

# Validering av prediktionsmetoder för NO<sub>x</sub>-mätning

Presentation vid Värmeforsk NO<sub>x</sub>-reduktionsseminarium i Sundsvall, 22-23 januari 1997.

Tomas Öberg  
Tomas Öberg Konsult AB  
Gamla Brovägen 13, 371 60 LYCKEBY  
[www.tomasoberg.com](http://www.tomasoberg.com)

## Inledning

Från 1997 kommer miljöavgifterna för utsläpp av kväveoxider (NO<sub>x</sub>) att omfatta ytterligare ett stort antal pannor med liten energiproduktion. Intresse finns för metoder som reducerar kostnaden för att bestämma utsläppet.

NO<sub>x</sub>-halten i rökgasen från en panna kan bestämmas indirekt genom beräkning från mätvärdet för ett antal driftsvariabler andra än NO<sub>x</sub>. Därmed behöver inte ett kontinuerligt mätsystem för NO<sub>x</sub>-halt ständigt finnas installerat. Metoden kan också användas för att bestämma NO<sub>x</sub>-halten under perioder då ett automatiskt system för direkt mätning inte ger godtagbara mätresultat.

Naturvårdsverkets Allmänna Råd om mätmetoder har kompletterats i anslutning till de nya mätföreskrifterna (SNFS 1996:9 MS:92) och ger möjlighet att använda indirekta bestämningsmetoder. En förutsättning för att indirekt bestämning skall godtas är att vissa kvalitetskrav uppfylls.

Bergström & Öberg har på uppdrag av Värmeforsk och Naturvårdsverket utrett lämpliga kvalitetskrav för indirekt NO<sub>x</sub>-bestämning. I uppdraget ingick även att beskriva hur dessa frågor hanteras i USA. Utredningsresultatet finns nu presenterat i en Värmeforsk-rapport<sup>1</sup>.

I presentationen har jag anpassat mig till Naturvårdsverkets språkbruk. ”Prediktion” och ”prediktionsmodell” har bytts ut mot ”beräkning” och ”beräkningsmodell”.

## Krav och erfarenheter från USA

Ett stort antal anläggningar i USA använder redan nu beräkningsmodeller för att bestämma utsläppet av kväveoxider. Systemen, som är ett alternativ till kontinuerlig mätning, går under beteckningar som "parameter monitoring" eller "Predictive Emission Monitoring Systems" (PEMS).

Ett stort antal installationer (något 100-tal) finns i bruk inom olje-, kemisk- och kraftindustrin, med en nästan total dominans för gasturbiner och gaseldade pannor. Driftserfarenheterna vad avser mätsäkerhet har generellt sett varit goda. Andra erfarenheter av intresse är: Ett minskat underhålls-/skötselbehov, möjlighet till fortlöpande kontroll av bakomliggande mätsystem och givare samt att det nu har blivit möjligt att bättre styra/optimera processen.

Kraven på beräkningsmodeller från de amerikanska miljöförvaltningsmyndigheterna sammanfattas i tabell 1.

### Tabell 1

#### Sammanfattning av myndighetskrav i USA.

Delstater där beräkningsmodeller har accepterats	Alabama, Arkansas, Kalifornien, Colorado, Louisiana, Pennsylvania och Texas.
Accepterade tillämpningar	Topplastenheter och som backup-system.
Föreslagen tillämpning	Ett generellt alternativ till mätinstrument.
Mätdata för upprättande av modell	Jämförelse med en referensmetod.
a/ Lastnivåer	≥ 3
b/ Nivåer av andra inverkanse faktorer	≥ 3
Verifiering av modell	Jämförelse med en referensmetod.
a/ Antal provperioder	≥ 9
b/ Provperiodernas längd	30-60 min
Relativ noggrannhet*	≤ 20%

\* Prestandamått avseende precision och riktighet.

## Beräkningsmodellen

Beräkningsmodellen är en på mätdata grundad matematisk beskrivning av sambandet mellan NO<sub>x</sub>-halt och ett antal andra mätvariabler. Därigenom kan det bli möjligt att beräkna NO<sub>x</sub>-utsläppet utan direkt mätning av NO<sub>x</sub>-halten. Exempel på driftparametrar som kan användas vid beräkning av NO<sub>x</sub>-utsläppet är:

- Typ och kvalitet av bränsle.
- Luftfördelning i eldstaden.
- Luftöverskott.
- Temperaturer i eldstad och rökgas.
- Nyttiggjord effekt.

Pannor med utrustning för att reducera  $\text{NO}_x$ -halten, exempelvis genom SCR- eller SNCR-system, genererar ytterligare ett antal ingångsvariabler som bör tas med i beräkningsmodellen.

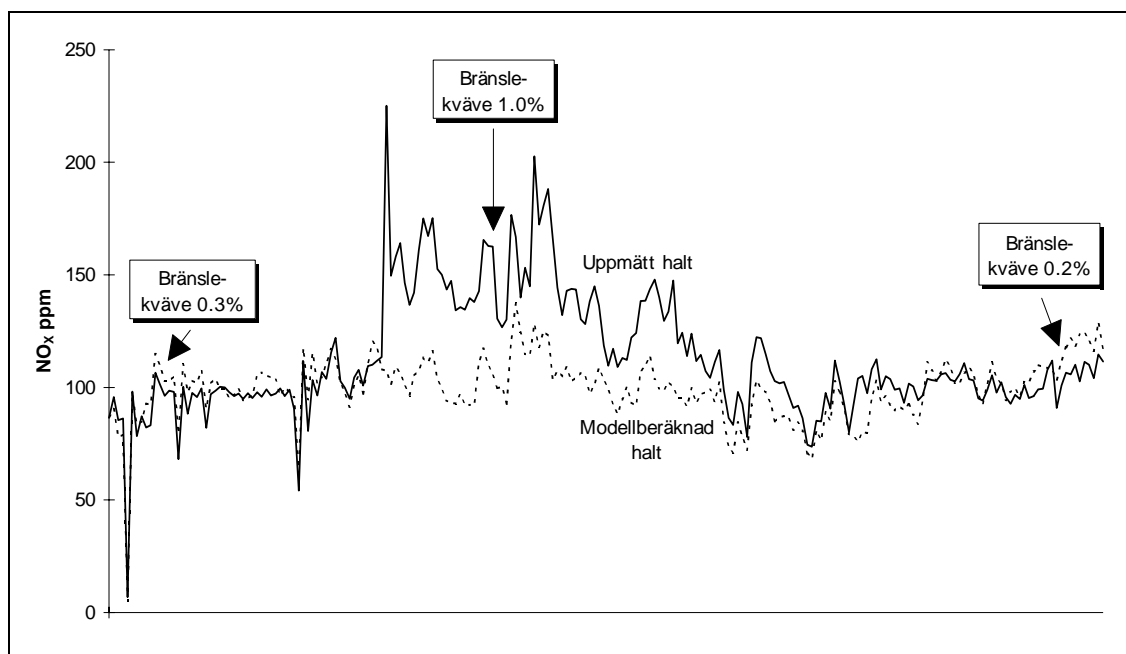
Tillförlitliga beräkningsmodeller erhålls enklast för pannor med homogena och enhetliga bränslen samt väl definierade driftförhållanden, exempelvis gas- och oljeeldade pannor.

### **Modelluppbyggnad - krav på ingångsdata**

Kvaliteten i uppbyggnaden av en beräkningsmodell för indirekt  $\text{NO}_x$ -bestämning beror av kvaliteten hos de ingångsdata som den baseras på. Det är därför av stor betydelse för slutresultatet att ingångsdata är korrekta och representativa för alla de driftfall och bränslen som kan bli aktuella.

Beräkningsmodellen för  $\text{NO}_x$ -halten i rökgasen från en panna upprättas under en period då direkt mätning av  $\text{NO}_x$  företas. Det mätsystem som då används ska vara kalibrerat och uppfylla kraven i Naturvårdsverkets föreskrifter (1996:9). Det antal ingångsvariabler som behövs för att upprätta en tillförlitlig modell avgörs individuellt för varje panna.

Beräkningsmodellen är endast tillämpbar inom de intervall av driftfall som utgör underlaget för modellens uppbyggnad. Beräkningsmodellen bör därför grundas på mätningar som genomförs enligt en statistisk försöksplan, i vilken alla variabler som kan ha inflytande på  $\text{NO}_x$ -halten ändras på ett kontrollerat sätt. Alla förekommande bränslen och alla variationer i bränslets sammansättning bör också täckas in av de provade driftfallen. En möjlig konsekvens om så ej sker visas i figur 1.



*Figur 1*

*Avvikelse mellan prediktionsmodell och uppmätt  $NO_x$ -halt p g a skillnader i bränslesammansättning. Resultat från en veckas mätning.*

För varje provat driftfall bör mättiden vara så lång att stabila provsvar erhålls. Mätunderlaget för att beräkna modellen för en panna bör omfatta minst tre dygns drifttid. För fastbränsleledade pannor är den rimliga omfattningen ca en vecka.

Kvaliteten för de mätvariabler som ger ingångsdata till modellberäkningarna, exempelvis ång- och luftflöden, bör vara kontrollerade genom återkommande kalibrering. Repeterbarheten hos dessa mätvariabler är avgörande för den säkerhet som uppnås i de beräknade  $NO_x$ -halterna. Beräkningsmodellen behöver uppdateras eller förnyas i det fall väsentliga förändringar företas i pannan exempelvis sådana som påverkar eldstadens utformning och blandningsförhållandet av bränsle och förbränningsluft.

### **Validering av beräkningsmodellen - prestandakrav**

Innan beräkningsmodellen tas i drift måste dess prestanda bekräftas. Kontrollperioden bör vara tidsmässigt skild från modelluppbyggnaden, och omfatta minst en veckas drift. Den innebär att de  $NO_x$ -halter som erhålls genom modellberäkningen jämförs med mätvärdena som erhålls från det kontinuerliga mätinstrumentet. Jämförelsen ska dokumentera att den använda modellberäkningen uppfyller prestandakraven i tabell 2.

Beräkningsmodellens giltighet och prestanda kontrolleras sedan minst en gång per år genom en jämförande mätning. Mellan de återkommande jämförande mätningarna kan modellen inte förändras. Dock bör instrument och givare för ingångsdata till modellen kontrolleras enligt fastlagda dokumenterade rutiner.

Tabell 2

Förslag till kvalitets- och prestandakrav som bör uppfyllas av beräkningsmodeller för indirekt bestämning av  $\text{NO}_x$ -halt i rökgaser.

Mätdata för upprättande av modellen	Kvalitetskontrollerade mätningar av $\text{NO}_x$ -halt och ingångsdata för modellen. Representativa prov genomförda enligt en statistisk försöksplan omfattande minst tre dygns drifttid. Stabila mätperioder för varje driftfall.
Uppbyggnad av modellen	Dokumenteras så att en oberoende kontroll är möjlig.
Validering av modellen	Bekräftelse av överensstämmelsen för beräknade och uppmätta $\text{NO}_x$ -halter under minst en veckas drifttid. Dokumenteras så att en oberoende kontroll är möjlig.
Kontroll	Modellen kontrolleras minst en gång per år genom en jämförande mätning som täcker hela kalibreringsområdet*. Instrument och givare för ingångsvariablerna kontrolleras enligt fastlagda rutiner.
Systematisk skillnad vid jämförande mätning	$\leq 10\%$ av modellens kalibreringsområde* och $\leq 10$ ppm. Systematisk skillnad beräknas som det absoluta medelvärdet av skillnaderna mellan mätvärdesparen.
Standardavvikelse vid jämförande mätning	$\leq 10\%$ av modellens kalibreringsområde* och $\leq 10$ ppm. Standardavvikelsen beräknas på skillnaderna mellan mätvärdesparen.
Svarstid	$\leq 200$ sek
Giltighetsområde	Definieras och kontrolleras fortlöpande.
Registrering och behandling av mätdata	Samma krav som för direktmätande instrument.

\* Kalibreringsområde definieras som intervallet mellan högsta och lägsta  $\text{NO}_x$ -halt som förekom då modellen upprättades.

Jämförelsen mellan modell och instrument sker genom att beräkna skillnaderna för ett antal mätvärdespar. För närvarande sker utvärderingen av dessa jämförelser genom att bilda medelvärde och standardavvikelse.

Vi har pekat på behovet av ett nytt prestandamått, kombinerad avvikelse, som innefattar både slumpmässiga och systematiska fel. Kombinerad avvikelse beräknas som medelvärdet för de absoluta skillnaderna mellan mätvärdesparen vid en jämförande mätning:

$$\text{Kombinerad avvikelse} = \frac{\sum |z_i|}{n}$$

Naturvårdsverket diskuterar nu förslag om ett sådant prestandamått<sup>2</sup>.

I tabell 3 och figurerna 2-3 visas en prestandajämförelse av två beräkningsmodeller på en liten fliseldad panna (Skinnskatteberg).

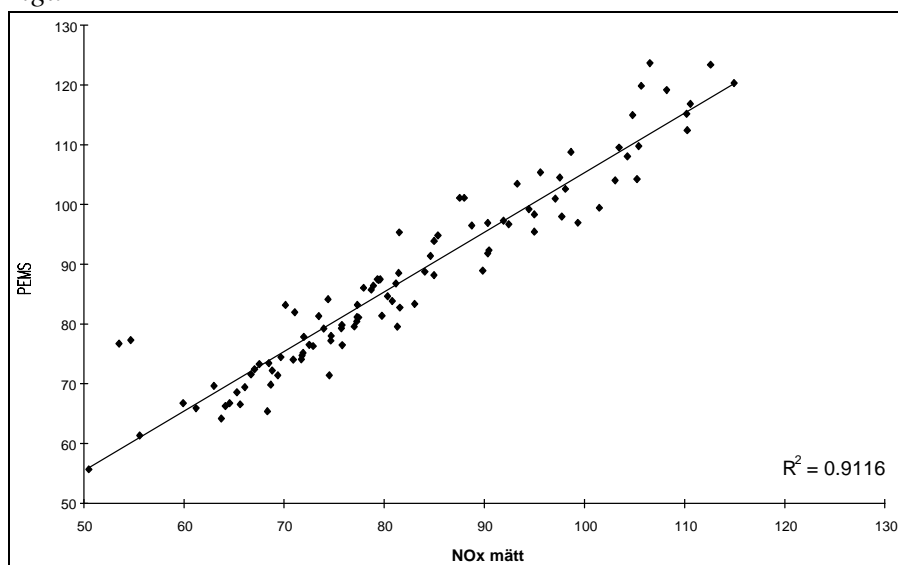
Tabell 3

Prestandajämförelse för två beräkningsmodeller. Avvikelse mellan modell och mätinstrument för 100 st mätvärdespar.

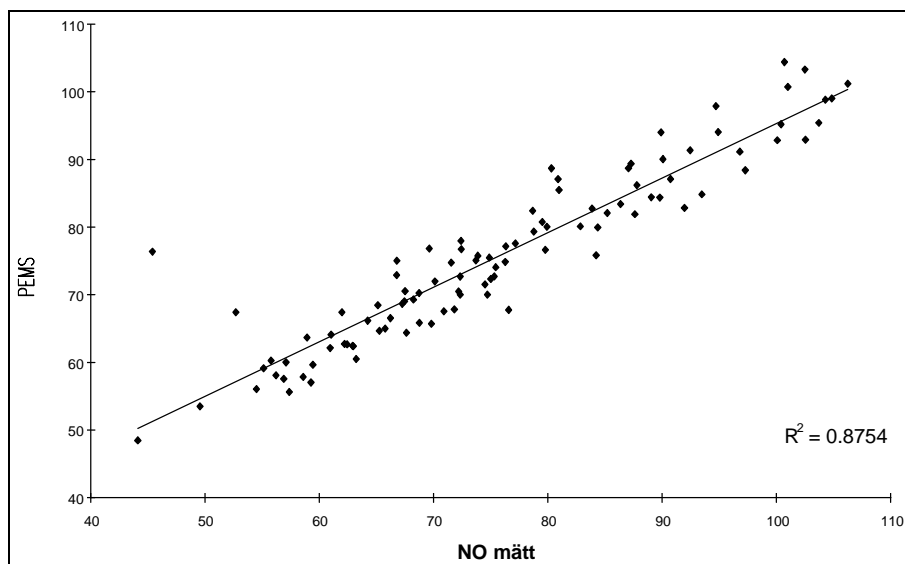
Modell	Absolut medelavvikelse $ \bar{z} $ , ppm*	Standardavvikelse s, ppm*	Kombinerad avvikelse $\sum  z_i /n$ , ppm*
Vattenfall (NO <sub>x</sub> )	5.3	4.7	5.6
Trätek (NO)	0.0	5.3	3.7

\*Avvikelsemåttan ovan är oberoende av mätområdet

Figur 2



Modellberäkningar vs. mätresultat, ppm NO<sub>x</sub> tg, Vattenfalls modell.



*Figur 3*  
*Modellberäkningar vs. mätresultat, ppm NO tg, Träteks modell.*

I prestandajämförelsen ovan visade båda modellerna god riktighet och precision. Den systematiska skillnaden, spridningen och den kombinerade avvikelsen låg alla inom 6% av kalibreringsområdet (42-136 ppm).

### **Giltighetsområde och fortlöpande kontroll**

De beräknade  $\text{NO}_x$ -halterna från den validerade beräkningsmodellen kan användas om:

- De beräknade  $\text{NO}_x$ -halterna ligger inom kalibreringsområdet, definierat som intervallet mellan högsta och lägsta  $\text{NO}_x$ -halt som förekom då modellen upprättades.
- Pannans utformning inte väsentligt förändras.
- Driftinställningarna bibehålls inom de intervall som förekom vid modelluppbyggnaden.
- Bränsletyp och sammansättning bibehålls inom de intervall som förekom vid modelluppbyggnaden.

Därför måste man fortlöpande kontrollera och dokumentera att den beräkningsmodell som används är giltig för de aktuella driftförhållandena. Kontrollen bör, dels avse ingångsvariablerna var för sig, dels sambanden mellan dem. Principalkomponentanalys är ett exempel på en användbar teknik för giltighetskontroll.

## Slutsatser

Naturvårdsverket godtar indirekt bestämning för NO<sub>x</sub>-utsläpp, förutsatt att tillförlitligheten motsvarar det som erhålls med ett direktmätande instrument. Vår utredning visar att detta är möjligt att uppnå. Vi har lämnat förslag på rimliga kvalitets- och prestandakrav.

Kostnaderna för att upprätta modeller som uppfyller kvalitets- och prestandakraven innebär dock att installation av indirekta mätsystem ger en relativt liten besparing, jämfört med direktmätande instrument. Indirekt mätning är därför mindre intressant för de små pannor som nu kommer in i avgiftssystemet.

Finns redan ett direktmätande instrument i anläggningen så är det avsevärt billigare att upprätta och underhålla en beräkningsmodell. För större anläggningar, som redan har investerat i direktmätande instrument, kan beräkningsmodeller därför bli ett mycket intressant komplement. Indirekt mätning ger ett extra ”instrument”, som kan användas både för fortlöpande instrumentkontroll och som backup-system vid instrumenthaverier. Metodiken för indirekta instrumentkontrollsystem finns utvecklad och väntar bara på att tillämpas<sup>3-4</sup>.

Den erhållna modellen kan också användas för att optimera driften. Beräkningsmodellen visar vilka faktorer som påverkar NO<sub>x</sub>-utsläppet och hur inställningarna av dessa ska väljas så att miljöavgiften kan minimeras. Metodiken har beskrivits vid ett tidigare Värmeforskseminarium (den som är intresserad kan höra av sig till mig för kopior av presentationen)<sup>5</sup>.

De beskrivna beräkningsmodellerna ger alltså möjligheter att:

- Optimera driften.
- Minimera utsläppen.
- Förbättra mätkvaliteten.
- Minska mätkostnaderna.

## Vem vill bli först med det praktiska införandet?

### Referenser

1. Öberg, T. *Validering av prediktionsmodeller för NO<sub>x</sub>-mätning*. Värmeforsk. Rapport 586, oktober 1996.
2. Borgström, B. *Hur noggrant bestäms NO<sub>x</sub>-avgifterna?* Mätbladet. Naturvårdsverkets mätteknikprogram info. November 96, nr 21.
3. Öberg, T. *Kontinuerlig kvalitetskontroll av process och instrument*. RVF-nytt. Nr 3, 1994.
4. Öberg, T. *Löpande kvalitetskontroll av kontinuerliga mätinstrument*. Mätbladet. Naturvårdsverkets mätteknikprogram info. November 94, nr 17.
5. Öberg, T. *Försöksplanering och empiriska modeller - effektiva verktyg för att optimera processer och reducera NO<sub>x</sub>-emissioner*. Presentation vid Värmeforsk Nordiskt NO<sub>x</sub>-seminarium, 17-19 mars 1993, Åbo - Stockholm.