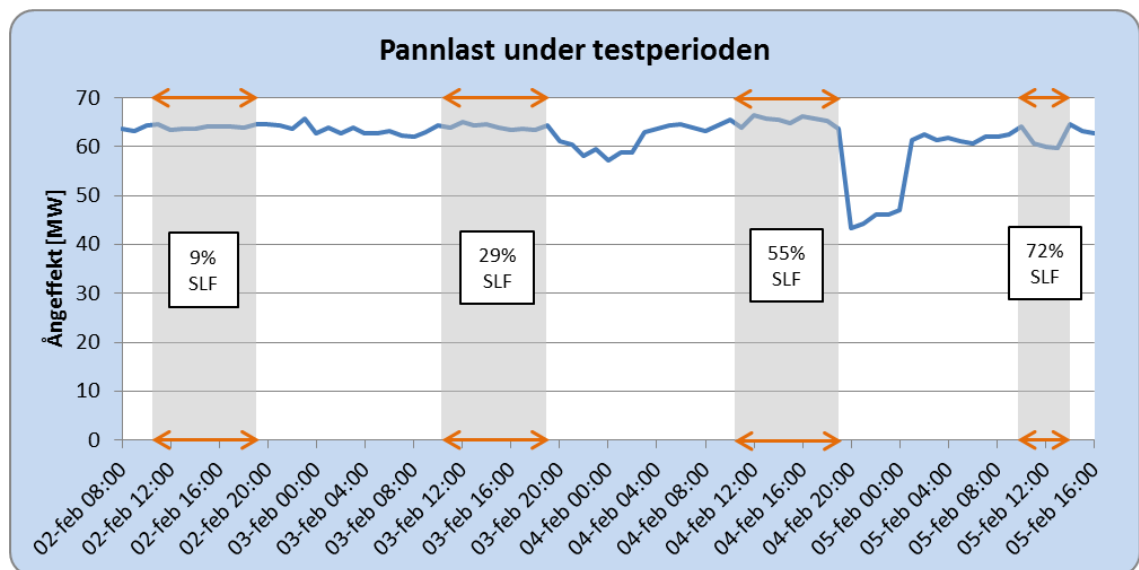
Då pannan normalt eldas med ~9 %-vikt SLF har ett godtyckligt intervall valts den 2 februari som motsvarar samma antal timmar som de andra fraktionerna SLF testats. Från det att bränslet släpps ned i bränsletratten tills det når rostern tar det enligt anläggningspersonal cirka 3 timmar. Startpunkt för de tidsintervall för vilka processdata analyserats har därför valts till 3 timmar efter att de olika bränsleblandningarna med förhöjd andel SLF börjat doseras. Sluttid för intervallen har

valts till 2 timmar efter det att blandningarna med de förhöjda fraktionerna upphört – detta för att säkerställa viss marginal till när genomslag av den ”normala” bränsleblandningen kan förväntas synas i driftdata.

Generellt visar tabellen att skillnaderna i pannans driftdata mellan de olika försöken har varit relativt små och att en större inverkan av ökad andel SLF hade förväntats. Baserat på de relativt små skillnaderna i temperaturer och volymflöden indikerar att det inte varit någon signifikant skillnad i värmevärde eller fukthalt mellan den ordinarie bränslemixen och den fraktion SLF som använts under försöken.

B.2 Pannlast

Figur 33 visar pannlasten (timmedel) under försöken. Som syns tydligt både i Tabell 10 och i figur har pannan i snitt körts nära max effekt under tiden då försöken med varierande grad SLF utförts. Pannan har gått relativt stabilt under perioden med endast mindre svängningar i lasten. Undantag utgörs av ett stopp efter försöken med 55% SLF följt av några timmars drift med lägre last samt ett snabbstopp av pannan i samband med försöket med 72% SLF. Då snabbstoppet var mycket kortvarigt syns det inte i timmedelvärden.



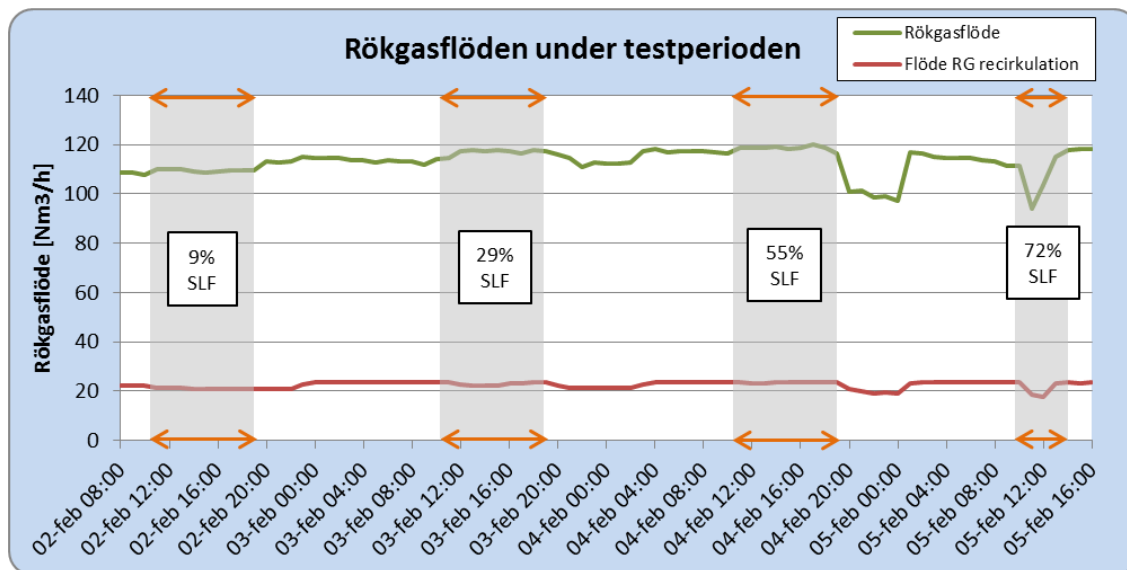
Figur 33: Pannans last under dygnet för försöken (timmedelvärden). De grå fälten i figuren visar tidpunkterna då försöken med de olika mängderna SLF genomförts.

Snabbstoppet får dock som konsekvens att medellasten under denna period blir något lägre vilket även förklarar de något lägre volymflödena och temperaturnivåerna mellan de olika värmeupptagande ytorna i pannan jämfört med försöken 9, 29 och 55% SLF. De skillnader som föreligger för fallet med 72% SLF beror således snarare på pannans lastprofil under tidpunkten för aktuellt försök och inte på den högre andelen SLF.

Snabbstoppet under försöket med 72% SLF innebär även att de uppmätta avlagringarna ska tolkas med en viss försiktighet då de hastiga dynamiska förlopp som uppstår i samband vid ett snabbstop potentiellt skulle kunna påverka påbyggnaden av dessa.

B.3 Rökgasflöden och fläkarbeten

Figur 34 visar volymflödet rökgas efter pannan samt flödet recirkulerad rökgas. Figuren indikerar en tendens till något högre rökgasflöden i samband med fallen med 29 och 55% SLF jämfört med referensfallet 9% SLF. Fallet med 72% SLF är inte fullt jämförbart p.g.a. av den lägre panneffekten under det testet. Totalt är ökningen i rökgasflöde ~5-7%. Effekten av de något förhöjda rökgasflödena syns också på rökgasfläktarnas arbete som också ökar något i samband med 29 och 55% SLF.



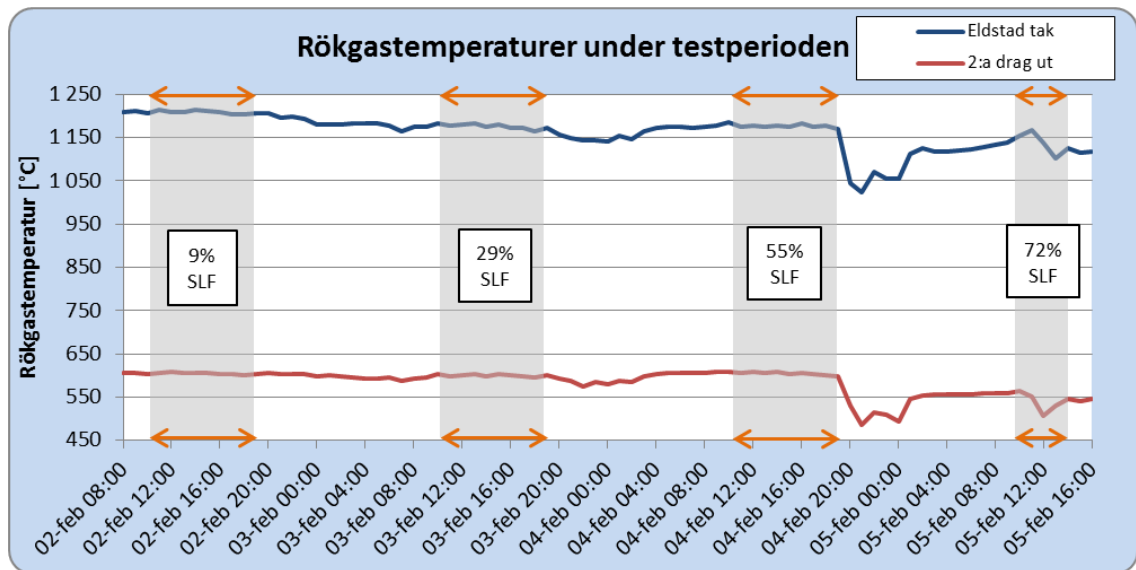
Figur 34: Rökgasflöden under dygnet för försöken (timmedelvärden). De grå fälten i figuren visar tidpunkterna då försöken med de olika mängderna SLF genomförts.

De något högre volymflödena rökgas i samband med testerna hänger till viss del samman med ett något högre luftöverskott (O_2 i rökgas) i försöken med högre andel SLF, se Tabell 10 ovan.

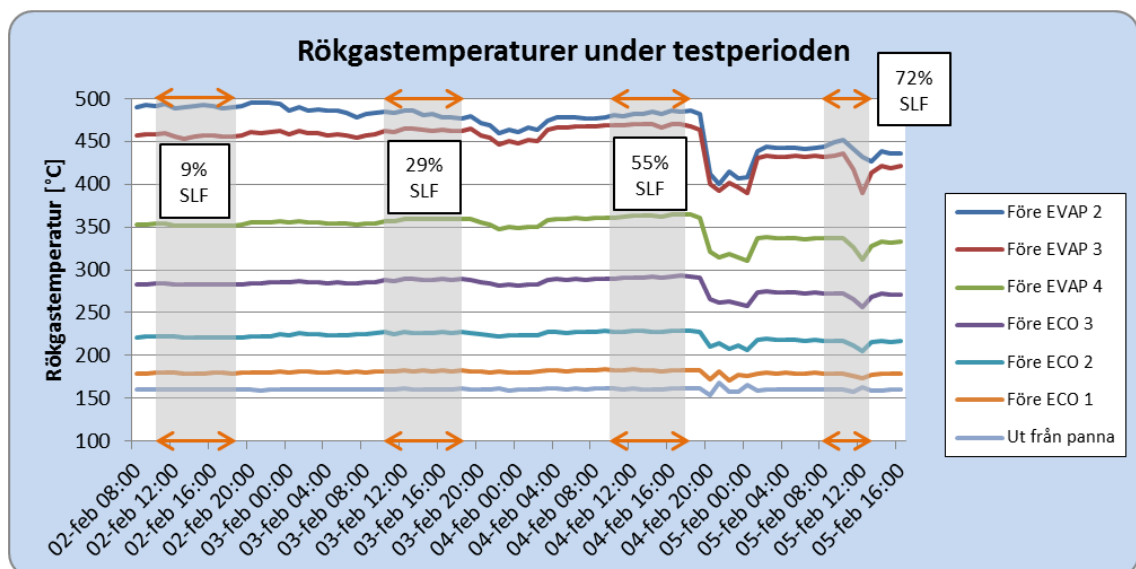
De något ökade volymflödena skulle också till viss del kunna relateras till bränslekomposition, men den resulterande ökningen i rökgasflöden skulle i så fall snarare indikera en högre fukthalt i den fraktion SLF som använts under försöken än i den "normala" bränslemixen.

B.4 Rök Gastemperaturer i pannan

Temperaturnivåer i de olika delarna av pannan under försöken visas i Figur 35 och Figur 36. Som kommenterats tidigare är resultaten i försöket med 72% SLF inte helt representativa p.g.a. av snabbstoppet och en något lägre last under det försöket.



Figur 35: Rökigastemperaturer i toppen av eldstaden och ut ur 2:a draget (timmedelvärden). De grå fälten i figuren visar tidpunkterna då försöken med de olika mängderna SLF genomförts.



Figur 36: Rökigastemperaturer i bakre del av pannan (timmedelvärden). De grå fälten i figuren visar tidpunkterna då försöken med de olika mängderna SLF genomförts.

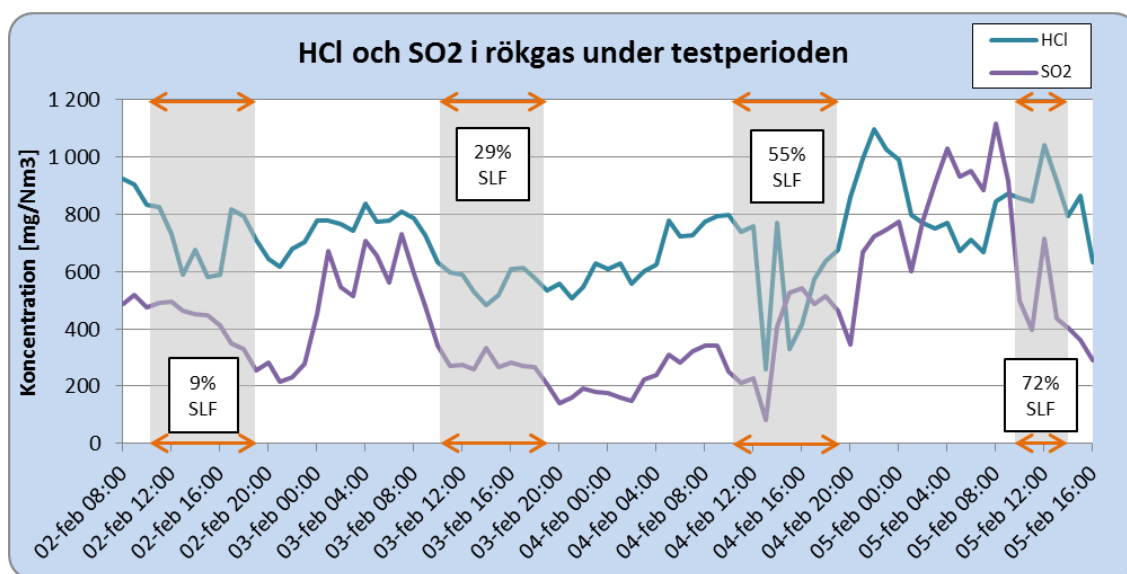
Jämförelse av referensfallet 9% SLF mot fallen 29% SLF och 55% SLF indikerar något lägre temperaturer i eldstaden, bakre draget och de första förångarytorna, medan temperaturnivåerna mellan värmeytorna längre bak i pannan är något högre. Detta indikerar således en ytterst liten förskjutning och ökning av värmeupptaget i pannväggar och de första värmeytorna (EVAP 1 & 2) och en liten minskning av värmeupptaget längst bak i pannan. Skillnaderna är dock så små att det inte har någon signifikant påverkan på pannans drift eller innebär några driftbegränsningar.

Utgående rökigastemperatur är mer eller mindre konstant mellan de olika försöken vilket i fallen med högre andel SLF indikerar en försämring av pannverkningsgraden (p.g.a. av ett något högre volymflöde i dessa fall). Då anläggningen är utrustad med rökigaskondensor spelar detta mindre roll för anläggningens totalverkningsgrad.

B.5 HCl och SO₂

Förutom ett högre värmevärde brukar även SLF förknippas med ett högre Cl-innehåll än ”normalt” avfall p.g.a. av en hög andel ingående plaster. Då inga bränsleanalyser finns tillgängliga för de bränslen som använts under försöken går det inte med säkerhet att bekräfta att så varit fallet. Om så är fallet borde det logiskt innebära en högre andel klorhaltiga föreningar i rökgasen. Figur 37 visar de uppmätta koncentrationerna av HCl samt SO₂ under försöken.

Som framgår av figuren är det svårt att dra några entydiga slutsatser kring om andelen SLF har någon påverkan på dessa föroreningar. Både andelen HCl och SO₂ ser ut att vara högre i referensfallet med 9% SLF för att sedan sjunka i fallen med 29 & 55% SLF för att slutligen öka i fallet med 72% SLF.



Figur 37: Koncentrationerna av HCl och SO₂ i rökgas ut från pannan (timmedelvärden). De grå fälten i figuren visar tidpunkterna då försöken med de olika mängderna SLF genomförts.

B.6 Slutsatser

Som konstaterats ovan så föreligger det inga signifikanta skillnader i pannans driftdata mellan försöken med 9, 29, 55 och 72% SLF i ingående bränslemix. Rökgasflöden påvisar en något ökande trend med ökande andel SLF medan temperaturerna i delarna av pannan närmast eldstaden påvisar en något minskande trend samtidigt som temperaturerna längre bak i pannan går upp marginellt.

Data för fallet med 72% sticker ut något men förklaras av ett snabbstopp av pannan i samband med det försöket vilket får som konsekvens att pannans medellast varit något lägre under det försöket (med något lägre rökgastemperaturer och flöden som följd).

Att skillnaderna är så pass små är något förvånande då SLF enligt litteratur ofta definieras som ett ”torrare” bränsle med högre värmevärde än de fraktioner avfall som normalt eldas i block 5. Ett bränsle med högre värmevärde borde logiskt sett leda till större skillnader i både temperaturnivåer samt volymflöden i pannan.

Eftersom analyserna av driftdata visar att så inte är fallet tyder mycket således på att det inte föreligger några signifikanta skillnader i fukthalt och värmevärde mellan den

fraktion SLF som använts i samband med försöken och den ordinarie bränslemixen. Då inga detaljerade bränsleanalyser är tillgängliga i skrivande stund går detta dock inte att bekräfta. Dock bör detta utredas vidare för att kunna bekräfta att den del SLF som använts under försöken har varit representativ.

Under förutsättning att de använda bränslefraktionerna under försöken varit representativa visar denna analys, att från ett rent processtekniskt perspektiv, så kommer en ökad andel SLF inte innebära några signifikanta begränsningar på pannans drift och att eventuella skillnader bör kunna kompenseras med åtgärder som ändrad mängd rökgasrecirkulation, etc.

KORROSION OCH BELÄGGNINGS- BILDNING VID FÖRBRÄNNING AV BRÄNSLET SLF

SLF (Shredder Light Fraction) även kallat "fluff" är den brännbara rest som inte kan återvinnas då metallskrot krossats och separerats i olika fraktioner för återvinning. Det består framförallt av tyg, gummi och plast. En stor andel kommer från bilar. Ett högt energivärde samt bra betalt för att ta emot avfallet gör SLF till ett mycket attraktivt bränsle ekonomiskt sett. Tidigare erfarenheter visar dock att eldning av SLF kan leda till stora problem med korrosion och igensättningar.

Tester med olika inblandningsgrad av SLF i bränslemixen har genomförts. Resultaten tyder på att man kan öka andelen SLF i i den testade pannan från dagens nivå på 9% upp till max 29% utan förväntade problem. Det rekommenderas dock starkt att långtidskorrosionsprovning genomförs vid en ökad inblandning för att ta reda på korrosionshastigheten och beläggningsskemin.

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



Energiforsk