



STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Utvärdering av EMP-utspädnings-systemet för mätning av utsläpp till luft

Göran Hellén

Utvärdering av EPM-utspädningssystemet för mätning av utsläpp till luft

Göran Hellén, EKONO

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING
BOX 6405 · 113 82 STOCKHOLM · TEL. 08/ 34 09 80

Januari 1987
ISSN 0282-3772

Distribution (4)

(2) Värmeforsk

(2) E.ark/GEH

EV-65391-01

Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning

Projekt B4-607

Utvärdering av EPM-utspädningssystemet
för mätning av utsläpp till luft

Förord

Vid kontinuerlig utsläppsmätning av gasformiga luftföroreningar har svårigheter förekommit både i form av mätfel och driftstörningar hos mätutrustningen. Dessa problem har oftast haft sitt ursprung i provtagningssystemet. Problem, som härrör sig från själva analysatorn har varit färre.

Konventionellt används provtagningssystem, som bygger på avkylning och avvattning av provgasen i en gaskylare. Under ca 3 år har på marknaden funnits ett provtagningssystem av en helt ny typ, i vilket en utspädning av provgasen sker, i syfte att förhindra kondensation. Utspädningssystemet tillverkas av ett holländskt företag under namnet EPM (Environment & Process Monitoring). Det nya provtagningssystemet har många potentiella fördelar framom det konventionella, både vad gäller mätnoggrannhet och driftsäkerhet.

I föreliggande rapport redovisas en utvärdering av EPM-provtagningssystemet. Utvärderingen har utförts både i laboratorie- och i fältförhållanden.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
0. Summary	3
1. Inledning	4
2. Sammandrag	7
3. Slutbedömning	9
4. Beskrivning av extraktivt provtagningssystem	10
4.1 Konventionellt provtagningssystem	10
4.2 EPM-provtagningssystem	12
4.2.1 Principiell uppbyggnad	12
4.2.2 Teoretisk betraktelse	15
5. Mätfelkällor	17
5.1 Konventionellt extraktivt mätsystem	17
5.2 Mätsystem med EPM-provtagning	17
5.2.1 Tryckförändring i gaskanalen	18
5.2.2 Rökgasens densitet	19
5.2.3 Förändring av rökgasens temperatur	20
5.2.4 Förändring av spädgastrycket	21
5.2.5 Otillräckligt kalibreringsgasflöde till provtagningssondöppningen	23
5.2.6 Bakgrundskoncentration	23
5.2.7 Omvandlingsreaktioner och diffusionsförluster	24
6. Fältutprovning	24
7. Rapporterade erfarenheter från andra användare av EPM-provtagningssystemet	26
Referenser	

0. Summary

Monitoring and surveillance of SO_2 and NO_x emissions are common today at a large number of combustion plants. The instruments used for these purposes usually require a sample free from particles and water aerosol, and a temperature below $30\text{--}40^\circ\text{C}$. For sample conditioning purposes a sampling system based on the water condenser method is commonly used. Due to the reactivity and solubility of the gases of interest there are risks for losses of compounds when using these sampling systems.

A sampling system based on the dilution probe technology (EPM dilution stack sampler) has been studied from a theoretical and field experience point of view.

The dilution probe technology may be generically defined as a sampling technique whereby a small continuous sample is filtered and diluted at stack temperature prior to conveyance to a set of analyzers. This is done with an instack venturi, in which preheated instrument air serves the triple function of extracting the sample, diluting it, and conveying it under pressure to the remote analyzers.

The dilution probe sampling technology has provided a relatively easily installed, accurate alternative with lower maintenance costs to conventional sampling systems.

Variation of the flue-gas pressure and temperature and differences in the reference- and flue-gas densities will decrease the accuracy of the EPM dilution stack sampler.

Laboratory evaluation shows that a increase (decrease) in the absolute flue-gas pressure leads to a similar percentual increase (decrease) in the reading of the analyzer. A change in the flue-gas temperature by 10°C will lead to a analyzer reading error of 1 %.

The reference-gas commonly being used has a density of 1.25 kg/m^3 norm.³ The density of the flue-gas is usually $1.15 - 1.35\text{ kg/m}^3$ norm. The error in the analyzer reading due to differences in the reference- and flue-gas densities is shown in Figure 7.

Field experiences associated with the use of the EPM diluting stack sampler show no technical problems in applications to ducts with low dust loading (after the precipitator).

Orifice clogging has been reported

- Due to particulates in applications to ducts with high dust loading (before the precipitator)

- Due to water droplets in applications after wet scrubbers. This problem has been solved by installation of a droplet shield
- Due to crystallization in chemical industry applications.

Keywords: Sulphur dioxide, nitrogen oxides, emissions, sampling system, monitoring, stack gases.

1. Inledning

Vid förbränningsanläggningar utförs mätningar i rökgaskanalen dels för processkontroll och dels för tillsyn enligt miljöskyddslagen.

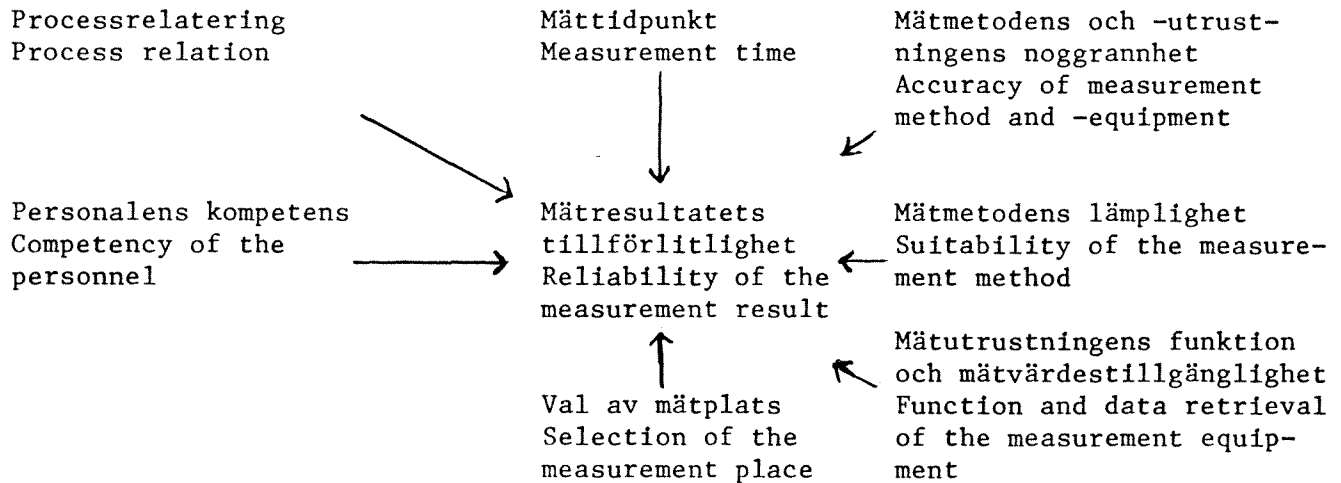
Målsättningen vid processkontrollen är att hitta den optimala driftpunkten, dvs "den punkt där goda driftsekonomiska och miljömässiga egenskaper sammanfaller". Vid processkontrollen mäts bl.a. någon eller några av följande komponenter O_2 -, CO -, CO_2 - och sothalten. Dessa mätningar utförs både med manuella och kontinuerligt registrerande metoder.

Mätningar som utförs för kontroll av emissionsvillkor enligt miljöskyddslagen innefattar beroende på typ av anläggning sådana komponenter som SO_2 , NO_x , stoft och H_2S . Dessa mätningar utförs både i form av besiktningsmätningar och som en kontinuerlig instrumentell registrering (fast installation). Dessa mätningar syftar dock inte enbart till en kontroll av emissionsvillkoret, utan även till en styrning av processen, dvs till att hitta den optimala driftpunkten hos anläggningen.

De krav man bör ställa på mätresultatets tillförlitlighet är beroende av mätningens syfte. Vid en kvantitativ analys, som syftar till process- eller villkorskontroll eftersträvas en hög mätnoggrannhet och mätvärdestillgänglighet, eftersom resultatet ligger till grund för något beslut (processstyrning, investering, mm.). Dessa beslut kan ha stora ekonomiska verkningar. För att indikera driftstörningar och förändringar i process och avskiljningsutrustning är ett mindre noggrant mätresultat tillräckligt (larmfunktion). En god mätvärdestillgänglighet är även i detta fall viktig.

För att säkerställa en hög mätnoggrannhet med hög mätvärdestillgänglighet, krävs i allmänhet en större insats i form av personalresurser, kompetens och utrustning, än vad som är fallet vid en lägre ambition. Kostnadsmässigt är det sålunda viktigt att klart definiera målsättningen med sina mätningar samt att göra en god planering.

Säkerställandet av en viss mätvärdestillförlitlighet består av en genomgång av en lång kedja faktorer som påverkar mätresultatets tillförlitlighet (se figur 1).



Figur 1. Faktorer som påverkar mätresultatets tillförlitlighet

Figure 1. Factors with an impact on the reliability of the measurement result

Kontinuerlig emissionsmätning (fast installation), med ett högt krav på mätvärdestillförlitlighet har ofta ansetts vara svår och dyr att utföra. Denna kritiska inställning till mätsystemen har varit befogad. Man har varit medveten om de svårigheter man har haft att få mätsystemen att fungera i industriell miljö. Utrustningarna har krävt en stor och kostsam insats för att fungera tillfredsställande.

Naturvårdsverket har i samarbete med SVTF låtit utföra jämförbara mätningar av SO_2 - och NO_x -halterna i rökgaserna vid Västerås kraftvärmeverk (pannå 2, kolpulvereldad). Mätlaboratorierna genomförde mätningar på "samma" rökgas i mätplan på olika nivåer i rökgaskanalen (referens 1).

Följande medelvariationsvidder i procent av medelvärde för mätresultaten mellan de olika laboratorierna har erhållits (se tabell 1):

Manuell bestämning av SO_x -koncentrationen, Manual determination of SO_x -concentration	25 %
Instrumentell bestämning av SO_2 -koncentrationen, Instrumental determination of SO_2 -concentration	20 %
Manuell bestämning av NO_x -koncentrationen, Manual determination of NO_x -concentration	40 %
Instrumentell bestämning av NO_x -koncentrationen, Instrumental determination of NO_x -concentration	15 %

Tabell 1. Erhållna medelvariationsvidder vid simultana bestämning av SO_x - och NO_x -koncentrationerna

Table 1. The mean ranges of data dispersion (% of the arithmetic mean) calculated for some comparable measurements performed by commercial laboratories

Undersökningen visar att även vid kortvariga mätningar, som utförs av kompetenta mätkonsulter förekommer mätoslaggrannheter som är otillfredsställande stora. Precisionen som redovisas i tabell 1 gäller endast för det mättekniska arbetet. Redovisningen innefattar inte osäkerheter förorsakade av brister i provtagningsstrategi, t.ex. uppskattning av ett långtidsmedelvärde utgående från stickprovsmätningar. Dessa brister i provtagningsstrategi uppträder i praktiken och bidrar till den totala mätprecisionen, som därvid kan förväntas bli mindre.

Generellt kan sägas att de problem som har att göra med mätutrustningens fältmässighet, funktion och mätoslaggrannhet har sitt ursprung i provtagningsystemet. Problem, som härrör sig från själva analysatorn har varit färre. Med provtagnings-system förstås i dethär sammanhanget den del i mätsystemet som förser analysatorn med provgas. I provtagningsystemet avkyles och avvattnas provgasen i en gaskylare.

För att avhjälpa ovannämnda problem med provtagningsystemet har instrumenttillverkarna presenterat olika lösningar. Man har konstruerat mätsystem utan provtagning sk. in-situ mätmetoder, hos vilka mätningen görs direkt över gaskanaltvärnsnittet eller i kyvetter i rökgaskanalen. Man har även förbättrat de extraktiva mätmetoderna (mätsystem med provtagning), genom att undvika utkondensering av vatten i provtagningsystemet. Detta har åstadkommit bl.a. genom att för torkning använda material (membran) som selektivt genomsläpper vatten. Ett sådant material saluför Du Pont under produktnamnet Nafion. Materialet är en polymer av perfluorsulfonsyra. Andra lösningar för att undvika utkondensering av vatten i provtagningsystemet har dels baserat sig på uppvärmda analysatorer (över daggpunkten) och dels på utspädning av provet med torr instrumentluft (sänkning av daggpunkten).

Optiska in-situ instrument för mätning av bl.a. NO, NO₂ och SO₂ har några år funnits på marknaden. Dessa instrument har visat sig fungera väl under fältmässiga förhållanden. Till nackdelarna hör dock både en sämre känslighet och mätnoggrannhet i förhållande till extraktiva mätsystem. Den sämre mätnoggrannheten beror främst på kalibreringssvårigheter. Dessa instrument lämpar sig dock väl för att indikera driftstörning och förändringar i processen. För en noggrann kvantitativ analys krävs i allmänhet extraktiva system.

Extraktiva mätsystem som använder Nafion-membran (sk Perma-Pure-Drier teknik) för avvattning finns installerade på några anläggningar. Erfarenheterna visar att provtagningssystem som bygger på den här tekniken är lika känsliga för driftstörningar som konventionella system. Störningarna har bestått i utkondensering av tjärämnen i membranet, vilket har försämrat dess avvattnande förmåga.

Uppvärmda analysatorer för NO_x har en längre tid funnits på marknaden. Vid långvarig mätning har problem förekommit i form av kondensbildning och igensättning i analysatorn. Uppvärmda instrument för SO₂ och även andra komponenter är under utveckling.

Utspädning av provgasen har som idé funnits länge, men i och med att ett litet holländskt företag under namnet EPM (Environment & Process Monitoring) presenterade sitt utspädningssystem år 1983, har utspädningen som praktisk lösning blivit intressant. EPM-utspädningssystemet representerar sannolikt den potentiellt bästa provtagnings- och provberedningsteknik som finns att tillgå idag. Systemet bör kunna förena en god mätnoggrannhet och fältmässighet med en låg tillsynskostnad.

I den här rapporten utvärderas EPM-utspädningssystemet både ur en teoretisk och erfarenhetsmässig synvinkel.

2. Sammandrag

Utspädningstekniken, som används i EPM-provtagningsystemet, kan generellt beskrivas på följande sätt. En liten kontinuerlig provgasström filtreras och utspäds i gaskanaltemperaturen för att sedan transporteras till analysatorerna. Med hjälp av uppvärmd instrumentluft sugas provgasen ut, späds ut (i ett litet venturirör) och transporteras under tryck till analysatorerna.

EPM-utspädningstekniken har följande potentiella fördelar framom konventionella extraktiva system:

- ingen uppvärmd sond, provslang samt gaskylare behövs, p g a att det utspädda provet innehåller endast 1-2 % av sin ursprungliga fukt- och syrakoncentration
- hela mätsystemet kan kalibreras genom att kalibreringsgas förs in i sonden redan omedelbart efter grovfiltret

- det är lätt att utföra en automatisering av hela systemet
- provtagningssystemet är till sin utbyggnad litet och lätt
- långa provtagningsslangar kan användas (upp till 100 m)

Som en följd av EPM-provtagningssystemets allmänna konstruktion har systemet följande potentiella specifika mätfelkällor:

- tryckförändring i gaskanalen
- rökgasens densitet
- förändring i rökgasens temperatur
- förändring i spädgastrycket
- otillräckligt kalibreringsgasflöde till provtagningssondöppningen
- bakgrundskoncentration
- omvandlingsreaktioner och diffusionsförluster.

Av ovannämnda mätfelkällor är de tre första de mest betydande.

En förändring av gaskanaltrycket leder till en lika stor procentuell avvikelse i analysatorns utslag. T.ex. 1 % (ca 100 mm H₂O) förhöjning (sänkning) av gaskanaltrycket förorsakar en förhöjning (sänkning) av analysatorns utslag med 1 %.

Variationen i atmosfärstrycket i nordiska förhållanden är maximalt ca 50 mbar (500 mm H₂O), vilket motsvarar en 5 %:ig avvikelse i analysatorns utslag.

Som en följd av förändring i gashastigheten i kanalen förändras det statiska trycket med maximalt ca 100 mm H₂O (gashastighetsförändring från 40 m/s -> 0 m/s). Detta leder till en avvikelse i analysatorns utslag på ca 1 %. Vid en gashastighetsförändring från 30 m/s -> 15 m/s blir förändringen i analysatorns utslag ca 0,5 %.

Mätsystemet kalibreras med en gasblandning (referensgas) innehållande den aktuella mätkomponenten₃ med kväve som grundgas. Referensgasens densitet är 1,25 kg/m³ norm. Rökgasens densitet kan variera mellan ca 1,15 - 1,35 kg/m³. Detta kan leda till ett fel i analysatorns utslag, som beror av EPM-utspädningssonden, på upp till + 8 %, jfr figur 7. Själva analysatorn är dessutom ofta känslig för densitetsförändringar.

En förändring av gaskanaltemperaturen på ca 10 °C förorsakar en avvikelse i analysatorns utslag på ca 1 %. Vid endel förbränningsanläggningar kan en belastningsförändring leda till en temperaturförändring på upp till 50 - 100 °C.

I ogynnsamma situationer kan ovan beskrivna mätfelkällor leda till ett sammanlagt mätfel på upp till ca 15 %. Det är dock möjligt, och relativt enkelt, att beakta mätfelkällorna och kompensera mätresultatet för dessa.

Vid Igelstaverket i Södertälje utfördes en fältutprovning av EPM-provtagningssystemet. Provtiden var två veckor.

Utprovningen visade att mätsystemet klarade provperioden utan tillsyn och utan störningar. Mätvärdestillgängligheten var 100 %.

Det testade mätsystemet innehöll både EPA:s (USA) och Umweltbundesamts (Förbundsrepubliken Tyskland) krav på maximal nollpunktsdrift och mätvärdesdrift. Dessa är följande: nollpunktsdrift $< \pm 2$ %/vecka, mätvärdesdrift $< \pm 2$ % resp. $< \pm 4$ %/vecka.

Andra användare av EPM-provtagningssystemet rapporterar följande erfarenheter:

- igensättning av det kritiska munstycket genom stoftavlagringar har förekommit vid mätning i gaskanaler med höga stofthalter och små partikelstorlekar (mesaugnar och sodapannor före avskiljare)
- vid mätning inom den kemiska industrin rapporteras även igensättningar som en följd av kristallbildning i det kritiska munstycket
- vattendroppar har också förorsakat tilltäppningar vid mätning i mycket vattenmättade gaser efter våtavskiljare. Problemet har lösts genom att förse sonden med "droppskydd"
- vid en praktisk utvärdering av EPM-provtagning under ett års tid vid Craig Station, Unit 3 of the Colorado - Ute Electric Association har man erhållit 95 % mätvärdestillgänglighet, 2-4 timmar/vecka har åtgått för underhåll. Inga tilltäppningar av munstycke, sond eller gasslangar har förekommit.

3. Slutbedömning

EPM-utspädningssystemet lämpar sig i dagens utförande för mätning i gaskanaler, som är lågbelastade med stoft (i allmänhet efter stoftavskiljare). Vid dessa applikationer uppnås en bättre mätvärdestillgänglighet till lägre underhållskostnader i jämförelse med konventionell provtagning.

Vid mätning i gaskanaler med höga stofthalter och små partikelstorlekar (t.ex. mesaugnar och sodapannor före avskiljare) kan man förvänta problem i form av igensättning av det kritiska munstycket.

Utspädningssystemet har vissa specifika mätfelskällor. Dessa är följande: tryckförändring i gaskanalen, rökgasens densitet och förändring i rökgasens temperatur. Om mätresultatet kompenseras för dessa effekter uppnås ett mätsystem med en mycket stor förväntad mätnoggrannhet. Möjliga mätfelskällor har i detta fall i princip reducerats till referensgasens

eventuella felaktiga koncentrationsangivelse, grovstoftfiltrets inverkan samt analysatorns känslighet för interfererande gaser. Förväntad mätonoggrannhet är i de flesta fall $< \pm 5 \%$. Noggrannheten är bättre än vad som kan förväntas med konventionellt system.

Investeringskostnaden för ett mätsystem som bygger på EPM-utspädningssonden är ungefär lika som för motsvarande konventionellt system, dvs ca 100 tkr + 100 tkr/mätkomponent.

4. Beskrivning av extraktivt provtagningssystem

Ett extraktivt mätsystem kan anses bestå av ett provtagningssystem, en analysator samt en resultatutvärderingsenhet.

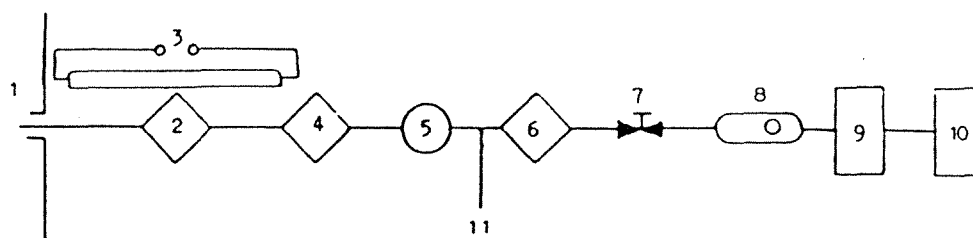
Provtagningsystemets uppgift är att transportera en delgasström från mätstället till analysatorn samt att skydda analysatorn mot fasta föreningar, interfererande gaser och kondensbildningar, samt att åstadkomma konstanta förhållanden med avseende på tryck, temperatur och flöde.

4.1 Konventionellt provtagningssystem

Konventionellt används ett provtagningssystem, som bygger på avkylning och avvattning av provgasen i en gaskylare. Ett exempel på provtagningssystem visas i figur 2.

Vid konstruktion av ett sådant provtagningssystem skall man försöka eftersträva (referens 2):

- att ett läckagefritt system skapas
- att pumpen är läckagefri
- att kondensation av mätkomponenten förhindras
- att mätkomponenten inte löser sig i kondensat
- att reaktioner inte kan ske i systemet mellan mätkomponenten och övriga i provgasen ingående komponenter
- att materialet i systemet inte katalyserar någon reaktion mellan aktuella gaskomponenter
- att materialet har tillräcklig kemisk-, termisk- och mekanisk motståndskraft
- att förhindra sulfatbildning på filter vid mätning av svavelhaltiga komponenter
- att provtagningssystemet har så kort längd som möjligt mellan gasuttag och analysator
- att gasvolymen i systemet är så liten som möjligt i förhållande till strömningshastigheten
- att systemet är så enkelt som möjligt
- att ledningarna i systemet lutar nedåt för att förhindra kondensfickor.



- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Sond, Probe | 7. Reduceringsventil, Pressure regulator |
| 2. Grovfilter, Coarse filter | 8. Flödesmätare, Flowmeter |
| 3. Uppvärmning, Heating | 9. Analysator, Analyzer |
| 4. Kylare med kondensfälla, Condenser | 10. Datainsamling, Data collection |
| 5. Pump, Pump | 11. Referensgas, Reference gas |
| 6. Finfilter, Fine filter | |

Figur 2. Ett exempel på konventionellt extraktivt provtagningssystem

Figure 2. An example of a conventional extractive sampling system

Olika typer av uttagssonder används beroende på gasens temperatur och aggressivitet. Filtret i uttagssonden brukar vara ett keramiskt filter och utbytbart. Vid mätning av SO_2 i fuktig gas skall en uppvärmd sond användas, eftersom risk finns för att SO_2 löser sig i det kondenserade vattnet. Andra motiv för att använda en uppvärmd sond är att i samband med fuktiga stoftbemängda gaser får ej kondensering av vattenångor ske i filtret, eftersom detta skulle leda till en snabb igensättning.

Gaskylaren insätts i provtagningssystemet för att sänka temperaturen hos den fuktiga gasen så lågt att utkondensering sker i kylaren, varvid kondensatbildning ej kan uppstå i någon del i det efterföljande systemet eller i analysatorn.

De vanligast använda pumparna är membranpumpar. Detta på grund av det låga erforderliga flödet och att gasberörda delar i dessa pumpar lätt kan tillverkas av inerta material.

Finfiltret består vanligen av ett membranfilter eller glasfiberfilter monterat i en transparent filterhållare för att man lätt skall kunna kontrollera smutshalten på filtret.

4.2 EPM-provtagningssystem

4.2.1 Principiell uppbyggnad

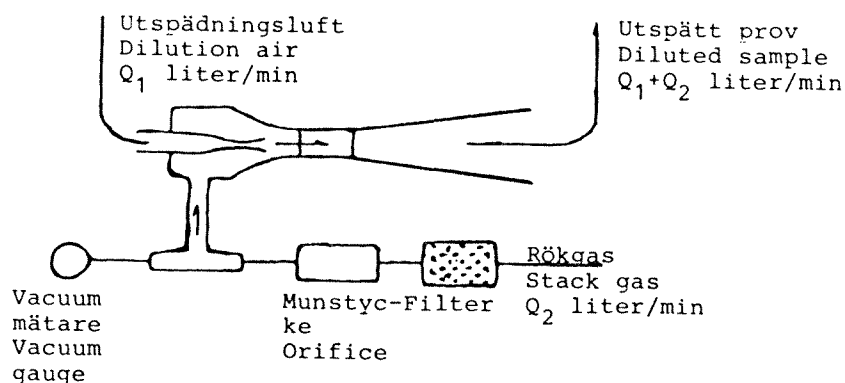
Utspädningstekniken, som används i EPM-provtagningssystemet, kan generellt beskrivas på följande sätt. En liten kontinuerlig provgasström filtreras och utspäds i gaskanaltemperaturen för att sedan transporteras till analysatorerna. Med hjälp av uppvärmd instrumentluft sugas provgasen ut, späds ut (i ett litet venturirör) och transporteras under tryck till analysatorerna. Figur 3 framställer en typisk systemlösning.

EPM-utspädningstekniken har följande potentiella fördelar framom konventionella extraktiva system:

- ingen uppvärmd sond, provslang samt gaskylare behövs, p g a att det utspädda provet innehåller endast 1-2 % av sin ursprungliga fukt- och syrakoncentration
- hela mätsystemet kan kalibreras genom att kalibreringsgas förs in i sonden redan omedelbart efter grovfiltret
- det är lätt att utföra en automatisering av hela systemet
- provtagningssystemet är till sin utbyggnad litet och lätt
- långa provtagningsslangar kan användas (upp till 100 m)
- samma analysatorer kan användas som vid mätning i utomhusluft.

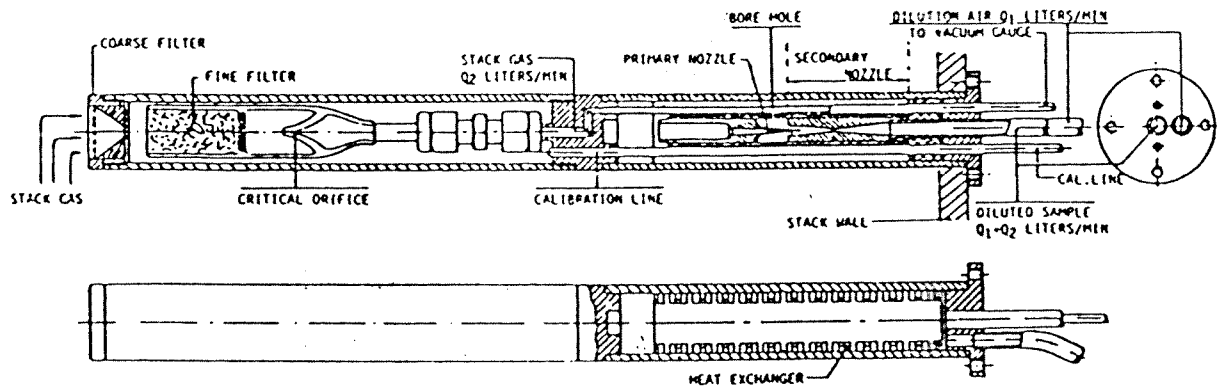
Vid användning av en standard mätgasslang med 100 meters längd är provtagningssystemets svarstid ca 20 sekunder.

Behövligt referensflöde är ca 0,5 l/min.



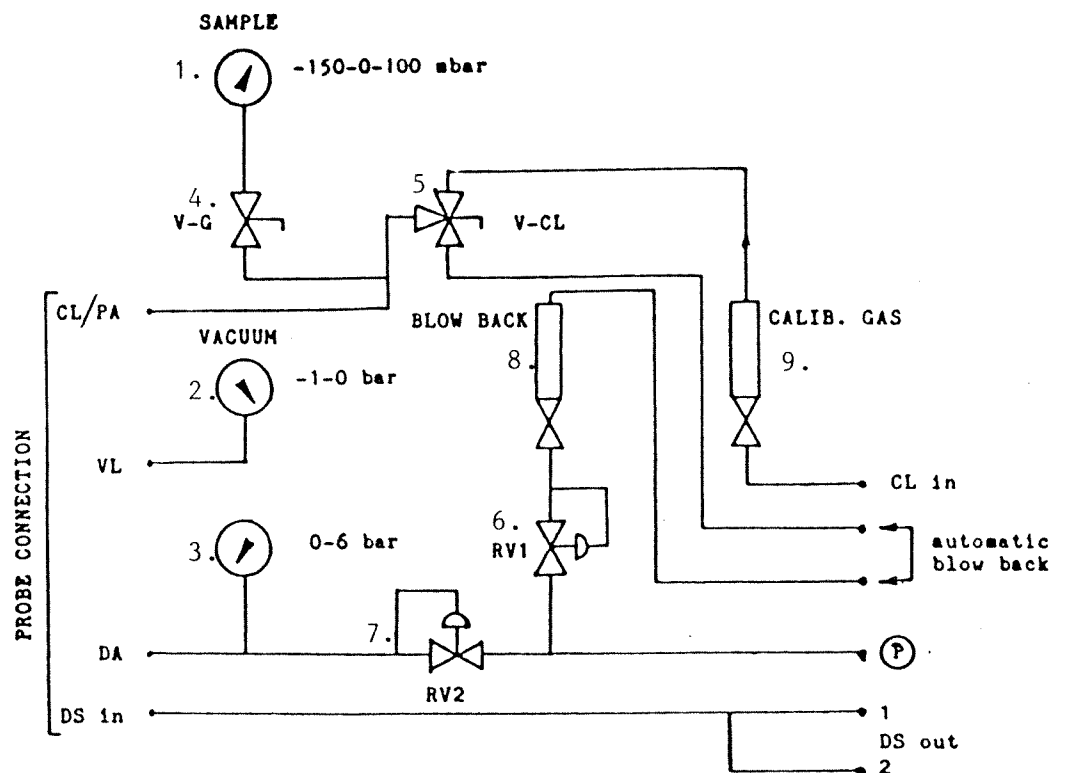
Figur 3a. EPM-provtagningssystemet
- funktionsprincip (referens 4)

Figure 3a. EPM-diluting stack sampler (reference 4)



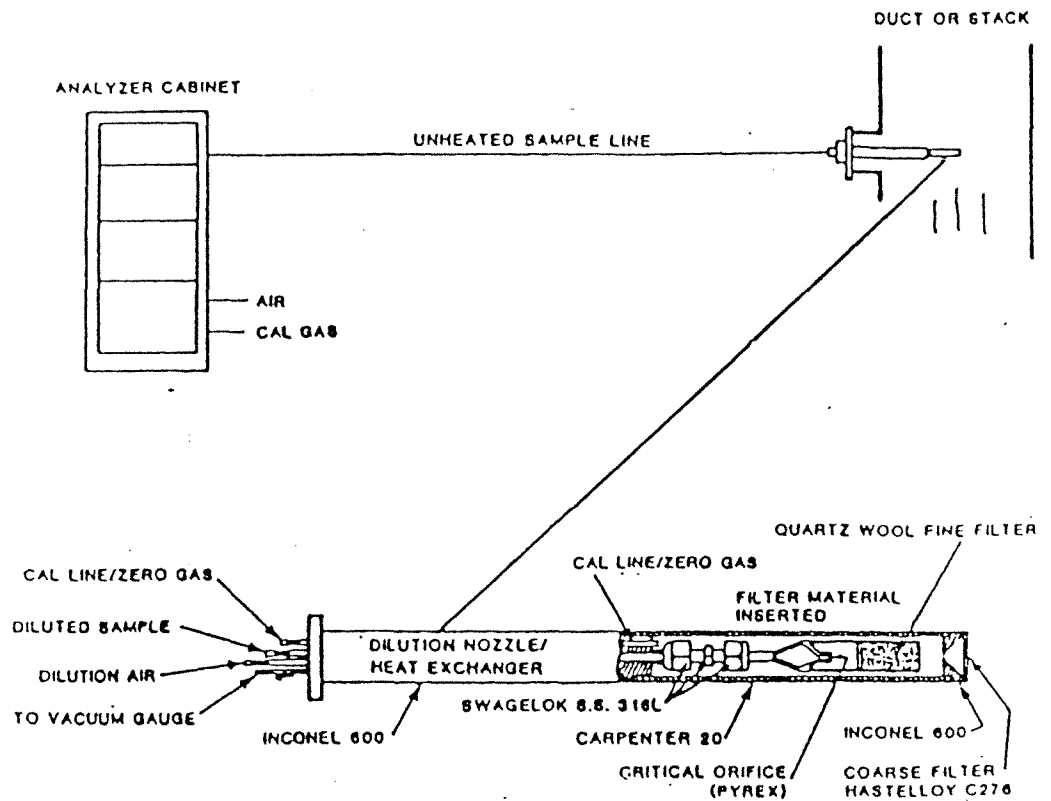
Figur 3b. EPM-provtagningsystemet
- genomsnitt av sonden (referens 4)

Figure 3b. EPM-diluting stack sampler
- cross-section of the standard probe (reference 4)



Figur 3c. EPM-provtagningsystemet
- flödesdiagram över kontrollenheten (referens 4)

Figure 3c. EPM-diluting stack sampler
- flow diagram of the control module (reference 4)



Figur 3d. EPM-provtagningssystemet
- typisk systemlösning (referens 3)

Figure 3d. EPM-diluting stack sampler
- typical system configuration (reference 3)

Följande krav måste uppfyllas för att utspädningssystemet skall fungera tillfredsställande:

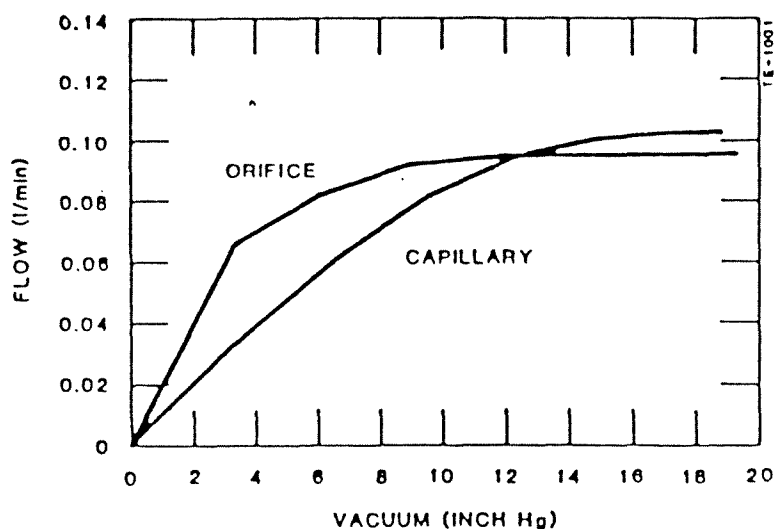
- partiklar $> 1 \mu\text{m}$ i utspädningsgasen måste filtreras bort. Som utspädningsgas används vanligtvis instrumentluft
- utspädningsgasens daggpunkt bör ligga under ca -30°C
- provgasens och utspädningsgasens temperatur bör vara lika i utspädningspunkten
- jämna flöden bör åstadkommas.

EPM-utspädningssystemet har följande potentiella svagheter och nackdelar i förhållande till ett konventionellt system:

- risk för igensättning av det kritiska munstycket
- tryck- och temperaturförändringar i gaskanalen påverkar mätutslaget
- skillnad i referensgasens- och rökgasens densitet påverkar mätutslaget
- eventuell bakgrund från utspädningsgasen måste beaktas
- tillgång på utspädningsgas bör säkras.

4.2.2 Teoretisk betraktelse

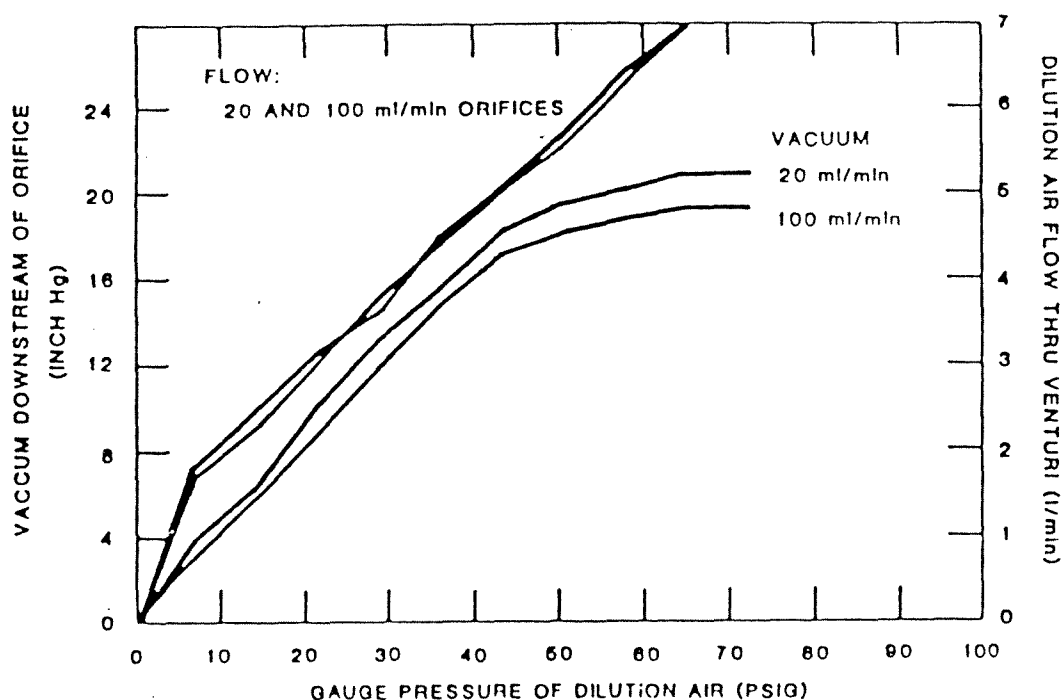
Provgasen uttass ur gaskanalen genom ett kritiskt munstycke. Om trycket i flödesriktningen efter munstycket är lägre än ca hälften av trycket före, uppnås ett sk. kritiskt flöde. Dethär betyder att flödet genom munstycket kommer att begränsas av den högsta hastighet de enskilda molekylerna kan röra sig, dvs ljudets hastighet. Volymflödet kommer att vara oberoende av det exakta trycket efter munstycket. Ur figur 4 framgår karakteristikan för ett sådant kritiskt munstycke i motsats till ett vanligt långt kapillär.



Figur 4. Volymflödet genom ett kritiskt munstycke samt ett långt kapillär (referens 3)

Figure 4. Volumetric flow through a "sonic orifice" compared with a standard long-channel capillary (reference 3)

Ur det föregående följer att ett stabilt utspätt prov kan erhållas med hjälp av ett venturirör med en kapacitet att skapa ett undertryck överstigande 50 %, efter det kritiska munstycket. Ett typiskt undertryck - spädgastryck samband för det venturirör som används framgår ur figur 5. Dessutom framgår ur figur 5 volymflödet spädgas, som behövs för att producera detta undertryck.



Figur 5. Undertryck - spädgastryck sambandet för det använda venturiröret. Dessutom framgår volymflödet spädgas som behövs för att producera detta undertryck. Sambanden framgår för två provgasflöden 20 ml/min och 100 ml/min (referens 3)

Figure 5. Typical vacuum vs pressure characteristics of the venturi used, along with the volumetric flow required to produce that vacuum, for two different sample rates: 20 ml/min and 100 ml/min (reference 3)

Möjliga utspädningsförhållanden bestäms utifrån området möjliga venturiflöden. Ur tabell 2 framgår typiska utspädningsförhållanden.

Munstyckets storlek	Möjliga utspädningsförhållanden
Orifice size	Dilution range
20 ml/min	250 - 350
50 ml/min	75 - 150
100 ml/min	40 - 75
150 ml/min	25 - 50

Tabell 2. Möjliga utspädningsförhållanden för vissa munstycksstorlekar (referens 3)

Table 2. A typical set of dilution ranges (reference 3)

Val av munstycksstorlek och därmed utspädningsförhållande är vid en praktisk mätning beroende av två kriterier som måste uppfyllas.

- A. Den använda analysatorns mätområde måste i alla lägen innehållas.
- B. Utspädningsförhållandet måste väljas så att ingen kondensation av syra eller vatten kan äga rum i provgasledningen. Man bör då beakta den lägsta omgivningstemperaturen som provgasledningen utsätts för, samt utspädningsgasens daggpunkt.

5. Mätfelkällor

5.1 Konventionellt extraktivt mätsystem

Den mätnoggrannhet som förekommer vid instrumentella bestämningar med konventionella extraktiva mätsystem kan antas bero på följande faktorer:

- fel angiven referensgaskoncentration
- analysatorns mätprincip är känslig för interferenter, vilka finns i rökgasen men ej i referensgasen. Som referensgas används en blandning av den aktuella mätkomponenten och ren kvävgas. Dethär motsvarar inte en riktig rökgassammansättning
- förluster och omvandlingsreaktioner äger rum i provtagningssystemet. Dessa reaktioner kan äga rum vid utsugningssondens grovstoftfilter, vilket genomströmmas av het och fuktig reaktiv gas. En annan kritisk punkt i provtagningssystemet är provgastemperatursänkningen, vilken sker i kylare med kondensvattenavlopp. I denna del av provtagningssystemet, där vattnet förekommer i aerosolform, sker förluster i form av urtvättning av lösliga mätkomponenter. Gasen tillförs provtagningssystemet i uppvärmda teflonslangar, för vilka gäller att differensen i partialtrycket för mätkomponenter utanför och innanför slangarna är stor. Dethär leder till diffusionsförluster. I provtagningssystemets olika delar finns alltid risk för kondensbildningar med förluster som följd.

Av ovan listade mätfelkällor är oftast de som hör samman med provtagningssystemet de mest betydande.

5.2 Mätsystem med EPM-provtagning

Den mätnoggrannhet som förekommer vid instrumentella bestämningar med EPM-provtagningssystem kan delvis antas bero på samma faktorer som gäller för konventionella mätsystem. Dessa gemensamma faktorer är:

- fel angiven referensgaskoncentration
- analysatorns känslighet för interferenter.

För kritiska flöden genom munstycken gäller allmänt följande samband:

$$Q = \frac{KP}{\gamma(T)\sqrt{T}} \quad (1)$$

Q = volymflödet genom munstycket,
volume flow through the orifice

K = konstant, lumped constant

P = absoluta ingångstrycket,
upstream absolute pressure

γ = gasens densitet, gas density

T = gasens absoluta temperatur,
absolute temperature of the gas.

Ur ekvation 1 och p g a provtagningssystemets allmänna konstruktion följer att systemet har följande potentiella specifika mätfelkällor:

- tryckförändring i gaskanalen
- rökgasens densitet
- förändring av rökgasens temperatur
- förändring av spädgastrycket
- otillräckligt kalibreringsgasflöde till provtagningssondöppningen
- bakgrundskoncentration
- omvandlingsreaktioner och diffusionsförluster.

I referens 3 beskrivs en praktisk utprovning av EPM-utspädningssonden vid Craig Station, Unit 3 of the Colorado - Ute Electric Association. Typ av bränsle, förbränningssätt, reningsutrustning och mätplats anges inte. För CO_2 -haltbestämning redovisas ett mätfelintervall $< 3,5 \%$ innehållande både precision och relativ mätonoggrannhet. Motsvarande resultat för SO_2 är $< 6,5 \%$.

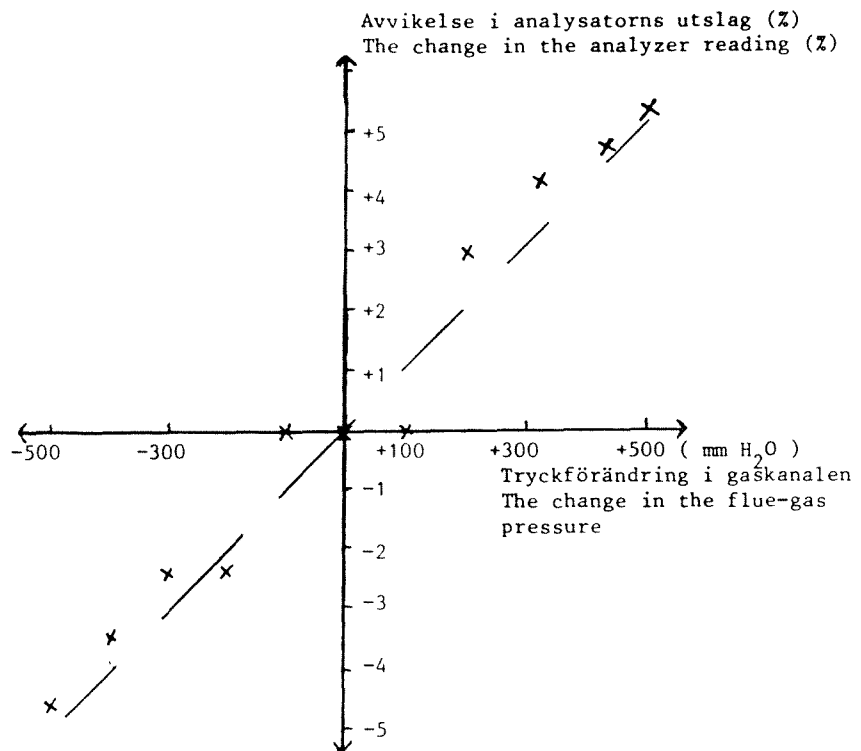
5.2.1 Tryckförändring i gaskanalen

Ur ekvation 1 följer att en förändring av gaskanaltrycket leder till en lika stor procentuell avvikelse i analysatorns utslag. T.ex. 1 % (ca 100 mm H_2O) förhöjning (sänkning) av gaskanaltrycket förorsakar en förhöjning (sänkning) av analysatorns utslag med 1 %. Detta resultat bekräftas även av ett utfört laboratorieförsök. Resultatet framställs grafiskt i figur 6.

En förändring i rökgaskanalens statiska tryck kan förorsakas av en förändring både av atmosfärstrycket och rökgashastigheten (belastningen hos anläggningen).

I nordiska förhållanden är variationen i atmosfärstrycket maximalt ca 50 mbar (500 mm H₂O), vilket motsvarar en 5 %:ig avvikelse i analysatorns utslag.

Som en följd av förändring i gashastigheten i kanalen förändras det statiska trycket med maximalt ca 100 mm H₂O (gashastighetsförändring från 40 m/s -> 0 m/s). Detta leder till en avvikelse in analysatorns utslag på ca 1 %. Vid en gashastighetsförändring från 30 m/s -> 15 m/s blir förändringen i analysatorns utslag ca 0,5 %.



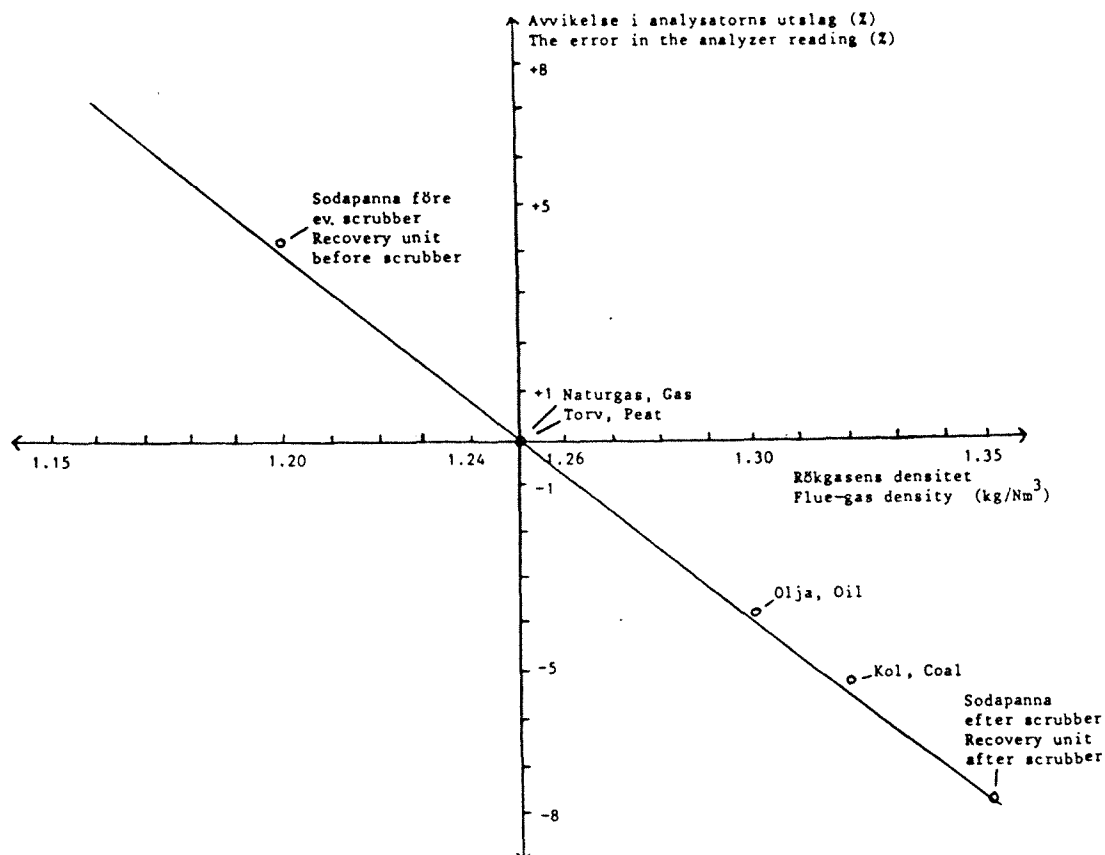
Figur 6. Mätresultatets inverkan av tryckförändringar i gaskanalen

Figure 6. The change in the analyzer reading due to variation of the flue-gas pressure

5.2.2 Rökgasens densitet

Mätsystemet kalibreras med en gasblandning (referensgas) innehållande den aktuella mätkomponenten med kväve som grundgas. Referensgasens densitet är 1,25 kg/m³ norm₃. Rökgasens densitet kan variera mellan ca 1,15 - 1,35 kg/m³ norm.

I figur 7 har mätvärdesavvikelsens storlek framställts som funktion av rökgasens densitet. Avvikelsen har beräknats utgående från ekvation 1 och innefattar endast avvikelsen, som beror av EPM-provtagningssystemet. Själva analysatorn är dessutom ofta känslig för densitetsförändringar.



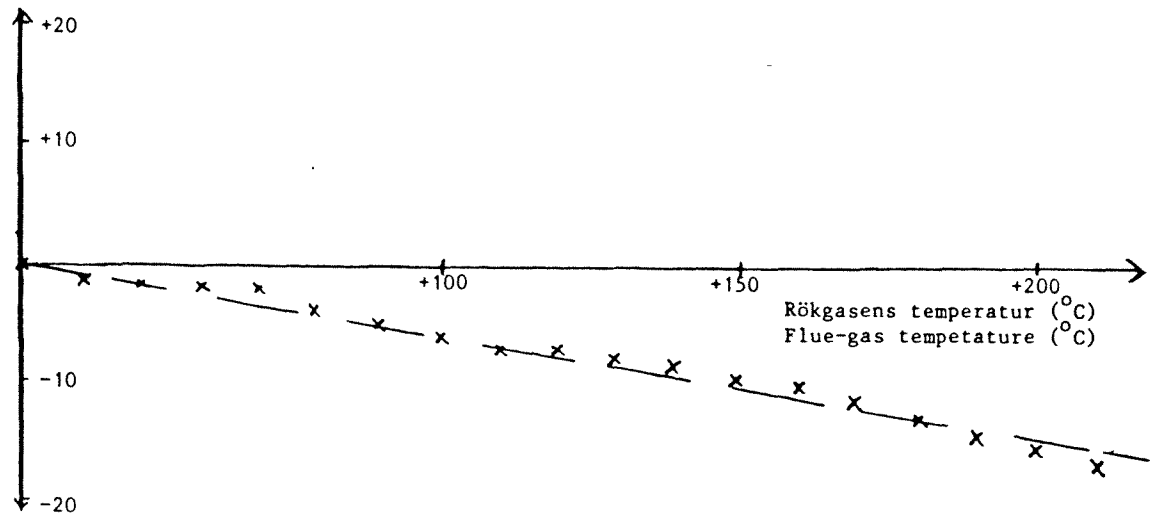
Figur 7. Mätvärdesavvikelsens storlek som funktion av rök-gasens densitet (endast EPM-provtagningsystemets inverkan)

Figure 7. The error in the analyzer reading due to differences in the reference and flue gas densities (only the influence of the EPM diluting stack sampler included)

5.2.3 Förändring av rökgasens temperatur

Volymflödet gas genom det kritiska munstycket i provtagnings-systemet är beroende av gasens temperatur. I figur 8 har grafiskt framställts resultatet från ett utförd laboratorie-försök. Ur figuren framgår att en temperaturförändring på ca 10 °C förorsakar en avvikelse i analysatorns utslag på ca 1 %.

Avvikelse i analysatorns utslag (%)
The change in the analyzer reading (%)



Figur 8. Inverkan av en gaskanaltemperaturförändring på mätresultatet

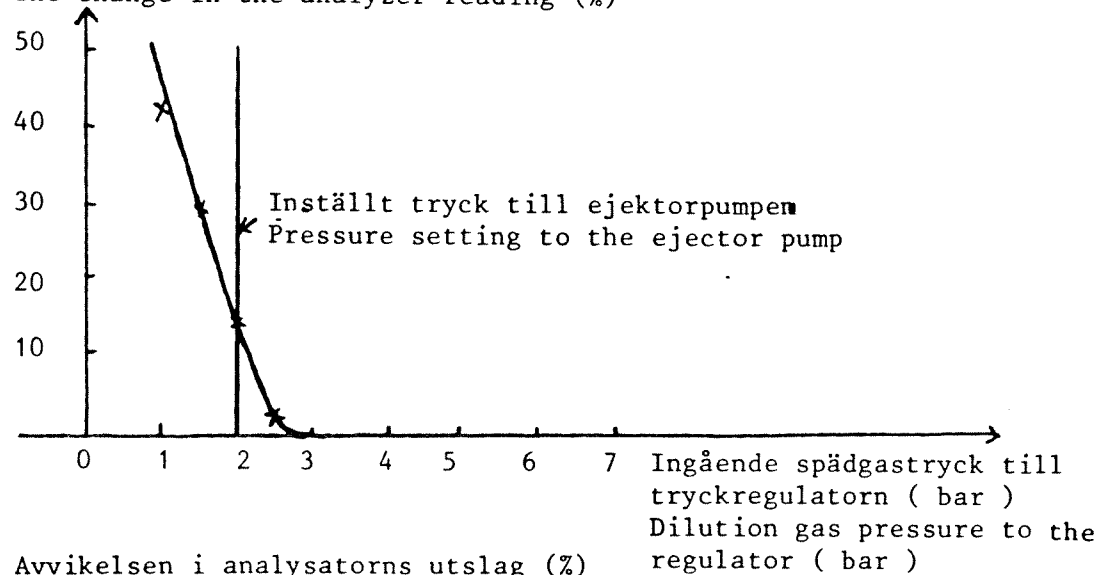
Figure 8. The change in the analyzer reading due to variation of the flue-gas temperature

5.2.4 Förändring i spädgastrycket

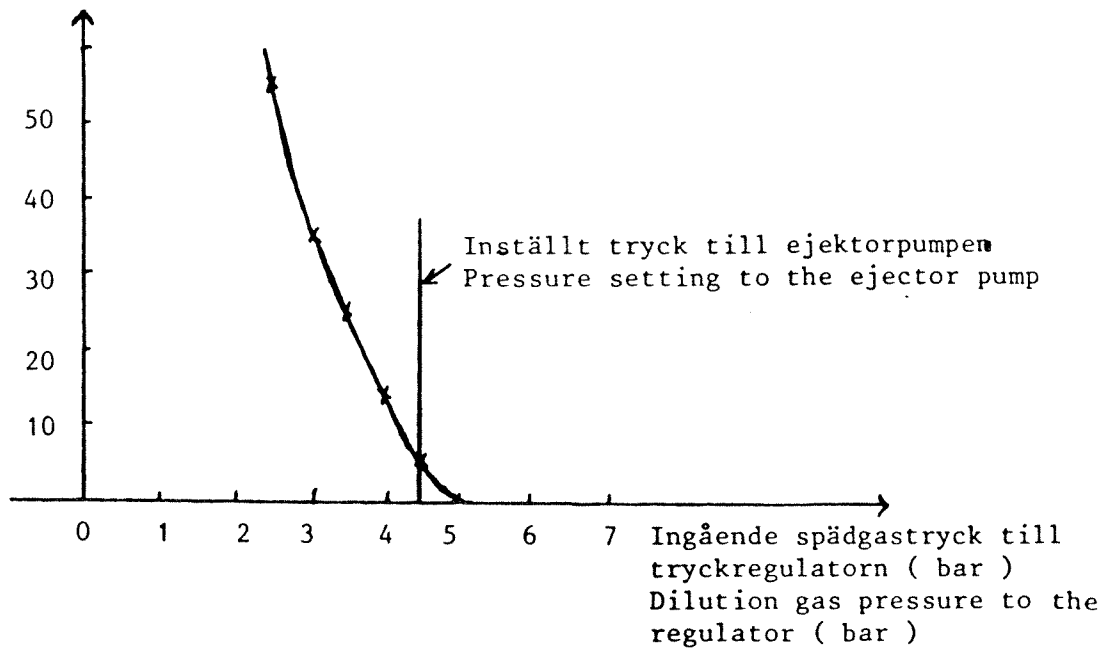
Sondens utspädningsförhållande är beroende av utspädningsgasens tryck, dvs ingående trycket till sondens venturirör. Trycket bestäms med hjälp av manometern 3 och regleras med tryckregulatorn 7 (se figur 3c).

Tryckregulatorns funktion har studerats genom att ingångstrycket till regulatorn har varierats. Resultaten, som framgår ur figur 9, visar att tryckregulatorn till sin funktion är mycket stabil, dvs den är okänslig för tryckförändringar i ingångstrycket. Detta gäller under förutsättning att ingångstrycket överstiger med 1-2 bar det tryck, som råder efter regulatorn.

Avvikelsen i analysatorns utslag (%)
The change in the analyzer reading (%)



Avvikelsen i analysatorns utslag (%)
The change in the analyzer reading (%)



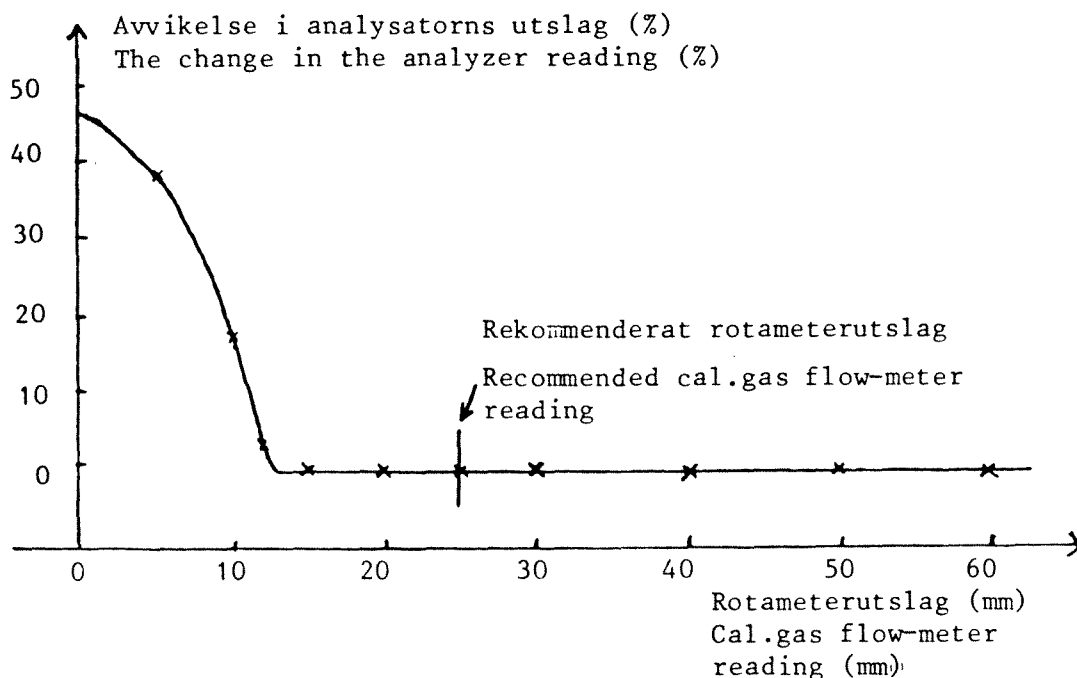
Figur 9. Spädgastryckets inverkan på mätresultatet. Inställda ingångstryck till venturiröret är 2,0 bar resp. 4,5 bar

Figure 9. The change in the analyzer reading vs dilution gas pressure to the regulator. Pressure settings to the ejector pump are 2.0 bar respectively 4.5 bar

5.2.5 Otillräckligt kalibreringsgasflöde till sondöppningen

Mätsystemet kalibreras genom att referensgas införs i utspädningssonden redan omedelbart efter sondens grovfilter. För att kalibreringen skall bli riktigt utförd, måste kalibreringsgas föras in i sonden med ett flöde, som överstiger flödet genom det kritiska munstycket. Tillverkaren rekommenderar ett flöde överstigande 4 ggr flödet genom munstycket. Kalibreringsgasflödet regleras med hjälp av regulatorn 3 och bestäms med rotametern 4 (se figur 3c).

Ett laboratorieförsök utfördes för att kontrollera att det kalibreringsgasflöde, som tillverkaren rekommenderar, är tillräckligt. Resultatet framgår ur figur 10. Vi kan konstatera att det rekommenderade kalibreringsgasflödet räcker till för en riktigt utförd kalibrering



Figur 10. Kalibreringsgasflödets inverkan på mätresultatet

Figure 10. The change in the analyzers reading vs reference gas-flow

5.2.6 Bakgrundskoncentration

Genom utspädning av provgasen sänks mätgaskomponentens koncentration till en nivå som gör att en eventuell bakgrundskoncentration hos utspädningsgasen blir betydelsefull. Om bakgrundsvärdet är konstant över tiden behövs ingen åtgärd vidtagas. I annat fall måste den aktuella mätkomponenten elimineras ur spädgasen.

5.2.7 Omvandlingsreaktioner och diffusionsförluster

På grund av den snabba utspädningen av provgasen i sonden är risken för omvandlingsreaktioner i sond och provgasslangar betydligt mindre än vid provtagning med ett konventionellt extraktivt mätsystem. Till detta bidrar även provgasens relativt låga partialtryck och temperatur i provgasslangarna. Av samma skäl är diffusionsförlusterna lägre vid mätning med utspädningssonden än vid provtagning med ett varmt konventionellt system.

Som utspädningssgas används vanligtvis luft. För att minimera eventuella omvandlingsreaktioner i provgasslangarna kan en inert gas, såsom N_2 användas.

6. Fältutprovning

EPM-provtagningssystemet utprovades, tillsammans med en Monitor Labs Model 8850 (fluorescens) SO_2 -analysator samt en Monitor Labs Model 8840 (chemiluminescens) NO_x -analysator, under tiden 86-05-22...86-06-06 vid Igelstaverket (Södertälje Energiverk). Mätningar utfördes vid panna 1 under tiden 86-05-22...86-05-31 och vid panna 2 under tiden 86-06-01...86-06-06.

Igelstaverket är ett kolpulvereldat fjärrvärmeverk. Panneffekten är 3 x 120 MW. Anläggningen är utrustad med rökgasrening i tre steg: elfilter, svavelskrubber och spärrfilter. Svavelavskiljningen sker enligt sk. "våt-torr" metod. Som absorbent används släckt kalk $Ca(OH)_2$.

Mätningarna utfördes i rökgaskanalen efter spärrfiltret och rökgasfläkten. I mätpunkten var 3 gastemperaturen ca $68^\circ C$, stoftkoncentrationen $< 25 \text{ mg/Nm}^3$ och rökgashastigheten i medeltal ca 11 m/s.

Erfarenheterna från fältutprovningen har framställts i tabell 3.

Testtid, Time of evaluation	86-05-22...86-06-06
Mätvärdestillgänglighet, Percent data retrieval	100 %
Tillsynstid, Time of maintenance	-
EPM-provtagningssystemet, EPM-diluting stack sampler	
- funktionsproblem, problems	-
- drift i ejektorpumpens undertryck, vacuum drift	$< 1 \%$
- drift i ingångstryck till ejektorpumpen, pressure drift	$< 1 \%$

Mätvärdesförskjutning efter rengöring av grovfilter (2 veckors intervall, % av full skala), Change in the analyzer reading after purging of the coarse filter (2 weeks period, % of full scale)	0,2 %
SO ₂ -analysatorn, SO ₂ -analyzer (Monitor Labs Model 8850)	
- funktionsproblem, problems	-
- noll-drift (% av full skala/2 veckor) Zero-drift (% of full scale/2 weeks)	0,8 %
- mätvärdesdrift (% av full skala/2 veckor) span-drift (% of full scale/2 weeks)	3,2 %
NO _x -analysatorn, NO _x -analyzer (Monitor Labs Model 8840)	
- funktionsproblem, problems	-
- noll-drift (% av full skala/2 veckor) Zero-drift (% of full scale/2 weeks)	0,2 %
- mätvärdesdrift (% av full skala/2 veckor) span-drift (% of full scale/2 weeks)	4,0 %

Tabell 3. Testresultat från utprovning av EPM-provtagningssystemet vid Igelstaverket i Södertälje

Table 3. Test results for the EPM-diluting stack sampler installation at Igelstaverket in Södertälje

Det testade mätsystemet innehöll både EPA:s (USA) och Umweltbundesamts (Förbundsrepubliken Tyskland) krav på maximal nollpunktsdrift och mätvärdesdrift. Dessa är följande: nollpunktsdrift $< \pm 2$ %/vecka, mätvärdesdrift $< \pm 2$ % resp. $< \pm 4$ %/vecka.

Vid Igelstaverket finns fast installerade SO₂- och NO-mätinstrument av typ LSI SM 810 (Lear Siegler). En jämförelse av mätresultat utfördes. Se tabell 4.

Panna nr. Boiler Nr.	Mätkompo- nent Component	Jämförelsetid Time of com- parison	Koncentration Concentration	Medelvärde för skillnaden i mät- värdespar (1 h me- delyärden) The mean value of the differences in pairs of observa- tions (1 h mean values)	Procentuell skillnad Percentual difference
3	SO ₂	86-06-02 (24 h)	149 ppm	10,5 ppm	7 %
1	SO ₂	86-05-22... 86-05-23 (9 h)	68 ppm	25,0 ppm	36 %
3	NO _x	86-05-05... 86-06-06 (14 h)	203 ppm	0,5 ppm *)	0,2 %

*) baserar sig på 27 st enskilda värden
based on 27 distinct observations

Tabell 4. Mätvärdesjämförelse - Igelstaverkets LSI-installation mot EPM-mät-systemet

Table 4. Comparison of observations - LSI-installation vs EPM-diluting stack sampler system

Mätsystemen uppvisar en god överensstämmelse för koncentrationer över ca 100 ppm, medan överensstämmelsen vid låga koncentrationer är dålig. LSI-instrumentet uppvisar en bakgrunds nivå på ca 20-50 ppm även då pannan i fråga är avstängd. Detta kan vara en orsak till dålig överensstämmelse vid låga koncentrationer.

7. Rapporterade erfarenheter från andra användare av EPM-provtagningssystemet

EPM-provtagningssystemet har snabbt kommit till stor användning i många länder bl.a. Frankrike, Belgien, Holland och USA. I Sverige finns endast ca 5 system i bruk (augusti 1986).

Användarna av systemen rapporterar överlag positiva resultat. Inga problem har förekommit vid mätning i gaskanaler med låg stoftbelastning (efter stoftavskiljare). Igensättning av det kritiska munstycket har förekommit vid mätning i gaskanaler med höga stofthalter och små partikelstorlekar (mesaugn och sodapannor före elektrofiltret).

Vid mätning inom den kemiska industrin rapporteras även igensättningar som en följd av kristallbildning i det kritiska munstycket.

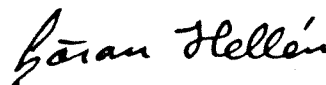
Vattendroppar har också förorsakat tilltäppningar vid mätning i mycket vattenmättade gaser efter våtavskiljare. Problemen med vattendropparna har lösts genom att förse sonden med "droppskydd".

I referens 3 redovisas erfarenheter från en praktisk utvärdering av EPM-provtagningssystemet under ett års tid (Craig Station, Unit 3 of the Colorado - Ute Association. Typ av bränsle, förbränningssätt, reningsutrustning och mätplats anges inte). Man har erhållit 95 % tillgänglighet hos mätutrustningen, 2-4 timmar/vecka har åtgått för underhåll. Inga tilltäppningar av munstycke, sond eller gasslangar har förekommit.

EKONO Oy, Energibranschen



Hannu Maskuniitty
Sektionschef
Pann- och förbränningsteknik



Göran Hellén
Planeringsingenjör

Referenser:

1. Värmeforsk, bränsleteknik 228 "Utsläpp av svavel- och kväveoxider till luft från fasta anläggningar - jämförbara mätningar"
2. SNV PM 1822 "Mätning av svavel- och kväveoxider i utsläpp till luft från fasta anläggningar"
3. EPM: "Report on field experiences with the EPM diluting stack sampler model 797.302 by Thermo Electron USA"
4. EPM: "Manual, Model 797 diluting stack sampler for monitoring gaseous emissions".

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

- Elforsk
- Värmeverksföreningen
- Övrig industri

Värmeforsk samarbetar med Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Box 1765 · 111 87 Stockholm
Tek: 08-7900600 · Fax 08-796 00 37