VÄRMEFORSK

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Utspädningssystem för mätning av utsläpp till luft Erfarenheter av långtidsdrift.

Gunnar Nyquist
Jonas Radö
Vaclav Vesely

BRÄNSLETEKNIK 306

NATURVÅRDSVERKET RAPPORT NR 3468

UTSPÄDNINGSSYSTEM FÖR MÄTNING AV UTSLÄPP TILL LUFT. ERFARENHETER AV LÅNGTIDSDRIFT

(Dilution probe technique for emission measurements of air pollutants. Experiences from field measurements)

GUNNAR NYQUIST
JONAS RADÖ
VACLAV VESELY

ISBN 91-620-3468-5
ISSN 0282-7298

Utgivningsår: 1988

FÖRORD

Vid analys av rökgaser med ett kontinuerligt, extraktivt mätsystem behövs ett tillförlitligt och driftsäkert gasberedningssystem. Nyligen har en ny typ av gasberedningssystem, som bygger på utspädning, blivit kommersiellt tillgängliga. I ett utspädningssystem späds provgasen med ren och torr luft i provtagningssonden. Därigenom undviks kondensation vid avkylning.

Tester av utspädningssystem har tidigare rapporterats för laboratorieförsök och kortare fältmätningar, men erfarenheter samlade under en längre tids användande finns inte beskrivna. Därför genomförde naturvårdsverkets luftlaboratorium denna undersökning för att prova funktionen av ett utspädningssystem vid långtidsdrift.

Rapporten vänder sig till tillsynsmyndigheter, industrier, förbränningsanläggningar, mätkonsulter och övriga som kan ha intresse av utrustning för kontinuerliga mätningar av utsläpp till luft.

Rapporten har granskats och godkänts för publicering av forskningsgruppen för Bränsleteknik vid Stiftelsen för värmeteknisk forskning.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		Sid
	SUMMARY	3
	SAMMANFATTNING	4
1.	BAKGRUND	5
2.	BESKRIVNING AV UTSPÄDNINGSSYSTEMET	6
3.	LABORATORIEMÄTNINGAR	11
	3.1 Inverkan av tryckförändringar	13
	3.2 Inverkan av rökgastemperatur	14
	3.3 Inverkan av rökgasens densitet	15
	3.4 Samband mellan spädluftens tryck och trycket efter det kritiska munstycket	16
	3.5 Inställning av kalibrergasflöde	17
	3.6 Bakgrundskoncentration	17
	3.7 Omvandlingsreaktioner och diffusionsförluster	17
4.	MÄTPLATS OCH PROCESS	18
	4.1 Idbäcksverket, Nyköping	18
	4.2 Kraftvärmeverket i Västerås	20
5.	MÄTSYSTEMETS UPPBYGGNAD	22
	5.1 Hastighetssond	24
	5.2 Gasberedningssystem	24
	5.3 Instrumentdel	25
	5.4 Datainsamlingssystem	29
6.	DRIFTSERFARENHETER	30
7.	MÄTPERIODER, TILLGÄNGLIGHET OCH TILLSYN	33

	sid
8. MÄTRESULTAT	36
8.1 Mätningar vid Idbäcksverket, Nyköping	36
8.2 Mätningar vid kraftvärmeverket i Västerås	40
9. DISKUSSION	42
10. REFERENSER	45

BILAGOR

Bilaga 1. Utspädningssystem på den svenska marknaden	46
Bilaga 2. Teknisk specifikation av utspädningssystemet Kipp Analytica, Model 797	47
Bilaga 3. Referensgasblandare (standard gas divider)	49
Bilaga 4. Fluorimetrisk bestämning av SO_2-koncentrationen	51
Bilaga 5. Kemiluminescensmetod för bestämning av NO_x	53
Bilaga 6. Mätning av rökgashastighet och rökgastemperatur	56
Bilaga 7. IR-instrument för bestämning av CO_2	58
Bilaga 8. Permeationstorkare (Perma Pure Dryer)	60
Bilaga 9. Resultat från Idbäcksverket, Nyköping	62
Bilaga 10. Resultat från kraftvärmeverket i Västerås	74
Bilaga 11. Formler	90
Bilaga 12. Felanalys för utspädningssystemet	95

Dilution probe technique for emission measurements of air pollutants. Experiences from field measurements

SUMMARY

Continuous measurements of certain gaseous pollutants in stack gases from stationary sources are often performed through extractive sampling. The reliability of these emission measurements are strongly influenced by the method of sampling and conditioning of the hot, dusty and corrosive stack gases. In this investigation, an EPM diluting stack sampler has been used. 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 transport to a set of analyzers. The purpose of the investigation was to test function, reliability and maintenance need of the diluting stack sampler.

Measurements were performed at combustion plants for three months in Nyköping (circulating fluidized bed; coal firing and sulfur reduction) and Västerås (coal-dust firing).

The experience from the diluting stack sampler after field measurements during six months is excellent. The system worked all the time without any problems. The only maintenance needed was the cleaning of the coarse filter once a week.

The conclusion of this investigation is that the dilution probe technique is easy to handle and maintain and is a reliable way to prepare gas samples for measurements of gaseous air pollutants from combustion plants.

KEY WORDS: Dilution probe technique, continuous measurements, emission, sulfur dioxide, nitrogen oxides, flue gases, fluidized bed, coal, coal-dust firing.

SAMMANFATTNING

Vid mätning av gaskomponenter i rökgaser med ett kontinuerligt, extraktivt mätsystem sugs en delgasström ut ur gaskanalen. Som regel måste detta gasprov sedan passera ett gasberedningssystem innan provgasen kan ledas in i analysinstrumenten. I denna undersökning användes ett EPM utspädningssystem för gasberedningen i stället för den konventionella metoden med kylare. Syftet med undersökningen var att pröva utspädningssystemets tillförlitlighet, driftsäkerhet och underhållsbehov.

Mätningar utfördes under tre månader vid vardera Idbäcksverket i Nyköping (cirkulerande fluidiserad bädd; koleldning med svavelreduktion) och kraftvärmeverket i Västerås (kolpulvereldning).

Erfarenheterna av utspädningssystemet är mycket goda efter totalt sex månaders fältmätningar. Systemet fungerade hela tiden utan problem och det enda underhåll som behövdes var backblåsning av grovfiltret en gång/vecka.

Slutsatsen som kan dras utifrån resultaten i denna undersökning är: användning av ett utspädningssystem är en lätthanterlig och driftsäker gasberedningsmetod vid extraktiva, kontinuerliga mätsystem vid koleldade förbränningsanläggningar (med låg stofthalt i rökgaserna).

1. BAKGRUND

Naturvårdsverkets luftlaboratorium utförde under två eldningssäsonger (84/85 och 85/86) mätningar av gaskomponenter och flöde vid Västerås kraftvärmeverk (ref 1). Syftet med dessa mätningar var att samla driftserfarenheter av ett konventionellt extraktivt mätsystem för kontinuerlig mätning av gaskomponenter (SO_2, NO och CO_2). Det mätsystem som användes i Västerås bestod av följande delar:

a) en sond för provtagning av gaser samt en hastighetssond för mätning av flöde och temperatur
b) ett gasberedningssystem där provgasen torkas och kyls
c) en instrumentdel med kontinuerligt registrerande instrument
d) ett databehandlingssystem

Tillgängligheten för det använda mätsystemet var inte tillfredsställande, framför allt beroende på korrosions- och kondensationsproblem. De två årens erfarenheter av denna typ av kontinuerliga, extraktiva mätsystem för rökgaser fick oss att studera alternativa mätmetoder.

En mycket intressant lösning är att använda ett utspädningssystem i stället för kylare för gasberedningen. Provgasen späds då med ren luft redan i provtagningssonden och därigenom undviks kondensation vid avkylning. Utspädningssystem finns kommersiellt tillgängliga och en utvärdering av ett sådant system har utförts i Värmeforsks regi. Slutomdömet var att ett utspädningssystem har bättre mätvärdestillgänglighet och lägre underhållskostnader jämfört med konventionell provtagning i gaskanaler med låg stofthalt (ref 2). De viktigaste fördelarna är:

- provtagningssond och provgasledningar behöver inte värmas upp och ingen provgaskylare 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 redan i sonden, omedelbart efter grovfiltret

- hela systemet kan lätt automatiseras
- långa provgasledningar kan användas (upp till 100 m).

Utspädningssystemet har också vissa felkällor. De viktigaste felkällorna som kan påverka mätresultatet är:

- tryckförändringar i gaskanalen
- rökgasens densitet
- förändringar i rökgasens temperatur.

Omdömena om utspädningssystemet var positiva (ref 2). Men fungerar systemet lika bra efter en lång driftstid? Hur är systemets tillgänglighet och hur ofta behövs tillsyn och service? För att kunna besvara dessa och andra frågor startade naturvårdsverkets luftlaboratorium ett långtidsförsök. Målet för undersökningen var att utröna om ett utspädningssystem är en tillförlitlig och driftsäker gasberedningsmetod vid kontinuerliga, extraktiva emissionsmätningar.

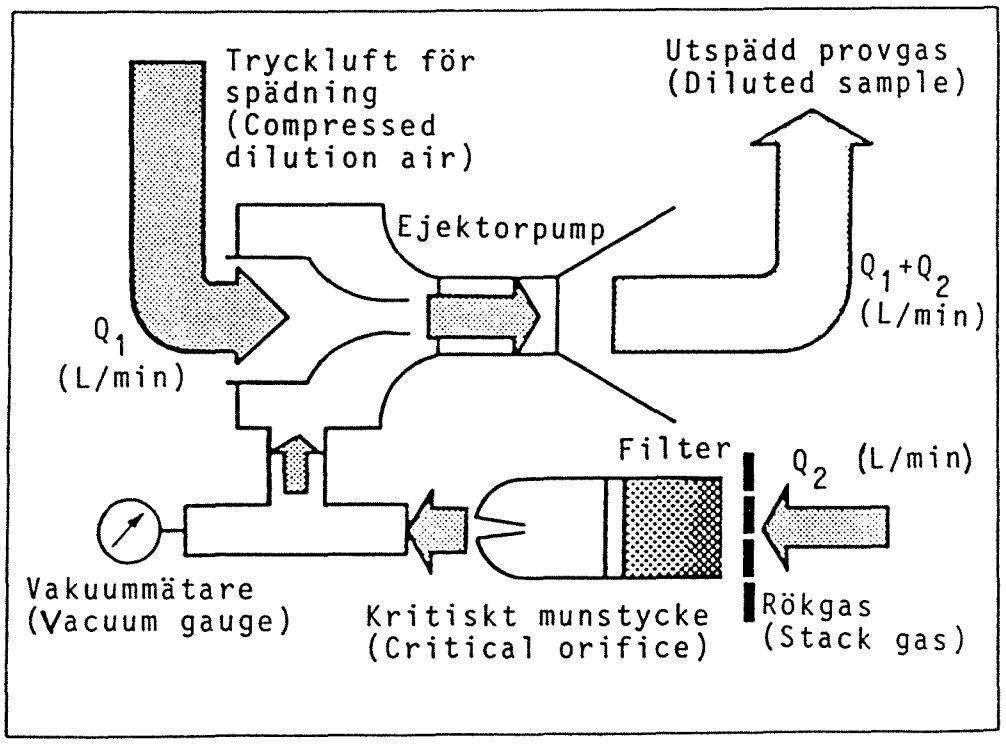
Mätningar utfördes under tre månader vid Idbäcksverket i Nyköping (värmeverk med cirkulerande fluidiserande bädd, CFB, och avsvavling) och tre månader vid kraftvärmeverket i Västerås (block 2, kolpulvereldning utan avsvavling). Försöket utfördes således dels i en förbränningsanläggning med låga halter SO_2 och NO_x, dels i en anläggning med betydligt högre halter. Stofthalten var i båda fallen låg (elektrofilter), i regel <25 mg/m^3. Förutom halterna av SO_2 och NO_x mättes också CO_2-halten och rökgashastigheten.

2. BESKRIVNING AV UTSPÄDNINGSSYSTEMET

I ett kontinuerligt, extraktivt mätsystem sugs en delgasström ut ur rökgaskanalen. Detta gasprov passerar först genom ett gasberedningssystem innan provgasen leds in i analysinstrumenten. Gasberedningssystemets uppgift är att skydda instrumenten för partiklar och kondensbildning, samt att åstadkomma konstanta förhållanden när det gäller tryck, temperatur och flöde.

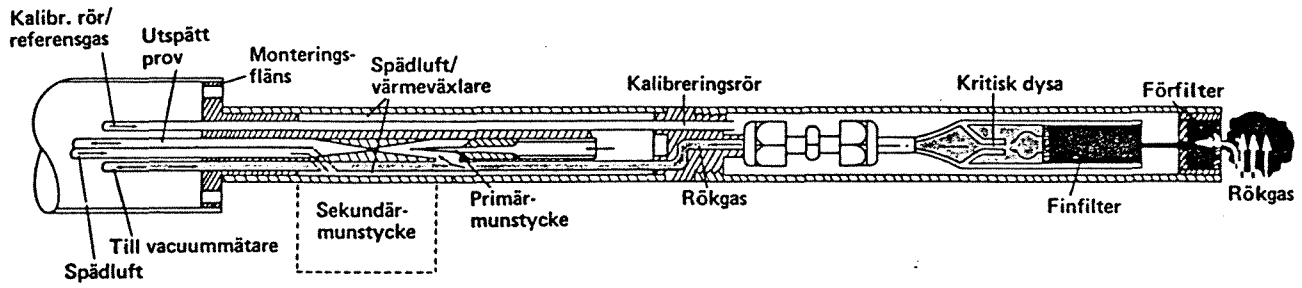
De flesta konventionella extraktiva system kräver komplicerade filter, uppvärmd provgasledning för att undvika kondensation, kylare för att torka provgasen och kraftiga pumpar som kommer i direkt kontakt med provgasen. Detta ställer stora krav på tillsyn och underhåll av utrustningen.

Genom att använda ett utspädningssystem förenklas gasberedningen avsevärt. Utspädningssystemet fungerar enligt följande princip: En liten kontinuerlig provgasström sugs ut ur gaskanalen, filtreras och späds med torr ren luft direkt i provtagningssonden. Sonden kan vara separat upphettad men oftast räcker det att utspädningsluften uppvärms till provtagningspunktens temperatur genom den i sonden inbyggda värmeväxlaren. Principen för utspädningssystemet visas i figur 1 nedan.



Figur 1. Principen för utspädningssystemet.
(Working principle of diluting stack sampler.)

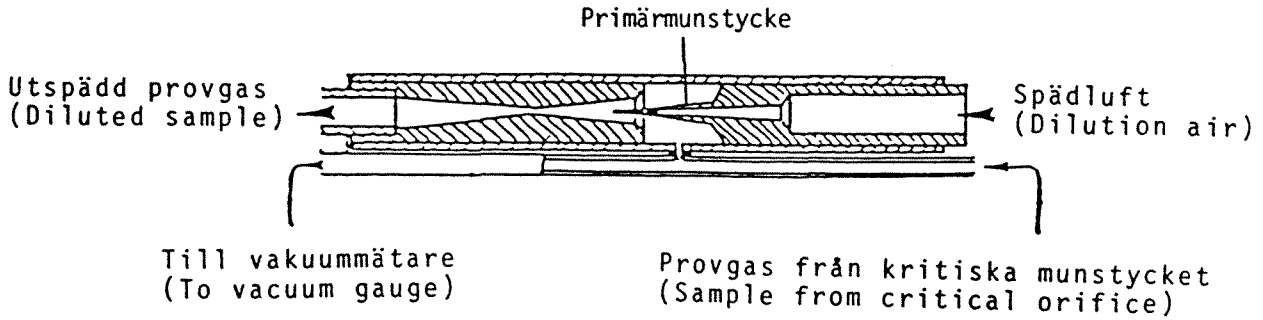
Utspädningssystemet består av en provtagningssond och en reglerenhet. Sondens uppbyggnad framgår av figur 2 nedan.



Figur 2. Utspädningssondens uppbyggnad.
(Design of the dilution stack probe.)

Rökgasen sugs genom ett förfilter (som kan rensas genom backblåsning), ett finfilter (som avlägsnar partiklar >1 µm) och ett kritiskt munstycke innan den blandas i önskad proportion med ren luft. För ett kritiskt munstycke gäller att om trycket efter munstycket (i flödesriktningen) är ca hälften av trycket före munstycket, uppnås ett s k kritiskt flöde. Det som då begränsar flödet genom munstycket är den högsta möjliga hastigheten av de enskilda molekylerna, dvs ljudhastigheten. Flödesvolymen kommer att vara konstant och oberoende av det exakta trycket efter munstycket, men beroende av det absoluta trycket före munstycket (se ekv 1, sid 11 och 3.1).

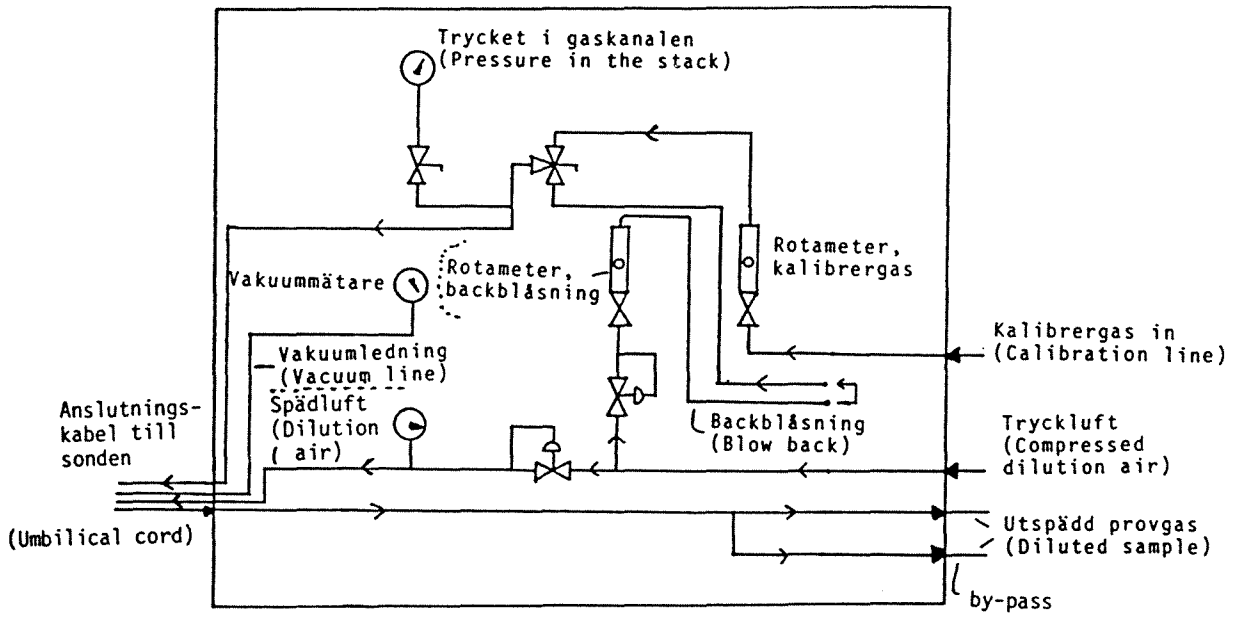
Det vakuum som suger rökgasen genom det kritiska munstycket åstadkoms med hjälp av en ejektorpump. Utformningen av ejektorpumpen framgår av figur 3 nedan.



Figur 3. Ejektorpumpens utformning.
(Ejector pump construction.)

Noggrannheten i spädningsförhållandet är ca ± 2 %. Genom utspädningen sänks provets daggpunkt som regel till ca -40 °C, vilket medför att provgasledningarna mellan sonden och analysinstrumenten inte behöver vara uppvärmda. Enligt uppgift kan upp till 100 meter långa ledningar användas.

Provtagningssonden är via en kabel, med fyra separata gasledningar, förbunden med en kontrollenhet. En ledning förser ejektorpumpen med ren och torr tryckluft (max 6 bar) för utspädningen. En annan ledning används för att mäta undertrycket efter det kritiska munstycket (jfr figur 1 och 2). En tredje ledning kan genom omställning av en reglerventil användas för tre olika funktioner: tillförsel av kalibreringsgas, backblåsning med tryckluft för rengöring av grovfiltret eller för att mäta det relativa trycket i gaskanalen. I den fjärde ledningen transporteras den utspädda provgasen. Kontrollenhetens flödesschema visas i figur 4 nedan.



Figur 4. Flödesschema för utspädningssystemets kontrollenhet.
(Flow diagram of the control module of diluting stack sampler.)

Spädluften skall vara torr och filtrerad för partiklar >1 µm. Kalibrering utförs genom att leda in kalibreringsgas i provtagningssonden omedelbart efter förfiltret (jfr fig 2). Kalibreringsgasen behandlas då på samma sätt som rökgasen, dvs den passerar finfiltret och det kritiska munstycket innan spädningen i ejektorpumpen. Därigenom kompenseras för eventuella förluster i systemet.

Eftersom gaskoncentrationen sänks genom utspädningen krävs känsligare analysinstrument än vid direktmätning. För att erhålla maximal känslighet utnyttjas främst instrument som normalt används för omgivningsmätningar (immission).

Med ett utspädningssystem sker mätningarna på "våt" rökgas, dvs ingen torkning sker av rökgasen före utspädningen. Efter spädningen med torr tryckluft är vattenhalten i regel så låg att den spädda provgasen kan ledas direkt in i analysinstrumenten (fukthalt <0,1 %). För att skydda instrumenten bör emellertid någon typ av fuktvakt installeras, t ex en fuktsensor som stänger av systemet vid för hög fukthalt eller en permeationstorkare som håller fukthalten konstant låg. Skall koncentrationen av den mätta gaskomponenten anges för torr gas måste man kompensera för rökgasens vattenhalt enligt $c = x/(1-f)$, där c är koncentrationen i torr gas, x är den uppmätta halten och f är rökgasens fukthalt.

Utspädningssystem levereras av flera instrumenttillverkare, men själva provtagningssonden är i alla fallen identisk och tillverkas av ett holländskt företag under namnen EPM (Environment & Process Monitoring) eller Kipp Analytica. De olika utspädningssystemen skiljer sig endast genom utformningen av kontrollenheten. En förteckning över utspädningssystem på den svenska marknaden finns i bilaga 1.

Det utspädningssystem som användes vid denna undersökning var från Kipp Analytica: model 797 Diluting Stack Sampler. En teknisk specifikation av systemet finns i bilaga 2.

3. LABORATORIEMÄTNINGAR

Med utspädningssonden uttas en delström av rökgasen från gaskanalen. Utsugningen sker med hjälp av en ejektorpump. Denna fungerar på så sätt att då tryckluft blåses genom det primära munstycket i ejektorpumpen, uppstår ett undertryck som suger rökgasen genom det kritiska munstycket (jfr figur 2 och 3). Som tidigare nämnts gäller för ett kritiskt munstycke att om trycket efter munstycket är mindre än hälften av trycket före, så är flödet konstant (jfr sid 8). Flödesvolymen bestäms då av det kritiska munstyckets nominella flöde. En måttlig ökning av spädluftens tryck ger ett ökat flöde genom ejektorpumpen, men medför alltså ingen ökning av flödet genom det kritiska munstycket. Däremot kommer spädningsförhållandet att påverkas (jfr figur 1).

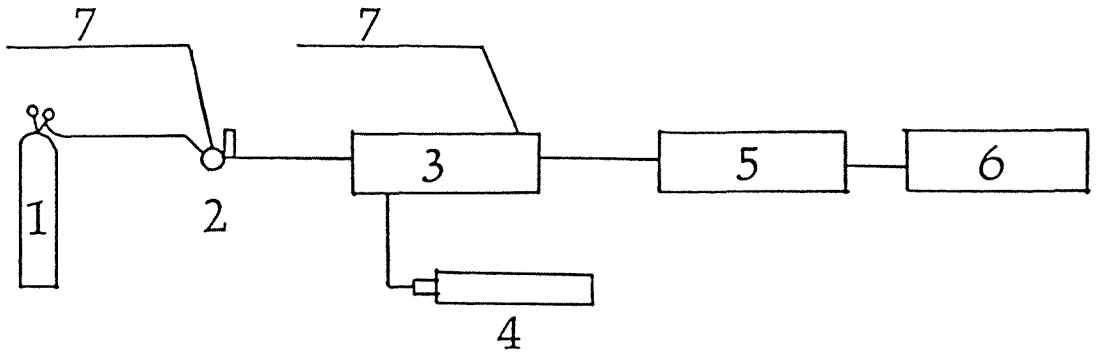
Allmänt gäller för kritiska flöden genom munstycken följande samband (se vidare ref 3):

$$Q = k \times P/(\rho_o \sqrt{T}) \qquad (1)$$

där
- Q = flödesvolymen genom munstycket
- k = konstant
- P = absoluta ingångstrycket
- ρ_o = gasens densitet vid normaltillstånd
- T = gasens absoluta temperatur

Ur ekvation 1 framgår att de faktorer som påverkar provgasflödet, och därmed utspädningsförhållandet, är:
- tryckförändringar i gaskanalen
- densiteten av rökgasen
- ändring av rökgasens temperatur

För att ta reda på hur stor effekt som ändringar av ovanstående parametrar har på mätresultatet, användes det i figur 5 nedan visade systemet för laboratorietest. Liknande undersökningar har tidigare beskrivits, jfr ref 2 och 4.



1. Kalibreringsgas (calibration gas); SO_2, NO
2. Referensgasblandare (standard gas divider); Horiba
3. Utspädningssystemets kontrollenhet (control module of the dilution stack sampler)
4. Utspädningssond (dilution stack probe)
5. Analysinstrument (gas monitor)
6. Skrivare (recorder)
7. Tryckluft eller kvävgas (pressurized air or nitrogen)

Figur 5. Uppställning för laboratorietest av utspädningssystemet. (Design of the system for laboratory test of the dilution stack sampler.)

Den utrustning som användes var:

- kalibreringsgaser för svaveldioxid, SO_2 (667 ppm) och kväveoxid, NO (210 och 810 ppm)
- referensgasblandare från Horiba. Blandade kalibreringsgasen med luft eller kvävgas i fasta steg (0, 20, 40, 60, 80, eller 100 % kalibreringsgas i blandningen), se vidare i bilaga 3
- utspädningssystem Kipp Analytica Model 797
- analysinstrument:

  svaveldioxid: Monitor Labs, model 8850 (se bilaga 4)

  kväveoxid: Monitor Labs, model 8440 och Thermo Electron, model 10AR (se bilaga 5)

3.1 Inverkan av tryckförändringar

Ur ekvation 1 följer att en ändring av trycket i gaskanalen medför en procentuellt lika stor ändring av analysinstrumentets utslag. Utförda laboratorieförsök bekräftade att den teoretiska förutsägelsen är riktig (jfr ref 2). Laboratorieförsöken utfördes enligt följande:

- analysinstrument: Monitor Labs model 8440
- kalibreringsgas: NO, 210 ppm
- temperatur: 20 ^{o}C
- a) kritiskt munstycke 50 ml
  - undertryck: 0,5 bar
  - spädluft: 2,0 bar
  - referensgasflöde: 300 ml/min
  - ökning av ingångstrycket: 0, 30, 55, 70 och 95 mbar
  - referensgasblandningar: 40, 60, 80 och 100 %
- b) kritiskt munstycke: 250 ml
  - undertryck: 0,5 bar
  - spädluft: 2,2 bar
  - referensgasflöde: 600 ml/min
  - ökning av ingångstrycket: 0, 30, 60 och 100 mbar
  - referensgasblandningar: 60, 80 och 100 %

Resultatet av mätningarna var entydigt. Om exempelvis ingångstrycket ökades 10 % blev också instrumentutslaget 10 % högre, oberoende av vilken referensgasblandning som mättes.

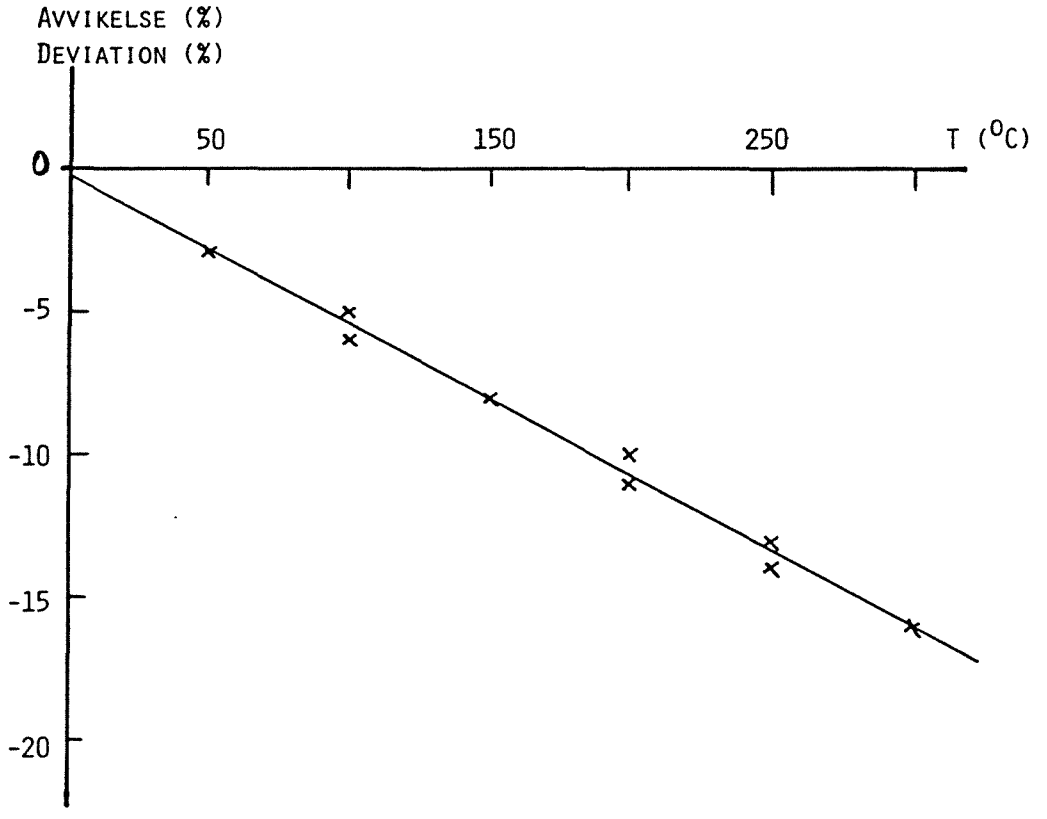
En ändring av rökgaskanalens statiska tryck kan orsakas av variationer i både atmosfärstrycket och rökgashastigheten (belastningen hos anläggningen).

Variationen i atmosfärstrycket är maximalt ca 50 mbar, vilket motsvarar en avvikelse i analysinstrumentets utslag på 5 %. I praktiken är lufttrycksvariationerna mellan två kalibreringstillfällen betydligt lägre. Mätfelet som beror på variationer i atmosfärstrycket kan uppskattas till $\pm$ 2 %.

Som en följd av förändringar i gashastigheten förändras det statiska trycket i rökgaskanalen med maximalt ca 10 mbar, dvs 1 % (ref 2). Vid de fältmätningar som utfördes under detta projekt var det relativa trycket i gaskanalen oförändrat ca -2 mbar.

3.2 Inverkan av rökgasens temperatur

Flödesvolymen genom det kritiska munstycket i utspädningssonden är beroende av temperaturen i rökgaskanalen. Enligt ekvation 1 (och allmänna gaslagen) minskar flödesvolymen genom det kritiska munstycket då temperaturen ökar, och om spädgasflödet är konstant innebär det att utslaget på analysinstrumentet blir lägre om temperaturen höjs efter det att kalibrering har utförts. Resultatet av utförda laboratorieförsök redovisas i figur 6 nedan.



Figur 6. Relativa instrumentutslaget vid olika temperatur i gaskanalen.
(Relative instrumental reading at different temperatures in the flue gas canal.)

Av figuren framgår att en temperaturförändring av 10 ^{o}C medför en avvikelse i mätinstrumentutslaget på ca 0,5 %, vilket är ungefär hälften av vad som tidigare har rapporterats (ref 2). Resultaten förändrades inte om kalibreringsgasen blandades med luft i stället för kvävgas (20-80 %) innan den leddes in i utspädningssonden. För att ytterligare bekräfta att resultatet var reproducerbart användes två olika mätinstrument och kalibreringsgaser med två olika koncentrationer. Laboratorieförsöken utfördes enligt följande:

- kritiskt munstycke: 50 ml
- undertryck: 0,5 bar
- spädluft: 2,0 bar
- referensgasblandningar: 20, 40, 60, 80 och 100 %
- a) analysinstrument: Monitor Labs model 8440
  - kalibreringsgas: NO, 210 ppm
  - referensgasflöde: 300 ml/min
- b) analysinstrument: Thermo Electron model 10AR
  - kalibreringsgas: NO, 810 ppm
  - referensgasflöde: 600 ml/min

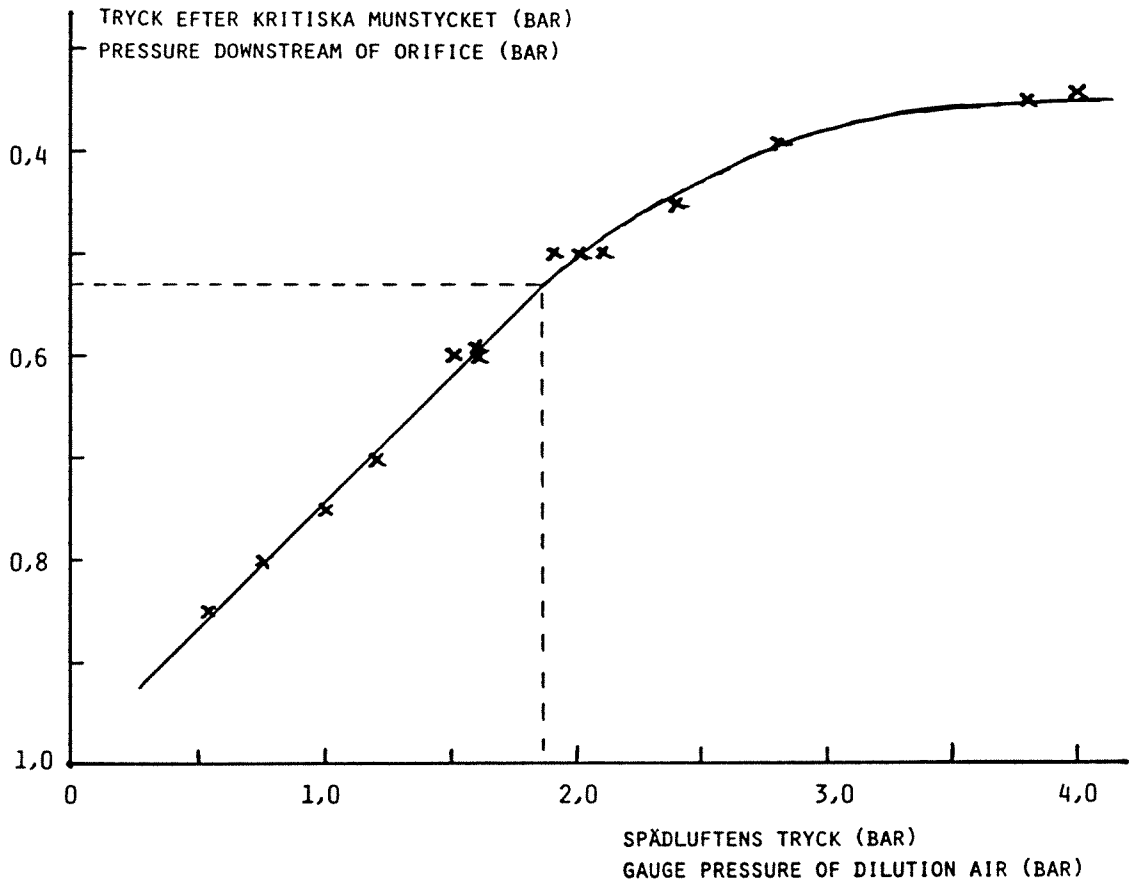
3.3 Inverkan av rökgasens densitet

Mätsystemet kalibreras med en gasblandning (kalibreringsgas) som innehåller den önskade gaskomponenten blandad med kvävgas. Kalibreringsgasens densitet är för NO och SO_2 1,25 kg/Nm^3 och för CO_2 1,36 kg/Nm^3 (Nm^3 avser förhållandet vid 1,013 bar och 0 ^{o}C). Tätheten av provgasen beror på sammansättningen (varierar med processen) och kan variera mellan ca 1,15-1,35 kg/Nm^3. Vid koleldade förbränningsanläggningar är rökgasens densitet ca 1,31-1,33 kg/Nm^3 (CO_2 = 10-13 %; H_2O = 6 %), men efter utspädning med instrumentluft blir densiteten av den utspädda provgasen ca 1,29. Genom att sätta in dessa värden i ekv 1 ser man att vid koleldning

- är relativa avvikelsen som beror på rökgasens sammansättning ca $\pm$ 1 %,
- medför skillnaden i densitet mellan kalibreringsgasen och rökgasen att instrumenten för SO_2 och NO visar ca 5 % för låga och för CO_2 ca 3 % för höga värden efter kalibrering (systematisk avvikelse).

3.4 Samband mellan spädluftens tryck och trycket efter det kritiska munstycket

En ökning av spädluftens tryck medför att flödet genom ejektorpumpen ökar och därmed förstärks vakuumet efter det kritiska munstycket. Sambandet mellan trycket efter det kritiska munstycket och spädluftens tryck visas grafiskt i figur 7 nedan.



Figur 7. Trycket efter det kritiska munstycket som funktion av spädgasens tryck.
(Pressure downstream of orifice versus gauge pressure of dilution air.)

Enligt teorin gäller att om absoluta trycket efter det kritiska munstycket är <0,53 bar (under förutsättning att trycket före munstycket är 1,0 bar; ref 3) så är flödesvolymen genom munstycket oberoende av det exakta trycket efter munstycket, dvs ett kritiskt flöde har uppnåtts. Ur figur 7 framgår att om spädluftens tryck är större

än ca 1,9 bar uppnås ett kritiskt flöde. För spädluftstryck ned till ca 1,2 bar avviker flödesvolymen genom munstycket obetydligt från ett kritiskt flöde (jfr ref 4). Vid fältmätningarna ställdes trycket av spädluften in på 4,0 bar, vilket gav ett tryck efter det kritiska munstycket på 0,37 - 0,38 bar.

3.5 Inställning av kalibrergasflöde

Mätsystemet kalibreras genom att referensgas införs i utspädningssonden omedelbart efter sondens grovfilter. Vid en korrekt kalibrering skall referensgasflödet vara minst dubbelt så stort som flödet genom det kritiska munstycket. Tillverkaren rekommenderar att referensgasflödet är minst fyra gånger munstyckets nominella flödesvolym. Laboratorieförsök utförda av Göran Hellén visar att det referensgasflöde som tillverkaren rekommenderar räcker väl (ref 2). Någon avvikelse i analysatorns utslag skedde inte förrän referensgasflödet var mindre än två gånger flödet genom munstycket.

3.6 Bakgrundskoncentration

Då rökgasen späds, sänks koncentrationen av de olika gaskomponenterna till en nivå där en eventuell bakgrundskoncentration hos spädluften blir betydelsefull. Om bakgrundshalten är konstant över tiden behöver ingen åtgärd vidtagas. I annat fall måste den aktuella komponenten elimineras ur spädgasen.

3.7 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 uppvärmt konventionellt system.

Som utspädningsgas används vanligen luft. För att minimera eventuella omvandlingsreaktioner i provgasslangarna kan en inert gas, t ex kvävgas, användas.

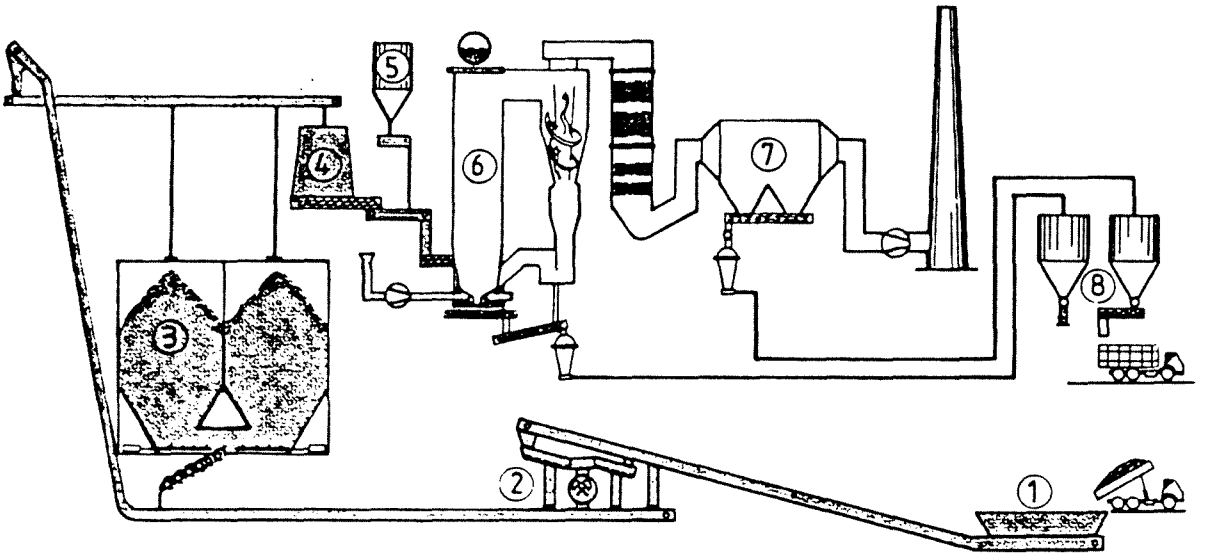
4. MÄTPLATS OCH PROCESS

4.1 Idbäcksverket, Nyköping

Idbäcksverket svarar för basproduktionen av hetvatten till fjärrvärmesystemet i Nyköping. Anläggningen består av två stycken CFB-pannor för eldning av fasta bränslen. CFB står för Cirkulerande Fluidiserad Bädd, en teknik som utvecklats av Götaverken Systems AB för eldning av kol och inhemska bränslen såsom träflis, torv och bränslepellets. I Nyköping baseras fjärrvärmeproduktionen på kol.

I CFB-pannornas eldstad finns en sandbädd där en del av förbränningsluften blåses in genom bottendysor. Sand och bränsle svävar - fluidiserar - i luftströmmen. Genom att ändra bäddens sandmängd kan pannan ställas om för bränslen med olika förbränningsegenskaper. Energiupptagning i pannornas vattenrörväggar reglerar så att optimal temperatur hålls. Förbränning sker genom att bränsle som tillförs den glödande sanden antänds och brinner i den cirkulerande sandmassan. De partiklar som blåser ut ur eldstaden avskiljs i hetcykloner och återförs till botten av bädden.

En skiss över anläggningen finns i figur 8 nedan.



1. Bränslemottagning – tippficka
2. Bränslesåll – kvarn
3. Bränsleförråd
4. Dagsilo
5. Kalkstens/sandsilos
6. CFB-panna
7. Elektrofilter
8. Asksilos

Figur 8. Principskiss över Idbäcksverket, Nyköping.
(Plan of Idbäcksverket in Nyköping with a Circulating Fluidized Bed for combustion of coal.)

Idbäcksverket har två CFB-pannor med en effekt av 40 MW (termisk) vardera. Årsförbrukningen av kol är ca 50 000 ton, av kalk ca 2 000 ton och av sand ca 600 ton. Bränsleförbrukningen är 163-168 kg kol/MWh beroende på pannlast. Vid 90 % avsvavling är kalkförbrukningen 35-40 kg per ton kol.

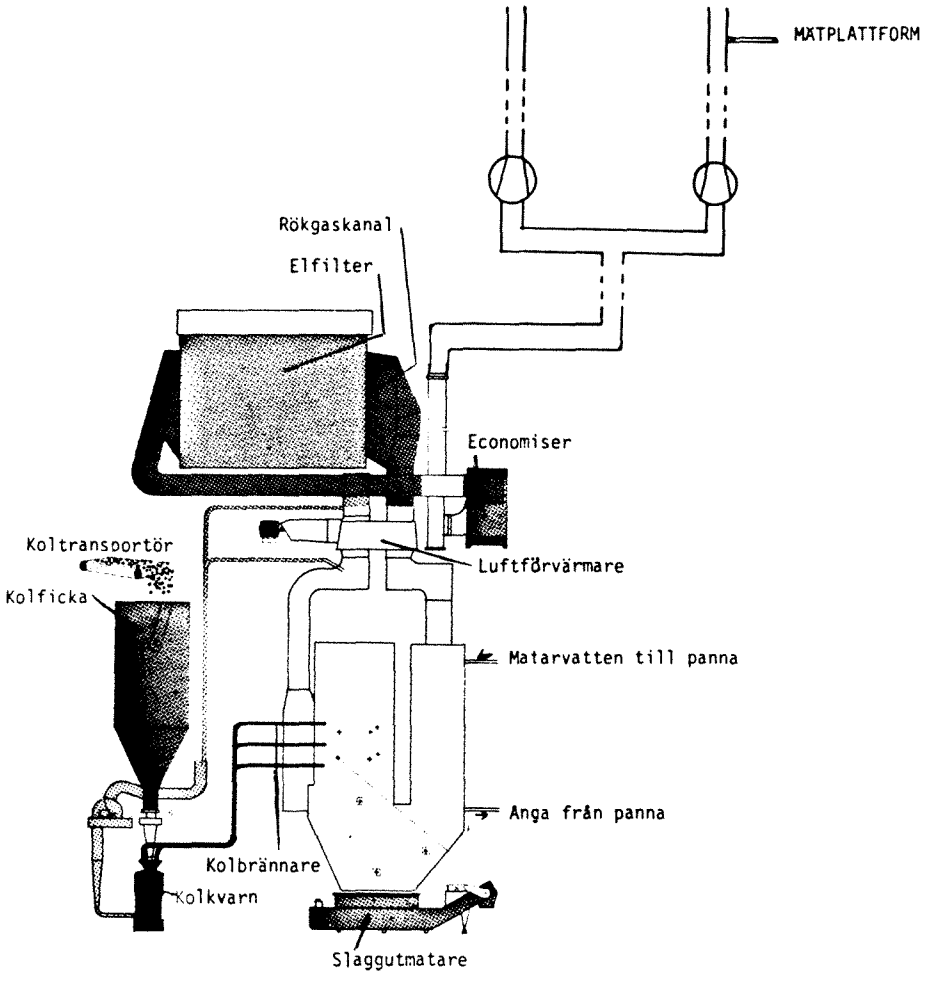
Mätningarna utfördes 18 meter upp i skorstenen. Skorstenen utgörs av en bärande betongkonstruktion innehållande två separata rökgaskanaler. Totala skorstenshöjden är 80 meter. Från mätplatsen drogs provgasledning och elektriska ledare till en mätvagn där all övrig utrustning var samlad (se vidare kapital 5). Mätvagnen var placerad utomhus vid foten av skorstenen. Diametern på rökgaskanalen var 1,05 meter.

4.2 Kraftvärmeverket i Västerås

Ett kraftvärmeverk är en anläggning för produktion av både elkraft och värme. Västerås kraftvärmeverk har fyra block. Varje block består av en ångpanna och en turbin. Block 1 och 2, som är äldre och mindre, används för kombinerad produktion av elkraft och fjärrvärme. Vid behov kan också enbart värme produceras. Block 3 och 4 kan användas för kombinerad produktion eller för kondensdrift. Enbart värmeproduktion är också möjlig. Block 1, 2 och 4 kan antingen eldas med kol eller olja, block 3 endast med olja.

I stora kvarnar mals kolet till ett fint pulver som via ett rörsystem blåses in i pannorna vid brännarna. Varje panna har flera kvarnar och brännare. Dessa brännare kan också användas för oljeeldning.

Mätningarna utfördes efter elektrofiltret i rökgaskanalen från block 2. Någon avsvavlingsanläggning fanns inte på detta block. Produktionen vid kolpulvereldning är för block 2 vid kombinerad drift 40 MW eleffekt och 110 MW värmeeffekt. En skiss över block 2 finns i figur 9 nedan.



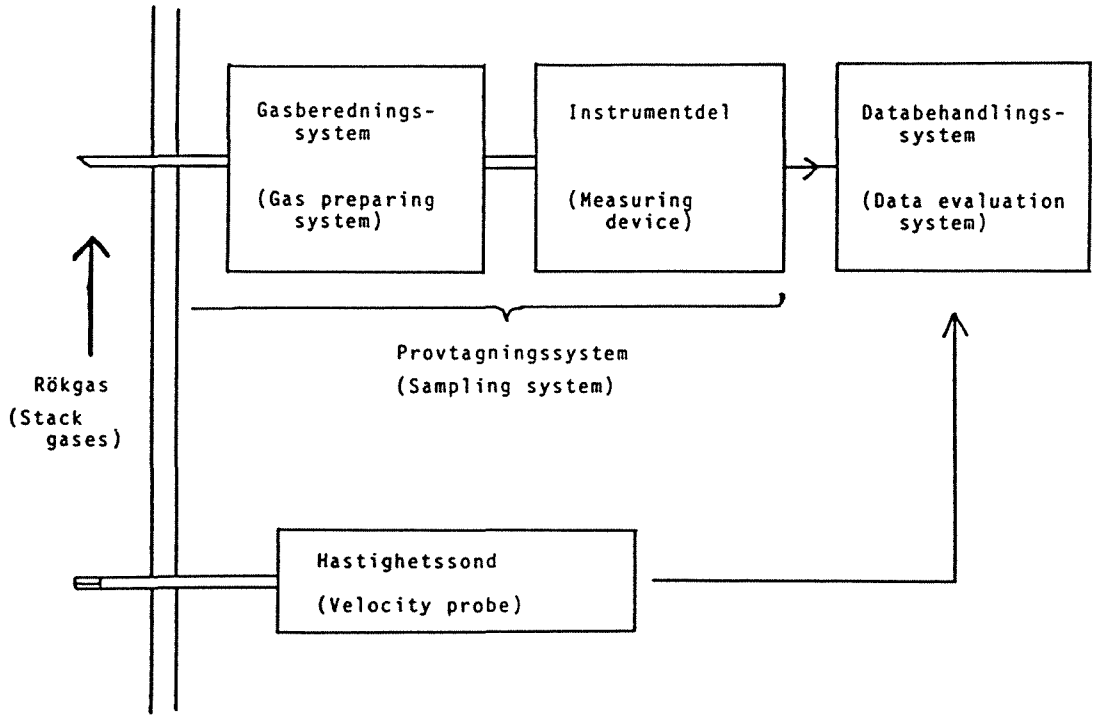
Figur 9. Västerås kraftvärmeverk, block 2.
(Block 2 of the heat and power station of Västerås.)

Mätplattformen var belägen ca 60 meter över markplanet och inomhus (jfr figur 9). Från mätplattformen drogs provgasledning och elektriska ledare till en mätvagn där all övrig utrustning var samlad (se vidare kapitel 5). Mätvagnen var placerad inomhus på ett plan 54 meter över markplanet.

Diametern på rökgaskanalen vid mätplatsen var 1,7 meter. Skillnaden i rökgasflöde mellan kanalerna efter förgreningen är enligt uppgift högst 5 %.

5. MÄTSYSTEMETS UPPBYGGNAD

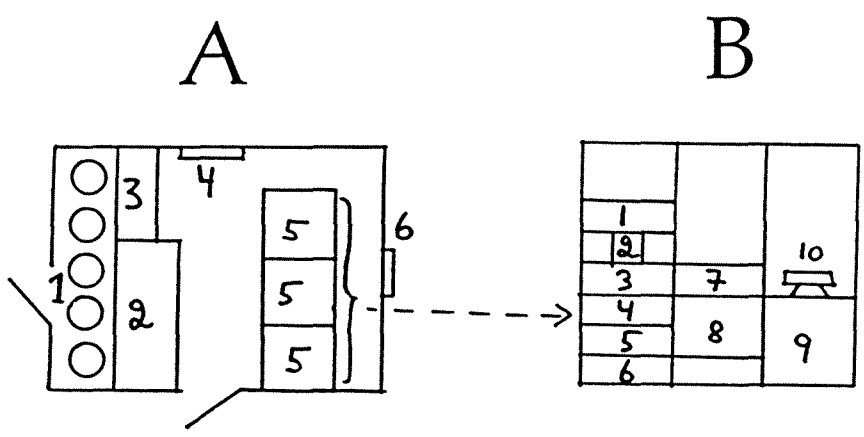
En principskiss över uppbyggnaden av det använda mätsystemet visas i figur 10 nedan.



Figur 10. Mätsystemets uppbyggnad.
(Design of the measuring system.)

Den använda mätmetoden är extraktiv, dvs provgasen sugs ut ur rökgaskanalen och transporteras till analysinstrumenten. Detta till skillnad mot in situ-metoder, där mätningarna sker direkt i rökgaskanalen. En extraktiv metod kräver, i motsats till en in situ-metod, ett gasberedningssystem vilket är fördyrande och kräver extra tillsyn och underhåll. Fördelarna är att känslighet och precision i mätningarna oftast är bättre samt att det är mycket lättare att kalibrera instrumenten. Utvecklingen på instrumentsidan går emellertid snabbt framåt och en helt ny teknik för in situ-mätningar av olika gaskomponenter har blivit kommersiellt tillgänglig. Denna nya teknik, kallad DOAS (differentiell optisk absorptionsspektroskopi), håller f n på att utvärderas av naturvårdsverkets luftlaboratorium.

Utrustningen samlades i en för ändamålet särskilt inredd vagn. Endast utspädningssonden och hastighetssonden behövde placeras vid mätplattformen. Fördelen med en mätvagn är att utrustningen finns samlad i ett enda utrymme under kontrollerade betingelser, t ex reglerad temperatur; fritt från damm och korrosiva gaser. Övriga fördelar är att mätvagnen kan låsas till så obehörigt ingrepp förhindras, möjlighet finns att utföra en del reparationen på platsen och hela mätutrustningen kan lätt flyttas från en anläggning till en annan. Hur utrustningen var placerad i mätvagnen framgår av figur 11 nedan.



1. Gastuber (gas cylinders)
2. Arbetsbord (bench)
3. Skåp (cupboard)
4. Elvärme (electric radiator)
5. Rack
6. Ventilation

1. Kontrollenhet för utspädningssonden (control module of the diluting stack probe)
2. CO_2; 3. SO_2; 4+5. NO_x
6 + 9. Pump
7. Kalibreringskontroll (calibration control unit)
8. RACU (remote aquisition and control unit)
10. Voltmeter

Figur 11. Skiss över mätvagnen. A/ Disposition av utrymmet. B/ Instrumentens inplacering i racken.
(Carriage for the measuring equipment. A/ General design. B/ Design of the instrument rack.)

5.1. Hastighetssond

Rökgasens flödeshastighet och temperatur mättes med en separat hastighetssond: Kurz, Model 455 TM-X. Mätprincip och teknisk beskrivning finns i bilaga 6. Instickslängden var 50 cm i Idbäcksverket och ca 80 cm i Västerås. Hastighetssonden och utspädningssonden var instuckna i rökgaskanalen rakt ovanför varandra i samma diagonal i Idbäcksverket och i 90° vinkel till varandra i Västerås.

Traversering utfördes vid kraftvärmeverket i Västerås. Flödet mättes på var tionde centimeter över ena diagonalen. Av tekniska skäl kunde dock flödet inte mätas närmare kanalväggen än ca 15 cm. Ingen mätbar skillnad i flödeshastighet iakttogs längs mätsträckan.

Någon separat mätning med pitotrör utfördes inte. I stället har de uppmätta rökgashastigheterna jämförts med de teoretiska, vilka har beräknats utgående från kolförbrukningen (jfr sid 36 och 40).

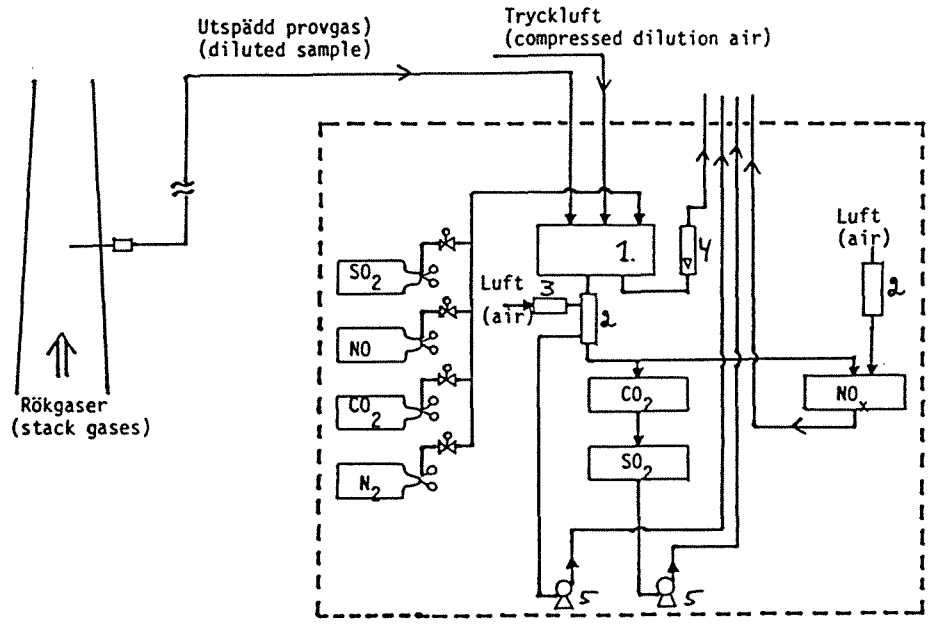
5.2 Gasberedningssystem

De flesta extraktiva gasanalysatorer kräver någon form av gasberedningssystem innan mätgasen kan passera in i analysatorn. Gasberedningssystemets uppgift är i första hand att skydda gasanalysinstrumenten mot fasta föroreningar och kondensbildning samt att åstadkomma konstanta förhållanden med avseende på tryck, temperatur och flöde.

För gasberedning användes vid denna undersökning ett utspädningssystem. Huvudsyftet med projektet var ju att göra en utvärdering av ett utspädningssystem vid kontinuerliga långtidsmätningar. Utspädningssystemet finns beskrivet i kapitel 2 och bilaga 2.

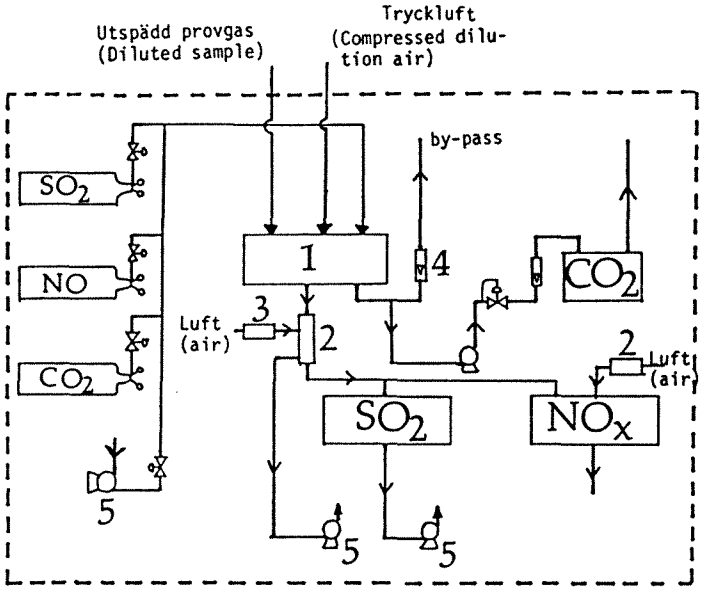
5.3 Instrumentdel

Gasanalysinstrumenten för SO_2, NO_x och CO_2 var monterade i en rack i mätvagn (jfr fig 11). Instrumentdelen (med kringutrustning), såsom den var uppbyggd vid mätningarna i Idbäcksverket i Nyköping, visas i figur 12. Systemet modifierades i vissa delar till mätningarna vid kraftvärmeverket i Västerås, vilket framgår av figur 13. Den viktigaste skillnaden är en noggrann reglering av trycket i CO_2-instrumentet, vilket skedde genom installation av tryckventil, pump och flödesmätare (se vidare kap 6).



1. Kontrollenhet för utspädningssonden (control module of the diluting stack probe)
2. Permeationstorkare (perma pure dryer)
3. Blågel (silica gel)
4. Flödesmätare (flow meter)
5. Pump

Figur 12. Instrumentdelens uppbyggnad vid mätningar i Idbäcksverket, Nyköping.
(Design on the measuring device used at Idbäcksverket, Nyköping.)



1. Kontrollenhet för utspädningssonden (control module of the diluting stack probe)
2. Permeationstorkare (perma pure dryer)
3. Blågel (silica gel)
4. Flödesmätare (flow meter)
5. Pump

Figur 13. Instrumentdelens uppbyggnad vid mätningarna i kraftvärmeverket i Västerås.
(Design of the measuring device used at the heat and power station of Västerås.)

Referensgaserna tillförs systemet redan i utspädningssonden, omedelbart efter grovfiltret och före det kritiska munstycket. På så sätt blir hela mätsystemet kalibrerat, dvs eventuella förluster på vägen mellan sonden och analysinstrumentet blir kompenserade.

SO_2-instrument:

Det kontinuerligt registrerande SO_2-instrument som användes var Monitor Labs, Model 8850. Mätprincipen är pulsfluorescens. En beskrivning av mätprincipen och instrumentet finns i bilaga 4.

NO_x-instrument:

Koncentrationen av NO/NO_x bestämdes med ett kontinuerligt registrerande instrument från Monitor Labs, Model 8440. Mätprincipen är kemiluminescens. En beskrivning av mätprincip och instrument finns i bilaga 5.

CO_2-instrument:

För att bestämma CO_2-koncentrationen i den utspädda rökgasen användes ett instrument från Horiba, Model PIR-2000. Mätprincipen är NDIR (non-dispersive infrared). Mätprincip och instrumentbeskrivning finns i bilaga 7.

Kalibrering:

Vid kalibreringen anslöts gasledningen från den aktuella kalibreringsgasen manuellt till utspädningssondens kontrollenhet, och vid byte av kalibreringsgas skiftades helt enkelt gasanslutningsslangar. Nollgas framställdes genom att rena omgivningsluft (se nedan).

Kalibreringen omfattade hela provtagningssystemet eftersom referensgaserna tillfördes redan i provtagningssonden. Kalibrering utfördes manuellt ca en gång/vecka. Kalibreringspunkten var nollpunkt (nollgas) och referenspunkt (kalibreringsgas). Innan mätningarna startades i Nyköping resp Västerås, kontrollerades instrumentens linearitet på laboratoriet genom att med en referensgasblandare (från Horiba; se bilaga 3) blanda kalibreringsgas och kvävgas i fasta steg (0, 20, 40, 60, 80 och 100 %). En linearitetskontroll utfördes också i fält en gång vid vardera mätplatsen. Mätutslagen följde mycket väl en rät linje (korrelationskoefficient r = 0,99).

Koncentrationerna av de använda kalibreringsgaserna var (grundgas: kväve):

SO_2:	688 ± 34 ppm	(16.10 1986 - 4.3 1987)
	192 ± 10 ppm	(4.3 - 18.6 1987)
NO:	243 ± 12 ppm	
CO_2:	15,0 ± 0,2 %	

Nollgas:

Nollgas för kalibrering av instrumenten framställdes genom att rena omgivningsluft. Utrustningen bestod av grovfilter, blågel för torkning av luften, pump, finfilter och en flödesmätare (rotameter). Alternativt användes kvävgas från gastub.

Tryckluft:

Ren och torr tryckluft till utspädningssystemet erhölls genom att använda anläggningarnas instrumentluftsystem (5 resp 7 bar).

Permeationstorkare:

Som en extra säkerhetsåtgärd mot fukt i systemet var en permeationstorkare, Perma Pure Dryer (typ MD-250-48 PP), inkopplad mellan utspädningssystemets kontrollenhet och analysinstrumenten. En likadan permeationstorkare användes för att torka luften till NO_x-instrumentets ozongenerator (jfr fig 12 och 13). Beskrivning av arbetsprincip och utformning finns i bilaga 8.

Ett alternativ till permeationstorkaren är en elektronisk fuktvakt inkopplad före analysinstrumenten. Fuktvaktens uppgift är att stänga av systemet om fukthalten blir för hög.

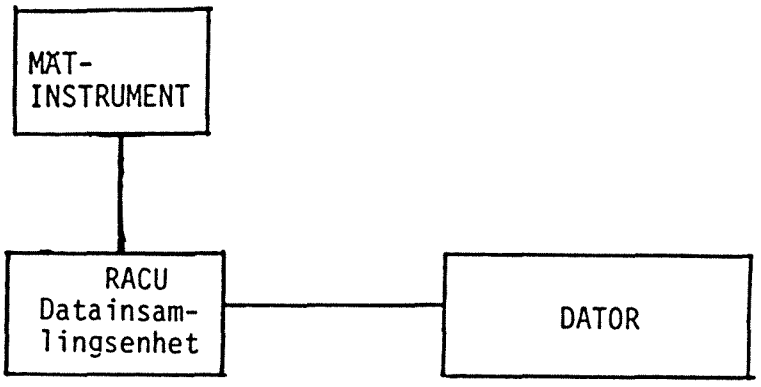
Flödesmätare för by-pass-flöde:

En flödesmätare var inkopplad för att registrera by-pass-flödet (jfr fig 12 och 13). Mätaren var en Hi-Tec, model F-201 MFC från Bronkhorst High-Tech B.V. (Holland). Mätområde 0-5 l/min. Utgångssignal 0-5 V.

Mätprincip: en del av det totala flödet tvingas in i ett uppvärmt kapillärrör. Med två termistorer mäts temperaturskillnaden över kapillären. Temperaturskillnaden är proportionell mot massflödet genom mätaren.

5.4 Datainsamlingssystem

Datainsamlingssystemets principiella uppbyggnad framgår av figur 14 nedan.



Figur 14. Datainsamlingssystemet.
(The data collecting system.)

Systemet levererades av Datalab AB. De olika delarna i systemet var:

- styr och datainsamlingsenhet (RACU - remote aquisition and control unit). RACU:n består av 32 analoga kanaler för spänningsmätning (single-ended) eller 16 kanaler för ström- och spänningsmätning (differentiella). Varje kanal kan ha individuell förstärkning 1 till 1024 gånger. Mätnoggrannheten är 12 bitar. Mäthastigheten kan vara upp till 320 mätningar/sekund.

  Det finns 24 digitala ingångar med TTL-nivåer och 24 digitala utgångar med TTL eller Opto. Enheten styrs från en värddator via seriekommunikation (RS232) med hastigheten 9600 bit/sekund.

- värddator: Caligula 186, programspråk Pascal, operativt system RMX -86. Värddatorn samlar in mätvärden från RACU:n genom ett insamlingsprogram. De olika kanalerna scannas var 10:e sekund och lagras sedan som halvtimmesmedelvärden i dygnsfiler på hårddisk.

  Rutiner för automatisk kalibrering (via Monitor Labs: Calibration Controller, Model 8530) fanns inlagt i programmet, men kalibreringen sköttes manuellt.

6. DRIFTSERFARENHETER

Mätningar utfördes under ca tre månader vid vardera Idbäcksverket i Nyköping (16 oktober 1986 - 26 januari 1987) och kraftvärmeverket i Västerås (10 februari - 17 juni 1987; inga mätningar under april p g a att panna 2 då var avstängd). Utspädningssonden fungerade utan störningar hela tiden. Det databortfall som inträffade under perioden orsakades av problem med analysinstrumenten eller datainsamlingsdelen.

En tidigare undersökning, där ett konventionellt extraktivt mätsystem användes, gav ett klart otillfredsställande resultat när det gällde driftssäkerhet och tillgänglighet (se ref 1). Vid planeringen av den här undersökningen försökte vi därför i möjligaste mån undvika att upprepa tidigare misstag. Några viktiga förändringar var:

- utrustningen var samlad i en speciell mätvagn där betingelserna kunde kontrolleras (t ex temperatur; fritt från damm),
- en så enkel systemuppbyggnad som möjligt,
- ingen automatisk kalibrering.

Den viktigaste förändringen var emellertid bytet av gasberedningssystem: utspädningssystem i stället för kondensationskylare. Erfarenheter gjorda vid anläggningar i Sverige och Västtyskland visar att det går att få konventionella extraktiva system att fungera bra, men det kan ta tid och det krävs fortlöpande en hel del service (jfr ref 5 och 6). Det bästa är att installera ett utprovat, kommersiellt system. Också när det är fråga om ett mätsystem med utspädningssond är det vid permanent installation bäst att välja ett komplett system där alla styr- och datainsamlingsfunktioner är väl prövade. Men vår erfarenhet är att det är mycket lättare att bygga ett fungerande eget mätsystem om man använder utspädning i stället för kylning vid gasberedning.

En närmare beskrivning av driftserfarenheterna för de enskilda komponenterna i det använda mätsystemet följer nedan.

Utspädningssystemet

Utspädningssystemet var mycket driftssäkert. Spädningsförhållandena förändrades inte under projektet. Ingen igensättning av det kritiska munstycket. Enda service och underhåll som behövdes under mätperioderna var backblåsning i 4-5 minuter/vecka för att rensa förfiltret. Följande värden gällde under fältmätningarna:

Relativa trycket i rökgaskanalen:	-2 mbar
Kritiskt munstycke:	50 ml/min
Kalibrergasflöde:	0,5 - 0,6 l/min
Vakuum efter kritiskt munstycke/instrumentluftens tryck:	0,65/4,0 bar

By-pass-flöde: Idbäcksverket ca 1,4 l/min; Västerås: ca 5,0 l/min utan CO_2-instrument, ca 2,8 l/min med.

SO_2-instrument

Fungerade hela tiden utan problem. Försumbar nollpunkts- och referensvärdesdrift.

NO_x-instrument

Visst databortfall p g a instrumentproblem. Under mätperioden i Nyköping byte av säkring, ozonlampa och pump. Försumbar nollpunktsdrift. Referensvärdesdrift <3 %/vecka.

CO_2-instrument

Koldioxidinstrumentet fungerade bra på laboratoriet, men betydligt sämre vid mätningarna på Idbäcksverket i Nyköping. Nollpunkten och referensvärdet var inte stabila. En första misstanke var att instrumentluften innehöll varierande halt CO_2. Därför vidtogs följande åtgärder:

1) Inköp av kompressor för att försörja utspädningssystemet med tryckluft. Åtgärden medförde ingen positiv förändring.
2) Spädning med kvävgas i stället för tryckluft under en vecka. Ingen bättre stabilitet, bara ökat behov av tillsyn eftersom byte av kvävgastuber måste ske en gång/dygn.
3) Ny placering av CO_2-instrumentet. Instrumentet kopplades till by- pass-ledningen från utspädningssondens kontrollenhet. Mellan kontrollenheten och instrumentet monterades en burk (volym: 1 liter) som skulle utjämna tryck och flödesvariationer (jfr fig 12). En liten förbättring kunde iakttagas, men fortfarande ingen tillfredsställande stabilitet.

Eftersom ovanstående åtgärder inte gav någon förbättring, kunde CO_2-instrumentets instabilitet inte bero på varierande koldioxidhalt i instrumentluften. Därför skickades CO_2-instrumentet till försäljaren för service och funktionskontroll. Något fel kunde emellertid inte upptäckas.

Efter två månader kopplades så CO_2-instrumentet ånyo in i mätsystemet, nu vid mätningarna i Västerås. Men framför instrumentet monterades pump, tryckregulator och flödesmätare (se fig 13) för att hålla trycket i mätcellen konstant. Instrumentutslaget är beroende av antalet CO_2-molekyler i provet, och antalet molekyler är proportionellt mot trycket. Denna tryckreglering förbättrade funktionen avsevärt. Nollpunkts- och referensvärdesdrift var under resterande tid (1,5 månad) $\leq \pm$ 0,5 %-enheter CO_2 per vecka.

Rökgashastighet

Hastighetsmätaren fungerade utan problem.

Rökgastemperatur

Registreringen av rökgastemperaturen fungerade mycket dåligt. Temperaturmätaren som finns inbyggd i hastighetssonden fungerade inte. En separat temperaturgivare (PT 100) installerades, men de värden som lagrades i datafilen var inte samma som mätvärdena. Också då Idbäcksverkets temperaturmätningar matades in, blev det delvis felaktiga värden som lagrades i datafilen p g a fel i datainsamlingsenheten. I slutet av mätningarna i Västerås byttes ingångskanal till datainsamlingsenheten, och därefter lagrades enbart riktiga temperaturdata.

Datainsamlingsenhet

Datainsamlingsenheten (jfr sid 29) fungerade inte tillfredsställande. Något fel på vissa ingångskanaler medförde att felaktiga värden lagrades i vissa datafiler. Främst drabbade detta temperaturmätningarna. Vid byten av ingångskanaler (1/5 1987) missades sex dagars mätdata för NO_x och hastighet innan alla kanaler fungerade. Orsaken till felet i datainsamlingsenheten hittades aldrig.

Dator

Fungerade i stort sett bra. Vid några tillfällen låste sig emellertid datorn, varvid omstart krävdes vilket medförde att en del mätdata förlorades.

7. MÄTPERIODER, TILLGÄNGLIGHET OCH TILLSYN

A) Fältmätningar

Fältmätningar ufördes under följande perioder:

I) Idbäcksverket, Nyköping: 16/10 1986 - 26/1 1987 (totalt 103 dagar)

II) Kraftvärmeverket i Västerås, block 2: 10/2 - 27/3 + 1/5 - 10/6 1987 (11/6 - 18/6 vid block 1; totalt 89 dagar). Uppehållet under april berodde på att panna 2 inte eldades eftersom kapaciteten från de övriga pannorna täckte fjärrvärmebehovet.

B) Tillgänglighet

Med ett mätinstruments tillgänglighet menas den del av provtagningsperioden från vilken instrumentet givit mätdata, dvs tid under vilken data producerats/totala tiden instrumentet varit inkopplat. En låg tillgänglighet kan bero på antingen brister i instrumentets funktion eller fel på kompletterande utrustning (t ex gasberedningssystem och datainsamlingssystem). Tillgängligheten för de olika komponenterna i mätsystemet var:

Utspädningssystem (sond + anslutningskabel + kontrollenhet):

Tillgänglighet, Idbäcksverket:	100 %
Tillgänglighet, Västerås:	100 %

Siffrorna för tillgänglighet anger den tid som utspädningssystemet fungerade.

SO_2-instrument

Tillgänglighet, Idbäcken:	98 %
Tillgänglighet, Västerås:	93 %

Databortfallet berodde på fel i datainsamlingssystemet.

Idbäcksverket hade ett eget extraktivt, kontinuerligt mätsystem för SO_2: Binos från Leybold-Hereaus. Tillgängligheten för detta system var 86 %, men den tid från vilken tillförlitliga data erhölls var endast 25 % (16/10 - 17/11, därefter osäkra eller felaktiga värden).

NO_x-instrument

Tillgänglighet, Idbäcken:	93 %
Tillgänglighet, Västerås:	93 %

CO_2-instrument

Tillgänglighet, Idbäcken:	(98 %)
Tillgänglighet, Västerås:	57 %

CO_2-instrumentet gav visserligen mätdata från Idbäcken, men mätvärdena är osäkra p g a instabil mätsignal från instrumentet. Den låga tillgängligheten i Västerås berodde på att instrumentet var på service en del av tiden (se kap 6).

Rökgashastighet

Tillgänglighet, Idbäcken:	98 %
Tillgänglighet, Västerås:	93 %

Databortfallet berodde på fel i datainsamlingssystemet.

Rökgastemperatur

Tillgänglighet, Idbäcken:	0 %
Tillgänglighet, Västerås:	57 %

Databortfallet berodde på fel i ingångskanalen till datainsamlingsenheten (jfr kap 6). Registrering av Idbäcksverkets temperaturmätning gav en tillgänglighet av 76 %.

C) Tillsyn

Tillsynsfrekvensen i Västerås var ca ett besök per vecka. Den tid som behövdes för kontroll och kalibrering av utrustningen var 2-3 tim per besök. Behövdes service och reparationer, tog besöket några timmar längre tid.

Idbäcksverket besöktes betydligt oftare, periodvis så ofta som en gång/dag. Detta berodde inte enbart på att det var en del problem med CO_2-instrumentet som behövde åtgärdas, utan också på att det var kort resväg till anläggningen och att vi noga ville följa hur det nya systemet fungerade.

8. MÄTRESULTAT

8.1 Mätningar vid Idbäcksverket, Nyköping

Mätningar utfördes under perioden 16/10 1986 - 26/1 1987. Mätdata för de olika parametrarna lagrades som halvtimmesmedelvärden. De parametrar som registrerades var: koncentrationerna av NO_x, SO_2 och CO_2, rökgashastighet och rökgastemperatur samt by pass-flöde från utspädningsenheten; av Idbäcksverkets egna mätningar SO_2, stoft och rökgastemperatur.

En sammanställning av mätresultaten, i form av tabell och figurer, finns i bilaga 9 (tabell 1 + figur 21-29). I tabell 1 finns dygnsmedelvärden för koncentrationerna av NO_x och SO_2, rökgashastigheten samt massflöden av NO_x (som NO_2) och SO_2. P g a osäkra värden för CO_2-halten och rökgastemperaturen har dessa parametrar inte medtagits. Massflödena för perioden 1/11 - 26/1 illustreras i figur 21. Variationen av SO_2-koncentrationen (som halvtimmesmedelvärden) visas i figur 22-24, för NO_x i figur 25-26 och för rökgashastigheten i figur 27-28.

Den uppmätta rökgashastigheten har jämförts med den teoretiska. Den teoretiska rökgashastigheten beräknades från uppgifter om den totala lufttillförseln till pannan. Alternativet, att beräkna rökgashastigheten utgående från pannans värmeeffekt, är mindre exakt eftersom inga kolanalysdata fanns tillgängliga. Emellertid fås en god överensstämmelse mellan anläggningens luftförbrukning och beräkningar med ekv 10 - 12 i bilaga 11, då följande värden användes: $l_o = 6,5$ och $g_o = 6,8$ nm^3/kg kol samt 1,0 MWh = 163 kg kol/h.

Jämförelsen mellan teoretisk och uppmätt rökgashastighet visade att

$$(RGH)_{teor}/(RGH)_{mätt} = 1,21 \pm 0,11$$

dvs i genomsnitt är den uppmätta rökgashastigheten ca 20 % lägre än den teoretiska. Dessa värden stämmer väl överens med motsvarande jämförelser i en tidigare undersökning vid kraftvärmeverket i Västerås, block 4 (ref 1).

Massflödet av NO_x (som NO_2) och SO_2 beräknades varje halvimme enligt ekv 2, bilaga 11. Vid beräkningarna har följande värden använts: r = 0,525 meter, T = 125 °C, H_2O = 5 %, korrektionsfaktor för rökgashastigheten = 1,20 (jfr ovan). Från dessa halvtimmesmedelvärden beräknades sedan dygnsmedelvärden. Om i stället dygnsmedelvärdena för NO_x- resp SO_2-koncentrationen och rökgashastigheten användes för att beräkna dygnsmedelvärdena för massflödet blev skillnaden obetydlig, i genomsnitt <2 %. De båda sätten att beräkna massflödet ger alltså samma resultat. En summering för de olika månaderna ger:

november: NO_x: 5,76 ± 2,50 kg/h, vilket ger ett totalt massflöde av 4,1 ton för november.
SO_2: 9,28 ± 3,21 kg/h; totalt 6,7 ton.

december: NO_x: 9,91 ± 2,95 kg/h; totalt 7,4 ton.
SO_2: 12,56 ± 3,20 kg/h; totalt 9,3 ton.

januari: NO_x: 11,20 ± 3,77; totalt 8,4 ton.
SO_2: 28,00 ± 9,32; totalt 20,8 ton.

Observera att dessa värden endast innefattar utsläppen från den ena pannan (panna 1). Under de perioder bägge pannorna eldades är den totala emissionen från Idbäcksverket upp till dubbelt så stor om koncentrationerna i rökgaskanalen antas vara lika.

För perioden 16/10 - 17/11 har SNV:s mätningar av SO_2-koncentra-

tionen jämförts med anläggningens egna mätningar (se figur 22-23). Av figurerna framgår att instrumentutslagen följer varandra mycket väl. Kvoten SO_2(SNV)/SO_2(Idbäcken), beräknad för alla halvtimmesmedelvärden, är i genomsnitt 0,80 - 0,85.

Figur 22-28 visar mätvärdenas variationer under försöksperioden för tre parametrar: koncentrationerna av SO_2 och NO_x samt rökgashastigheten (RGH). Instrumentutslagen har jämförts med tillgängliga driftsparametrar, dvs värmeeffekt (kolförbrukning), kalktillsats och sandmängd i bädden. Många toppar i figurerna kan förklaras med hjälp av dessa driftsdata, om än inte alla. Att RGH följer kolförbrukningen är helt naturligt, liksom att kalktillsatsen inverkar på SO_2-koncentrationen. Sandmängden i bädden verkar ha inverkan på NO_x- och SO_2-halten. Någon direkt förklaring till de höga SO_2-halterna i januari kan inte ges utifrån av oss kända driftsförhållanden. Mer detaljerade kommentarer följer nedan:

oktober:

21-29. RGH (och troligen också NO_x): osannolika värden. Troligen något datainsamlingsfel.

21, kl 14-16.30. SO_2-minimum. Hög kalktillsats (720 kg/h).

28, kl 16-22. Höga SO_2-värden. Belastningen sjönk från 41-31 MW; låg och något varierande kalktillsats.

november:

1. SO_2-max. Kl 14-23.30 ökade belatningen från 14 till 35 MW. kl 22-23.45: ingen kalktillsats, sand = 0.

4. SO_2-max. Minskad kalktillsats. Se vidare nedan och figur 29.

6, kl 00-01. Mycket låga värden för samtliga parametrar, även på Idbäcksverkets SO_2-mätare. En mycket snabb minskning av effekten (från 36-24 MW mellan kl 23 och 01) kan möjligen ha inverkat.

7-8. SO_2 svänger mellan höga och låga värden. Inget synbart samband med driftsförhållandena.

10, kl 05. SO_2-max. Sand = 0 kl 4.30-4.45.

11, kl 12. Lågt RGH-värde. Avbrott direkt efter p g a kabelbyte kan ha gett ett felaktigt värde.

18. Höga NO_x och RGH-värden. Orsaken inte känd. Möjligen ökad belastning i kombination med luftöverskott?

december:

1, kl 6. SO_2-max. Kl 5.30-5.45: sand = 0.

3, kl 15.30. SO_2-max. Kl 15.10-15.30: sand = 0.

4, kl 8.30. SO_2-max. Kl 8.10-8.30: sand = 0.

8, kl 24. SO_2-max. Kl 22.20-22.40: sand = 0.

17-18. NO_x-max; kalk = 0, sand = 0.

21, kl 19. SO_2-max och NO_x-min. Kl 18.30-19.20 var kolförbrukningen = 0. Kl 19-19.40: oljeeldning.

30. SO_2-max. Låg kalktillsats.

januari:

3, kl 8-9. SO_2-max. Minskad kalktillsats.

3, kl 15-24. SO_2-min. Hög kalktillsats (ca 300 kg/h).

4, kl 01-15. Ökande SO_2-halt, minskande kalktillsats (från 300-30 kg/h).

4, kl 15-16. Minskande SO_2-halt. Kalktillsatsen ökar från 30 till 60 kg/h.

3-4. NO_x-max. Kalk: se ovan. Varierande sandmängd.

6, kl 8. SO_2-min. Kortvarig, kraftig dos kalk.

10, kl 0-12. SO_2-min. Hög kalktillsats.

12, kl 17-19. SO_2- och NO_x-min. Mycket höga sandvärden kl 17-18.

15, kl 12-24. SO_2-min och NO_x-max. Hög kalktillsats.

21-23. Höga NO_x-värden. Orsak okänd.

I figur 29 illustreras sambandet mellan kalktillsats och SO_2-koncentration. Exemplet är från november och alla halvtimmesmedelvärden mellan kl 14 den 3 och kl 6 den 4 är inritade. Anläggningens totala värmeeffekt visas också. Som väntat är minskningen av SO_2-halten i rökgasen en funktion av kalktillsatsen.

8.2 Mätningar vid kraftvärmeverket i Västerås

Mätningar i den ena rökgaskanalen från panna 2 (jfr fig 9, sid 21) vid kraftvärmeverket i Västerås utfördes under perioden 10/2 - 10/6 1987 med avbrott 28/3 - 1/5 då det var eldningsuppehåll. Den 11-18/6 mättes på panna 1. Mätdata för de olika parametrarna lagrades som halvtimmesmedelvärden. De parametrar som registrerades var: koncentrationerna av NO_x, SO_2 och CO_2, rökgashastighet och rökgastemperatur samt by pass-flöde från utspädningsenheten. Från anläggningen fick vi tillgång till den beräknade kolförbrukningen i form av timmedelvärden.

En sammanställning av mätresultaten, i form av tabeller och figurer, finns i bilaga 10 (tabell 2-3, figur 30-41). I tabell 2 finns dygnsmedelvärden för koncentrationerna av NO_x, SO_2 och CO_2, rökgashastigheten, kolförbrukningen samt massflödena av NO_x (som NO_2) och SO_2. Variationen av mätvärdena (som halvtimmesmedelvärden) visas grafiskt för SO_2 i figur 30-31, för NO_x i figur 32-33, för rökgashastigheten i figur 34-35 och för CO_2 i figur 36.

Den uppmätta rökgashastigheten har jämförts med den teoretiska. Den teoretiska rökgashastigheten vid driftstillståndet beräknades från uppgifter om kolförbrukningen (tabell 2) och kolanalysdata (tabell 3) med hjälp av ekvation 5-12 i bilaga 11. Vid beräkningarna har medelvärden för CO_2-halten (11,0 %) och rökgastemperaturen (112 ^{o}C) använts. Luftfaktorn, m, blir då ca 1,70. Kvoten mellan dygnsmedelvärdena av den teoretiska och den uppmätta rökgashastigheten blir då

$$(RGH)_{teor}/(RGH)_{mätt} = 1,13 \pm 0,09$$

dvs i genomsnitt är den uppmätta rökgashastigheten ca 10 % lägre än den teoretiska. Överensstämmelsen är något bättre än vid mätningarna på Idbäcksverket i Nyköping och vid tidigare mätningar vid kraftvärmeverket i Västerås, block 4 (ref 1).

Massflödet av NO_x (som NO_2) och SO_2 för varje halvtimme beräknades med ekv 2, bilaga 11. Vid beräkningarna har följande värden använts: r = 0,85 meter, T = 112 ^oC och H_2O = 5 %. Det erhållna värdet har sedan multiplicerats med 2 eftersom rökgasen har delats i två likadana kanaler innan mätpunkten (jfr fig 9, sid 21). Från halvtimmesmedelvärdena beräknades sedan de i tabell 2 återgivna dygnsmedelvärdena, vilka också illustreras grafiskt i figur 37. Om i stället dygnsmedelvärdena för NO_x- resp SO_2-koncentrationen och rökgashastigheten användes för att beräkna dygnsmedelvärdena för massflödet blev skillnaden liten, <2 %. De båda sätten att beräkna massflödet ger alltså likvärdiga resultat. En summering för de olika månaderna ger:

februari (16-28):

NO_x: 231,7 $\pm$ 33,5 kg/h, vilket ger ett totalt massflöde av 105,6 ton för perioden.

SO_2: 105,6 $\pm$ 12,4 kg/h; totalt 48,1 ton.

mars:

NO_x: 135,6 $\pm$ 69,9 kg/h; totalt 135,6 ton.

SO_2: 100,2 $\pm$ 19,1 kg/h; totalt 64,9 ton.

maj:

NO_x: 201,6 $\pm$ 35,6 kg/h; totalt 150,0 ton.

SO_2: 134,3 $\pm$ 35,6 kg/h; totalt 99,9 ton.

juni (1-18):

NO_x: 170,4 $\pm$ 35,5 kg/h; totalt 69,5 ton.

SO_2: 167,6 $\pm$ 29,3 kg/h; totalt 68,4 ton.

Kolförbrukningen för panna 2 (som timmedelvärden) framgår av figur 38-39. Som väntat är det god överensstämmelse mellan kolförbrukningen och rökgashastigheten (jfr fig 34-35), men också NO_x-koncentrationen följer kolförbrukningen. Av figur 40 framgår att en ökning av pannlasten medför en ökning av NO_x-emissionen. I figuren är dygnsmedelvärdena inprickade då pannan eldas med ryskt kol. Riktigt tydligt syns sambandet mellan kolförbrukning, rökgashastighet och NO_x-halt i figur 41, där värden från perioden 6-9

mars jämförs. Däremot är det inget samband mellan kolförbrukning och SO_2-halt i rökgasen (jfr fig 38-39 och 30-31). SO_2-koncentrationen beror på svavelhalten i kolet och ändras inte med pannlasten.

Från de uppmätta SO_2-koncentrationerna har mängden emitterat svavel beräknats ($(S)_m$, g/MJ; ekv 15 i bilaga 11) och jämförts med de teoretiska svavelemissionerna ($(S)_o$, ekv 13 i bilaga 11). Dygnsmedelvärdena för SO_2-koncentrationen gav att

$$(S)_m/(S)_o = 1,18 \pm 0,06$$

dvs den teoretiska svavelemissionen är 15-20 % högre än den uppmätta. Svavelförlusterna till bottenaska och flygaska vid kolpulvereldning är ca 5 %, dvs resterande 95 % av kolets svavelinnehåll går ut via rökgaserna. Enligt laboratorietesten av utspädningssystemet visar SO_2-instrumentet ca 5 % för låga värden p g a skillnader i densitet mellan kalibrergasen och rökgasen (se sid 15). Någon kompensation för denna systematiska avvikelse av mätvärdena har inte gjorts. Efter korrigering för dessa faktorer är det en god överensstämmelse mellan den uppmätta och den teoretiska svavelemissionen.

9. DISKUSSION

Projektets mål var att undersöka om ett utspädningssystem är en tillförlitlig och driftsäker gasberedningsmetod vid kontinuerliga, extraktiva emissionsmätningar. För att kunna göra denna bedömning skaffade vi oss erfarenheter av ett utspädningssystem genom kontinuerliga långtidsmätningar av utsläppen från två förbränningsanläggningar. Utspädning är ett sätt att förbehandla rökgasprovet innan provgasen leds in i analysinstrumenten. De flesta extraktiva gasanalysatorer kräver någon form av gasberedning, och utspädning är en nyligen introducerad alternativ metod till den konventionella kondensationstekniken. Genom utspädningen sänks rökgasprovets

daggpunkt så mycket att det inte finns någon risk för kondensation i slangar eller instrument. Därför behövs inga uppvärmda provgasledningar. Inte heller någon provtagningspump behövs för att suga ut gasprovet ur rökgaskanalen eftersom hela systemet drivs med renad tryckluft. Allt detta innebär att ett utspädningssystem innehåller få delar som kan gå sönder och att systemet är enkelt att använda och underhålla. Mätningarna sker direkt på "våt" rökgas (se vidare s 10).

Erfarenheterna av utspädningssystemet är mycket goda efter tre månaders kontinuerlig drift vid förbränningsanläggningar i vardera Nyköping och Västerås. Systemet fungerade hela tiden utan problem. Underhållet inskränkte sig till backblåsning av grovfiltret ca en gång/vecka. En tidigare undersökning, vid vilken ett konventionellt gasberedningssystem (med kondensationskylare) användes (se ref 1), gav långtifrån lika god driftssäkerhet. Visserligen fungerade inte alla delar i det nuvarande mätsystemet (med utspädningsenhet) som önskat, men skillnaden i tillgänglighet och nödvändig underhållsinsats var mycket påtaglig. Den del som inte fungerade tillfredsställande var datainsamlingssystemet. Också med CO_2-instrumentet var det en del problem innan noggrann reglering av provgasens flöde och tryck skett. Mätningarna av SO_2- och NO_x-koncentrationerna fungerade hela tiden mycket bra.

En felanalys visar (se bilaga 12) att det slumpmässiga felet vid användandet av utspädningssonden är ca 3 %. Därutöver tillkommer ett systematiskt fel p g a skillnader i densitet mellan kalibreringsgasen och rökgasen. SO_2- och NO_x-instrumenten ger ca 5 % för låga utslag och CO_2-instrumentet ca 3 % för höga.

De slutsatser vi vill dra utifrån resultaten i denna undersökning är: användning av ett utspädningssystem är en lätthanterlig och driftsäker gasberedningsmetod vid extraktiva, kontinuerliga mätsystem vid förbränningsanläggningar (med låg stofthalt). Vid inköp av ny mätutrustning rekommenderas köp av ett komplett system med utprovade styr- och datainsamlingsfunktioner. Man får inte glömma att med ett utspädningssystem blir provgasens koncentration betydligt lägre än vid direkta mätningar, varför man bör använda den typ av

mätinstrument som normalt används för bakgrundsmätningar i recipienten. För mätning i kanaler innehållande vattendroppar eller mycket stoft finns en vidareutvecklad version av utspädningssonden som bl a har dubbla kritiska munstycken för att minska risken för igensättning. Möjlighet finns också att mäta O_2-halten före utspädningen med en zirkoniumoxidcell (Oxydan Diluting System, model DOS).

Kontinuerliga mätningar av t ex SO_2- och NO_x-halterna i rökgaser ger upplysningar om hur koncentrationerna varierar över tiden, men ger dessutom möjlighet att utföra tillförlitliga beräkningar av massflödena. Utsläppsvillkoren för en anläggning är oftast angivna som mängdvillkor, vanligen g/MJ vid förbränningsanläggningar men också t ex kg/månad eller ton/år. Dygnsmedelvärden av massflödet kan beräknas på två sätt:

- dygnsmedelvärdena för koncentrationerna och rökgasvolymen multipliceras
- de momentana värdena för koncentrationerna och rökgashastighet multipliceras och dygnsmedelvärden beräknas från produkterna.

En jämförelse mellan de två beräkningssätten, då de momentana värdena var lika med halvtimmesmedelvärden, gav mycket små skillnader. Vilken beräkningsmetod som skall väljas beror därför av praktiska skäl. Hur ofta korttidsvärden skall registreras beror på den process som skall övervakas. I de allra flesta fall är det tillräckligt att registrera halvtimmesmedelvärden.

Att utifrån stickprovsmätningar fastställa om ett utsläppsvillkor följs, fungerar om koncentrationsvariationerna är kända eller kan förutses, t ex från processdata. För panna 2 vid värmekraftverket i Västerås gäller, att SO_2-emissionen beror på svavelinnehållet i det kol som eldas, och NO_x-emissionen på eldningseffekten. Massflödena från denna panna kan därför uppskattas med god tillförlitlighet från driftsdata och relativt få stickprov. Däremot är det svårt att från stickprovsmätningar säkert beräkna massflödet från Idbäcksverket i Nyköping. I detta fall beror variationerna av SO_2- och NO_x-koncentrationerna på flera driftsfaktorer och är därför mycket svåra att förutsäga.

10. REFERENSER

1. Nyquist G, Radö J & Vesely V, 1987. Kontinuerlig mätning av SO_2, NO, CO_2 och flöde. Naturvårdsverket Rapport 3368 (= Värmeforsk rapport 278), 71 s.

2. Hellén G, 1987. Utvärdering av EPM-utspädningssystemet för mätning av utsläpp till luft. Värmeforsk rapport 247, 27 s.

3. Appelqvist B & Loyd D, 1979. Grundläggande teknisk strömningslära, 2:a upplagan. Ingenjörsförlaget, Stockholm, 112 s.

4. Myers R L & Vernon D, 1985. Field experiences using dilution probe technique for continuous source emission monitoring. EPM, Report on field experiences with the EPM diluting stack sampler model 797.302 by Thermo Electron, 9 s.

5. Lundström M, 1986. Driftserfarenheter av kontinuerliga mätsystem för övervakning av utsläpp till luft från fasta anläggningar. Naturvårdsverket Rapport 3107 (= Värmeforsk rapport 229), 101 s.

6. Nyquist G, Borgström B & Hellén G, 1987. Kontinuerlig övervakning av utsläpp till luft i Västtyskland. Lagar, mätinstrument och driftserfarenheter. Naturvårdsverket Rapport 3403 (= Värmeforsk rapport 289), 90 s.

Bilaga 1.

UTSPÄDNINGSSYSTEM PÅ DEN SVENSKA MARKNADEN.

Leverantörer och instrumentbeteckningar.
(Diluting stack sampler for sale in Sweden. Retail dealer and manufacturer/model.)

a/ Leverantör: Hesselvik AB, Cathrineholms gård, 641 90 Katrineholm; 0150/53830.
Tillverkare/modell: Kipp Analytica, Model 797 diluting stack sampler; Monitor Labs-Oxydansystem.

b/ Leverantör: Haeger Gasanalysatorer AB, Box 29020, 100 52 Stockholm; 08/62 75 43.
Tillverkare/modell: Environment AB, systéme de dilution.

c/ Leverantör: Envirec AB, Frötallsgatan 2, 421 32 Västra Frölunda; 031/49 62 90.
Tillverkare/modell: Dynatron 5000 CEM Dilution Extractive System.

d/ Leverantör: Olle Moberg AB, Box 61, 178 00 Ekerö; 0756/201 60
Tillverkare/modell: CSI Model DS 210 Stack Analysis System.

e/ Leverantör: Philips Analytical Systems AB, 115 84 Stockholm; 08/782 10 00.
Tillverkare/modell: Thermo-Electron, Model 200 Gas Analysis System.

Bilaga 2.

TEKNISK SPECIFIKATION AV UTSPÄDNINGSSYSTEMET KIPP ANALYTICA, MODEL 797.

Utspädningssond (Model 0797.300)

Ytterhöljet är tillverkat av en extra korrosionsbeständig nickellegering (Inconel 600); övriga metalldelar av rostfritt stål (304). Sondens yttre diameter är 27 mm, instickslängden 310 mm och vikten 1,5 kg.

Rökgastemperatur: max 400 °C. (Det finns även en sond för rökgastemperaturer upp till 600 °C).

Kritiska munstycket (av Pyrexglas; med finfilter) är utbytbart så sex spädningsintervall kan erhållas enligt

nominellt flöde (ml/min)	spädningsförhållande min	max
50	95:1	150:1
100	44:1	75:1
150	32:1	50:1
200	27:1	37:1
250	20:1	30:1
500	12:1	16:1

(Det finns också kritiska munstycken med nominellt flöde 20 ml/min och munstycken tillverkade av kvarts.)

Noggrannhet i spädningen: 2 %.

Anslutningskabel

Den plastarmerade anslutningskabeln, mellan sonden och kontrollenheten, innehåller fyra separata gasledningar med ytterdiametern 1/4 tum: två ledningar av teflon för kalibreringsgas resp provgas och två ledningar av polypropylen för spädluft resp anslutning till tryckmätaren. Maximal längd på anslutningskabeln: 100 meter.

Kontrollenhet (EPM 979.440)

Med kontrollenheten (19 tums modul för montering i rack; höjd 8 3/4 tum) regleras spädluftens tryck samt flödet av kalibrergas och backblåsningsluft. Vidare mäts relativa trycket i gaskanalen och undertrycket efter ejektorpumpen (jfr figur 4, sid 9).

Behov av spädluft: 3-8 l/min, tryck 4-6 bar.
Tryckluften skall vara torr (daggpunkt <-20 ^{o}C) och fri från föroreningar som kan störa mätningarna. Partiklar >1 µm skall vara bortfiltrerade.

Vakuummätare: -1 - 0 bar.

Mätare för trycket i gaskanalen: -150 - 0 - 100 mbar.

Flödesmätare för kalibreringsgas: 0 - 600 ml/min.

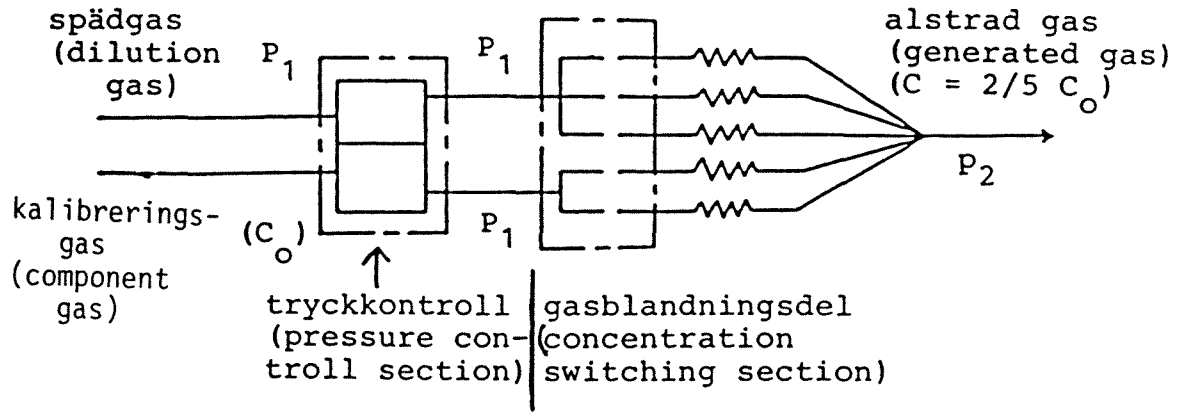
Flödesmätare för backblåsning: 0 - 6 l/min.

Bilaga 3

Referensgasblandare (standard gas divider)

För att kontrollera linearitetен av mätsignalerna från ett gasanalysinstrument behövs flera mätpunkter. Lägsta och högsta värde fås lätt (ren kvävgas resp ren kalibreringsgas), men för värden däremellan behövs antingen någon typ av referensgasblandare eller flera gastuber innehållande olika koncentration kalibreringsgas. Enklast, säkrast och billigast erhålls de för en kalibreringskurva nödvändiga koncentrationerna med hjälp av en referensgasblandare.

Den referensgasblandare som användes vid detta projekt var S-TEC Model SGD från Horiba (Japan), vilken är en läckagefri gasblandare som blandar en kalibreringsgas med en spädgas i fem fasta steg (100, 80, 60, 40 och 20 %). Princip: Flödesvolymerna av kalibreringsgas och spädgas kontrolleras av kapillärrör, och de inbördes koncentrationerna i blandningen är proportionella mot flödesvolymerna. Referensgasblandaren innehåller fem likadana kapillärer, och ändringar i blandningsförhållandet åstadkoms genom att ändra det antal kapillärer som kalibreringsgasen resp spädgasen strömmar genom (se fig 15 nedan).



Figur 15. Principen för referensgasblandaren.
(Schematic diagram for the principle of standard gas divider.)

Kalibreringsgas och spädgas justeras till samma tryck med tryckkontrolldelen och leds in i gasblandningsdelen. Blandningsförhållandet påverkas inte av ändringar i temperaturen eller lufttrycket, dvs inverkan av yttre förhållanden är försumbara. De faktorer som påverkar flödesvolymen genom kapillärerna är trycket före och efter kapillärerna samt gasernas viskositet.

Noggrannheten i blandningsförhållande med referensgasblandaren S-TEC Model SGD är enligt tillverkaren $\pm$ 0,5 %.

Bilaga 4.

Fluorimetrisk bestämning av SO_2-koncentrationen

Om ett rökgasprov bestrålas med UV-ljus, kommer SO_2-molekyler i provet att absorbera ljuskvanta och hamna på en högre energinivå (exciteras). Den absorberade energin kan i vissa fall återutsändas i form av ljus (fluorescensstrålning), men vid en något längre våglängd p g a diverse energiförluster. Processen kan sammanfattas enligt

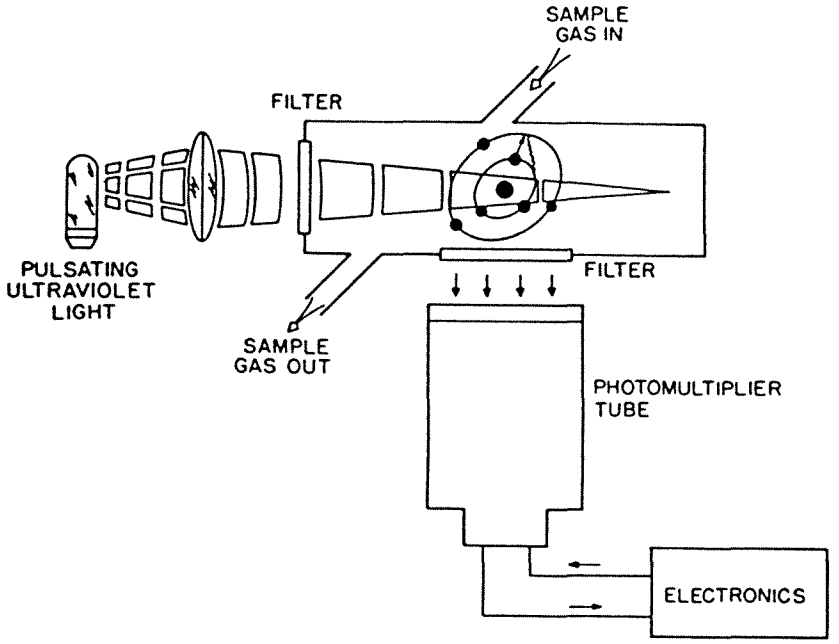
$$SO_2 + h\nu_1 \rightarrow SO_2^*$$

$$SO_2^* \rightarrow SO_2 + h\nu_2$$

Intensiteten av den utsända fluorescensstrålningen ($h\nu_2$) är direkt proportionell mot koncentrationen av SO_2. Fluorescensljuset sänds ut i alla riktningar. Genom att mäta i 90 graders vinkel mot det inkommande ljuset undviker man störningar från excitationsljus ($h\nu_1$) som passerat genom mätkammaren.

För att erhålla en bra mätsignal fordras att SO_2 har en kraftig absorption vid excitationsvåglängden samt att excitationsenergin inte överförs på strålningslös väg till omgivningen (quenching; främst till syre- och kvävemolekyler då det är frågan om gasprover). För SO_2-bestämning används våglängdsområdet 190-230 nm för excitation.

Det SO_2-instrument som användes i detta projekt var Monitor Labs, model 8850. Mätprincipen är pulsfluorescens. Ett pulserat UV-ljus erhålles med hjälp av en mekanisk chopper (hålskiva). Ljuset pulseras bl a för att minska inverkan från störande ströljus (bättre signal/brus-förhållande). Figur 16 nedan visar översiktligt mätprincipen. En referensdetektor, placerad i strålgången efter mätcellen, möjliggör automatisk korrektion av variationer i UV-lampans ljusintensitet. En pump suger ca 0,5 liter provgas per minut genom mätcellen, vilket ger ett undertryck av ca 0,75 bar.



Figur 16. Mätprincipen för SO_2-bestämning med pulsfluorescens-instrument.
(Pulsed fluorescent SO_2 analyzer. Principle of operation.)

Tekniska specifikationer, Monitor Labs model 8850:

Mätområden:	0,25; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 ppm
Nedre detektiongräns:	0,001 ppm
Nollpunktsdrift:	<3 ppb/vecka; <2 ppb/dygn
Mätvärdesdrift:	<1 %/vecka; <0,5 %/dygn
Stigningstid:	<4 minuter till 95 %
Precision:	0,001 ppm
Provgasflöde:	500 $\pm$ 50 ml/min
Utgång:	0-10 V

Bilaga 5.

Kemiluminescensmetod för bestämning av NO_x

Då NO reagerar med ozon bildas NO_2. En del av de bildade NO_2-molekylerna hamnar på en högre energinivå (exciterad form). När dessa exciterade molekyler återgår till en lägre energinivå avges energin i form av ljusstrålning (kemiluminescens). Kemiluminescensprocessen kan sammanfattas med följande reaktioner:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 \rightarrow NO_2 + O_2 + h\nu$$

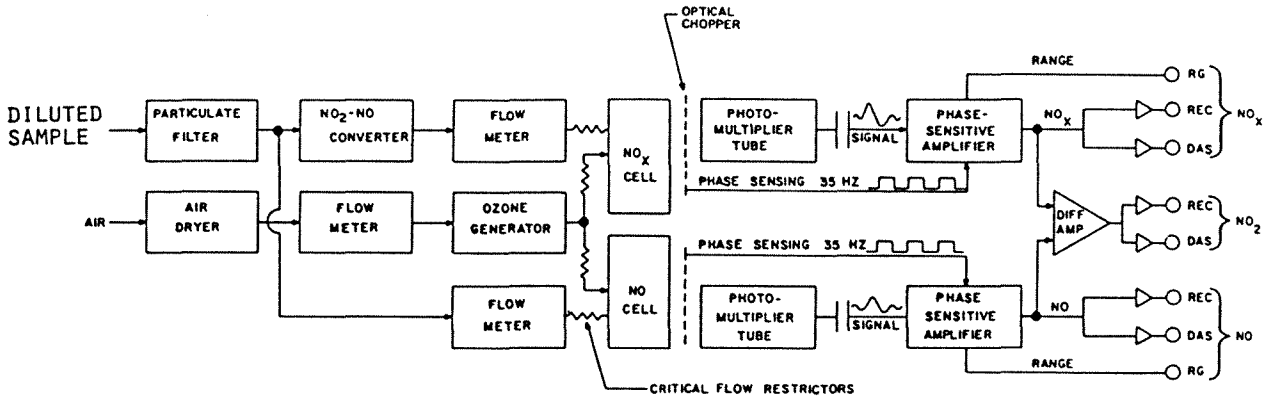
Intensiteten av den utsända strålningen är direkt proportionell mot NO-koncentrationen.

Det instrument som användes vid samtliga fältmätningar och huvudparten av laboratoriemätningarna var Monitor Labs kväveoxidanalysator Model 8440E. Vid några jämförande mätningar på lab användes ett instrument från Thermo Electron (Model 10 AR), vilket finns beskrivet i ref 1.

Monitor Labs kväveoxidanalysator Model 8440E är ett kemiluminescensinstrument för kontinuerlig analys av kväveoxid (NO), kvävedioxid (NO_2) och summan av dessa två gaser (NO_x). Instrumentet är utrustat med dubbla reaktionskamrar och detektorer: en uppsättning är för bestämning av NO och den andra för NO_x.

Den inkommande utspädda rökgasen delas upp i två delströmmar. Den ena delströmmen passerar genom en konverter som reducerar NO_2 till NO innan provgasen leds in i reaktionskammaren, den andra delströmmen leds direkt in i reaktionskammaren. I reaktionskammaren får NO i provet reagera med ozon och den resulterande kemiluminescensstrålningen i de två reaktionskamrarna mäts med separata fotomultiplikatorer. Mätsignalen från den första kammaren är proportionell mot NO_x-koncentrationen och från den andra mot NO-koncentrationen. Skillnaden mellan de två mätvärdena ger NO_2-koncent-

rationen. En schematisk bild av instrumentets uppbyggnad finns i figur 17 nedan.



Figur 17. Principskiss över det använda kemiluminescensinstrumentet för NO_x-bestämning.
(Dual channel NO_x analyzer: Monitor Labs Inc., Model 8440E.)

Reduktionen av NO_2 till NO i konvertern sker med hjälp av en specifik reaktion mellan molybden och NO_2. Metallisk molybden reagerar med NO_2 vid 300 ^{o}C, varvid det bildas molybdenoxid och NO. Vid denna temperatur oxideras inga andra kväveföreningar till NO. Molybdenen i konvertern förbrukas och måste så småningom regenereras eller bytas.

Reaktionen mellan NO och ozon är temperaturberoende. Därför är reaktionskammaren termostaterad till 50 $\pm$ 2 ^{o}C.

Flödeshastigheter och reaktionskamrarnas vakuum regleras med en särskild kontrollmodul, vilken innehåller fyra kanaler: två för provgas och två för ozon. Flödesvolymerna bestäms av kritiska munstycken (jfr kap 2). Undertrycket i reaktionskammaren hålls vid 0,8 bar med en vakuumpump.

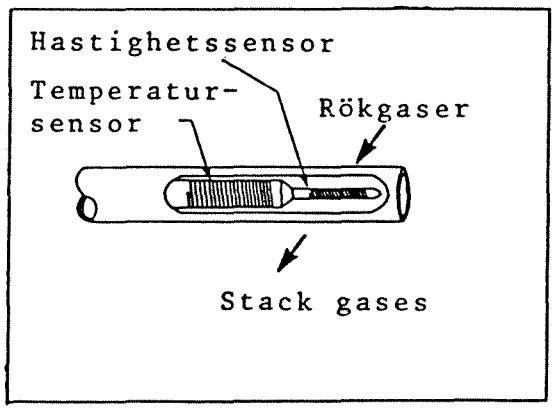
Tekniska specifikationer för Monitor Labs Model 8440E:

Mätområden:	0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 ppm
Nedre detektionsgräns:	0,002 ppm
Nollpunktsdrift:	<3 ppb/vecka
Mätvärdesdrift:	<4 %/vecka
Stig- och falltid:	3 minuter till 95% av mätvärdet
Precision:	$\pm$ 1 %
Linearitet:	$\pm$ 1 % avvikelse från bästa räta linje
Provgasflöde:	a) totala provgasflödet: 500 $\pm$ 30 ml/min b) provgasflödet till NO- resp NO_x-kanalen: 250 $\pm$ 15 ml/min c) flöde från ozongeneratorn: 180 $\pm$ 20 ml/min
Utgång:	0 - 1 V

Bilaga 6.

Mätning av rökgashastighet och rökgastemperatur

För kontinuerlig mätning av rökgasens flödeshastighet och temperatur användes en hastighetssond, Kurz Model 455 TM-X. Mätprincipen bygger på värmeöverföring från ett upphettat element till den strömmande gasen. Den flödeskänsliga delen i den använda mätaren är en Kurz "DuraFlo"-sond, som innehåller en hastighetssensor och en temperatursensor (se figur 18 nedan).



Figur 18. Principen för hastighetsmätning.
(Principle of operation, velocity measurements.)

Hastighetssensorn värms upp till en konstant temperatur med hjälp av en kontrollkrets i elektronikenheten. Systemet är en konstanttemperatursanemometer. Mätprincipen är att sensorn känner av kyleffekten från den strömmande rökgasen som passerar över den uppvärmda sensorn. Temperatursensorn kompenserar för variationer i rökgastemperaturen. Genom elektronisk linearisering av mätsignalen erhålles en utgångssignal som är direkt proportionell mot hastigheten i rökgasen.

Känselkroppen är fårad och stabil och därigenom motståndskraftig mot mekanisk påverkan och dessutom lätt att göra ren. Enligt till-

verkaren är mätaren okänslig för nedsmutsning och den skall inte förväxlas med en ömtålig varmtrådsanemometer.

För hastighetsmätningar gäller:

- mätområde: 0 - 30 m/sek (temperatur 0-325 ^{o}C)
- noggrannhet: $\pm$ 5 % av fullt skalutslag
- svarstid: 3 sekunder
- repeterbarhet: $\pm$ 0,25 % av fullt skalutslag

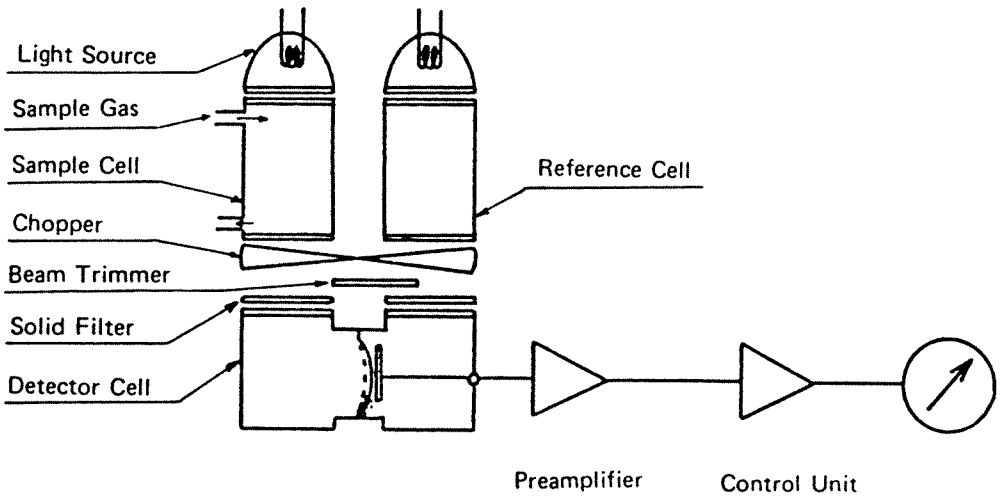
Den använda modellen av hastighetssond är utrustad med en separat temperatursensor för mätning av rökgastemperaturen. För temperaturmätningar gäller:

- mätområde: 0 - 325 ^{o}C
- noggrannhet: $\pm$ 5 ^{o}C
- svarstid: 10 sekunder
- repeterbarhet: $\pm$ 0,25 % av fullt skalutslag

Bilaga 7.

IR-instrument för bestämning av CO_2

Mätprincipen för det använda CO_2-instrumentet är absorption i den infraröda delen av ljusspektrum. Vilka våglängder som absorberas beror på molekylstrukturen hos ämnena i provet. En översiktlig skiss av det använda instrumentets (Horiba, Model PIR-2000) arbetsprincip finns i figur 19 nedan.



Figur 19. Mätprincipen för CO_2-instrument från Horiba. (Single beam non-dispersive IR analyzer; Horiba Model PIR 2000.)

IR-strålningen från ljuskällan passerar den med provgas fyllda mätcellen. En del av ljuset absorberas av ämnen i provet. Resten av ljuset går vidare till detektorn.

Som referenscell används en cell fylld med en gas som inte absorberar någon strålning i det aktuella våglängdsområdet (t ex kvävgas eller argon). En chopper släpper växelvis igenom ljus som passerat mätcellen resp referenscellen. Innan detektorn finns filter som absorberar interfererande våglängder.

Detektorn består av två kamrar, åtskiljda genom ett membran och fyllda med den gaskomponent som skall mätas (i detta fall CO_2). I detektorcellen absorberas den strålning som passerat mät- resp referenscellen. Gasen i detektorcellen värms då upp och expanderar, vilket får till följd att membranet som delar detektorcellen kommer att bukta utåt. Ljusabsorptionen sker omväxlande i vänster eller höger halva av detektorcellen, vilket får membranet att vibrera. Membranets utslag kan omvandlas till en elektrisk signal som är proportionell mot CO_2-koncentrationen i mätcellen.

Detta sätt att mäta kallas NDIR (non-dispersive infrared) till skillnad från en spektrometrisk mätning där ljuset delas upp i olika våglängder.

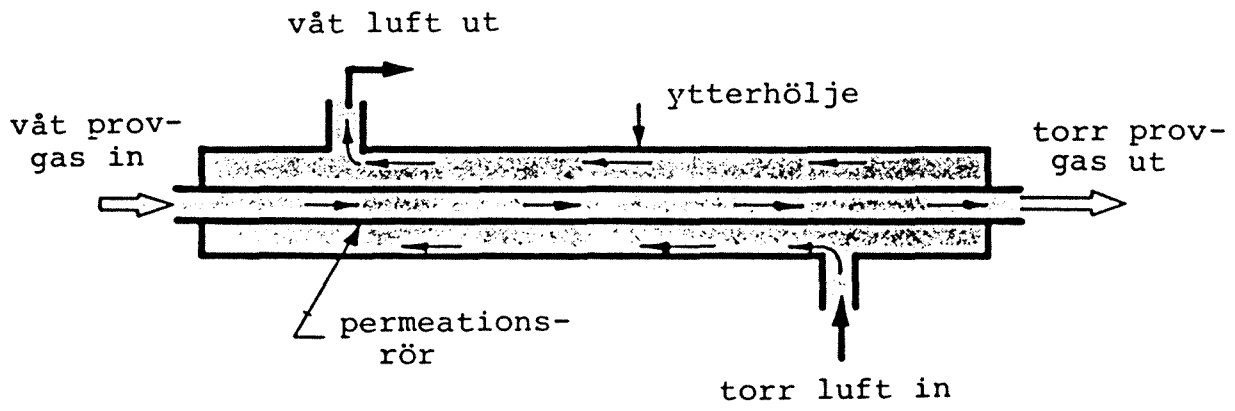
Teknisk specifikation för Horiba Model PIR-2000:

Mätområden:	500, 1500 och 2500 ppm CO_2
Brusnivå:	<1,0 % av fullt skalutslag
Nollpunkts- och mätvärdesdrift:	$\pm$ 1 %/dygn av fullt skalutslag
Svarstid:	1,2 sekunder till 90 % av fullt skalutslag
Noggrannhet:	1 % av fullt skalutslag
Repeterbarhet:	$\pm$ 1 % av fullt skalutslag
Linearitet:	$<\pm$ 2,5 % avvikelse vid fullt skalutslag vid lägsta mätområdet
Provgasflöde:	0,5 - 1,0 l/min

Bilaga 8

Permeationstorkare (Perma Pure Dryer)

I en permeationstorkare används ett hygroskopiskt, jonbytande membran i en kontinuerlig torkprocess för att selektivt avlägsna vattenånga från en gasström. Membranet kan liknas vid en rörformad torkapparat. Konstruktionen av den i detta projekt använda permeationstorkaren: i ett gastätt ytterrör är ett permeationsrör inneslutet enligt figur 20 nedan.



Figur 20. Permeationstorkare.
(Perma Pure Dryer.)

Membranet i permeationsröret skall enligt tillverkaren endast släppa igenom vattenmolekyler medan andra komponenter, som t ex SO_2, NO och CO_2, blir kvar. Den drivande kraften för borttransporten av vatten är skillnaden i vattenångans partialtryck på ömse sidor om membranet. Om våt gas strömmar genom permeationsröret samtidigt som torr gas strömmar i motsatt riktning i utrymmet mellan permeationsröret och torkarens hölje, så kommer vattenmolekyler att transporteras ut genom membranet. Den våta mätgasen torkas medan den torra instrumentluften blir fuktig då den transporterar bort vattenångan.

Effektiviteten och kapaciteten hos en permeationstorkare vid konstant temperatur och fuktighet beror på torkarens geometri (t ex permeationsrörets inre diameter och yttre yta; torkarens totala volym) samt flödeshastighet och tryck av provgas och renluft.

Den använda torkaren (Perma Pure Dryer, typ MD-250-48 PP) är 120 cm lång. Permeationsrörets innerdiameter är 2,54 mm. Torkarens ytterdiameter är 6,35 mm, ytterhölje och anslutningar är tillverkade av polypropylen. Permeationsmembranet tål temperaturer upp till 160 ^{o}C, medan polypropylenhöljet tål max 100 ^{o}C. Maximala flödet genom permeationstorkaren är 4 l/min.

Bilaga 9

Resultat från Idbäcksverket, Nyköping

Tabell 1. Dygnsmedelvärden för koncentrationerna (normal torr gas) av kväveoxider (NO_x) och svaveldioxid (SO_2), rökgashastigheten (RGH) samt massflödena av NO_x (som NO_2) och SO_2.
(Mean values (24 h) of the concentration (normal dry gas) of NO_x and SO_2, flue gas velocity (RGH) and the mass flow of NO_x (as NO_2) and SO_2.)

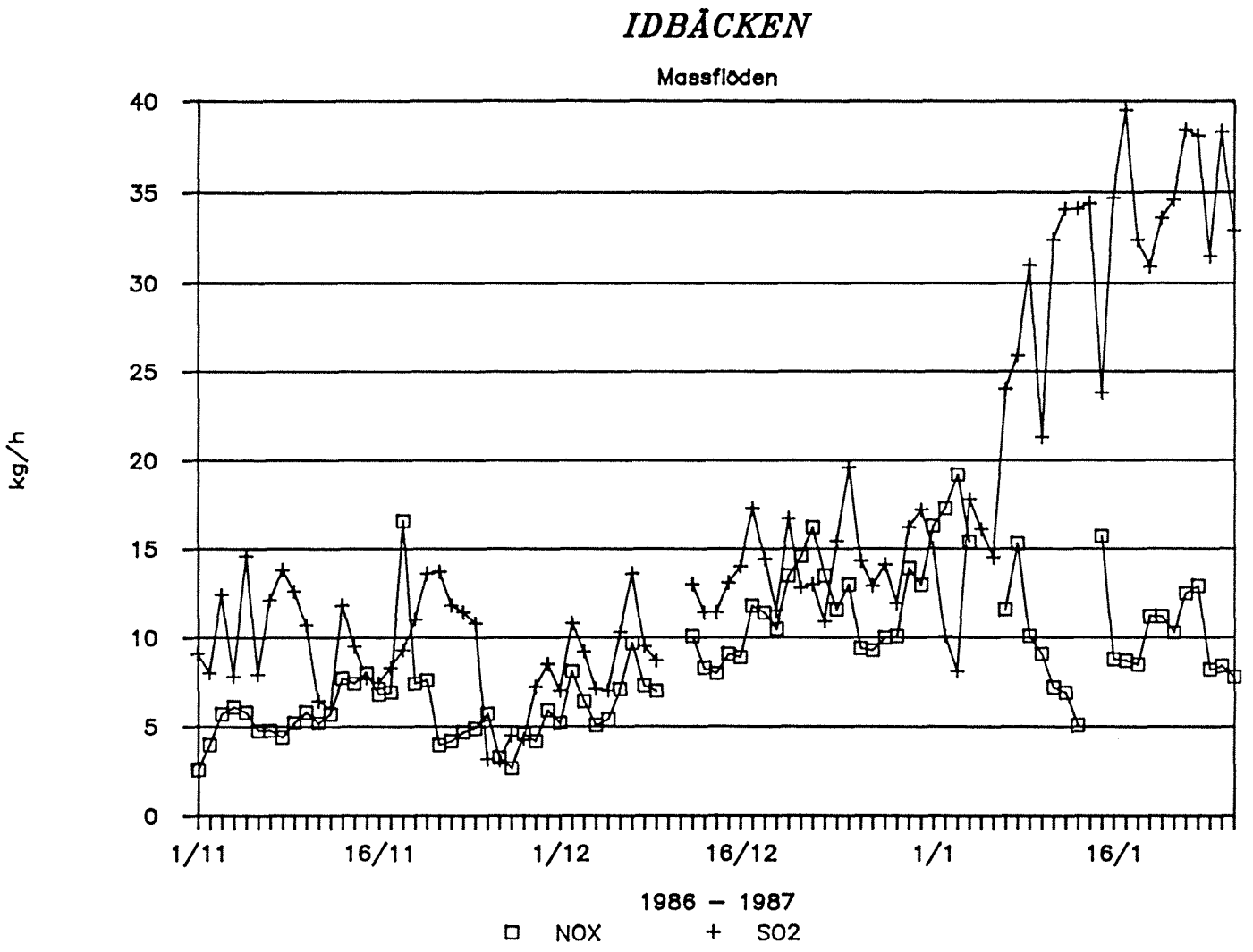
	Dygnsmedelvärden				
datum	NOX (ppm)	SO2 (ppm)	RGH (m/s)	NOX (kg/h)	SO2 (kg/h)
861016	46	98	16.8	3.9	11.6
861017	69	75	17.6	6.3	9.3
861018	91	76	19.1	8.9	10.3
861019	53	82	16.6	4.4	9.6
861020	47	90	15.4	3.7	9.6
861021		85	12.4		7.4
861022		137	12.4		12
861023	20	80	12.8	1.3	7.2
861024	26	80	13	1.7	7.3
861025	36	73	12.9	2.3	6.6
861026	25	71	12.6	1.6	6.3
861027	27	72	12.4	1.7	6.3
861028	29	129	12.5	1.8	11.5
861029	26	153	11.7	1.5	12.6
861030	50	94	18.4	4.7	12.6
861031	40	90	15.6	3.3	9.9
861101	38	100	13.3	2.6	9.1
861102	62	88	12.7	4	8
861103	71	116	15.8	5.7	12.4
861104	74	75	16	6.1	7.8
861105	67	122	16	5.8	14.6
861106	59	76	14.9	4.8	7.9
861107	65	116	14.8	4.8	12.1
861108	68	153	12.8	4.4	13.8
861109	78	135	13.2	5.2	12.6
861110	92	121	12.5	5.8	10.7
861111	85	75	12	5.2	6.4
861112	84	63	13.3	5.7	6
861113	97	107	15.7	7.7	11.8
861114	97	88	15.3	7.4	9.5
861115	108	74	14.8	8	7.7
861116	96	75	14.1	6.8	7.4
861117	92	79	14.9	6.9	8.3
861118	170	68	17.2	16.6	9.3
861119	93	98	15.9	7.4	11
861120	92	119	16.2	7.6	13.6

Dygnsmedelvärden

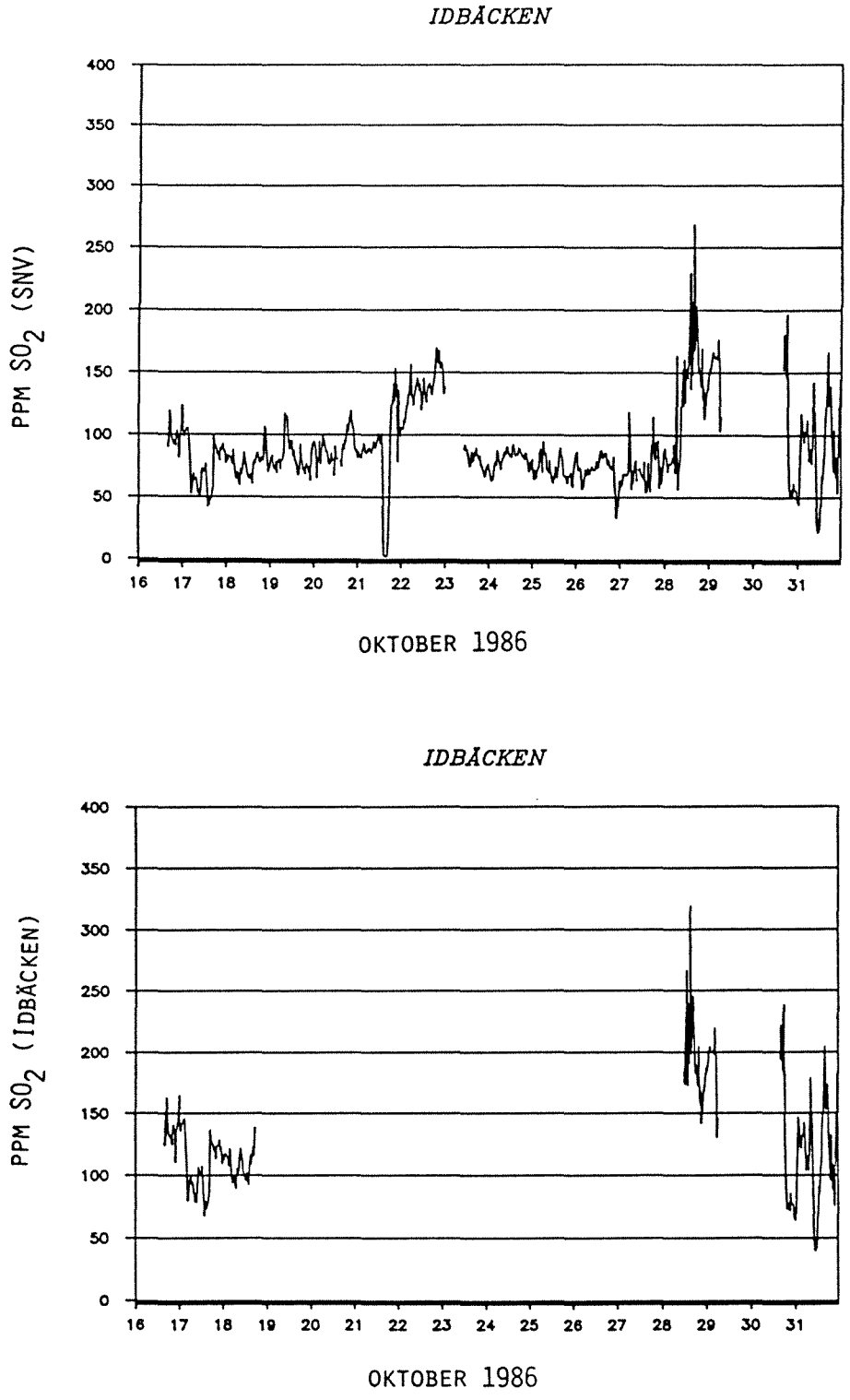
datum	NOX (ppm)	SO2 (ppm)	RGH (m/s)	NOX (kg/h)	SO2 (kg/h)
861121	53	132	15.1	4	13.7
861122	61	123	13.7	4.2	11.8
861123	69	120	13.5	4.7	11.4
861124	71	105	14	4.9	10.8
861125	86	52	12.3	5.7	3.2
861126	55	38	11.7	3.3	3.1
861127	49	58	10.9	2.7	4.5
861128	66	44	13.8	4.6	4.3
861129	60	73	13.8	4.2	7.2
861130	82	85	14.3	5.9	8.5
861201	78	76	13.2	5.2	7
861202	95	93	16.3	8.1	10.8
861203	87	89	14.6	6.4	9.2
861204	78	77	12.9	5.1	7.1
861205	84	77	12.8	5.4	7
861206	92	97	15	7.1	10.3
861207	107	107	18	9.7	13.6
861208	94	88	15.4	7.3	9.5
861209	95	84	14.8	7	8.7
861210					
861211					
861212	111	103	17.9	10.1	13
861213	102	100	16.2	8.3	11.4
861214	99	101	16	8	11.4
861215	103	107	17.3	9.1	13.1
861216	102	115	17.2	8.9	14
861217	137	145	16.8	11.8	17.3
861218	127	114	17.7	11.4	14.4
861219	119	93	17.3	10.5	11.5
861220	141	125	19.1	13.5	16.7
861221	148	94	19.5	14.6	12.8
861222	159	92	20.1	16.2	13
861223	142	82	18.9	13.5	10.9
861224	121	116	19	11.6	15.4
861225	136	147	18.8	13	19.6
861226	109	119	17.2	9.4	14.3
861227	109	109	16.9	9.3	12.9
861228	113	115	17.5	10	14.1
861229	116	97	17.2	10.1	11.9
861230	143	119	19.3	13.9	16.2
861231	138	131	18.7	13	17.2
870101	161	107	20	16.3	15
870102	179	75	19.1	17.3	10.1
870103	197	60	19.4	19.2	8.1
870104	157	131	19.3	15.4	17.8
870105		127	18		16.1
870106		116	17.8		14.5

Dygnsmedelvärden

datum	NOX (ppm)	SO2 (ppm)	RGH (m/s)	NOX (kg/h)	SO2 (kg/h)
870107	119	177	19.2	11.6	24
870108	165	191	19.3	15.3	25.9
870109	109	241	18.5	10.1	31
870110	96	162	18.9	9.1	21.3
870111	81	257	17.9	7.2	32.4
870112	76	271	18	6.9	34.1
870113	59	292	16.7	5.1	34.1
870114		302	16.2		34.4
870115	174	194	17.7	15.7	23.8
870116	105	297	16.6	8.8	34.7
870117	104	338	16.6	8.7	39.5
870118	111	302	15.3	8.5	32.4
870119	140	276	15.8	11.2	30.9
870120	131	285	16.7	11.2	33.6
870121	124	300	16.3	10.3	34.6
870122	143	316	17.2	12.5	38.4
870123	152	323	16.7	12.9	38.1
870124	107	296	15.1	8.2	31.5
870125	98	323	16.9	8.4	38.3
870126	99	307	15.2	7.8	32.9

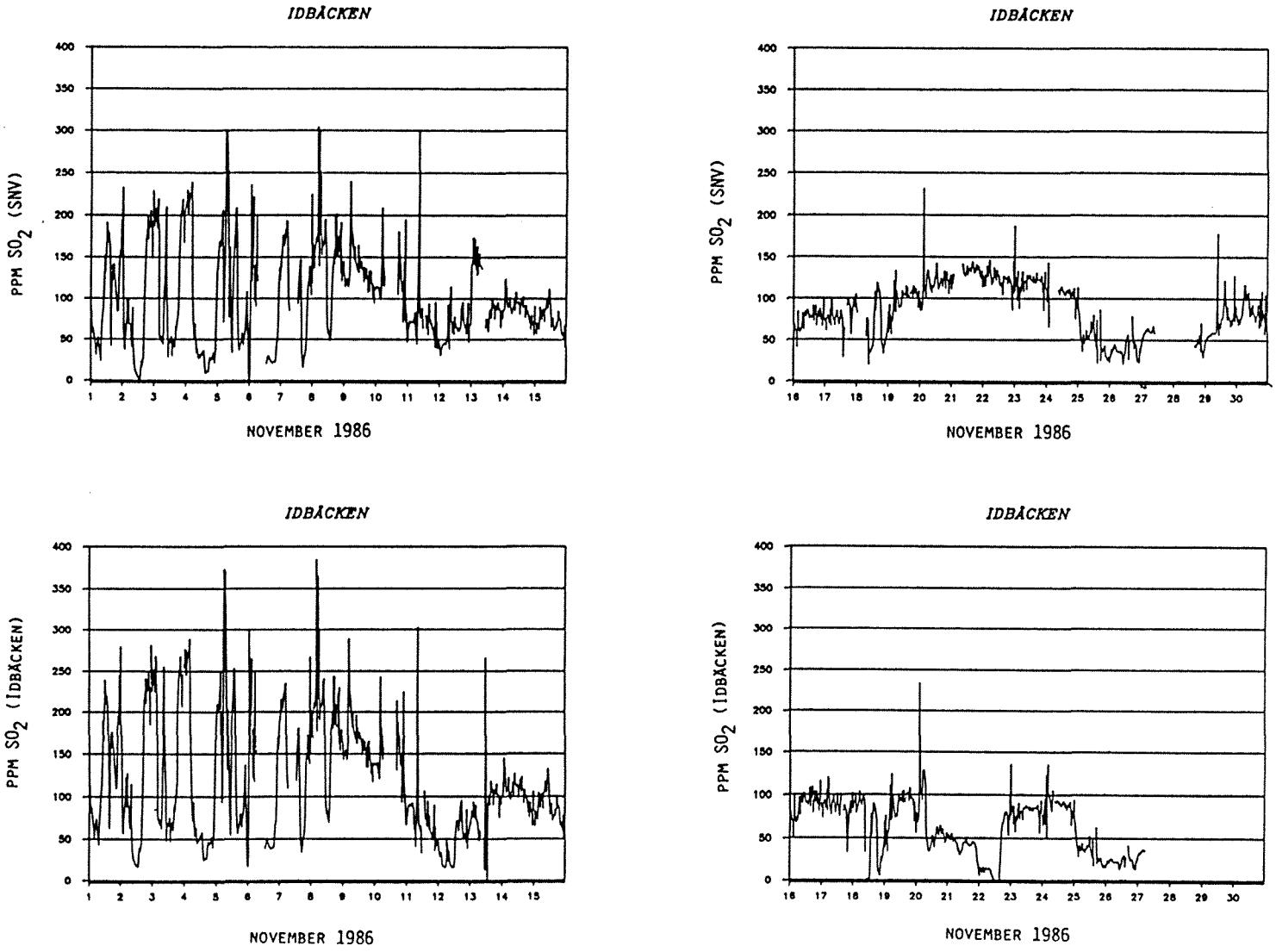


Figur 21. Massflöden (dygnsmedelvärden) av SO_2 och NO_x (som NO_2); kg/h.
(Mass flow (mean values, 24 h) of SO_2 and NO_x (as NO_2); kg/h.)

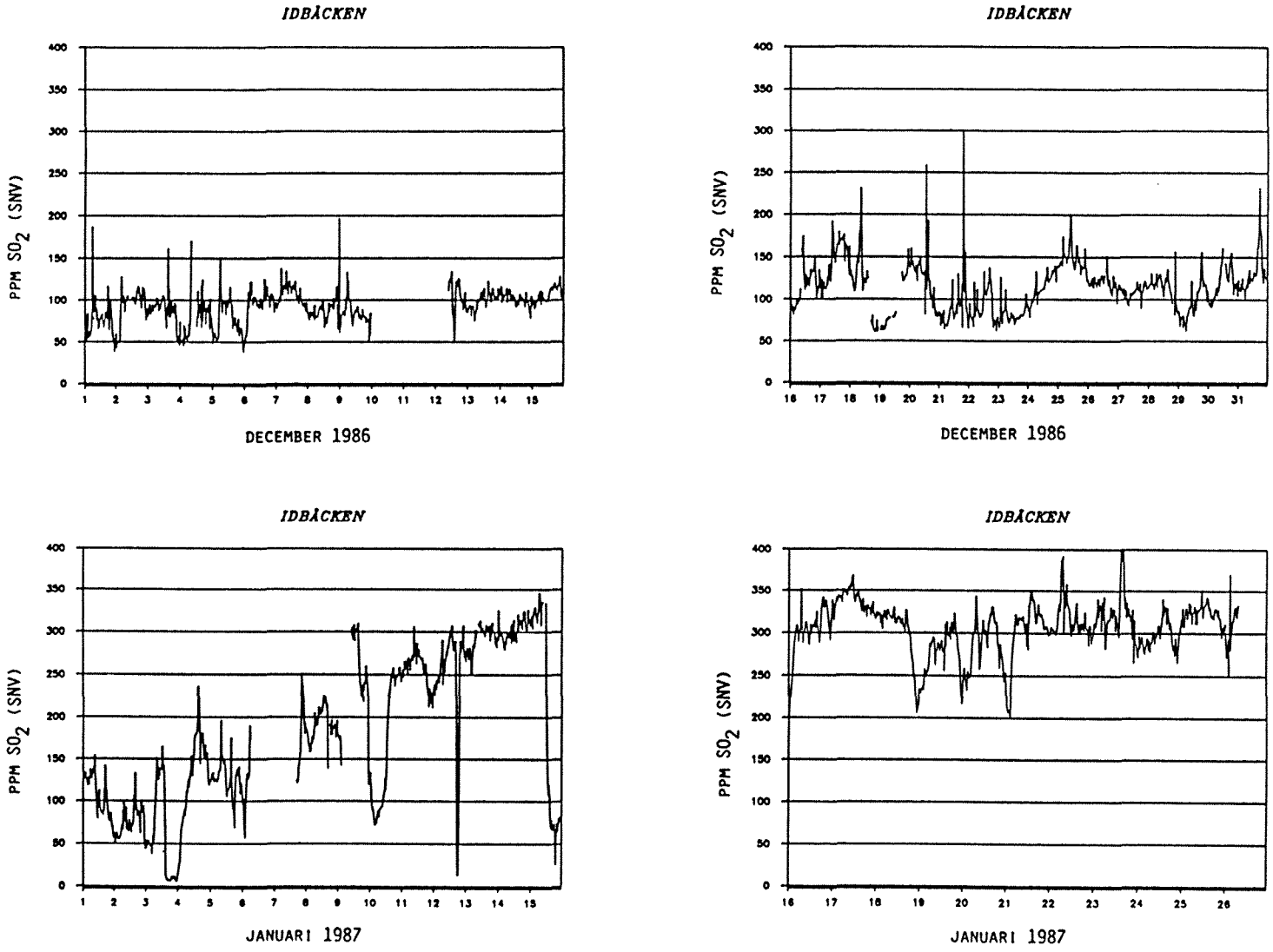


Figur 22. Koncentrationen av SO_2 (ppm; torr gas) mätt med utspädningssystem (SO_2(SNV)) och anläggningens egna mätsystem (SO_2(Idbäcken)). Mätperiod 16-31 oktober 1986.

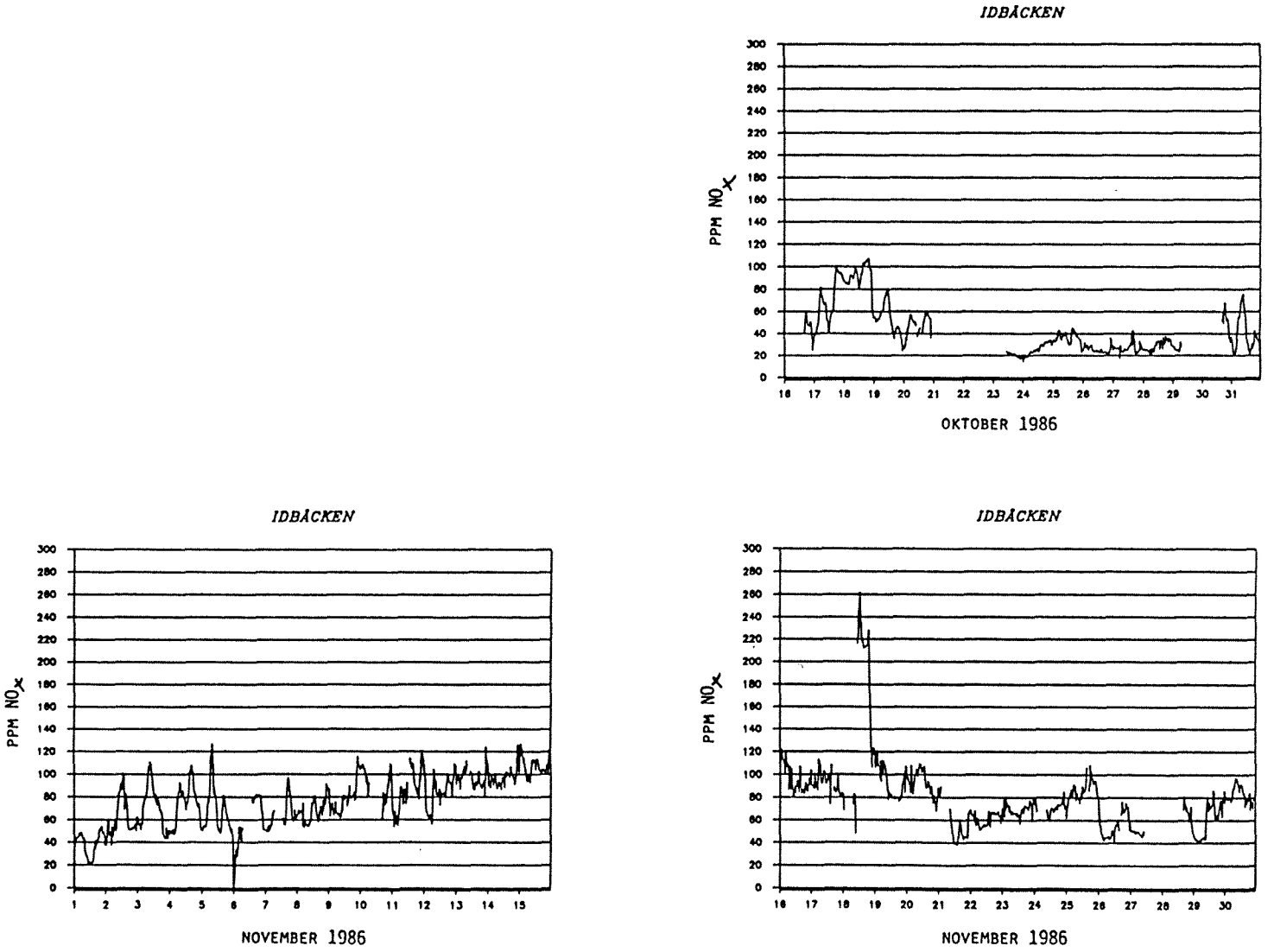
(The concentration of SO_2 (ppm; dry gas) measured by dilution stack sampler (SO_2(SNV)) and the equipment of the plant (SO_2(Idbäcken)) during October 16-31, 1986.)



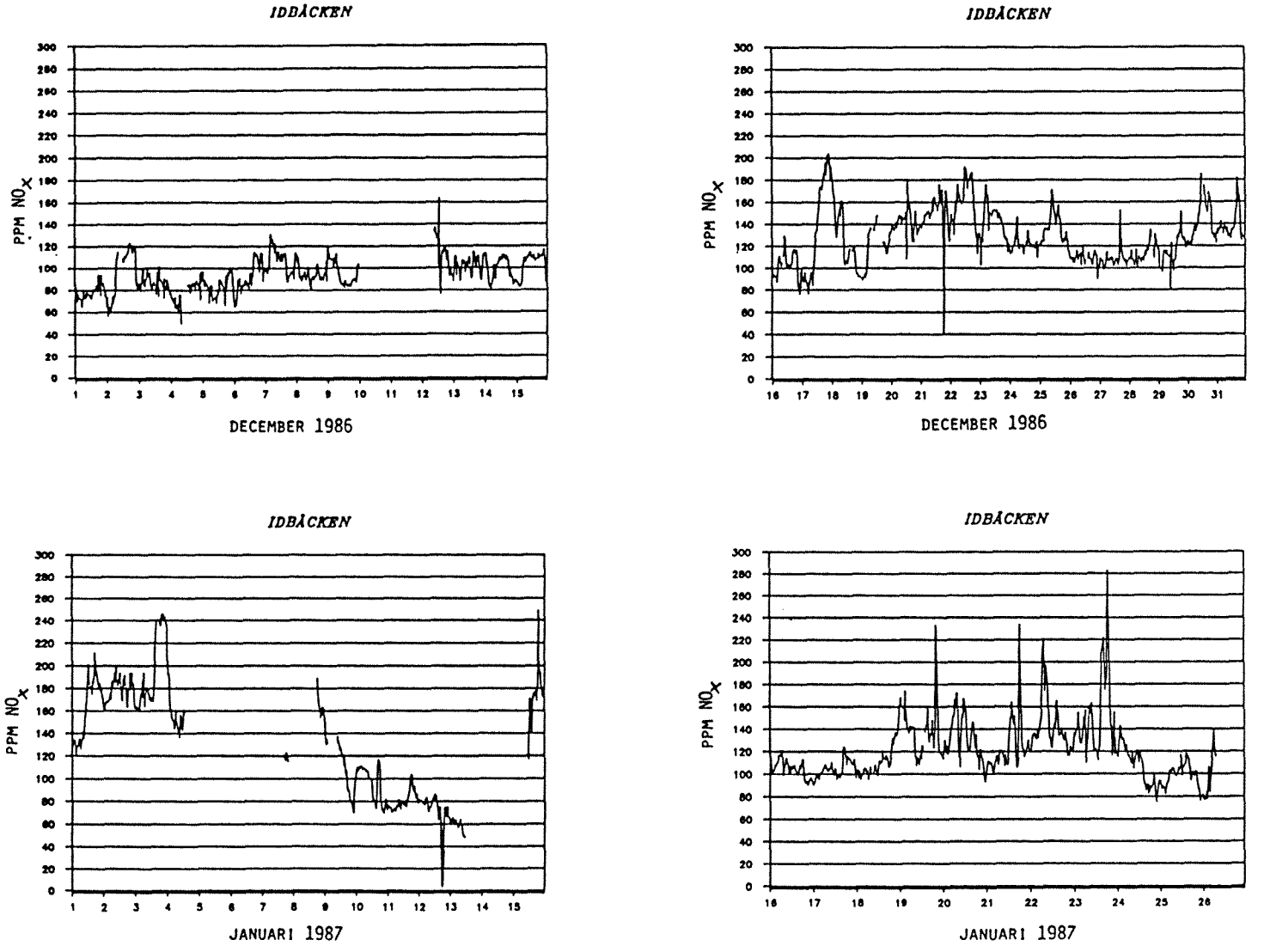
Figur 23. Koncentrationen av SO_2 (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) mätt med utspädningssystem (SO_2(SNV)) och anläggningens egna mätsystem (SO_2(Idbäcken)). November 1986. (Concentration of SO_2 (ppm; dry gas; ½ h mean values) measured by dilution stack sampler (SO_2(SNV)) and the equipment of the plant (SO_2(Idbäcken)). November 1986.)



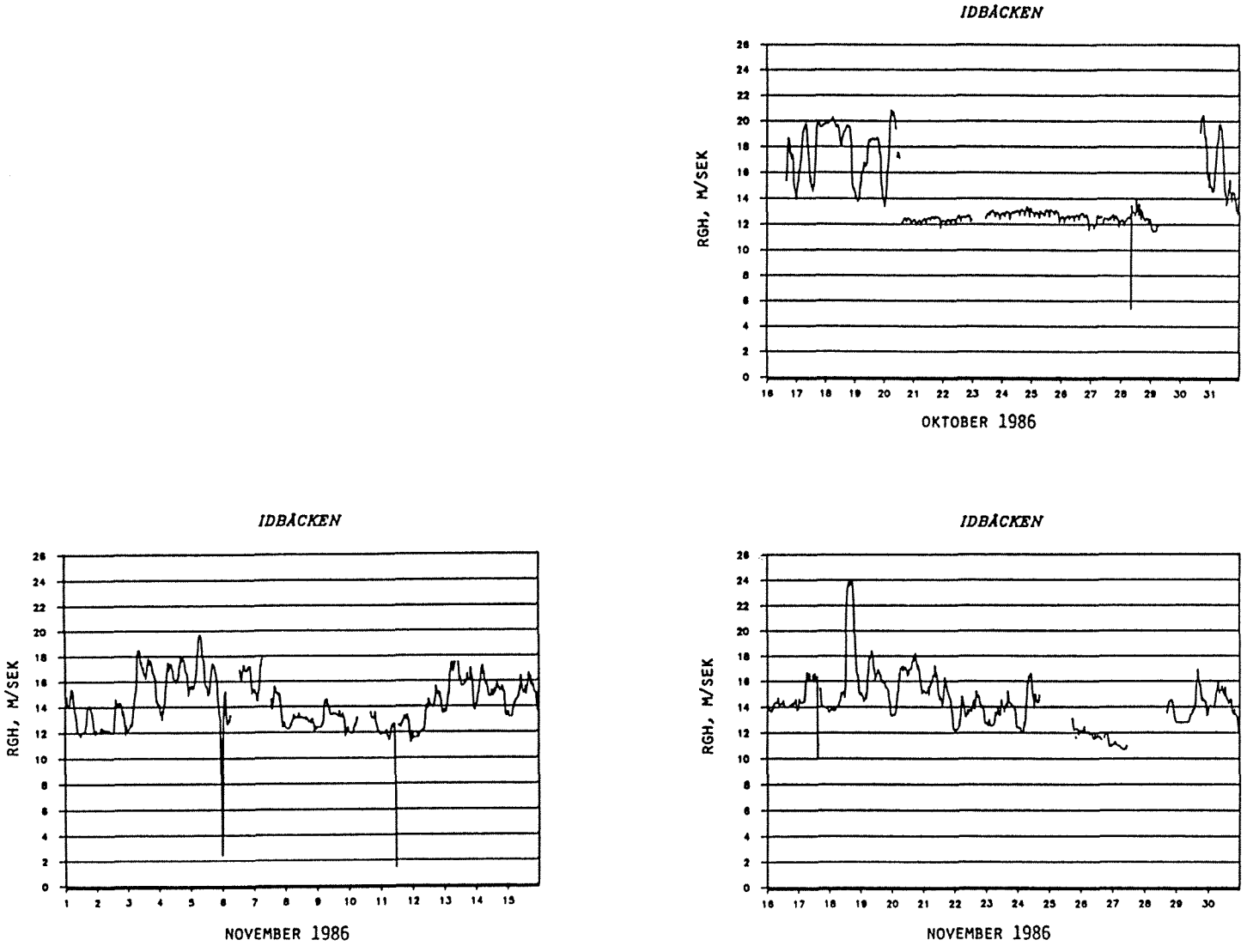
Figur 24. Koncentrationen av SO_2 (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) mätt med utspädningssystem (SO_2(SNV)) under perioden december 1986 - januari 1987.
(Concentration of SO_2 (ppm; dry gas; ½ h mean values) measured by dilution stack sampler (SO_2(SNV)) during December 1986 - January 1987.)



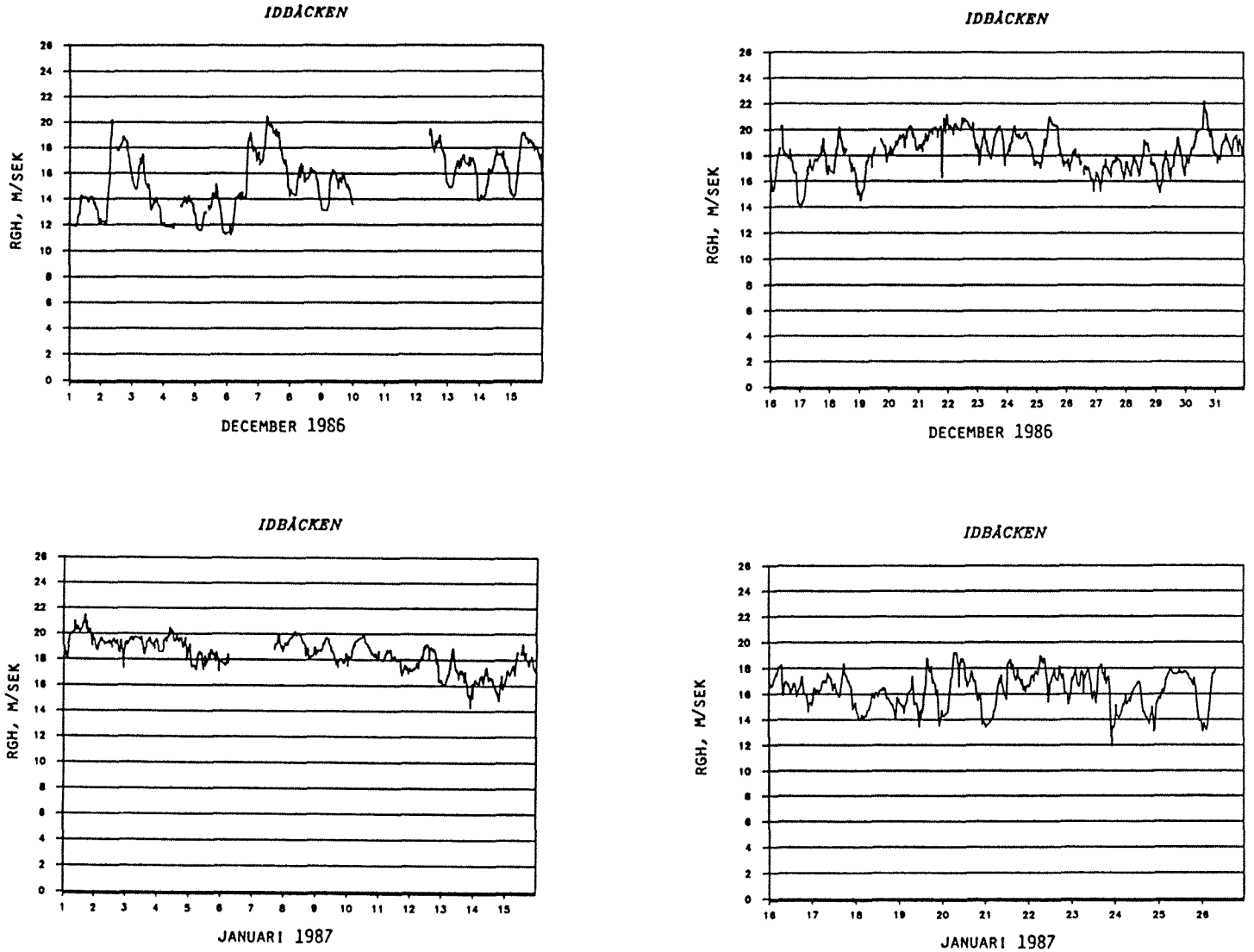
Figur 25. Koncentrationen av NO_x (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden 16 oktober - 30 november 1986.
(Concentration of NO_x (ppm; dry gas; ½ h mean values) as measured during October 16 - November 30, 1986.)



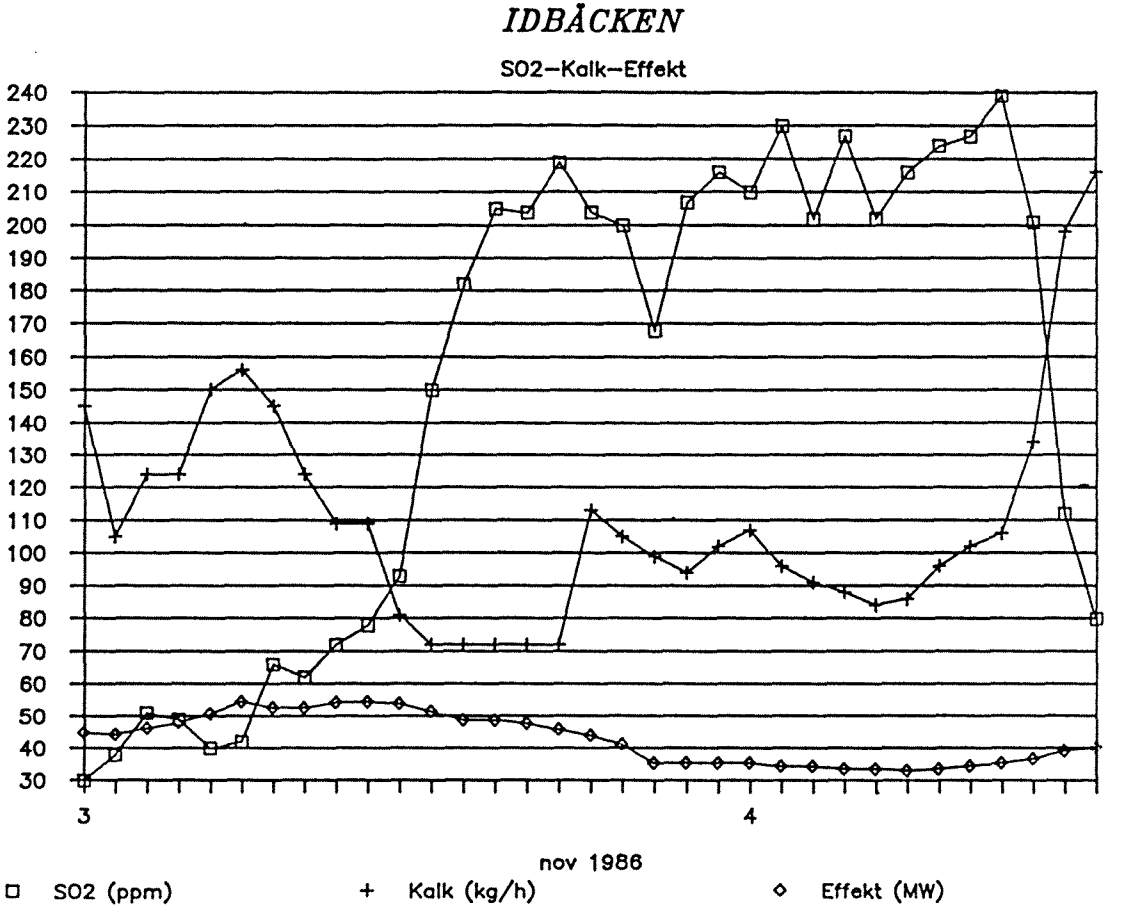
Figur 26. Koncentrationen av NO_x (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden december 1986 - januari 1987.
(Concentration of NO_x (ppm; dry gas; ½ h mean values) as measured during December 1986 - January 1987.)



Figur 27. Uppmätt rökgashastighet (RGH; m/sek; halvtimmesmedelvärden) under perioden 16 oktober - 30 november 1986.
(Flue gas velocity (RGH; m/sec; ½ h mean values) as measured during October 16 - November 30, 1986.)



Figur 28. Uppmätt rökgashastighet (RGH; m/sek; halvtimmesmedelvärden) under perioden december 1986 - januari 1987.
(Flue gas velocity (RGH; m/sec; ½ h mean values) as measured during November 1986 - January 1987.)



Figur 29. Jämförelse mellan SO_2-koncentrationen (ppm; torr gas) i rökgasen och mängden kalk (kg/h) som tillsattes den fluidiserande bädden. Anläggningens totala värmeeffekt (MW) visas också. Halvtimmesmedelvärden från kl 14.00 den 3/11 - kl 06.00 den 4/11 1986. (Comparison between SO_2 concentration (ppm; dry gas) in the flue gases and the amount of limestone (kg/h) added to the fluidized bed. The total effect of the plant is also shown. Mean values (½ h) during 02.00 pm of November 3 - 06.00 am of November 4, 1986.)

Bilaga 10

Resultat från kraftvärmeverket i Västerås

Tabell 2. Dygnsmedelvärden för koncentrationerna (normal torr gas) av kväveoxider (NO_x), svaveldioxid (SO_2) och koldioxid (CO_2); rökgashastigheten (RGH) och kolförbrukningen samt massflödena av NO_x (som NO_2) och SO_2.
(Mean values (24 h) of the concentration (normal dry gas) of NO_x, SO_2 and CO_2; flue gas velocity (RGH), coal consumption and the mass flow of NO_x (as NO_2) and SO_2).)

datum	NOX (ppm)	SO2 (ppm)	RGH (m/s)	CO2 (%)	KOL (kg/h)	NOX (kg/h)	SO2 (kg/h)
870210	702	240	14.8		18700	235	112
870211	682	238	15.2		16300	235	114
870212	674	232	12.7		12600	198	94
870213	742	234	13.4		15100	230	100
870214	722	234	13		15400	217	97
870215	835	245	14.5		18100	276	112
870216	790	241	16.5		18800	296	126
870217	669	227	13.4		15100	204	96
870218	733	244	14.9		17900	248	115
870219	707	235	13.4		16900	217	100
870220	698	236	12.8		16800	205	96
870221	618	226	11		12800	154	79
870222	713	236	15.5		18800	251	115
870223	718	235	15.4		18000	252	115
870224	689	225	13.8		16300	220	99
870225	715	240	15.4		18000	250	117
870226	778	248	16.3		18500	290	128
870227	664	220	13		13100	197	91
870228	735	233	13.6		17100	228	100
870301	735	228	14.3		18300	239	103
870302	752	223	17.5		19500	298	123
870303	784	206	18.2		19100	322	118
870304	803	217	17		19800	330	124
870305	815	227	18.8		20500	347	135
870306	688	226	14.9		15400	238	106
870307	696	236	14.9		17000	235	111
870308	672	232	14.3		15700	220	105
870309	664	228	13.9		15700	210	100
870310	691	223	13.2		16000	216	96

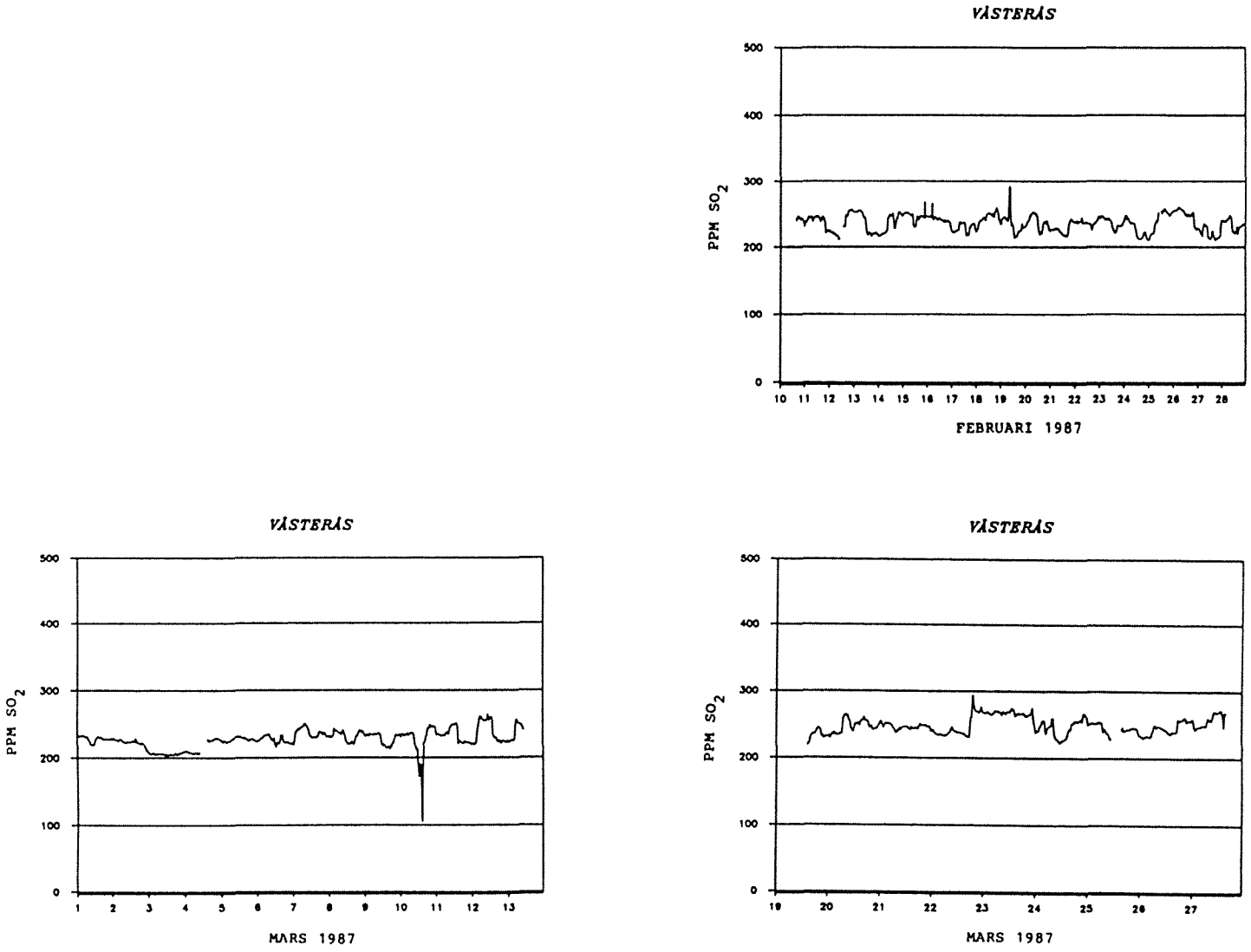
datum	NOX (ppm)	SO2 (ppm)	RGH (m/s)	CO2 (%)	KOL (kg/h)	NOX (kg/h)	SO2 (kg/h)
870311	648	233	13.5		13300	198	99
870312	656	238	12.3		14200	189	94
870313	652	238	12.2		14800	188	93
870314					18600		
870315					14600		
870316					12800		
870317					16100		
870318					14100		
870319	555	233	10		12600	126	74
870320	556	246	10.4		12000	131	81
870321	555	246	10		11000	126	78
870322	605	245	11		12500	155	86
870323	746	266	16.3		18400	276	137
870324	572	244	10.4		12300	136	80
870325	528	244	8.2	10.9	11100	99	63
870326	560	243	11.5	10.8	12500	148	89
870327	572	257	13.5	10.5	12800	177	110
870328							
870329							
870330							
870331							
870501		240		9.4	11600		
870502		236		9.2	11500		
870503		235		9.5	12100		
870504		264		10.4	19000		
870505		286		10.4	17900		
870506		275		9.9	15700		
870507	680	275	14.5	10.3	16500	225	123
870508	706	267	12.9	10.5	17100	207	109
870509	608	247	11.7	9.7	13300	163	92
870510	644	247	13.1	10	14900	195	102
870511	738	245	14.7	10.4	18100	245	113
870512	745	243	15	10.8	18400	252	115
870513	730	253	14	10.1	18400	230	111
870514	702	256	14.1	10.9	16400	226	114
870515	723	257	13.8	10.5	17200	226	112
870516	641	253	13.8	11.3	14600	204	111
870517	615	240	13	10.1	14200	183	99
870518	690	241	15	11.6	18000	234	113
870519	665	249	15.3	11.9	16200	232	121
870520	666	257	13	10.8	16400	196	105
870521	624	292	13.1	11.2	16100	188	121
870522	525	344	12.7	10.6	12400	152	138
870523	473	348	9.7	10.1	9300	105	107
870524	487	359	12.4	10.3	9400	137	141

datum	NOX (ppm)	SO2 (ppm)	RGH (m/s)	CO2 (%)	KOL (kg/h)	NOX (kg/h)	SO2 (kg/h)
870525	588	402	14.7	11.9	16600	196	186
870526	620	401	15.9	13.1	18800	223	202
870527	618	378	15	11.6	17700	210	180
870528	625	394	15.4	11.9	18100	217	191
870529	611	400	16	12.8	18000	221	202
870530	618	388	16.2	13.4	17800	226	198
870531	501	367	13	10.3	12600	148	151
870601	558	381	15.8	13.6	16200	201	190
870602	571	377	16.9	15	17400	218	201
870603	571	376	16.4	13.7	16000	211	194
870604	543	368	14.2	10.6	12600	176	165
870605	539	379	12.9	10.3	13100	158	155
870606	497	366	11.1	9.5	10300	126	128
870607	480	368	9.8	9.3	10400	106	114
870608	492	378	10.8	9.6	11800	121	129
870609	557	389	13.2	10.2	14900	166	162
870610							
870611	559	392	17.5	15.2	16200	220	216
870612	546	387	17.2	14.5	16100	213	210
870613	466	359	13.7	9.3	10100	144	155
870614	472	362	12.2	9	10300	130	139
870615	526	361	14.6	11.6	15200	176	167
870616	524	368	16.6	13.6	16300	197	193
870617	502	359	15.8	12.1	14100	181	180
870618	477	340	14.1	11.2	11500	152	151

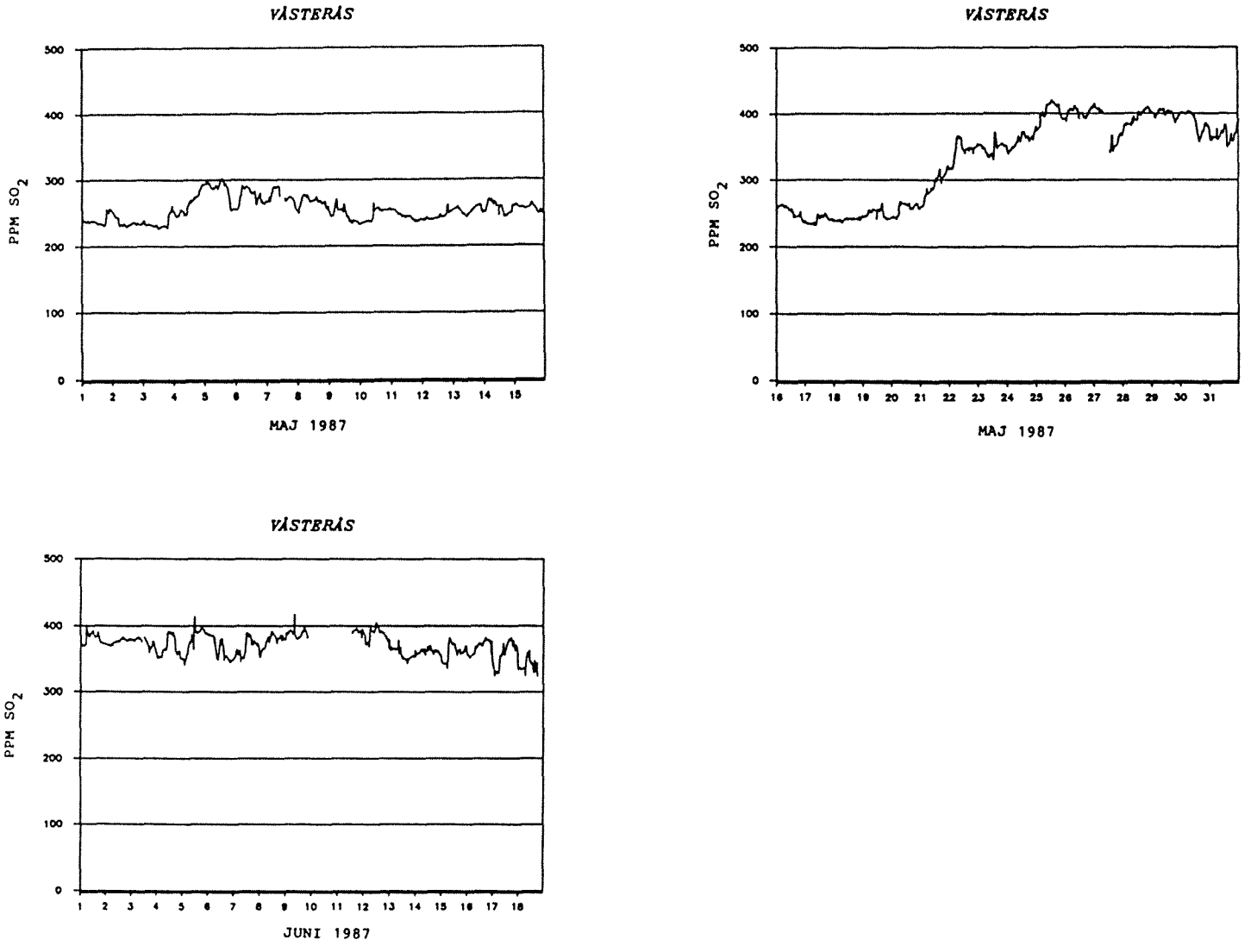
Tabell 3. Resultat av kolanalyser.
(Coal analysis)

Datum	10/2-22/3	23-27/3	1-19/5	20/5-18/6
Ursprung	Ryskt	Ryskt	Ryskt	Colombia
H_i	24,39	23,38	24,43	25,94
Aska	12,9	12,9	12,6	8,11
Fukt	11,3	14,5	11,9	12,0
Flykthalt	32,2	31,0	31,6	32,5
C	61,6	59,6	61,4	64,2
H	4,09	3,81	3,90	4,12
N	2,06	1,99	2,00	1,38
O	7,61	7,57	7,68	9,52
S	0,372	0,411	0,43	0,652

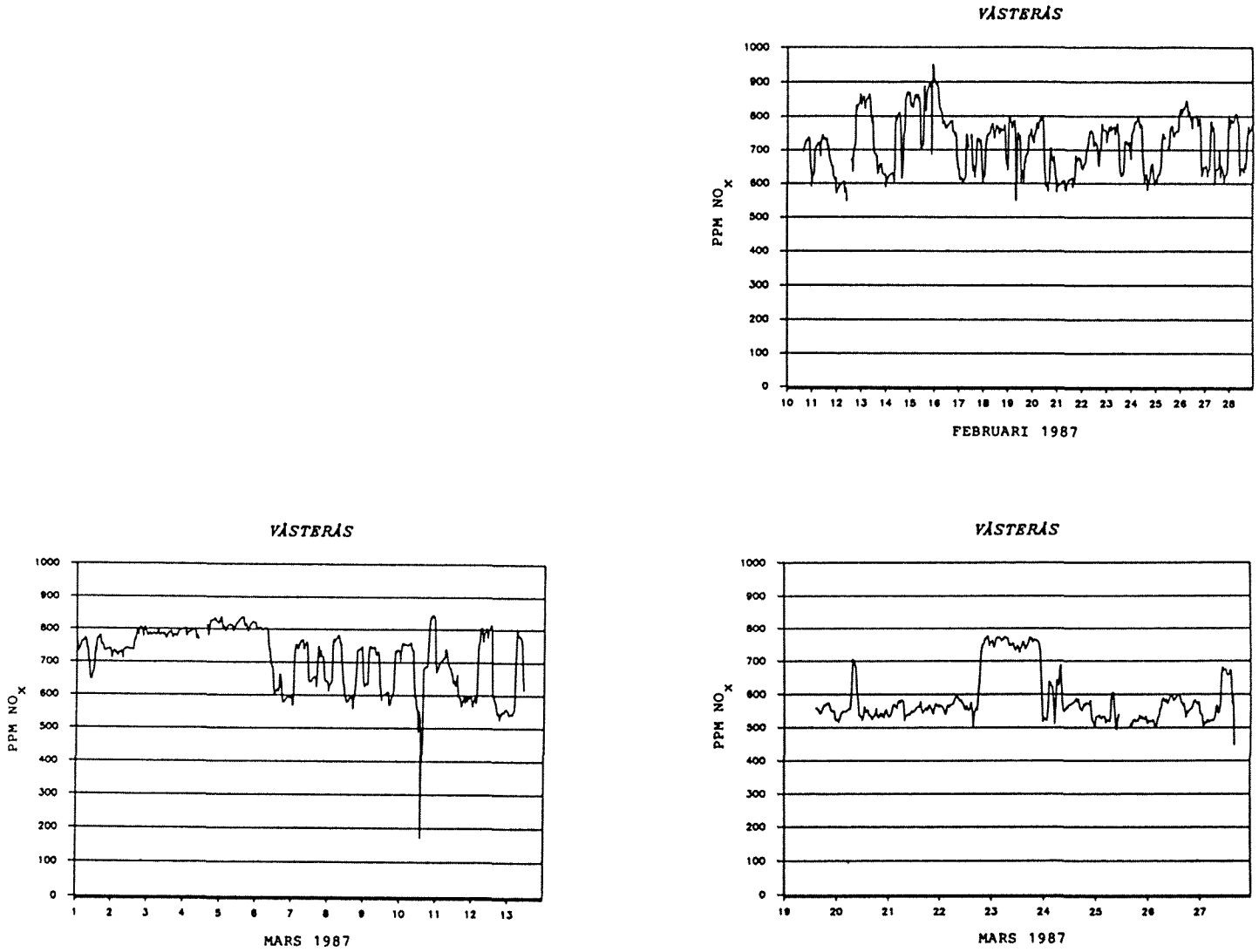
Ursprung - origin
H_i = effektiva värmevärdet - net caloric value as received (MJ/kg)
Aska = askhalt - ash (%; by weight) (vikts-%)
Fukt = fukthalt - total moisture (vikts-%)
Flykthalt = flyktiga beståndsdelar - volatile matter (vikts-%)
C = kolhalt - carbon (vikts-%)
H = vätehalt - hydrogen (vikts-%)
N = kvävehalt - nitrogen (vikts-%)
O = syrehalt - oxygen (vikts-%)
S = svavelhalt - sulfur (vikts-%)



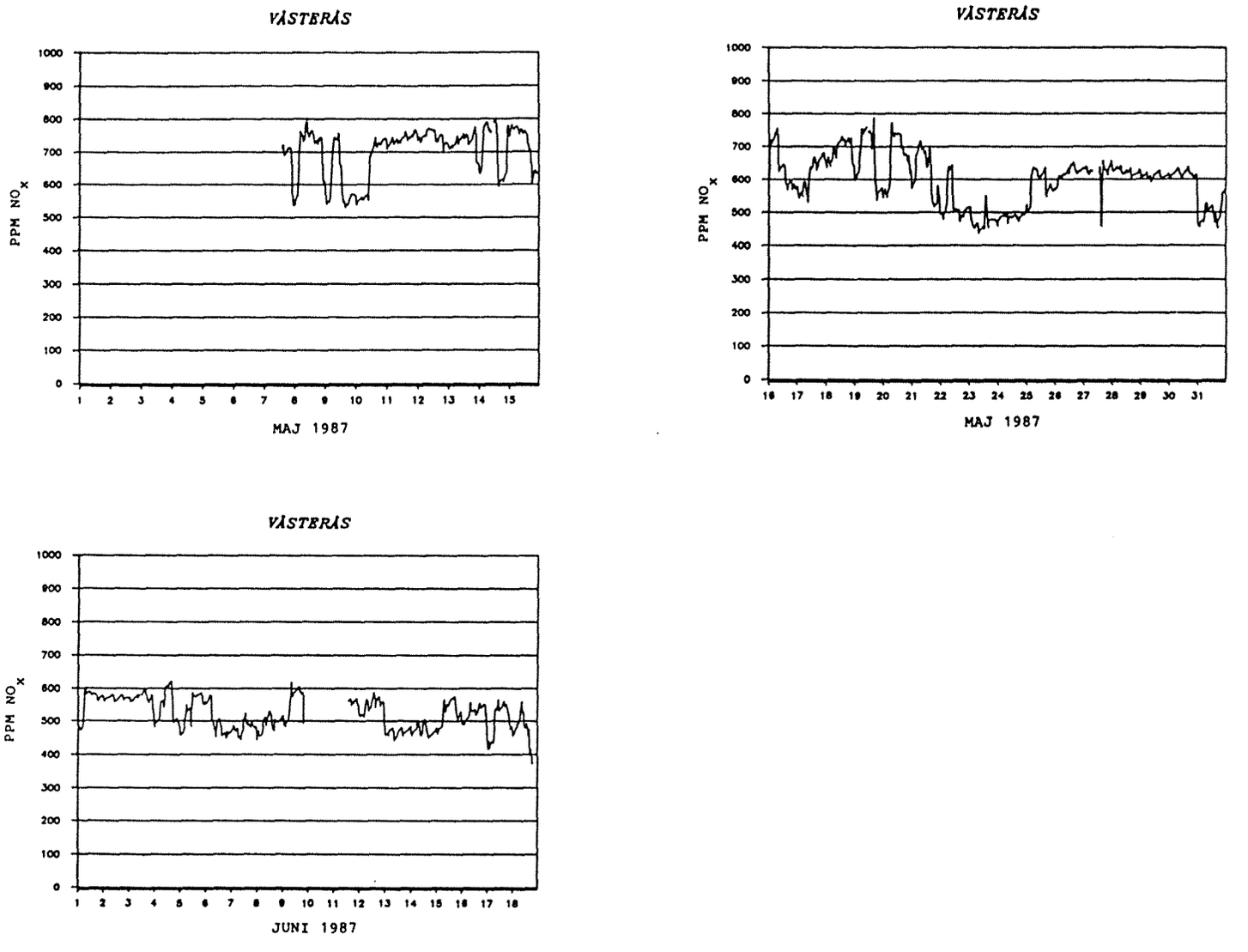
Figur 30. Koncentrationen av SO_2 (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden 10 februari - 27 mars 1987.
(Concentration of SO_2 (ppm; dry gas; ½ h mean values) as measured during February 10 - March 27, 1987.)



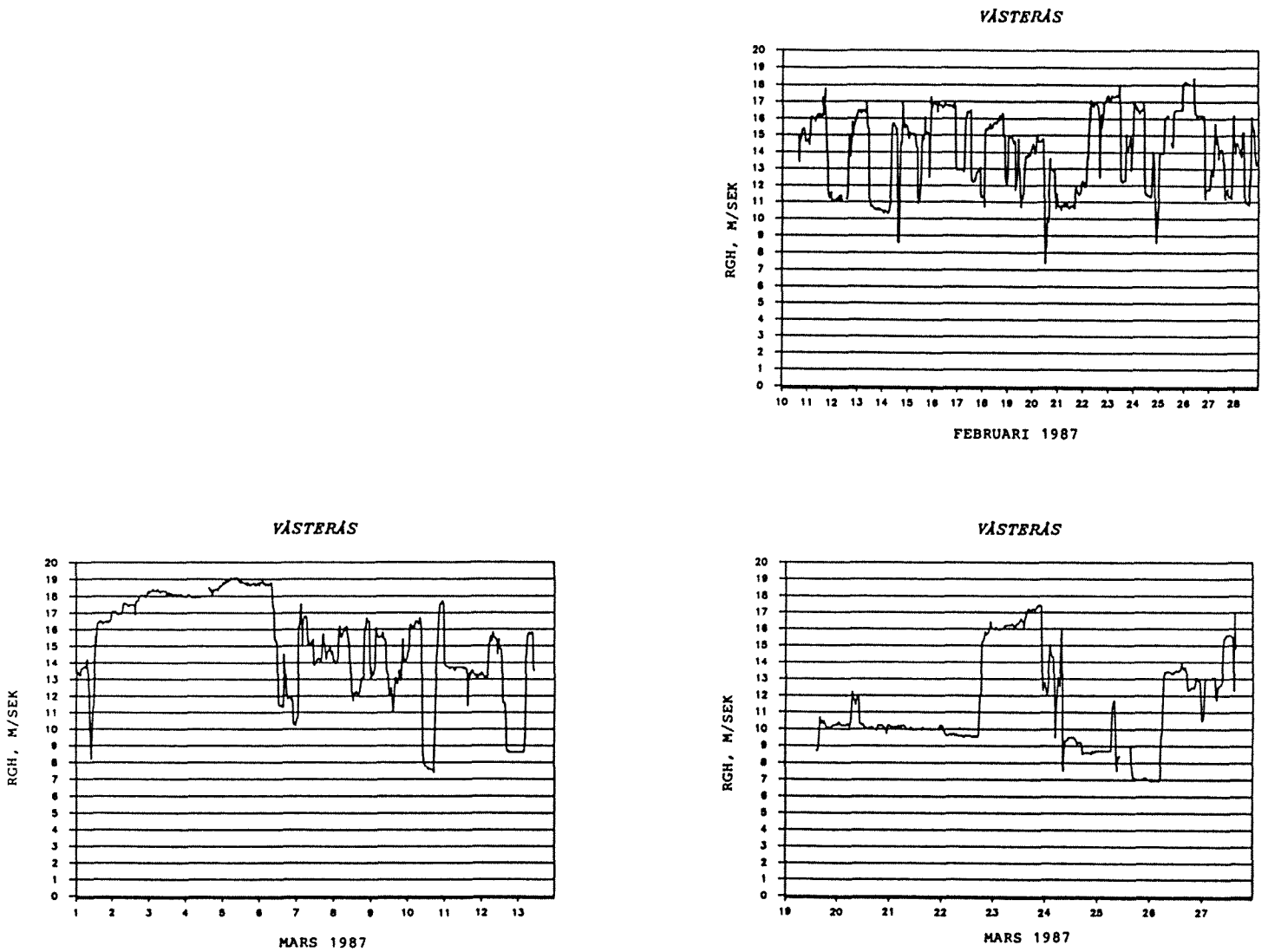
Figur 31. Koncentrationen av SO_2 (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden 1 maj - 18 juni 1987.
(Concentration of SO_2 (ppm; dry gas; ½ h mean values) as measured during May 1 - June 18, 1987.)



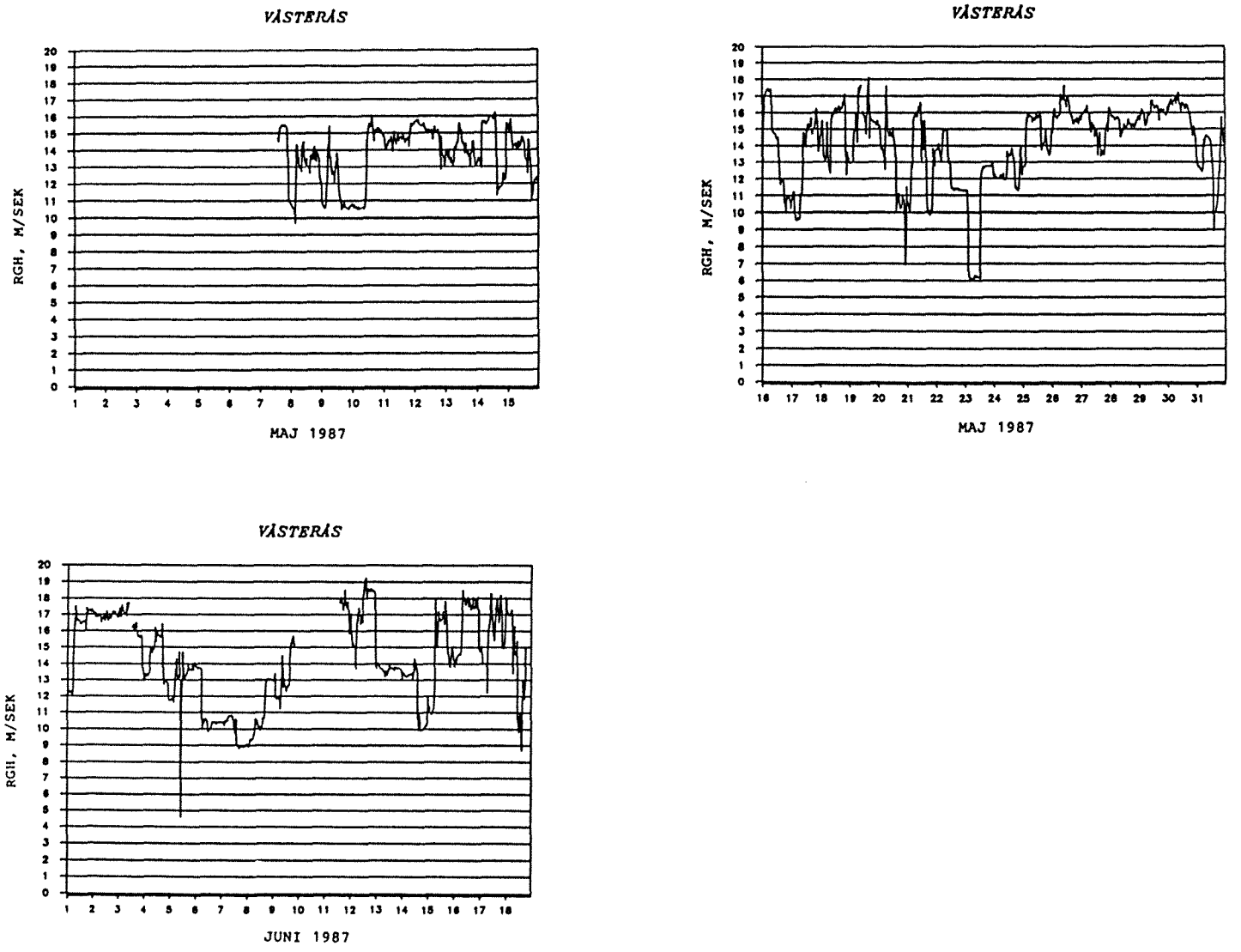
Figur 32. Koncentrationen av NO_x (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden 10 februari - 27 mars 1987.
(Concentration of NO_x (ppm; dry gas; ½ h mean values) as measured during February 10 - March 27, 1987.)



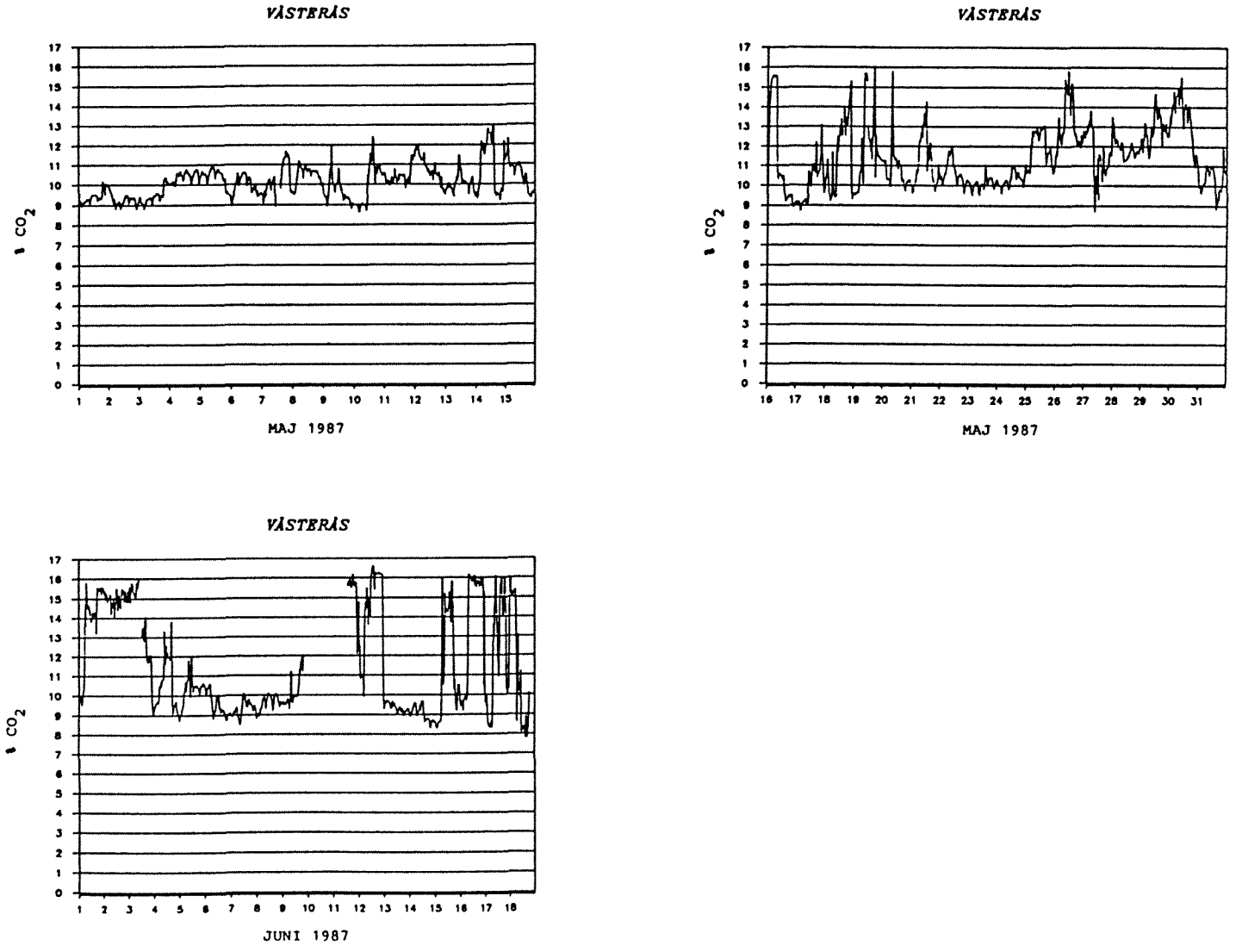
Figur 33. Koncentrationen av NO_x (ppm; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden 1 maj - 18 juni 1987.
(Concentration of NO_x (ppm; dry gas; ½ h mean values) as measured during May 1 - June 18, 1987.)



Figur 34. Uppmätt rökgashastighet (RGH; m/sek; halvtimmesmedelvärden) under perioden 10 februari - 27 mars 1987.
(Flue gas velocity (RGH; m/sec; ½ h mean values) as measured during February 10 - March 27, 1987.)

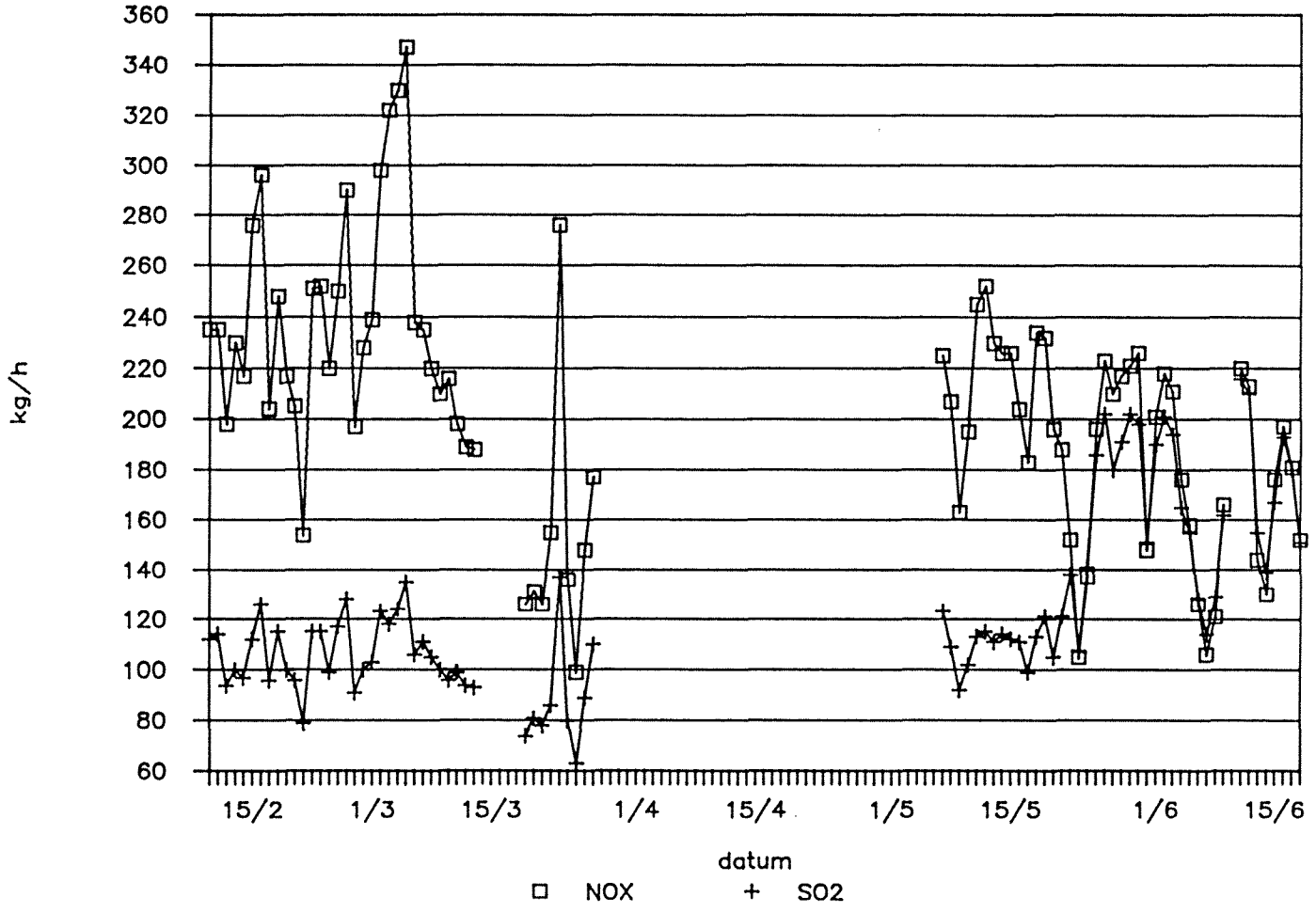


Figur 35. Uppmätt rökgashastighet (RGH; m/sek; halvtimmesmedelvärden) under perioden 1 maj - 18 juni 1987.
(Flue gas velocity (RGH; m/sec; ½ h mean values) as measured during May 1 - June 18, 1987.)

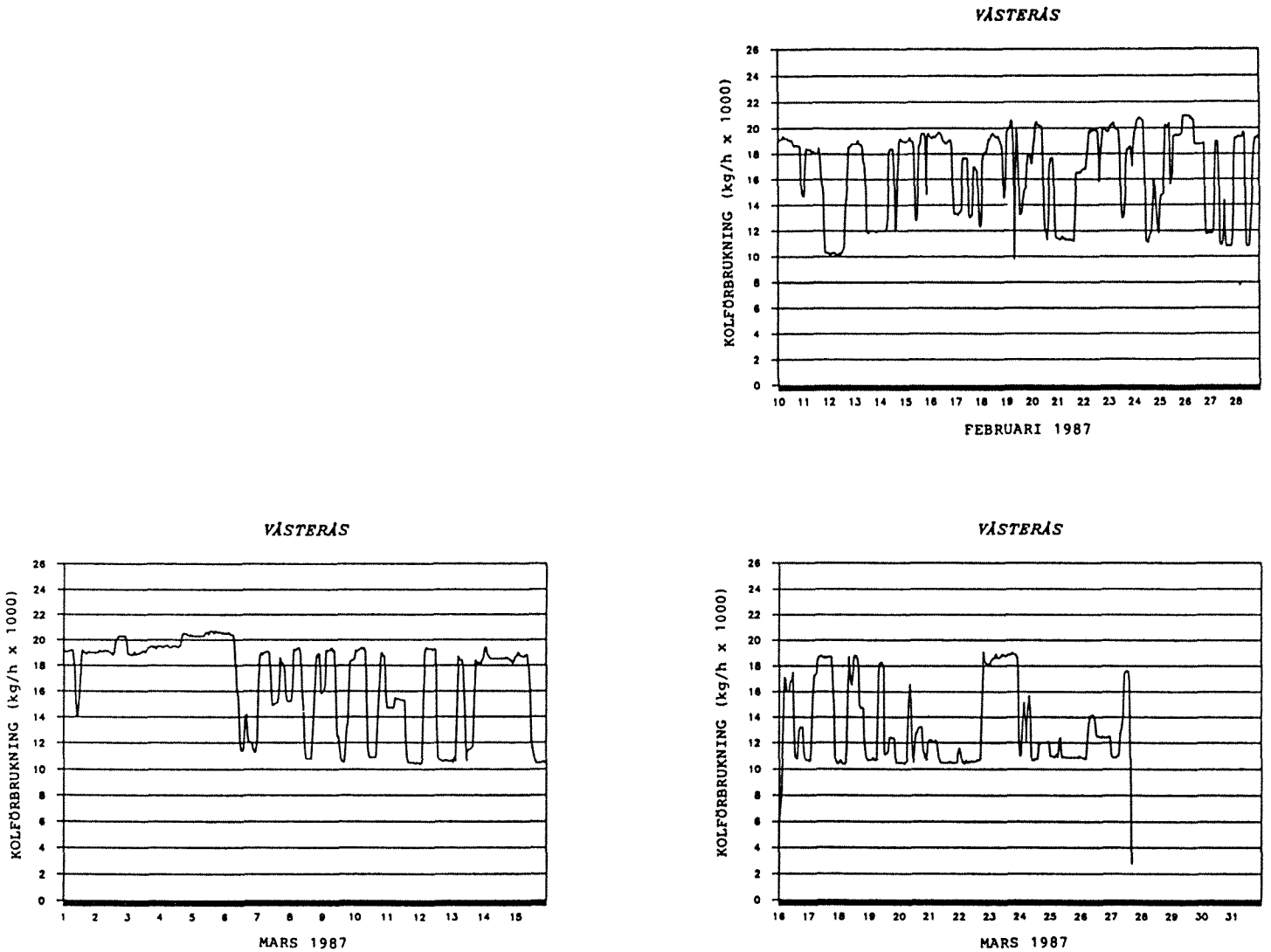


Figur 36. Koncentrationen av CO_2 (%; torr gas; halvtimmesmedelvärden) under perioden 1 maj - 18 juni 1987.
(Concentration of CO_2 (%; dry gas; ½ h mean values) as measured during May 1 - June 18, 1987.)

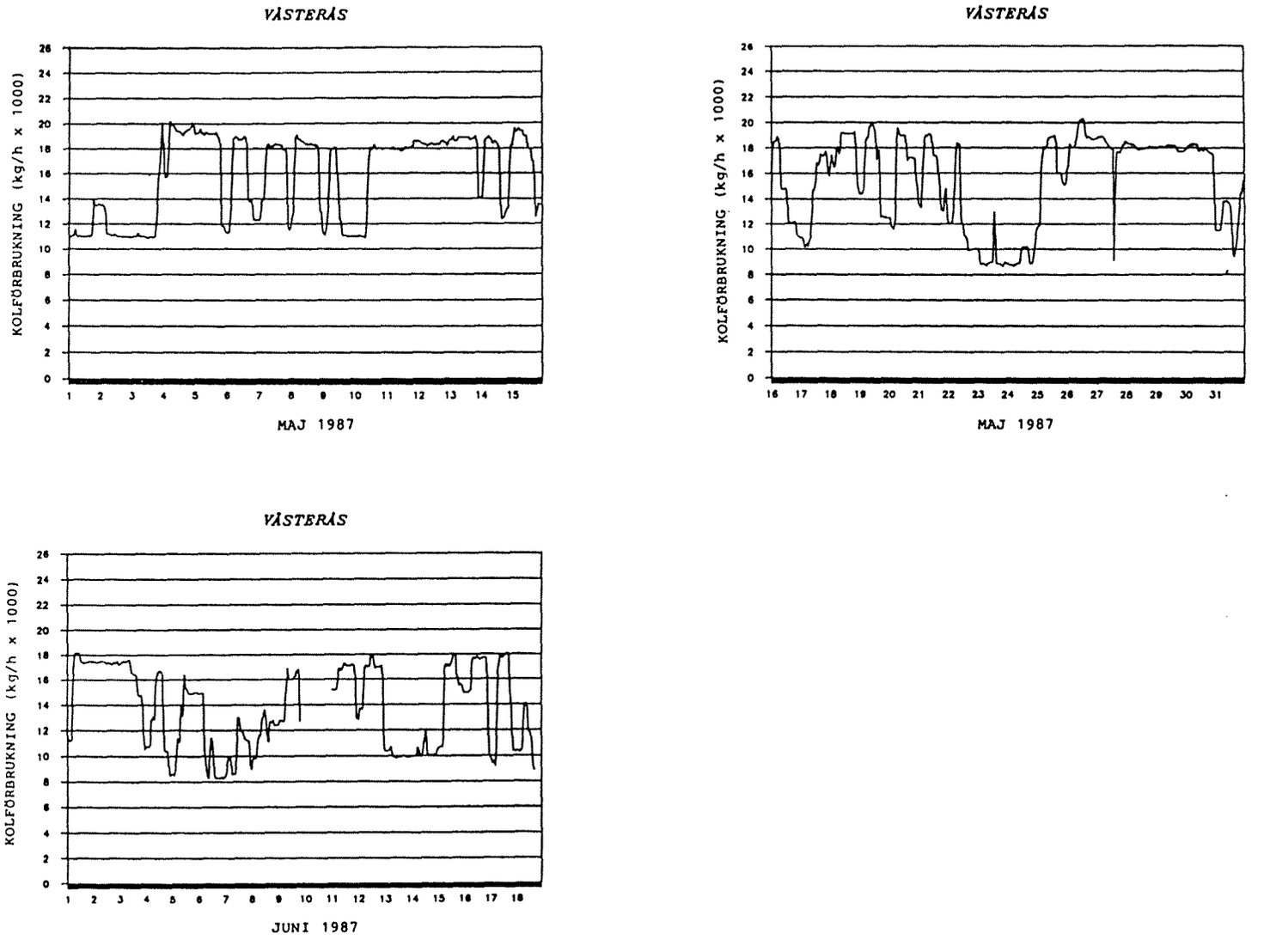
VÄSTERÅS



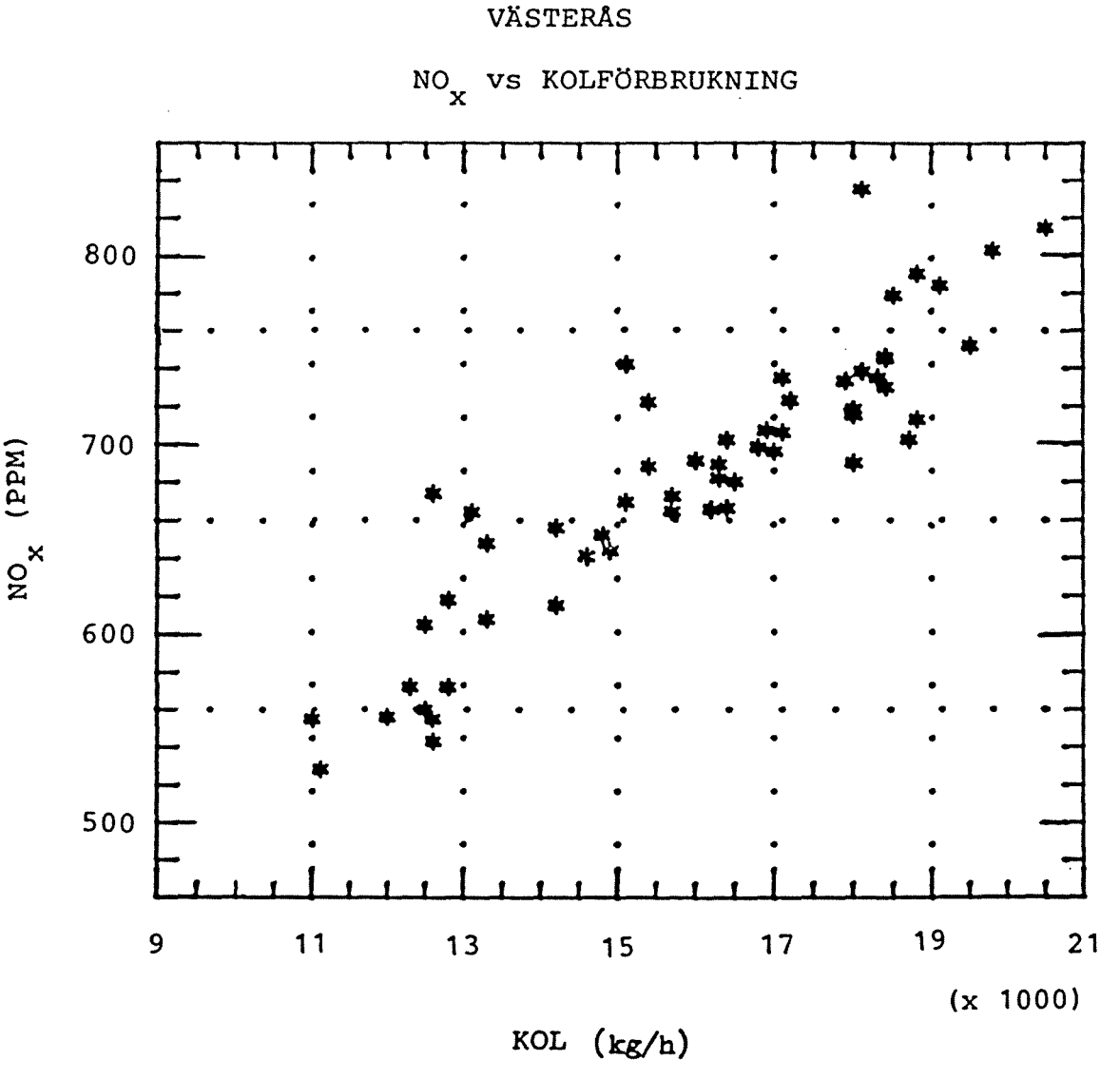
Figur 37. Massflöden (dygnsmedelvärden) av SO_2 och NO_x (som NO_2); kg/h.
(Mass flow (mean values, 24 h) of SO_2 and NO_x (as NO_2); kg/h.)



Figur 38. Kolförbrukningen (kg/h; entimmesmedelvärden) under perioden 10 februari - 27 mars 1987.
(Coal consumption (kg/h; 1 h mean values) during February 10 - March 27, 1987.)



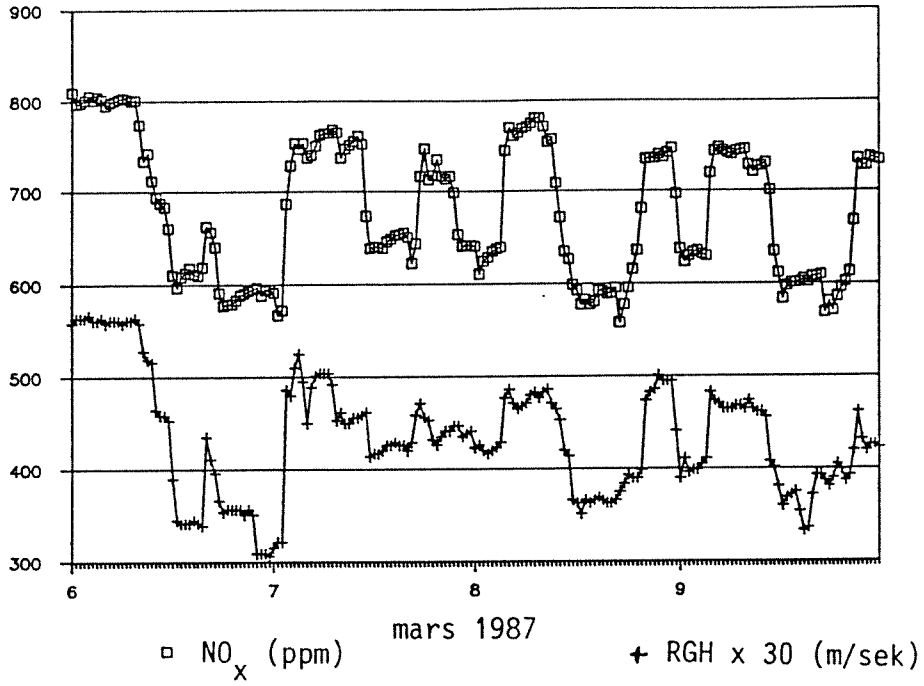
Figur 39. Kolförbrukningen (kg/h; entimmesmedelvärden) under perioden 1 maj - 18 juni 1987.
(Coal consumption (kg/h; 1 h mean values) during May 1 - June 18, 1987.)



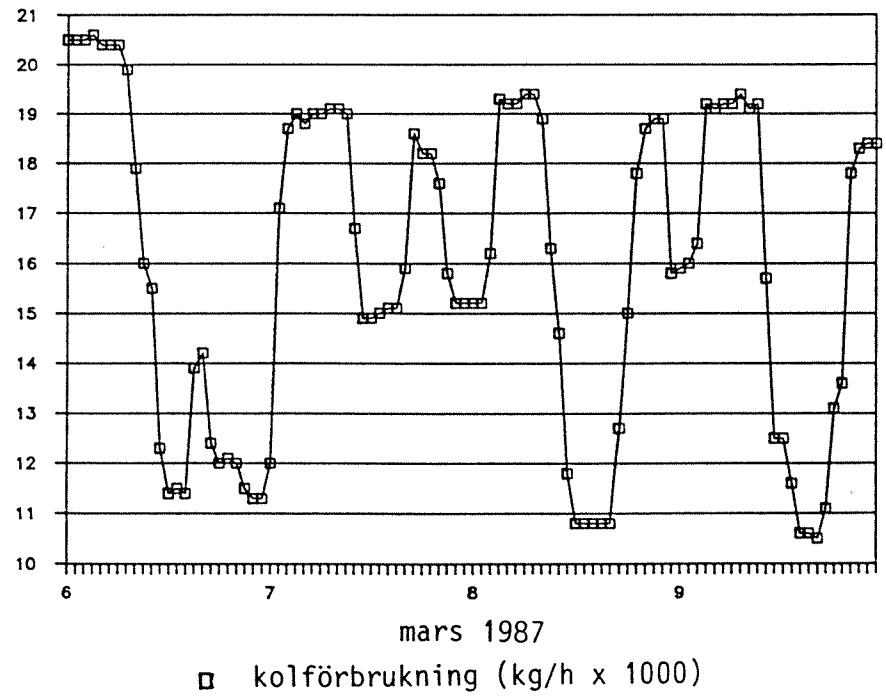
Figur 40. Jämförelse mellan uppmätt NO_x-koncentration och kolförbrukning (ryskt kol; dygnsmedelvärden).
(Measured concentration of NO_x (ppm) versus coal consumption (russian coal, kg/h; 24 h mean values).)

A.

VÄSTERÅS



B.



Figur 41. Jämförelse mellan NO_x-koncentrationen och rökgashastigheten, RGH (A.) och kolförbrukningen (B.) under perioden 6 - 9 mars 1987. Halvtimmes- (A.) resp entimmesmedelvärden (B.).
(Comparison between NO_x concentration and flue gas velocity, RGH (A.) and coal consumption (B.) during the period March 6 - 9, 1987. ½ h (A.) and 1 h (B.) mean values.)

Bilaga 11.

FORMLER

Beräkning av massflöden av SO_2 och NO:

$$F_x = *r^2*3600*(RGH)*(273/(273+T))*(1-(H_2O))*X*K*10^{-6} \quad (2)$$

F_x = massflödet av SO_2 eller NO (kg/tim)
r = radien av rökgaskanalen (m)
(RGH) = rökgashastigheten vid drift-
tillståndet (m/sek)
T = rökgastemperaturen (^oC)
(H_2O) = andelen vattenånga i rökgasen =
= $(g_o-g_{ot})/g$ (se ekv. 8-10 nedan)
X = koncentrationen av SO_2 eller NO
(ppm; torr gas)
K = omräkningsfaktor ppm -> mg/m^3 ntg (normal
torr gas: 0 ^oC, 1 bar)
= 2,86 för SO_2
= 2,05 för NO (räknat som NO_2)

Beräkning av luftfaktor:

Ur syrgashalten i torr rökgas kan luftfaktorn beräknas enligt

$$m = 1 + ((O_2)_t / (21,0 - (O_2)_t)) * K \quad (3)$$

m = luftfaktorn
$(O_2)_t$ = syrgashalten i torr rökgas (%)
21,0 = syrgashalten i luft
K = konstant = 0,97 för stenkol

Också koldioxidhalten i torr rökgas kan användas för beräkning av luftfaktorn:

$$m = 1 + ((CO_2)_{ot} / (CO_2)_t - 1) * K \quad (4)$$

$(CO_2)_{ot}$ = teoretiska koldioxidhalten i torr rökgas (%) vid stökiometrisk förbränning

$(CO_2)_t$ = uppmätta koldioxidhalten i torr rökgas (%)

K = konstant = 0,97 för stenkol

Teoretiska koldioxidhalten i torr rökgas , $(CO_2)_{ot}$, beräknas enligt

$$(CO_2)_{ot} = 21,0/(1 + 2,37 * (H - 0,126 * O)/(C + 0,375 * S))$$

H = vätehalten i bränslet (vikts-%)

O = syrehalt i bränslet (vikts-%)

C = kolhalt i bränslet (vikts-%)

S = svavelhalt i bränslet (vikts-%)

Beräkning av luft- och rökgasmängder:

Med utgångspunkt från bränslets totalanalys inklusive vatten och aska kan luft- och rökgasmängderna beräknas enligt nedan. Analysvärden skall vara uttryckta i viktsprocent (C = kol, H = väte, S = svavel, O = syre, N = kväve och F = fukthalt).

Luftbehov (torr luft):

$$l_{ot} = (9,02 * C + 27,0 * H + 3,38 * S - 3,38 * O)/100 \quad (5)$$

l_{ot} = teoretiska behovet av torr luft (nm^3/kg bränsle)

nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 ^oC

Luftbehov (fuktig luft):

$$l_o = 1,014 * l_{ot} \quad (6)$$

l_o = teoretiskt luftbehov (nm^3/kg bränsle)
l_{ot} = teoretiska behovet av torr luft (nm^3/kg bränsle)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 ^oC

Verkligt luftbehov:

$$l = l_o * m \quad (7)$$

l = verkligt luftbehov (nm^3/kgbränsle)
l_o = teoretiskt luftbehov (nm^3/kg bränsle)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 ^oC
m = luftfaktorn

Rökgasmängd (torr rökgas):

$$g_{ot} = (9.02 * C + 21,3 * H + 3,37 * S + 0,81 * N - 2,68 * O) / 100 \quad (8)$$

g_{ot} = teoretiskt torrt rökgasflöde (nm^3/kg bränsle)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 ^oC

Rökgasmängd (fuktig rökgas):

$$g_o = g_{ot} + (11,3 * H + 1,25 * F) / 100 \quad (9)$$

g_o = teoretiskt rökgasflöde (utan luftöverskott; nm^3/kg bränsle)
g_{ot} = teoretiskt torrt rökgasflöde (nm^3/kg bränsle)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 ^oC

Verklig rökgasmängd:

$$g = g_o + l_o * (m - 1) \qquad (10)$$

g = verkligt rökgasflöde (nm^3/kg bränsle)
g_o = teoretiskt rökgasflöde (utan luftöverskott; nm^3/ kg bränsle)
l_o = teoretiskt luftbehov (nm^3/kg bränsle)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 °C
m = luftfaktorn

Beräkning av kolförbrukning:

$$\text{kolmängd} = (\text{eldningseffekt} * 3600) / \text{värmevärde}_{kol} \qquad (11)$$

kolmängd: kg/timma
eldningseffekt: MJ/sek
värmevärde_{kol} (effektivt): MJ/kg kol

Beräkning av rökgashastigheten:

$$(RGH) = (X * g) / (3600 * r^2 * \pi) \qquad (12)$$

(RGH) = rökgashastigheten (m/sek)
X = kolförbrukningen (kg/tim)
g = verkligt rökgasflöde (nm^3/kg bränsle)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 °C
r = radien av rökgaskanalen

Beräkning av teoretiska svavelemissionen:

$$(S)_o = S * 10 / H_i \qquad (13)$$

$(S)_o$ = teoretisk svavelemission (g/MJ)
S = svavelkonc. i bränslet (vikts-%)
H_i = effektiva värmevärdet för bränslet (MJ/kg)

Beräkning av teoretiska svavelkoncentrationen i rökgasen

$$(SO_2)_{ot} = (S * 10/H_i)*(H_i/g_t)*(64,06/32,06)*1000 = \\ = S * 19980 / g_t \qquad (14)$$

$(SO_2)_{ot}$ = teoretiska svavelhalten i torr rökgas (mg/nm^3)
S = svavelkonc. i bränslet (vikts-%)
H_i = värmevärdet för bränslet (MJ/kg)
64,06 = molekylvikten för SO_2 (g)
32,06 = molekylvikten för svavel (g)
g_t = verkliga mängden torr rökgas (nm^3/kg bränsle)

$$g_t = g * (1 - (g_o - g_{ot})/g) \qquad (14a)$$

g = verkliga rökgasmängden (fuktig gas) (nm^3/ kg bränsle)
g_o = teoretiska rökgasflödet (nm^3/kg bränsle)
g_{ot} = teoretiskt torrt rökgasflöde (nm^3/kg bränsle)
$(g_o - g_{ot})/g$ = mängden vattenånga i den verkliga rökgasmängden (volyms-%)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 °C

Beräkning av den mätta svavelemissionen:

$$(S)_m = (SO_2)_m * (g_t/H_i) * 1,431 * 10^{-3} \qquad (15)$$

$(S)_m$ = mätta svavelemissionen (g/MJ)
$(SO_2)_m$ = uppmätta konc. SO_2 i torr rökgas (ppm)
g_t = verkliga torra rökgasmängden (nm^3/kg bränsle)
H_i = värmevärdet för bränslet (MJ/kg)
nm^3 = avser tillståndet vid 1 bar och 0 °C

Bilaga 12

Felanalys för utspädningssystemet

Felkällor och uppskattning av felens storlek för utspädningssystemet vid mätning i koleldade anläggningar (Nyköping, Västerås):

Felkälla	Slumpmässigt fel	Systematiskt fel
Lufttrycksvariationer	2 %	
Variationer i rökgastemperatur		
Nyköping:	0,5 %	
Västerås:	0,2 %	
Skillnader i densitet	1 %	NO_x, SO_2: -5 % CO_2: +3 %
Kritiska munstycket	2 %	

Det sammansatta, slumpmässiga felet (S_R) beräknas enligt

$$S_R = \sqrt{S_A^2 + S_B^2 + S_C^2 + \ldots}$$

dvs $$S_R = \sqrt{2^2 + 0{,}5^2 + 1^2 + 2^2} = 3\ \%.$$

Därtill kommer ett systematiskt fel för SO_2- och NO_x-mätningarna på -5 % och för CO_2-mätningarna på +3 % p g a skillnader i densitet mellan kalibreringsgasen och rökgasen (se sid 15).

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk Forskning och utveckling. Stiftelsens forskningsprogram 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