

Sotningsmetoder för pannor som använder besvärliga bränslen

Kent Davidsson, Inge Johansson, Annika Stålenheim, Katarina Boman

Sotningsmetoder för pannor som använder besvärliga bränslen

Cleaning methods for combustion facilities that use difficult fuels

Kent Davidsson, Inge Johansson,
Annika Stålenheim, Katarina Boman

A12-210

Abstract

Erfarenheter samt finansierings- och driftkostnader har tagits fram för en rad sotningsmetoder.

Resultatet visar att av de studerade anläggningarna finns det ingen metod som generellt bara fungerar bra, eller generellt inte fungerar alls. Alla har sina för och nackdelar och fungerar olika bra på olika pannor. Kostnadsmässigt är det också stor spridning men det beror delvis på ett ganska litet underlag. I vissa fall blir kostnaderna väldigt höga om bristande funktion leder till mycket stilleståndstid eller att man exempelvis får minska lasten under sotningssekvensen, medan det i andra fall är relativt låga kostnader för samma metod.

Ett trettiootal anläggningar av rost- och fluidbäddtyp, vilka eldades med avfall eller biobränsle har ingått i undersökningen.

Sammanfattning

I takt med att alltmer avfall och svåra biobränslen förbränns blir behoven av sotning större. Idag finns en rad sotningsmetoder som ibland är alternativ och ibland kan användas parallellt. Många anläggningar har nyligen bytt eller står i begrepp att byta eller komplettera sin befintliga sotningsutrustning. Samtidigt har det saknats en sammanhållen beskrivning av kostnader och konsekvenser av de olika sotningsmetoderna. Detta projekt har syftat till att ge svar på vilken sotningsmetod som är mest lämpad ur ett ekonomiskt perspektiv beroende på sotningsposition och bränsle samt beskriva erfarenheter från olika sotningsmetoder. Målgruppen är främst anläggningsägare men också exempelvis konsulter. I de studerade anläggningarna har följande sotningsmetoder varit representerade:

- Ångsotning
- Vattensotning
- Luftsotning
- Kulsotning
- Slagsotning
- Sprängsotning
- Ljudsotning

Projektet genomfördes genom insamlande av kvalitativa och kvantitativa data från anläggningarna. De kvantitativa data användes i en i projektet framtagen modell för driftkostnaderna för respektive sotningsmetod. En särskild studie gjordes av Idbäcksverkets byte av gamla ångsotare till ljud- och sprängsotning. Sotningens effektivitet blir i de flesta fall en subjektiv bedömning från personalen på anläggningen och en metod som inte upplevs fungera på en anläggning fungerar bra på en annan. Utvärderingen av bytet av sotningsmetoder på Idbäcken gav dock resultatet att på överhettardelen rengjorde ångsotningen bättre än den fast monterade sprängsotningen, medan i ekonomisern fungerade ljudsotningen bättre än ångsotningen. Dock har det varit vissa intrimningsproblem och det går inte helt att fastställa hur det ekonomiska utfallet av bytet blev förrän en längre tids drift kunnat studeras.

När det gäller driftkostnader för olika sotningsmetoder beror dessa på en rad olika faktorer, där en del kan vara svåra att generalisera. I vissa fall måste lasten reduceras under sotningen på grund av andra begränsningar i systemet vilket leder till höga kostnader. Generellt har det varit svårt att få fram bra data för kostnader, speciellt underhållskostnader och investeringskostnader.

Slutsatsen är att det är viktigt att studera de specifika förutsättningarna för anläggningen där utrustningen ska installeras. Det går inte från den genomförda studien att dra en generell slutsats om vilket som är det mest ekonomiska alternativet men erfarenheterna och kostnaderna från projektet ger dock en indikation för de olika alternativen.

Nyckelord: sotning, driftkostnader, drifterfarenheter, avfall, biobränsle

Executive Summary

Introduction

Most fuels cause deposits on water and steam tubes in combustion facilities. The deposits hinder heat transfer, and may cause high-temperature corrosion. Especially alkali (sodium and potassium) and chlorine are involved in these mechanisms. Pure wood fuel (*e.g.* wood chips and wood pellets) contains small amounts of alkali and almost no chlorine. In more rapidly growing parts of the tree (branches, roots, twigs and bark) the content of alkali is higher. Energy crops and straw fuels may contain even higher concentrations of alkali together with chlorine. Waste fuels usually have high alkali and chlorine content.

Increased competition for fuel, and increased prices, implies that even fuels with high contents of alkali and chlorine will come in question also in facilities not intended for alkali-rich fuels. Consequently, deposits in combustion facilities will become a larger problem in these cases. Severe deposits are also a well-known problem in waste combustion, which has increased strongly over the last 10-15 years.

There are a number of cleaning methods available which remove deposits during operation. These methods can often be distinguished by the media used for cleaning:

- steam cleaning
- water cleaning
- air cleaning
- shot cleaning
- rapping systems
- explosion cleaning
- sonic cleaning

Increased deposits can be met by more frequent cleaning, but cleaning always has negative effects. The most common method of cleaning is the use of steam blowers. A superheater is usually cleaned a couple of times per day according to a time schedule or initiated by a change in some process parameter, such as the flue gas temperature. During the cleaning procedure clean surfaces are also exposed to the steam flow. This is unnecessary and damages the surface while some of the surfaces with deposits are not reached. This demonstrates that cleaning is associated with costs and that the efficiency may be less than desired. Costs related to other cleaning methods are pressurised air, steel/aluminum balls and gases. Wear and tear on the cleaning equipment as well as on the tube materials that are cleaned, are other examples of operational costs associated with cleaning.

Cleaning methods have been compared in combustion facilities of ≤ 50 MW.[1] Due to lack of information, no conclusions regarding the operational costs of the cleaning methods could be drawn. It was reported that steam cleaning in combination with audible sonic cleaning functioned well in most cases except some wood chips-fired

boilers. In particular, this kind of sonic cleaning worked in fluidised beds, while ultrasonic cleaning didn't function well in any kind of facility. Shot cleaning functioned well with the exception of systems with bark and coal as fuels. In these cases the balls were clogged in the deposits.

Cleaning methods and deposits have been described in a number of large combustion facilities, and suggestions to improve the cleaning were made.[2] The targeting of the steam or water cleaning can be enhanced, water cleaning may also be optimised with respect to flow, pressure and temperature. Shot cleaning can be adjusted by the quality of the balls; *e.g.* heavier balls cause stronger impact. Sonic cleaning may be optimised by varying the placement of the sound source. Stationary explosion cleaning was described as a new method not well known. Sonic cleaning was found to be most efficient on fairly fresh deposits; *i.e.* before they had grown thick and/or hard. Among the negative effects, a stuck steam lance is the most serious. Then a specific point on the surface is exposed to the steam for a long time, and consequently it is a matter of time before severe damage of the surface is a fact. The flue gas temperature was found to be the best indicator during operation for deposit thickness and cleaning efficiency. The cost of steam cleaning was illustrated by the fact that 5-10 000 kg steam per day was used in biomass and waste fired facilities.

Cleaning may damage the surfaces that are to be cleaned. *E.g.* steam cleaning may erode the superheater tubes.[2] The erosion depends on the attack angle and the water content of the steam. Erosion and corrosion sometimes occur in synergy,[3] which further increases the degradation. Factors that affect these processes are the composition of the material and temperature variations caused by the steam cleaning. To protect the tubes, plates can be fitted onto them. The steam pressure or the cleaning frequency can also be reduced.

Studies to optimise the cleaning frequency have been carried out.[4][5][6] The basic idea of such optimisation is to clean when needed and not otherwise. This is mainly used in recovery boilers in the pulp and paper industry.

It is difficult to find studies where the economics of different cleaning methods are evaluated. An ideal economic model should take into account the investment cost, operational costs and revenues (and excluded costs) that a certain cleaning method gives rise to. This would soon become a very complex model, and it suffers from the difficulty of acquiring the input data: it is difficult to estimate the value of the prevented corrosion, and some costs may be industrial secrets. Nevertheless, it should be possible to estimate the operational costs for a certain cleaning method. It is reasonable to assume that the criteria for starting the cleaning – for example too high a pressure drop over a certain tube bank – is independent of the cleaning method. Then the operational cost would be a good comparison of the economic efficiency of the methods.

In addition to the cleaning method, the fuel and the type of facility may affect the outcome of the cleaning. Therefore biomass- and waste-fired facilities should be distinguished between as well as grate-fired and fluidised beds. Experiences from many combinations of these parameters would be an important part of the knowledge about

cleaning. Of special interest are facilities where a replacement of one cleaning method for another has taken place.

Aim and objective

The overall aim of the present project has been to increase the efficiency and lower the operational costs. The objective has been to describe qualitative and economic criteria that constitute the basis for the choice of cleaning method:

- to collect experiences from different cleaning methods, facilities and fuels
- to establish the operational cost for the cleaning methods

Method

The aim and objective were obtained by creating a cost model for the different cleaning methods, and by collecting data. The cost model identifies the important parameters for the operational cost of the cleaning system, and is described in further detail below. A questionnaire was developed in cooperation with the project group, and the data collection was performed by site visits and interviewing relevant personnel at the combustion facilities. A more thorough technical investigation is presented regarding Idbäcksverket at which the cleaning system was exchanged recently.

Combustion facilities

Combustion units of some ten operator sites on the heat and power market were included in the project. Each site may contain several units, which sum up to 28. Basic features of the units are collected in the Table below.

Table. Characteristics of the investigated combustion units.

Operator/ site	Type	Size (MW _{th})	Steam (bar/°C)	Fuel	Empty duct	Superheater/ convection	Economiser
Borås energi & miljö/ Ryaverket	grate	2x60	50/500	biomass		steam	shot
	BFB	2x20	50/405	waste		steam	sonic
EON/ Händelö	CFB	75	65/450	waste	water	steam	sonic, steam
	CFB	85	65/450	waste	water	rapping	sonic, steam
	grate	85	110/535	RT/ biomass		air	air
	grate	125	535/110	coal		air	air
	CFB	132,5	535/110	tires, RT, biomass		steam	steam
Halmstad energi & miljö/ Kristinehed och Oceanen	grate	2x12,4	10/160	waste	water	rapping	shot
	grate	43	40/400	waste	water	rapping	rapping
	grate	32,5	56/475	biomass		steam	steam
Kils energi	BFB	8	hot water, 8-9 bar	RT, PTP			expl., sonic
Lidköpings värmeverk	BFB	14	saturated steam, 20 bar	waste		steam	steam
	BFB	14	saturated steam, 20 bar	waste		steam, sonic	sonic
	BFB	20	saturated steam, 40 bar	waste		steam	steam
	grate	21,6	40/350	waste	water	steam	steam
Sysav	grate	2x33	10/150	waste		shot, sonic	sonic
	grate	2x75	40/400	waste	water	rapping	rapping
Tekniska verken Linköping/ Gärstad- verket	grate	17	17/207	waste		rapping	shot
	grate	2x30.5	17/207	waste	water	steam	shot
	grate	68	40/400	waste		rapping, expl.	sonic, shot
Umeå energi/ Dåva	grate	55	40/395	waste	water	rapping	rapping
	BFB	110	140/540	biomass		steam	steam
Vattenfall/ Idbäcken	BFB	97.5	140/540	RT		expl., sonic (air preh.)	sonic
Växjö energi/ Sandvik	CFB	100	142/540	biomass/ peat		steam, sonic	steam

RT = demolition wood, PTP = paper, wood and plastics, SH = superheater. Cleaning methods: steam = steam blown, water = water cleaning, rapping = rapping cleaning, shot = shot cleaning, air = air cleaning, sonic = sonic cleaning, expl. = explosion cleaning.

The units can be classified according to fuel and type of unit. This is described in the below figure.

grate	2x60MW 85 MW 32.5 MW	2x12,4 MW 43 MW 21,6 MW 2x33 MW 75 MW 17 MW 2x30,5 MW 68 MW 55 MW
fluidised bed	110 MW B 100 MW C	2x20 MW B 75 MW C 85 MW C 8 MW B 14 MW B 2x20 MW B 97,5 MW B
	biofuel	waste

Figure. Combustion units classified according to fuel and type. B = bubbling fluidised bed, C = circulating fluidised bed.

To sum up, the units cover a wide range of sizes and cleaning methods. Grates and fluidised beds are represented as well as biomass and waste. There is some focus on waste-fired units. This reflects the fact that the deposition is usually heaviest in these, and that the need for cleaning is greatest.

Results

Idbäcksverket

Over the last decade a shift from nearly 100 % wood chips to nearly 100 % demolition wood has taken place at Idbäcken. This implies that the ash load, and hence the liability to form deposits, has increased in the combustion facility. This was accentuated when the operation in Idbäcksverket was disturbed by erroneous steam soot blowers during 2010-2012. Unplanned shutdowns led to costs of 5-10 MSEK/year. Therefore a new cleaning system was installed during the summer 2012. Steam blowers were substituted for sonic and explosion soot blowers. Here, the experiences of this change of methods are described. Figures with English captions are found in section 6.

The old and new cleaning system

The old system consisted of 21 steam soot blowers for the superheaters, the economiser and the air preheater. It was operated 3 times per day. The main problem was erosion of the tubes. A probable cause of this was water droplets in the steam. The blowers also malfunctioned, with the result that deposits were not removed. A subsequent result was that the increased flue gas velocity in some parts led to further erosion.

The new system consists of 5 explosion cleaners for the superheaters, and 2 sonic cleaners for the economiser and the air preheater. The explosion cleaners are operated in

sequence every 12 minutes, and the sonic cleaner runs 3 seconds every 45 seconds. Steam cleaners in the air preheater have not been removed, and are used as a backup.

The explosion generators

The explosion generators were adjusted during the first weeks of operation. The direction of one of the explosion generators was found to have caused a leakage in the superheater. Hence, the placement of the generator in relation to the superheater is important. This is also true for the microphone which indicates whether an explosion has taken place at all. It was moved to a better position. A gas leakage also occurred. After the adjustment period, the availability of the explosion generators has been 80-90 %. Most stops have been caused by lack of gas and change of gaskets. To increase the accessibility, the supplier has arranged a data logging system. The aim is to predict and counteract malfunction rather than to react when it is already the case. The explosion frequency is important for the operational cost since it affects the gas consumption and the amount of parts that need to be replaced due to wear. Therefore the explosion frequency is subject to adjustments depending on the deposit formation.

The sonic cleaning

During the adjustment period it was found that one of the sonic cleaners malfunctioned because of some manufacturing error. After this was corrected, the accessibility was acceptable. The other cleaner had an availability of 95 %. At an inspection deposits were found but they were probably less than with the steam cleaning system.

Model of deposition rate

The flue gas passing a tube bank is in effect a heat exchanger. According to theory

$$Q = UA \cdot LMTD,$$

where Q is the exchanged heat, U is the overall heat transfer coefficient, A is the area of the tube bank, and $LMTD$ is the logarithmic mean temperature difference.

From this equation UA can be calculated for the tube bank. However, UA varies not only with deposition, but also with fuel load. To get a relevant measure of the deposition in terms of decreasing UA , a relative heat transfer coefficient

$$UA\text{-ratio} = UA/UA_{\text{clean}},$$

was defined, where UA_{clean} is the heat transfer coefficient for clean tubes. UA_{clean} is a function of fuel load and can be adjusted to operational data from occasions with clean tubes. The UA -ratio equals one when tubes are clean and decreases as they are covered with deposits. Since temperature sensors in the combustion facility give a rather momentary measure, UA -ratios can be calculated at a vast number of occasions, thus clearly showing the build-up of deposits and the effect of cleaning.

Deposition rate

Steam and sonic soot blowing in the economiser was compared using the *UA*-ratio. It was found that the deposition rate may differ for both methods, but sonic cleaning was some 30 % better, when it functions well.

Comparing explosion and steam cleaning of the superheater shows that the latter gave the best result. This means that the tube banks have to be cleaned every month instead of every 3rd month. However, the comparison comprises periods with less than fully functioning explosion cleaning. A better performance is anticipated when the explosion cleaning operates more according to standard.

Deposits build up in a couple of hours. Therefore cleaning systems – depending on their function – have to operate at least on hourly basis. A small fraction of the deposits is not removed by the cleaning system. This fraction builds up slowly over weeks or months, and eventually requires more thorough actions such as explosion or manual cleaning. The present comparison concerns this long-term deposition; *i.e.* the time between thorough cleaning is compared. While this is important, the operational costs for the systems should also be considered. In the present case those costs were estimated to 5,9-11,6 MSEK/year for the old cleaning system, and 1,7-3,8 MSEK/year for the new one.

Economic evaluation

An economic model that takes into account operational costs and financial costs for the different soot blowing techniques was developed. While the financial cost is simply the investment times some interest rate independent of cleaning method, the operational cost, K_d , must be calculated differently. It comprises maintenance costs, expenditure costs and, in the case of steam cleaning, a cost for loss of electricity revenue. The expenditures are:

Steam: processed water consumption

Water: unprocessed water consumption (essentially = 0)

Air: pressurised air

Shot: consumption of balls

Rapping: electricity consumption (essentially = 0)

Expl.: gas consumption

Sonic: pressurised air

The calculated costs were based on data from the facilities in the present study but recalculated to 7500 h of operation a year and normalised with respect to the size in terms of MW_{th}. Consequently the cost were given in units of SEK/(year·MW).

Results

The experiences of the cleaning methods vary between different plants. As long as the methods don't malfunction, they remove deposits satisfyingly. However, not all deposits are removed, and not all surfaces are cleaned sufficiently. Some deposits build up over time and are not possible to remove. In those cases special methods or even manual cleaning is required. A well operating cleaning system keeps this kind of

measures to a minimum. An erroneous cleaning system may damage the facility and cause increased maintenance costs as well as stand-still costs.

The availability of the cleaning system is essential. Systems which have been in operation for some time have the best accessibility, whereas new systems being adjusted, and old systems, subject to wear, have lower accessibility. At some occasion it is profitable to invest in a new system. Severe damage can be caused by steam cleaning if the steam flows in the wrong direction.

To enhance the function, in a cleaning system, adjustments can be made. Sonic and explosion cleaning are usually adjusted by the supplier, but the other methods can usually be adjusted by the plant's personnel; e.g. by increasing the cleaning frequency over the season, while the flue gas temperature may be used as an indicator. Steam cleaning suffers from the risk of formation of water droplets, which may cause erosion of the exposed surface. An important adjustment is to make sure that these droplets are not formed.

Some costs are given in the Table below. The costs vary a lot and some have not been possible to establish. The reason for the variation is, among other things, the difference in size of the combustion units and the amount of maintenance. These circumstances make it difficult to directly compare the costs of methods and facilities. However, these examples show that it is, in principle, possible to calculate the costs in each case. They should be monitored over time and thereby constitute a basis for investment decisions. In the case of shot cleaning and rapping the investment was included in the investment for the whole facility, which makes it difficult to establish. In addition, the investments took place long ago in many cases.

Table. Financial and operational costs for different cleaning methods.

Cost	Unit	Steam	Water	Air	Shot	Rapping	Expl.	Sonic
Financial	SEK/ year/MW	850- 5200	870- 5200	2100	^a	^a	5800	800
	SEK/year/ cleaning unit	3800- 17000	65000	7100	^a	^a	46000	80000
Operation	SEK/ year/MW	2200- 25000	^a	^a	3500- 7200	5600- 8000	2400- 2500	160- 8500
	SEK/year/ cleaning unit	13000- 29000	^a	^a	138000- 250000	70000- 440000	20000- 46000	16000- 68000
Expen- diture	SEK/ year/MW	160- 4700	0 ^b	19	3100- 6800	0 ^b	600- 810	115- 6300
	SEK/year/ cleaning unit	660- 4700	0 ^b	65	110000- 220000	0 ^b	4800- 16000	12000- 50000
Main- tenance	SEK/ year/MW	181- 3700	^a	^a	380	5600- 8000	1500	40- 2300
	SEK/year/ cleaning unit	1100- 14000	^a	^a	25000	70000- 440000	15000- 30000	4000- 18000

^a Not established or not available.

^b Negligible.

Conclusions

The present study shows that the function and cost associated with different cleaning systems vary a lot. There is not a simple answer to the question which cleaning system is the best or the cheapest. However, in each case it is possible to judge whether the cleaning is good enough and its operational and financial costs. The costs are sometimes significant, which makes it is important to monitor those regularly. The monitoring gives input to future investment decisions. The decision on which technique to choose should be based not only on the own experiences, but also on those of other plant owners. It is therefore of great value to document experiences and to share them with other operators.

Key words: cleaning, operational costs, operational experiences, waste, biomass

Innehållsförteckning

1	SYFTE OCH MÅL	1
2	INLEDNING	2
2.1	BAKGRUND	2
2.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET.....	3
2.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	4
2.4	MÅL OCH MÅLGRUPP	5
3	GENOMFÖRANDE.....	6
3.1	INSAMLING AV ERFARENHETER.....	6
3.2	FÖRDJUPAD UPPSKATTNING AV VISSA SOTNINGSRELATERADE KOSTNADER	6
3.3	FÖRDJUPAD STUDIE AV SOTNINGENS EFFEKTIVITET	6
4	SOTNING	8
4.1	PÅSLAG	8
4.2	SOTNINGSMETODER	9
5	ERFARENHETER AV SOTNING	16
5.1	ÅNGSOTNING.....	17
5.2	VATTENSOTNING.....	18
5.3	LUFTSOTNING	19
5.4	KULSOTNING	19
5.5	SLAGSOTNING	20
5.6	MANUELL SPRÄNGSOTNING	21
5.7	FAST SPRÄNGSOTNING	21
5.8	LJUDSOTNING	22
6	BYTE AV SOTNINGSSYSTEM I IDBÄCKEN	24
6.1	BAKGRUND	24
6.2	IDBÄCKEN P3	24
6.3	BESKRIVNING AV SOTNINGSSYSTEMEN	25
6.4	BERÄKNINGSMODELL FÖR VÄRMEGENOMGÅNGSTAL	29
6.5	NEDSMUTSNINGSHASTIGHETEN	35
7	EKONOMISK UNDERSÖKNING	44
7.1	EKONOMISK MODELL	44
7.2	KOSTNADER I ANLÄGGNINGARNA	48
8	RESULTATANALYS	51
8.1	ERFARENHETER	51
8.2	KOSTNADER	53
9	SLUTSATSER	55
10	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING.....	56
11	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSGÄRANDE.....	57
12	LITTERATURREFERENSER	58

Bilagor

A	FRÅGOR TILL ANLÄGGNINGAR	1
B	ÖVERSIKTSTABELL KVALITATIVA RESULTAT	1
C	VATTENFALLS UTREDNING	1

1 Syfte och mål

Projektet syftar till att öka effektiviteten och sänka driftkostnaderna i bio- och avfallspannor genom att förbättra underlaget för val av sotningsmetod.

Målet är att beskriva kriterier som ligger till grund för val av sotningsmetod från kvalitativ och driftekonomisk infallsvinkel:

- att insamla drifterfarenheter från olika sotningsmetoder, pannor och bränslen
- att fastställa driftkostnaden för en rad sotningsmetoder.

2 Inledning

2.1 Bakgrund

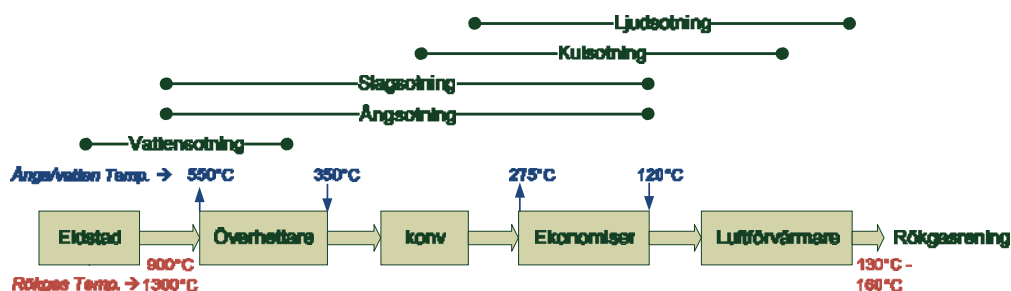
De flesta bränslen ger upphov till oönskade påslag på vatten- och ångbärande tuber i förbränningsanläggningar. Påslagen hindrar värmeöverföring och orsakar högtemperaturkorrosion. Det är främst alkali (natrium och kalium) och klor i bränslet som orsakar detta.[7] I rent träbränsle (träflis och träpellets) finns endast små halter av alkali och knappt något klor. I mer snabbväxande delar av trädet (grenar, rötter, toppar och bark) är halterna av alkali högre.[8] I energigrödor kan halterna vara ännu högre liksom i stråbränsle där klorhalterna kan vara betydande. Avfallsbränslen (hushållsavfall och verksamhetsavfall) innehåller ofta höga klor- och alkalihalter.[9]

Den ökande konkurrensen om biobränslen gör att även bränslen med höga halter av klor och alkali kommer i fråga för anläggningar som inte designats för dem. En rimlig slutsats är att påslag i förbränningsanläggningar för biobränslen därmed kommer att öka. Antalet förbränningsanläggningar för avfall ökar också, och med dem mängden påslagsrelaterade problem. Det finns samtidigt en önskan att öka elutbytet i förbränningsanläggningar. Detta kan göras genom högre ångtemperatur vilket ökar risken för högtemperaturkorrosion.

För att avlägsna påslag under drift sotar man. Ökade påslag kan alltså mötas med mer sotning. Det finns idag flera typer av sotningsmetoder tillgängliga:

- Ångsotning
- Vattensotning
- Luftsotning
- Kulsotning
- Slagsotning
- Sprängsotning
- Ljudsotning

Sotningsmetoderna ovan används lämpar sig mer eller mindre väl i olika delar av anläggningen och för olika bränslen och anläggningstyper. Figur 1 visar var de olika sotningsmetoderna vanligen används.



Figur 1. Typisk placering av olika sotningsmetoder.[2][4]

Figure 1. Typical location of different cleaning methods.

Alla metoder har någon form av negativ påverkan alternativt kan ha en bristande effektivitet. Ångsotning är idag den vanligaste sotningsmetoden. Vanligtvis sotas t.ex. överhettare regelbundet: t.ex. 1 gång/skift eller när rök Gastemperatur eller tryckfall passerar vissa gränsvärden. Oftast rengörs även de delar av t.ex. överhettare som inte behöver rengöras. Detta ger upphov till en ökad kostnad för sotningsproceduren i sig men också till ökad materialavverkning på tuber och pannväggar. Dessutom sjunker verkningsgraden under sotningsförfarandet.

2.2 Beskrivning av forskningsområdet

En tidig värmeforskrapport [1] jämförde sotningsmetoder för olika pannor (≤ 50 MW) och bränslen. På grund av bristande information kunde det inte dras några slutsatser om sotningens driftkostnader. Kvalitativa omdömen om metoderna var bl.a. att ångsotning i kombination med tyfoner (ljudsotning med hörbart ljud) fungerade för de flesta fall med undantag för ett par träfliseldade pannor. Framför allt fungerade tyfoner bra i fluidbäddpannor medan infraljud inte fungerade bra i någon studerad panna. Kulsotning fungerade bra med undantag för eldning av bark och kol då kulorna bakades ihop med påslaget.

Sotningsmetoder och beläggningar har beskrivits i ett antal större pannor varvid förslag till förbättringar av den befintliga sotningsutrustningen getts [2]. Exempel på områden med förbättringspotential är ångsotningens respektive vattensotningens träffbild. Vattensotning kan också optimeras med avseende på flöde, tryck och temperatur. Kulsotning kan främst varieras med kulornas kvalitet; tyngre kulor ger t.ex. större anslagskraft. Ljudsotning kan optimeras utifrån placering av ljudgivarna men sprängsotning anges som en ny metod där kunskapsbilden är oklar. Ljudsotning befanns vara effektivast mot beläggningar i ett tidigt skede; d.v.s. innan de blivit tjocka och/eller hårda. Ett antal negativa effekter av sotningen togs upp. Den allvarligaste är t.ex. när en ånglans fastnar i ett läge och bestryker samma punkt på en tub med ånga under lång tid med materialavverkning som följd. Även utebliven sotning är ett allvarligt problem. Rök Gasens temperatur fastslogs som det bästa måttet på beläggningens bildning och sotningens effektivitet. När det gäller ångsotning så var spridningen i åtgång på ånga

stor mellan de undersökta anläggningarna, men i genomsnitt användes 5-10 ton ånga/dygn för bio- respektive avfallseldade pannor.

Sotning kan skada ytorna som den skall rengöra. Ångsotning kan t.ex. orsaka erosion på tuber.[2] Erosionens omfattning beror på ångstrålens infallsvinkel och vattenhalt. Erosion förekommer ibland i synergi med korrosion.[3] Avverkningshastigheten kan då bli betydligt högre än vid erosion och korrosion för sig. Sådan så kallad erosionskorrosion kan orsakas av ångsotning. Faktorer som påverkar känsligheten för sotning är materialets sammansättning och de temperaturvariationer som sotningen ger upphov till. För att skydda tuber som är särskilt utsatta för ångsotning kan tubskydd appliceras. Även reducerat sotblåsningstryck och minskad sotningsfrekvens har prövats.

Studier av behovsstyrd sotning för att optimera sotningen har gjorts.[4][5][6] Behovsstyrd sotning kan bidra till en förbättrad ekonomi. System med behovsstyrd sotblåsning används idag främst i sodapannor p.g.a. deras relativt konstanta driftförhållanden. Vid förbränning av avfall och andra bränslen, som ger upphov till mer besvärliga påslag, brukar de varierande driftförhållandena försvåra eller t.o.m. utesluta användningen av behovsstyrd sotning.

2.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Generellt har det saknats studier där både effektiviteten och kostnaderna studerats, fokus har generellt sett varit på effektiviteten på metoderna.

En ideal ekonomisk modell skulle ta hänsyn till investeringskostnaden, driftkostnader och intäkter (uteblivna kostnader) som en viss sotningsmetod medför. Modellen blir snabbt mycket komplex och lider av svårigheten att få fram data: dels är det mycket svårt att uppskatta vad t.ex. den eventuellt uteblivna korrosionen är värd och dels kan vissa kostnader vara industrihemligheter. För att minska komplexiteten och osäkerheten i resultatet har de uteblivna kostnaderna inte tagits med.

Utöver själva sotningsmetoden kan bränslet och panntypen påverka utfallet vid sotning. Därför bör man skilja på bio- och avfallsbränsle samt fluidbädd- och rostpannor. Denna erfarenhetsinsamling från många kombinationer av ovanstående parametrar är en viktig del av kunskapsbygget kring sotning. Av speciellt intresse är anläggningsägares egna förändringar av typen Vattenfalls byte från ångsotning till sprängsotning vid överhettarna och från ångsotning till ljudsotning vid ekonomisern i Idbäcken.

Denna studie kvantifierar driftkostnaderna för olika sotningsmetoder i anläggningar som eldar bio- eller avfallsbränslen, med de begränsningar som finns i form av tillgång på data. Studien utvärderar också bytet av sotningsmetod vid Idbäcken.

2.4 Mål och målgrupp

Projektet syftar till att öka effektiviteten och sänka driftkostnaderna i bio- och avfallspannor genom att förbättra underlaget för val av sotningsmetod.

Målet är att beskriva kriterier som ligger till grund för val av sotningsmetod från kvalitativ och driftekonomisk infallsvinkel:

- att insamla drifterfarenheter från olika sotningsmetoder, pannor och bränslen
- att fastställa driftkostnaden för en rad sotningsmetoder.

Målgruppen är anläggningsägare som avser investera i ny sotutrustning, eller som är intresserade av hur man kan utvärdera sotningen.

3 Genomförande

Genomförandet kan indelas i tre huvudinsatser:

- insamlande av erfarenheter
- fördjupad uppskattning av vissa sotningsrelaterade kostnader
- fördjupad studie av sotningens effektivitet

Dessa delar beskrivs nedan.

3.1 Insamling av erfarenheter

I samarbete med referensgruppen utarbetades de frågor som ställdes vid anläggningsbesök. Frågorna återges i Bilaga A. Anläggningsbesök gjordes på tio företag som hade 28 anläggningar totalt. Dessa anges i Tabell 1.

3.2 Fördjupad uppskattning av vissa sotningsrelaterade kostnader

Valmet Power (f.d. Metso Power) gjorde en sakkunnig uppskattning av kostnaderna för de olika sotningsmetoderna till en avfallseldad bubblande fluidbäddspanna. Dessa uppskattningar är ingångsdata till beräkningarna av driftkostnader.

3.3 Fördjupad studie av sotningens effektivitet

Vattenfall R&D genomförde beräkningar av värmegenomgångstal från en stor mängd data före och efter byte från ångsotblåsare till fast monterade sprängsotare och ljudsotare i Idbäcksverket.

Tabell 1. Förbränningsanläggningar som ingick i projektet.

Table 1. Combustion facilities that were part of the project.

Företag/ anläggning	Typ	Effekt (MW)	Ångdata (bar/°C)	Bränsle	Tom- drag	ÖH/ konvek- -tion	Eko
Borås energi & miljö/ Ryaverket	rost	2x60	50/500	bio	ånga		kul
	BFB	2x20	50/405	avfall	ånga	ånga	ljud
EON/ Händelö	CFB	75	65/450	avfall	vatten	ånga	ljud, ånga
	CFB	85	65/450	avfall	vatten	slag	ljud, ånga
	rost	85	110/535	RT/bio		luft	luft
	rost	125	110/535	kol		luft	luft
	CFB	132,5	110/535	däck, RT, bio		ånga	ånga
Halmstad energi & miljö/ Kristinehed och Oceanen	rost	2x12,4	10/160	avfall	vatten	slag	kul
	rost	43	40/400	avfall	vatten	slag	slag
	rost	32,5	56/475	bio		ånga	ånga
Kils energi	BFB	8	Hetvat- ten, 8-9 bar	RT, PTP			spräng, ljud
Lidköpings värmeverk	BFB	14	20 bar, mättad ånga	avfall		ånga	ånga
	BFB	14	20 bar, mättad ånga	avfall		ånga, ljud	ljud
	BFB	2x20	40 bar, mättad ånga	avfall		ånga	ånga
	rost	21,6	40/350	avfall	vatten	ånga	ånga
Sysav	rost	2x33	hetvatten, 10/150	avfall		kul, ljud	ljud
	rost	2x75	40/400	avfall	vatten	slag	slag
Tekniska verken Linköping/ Gärstad- verket	rost	17	17/207	avfall		slag	kul
	rost	2x30,5	17/207	avfall	vatten	ånga	kul
	rost	68	40/400	avfall		slag, spräng	ljud, kul
Umeå energi/ Dåva	rost	55	40/395	avfall	vatten	slag	slag
	BFB	110	140/540	bio		ång	ång
Vattenfall/ Idbäcken	BFB	97,5	140/540	RT		spräng, ljud (lufo)	ljud
Växjö energi/ Sandvik	CFB	100	142/540	bio/torv		ång, ljud	ång

4 Sotning

Här följer en kort beskrivning av hur påslag bildas och hur respektive sotningsmetod principiellt avlägsnar påslag.

4.1 Påslag

Påslag bildas av ämnen i bränslet. Vid den termiska omvandlingen kan dessa frigöras och föras med rökgaserna till ytor där de kan bilda påslag. Bränslets sammansättning – särskilt avseende den del som återfinns som aska efter omvandlingen – den aktuella ytans temperatur, och rökgasens temperatur vid ytan är faktorer som påverkar bildningen av påslag. De flesta ämnen som förs med rökgaserna är i form av fasta partiklar. Dominerande ämnen i dessa är kalcium, kisel och aluminium om de finns i bränslet. Eftersom dessa partiklar är fasta är de också torra och i sig relativt obenägna att fastna på ytor även om de är betydligt kallare än rökgasen. I bränslet finns också alkalimetaller (natrium och kalium) och ibland klor och svavel. Dessa bildar gasformiga ämnen som kan kondensera ut på flygspartiklarna som då blir klabbiga. Kondensation kan också ske direkt på överhettare och andra kylda ytor.

Avgången av alkali, klor och svavel till gasfasen sker genom avgasning av bränslet (200-500 °C) och avdunstning från askfraktionen (> 600 °C) i bränslet. En del alkali och en större del av svavlet är organiskt bundet i bränslet. Dessa delar frigörs vid bränslets avgasning liksom klor i form av HCl. Avdunstning av alkali från askan sker i form av klorid eller hydroxid när ångtrycket ökar vid temperaturstegringen.

Påslag består åtminstone initialt av alkali t.ex. i form av klorid eller någon annan jonförening. Avfallsbränsle ger en mer komplex sammansättning; exempelvis kan zink bilda påslag. Påslagets sammansättning på en viss yta beror av rökgasens sammansättning och de lokala temperaturerna samt de mekanismer genom vilka material i rökgasen når ytorna.

Rökgasen består alltså av förångade lättflyktiga föreningar och partiklar. De mekanismer som kommer i fråga är impaktion, diffusion, termofores, kondensation och kemisk reaktion. Impaktion sker genom att partiklar inte kan följa rökgasströmmen när denna böjer av vid en yta. Partikelns tröghet gör att den träffar ytan och fastnar. Sannolikheten för att den skall fastna ökar om partikeln är klabbig och ytan ojämn som när det redan bildats påslag. Impaktion torde vara störst på vindsidan av t.ex. en konvektionstub. Diffusion uppstår om det finns en koncentrationsgradient t.ex. med avseende på en viss förening. Av sannolikhetsskäl uppstår då en transport av molekyler av föreningen från hög till låg koncentration. Vid en yta kan molekylerna fastna och alltså upprätthålls en lägre koncentration än i gasen utanför. På så vis uppstår ett flöde mot ytan på vilken molekylerna bygger upp påslaget. Termofores uppstår vid skarpa temperaturgradienter som kan vara fallet när t.ex. rökgas vid 800 °C passerar en ståluta på omkring 500 °C. Små partiklar i gradienten träffas av gasmolekyler som har högre rörelseenergi på den varma sidan än på den kalla. Partikeln tillförs alltså mer rörelseenergi från ena sidan och rör sig mot den kallare temperaturen; d.v.s. mot t.ex. överhettarytan. Kondensation är en fasövergång och inte en transportprocess. Det

inträffar om en gas kyls under sin kondensationspunkt. Kondensationen kan ske genom homogen nukleation i den fria gasen, men mer sannolikt är att den ske på partiklar så då får en klabbig yta. Kondensationen kan också ske direkt på en kyld yta och kan vara en viktig orsak till att gaskoncentrationen av den aktuella molekylen hålls låg nära ytan vilket medför att diffusion kan fortgå. Kemiska reaktioner kan ske mellan ämnen i gasfas och ämnen i eller på ytor. Om produkten är flytande eller fast så byggs ett påslag upp.

Mycket kan göras innan påslagen bildas för att minska deras tillväxt men när de väl bildats måste de tas bort genom sotning. Det är sotningsmetodens uppgift att hålla rent på tuberna. Det bör vara viktigt att hindra klabbiga beläggningar, som dels är svåra att sota bort och dels i sig bidrar till ökad påslagsbildning.

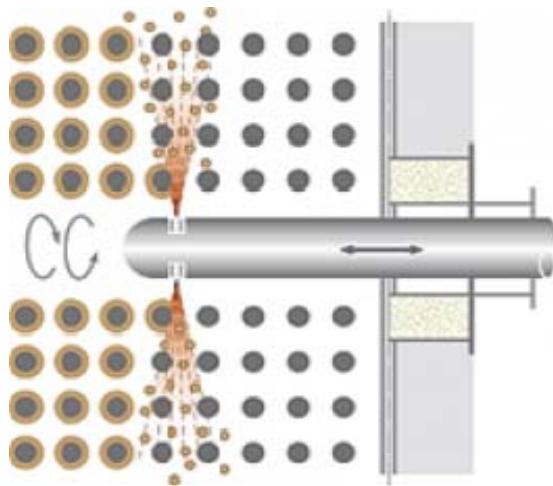
4.2 Sotningsmetoder

4.2.1 Ångsotning

Ångsotning innebär att trycksatt ånga blåses mot de ytor som skall hållas rena. Påslagen avlägsnas med den kraft som ångan överför. Ångsotning kan användas på de flesta positionerna i pannan som behöver rengöras, oavsett om det är tomdrag, överhettare eller andra konvektionsytor.

Det finns olika varianter på ångsotblåsare. Om ångsotningen är placerad i de varmare delarna av pannan är en vanlig lösning utdragbara ånglansar. Dessa förs in i rökgasstråket under sotningen. Lansarna förs i axiell led och längst ut på lansen sitter normalt ett par dysor, genom vilken ångan fördelas. Lansen roteras kring sin axel för att täcka så stor yta som möjligt (se Figur 2). En sotningscykel kan ofta vara runt en minut för ett sotningsaggregat och den totala sotningscykeln beror sedan på antalet sotningsaggregat. Vanligen körs ångsotningen en gång per skift men det beror på panna och bränsle.

Eftersom lansarna kan vara ganska långa är det viktigt med bra stöd för lansarna, annars kommer de att slå sig. Denna lösning kräver också utrymme utanför pannan så att lansen kan dras ut under paustiderna (se Figur 3).



Figur 2. Principskiss över funktionen för en utdragbar sotningslans.[10]

Figure 2. Principle view of a retractable sootblower.



Figur 3. Utdragbar sotlans från Clyde Bergemann Power Group.[10]

Figure 3. Retractable sootblower from Clyde Bergemann Power group

I ekonomiser, katalysator och luftförvärmare kan andra typer av sotblåsare förekomma, det kan röra sig om lansar med flera dysor där lansen roterar kring sin egen axel, men är fast i axiell led eller ångkrattor där dysorna är monterade tvärs mot rörelseriktningen på lansen (se Figur 4).



Figur 4. Exempel på ångkratta från Clyde Bergemann Power group.[10]

Figure 4. Example of a rake soot blower from Clyde Bergemann Power group.

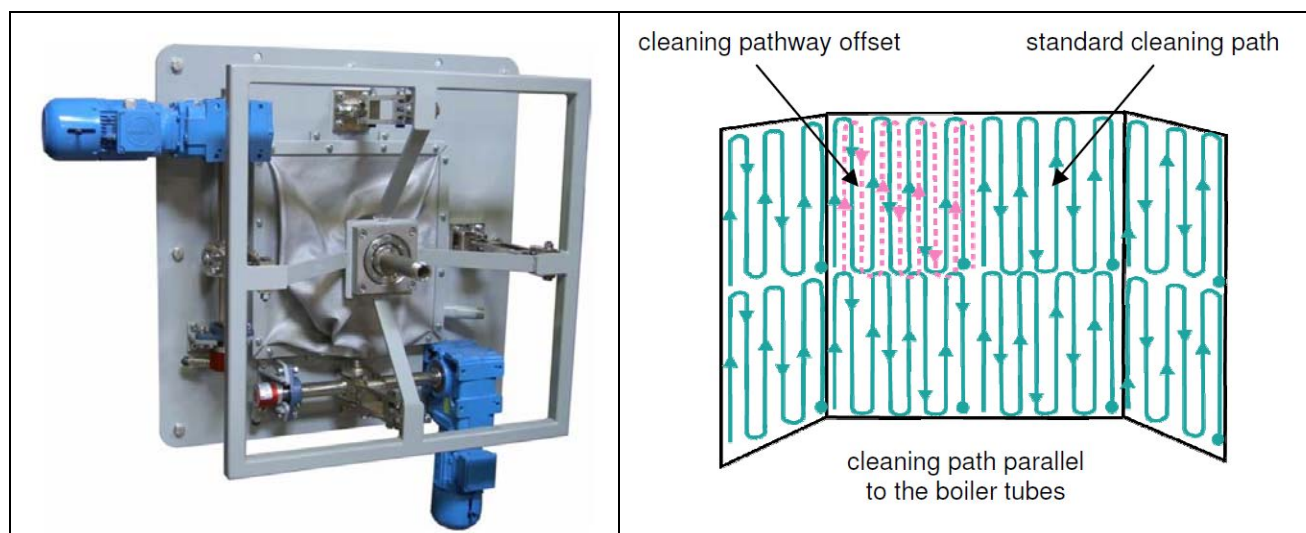
Typiska problem med ångsotning är att ångan inte når alla ytor i tubpaketet. Det beror på att tuberna skärmar varandra från lansens munstycke. Ett annat problem är materialavverkning på de tuber som skall hållas rena. Detta problem blir större om ångan delvis kondenserat till vattendroppar. För att motverka detta har man bl.a. placerat skyddsplåtar på de mest utsatta ytorna. Materialavverkningen blir lokalt värre om lansen alltid genomgår samma rörelse. Detta har man försökt ändra genom att förskjuta startpositionen från en sotning till en annan. Även att stänga av ångan när lansen förs in (eller ut) kan spara material, liksom det också sparar ånga.

4.2.2 Vattensotning

Vattensotning innebär att vatten sprutas på de ytor som skall hållas rena. Lösa påslag avlägsnas av vattnets kraft. Vid vattensotning fås även en effekt av att den kylning som vattnet orsakar leder till sprickor p.g.a. termisk volymändring, och att påslagen krackelerar p.g.a. den volymökning som sker vid förångning av vattnet. Vattensotning används främst i eldstad eller tomdrag.

En av teknikerna som används är att vattnet förs genom en slang som sänks ner i tomdraget. Dess position i höjdlängd regleras och själva munstycket vrids så vattnet sprids i olika riktningar. Eftersom slangen hänger fritt så kan den bara användas där en fri passage finns för en hängande slang.

En annan teknik är vattenkanoner som besprutar den motsatta pannväggen enligt ett förprogrammerat mönster. Kraften i strålen regleras för att ge en jämn belastning genom mönstret, detta förfarande minimerar också risken för ojämnt tubslitage som följd av sotningen.



Figur 5. Till vänster en bild på vattenkanon Hydrojet HJ-EU 1000 från Diamond power och till höger ett exempel på det standardmönster den använder sig av vid sotningen.[11]

Figure 5. A Hydrojet HJ-EU 1000 from Diamond power is shown in the left picture while the right picture shows a standard pattern for the cleaning with the Hydrojet.

Ytterligare en variant är en lans med två dysor som förs in vid sotningen. Dysorna är riktade snett bakåt och när lansen roterar rengörs en cirkel av pannväggen runt själva lansen.

4.2.3 Luftsotning

Luftsotning fungerar enligt samma princip som ångsotning med den skillnaden att tryckluft används istället för ånga. Det är även normalt samma typ av sotningsaggregat som används vid ångsotningen (se avsnitt 4.2.1).

4.2.4 Kulsotning

Kulsotning innebär att metallkulor släpps ovanför de ytor som skall hållas rena varvid kollisionen mellan kula och yta gör att eventuella påslag lossnar. Kulorna transporteras sedan upp igen. Tillbakatransporten av kulorna kan vara både mekanisk och pneumatisk.



Figur 6. Principskiss för ett kulsotningssystem.[12]

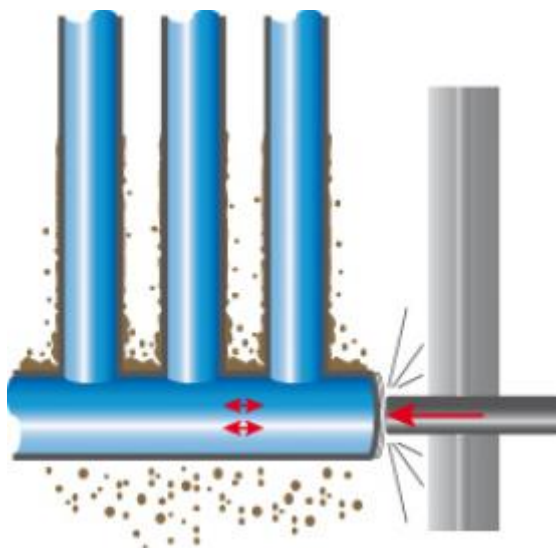
Figure 6. Schematic picture of a shot cleaning system.

Placeringen är fördelaktigast om den innebär att kulorna faller genom flera tubpaket. Det innebär att de rökgasstråk där gasen strömmar vertikalt kommer i fråga. Det kan vara i ekonomisern.

Fördelen jämfört med ång- och luftsotning är att ytorna inte skärmar varandra på samma sätt. Däremot blir ytor som vätter neråt sällan träffade av kulor. Kamflänsekonomiser är inte lämpad för denna sotningsmetod då kulorna kommer att fastna i tubpaketen i hög utsträckning.

4.2.5 Slagsotning

Slagsotning innebär att ytorna som skall hållas rena sätts i vibration genom att slagor överför rörelseenergi till tubytorna. Vibrationerna gör att påslagen lossnar (se Figur 7) Slagsotning används oftast på tubpaket i avfallseldade rostanläggningar.



Figur 7. Principskiss över funktionen vid slagsotning.[13]

Figure 7. Schematic of the principles of a rapping cleaning system.

Det finns tre huvudsakliga varianter på slagsotningen, en rent mekaniska där slagorna sitter på en axel, när den roteras slår slagorna på en anslagpunkt på tubpaketen. I detta fall finns det en slaga per anslagsyta.

En annan variant är att slagan är monterad på en vagn som åker utmed pannväggen och slår på respektive anslagpunkt. Slagkolvén drivs oftast pneumatiskt i dessa fall. Denna variant ger större möjlighet till individuell styrning av slagsotningen på olika punkter.

Den sista varianten drivs pneumatiskt där det finns en kolv vid varje anslagsyta, där kan också i princip frekvensen på slagen vid varje anslagpunkt styras oberoende. Dock är dessa normalt sett indelade i olika banker som kör på samma schema.

4.2.6 Sprängsotning

Sprängsotning innebär att en sprängladdning detonerar i närheten av ytorna som skall hållas rena. Tryckvågen från explosionen avlägsnar påslagen.

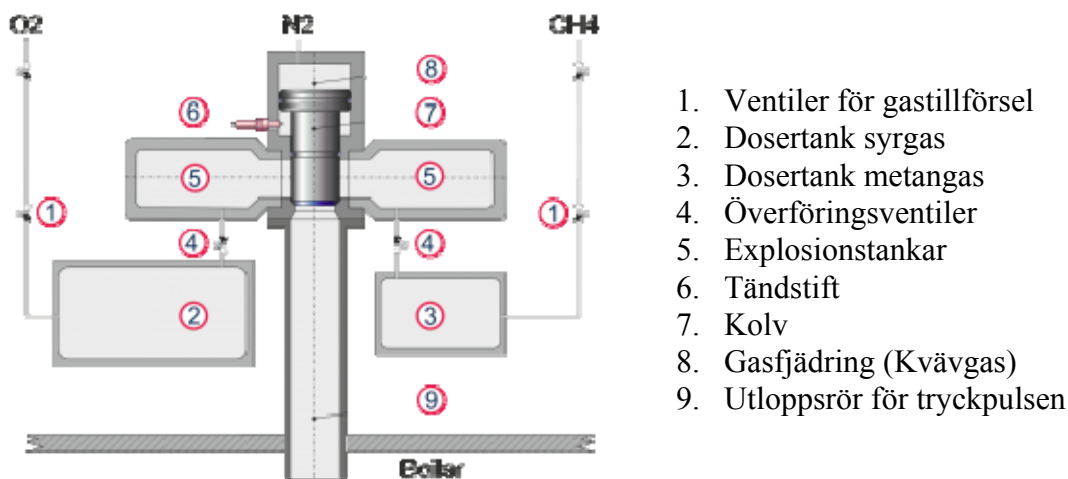
Sprängsotning är till skillnad från de övriga metoderna en tjänst som köps in när det är aktuellt. Den utförs manuellt. Sprängningen genomförs med dynamit eller gas som förs in i rökgasstråket med lansar. Åtkomsten begränsas av möjligheten att föra in dessa lansar, vilket innebär att antalet manluckor är en begränsande faktor. De påslag som bildas kan indelas i de som går att ta bort med det ordinarie sotningssystemet och de

som inte går att ta bort med dessa sotsystem. De senare blir till slut så besvärliga att de måste tas bort. Sprängsotning är då en möjlighet som inte kräver att man stänger ner anläggningen. Det kan bli aktuellt några gånger per år.

4.2.7 Fast monterad sprängsotning

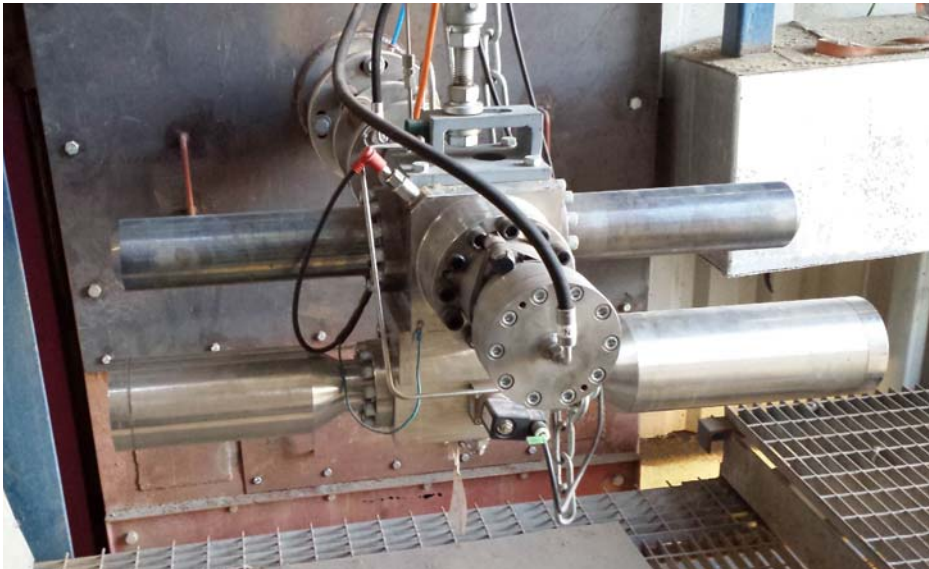
Fast sprängsotning innebär att en anordning har fast monterats för att skapa en explosion i närheten av ytorna som skall hållas rena. Tryckvågen från explosionen avlägsnar påslagen.

En blandning av syrgas och naturgas, alternativt metangas, blandas och antänds med ett tändstift (se Figur 8). För modellen EG10 är mängderna 13 g metan och 45 g syre och trycket före antändning ca 30 bar. Vid antändningen fås en expansion och trycket stiger till 350-400 bar varvid kolven automatiskt pressas tillbaka och tryckvågen styrs via ett utloppsrör in i pannan. Tryckvågen expanderar först linjärt och sedan sfäriskt och får tubpaketen att vibrera och en mekanism liknande den från slagsotningen uppnås. Tryckvågen kan täcka ett avstånd av ca 10 meter. Sotningsfrekvensen styrs individuellt per panna men maximalt frekvens per explosionsgenerator är 4 explosioner per timme. Ett exempel på installation visas i Figur 9.



Figur 8. Principskiss för en explosionsgenerator (EG 10, EG10L).[14]

Figure 8. Schematic for explosion generator (EG 10, EG10L)



Figur 9. Fast monterad sprängsotare vid Kils energi

Figure 9. Explosion generator (EG 10) installed at Kils Energi

4.2.8 Ljudsotning

Ljudsotning innebär att ljud med kraftig ljudstyrka och anpassad frekvens sprids i närheten av ytorna som skall hållas rena. Ljudvågorna överför den energi som avlägsnar påslagen. Ljudsotningen sker under ganska täta intervall, där gångtiden är några sekunder följt av en paus på några minuter.

Placeringen av ljudsotningen är mindre känslig än för ång-, luft- och sprängsotning eftersom ljudvågorna sprider sig längre än t.ex. ånga. Speciellt gäller detta infraljud vilket är det vanligaste ljudsotningsmetoden idag. Oftast är syftet att ta bort beläggningar från tubpaket. Enklast att avlägsna för ljudsotning är torra beläggningar, d.v.s. typiskt sådana som bildas i ekonomisern.

5 Erfarenheter av sotning

I undersökningen ingick 28 anläggningar fördelade på tio operatörer. De flesta anläggningarna använder olika typer av avfall som bränsle men några biobränsleanläggningar är också med. Det relativt stora antalet anläggningar inbjuder till statistiska analyser. Exempelvis skulle man kunna undersöka eventuella samband mellan resultatet av sotningen och bränsletyp. Detta har inte gjorts i det föreliggande projektet eftersom det inte ingick i uppgiften. En sådan analys försvåras också av det faktum att antalet parametrar som påverkar sotningsresultatet är mångfalt större än de huvudparametrar som här används för att beskriva anläggningarna. Huvudparametrarna är sotningsmetod, anläggningens storlek, anläggningstyp och bränsle. Sotningsmetoderna är de ovan uppräknade (avsnitt 4.2). Anläggningstypen är antingen rost eller fluidbädd. Bränslet är antingen biobränsle eller avfall. Detta går att strukturera på olika sätt, men här presenteras sotningsmetoderna var för sig. För envar av dessa finns alltså teoretiskt fyra kombinationer av anläggningstyp och bränsle såsom illustreras i Figur 10 där anläggningarnas totaleffekter angivits. I figuren är ett par anläggningar inte med eftersom de inte gick att klassa som antingen avfalls- eller biobränsleanläggning. Vissa sotningsmetoder förekommer inte i vissa anläggningstyper.

rost	2x60MW 85 MW 32,5 MW	2x12,4 MW 43 MW 21,6 MW 2x33 MW 75 MW 17 MW 2x30,5 MW 68 MW 55 MW
fluidbädd	110 MW B 100 MW C	2x20 MW B 75 MW C 85 MW C 8 MW B 14 MW B 2x20 MW B 97,5 MW B
	biobränsle	avfall

Figur 10. Anläggningarnas storlek uppdelade i kombinationer av anläggningstyp och bränsle. B = bubblande, C = cirkulerande.

Figure 10. The sizes of the facilities sorted into combinations of type and fuel. B = bubbling, C = circulating.

Erfarenheterna kan för varje sotningsmetod indelas i *Effektivitet*, *Driftproblem*, *Underhåll* och *Justering*. *Effektivitet* är hur väl sotningsmetoden tar bort påslag. *Driftproblem* är avvikelser från den avsedda funktionen. *Underhåll* är arbete som utförts

för att motverka driftproblem. *Justering* är arbete som utförts för att förbättra effektiviteten. Resultaten nedan är sammanfattade i Bilaga B.

5.1 Ångsotning

Ångsotning förekommer i elva anläggningar (av 28) varav två biobränsleeldade.

5.1.1 Effektivitet

Generellt fungerar ångsotning men den har ofta smärre brister som avhjälpas på olika sätt. Typiskt är att ångblåsningen inte når in i tubpaketen varvid delar av påslagen inte avlägsnas. En annan brist är att vissa beläggningar blir så beständiga att de inte går att få bort med ångsotningen. I biopannor är funktionen bättre än i avfallspannor, men extra rengöring någon gång per år kan krävas. I avfallspannor har man p.g.a. bränslet oftast besvärligare påslag. Det har avhjälpits genom att kombinera ångsotningen med sprängsotning vid valda tillfällen.

5.1.2 Driftproblem

När ångsotningen är igång är det ett avsteg från ordinarie drift i det att ånga tas från vattensidan och blåses in i rökgaserna. Denna förändring är momentan och kan i vissa anläggningar kräva att man parerar driften genom att exempelvis sänka lasten. Ett typiskt problem med ångsotning är materialavverkning. Orsakerna till materialavverkningen kan vara flera. En är att ångflödet helt enkelt är så kraftigt att stålet i tuberna avverkas. En annan är om det förekommer vattendroppar i flödet, vilket inte är helt ovanligt vid starten av sotningen. För att undvika avverkning kan skyddsplåtar sättas på de mest utsatta tuberna. För att undvika droppar i sotången värms lansen innan den förs in för att undvika kondensation, och den monteras så att kondensat ska kunna evakueras innan sotningssekvensen påbörjas.

Ett annat problem är att ånglansarna kärvar och t.o.m. fastnar. Då upphör givetvis funktionen hos sotaggregatet och ångan riskerar att blåsas på ett och samma ställe under en lång tid vilket leder till kraftig materialavverkning. Det har också hänt att lansar har varit felriktade och att ångventiler inte öppnat sig med nedsatt eller utebliven funktion som följd. I något fall har det varit för lite stöd för lansarna så de har krökts av egenvikten.

5.1.3 Underhåll

Bedömningarna har varierat från "oftast lättskötta problem" till "mycket ombyggnadsarbeten". Spridningen i omdömen kan bero på att sotaggregatens ålder sträcker sig från över 20 år i vissa anläggningar till nästan nya i andra. Det är självklart att äldre aggregat kräver mer underhåll och byten av delar än nya. I flera anläggningar läggs betydande mantid på att underhålla sotaggregaten och skyddsplåtar på tuber.

5.1.4 Justering

För att bli av med vattnet i systemet, och sålunda minska risken för vattendroppar i ångflödet, har dräneringstiden förlängts, även uppvärmningstiden före sotningssekvensen har förlängts i vissa fall. I detta syfte har även arbete med noggrann

inställning av tryck och temperatur genomförts. För att minska tubslitage har ångsotningen justerats så att ånglansen startar på olika ställen, detta eftersom eventuella vattendroppar kommer i början av sotingscykeln. Det sprider slitaget på ångtuben över en större yta vilket minskar risken för tubbrott.

Eftersom ångsotning förbrukar ånga och tubmaterial så är det viktigt att inte sota för ofta. Normalt blåses ånga både när lansen är på väg in och när den är på väg ut. Det betyder att samma yta bestryks med ånga två gånger under en kort tid. Om en stor del av påslagen avlägsnades vid den första av dessa så blir den andra mindre värdefull. Därför har en justering gjorts som innebär att ånga blåses endast ena vägen. Det sparar både ånga och tubmaterial.

Det kan också vara onödigt att sota om det inte finns påslag. Därför har justering av sotningsfrekvensen – d.v.s. hur ofta ångsotningen körs – gjorts med hänsyn till rökastemperaturen. Det kan t.ex. vara så att man efter en rengöring vid stopp kan dra ner från 4 till 3 gånger/dygn för att sedan höja frekvensen under eldningssäsongen. Ekonomin i denna typ av behovsstyrd sotning har diskuterats.[4][16]. Det finns även de anläggningar som endast kör sotningssekvensen någon gång i veckan i ekopaketen just för att undvika onödig materialavverkning.

I ett fall har även sotningsfrekvensen minskats för att ytorna blivit för rena så att ångtemperaturen blir för hög.

Som nämnts ovan har ångsotning i flera fall kompletterats med annan sotningsmetod. Även då har sotningsfrekvensen kunnat minskas.

5.2 Vattensotning

Vattensotning förekommer i 8 (av 28) anläggningar som alla förbränner avfall.

5.2.1 Effektivitet

Generellt fungerar vattensotning och den används främst i eldstad/tomdrag. Funktionen riskerar dock att utebli där vattnet inte träffar, men eftersom vattensotning vanligtvis sker genom att en slang som sänks ner i tomschaktet så är systemet mer flexibelt avseende träffytan än ett system med fasta lansar som vid ångsotning. Det kan hända att askan klibbar ihop av vattnet vilket försvårar askans borttagning, utmatning och vidare transport. Några samband mellan effektivitet och anläggningstyp har inte uppdagats.

5.2.2 Driftproblem

Vattensotning förekommer i halvautomatiska och manuella versioner. Båda versionerna tar uppemot en hel dag att genomföra och den manuella kräver en betydande arbetsinsats. Det ovan nämnda problemet med klibbig aska kan innebära att man måste dela upp sotningen av ett visst objekt vilket kan vara ineffektivt.

Som alla sotningsmetoder som inte körs dagligen riskerar den askmängd som avlägsnas bli så stor att befintliga utmatningssystem inte räcker till.

I de halvautomatiska vattensotningssystemen har problem observerats med själva automatiken, det har oftast handlat om att systemet trippat under initialisering och internkalibrering vilket kräver att man manuellt får återstarta det. I något fall har tillgängligheten sjunkit till 50 %.

Det har hänt att slangen brunnit upp vilket får antas bero på att vattenflödet av något skäl blivit för lågt för att kyla slangen.

Vattensotningen kan påverka driften så att lasten ibland måste sänkas, vilket kan vara ett problem eftersom sotningen tar flera timmar.

5.2.3 Underhåll

Typiska insatser är slangbyte någon gång per år samt rengöring av dysor. Akuta underhållsinsatser har varit mycket förekommande i något fall. Något förebyggande arbete har dock inte gjorts.

5.2.4 Justering

Olika storlekar på dysor har testats för att få så bra täckning som möjligt på de ytor som ska sotas.

5.3 Luftsotning

Luftsotning förekommer i två (av 28) anläggningar varav en som förbränner RT och biobränslen och en som förbränner kol. Det finns ytterligare en bioanläggning som använder luft för sotning av katalysatorn.

5.3.1 Effektivitet

I biopannor av fluidbäddtyp har luftsotningen fungerat precis vid dysorna men spridningen har inte varit tillräcklig varför avlägsnandet av påslag varit alltför lokal. I avfallspannor har luftsotningen fungerat bra utom i kamflänsar i ekonomisern.

5.3.2 Driftproblem

Materialavverkning har rapporterats.

5.3.3 Underhåll

Väldigt lite underhåll har rapporterats.

5.3.4 Justering

Inga justeringar har rapporterats.

5.4 Kulsootning

Kulsootning förekommer i sex (av 28) varav en som eldar biobränsle. Kulsootningen används främst i ekonomiser- och konvektionsdelen av pannan.

5.4.1 Effektivitet

Kulsotning fungerar bra i biopannor och i de flesta fall även i avfallspannor av rosttyp. I något fall används kulsotning parallellt med ljudsotning med gott resultat. Sammantaget rengör kulsotning bra när den fungerar.

5.4.2 Driftproblem

I något fall har inga driftproblem rapporterats men det är inte ett representativt fall. Typiska problem är hög ljudnivå, läckage av stoft, och transporten av kulorna. Om vatten kondenserar på kulorna kan de klumpa ihop sig och bli svåra att transportera. I något fall har kulor följt med till slangfiltret och orsakat problem. I avfallspannor av rosttyp har kulornas bristande transporterbarhet lett till dålig tillgänglighet. Man har även haft problem med hållbarheten hos kulornas transportkanaler.

5.4.3 Underhåll

Underhållet är i stort sett knutet till kulornas transport. Kulor förbrukas och måste mer eller mindre kontinuerligt fyllas på. Delar som slits måste bytas. Speciellt skruvar har utsatts för slitage men även tätande delar har måst bytas. Underhållskostnaderna uppfattas som höga. Det kan dock till viss del också kopplas till att det i flera fall är gamla anläggningar där underhållsbehovet ökat med tiden.

5.4.4 Justering

Sotningsfrekvenser har justerats. Det är viktigt i sig men särskilt betydelsefullt när det gäller att nå en balans mellan två sotningsmetoder. I detta fall har kulsotning och ljudsotning balanserats. Kulornas material har bytts från stål till aluminium.

5.5 Slagsotning

Slagsotning förekommer i sju anläggningar (av 28) som alla förbränner avfall. Främst används slagsotning i rostpannors horisontella konvektionsdelar.

5.5.1 Effektivitet

I avfallseldade anläggningar fungerar slagsotningen men ofta krävs ytterligare åtgärder såsom sprängsotning. Orsaken har bl.a. varit att slagsotningen varit för klen. Effektiviteten kan också minska med tiden p.g.a. att slaget blir stumt.

5.5.2 Driftproblem

Slagsotningens funktion är ganska enkel men krafterna är stora. Typiska problem är bultar som släpper eller t.o.m. går av, eller slagor som ramlar ner. Det kan uppstå glapp i slagornas armar. Med tiden kan själva slaget bli stumt, vilket kan bero på att aska ansamlats mellan slaga och slagstift.

5.5.3 Underhåll

Underhållsarbetet ökar med stigande ålder på utrustningen. Olika kontroller har därför schemalagts för att förekomma problem. Det mesta klarar anläggningen av att hantera själv. Då sotningssystemet varit för klen har vissa konstruktioner helt enkelt byggts om.

5.5.4 Justering

Den enda justering som rapporterats är att paustiderna mellan sotningar minskats när temperaturen på rökgaserna stiger. En temperaturökning är en indikation på att påslagen är mer omfattande.

5.6 Manuell Sprängsotning

De flesta avfalleldade anläggningarna använder sprängsotning. Det är en inköpt tjänst som behövs när de fasta sotsystemen inte förmår ta bort påslagen.

5.6.1 Effektivitet

Sprängsotning tar för det mesta bort beläggningarna. De två typerna av sprängladdning – dynamit och gas – har befunnits likvärdiga. Endast i bioeldad BFB har rapporterats att sprängsotningen misslyckats med att ta bort beläggningarna.

5.6.2 Driftproblem

Eftersom sprängsotning är en tjänst som köps in när påslagen nått en viss tjocklek så blir det lätt mycket som lossnar på en gång när sotningen startar. Det kan bli för mycket aska för askutmatningen, bulkbilen och annan utrustning för asktransport. De ballonger som används vid sprängsotningen med gas kan också fastna i askutmatningen. Det har rapporterats tubbrott som dock inte säkert kan knytas till sprängsotningen. Viss utrustning, såsom syremätare, har visat sig inte klara sprängsotningen varför den numera monteras ned när det är dags för sotning.

5.6.3 Underhåll

Eftersom sprängsotning är en inköpt tjänst så sker inget underhåll. Det är heller ingen metod som man baserar den löpande sotningen på utan snarare en metod som används då påslagen inte går att sota bort med ordinarie system.

5.6.4 Justering

Det som kan justeras enklast är hur ofta man sprängsotar. Det har prövats både att öka frekvensen med ett sotningstillfälle per år och att genomföra förebyggande sotning. Dessa åtgärder syftar till att minska askbelastningen. Även att sprängsota inför revisionsstopp har rapporterats. Syftet med det är inte minst att skapa en bättre arbetsmiljö för dem som senare skall gå in och arbeta i pannan.

5.7 Fast sprängsotning

Fast sprängsotning förekommer i tre (av 28) anläggningar som alla förbränner avfall. Installationerna har främst skett i överhettarregionerna. I ett fall är det en hetvattenpanna och då är de i de varmare delarna i konvektionsdelen som aggregatet monterats. Metoden är relativt ny på marknaden och långvariga erfarenheter finns därför inte.

5.7.1 Effektivitet

I avfallseldad rostpanna har ljudsotningen fungerat bra trots att placeringen av praktiska skäl varit icke optimal. Även i BFB har den fungerat bra i närområdet medan beläggningar bygger på utanför tryckzonen.

5.7.2 Driftproblem

Det har funnits brister i regleringen och tryckreduceringen av gasen. Någon gång har explosionen uteblivit av okänd anledning. Även läckage har rapporterats. Slitaget på ventiler/säten har varit högre än vad leverantören utlovat. Detta har hittills dock åtgärdats som garantiåtgärder.

5.7.3 Underhåll

Tändstift som är att betrakta som förbrukningsvara måste bytas. Murverk på manlucka har lagats till följd av sprängsotningens verkan.

5.7.4 Justering

Trycket på gasen har sänkts utan att effekten minskat. Leverantören har också börjat analysera data från utrustningen på regelbunden basis för att förutse och förekomma driftproblem.

5.8 Ljudsotning

Ljudsotning förekommer i sju (av 28) anläggningar varav en är bioeldad. Ljudsotning används oftast i ekonomisern.

5.8.1 Effektivitet

Ljudsotning anskaffas idag ofta till en redan existerande anläggning i syfte att komplettera eller ersätta ett gammalt sotningssystem och förhoppningsvis få en bättre ekonomi. I bioeldad CFB har ljudsotningen ersatt en ångcykel per dygn vilket motsvarar 1/4-1/3 av ångsotningen. I avfallseldade BFB-pannor har rapporterats att ljudsotningen inte ensam klarar sotningen; det blev snarare 50 % effekt än 90 %. I rosteldad avfallspanna fungerar ljudsotningen tillsammans med kulsotningen. I avfallseldad CFB har ljudsotningen fungerat bra.

5.8.2 Driftproblem

Det har rapporterats buller och vibrationer. Ljudet som skall avlägsna sotet är inte hörbart eftersom det oftast är fråga om infraljud. Dock ger aggregatet upphov till ett kraftigt brummande under de sekunder då det verkar. Ljudet är i sig inte obehagligt men bidrar till en redan bullrig miljö. Vibrationer kan vara störande för känslig utrustning, såsom instrument, och allt som inte sitter fast. En O₂-mätare har bytts för att elektroniken inte klarade skakningarna. Ett antal plåtar och dylikt har skruvats fast för att inte skaka. I något fall har ett membran lossnat och fastnat på annan plats i rökgaskanalen. Utöver tryckluft till själva ljudstöten används tryckluft till kylning. Det har visat sig gå åt större mängder tryckluft än väntat till denna kylning.

5.8.3 Underhåll

Erfarenheterna av underhåll varierar från mycket lite till mer än väntat. Utöver byte av slitdelar ett par gånger per år så har det rapporterats sprickor i infästningar.

5.8.4 Justering

Denna sotningsmetod kräver specialkunskaper för att justera. Det som bl.a. justeras är ljudets frekvens samt paus- och gångtid. Dessa justeringar utförs normalt av leverantören.

6 Byte av sotningssystem i Idbäcken

Detta avsnitt är en förkortad version av Vattenfall R&D:s rapport som återfinns i Bilaga C.

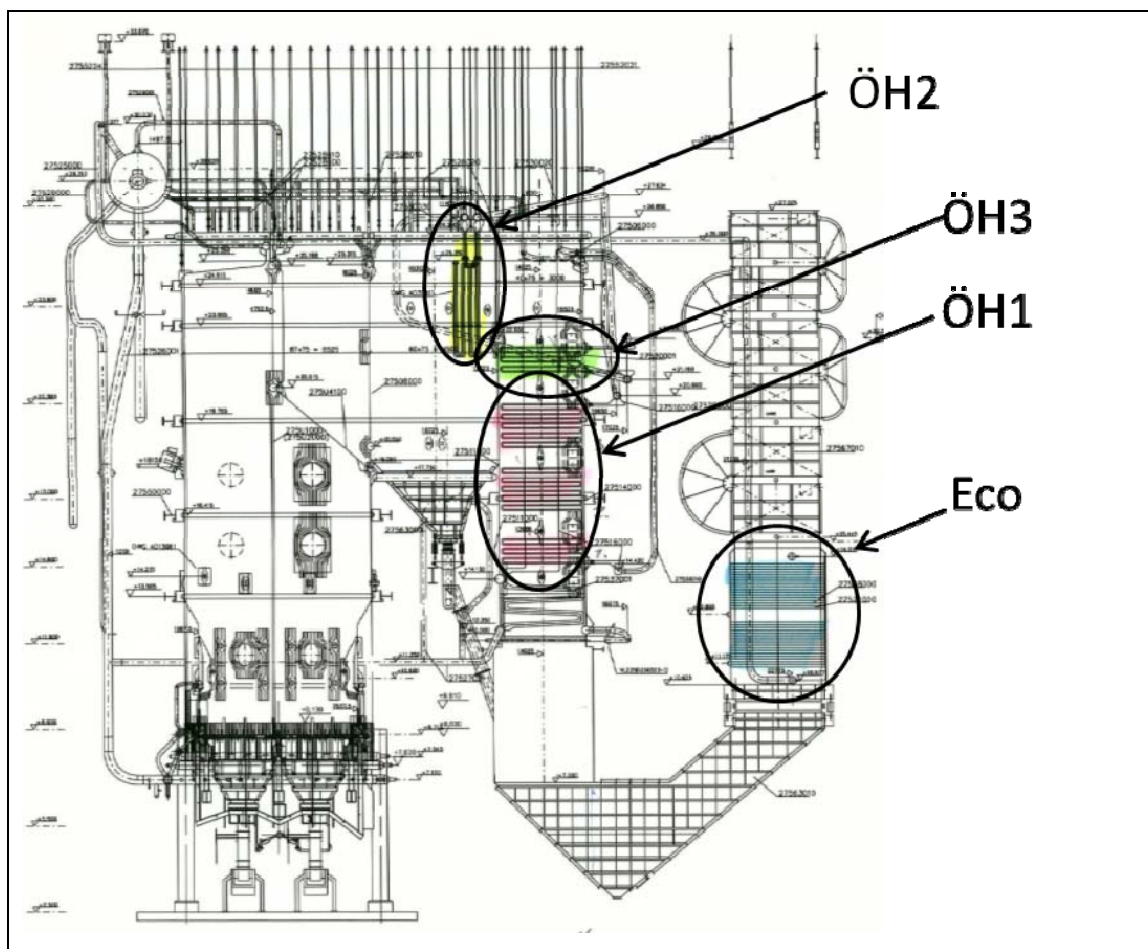
P.g.a. ökade problem med sotning och sotblåsare under senare år i Idbäckens kraftvärmeverk installerades under 2012 ljud- och sprängsotningsaggregat. Kostnaderna som orsakades av problemen uppskattas till 5-10 MSEK/år. Den största kostnaden är otillgängligheten. Med det nya systemet har driftkostnaderna sjunkit drastiskt. De nya systemet har dock krävt en hel del injustering innan funktionen har blivit tillfredsställande. I detta avsnitt beskrivs erfarenheterna av de nya systemen, samt redovisas en modell för jämförelse mellan de olika sotsystemens effektivitet. För utförligare beskrivning hänvisas till Bilaga C.

6.1 Bakgrund

Under de senaste åren har Vattenfalls biobränsleeldade anläggningar ökat andelen besvärliga bränslen, t.ex. olika typer av returträ. Detta har orsakat ökad beläggingsbildning på värmeöverförande ytor i pannorna, vilket i sin tur har lett till ökade krav på väl fungerande sotning, för att ta bort beläggningarna. Man har dock under senare år kunnat iaktta ett ökande antal av haverier på sotblåsare och haverier orsakade av sotblåsare. I Idbäckens kraftvärmeverk har felaktiga sotblåsare orsakat ett stort antal pannstopp under 2010-2012, vilket har lett till kostnader på 5-10 MSEK per år. De flesta stopp har berott på tubläckor orsakade av trasiga sotblåsarlansar. De trasiga lansarna har lett till otillräcklig rengöring och tjocka avlagringar har då orsakat igensättningar. Detta leder i sin tur till lokalt höga rökashastigheter, vilket orsakar erosionsskador på tuberna. När tuberna har gått sönder har ånga från tuberna i flera fall blåst hål genom panelväggen. Dessa problem ledde till att man bestämde sig för att byta ut sotblåsningssystemet mot ett system med explosions- och sprängsotning 2012.

6.2 Idbäcken P3

Placeringen av överhettare och ekonomiser i Idbäcken P3 visas i Figur 11. Överhettarnas placering i rökgasriktningen är i följande ordning: överhettare 2 (ÖH2), överhettare 3 (ÖH3) och överhettare 1 (ÖH1).



Figur 11. Skiss av Idbäcken P3 med placering av överhettare och ekonomiser

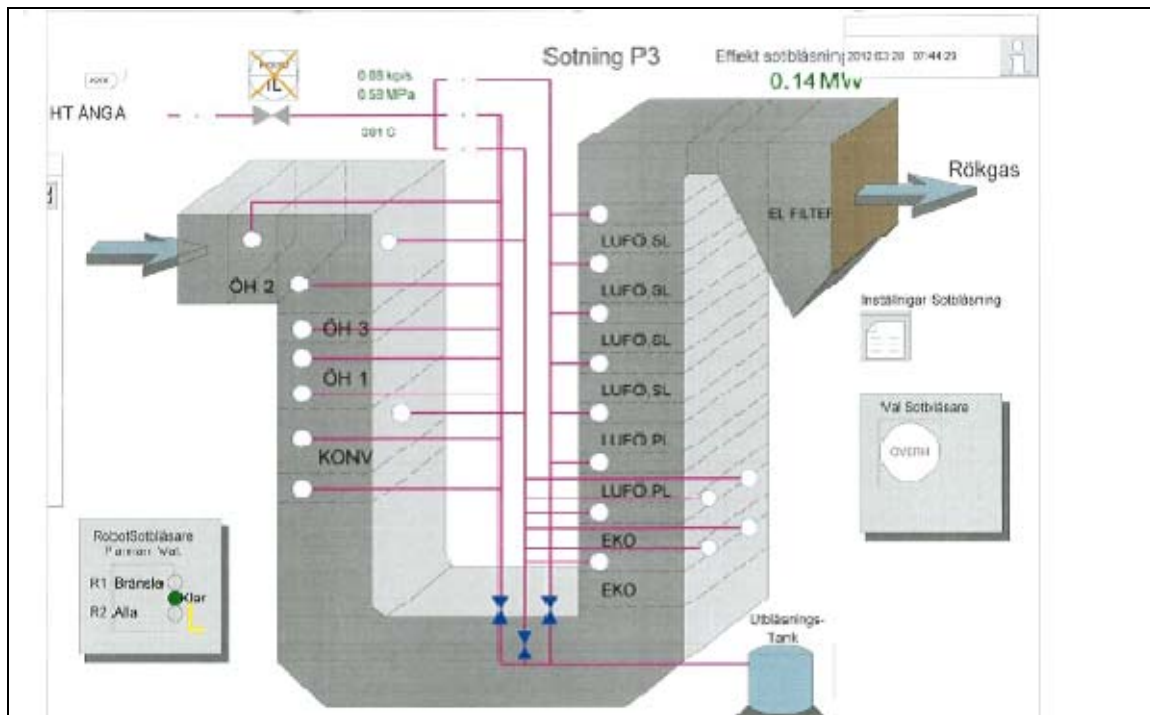
Figure 11. Schematic of Idbäcken P3 with superheaters and economiser.

6.3 Beskrivning av sotningssystemen

6.3.1 Ångsotningssystem fram till 2012

Det gamla ångsotblåsningssystemet kom från Diamond och bestod av ett ångsotblåsningssystem för de konvektiva delarna och ett vattenkanonsystem för eldstaden. Figur 12 visar ångsotblåsningssystemet för överhettare, ekonomiser och luftförvärmare. För de konvektiva delarna (överhettare, ekonomiser, luftförvärmare) var totalt 21 ångsotblåsare från Diamond installerade. Ångsotningen genomfördes i en sekvens som började med överhettarna, följt av ekonomiser och sist luftförvärmare, tre gånger per dag. Systemet bestod av:

- Lång icke utdragbar sotblåsare i den kallaste delen av överhettarna (ÖH1)
- Lång utdragbar sotblåsare i den varmaste delen av överhettarna (ÖH 2 och ÖH3)
- Kort utdragbar sotblåsare (delvis utdragbar) i ekonomiser



Figur 12. Det gamla ångsotblåsningssystemet med ångsotare för ekonomiser, luftförvärmare och överhettare 1, 2 och 3.

Figure 12. The old soot blowing system with steam blowers for the economiser, air preheater and superheater 1, 2 and 3.

Underhåll planerades av anläggningen och utfördes av MIBS (Malungs Industri och Byggservice). Idbäcken anser att underhållsarbetet var ett ganska enkelt arbete. Arbetet skulle kunna ha utförts av Diamond, men det ansågs inte nödvändigt att betala för deras dyrare service, när andra företag kunde göra samma sak.

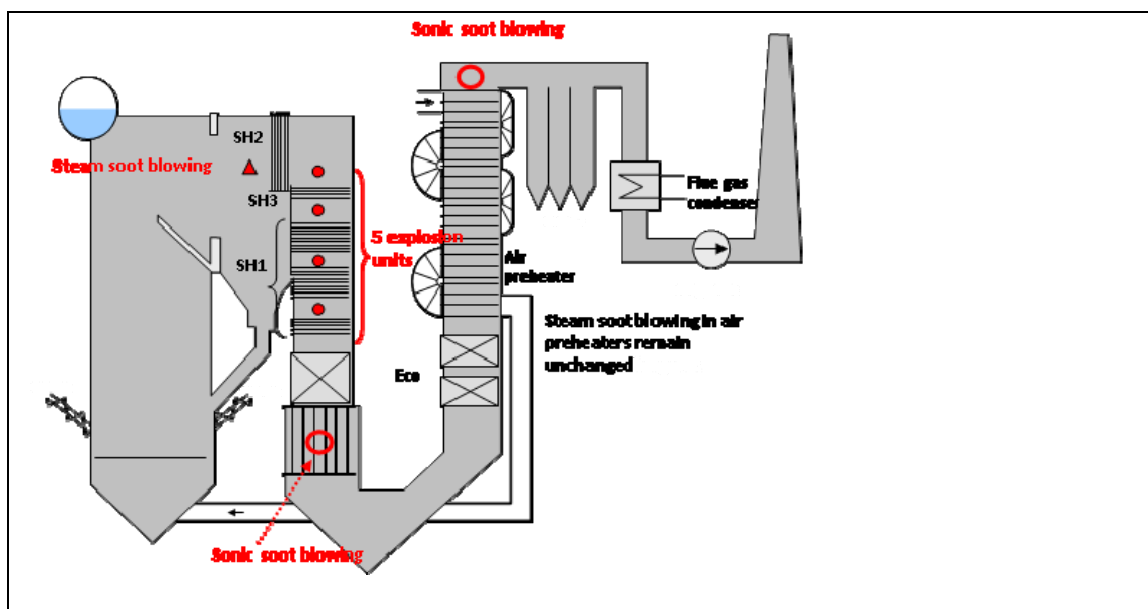
Man hade ofta problem orsakade av trasiga sotblåsare. Detta orsakade erosion och beläggingsbildning. Erosion av tuberna kan ha orsakats av kondensatdroppar i ångan från sotblåsarna eller att riktningen på ångan inte var optimerad. Det fanns ett avlopp, som skulle dränera bort kondensatet, men det blev lite kondensat kvar.

Sotblåsarhaverier ledde till att beläggningar inte togs bort i tillräcklig utsträckning, vilket ledde till igensättningar av rökgaskanalen. Rökgashastigheterna i de igensatta delarna ökade och detta ledde till erosion av tuberna. Ett av problemen som man upplevde med ångsotning var att man inte kunde veta när den inte fungerade.

6.3.2 Nytt sotningssystem från 2012

Det nya sotningssystemet visas i Figur 13. Fem explosionsgeneratorer installerades i överhettardraget under sommaren 2012. De installerades över och mellan sektionerna för ÖH 1 och ÖH3 i hålen där det tidigare satt ångsotarlansar. Tryckvågor sänds från

båda sidor av pannan. Det är totalt fem enheter. Två stora enheter (Explosion Power EG10L) sitter högst upp och längst ner (vid ÖH3 och mellan den första och den andra sektionen av ÖH1). De tre enheterna i mitten är mindre (Explosion Power EG10). Explosioner äger rum var 12:e minut och genomförs i en sekvens som börjar med de övre enheterna och fortsätter nedåt. Leverantör var AB Sprängsotning. (Idag är alla av modell Large utom den nedersta, from jan 2014).



Figur 13. Det nya sotningssystemet, med ljudsotning för ekonomisern och sprängsotning för ÖH1 och ÖH3. Hela ÖH 2 togs bort under säsongen 2012/2013.

Figure 13. The new soot blowing system with sonic soot blowing for the economiser and explosion soot blowing for superheater 1 and 3. Superheater 2 was removed 2012-2013.

Två infraljudsenheter installerades, en i det gamla katalysatorhålet och en ovanför luftförvärmaren. Infraljudssotningen körs var 45:e sekund i tre sekunder. Leverantör var Infracore.

Ångsotblåsarna i luftförvärmaren har inte tagits bort och används när ljudenheterna inte fungerar som de ska. Före ÖH2 sitter fortfarande en ångsotare kvar, men sedan ÖH2 har tagits bort finns inte längre något behov av att sota i denna position och sotblåsaren kommer att tas bort.

6.3.2.1 Erfarenheter av sprängsotningen

- Under de första veckornas drift gjordes en intrimning av systemet och sotningsintervallen justerades.
- Mikrofonen flyttades för att bättre ta upp ljudet av explosionerna. Den används för att indikera om en explosion äger rum eller inte.
- Det uppstod ett läckage och gasen tog slut utan att det upptäcktes. Numera kontrolleras att man inte har några läckor varje skift.

En av explosionsenheterna var till en början felriktad, vilket ledde till att den blåste hål på den nya ÖH1. När enheterna monterades hade man inte tagit tillräcklig hänsyn till pannans expansion av den nedre installationen. Av denna anledning hade sotaren mellan sektion 1 och 2 i ÖH1 blivit felriktad och explosionskraften riktades mot överhettartuberna som gick sönder. Enheterna som sitter högre upp i pannan tycks inte ha samma problem. Detta kan bero på att effekten av pannans expansion är störst längst ner (där ÖH1 sitter) eftersom det är en hängande konstruktion.

6.3.2.2 Drift av Sprängsotningen

Explosionsstotarna kontrolleras för läckor en gång per skift. Om en läcka upptäcks åtgärdas den av leverantören inom ca 20 timmar. Mikrofonen som indikerar om det har skett en explosion eller inte kontrolleras också varje skift.

Efter intrimningsperioden har sprängsotningen fungerat ungefär 80-90% av tiden. De flesta stoppen har orsakats av att man har behövt byta gasflaskor och/eller packningar. Vid några tillfällen har man fått vänta på delar för reparation i flera dagar, vilket är alldeles för lång tid att stå utan sotblåsning.

Det har varit stora skillnader i tillgänglighet mellan de olika enheterna och några har haft lägre tillgänglighet än vad som är acceptabelt. Av denna anledning har AB Sprängsotning tagit fram en handlingsplan. I planen ingår byten av en del hårdvara, men framförallt har man infört loggning av enheterna. Gastryck och andra mätningar loggas och sparas på ett minneskort, som skickas en gång i veckan till Sprängsotning AB. Trender för mätningarna följs och detta ska ge en indikation på om en enhet försämras, så att åtgärder kan sättas in innan den går sönder. Tidigare gavs ingen indikation innan enheten gick sönder och stannade. Vid fel larmade enheten och personalen på Idbäcken ringde AB Sprängsotning, så att de kunde komma och reparera enheten.

Efter 3 000 explosioner för en enhet ska ventilen och sätet bytas. Detta sker ungefär en gång per eldningssäsong. Ju tätare intervall mellan explosionerna, desto mer ofta måste bytena göras. (Den schweiziska tillverkaren håller på att utveckla nya ventiler/säten som ska nå 5000 explosioner innan byte sker.)

Sotningsfrekvensen för explosionsenheterna ändrades efter julstoppet 2012. Frekvensen för de två övre enheterna ökades till var trettionde minut, tidigare kördes de var sextionde minut. Detta gjordes för att man under stoppet hade sett att det hade byggts upp påslag, dock inte lika mycket som tidigare, med ångsotning. De övriga enheterna körs fortfarande var sextionde minut.

(Anm: Idag, maj 2014, verkar det som de 2 lägre kan ställas in på varannan timme, och de 3 övre (Large) på 60 min intervall. Det är mindre beläggningar i de nedre regionerna och mer i ÖH 3, och övre del ÖH1.)

Enheterna körs sekventiellt, med 12 minuter mellan explosionerna för de olika enheterna. Efter frekvensökningen för de två övre enheterna är det två enheter som körs nästan samtidigt en gång per cykel.

Inför kommande säsonger kommer ett serviceavtal att skrivas med AB Sprängsotning. De tre enheterna i mitten kommer också att uppgraderas till större enheter, då man observerat att dessa ger en bättre rengöringseffekt.

6.3.2.3 Erfarenheter av ljudsotningen

Två enheter för infraljudssotning har installerats, en i det gamla katalysatorhålet och en ovanför luftförvärmaren. Ljudsotningen körs var 45:e sekund i tre sekunder varje gång. Enheterna använder kompressorluft (5-7 bar) och har frekvenser mellan 16 och 32 Hz (infraljudsområdet).

En extra undersökning genomfördes av Infrafone för att fastslå vilka krav som behövde uppfyllas för installationen. Som ett resultat av denna genomgång installerades två extra lufttankar för att undvika dippar i lufttrycket.

Ljutfrekvensen behövde ställas in i början och detta var lite svårare än vad man hade förutsett.

Ljudsotningen fungerade inledningsvis inte tillfredsställande, i synnerhet inte den övre enheten. Tillgängligheten för denna enhet uppskattades till 60-70% före mars 2013 och i slutet av februari hade man extra mycket problem och en tillgänglighet på endast 50 %. Tillverkaren medgav ett tillverkningsfel och bytte ut sonarröret. Två luftslangar har bytts ut för att öka lufttrycket. Ljudgeneratoren har också satts fast på ett stöd. Sen mars 2013 fungerar systemet tillfredsställande.

Även den nedre enheten hade några stopp (2-3) på grund av att upphängningen gått sönder och att fjädrar har hoppat ur. Tillgängligheten uppskattades till 95 %.

Vid inspektion under rengöringsstoppet i början av mars 2013 kunde beläggningar ses i ekonomisern, men de var inte särskilt tjocka. Trots problemen med utrustningen visar de beräknade nedsmutsningshastigheterna (Se avsnitt 6.5.1) att ljudsotningen under 2013 gav bättre resultat än ångsotningen föregående säsong.

Vid tillfällen då ljudsotningen inte fungerade som den skulle, användes ångsotblåsarna i luftförvärmaren.

6.3.2.4 Drift av ljudsotningen

Service kommer att utföras av anläggningens personal för säkerställa att fullt lufttryck uppnås, samt att fjädrar och upphängning fungerar som de ska. Leverantören rekommenderar att man ska öppna och rengöra enheten var tredje månad och att man kallar in leverantören vid revisionsstopp

Ljudsotningen använder inte hörbart ljud, men infraljudet får isolationsplåtar och kringutrustning att vibrera vilket genererar ett ganska högt ljud. Dessutom leder vibrationerna till att skruvar och ventiler skruvas loss. Personalen på anläggningen har gått igenom pannan för att dra åt skruvar och ventiler. Detta kommer att ingå i de normala underhållsrutinerna.

6.4 Beräkningsmodell för värmegenomgångstal

När pannan är i drift kommer fina partiklar och kondensering av gaser att bilda beläggningar på de värmeöverförande ytorna i eldstaden och rökgaskanalen. Detta kommer att leda till en minskad värmeöverföring. Sotblåsningssystemet används för att ta bort dessa beläggningar och därmed återställa värmeöverföringen till sin ursprungliga nivå. Eftersom värmeöverföringen inte endast påverkas av avlagringar på ytorna, men också av variationer i bränsle och last har man i modellen som beskrivs nedan försökt

att normalisera de ekvationer som beskriver värmeöverföringen, för att minimera inverkan av variationer i bränsle och last.

För att beskriva hur effektivt sotblåsningssystemet tar bort beläggningar i panna 3 (P3) i Idbäcken har en modell som uppskattar värmegenomgångstalet UA [kW/K] för överhettarna och ekonomisern tagits fram. Den underliggande teorin som använts för värmeöverföringen beskrivs i Bilaga C. Värmegenomgångstalet UA_{act} [kW/K] har beräknats genom att dividera värmeenergin Q [MW] som överförs från rökgaserna till vattnet/ången med den logaritmiska medeltemperaturskillnaden (Log Mean Temperature Difference, $LMTD$) enligt ekvation 1. Detta har gjorts för överhettare 1 till 3 och för ekonomisern.

$$UA = \frac{Q}{LMTD} \quad \text{Ekvation 1}$$

Värmeenergin Q [MW] beräknas genom att multiplicera massflödet för vatten/ånga genom ekonomisern/överhettaren $\dot{m}$ [kg/s] med skillnaden i entalpi h [kJ/kg] för vattnet/ången mellan då det går in i och kommer ut ur ekonomisern/överhettaren enligt ekvation 2. Entalpin är en funktion h_{pt} av trycket p [MPa] och temperaturen T [°C] på vattnet/ången in och ut.

$$Q = \dot{m} \cdot (h_{pt}(p_{out} \cdot 10; T_{out}) - h_{pt}(p_{in} \cdot 10; T_{in})) \quad \text{Ekvation 2}$$

Det relativa värmegenomgångstalet beräknas genom att dividera den beräknade värmegenomgångstalet UA [kW/K] med ett uppskattat värmegenomgångstal UA_{clean} [kW/K] för rena ytor, enligt ekvation 3. Det relativa värmegenomgångstalet visar hur värmeöverföringen förändras över tiden, oberoende av bränsle och last.

$$\frac{UA}{UA_{clean}} = \frac{UA}{(a \cdot Q_{total} + b)} \quad \text{Ekvation 3}$$

Det uppskattade värmegenomgångstalet UA_{clean} [kW/K] för rena ytor beräknas med en linjär funktion av den totala värmeöverföringen Q_{total} [MW] med konstanterna a och b . De beräknade värdena för UA för låg last (<20 MW) uppvisar ett icke-linjärt beteende som skulle kräva mer komplexa modeller. En beskrivning av beräkningarna och de antaganden som använts för att uppskatta konstanterna a och b redovisas i B. Den resulterande UA_{clean} som funktion av Q_{total} presenteras i Figur 14 till Figur 17.

Den totala värmeöverföringen Q_{total} [MW] beräknas genom att multiplicera skillnaden mellan entalpin h [kJ/kg] för vattnet från matarvattentanken och ången som kommer från ÖH3 med flödet $\dot{m}_{MaVa}$ [kg/s], enligt ekvation 4.

$$Q_{total} = (H_{ut, \text{öh3}} - H_{MaVa}) \frac{\dot{m}_{MaVa}}{1000} \quad \text{Ekvation 4}$$

Konstanterna a och b för överhettare 1 till 3 och ekonomisern för Idbäcken Pc redovisas i Tabell 2 och Tabell 3.

Tabell 2. Konstanterna a och b för lastberoendet för UA under säsongen 2011-2012. Konstanterna används i en linjär ekvation som beskriver lastberoendet för värmeöverföringskoefficienten för rena ytor.

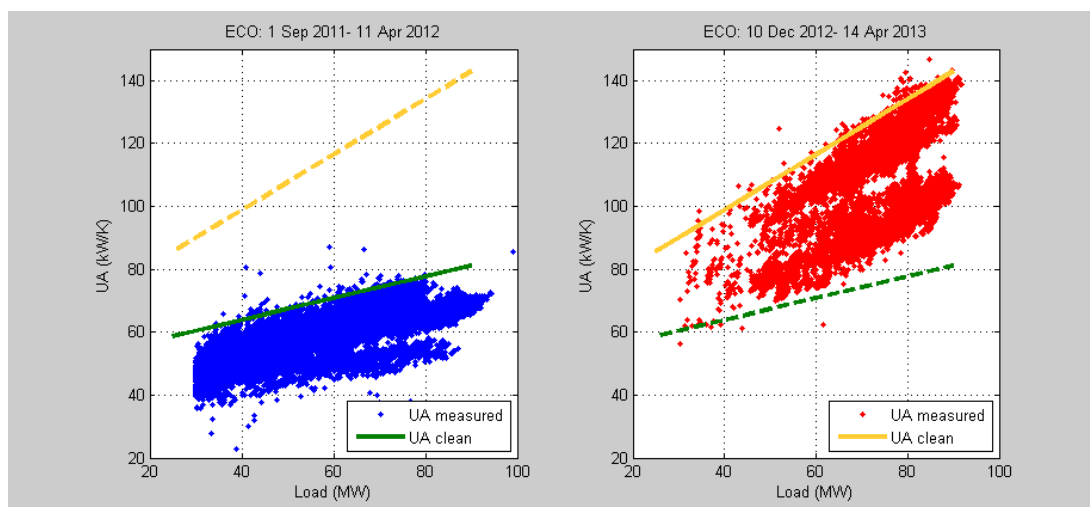
Table 2. The constants a and b for the load dependence of UA during the season 2011-2012. The constants are applied in a linear equation which describes the UA as a function of load when surfaces are clean.

Värmeöverförande yta	Konstant a	Konstant b
Ekonomiser	0,34	50
Överhettare 1	0,18	74
Överhettare 2	0	17
Överhettare 3	0,055	15

Tabell 3. Konstanterna a och b för lastberoendet för UA under säsongen 2012-2013. Konstanterna används i en linjär ekvation som beskriver lastberoendet för värmeöverföringskoefficienten för rena ytor. Ekonomisern har bytts ut mot en ny av annan typ. Jämfört med 2011-2012 har överhettare 1 bytts ut mot en ny likadan och överhettare 2 tagits bort.

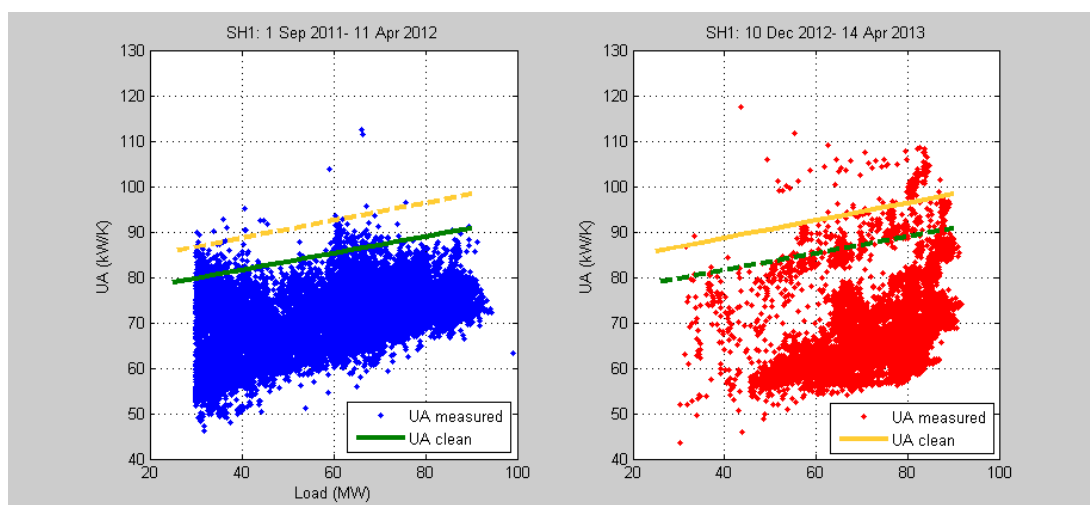
Table 3. The constants a and b for the load dependence of UA during the season 2012-2013. The constants are applied in a linear equation which describes the UA as a function of load when surfaces are clean. Compared with 2011-2012 the economiser and superheater 1 have been exchanged, and superheater 2 has been removed.

Värmeöverförande yta	Konstant a	Konstant b
Ekonomiser	0,88	63
Överhettare 1	0,19	81
Överhettare 2	--	--
Överhettare 3	0,03	15



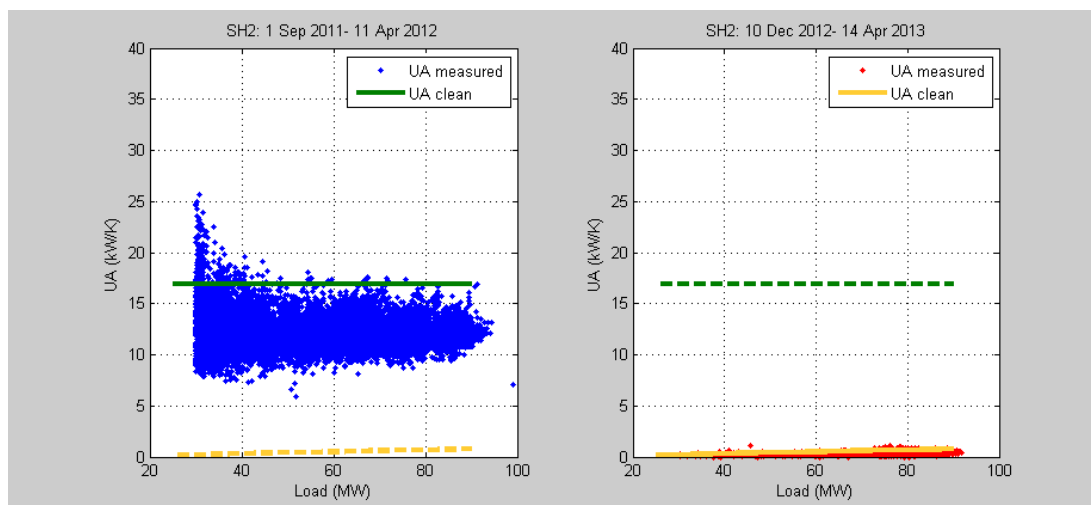
Figur 14. Värmegenomgångstalet UA (kW/K) för ekonomisern som funktion av den beräknade totala värmeöverföringen enligt ekvation 4 för Idbäcken P3. Vänster: mellan september 2011 och maj 2012, Höger: mellan december 2012 och april 2013. Den heldragna linjen är den uppskattade värmekoefficienten för rena ytor. (Den streckade linjen är för jämförelse mellan de två säsongerna.)

Figure 14. The overall heat transfer coefficient UA (kW/K) in the economiser versus calculated load according to equation 4. Leftmost diagram: December 2012-April 2013. The solid lines represent the estimated overall heat transfer coefficients with clean surfaces. The dashed lines represent the solid line in the other diagram for comparison.



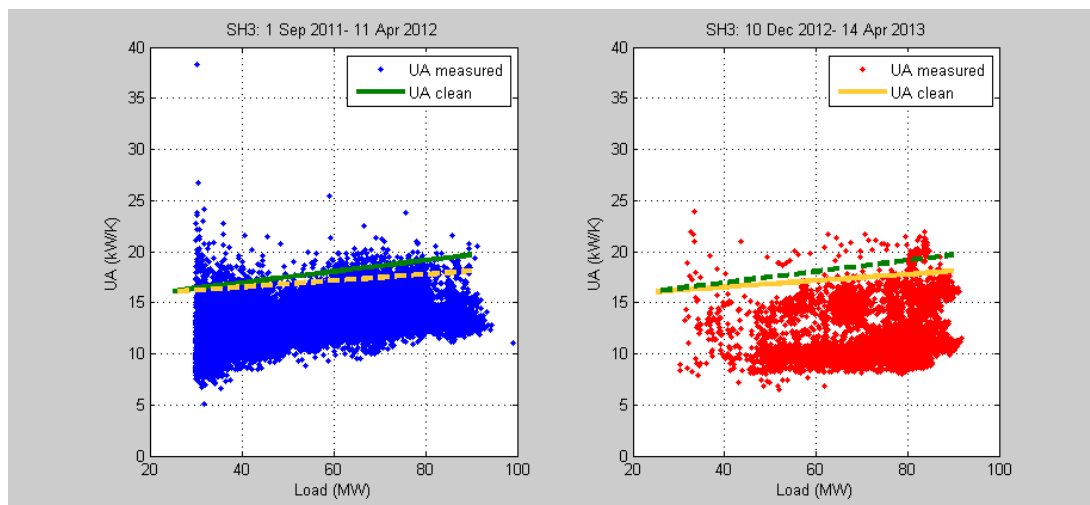
Figur 15. Värmegenomgångstalet UA (kW/K) för ÖH1 som funktion av den beräknade totala värmeöverföringen enligt ekvation 4 för Idbäcken P3. Vänster: mellan september 2011 och maj 2012, Höger: mellan december 2012 och april 2013. Den heldragna linjen är den uppskattade värmekoefficienten för rena ytor. (Den streckade linjen är för jämförelse mellan de två säsongerna.)

Figure 15. The overall heat transfer coefficient UA (kW/K) in superheater 1 versus calculated load according to equation 4. Leftmost diagram: September 2011-May 2012. The solid lines represent the estimated overall heat transfer coefficients with clean surfaces. The dashed lines represent the solid line in the other diagram for comparison.



Figur 16. Värmekoefficient UA (kW/K) för ÖH2 som funktion av den beräknade totala värmeöverföringen enligt ekvation 4 för Idbäcken P3. Vänster: mellan september 2011 och maj 2012, Höger: mellan december 2012 och april 2013. Den heldragna linjen är den uppskattade värmekoefficienten för rena ytor. ÖH2 togs bort i december 2012. (Den streckade linjen är för jämförelse mellan de två säsongerna.)

Figure 16. The overall heat transfer coefficient UA (kW/K) in superheater 2 versus calculated load according to equation 4. Leftmost diagram: December 2012-April 2013. The solid lines represent the estimated overall heat transfer coefficients with clean surfaces. The dashed lines represent the solid line in the other diagram for comparison.



Figur 17. Värmeoefficient UA kW/K för ÖH3 som funktion av den beräknade totala värmeöverföringen enligt ekvation 4 för Idbäcken P3. Vänster: mellan september 2011 och maj 2012, Höger: mellan december 2012 och april 2013. Den heldragna linjen är den uppskattade värmeoefficienten för rena ytor. (Den streckade linjen är för jämförelse mellan de två säsongerna.)

Figure 17. The overall heat transfer coefficient UA (kW/K) in superheater 3 versus calculated load according to equation 4. Leftmost diagram: September 2011-May 2012. The solid lines represent the estimated overall heat transfer coefficients with clean surfaces. The dashed lines represent the solid line in the other diagram for comparison.

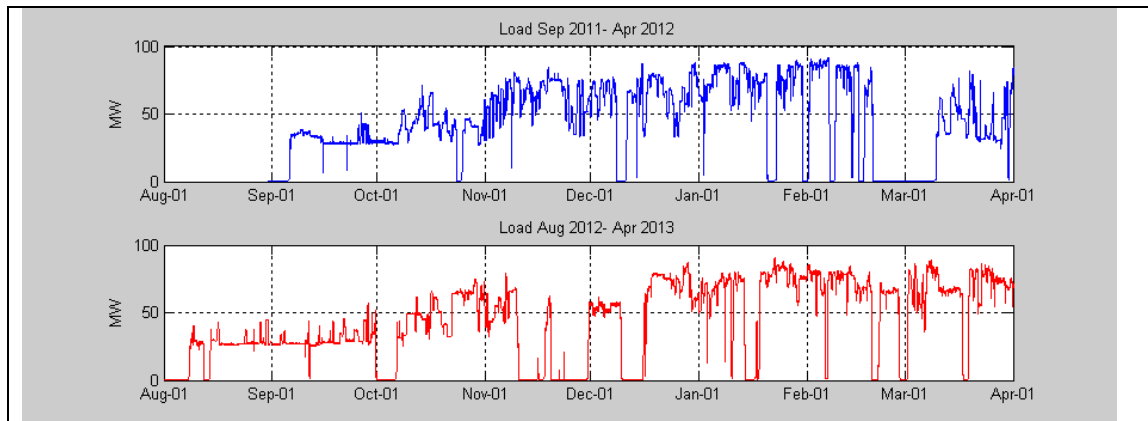
6.5 Nedsmutsningshastigheten

Det gamla och det nya sotningssystemet jämförs i detta avsnitt. Säsong 1 (augusti 2011 – april 2012) med sotblåsning jämförs med säsong 2 (augusti 2012 – april 2013) med sprängsotning i överhettardelen och ljudsotning i ekonomisern. Det tog lite tid att justera in det nya sotningssystemet innan det fungerade någorlunda väl från 2012-12-26. Det var dock inga långa perioder av ostörd drift utan underhållsstopp och sotningssystemen och man var tvungen att ställa in och justera systemen under hela den undersökta perioden. Under ett underhållsstopp rengörs ibland en del ytor och ibland faller beläggningar från väggarna ner på komponenter nedanför och ändrar värmeöverföringen.

Försiktighet bör iakttagas då de absoluta UA -värdena används för att ljudsotningssystemet för ekonomisern, eftersom den nya ekonomisern är mycket olik den gamla och har en mycket högre värmeöverföringskoefficient. Istället kan hastigheten för den relativa minskningen av värmeöverföringen jämföras för att jämföra sotningssystemens effektivitet.

Vid utvärderingen i detta avsnitt studeras kvoten mellan värmegenomgångstalen UA och UA_{clean} för en ren yta (UA/UA_{clean}). Denna kvot kallas UA -kvot. När beläggningarna ökar kommer UA -kvoten att minska. Nedsmutsningshastigheten i detta avsnitt definieras som hastigheten för minskning av UA -kvoten (enheter/dygn).

I Figur 18 visas lastförhållandena för de två säsonger som analyserats. Den totala värmelasten visas som den totala värmen som absorberats i överhettare och ekonomiser.



Figur 18. Total värmelast för ekonomiser + ÖH1 + ÖH2 + ÖH3 (när enhetens last överstiger 25 MW)

Figure 18. Total heat load for economiser + superheater 1 + superheater 2 + superheater 3 when the total load exceeds 25 MW.

6.5.1 Ekonomisern (ångsotning jämfört med ljudsotning)

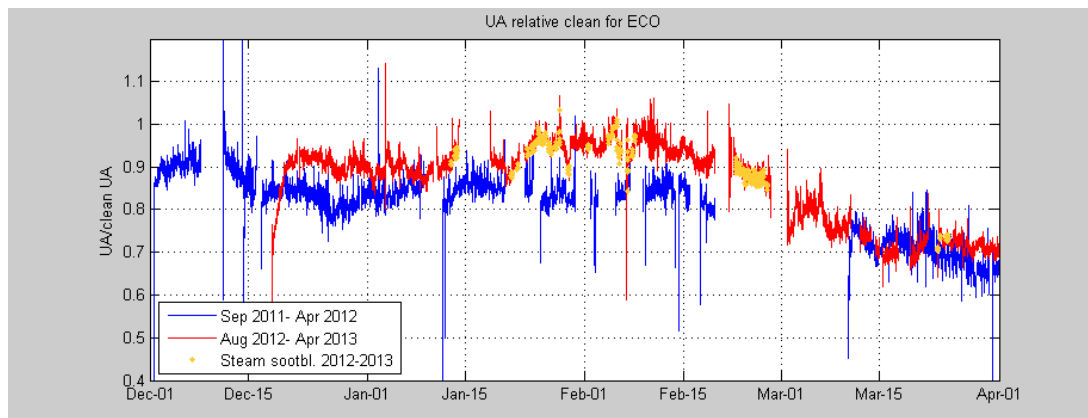
I Figur 19 visas trenden för UA-kvoten för de två undersökta säsongerna. Kvoten ligger på en konstant nivå på 0,9 mellan 2012-12-21 och 2013-01-12, därefter måste sotblåsningen aktiveras. Efter detta tycks det vara problem med ljudsotningen eftersom användningen av sotblåsning ökar. I mitten av februari 2013 uppvisar ekonomisern en tydligt ökad nedsmutsning. Ljudsotningen fungerade inte som den skulle och ångsotningen aktiverades, vilket gradvis tycks ha ökat UA-kvoten. Det finns ingen tydlig förklaring till varför beläggningarna har tagits bort gradvis, vilket skulle kunna tyda på problem i modellen eller något mätproblem. Från 2013-02-09 och framåt är det dock en tydligt minskande trend för UA-kvoten. Trenden är minskande oavsett om ångsotning eller ljudsotning har använts. Det är inte känt hur ofta ljudsotningen inte fungerade, men man vet att det var problem med den under perioden. Nedsmutsningshastigheten förbättras troligen när utrustningen fungerar som den ska hela tiden.

I Tabell 4 (säsong 2012-2013) och Tabell 5 (säsong 2011-2013) redovisas beräknade nedsmutsningshastigheter för ekonomisern tillsammans med statusen för sotningsutrustningen och underhållsåtgärder.

När de två sotningsteknikerna jämförs tycks det som om att nedsmutsningshastigheterna kan variera från över tid för båda teknikerna. Båda systemen har perioder med nästan konstant UA-kvot. De högsta nedsmutsningshastigheterna för ljudsotningen uppskattas till 0,007 (enheter/dag). De högsta nedsmutsningshastigheterna för ångsotningen uppskattas till 0,01-0,03 (enheter/dag).

Det kan finnas ytterligare förklaringar till de beräknade nedsmutsningshastigheterna än endast sotningen. Ekonomisern byttes ut mellan de två säsongerna och värmeöverföringskoefficienterna skiljer sig väldigt mycket åt mellan de två enheterna.

Ytförhållandena är inte desamma och beläggningarna byggs upp på olika sätt på olika typer av ytor. Trasig utrustning, läckor och bränsleegenskaper kan också inverka på resultaten. Det tycks dock som om att den sämsta UA-kvoten under perioderna med fungerande ljudsotning är lägre (bättre) än den sämsta UA-kvoten vid ångsotning.



Figur 19. UA-kvot för ekonomisern. Ljudsotning 2012-2013 (röd) och ångsotning 2011-2012 (blå). Gult markerar tillfällena när ångsotningen var aktiverad under säsongen 2012-2013.

Figure 19. UA ratio for the economiser. Sonic soot blowing 2012-2013 (red) and steam soot blowing (blue). Yellow represent those occasions when the steam soot blower was deactivated 2012-2013.

Tabell 4. Nedsmutningshastigheter för ekonomisern under säsongen 2012-2013

Table 4. Fouling rates for the economiser 2012-2013.

Från	Till	Nedsmutningshastighet	Status på sotningsutrustning
2012-12-21	2013-01-12	Konstant UA-kvot 0,9. nedsmutningshastighet = 0	Ljudsotning OK, ingen sotblåsning använd
2013-01-14	2013-01-24	Ökande UA-kvot (orsakad av underhåll eller av ångsotare?)	Ångsotning aktiv. Underhållsstopp 2013-01-14 till 2013-01-18.
2013-02-09	2013-02-19	Fallande UA-kvot från 0,98 till 0,91 på 10 dagar, nedsmutningshastighet = 0,07/10 = 0,007	Endast ljudsotning
2013-02-22	2013-02-27	Fallande UA-kvot från 0,93 till 0,88 på 5 dagar. nedsmutningshastighet = 0,05/5 = 0,010	Ångsotning aktiv.
2013-03-02	2013-03-17	Efter omstart har UA-kvoten fallit till 0,80. Därefter en minskning till ca 0,7 på 15 dagar. nedsmutningshastighet = 0,10/15 = 0,007	Endast ljudsotning
2013-03-25	2013-04-01	Ungefär konstant (men dålig) UA-kvot på 0,7.	Endast ljudsotning

Tabell 5. Nedsmutningshastigheter för ekonomisern under säsongen 2011-2012

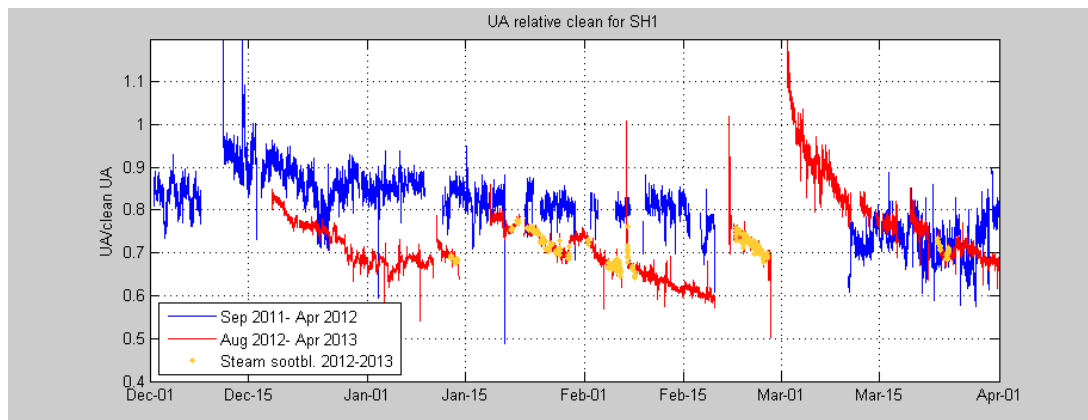
Table 5. Fouling rates for the economiser 2011-2013.

Från	Till	Nedsmutningshastighet	Status på sotningsutrustning
2011-12-12	2011-12-16	Fallande UA-kvot från 1 till 0,92 på en dag och till 0,84 efter 4 dagar. Nedsmutningshastighet 0,08 första dagen, och sen $0,08/3 = 0,03$	Ångsotning
2011-12-16	2012-02-15	Nästan konstant UA-kvot 0,84. nedsmutningshastighet 0	Ångsotning
2012-02-16	2012-03-11		Underhållsstopp
2012-03-11	2012-04-01	UA-kvot vid omstart är 0,76 och faller till 0,7 efter 21 dagar. nedsmutningshastighet $0,06/21 = 0,003$	Ångsotning

6.5.2 Överhettare 1 (ångsotning jämfört med fast sprängsotning)

I Figur 20 visas trenden för UA-kvoten för de två undersökta säsongerna. Det verkar som om ångsotningen var mer framgångsrik med att minska nedsmutningshastigheterna. Med sprängsotning krävdes extra stopp för rengöring.

De högsta nedsmutningshastigheterna för sprängsotning i ÖH1 är 0,3 (enheter/dag) och ses vid den inledande nedsmutningen av de rena ytorna. Då UA-kvoten är under 0,8 uppskattas nedsmutningshastigheten i medeltal ligga på 0,006 (enheter/dag).



Figur 20. UA-kvot för överhettare 1. Sprängsotning 2012-2013 (röd) och ångsotning 2011-2012 (blå). Gult markerar tillfällen när ångsotningen var aktiverad under säsongen 2012-2013.

Figure 20. UA ratio for superheater 1. Explosion soot blowing (red) and steam soot blong2011-2012 (blue). Yellow represents occasions when the steam soot blowing was deactivated 2012-2013.

Tabell 6. Nedsmutsningshastigheter för överhettare 1 under säsongen 2012-2013

Table 6. Fouling rates for superheater 1 2012-2013.

Från	Till	Nedsmutsningshastighet	Status på sotningsutrustning
2012-12-21	2013-01-12	Fallande UA-kvot från 0,83 till 0,69 på 25 dagar. nedsmutsningshastighet $0,14/25=0,006$	Sprängsotning
2013-01-14	2013-01-18		Underhållsstopp. Ånga från ett läckage i ÖH1 blåstes på ÖH3.
2013-01-18	2013-02-19	UA-kvot 0,80 efter stoppet, föll sedan till 0,60 på 32 dagar. nedsmutsningshastighet $0,20/32 = 0,006$	Sprängsotning
2013-02-19	2013-02-22		Kort stop och snabb rengöring av överhettarna.
2013-02-22	2013-02-27	UA-kvot 0,75 efter stoppet, föll sedan till 0,70 på 5 dagar. nedsmutsningshastighet $0,05/5 = 0,01$	Sprängsotning
2013-02-27	2013-03-02		Kort stopp och blästring av överhettarsektionen.
2013-03-02	2013-04-01	Rena ytor och en UA-kvot på 1,0 efter rengöring. UA-kvoten föll till 0,9 på 4 dagar och till 0,8 på ytterligare 4 dagar och sedan till 0,7 på de följande 16 dagarna. Nedsmutsningshastighet 0,03 i början och 0,006 när UA-kvoten var 0,8 i slutet.	Sprängsotning

Tabell 7. Nedsmutningshastigheter för överhettare 1 under säsongen 2011-2012

Table 7. Fouling rates for superheater 1 2011-2012.

Från	Till	Nedsmutningshastighet	Status på sotningsutrustning
2011-12-12	2012-02-15	UA-kvoten föll från 0,95 till 0,85 på 28 dagar Nedsmutningshastighet $0,1/28 = 0,004$ Från UA-kvot 0,85 till 0,80 tar det sedan 34 dagar Nedsmutningshastighet $0,05/34 = 0,002$	Ångsotning. Från början nästan helt rena ytor.
2012-02-16	2012-03-11		Underhållsstopp
2012-03-11	2012-04-01	UA-kvoten vid omstart är 0,75 och minskar inte därefter.	Ångsotning

6.5.3 Överhettare 2

Överhettare 2 togs bort under den andra säsongen och därför kan ingen jämförelse göras mellan de två sotningsmetoderna göras för överhettare 2.

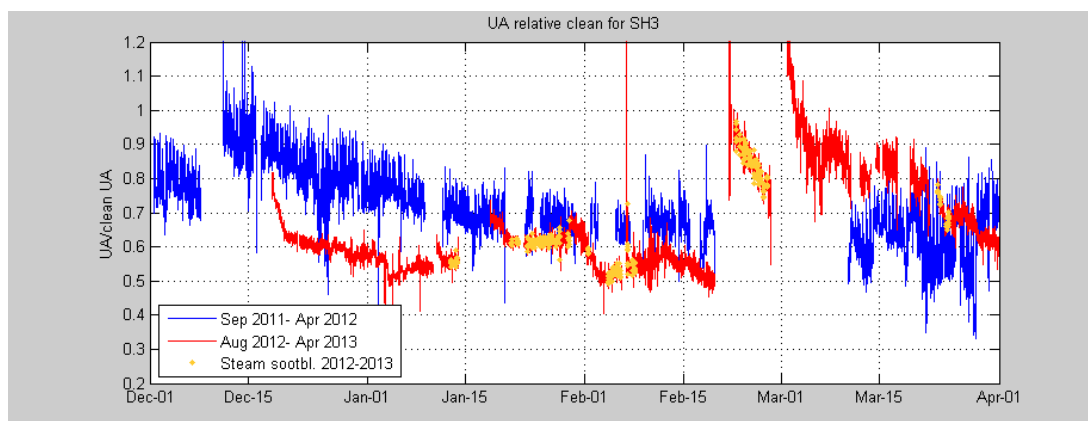
6.5.4 Överhettare 3 (ångsotning jämfört med sprängsotning)

I Figur 21 visas trenden för UA-kvoten för de två undersökta säsongerna. Trenderna för de två sotningsmetoderna följer ett likartat mönster. Det verkar som om ångsotningen var mer framgångsrik med att minska nedsmutningshastigheterna. Med sprängsotning krävdes extra stopp för rengöring.

I mitten av januari indikerar konstiga svängningar i UA-värden och varierande nedsmutningshastigheter för ÖH3 att det är något som inte fungerar som det ska under denna period. Förklaringen är att ett läckage i ÖH1 blåste ånga på ÖH3. Ett stopp och reparationer genomfördes. Den övre sprängsotningsenheten var troligen inte aktiv runt 2013-02-01, då UA-kvoten föll snabbt.

För UA-kvoter över 0,8 verkar det som om att nedsmutningshastigheten för sprängsotning är ca 0,01-0,07. När UA-kvoten är under 0,7 är nedsmutningshastigheten lägre, ca 0-0,005. Efter det sista rengöringsstoppet i mars tog det 30 dagar att gå från rena ytor till UA-kvot 0,6. Detta betyder att extra stopp för rengöring kommer att krävas varje månad om ingen förbättring av sprängsotningen kan åstadkommas, såvida man inte kan acceptera en lägre värmeöverföring. Om UA-kvoten ska hållas över 0,7 kommer rengöring att krävas var 24:e dag.

När UA-kvoten var över 0,85 för ångsotning var nedsmutningshastigheten ca 0,01 och vid medelhög UA-kvot (0,7-0,85) var nedsmutningshastigheten 0,005. Vid UA-kvot 0,7 tycks nedsmutningen stabiliseras och UA-kvoten sjunker inte ytterligare.



Figur 21. UA-kvot för överhettare 3. Sprängsotning 2012-2013 (röd) och ångsotning 2011-2012 (blå). Gult markerar tillfällen när ångsotningen var aktiverad under säsongen 2012-2013.

Figure 21. UA ratio for superheater 3. Explosion soot blowing (red) and steam soot blowing 2011-2012 (blue). Yellow represents occasions when the steam soot blowing was deactivated 2012-2013.

Tabell 8. Nedsmutningshastigheter för överhettare 3 under säsongen 2012-2013

Table 8. Fouling rates for superheater 3 2012-2013.

Från	Till	Nedsmutningshastighet	Status på sotningsutrustning
2012-12-21	2013-01-12	Fallande UA-kvot från 0,78 till 0,65 på 1,5 dagar. nedsmutningshastighet $0,13/1,5=0,09$ Från UA-kvot 0,65 till 0,55 på 19 dagar nedsmutningshastighet $0,10/19 = 0,005$	Sprängsotning
2013-01-14	2013-01-18		Maintenance stop
2013-01-18	2013-02-19	UA-kvoten efter stoppet var 0,69. Därefter föll det till 0,51 på 32 dagar. nedsmutningshastighet $0,18/32 = 0,006$	Sprängsotning Konstiga variationer i UA-värden och variationer i nedsmutningshastighet för ÖH3 indikerar att det är något som inte fungerar som det ska under denna period. Den övre sprängsotningsenheten var troligen inte aktiv runt 2013-02-01, då UA-kvoten föll snabbt.
2013-02-19	2013-02-22		Kort stopp och snabb rengöring av överhettarsektionen
2013-02-22	2013-02-27	ÖH3 är nästan ren vid starten UA-kvoten börjar på 0,95 och sjunker sedan till 0,8 på 5 dagar. nedsmutningshastighet $0,15/5 = 0,03$	Sprängsotning
2013-02-27	2013-03-02		Kort stopp och blästring av

			överhettarsektionen
2013-03-02	2013-04-01	Rena ytor och en UA-kvot på 1,1 efter rengöring (över 1 pga normalisering). UA-kvoten faller till 0,9 på 3 dagar. Nedsmutningshastighet $0,20/3 = 0,07$ Från 0,9 till 0,8 på ytterligare 10 dagar nedsmutningshastighet $0,1/10 = 0,01$	Sprängsotning

Tabell 9. Nedsmutningshastigheter för överhettare 1 under säsongen 2011-2012

Table 9. Fouling rates for superheater 1 2011-2012.

Från	Till	Nedsmutningshastighet	Status på sotningsutrustning
2011-12-12	2012-02-15	UA-kvoten faller från 0,95 till 0,85 på 10 dagar nedsmutningshastighet $0,1/10 = 0,01$ Från UA-kvot 0,85 till 0,70 tar det ytterligare 32 dagar nedsmutningshastighet $0,15/32 = 0,005$	Ångsotning. Startar med nästan rena ytor.
2012-02-16	2012-03-11		Underhållsstopp
2012-03-11	2012-04-01	UA-kvoten är vid omstarten ca 0,7 och faller sedan inte ytterligare.	Ångsotning

6.5.5 Sammanfattning av nedsmutningshastigheter

6.5.5.1 Ekonomiser

Då de två sotningsteknikerna, ångsotning och ljudsotning, för ekonomisern jämförs, verkar det som om nedsmutningshastigheterna kan variera över tid för båda teknikerna. Både ångsotning och ljudsotning har perioder med nära nog konstant UA-kvot. Det tycks dock som om den högsta nedsmutningshastigheten under perioder med fungerande ljudsotning är lägre än nedsmutningshastigheten för ångsotning. Den högsta nedsmutningshastigheten för ljudsotning uppskattas till 0,007 (enheter/dygn). Den högsta nedsmutningshastigheten för ångsotning uppskattas till 0,01-0,03. Om man antar att skillnaden i nedsmutningshastighet är ca 0,007 till 0,01, alltså 30 % långsammare för ljudsotningen än för ångsotningen, betyder det att pannan kan hållas i drift 30 % längre tid innan ett pannstopp för rengöring av ekonomisern krävs om med ljudsotning.

6.5.5.2 Överhettare

Då de två sotningsteknikerna, ångsotning och sprängsotning, för överhettare 1 och 3 jämförs, är det tydligt att sprängsotningen ger ett sämre resultat än ångsotningen. Nedsmutningshastigheterna var ca 3 gånger högre under säsongen med sprängsotning än under föregående säsong, med ångsotning. Detta innebär att för att undvika att värmeöverföringskoefficienten UA sjunker till ett värde som är lägre än 60 % av det

ursprungliga värdet, måste rengöring genomföras ungefär var 30:e dag vid sprängsotning medan det endast behövdes var tredje månad vid ångsotning.

Man har dock haft många driftproblem med sprängsotningen och den har haft perioder då den inte varit i full drift. En förbättring av resultatet för sprängsotningen förväntas då den fungerar som den ska och är i kontinuerlig drift.

7 Ekonomisk undersökning

En fullständig ekonomisk analys skulle kräva väldigt många olika ingångsdata som inte är kända och knappast medger annat än kvalificerade gissningar. Det kan t.ex. gälla värdet av minskade påslag. I föreliggande projekt beräknas kostnader för sotning utifrån de parametrar som är möjliga att bestämma, och som är specifika för sotningssystemet i fråga. Bedömningen är att finansieringskostnader och driftkostnader kan bestämmas.

Ett sotningssystem består ofta av minst ett sotaggregat. Med begreppet sotning avses en körning av sotningssystemet. Med gångtid avses den tid en sotning tar. Med paustid avses tiden mellan två sotningar. Paus- och gångtid är summan av paustid och gångtid.

7.1 Ekonomisk modell

Den ekonomiska modellen består av delmodeller för varje sotningssystem. Kostnaden beräknas per år. Variabler framgår av Tabell 10.

Tabell 10. Variabler i den ekonomiska modellen.

Table 10. Variables in the economic model.

Beteckning	Beskrivning	Enhet	
K_{tot}	totalkostnad	kr/år	
K_f	finansieringskostnad	kr/år	
P_s	sotningssystemets pris	kr	
r	kalkylränta	1/år	
K_d	drifkostnad	kr/år	
$K_{\text{fö}}$	förbrukningskostnad allmänt	kr/år	gas, ånga, luft
K_{el}	kostnad för utebliven elproduktion	kr/ år	
K_u	underhållskostnad	kr/ år	
P_{el}	elpris	kr/kWh	
$m_{\text{åf}}$	ångförbrukning vid en sotning	kg	
p_{el}	anläggningens totala eleffekt	MW	
$m_{\text{åp}}$	anläggningens totala ångproduktion	kg/s	
t_{pg}	paus- och gångtid	h	
k_a	specifik kostnad för avjonat vatten	kr/kg	
K_{ar}	arbetskostnad	kr/år	
P_{ar}	priset på arbete	kr/h	
t_{ar}	tidsåtgång för arbete vid en sotning	h	
t_g	gångtid	s	
K_{as}	kostnad för ökad askhantering	kr/s	
l	tryckluftåtgång vid sotning	m ³	
k_l	specifik kostnad för tryckluft	kr/m ³	
P_k	priset på kulor	kr/kg	
$m_{\text{åk}}$	förbrukning av kulor	kg/år	
P_g	priset på gas	kr/kg	
m_{fg}	förbrukning av gas	kg/år	

Totalkostnad är summan av finansieringskostnaden och drifkostnaden.

$$K_{\text{tot}} = K_f + K_d.$$

7.1.1 Finansieringskostnad

Finansieringskostnaden bestäms av priset på sotningssystemet och en kalkylränta.

$$K_f = Pr,$$

där K_f är finansieringskostnaden, P är sotningssystemets pris, och r är kalkylräntan.

7.1.2 Drifkostnad

Olika sotningssystem har olika kostnader förknippade med deras respektive drift. De kan bestå av el, tryckluft, ånga m.m.

Ångsotning: $K_d = \text{ångförbrukning} + \text{vattenförbrukning} + \text{underhåll}$

Vattensotning: $K_d = \text{ökad askhantering} + \text{arbete} + \text{underhåll}$

Luftsotning: $K_d = \text{tryckluftsförbrukning} + \text{underhåll}$

Kulsotning: $K_d = \text{förbrukning av kulor} + \text{underhåll}$

Slagsotning: $K_d = \text{underhåll}$

Fast sprängsotning: $K_d = \text{gasförbrukning} + \text{underhåll}$

Ljudsotning: $K_d = \text{tryckluftsförbrukning} + \text{underhåll}$

7.1.2.1 Ångsotning

För ångsotning finns en kostnadsmodell framtagen.[4] Den omfattar kostnaden för utebliven elproduktion och förbrukningskostnaden för avjonat vatten. Dessa två tas med här men kostnaden för ökad bränsleåtgång p.g.a. sämre värmeupptag bortses ifrån eftersom den kan anses snarlik för alla sotningsmetoder och alltså inte bidrar till möjligheten att jämföra. Den skulle också vara svår att bestämma för metoder som används ibland och parallellt med ett befintligt sotningssystem. Driftkostnaden för ångsotning blir alltså

$$K_d = K_{el} + K_{fö} + K_u,$$

Kostnaden för utebliven elproduktion beräknas genom att anläggningens totala eleffekt divideras med ångproduktionen. Då får man elproduktion per massenhet ånga. Denna multipliceras med förbrukningen av ånga vid en sotning dividerad med paus- och gångtiden. Den erhållna produkten blir då den elproduktion som den, vid sotningen, förbrukade ångan kunde ha genererat. Detta multipliceras med elpriset.

$$K_{el} = P_{el}(p_{el}/m_{\dot{a}p})(m_{\dot{a}f}/t_{pg}).$$

Förbrukningskostnaden för avjonat vatten vid sotning beräknas genom att vattenförbrukningen vid en sotning divideras med paus- och gångtiden. Härvid erhålls vattenförbrukningen per tidsenhet. Denna multipliceras med kostnaden för att framställa vattnet.

$$K_{fö} = k_a m_{\dot{a}f}/t_{pg}.$$

7.1.2.2 Vattensotning

Driftkostnaden för vattensotning kan anses bestå av arbetskostnaden, kostnaden för ökad askhantering och underhållskostnader.

$$K_d = K_{ar} + K_{as} + K_u$$

Arbetskostnaden beräknas genom att multiplicera priset på arbete med tiden som åtgår. För att slå ut det på den totala tiden divideras med paus- och gångtiden.

$$K_{ar} = P_{ar} t_{ar}/t_{pg}.$$

Kostnaden för ökad askhantering är den som uppkommer om extra arbete och utrustning krävs för att hantera det faktum att mycket aska uppstår plötsligt, eller om det uppstår driftstörningar. Det skulle kunna uttryckas i en funktion med sannolikheter för olika fall men troligen är det enklare att för den aktuella anläggningen uppskatta K_{as} utifrån erfarenheter.

7.1.2.3 Luftsotning

Driftkostnader för luftsotning består av förbrukningskostnaden för tryckluft och underhållskostnader.

$$K_d = K_{fö} + K_u.$$

Förbrukningskostnaden för tryckluft beräknas genom att dividera tryckluftförbrukningen vid en sotning med paus- och gångtiden. Denna genomsnittsförbrukning multipliceras med kostnaden för att framställa en viss mängd tryckluft. Denna kostnad kan beräknas med åtgånget pV-arbete och tryckluftaggregatets verkningsgrad och elförbrukning, men görs troligen enklast genom att totalkostnaden för tryckluft tas fram och räknas om till exempelvis Nm^3 .

$$K_{fö} = (l/t_{pg})k_l.$$

7.1.2.4 Kulshotning

Driftkostnader för kulshotning består av förbrukningskostnaden för kulor och underhållskostnader.

$$K_d = K_{fö} + K_u.$$

Förbrukningskostnaden för kulor beräknas genom att multiplicera kulornas pris med förbrukningen av kulor.

$$K_{fö} = P_k m_{fk}$$

7.1.2.5 Slagsotning

Förbrukningskostnaden för el bedöms som försumbar. Härvid har slagsotning enbart underhållskostnader.

$$K_d = K_u.$$

7.1.2.6 Fast Sprängsotning

Driftkostnader för fast sprängsotning består av förbrukningskostnaden för gas och underhållskostnader.

$$K_d = K_{fö} + K_u.$$

Förbrukningskostnaden för gas beräknas genom att multiplicera gaspriset med gasförbrukningen.

$$K_{fö} = P_g m_{fg}.$$

7.1.2.7 Ljudsotning

Driftkostnader för ljudsotning består av förbrukningskostnaden för tryckluft och underhållskostnader.

$$K_d = K_{f0} + K_u.$$

Förbrukningskostnaden för tryckluft beräknas analogt med den vid luftsothning (7.1.2.3).

$$K_{f0} = (l/t_{pg})k_l.$$

7.2 Kostnader i anläggningarna

Baserat på data inhämtade från företagen har finansierings- och driftkostnader beräknats på ett antal sotsystem. I Tabell 11 presenteras driftkostnaderna uppdelade på underhåll och förbrukning. Vid beräkningarna har följande grundantaganden gjorts, elpris (såld el) 0,4 kr/kWh, drifttid 7500 h/år, kostnad tryckluft 0,157 kr/m³, kostnad avjonat vatten 15,75 kr/m³ [4]. Totalkostnaden (kr/år) för ett sotningssystem i en viss anläggning har i sig begränsad användbarhet eftersom sotningskostnaden är beroende av anläggningens storlek och last. Därför anges kostnaden per effektenhet (termisk). Detta värde lider dock av begränsningen att vara beroende av sotningssystemets storlek. Därför anges även kostnaden per sotningsaggregat. På så vis kan en given anläggning åtminstone jämföra sina kostnader vid olika tidpunkter. Att jämföra kostnaderna mellan olika anläggningar är svårt eftersom så många parametrar påverkar dessa.

De beräknade kostnaderna uppvisar stora intervall vare sig man räknar per effektenhet eller aggregat. Orsakerna är flera. Finansieringskostnaderna ökar inte linjärt för alla sotningsmetoder. Ångsotning ger exempelvis en lägre kostnad per effektenhet om anläggningen är stor. Ljudsotningens funktion gör att den inte blir beroende av att ”se” ytorna som ska rengöras på samma sätt som exempelvis ång- eller vattensotning. Det gör att det oftast räcker med ett sotningsaggregat (alternativt två) för en hel ekonomiserdel, vilket i sin tur gör att investeringskostnaden blir relativt större för små anläggningar. Investeringarna för kulsotnings- och slagsotningsanordningar ingår ofta i investeringen för hela anläggningen, vilket försvårar jämförelsen, men det torde finnas skalfördelar även i dessa fall. Sammantaget betyder skalfördelarna att investeringskostanden för sotningsmetoder blir mindre per effektenhet för stora anläggningar.

Driftkostnaden är summan av förbruknings-, underhållskostnaderna och eventuell kostnad för utebliven elproduktion. Förbrukningskostnaden för vattensotning är i stort sett försumbar eftersom vanligt vatten kan användas. Likaså är elkostnaden för slagsotare så låg att den kan försummas i detta sammanhang. Något mer förvånande är kanske att beräkningen visar att luftsothning inte är förknippad med särskilt hög kostnad trots att tryckluft används. Det skall dock påpekas att luftsothning endast förekommer i två anläggningar varför underlaget är begränsat. En förklaring till de låga kostnaderna i dessa fall är också att sotningsfrekvensen är väldigt låg (någon gång i veckan). Ljudsotning förbrukar tryckluft och här blir kostnaden substantiell eftersom dylika aggregat körs med några minuters intervall. Sprängsotning förbrukar gas. Både spräng-

och ljudsotning kräver att delar byts regelbundet. Underhållskostnaderna är i allmänhet svåra att fastslå eftersom de till stor del utgörs av arbete. Detta är särskilt fallet om underhållet är utlagt på entreprenad till ett totalpris vari underhåll av t.ex. ångsotningsaggregat ingår. I andra fall har man helt enkelt inte följt upp hur mycket tid som åtgår till underhåll. Det är också så att nyare system kräver mycket mindre av underhåll. En del av underhållet är planlagt men en stor del består av åtgärder som uppkommer. Denna typ är naturligtvis mycket vanligare om systemet är gammalt och slitet. Av dessa orsaker blir det kostnadsintervall som har beräknats här väldigt stort varför det återigen är vanskligt, att jämföra en anläggning med en annan. Dock är det fullt möjligt att jämföra anläggningen med sig själv över tid. Den uteblivna intäkten för elproduktion är en viktig parameter för ångsotning. Den ånga som åtgår vid sotningen hade kunnat användas för elproduktion. Istället blåses den in i rökgasen. Entalpin minskar då i ett första steg från den hos överhettad ånga till den hos mättad ånga vid temperaturen hos rökgaserna när de lämnar anläggningen. I det ögonblicket går alltså kondensationsvärmets förlorat. En avsevärd förbättring är det alltså att ha rökgaskondensering eftersom kondensationsvärmets då blir till en intäkt för värme. Istället för att förlora intäkten motsvarande elpriset blir förlusten isåfall skillnaden mellan elpris och värmepris.

Alternativet att helt avstå ifrån ett fast sotsystem och istället köpa in sprängsotning då man anser sig behöva det bör också beaktas. Man slipper då en stor investering men får istället höga rörliga kostnader. Om man lågt räknat antar att det skulle räcka med sprängsotning en gång i veckan, så blir det $7500/7/24 = 45$ sotningar. Om varje sådan kostar 50 000 kr så blir årskostnaden ca 2,2 Mkr. Det överskrider vida summan av finansierings- och driftkostnaderna för alla fall som studerats i detta projekt. Slutsatsen blir att ett fast sotsystem är billigare.

Tabell 11. Beräknade kostnader för olika sotningsmetoder.

Table 11. Calculated costs for different cleaning methods.

Kostnadsslag	Enhet	Ånga	Vatten	Luft	Kul	Slag	Spräng	Ljud
Finansieringskostnad	kr/år/MW	850-5200	870-5200	2100	^a	^a	5800	800
	kr/år/aggregat	3800-17000	65000	7100	^a	^a	46000	80000
Driftkostnad	kr/år/MW	2200-25000	^a	^a	3500-7200	5600-8000	2400-2500	160-8500
	kr/år/aggregat	13000-29000	^a	^a	138000-250000	70000-440000	20000-46000	16000-68000
Förbrukningskostnad	kr/år/MW	160-4700	0 ^b	19	3100-6800	0 ^b	600-810	115-6300
	kr/år/aggregat	660-4700	0 ^b	65	110000-220000	0 ^b	4800-16000	12000-50000
Underhållskostnad	kr/år/MW	181-3700	^a	^a	380	5600-8000	1500	40-2300
	kr/år/aggregat	1100-14000	^a	^a	25000	70000-440000	15000-30000	4000-18000
Kostnad för utebliven elproduktion	kr/år/MW	1800-18000	12000	0	0	0	0	0
	kr/år/aggregat	3300-15000	880000	0	0	0	0	0

^a Ej fastslagen.^b Försumbar.

8 Resultatanalys

8.1 Erfarenheter

I stort bekräftar undersökningen den bild av användningsområde för respektive sotningsmetod som ges i Figur 1. I denna studie har vattensotningen varit begränsad till tomdrag. Luftsotning har i ett par äldre anläggningar ersatt ångsotningen men användningsområdena har varit desamma. I tillägg har även någon anläggning luftsotning i katalysatorn. Den manuella sprängsotningen spänner i stort sett över hela pannan, men får naturligt fokus på där respektive anläggning har störst beläggingsproblematik. Den manuella sprängsotningen används också före revisionsstopp för att minska risken att beläggningar faller ner och skadar personal när de går in i eldstaden för att utföra exempelvis murverksarbeten eller materialkontroller. Den fast monterade sprängsotningen har i anläggningarna som representerats i denna studien främst använts i överhettarna. I fallet med hetvattenpannan som också har fast sprängsotning installerat är det den varmare delen av konvektionen som sotas med sprängsotningen. Ljudsotningen har främst använts i konvektion och eko, precis som kulsotningen.

Erfarenheterna av sotningsmetoderna varierar från anläggning till anläggning. I de flesta fall fungerar sotningsmetoderna tillfredsställande när de går som de skall. Att de fungerar innebär dock inte att de tar bort alla påslag. Efter en tids drift behövs punktåtgärder i form av sprängsotning eller revisionsstopp med manuell rengöring. Det beror på att vissa påslag är så hårda att de inte kan sotas bort, och på att alla ytor inte nås av sotningssystemet. En väl fungerande sotningsmetod ser till att punktåtgärderna blir så få som möjligt. Om sotningsmetoden inte fungerar som den skall kan en rad problem uppstå. Utöver att punktåtgärderna, p.g.a. minskad tillgänglighet hos sotningssystemet, blir mer frekventa, så kan det innebära skador på anläggningen och höga underhållskostnader samt korrosion med tubbrott som följd.

Tillgängligheten varierar kraftigt mellan olika sotsystem. Ett nyligen installerat fast sprängsotningssystem eller ljudsotningssystem som håller på att justeras in har av naturliga skäl sämre tillgänglighet än ett inkört ångsotnings- eller slagsotningssystem. Detta är inte heller en isolerad företeelse för de lite nyare metoderna (fast monterad sprängsotning och ljudsotning) utan har även noterats på exempelvis vissa nya ångsotsystem. Ett gammalt sotningssystem har sämre tillgänglighet än ett nytt p.g.a. rent slitage. Vid någon tidpunkt blir det mer lönsamt att investera i ett nytt sotningssystem i stället för att underhålla det gamla. Skador kan uppstå främst med ångsotning i form av erosion av tuber p.g.a. felriktade ånglansar. Detta kan också uppstå om den fasta sprängsotningen är felriktad. De andra sotningsmetoderna kan ge upphov till smärre skador. Vattensotningen är en av de metoder som till synes dras med antingen lägre tillgänglighet eller stort manuellt arbete. Dock har de flesta angett att metoden fungerar bra när den går.

För att förbättra funktionen hos ett sotningssystem kan justeringar göras. Ljud- och fast sprängsotning justeras oftast av leverantören medan de andra systemen kan anpassas av

ordinarie personal. Oftast anpassas paus- och gångtid efter behovet över säsongen. Då används t.ex. rökgastemperaturen som indikator. Vid ångsotning riskerar det att bildas vattendroppar som bidrar till ökad erosion på den sotade ytan. En viktig åtgärd är att tillse att droppar inte bildas. Det finns också konsulter som specialiserat sig på att justera ångsotningssystem.[15]

När det gäller fast sprängsotning och ljudsotning (infraljud) som har fått en större spridning de senaste åren finns det inte sammanställt så mycket tidigare erfarenheter. Det förtjänar att nämnas att leverantörerna Infracore och AB Sprängsotning genomgående får goda vitsord av anläggningarna angående leverantörserfarenheter.

För ljudsotningen varierar resultaten en del mellan anläggningarna men verkar generellt kunna fungera bra som ett komplement till redan existerande sotningssystem. Det har varit en del tillgänglighetsproblem, framförallt i början och i flera fall har man inte nått fullt den rengörande effekt som man hade hoppats. På en anläggning finns det ljudsotare installerade på två parallella linjer som matas från samma bränsleberedning. I den ena linjen fungerar ljudsotningen av någon anledning väsentligt sämre än i den andra och varken anläggningsägaren eller leverantören har kunnat hitta anledningen till skillnaden. Detta visar också på svårigheten att utvärdera funktionen. Den främste leverantören inom området har också börjat med att leverera sotningen som en tjänst istället för att bara sälja själva utrustningen. Detta borde kunna vara intressant, åtminstone till en anläggning har kunnat konstatera vilken funktionalitet metoden har i just den anläggningen. Metoden har också en viss fördel i det att den inte är beroende av att ”se” ytorna den ska rengöra till skillnad från exempelvis ång- eller vattensotning.

Fast monterad sprängsotning är den nyaste metoden bland de undersökta och därför finns det inte så lång drifterfarenhet att dra slutsatser från. Metoden är under utveckling och bland annat har tillgängligheten inte riktigt varit den önskade i början. Det har varit en del problem med gassystemen både när det gäller läckage och tryckreglering, och det återstår att se hur dessa parameterar kan komma att förbättras. Den går inte heller riktigt att jämföra med den manuella sprängsotningen eftersom de oftast har helt olika syften. Den fast monterade sotningen har som syfte att förhindra uppbyggnaden av beläggningar medan den manuella normalt sett används för att åtgärda kraftig beläggningsbildning som redan skett. Vid bytet i Idbäcken har de analyser som gjorts visat att metoden fungerade sämre än ångsotningen, detta kan dock delvis bero på att tillgängligheten under det första året inte varit tillfredställande. Framtiden kommer också att utvisa om den fast monterade sprängsotningen ger upphov till något ökat slitage/tubhaverier i pannan, vilket varit en farhåga hos vissa.

Sammanfattningsvis finns det inget kort svar på frågan om vilken sotningsmetod som är bäst. Alla metoder uppvisar exempel på dålig och bra funktion på olika sätt, antingen genom att rengöringsförmågan i sig inte uppnår förväntningarna eller att tillgängligheten varit för låg med samma slutresultat. När det gäller avfallspannor så använder sig alla exempelvis av manuell sprängsotning eller annan manuell rengöring vilket indikerar att ingen av sotningsmetoderna som används under drift helt fyller sitt syfte. En del av dessa pannor är sådana som konverterats från biobränslen till returbränslen och där har sotningssystemen kanske inte alltid varit anpassade till det

tuffare bränslet. Men även de pannor som är designade för returbränslen har dessa problem. Om det sedan är ett resultat av svårare avfallsbränslen, ökade laster och utnyttjandegrader eller andra faktorer går inte att avgöra.

När det gäller biobränslen så dominerar ångsotningen och den fungerar på de flesta ställen väl. Dock kan ju kostnaderna för användningen göra att andra alternativ är intressanta. Här har användningen av ljudsotning, som ett komplement, också börjat komma in. I något fall har även biopannor kulsotning i ekodelen. Det finns dock exempelvis inga exempel på biopannor med slagsotning med i studien så hur en sådan metod som är vanlig på avfallspannor står sig mot ångan i avfallspannor ger inte denna studie något svar på.

Svårigheten ligger i att bedöma vilket system som funkar bäst i den aktuella anläggningen med det aktuella bränslet. Denna bedömning underlättas om det finns kunskap om hur det befintliga systemets underhållskostnad utvecklats över tid, samt kunskap om andra liknande anläggningars erfarenheter.

8.2 Kostnader

De framräknade kostnaderna för de olika sotningsmetoderna varierar en hel del. Det har generellt sett varit svårt att få fram bra förbrukningsdata och underhållskostnader för flera av sotningsmetoderna. I vissa fall är det bara någon enstaka anläggning som har den aktuella metoden. Detta gör att underlaget för de beräknade siffrorna i sig är ganska litet även om antalet pannor som undersökts varit stort. I de flesta fall har uppgifter fått kombineras från olika anläggningar/källor för att en heltäckande bild inte gått att fås från varje anläggning.

Investeringskostnaden för ett sotningsaggregat är ungefär lika stor oavsett om det sker i en panna på 10 eller 50 MW vilket ger stordriftsfördelar. I de fall där man exempelvis klarar sig med ett aggregat i ekopaketet (exempelvis ljudsotning) så blir normeringen per MW missvisande. I det fallet fungerar normering/aggregat bättre. Även servicekostnader blir mer fördelaktigt för stora anläggningar om man normerar mot storleken på pannan. En annan faktor som kan påverka är huruvida en del åtgärder redovisas som underhåll eller reinvesteringar vilket också varierar mellan olika anläggningar.

Underhållsfilosofin påverkar. Genom ett bättre förebyggande underhåll kan kostnaderna för stillestånd och akutunderhåll minskas. Stilleståndskostnaderna beror på styrmedel, vilken tid på året och vilka alternativbränslen som används vilket snabbt ger en extremt komplex kostnadsbild som legat utanför omfattningen av denna studie. Undantaget är Idbäcken där den analysen också gjorts.

Om underhållet sker i egen regi är det ofta svårare att avgöra hur mycket som lagts på enskilda objekt eftersom en del av det görs i förbifarten. Detta innebär dock inte att det blir dyrare eller sämre - bara att kostnaderna är svåra att avgöra.

Åldern på sotningssystemet påverkar också kostnaderna. Ett äldre system kräver normalt sett ett högre underhåll. I flera fall när det gällde exempelvis kulsotningen så

har det varit ganska gamla och underhållsintensiva system (även om det inte gått att få ekonomiska siffror på underhållet har anläggningarna i de fallen uppfattat dem som underhållsintensiva).

Verkliga investeringskostnader har generellt varit svårt att få tag på. Det kan dels bero på att det är känsligt att lämna ut, men också att det har ingått i en större leverans. Slagsotningen ingår normalt sett som ett integrerat system vid pannleverans och delkostnaden är svår att spåra. För en del av systemen har kostnader erhållits från Valmet.

Olika pannor har stora skillnader inbördes, det kan vara konstruktion, bränsle eller ångtemperaturer. I detta projekt har det inte funnits möjlighet att analysera så djupt att sådana faktorer kunnat tas in i beräkningen (mer än genom matrisen av bränslen och metoder i sig). I projektet har det också visat sig att även likadana pannor på samma anläggning med i princip samma bränsle har kunna ha olika funktion på en sotningsmetod.

I ett par fall måste anläggningarnas last minskas när ångsotning respektive vattensotning sker. Det beror på skilda saker, men påverkar kostnaden kraftigt när det gäller förlorad elproduktion. I de fallen ska även värmeproduktionen ersättas, kostnaderna för detta har inte tagits med i detta projekt eftersom det beror på tid på året vad alternativbränslen och därmed kostnaderna blir. Även förlorade inkomster för mottagningsavgifter på avfall kan bli aktuella.

Sammanfattningsvis går det inte heller för kostnaderna att säga att en specifik sotningsmetod är den ekonomiskt optimala bara sett utifrån bränsle, panntyp och placering i pannan. Om exempelvis lasten måste backas vid en metod som rengöringsmässigt och investeringsmässigt skulle vara attraktiv så kan den förlorade intäkten för den reducerade lasten stjälpa kalkylen. I något fall kan det vara så att ett ökat ånguttag är positivt eftersom det hjälper till att hålla lasten uppe på pannan och därmed förlänger driftsäsongen på just den pannan.

En observation som gjorts under denna studie är att så länge sotningen fungerar någorlunda är det få anläggningar där man detaljstuderat kostnaderna för sotningen och jämfört med alternativ.

9 Slutsatser

Denna studie bekräftar tidigare erfarenheter av var olika sotningsmetoder tillämpas i pannan. Den fasta sprängsotningen som är en relativt ny metod verkar främst användas i överhettardelen eller de varmare delarna av konvektionen (för hetvattenpannor).

Studien visar också att funktionen hos och kostnaden för olika sotningssystem varierar kraftigt. Det finns helt enkelt inget givet svar på vilket system som är bäst eller billigast utan detta kommer bero av specifika förutsättningar på respektive anläggning.

Det är dock principiellt möjligt att i ett enskilt fall avgöra om sotningen är tillräckligt bra och vad dess drift och finansiering kostar. Sotningens kvalitet kan förslagsvis följas med den s.k. UA-kvoten, som med liten insats torde kunna följas i realtid i de flesta anläggningar. Eftersom kostnaderna ibland är betydande så är det en viktig slutsats att de bör mätas och följas över tid. På så vis kan man få bättre underlag för eventuella framtida investeringar. Vilken teknik man då väljer bör baseras på egna och andras erfarenheter från liknande förbränningsanläggningar. Det är alltså önskvärt att dokumentera sina erfarenheter samt utbyta dessa med andra operatörer.

10 Rekommendationer och användning

Resultatet i föreliggande projekt syftar till att ge underlag till investering i sotningssystem. Underlaget består av erfarenheter och av driftkostnader. Resultaten ska tolkas med försiktighet då det varit stor spridning såväl gällande funktionalitet som gällande kostnader. Underlaget ger en fingervisning om problem som kan uppstå med olika metoder och också om de driftkostnader som finns.

Utöver att ta del av erfarenheterna i denna rapport så är rekommendationen till företrädare för förbränningsanläggningar att kommunicera med företrädare för andra anläggningar om deras sotningssystem. Denna rapport ger en överblick över vilka sotningsmetoder som finns representerade vid några svenska anläggningar. En kanal eller ett forum för återkommande erfarenhetsutbyte är förmodligen mer värdefullt på lång sikt än en sammanställning i en rapport, vilken endast kan bli enkelriktad och utgöra en ögonblicksbild. En sådan kommunikation ger en bättre möjlighet att svara på specifika frågor. Där kan också utbytas erfarenheter kring lösningar på problem som uppstått, vilket ska vägas mot kostnaderna för att eventuellt byta system.

Den ekonomiska modellen kan användas för utvärdering av sotningssystem. Dels kan olika system jämföras – t.ex. före och efter ett byte av system – och dels kan ett system följas över tid så att man t.ex. följer kostnadsutvecklingen. Det senare skulle kunna vara ett viktigt underlag för beslut om nya investeringar.

11 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Sotning kostar samt sliter på delar av förbränningsanläggningen. Det är ett nödvändigt ont som inte skall användas i onödan. Många anläggningar sotar exempelvis 3 gånger per skift. Denna frekvens ändras efter behov över säsongen i vissa fall men direkt behovsstyrd sotning är ovanligt. Det av Vattenfall R&D framtagna relativa värmegenomgångstalet (UA -kvoten) är i princip möjligt att följa i realtid. Det behövs temperaturgivare på in- och utgående ånga/vatten och kanske någon i rökgasen, men det räcker för att beräkna UA -kvoten. En viktig forskningsuppgift är alltså att undersöka ifall ett sådant mått kan användas för att styra sotningen och hur mycket det i så fall skulle spara i ekonomiska termer.

En jämförelse mellan olika sotningsmetoder för olika bränslen i en kontrollerad miljö hade också kunnat öka förståelsen för när olika metoder är mest lämpade. Om man i samma panna hade kunnat arbeta med olika bränslen för respektive sotningsmetod så hade en mer djuplodande och rättvisande utvärdering kunnat göras.

12 Litteraturreferenser

- [1] Skaardal, R.; "Utvärdering av sotningsmetoder", Värmeforsk, rapport nr. 176, 1984.
- [2] Eklund, A., Rodin, Å.; "Sotningsmetodernas effektivitet och konsekvenser på förbränningsanläggningar för olika typer av bränslen", Värmeforsk, rapport nr. 878, 2004.
- [3] Hjörnhede, A., Henderson, P.; "Sotningens inverkan på materialförluster i bio- och avfallseldade pannor", Värmeforsk, rapport nr 970, 2006.
- [4] Niklasson, F., Davidsson, K.; "Behovsstyrd sotblåsning i avfallspannor", Waste Refinery ISSN nr 1654-4706 WR-10, Borås 2009.
- [5] Blom, E., Ivarsson, C.; "Förbättrad behovsstyrd sotning genom mätning av värmeöverförande tubernas egenfrekvens", Värmeforsk, rapport nr. 1018, 2007.
- [6] Blom, E., Fredö, C., Gabrielsson, L., Eriksson, D.; "Förbättrad behovsstyrd sotning med hjälp av värmeöverförande tubens mekaniska egenskaper", Värmeforsk, rapport nr. 1193, 2011.
- [7] Baxter L. L., Miles T. R., Miles Jr. T. R., Jenkins B. M., Milne T., Dayton D., Bryers R. W., Oden L. L.; "The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences", Fuel Processing Technology 47-78, 54, 1998.
- [8] Werkelin J., Skrifvars B.-J., Hupa M.; "Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest", Biomass & Bioenergy 451-466, 29, 2005.
- [9] Gyllenhammar, M., Davidsson, K., Jonsson, T., Pettersson, J., Victorén, A., Andersson, H., Widén, C.; "Energiåtervinning av brännbar fraktion från fragmentering av metallhaltigt avfall – Steg 2", Waste Refinery ISSN 1654-4706 WR-23, Borås 2010.
- [10] <http://www.cbpg.com/en/products-solutions/boiler-efficiency/load-boiler-cleaning-systems/economizer/retractable-sootblower>
- [11] http://www.diamondpower.co.uk/media/26476/hydrojet_eu%20brochure1.pdf
- [12] <http://www.ekstromsvarme.se/kulsotning.html>
- [13] <http://www.cbpg.com/en/products-solutions-boiler-efficiency-load-cleaning-systems/rapping-system>
- [14] <http://www.explosionpower.ch/explosion-generator/design/>
- [15] <http://www.soottech.se/sotning-gor-returflis-lonsam-i-kraftvarmeproduktion/>
- [16] Kjörk, A.; "Behovsstyrd sotblåsning för bio- och avfallseldade pannor - inventering och teknikval", Värmeforsk, rapport nr. 841, 2003.

Bilagor

A Frågor till anläggningar

1. Anläggning

- 1.1. Panntyp/pannlayout
- 1.2. effekt
- 1.3. bränsle
- 1.4. sotningsmetoder
- 1.5. Asksammansättning (om tillgängligt)
- 1.6. annat

2. Sotningsmetoder X, Y, Z ...

- 2.1. fabrikat, ålder, storlek, antal /status (skick)
- 2.2. leverantörserfarenheter
- 2.3. placering (rumslig, rökgastemp., tubtemp.)
- 2.4. drift (paus-/gång-tider)
- 2.5. förbrukningsdata
 - 2.5.1. ånga
 - 2.5.2. tryckluft
 - 2.5.3. gas
 - 2.5.4. el
 - 2.5.5. annat (t.ex. kulor)
 - 2.5.6. vatten
- 2.6. drifterfarenheter
 - 2.6.1. metodens effektivitet (hur väl den tar bort påslag)
 - 2.6.2. optimeringsarbete
 - 2.6.3. underhållsbehov
 - 2.6.4. driftproblem

- 2.6.4.1. materialavverkning
- 2.6.4.2. vibrationer
- 2.6.4.3. buller
- 2.6.4.4. avvikelser/tillgänglighet
- 2.6.4.5. arbetsmiljö
- 2.6.4.6. övrigt

2.7. kostnader

2.7.1. installation

2.7.2. drift och underhåll

- 2.7.2.1. ångförbrukning
- 2.7.2.2. trycklufts
- 2.7.2.3. kalkförbrukning
- 2.7.2.4. gaskostnad och tändstift för sprängsotning
- 2.7.2.5. kostnad för sänkning av gastemperatur vid sotning
- 2.7.2.6. kostnad för tubslitage
- 2.7.2.7. stilleståndskostnader
- 2.7.2.8. annat (t.ex. kulor)

3. Driftdata

- 3.1. tryckfall över tubpaket
- 3.2. temperaturer av relevans
- 3.3. tubarea
- 3.4. värmegenomgångstal
- 3.5. lastvariationer
- 3.6. insprutningsmängd

B Översiktstabell kvalitativa resultat

	ångsotning			vattensotning			luftsotning			kulsotning			slagsotning			fast sprängsotning			ljudsotning		
	E	D	U	E	D	U	E	D	U	E	D	U	E	D	U	E	D	U	E	D	U
rost/bio																					
60 MW	+	0	^a							+	0	^a									
32,5 MW	+	-	0																		
85 MW							-	-	^a												
rost/avfall																					
43 MW				0	-	-							0	-	0						
12,4 MW				^a	^a	^a				+	-		+	^a	0						
21 MW	+	+	+	^a	-	^a															
33 MW																			+	+	+
75 MW				+	0	0							0	+	0						
17 MW										+	+	+	+	+	0						
30,5 MW	0	0	0	+	^a	+				+	0	0									
68 MW	+	+	0							-	-	0	-	-	0	+	^a	^a	-	0	0
55 MW				0	+	+							0	-	-						
FB/bio																					
110 MW	+	+	0																		
100 MW	-	+	+																0	0	0
FB/avfall																					
20 MW	+	-	0																-	0	-
75 MW				+	-	^a													+	0	^a
85 MW													+	^a	^a				+	0	^a
8 MW																0	-	-	0	+	+
132,5 MW	0	0	^a																		
14 MW	0	+	-																		
14 MW	^a	^a	-																^a	-	0
20 MW	^a	0	+																		
97,5 MW																-	-	0	+	0	+

E = effektivitet, D = driftproblem, U = underhållsbehov, + = bättre än väntat, 0 = som väntat, - = sämre än väntat, ^a uppgift saknas

C Vattenfalls utredning

Rapporten finns tillgänglig i rapportdatabasen i anslutning till denna huvudrapport.

Vattenfalls beteckning: MEMO U 14-19

Datum: 2014-03-25

Titel: Slagging and fouling – Idbäcken P3 soot blowing evaluation and heat transfer model description

Författare: Ida Mann, Katarina Boman, Annika Ståhlenheim, Linda Nylén