



Metodutveckling för indirekt bestämning av PAH-halt utgående från mätt momentan CO-halt

Rolf Ingman och Robert Schuster

3 2 / 3 2

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

**Metodutveckling för indirekt bestämning av PAH-halt
utgående från mätt momentan CO-halt**

**Development of methods for determination of PAH
based on measured CO-content**

**Rolf Ingman, Robert Schuster
ÅF-Energikonsult Stockholm AB**

F6-679

VÄRMFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM - TEL 08/677 25 80
Februari 2001
ISSN 0282-37

Sammanfattning

Målet med projekt "Metodutveckling för indirekt bestämning av PAH-halt utgående från mätt momentan CO-halt" är att undersöka om det är möjligt att utveckla en metod för att kontinuerligt minimera NO_x-utsläpp genom sänkning av luftöverskottet; utan att samtidigt producera signifikanta mängder tyngre kolväten i form av tex. PAH. Grundidén har varit att indirekt on-line bestämma mängden emitterade tyngre kolväten, genom att;

- ta fram en korrelation mellan momentana halter av CO och PAH.
- styra luftöverskottet med ledning av CO-halten.
- ange och integrera beräknad PAH-halt utgående från CO-halten.

Bakgrunden är att vissa pannor idag körs vid för låga luftöverskott för att uppnå låga NO_x-avgifter. Låga luftöverskott kan medföra höjda CO-halter samt förhöjda halter av lätta (VOC) och tyngre kolväten i rökgaserna. Andra pannor drivs, för att undvika CO-emission och risk för PAH-utsläpp, med för höga luftöverskott. Dessa producerar istället mer NO_x än nödvändigt.

En av huvudanledningarna till svårigheterna att avpassa luftöverskottet till den mest miljö-optimala nivån är att det saknas instrument för momentan och kontinuerlig mätning av tyngre miljö- och hälsofarliga kolväten. De tyngre kolvätena (PAH) mäts vanligen under en tidsperiod av minst en timme och korta emissionstoppar kan därmed inte urskiljas. Mätmetoden kan inte heller omformas till att bli ett kontinuerligt driftinstrument.

Som basdata inom projektet har mätningar gjorda främst vid CFB-pannan i Korsta i Sundsvall använts. Dessa mätningar genomfördes för projektet "Emissioner av kolväten och NO_x vid låga luftöverskott i CFB" Värmeforskrapport 541. De data som använts visar på ett samband mellan THC och CO som tycks variera mer med lasten än med bränslet.

Mätningarna och den bearbetning av data som gjorts visar att det är möjligt att bestämma PAH med utgångspunkt från CO i Korstaanläggningen. Generellt krävs dock ett antal "kalibrerings-mätningar" för att förfina metodiken och kunna anpassa den till en valfri enskild anläggning.

Den praktiska användbarheten för metoden är att få ett verktyg för samtidigt optimering av CO-, NO_x-, THC- och PAH-utsläppen och/eller att övervaka PAH-utsläppen under kontinuerlig drift.

Abstract

Rapporten beskriver en metod att styra en anläggnings luftöverskott genom att indirekt och on-line bestämma mängden emitterade tyngre kolväten baserat på mätning av CO-halten.

Summary

The aim of the project "Development of methods for determination of PAH based on measured CO-content" is to investigate the possibility to develop a method for continuous optimisation of NO_x-emissions by decreased air ratio, without significant increase of polyaromatic hydrocarbons such as PAH. The general idea has been to find an indirect on-line method to predict the emissions of heavier hydrocarbons by:

- creating a correlation between the content of CO and PAH.
- controlling the air ratio by the CO-content
- integrating the calculated PAH-content from CO-content

Today many boilers are operated with a low air ratio to minimise the NO_x content and the NO_x-fee. A low air ratio increases the risk of high CO contents in the flue gas as well as increased contents of VOC and PAH. Other boilers are operated with high air ratios in order to minimise the CO content, which in some cases will result in unnecessary high NO_x emissions.

One of the main difficulties in optimising the air ratio to the most environmental friendly level is the lack of a suitable and well proven PAH instrument. There are today no available instruments for instantaneous and continuous measurement of PAH. PAH is normally measured as an average value during a period of at least one hour. It is not possible to detect short peaks.

The development of the CO-method has been based on data from a CFB-boiler in Korsta in Sundsvall (Värmeforskrappport 541). The data shows a clear correlation between THC and CO. The correlation seems to be mostly dependent of moisture content and load.

The development presented in the report shows that it is possible to find a method to predict the PAH content from the CO-content in the flue gas. The next phase aims to improve and implement the method, by measurements and adaptation in a plant.

The practical use of the method is as a tool to optimise the emissions of CO, NO_x, THC and PAH and/or to predict the PAH-emission during continuous operation.

Key Words: Combustion, PAH, Carbon monoxide, Hydrocarbon, Combustibles

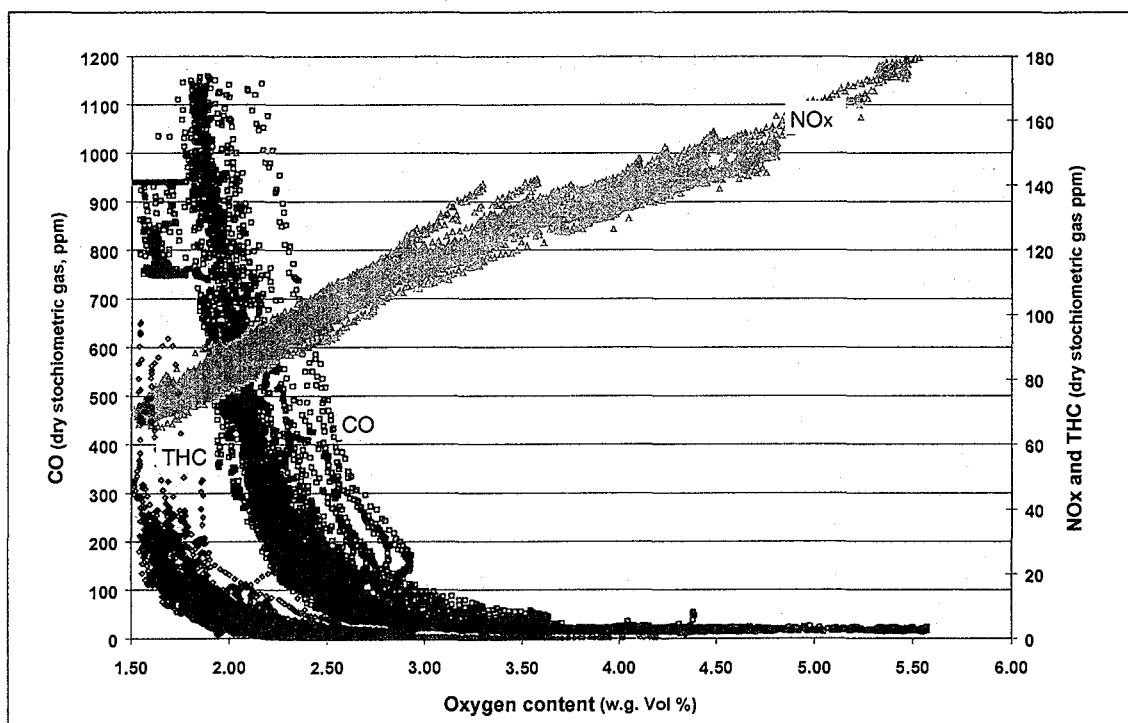
Innehåll	Sid
1. Inledning.....	4
1.1. Allmänt.....	4
1.2. Allmän bakgrund.....	5
1.3. Förbränningsteknisk bakgrund till emissioner.....	7
1.3.1. Allmänt om reaktioner, temperatur och omblandning.....	7
1.3.2. Om/inblandning av gaser.....	7
1.3.3. Reaktionsid.....	7
1.3.4. Temperatur.....	8
1.3.5. Partikelreaktioner.....	9
1.3.6. Övrig CO-bildning.....	9
2. Uppdraget.....	10
2.1. Mål.....	10
2.2. Projektet.....	10
3. Inledande arbete och hypoteser.....	11
3.1. Inledande arbete.....	11
3.2. Arbetshypotes.....	11
4. Tillgängliga mätdata.....	12
5. Metodutveckling inom projektet.....	13
5.1. Avgränsningar och förutsättningar.....	13
5.2. Mätningar av PAH, THC och CO.....	13
5.3. Samband mellan THC och CO.....	13
5.3.1. Allmänt om mätdatahanteringen.....	13
5.3.2. Mätningar i Östersund.....	16
5.3.3. Mätningar i Sundsvall.....	19
5.4. Samband mellan PAH och THC.....	21
5.4.1. Allmänt.....	21
5.4.2. Använda mätningar.....	22
5.5. Metoden för att bestämma PAH-halten som funktion av CO-halten.....	23
5.5.1. Allmänt.....	23
5.5.2. Kurvanpassning av THC som funktion av CO.....	24
5.5.3. Kurvanpassning av PAH som funktion av THC.....	24
5.5.4. Samband CO-PAH.....	24
5.5.5. Anpassning av mätningar till praktisk drift.....	25
5.6. Noggrannhet och begränsningar för metoden.....	26
6. Slutsatser och fortsatt arbete.....	27
Bilaga A Hantering av mätdata.....	28
A.1 Tidsförskjutning.....	28
A.2 Distorsion av mätsignaler.....	29
A.2.1 Allmänt.....	29
A.2.2 Medelvärdesbildning.....	29
A.2.3 Olinjär medelvärdesbildning (gasblandning, tröghet).....	31
A.3 Slutsatser av distorsion i mätsystem för metodens användbarhet.....	33
A.4 Praktiska problem vid mätningar.....	34
Bilaga B Redovisning av enskilda mätningar avseende THC som funktion av CO..	36
REFERENSER	

1. Inledning

1.1. Allmänt

Vid miljöprovning och drift av svenska anläggningar uppstår med viss regelbundenhet frågan ” vid vilken CO-halt är det tillåtet/bör vi köra vår anläggning”.

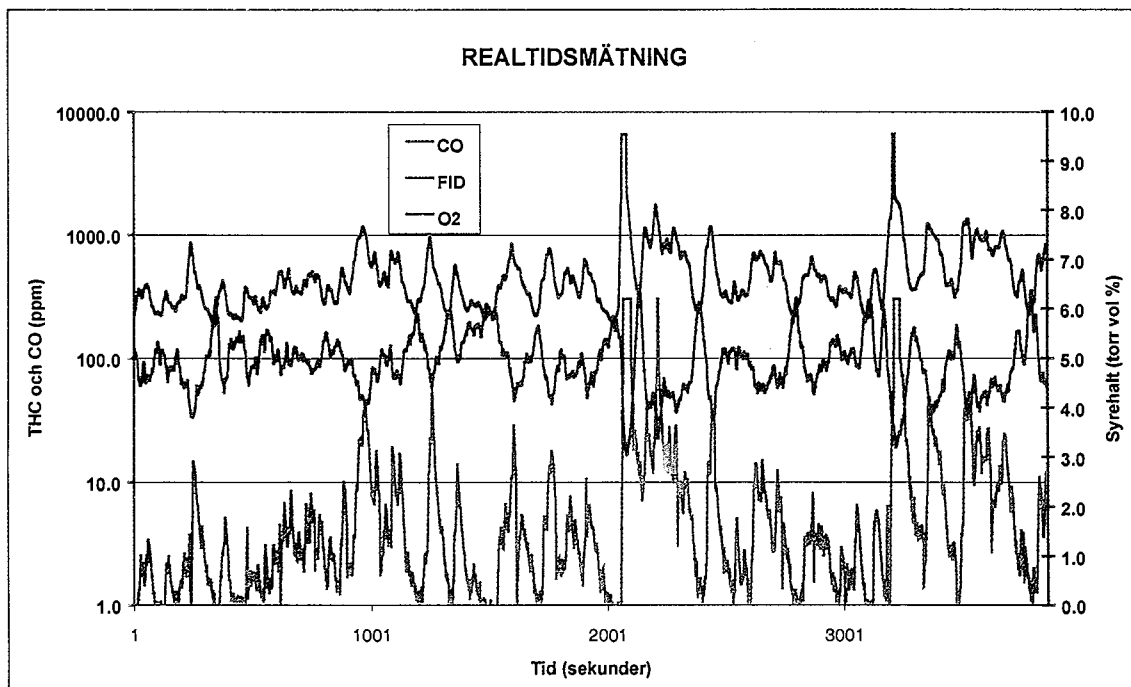
Bakgrunden är givetvis att med en successivt sänkt syrehalt sjunker NO_x -emissionen samtidigt som först CO och THC och därefter tyngre cancerogena kolväten börjar avges (de tyngre ingår som en del av THC). Det finns således ett motsatsförhållande mellan låga halter oförbrända gaser och låga halter kväveoxider. Detta framgår av figur 1 nedan som visar samhörande värden mellan emissionerna; koloxid (CO), totalkolväte (THC) och kväveoxider (NO_x) som funktion av syrehalt.



Figur 1 Samhörande värden för CO, THC och NO_x som funktion av syrehalt.
Measured contents of CO, THC and NO_x as function of oxygen content.

Vid en hög syrehalt är koloxidhalten liksom totalkolvätehalten låg, men kväveoxidhalten hög. Vid sjunkande syrehalt börjar först gradvis koloxidhalten öka beroende på lokalt låga syrehalter och med en ytterligare sänkt syrehalt stiger även kolvätehalten kraftigt. Kväveoxidhalten har tämligen kontinuerligt sjunkit allteftersom syrehalten minskat. Det finns således teoretiskt en ideal driftpunkt vid vilken både kolväte- och NO_x -halterna är relativt låga.

Skulle samma värden som ges i figuren istället ritas upp i realtid skulle kurvorna ge en betydligt mer fluktuerande bild med spikar av CO och THC, vilket visas i figur 2 nedan (observera att den vänstra axeln är logaritmisk).



Figur 2 Realtidsmätning av CO, THC (FID) och syrehalt.
Real-time data of CO, THC (FID) and oxygen content.

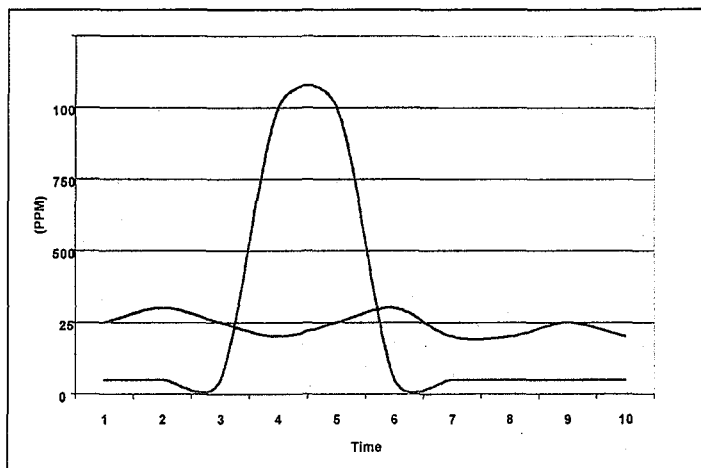
En fråga, relaterad till figur 1 är således; vid vilket luftöverskott som driften är mest miljövänlig för just min panna.

En annan berättigad fråga, relaterad till figur 2, är i vilken grad emissionstoppar utgör en miljöbelastning, dvs hur många toppar och med vilken amplitud kan anläggningen tillåtas köras utan att driften utgör en signifikant miljöbelastning.

1.2. Allmän bakgrund

Frågan om hur tyngre kolväten skall kunna bedömas med hjälp av driftinstrument som t.ex. CO- eller möjligen THC-instrument har varit uppe för diskussion i SVF 447¹ och i SVF 541² samt senast i RVF-rapporten "Environmental optimisation of waste combustion"³. Några av slutsatserna i dessa rapporter var att koloxidhalten i sig själv inte utgör någon signifikant miljöbelastning, men att det är en utmärkt indikator på risken för farligare föreningar. En annan slutsats var att det finns en viss syrenivå, som är bränsle/anläggningsberoende, vid vilken halterna av kolväten stiger kraftigt.

En tredje "etablerad sanning" är att de tyngre kolvätena avges i topparna av CO, även om detta inte direkt undersökts just för fastbränsleeldade pannor. Eller med andra ord så kan det på goda grunder ansättas att ju högre toppar av CO, desto mer tyngre miljö- och hälsofarliga kolväteföreningar emitteras. I figur 3 visas som en illustration för detta två nivåer av CO, båda med samma medelvärde, men som sannolikt har olika utsläpp av tyngre kolväten.



Figur 3 Två CO kurvor med samma tidsmässiga medelvärde.
Two CO-emission levels with the same mean value

Det är således inte medelvärdet av CO-nivån, utan istället amplituden och frekvensen av de ibland frekvent förekommande spikarna av oförbränt som kan antas avgöra emissionen av tyngre cancerogena kolväten. De senare mäts dock under en längre tidsperiod och kan därför inte direkt korreleras mot de relativt snabba fluktuationerna hos CO-instrument. Korrelationens absolutvärden påverkas även av valda instrument och deras placering liksom av anläggningsspecifika förutsättningar. Det finns således ingen möjlighet att ta fram en generell korrelation som gäller flera anläggningar. Det är inte heller praktiskt möjligt, med dagens teknik, att mäta halten av tunga kolväten i rökgasen, med hjälp av ett driftinstrument.

Det har inte funnits någon etablerad vedertagen metod för att bedöma hur många och hur höga CO-toppar som kan tillåtas i en anläggning. De värden som används i driften är således ofta baserade på subjektiva mått eller på enstaka miljömätningar som genomförts, kanske ofta under helt andra driftförhållanden. Det har därigenom saknats ett verktyg för att bedöma hur en anläggning skall kunna drivas med lägsta möjliga NO_x utan att skadliga tyngre cancerogena kolväten bildas.

Det har konstaterats ovan att det inte är möjligt att ta fram några generella samband mellan koloxid och tunga kolväten som gäller för fastbränslepannor i stort. Det borde dock vara möjligt, eftersom det finns ett väl utvecklat samband mellan koloxid och tunga kolväten, att för en specifik panna ta fram och använda detta samband. Avsikten med föreliggande studie är således att undersöka om ett sådant verktyg kan tas fram. Metoden skulle kunna baseras på att väga bildningen av tyngre kolväten mot CO-spikarnas amplitud, varaktighet och frekvens. De tyngre kolvätena skulle således mätas i samband med ordinarie besiktningar/miljöprov. I mellanperioderna skulle koloxidmätaren användas som drift- och miljöstyrande instrument. Metoden blir generell, men korrelationen för den enskilda pannan specifik.

Projektet syftar således i förlängningen till att ta fram en metodbeskrivning och databaserat verktyg.

1.3. Förbränningsteknisk bakgrund till emissioner

1.3.1. Allmänt om reaktioner, temperatur och omblandning

Gasförbränningen är i princip en mycket enkel process. En brännbar molekyl skall rent fysiskt träffa en syremolekyl. Om energinivån hos de bägge molekylerna som kolliderar är tillräckligt hög (temperatur), sker en kemisk oxidationsreaktion och en förbränning har skett. Beskrivningen är ytterligt förenklad, men anger principen.

1.3.2. Om/inblandning av gaser

Det kan i modellen ovan noteras att om de två molekylerna aldrig träffas, så sker ingen förbränning. Sannolikheten att de skall träffas ökar dock med tiden och med koncentrationen av molekyler, eller med andra ord; två molekyler instängda i en låda kommer förr eller senare att träffas om de ges tillräckligt med tid; många molekyler instängda i samma låda kommer att träffas ofta.

Hur fort denna blandning i praktiken sker styrs av två mekanismer; turbulens och diffusion. Vid en storskalig turbulent inblandning av luft i en brännbar gas i en panna samverkar diffusionen endast genom att sköta transporten av gasmolekyler på de mycket korta avstånden, men kan där utgöra en signifikant tidsfaktor.

För att exemplifiera tidsfaktorn för diffusion kan man tänka sig en gassfär som innehåller två gaser i varsin halva. En gassfär med en diameter av 5 cm ger i storleksordningen 2 till 3 sekunders tid för fullständig blandning och en sfär med diametern 1 dm ger ca 8 till 12 sekunders blandningstid vid 1000 °C, dvs relativt sett mycket långa blandningstider om det jämförs med uppehållstiden i en eldstad. Den långa blandningstiden är en av förklaringarna till att höga emissionsnivåer av oförbränt kan uppstå i pannor som har stråkbildning, dvs pannor som har enskilda gasstråk med låga syrehalter och strax bredvid gasstråk med höga syrehalter.

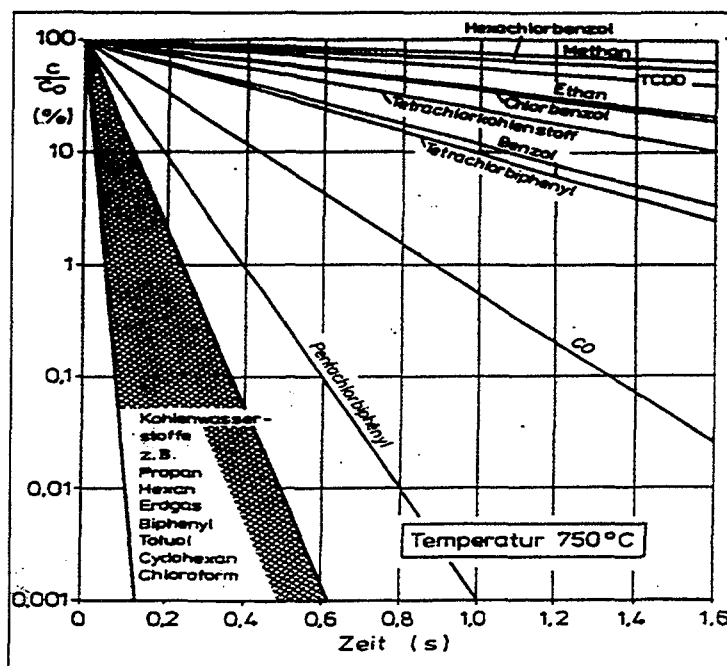
1.3.3. Reaktionstid

Även vid normal NO_x-minimering är det en fördel med en lång uppehållstid. Den första delen av uppehållstiden kan då användas för att låta kvävemolekyler träffa varandra, utan konkurrens från syremolekylerⁱ, och den senare delen till att förbränna kol och väte genom att de får chansen att träffa syremolekyler, dvs det vi i dagligt tal kallar stegad förbränning.

Det är givetvis också så att olika brännbara gaser tar olika lång tid på sig att reagera, dvs kinetiken är olika mellan olika föreningar.

I figur 4 visas hur lång tid det tar att förbränna olika ämnen vid 750 °C och vid luftöverskott.

ⁱ I verkligheten är reaktionsmekanismerna betydligt mer komplexa och reduktion av bildad NO_x sker i den bäddnära regionen t.ex med från bränslet bildad ammoniak.



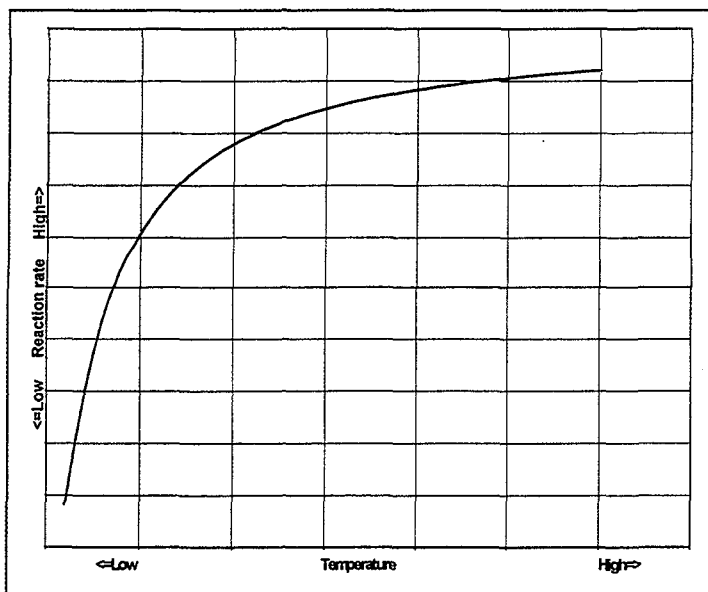
different gases at combustion at 750°C

Det bör noteras att koncentrationsaxeln är logaritmisk. Kolmonoxid tar i storleksordningen någon sekund att oxidera vid denna temperatur. Metan, samt en del andra tyngre kolväten, har en mycket längre reaktionstid, speciellt vid denna relativt sett låga temperatur. Det tar således någon tiondels sekund att förbränna 99 % av lätta kolväten av typen propan, naturgas etc.

Figur 4 Koncentrationsminskning vid förbränning av olika gaser vid 750 °C /Ref 4/
Concentration decrease of

1.3.4. Temperatur

Temperaturen är också en utomordentligt viktig faktor. Vid transienter i form av lastökningar eller varierande fukthalter är det inte helt ovanligt att temperaturen i eldstaden kan sjunka beroende på ökad avkylning av överskottsluft och/eller vattenånga. Detta kan ge drastiska effekter på slutförbränningen, dvs att emissionerna ökar kraftigt. I svåra fall riskerar man även att uttagen effekt sjunker på ett oönskat sätt. Reaktionstidens beroende av



temperaturen följer det sk. Arrheniussambandet, som visas i figur 5.

Arrheniussambandet säger att vid låga temperaturer är den begränsande faktorn temperaturen, dvs att vid låga temperaturer är reaktionshastigheten låg, eftersom de kemiska reaktionerna går mycket långsamt. Det säger också att i detta lågtemperaturområde påverkas reaktionshastigheten kraftigt av en relativt liten temperaturändring.

Figur 5 Reaktionshastighet som funktion av temperatur/ Reaction rate v.s. temperature.

Vid mycket höga temperaturer däremot påverkas reaktionshastigheten endast marginellt av en Arrheniussambandets temperaturändring, eftersom de inte är de kemiska reaktionerna som är begränsande utan masstransporten, dvs att tillräckligt med brännbara molekyler träffar syremolekyler.

I en panna finns oftast ett alltför stort spann av temperaturer och uppehållstider. Av det som sagts ovan är slutsatsen således att för att skapa en marginal mot transienter skall temperaturen hållas uppe i alla driftsituationer, att uppehållstiden skall göras så lång som möjligt och att medelsyrehalten måste avpassas så att risken för lokala luftunderskott inte blir alltför stor. I annat fall kommer således oönskade emissioner att uppkomma.

1.3.5. Partikelreaktioner

Ovan har diskuterats vad som händer vid förbränningen av gaser. Uppkastade eller medrykta kolpartiklar kan även ha en stor inverkan både på NO_x och kolmonoxidbildningen genom att t.ex. reduktionsprocesser sker på kolytan.

1.3.6. Övrig CO-bildning

För fullständighetens skull bör nämnas att CO-produktion kan ske, utan nämnvärd produktion av kolväten, om avgasad char (kol+aska) får brinna under ogynnsamma betingelser, antingen vid syreunderskott eller vid låga omgivningstemperaturer. Sådana betingelser kan dels uppstå högt upp i eldstaden eller konvektionspartiet av brinnande kolpartiklar, dels i vid slutförbränningen av charen på rosten. I allmänhet är dock denna effekt försumbar i större pannor.

2. Uppdraget

2.1. Mål

Målet med etapp 1 är att visa om och hur en metod för bestämning av lämpliga börvärden för koloxid, baserat på beräknad PAH-halt, kan byggas upp.

I förlängningen är avsikten att utveckla en praktiskt användbar generell indirekt metod för bestämning/ mätning av tunga kolväten med utgångspunkt från ”kalibrering” av anläggningens koloxidmätare mot enstaka kontrollmätningar av tunga kolväten.

2.2. Projektet

Projektet är uppdelat i två delar. Etapp 1 omfattar en teoretisk grundläggande matematisk metodutveckling med en bedömning av framkomlighet, noggrannhet och krav på mätningarnas omfattning och utförande. Denna del redovisas här och kallas Metodutveckling.

En andra del (etapp 2), som genomförs om metoden visar sig vara praktiskt användbar, omfattar validering och finjustering av metoden genom kontroll mot miljömätningar, framtagande av text till mätboken samt framtagande av användartillvända verktyg för att, ur de datamängder som erhålls, ta fram vilka koloxidnivåer som skall utgöra börvärden för pannan. Denna del kallas Metod-implementering.

3. Inledande arbete och hypoteser

3.1. Inledande arbete

Under projektets gång har sökningar gjorts på Internet och i databaser för att finna information avseende problematiken kring PAH och kopplingen till CO. Sökord som använts är CO, PAH, carbonmonoxide, THC, polyaromatic hydrocarbons i kombination med varandra och var för sig. Dessutom har hemsidorna för bland annat VTT, EPRI, Åbo Akademi, m.fl. besökts. Kontakt har tagits med Mikko Hupa Åbo Akademi för att kontrollera om det finns några aktuella arbeten inom området vid Åbo Akademi och i Finland generellt. De arbeten som stått att finna har främst avsett mätningar av PAH i olika icke energirelaterade sammanhang. Exempel på dokumentation är mätning av PAH i bussar, mätningar av PAH i sjöar, och mätningar av PAH i jord. Även toxiciteten för PAH har studerats. Inga aktuella arbeten vad gäller koppling mellan bildningen av PAH och CO har dock stått att finna.

3.2. Arbetshypotes

De metoder som är tillgängliga för mätning av PAH är tidskrävande och omständiga. PAH mäts genom att rökgas sugts ut på lämplig punkt i anläggningens rökgaskanal. PAH kondenseras sedan ut ur gasen och samlas upp för analys. Den tid under vilken gasen sugts ut ur rökgaskanalen varierar men bör oftast vara minst en timme. Detta för att få tillräckliga kvantiteter PAH. Provet blir därför ett medelvärde av PAH-halten under den aktuella mätperioden.

Det vore fördelaktigt om det fanns en beprövad kontinuerlig metod för att indikera PAH-halterna. Denna skulle i så fall kunna användas av driftpersonalen för att undvika utsläpp av tyngre kolväten såsom PAH. För närvarande finns det dock inga utprovade kontinuerliga metoder för en sådan mätning.

I avsaknad av en sådan metod för kontinuerlig mätning av tyngre kolväten är således arbetshypotesen att CO-halten och THC-halten i rökgaserna kan användas för indikering av PAH. Vidare är arbetshypotesen att THC-halten är beroende av CO-halten samt att PAH-halten är starkt korrelerad till THC-halten.

Det finns också, från tidigare studier, skäl att anta att medelvärdet av CO-halten i rökgaserna inte är något bra mått på PAH-halten, utan att det är under perioder med höga halter av CO som PAH bildasⁱⁱ.

Den metod som utvecklas eller testas inom projektet är avsedd att vara en ingenjörsmässig metod som kan komma till användning vid kontinuerlig drift i olika anläggningar. Rent praktiskt skall anläggningens koloxidmätare korreleras mot kontrollerade miljömätningar av tunga kolväten och därefter utgöra en grund för bestämning av utsläppen.

ⁱⁱ CO-bildning från kombinationen koksutbränning och dåliga förbränningsförhållanden i övrigt, torde ge en tämligen konstant basnivå.

4. Tillgängliga mätdata

För projektet har mätdata från följande mätningar varit tillgängliga:

1. Jämtkrafts anläggningar i Östersund under 1994 och 1997
2. Sundsvalls Energi, Korsta
3. Stora Kvarnsveden, P7 barkpanna 1999
4. ASSI Domän Karlsborg, barkpanna 1999
5. MoDO Paper Iggesund, barkpanna 1999
6. ASSI Domän Dynäs, barkpanna 1999

Mätningarna på Jämtkrafts anläggningar är gjorda som industriuppdrag för optimering av CO-nivån i samband med tillståndsärenden och innefattar PAH-mätningar. Antalet mätningar är dock få vid samma tillfälle och last.

Mätningarna från Korsta Sundsvall finns redovisade i Värmeforskrapport Bränsleteknik 541 och innefattar ett mycket stort antal PAH-mätningar vid olika laster, luftöverskott och bränsleblandningar /Ref 2/.

Mätningarna i barkpannorna är gjorda inom Värmeforsksprojektet "Möjligheter till optimering av barkpannor genom förbränningsteknisk styrning" /ref 5/. Mätningarna innefattar inte PAH mätningar och THC-mätningarna och är företrädesvis gjorda i ett matrissystem över ett eller flera eldstadsplan. Dessa mätvärden är därför inte direkt jämförbara med mätningar som gjorts i rökgaskanalen. Som följd av detta redovisas inte de analyser som gjorts av mätvärdena i denna rapport. Analyserna visade dock på liknande samband mellan CO och THC som redovisas nedan för gaser uttagna ur rökgaskanalerna i andra anläggningar.

De mätningar som främst har kommit till användning, vid framställning av denna rapport, är mätningarna genomförda i Östersund och framförallt i Sundsvall.

5. Metodutveckling inom projektet

5.1. Avgränsningar och förutsättningar

De emissioner som studerats är CO, THC och PAH och deras samvariation. Koldioxid och syrehalter har exkluderats som styrande parametrar eftersom dessa inte är lika hårt kopplade till utsläppen av hälso- och miljöfarliga ämnen som CO, THC och PAH. CO-halten kan således börja stiga vid helt olika syrehalter beroende på fukthalt och aktuell last.

Det är rimligt att anta, och genomförda mätningar tyder på, att de inbördes förhållandet mellan olika ”oförbrända ” emissioner är mycket mer stabila inbördes än kopplingen till syrehalt och temperatur. De påverkas dock i viss utsträckning både av last (bl.a. uppehållstid) och temperatur i eldstad. Vid en fortsatt utveckling av CO-metoden, efter att erfarenhet skaffats av grundversionen, bör det således undersökas om dessa parametrar kan användas för att minimera antalet korrelationer (antalet PAH prov).

I dagsläget, vilket kommer att framgå senare, behövs förmodligen en korrelation för varje lastområde och hänsyn måste även tas till mycket stora bränslefukthaltsändringar, om sådana förekommer.

5.2. Mätningar av PAH, THC och CO

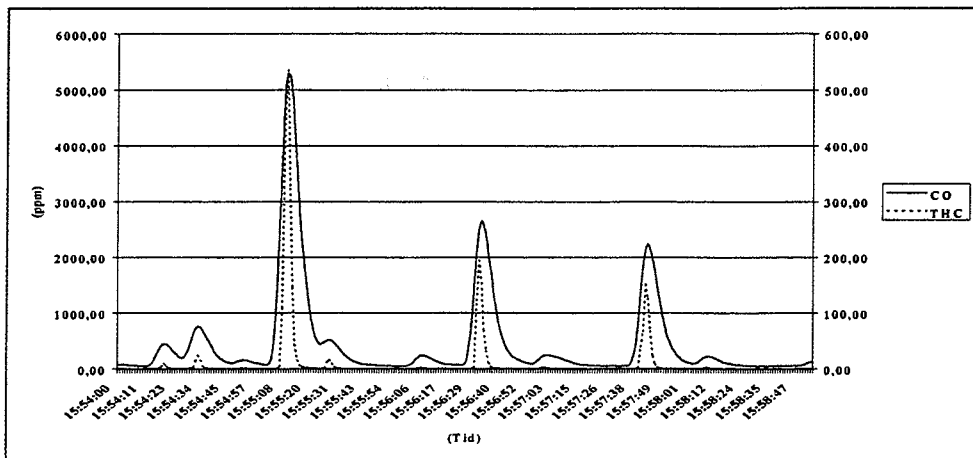
Mätningarna av PAH, THC och CO är i sig inget problem. Hänsyn måste dock tas till tidsförskjutningar, vilket diskuterats tidigare. Strävan vid PAH-mätningarna måste vara att få en hög noggrannhet på mätningarna, vilket kräver att största möjliga mängd rökgas sugts ut på kortast möjliga tid.

Vid normaldrift kommer och måste anläggningens driftsinstrument för CO användas för att ge indata till PAH-beräkningen. Då mätningar görs för att ta fram samband bör dock, åtminstone inledningsvis, ett extra instrument för att mäta CO användas, helst med liten dämpning. Detta för att få en bättre bild av hur CO-mätningen i anläggningen fungerar samt hur CO-topparna uppträder. I den mån ordinarie driftsinstrument har en extremt stor dämpning eller på annat sätt uppvisar en kraftig avvikelse mot det extra CO-instrumentet kan det vara en indikation på servicebehov eller instrumentbyte.

5.3. Samband mellan THC och CO

5.3.1. Allmänt om mätdatahanteringen

Inledningsvis studerades hur kurvorna för CO och THC följde varandra. Det kunde konstateras att vid toppvärden för CO kom en topp för THC. Topparna var i många fall något förskjutna i förhållande till varandra någon eller några sekunder. Detta trots att en tidskompensering gjorts i samband med den första analysen av mätningarna. Förskjutningen var inte lika stor och inte alltid åt samma håll. En THC-topp kunde dock alltid observeras i omedelbar närhet av varje CO-topp. Orsaken var som närmare framgår av bilaga A successiva och ökande skillnader i gashastighet mellan de olika gasanalystågen.

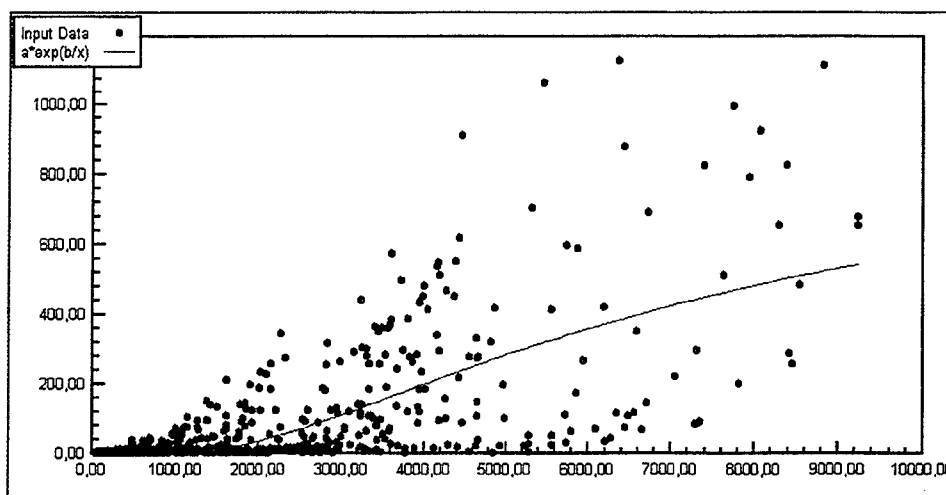


Figur 6 Realtidsmätning med tidsjusterade mätdata/ Emission data, time adjusted

I ett första skede gjordes försök att hantera hela datamängden för en mätserie för att finna samband mellan CO och THC. Svårigheterna att generera konsistent material från denna datamängd bestod i huvudsak av att:

1. Tidsförskjutning förelåg mellan olika mätvärden, vilket dock relativt enkelt kunde justeras tidsmässigt med hjälp av dator (se bilaga A kap1)
2. Tidsförskjutningen var inte alltid lika stor under hela mätserien, vilket dock kunde justeras om förskjutningen är linjär under någorlunda långa perioder.
3. Distorsion av mätsignaler (se bilaga A kap 2), vilket inte kunde hanteras på något enkelt sätt för en generell metodutveckling.

Figur 7 nedan visar hur THC-halten varierat med CO-halten för en hel mätserie. I detta fall har ingen medelvärdesbildning genomförts för att anpassa kurvformerna till varandra, endast en tidsförskjutning. En kurvanpassning har också lagts in, vilken i detta fall inte ger någon större vägledning.



Figur 7 Samhörande mätningar av THC(Y-axel) och CO(X-axel), THC v.s. CO time adjusted data

Försök gjordes sedan att finna en modell för vid vilken halt på CO som THC-halten börjar att stiga. Ur kurvorna i figur 6 förefaller det som att det finns en nivå på CO-halt vid vilken THC-halten börjar att stiga. Detta visade sig dock svårt att ur mätdata finna denna nivå beroende på att det inte kan avgöras vad som är en naturlig punkt för nivåökningen och vad

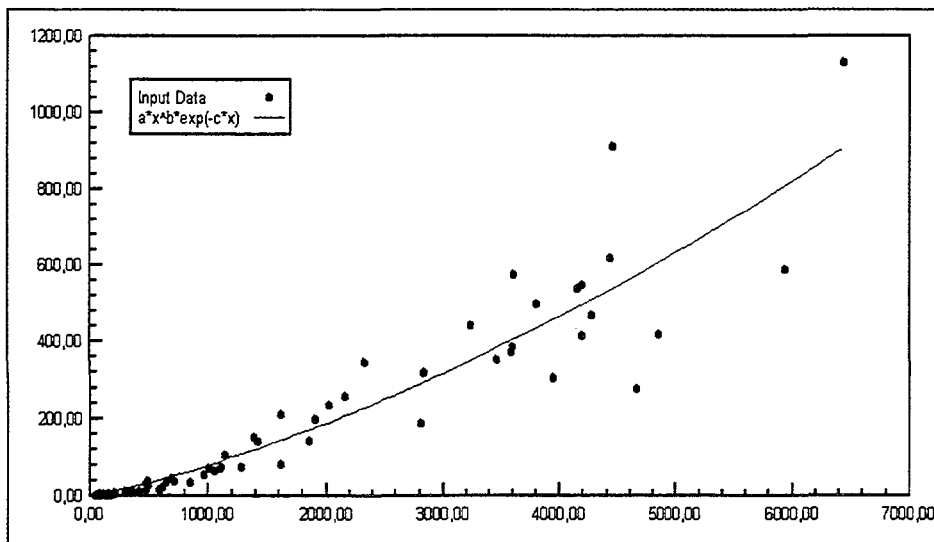
som beror på de olika dämpningarna i instrumenten. Det framgår också att den mätta THC-halten kan vara låg trots att CO-halten är hög. Detta kan enligt tidigare förklaras dels med tidsförskjutningen dels med olika dämpning.

Den metod som visade sig mest framgångsrik att använda var att matcha toppar för CO-halten mot toppar för THC-halten. Beräkningstekniskt gjordes detta genom att isolera varje toppvärde och genom att anta att en topp av CO-halt motsvarar en topp av THC-halt och sedan matcha dessa mot varandra. Fördelen att matcha toppar mot toppar på det sätt som valts här är att topparna är relativt korta och väl definierade. Genom denna bearbetning av data för mätvärden erhöles dessutom en mer hanterlig datamängd med en begränsad spridning.

På detta sätt kunde THC-halten beskrivas som en funktion av toppvärdena för CO-halten. Figur 8 visar toppvärdet av THC-halten som funktion av CO-halten med en kurvanpassning som gjorts av mätserien för de mätdata som redovisas i figur 7.

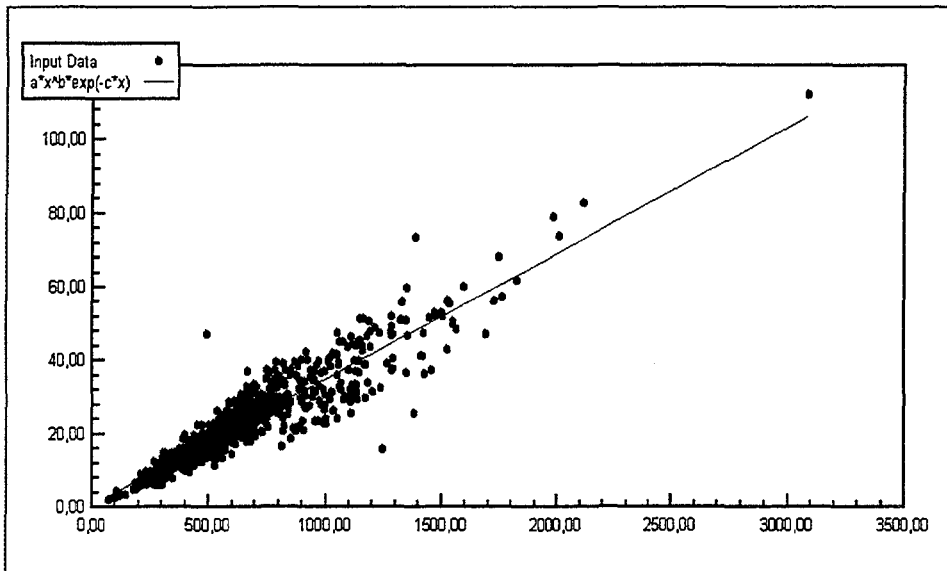
Slutsatsen är att med antagandet att toppvärden för CO ger toppvärden av THC förefaller det som att det går att finna ett gott samband mellan CO och THC.

Figur 8 Samhörande toppvärden för THC (Y-axel) och CO(X-axel), THC v.s. CO peak values



5.3.2. Mätningar i Östersund

Med mätningar gjorda under 1994 och 1995 i Östersund som grund erhöles en god överensstämmelse mellan de olika mätserierna. Vid mätningarna har lasten legat omkring 26 MW vid de båda mättillfällena. I Figur 9 redovisas mätningarna från 1994 och en kurvanpassning av dessa.



Figur 9 THC som funktion av CO 1994 vid mätningar utförda i Östersund, toppvärden
 THC as function of CO during 1994, measured in Östersund, peakvalues

För kurvanpassningen har formel enligt 1 valts. Kurvanpassningen är gjord med programmet Datafit från Oakdale Engineering. Ekvation (1) valdes för kurvanpassningen för sambandet mellan THC och CO.

$$(Ekv 1) \quad THC = a * x^b * e^{(-c * x)}$$

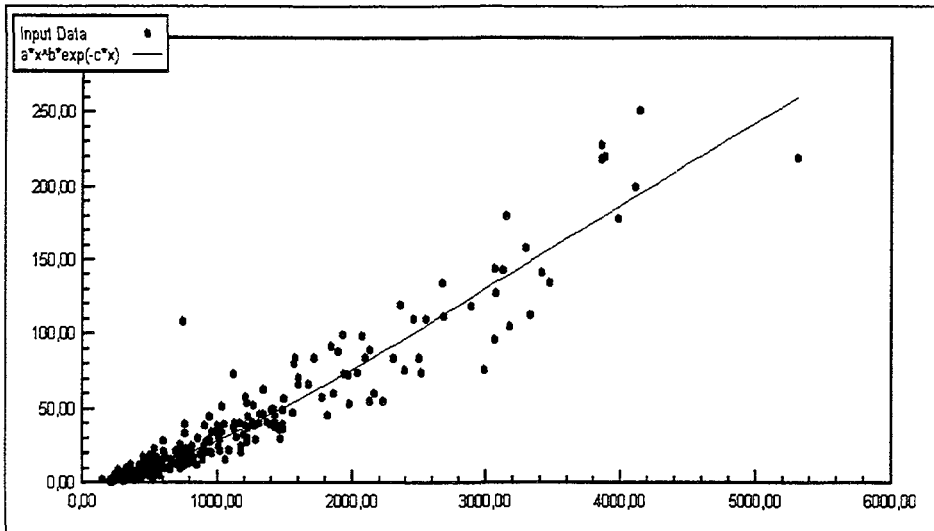
För kurvanpassningen till Figur 9 gäller följande konstanter:

$$a = 0,000853, \quad b = 1,52093, \quad c = 7,9 * 10^{-5}$$

I Figur 10 nedan redovisas data från året efteråt vid ungefär samma last och i samma panna, även här har ekvation 1 använts.

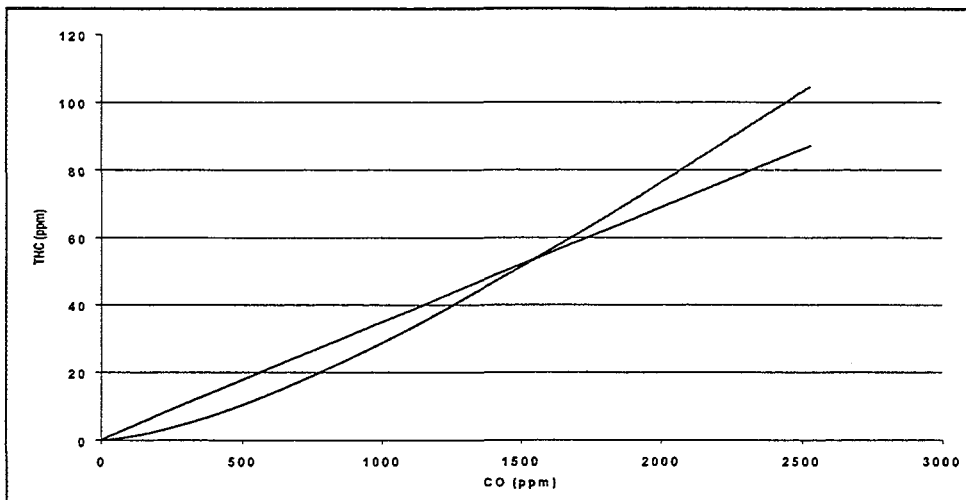
För den kurvanpassning som visas i figuren gäller följande konstanter:

$$a = 0,04554, \quad b = 0,959847, \quad c = -1,38 * 10^{-5}$$



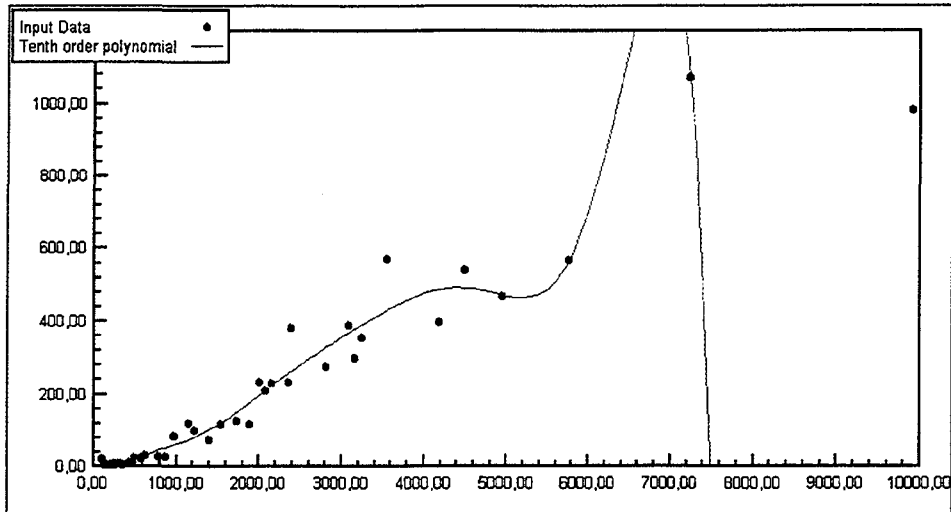
Figur 10 THC-halt som funktion av CO-halt vid mätningar utförda 1995 i Östersund.
 THC as function of CO during 1995, measured in Östersund, peak values

Dessa två mätserier och de kurvanpassningar som gjorts visar på en inte allt för stor avvikelser mellan kurvorna, trots den tid som förflutit mellan mättillfällena. I Figur 11 har kurvanpassningarna för de två serierna lagts in i samma diagram. Skillnaden mellan kurvanpassningarna för de två mätserierna är relativt liten.



Figur 11 Mätserier 1994 och 1995 vid samma last hos Jämtkraft Fig. 9 och 10

Vid framtagande av sambanden mellan CO och THC bör noteras att kurvanpassningarna skall göras stabila, dvs alltför känsliga ekvationsuttryck bör undvikas. I figur 12 nedan visas effekten av att använda ett alltför högt gradtal när det gäller polynom.



Figur 12 Kurvanpassning med 10 gradspolynom / Curve fitting by 10 grade polynom.

5.3.3. Mätningar i Sundsvall

Mätprogrammet /ref 2/ för CFB-pannan i Sundsvall sammanfattas i tabell 1 nedan. Projektet genomfördes för att undersöka vilka emissioner som uppkommer om luftöverskotten minskas i avsikt att uppnå en minskad NO_x-halt. Pannan eldades med antingen RDF-mix (pappers- och plastfolier och grot) eller ren grot. De provinställningar som användes spändes från onormalt låga till onormalt höga luftöverskott i 5 steg vid både full och låg last. I tabellen nedan står PriorP för Priority Pollutants, vilket är en lång lista på ämnen som angivits som skadliga av amerikanska myndigheter och Ames test, som är en biologisk test av risken genförändringar hos biologiskt liv (cancer).

Dag	Prov	Bränsle	Last	O2-inst	NH3 tillförsel	NH3 mätning	POM/PNA	Prior.P.	Ames	Dioxin
Tis	1	Hög fukt, trä	Hög	1			POMPNA	Prior	Ames	
	2	Hög fukt, trä	Hög	2		Mätn	POMPNA		Ames	
	3	Hög fukt, trä	Hög	2	NH3	Mätn	POMPNA			
	4	Hög fukt, trä	Hög	2	2* NH3	Mätn	POMPNA			
	5	Hög fukt, trä	Hög	2						
Ons	6	Hög fukt, trä	Hög	3			POMPNA	Prior.	Ames	
	7	Hög fukt, trä	Hög	3	NH3	Mätn	POMPNA	Prior	Ames	
	8/36	Hög fukt, trä	Hög	4			POMPNA	Prior	Ames	
	9	Hög fukt, trä	Hög	4	NH3	Mätn	POMPNA			
Tor	10	Hög fukt, trä	Hög	4						
	11/35	Hög fukt, trä	Hög	5			POMPNA		Ames	
Fre	12	Hög fukt, trä	Låg	2			POMPNA			
	13	Hög fukt, trä	Låg	3			POMPNA			
	14	Hög fukt, trä	Låg	4			POMPNA		Ames	
	15	Hög fukt, trä	Låg	5			POMPNA			
Mån	16	Låg fukt, trä	Hög	2						
	17	Låg fukt, trä	Hög	2						
	18	Låg fukt, trä	Hög	3						
	19	Låg fukt, trä	Hög	3						
Tis	20	Låg fukt, trä	Hög	3						
	21	Låg fukt, trä	Hög	3						
	22	Låg fukt, trä	Hög	4						
	23	Låg fukt, trä	Hög	4						
Ons	24	RDF-mix	Hög	1			POMPNA	Prior	Ames	Diox
	25	RDF-mix	Hög	2		Mätn	POMPNA			Diox
	26	RDF-mix	Hög	2	NH3	Mätn	POMPNA			
	27	RDF-mix	Hög	3			POMPNA		Ames	Diox
	28	RDF-mix	Hög	3	NH3	Mätn	POMPNA			
	29	RDF-mix	Hög	3						
Tor	30	RDF-mix	Hög	4			POMPNA			
	31	RDF-mix	Hög	4	NH3	Mätn	POMPNA			
	32	RDF-mix	Låg	2						
Fre	33	RDF-mix	Låg	3						
	34	RDF-mix	Låg	4						

Tabell 1 Mätprogram för CFB-pannan i Korsta Sundsvall. Measurements at Korsta in Sundsvall

Instruktionerna till driftpersonalen var att försöka ställa pannan så att de mer frekventa topparna av CO låg på nedan angivna nivåer.

Driftläge	O2-inställning	CO(ppm)
1	hög	ca 0
2	normal	ca 100
3	låg	ca 500
4	lägre	ca 1000
5	lägst	ca 2000

Tabell 2 Driftinställningar. Operation Korsta in Sundsvall

Det visade sig emellertid ytterligt svårt att i alla lägen styra inställningarna. I flera fall har därför en period av "stabil drift" men med fel nivå godtagits som prov, utan att provnumret ändrats. Detta gör att det är emissionsnivåerna i resultaten som får ställas mot varandra, inte strikt provnumren i försöksplanen

Prov nr	Bränslefukt %	Last MW	O2 %	CO ppm	THC Ppm
1	44	15	7.5	93	5
2	38	15	5.7	113	9
3	40	15	5.5	118	7
4	41	15	6.5	158	7
6	47	15	4.9	469	29
7	47	15	4.9	431	14
8/36	51	15	1.5	530	12
9	49	15	4.3	1150	60
11/35	49	15	1.4	773	22
12	45	11	5.8	158	8
13	45	11	5.5	431	22
14	46	11	2.8	438	20
15	48	11	2.2	1080	49
161	48	15	2.5	116	3
162	50	15	1.5	459	10
163	50	15	6.2	129	2
24	53	15	6.2	129	2
25	52	15	5.9	362	14
26	51	15	6.0	442	19
27	52	15	5.1	389	17
28	49	15	4.9	611	26
30	53	15	4.6	442	13
31	53	15	5.3	465	19
32		12	4.4	419	24

Tabell 3 Resulterande driftdata. / Results Korsta in Sundsvall

Proven 8/36 och 11/35 gjordes om efter det att provtagningen av tyngre kolväten misslyckats i de första försöken. Proven 161 till 163 motsvarar prov 16-23 och utgörs av en kontinuerlig loggning av ens sekundsmätvärden, med en stegvis sänkning av luftöverskottet, från kl 8.45 till 19.05.

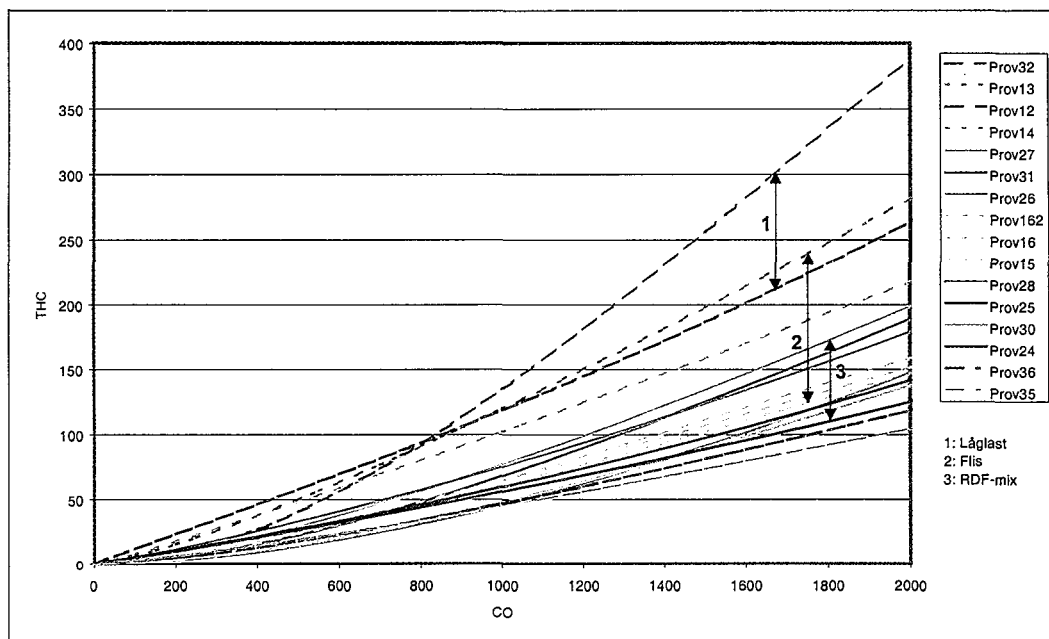
För dessa mätningar har kurvanpassningar gjorts på samma sätt som redovisas för pannan i Östersund. Det vill säga att i CO-toppar har matchats mot THC-toppar. I vissa fall har mätningar som varit uppenbart felaktiga sorterats bort. Det är dock endast ett begränsat antal mätpunkter, försakade av t.ex. att ett instrument har "bottnat". Figur 13 visar kurvanpassningen för samtliga kurvor.

I figur 13 har endast CO-värden upp till 2000 ppm tagits med. Kurvorna avviker från varandra främst genom att ha olika lutning. Det stora flertalet av kurvorna avviker dock endast i begränsad omfattning från varandra. Detta trots kraftigt olika driftinställningar, laster och bränslen. Prov 32 avviker dock lite mer från de övriga vid höga CO-värden. Orsaken till detta har inte stått att finna. Men i det område som är av intresse för normal drift av pannor är avvikelserna inte allt för stora och formen liknar övriga kurvor och mätningar.

För den översta kurvan i figur 13 (prov 32) är bränslet RDF-mix och lasten låg. Prov24, Prov25, Prov 26, Prov28, Prov30 och Prov31 är samtliga prov vid hög last och med RDF-mix. Dessa sex prov avviker i mindre omfattning från varandra. Vid Prov 28 mättes dock

inte PAH. En av slutsatserna kan vara att det är rimligt att anta att lasten har en relativt sett större betydelse än bränslet.

Med utgångspunkt från figur 13 är det rimligt att anta att sambandet mellan THC och CO går att beskriva på ett sammanfattande sätt, exempelvis med en formel som anges i ekvation 1. I det program som använts för kurvanpassningen finns dock teoretiskt möjligheten att göra approximationer för ett 60 tal olika funktioner.



Figur 13 Kurvanpassningen sexton mätningar i Sundsvall. Curve-fitting for sixteen measurements

För att jämföra resultaten från kurvanpassningarna mer i detalj finns samtliga kurvor även i bilaga B.

Slutsatsen är således att det finns ett samband mellan THC och CO och att det är möjligt att beskriva detta genom att matcha toppvärden för de två storheterna mot varandra för varje last och bränsle. Genom att genomföra flera mätningar kan en typisk kurva syntetiseras. Det är dock inte möjligt och lämpligt att "kontrollera" att rätt totalmängd THC erhålls baserat på den under perioden varierande mätta CO-halten. Framtagen kurva ger endast det momentana sambandet för CO och THC, den beskriver inte i detalj de distorsionsresultat som respektive instrument förorsakar. I allmänhet är driftinstrumentet för CO avsevärt mycket långsammare, dvs. har större dämpning, än de i allmänhet avsevärt snabbare THC (FID)-instrumentet. THC visar således "rätt" medan CO-instrumentet ger den dämpning som måste beaktas, och inte får ändras, vid införandet av metoden.

5.4. Samband mellan PAH och THC

5.4.1. Allmänt

I föregående kapitel har sambandet mellan driftinstrumentet för CO och det "extra" THC-instrumentet bestämts och det ansätts vidare i den här föreslagna metoden att THC-halten och halten av tyngre kolväten samvarierar, vilket också visats i tidigare studier.

Det har dock inte framtagits någon mer exakt korrelation mellan THC och tyngre kolväten inom POM eller undergruppen PAH, exempelvis för Benso(a)pyren, vilket är ett allmänt använt jämförelseämne. Svårigheten är givetvis att de tyngre kolvätena endast är kända som ett medelvärde över tiden, oftast under en tidsrymd av minst en timme.

THC-halten mäts oftast med ett FID-instrument som något förenklat mäter antalet kolvätebindningar. Detta innebär att de tyngre kolvätena finns med i mätinstrumentets THC-utslag, och att dessa även om halterna är mycket låga bidrar med ett relativt sett större utslag än de enklare kolvätemolekylerna t.ex. metan (CH₄).

5.4.2. Använda mätningar

För att testa om metoden är användbar har mätningarna i Sundsvall använts, eftersom dessa är de enda där en större mängd prov genomförts under något så när likartade förhållanden. Mätningarna i Östersund är för få och gjorda vid olika tillfällen, varför dessa inte kan användas. Det kan emellertid inte uteslutas att förutom typ av anläggning, så påverkar även last och bränsle emissionerna av PAH i relation till THC-halten. Detta medför att endast ett begränsat antal mätningar kan användas. De mätningar som kommit till användning är Prov26, Prov27, Prov30 och Prov31 vid Korsta i Sundsvall (se tabell 3).

Inom gruppen PAH finns ett otal föreningar. Ett femtontal av dessa, inklusive naftalen, ett tämligen harmlöst ämne, brukar väljas ut när analyser av PAH görs och presenteras. I metodutvecklingen har ett av dessa analyserade ämnen, Benso(a)pyren valts ut ur PAH-gruppen för att användas som indikatorsubstans på rökgasens cancerogenitet. Benso(a)pyren är ett av de mest kända och oftast använda jämförelsesubstanserna. Vi rekommenderar att Benso(a)pyren, fortsättningsvis förkortat B(a)P, används även i framtiden, men metoden förutsätter inte att just detta ämne används som ett mått på rökgasens skadlighet.

För att erhålla ett förhållande mellan PAH (Benso(a)pyren) och THC-halt genomförs följande steg:

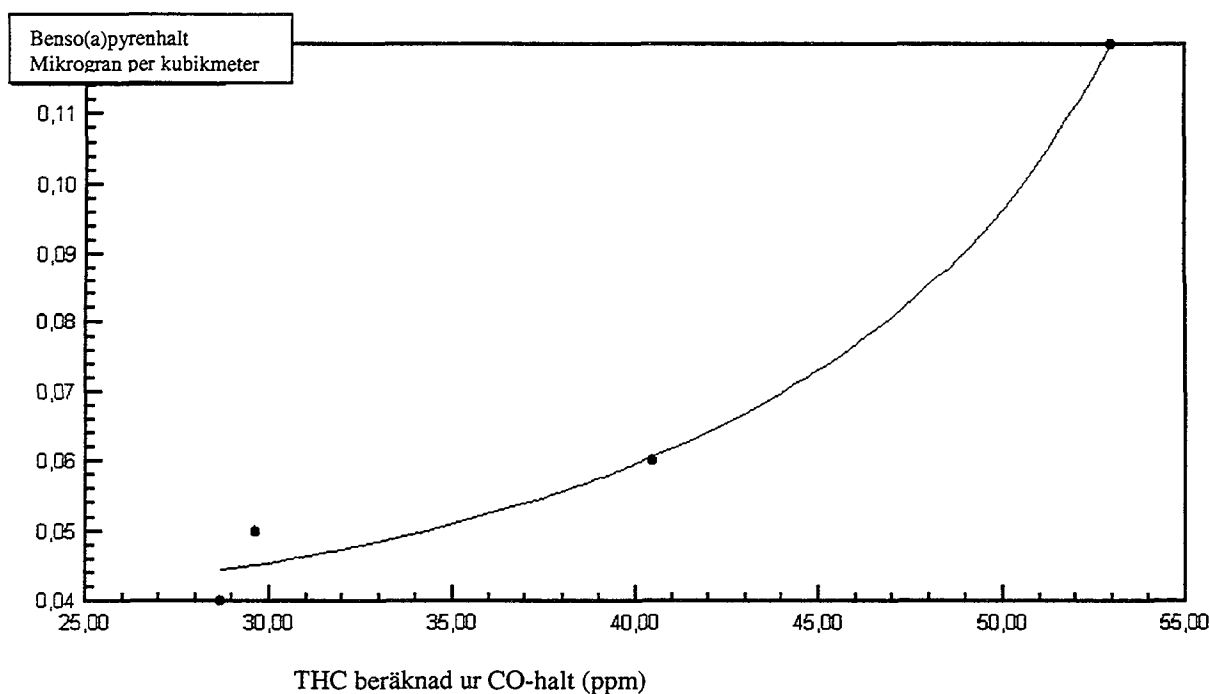
1. De formler som tidigare erhållits vid kurvanpassningen ovan i kapitel 5 för varje enskild mätning beskriver THC-halten med utgångspunkt från CO-halten. Notera att detta är sambandet för topp CO och topp THC
2. THC-halten integrerats numeriskt över tiden, baserat på den kontinuerligt mätta CO-halten under perioden, vilket givit en fiktiv total halt av THC. Notera att denna integration görs på hela CO-kurvan under hela perioden, således inte enbart toppvärdena.
3. Den beräknade THC-halt som erhållits vid integrationen divideras med tiden. Genom detta förfarande erhålls en beräknad THC halt som är ett medelvärde med samma tidsbas som B(a)P mätningen.
4. En kurvanpassning görs av B(a)P som funktion av THC, vilket ger sambandet THC - B(a)P. I Figur 14 har mätta B(a)P-halter plottats som funktion av beräknade THC-halter och en kurvanpassning genomförts. Notera att ingångsvärdena i kurvanpassningen är de beräknade THC halterna utgående från fyra kompletta verkliga realtidsmätningar av CO-halten och de verkligt mätta PAH-halterna i form av Benso(a)pyren.

För kurvanpassningen har följande ekvation ansatts.

$$(Ekv 2) \quad PAH = x/(a+bx-cx^2), \quad a=-0,04131, \quad b=0,00306, \quad c=-2,7005$$

I figur 14 redovisas de fyra mätningar som har de likartade driftförhållanden som krävs för att erhålla ett samband mellan CO och PAH. Av figur 14 att döma finns det en samband, med en gradvis ökande andel PAH i relation till totalcolvätehalten. Vid en vidareutveckling av metoden torde det i ett första steg vara värdefullt att genomföra flera mätningar för att erhålla en större säkerhet över vad som kan betraktas som mest generell.

Vid en framtida användning av metoden bedöms det vara nödvändigt med minst fyra PAH mätningar med motsvarande CO och THC mätningar för att fastställa sambanden vid varje utvald last och vid ett specifikt bränsle.



Figur 14 Förhållande mätt Benso(a)pyren- och beräknad THC-halt
Benso(a)pyren v.s. THC at Sundsvall.

5.5. Metoden för att bestämma PAH-halten som funktion av CO-halten.

5.5.1. Allmänt.

I tidigare kapitel har sambandet CO-THC (kapitel 5.3) och sambandet THC-PAH (kapitel 5.4) diskuterats och analyserats. I detta kapitel beskrivs stegvis och sammanfattande metoden att bestämma PAH-halten kontinuerligt ur CO-halten i rökgaserna, dvs. att eliminera THC-ledet. Vidare diskuteras antalet mätningar som behövs. Metoden bygger på följande steg:

1. Samhörande mätning av PAH, THC och CO.

2. Kurvanpassning av THC som funktion av CO från mätningarna (toppvärden).
3. Kurvanpassning av PAH som funktion av THC beräknad ur CO från mätningarna.
4. Framtagande av samband CO-PAH.

Nedan beskrivs varje steg var för sig.

5.5.2. Kurvanpassning av THC som funktion av CO

För att erhålla en god kurvanpassning bör endast toppvärdena av CO och THC matchas mot varandra och kurvanpassningen göras med utgångspunkt från dessa. I enlighet med kap 5.3.

För kurvanpassningen bör en ”styv” formel väljas, dvs. ett polynom av hög grad är direkt olämpligt då kurvanpassningen kommer att börja svänga i ändarna av mätområdet.

5.5.3. Kurvanpassning av PAH som funktion av THC

Kurvanpassning enligt kapitel 5.4. En viktig avvägning som måste göras är antalet mätningar av PAH som behövs för att erhålla ett samband. Den bedömning som gjorts under arbetet med denna rapport är att det behövs minst fyra mätningar av PAH för varje last och bränsle. Detta motiveras av att med mindre antal mätningar blir kurvanpassningen mellan PAH och THC allt för osäker. Med fyra mätningar borde det kunna avgöras om metoden är tillämpbar på anläggningen eller ej, dvs. om det finns en repeterbarhet hos mätresultaten eller ej.

5.5.4. Samband CO-PAH

Det första steget är att eliminera THC i de två framtagna ekvationerna för CO-THC respektive THC-PAH för att kunna ange PAH som en direkt funktion av CO, vilket är en rent matematisk övning. Det finns dock två användningsområden för ekvationerna, vilket gör att två lösningar kan bli aktuella.

Beräkning av total utsläppshalt under en längre period.

För beräkning av totalt utsläppt PAH halt med en miljö dator kan först.

$$(Ekv 1) \quad Q_{THC} = a * Q_{CO}^b * e^{(-c * Q_{CO})}$$

användas för att successivt beräkna ett medelvärde för THC-halten. Svaret kommer således att bli t.ex. under senaste timmen, dygnet eller månaden är den beräknade THC-halten $XY \text{ mg}_{THC} / \text{nm}^3$ vid ett normerat luftöverskott (det senare endast om hänsyn tagits till syrehalten i ekv 1 och i beräkningen). Endast ett värde att lagras erhålls således under denna valda period. En numerisk integration har skett i datorn.

Därefter sätts detta värde på Q_{THC} in i ekvation

$$(Ekv 2) \quad Q_{PAH} = Q_{THC} / (d + fQ_{THC} - gQ_{THC}^2)$$

där a, b, c, d och f är konstanter och Q är volymkoncentration. Resultatet blir en medelhalt av PAH i $\mu\text{g}/\text{nm}^3$ under valda perioden. Givetvis kan även andra sorter eller analyserade ämnen användas. Utfallet kan i princip väljas fritt. Det blir beroende av vilket ämne eller sort som används vid kurvanpassningen mellan THC och tyngre kolväte.

Resultatet blir således i detta exempel ett värde som utgör en medelhalt av t.ex. Benso(a) pyren uttryckt i $\mu\text{g}/\text{nm}^3$ vid ett visst luftöverskott under en timme, ett dygn eller under en annan valfri period. Vi känner eller kan under samma tid beräkna luftöverskott och producerad rökgasmängd och kan därmed om så önskas också beräkna det totala massutsläppet av utvalt tungt kolväte.

Beräkning av momentan utsläppshalt.

För beräkning av momentan utsläppt halt av ett tungt kolväte kan också ekvation 3 användas direkt och on-line genom att sätta in ekv 1 i ekv 2, enligt följande:

$$\text{(Ekv 1)} \quad Q_{\text{THC}} = a * Q_{\text{CO}}^b * e^{(-c * Q_{\text{CO}})}$$

och

$$\text{(Ekv 2)} \quad Q_{\text{PAH}} = Q_{\text{THC}} / (d + f Q_{\text{THC}} - g Q_{\text{THC}}^2)$$

blir därmed

$$\text{(Ekv 3)} \quad Q_{\text{PAH}} = a * Q_{\text{CO}}^b * e^{(-c * Q_{\text{CO}})} / (d + f * a * Q_{\text{CO}}^b * e^{(-c * Q_{\text{CO}})} - g * (a * Q_{\text{CO}}^b * e^{(-c * Q_{\text{CO}})})^2)$$

Ekvation 3 beskriver således i detta fall det direkta sambandet mellan mätta volymkoncentrationen av CO och PAH. De momentana halterna kan därefter medelvärdesbildas under valfri period eller presenteras som momentanvärden. Detta innebär att bägge angivna metoder ovan egentligen bara är två arbetsätt.

Detta samband ger för samtliga fyra använda prov "rätt" PAH-halt, med den avvikelse som framgår av figur 13, dvs "felet" utgörs av skillnaden mellan den halt som beskrivs av kurvan och den mätta halten i form av mätpunkten.

Spridningen av det beräknade PAH-resultaten är ett mått på antingen hur lämplig pannan är för CO-metoden eller alternativt hur väl provnings-, analys- och metodbestämningen lyckats. Det kan också uttryckas som att en liten skillnad mellan kurva och mätta prov innebär att metoden kan tillämpas med stor tillförsikt. Stora avvikelser mellan kurva och prov innebär det motsatta.

5.5.5. Anpassning av mätningar till praktisk drift

De samband som tas fram och som testats mot den verkligt mätta PAH-halten gäller för ett visst lastintervall och för ett visst fukthaltsintervall. För att kunna använda sambanden för olika laster och olika fukthaltsintervall rekommenderas att en interpolation sker mellan olika framtagna last- och bränslefall.

Hur omfattande denna interpolationsrymd blir är beroende av hur stora skillnaderna är mellan de framtagna sambanden och givetvis hur pannan drivs. En panna som går på baslast behöver endast ett lastfall. En panna som uppvisar likartade förbränningsbetingelser inom hela lastområdet behöver få lastfall. Med dagens möjligheter till billig datahantering utgör detta inget större problem att hantera för ett övervakningssystem. Val av interpolationsmetod har inte kunnat göras i denna studie som följd av det begränsade antalet mätningar av PAH som varit tillgängliga. Denna del får återstå till återstå till framtida försök genomförts för att testa metoden i "Implementerings-fasen", se kapitel 2.2. Det kan dock antas att tre eller fyra lastfall kan vara aktuellt.

5.6. Noggrannhet och begränsningar för metoden

Metodens begränsningar är svåra att säkert uttala sig om i nuvarande läge. Vid framställningen av denna rapport har flera mätserier för THC och CO studerats (se kap 4) samt /ref 1/. I nästan samtliga fall har liknande samband som de i rapporten erhållits för samtliga mätserier. Detta gäller både fluidbäddar och rostpannor. Det finns anledning att tro att liknande samband mellan PAH och THC som redovisas i denna rapport föreligger även för andra typer av anläggningar.

De data som varit tillgängliga har dock tagits fram för andra ändamål. Detta har medfört att antalet PAH-mätningar inte är tillräckligt många för att helt säkerställa metoden i detalj. Med nya mätningar avsedda specifikt för att implementera metoden på en anläggning kan en verifiering av metoden göras relativt enkelt.

Försök har gjorts att skatta noggrannheten för metoden. De felkällor som kan identifieras är mätnoggrannhet, fel genom hantering av mätdata och beräkningsfel vid kurvanpassning. Att göra en exakt feluppskattning är dock inte möjlig med utgångspunkt från befintliga (få) data. Slutsatsen är dock att det inte är själva metoden, utan anläggningens karakteristik som är den helt avgörande för metodens användbarhet.

En indikation på felets storlek kommer att fås vid Implementeringsdelen av projektet (se kap 2.2), men felstorleken kommer alltid att vara individuell för varje anläggning. Vissa (bra) anläggningar kan säkerligen uppnå en mycket god överensstämmelse mellan beräknad och verklig PAH-halt, andra kommer aldrig att kunna presentera samstämmiga resultat från de fyra PAH-mätningarna genom att förbränningsförhållandena är alltför obestämda.

De flesta stokastiska störningarna som sker under drift borde dock kunna hanteras av metoden, eftersom metoden är baserad på att analysera dessa. Den största begränsningen ligger i om en anläggning körs på ett sätt som ligger utanför de undersökta området, tex. vid ett bränslebyte från fuktig GROT till RT-flis.

6. Slutsatser och fortsatt arbete

Det har i rapporten konstaterats att det för de studerade körningarna går att räkna fram en totalmängd PAH som stämmer med de mätta mängderna utgående från mätvärdena för CO. Det kan också uttryckas som att det går att ta fram ett konsistent samband mellan den momentant mätta CO-halten och den mätta PAH-halten. Genom brist på konsistenta data har det inte varit möjligt att närmare undersöka möjligheterna att översätta till andra lastfall och bränslen.

Det bästa sättet att utröna metodens användbarhet är att genomföra en metodimplementering i form av ett pilotfall på en verklig anläggning (etapp 2). Detta innebär i princip att fyra mätningar av PAH görs för varje utvald last och bränsle.

Preliminärt, lite grand beroende på val av anläggning, bör tre lastfall undersökas och för något eller några av lastfallen bör även en större variation i bränslekvalitet ske. De tre lastfallen min, medel och maxlast motiveras av behovet av utröna kurvformen för lastberoendet. Genom utnyttjande av vedertagna försöksreduceringsmetoder behöver dock inte fyra PAH-prov tas vid samtliga laster.

Den extra instrumentering som behövs för ett sådant försök är ringa, förutom befintlig CO-mätare krävs ett THC-instrument (FID) och ett separat CO-instrument samt datalogger. Den största arbetsinsatsen utgörs av PAH-provtagningen. Pannan måste även drivas med relativt konstant last och ett homogent bränsle. Provtagningstiden för ett PAH-prov är ca 1.5 timme, utöver tiden för att säkerställa att inte reemission från tidigare drift föreligger.

Det är ingenting i dagsläget som talar emot att metoden skulle kunna bli en on-line metod som både anger momentan och integrerad (beräknad) PAH-halt och som kan användas för att styra anläggningarna mot lägsta NO_x -halt och högsta verkningsgrad.

I den mån THC-instrument i framtiden blir vanligare i anläggningar kan metoden reduceras till att ta fram samband direkt mellan THC och tunga kolväten. I den mån enklare (snabbare) metoder tas fram för mätning av tunga kolväten minskar resursbehovet vid bestämningen av sambanden. I den mån och när konkurrenskraftiga instrument tas fram för direkt onlinemätning av PAH behövs inte metoden.

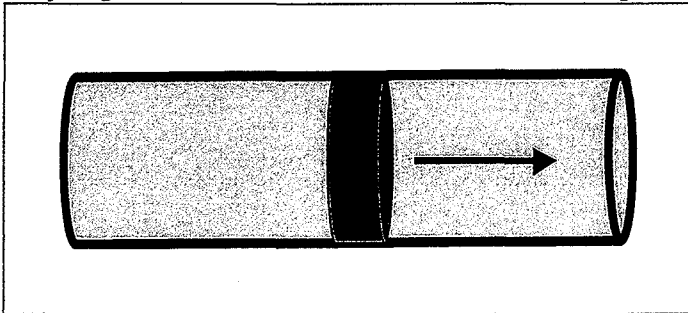
Bilaga A Hantering av mätdata

I rapporten "Emissioner av kolväten och NO_x vid låga luftöverskott i CFB", Värmeforsk 541, redovisas några faktorer vilka påverkar och måste beaktas vid mätning och utvärdering av transienta förlopp, dvs. då värden varierar och man vill veta hur olika emissioner samvarierar. Frågor kring mätdatahantering är således av specifikt intresse i detta sammanhang, när det gäller analys av snabba förlopp. Det måste således beaktas i en eventuellt kommande metodanvändning och behandlas därför kortfattat nedan. De två faktorerna är:

1. tidsförskjutning mellan mätningar av olika emissioner
2. distorsion av signaler

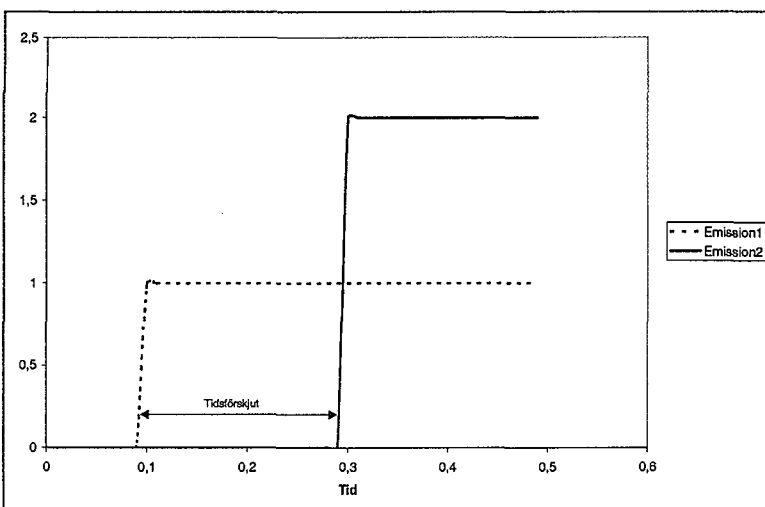
A.1 Tidsförskjutning

Då en förändring sker som ger upphov till förändring av någon storhet som mäts dröjer det en tid tills det att instrumentet börjar registrera förändringen. Denna fördröjning är olika stor för olika instrument och parametrar. Tidsförskjutningen beror



på hela mätsystemet dvs vilka instrument, metoder, komponenter m.m. som ingår i mätsystemet. En bra exempel är en gasplugg med avvikande sammansättning av t.ex. CO som rör sig i ett rör. Det tar en viss tid tills den kan detekteras.

Figur 1 Tidsförskjutning förorsakad av förflyttning av gas i gaskonditioneringsutrustning.
Time delay caused by gas movement in gas treatment equipment



Samma sak kan också beskrivas i diagramform såsom i Figur A-1. I Figuren sker en momentan förändring i processen som ger upphov till två samtidiga emissionstoppar, vilka dock mäts med två olika utrustningar, en med liten fördröjning och en med längre fördröjning.

Figur A-2 Tidsförskjutning mellan två mätvärden vid en stegfunktion.
Time delay between data for a step-function.

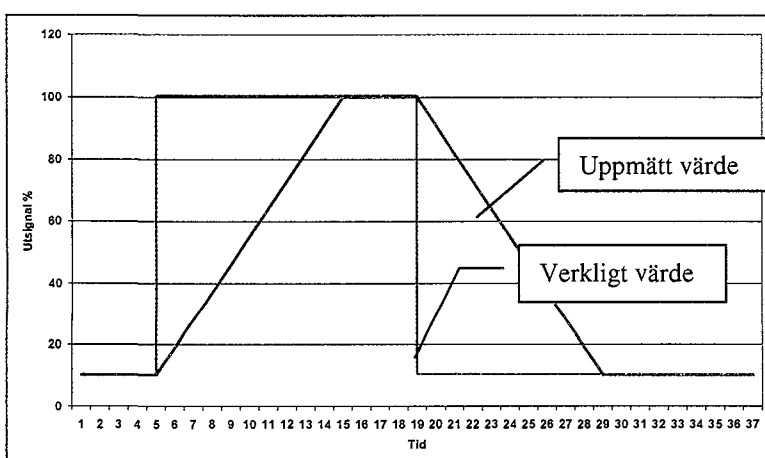
A2 Distorsion av mätsignaler

A.2.1 Allmänt

I alla mätkedjor uppstår någon typ av förvrängning mellan verkligt värde och det uppmätta värdet. En sådan vanlig omvandling är dämpning. Dämpningen kan grovt beskrivas som en medelvärdesbildning av mätdata. Principiellt finns två typer, dels en linjär rent matematisk medelvärdesbildning som sker i mätinstrument eller mätdatainsamlingsdator, dels en olinjär tröghet som exempelvis kan uppstå i en inbyggd PID-krets alternativt i en kuvett som skall fyllas med en gas.

A.2.2 Medelvärdesbildning

Den rent matematiska medelvärdesbildningen kan åskådliggöras med figur A-2, i vil-

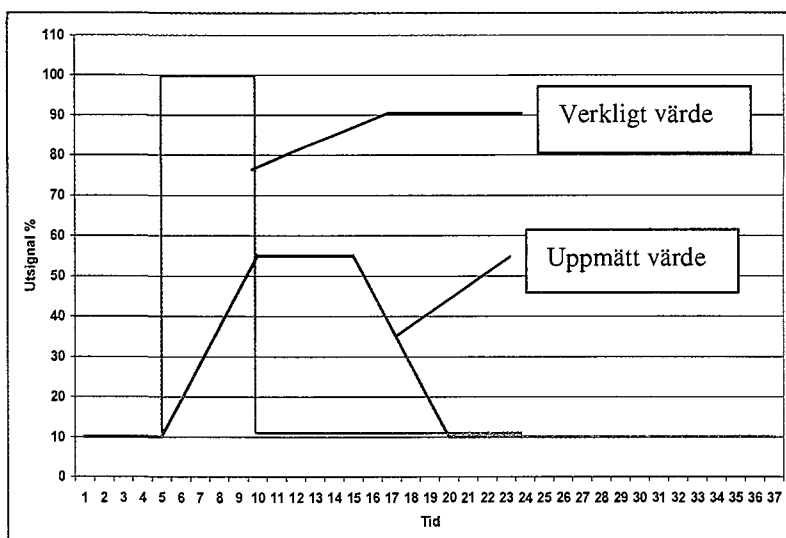


ken visas dels en stegfunktion med förloppet 10 %, 100 %, 10 % dels en rent matematisk medelvärdesbildning.

Som framgår av figuren ger medelvärdesbildningen en rätlinjig linjär ökning och därefter en linjär sänkning, bägge med en viss tidsfördröjning.

Figur A-3 Dämpning av stegfunktion genom matematisk medelvärdesbildning.
Damping of a step-function by mathematical mean value transformation.

I de fall stegfunktionen är tidsmässigt kortare eller medelvärdesbildningen längre

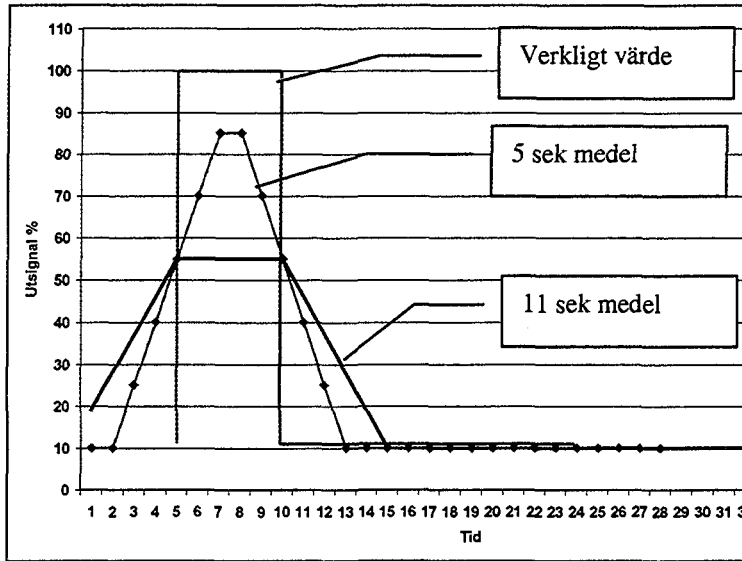


uppkommer ytterligare ett fenomen, nämligen att absolutvärdena kommer att skilja sig åt.

I figur A-3 hinner inte den medelvärdesbildande kurvan nå mer än 55 % av fullt utslag. I detta fall är stegfunktion 5 sekunder lång och den rullande medelvärdesbildningen 11 sekunder.

Figur A-4 Dämpning av stegfunktion genom matematisk medelvärdesbildning (11 sek).
Damping of a step-function by mathematical mean value transformation.

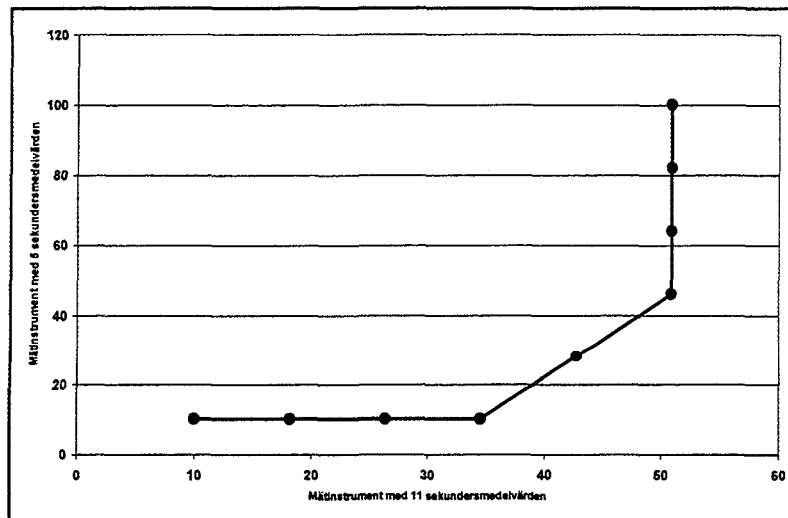
I figur A-5 visas dels den ursprungliga "verkliga stegfunktionen" dels två mätinstrument med olika tid för medelvärdesbildningen.



Den heldragna linjen är som tidigare ett instrument med 11 sekunders medelvärdesbildning och det nya instrumentet i form av den prickade linjen har medelvärdesbildning under 5 sekunder. I detta fall har även en tidsförskjutning gjorts av kurvorna för att få maximum att ligga tidsmässigt i fas.

Figur A-5 Tre dämpningar genom matematisk medelvärdesbildning (0, 5 och 11 sekunder).
Damping of a step-function by mathematical mean value transformation.

Om två instrument med olika medelvärdesbildning används samtidigt för att bestämma samma gas kan således resultatet bli en icke linjär korrelationen, vilket visas i figur A-6. I figur A-6 är tiden under vilket toppvärdena råder något utsträckt jämfört med figur A-5, vilket innebär att det ena instrument når 100 %.



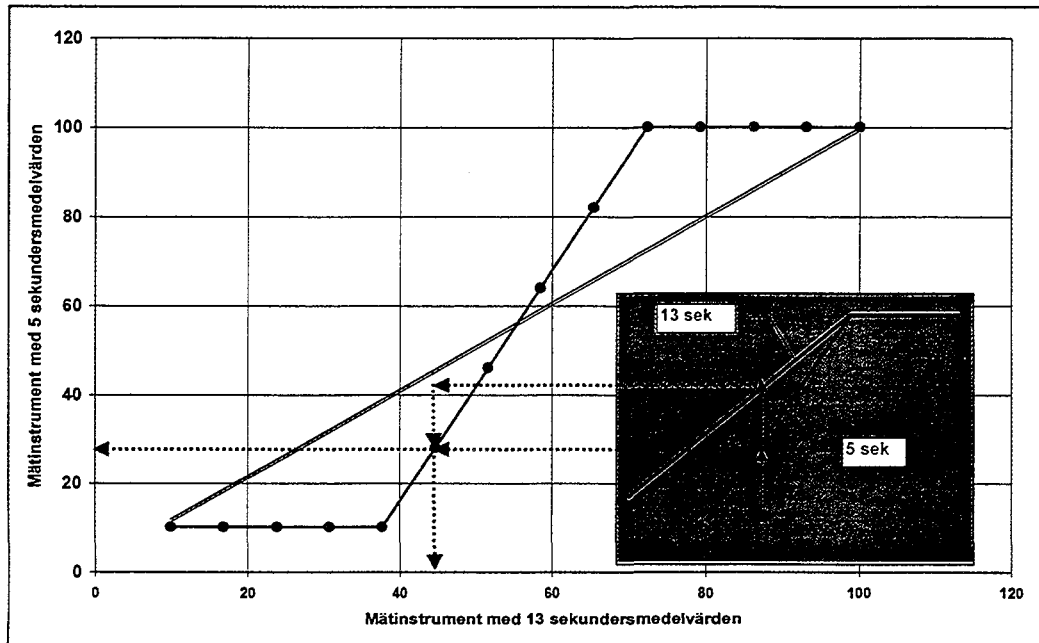
När samma gas mäts med två olika instrument är det uppenbart att det rör sig om mätfel, men om det är olika gaser och olika instrument saknas en naturlig referens för bedömning av huruvida sambandet beror på emissionerna eller instrumenten. Fel slutsatser om korrelationen kan således dras.

Figur A-6 Korrelation mellan två mätningar med 5 resp. 11 sekunders medelvärdesbildning.
Correlation between two measurements with 5 resp. 11 sec means values.

För att ytterligare belysa lättheten att dra felaktiga slutsatser har även ett samband mellan 5-sekundersinstrumentet ovan och ett nytt 13-sekundersinstrument tagits med i figur A-7.

Som framgår av diagrammet är kurvformen helt annorlunda. Det röda strecket är det korrekta sambandet. Den brutna punktmarkerade blå linjen är sambandet som uppstår mellan de två mätinstrumentutslagen.

För att underlätta förståelsen har även den vänstra delen av figur A-5 skisserat i diagrammet i den högra turkosfärgade "hjälpstrutan" i fig A-7 nedan. I denna ses 13 sekunders- respektive 5 sekundersstigningen som två lutande linjer. Bägge är fasförskjutna så att deras toppvärden ligger mitt för varandra. De når sedan bägge ett gemensamt toppvärde och sjunker därefter (ej utritat i A-7, se figur A-5)



Figur A-7 Korrelation mellan två mätningar med 5 resp. 13 sekunders medelvärdesbildning.
Correlation between two measurements with 5 and 13 sec mean values.

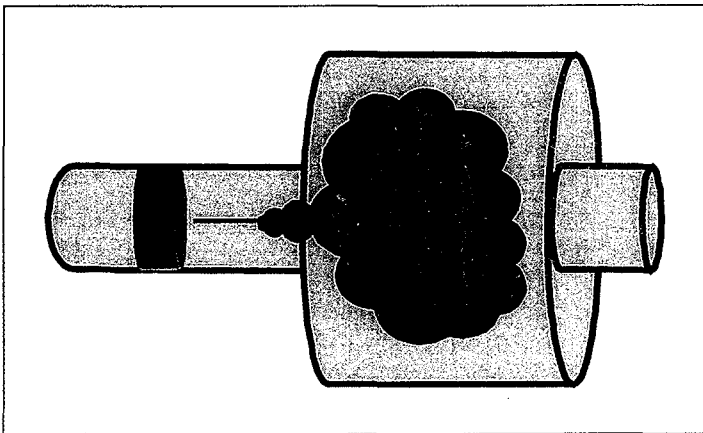
Vid samma (förskjutna) tidpunkt har 13-sekunderskurvan stigit mer än kurvan för 5-sekundersmedelvärdet. Detta innebär att det bildas en punkt i huvuddiagrammet där instrumentens mätvärde möts. På samma sätt bildas linjen av alla andra samhörande mätvärden. Den horisontella nedre delen av sambandet bildas när 13-sekunderskurvan ger utslag och 5-sekundersinstrumentet ännu ej börjat stiga. På samma sätt bildas den övre horisontella delen av sambandet när de verkliga mätvärdena sjunker (ej utritat i hjälprutan).

Att justera två instrument med olika (matematisk) medelvärdesbildning till identiska utslag görs genom att medelvärdesbilda det snabbare instrumentet, så att dess tidsbas blir densamma som det med längre tidsbas.

A.2.3 Olinjär medelvärdesbildning (gasblandning, tröghet)

Den andra typen av medelvärdesbildning är mer besvärlig att hantera. Utslaget är inte linjärt utan går mer eller mindre asymptotiskt mot det verkliga värdet. Den vanligaste orsaken är att volymerna i gaskonditioneringsutrustningen inte ger ett pluggflöde, dvs. att även om gasens sammansättning i rökgaskanalen ändras språngvis, så utjämnas denna i filter, slangar, kondensatavskiljare och mätkuvett.

Detta åskådliggörs i fig. 13, i vilken en väldefinierad emissionstopp har färdats in från röret till kammaren. När den kommer in i den större volymen uppstår omblandning i virvlar och stråk, vilket leder till att gaskoncentrationen i utgående gas, först snabbt ökar för att därefter asymptotiskt när ett toppvärde.



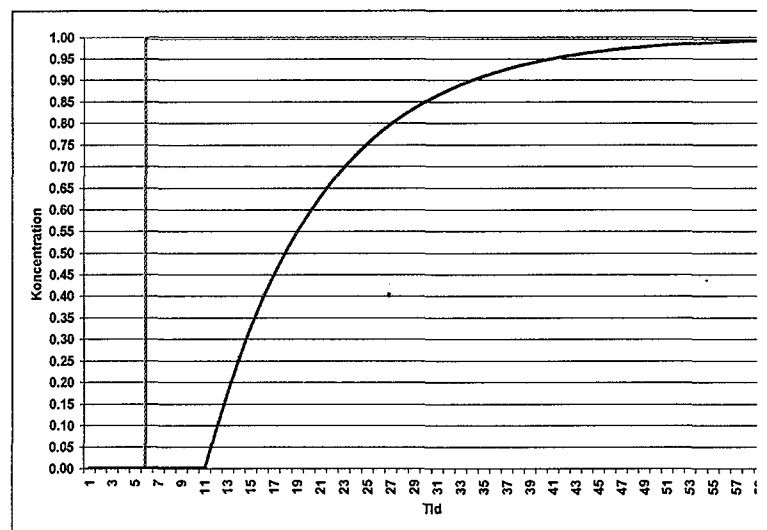
Rent teoretiskt skulle kan man kunna tänka sig att enstaka molekyler gas aldrig kommer ut, utan hamnar i en stabil virvel i något hörn.

Figur A-8 Gasomblandning i t.ex. kondensatavskiljare.
Gas mixing, dilution in a larger volume

Skillnaden mellan en verklig plötslig koncentrations-

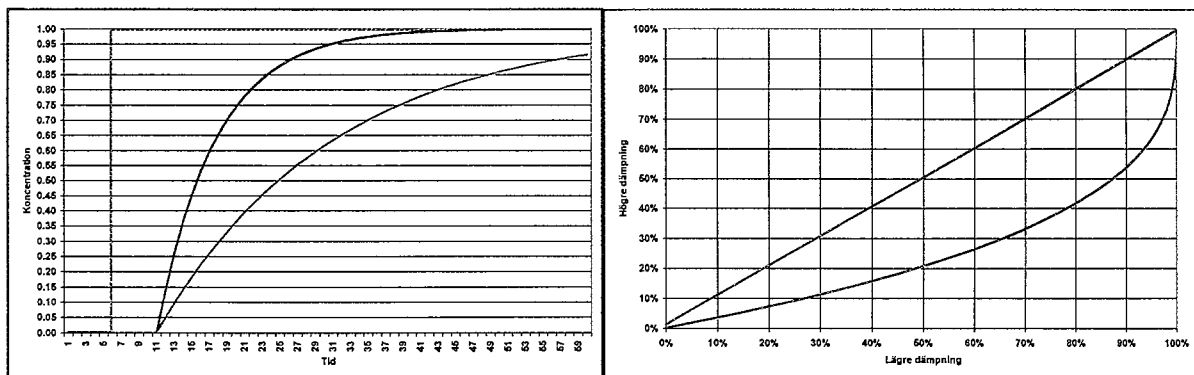
förändring och en mätt koncentrationsändring i t.ex. en stor CO-mätkuvett visas i

figur A-9. En likartad kurva uppträder även om mätinstrumentet är försedd med en PID-krets, där I-funktionen är den integrerande delen. Som framgår av diagrammet stiger först mätvärdet brant och därefter asymptotiskt mot de verkliga värdet. Vid en senare introduktion av luft i samma kuvett, uppstår en likartad kurva, men med en inledande brant lutning för att därefter gå asymptotiskt mot noll.



Figur A-9 Instrumentsvar från t.ex. en mätkuvett för CO.
Measurement response at gas mixing conditions

Om man betraktar två mätinstrument med olika kuvettstorlekar eller gaskonditioneringssystem, vilket ger olika dämpning kan detta ge ett instrumentsvar som i figur A-10. I den vänstra diagrammet kan ses att stighastigheten är olika men att de båda närmar sig maxvärdet asymptotiskt. I det högra diagrammet har de två instrumentens utslag plottats mot varandra. Den röda linjen är i bägge fallen den verkliga gaskoncentrationen innan gaskonditionering och mätutrustning

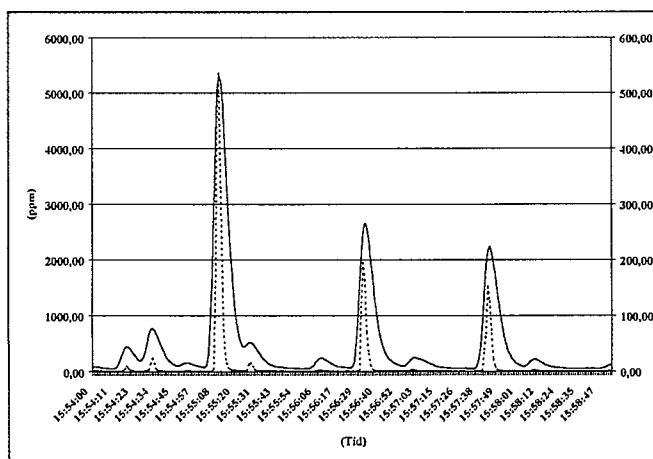


Figur A-10 Instrumentsvar(vänster) och korrelation (höger) från 2 mätkuvetter med olika volym, tex. för CO.
Measurement response at gas mixing conditions

A.3 Slutsatser av distorsion i mätsystem för metodens användbarhet

Den skisserade arbetshypotesen för metoden (se kap 3) är att vid ett provtillfälle, först bestämma ett samband mellan CO och THC och därefter på basis av detta ett samband mellan CO och PAH. Vid normaldrift styrs därefter driften av driftinstrumentet för CO och halterna av PAH beräknas.

Verkliga mätsystem uppvisar en kombination av matematisk medelvärdesbildning



och tröghet beroende på turbulens/ diffusion i mätsystemet samt en integrerande elektronik. Hur ett samband mellan snabba mätinstrument, t.ex. FID-instrument för mätning av THC (totalkolväte) och mer långsamma instrument, tex. IR-instrument för CO ser ut i diagramform, beror till stor del av hur mätvärdesbehandlingen går till.

Figur A-11 THC och CO-mätning, realtid./ THC and CO, real time

Sambanden mellan koncentrationerna av gaser i rökgasen blir givetvis beroende av anläggningens karakteristik, t.ex. bränsle, förbränningsluftutformning, eldstadens, murverk etc., men således även av mätinstrument och databehandling. Det praktiska resultatet av detta är att man bör sträva efter att erhålla data som är likvärdiga som möjligt, dvs. undvika alltför stora och olika dämpningar samt tidsförskjutna data så att mätvärdena ligger i fas, för att därigenom kunna få fram utvärderingsbara korrelationer. Att hitta det riktigt sanna sambandet mellan emissionerna låter sig dock inte göras, eftersom det inte finns något sådant. Kurvformen och amplituden blir beroende på var man mäter i anläggningen. Exempelvis sker således även en utjämning av gaskoncentrationerna under hela sträckan från eldstadsrummet, i konvektionspartier,

filter, rökgasfläktar och i skorstenen. Sambanden är således relativa och korrelerade till anläggning och instrument. De beskriver dock den verklighet som föreligger just för denna anläggning med befintlig utrustning och är därför repeterbara och kan användas för metoden. Detta gäller så länge inget ändras i utformningen av panna och mätsystem.

A.4 Praktiska problem vid mätningar

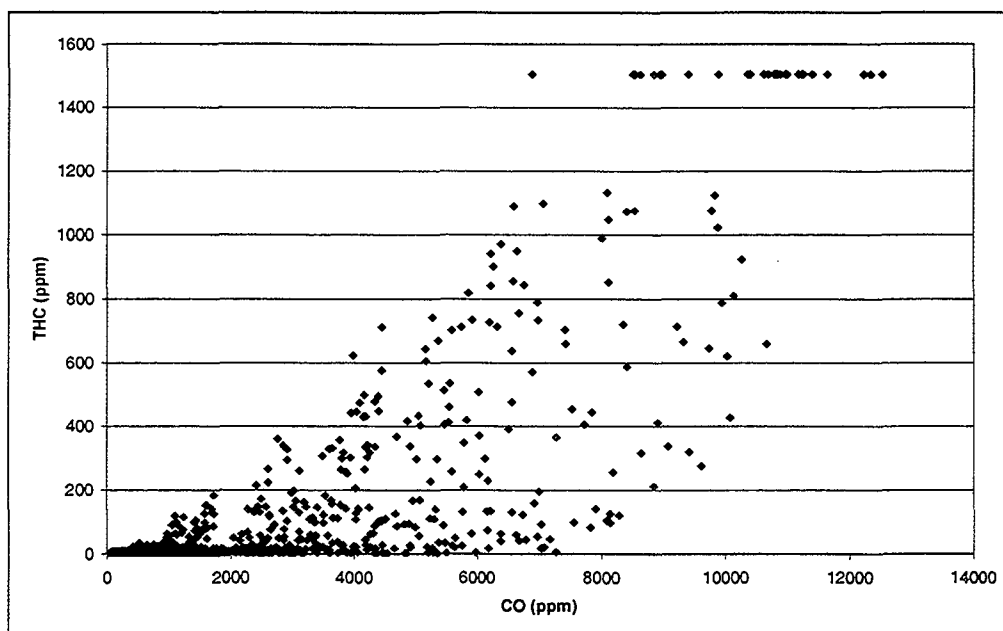
Ovan behandlas generella problem vid mätningar så som tidsförskjutningar och olika typer av distorsion. Det finns dock andra felkällor som kan påverka resultatet. De viktigaste är :

- Läckage i gashanteringssystem
- Flödesförändringar
- Bottnande mätinstrument

Läckage brukar inte vara ett problem vid användande av driftinstrument, däremot ofta vid tillfälliga mätningar. Höga läckage har dock i några fall uppstått genom mikroporer i långa fasta ledningar till driftinstrument. Under förutsättning att läckagen är lika stora hela tiden ger detta dock inte något problem för CO-metoden, om även korrelationen görs mot de läckande instrumentet. Kontroll av täthet, speciellt vid provtillfället rekommenderas dock.

Flödesförändringar påverkar både tidsförskjutningen mellan de olika emissionsmätningarna och kurvformen (amplituden). Orsaken kan t.ex. vara igensättning av filter, som successivt leder till högre tryckfall i systemet. Detta innebär att det kan bli svårt eller omöjligt att bestämma korrelationerna mellan emissionerna, eftersom tidsförskjutningen inte är konstant. Distinkta ”flaggor” i form av kalibrergas i sondspetsarna både före och efter provet rekommenderas. På detta sätt kan tidsförskjutningen före och efter provet jämföras och vid behov korrigeras.

Bottnande mätinstrument kan vara ett problem eftersom de antingen ger ett konstant högt eller lågt värde vid halter högre än mätområde eller också ger helt obestämda värden. ”Rätt mätområde” måste både vid provet och vid normaldrift omfatta de högsta topparna. I annat fall förloras de viktigaste delarna av emissionsmätningarna, de som producerar mest hälso- och miljöskadliga ämnen. Tyvärr minskar oftast känsligheten hos instrumenten vid stora mätomfång.



Figur A-12 Exempel på mätserie där mätinstrument "bottnat". Mätserie Prov28 i Sundsvall
Data with restricted measurement range

I figur A-12 ovan visas mätdata från ett instrument som har bottnat vid ca 1500 ppm. Huruvida dessa mätpunkter i verkligheten representerar 2000 eller 10000 ppm kan inte uttydas.

En ytterligare fråga som kan uppkomma är med vilken frekvens som mätvärdena skall samlas in. För att bestämma sambanden mellan emissionerna är en mycket hög insamlingsfrekvens att föredra, gärna på sekundbasis. Vid längre tid mellan mätvärdena måste en distinktion göras mellan mätvärden som samlas in med låg frekvens och mätvärden som samlas in med hög frekvens, men som i det senare fallet lagras som medelvärden över längre perioder.

I det första fallet kan hela toppar av emissioner förloras, i det senare fallet utjämnas topparna på det sätt som har visats i kapitlen ovan. Det är inte möjligt med CO-metoden att använda en insamlingsfrekvens/ medelvärdesbildning vid proven och en annan vid normaldrift. Korrelationerna kommer ej att stämma i ett sådant fall

Den bästa alternativet är dock givetvis att vid normaldrift samla in CO-halten med hög frekvens och kontinuerligt on-line beräkna PAH-halten och att därefter lagra medelvärden av dessa med en tämligen måttlig frekvens.

Slutsatsen är således att en hög mätfrekvens är eftersträvsvärt, men att den måste ligga på den nivå som mätinstrument och mät datorer klarar av vid normaldrift.

Bilaga B Redovisning av enskilda mätningar avseende THC som funktion av CO.

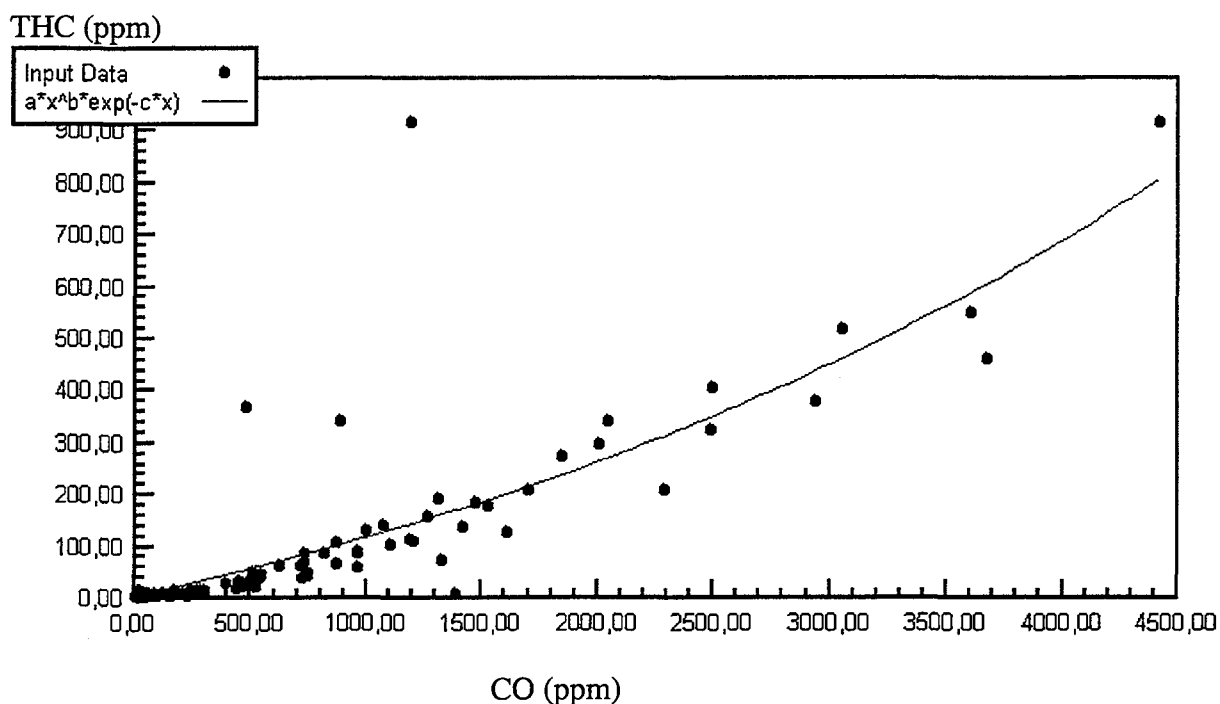


Bild B.1. Provs12 i Sundsvall

THC= $a*x^b*\exp(-c*x)$, $a = 0,1670826356$, $b = 0,9264770328$, $c = 0,0001599547694$

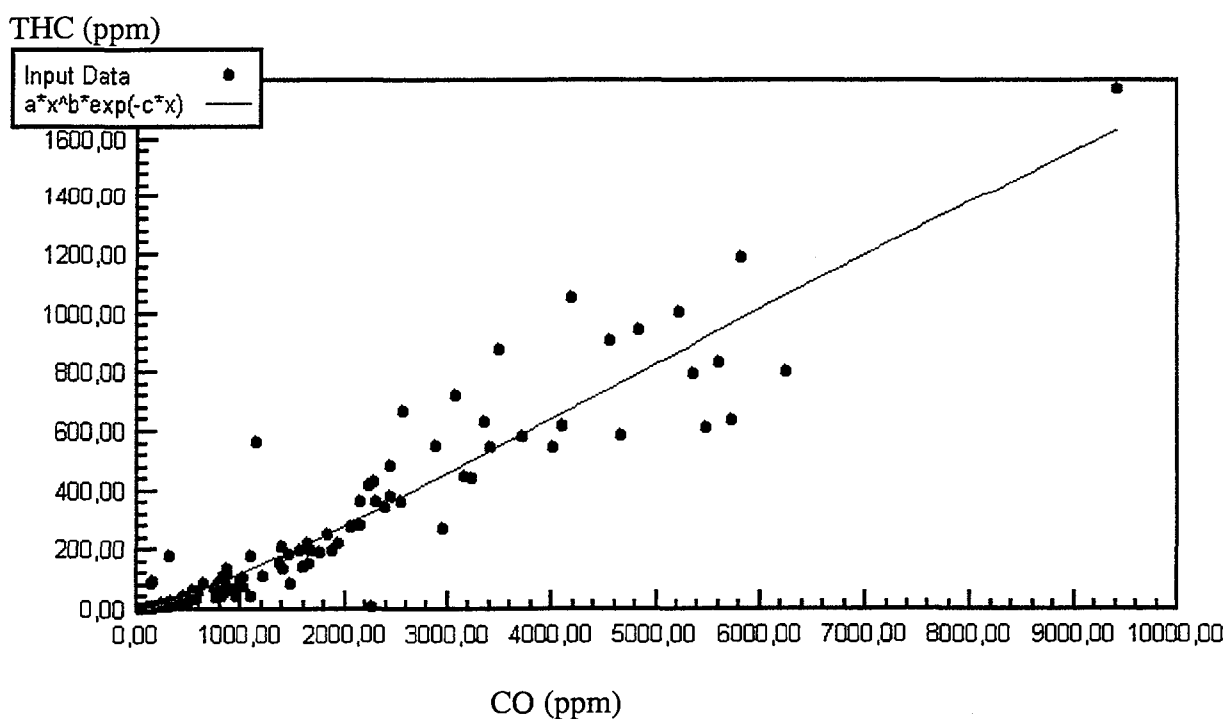


Bild B.2. Provs13 i Sundsvall

THC= $a*x^b*\exp(-c*x)$, $a = 0,0179421634$, $b = 1,278665811$, $c = 2,99405621E-005$

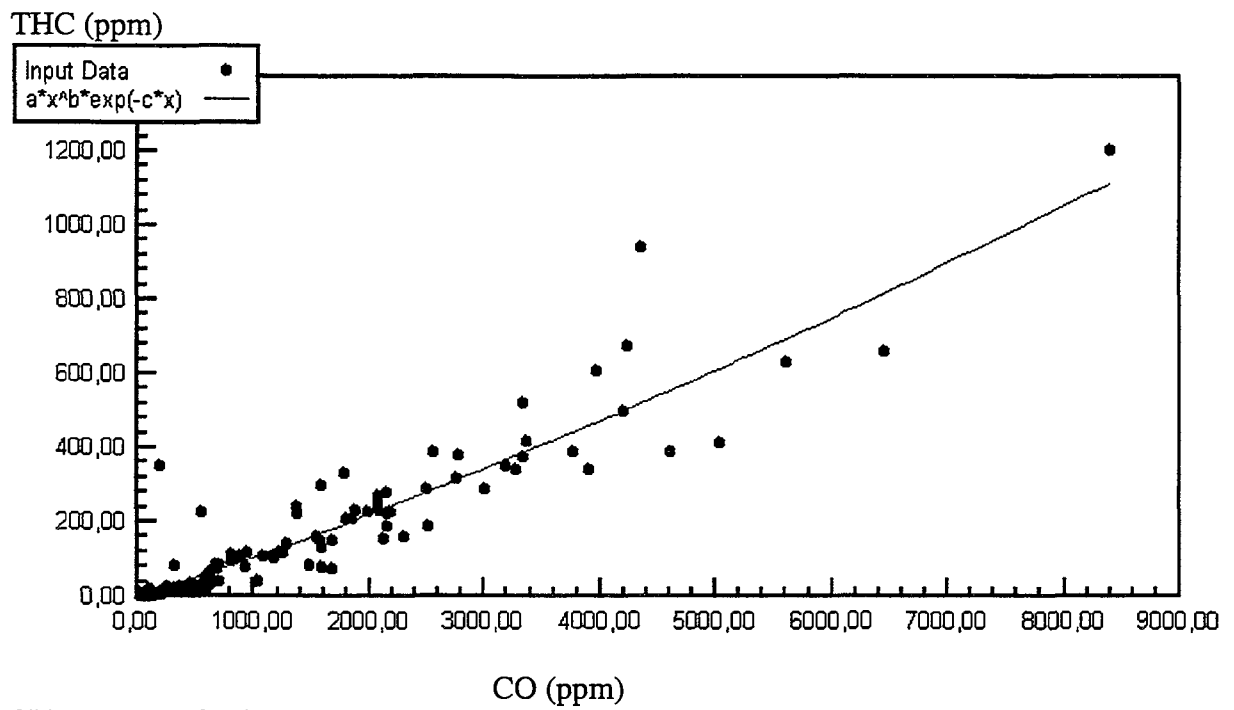


Bild B.3. Prov14 i Sundsvall

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,06038209797$, $b = 1,073304379$, $c = -1,462055926E-005$

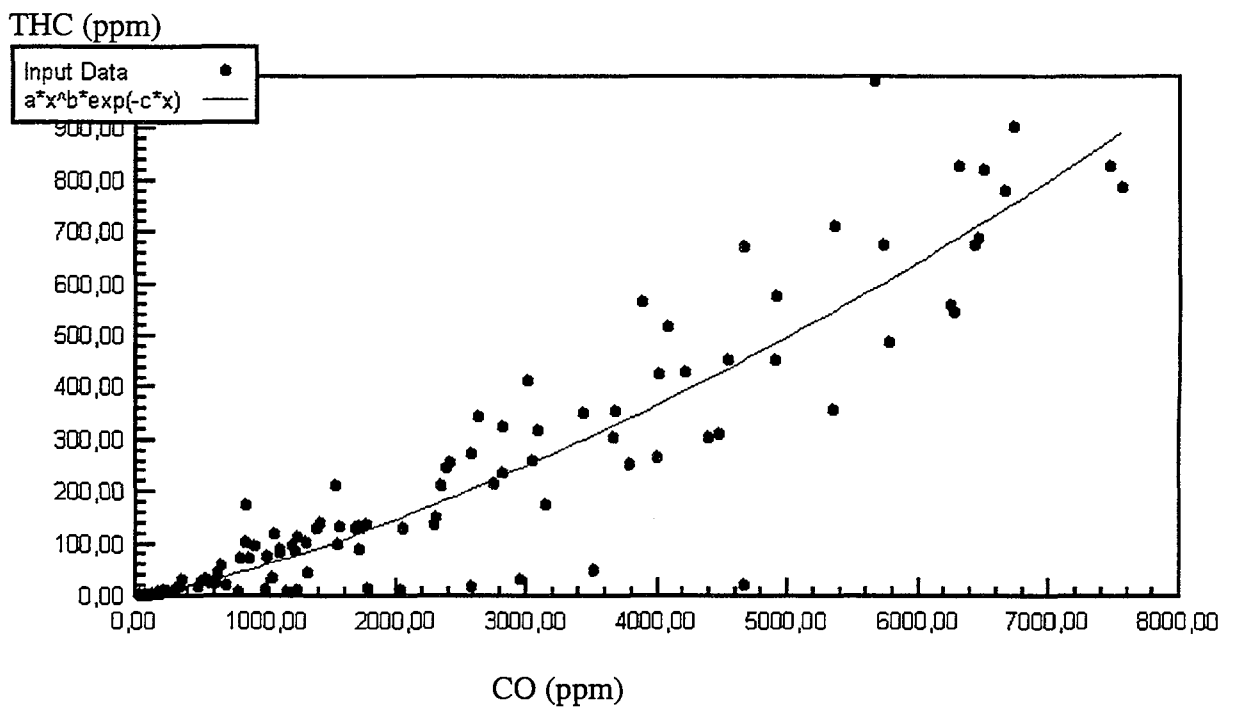


Bild B.4. Prov15 i Sundsvall

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,01142939428$, $b = 1,237235649$, $c = -2,877323375E-005$

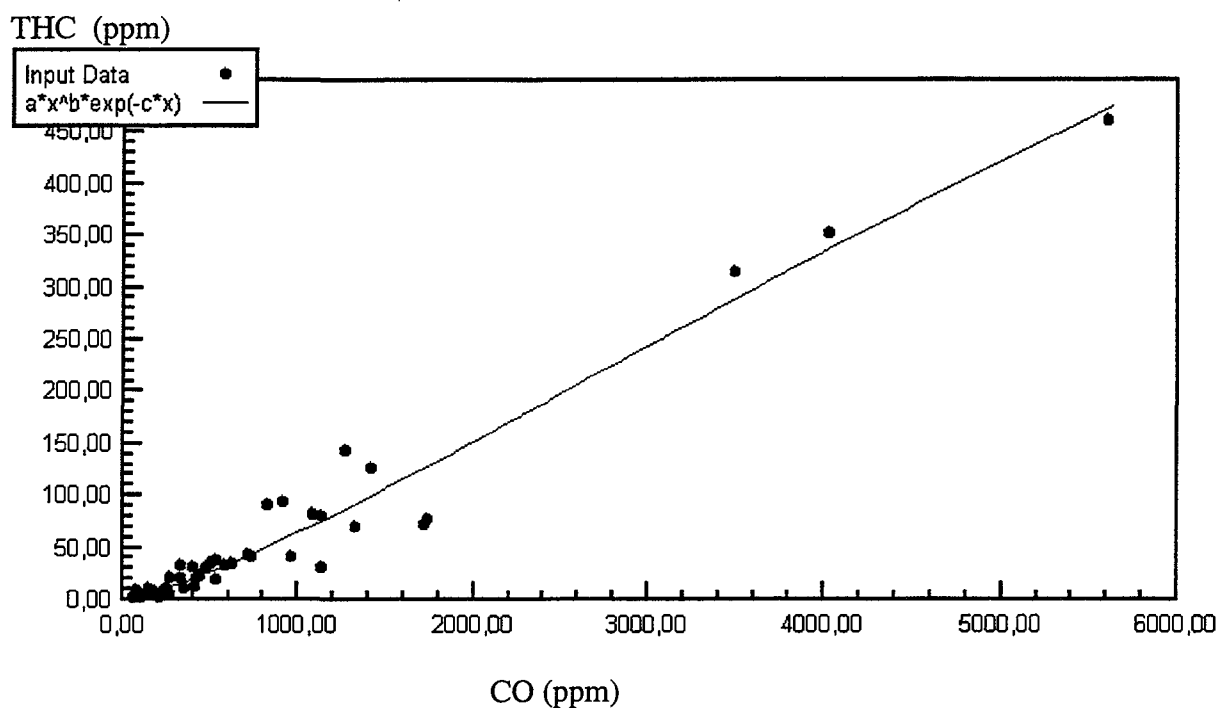


Bild B.5. Prov161 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,006559055357$, $b = 1,339342908$, $c = 6,737770414E-005$

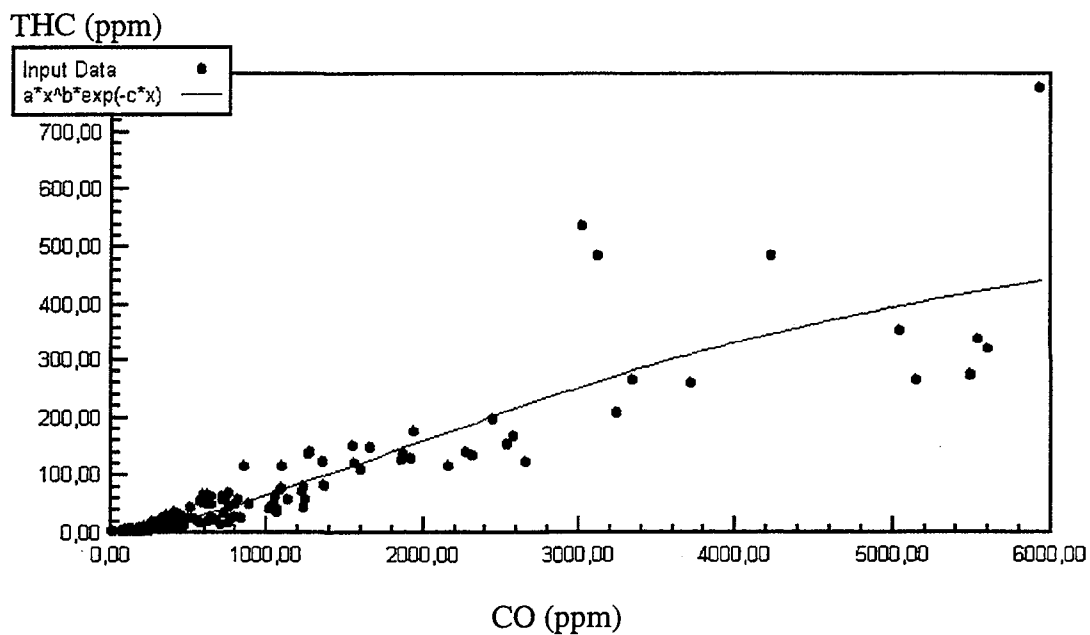


Bild B.6. Prov162 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,001858891854$, $b = 1,537130713$, $c = 0,0001652220488$

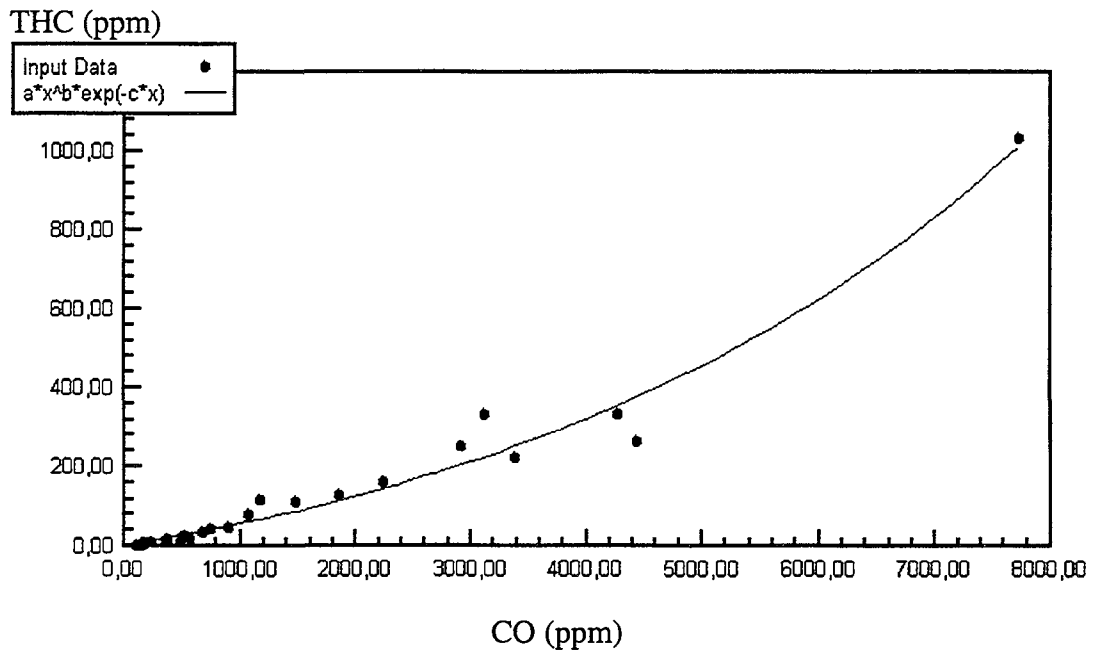


Bild B.7. Prov24 i Sundsvall.

$THC=a*x^b*\exp(-c*x)$, $a = 0,06450177851$, $b = 0,9582749097$, $c = -0,0001400721156$

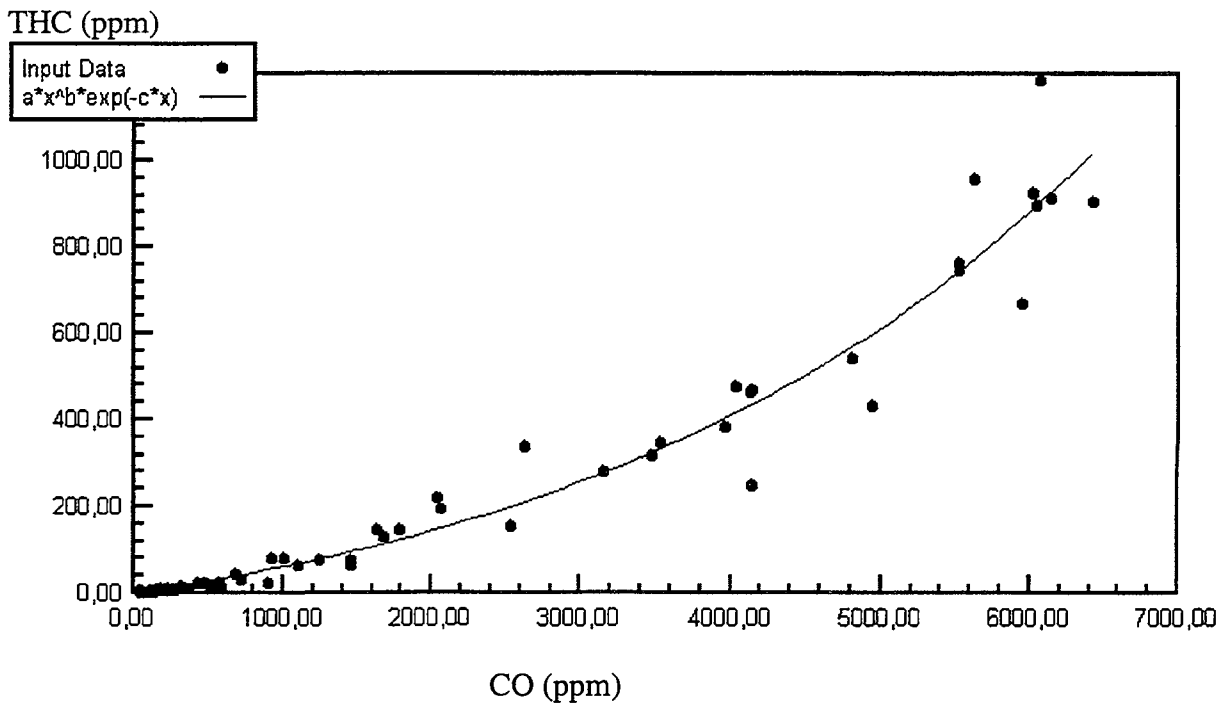


Bild B.8. Prov25 i Sundsvall.

$THC=a*x^b*\exp(-c*x)$, $a = 0,05374793641$, $b = 0,9867502482$, $c = -0,0001866772692$

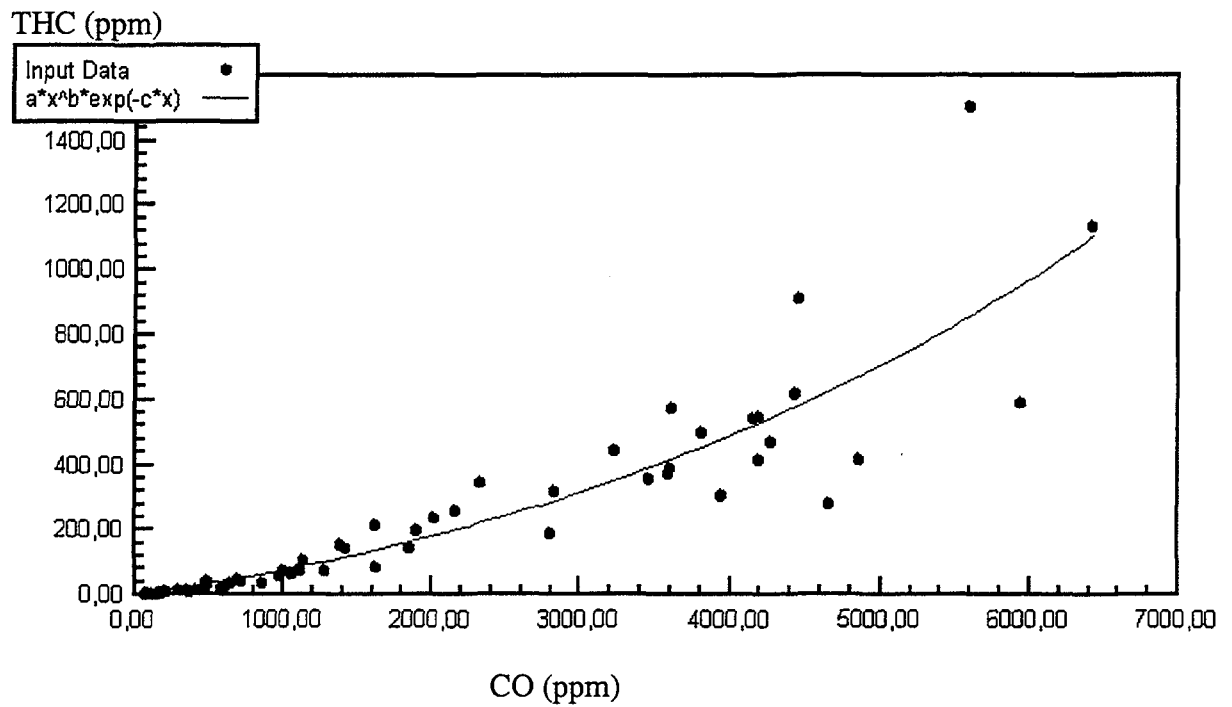


Bild B9 Prov26 i Sundsvall.

$THC = a*x^b*exp(-c*x)$, $a = 0,0377105356$, $b = 1,080382875$, $c = -0,0001261070183$

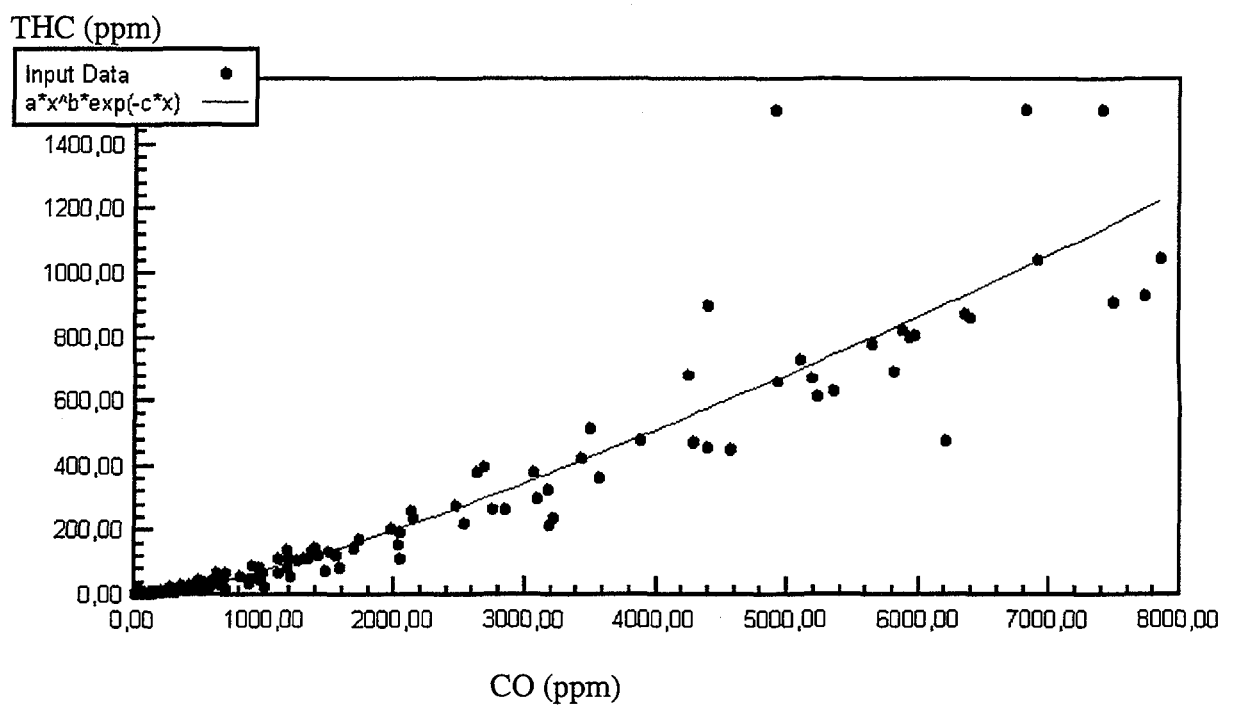


Bild B.10. Prov27 i Sundsvall

$THC = a*x^b*exp(-c*x)$, $a = 0,00483550715$, $b = 1,402086418$, $c = 1,711265608E-005$

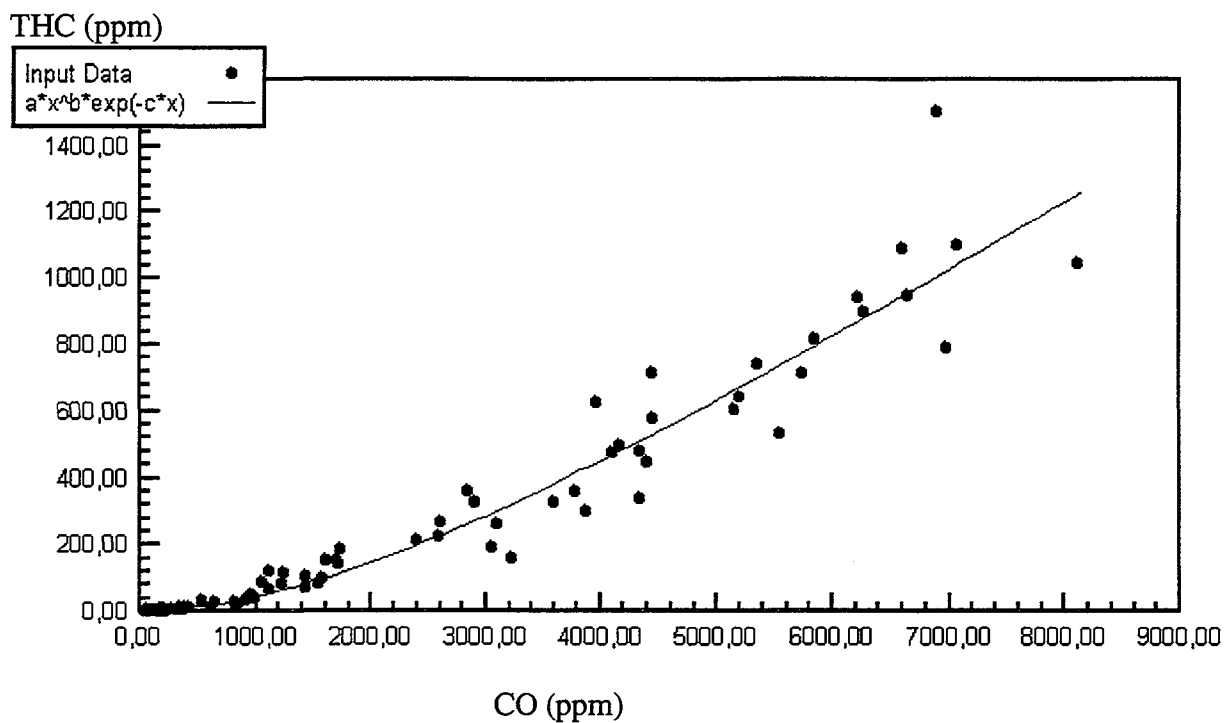


Bild B.10. Prov28 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,0002167038275$, $b = 1,782024735$, $c = 5,798770123E-005$

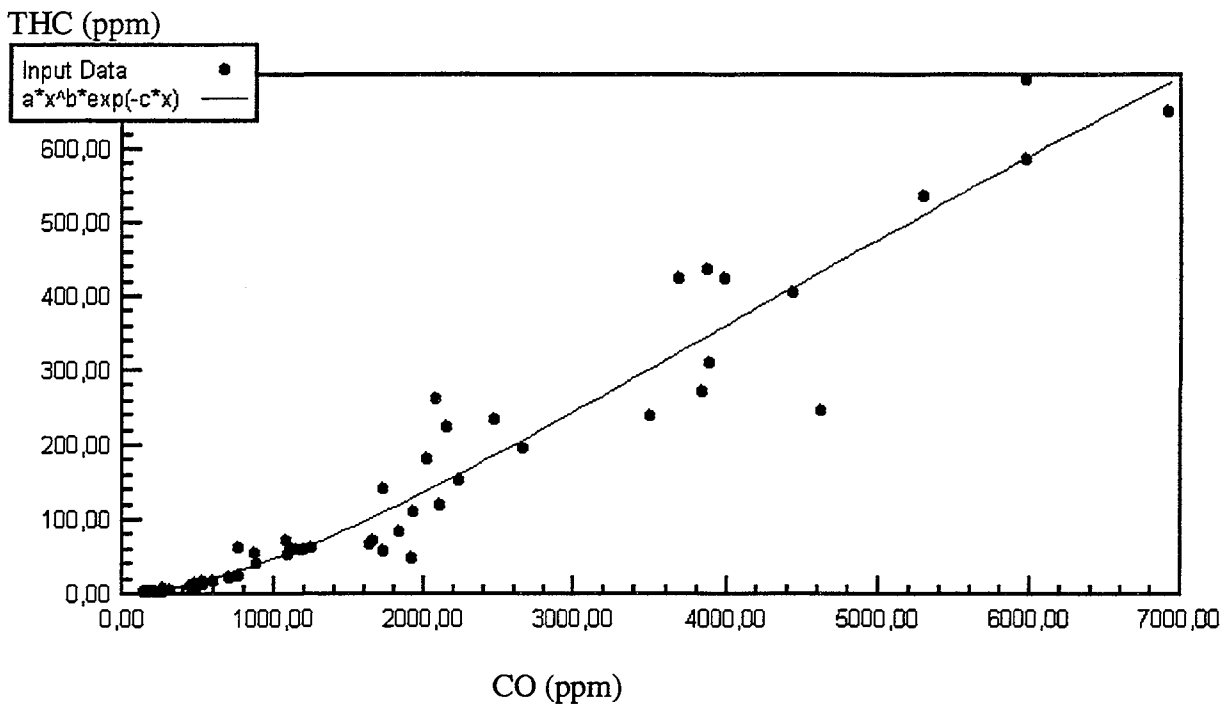


Bild B.11. Prov30 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,0006097262279$, $b = 1,644221917$, $c = 8,671067726E-005$

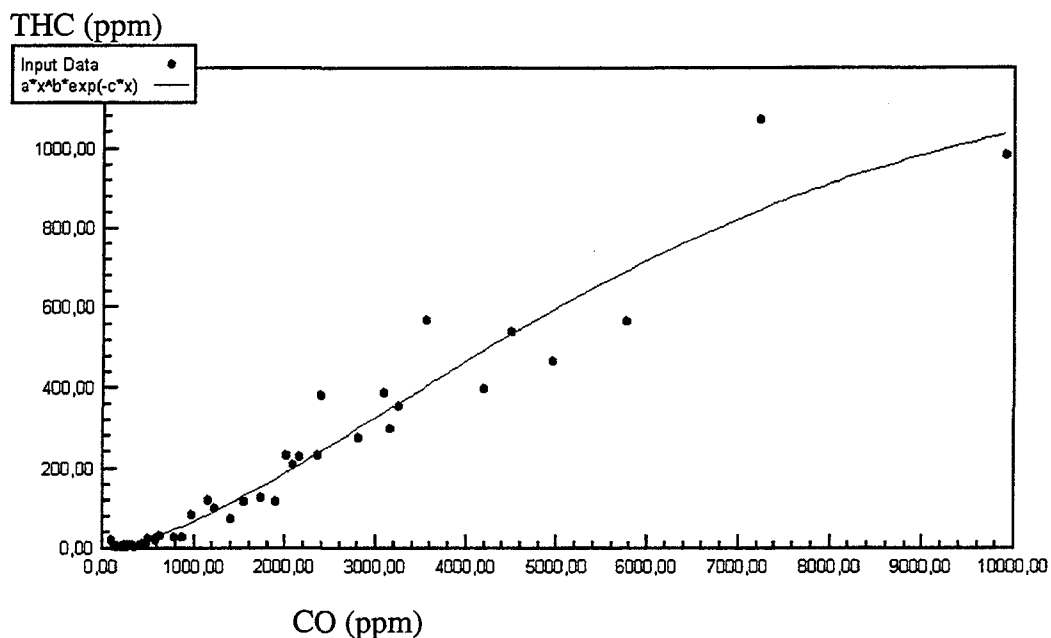


Bild B.12. prov31 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,000843335673$, $b = 1,65219235$, $c = 0,0001193568385$

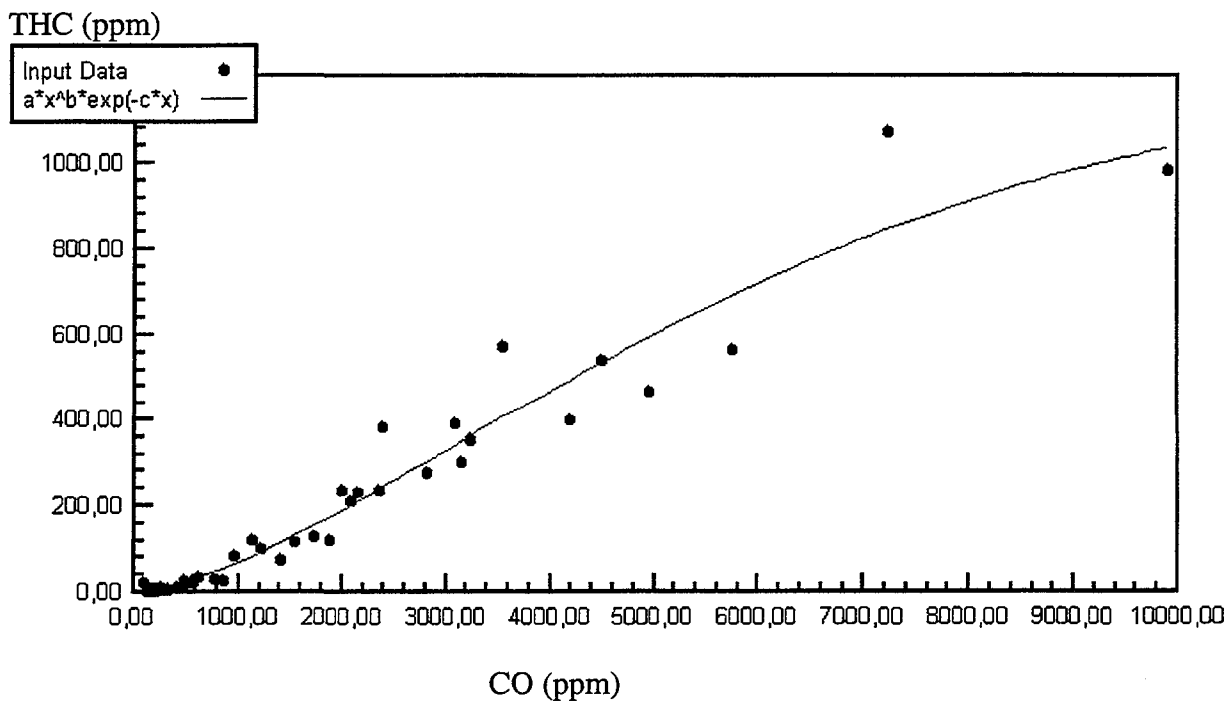


Bild B.12. Prov31 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,000843335673$, $b = 1,65219235$, $c = 0,0001193568385$

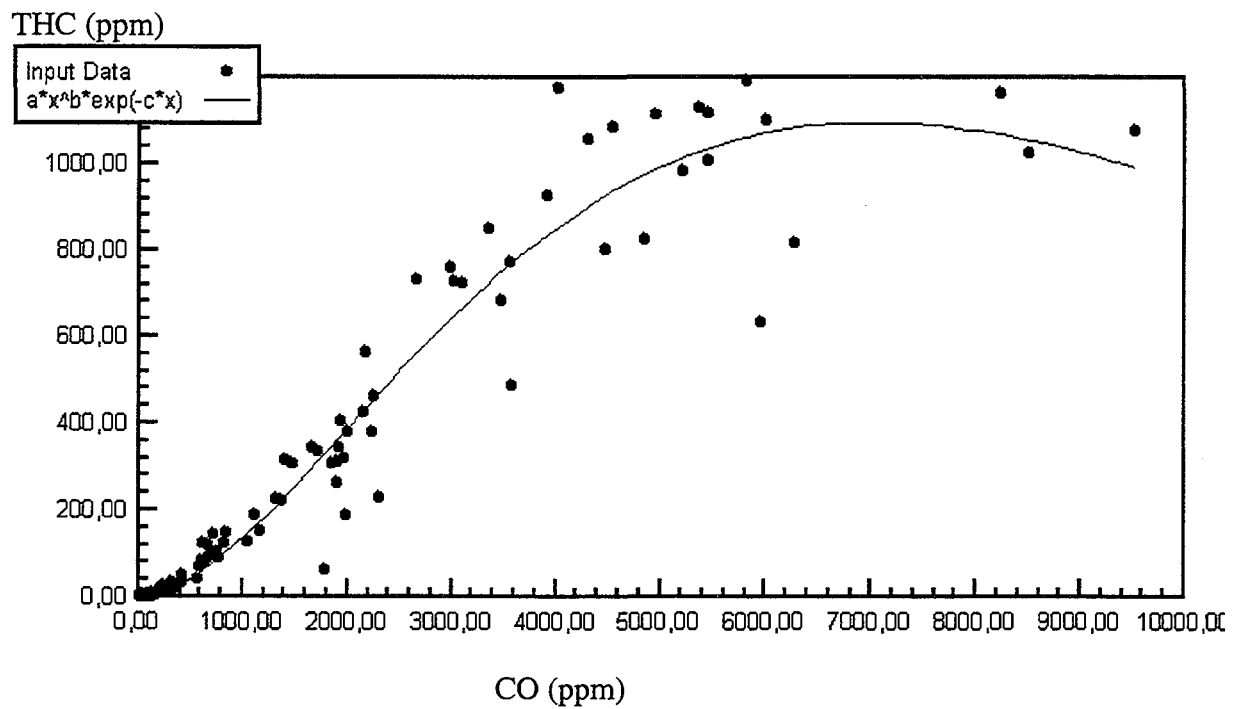


Bild B.13. Provs32 i Sundsvall.

$$\text{THC} = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x), \quad a = 0,0002962668405, \quad b = 1,925362254, \quad c = 0,0002747134351$$

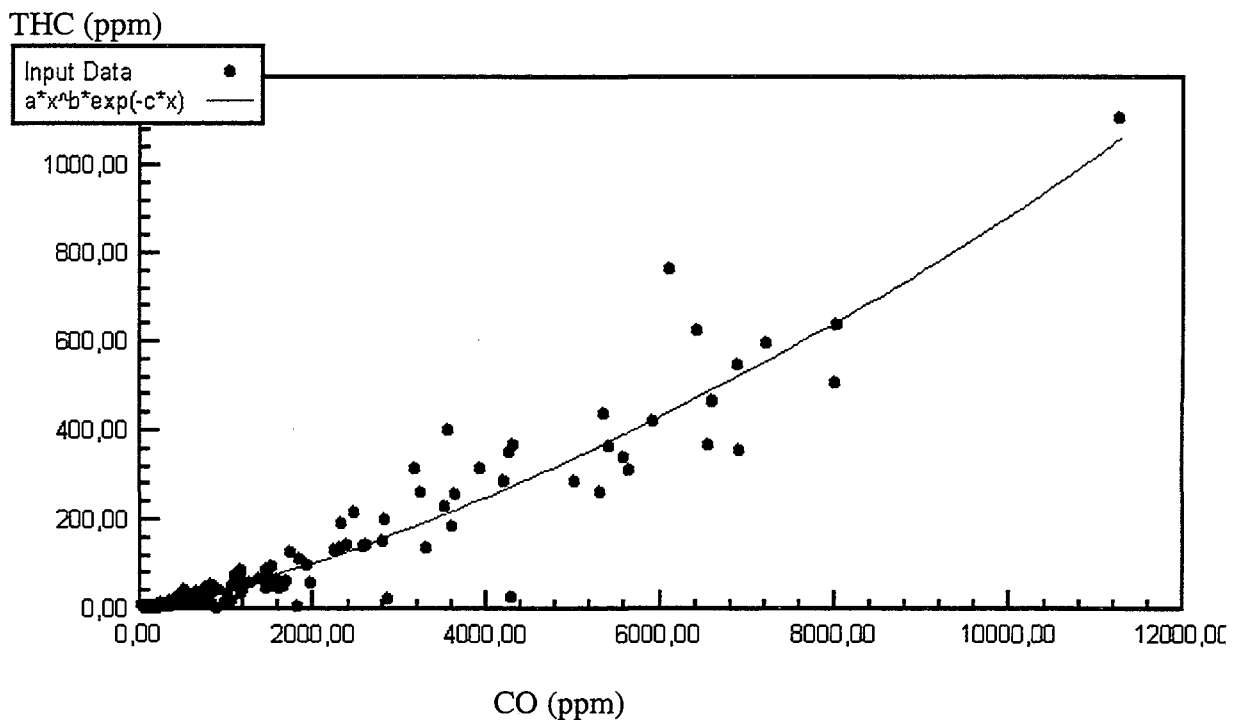


Bild B.14. Provs35 i Sundsvall.

$$\text{THC} = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x), \quad a = 0,01202237865, \quad b = 1,185005195, \quad c = -2,941285235E-005$$

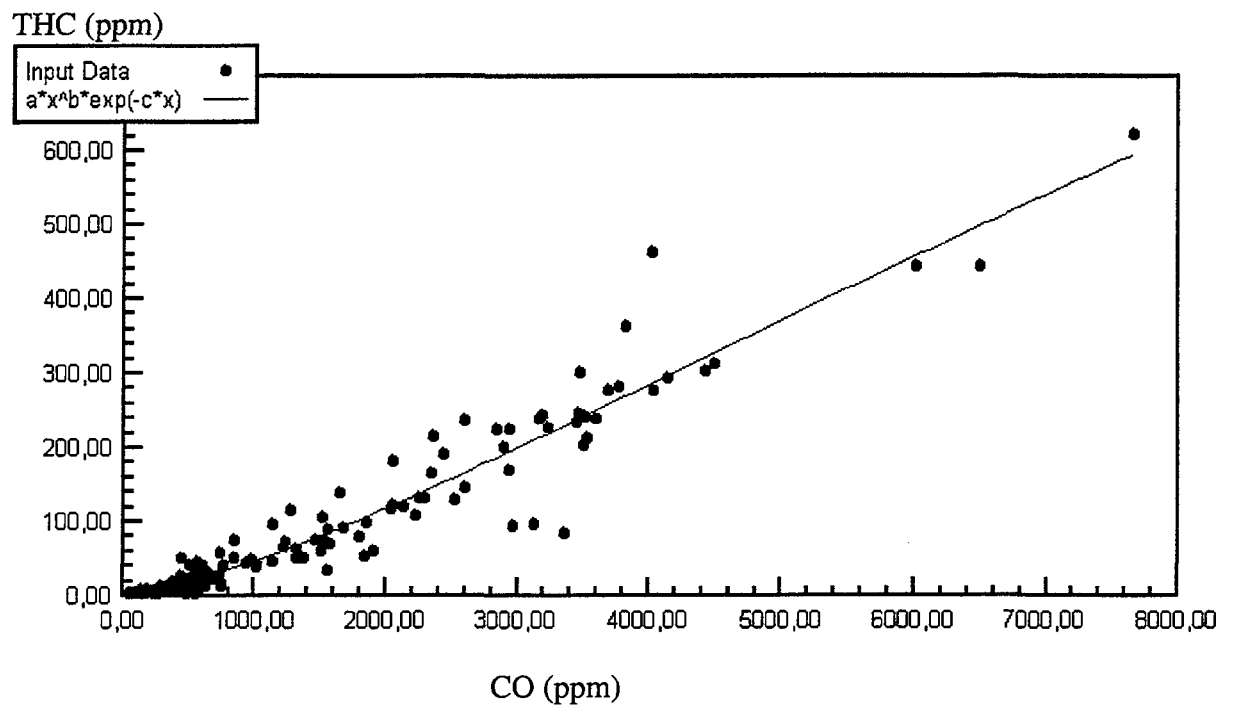


Bild B.14. Prov36 i Sundsvall.

$THC = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$, $a = 0,002842034186$, $b = 1,411817449$, $c = 4,914081399E-005$

REFERENSER

- ¹ Schuster.R
Kväveoxider kontra kolväteemissioner i medelstora fastbränslepannor
TPS AB
SVF 477
Juli 1992
- ² Schuster.R.
Emissioner av kolväten och NOx vid låga luftöverskott i CFB
TPS AB
SVF 541
Juni 1995
- ³ Schuster.R, Berge.N, Strömberg.B,
Environmental optimisation of waste combustion
TPS AB/ÅF Energikonsult AB
RVF-rapport nr 3
1988
- ⁴ Hasberg W, Römer R: Organische Spurenschadstoffe in Brännräumen von Anlagen zur thermischen Entsorgung. Chem.-Ing.-Tech 60 (1988) Nr 6, S 435-443
- ⁵ Schuster R, Lundborg R
Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning
Etapp 2 Redovisning av generella möjligheter och tillämpning på fyra utvalda anläggningar
SVF (Under tryckning)
2000

RAPPORTFÖRTECKNING

Förteckning över tidigare publicerade rapporter, kan beställas hos Värmeforsk.

Telefax: 08-677 25 35

Telefon: 08-677 27 54

<http://www.varmeforsk.se>

Siffrorna inom parentes anger forskningsgrupp/program:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 = Materialteknik | 5 = Gasteknik |
| 2 = Miljö- och förbränningsteknik | 6 = Tillämpad förbränningsteknik |
| 3 = Anläggningsteknik | 7 = Torkning av biobränsle |
| 4 = Hetvattenteknik | 8 = Skogsindustriella programmet |
-
- | | | | |
|-----|--|-----|---|
| 660 | Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning
Etapp 1 "Diagnos och analys av nuläge"
R Schuster, A Edholm, L Franzén
januari 1999 F6-655 (2) | 665 | Erfarenheter från bränslekonverteringar
Karin Nielsen
mars 1999 A6-643 (3) |
| 661 | Problematik vid lagring och hantering av biobränslen - en förstudie
Jonas Dyrke, Mats Lindberg, Peter Morelius
mars 1999 A6-641 (3) | 666 | Sammanställning av erfarenheter från hantering av slam inom skogsindustrin
Mårten Krogerus, Eva Tennander, Åsa Sivard
mars 1999 S6-624 (8) |
| 662 | Teknisk och miljömässig analys av biobränsletorkar
Maria Münter, Ulf Hagman, Henrik Harnevie, Hans Johansen, Ingemar Kristensson, Mats Westermarck, Torgny Viberg
mars 1999 T9-600 (7) | 667 | Energieffektiv biobränsletorkning med öppen absorptionsprocess
Lars Johansson, Lars Westerlund
maj 1999 T9-610 (7) |
| 663 | Optimering av deNOx genom kontinuerlig mätning och justering av koncentrationsgradienter
Lennart Gårdman, Christer Andersson
mars 1999 F6-651/B7-701 (2) | 668 | Förbränning av returflis – kvalitets-säkring och driftproblem
Claes Tullin, Christer Andersson
augusti 1999 F6-675 (2) |
| 664 | On the influence of chlorides and sulphureous compounds on the corrosion of superheater tubes in boilers with special consideration on kraft recovery boilers
Fredrik Bruno
mars 1999 M6-811 (1) | 669 | Jämförelse mellan olika metoder att behandla bioaska som skall återföras
Henrik Bjurström
maj 1999 F6-646 (2) |
| | | 670 | Kryp beteende och livslängdsbedömning för modifierade 12 % kromstål
Anders Bjärbo, Åsa Gustafson, John Ågren, Mats Hättestrand, Hans-Olof André
maj 1999 M6-615 (1) |
| | | 671 | Styrning av biobränsletorkar
Fredrik Axby
maj 1999 Y9-711 (7) |

- 672 Inverkan av ingrepp i ångledningssystem på dess återstående kryplivslängd
Peter Segle, Peter Algotsson, Åke Samuelsson
augusti 1999 M6-651 (1)
- 673 Anpassning av värmeverksutrustning till halminblandning
Sven Stridsberg
oktober 1999 F6-645 (2)
- 674 Inledande studie av metod för IR-mätning i ångpannor
Martin Sandberg, Magnus Jönsson, Leif Lundin
oktober 1999 A9-804 (3)
- 675 Teknik och ekonomi för att förbereda nya biobränsleeldade värmeverk för elproduktion
Pontus Steinwall, Johan Nyström, Olle Nyström, Sven-Åke Svensson
oktober 1999 A6-644 (3)
- 676 NO_x-reduktion med stegvis lufttillförsel och tillsats av ammoniak vid stökiometri nära 1.0, vid förbränning av träpulver
Lars Rudling
februari 2000 F6-662 (2)
- 677 Optimering av askutbränning vid rostereldade anläggningar med hjälp av IR-sensorer. Demonstration av teknikens tillämpbarhet
Lars Rudling
november 1999 F6-654 (2)
- 678 Överhettarmaterial för energieffektivare, miljövänligare och bränsleflexibla sodahus- och barkpannor
Thomas Eriksson, Ivan Falk
november 1999 S6-615 (8)
- 679 Processtudie av biobränsleeldade kraftvärmeverk integrerade med rökgastork
Kent Johansson, Pontus Steinwall
januari 2000 Z9-817 (7)
- 680 Flygaskans sammansättning och nedsmutsande tendens i sodapannan
Mikael Forssén, Rainer Backman, Jonas Wallén, Mikko Hupa
februari 2000 S6-612/S9-804 (8)
- 681 Drifterfarenheter från ångtorkar och direkta rökgastorkar
Christian Berge, Charlotte Dejfors
januari 2000 Z9-814/Z9-815 (7)
- 682 Uppföljning av tillgänglighet inom värme- och kraftvärmeverk – en branschgemensam plattform av erfarenheter
Mats Hedberg, George Sfiris, Sven-Olof Andersson, Lasse Pettersson
januari 2000 A6-633 (3)
- 683 Rening och kemisk karakterisering av kondensat och torkgaser från torkning av biobränsle
Mats Ek, Curt-Åke Boström, Pierre Ljungqvist, Nils-Olof Nilvebrant
februari 2000 Y9-703 (7)
- 684 Effect of fuel quality on the bed agglomeration tendency in a biomass fired fluidised bed boiler
Bengt-Johan Skrifvars, Maria Zevenhoven, Rainer Backman, Marcus Öhman, Anders Nordin
mars 2000 B8-803 (6)
- 685 TPS Branschforskningsprogram för energiverk 1997/98
N Berge, P Kallner, J Larfeldt, B Ljungdahl, A Malmgren, F Zintl
mars 2000 B7-702 (6)
- 686 Konvertering av befintliga oljepannor till pulvereldning för spetslast
Alf Malmgren, L Tao, M Wennström
mars 2000 F6-676 (2)
- 687 Reningsteknik för organiska ämnen i utsläpp till luft vid biobränsletorkning
Karin Nielsen, Thomas Ehrstedt
juni 2000 Z9-823 (7)
- 688 Minskning av NO_x-emissioner från biobränsleeldade anläggningar genom katalytisk reurning
Fredrik A Silversand
mars 2000 F6-660 (2)

- 689 Mätning av fukt i biobränslen med dubbelenergiröntgen
Anders Nordell, Karl Johan Vikterlöf
april 2000 A6-614 (3)
- 690 Metod för kartläggning av bränslepartiklars rörelse och temperaturhistorik i rosterpannor/avfallsugnar – etapp 1
Lennart Gustavsson, Elisabeth Blom, Niels Hald Pedersen, Anders Moritz, Olle Mårdsjö, Jan Oskarsson, Mats Petersson
april 2000 F9-808 (2)
- 691 Driftrelaterad direktmätning av lågtemperaturkorrosion i en bränsleeldad kraftvärmeanläggning
Thomas Eriksson
maj 2000 M6-817 (1)
- 692 Kvalitetssäkring av pellets – inledande studie
Sven-Erik Wiklund, Lars-Åke Cronholm
maj 2000 A9-805 (3)
- 693 Förstudie beträffande livslängd hos kryppåkända svetsreparationer i ångsystem
Jan Storesund, Kjeld Borggreen
maj 2000 M9-804 (1)
- 694 Värmeforsks Mäthandbok 2000
Lennart Gustavsson, Gunnar Nyquist
maj 2000 F6-667 (2)
- 695 Valspelletering; Utvärdering och uppföljning av pilotprojekt omfattande ny teknik för framställning av pellets för återföring av bioaska till skogsmark
Kjell Windelhed
maj 2000 A6-654 (3)
- 696 System för bränsletorkning – vad är bäst?
Björn Zethraeus CD-skiva
maj 2000 T9-609 (7)
- 697 Kartläggning av NO_x-utsläpp från sodapanor i Sverige
Anders Kjörk, Solvie Herstad Svärd
maj 2000 S9-807 (8)
- 698 Teknisk ekonomisk utvärdering av svartlutförgasningsprocesser
Björn Warnqvist, Lennart Delin, Hans Theliander, Ingrid Nohlgren
juni 2000 S6-614 (8)
- 699 Systemstudie avseende kombinerad NO_x-reducering med SNCR/SCR
Therese Niemann, Claes Henningsson, Christer Andersson
juni 2000 F9-812 (2)
- 700 Överhettarkorrosion i bioeldade anläggningar – status
Pamela Henderson, Anders Kjörk, Per Ljung, Olle Nyström, Erik Skog
juni 2000 M9-811 (1)
- 701 Upparbetning av returbränslen – förutsättningar, kvalitet, teknik och kostnader
Rolf Njurell, Marianne Gyllenhammar
juli 2000 A9-812 (3)
- 702 Motorer för deponigas – Tillgänglighet och drifterfarenheter
Charlotte Dejfors, Göran Grimberger
juni 2000 A6-651 (3)
- 703 Produktion av pyrolysvätska – statusrapport
Rolf Ingman
juni 2000 F9-805 (2)
- 704 Nyttjande av indentorteknik för bestämning av krypegenskaper lokalt – litteraturstudie
Peder Andersson
juli 2000 M9-809 (1)
- 705 SCR vid biobränsleeldning – etapp 2
Christer Andersson, Henrik Bodin, Raziye Khodayari, Ingemar Odenbrand, Åsa Sahlqvist
juli 2000 F6-666 (2)
- 706 Rekommendationer för replikprovning av högtemperaturkomponenter i kraftanläggningar
Jan Storesund
augusti 2000 M9-803 (1)

- 707 Sönderdelning och hantering av mjuka plaster för energiutvinning
Sven-Erik Wiklund
oktober 2000 A6-645 (3)
- 708 Överhettarkorrosion i bioeldad panna – teorier och prov i Västermalmsverket, Falun
Eva-Marie Rönnquist
oktober 2000 M6-644 (1)
- 709 Brandsäkerhet vid torkning av biobränsle
Anvisningar och råd för utförande och drift
Anders Knudsen, Hans Persson
oktober 2000 Z9-826 (7)
- 710 Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning – etapp 2
Robert Schuster, Rickard Lundborg
oktober 2000 B8-802/S9-803
- 711 TPS Branschforskningsprogram för energiverk 1998/99
N Berge, K Engvall, M Landtblom, J Larfeldt, B Ljungdahl, A Malmgren, F Zintl
november 2000 B8-801 (6)
- 712 Sintring i FB och CFB – Utveckling av prediktiv metod samt test av additiv och sameldning
F Zintl, B Ljungdahl
november 2000 B8-801 (6)
- 713 LCA-analys; En jämförande studie baserad på ett förädlad och ett oförädlad biobränsle
Anders Edholm
november 2000 Z9-819 (7)
- 714 Visualisation of the velocity field in a scaled water model for validation of numerical calculations for a powder fuelled boiler
Laurent Dumortier
januari 2001 B8-804 (6)
- 715 Småskalig biobränslebaserad kraftvärme – förutsättningar för standardiserade lösningar med avseende på teknik och bränslen i ett systemperspektiv
Olle Nyström, Kent Johansson, Pontus Steinwall
januari 2001 A9-809 (3)
- 716 Alkalimotståndskraftiga keramer
Stig-Björn Westberg
januari 2001 M6-813 (1)
- 717 Oxidationskatalysatorer för rening av oförbrända rökgaser – etapp 1
Magnus Berg, Henrik Harnevie
januari 2001 F9-834 (2)
- 718 Regelverk för eldning av returträflis
Henrik Harnevie, Marie Louise Olvstam
januari 2001 F9-819 (2)
- 719 Studie av rökgaskondensering för biobränsleeldade kraftvärmeanläggningar
Fredrik Axby, Jan-Olof Gustafsson, Johan Nyström, Kent Johansson
januari 2001 A9-815 (3)
- 720 Syntesrapport för Forskningsprogrammet Torkning av biobränsle
Viktoria Martin, Lennart Säterber
januari 2001 Z9-835 (7)
- 721 Metoder för rosterövervakning, dagslägesbestämning
Elisabet Blom
januari 2001 F9-830 (2)
- 722 Metodutveckling för indirekt bestämning av PAH-halt utgående från momentan CO-halt
Rolf Ingman, Robert Schuster
februari 2001 F6-679 (2)
- 723 NOx-emissioner vid förbränning av biomassa i svävbäddspannor – En modelleringsstudie
Sture Boström, Anders Brink, Pia Kilpinen, Mikko Hupa
februari 2001 B9-903 (6)

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig Industri

Värmeforsk samarbetar med Statens Energimyndighet.

VÄRMEFORSK Service AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80 • Fax 08-677 25 35

<http://www.varmeforsk.se>