

Validering av prediktionsmodeller för NO_x-mätning

Tomas Öberg,
T. Öberg Konsult AB

Publicerad som rapport nr 586 i oktober 1996
av Stiftelsen för värmeteknisk forskning

Innehållsförteckning

<i>Sammanfattning</i>	3
<i>Summary</i>	4
<i>1. Bakgrund och syfte</i>	5
<i>2. Vad är en prediktionsmodell</i>	6
<i>3. Krav och erfarenheter från USA</i>	8
3.1 Modelluppbyggnad och praktiska erfarenheter	8
3.2 Myndighetskrav	9
<i>4. Yttre faktorer som påverkar riktighet och precision</i>	13
4.1 Förändringar i anläggningen	13
4.2 Driftinställningar	14
4.3 Bränslevariationer	14
<i>5. Kvalitetskrav för prediktionsmodeller</i>	16
5.1 Ingångsdata för modelluppbyggnad	16
5.2 Modellverifiering - rekalkibrering	19
5.3 Prestandakrav och definition av kalibreringsområde	19
5.4 Kontroll av giltighetsområde	24
5.5 Mätkvalitet - validering av mätsignaler	30
5.6 Störningstålighet	30
5.7 Dokumentationskrav - kvalitetsstyrning	32
<i>6. Slutsatser</i>	34
<i>7. Definitioner och begrepp</i>	36
<i>8. Referenser</i>	40

Sammanfattning

Indirekt bestämning NO_x-utsläpp med hjälp av prediktionsmodeller kan godtas för bestämning av miljöavgift. Kraven på tillförlitlighet förutsätts bli likartade som för mätutrustningar. Rapporten redovisar hur prediktionsmodeller bör utformas för att motsvara dessa krav.

Ett stort antal anläggningar i USA använder redan nu prediktionsmodeller för att bestämma utsläppet av kväveoxider. De förslag till valideringskrav som har föreslagits är likartade som för mätutrustningar. Modellen skall upprättas utifrån mätdata från jämförande mätningar där olika driftinställningar provas. Verifieringen genomförs likartat, med ett specificerat prestandakrav för precision och riktighet.

I Sverige är detaljerade kvalitetskrav för prediktionsmodeller ännu inte fastställda. Följande punkter måste dock beaktas:

- Ingångsdata för modelluppbyggnad.
- Modellverifiering - rekalibrering.
- Prestanda och definition av kalibreringsområde.
- Kontroll av giltighet och signalvalidering.

En genomgång av resultat från två genomförda projekt visar att indirekt bestämning av kväveoxider är tekniskt möjlig.

Rapporten avslutas med ett förslag till ”översättning” av Naturvårdsverkets nuvarande prestandakrav för mätinstrument. Det viktigaste prestandakraven för prediktionsmodellerna vid jämförande mätningar är att den systematiska skillnaden liksom standardavvikelsen högst får uppgå till 10% av kalibreringsområdet och högst 10 ppm tg.

Nyckelord: Prediktionsmodeller, kväveoxider, verifiering, giltighet, prestandakrav.

Summary

Predictive emission monitoring can be accepted for determining the environmental fees for NO_x. Requirements for validity are assumed to be set comparable to those for measurement instruments. This report describes how prediction models should be constructed to fulfil these requirements.

A substantial number of plants in the U.S. are already using prediction models to measure the emissions of nitrogen oxides. Suggested validation requirements are comparable to those for measurement instruments. The model shall be established on the basis of comparisons with a reference method during different operating conditions. The performance verification test is comparable, with specified requirements for precision and accuracy.

Detailed quality requirements are not yet specified in Sweden. The following items must however be considered:

- Input data for the model building.
- Model verification - recalibration.
- Performance and definition of calibration range.
- Model domain check and signal validation.

An evaluation of results from two completed projects shows that predictive emission monitoring for nitrogen oxides is technically feasible.

The report is concluded with a recommendation on how to "translate" the present performance requirements of the Swedish Environmental Protection Agency regarding measurement instruments. The most important performance requirements for prediction models at comparison tests are that the systematic and the standard deviations are not above 10 % of the calibration range and at the most 10 ppm dry gas.

Key words: Prediction models, nitrogen oxides, verification, domain, performance requirements.

1. Bakgrund och syfte

Från 1997 kommer miljöavgifterna för utsläpp av kväveoxider att omfatta ytterligare ett stort antal pannor. De har en energiproduktion från 25 till 40 GWh och mätningen av utsläppen kommer att uppfattas som kostsam. Intresset för metoder som reducerar mätkostnaden och ger rätt till återbetalning är därför stor. Ett par projekt har genomförts i Sverige som syftar till att indirekt bestämma NO_x-utsläppet med hjälp av prediktionsmodeller.

NO_x-bestämning med prediktionsmodeller har allmänt sett god utsikt att bli användbart. En grundförutsättning för att prediktionsmodeller skall accepteras som metod för att bestämma utsläpp är att deras begränsningar i giltighet och beroende av yttre omständigheter kan beskrivas.

Syftet med denna rapport är att visa hur prediktionsmodeller bör utformas för att motsvara de krav som Naturvårdsverket ställer på mätsystem för avgiftsskyldiga pannor. Rapporten kommer även att visa hur prediktionsmodellernas giltighet och tillämpbarhet fortlöpande kan kontrolleras i en praktisk användning vid pannanläggningar.

I USA har man några års erfarenhet från användning av prediktionsmodeller för miljökontroll. Rapporten inleds därför med en beskrivning av de amerikanska kraven för ”parameter monitoring” (även kallat Predictive Emission Monitoring System)

2. Vad är en prediktionsmodell

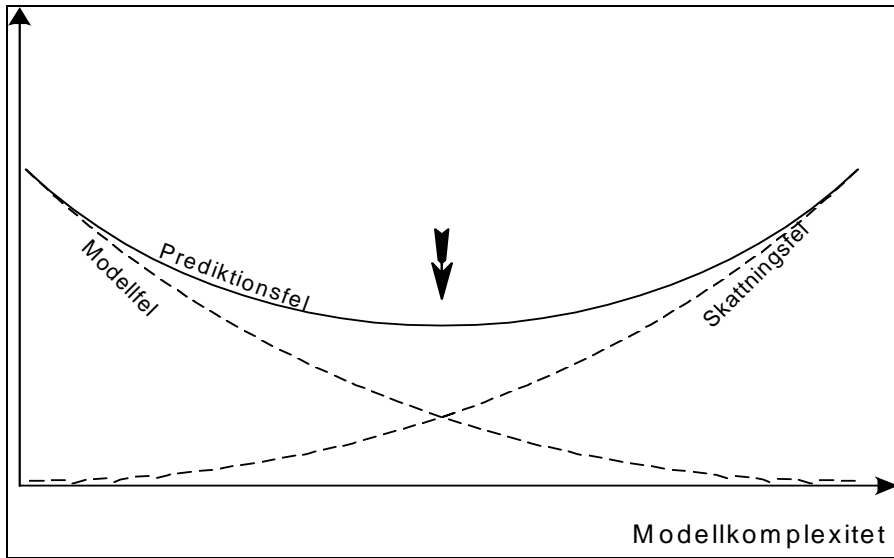
En prediktionsmodell är en beskrivning av ett samband mellan ett antal s.k. oberoende variabler ("x") och en eller flera beroende variabler ("y") enligt:

$$y = f(x)$$

Regressionsmodeller och neurala nät är exempel på beräkningstekniker där modellernas uppbyggnad helt styrs av de iakttagna sambanden mellan exempelvis utsläpp av NO_x och olika driftsvariabler som last, luftflöden, O₂ och temperaturer.

Någon form av samvariation mellan den beroende variabeln, NO_x-utsläpp, och de andra mätvariablerna är förstås en avgörande förutsättning för om det ska vara möjligt att använda empiriska prediktionsmodeller. Hur sambandet beskrivs och valet av beräkningsteknik är däremot inte avgörande för vilka kvalitetskrav som bör ställas. Snarast är det så att kvalitetskraven bör tillåta största möjliga flexibilitet i valet och utformningen av modellen.

Kan man välja mellan en "enkel" eller en komplicerad modell som ger samma resultat bör naturligtvis den enkla väljas. Det beror på att skattningsfelet för modellparametrarna (t.ex. regressionskoefficienterna) ökar med modellens komplexitet. En optimal modell är alltså resultatet av en kompromiss som skall ta hänsyn olika typer av fel som påverkar beräkningsresultatet. Figur 1 åskådliggör hur modellfel och skattningsfel påverkas. Valet av modell syftar till att ge lägsta möjliga prediktionsfel.



Figur 1
Prediktionsfel som en funktion av modellkomplexitet.
(Prediction error as a function of model complexity).

I rapporten återkommer vi till några punkter som är avgörande betydelse för prediktionsmodellernas kvalitet och tillämpbarhet. Avsikten med den här rapporten är dock inte att i detalj beskriva hur de empiriska modellerna bör utformas utan hur de ska tillämpas. Vi vill hänvisa den intresserade läsaren till några verk i den statistiska facklitteraturen som har getts ut av bokförlaget Wiley och som behandlar olika former av regressionsanalys, ref. 1-3.

3. Krav och erfarenheter från USA

Ett stort antal anläggningar i USA använder redan nu prediktionsmodeller 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).

Generella krav på prediktionsmodellerna finns inte heller fastställda i USA. Vi har ändå funnit det av värde att sammanfatta utvecklingen och de praktiska erfarenheterna från USA, liksom de förslag till formell reglering som har presenterats.

Informationen har inhämtats genom sökningar i olika litteraturlösningsdatabaser, däribland "Federal Register", samt direktkontakter med dels branschorganisationen *Council of Industrial Boiler Owners* dels det amerikanska naturvårdsverket - *U.S. EPA*.

3.1 Modelluppbyggnad och praktiska erfarenheter

Det finns ett flertal exempel på den praktiska tillämpningen av prediktionsmodeller⁴⁻¹¹.

Miljölagstiftningen och myndigheter ställer formella krav på validering av prediktionsmodeller vid olika driftlägen och pannlast^{6,9,12}. Det har även visats från en rent teknisk utgångspunkt att modeller som är beräknade utifrån data insamlade vid ett enda väl definierat "normalläge", dels får ett mycket begränsat giltighetsområde, dels blir störningskänsliga¹⁰.

Felaktiga mätsignaler för de variabler som ingår i modellen resulterar också i felaktiga modellsvår. Validering av mätsignaler har därför identifierats som ett viktig punkt för att göra "PEMS" till ett trovärdigt alternativ för utsläppskontroll^{4,7-10}.

Signalvalideringen omfattar då inte bara max-/minvärden utan även att det normala

variationsmönstret bibehålls. Både system baserade på neurala nät och andra tekniker innehåller signalvalidering som en väsentlig komponent^{4,7-10}.

Ett stort antal installationer (något 100-tal) finns i bruk inom olje-, kemisk- och kraftindustrin, med en nästan total dominans för gasturbiner och gaseldade pannor⁴⁻¹¹. Lovande resultat har även rapporterats från prov i ett koleldat kraftverk⁶.

Driftserfarenheterna vad avser mätsäkerhet har generellt sett varit goda⁸⁻⁹. 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^{6,11}.

3.2 Myndighetskrav

Kraven på prediktionsmodeller från de amerikanska miljöförvaltningsmyndigheterna sammanfattas först i tabell 1, och därefter diskuteras varje punkt mer i detalj.

Tabell 1

Sammanfattning av myndighetskrav i USA. (Summary of regulatory policies in the U.S.)

Delstater där prediktionsmodeller 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, se vidare kap. 7.

Prediktionsmodeller för att bestämma emissioner har accepterats av delstatsmyndigheterna i Alabama, Arkansas, Kalifornien, Colorado, Louisiana, Pennsylvania och Texas^{5-8,11}. Installationer finns i fler delstater, men rättsläget där framgår inte av den granskade litteraturen. Kraven på utprovning ansluter till vad som har föreslagits på federal nivå av U.S. EPA, men förefaller enbart bestå i utvärdering av prestanda under ett antal testperioder⁵⁻⁷. Vi har inte kunnat finna några specificerade krav på modelluppbyggnad, signalvalidering, etc.

Regelverket på den federala nivån, om tillämpningen av prediktionsmodeller för att bestämma emissioner, är ännu ej helt färdigställt. Prediktionsmodeller är dock ett godtagbart alternativ till konventionell mätning för topplastenheter under "Acid-Rain Rules" (40 CFR Part. 75, CFR= "Code of Federal Regulations")⁶. Samma del av miljölagstiftningen kräver uppskattning av utsläppen även vid instrumenthaverier och prediktionsmodeller kan då fungera som backup-system för konventionella mätsystem⁷. Kraven för prediktionsmodellerna specificeras i "Subpart E", som bl.a. anger att de alternativa "mätsystemet" måste uppvisa minst samma precision, tillförlitlighet och tillgänglighet som ett konventionellt mätsystem⁶. Prediktionsmodeller finns också omnämnt i förslaget till "Operating Permits Rule Revisions" som presenterades 1994¹⁶. Byte från konventionellt mätsystem till prediktionsmodell anses där som en tillståndspliktig förändring.

Indirekta mätmetoder/prediktionsmodeller ("parameter-monitoring protocols") är likaså ett alternativ till konventionell mätutrustning enligt förslaget till "Enhanced Monitoring Program" (40 CFR Parts 51, 52, 60, 61 och 64)^{6,9,12-13}. Kraven på prediktionsmodellerna är specificerade i bilaga C till förslaget.

I bilaga C till det föreslagna "Enhanced Monitoring Program" anges att anläggningsägaren ska demonstrera och validera representativiteten av ett system för indirekt mätning/prediktion ("parameter monitoring system") enligt följande krav (och vad som ytterligare specificeras av tillståndsmyndigheten)¹²:

1. Ett prediktionssamband ("predictive relationship") ska etableras genom jämförelse med en referensmetod vid minst tre lastnivåer. Andra processfaktorer som kan inverka ska identifieras och likaså provas vid tre nivåer som täcker variationsområdena. Erhållna mätdata används för att utveckla den algoritm som därefter ska provas med en verifierande mätning ("correlation test").
2. En jämförelse genomförs med ett referensmetod vid en verifierande mätning som omfattar minst en serie om 9 st provperioder. Om fler än 9 st provperioder genomförs så får högst tre st förkastas så länge som det totala antalet uppgår till 9 st. Alla testresultat måste dock rapporteras. Under en testperiod får systemet inte ha några avbrott eller bli föremål för något underhåll eller några justeringar. Varje testperiod skall omfatta 30-60 minuter. Systemet skall provas inom hela tillämpningsområdet, och den relativa noggrannheten ("the relative accuracy") ska vara mindre än eller lika med 20% enligt de krav som gäller för konventionella mätinstrument^{5,7}.

Det amerikanska prestandakraven tar hänsyn till den indirekta mätmetodens riktighet och precision, genom att både systematiska och slumpmässiga avvikelser bidrar till en ökad relativ noggrannhet. Beräkningen av relativ noggrannhet definieras i kapitel 7.

I september 1995 meddelade U.S. EPA att det inte var lämpligt att gå vidare med ursprungsförslaget till "Enhanced Monitoring Program", särskilt med beaktande av Presidentens intresse av att uppnå flexibilitet och kostnadseffektivitet. Ett alternativ, med beteckningen "Compliance Assurance Monitoring", är nu under utarbetande och skulle föreligga till i december 1995¹⁴. Vi har inte kunnat finna att det har lagts fram. I en presentation av "Unified Agenda" från U.S. EPA i november 1995 finns formuleringar som antyder att nuvarande mätkrav kan komma att förenklas, exempelvis: "...*monitoring does not need to be so rigorous as to exactly determine or predict emission levels, but rather should be sufficient to allow for reasonable optimization of the method used by a source to achieve ongoing compliance with emission limitations or standards...*"¹⁵. Olika industriföreträdare arbetar både för att prediktionsmodeller ska finnas med som ett alternativ och att kraven på utvärdering av dessa ska förenklas, men enligt uppgift finns det ett visst motstånd i Kongressen^{9,11}.

4. Yttre faktorer som påverkar riktighet och precision

De flesta resonemang och slutsatser som redovisas i vår rapport är generella och därmed tillämpbara för alla typer av utsläppskontroll med prediktionsmodeller. Alla exempel är däremot hämtade från en liten fliseldad panna, vid sågverket i Skinnskatteberg. Den har särskilt studerats i ett separat Värmeforsk-projekt¹⁷.

Prediktionsmodellernas funktion påverkas av många faktorer, och det är från kvalitets-synpunkt helt avgörande att modellen tillämpas med de förutsättningar som gällde när den utvecklades. Bäst fungerar prediktionsmodeller i anläggningar med jämna driftför-hållanden, exempelvis gas- och oljeeldade pannor.

4.1 Förändringar i anläggningen

Anläggningens utformning är av väsentlig betydelse för NO_x-bildningen. Ombyggnationer, reparationer och andra förändringar i en anläggning medför i många fall att tidigare utvecklade modeller måste uppdateras för att säkerställa en god beskrivning av den nya situationen.

Några exempel på förändringar i anläggningen, utöver ombyggnationer och reparationer, som kan vara av betydelse är:

- Slaggpåslag.
- Rostens slitage.
- Ändrat värmeupptag i pannans olika delar.

Normalt sker dessa förändringar långsamt och kan därför närmast jämföras med mätvärdesdrift.

4.2 Driftinställningar

Driftinställningarna har en avgörande betydelse för NO_x-bildningen. Även i detta fall gäller att modellen endast är tillämpbar inom det driftsområde som har tagits med vid modelluppbyggnaden. Detta innebär att alla driftinställningar som kan komma till användning under en säsong också måste provas när modellen skapas.

Några exempel på driftsvariabler som kan vara av betydelse är:

- Pannlast.
- Luftflöden.
- Ugnstemperaturer.

4.3 Bränslevariationer

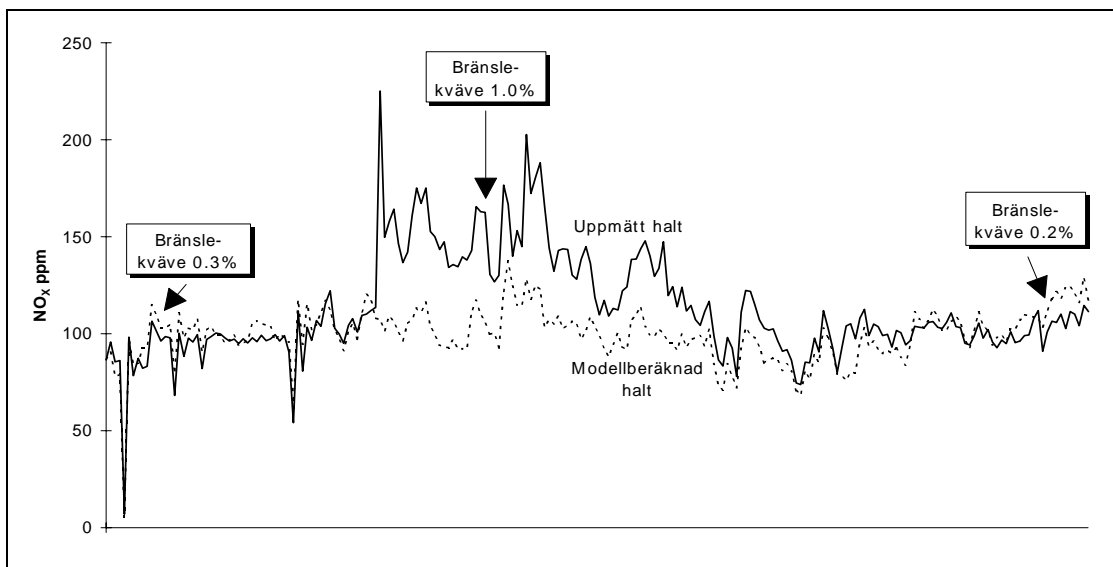
Bränslets sammansättning är av särskild betydelse. Prediktionsmodellen är tillämpbar bara för de bränslen och de blandningar som är provade vid modelluppbyggnaden. En medveten försöksplan kan dock möjliggöra interpolation mellan olika bränsletyper/blandningar, se vidare kapitel 5.1.

Några exempel på bränslevariabler som kan vara av betydelse är:

- Kvävehalt.
- Fukthalt.
- Styckestorlek (spån/flis).

Bränslekvävet inverkan illustreras tydligt av resultaten från det nyligen genomförda projektet: ”*Predikerande emissionsmätsystem (PEMS) för emissionskontroll i biobränsleeldade anläggningar*”¹⁷. Vid de jämförande mätningarna i Skinnskatteberg avvek uppmätta NO_x-halter kraftigt från prediktionsmodellen under några dagar i

februari. Den uppmätta NO_x-halten var tidvis mer än 50 ppm högre än den modellberäknade, figur 2.



Figur 2

Avvikelse mellan prediktionsmodell och uppmätt NO_x-halt p g a skillnader i bränslesammansättning.

(Deviation between prediction model and measured NO_x-concentration due to differences in fuel composition.)

Under samma period eldades anläggningen med ett bränsle som höll betydligt högre kvävehalt än då modellen togs fram, tabell 2.

Tabell 2

Sammanfattning av bränsleanalyser avseende kvävehalt från mätningarna i Skinnskatteberg.

(Summary of fuel analyses concerning nitrogen content from the measurements in Skinnskatteberg.)

Bränsle (Fuel)	Antal prov (No. samples)	Medelvärde (Mean)	Standardavvikelse (Standard deviation)	95% konfidensintervall (95% confidence interval)
Normalt (Normal)	5	0.28	0.0447	0.22-0.34
Avvikande (Deviating)	1	1.0	-	-

Skillnaderna i kvävehalt mellan de två bränslena är tydlig och statistiskt säkerställd.

Högre kvävehalt i bränslet medförde helt logiskt även en ökad NO_x-halt i rökgasen.

5. Kvalitetskrav för prediktionsmodeller

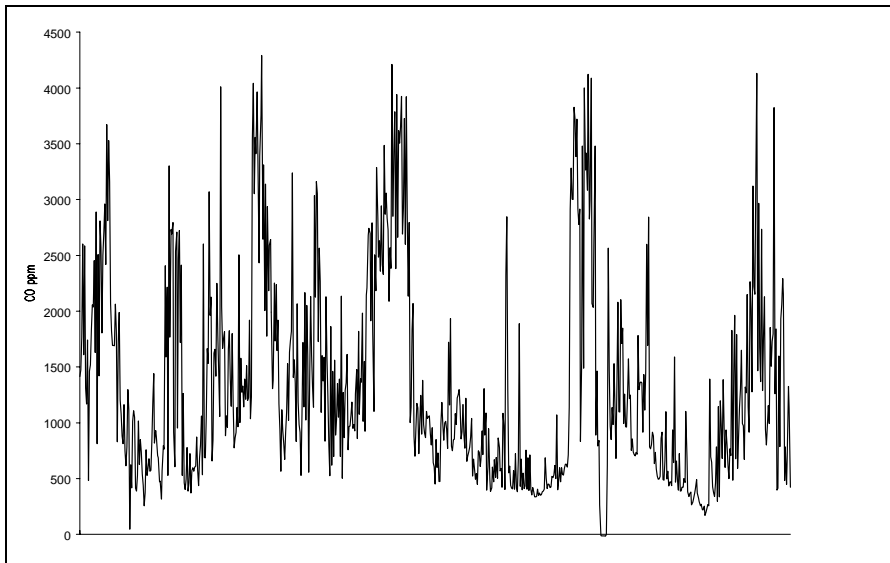
De yttre faktorer som påtalas i kapitel 4 återverkar på den riktighet och precision som uppnås i resultaten, men med rätt utformning och tillämpning av prediktionsmodellerna kan denna inverkan kontrolleras och minimeras.

Prediktionsmodellerna som används i exemplen avser, som tidigare har nämnts, pannan vid sågverket i Skinnskatteberg. Modellerna är utvecklade inom Vattenfalls och Träteks respektive ”PEMS”-projekt. I Vattenfalls modell ingår följande mätvariabler: Syrehalt i våt rökgas, rökgastemperatur före luftförvärmare, ugnstemperatur samt pannlast (effekt). Syrehalt i våt rökgas och pannlast (effekt) är de båda mätvariabler som ingår i den av Träteks modeller som vi har utvärderat.

5.1 *Ingångsdata för modelluppbyggnad*

En prediktionsmodell blir inte bättre än de ingångsdata som den baseras på. Det är därför av stor betydelse för slutresultatet att ingångsdata är korrekta och representativa för alla de driftsfall och bränslen som kan bli aktuella.

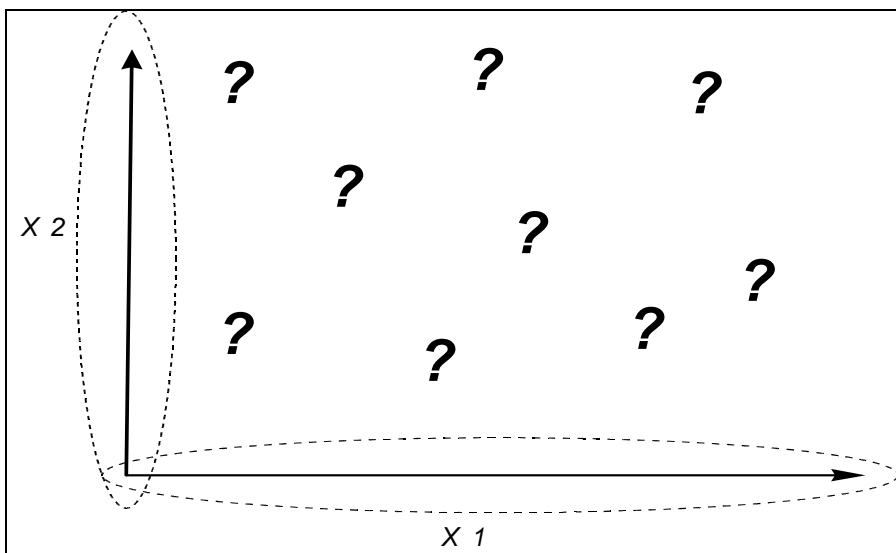
För varje driftsvariabel som kan ha betydelse bör olika inställningar provas. Varje prov bör omfatta en tillräckligt lång tid för att erhålla ett stabilt provsvar, d v s i allmänhet flera timmar. Driftsbetingelser med kraftiga svängningar i förbränningskvaliteten bör därför undvikas, figur 3.



Figur 3

Panna med kraftiga variationer i förbränningskvaliteten, timmedelvärden för CO-halt under en månad (mätdata från Skinnskatteberg som har ställts till förfogande av Vattenfall). (Boiler with considerable variations in combustion quality, hourly mean values for CO-concentration over one month.)

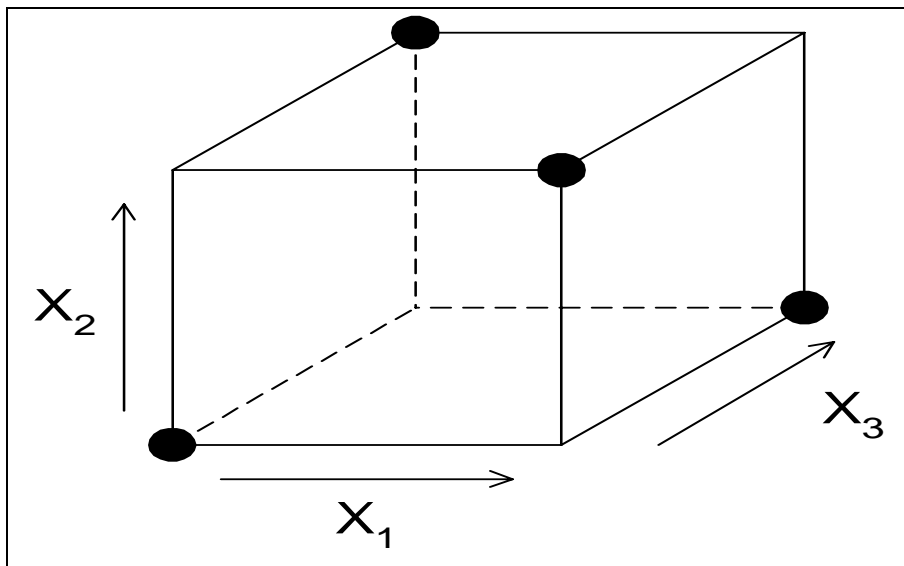
En vanlig metod att utföra försök är att ändra ”en-variabel-i-taget” (EVIT). Detta är ett helt förkastligt förfarande då modellens giltighetsområde begränsas helt i onödan, figur 4.



Figur 4

Försök i två variabler enligt en EVIT-strategi. Modellens giltighetsområde begränsas till de streckmarkerade områdena. (Trials in two variables using an OVAT-("one-variable-at-a-time")-strategy. The boundaries for the calibration domain are line drawn.)

Proven som genomförs för att erhålla mätunderlag till prediktionsmodellen bör alltid utgå från en sk statistisk försöksplan. Proven sprids då ut för att täcka hela det aktuella giltighetsområdet, och ge optimal beräkningsprecision för modellparametrarna. I figur 5 visas en enkel försöksplan avseende ett reducerat faktorförsök, för 3 st variabler.



Figur 5
4 st prov som ett reducerat faktorförsök för 3 st variabler på två olika nivåer.
(Four trials as a fractional factorial design for three variables at two different levels.)

Mätningarna som ska användas som ingångsdata för en prediktionsmodell bör ha god kvalitet. Det uppnås genom frekventa kalibreringar och kontroller. Annars finns det risk för att bygga in systematiska mätfel i prediktionsmodellen. Mätssystemet för NO_x bör vara kalibrerat mot ett separat ackrediterat mätsystem.

De ingångsdata som används för att beräkna prediktionsmodellen bör omfatta en rimligt lång sammanhängande driftsperiod. Detta säkerställer att mätunderlaget även blir representativt med avseende på de driftsvariabler som har betydelse men inte kan styras. Mätunderlaget för att beräkna modellen bör därför omfatta minst en veckas drift.

5.2 Modellverifiering - rekalkibrering

En prediktionsmodell måste verifieras med tidsmässigt helt oberoende mätdata innan den tas i drift. Är inte ingångsdata för modellverifieringen helt oberoende från de mätdata som modellen beräknades för så riskerar man att överskatta modellens prediktionsförmåga.

Praktiskt innebär verifieringen att modellen, som har beräknats på ingångsdata från en tidigare mätperiod, kontrolleras med senare insamlade mätdata. Modellverifieringen skall visa om modellen uppfyller prestandakraven. Rent teoretiskt går det lika bra att utföra verifieringen med oberoende mätdata från ett tidigare tillfälle. Risker är dock uppenbar att verifieringstillfället väljs på ett sådant sätt att "oberoendet" sätts ur spel.

Modellverifieringen bör åtminstone första gången omfatta minst en veckas drift. Frekvensen av jämförande mätningar får därefter anpassas till behovet från fall till fall. Minst en gång per år bör modellens prestanda verifieras med en jämförande kalibreringsmätning, enligt vad som redan gäller för konventionella mätinstrument¹⁸.

Uppfyller inte modellen prestandakraven vid denna kalibreringskontroll så bör orsaken identifieras och åtgärder vidtagas. Modellen kan då exempelvis rekalkibreras/-uppdateras med nya mätdata. Mellan de återkommande jämförande mätningarna kan själva modellen inte rekalkibreras. Instrumenten för ingångsvariablerna kan och bör däremot kalibreras enligt fastlagda rutiner.

5.3 Prestandakrav och definition av kalibreringsområde

I Naturvårdsverkets föreskrifter SNFS 1996:10 MS:93 och i Allmänna Råd 91:6 anges prestandakrav för mätinstrument¹⁸⁻¹⁹. De generella prestandakraven sammanfattas i tabell 3.

Tabell 3

Prestandakrav för automatiska mätutrustningar.

(Performance requirements for automatic measurement instruments.)

Parameter	Krav
Nedre detektionsgräns	= 2 %*
Nollpunktsdrift	= ± 2 %*
Kalibrerpunktsdrift	= ± 4 %**
Standardavvikelse	= ± 5 %*
Inverkan av interfererande ämnen	= ± 4 %*
Svarstid	= 200 sek

*Jämfört med fullt skalutslag.

**Jämfört med referenspunkten.

Nedre detektionsgräns beräknas med formeln:

$$x_{\min} = \bar{x}_0 + 2s_{x0}$$

där \bar{x}_0 är medelvärdet av nollprovsmätningarna och s_{x0} är standardavvikelsen.

Nollprov kan inte genomföras med en prediktionsmodell. Detektionsgränsen kan därför lämpligen definieras som standardavvikelsen vid en jämförande mätning multiplicerad med två ($2s$).

Nollpunktsdrift och kalibrerpunktsdrift kan inte definieras för en prediktionsmodell.

Mätvärdesdrift kan förekomma i en prediktionsmodell vid drift i ingångsdata. Mätvärdesdrift kan påvisas som en systematisk skillnad vid jämförande mätningar.

Standardavvikelsen för en prediktionsmodell bestäms vid jämförande mätningar.

Interferenser kan förekomma i ingångsdata eller genom väsentliga yttre faktorer som ej ingår i modellen. Inverkan av interferenser på prediktionsmodellen går ej att bestämma kvantitativt.

Svarstiden för en prediktionsmodell beror direkt av svarstiden hos ingångsvariablerna. Svarstiden är därför normalt inget problem för prediktionsmodeller som baseras enbart på kontinuerligt mätta variabler.

Minst en gång per år skall anläggningens mätutrustning kontrolleras av ett ackrediterat laboratorium genom jämförande mätning. Prestandakravet anges då som att: *”Om den systematiska skillnaden är större än 2% av mätintervallet, bör orsaken undersökas och nödvändiga åtgärder vidtagas.”*

Definitionen av mätintervall är något oklar, och särskilt för en prediktionsmodell. Vattnfall har här gjort en egen tolkning av Naturvårdsverkets prestandakrav genom att anta ett artificiellt mätområde som motsvarar vad som bör gälla för ett konventionellt mätsystem¹⁷. I exemplet Skinnskatteberg var kalibreringsområdet för prediktionsmodellen 42-136 ppm NO_x torr gas, och ”mätområdet” sattes till 0-350 ppm.

Naturvårdsverket kommer att ställa likartade krav på prediktionsmodeller som för konventionella mätsystem²⁰. Prestandakraven behöver dock anpassas, och detta arbete pågår nu. Det förefaller rimligt att specifika prestandakrav utformas som inte behöver gå omvägen över antagandet om ”mätområde” utan direkt utgår från modellens reella kalibreringsområde. Kalibreringsområdet för en prediktionsmodell, skillnaden mellan max- och minvärdet i de data som har använts i modelluppbyggnaden, motsvarar mätområdet för ett instrument men blir i allmänhet betydligt snävare. Prestandakrav som för ett instrument anges som procentandelar av mätområde/skalutslag måste därför anpassas om de ska tillämpas för en prediktionsmodell.

I motsats till vad som gäller i USA har vi inget uttalat prestandakrav avseende precision vid de årliga mätjämförelserna mellan instrument, men det är lättare att statistiskt påvisa en systematiskt skillnad om den slumpmässiga variationen är liten. En systematisk skillnad anses föreligga om det absoluta medelvärdet av mätvärdesparens skillnader $|\bar{z}|$ är större än $2s/\sqrt{n}$. Trots att kvalitetsmålet bör vara en hög mätprecision kan den därför uppfattas som negativ.

Det amerikanska prestandakravet avseende ”relativ noggrannhet” skulle kunna tillämpas även här. Det går dock att utforma ett enklare mått på prestanda som innefattar både systematiska och slumpmässiga avvikelser vid mätjämförelser. Det absoluta medelvärdet av mätvärdesparens skillnader, $|\bar{z}|$, används som ett mått på systematisk avvikelse. Om vi istället bildar medelvärdet för de absoluta skillnaderna mellan mätvärdesparen får vi ett mått som även innefattar det slumpmässiga felet:

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

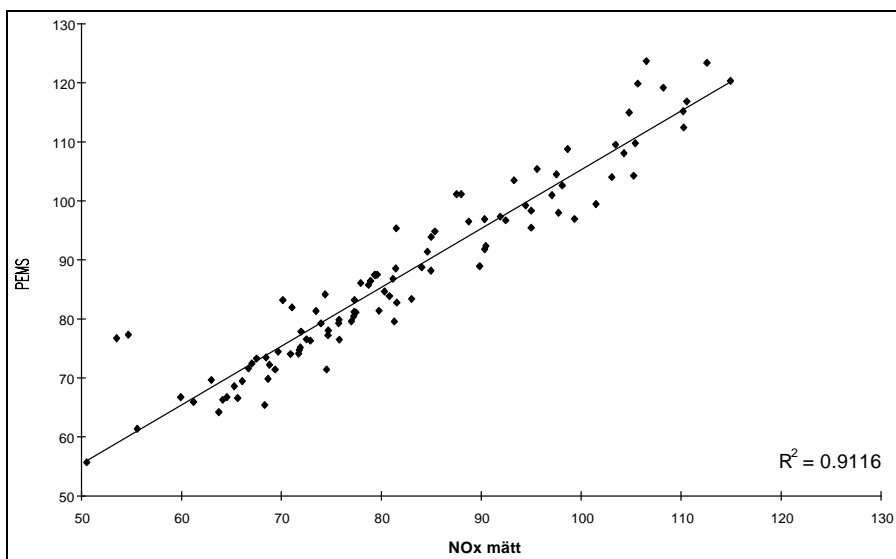
I tabell 4 och figur 6-7 redovisas en prestandajämförelse av två prediktionsmodeller i Skinnskatteberg under en tidsperiod då båda mätsystemen, för NO_x respektive NO, var i funktion och visade god följsamhet. Mätdata har ställts till förfogande av Vattenfall inom ramen för det genomförda ”PEMS”-projektet och avser tidsperioden 1996-03-01--03-05. Vattenfall och Trätec har ställt sin prediktionsmodeller till förfogande för vår utvärdering^{17,21}.

Tabell 4

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

(Performance comparison for two prediction models. Deviation between model and measurement instrument for 100 measurement pairs.)

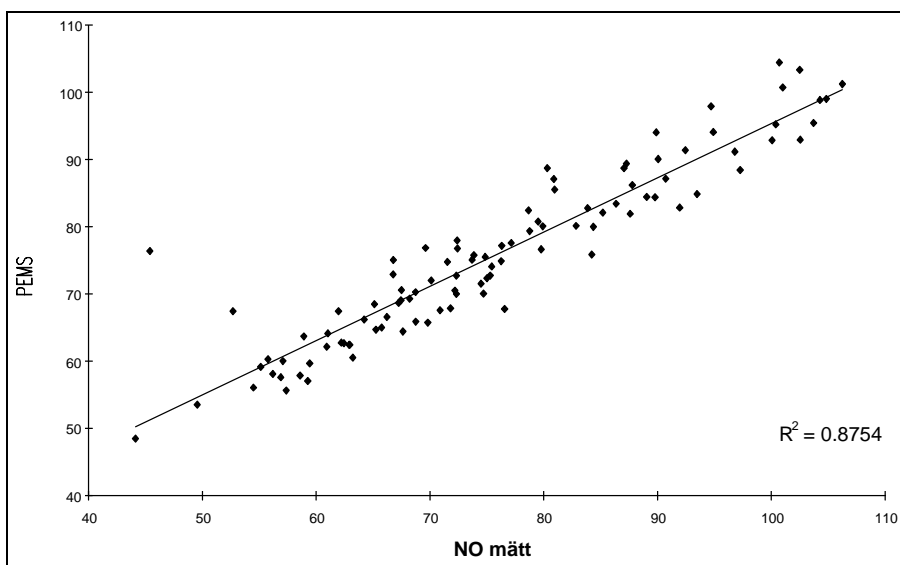
Modell (Model)	Absolut medelavvikelse (Absolute mean deviation) $ \bar{z} $, ppm	Standardavvikelse (Standard deviation) s, ppm	Kombinerad avvikelse (Combined deviation) $\sum z_i /n$, ppm
Vattenfall (NO _x)	5.3	4.7	5.6
Trätec (NO)	0.0	5.3	3.7



Figur 6

Modellberäkningar vs. mätresultat, ppm NO_x tg, Vattenfalls modell.

(Model predictions vs. Measurement results, ppm NO_x dry gas, Vattenfall's model.)



Figur 7

Modellberäkningar vs. mätresultat, ppm NO tg, Trätek's modell.

(Model predictions vs. Measurement results, ppm NO dry gas, Trätek's model.)

Prediktionsmodeller kalibreras mot mätinstrument som är behäftade med ett visst mätfel. Modellerna kan givetvis aldrig bli bättre än mätningen som den kalibreras emot, och det förekommer alltid ett visst modellfel. Prestandakraven för prediktionsmodeller kan därför inte fastställas utan att beakta det enkla sambandet:

$$\text{Prediktionsfel} = \text{modellfel} + \text{mätfel}$$

I prestandajämförelsen ovan visade båda modellerna god riktighet och precision. Den systematiska skillnaden, spridningen och den kombinerade avvikelsen låg alla inom 6% av kalibreringsintervallet (42-136 ppm). jämförelsen kan tas som utgångspunkt för att formulera ett förslag rimligt prestandakrav:

Skillnader i mätresultat från en jämförande mätning bör, om det uttrycks som systematisk skillnad och standardavvikelse alternativt kombinerad avvikelse, inte tillåtas överskrida 10 % av modellens kalibreringsområde (dock max 10 ppm tg) utan att åtgärder vidtas.

Utöver de föreslagna prestandakravet ovan kan maximal svarstid anges likartat som för ett mätinstrument. Detektionsgränsen är direkt kopplad till standardavvikelsen för en prediktionsmodell och behöver därför inte anges separat. Mätvärdesdrift påvisas som en systematisk skillnad vid jämförande mätningar och behöver därför inte anges separat.

5.4 Kontroll av giltighetsområde

Prediktionsmodellens giltighetsområde beror på ingångsdata vid kalibreringstillfället.

Modellen är tillämpbar om:

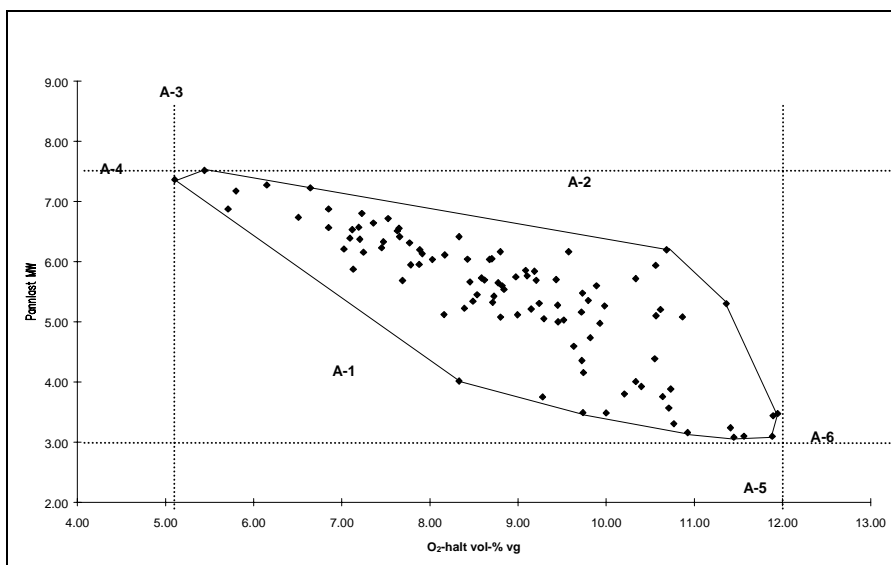
- Pannans utformning inte förändras.
- Driftinställningarna är inom det provade området.
- Bränslets sammansättning är inom det provade området.

Ett brett giltighetsområde erhålls genom att använda statistisk försöksplanering, se pkt. 5.1.

Giltighetsområdet för prediktionsmodellen måste fortlöpande kontrolleras. Interpolation, d v s skattning mellan olika driftpunkter inom området, är godtagbart. Extrapolation, d.v.s. skattning utanför området, kan däremot ge helt felaktiga resultat.

Den enklaste formen av giltighetskontroll för kontinuerliga variabler är max- och minvärdet vid kalibreringen. För kategorivariabler, exempelvis olika bränslen, måste aktuell ”typ” överensstämma med de provade.

Giltighetskontroll med ”en-variabel-i-taget”-(EVIT)-metodik är inte tillräcklig om det finns samvariation mellan mätvariablerna, och det är nästan alltid fallet. I figur 8 illustreras detta för mätvariablerna O_2 -halt och pannlast. Avvikarna A-3 och A-6 kan upptäckas genom att max-gränserna (streckmarkerade linjer) för pannlast respektive O_2 -halt överskrids. Avvikarna A-5 och A-4 kan upptäckas genom att min-gränserna (streckmarkerade linjer) för samma driftsvariabler underskrids. Avvikarna A-1 och A-2 är lika tydligt onormala, men här krävs att vi även betraktar last- O_2 -sambandet för att upptäcka dem.



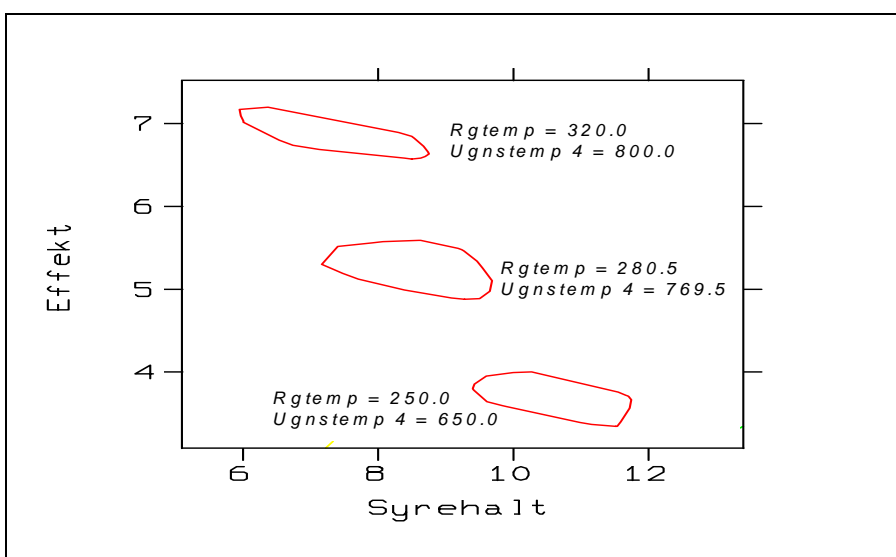
Figur 8

Pannlast som en funktion av O_2 -halt, med giltighetsområde och 6 st avvikare markerade (mätdata från Skinnskatteberg som har ställts till förflöende av Vattenfall).

(Boiler load as a function of O_2 -concentration, with model domain and six outliers marked.)

I normalfallet är fler än två variabler inblandade och då blir det ännu svårare att övervaka giltighetsområdet utan datorbaserade hjälpmedel.

Giltighetsområdet för den prediktionsmodell som Vattenfall utvecklade för pannan i Skinnskatteberg har angetts med max-/min-värden, samt med olika X-Y-diagram som visar randvillkoren för två variabler åt gången. Antalet använda mätvariabler är dock flera. I prediktionsmodellen ingår förutom pannlast och O₂-halt även rökgastemperatur före luftförvärmare och ugnstemperatur. Giltighetsområdet är därför betydligt snävare, om vi betraktar även dessa båda mätvariabler. I figur 9 visas med några representativa driftsfall hur giltighetsområdet krymper om man tar hänsyn till de två andra mätvariablerna.



Figur 9

Giltighetsområdet för Vattenfalls prediktionsmodell avseende pannan i Skinnskatteberg som en funktion av pannlast och O₂-halt vid olika inställningar i de två andra ingångsvariablerna.

(The model domain for the Vattenfall prediction model for the boiler in Skinnskatteberg as a function of boiler load and O₂-concentration at different set-points in the two other input variables.)

Giltighetsområdet kan fortlöpande kontrolleras genom att:

- Definiera den mångdimensionella geometrin för kalibreringsområdet.

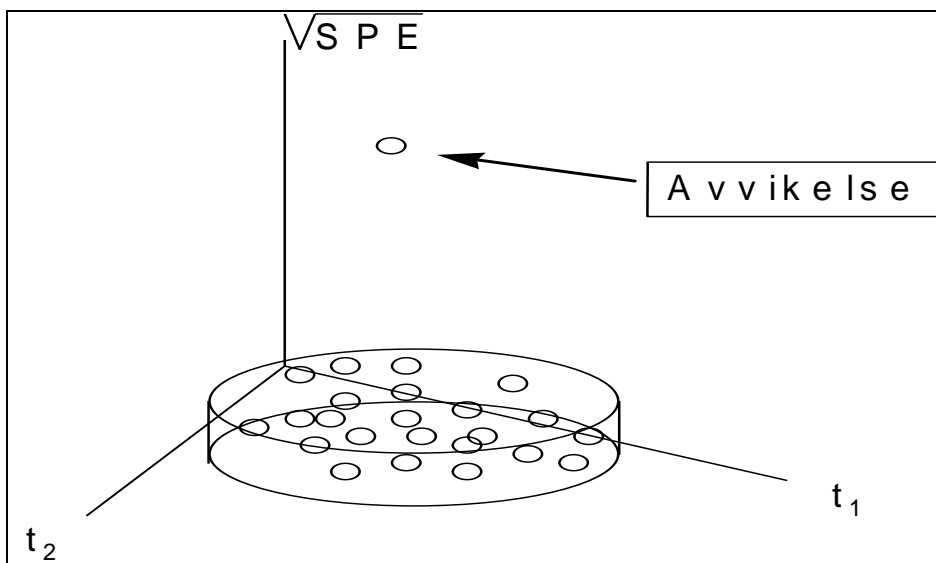
eller

- Utgående från min-/max-begränsningarna och variablernas variationsmönster (samvariation).

Den sistnämnda lösningen är beräkningstekniskt enkel att genomföra med t.ex. en principalkomponent-(PCA)-modell, som även kan användas för signalvalidering.

En principalkomponent är en linjär kombination av ursprungsvariablerna. Principalkomponenterna beräknas med minsta-kvadratanpassning så att de beskriver så mycket som möjligt av variationen i mätdata. Mätdata som samvarierar går att komprimera och beskriva med några få principalkomponenter, en $s \times k$ principalkomponentmodell. Principalkomponenterna är sinsemellan helt oberoende. Tekniken beskrivs mer ingående i ref. 3, se även begreppsförklaringen i kap. 7.

I figur 10 visas hur mätdata kan projiceras längs två principalkomponenter med ett markerat giltighetsområde. Den markerade avvikaren har ett stort prediktionsfel, d v s befinner sig på ett stort "avstånd" från det giltighetsområde som modellen beskriver.

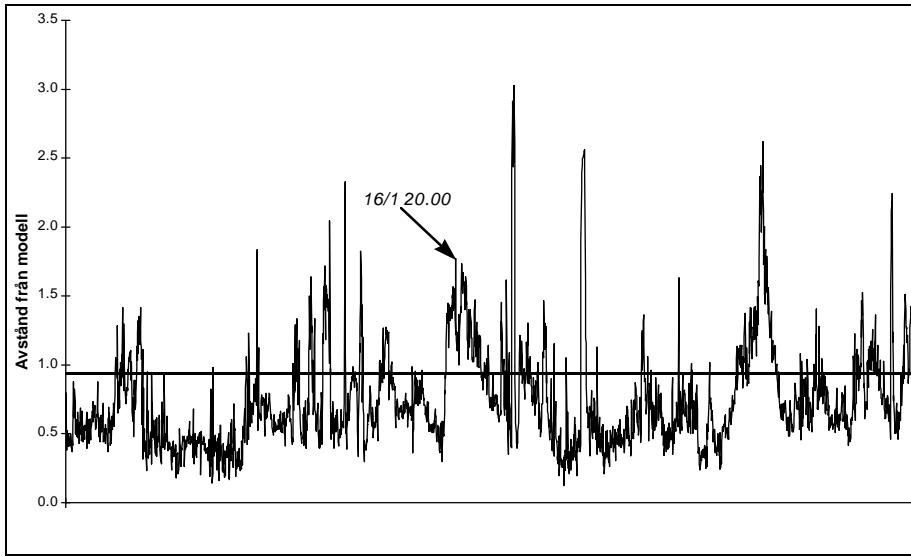


Figur 10

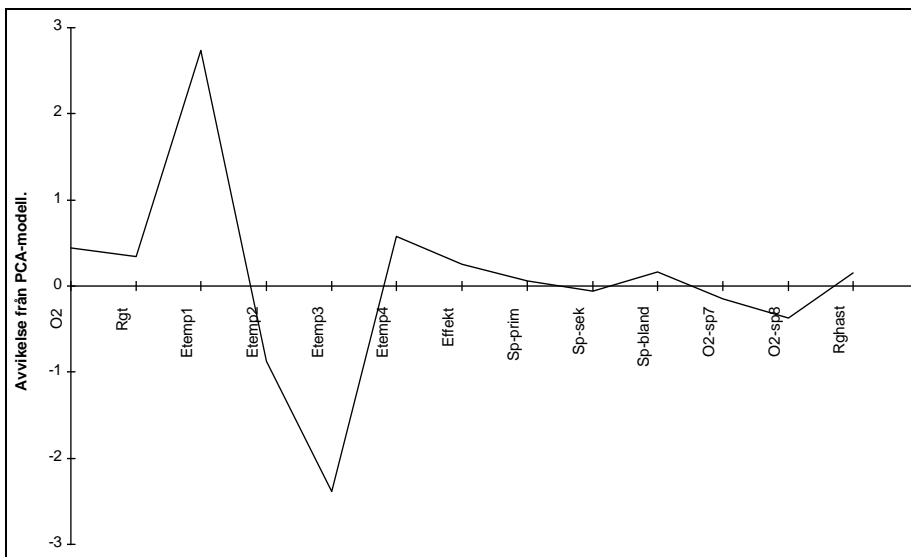
Mätdata med en avvikare projicerade på två principalkomponenter. Prediktionsfelet (\sqrt{SPE}) anger avståndet från modellplanet.

(Measurement data with an outlier projected on two principal components. The prediction error (\sqrt{SPE}) shows the distance from the model plane.)

Som exempel på resonemanget ovan har en PCA-modell beräknats för samma prov som ingick i Vattenfalls prediktionsmodell för pannan i Skinnskatteberg. I figur 11 visas hur de verifierande mätningarna, 2509 registreringar, projicerar på denna modell med en kontrollgräns markerad. "Avståndet" är ett mått på avvikelse från modellen och det variationsmönster som den beskriver. Registreringar över den markerade kontrollgränsen är statistiskt säkerställda avvikelser. Orsaken till avvikelserna kan spåras genom att plotta avvikelserna för de använda mätvariablerna i ett enskilt prov, figur 12.



Figur 11
Avstånd/avvikelse från PCA-modell, verifierande mätning, pannan i
Skinnskatteberg.
(Distance/deviation from a PCA-model, verifying measurements, the boiler in Skinnskatte-
berg.)



Figur 12
Avvikelser, framför allt två ugnstemperaturer, från PCA-modell den
16 januari kl. 20⁰⁰, pannan i Skinnskatteberg.
(Deviations, applies particularly for two furnace temperatures, from PCA-model the
16th of January at 8⁰⁰ p.m.)

5.5 Mätkvalitet - validering av mätsignaler

Mätkvaliteten för de använda mätsignalerna har en helt avgörande betydelse för prestanda hos en prediktionsmodell. De mätinstrument och givare som används i prediktionsmodellen ska därför underhållas och kalibreras fortlöpande enligt ett fastlagt schema.

Utöver normalt instrumentunderhåll och kalibreringar bör en använd mätsignal även valideras fortlöpande gentemot variationsmönstret för alla övriga mätsignaler. Det kan ske exempelvis genom specifika prediktionsmodeller för varje enskild mätsignal eller genom en övergripande principalkomponentmodell enligt ovan. Det sistnämnda alternativet som omfattar endast en modell är enklast att genomföra.

Praktiskt sker valideringen av mätsignalen genom att varje registrering av ett mätvärde jämförs mot ett modellberäknat värde. Är avvikelse inom gränserna för de normala avvikelserna så godtas värdet, annars förkastas det. Vid onormala avvikelser i någon eller några mätsignaler så kan prediktionsmodellen inte användas.

5.6 Störningstålighet

Trots ansträngningar att upprätthålla en god mätkvalitet, och fortlöpande kontroll av giltighetsområdet, kommer en prediktionsmodell att utsättas för störningar vid praktisk drift. Det måste därför vara en målsättning att åstadkomma en så robust modell som möjligt. Några punkter att beakta, exempelvis enkel uppbyggnad, har redan påtalats.

Modellens störningstålighet kan undersökas genom simuleringar, men för en linjär modell går det lika bra att granska regressionskoefficienterna. Exempelvis mätfel i använda mätsignaler kommer att fortplanta sig i direkt proportion till regressionskoefficienternas storlek, och i tabell 5 visas detta för de båda prediktionsmodellerna för pannan i Skinnskatteberg.

Vattenfalls modell:

$$NO_x \text{ ppm} = 1.591 - 3.469 * O_2 + 0.163 * T_{rg} + 0.06970 * T_{ugn4} + 4.635 * P_n$$

Träteks modell (för fuktigt bränsle):

$$NO \text{ ppm} = 101.222 - 6.389 * O_2 + 6.964 * P_n$$

Tabell 5

Jämförelse av fortplantning av mätfel genom prediktionsmodellerna för pannan i Skinnskatteberg.

(Comparison of error propagation through the prediction models for the boiler in Skinnskatteberg.)

Modell (Model)	O ₂ -halt (O ₂ -concentration)	Pannlast (Boiler load)
Vattenfall	3.5 ppm NO _x /vol-% O ₂ vg	4.6 ppm NO _x /MW
Trätek	6.4 ppm NO/vol-% O ₂ vg	7.0 ppm NO/MW

Vattenfalls modell är alltså något mer störningståligen trots att den använder fler mätvariabler. För beräkning av prediktionsmodellen har man använt *The Unscrambler*®, en programvara för multivariat dataanalys. Modellberäkningstekniken, PLS-regression, möjliggör att många mätvariabler kan utnyttjas utan att modellen blir alltför komplex. ”Enkelheten” åstadkoms genom att endast en del av de använda mätvariablernas variation utnyttjas i regressionen.

Träteks modell är beräknad genom minsta kvadratanpassning till mätdata. Regressionsmetod och beräkningsprogramvara har inte redovisats för oss.

5.7 Dokumentationskrav - kvalitetsstyrning

En prediktionsmodell som ska användas för miljökontroll måste kunna utsättas för en oberoende granskning. För att säkerställa kvaliteten i beräkningsarbetet kan man även överväga om särskilda kompetenskrav bör ställas på den som är utförande part. Under alla omständigheter bör arbetet med att ta fram prediktionsmodellen dokumenteras i följande avseenden:

- Kalibreringsdata som har använts i modelleringen skall finnas bevarade.
- Hur prediktionsmodellen har beräknats (metod, förbehandling samt val av prov och variabler inkl. ev. viktning) skall anges.
- Verifieringsdata som har använts för att kontrollera den beräknade modellen skall finnas bevarade och resultatet av verifieringen skall anges.
- Vilka kvalitetssäkringsrutiner som har används vid mätning och insamling av kalibrerings- och verifieringsdata skall anges.
- Vilka kvalitetssäkringsrutiner som har använts vid beräkningen av prediktionsmodellen skall anges.
- Giltighetsområde och speciella förutsättningar, exempelvis bränsle skall anges.

Vid den praktiska tillämpningen av modellen bör det likaså vara möjligt att genomföra oberoende kontroller, utöver jämförande mätningar av samma typ och omfattning som för andra mätsystem. Det förutsätter att följande dokumenteras:

- Vilka kvalitetssäkringsrutiner som har använts vid mätning och vid insamling av mätdata. Exempelvis ska allt instrumentunderhåll, kalibreringar och funktionskontroller journalföras.

- Vilka rutiner för kvalitetssäkring som har använts vid beräkning av modellprediktioner, inklusive rutiner för datalagring.
- Hur den fortlöpande kontrollen av prediktionsmodellens tillämplighet genomförs. Perioder då modellen ej varit tillämplig skall klart framgå av det insamlade materialet.

6. Slutsatser

De ”PEMS”-projekt som har genomförts under 1995-96 visar att indirekt mätning av kväveoxider är tekniskt möjligt att genomföra även i små fastbränsleeldade anläggningar. Indirekt mätning av kväveoxider kan därmed bli ett alternativ förutsatt att modelluppbyggnad, verifiering och tillämpning dokumenteras så att en oberoende kontroll är möjlig.

Det underlag som har presenterats i de genomförda ”PEMS”-projekten kan läggas till grund för att utforma prestandakrav för prediktionsmodeller. Detta arbete pågår hos Naturvårdsverket. Utgångspunkten är att likartade krav skall gälla för prediktionsmodeller som för mätinstrument.

Indirekt bestämning av kväveoxider genom modellberäkningar bör kunna godtas om kvalitets- och prestandakraven i tabell 6 uppfylls.

Tabell 6

Förslag till kvalitets- och prestandakrav för prediktionsmodeller avsedda för indirekt bestämning av NO_x-halt.

Mätdata för upprättande av modell	Representativa prov genomförda enligt en statistisk försöksplan. Stabila provperioder som omfattar minst en veckas drift.
Uppbyggnad av modell	Dokumenteras så att en oberoende kontroll är möjlig.
Verifiering av modell	Prediktionsmodellen verifieras med en veckas tidsmässigt oberoende jämförande mätning innan den tas i drift. Dokumenteras så att en oberoende kontroll är möjlig.
Kalibreringskontroller	Modellen kontrolleras minst en gång per år med en jämförande mätning som täcker hela kalibreringsområdet*. Instrumenten för ingångsvariablerna kalibreras enligt fastlagda rutiner.
Systematisk skillnad vid kalibreringskontroll	= 10 % av modellens kalibreringsområde* och = 10 ppm tg. Systematisk skillnad beräknas som det absoluta medelvärdet av skillnaderna mellan minst 10 st mätvärdespar.
Standardavvikelse vid kalibreringskontroll	= 10 % av modellens kalibreringsområde* och = 10 ppm tg. Standardavvikelsen beräknas på skillnaderna mellan minst 10 st mätvärdespar.
Svarstid	= 200 sek
Giltighetsområde	Definieras och kontrolleras fortlöpande.
Signalvalidering	Fortlöpande.
Registrering och behandling av mätdata	Samma krav som för mätinstrument (SNFS 1996:10 MS:93)

* Kalibreringsområde definieras som skillnaden mellan högsta och lägsta värde i de mätdata avseende NO_x som används för att upprätta modellen.

Övriga prestandakrav för instrument är antingen ej tillämpbara eller innefattas med de angivna gränserna för systematisk skillnad och standardavvikelse

7. Definitioner och begrepp

Definitioner och förklaringar till några olika begrepp som används i rapporten. I de flesta fall har de hämtats från Naturvårdsverkets rapport nr 3404 (baserade på Svensk Standard) eller ISO Standards ISO 3534-1-3. Kompletteringar och bearbetningar har dock genomförts.

Absolut avvikelse	Absolutbeloppet av skillnaden mellan två mätvärden.
Ackrediterat laboratorium	Laboratorium som av SWEDAC har ackrediterats för att utföra specificerade provningar.
Algoritm	En regel för att lösa ett matematiskt problem i ett visst antal steg.
Avvikare	Ett prov eller mätvärde som avviker från den normala nivån eller det normala variationsmönstret.
Faktor försök	En typ av statistisk försöksplan där varje faktor varierar mellan alla möjliga kombinationer av ett antal förutbestämda nivåer, vanligtvis två olika. Se även reducerat faktor försök.
Jämförande mätning	En samtidig mätning utförd av ett ackrediterat laboratorium för att kontrollera den avgiftsskyldiges mätutrustning.
Kategorivariabel (kvalitativ variabel)	En variabel som inte kan definieras med mätvärden längs en kontinuerlig skala utan som antar diskreta kvalitativa ”värden”, exempelvis typ av bränsle.
Konfidensintervall	Intervall som med en viss sannolikhet innesluter en estimators väntevärde (t.ex. medelvärdet).
Korrelation	Graden av samvariation mellan två eller flera variabler. Ett numeriskt värde för den linjära korrelationen mellan två variabler ges av korrelationskoefficienten ”r”.
Kvalitetssäkring	Alla planerade och systematiska åtgärder som är nödvändiga för att ge tillräcklig säkerhet att kvalitetskraven uppfylls.
Minsta-kvadrat-anpassning	Anpassning av en funktion genom minimering av kvadratavvikelsena.

Modellfel	Avvikelsen mellan en modells beskrivning av sambandet mellan två eller flera variabler och det verkliga sambandet.
Multivariat	Flervariabel.
Mätfel	Ett mätvärdes avvikelse från ett jämförelsevärde.
PCA	Se principalkomponentanalys.
PEMS	Förkortning av ”Predictive Emission Monitoring System” eller predikterande emissionsmätsystem. Ett mätsystem som baserar sig på en indirekt mätmetod genom beräkning av ett utsläpp från andra drifts- och anläggningsparametrar.
Precision	Kvalitetssegenskaper hos en mätmetod som anger graden av inbördes överensstämmelse mellan resultat av på ett definierat sätt upprepade mätningar enligt denna metod. Hög precision ger liten spridning av resultaten och således en liten standardavvikelse. Motsvaras av begreppet slumpmässigt (tillfälligt) fel.
Prediktion	Modellberäknat värde.
Prediktionsmodell	Ett funktionssamband som används för indirekt bestämning av en egenskap genom beräkning utifrån andra variabler.
Prestanda	Kvalitetssegenskaper hos en mätutrustning, exempelvis detektionsgräns, mätvärdesdrift, känslighet för interferenser samt slumpmässigt och systematiskt fel vid mätjämförelser.
Principalkomponentanalys	En teknik för dataanalys där ett antal korrelerade variabler transformeras linjärt till ett antal icke-korrelerade variabler. Varje principalkomponent beräknas så att en maximal andel av den återstående variationen i mätdata beskrivs.
r^2	Den kvadrerade korrelationskoefficienten ”r”. Ett mått på det linjära sambandet mellan två variabler.
Regression (regressionsanalys)	Metoder för att beräkna parametrarna i en modell genom att optimera en objektiv funktion, t.ex. minsta-kvadratanpassning, och därefter testa den statistiska signifikansen hos erhållna beräkningsresultat. De flesta regressionsmetoderna baseras på någon form av minsta-kvadratanpassning.

Relativ noggrannhet Ett prestandamått för mätutrustningar som används i USA. "Relative accuracy" (RA) definieras som:

$$RA = \frac{|\bar{d}| + |CC|}{RM} * 100 \%$$

där $|\bar{d}|$ är det absoluta medelvärdet, s_d är standardavvikelsen för mätvärdesparens skillnader, CC är en enkelsidig konfidenskoefficient $CC = t_{.025[n-1]} \frac{s_d}{\sqrt{n}}$ och RM är det medelvärde som erhöles vid bestämning med en godkänd referensmetod.

Reducerat faktorförsök Ett faktorförsök där endast en relevant delmängd av de möjliga försöken väljs ut och genomförs. Se även faktorförsök.

Riktighet (noggrannhet) Graden av överensstämmelse mellan medelvärdet av ett stort antal mätvärden och ett accepterat referensvärde. Motsvaras av begreppet systematiskt fel.

Signifikansnivå Övre gräns för sannolikheten att nollhypotesen förkastas trots att den är sann. Ett exempel på en nollhypotes är att det inte föreligger någon skillnad mellan två grupper av mätvärden.

Signifikant resultat Resultat av ett test på en given signifikansnivå som leder till att nollhypotesen förkastas.

Skattningsfel Differensen mellan en punktskattning och det verkliga parametervärdet för vilken den är en skattning. I rapporten används det vid diskussion av fel vid skattning av modellparametrar, exempelvis regressionskoefficienter.

Slumpmässigt (tillfälligt) fel Mätfel som varierar slumpmässigt till värde och tecken under flera mätningar av samma storhetsvärde utförda under så identiska betingelser som möjligt.

Standardavvikelse Ett spridningsmått. Den positiva kvadratroten ur variansen.

Statistisk försöksplan En försöksplan som syftar till att så effektivt som möjligt och till lägsta kostnad ge underlag för en statistisk utvärdering av resultaten, exempelvis skattning av modellparametrarna i ett funktionssamband.

Systematiskt fel	Mätfel, som under flera mätningar av samma storhetsvärde utförda under samma betingelser är konstant till värde och tecken, och som förblir konstant eller varierar regelbundet när betingelserna ändras.
Validering	Kontroll av giltighet (kravuppfyllelse).
Varians	Ett spridningsmått. Summan av kvadraterna på avvikelserna från medelvärdet dividerad med antalet värden minus ett.

8. Referenser

1. Draper, N.R., Smith, H. *Applied regression analysis*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, 1981.
2. Box, G.E.P., Draper, N.R. *Empirical model-building and response surfaces*. John Wiley & Sons, 1987.
3. Martens, H., Næs, T. *Multivariate calibration*. John Wiley & Sons, 1989.
4. Havener, J., Terhune, K. *Implementation of a software CEM™ for NO_x emission*. Presentation vid 1993 AFRC International Symposium.
5. Hung, W. S. Y. *Predictive emission monitoring system (PEMS): An effective alternative to in-stack continuous NO_x monitoring*. Industrial Power Conference: Papers ASME-Publications-PWR; 24(1994):145-153.
6. Stevens, T. *Software cuts clean air costs*. Industry Week 243(1994):45-48.
7. Collins, M., Terhune, K. *A model solution for tracking pollution*. Chemical Engineering, juni 1994.
8. Simpson, C. A. *Adaptive software performs CEM functions*. Pollution Engineering, maj 1994.
9. Reinermann III, P., Keeler, J. *Predictive emission monitoring systems: Low-cost continuous emission monitoring*. Presentation vid Eighth Annual NO_x Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 7-8 mars, 1995.
10. Bitto, M. S., Frerichs, D. K. *A novel approach to predictive emission monitoring*. Presentation vid Eighth Annual NO_x Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 7-8 mars, 1995.
11. Sperber, B. *Lawmakers find common sense in neural nets*. Control, juli 1995.
12. *Enhanced Monitoring Program. Proposed Rules*. U.S. EPA, 22 oktober, 1993.
13. deRuyter, J. C. *Enhanced monitoring*. Presentation vid Eighth Annual NO_x Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 7-8 mars, 1995.
14. *Compliance Assurance Monitoring Rule. Proposed Rules*. U.S. EPA, 20 september, 1995.
15. *Compliance Assurance Monitoring Program. Unified Agenda*. U.S. EPA, 28 november, 1995.

16. *Operating Permits Program Rule Revisions. Proposed Rules.* U.S. EPA, 29 augusti, 1994.
17. Harnevie, H., Sarközi, L., Trenkle, S. *Predikterande emissionsmätsystem (PEMS) för emissionskontroll i biobränsleeldade förbränningsanläggningar.* Vattenfall. Rapportkoncept, juni 1996.
18. *Mätmetoder för kväve- och svaveloxidutsläpp - vid kontroll enligt miljöskyddslagen av utsläpp från förbränning.* Allmänna Råd 91:6. Statens Naturvårdsverk, 1991.
19. *Statens naturvårdsverks föreskrifter om ändring i kungörelsen (SNFS 1991:4) med föreskrifter om kontroll av utsläpp av kväveoxider och svaveloxider till luft från förbränning i fasta anordningar.* Statens naturvårdsverks författningssamling SNFS 1996:10 MS:93. Utkom från trycket den 27 juni 1996.
20. Allmänna Råd i *Statens naturvårdsverks föreskrifter om ändring i kungörelsen (SNFS 1991:5) med föreskrifter om mätutrustning för bestämmande av miljöavgift på utsläpp av kväveoxider vid energiproduktion.* Statens naturvårdsverks författningssamling SNFS 1996:9 MS:92. Utkom från trycket den 27 juni 1996.
21. Liebscher, P. *Modellekvationer för Skinnskattebergs sågverk.* Fax. Fjärrvärmebyrån AB, 1996-02-28.