

Svaveldosering i fastbränslepanna

av

Alice Gunnarsson

Institutionen för processteknik och tillämpad biovetenskap

Lunds universitet

Juni 2026

Handledare: Ola Wallberg

Biträdande handledare: Kristina Jonsson, SCA

Examinator: Mikael Sjölin

Postadress

Box 124
221 00 Lund

Hemsida

www.ple.lth.se

Besöksadress

Naturvetarvägen 14

Telefon

046-222 82 85
046-222 00 00

Sammanfattning

På SCAs pappersbruk i Obbola eldas restprodukter från pappers- och massaproduktionen tillsammans med inköpta träbränslen för ångtillverkning i fastbränslepannan i Ångcentral 2. Då pannan i grunden ej är byggd för dessa bränslen finns problematik med både utsläpp och korrosion. Tidigare studier, på andra pannor, har indikerat att dosering av svavel skulle kunna hjälpa med denna problematik.

Detta arbete syftar till att undersöka påverkan på utsläpp, och i den mån det varit möjligt även korrosion och verkningsgrad, av att dosera granulärt svavel till det fasta bränslet i Ångcentral 2. Arbetet omfattar en litteraturstudie, tester vid tre olika doseringskoncentrationer samt tester med reducerad syrehalt i förbränningen.

Resultaten visar att naturliga variationer i produktion och bränsle har stor påverkan på de skillnader som går att notera och stora standardavvikelser för mätningarna gör resultaten mindre tydliga. Sammanfattningsvis kan en viss minskning i kolmonoxidutsläpp (CO) noteras. Utsläppen av kväveoxider (NO_x) minskar inte med svaveldosering, utan ökar snarare något och försöken att minska dessa utsläpp via reducerad syrehalt i förbränningen gav för instabil produktion för att ses som ett realistiskt alternativ, dessa minskningar gav också upphov till stora öknings i CO-utsläppen. Utsläppen av väteklorid (HCl) tycks öka något vilket kan indikera en minskning av korrosion orsakad av kloralkaliska föreningar. Utsläppen av svaveldioxid (SO₂) ökar tydligt vid högre halter av svaveldosering vilket var väntat men skulle kunna leda till ökad lågtemperaturkorrosion. Verkningsgraden tycks öka något för höga doseringshalter men standardavvikelsena för dessa mått är mycket höga och resultaten är därmed svåra att utvärdera.

Den slutsats som kan dras från testerna med svaveldosering i Ångcentral 2 är att den önskade effekten på utsläppen av NO_x uteblir och att effekten på korrosion är svår att utvärdera. Beroende på hur den eventuella ökningen i NO_x hanteras kan svaveldosering orsaka en dyrare produktion, på grund av dessa anledningar ses svaveldosering inte som en bra match för denna fastbränslepanna.

Abstract

At the SCA papermill in Obbola byproducts from the pulp- and paper production are incinerated together with purchased wood fuels to produce steam in Ångcentral 2 (Steam centre 2). As the boiler was built for other types of fuel there are currently problems with both emissions and corrosion. Earlier studies, on other boilers, indicate that dosing sulphur could help solve some of these issues.

This thesis aims to investigate the effects on emission and, as far as possible, also corrosion and efficiency of the boiler, of dosing granulated sulphur to the solid fuel in Ångcentral 2. The thesis consists of a literature study, tests with sulphur dosing at three different concentrations as well as tests with reduced oxygen flow to the combustion.

The results shows that variations in production and fuel have a large effect on which changes can be noted, the large standard deviation in the measured values also makes the changes less distinct. To summarize, some reduction in carbon monoxide emissions (CO) can be noted. The emissions of nitrous oxides (NO_x) are not reduced by the sulphur dosing but rather increase slightly and the tests with reduced oxygen flow resulted in too unstable production to be a realistic alternative, the oxygen reduction also resulted in large increases in the CO emissions. The emissions of hydrogen chloride (HCl) seem to increase which could indicate a decrease in corrosion caused by chloralkaline compounds. The emissions of sulphur dioxide noticeably increase, especially at higher sulphur concentrations, which was expected but which could result in increased low temperature corrosion. The efficiency looks to be increasing slightly at high dosing concentrations but with very high standard deviation for these measurements it is difficult to evaluate the actual effects.

The conclusion drawn from the tests at Ångcentral 2 is that the desired effect on the NO_x emissions is missing and that the effect on corrosion in the boiler is difficult to evaluate. Depending on how the increase in NO_x is dealt with, production using sulphur dosing might be more expensive, due to these reasons sulphur dosing was determined to not be a good match for this boiler.

Förord

Detta examensarbete utfördes under vårterminen 2026 och omfattar de avslutande 30 högskolepoängen på civilingenjörsutbildningen inom kemiteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet utfördes på SCA i Obbola utanför Umeå.

Först av allt vill jag tacka min biträdande handledare på SCA, Kristina Jonsson, för hjälp med utformningen av detta examensarbete samt för all den hjälp och stöd jag fått under arbetets gång. Tack till de operatörer som hjälpt till med att hålla produktionen på ÅC2 så jämn som möjligt under mina testperioder och assisterat i vissa testfaser. Jag vill även tacka all annan personal på SCA Obbola som tagit sig tid att svara på frågor, visat mig runt på anläggningen och förberett för den utrustning som behövts under mina försök.

Jag vill även tacka min handledare på institutionen, Ola Wallberg, för guidning genom arbetet samt för feedback på denna rapport.

Slutligen vill jag ge ett stort tack till min sambos föräldrar, Stina och Staffan, som möjliggjort att jag kunnat genomföra detta examensarbete genom att låta mig bo hos dem under terminen. Tack!

Innehållsförteckning

1.	Inledning.....	1
1.1.	Uppgift/syfte – uppdragsbeskrivning	2
1.2.	Avgränsningar	2
2.	Bakgrund	3
2.1.	Utrustning i ÅC2	3
2.2.	Bränslesammansättning.....	4
2.3.	Svavel och kolmonoxid.....	6
2.4.	Kväveoxider	8
2.5.	Korrosion.....	9
2.6.	Nuvarande dosering.....	10
3.	Metodik	11
3.1.	Försöksutrustning	11
3.2.	Försöksutförande	12
4.	Resultat.....	13
4.1.	Låg dosering	13
4.2.	Hög dosering.....	16
4.3.	Maximal dosering	19
4.4.	Trender.....	22
4.5.	Reducerat luftflöde	23
5.	Diskussion	24
5.1.	Utsläpp.....	24
5.2.	Korrosion.....	24
5.3.	Verkningsgrad.....	25
5.4.	Dosering och andra förändringar	25
5.5.	Lönsamhetsberäkning	26
5.6.	Slutsats.....	27
	Referenser.....	28
	Bilagor.....	30
A.	Resultat t-tester.....	30
B.	Respons reducerat syre.....	31

1. Inledning

På SCAs pappers- och massabruk i Obbola utanför Umeå tillverkas liner, bland annat kraftliner, ett kraftigt, oblekt papper som används som ytskikt i wellpapp. I bruket används stora mängder ånga, särskilt för torkningssteget i pappersproduktionen men även till många andra mindre applikationer. Del av ångan produceras i samband med återvinningen av kokkemikalier från kokeriet. De upplösta vedämnena i svartlut förbränns i sodapannan vilket producerar grönlut. Denna process ger ett konstant ångflöde, det behövs dock ytterligare produktion för att möta behovet samt möjlighet att reglera detta efter variationer i produktionen. Ångcentral 2, ÅC2, står för detta flöde. Ångcentralen byggdes som en oljepanna men har senare byggts till med två axonugnar för förbränning av bark. Idag bränns en blandning av olika restströmmar från fabriken så som bark, slam och plastrejekt från returfiberavdelningen, tillsammans med inköpt flis i ugnarna.

Förbränning av biomassa kommer med unika utmaningar på grund av dess komposition. Högt innehåll av alkali och alkaliska jordartsmetaller orsakar fouling och korrosion. Höga utsläpp av kväveoxider på grund av bränslets kväveinnehåll samt en större risk för ofullständig förbränning vilket orsakar högre halter kolmonoxid i rökgaserna. Förutom dessa utsläpp innehåller rökgaserna även svaveldioxid och partikelföroreningar.

Vid utloppet för rökgaserna från ÅC2 mäts ett flertal olika utsläpp. Detta inkluderar bland annat, kolmonoxid (CO), kväveoxider (NO_x), svaveldioxid (SO₂), klorväte (HCl) och syre (O₂). CO bildas främst av ofullständig förbränning och även om kolmonoxid inte själv är en stark växthusgas har det en pådrivande effekt på växthusgaser. Främst gäller detta för metan i atmosfären samt marknära ozon. Metan har som växthusgas en 25 gånger större påverkan än en motsvarande mängd koldioxid (CO₂), och stannar i atmosfären 8–12 år. Det främsta sättet som metan bryts ned är via reaktioner med hydroxylradikaler, tillgängligheten av dessa radikaler beror på en komplicerad kemisk balans mellan flera olika ämnen där CO har en direkt negativ effekt på bildandet [1]. Naturvårdsverket beskriver marknära ozon som en av de viktigaste luftföroreningarna i Sverige då det orsakar negativa hälsoeffekter på människor men även har stor inverkan på växtligheten. Den huvudsakliga orsaken till marknära ozon i Sverige är långdistanstransport, framför allt från andra europeiska länder, men även industriella processer har en inverkan. Skog och jordbruksgrödor tar skada av marknära ozon redan vid lägre halter och skadorna har uppskattats till ett värde på 1 miljard kronor om året. Utöver de ekonomiska konsekvenserna så gör påverkan på skog att upptaget av koldioxid minskar med runt 10% [2]. Marknära ozon bildas genom fotokemiska reaktioner där flyktiga organiska ämnen och CO reagerar i solljus, men även NO_x har en stor påverkan. Då NO_x både förbrukas och bildas under den serie av reaktioner som resulterar i marknära ozon kan NO_x effekt liknas vid den av en katalysator [3]. Svaveldioxidutsläpp har i sin tur en direkt koppling till försurning då det omvandlas till svavelsyra i atmosfären. Surt regn var fram till början av 2000-talet ett stort problem i Sverige men även idag ligger pH på nederbörden mellan 4,6–4,8 i stället för 5,3–5,5 där den uppskattats ligga utan försurning. Även här har NO_x utsläpp en inverkan på försurning, men då det först omvandlas till nitrat som fungerar som gödningsmedel sker försurningen först då kvävemättnad uppnås i miljön och nitraten läcker ut i vattendrag [4]. Även HCl kan ha en försurande effekt då det påverkar salthalter i vatten vilket kan öka mängden löst organiskt kol i ytvatten [5].

Tidigare studier med dosering av svavel har visat lovande resultat för reducering av CO-utsläpp vid förbränning i fastbränslepannor och skulle även kunna möjliggöra för drift som minskar NO_x-utsläpp [6], [7], [8]. Svaveldosering doseras även för att minska korrosion på många anläggningar, vilket till exempel utförs på Umeå Energi [9], [10].

1.1. Uppgift/syfte – uppdragsbeskrivning

Syftet med examensarbetet är att utvärdera hur dosering av svavelgranulat i bränslemixen påverkar utsläpp från fastbränslepannan i Ångcentral 2 och ifall doseringsbehovet av urea eller kalk förändras. Det ska även fokusera på doseringens inverkan på korrosion och verkningsgrad i den mån det är möjligt. Samt infatta en beräkning av lönsamhet av en permanent applicering av svaveldosering.

Arbetet ska omfatta en litteraturstudie, försöksplanering och ett försök med svaveldosering till fastbränslepannan ÅC2 under en kortare period.

1.2. Avgränsningar

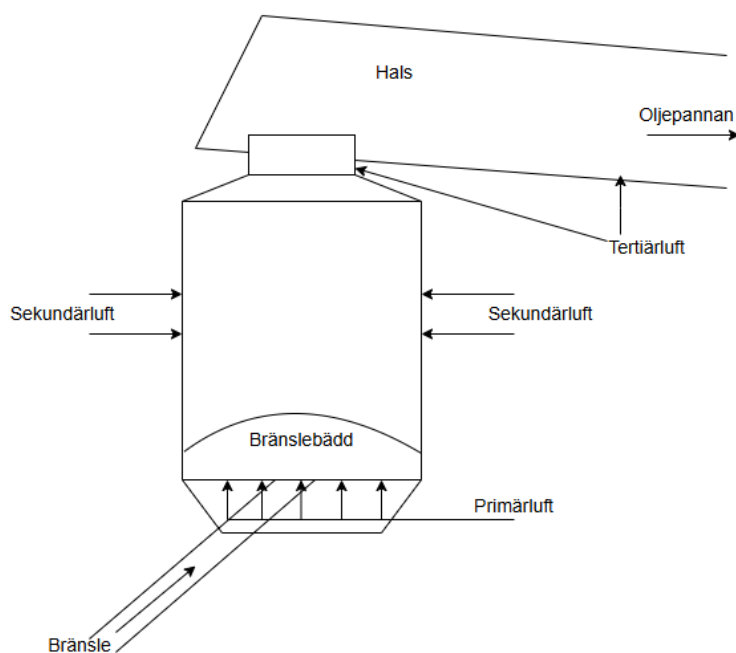
Arbetet ska inte utvärdera resultat för olika bränsleblandningar utan utgår från att bränslet i pannan kan representeras av det genomsnittliga bränslet som tillförts under den senaste tidsperioden. Resultatet utreds endast för perioder när pannan ej stöddeldats med eldningsolja då utsläppsbilden skiljer sig stort från den vid förbränningen av fasta bränslen, samt att doseringen sker via det fasta bränslet. Då beläggningssonder ej fanns att tillgå för korrosionsmätningar utreds korrosionspåverkan endast utifrån den påverkan som kan utläsas från förändringar i utsläppsnivåer.

2. Bakgrund

För att uppskatta svavlets effekter på utsläppen från ÅC2 behövs kunskap om pannans utformning och det bränsle som förbränns samt om uppkomsten av de utsläpp som idag finns. Vilket sammanfattas i detta avsnitt.

2.1. Utrustning i ÅC2

Bränslet tillförs till ugnarna via två olika strömmar där den första, biobränsleremmen, innehåller en blandning av bark, biologiskt slam och torrflis, och den andra, rejektströmmen, innehåller plastrejekt och fiberslam från returfiberavdelningen. Dessa blandas med varandra precis innan bränslet delas upp mellan de två axonugnarna. Det blandade bränslet delas med hjälp av en fördelningsskruv upp mellan två bingar var ifrån det transporteras via skruvar in i respektive axonugn. Ugnarna är murade och fungerar som kompletterande förbränningskammare till ångpannan. Axonugnar är speciellt lämpliga för att förbränna bränslen med hög fukthalt då teglet lagrar strålningsenergi som snabbt torkar bränslet vid tillsättning. I ugnen förbränns bränslet på ett fast roster utan automatisk askutmatning, vilket innebär att ugnarna måste eldas ned för att kunna tömmas på slagg och aska. Luft tillförs till förbränningen i form av primär-, sekundär- och tertiära flöden, se Figur 1.

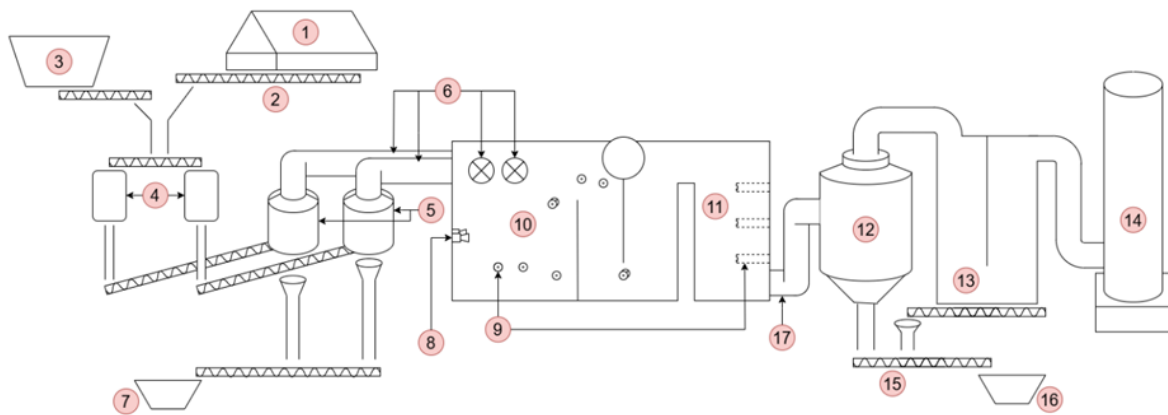


Figur 1. Schematisk bild av axonugnarna på ångcentral 2.

Det primära luftflödet kan justeras både till volym och temperatur för att motverka variationer av framför allt fukthalt i bränslet och tillsätts underifrån. Även det tertiära luftflödet är justerbart och tillsätts på två olika platser, i den övre delen av ugnen samt i rökghalsen, flödet kontrolleras i styrsystemet genom att förhålla sig till önskat högsta värde på CO och lägsta värde på O₂ i halsen mellan fastbränsleugnar och oljepannan. Det sekundära luftflödet är ett konstant flöde vid normal drift men kan stängas av för att undvika stora luftöverskott vid låg last och tillsätts på två nivåer i mitten av ugnen. Via de så kallade halsarna transporteras sedan rökgaserna vidare in i oljepannan där mättad 30 bars ånga

produceras via värmeväxling. Eldningsolja kan förbrännas i oljepannan om förbränningen av fast bränsle i axonugnar inte kan möta ångbehovet, till exempel då de eldas ned vilket görs varannan dag.

Oljepannan är utrustad med ångsotblåsare för att rengöra värmeväxlarytor från sot, aska och slagg. Pannan är sammankopplad med en så kallad ekonomiser, en värmeväxlare där inkommande pannvatten förvärms med hjälp av spillvärme från rökgaserna, innan de leds vidare till cyklon, elfilter och slutligen skorstenen. Cyklonen separerar ut större fasta partiklar och elfiltret avskiljer stoft. Elfiltret är uppbyggt av två fält med elektroder som matas med likspänning. När stoftpartiklar passerar genom passagen mellan elektroderna blir de negativt laddade vilket gör att de då fångas upp av filtret.

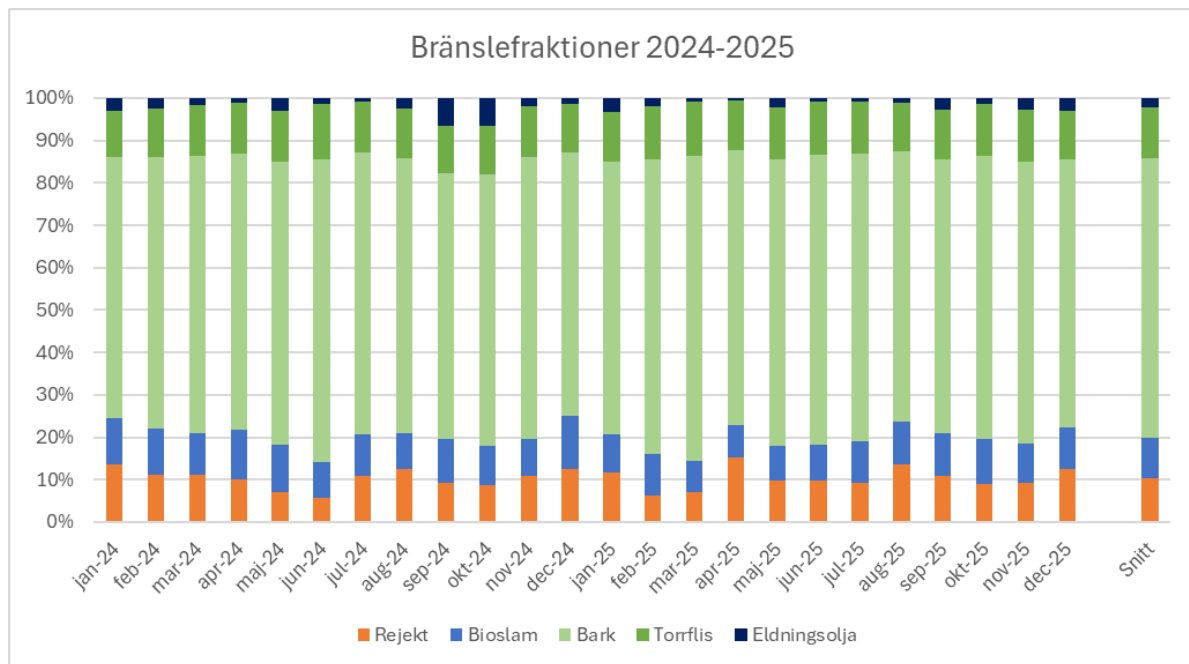


Figur 2. Översiktsskild över ångcentral 2. Från [11], återgiven med tillåtelse.

1) Bränslekyrkan, 2) Biobränsle-remmen, 3) Tippficka för rejekt, 4) Blandningsbingar, 5) Axonugnar, 6) Rökashalsar & inlopp till oljepannan, 7) Slaggcontainer, 8) Oljebrännare, 9) Sotblåsare, 10) Oljepanna, 11) Ekonomiser, 12) Cyklon, 13) Elfiltret, 14) Skorsten, 15) Askblandskruv, 16) Askcontainer, 17) Kalkinblåsning.

2.2. Bränslesammansättning

Generellt sett finns ganska stora variationer i bränslemixen som matas till fastbränslepannan då fraktionerna i stor utsträckning beror på variationer i produktionen. En produktion som varit än mer föränderlig i och med uppstarten av den nya pappersmaskin som byggts på anläggningen. Månadsförbrukningen av de olika bränslena finns dock noterad och genom att sammanställa denna data kan det noteras att blandningen varit liknande från månad till månad de senaste två åren. Från den sammanställda data om bränsle som fanns tillgänglig togs ett genomsnittsbränsle fram, se Figur 3.



Figur 3. Genomsnittliga bränslefraktioner förbrukade i ÅC2 för samtliga månader 2024–2025, i viktsprocent.

Majoriteten av bränslet i fastbränslepannan är bark, det axonugnarna byggdes för att förbränna. När virket kommer till bruket tvättas det först med varmvatten innan det avbarkas i barktrumman. Barken sönderdelas och pressas för att höja torrhalten sedan transporteras den till lagring innan den förbränns. Till detta tillsätts inköpt torrflis. Torrflis består av rester från sågverk, de delar av trädet som blir över efter att plank och brädor sågats upp och som sedan huggs upp i mindre delar. Då torrflisen kommer från torkat virke är fukthalten betydligt lägre än för trädbränslen från andra delar av produktionskedjan, även askhalten är något lägre [12].

Produktionsvattnet från bruket behöver renas innan det släpps ut. Detta görs via en biologisk reningsprocess i tre steg. Två sedimenteringssteg och ett biologiskt aktivt steg. I det biologiska steget tillsätts fosforsyra och urea som näring till mikroberna, järnsulfat och polymer tillsätts senare till slammet för enklare avvattnings. Efter sedimentering tas slammet till vara och avvattnas innan det tillsätts i bränslemixen till fastbränslepannan. Denna fraktion benämns som bioslam.

Rejektströmmen kommer från returfiberavdelningen där utsorterad wellpapp återvinns. Wellpappen tillsätts till ett vattenbad där den löses upp under omrörning. Trots att wellpappen främst kommer från kommersiell verksamhet, vilket ger en returfiber av högre kvalitet på grund av bättre sortering, innehåller den en hel del plastrester. I vattenbadet finns en raggerkejda, en roterande kätting, som samlar upp plasten från pappersmassalösningen. Efter att den bortforslade plasten skiljts från kedjan delas rejektet i mindre bitar. Rejektströmmen består också av en fiberfraktion, denna utvinns från golvkanaler och från recirkulerande vattenströmmar inom processen.

Eldningsoljan som bränns i oljepannan vid utökat behov transporteras direkt till brännare och är därför aldrig del av den fasta bränslemixen men utgör totalt ett par viktsprocent av det bränsle som nyttjas, dock har oljan betydligt högre energitäthet än den fasta bränslemixen och ungefär 15 % av ångproduktion kommer från oljeförbränning.

Genom att använda de genomsnittliga värden för bränslemixens sammansättning som tagits fram kunde resultat från analyser som gjorts på de separata bränsleströmmarna sammanställas till ett snittbränsle då det gäller innehåll av ämnen och värmevärde, se Tabell 1. Dessa värden blir såklart ett antagande på grund av de tidigare nämnda variationerna i sammansättning, men även variationer inom varje bränsletyp förekommer.

Tabell 1. Beräknade bränslefraktioner för bränslemixen i ÅC2 år 2024–2025, i viktprocent. Värmevärdet gäller för sammansättningen som levereras till pannan, det vill säga, inklusive fukt.

	Bränslemix	Enhet
Aska	3,44	vikt-%
Svavel	0,05	vikt-%
Kol	52,05	vikt-%
Väte	6,22	vikt-%
Kväve	0,41	vikt-%
Syre	37,57	vikt-%
Fukthalt	59,50	vikt-%
Effektivt värmevärde	7,78	MJ/kg

Biobränsle har generellt sett mycket lågt svavelinnehåll om man jämför med fossila bränslen men också högre klorvärden. Bränslemixen i ÅC2 har liknande svavel och klorinnehåll som ren bark, båda ligger strax över typiska halter, se Tabell 2. Det extra svavlet kommer främst från det biologiska slammet, vilket från början har sitt ursprung i kokprocessen och det högre klorinnehållet är ett resultat av den höga klorhalten i plastrejektet.

Tabell 2. Svavel och klorinnehåll i ett typiskt barkbränsle i jämförelse med den aktuella fasta bränslemixen och oljan som förbränns i ÅC2. Genomsnittsvärden från senaste årens bränsleanalyser, omräknat efter bränslefraktioner.

	Typiskt värde bark TS vikt-% [13]	Bränslemix TS vikt-%	Förbränningsolja vikt-%
S	<0,05	0,06	0,37
Cl	0,01–0,03	0,05	<0,0002

2.3. Svavel och kolmonoxid

Kolmonoxid skapas vid ofullständig förbränning eller oxidation av kol. Vid förbränning av biomassa kan processen beskrivas i fyra steg. Först värms bränslet upp och vatten frigörs, detta följs av en nära pyrolytisk nedbrytning när makromolekylerna i biomassan fragmenterar till bland annat kolmonoxid, och mindre kolväten som frisätts i den omgivande gasfasen. Kvar blir också en fast kolfas, på grund av ett överskott i förhållande till tillgängligt syre och väte. Följer detta gör avgasningsfasen då kvarvarande fast kol förflyttas till gasfasen via oxidationsmedel som syre, H₂O eller H₂. Vid överstökiometrisk förhållanden sker sedan oxidering av tidigare skapade intermediat i gasfasen, exakt ordning för denna process beror på flera olika aspekter, både termodynamiska och kemiska [14].

Det finns fler olika aspekter som påverkar förhållandet mellan CO och CO₂ i rökgaser. Koncentrationen syre som möjliggör oxideringen men även bränslets fukthalt, mer värme till vätskedunstning betyder mindre till avgasning av kolföreningar. Även de oorganiska ämnena i bränslet har en betydande påverkan.

Försök med dosering av svavel för att minska kolmonoxidutsläpp från förbränning av biomassa har gjorts i över 20 år. Resultaten har visat på att reduktion av utsläpp har varierat med siffror mellan 40-70 % [6], [15], [16]. Trots att effekten är dokumenterad i flera fall har den bakomliggande reaktionsmekanismen inte kunnat säkerställas och flera olika teorier om svavlets inverkan existerar.

I en stor rapport sammanställd vid DTU 2007, gjordes försök med SO_2 vid förbränning av naturgas, i anslutning till detta dokumenterades resultat från tidigare försök och reaktionsmekanismerna bakom undersöktes med hjälp av det kinetiska modelleringsprogrammet Chemkin [17]. Sammanlagt diskuterades fyra olika teorier, två relaterade till sotbildning, en med fokus på radikaler och en relaterad till produktkomposition. Den första teorin är att svavel ökar sotbildning vilket då minskar mängden CO i gasfasen i förhållande till syret vilket i sig skulle öka andelen som oxiderar till CO_2 . Eventuellt genom att svavel adsorberas till sotpartiklar och ökar sotets klibbighet och som följd skapar större partiklar. Detta motsägs dock av tester på förbränningsmotorer där det motsatta i stället observerats vilket leder till nästa teori, att sotbildningen minskar till följd av svaveltillsättning. Anledningen bakom är antingen att svavel påverkar skapandet av radikaler och då minskar föregångarna till sotpartiklar eller att det mättar aromatiska strukturer, det som motsäger denna teori är att testerna sker vid låga syrehalter och att det då är osannolikt att eventuellt CO som skapas från sotet skulle kunna oxideras, utöver detta verkar syrehalter i rökgas ej öka under försök [17].

Radikalteorin är baserad på att reaktionen från svaveldioxid till svavelväte, och tillbaka, skulle skapa fler radikaler och att om rökgaserna återcirkuleras så kan detta ske på en högre än stökiometrisk grad. Denna teori har dock inte kunnat bekräftas genom kinetisk modellering. Teorin om produktkomposition föreslår att SO_2 ändrar kompositionen så att mindre CO och mer H_2 skapas, vilket skulle påverka vattengasskift, balansen mellan CO och H_2O till CO_2 och H_2 . Det skulle förklara varför CO minskar utan några större förändringar av O_2 i rökgasen, det förklarar dock inte varför CO minskar i högre grad än SO_2 ökar [17].

Ytterligare en möjlig orsak diskuteras i en artikel publicerad 2024 och är även den kopplad till bildningen av radikaler. Alkaliföreningarna KCl och KOH har påvisats att främst reagera med radikaler, vilket inte gäller för K_2SO_4 , när svavelhalten ökar och kalium i högre grad bildar sulfatföreningar snarare än KCl och KOH ökar också mängden tillgängliga radikaler. Då den direkta oxidationen mellan CO och O_2 är betydligt långsammare och har högre aktiveringsenergi än oxidation via radikaler så ökar oxideringen av CO till CO_2 med fler radikaler närvarande [14]. Men likt flera av de tidigare diskuterade teorierna så gör det faktum att O_2 i rökgasen inte förändras i någon signifikant utsträckning denna teori inte helt sannolik.

2.4. Kväveoxider

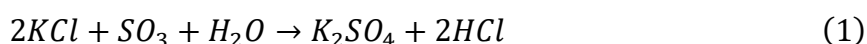
Kväveoxidutsläpp har en betydligt svagare koppling till dosering av svavel än kolmonoxid. Kväveoxider, NO_x, skapas via tre olika vägar under förbränning. Den första formen är bränsle-NO_x, som främst beror på kvävehalt i bränslet, dess reaktivitet, samt syrehalten i de första områden där förbränning sker. Lågvärdigt bränsle som bark har ofta en högre halt kväve än vedartad biomassa och därav högre bränsle-NO_x utsläpp vid förbränning. Föregångarna till bränsle-NO_x, NH₃ och HCN, bildas i sig genom två olika vägar, först i den initiala pyrolysen där ostabila aminer och proteiner bryts ner till NH₃, efter det bildas HCN från cykliska amider, dessa bildar NO_x då syre finns tillgängligt. Termisk-NO_x uppstår vid höga förbränningstemperaturer, över 1300–1500 °C och innebär att N₂ i förbränningsluften oxideras direkt av syre. Vid förbränning av biomassa är det bara högkvalitativ, vedartad biomassa eller bränslen med mycket låga fukthalter som når upp till dessa temperaturer. Temperaturen i fastbränslepannan i ÅC2 ligger främst mellan 900–1100 °C, därav är det troligen bara några få procent av NO_x-utsläppen som bildas som termisk-NO_x. Vid lägre flamtemperaturer kan den sista formen av NO_x skapas, prompt-NO_x, som bildas i flamzonen då N₂ reagerar med kolvätesradikaler, en mycket snabb reaktion därav namnet. Prompt-NO_x ger dock sällan upphov till några större mängder och därmed kommer utsläppen med allra största sannolikhet domineras av bränsle-NO_x [18].

Idag reduceras kväveoxidutsläpp från pannan genom dosering av urea. Urea bryts ned till CO och ammoniak, NH₃. Ammoniak reducerar NO_x, genom så kallad SNCR, selektiv icke katalytisk reduktion, till N₂ [19]. Tillsatsen av urea sker i halsen mellan ugnarna och oljepannan vilket minimerar risken för att N₂ åter reagerar till NO_x. Ytterligare en metod för NO_x reduktion som finns axonugnarna är stegvis lufttillförsel. Genom att begränsa lufttillförseln till den första förbränningszonen, med hög tillgång till bränsle, kan man styra reaktionen av kväve i bränslet mot N₂ i stället för NO_x. Genom att i nästa zon ha god tillgång på syre så säkerställs fullständig förbränning av bränslet. Att låta förbränningen ske vid under stökiometriska förhållanden har visat goda resultat [18]. I dagsläget är dock den stegvisa lufttillförseln begränsad av ökande CO utsläpp vid låga syrehalter i den första förbränningszonen. Då pannan redan idag körs vid temperaturer med minimal bildning av termisk-NO_x ger temperaturjusteringar troligen ingen större reduktion av NO_x-utsläpp.

I tidigare studier med svaveldoseringar till förbränning av biomassa har påverkan på NO_x-utsläpp varierat kraftigt. I en studie ökar NO_x-utsläppen [15]. I några sker ingen större förändring [6], [16], och i en studie påvisas reduktion [7]. I studien där reduktion uppvisats förklaras det med att de ammoniaktillsättningar som görs får en mer effektiv SNCR-process efter svaveldosering, dock sker liknande ammoniaktillsättningar i en av de studier där ingen förändring uppvisats [6]. En skillnad mellan dessa studier är panntypen då förändringen ses i en studie på en fluidpanna och uteblir i den liknande studien på en rosterpanna. I endast en av de studier som hittats görs försök med att minska syrehalten under förbränningen. Detta försök visar inga entydiga resultat då försöket var tvungen att avbrytas på grund av variationer i ångbehovet. Förändringen i luftflöde gjordes genom justeringar i sekundär- och tertiärluft, syrehalten noterades i rökgasen [6].

2.5. Korrosion

Under våren 2025 genomfördes ett examensarbete på Ångcentral 2 med syftet att identifiera och karaktärisera korrosion på fastbränslepannan med fokus på ekonomiser och elfilter [11]. I denna rapport noterades bland annat beläggningar innehållande kaliumklorid, KCl på värmeväxlarytor. Biomassa innehåller betydligt mer kalium och natrium än traditionella, fossila bränslen. Dessa kan, tillsammans med klorider, skapa eutektiska blandningar i avlagringar i pannan. På grund av att smälttemperaturer sänks ökar risken för korrosion vid lägre temperaturer än vid förbränning av till exempel kol [13]. I gasfas är svavelväte, H₂S och väteklorid, HCl de mest korrosiva ämnena, dock kräver de höga koncentrationer och temperaturer för att korrosionsprocessen ska kunna initieras, därför är saltavlagringarna oftast ett betydligt större problem när det gäller korrosion. Om alkalimetallerna i stället reagerar med svaveltrioxid, SO₃, skapas alkali-sulfater. Avlagringar som enbart består av sulfater har betydligt högre smältpunkter och är därför att föredra ur en korrosionssynpunkt [20].



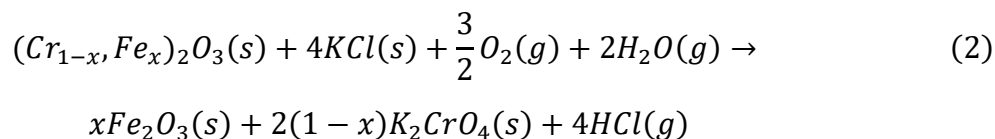
Alkaliklorider skapar oftast värst korrosion på överhettare men kan bilda partiell smälta avlagringar på övriga ytor över ca 500 °C och i laboratoriemiljöer har blandningar innehållande alkaliklorider påvisat korrosivitet redan vid 260 °C [10]. Fastbränslepannan i ÅC2 är inte utrustad med överhettare men medeltemperaturen i oljepannan är runt 550 °C och i ekonomisern, där både KCl och NaCl påvisats, är medeltemperaturen runt 290 °C. Även i elfiltret påvisades KCl, där är dock maxtemperaturen runt 150 °C och korrosionspåverkan från alkalikloriden är troligen inte lika omfattande [11].

Molförhållandet S till Cl i bränslet har stor inverkan på hur sannolik klorrelaterad korrosion är, där ett förhållande under 2 ofta är sammankopplat med problem medans en relation över 4 sällan uppvisar problem [21]. Med de analyser samt data för genomsnittliga bränslemixer som finns tillgängliga kan förhållandet i pannan idag antas ligga mellan 1-2 vilket stämmer väl överens med övriga indikationer på att klorrelaterad korrosion fortfarande sker [11].

Svavel kan doseras i många olika former för att minska korrosion där sulfater, som ammoniumsulfat, är mer effektiva än elementärt svavel eller svaveldioxid. Detta då sulfaterna bryts ned till SO₃ direkt, till skillnad från de andra tillsättningsarna där SO₂ först måste oxideras [22]. Elementärt svavel kan dock ändå användas för att minska korrosion med goda resultat [9].

En aspekt att ha i åtanke vid svaveldosering är att en hög dosering av svavel kan leda till ökad lågtemperaturskorrosion. Lågtemperaturskorrosion syftar till när temperaturer understiger daggpunkttemperaturen för rökgasen vilket orsakar utfällning av syra. Ett bränsle som bara innehåller klorväte i rökgaserna har en daggpunktstemperatur på 60–90 °C, för ett bränsle med mer svavel ligger denna punkt snarare mellan 140–180 °C. Utfällning kan ske vid ännu högre temperaturer vid närvaro av beläggningar med hygroskopiska salter. Dessa kan dra åt sig fukt från rökgaserna redan runt 30 °C över den faktiska daggpunkttemperaturen, och ökar därmed risken för korrosion även vid något högre temperaturer [23]. I en erfarenhetsinsamling gjord på svenska leverantörer av fjärrvärme rapporterades inga problem med korrosion på grund av svaveltillsättningar [16]. Dock finns redan idag ibland problem med syrautfällning i slutet av ekonomisern när högre verkningsgrad, på grund av lägre temperatur vid utloppet, uppnås.

När KCl reagerar med kromoxid i rostfritt stål skapas kaliumkromat vilket skadar det skyddande lagret med så kallad korund-strukturerad oxid. Kvar blir ett lager järnrik oxid som saknar god förmåga att skydda mot korrosion, vilket leder till att oxideringen av materialet ökar snabbt [24]. Se Ekvation 2 för reaktionen.

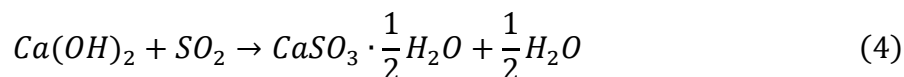
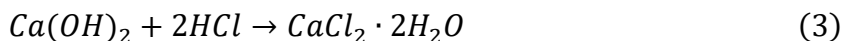


I flygaska (från elfiltret) som analyserats har ett överskott av katjoner noterats, antingen på grund av att det saknas anjoner eller att temperaturen inte är tillräckligt hög. Det tyder på att klorföreningar troligen fortfarande bildas då svavlet inte reagerar med tillräckligt av det närvarande Na och K [11].

2.6. Nuvarande dosering

Dosering av urea sker när temperaturen i ugn och hals är över 850 och 700 °C respektive, vilket förhindrar dosering vid urslaggnings av ugnarna samt vid låg förbränningslast. Doseringsmängden beror av det utgående ångflödet men ligger i snitt på 23 kg/h, vilket spädes med vatten innan det doseras i halsen mellan ugnarna och pannan. Den exakta reduktionen som uppnås på grund av ureadoseringen är inte helt lätt att säkerhetsställa då många olika faktorer påverkar utsläppen, men genom att notera förändringar i utsläppen då doseringen slås på eller av är den troligen runt 30 %.

Till Ångcentral 2 doseras, förutom urea, även släckt kalk, $Ca(OH)_2$, för att motverka HCl i rökgasen. Släckt kalk reagerar även med SO_2 i motsvarande utsträckning [25].



Bränslemixen innehåller redan en signifikant mängd kalcium men inte i former tillgängliga för att reagera med HCl, därför måste dessa tillsättningar göras för att möjliggöra reduktionen av HCl. Doseringen av kalk till ÅC2 har i dagsläget ingen avancerad styrning utan justeras av operatören så att gränsvärden för utsläpp ej passeras. Kalkdoseringen kan justeras mellan 0–60 kg/h och ligger i genomsnitt på 38 kg/h. Kalkinblåsningen är placerad mellan ekonomiser och cyklonen som utgör första steget i rökgasreningen.

3. Metodik

Processdata har hämtats från styrsystemet samt programmet WinMOPS där processdata för längre perioder finns tillgänglig. Även tidigare analyser som gjorts på bränslen har nyttjats.

Försöken genomfördes på fastbränslepannan under en period på fem veckor där antalet försöksdagar begränsats av urslaggning av axonugnarna, en period av låglastproduktion vid planerat produktionsstopp på annan del av anläggningen samt ett mindre antal oplanerade stopp.

3.1. Försöksutrustning

Utrustningen för svaveldosering inhyrdes av företaget Enviloop och består av en matartratt med inmatningsskruv och tillhörande motor i botten, vilket kan ses i Figur 4 [8].

Doseringsutrustningen monterades i anslutning till fördelningsskruven som delar upp bränslet mellan de två axonugnarna. Doseringsmängden ställdes in manuellt och genom att kopplas till styrsystemet stängdes doseringen av om inflöde av bränsle saknades. För att uppnå olika doseringsmängder utan att behöva plocka isär och kalibrera om utrustningen utnyttjades utrustningens pausfunktion, då kunde doseringen pausa ett visst antal sekunder under en sekvens om 30 sekunder för att uppnå en lägre dosering per timme. Då doseringen inte var kopplad till andra variationer i bränsleflöde eller ångproduktion gjordes dessa justeringar när skillnader noterades vilket gjort att de faktiska doseringshalterna kan skilja sig något från de önskade.



Figur 4. Doseringsutrustning för svavel. Fotograf: Alice Gunnarsson.

3.2. Försöksutförande

För att möjliggöra så tydliga resultat som möjligt för studierna gjordes testerna i pannan endast vid så stabila normalförhållanden som möjligt. För att säkerhetsställa detta gjordes inga försök under dagar då uraskning av axonugnarna inträffade. Under försöken hölls bränsleflöden in i pannan konstant i den mån det var möjligt samt att stödelning av olja i oljepannan undveks då det var möjligt på grund av den påverkan som förbränning av olja har på utsläppsvärden. Ångsotning i pannan, som vanligtvis genomförs var 6:e timme, pausades också under testperioderna, som var 8 timmar långa.

För att undersöka svaveldoseringens påverkan på utsläpp gjordes först tester med endast svaveldosering och med tre olika doseringshalter. Efter detta gjordes tester med reducerat luftflöde genom att begränsa tertiärluftflödet. Målet var att hålla syrehalten före ekonomiser på 2–2,5 % vilket var ungefär en procentenhet lägre än vid normal drift. Detta för att utreda hur svaveldoseringarna påverkade CO-värdena i en situation då dessa vanligen stiger kraftigt, samt i hur stor utsträckning det går att få ned NOx-utsläppen utan att nå kritiska CO-värden. Vanligtvis jämför man syrehalter i skorsten men då pannan har ett signifikant inläckage av luft användes en tidigare punkt för att få bättre kontroll.

De valda doseringshalterna bestämdes utifrån tidigare studiers resultat samt efter Enviloops rekommendationer. Den lägre doseringshalten, 35 g/MWh ånga, rekommenderades som en startdosering från Enviloop. Den högre halten, 70 g/MWh ånga, var en omräkning av 20 mg/MJ bränsle vilket nämndes som den optimala doseringen, efter vilken effekterna börjar plana ut i flera källor [6], [7], [15]. Två test genomfördes även med den rekommenderade maximala koncentrationen från Enviloop, 100 g/MWh ånga.

Tabell 3. Genomförda svaveldoseringsförsök.

Försök	Antal	Benämning
Låg dosering, 35 g/MWh ånga	3	1.A, 1.B, 1.C
Hög dosering, 70 g/MWh ånga	3	2.A, 2.B, 2.C
Maximal dosering, 100 g/MWh ånga	2	3.A, 3.B
Reducerat luftflöde	1	4

4. Resultat

Resultaten från doseringstesterna presenteras med ökande koncentration följt av tester med reducerade luftflöden till ugnarna. För samtliga tester har mätvärden tagits med 30 sekunders intervall. Mindre intervall fanns att tillgå men valdes bort för att minska risken för problem associerade med stora antal mätpunkter vid dataanalys. De enskilda testerna jämfördes främst med tidpunkter under samma dygn utan dosering för att förhoppningsvis minimera riskerna för stora variationer i bränslet. Vad som generellt sett kan noteras är att relativa standardavvikelser är stora för många av mätvärdena, då mätperioderna är långa och variationer i förbränningen på grund av till exempel bränslesammansättning förekommer är detta naturligt. Tyvärr innebär det också att vissa resultat inte kan räknas som statistiskt säkerställda, resultat från t-tester gjorda på processdata kan läsas i Bilaga A, förändringarna i kolumnen ytterst till höger i tabellerna i sektion 4.1–4.3 är grönmärkade då resultaten är säkerställda. Detta innebär inte nödvändigtvis att svaveldoseringen är orsaken till skillnaden men fastställer att skillnaden mellan perioderna finns.

Perioder med mycket avvikande värden har filtrerats bort från resultaten, detsamma gällde vid val av referensperioder innan svaveldoseringen startades, vid stora avvikelser eller förbränning av olja filtrerades dessa data bort för att möjliggöra en så rättvis jämförelse som möjligt. Dessa avvikelser resulterade nästan uteslutande i perioder med mycket högre utsläppssiffror än snittet och skulle därför förskjutit medelvärdena som beräknades.

4.1. Låg dosering

För testerna med låg dosering var målet en svaveldosering på 35 g/MWh ånga producerat. Försöket utfördes som tre test om 8 timmar.

Resultaten för de olika undersökta parametrarna presenteras i varsin tabell. För låg dosering av svavel syns inte de förväntade minskningarna vilket kan ses i Tabell 4.

Tabell 4. Summerade resultat för CO-utsläpp vid låg svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

CO					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
1.A	34,4	39,0 ± 33,2 (85%)	44,2 ± 23,7 (53%)	50,9 ± 38,1 (75%)	+13,3
1.B	34,6	22,8 ± 9,1 (40%)	27,6 ± 14,8 (54%)	37,3 ± 7,5 (20%)	+21,1
1.C	36,2	22,5 ± 16,1 (71%)	24,8 ± 13,5 (55%)	61,6 ± 39,2 (64%)	+9,8

CO-utsläppen ser snarare ut att öka något med låg dosering, det ska dock noteras att utsläppsvärdena varierar mycket. Dessa variationer syns för CO-utsläppen även för andra koncentrationer, de är också betydligt större än för övriga utsläpp. Det kan också vara värt att notera att utsläppen i samtliga fall fortsätter att öka efter att doseringen avslutats, det skulle därmed kunna vara andra faktorer i ångproduktionen som har ändrats under testperioden som haft större påverkan på CO-utsläppen än svaveldoseringen, men att dessa först blir ordentligt

tydliga efter att doseringen avslutats. Sammanfattningsvis syns inga större skillnader i CO för denna svavelkoncentration.

Resultaten på NO_x-utsläppen är inte entydiga och också relativt små, se Tabell 5.

Tabell 5. Summerade resultat för NO_x-utsläpp vid låg svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

NO _x					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
1.A	34,4	55,2 ± 8,8 (16%)	59,1 ± 14,3 (24%)	56,5 ± 13,4 (24%)	+7,0
1.B	34,6	69,2 ± 13,9 (20%)	72,9 ± 15,5 (21%)	80,2 ± 13,7 (17%)	+5,4
1.C	36,2	79,1 ± 11,1 (14%)	75,4 ± 13,8 (18%)	53,4 ± 13,5 (25%)	-12,9

Här är den relativa standardavvikelsen betydligt mindre, skillnaderna under svaveldoseringen är också något mindre. Då det både finns resultat som tyder på högre och lägre utsläpp med svavel samt att det saknas tydliga trender i hur utsläppen påverkas, efter avslutad dosering har den låga doseringsmängden troligen försumbar påverkan på NO_x-utsläppen.

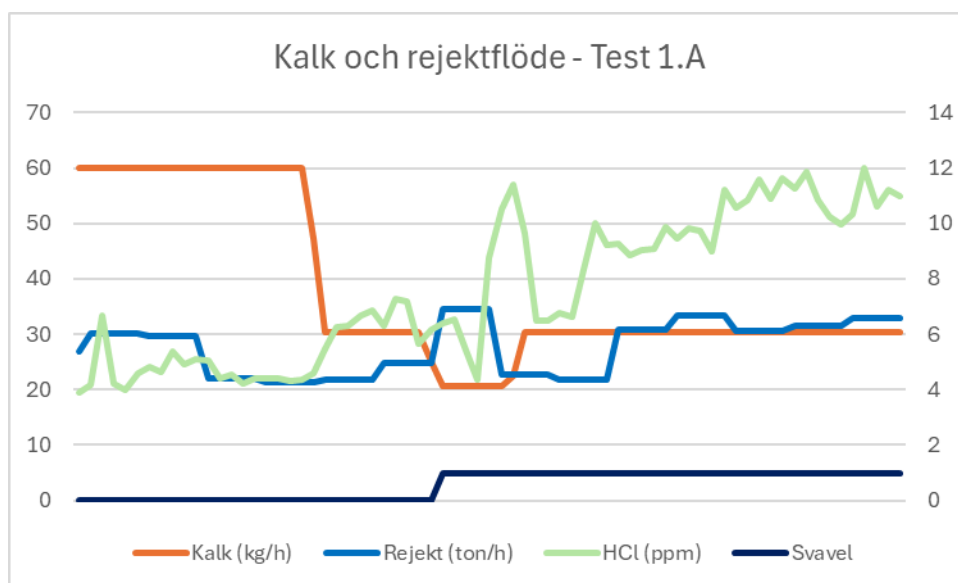
Även utsläppen av HCl går i båda riktningarna vid den låga koncentrationen, se Tabell 6.

Tabell 6. Summerade resultat för HCl-utsläpp vid låg svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

HCl					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
1.A	34,4	5,2 ± 1,0 (19%)	10,5 ± 1,0 (9%)	7,6 ± 0,9 (12%)	+99,8
1.B	34,6	9,2 ± 1,7 (19%)	7,9 ± 1,1 (14%)	8,5 ± 1,4 (16%)	-14,8
1.C	36,2	6,1 ± 0,5 (8%)	9,5 ± 1,3 (14%)	6,3 ± 1,1 (18%)	+54,4

Resultaten för HCl är dock betydligt mer avvikande, då det ökar tydligt för två av testerna. För HCl finns det två tydliga parametrar som har stor påverkan på utsläppen. Mängden plastrejekt i bränslet, den fraktion där majoriteten av klorret i det fasta bränslet återfinns, samt hur mycket släckt kalk som doserats i syfte att minska HCl utsläppen. Tittar man närmare på dessa faktorer kan man notera att de faktiskt är jämnast för försök 1.B. Där är kalkdoseringen några procent högre under svaveldoseringen än under perioden innan, men detsamma gäller för rejektflödet. Vid försök 1.A är kalkdoseringen i genomsnitt 70 % högre i perioden innan

svavel introduceras, trots att rejektflödet är ca 20 % mindre, förhållanden vilka skulle kunna förklara den stora ökningen under svaveldoseringen, se Figur 5.



Figur 5. Förändringar i kalk, rejekt och HCl innan och under försök 1.A. Kalk avläses på vänstra sidan, övriga till höger. Notera att svavel endast avläses som på eller av.

Vid försök 1.C borde dock effekterna leda till ett lägre värde under svaveldoseringen då rejektflödet är ca 30 % mindre och kalkdoseringen lite högre. Det blir därför svårt att uppskatta vilka förändringar som har sitt ursprung i svaveldoseringarna, det kan dock vara värt att notera är att SO₂ halten i rökgasen innan dosering i test 1.B är högre än under doseringen, se Tabell 7. Det skulle kunna förklara varför effekten blir den motsatta gentemot de andra försöken.

Tabell 7. Summerade resultat för SO₂-utsläpp vid låg svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

SO ₂					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
1.A	34,4	6,0 ± 1,5 (25%)	13,7 ± 2,4 (18%)	8,8 ± 1,8 (21%)	+128,7
1.B	34,6	12,4 ± 2,8 (23%)	11,7 ± 2,2 (19%)	8,5 ± 1,9 (23%)	-5,6
1.C	36,2	6,7 ± 1,5 (22%)	12,6 ± 2,2 (18%)	7,4 ± 1,4 (19%)	+87,5

Utsläppen av SO₂ är den faktor som borde ha starkast koppling till svaveldoseringen, trots det sjunker SO₂ vid dosering under test 1.B. Allra troligast har detta med en variation i bränslemixen att göra, om mixen innehåller mer biologisk slam än genomsnittet, kan svavelhalten vara högre än normalt, och på så sätt ha större effekt än svaveldoseringen. Den aktuella fraktionen bioslam kan dock inte utläsas ur styrsystemet då den ingår i biobränslemixen, denna mix blandas inte automatiskt utan av den operatör som ansvarar för att fylla på bränslet som matas från bränslekyrkan, därför kan vissa variationer förekomma även då målet är en jämn mix. Andra faktorer som kan påverka bildandet av SO₂ är

temperatur och tillgängligt syre vid förbränningen, men mätvärden för dessa är båda relativt konstanta under och innan testperioden.

Verkningsgrad var ett ytterligare område av intresse, där en eventuell ökning skulle kunna uppstå, resultaten av låg svaveldosering kan läsas i Tabell 8.

Tabell 8. Summerade resultat för verkningsgrad vid låg svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

Verkningsgrad					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
1.A	34,4	82,4 ± 15,6 (19%)	84,5 ± 22,6 (27%)	72,7 ± 15,4 (21%)	+2,6
1.B	34,6	84,3 ± 15,8 (19%)	86,4 ± 25,8 (30%)	89,6 ± 29,5 (33%)	+2,5
1.C	36,2	83,0 ± 18,0 (22%)	88,3 ± 32,5 (37%)	82,7 ± 23,0 (28%)	+6,3

Pannans verkningsgrad går ej att utläsa ur styrsystemet utan måste beräknas. Den beräknades genom att jämföra energin i de ingående bränsleströmmarna, antaget att deras sammansättning är densamma som vid tidigare bränsleanalyser, med energiinnehållet i den ånga som exporteras från pannan. En tidsförskjutning sker självklart mellan dess att bränslet noteras som inström till dess att det omvandlats till ånga, dock är beräkningarna gjorda med samtida in- och utflöden. Det resulterar i något högre relativ standardavvikelse, samt att det förekommer tillfällen med högre verkningsgrad än 100 %. Generellt sett ses en marginell ökning av verkningsgraden, men under test 1.B fortsätter verkningsgraden att öka även efter att dosering avslutats. Skillnaden mellan värden med och utan dosering är så pass mycket mindre än den relativa standardavvikelsen inom dessa grupper att och denna förändring inte är statistiskt säkerställd för test A och B.

4.2. Hög dosering

För tester med hög dosering var målet en svaveldosering på 70 g/MWh ånga producerat. Likt för testerna med lägre dosering utfördes försöket som tre test om 8 timmar.

Vid en högre svaveldosering ses den effekt på CO-utsläppen som förväntats, se Tabell 9.

Tabell 9. Summerade resultat för CO-utsläpp vid hög svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

CO					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
2.A	68,1	29,8 ± 27,0 (90%)	15,6 ± 8,1 (51%)	22,0 ± 18,6 (85%)	-47,2
2.B	67,4	41,1 ± 25,3 (62%)	36,2 ± 15,6 (43%)	38,9 ± 20,6 (53%)	-11,9
2.C	69,1	48,7 ± 35,5 (73%)	28,0 ± 21,2 (76%)	16,8 ± 16,2 (97%)	-42,6

Precis som vid den lägre doseringen ses stora relativa standardavvikelser för CO-utsläppen, men trots det finns det tydliga indikationer att en kontinuerlig minskning sker även om den är mindre tydlig för test 2.B. Vad som blir tydligare när man tittar i styrsystemet är att de perioderna med jämna värden ligger tydligt lägre vid denna koncentration men att de korta perioderna med toppar i CO-värdena kvarstår.

Resultaten för utsläppen av NO_x liknar de för den lägre doseringen, se Tabell 10, det finns mindre förändringar, åt båda håll.

Tabell 10. Summerade resultat för NO_x-utsläpp vid hög svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

NO _x					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
2.A	68,1	60,3 ± 14,4 (24%)	69,4 ± 11,1 (16%)	67,3 ± 12,5 (19%)	+15,0
2.B	67,4	64,4 ± 12,0 (19%)	62,2 ± 16,1 (26%)	70,0 ± 17,4 (25%)	-3,3
2.C	69,1	54,5 ± 12,4 (23%)	60,1 ± 13,4 (22%)	69,3 ± 16,6 (24%)	+11,4

De ökande siffrorna har något starkare trend än sjunkande, inga förändringar i NO_x ligger utanför standardavvikelserna för perioderna de jämförs med, förutom test C är dock skillnaderna säkerhetsställda.

Till skillnad från vid lägre dosering är en eventuell ökning av HCl inte särskilt tydligt för denna dosering, se Tabell 11.

Tabell 11. Summerade resultat för HCl-utsläpp vid hög svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

HCl					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
2.A	68,1	6,0 ± 1,2 (20%)	5,6 ± 0,3 (5%)	7,0 ± 0,7 (10%)	-7,8
2.B	67,4	6,8 ± 0,7 (11%)	5,6 ± 1,0 (18%)	6,8 ± 3,5 (52%)	-17,9
2.C	69,1	6,3 ± 0,8 (12%)	9,7 ± 2,7 (28%)	8,1 ± 2,2 (27%)	+52,7

Tittar man på kalkdosering och rejektflöde under dessa perioder ser man att resultaten för test A och C kan ha viss påverkan från dessa faktorer då förändringarna i inflöden kan resultera i den effekt som ses. För test B ändras båda faktorerna, både kalkdosering och rejektflöde minskar med liknande procentsatser, vilket påverkar HCl i varsin riktning, det är därför svårt att se om dessa faktorer har någon större påverkan.

Till skillnad från vid den lägre doseringen är resultaten för den högre doseringen samstämmig när det gäller SO₂, se Tabell 12.

Tabell 12. Summerade resultat för SO₂-utsläpp vid hög svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

SO ₂					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
2.A	68,1	5,5 ± 1,2 (21%)	10,7 ± 1,5 (14%)	8,5 ± 1,6 (19%)	+94,4
2.B	67,4	5,2 ± 1,5 (30%)	11,3 ± 3,1 (28%)	8,5 ± 2,5 (30%)	+115,5
2.C	69,1	6,1 ± 2,0 (33%)	14,0 ± 5,3 (37%)	9,4 ± 2,2 (23%)	+130,6

Här kan också en viss eftersläpande effekt noteras, där även SO₂-utsläppen efter avslutad dosering är tydligt högre än innan dosering påbörjades. Tittar man närmare på denna effekt verkar den avta och vara försumbar ungefär 6 timmar efter avslutad dosering. Vid en eventuell permanent utformning är doseringen troligen mer eller mindre konstant och en sådan effekt kommer inte vara av någon större vikt. Utsläppen visar ingen tydlig ökning med tiden som doseringen varit i gång, utöver den första timmen.

Den svaga trend för ökad verkningsgrad som kunde ses i resultaten för den lägre doseringen går inte att notera för denna koncentration, se Tabell 13.

Tabell 13. Summerade resultat för verkningsgrad vid hög svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

Verkningsgrad					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
2.A	68,1	79,9 ± 16,9 (21%)	77,8 ± 24,4 (31%)	98,3 ± 68,9 (63%)	-2,6
2.B	67,4	86,2 ± 22,9 (27%)	83,2 ± 30,1 (36%)	84,4 ± 19,3 (23%)	-3,5
2.C	69,1	81,6 ± 16,6 (20%)	87,4 ± 20,1 (23%)	89,5 ± 18,2 (20%)	+7,1

Men som tidigare noterat var förändringarna förhållandevis mycket små och variationen inom grupperna stor, det är därmed mer troligt att det samband som kunde anas vid lägre dosering var mer av ett sammanträffande som hade sin grund i andra variationer i pannan. Inga av skillnaderna i verkningsgrad för testgrupp 2 är statistiskt säkerställda. Verkningsgraden kan därmed tolkas som oförändrad för dessa koncentrationer.

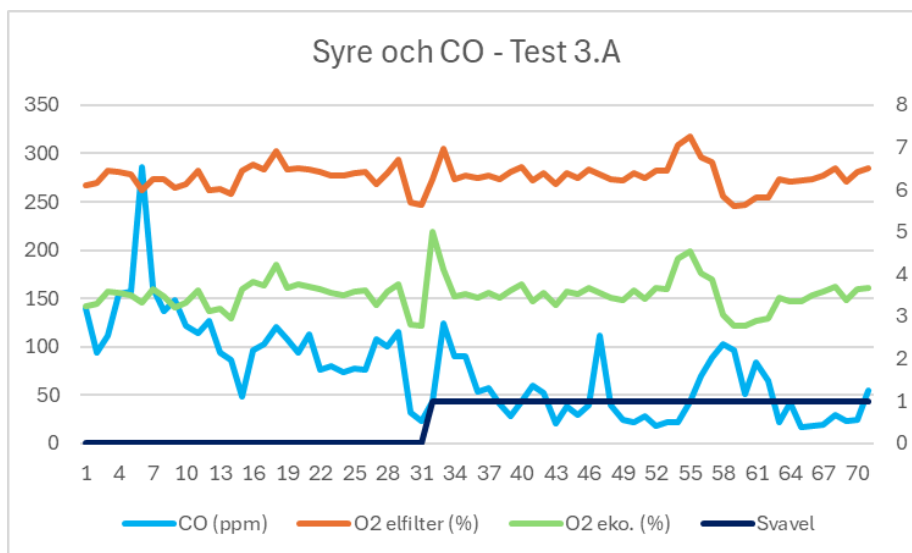
4.3. Maximal dosering

Två tester med den maximala rekommenderade doseringen från Enviloop, 100 g/MWh ånga, genomfördes i slutet av testperioden. Testen var likt de för de övriga koncentrationer 8 timmar långa och jämfördes med perioden precis innan och en period efter. Dessvärre eldades olja i pannan under perioden precis efter doseringen avslutats vid test 3.A, då utsläppen vid oljeförbränning avviker kraftigt från de med endast fast bränsle blev den första efterföljande perioden för jämförelse nästan 12 timmar efter avslutad dosering. Att kunna identifiera några eftersläpande effekter blir därmed svårt. Försök med denna dosering genomfördes dessutom bara två gånger då andra tester prioriterades. Resulterande utsläppsresultat kan ses i Tabell 14–17.

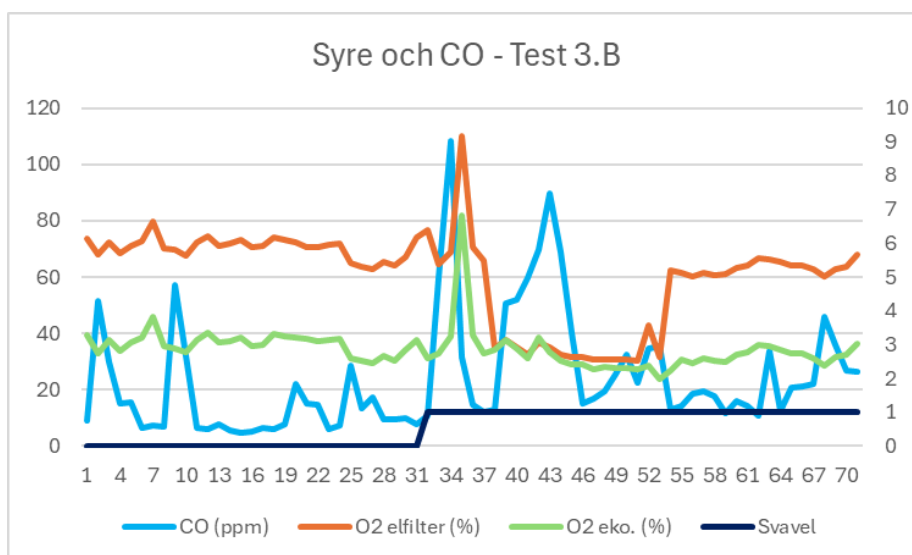
Tabell 14. Summerade resultat för CO-utsläpp vid maximal svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

CO					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
3.A	94,5	97,0 ± 31,5 (32%)	37,1 ± 27,1 (73%)	38,4 ± 24,6 (64%)	-61,7
3.B	105,2	14,1 ± 25,4 (180%)	22,5 ± 20,1 (89%)	50,5 ± 41,2 (81%)	+60,1

Test 3.A följer det tidigare noterade mönstret, för test 3.B saknas detta. Då B-testet föregås av en period med mycket låga CO värden är det troligen detta värde som är avvikelsen snarare än att svavel inte har någon påverkan. Anledningen till denna skillnad är svår att fastställa men man kan titta på syrehalter för de olika perioderna, vilka har en påverkan på både CO och NO_x, där högre syrehalter generellt sett leder till lägre CO och högre NO_x. Det går då att se att perioderna innan och under dosering har betydligt större skillnad mellan sig än om man tittar på syrehalter för test 3.A. För test 3.A ligger skillnaden på de genomsnittliga syrehalterna på ca 0.02-0.03 procentenheter beroende på mätpunkt. För 3.B är motsvarande skillnad 0.23-1.40, där syremätningarna är högre för perioden innan vilket överensstämmer med den förändring som kan ses i resultaten, se skillnaden i Figur 6 och 7.



Figur 6. Förändringar i CO och syre innan och under test 3.A. Syre mättes på två olika punkter. CO avläses på vänstra sidan, övriga till höger. Notera att svavel endast avläses som på eller av.



Figur 7. Förändringar i CO och syre innan och under test 3.B. Syre mättes på två olika punkter. CO avläses på vänstra sidan, övriga till höger. Notera att svavel endast avläses som på eller av.

Samtliga syremätningar visar dock värden som är inom det normala spannet, att värdena för perioden innan upplevs som avvikande skulle eventuellt kunna bero på att luftflödena till förbränningen inte anpassats till bränslevariationer på samma sätt som normalt.

För NO_x är resultaten för maximal dosering tvetydliga, se Tabell 15.

Tabell 15. Summerade resultat för NO_x-utsläpp vid maximal svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat

NO _x					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
3.A	94,5	31,1 ± 5,9 (19%)	56,9 ± 17,3 (30%)	56,8 ± 13,0 (23%)	+83,3
3.B	105,2	92,8 ± 20,8 (22%)	77,4 ± 21,3 (28%)	66,1 ± 16,5 (25%)	-16,6

Vad som är tydligt är att båda medelhalterna i perioderna innan dosering är något avvikande från de vi sett för tidigare tester, se Tabell 5 och 10. För test B kan detta härledas till syrehalterna som diskuterats för CO-utsläppen, anledningen till avvikelserna i test A går inte lika lätt att förklara. Egentligen kan en matchande avvikelse åt andra hållet ses för CO-mätningarna, men då skillnaden i syre innan och under dosering är minimal och svaveldoseringarna får en effekt som är närmre den som väntats för CO-utsläppen, är de förändringar som ses troligen mindre påverkade av andra faktorer än i test B.

Tabell 16. Summerade resultat för HCl-utsläpp vid maximal svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat

HCl					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
3.A	94,5	3,2 ± 0,3 (10%)	5,7 ± 1,5 (27%)	7,0 ± 1,1 (15%)	+75,5
3.B	105,2	8,3 ± 1,5 (18%)	10,1 ± 1,7 (17%)	4,7 ± 1,0 (22%)	+22,2

För HCl ses här tydligt ökande utsläpp, något som har noterats för enskilda tester vid lägre doseringshalter, se Tabell 6 och 11. Eventuellt sker den reaktion mellan KCl och S främst vid högre koncentrationer, kanske efter att någon annan reaktion mättats.

Tabell 17. Summerade resultat för SO₂-utsläpp vid maximal svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat

SO ₂					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (ppm)	Under Dosering (ppm)	Efter (ppm)	Δ Under vs innan (%)
3.A	94,5	8,0 ± 1,8 (22%)	22,2 ± 5,2 (24%)	11,7 ± 2,2 (19%)	+178,3
3.B	105,2	11,4 ± 1,7 (15%)	26,7 ± 6,8 (26%)	5,5 ± 2,7 (49%)	+133,3

Utsläppen av SO₂ ligger i det övre spannet för normal drift i perioderna innan dosering och ökningen vid dosering följer trenden från tidigare doseringstester. Därmed ligger SO₂-utsläppen betydligt högre än vad de vanligtvis gör med endast fast bränsle, då dessa utsläpp är associerade med viss korrosionsproblematik kan dessa värden bli något problematiska.

Förändringen i verkningsgrad går att utläsa i Tabell 18.

Tabell 18. Summerade resultat för verkningsgrad vid maximal rekommenderad svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

Verkningsgrad					
Test	Doseringsmängd (g/MWh)	Innan (%)	Under Dosering (%)	Efter (%)	Δ Under vs innan (%)
3.A	94,7	68,1 ± 13,9 (20%)	90,0 ± 25,2 (28%)	103,9 ± 29,2 (28%)	+31,6
3.B	105,2	83,3 ± 18,2 (22%)	98,1 ± 36,4 (37%)	95,8 ± 20,8 (22%)	+17,1

För testet 3.A är ökningen av verkningsgraden i jämförelse med innan dosering betydligt större än för tidigare tester. Dock är 90 % i sig inte en stor avvikelse från övriga uppmätta värden, även här är värdet innan doseringen mer avvikande. För test 3.B är värdet under dosering mer avvikande även om ökningen här är mindre. Generellt sett är skillnaderna vid denna koncentration betydligt större än tidigare.

4.4. Trender

För att få en bättre bild av de större trenderna som orsakas av svaveldosering är det relevant att både titta på hur värdena kan jämföras med de som noterades innan varje test samt att titta på de genomsnittliga förändringarna. Som tidigare diskuterats är inte alla noterade förändringar före och under testen lika pålitliga då vissa test påbörjades under perioder med otypiska utsläpp och det blir därmed svårt att säga att ett visst utsläpp faktiskt ökade om det uppmätta värdet fortfarande ligger under normal drift.

De genomsnittliga värdena för varje testgrupp finns summerade i Tabell 19.

Tabell 19. Genomsnittliga värden för samtliga testgrupper samt för perioderna som använts för jämförelse innan doseringen startats.

Genomsnittliga värden						
Testgrupp	Dosering (g/MWh)	CO (ppm)	NOx (ppm)	HCl (ppm)	SO ₂ (ppm)	Verkningsgrad (%)
Innan	-	39,4	63,3	6,4	7,7	81,2
1	35,1	32,2	69,2	9,3	12,7	86,4
2	68,2	26,6	64,1	6,9	12,0	82,8
3	99,8	29,8	67,03	7,9	24,4	93,9

För de sammanfattade medelvärdena är som väntat effekten på SO₂ tydligast, även om ökningen för testgrupp 2 var mindre tydlig än förväntat i jämförelse med övriga grupper. För CO ses viss minskning, för NOx eventuellt en viss ökning, detsamma gäller för HCl och verkningsgraden.

När det gäller de genomsnittliga förändringarna i utsläpp under testperioderna följer de i stort sett de mönster som noterats på de absoluta värdena, se Tabell 20.

Tabell 20. Genomsnittliga förändringar i jämförelse med perioderna innan dosering för samtliga testgrupper.

Genomsnittliga förändringar						
Testgrupp	Dosering (g/MWh)	CO (%)	NOx (%)	HCl (%)	SO ₂ (%)	Verkningsgrad (%)
1	35,1	+14,7	-0,2	+46,5	+70,2	+3,8
2	68,2	-33,9	+7,7	+9,0	+113,5	+0,3
3	99,8	-1,1	+33,2	+48,7	+155,4	+24,4

De avvikande punkterna är bland annat att CO för testgrupp 3, där den ena testet resulterade i en större ökning av utsläppen vilket inte följde det övriga mönstret, att ökningen i HCl utsläpp var mindre tydligt i testgrupp 2, samt att ökningen i verkningsgrad bara utmärkte sig i testgrupp 3. Här blir den eventuella ökningen i NOx mer tydlig, den gradvisa ökningen i SO₂-utsläpp blir också mycket tydlig.

4.5. Reducerat luftflöde

Testerna med reducerat luftflöde gjordes i syfte att se om svaveldoseringen kunde dämpa de CO-toppar som vanligtvis inträffar vid låga syrehalter, och på så sätt möjliggöra att köra processen vid lägre syrehalt. Detta skulle i sin tur kunna minska NOx-utsläppen från pannan, något som är eftersträvarsvärt på flera plan då det skulle minska den NOx-avgift som bruket måste betala för sina utsläpp.

Testerna genomfördes som steg-tester där syrehalten ändrades runt 10 min. Då utsläppen vid dessa förändringar kan bli mycket stora och syrehalten också är svårkontrollerad, då den beror på många olika parametrar, var det inte rimligt att försöka hålla syrehalten sänkt längre perioder till att börja men, särskilt i de tester som användes som referens. Vid för låga syrehalter <1,5 % så reagerar systemet genom att automatiskt skicka in högre luftflöden vilket då skulle avbryta testet. Om svaveldoseringen dämpade de kraftiga ökningarna av CO på det sätt som önskades kunde ett längre test övervägas. Sammanfattade resultat från stegtester kan utläsas ur Tabell 21, förändringar av O₂ och CO i enskilda test kan ses i Bilaga B.

Tabell 21. Sammanfattade resultat för stegtester med och utan svaveldosering. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat. Absolut och relativ standardavvikelse inkluderat.

Utsläpp						
Tester	Dosering (g/MWh)	CO (ppm)	NOx (ppm)	HCl (ppm)	SO ₂ (ppm)	O ₂ (%)
Låg O ₂ Ej svavel	-	201,4 ± 114,8 (57%)	21,8 ± 6,5 (30%)	1,6 ± 0,3 (19%)	7,5 ± 0,7 (10%)	2,4 ± 0,3 (14%)
Låg O ₂ Svavel	64,7	201,1 ± 142,3 (71%)	27,5 ± 10,0 (37%)	1,9 ± 0,1 (7%)	11,0 ± 1,0 (9%)	2,5 ± 0,3 (12%)
Normal drift	-	32,2 ± 28,3 (88%)	50,4 ± 16,5 (33%)	1,9 ± 0,3 (15%)	9,4 ± 1,5 (16%)	3,2 ± 0,4 (13%)

Då resultaten från steg-testerna ej indikerade en mer stabil drift vid svaveldosering, samt delvis sämre utsläppsbild än vid lägre syre utan dosering ansågs det inte vara rimligt att genomföra ett längre test vid lägre syrehalt. NOx-utsläppen minskar tydligt av reducerat syre till pannan men resultatet blir inte bättre av svaveldoseringarna. Syrehalten var fortsatt svår att kontrollera och CO-ökningarna gav inga indikationer på att minska.

5. Diskussion

Som följd av de stora standardavvikelserna och att en del av resultaten inte är statistiskt säkerhetsställda blir de slutsatser som kan dras något begränsade. En del av de samband som diskuteras handlar därför snarare om indikationer än styrkta resultat.

5.1. Utsläpp

Minskningarna i CO-utsläpp i pannan blir tydlig först vid testerna med 70 g/MWh. Vad som kan noteras när man studerar processdata är att de tillfälliga topparna som ibland inträffar fortfarande kvarstår med svaveldoseringen, dock ligger värdet vid mer stabil drift tydligt lägre.

Resultatet för försök 4 indikerar att den nuvarande syrehalten i förbränningen ligger relativt nära en stökiometrisk förbränning och att luftöverskottet i pannan i dagsläget behövs för att inte få mycket höga CO-utsläpp. Avsaknaden av dämpande effekt vid reducerat luftflöde tyder alltså på att luftöverskottet inte är särskilt stort. Då minskningen ej var möjlig utan kraftiga toppar i CO-utsläppen, samt att syrehalten var svår att hålla jämn vid en lägre halt än den vanliga blir en långvarig lägre syrehalt i förbränningen orealistisk. På grund av detta är det svårt att uppnå den önskade effekten på NO_x-utsläppen. Påverkan av svaveldosering utan luftreducering verkar, om något, leda till svagt ökande utsläpp av NO_x. Trenden syns i Tabell 20, det är dock värt att notera att de faktiska värdena är väldigt lika de som noteras utan doseringen.

Utsläppen av SO₂ är tydligt högre med svaveldosering vilket är väntat. Det har i en tidigare studie observerats att majoriteten av svavel vid svaveldosering hamnar i rökgaserna, snarare än i flyg- eller bottenaskan [15]. Även utsläppen av HCl ökar tydligt.

5.2. Korrosion

Ökningen av HCl utsläpp skulle kunna förklaras av att det bildas mindre KCl i pannan, genom att alkalimetallen i stället reagerar med svavel och att kloreten då i stället förs ut med rökgaserna som HCl. Ser man på de trender som noterats så ökar dessa utsläpp under doseringstesterna, dock inte så stegvis som man kanske hoppats då effekten noterad var betydligt mindre för 70 g/MWh än för övriga testgrupper. De faktiska förändringarna på KCl är dock inte mätta i detta arbete. Den faktiska påverkan som svaveldosering har på KCl beläggningar hade behövts undersökas under en längre period, under en mer permanent tillämpning. Dessutom hade den behövts innefatta analyser av beläggningar i pannan för att se att de uppskattade förändringarna faktiskt sker.

Svavel har inte bara en positiv inverkan på korrosion i pannan. Då fastbränslepannan i ÅC2 saknar överhettare är problematiken med KCl inte lika stor som för anläggningar med förbränning av, till exempel, avfall. I dessa anläggningar är det vanligt förekommande att dosera svavel för att minska korrosion. Korrosion på pannan i ÅC2 blir därmed en balansfråga då korrosion som i grunden är mindre aggressiv, orsakad av främst kondenserande syror i rökgaserna, har relativt stor påverkan. Denna korrosion ökar sannolikt med svaveldosering på grund av ökande halter SO₂ men även HCl i rökgaserna.

Trots tidigare arbete med att försöka karakterisera korrosionsproblematiken i fastbränslepannan är det svårt att säga vilka former av korrosion som i dagsläget är mest

problematiska. En permanent svaveldosering kan därför ha en positiv inverkan men kommer med en viss risk att korrosionen i pannan faktiskt ökar vilket skulle vara mycket problematiskt då korrosionen i pannan redan idag är ett av de största problemen med fastbränslepannan.

5.3. Verkningsgrad

Det är möjligt att svaveldoseringen haft viss positiv påverkan på verkningsgraden i pannan. Det har dock varit svårt att säkerställa, förändringarna har för det mesta varit mycket små i förhållande till relativa standardavvikelser, med undantag för de testerna med maximal dosering. En större positiv inverkan var dessutom först väntad för svaveldosering med reducerad syrehalt i förbränningen. Dock är minskningen av CO ett tecken på en mer fullständig förbränning vilket gör en högre verkningsgrad rimlig. På grund av att testerna med reducerat luftflöde blev mycket kortvariga och inte ansågs motsvara en realistisk produktion togs inga värden för verkningsgrad fram för dessa.

5.4. Dosering och andra förändringar

Efter de skillnader som noteras kommer inga minskningar av de nuvarande doseringarna vara aktuella. Om någon förändring krävs kommer den snarare vara viss ökning av dosering för både kalk och urea. Det finns därmed inga besparingar att hämta ur denna förändring.

När det gäller doseringshalten för svavel har de utförda försöken visat att en tydlig förbättring ses vid en halt runt 70 g/MWh ånga, den maximala doseringen på 100 g/MWh ger kanske ytterligare förbättring av till exempel verkningsgrad men kommer med större öknings av andra utsläpp vilket kan bli problematiskt. Den exakta doseringen bör bestämmas genom längre perioder av dosering, om en permanent dosering installeras. Doseringen bör också primärt baseras på de ingående bränsleflödena snarare än den aktuella ångproduktionen, även om förändringar bör kunna justeras av operatören vid behov. Med dosering baserat på produktion byggs en oavsiktlig fördröjning in i systemet. Även om det faktiska värmevärdet för bränslet har variationer, då bränslefraktionerna varierar, är detta mer överkomligt än en inbyggd fördröjning på mer än 15 minuter.

En ytterligare eventuell effekt av svaveldoseringen har noterats av personal som arbetar med uraskning av axonugnar. Ask som töms ut ur ugnarna har upplevts som mer porös och därmed enklare och snabbare att avlägsna. Att denna effekt skulle kunna vara möjlig hade noterats av personal på Enviloop, av vilka doseringsutrustningen inhyrdes, dock hade inte liknande effekter noterats i den litteratur som bakgrunden i denna rapport är baserat på. En anledning till detta skulle kunna vara att de flesta pannor i tidigare studier haft automatiserad uraskning och att förändringar därmed blev mindre tydliga. Vad som kan noteras från tidigare perioders driftanteckningar är att perioder med positiva erfarenheter är ovanliga men har förekommit tidigare, till exempel syntes liknande kommentarer för en period i början av februari 2026. Det kan därför återigen inte garanteras att denna positiva utveckling är på grund av svaveldoseringen och inte ett resultat av variationer i bränsle. De positiva kommentarerna i driftanteckningarna syns från det att det tredje passet med låg dosering inträffat fram till dess att det första försöket med maxdosering körts. Det blev sedan ett uppehåll i doseringen på grund av oplanerade stopp i produktionen och efter sista passet med maximal dosering var kommentarerna snarare negativa.

5.5. Lönsamhetsberäkning

Då resultaten från doseringsförsöken ger relativt svaga belägg för att de önskade förändringarna uppnås samt att några större besparingar skulle kunna uppnås med implementering av svaveldosering i pannan blir en design av en mer permanent utrustning inte av något större värde. I stället för en investeringskalkyl görs därmed bara en driftkalkyl för att illustrera vilka förändringar i löpande kostnader som en implementerade svaveldosering skulle kunna motsvara.

För att möjliggöra denna kalkyl måste ett antal antaganden om vilka förändringar som sker göras, dessa sammanfattas i Tabell 22. Antagandet om ökad verkningsgrad har tagits trots att förändringarna vid de lägre doseringshalterna i de flesta fall ej var statistiskt signifikanta, delvis för att hitta en punkt där besparingar skulle kunna förekomma, samt då resultaten för maximal dosering visade på en större ökning.

Tabell 22. Uppskattade förändringar nyttjade vid driftkalkyl.

Faktor	Förändring	Direkt ekonomisk påverkan
Verkningsgrad	+1%	Minskad bränslekostnad
CO	-25%	-
NOx	+7%	Ökad NOx-avgift eller inköp av urea
SO ₂	+110%	-
HCl	+30%	Ökat inköp av släckt kalk

Ett minskat CO-utsläpp resulterar i sig inte i några besparingar men har som tidigare nämnt eventuellt en koppling till den ökande verkningsgraden. I dagsläget görs inga doseringar eller liknande för att minska utsläpp av SO₂ från ÅC2, därmed finns ingen tydlig kostnad som ökar. Den ökande korrosionspåverkan detta skulle kunna medföra är inte del av denna beräkning men hade i så fall inneburit en ökad kostnad för underhåll.

Då SCA inte önskar delge sina kostnader offentligt, för att värna om sin konkurrenskraft, redovisas inga beräkningar i denna rapport utan endast i den interna rapporten till företaget.

I driftkalkylen undersöks två olika alternativ för att hantera de ökande utsläppen av NOx, för alternativ 1 görs inga förändringar i ureadosering i stället höjs kostnaden för NOx-avgiften för de ökade utsläppen. För alternativ 2 antas det att ökningarna kan hanteras genom att öka ureadoseringen. Vad som noteras är att ökningarna i NOx-avgiften blir mycket stora, och motsvarar mer än hälften av de besparingar i bränslekostnad som beräknas kunna göras vid 1 % högre verkningsgrad och gör att resultatet för driftkalkylen blir en totalt ökande kostnad. Om de ökande NOx-utsläppen i stället hanteras med urea blir resultatet att en mindre besparing är möjlig, huruvida det går att reducera hela ökningen i NOx med urea är dock inte känt. Förmodligen hade den verkliga produktionen hamnat någonstans mellan dessa alternativ och landar kanske mest troligt i ett scenario där driftskostnaden blir ungefär densamma som utan svaveldoseringen. Kostnader för inköp av kalk och svavel motsvarar tillsammans ungefär 50% av de minskade bränslekostnaderna, de är alltså också av signifikant storlek men mindre än den ökade NOx-avgiften. Med tanke på alla de antaganden som har behövts göra för att nå ett positivt resultat på driftkalkylen, samt att flera av de önskade effekterna av svaveldoseringen uteblivit är en större investering för att bygga en permanent doseringsutrustning troligtvis inte lönsamt, såvida inga andra positiva effekter kan fastställas.

5.6. Slutsats

De minskade CO-utsläppen är en tydlig effekt av svaveldoseringen, även indikationer på lägre kloralkalisk korrosion och högre verkningsgrad kan noteras i försöken. Dessa fördelaktiga resultat kommer dock med viss negativ utveckling när det gäller utsläpp av NO_x, SO₂ och HCl. Korrosionsfrågan blir därmed svår att utvärdera då kloralkalisk korrosion troligen minskar samtidigt som lågtemperaturskorrosion på grund av utfällda syror i utsläppen kanske ökar. Då det inte gått att utvärdera vilka former av korrosion är mest skadliga är dessa förändringar svåra att tolka. Då de utsläpp som idag reduceras med släckt kalk och urea är de som ökar kommer dessa kostnader öka om man vill fortsätta hålla dessa utsläpp på en nivå som liknar den utan svaveldoseringen. För att få en mer heltäckande bild av resultatet av svaveldoseringen hade en mer långvarig studie varit av intresse. De resultat som gått att observera från testerna i detta examensarbete indikerar dock att svaveldoseringarna inte når upp till de förhoppningar som funnits från SCAs sida när det gäller en av de viktigare frågorna, ett minskat utsläpp av NO_x, delvis på grund av de begränsningarna i justering av syrehalt i pannan. Beroende på hur dessa utsläpp hanteras kan svaveldoseringen vara en direkt förlust, även utan att räkna in kostnaden för en mer permanent utrustning. På grund av detta finns det troligen områden som är mer intressanta att titta vidare på från företagets sida. Sammanfattningsvis, även om svaveldosering är en bevisad metod passar den mindre bra i de förutsättningar som finns i fastbränslepannan i ÅC2.

Referenser

- [1] Y. Zhao *m.fl.*, "Air pollution modulates trends and variability of the global methane budget", *Nature*, vol. 642, nr 8067, s. 369–375, juni 2025, doi: 10.1038/s41586-025-09004-z.
- [2] "Fakta om marknära ozon". Åtkomstdatum: 16 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/luft/luftforenningar-och-dess-effekter/fakta-om-marknara-ozon/>
- [3] A. Volz-Thomas och B. A. Ridley, "Chapter 5. Tropospheric Ozone", i *Ozone*, vol. 1994, NOAA, s. 5.1-5.2.
- [4] "Försurning av sjöar och vattendrag", Havs- och vattenmyndigheten. Åtkomstdatum: 16 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.havochvatten.se/miljopaverkan-och-atgarder/miljopaverkan/forsurning/forsurning-och-kalkning/forsurning-av-sjoar-och-vattendrag.html>
- [5] C. D. Evans, D. T. Monteith, D. Fowler, J. N. Cape, och S. Brayshaw, "Hydrochloric Acid: An Overlooked Driver of Environmental Change", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, nr 5, s. 1887–1894, mar. 2011, doi: 10.1021/es103574u.
- [6] F. Yu, "Sulfur Addition to Reduce CO Emissions", 2018.
- [7] L. Lindau och E. Skog, "CO-reduktion i FB-panna via dosering av elementärt svavel", *MILJÖ- OCH FÖRBRÄNNINGSTEKNIK 812*, juni 2003.
- [8] "EnviDoos: Kraftfull CO-reduktion i fastbränslepannor", Enviloop. Åtkomstdatum: 27 januari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://enviloop.se/produkter/ovriga-produkter/envidoos/>
- [9] S. Lysell, "Svaveldosering Umeå Energi", 23 januari 2026.
- [10] P. Henderson, K. Ifwer, A. Stålenheim, M. Montgomery, J. Högberg, och A. Hjörnhede, "Kunskapsläget beträffande högtemperaturkorrosion i ångpannor för biobränsle och avfall", *Mater. Och Kemiteknik*, s. 46, dec. 2006.
- [11] Å. Albrecht och F. Scheffler, "KARAKTÄRISERING AV PROBLEMATIK I KALLARE RÖKGASDELAR PÅ ÅC2", 2025.
- [12] "Biprodukter från sågverken blir biobränslen", SCA. Åtkomstdatum: 04 maj 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.sca.com/sv/fornybar-energi/bioenergi/sagverksbranslen/>
- [13] T. Hardy, M. Jakubiak, och K. Filipowski, "PREVENTION OF CHLORIDE CORROSION IN BIOMASS BOILERS BY MEANS OF SO3 INJECTION", *Rynek Energii*, vol. 2, nr 14, s. 1–4, 2019.
- [14] T. Siegmund, C. Gollmer, M. Scherzinger, och M. Kaltschmitt, "A review of CO emissions during solid biofuel combustion – Formation mechanisms and fuel-related reduction measures", *J. Energy Inst.*, vol. 116, s. 101762, okt. 2024, doi: 10.1016/j.joei.2024.101762.
- [15] H. Bjurström, C. Jonsson, M. Almark, M. Berg, T. Streibel, och R. Zimmermann, "Influence of sulphur addition on emissions of organic substances during combustion", *Anlägg.- OCH FÖRBRÄNNINGSTEKNIK 1049*, feb. 2008.
- [16] K. Lennstam, J. Björk, C. Johansson, och J. Ohlson, "Svaveldosering av biopanna", 2014.
- [17] J. Ahrenfeldt *m.fl.*, "Emission control by sulphur addition", 2007.
- [18] M. Jafarsalehi, M. Mashayekh, M. B. Miranzadeh, N. Mirzaei, och M. Ebrahimi, "Primary measures for cleaner biomass combustion to reduce NOx: A narrative review on solid biomass fuels, NOx sources, small-scale boilers, auxiliary equipment, fuel management and fuel quality improvement", *Fuel*, vol. 396, s. 134891, sep. 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2025.134891.

- [19] J. Aurell och Å. Kling, "Minskad dioxinbildning med hjälp av additiv vid sameldning av skogsbränsle och returbränsle", *MILJÖ- OCH FÖRBRÄNNINGSTEKNIK* 928, s. 5, maj 2005.
- [20] K. Iisa, Y. Lu, och K. Salmenoja, "Sulfation of Potassium Chloride at Combustion Conditions", *Energy Fuels*, vol. 13, nr 6, s. 1184–1190, nov. 1999, doi: 10.1021/ef990057a.
- [21] M. Broström, "Aspects of alkali chloride chemistry on deposit formation and high temperature corrosion in biomass and waste fired boilers", s. 21–22, 2010.
- [22] H. Wu, J. B. Jespersen, M. Nedergaard, M. Aho, F. J. Frandsen, och P. Glarborg, "Utilization of sulfate additives in biomass combustion: fundamental and modeling aspects", *Proc. 21st Eur. Biomass Conf. Exhib.*, 2013.
- [23] M. Nordling, "Korrosion hos luftfövärmare och ekonomisar", *Mater. OCH KEMITEKNIK* 1235, s. 14–15, maj 2012.
- [24] J. Pettersson, H. Asteman, J.-E. Svensson, och L.-G. Johansson, "KCl Induced Corrosion of a 304-type Austenitic Stainless Steel at 600°C; The Role of Potassium", *Oxid. Met.*, vol. 64, nr 1, s. 23–41, aug. 2005, doi: 10.1007/s11085-005-5704-3.
- [25] J. W. Han *m.fl.*, "Dry scrubbing of gaseous HCl and SO₂ with hydrated lime in entrained mixing reactor", *Powder Technol.*, vol. 393, s. 471–481, nov. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.05.089.

Bilagor

A. Resultat t-tester

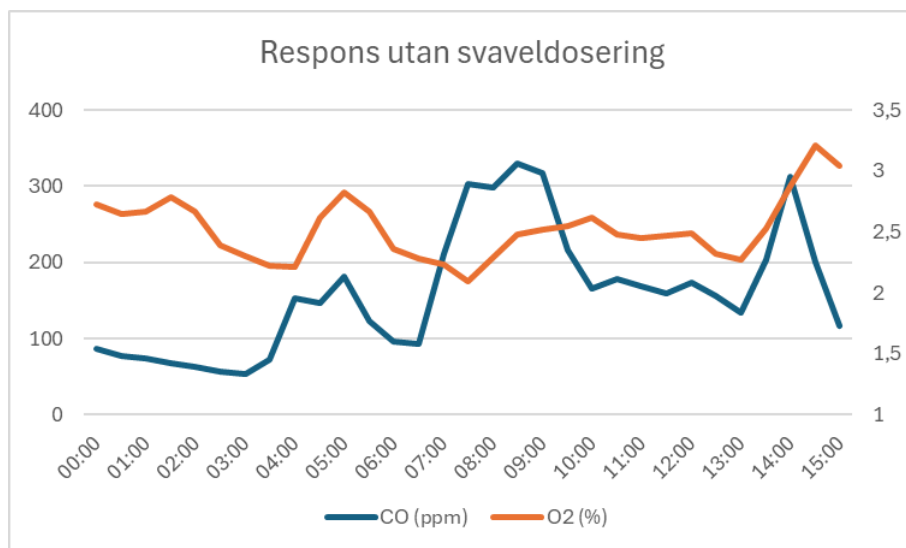
För att utreda om de förändringar som ses under testerna är statistisk signifikanta har t-tester utförts. Resultaten under doseringsperioden har jämförts med perioderna innan och efter samt bara för perioden innan. Med signifikant skillnad till båda dessa finns ett strat stöd för att det ses en skillnad under perioden som minskar då doseringen avslutats. Om endast perioden innan har signifikant skillnad kan det tyda på en efterdröjande effekt, om läget är tvärtom tyder det på att det finns avvikande värden i perioden efter som gör att det uppfattas som en skillnad men att den troligen inte är statistiskt säkerställd. Testerna är utförda i Excel som oberoende t-test med olika varians. Om p-värdet för ett test är mindre än 0,05 anses skillnaden vara säkerställd på en 95 %-ig nivå. Färgerna i Tabell A.1 indikerar hur säkerställda resultaten är där grön indikerar säkerställd i båda testerna, gul att testerna eventuellt indikerar en efterdröjande effekt, orange är troligen ej säkerställda och röda är ej säkerställda.

Tabell A 1. Resultat från t-tester gjorda på processdata, första siffran indikerar svaret på t-testet mot data från perioderna innan och efter; andra siffran för då data endast jämförts med perioden innan. Alla p-värden <1e-4 har avrundats till 0.

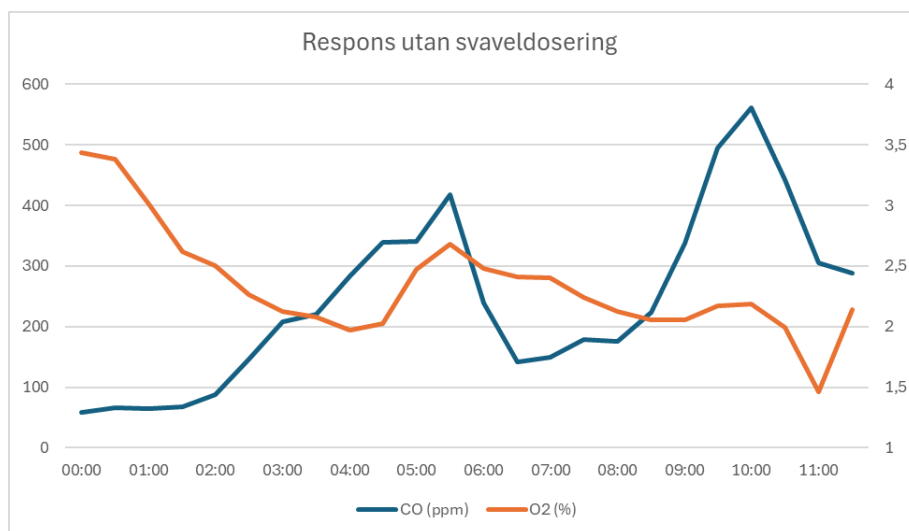
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B
CO	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1,320e-4/0	0/0	0,778/0
NOx	0,206/0,019	0/0,00103	3,150e-4/0	0/0	0,00518/0	0,079/0	0/0	0/0
HCl	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
SO ₂	0/0	0/1,020e-4	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Verkningsgrad	0/0,785	0,457/0,106	0/0	0/0,0931	0,135/0,0590	0,0532/0	0,00118/0	0/0

B. Respons reducerat syre

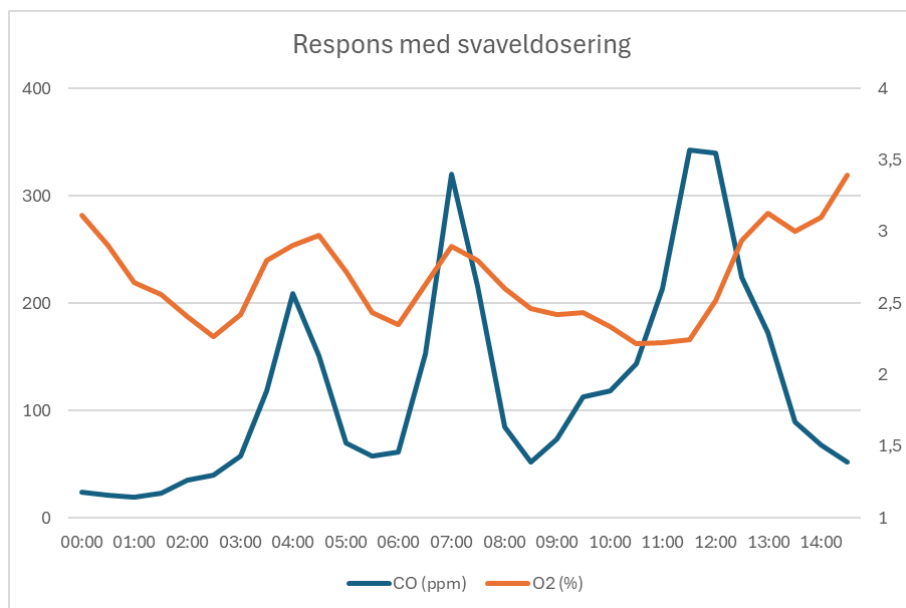
Testerna med reducerad syrehalt i förbränningen resulterade i två lyckade tester och två referenstester. Fler försök till att sänka syrehalten gjordes men då lyckades man inte hålla kvar syrehalten inom det önskade intervallet, då det antingen var svårt att hålla nere eller sjönk för lågt och testet fick avbrytas.



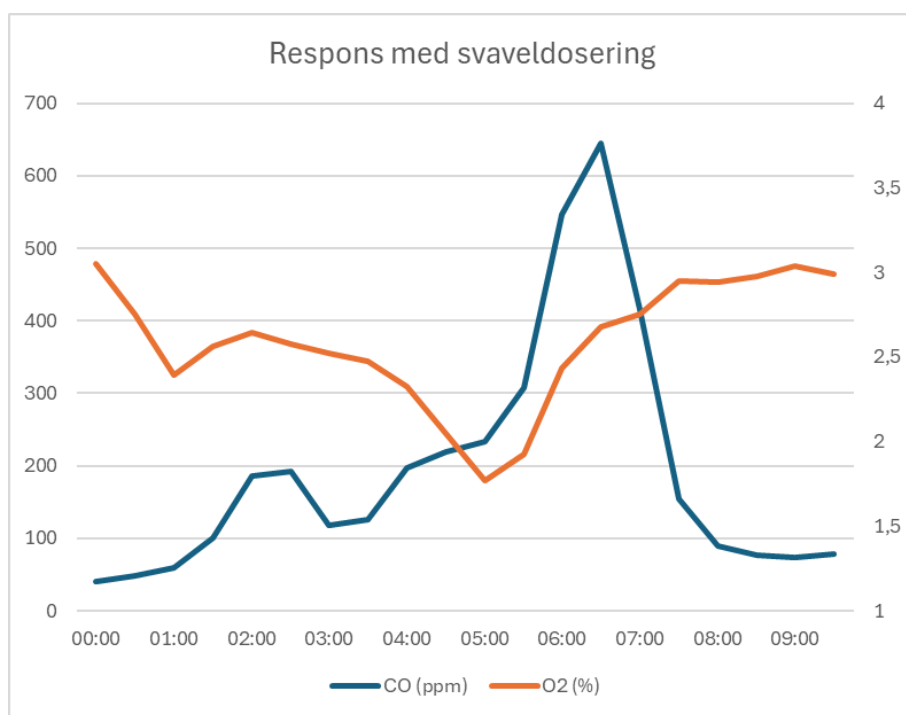
Figur B 1. Resultat för första försöket utan svaveldosering med reducerad syrehalt. CO utläses på vänster axel, O₂ på högra. Tiden indikerar tiden sedan start på försöket.



Figur B 2. Resultat för andra försöket utan svaveldosering med reducerad syrehalt. CO utläses på vänster axel, O₂ på högra. Tiden indikerar tiden sedan start på försöket.



Figur B 3. Resultat för första försöket med svaveldosering och reducerad syrehalt. CO utläses på vänster axel, O₂ på högra. Tiden indikerar tiden sedan start på försöket.



Figur B 4. Resultat för andra försöket med svaveldosering och reducerad syrehalt. CO utläses på vänster axel, O₂ på högra. Tiden indikerar tiden sedan start på försöket.