

ISSN 0280-5316  
ISRN LUTFD2/TFRT--5565--SE

# Katalytisk avgasrening av fartygsmotorer

Torbjörn Aukland

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
September 1996

<b>Department of Automatic Control</b> <b>Lund Institute of Technology</b> Box 118 S-221 00 Lund Sweden	<i>Document name</i> MASTER THESIS	
	<i>Date of issue</i> September 1996	
	<i>Document Number</i> ISRN LUTFD2/TFRT--5565--SE	
<i>Author(s)</i> Torbjörn Aukland	<i>Supervisor</i> Per Holmström, ABB Fläkt Marine AB, and Tore Hägglund	
	<i>Sponsoring organisation</i>	
<i>Title and subtitle</i> Katalytisk avgasrening av fartygsmotorer (Catalytic reduction in ship engines)		
<i>Abstract</i> <p>Recent years intensive measures of land-based emissions have increased the share contributed from ships and other marine activities. The main problem here is the nitrogen oxides emitted from today's fuel-optimized diesel engines used by the majority of ships.</p> <p>ABB Fläkt Marine is one of the very few companies that provides a solution to emissions on nitrogen oxides. This is made with a technique called Selective Catalytic Reduction using a substance, urea, which is injected into the exhausts to react with the nitrogen oxides in the reduction catalyst to form water, nitrogen and carbon dioxide. The amount of injected urea into an exhaust pipe is controlled by measuring the momentarily load of the engine. However, the optimal injection rate tends to drift slowly over longer periods of time causing the actual injection rate to be either too low or too high. The adjustments of these trends have so far been made manually by the company's service engineers, but with just a few more plants of this kind installed on ships around the world this would soon become too time consuming.</p> <p>The purpose of this master thesis project has therefore been to suggest how these trend adjustments could be carried out automatically. The measurements, mainly made on a ferry between Sweden and Denmark, show a very different dynamical behaviour of the catalyst depending on whether the actual injection rate is too low or too high. They also show that variations in the engines's load have to be taken into consideration in some way during the adjustments. The suggested method uses time series analysis and prediction while searching for the optimal injection rate.</p>		
<i>Key words</i>		
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>		
<i>Supplementary bibliographical information</i>		
<i>ISSN and key title</i> 0280-5316		<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 52	<i>Recipient's notes</i>
<i>Security classification</i>		

The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through:  
 University Library 2, Box 3, S-221 00 Lund, Sweden  
 Fax +46 46 222 44 22 E-mail ub2@uib2.lu.se

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola

Examensarbete

Katalytisk avgasrening av fartygsmotorer

Torbjörn Aukland

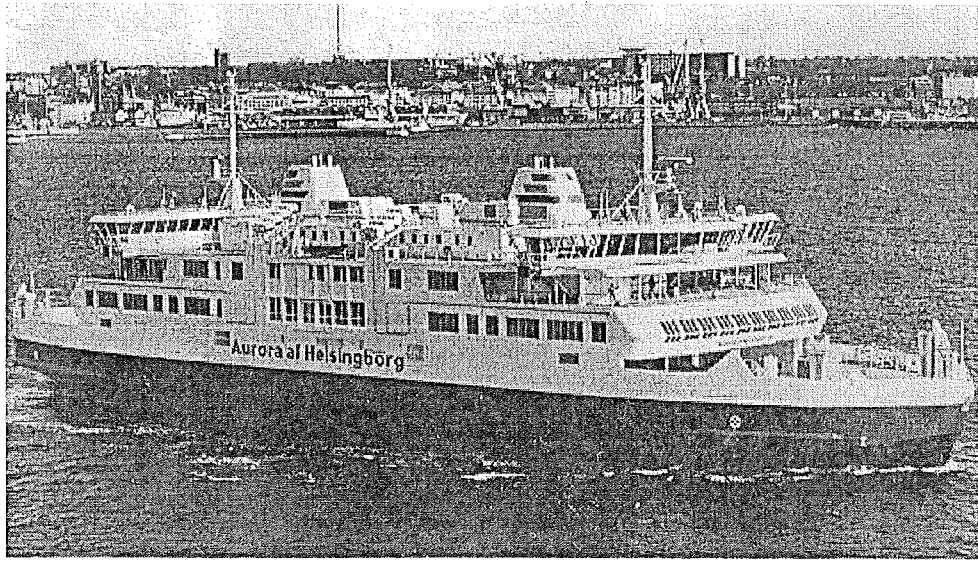
1996-09-05

## Abstract

Recent years intensive measures of land-based emissions have increased the share contributed from ships and other marine activities. The main problem here is the nitrogen oxides emitted from today's fuel-optimized diesel engines used by the majority of ships.

ABB Fläkt Marine is one of the very few companies that provides a solution to emissions of nitrogen oxides. This is made with a technique called Selective Catalytic Reduction using a substance, urea, which is injected into the exhausts to react with the nitrogen oxides in the reduction catalyst to form water, nitrogen and carbon dioxide. The amount of injected urea into an exhaust pipe is controlled by measuring the momentary load of the engine. However, the optimal injection rate tends to drift slowly over longer periods of time causing the actual injection rate to be either too low or too high. The adjustments of this trend have so far been made manually by the company's service engineers, but with just a few more plants of this kind installed on ships around the world this would soon become too timeconsuming.

The purpose of my master thesis project has therefore been to suggest how these trend adjustments could be carried out automatically. The measurements, mainly made on a ferry between Sweden and Denmark, show a very different dynamical behaviour of the catalyst depending on whether the actual injection rate is too low or too high. They also show that variations in the engine's load have to be taken in consideration in some way during the adjustments. The method I consider the most probable to work uses time series analysis and prediction while searching for the optimal injection rate, though it still has to be implemented and tested thoroughly before one can know for sure.



*“Det enda vi vet säkert är att jorden är platt”*

Grekisk vetenskapsman under antiken.

# Innehåll

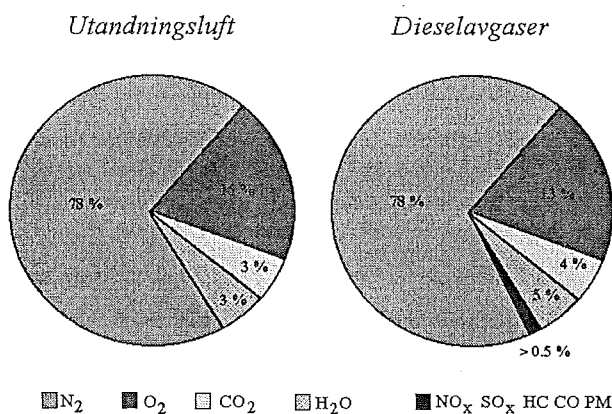
Inledning	1
1 Katalysator och styrsystem	5
1.1 Konstruktion	5
1.2 Kemisk process och optimal injicering	6
1.3 Styrsystemet	7
1.3.1 Börvärdesgenerering och manuell justering	7
1.3.2 Problemformulering	9
2 NO <sub>x</sub> -mätinstrument	10
3 Insamling och analys av mätdata	13
3.1 Genomförande av mätningar	13
3.2 Systemets dynamik	15
3.3 Filtrering och omsampling	18
4 Fortsatt analys med förslag på lösningar	20
4.1 Strukturering av problemet	20
4.2 Optimalsökande algoritm	21
4.3 Detekteringsalgoritm	23
4.3.1 Grundidé	23
4.3.2 Processidentifiering utan injicering	25
4.3.3 Processidentifiering vid överinjicering	29
4.3.4 Processidentifiering vid underinjicering	31
4.3.5 Alternativ lösning	32
4.3.6 Implementering av prediktor	33
4.4 Verifiering och slutsats	35
4.4.1 Kompletterande mätningar	35
4.4.2 Slutsats	38
5 Sammanfattning	39
Appendix A	40
Appendix B	48
Appendix C	51

# Inledning

Miljö och miljöförstöring är frågor som engagerar allt fler människor för var dag. Det är också uppenbart att det är folkets engagemang som driver fram nya miljölagar, forskning kring miljövänligare produkter och företags vilja att profilera sig som miljövänliga. Under en ganska kort tidsperiod har det skett många förändringar för att minska miljöförstöringen. I detaljhandeln finns det numera miljömärkta alternativ till alla möjliga och omöjliga produkter, sen 1990 är det lag på att alla nya bilar skall vara utrustade med katalysator och den som vill få tag på klorblekt papper får leta väldigt länge. Kalifornien, som är känt för sina hårda miljölagar, är ett bra exempel på hur man, sedan 1960, genom hård reglering av utsläppen från trafiken på land lyckats vända en galopperande ökning och minska nivåerna av t.ex koloxid och kolväten med ca. 50 resp. 80 % !

På grund av de åtgärder som vidtagits inom den landbaserade transportindustrin har sjöfartens andel av utsläpp ökat. Omfattande mätningar och beräkningar gjorda av bl.a. Lloyd's Register pekar på att fartyg står för 10 - 20 % av den globala antropogena emissionen av kväveoxider,  $\text{NO}_x$ , medan de i regionala delar av världen som t.ex. Norge står för hela 40 - 50 % ! Det är också först på senare år som miljödebatten inom sjöfarten kommit igång på allvar och ganska snart förväntas det även där införas gränsvärden för vad som får släppas ut samt straffavgifter för fartyg som inte uppfyller kraven, både lokalt av hamn- och sjöfartsmyndigheter men även internationellt av bl.a FN-organet IMO. Närmast i tiden är att förmoda emissionsgränsvärden för färjetrafiken mellan östersjöländerna, i Kaliforniska hamnar och för fartyg som trafikerar områden med känslig omgivning som t.ex Alaska.

Praktiskt taget alla motordrivna fartyg drivs med dieselmotorer tack vare deras höga verkningsgrad, pålitlighet och höga tolerans för skiftande bränslekvalitet. I en jämförelse mellan utandningsluften från en människa och dieselavgaser kan föroreningarna som förekommer i dieselavgaserna faktiskt förefalla vara av marginell betydelse.



Om människan ifråga var en alkoholiserad kedjerökare skulle hennes utandningsluft förmodligen stämma bättre överrens med diagrammet för dieselavgaser.

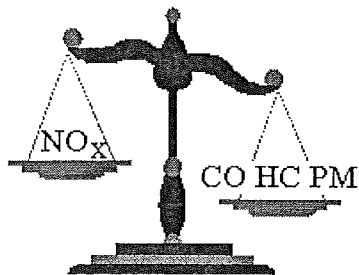
Problemet är de stora mängder avgaser som en motor producerar. En större marin diesel avger lika mycket avgaser per tidsenhet som utandningsluften från hundratusentals människor. Så även om innehållet i sig mest bara består av luft inser man lätt att dieselavgaser från fartyg ändå utgör ett stort miljöproblem. Liknelsen gör även en antydning om att det inte är helt trivialt att hitta och eliminera de få promillen av föroreningar som det är tal om. De i dieselavgaser förekommande föroreningar är:

- $\text{NO}_x$  , (*uttalas nåcks*). Kväveoxider bildas när luftens kvävemolekyler dissosieras i förbränningskammaren och därefter oxideras av laddluftens syre.
- $\text{SO}_x$ . Svaveloxider bildas av bränslesvavel på samma sätt som  $\text{NO}_x$ .
- CO. Koloxid bildas vid ofullständig förbränning.
- HC. Oförbrända kolväten, beror på ofullständig förbränning och dålig bränslekvalitet.
- PM (Particulate Matter). Sot bestående av kol, metalloxider och sulfater, beror också på ofullständig förbränning och dålig bränslekvalitet.

Direkt efter förbränningen består kväveoxiderna ungefär till 99 % av NO och 1 % av  $\text{NO}_2$  men när avgaserna kommer ut i det fria och kyls av omvandlas praktiskt taget all NO till  $\text{NO}_2$ .  $\text{NO}_2$  är irriterande på andningsorgan och starkt försurande för miljön. Att även de övriga ämnena är miljöförstörande, cancerframkallande och allmänt hälsovådliga framgår klart av bara deras namn.

$\text{SO}_x$ -halten i avgaserna beror som sagt på svavelhalten i bränslet och den enda praktiska lösningen idag till att minska  $\text{SO}_x$  -utsläppen är att använda bränsle med låg svavelhalt.

Dagens dieselmotorer är optimerade med avseende på bränsleförbrukningen och har därför en hög förbränning varvid det endast bildas låga halter av CO, HC och PM.  $\text{NO}_x$  däremot är, i vad som kallas *'The Diesel Dilemma'*, omvänt proportionellt till verkningsgraden vilket i princip gör det omöjligt att reducera alla oönskade ämnen utan någon form av efterbehandling av avgaserna.

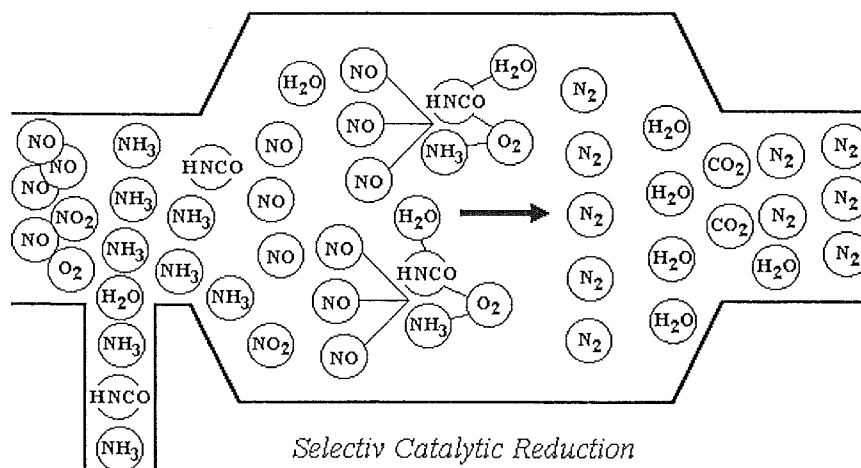


*The Diesel Dilemma*



Flera olika metoder för att reducera  $\text{NO}_x$ -halten under själva förbränningen har provats, bl.a. att spruta in vatten i förbränningskammaren för att p.s.s. sänka temperaturen och förhindra att  $\text{NO}_x$  bildas. Hitills har ingen sådan metod visat sig vara praktiskt genomförbar. På grund av den höga  $\text{O}_2$ -halten och låga  $\text{CO}$ -halten i dieselavgaserna fungerar inte heller den traditionella trestegskatalysatorn som finns på vanliga bilar i detta sammanhanget.

På ABB Fläkt Marine i Göteborg, som förutom avgasrening sysslar med luftkonditionering och brandrökevakueringsystem för fartyg, har man kringgått 'the Dilemma' med en teknik kallad SCR, Selectiv Catalytic Reduction. Tekniken som är utvecklad i Japan under 70-talet bygger på att ett ämne bestående av enatomigt kväve, vanligtvis ammoniak, injiceras in i avgaserna för att sedan reagerar i en reduceringskatalysator med kväveoxiderna så att kväve, vatten och koldioxid bildas.



Fläkt Marine har tillsammans med det Schweiziska företaget HUG Engineering utvecklat och anpassat tekniken till marina tillämpningar. T.ex. har ammoniak ersatts av det ofarliga och luklösa ämnet *urea* som används i allt från djurfoder, kosmetika och tuggummi till att av-isa landningsbanor på flygplatser.

Som framgår av bilden är inte bara en jämn blandning av urea och  $\text{NO}_x$  ytterst viktigt utan så är även en *rätt mängd* injicerad urea. I Fläkt Marine's system styrs ureans insprutningsmängden av motorns belastning via en tabell som implementeras i kontrollsystemet vid uppstartningen av katalysatorn. Därefter finjusteras injiceringen *manuellt* med ca 6 månaders intervall med hjälp av ett  $\text{NO}_x$ -mätinstrument. Denna lösning fungerar idag eftersom man endast har två installationer:

- Helsingborg - Helsingör färjan AURORA
- Sjöfartsverket isbrytar- och servicefartyg SCANDICA

Med kommande lagändringar runt knuten är ett scenario med t.ex 40 fartyg med 6 katalysatorer vardera inte otänkbara. Snabbt inser till och med en boxare, att den manuella finjusteringen då kommer att bli alldeles för tidsödande.

Syftet med mitt examensarbete är alltså att föreslå en reglerstrategi som hanterar denna justering automatiskt. Arbetet är av olika anledningar fokuserat till Aurora med den främsta anledningen är att den anläggningen har en mer representativ lösning av styrsystem än anläggningen på Scandica.

**Kapitel 1** behandlar anläggningens uppbyggnad. Beskrivningen är väldigt principiell men torde ändå vara tillräckligt ingående för att läsaren skall ha förstått problemets natur efteråt. Alla fakta och synpunkter som presenteras i kapitlet är baserat på vad av de anställda på Fläkt Marine's utvecklingsavdelning har berättat samt på rapporter och artiklar som de har skrivit.

**Kapitel 2** beskriver det  $\text{NO}_x$ -mätinstrument som använts under hela tiden. Det kan tyckas vara onödigt med ett kapitel om bara mätinstrumentet men det finns vissa förutsättningar och begränsningar med ett  $\text{NO}_x$ -mätinstrument som kan vara intressant att ta del av.

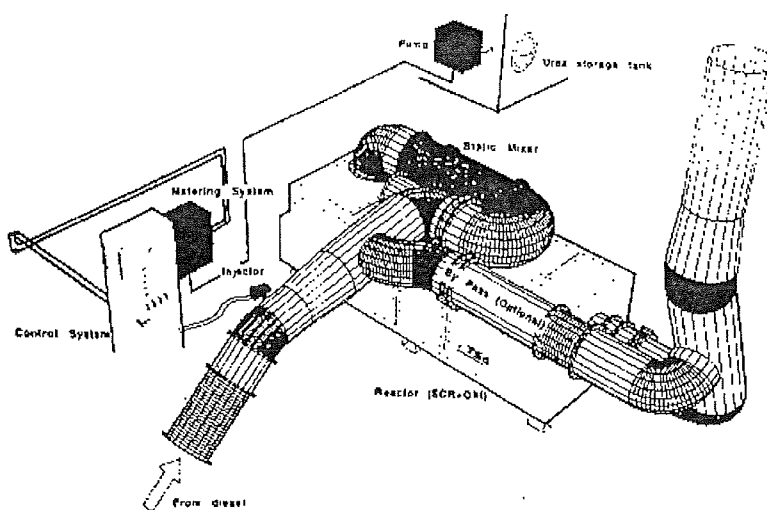
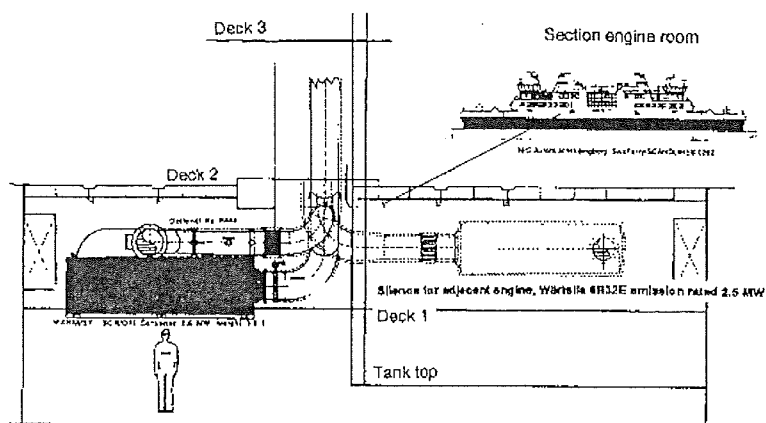
**Kapitel 3** innehåller en redovisning och allmän analysering av mätningarna som gjordes på Aurora.

**Kapitel 4** innehåller ett förslag på hur justeringen skall lösas. Lösningen är baserat på metoder från kurser som processidentifiering och tidserieanalys.

# 1 Katalysator och Styrsystem

## 1.1 Konstruktion

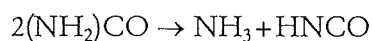
Reaktorns inre, dvs. själva det katalytiska materialet, består av värmeresistant keramik i form av tegelstensliknande block med ett ytlager av ett katalytiskt ämne av olika oxider av bl.a. vanadium beroende på vilken sorts bränsletyp som används och temperaturområde på avgaserna m.m. Kontaktytan mellan keramikblocken och avgaserna måste vara väldigt stor för att varje  $\text{NO}_x$ - och  $\text{NH}_3$ -molekyl skall reagera med varandra. Samtidigt måste den öppna arean genom reaktorn vara stor så att inte tryckfallet blir för stort och hindrar avgaserna att komma ut. Detta gör att om det inte finns tillräckligt med plats för en rätt dimensionerad katalysator kommer den totala  $\text{NO}_x$ -reduktionen att begränsas kraftigt. Både på Aurora och Scandica har man tack vare reaktorns ljuddämpande egenskaper kunnat ta bort de befintliga ljuddämparna och placera reaktorn på deras platser! Figurerna nedan visar en ritning på reaktorns placering i maskinrummet på Aurora samt en bild av anläggningen ur ett fågelperspektiv.



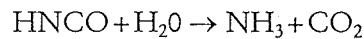
Inbyggd i reaktorn finns även en oxidationskatalysator för att eliminera HC och PM och eventuell överbliven ammoniak. Denna fungerar oberoende av ureainjeceringen. Urean är blandad i en 40%-ig vattenlösning som förvaras i tankar ombord. Den mängd förbrukad urea det är frågan om utgör i storleksordning 2- 4 % av det förbrukade bränslet.

## 1.2 Kemisk process och optimal injicering

När urean  $2(\text{NH}_2)\text{CO}$  vid injiceringen kommer i kontakt med de varma avgaserna, mellan 250 - 450 °C, omvandlas urean till ammoniak och cyanursyra enligt följande:

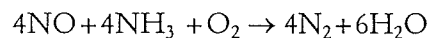


HNCO:n reagerar sedan med vattnet enligt:



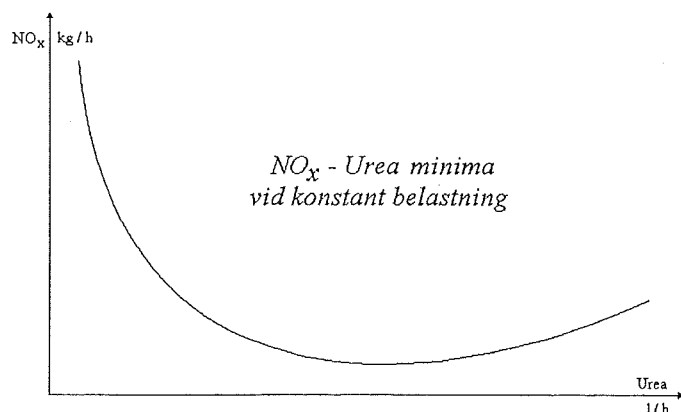
Kvar blir det två ammoniak- och en koldioxidmolekyl  $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ .

Koldioxiden deltar inte mer i processen utan försvinner ut genom skorstenen medan ammoniaken reagerar i katalysatorn med kväveoxiderna enligt :



Som synes så kan i teorin ett mol urea reducera ett mol kväveoxider. En för låg injicering av urea medför tydligt att onödigt mycket  $\text{NO}_x$  släpps igenom katalysatorn Även en för hög injicering av urea medför att reduktionen fungerar sämre och ger en onödigt hög  $\text{NO}_x$ -halt till följd, därför att *vid överinjicering bildas det överflödiga ammoniak som i efterföljande oxidationssteg omvandlas tillbaka till  $\text{NO}_x$* . Vid stor överinjicering kan en del av ammoniaken komma att följa med avgaserna ut i luften och det är definitivt inte bra. Keramikblockens porösa struktur gör dock att katalysatorn har en viss buffert så att den under transienta förlopp dvs. vid manövrering i hamnar o.dyl. kan absorbera överinjicerad urea och deponera den vid underinjicering. Detta fungerar bra under förutsättning att ureainjeceringen är korrekt under de stationära belastningsförhållanden.

*För varje stationärt belastningsfall finns det m.a.o. ett minimum av  $\text{NO}_x$  efter katalysatorn med avseende på injicerad mängd urea.*

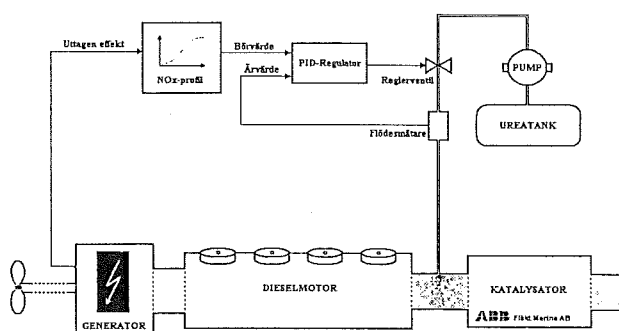


## 1.3 Styrsystemet

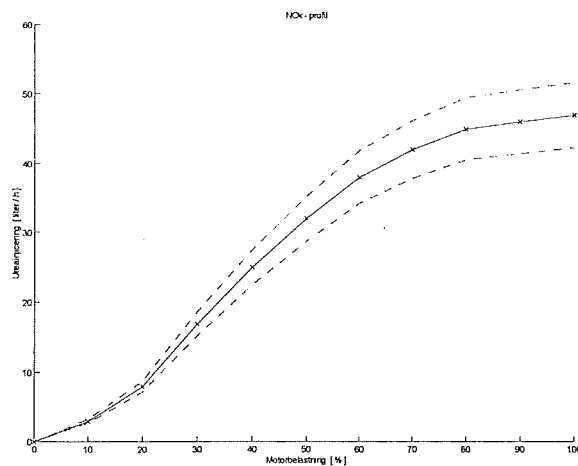
### 1.3.1 Börvärdesgenerering och manuell justering

Aurora drivs med fyra dieselelektriska motorer, Wärtsila Vasa 6R32E, varav en av dessa är utrustad med katalysator. Som dieselmotorns belastningssignal, här efter även kallad *lastsignal*, används den momentant uttagna effekten från generatoren.

*Principskiss av styrsystemet  
Aurora*



**Börvärde till ureaflödet** genereras från lastsignalen via en kurva bestående av en tabell av tio punkter med linjär interpolation mellan dessa punkter och som här efter refereras till som motorns *NO<sub>x</sub>-profil*. Ureaflödet mäts av en flödesmätare och regleras av en PID-regulator som styr en ventil för flödet in i avgasröret.

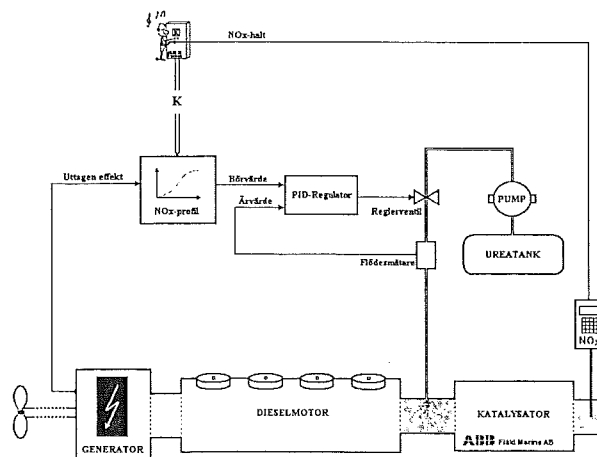


En justering av alla punkter i NO<sub>x</sub>-profilen är både omständigt och tidsödande därför att det då krävs att dieselmotorn har en konstant belastning under en längre tid för var och en av punkterna. För ett fartyg som t.ex går över Atlanten är detta i princip inget problem men för Aurora som går mellan Helsingborg och Helsingör inses lätt problematiken. Just därför görs injusteringen av varje punkt endast vid uppstart av anläggningen och efter varvsbesök eller liknande. Variationerna som gör att NO<sub>x</sub>-profilen måste justeras då och då orsakas av skiftande bränslekvalité, skiftande koncentration av urea i urea-vattenlösningen och slitage av katalysatorblocken m.m.

Finjusteringen för att kompensera för dessa variationer utförs ungefär en gång var sjätte månad och till detta används ett portabelt NO<sub>x</sub>-mätinstrument. Justeringen genomförs under själva överfarterna då belastningen ligger ganska konstant kring 70 % av maximal belastning och går till som följer:

*Genom att multiplicera alla tio punkter med en faktor, K, och variera denna tills man finner ett minima i förhållandet mellan urea och NO<sub>x</sub> erhåller man en samtidig justering av samtliga lastfall i NO<sub>x</sub>-profilen, se de streckade linjerna i figuren ovan.*

Manuell justering av NO<sub>x</sub>-profilen

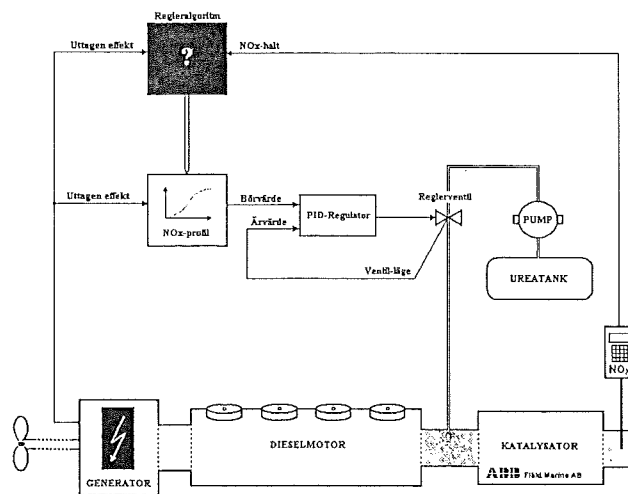


### 1.3.2 Problemformulering

Det primära syftet med mitt examensarbete består sammanfattningsvis i att ta fram ett förslag på en robust algoritm som vid lämpliga tidpunkter kan göra ändringar av K-faktorn, detektera ökning eller minskningar av  $\text{NO}_x$ -halten och p.s.s. söka sig ner till ett minimum av  $\text{NO}_x$ -utsläpp.

Till landbaserade anläggningar, som oftast används i kraftverk, finns det redan justeringsalgoritmer men de har väldigt höga krav på hur motorens belastning får variera under justeringarna. I det exempel som jag har sett så görs en justering endast om belastningen har varit konstant,  $\pm 3\%$ , under minst tio minuter. Det fungerar säkert bra för den typen av installationer men på ett fartyg är det dock inte rimligt att förvänta sig att belastningen skall vara så stabil så länge. Det är visserligen fullt möjligt att sänka villkoren och anpassa dem till marina installationer men det vore inte speciellt innovativt och den bästa lösningen vore då definitivt att använda samma utrustning som används på land eftersom den trots allt är beprövad och inte är kvar på experimentstadiet. Jag har därför valt att angripa problemet med avsikten att prestera en algoritm som tar belastningsvariationer i beaktning och kompenserar för dessa när justeringarna görs.

Tänkt styrsystem



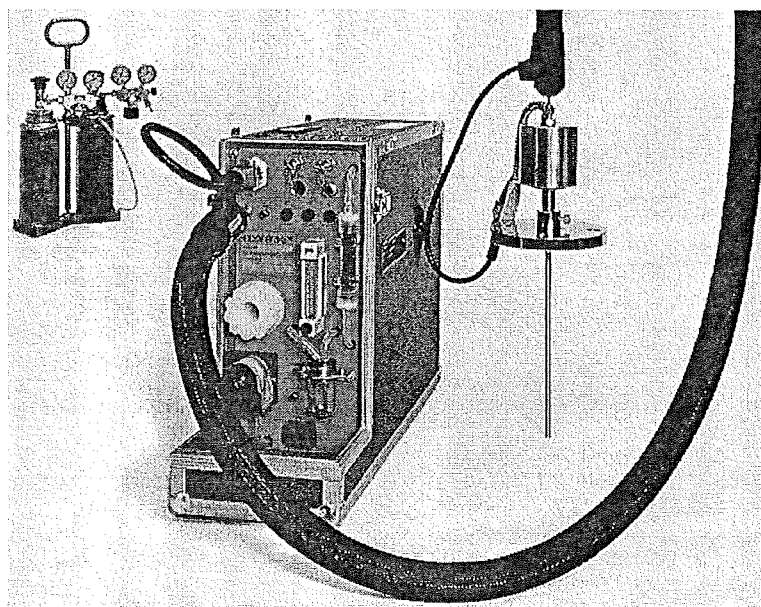
Angående börvärdesgenereringen till ureainjiceringen frågar sig kanske vän av ordning varför man väljer denna till synes märkliga lösning och inte helt enkelt placerar ett  $\text{NO}_x$ -mätinstrument innan katalysatorn och låter det generera ett börvärde?

Svaret får han i nästa kapitel...

## 2 NO<sub>x</sub>-mätinstrument

NO<sub>x</sub>-halten mäts inte direkt utan räknas ut som en viktad summa av upmätta NO- och NO<sub>2</sub>-halter enligt standardiserade formler. Den vanligaste typen av NO<sub>x</sub>-mätinstrument analyserar avgaser genom att en liten mängd av avgasen med en pump sugas in i instrumentet via en slang från en sond placerad i mätpunkten. Gasen värms, filteras och torkas för att sedan passera två olika elektrokemiska celler som avger spänningar proportionella till halten av NO respektive NO<sub>2</sub>. Dessa instrument är dyra och ömtåliga, har lång responstid och måste självkalibreras med korta intervall. Dessutom måste en serviceperson då och då byta de olika filterna och kalibrera instrumentet med kalibreringsgas.

Det instrument Fläkt Marine har och som jag använt under alla mätningar är av denna typ. Det heter ECOM SG-plus och är tillverkat i Tyskland, är ett universalinstrument och kan förutom NO och NO<sub>2</sub> mäta CO, O<sub>2</sub> och SO<sub>2</sub>.



Normalt sett har instrument av denna modell två olika sorters utgångar för mätsignalerna, en med analoga ut signaler 4-20 mA och en RS-232 seriell utgång. Efter en ur mätsynpunkt misslyckad utflykt till Scandica med efterföljande dryga felsökande visade det sig att just detta instrument hade själva kontakten men saknade drivkortet till den analoga utgången! Den enda person på avdelningen som kände till detta faktum var givetvis på semester. Avsaknandet av drivkort gjorde den seriella utgången till det självklara valet, vilket hade sina fördelar som t.ex att instrumentet kunde kopplas direkt till en dator utan att använda en logger som mellansteg. Datorn som användes under mätningarna var en bärbar Compaq.

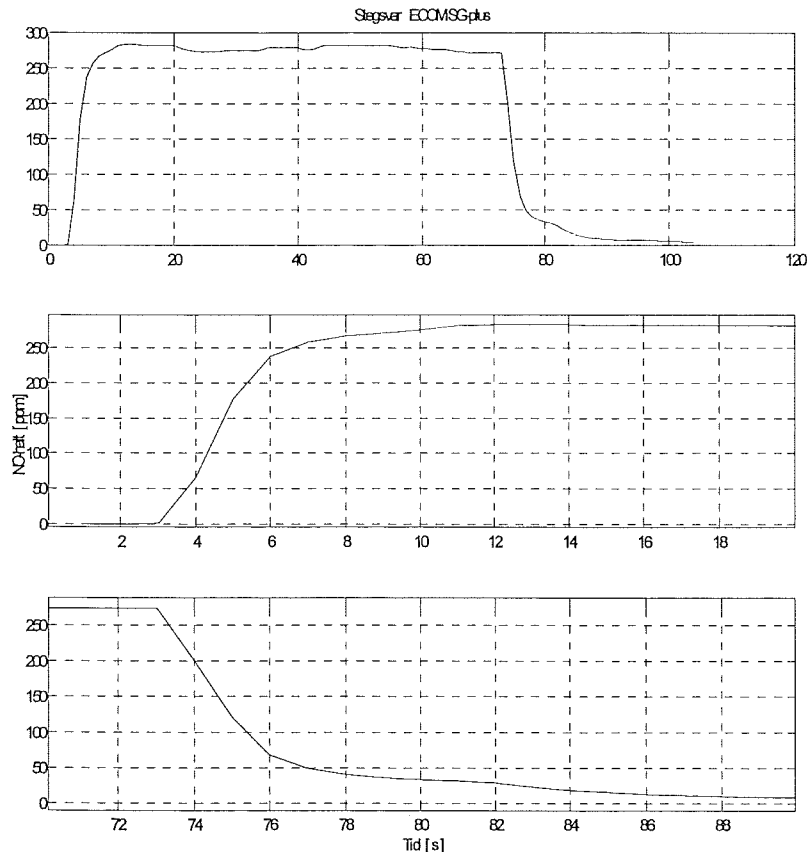
Återförsäljaren av instrumentet, PALGO i Malmö, hade vänligheten att förse mig med ett nytt terminalprogram till datorn speciellt avsett för ECOM SG-plus. Genom att ladda in datafilerna från terminalprogrammet i Excel och plocka bort alla semikolon kunde datan snabbt och lätt sparas i MATLAB-format.



Som följd av att den seriella utgången på instrumentet kopplas direkt till datorn erhålls mätvärdena för NO och NO<sub>2</sub> i ppm, avrundade till heltal. Den kortaste tiden mellan var dataöverföring som instrumentet kan sända via den seriella utgången är en sekund, alltså var det naturligt att i alla fall begynnelsevis välja samplingsfrekvensen till just en hertz inför mätutflykterna.

$$f_s = 1 \text{ Hz}$$

Enligt anställda på PALGO så rekommenderar tillverkaren att man väntar 200 s innan instrumentet läses av för att få ett korrekt mätvärde!?. Men dem och de personer på Fläkt Marine som använt instrumentet var alla av olika uppfattning om den saken. För att skapa mig en egen åsikt om dödtid och responstid samt för att bekanta mig med instrument och datorprogram gjorde jag tidigt ett par enkla mätningar på en bil utan katalysator, en Renault 5TS 88:a 13000 mil. För att försöka efterlikna stegsvar fördes mätsonden så snabbt som möjligt in i avgasröret och efter en stund ut ur röret, allt medan bilen gick på tomgång.



Som synes har instrumentet en tidsfördröjning på ca. tre sekunder och en stigtid på ca. 2-3 sekunder. En uppskattning enligt Ziegler-Nichols stegvarsmetod av instrumentet till ett första ordningens lågpasfilter med brytfrekvens 0.3 -0.5 Hz motiverar att 1 Hz är tillräckligt högt som samplingsfrekvens för att undvika vikningseffekter.

Det finns en annan typ av mätinstrument som mäter  $\text{NO}_x$ -halten med infrarött ljus. De består av en sändare och en mottagare som placeras på avgasröret så att ljustrålen lyser tvärs genom röret. Den stora fördelen med denna typ är att de behöver väldigt lite service. Nogrannheten är dock ca. 3 gånger sämre än ett instrument som ECOM SG-plus och eftersom instrumentet sitter fast på röret blir mobiliteten oehört låg. På ett fartyg med upp till kanske tio katalysatorer installerade och med ett pris på ett  $\text{NO}_x$ -mätinstrument, av godtycklig typ, som börjar kring 100 000 kronor är möjligheten kunna mäta på flera olika ställen med ett och samma instrument just en av de viktigaste aspekterna.

Priset är, inte helt oväntat, den största anledningen till att man inte låter ett  $\text{NO}_x$ -mätinstrument generera ett börvärde till kontrollsystemet utan istället använder motorns belastning så som beskrivits tidigare.

Ett annat förmodligen mer motiverat **motargument** är att  *$\text{NO}_x$ -mätinstrument mäter endast halten av  $\text{NO}_x$  och inte den totala mängden.* Det betyder att för att erhålla mängden  $\text{NO}_x$  som en motor släpper ut, typiskt i kg/h, behöver man i princip mäta  $\text{NO}_x$ -halten och luftflödet i avgasröret. Att mäta luftflöde är enligt utsago ingen trivial sak och sådana instrument har även de ett pris som börjar runt 100 000 kronor. Det tredje dräpande argumentet är instrumentets responstid. Som vi har sett är den i storleksordningen sekunder och det är helt enkelt inte tillräckligt snabbt vid snabba lastförändringar.

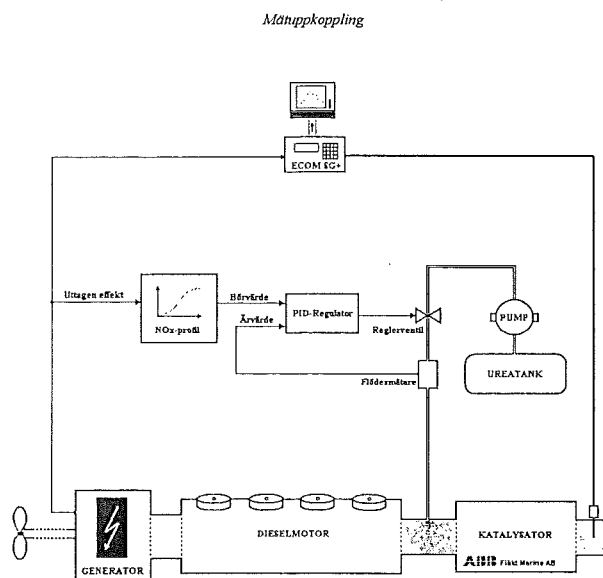
Fläkt Marine's största konkurrent på området, ett danskt företag, har faktiskt från att tidigare mätt  $\text{NO}_x$ -halten och reglerat ureaflödet därefter bytt strategi till samma som Fläkt Marine använder.

Eftersom all  $\text{NO}_x$  praktiskt taget består av NO alldeles efter motor och katalysator justeras  $\text{NO}_x$ -profilen idag bara efter NO-halten. Under de mätningar som jag själv gjorde på Aurora visade det sig också att  $\text{NO}_2$ -halten är noll hela tiden vid injicering av urea, även för stora avvikanden från  $\text{NO}_x$ -urea minimat eller stora lastvariationer, vilket gör att även om det i verkligheten uppmätta ämnet är NO kommer i fortsättningen av denna rapport  $\text{NO}_x$  att gälla som vedertagen beteckning.

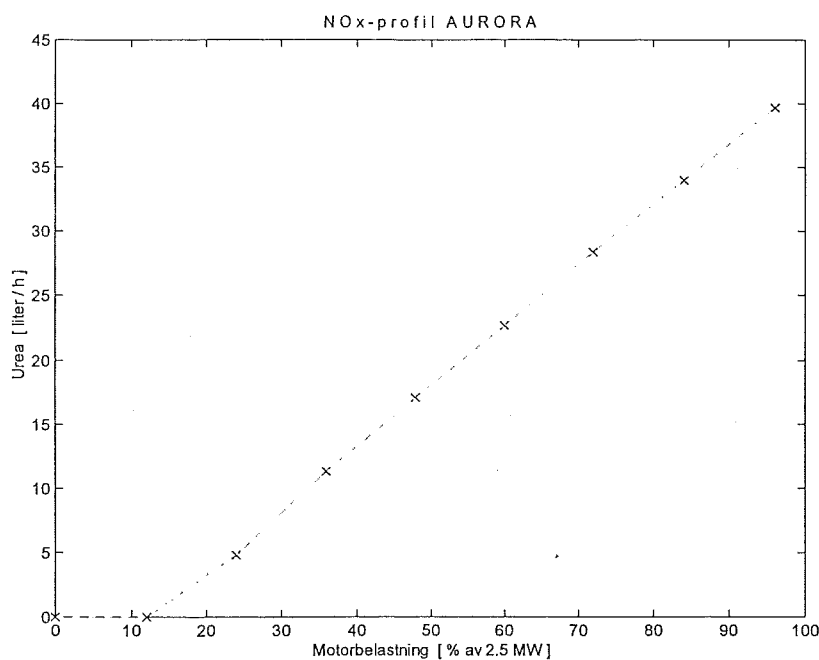
### 3 Insamling och analys av mätdata

#### 3.1 Genomförande av mätningar

Mätningarna på Aurora gjordes vid tre tillfällen, 3/7, 5/7 och 17/7 - 1996. En 'mätning' består av den loggade last- och NO<sub>x</sub>-signalen under ca 30 minuter, d.v.s. den tid det tar att komma från hamn till hamn. Mätresultaten från det första tillfället redovisas inte eftersom de blev totalt misslyckade. Den 5/7 gjordes 6 mätningar, 3 utan ureainjicering, 2 med ureainjiceringen och en där ureainjiceringen slogs av och på ett par gånger. Vid dessa mätningarna var NO<sub>x</sub>-profilens K-faktor hela tiden lika med ett,  $K = 1$ . Under det sista besöket på Aurora gjordes totalt åtta mätningar, alla där  $K$  varierades. *Mätningarna från de två sista tillfällena finns redovisade i Appendix A.*



En anledning till att många av mätningarna inte har varit användbara till någonting beror på de kläna möjligheterna att variera  $K$ -faktorn. Det finns ingen knapp eller ratt att göra justeringarna på utan det finns bara två tabeller som man kan programmera in en NO<sub>x</sub>-profil var i. Den NO<sub>x</sub>-profil som var aktiv vid mättidpunkterna ligger inlagd i en av tabellerna och har därför fått vara referens,  $K = 1$ , under mina mätningar.



För att så göra en ändring av K-faktorn får man alltså multiplicera värdena ur den aktiva tabellen med en tal som motsvarar en ökning eller minskning och mata in de i den andra tabellen. På kontrollpanelen finns det en brytare med vilken man sedan väljer vilken av tabellerna som skall vara aktiv NO<sub>x</sub>-profil.

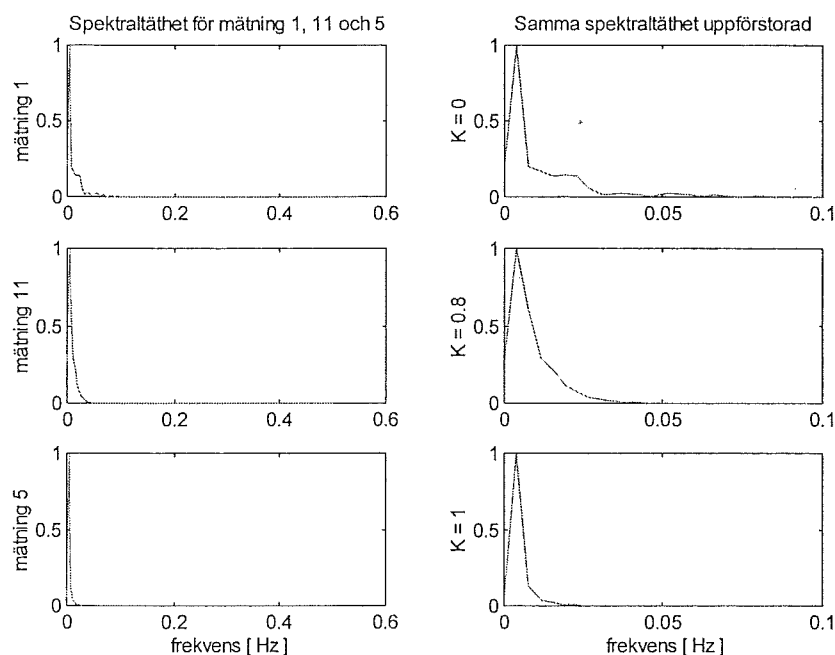
När jag åkte ner till Aurora för att göra mina mätningar gjorde jag dessutom det i tron att  $K = 1$  var optimal injicering och när man måste göra alla ändringar av K-faktorn enligt ovan blir därför följden lätt att alla stegen görs antingen till eller ifrån  $K = 1$ . Nu visade det sig dock senare att  $K = 1$  inte var optimalt utan ett klart fall av överdosering vilket alltså är den andra orsaken till att så få mätningar är användbara.

P.g.a. friktion i flödesmätarens mekanik kan flödesmätaren vid små flöden indikera att flödet är noll och det är en anledning till att börvärdet till injiceringen är satt till noll under ca. tolv procent belastning. Den andra anledningen är att för att de kemiska reaktionerna i katalysatorn skall inträffa krävs det att temperaturen på avgaserna är över ca. 280 °C vilket den inte är vid låga belastningar.

Detta har enligt Fläkt Marine försumbar inverkan på det totala utsläppet av NO<sub>x</sub> tack vare det låga luftflödet i avgasröret vid låga laster. Däremot inverkar det på NO<sub>x</sub>-halten och förklarar därför de annars oförklarliga topparna i graferna med NO<sub>x</sub> som dyker upp vid de tillfällen då lasten varit lägre än tolv procent, se t.ex mätning 9 vid ca. 1150 s.

## 3.2 Systemets dynamik

Genom att studera mätningarna 1, 11 och 5 i appendix A där  $K$  är 0, 0.8 resp. 1 ser man tydligt att det är inte bara halten av  $\text{NO}_x$  som förändras vid olika doseringar av urea utan även  $\text{NO}_x$ -haltens dynamik. När  $K$  är noll så syns tydligt likheten mellan last och  $\text{NO}_x$ , vilket det gör även för  $K=0.8$  men inte för  $K=1$ . Tittar man dessutom på mätning 8,  $K=1.1$ , ser man att då  $\text{NO}_x$ -halten ökar pga. överdosering, dvs. man befinner sig till höger om  $\text{NO}_x$ -urea minimat får  $\text{NO}_x$ -signalen en ännu långsammare dynamik. Diagrammen nedan med de skattade frekvensspektra visar också att lägre ureadosering desto mer högfrekvent innehåll får  $\text{NO}_x$ -signalen.

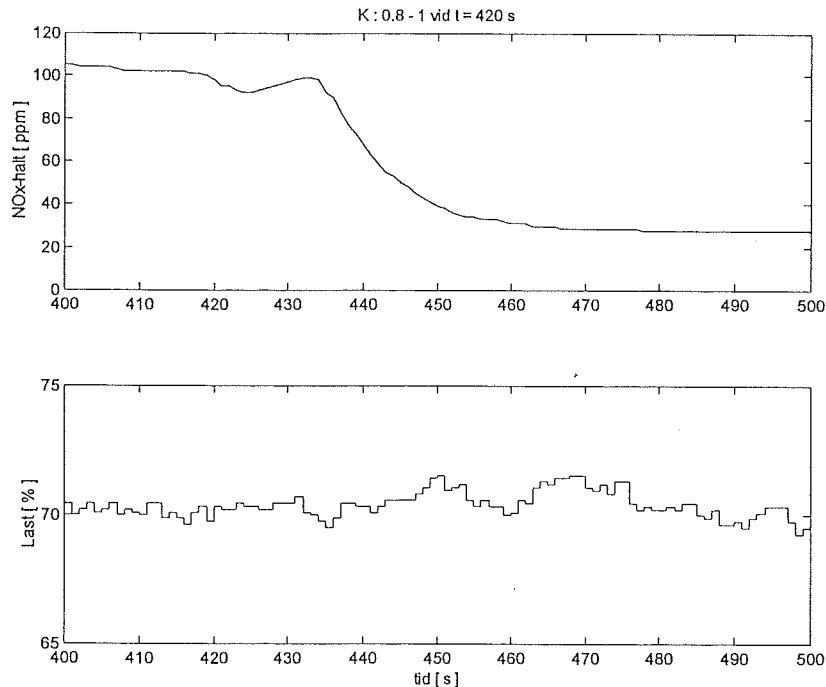


Tydligt är att en sampeltakt på 1 Hz är väldigt högt och bör reduceras. En avgörande faktor vid val av lägre samplingstakt är hur snabbt systemet reagerar på en ändring av  $K$ . Det finns tre faktorer som kan inverka på hela systemets tidsfördröjning vid en börvärdesändring av ureadoseringen.

- Tiden det tar för avgasen att gå från insprutningspunkt till mätpunkt samt den tid det tar för instrumentet att analysera gasen.
- tidsfördröjningar och responstider i styrsystemet.
- katalysatorblockens förmåga att ackumulera överdoserad urea och deponera den vid underdosering.

Dödtiden i instrumentet vet vi är ca. 3 s och för gasen att gå ovannämnda bit är uppskattningsvis som mest 2 s. Totalt alltså högst fem sekunder.

I figuren nedan som är från mätning 12 där det uppenbart är frågan om underdosering är det rimligt att anta hela tidsfördröjningen förutom de fem sekunderna till största del beror på regleringen av ureaflödet.

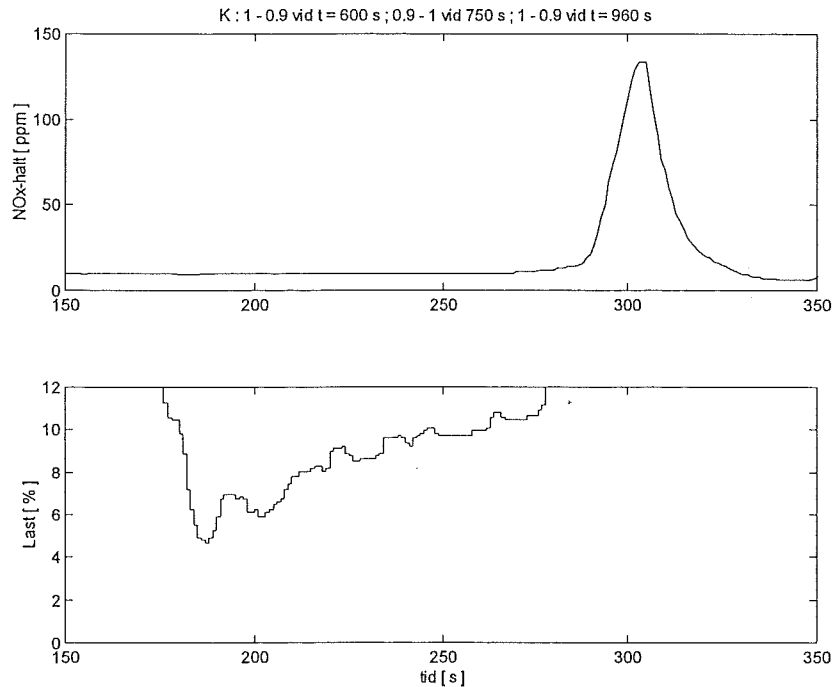


Förloppet har i storleksordning tio sekunders tidsfördröjning och en responstid kring femton sekunder. Frågan är hur mycket de är orsakade av regulatorn och reglerventilen till ureaflödet. Min uppfattning är att de har stor inverkan eftersom regleringen går väldigt långsamt och det tar efter vad jag observerat säkert ett par minuter innan ärvärde är lika med börvärde om motorns belastning under den tiden varit konstant. Enligt de anställda på avdelningen som är insatta i anläggningen på Aurora är det mycket riktigt reglerventilen som på grund av sin långsamsamhet är den stora boven i dramat.

Att ventilen är väldigt långsam till att följa börvärdet förklarar varför  $\text{NO}_x$ -halten i mätning 11 får en kraftig översläng vid det första lastpådraget och inte vid det andra. Ventilen har inte hunnit stänga efter det att lasten gått ner efter det första lastpådraget och därför är injiceringen mycket för hög när det andra lastpådraget kommer. Eftersom katalysatorn då är full av överinjicerad urea blir det heller ingen översläng.

Motsatt sak sker i mätning 14. Första toppen i  $\text{NO}_x$ -halten beror på att lasten varit lägre än tolv procent, d.v.s. börvärdet till ureainjiceringen varit noll, så pass länge att reglerventilen hunnit justera även ärvärdet till noll. Katalysatorns buffert är därför i princip tom när lastpådraget kommer och mycket riktigt blir följden av lastpådraget en kraftig översläng i  $\text{NO}_x$ -halten. *Jämför det med mätning 5* där det troligen finns överinjicerad urea i katalysatorn när lastpådraget kommer.

En detalj som styrker det ovan sagde och som kan vara intressant att se är den första toppen i  $\text{NO}_x$ -halten i mätning 14 nedan.



Toppen kommer *efter* det att lastsignalen är tillbaka över tolvprocentsgränsen d.v.s. börvärdet blir större än noll,  $t = 280$  s. Det beror antagligen på att ärvärdet inte blir större än noll förrän senare, gissningsvis vid  $t = 300$  s då  $\text{NO}_x$ -halten når maximum. En skillnad på tjugo sekunder! Att det dröjer en stund från det att börvärdet blir noll,  $t = 175$  s, tills att toppen kommer,  $t = 290$  s, beror troligen på en kombination av att ärvärdet blir noll långt senare än börvärdet och katalysatorns buffertkapacitet.

*För att klara av att reducera  $\text{NO}_x$ -halten vid transienta förlopp så måste det, på grund av den slöa regleringen av ureainjiceringen, ske en överdosering innan själva de transienta förloppen. Med en snabbare flödesreglering, d.v.s. kortare död- och responstider, skulle nämnda överslängar förmodligen kunna undvikas helt eller i alla fall dämpas ordentligt. En snabbare reglering hade med all sannolikhet också underlättat vid justering av  $\text{NO}_x$ -profilen, inte bara när man vill minimera utsläppen utan kanske framför allt vid avsiktlig underdosering.*

Syftet med katalysatorn vid avsiktlig underdosering är att ligga vid ett bestämt emissionsgränsvärde som är högre än vad katalysatorn optimalt klarar, vilket kostnadsmedvetna redare givetvis kommer att vilja göra för att spara urea.

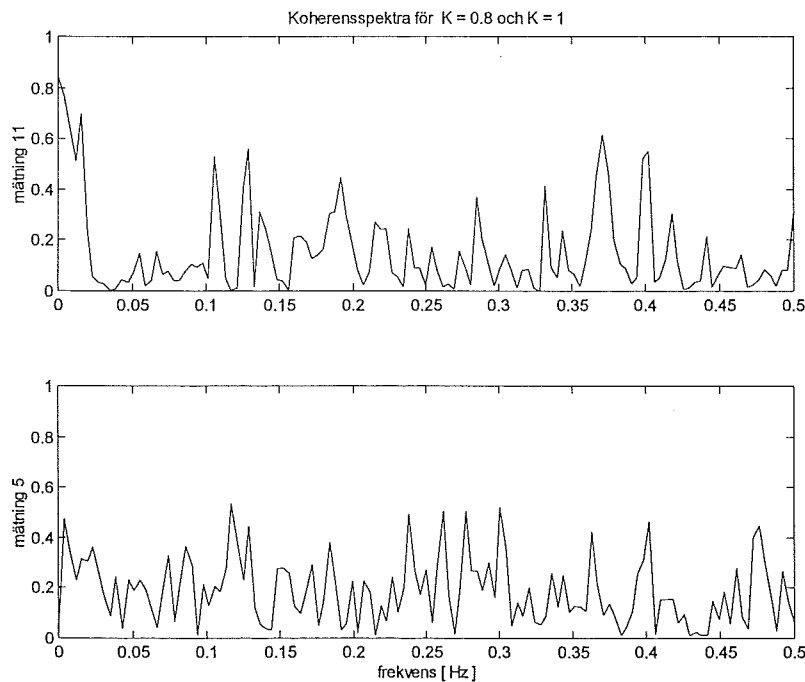
### 3.3 Filtrering och omsampling

Med tidigare frekvensanalys och resonemang om tidskonstanter dras slutsatsen, vad anläggningen på Aurora beträffar, att med justering av  $\text{NO}_x$ -profilen som syfte är en sampeltid på tio sekunder ett rimligt val.

Som alltid när det förekommer tidsdiskreta signaler är det en god idé att förfiltrera sina mätsignaler för att undvika vinkningseffekter, d.v.s. att höga frekvenser dyker upp som låga p.g.a. för låg samplingstakt. Vid en implementering av en justeringsalgoritm bör man förslagsvis därför låta signalerna samplas så fort som möjligt, filtreras i ett digitalt lågpasfilter och sedan omsamlas med en lagom samplingsfrekvens.

Högsta samplingfrekvensen bestämdes som bekant av  $\text{NO}_x$ -mätinstrumentet till 1 Hz. För den fortsatta analysen av mätningarna har jag valt att först filtrera alla mätningarna med ett första ordningens Butterworth lågpasfilter med brytfrekvensen 0.03 Hz och sedan sampla om dem med 0.1 Hz.

Läsaren har vid det här laget förhoppningsvis insett att ett optimalt  $K$  ligger någonstans mellan 0.8 och 1.0. Om vi, i brist på bevis, antar att dynamiken hos  $\text{NO}_x$ -halten vid ett optimalt  $K$  är något mellanting av vad den är för  $K = 0.8$  resp.  $K = 1.0$  så kan valet av brytfrekvensen motiveras med följande koherensspektra.

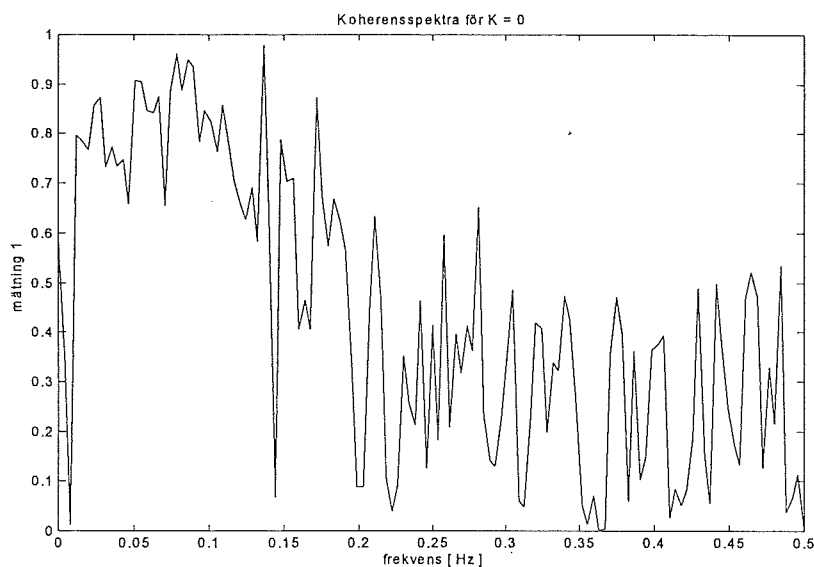


Koherensspektrum är ett mått på hur mycket av utsignalens energi som är orsakad av insignalens energi för varje frekvens där närmare 1 spektrat är desto större är kopplingen mellan in- och utsignal.



Med tanke på att en justeringsalgoritm är tänkt att ta hänsyn till variationer i lasten så är det bra att filtrera bort högre frekvenser där det inte finns något beroende. I fallet  $K = 0.8$  skulle det betyda frekvenser från ca. 0.03 Hz och högre. För  $K = 1$  ser det bedrövligt ut över hela frekvensområdet och orsaken till det är troligen överdoseringen.

*En snabbare reglering av ureaflödet hade förmodligen gett en bättre koherens i alla fall vid underdosering och därför medfört bättre förutsättningar för kompensering av lastvariationer. Jämförelse med koherensspektrat för mätning 1 där ingen urea injiceras talar sitt tydliga språk.*



Brytfrekvensen 0.03 Hz är dessutom tillräckligt hög för att inte nämnvärt påverka förloppen orsakade av en ändring av K-faktorn.

- - -

Om det finns överdoserad urea i katalysatorn kommer det att förlänga responstiden vid en ändring av K-faktorn. Hur länge beror givetvis på mängden av överdoserad urea. Längre man behöver vänta för att avgöra om  $\text{NO}_x$ -halten stiger eller sjunker till följd av ändringen desto större risk är det att det sker större variationer i belastningen som förstör avläsningen. Därför kommer jag att i nästa kapitel föreslå en justeringsalgoritm som undviker att det finns överdoserad urea i katalysatorn.

## 4 Fortsatt analys med förslag på lösningar

Vare sig Fläkt Marine får användning för vad jag föreslår eller ej så är syftet med arbetet inte att föreslå en reglerstrategi specifik för Aurora. Justeringen av ureainjiceringen för det fartyget kommer förmodligen aldrig att automatiseras utan tanken är att förslaget skall tillämpas på nya anläggningar. Det är därför av allmänt intresse att undvika detaljer i anläggningen på Aurora, if-satser och MacGuyver-lösningar. En detalj med Aurora som dock är väldigt intressant och får betraktas som ett svårare fall än ett fartyg i allmänhet är den korta tid som belastningen på Auroras motorer ligger kring ett jämviktsläge vilket sker under själva överfarterna. Det finns ett problem som säkert inses lätt och det är givetvis problemet med att generalisera en lösning utgående från resultat från endast en anläggning, ett mätinstrument och två dagars mätningar. Ingen onödig skugga får heller falla över MacGuyver, att kunna tillverka handgranater av kottar och kåda tyder trots allt på en viss ingenjörsmässig genialitet.

### 4.1 Strukturering av problemet

Lösningen, eller problemet, det är vilket man vill, personligen föredrar jag lösningen, kan delas upp i tre moment.

- Det behövs till att börja med en strategi för *hur* man skall göra justeringarna för att söka sig ned till ett minima i  $\text{NO}_x$ -ureaförhållandet. Av anledningar som redan nämnts och som kommer att upprepas så är standardprocedurer för minimalsökning inte direkt lämpade.
- För det andra behövs det också en algoritm som kan detektera *om* en ändring i  $\text{NO}_x$ -halten är orsakad av ändringar av K-faktorn eller variationer i motorns belastning.
- Slutligen är en kontrollrutin som kan tala om *när* det är lämpligt att göra justeringar nödvändig. Här är vi inne på detaljplanet, i fallet Aurora är det givetvis lämpligast att göra justeringarna under överfarterna med för t.ex. Scandica skulle man kanske kunna tänka sig att övervaka spakläget, dvs. gasreglaget som finns bryggan, och justera så länge det är oförändrat.

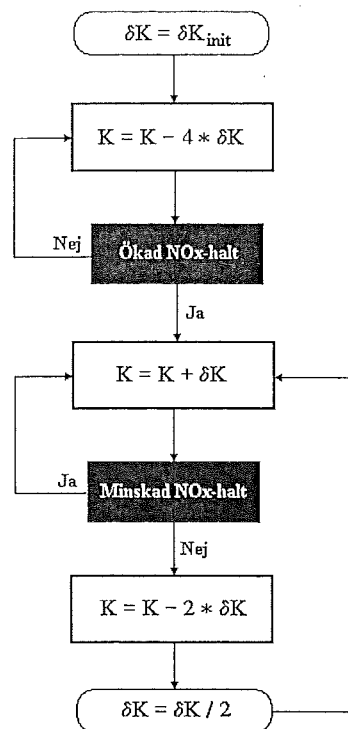
De två översta punkterna är indelade i kapitel 4.1 och 4.2. Saker som omfattas av den tredje punkten finns med som reflektioner i dessa kapitel där det är relevant.

## 4.2 Optimalsökande algoritm

Som vi sett tidigare så blir responstiderna vid en stegändring av ureadoseringen betydligt längre om det finns ackumulerad urea i reaktorn än om det inte finns det. Det gör att avläsningen av  $\text{NO}_x$ -halten efter en ändring av K-faktorn för jämförelse tar onödigt lång tid vilket är en stor nackdel eftersom risken att belastningen ändras kraftigt ökar för var sekund som går.

En naturlig lösning, tycker jag, vore en algoritm där första steget blir att förvissa sig om att man befinner sig till vänster om minimat, dvs. att underdosering sker. Detta görs genom att minska K-faktorn tills  $\text{NO}_x$ -halten stiger tydligt. Därefter ökas K-faktorn igen i t.ex. en fjärdedel så stora steg som den inledande minskningen tills det inte detekteras någon minskning av  $\text{NO}_x$ -halten. Då minskas K-faktorn med två steg, steglängden halveras och K-faktorn ökas åter tills det inte detekteras någon minskning av  $\text{NO}_x$ -halten, o.s.v.

Ibland säger en bild mer än tusen ord.

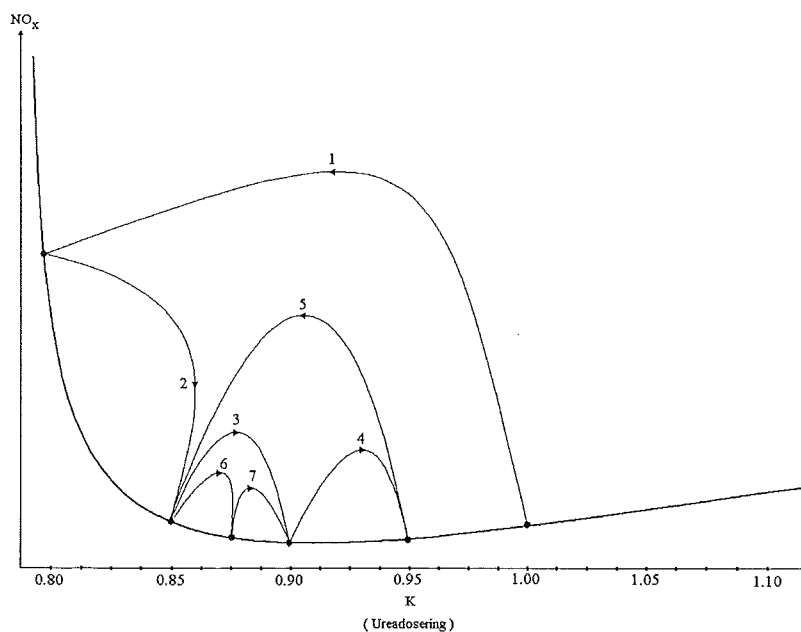


Den undre loopen kan brytas av

- ett i förhand bestämt minsta värde på  $\delta K$  eller
- ett minsta värde på den detekterade minskningen i  $\text{NO}_x$ -halten eller
- när , vid en ändring av K-faktorn,  $K = K_0 + \delta K_\beta$  eller  $K = (K_0 + \delta K_\beta) + \delta K_\alpha$ , det inte detekteras någon minskning av  $\text{NO}_x$ -halten men när det har detekterats en minskning vid en tidigare ändring av K-faktorn i samma intervall  $K = K_0 + \delta K_\alpha$  där  $\delta K_\alpha = 2 \cdot \delta K_\beta$ .

En kombination av alla tre punkter, där loopen bryts av det som först inträffar, är förmodligen vad som bör tillämpas. Det är t.ex. viktigt att steglängden aldrig blir för liten för att detekteringsalgoritmen skall kunna detektera skillnader för då skulle i princip  $K = 0$  kunna uppfattas som optimalt.

Den sista punkten kräver nog ett förtydligande. Ett tänkt förlopp illustreras i figuren nedan där  $K = 1$  och  $\delta K = 0.05$  initialt.



Steg 7 är ett steg där det inte går att detektera en minskning av  $\text{NO}_x$ -halten, vilket i detta fallet skulle motsvara  $K = (K_0 + \delta K_\beta) + \delta K_\beta$  där  $K_0 = 0.85$  och  $\delta K_\beta = 0.025$ .

Steg 3 blir då motsvarande  $K = K_0 + \delta K_\alpha$ . Således bryts loopen och  $K_{\text{slutligt}}$  kan väljas till antingen  $K_0$ ,  $K_0 + \delta K_\beta$  eller  $K_0 + \delta K_\alpha$  beroende på vilket humör man är på.

I verkligheten vore det förmodligen steg 3 som hade blivit det steg för vilket det inte gick att detektera en minskning med det spelar ingen roll eftersom det är principen som är viktig.

Det kan tyckas bli onödigt många iterationer med denna strategi där optimalsökningen sker från en sida men fördelen med kortare responstid är redan påpekad och en annan fördel är att eventuella utsläpp av ammoniak till följd av överdosering undviks så mycket som möjligt.

Att steget tillbaka,  $K = K - 2 \cdot \delta K$ , efter det att ingen minskning av  $\text{NO}_x$  har detekteras är dubbelt så stort ett steg framåt,  $K = K + \delta K$ , gör att *K-faktorn alltid konvergerar mot ett tal mindre eller lika med optimala K*,

$$K_{\text{slutligt}} \leq K_{\text{optimal}}$$

Hur nära beror givetvis på hur bra detekteringsalgoritmen är.

## 4.3 Detekteringsalgoritmen

### 4.3.1 Grundidé

Del två av problemet är alltså frågan om hur man skall avgöra om en ändring av  $\text{NO}_x$ -halten beror av en ändring av K-faktorn eller är orsakad av variationer i belastningen eller bara är en naturlig variation. I mätning 12 där K ändras från 0.8 till 1.0 är det uppenbart vad som är orsaken till förändringen men se t.ex mätning 10 och 14, där är det omöjligt att genom att bara jämföra ett värde före och efter en ändring av K-faktorn att avgöra vad som är orsakat av denna. Det antyder, förutom att  $\text{NO}_x$ -urea-minimat är ganska flackt, att *det kanske behövs en annan metod än att bara jämföra  $\text{NO}_x$ -halten före och efter för att detektera ändringar orsakade av K-faktorn i området kring  $\text{NO}_x$ -ureaminimat*.

Vad jag hade tänkt mig som lösning är en användning av en matematisk modell som beskriver förhållandet mellan last och  $\text{NO}_x$ . Samtidigt som man ändrar K-faktorn så m.h.a. sin modell predikterar dvs. man gör en kvalificerad gissning av  $\text{NO}_x$ -halten för en senare tidpunkt för att sedan jämföra det predikterade värdet med det verkliga och därur dra slutsatser om inverkningarna av K-faktorns ändring. Matematiskt modellbygge och prediktion är allmänt vedertagen metodik som används inom bl.a. reglerteknik, telekommunikation och medicinsk mätteknik.

För enkelhetens skull införs beteckningarna  $y$  för  $\text{NO}_x$ -signalen och  $u$  för lastsignalen

$$y = \text{NO}_x \text{ [ppm]}$$

$$u = \text{Last [\%]}$$

och idén kan beskrivas så här:

Vd tidpunkten  $t = t_c - k$  görs en ändring av K-faktorn. Vi förväntar oss därför vid en senare tidpunkt  $t = t_c$  att det har skett en förändring av  $\text{NO}_x$ -halten. Vid tidpunkten  $t_c$  görs prediktionen av  $y(t_c)$  baserat på  $\text{NO}_x$ -data fram t.o.m tidpunkten  $t_c - k$  och last-data t.o.m.  $t_c$  dvs.

$$y_p(t_c) = f\{y(t_c - k), y(t_c - k - 1), \dots, u(t_c), u(t_c - 1), \dots\}$$

Det är ingen prediktion i vanlig bemärkelse eftersom prediktionen görs först vid  $t = t_c$  utan snarare en rekonstruktion av vad  $\text{NO}_x$ -halten skulle ha varit vid just tiden  $t_c$  om inte en ändring av K-faktorn gjorts.

Skillnaden mellan det verkliga värdet och det predikterade är alltså orsakat av ändringen av K-faktorn. Om

$$\delta(t) = y_p(t) - y(t) > 0$$

så betyder det att ändringen av K-faktorn var ett steg i rätt riktning mot  $\text{NO}_x$ -ureaminimat.

Modeller är just bara modeller och följaktligen är en prediktion alltid behäftad med fel. Därför måste självfallet ett gränsvärde införas som skillnaden mellan predikterat och verkligt värde måste vara större än för att accepteras som en signifikant skillnad. En tänkbar sådan gräns är prediktionsfelets skattade standardavvikelse multiplicerat med ett tal som eventuellt kan vara beroende av prediktionslängden. M.a.o, skillnaden skulle i så fall kunna betecknas som signifikant om

$$|\delta(t)| > n \cdot S(t-k)$$

$$\text{där } n = f(k) \text{ och}$$

$$S(t) = f\{\delta(t), \delta(t-1), \dots\}$$

Som konstaterats tidigare så förändras systemets dynamik betydligt med ureadoseringen. I efterhand kan det också konstateras att det hade varit bra att gjort ett par mätningar med  $K = 0.8$  och  $K = 0.9$  men som situationen är får man göra samma antagande som tidigare att systemets dynamik vid optimal ureadosering är ett mellanting av dynamiken vid  $K = 0.8$  och  $K = 1$ . Går det att finna en gemensam modellstruktur som beskriver dynamiken vid  $K = 0.8$  och  $K = 1$  tillfredställande skulle den troligen stämma bra också kring optimalt  $K$ .

Eftersom underlaget för att ta fram en modellstruktur för  $K = 0.8$  är i magraste laget, bara mätning 11, börjar vi med  $K = 0$  och sedan  $K = 1$  eftersom det i de fallen finns tillräckligt med identifierings- och valideringsdata.

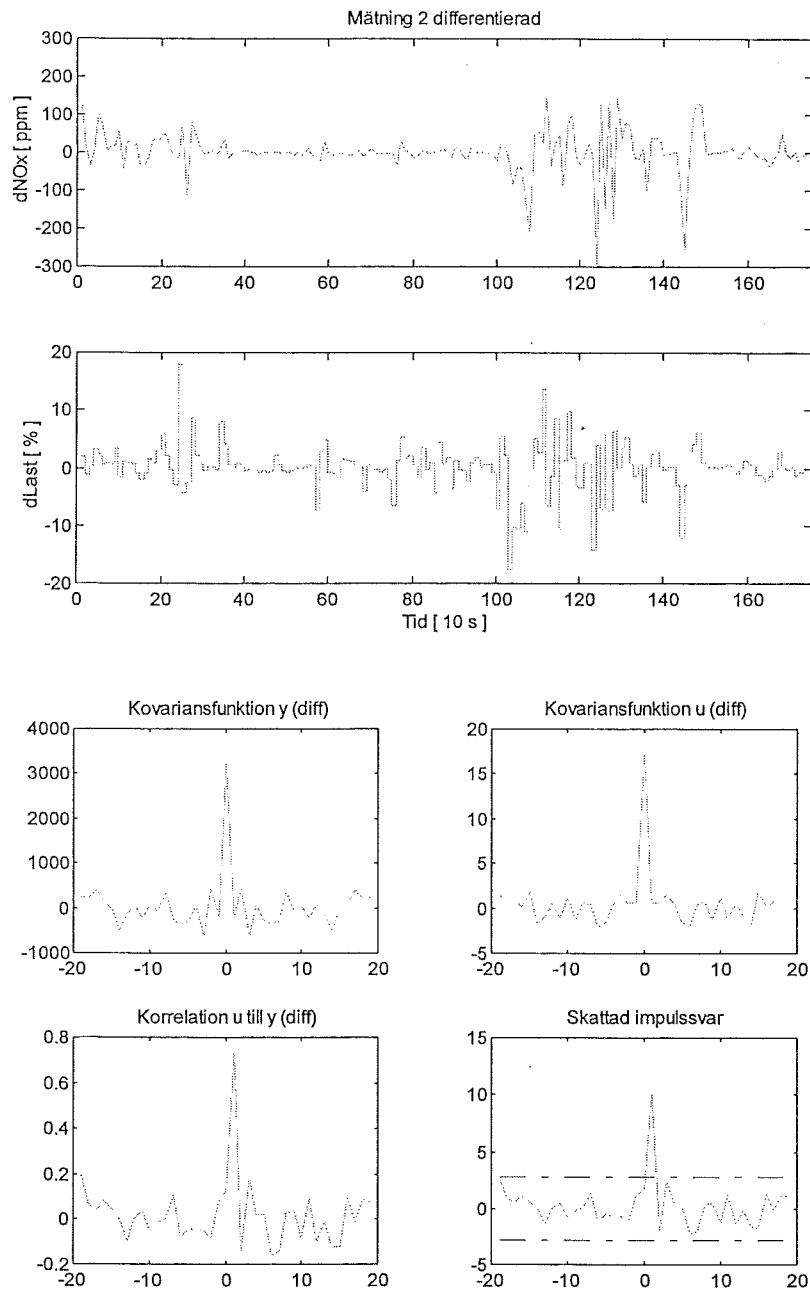
I fortsättningen är alla analyser gjorda med lågpasfiltrerade och omsamlade mätningar enligt tidigare kapitel. Vidare hade det syntts tydligt vid en direkt korrelationsanalys att närliggande värden ur mätserierna är starkt korrelerade. Ett sådant beroende ger upphov till en försämrad förmåga att prediktera något eller några steg framåt och en vanlig åtgärd mot detta är att differentiera mätserierna, d.v.s. att bilda

$$\nabla y(t) = y(t) - y(t-1) \text{ och } \nabla u(t) = u(t) - u(t-1)$$

och använda  $\nabla y(t)$  och  $\nabla u(t)$  för modellering. Denna åtgärd har därför vidtagits för kommande analyser av mätserierna.

### 4.3.2 Processidentifiering utan injicering

Nedan finns mätning 2 differentierad med tillhörande korrelationsanalys.

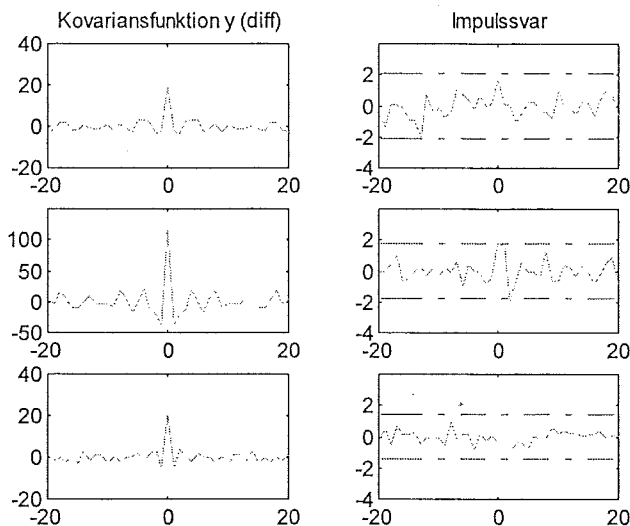


$\nabla y$  ser okorrelerat ut och impuls svaret antyder att det råder ett statistiskt förhållande mellan  $\nabla u$  och  $\nabla y$  med en tidsförskjutning på ett sampel. En korrekt modellstruktur skulle därför kunna vara:

$$\nabla y(t) = b \cdot \nabla u(t-1) + e(t)$$

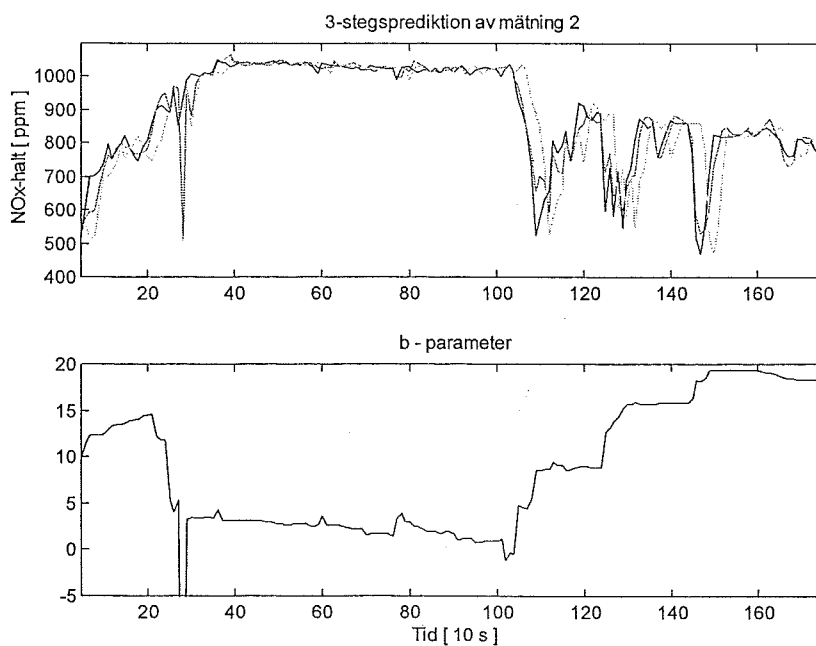
där  $e(t)$  är vitt brus med medelvärdet noll och  $b$  en parameter som förmodligen varierar betydligt beroende på belastningsområde.

Det intressanta intervallet är själva överfarten där belastningen bara varierar inom ett begränsat område. Följande figur visar kovariansfunktionen för  $\nabla y$  och skattat impuls svar av överfarterna för mätning 1, 2 och 3, intervallen 300 - 800 s, 400-1000 s resp. 300 - 850 s.



Till vår besvikelse så finns det som synes inget beroende mellan mellan  $\nabla u$  och  $\nabla y$  under överfarterna. En passande modellstruktur skulle därför lika gärna kunna vara  $\nabla y(t) = e(t)$  och den bästa prediktionen av  $\text{NO}_x$ -halten därmed gamla det värdet, d.v.s  $y_p(t) = y(t - k)$ . Möjligheterna att kompensera för lastvariationer försvinner då och frågan är vilket som blir bäst i praktiken.

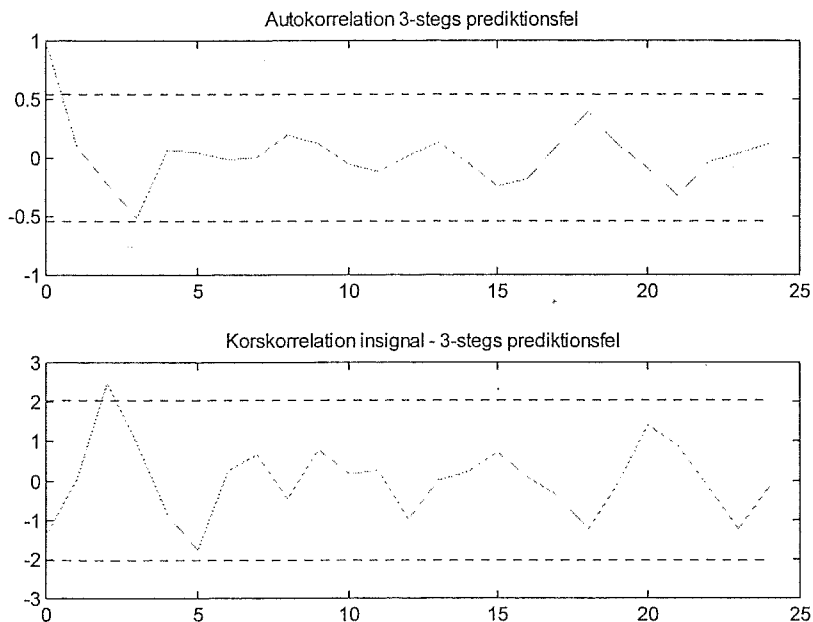
Nedanstående figur visar  $\text{NO}_x$ -halten från mätning 2 med två stycken 3-stepsprediktioner, d.v.s 30 sekunders prediktion. Svart kurva är den verkliga signalen, ljusgrå kurva är prediktion med gammalt värdet och mörkgrå kurva prediktion med  $\nabla y(t) = b \cdot \nabla u(t-1) + e(t)$  som modellförmodan.



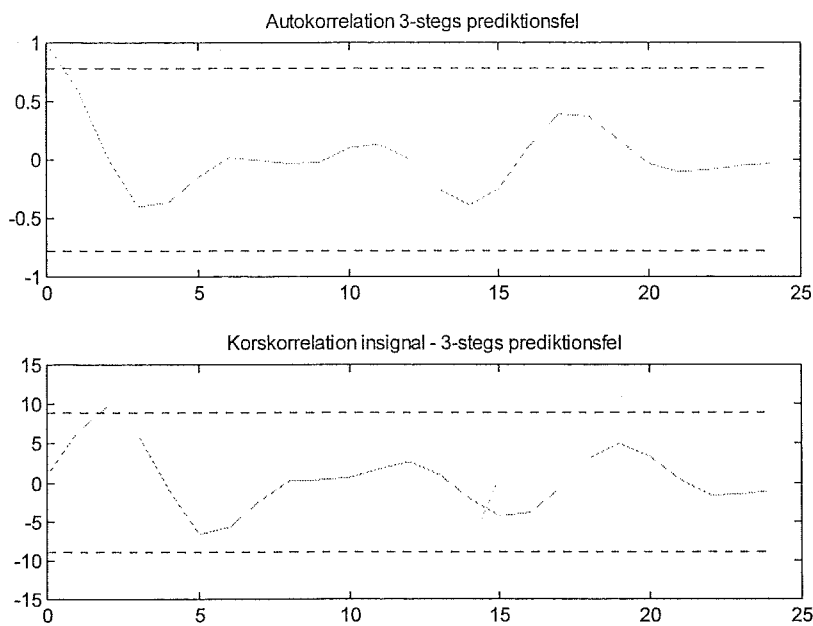


Skattningen av  $b$  är gjord med rekursiv MK-skattning med en glömskefaktor motsvarande ca. 2 min. och med återställning av kovariansmatrisen vid de tillfällen belastningen passerar 50 %.

En korrelationstest av prediktionsfelet  $\delta(t) = y_p(t) - y(t)$ , för den ovan antagna modellen, i intervallet 40 - 100 från figuren ovan visar att prediktionsfelet är förenligt med hypotesen om vitt brus.



Samma sak gäller för samma mätning och modell i intervallet 120 - 170 !



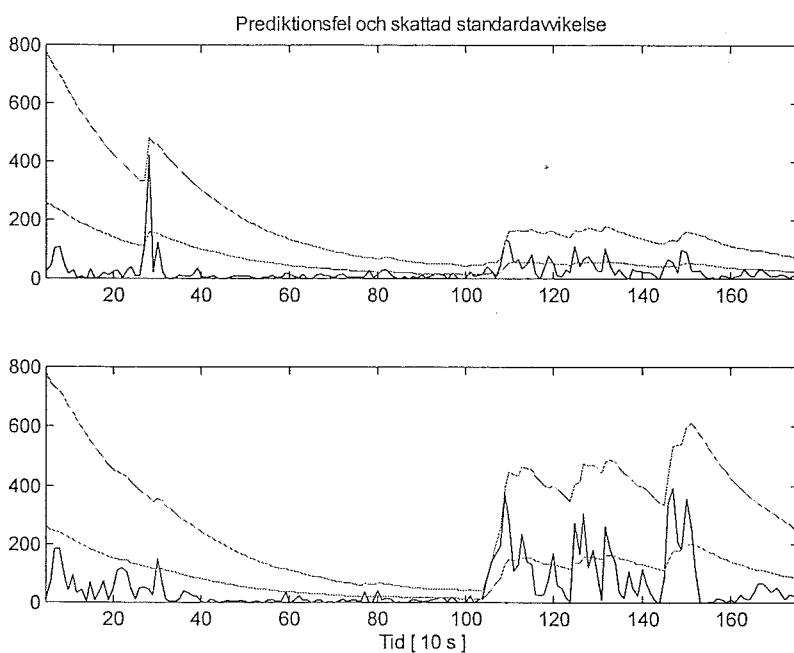
I följande figur visas en skattning av prediktionsfelets standardavvikelse,  $S$ , enligt formeln

$$S(t) = \sqrt{(1-\lambda) \cdot F(t)}$$

där  $\lambda$  är samma glömskefaktor som för  $b$ -skattningen och

$$F(t) = \lambda \cdot F(t-1) + \delta^2(t)$$

Svart kurva är beloppet av prediktionsfelet  $|\delta(t)|$ . Gråa kurvor motsvarar  $S$  resp  $3 \cdot S$ . Det övre diagrammet gäller för prediktion med den antagna modellen och det undre för prediktion med gammalt värde.



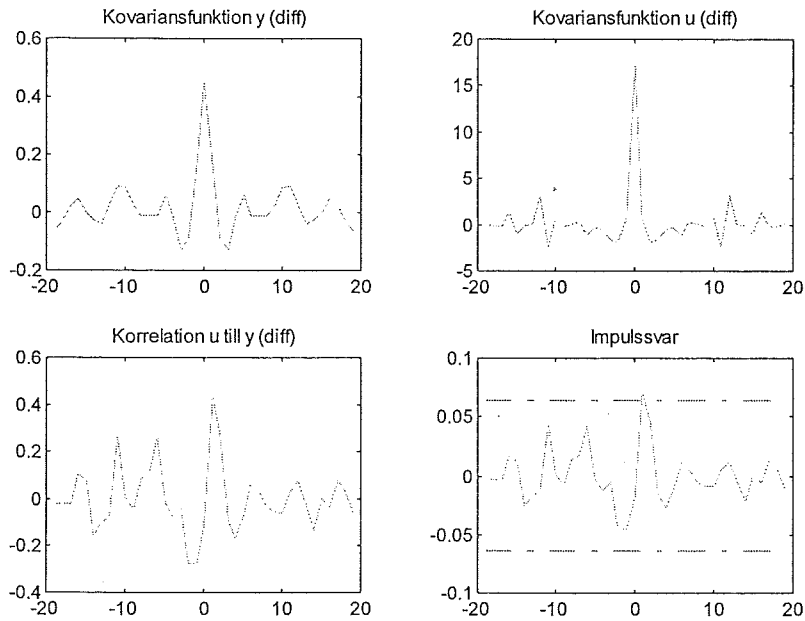
Bilden tyder på, anser jag, att  $S$  som givet i formeln ovan kan vara ett lämpligt sätt att generera en signifikansgräns på. Det bör påpekas att  $|\delta(t)|$  ska alltid jämföras med  $S(t-k)$ .

Man skulle också kunna tänka sig att prova lägre  $\lambda$ -värden än de som används i parameterskattningen. Om  $\lambda$ -värdet för standardavvikelsen t.ex. sätts till noll skulle  $S$  bli beloppet av prediktionsfelet tidpunkten tidigare. Det är förmodligen även nödvändigt att införa strängare variationsgräns för belastningen under de sekunder som ett stegförsök tar än för övrig tid. Det kan kanske göras genom att införa en toleransgräns för  $\nabla u$  p.s.s. som för prediktionsfelet eller att använda ett glidande medelvärde av  $u$  och under tiden stegändring och avläsning sker inte låta  $u$  variera utanför  $u_{medel} \pm x\%$ . Det återstår dock att verifiera att en algoritm fungerar i det ideala fallet innan det blir verkligt intressant att resonera kring dessa saker.

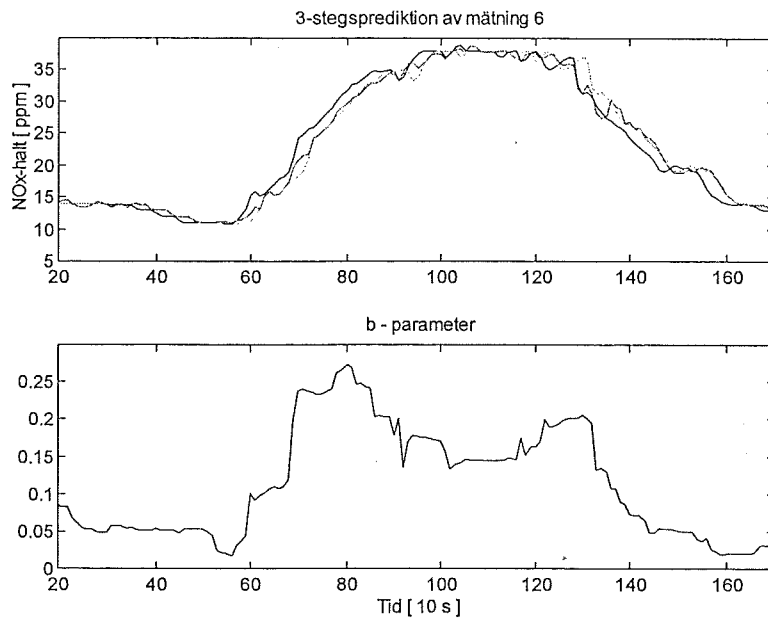
Nu är  $K = 0$  så långt ifrån optimalt  $K$  man kan komma och därför egentligen ganska ointressant i avseendet att finna en bra modellstruktur kring jämviktslägen. Vi vet redan att även en väldigt låg injicering av urea ger en kraftig reduktion av  $\text{NO}_x$ -halten. Förhoppningen är som bekant att samma modell och system skall fungera för alla  $K$ .

### 4.3.3 Processidentifiering överinjicering

$K = 1$  som är ett klart fall av överdosering är inte heller i sig särskilt intressant vad det gäller en bra modellstruktur. Man ser i mätning 5 och 6 att det för det första tar det minst en halv överfart innan  $\text{NO}_x$ -halten nått upp till ett jämviktsläge och när den väl har gjort det så borde  $y_p(t) = y(t - k)$  i praktiken bli en prediktion så god som någon. Med bakgrund av nedanstående korrelationsanalys av en differentierad mätning 6 i intervallet 800 - 1270 s kan man dock förmoda att prediktionen skulle kunna förbättras en aning med en lämplig modell.

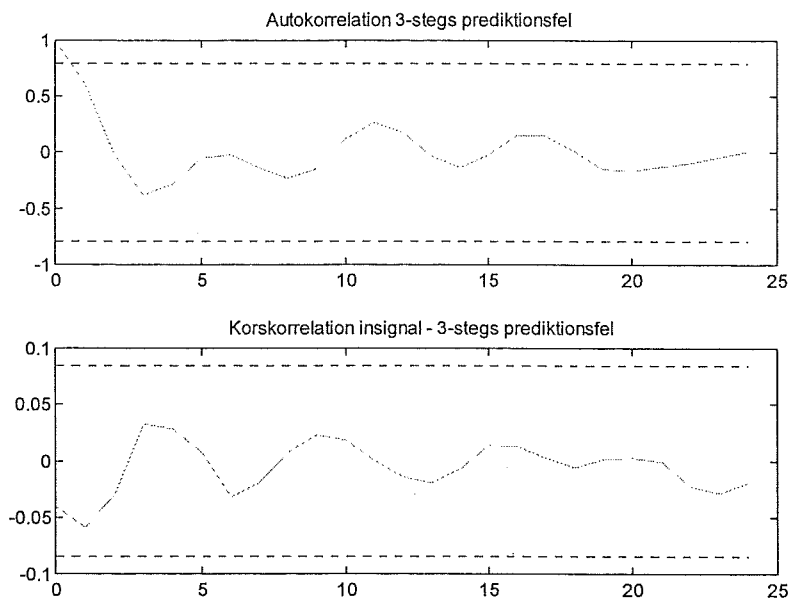


Det första steget är naturligtvis att prova att tillämpa tidigare modell och system från  $K = 0$  utan någon förändring. Följer gör alltså, från mätning 6, svart kurva för verklig signal, ljusgrå kurva för gammalt värde som prediktion och mörkgrå kurva för prediktion med exakt samma modell och rekursiva skattning som tidigare.



Den modellbaserade prediktionen förefaller vara något bättre. För första delen av överfarten, intervallet 60 - 100, och efter överfarten, intervallet 130 - 170, hade en korrekt modellstruktur kanske kunna varit  $\nabla y(t) = b \cdot \nabla u(t-1) + e(t) + m$  men eftersom det centrala i problemet är att undvika överdosering finns det ingen anledning att spekulera vidare i ett sådant antagande.

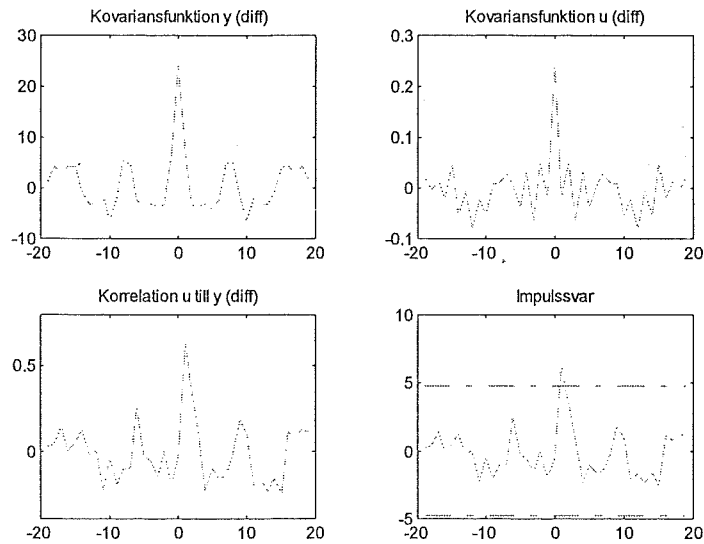
Det kan trots det vara intressant att undersöka modellens prediktionsfel för den del av överfarten då  $\text{NO}_x$ -halten uppnått stationaritet. Därav, med medvetande om det låga antalet datapunkter, en korrelationstest av prediktionsfelet i intervallet 100 - 130.



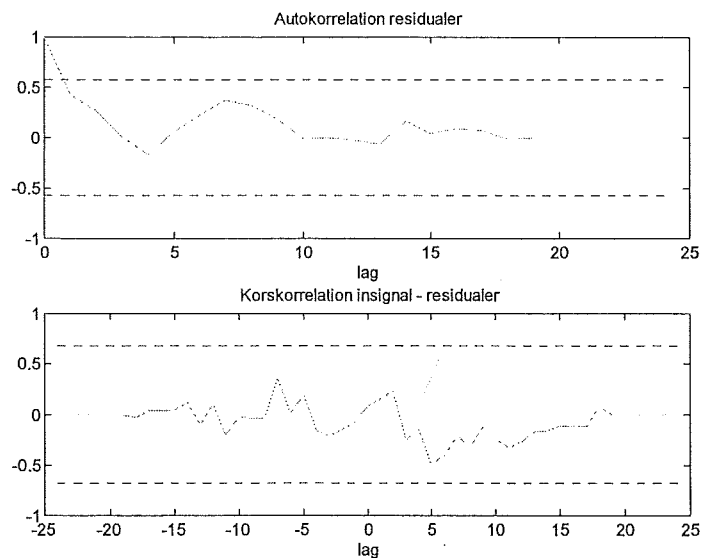
Ord är överflödiga.

### 4.3.4 Processidentifiering underinjicering

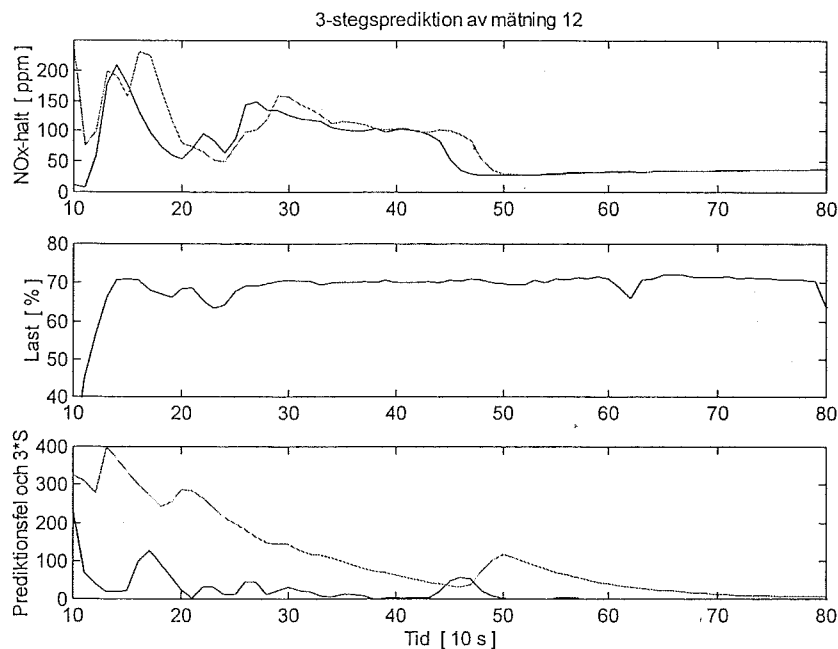
Återstår att analysera för  $K = 0.8$  och man kan åter igen konstatera att fler mätningar med  $K = 0.8$  och  $K = 0.9$  hade varit önskvärda. Det som står till buds är mätning 11 och under denna mätning var givetvis Murphy framme och såg till att det kom en kraftig svacka i belastningen mitt under överfarten. I vilket fall som helst följer här en korrelationsanalys av en differentierad mätning 11 i intervallet 190 - 570 s.



Med stor glädje så ser vi att det inte finns någon anledning att tro att tidigare modellförmodan inte skulle fungera för  $K = 0.8$ . Matrialet är som sagt väldigt magert, bara 38 datapunkter, men för att göra det bästa av situationen så har intervallet 190 - 380 använts för identifiering och intervallet 380 - 570 för validering av samma modellstruktur som tidigare men med icke-rekursiv skattning, med följande resultat av residualtestet.



Inte heller det mycket att orda om. Det är istället läge för att prova teorierna på relevanta mätningar, eller relevant mätning som det tyvärr bara är. I mätning 12 görs en ändring av K-faktorn vid  $t = 420$  s, d.v.s.  $t = 42$  [10 s] i figuren nedan.



Om man bortser från den otroligt svängiga inledningen så är det ändå tillfället som  $|\delta(t)| > 3 \cdot S(t-3)$  just efter  $t = 42$ .

Det är framför allt  $\lambda$ -värdet som är avgörande för hur stor inverkan ett prediktionsfel har och hur snabbt  $S$  minskar efter ett större fel.  $\lambda$  och  $n$  bör därför väljas med omsorg en avgörande faktor blir givetvis hur lång tid man anser att ett steg i justeringsprocedurer får lov att ta. Det finns många förslag på hur  $\lambda$  kan väljas och däribland sådana med tidsvariabla  $\lambda$ -värden så att vid stora prediktionsfel glöms gammal information snabbt och vice versa.

#### 4.3.5 Alternativ lösning

Ett annat alternativ till lösning av detekteringsproblemet som kanske är den man spontant kommer att fundera över när man för första gången konfronteras med problemet är att på något sätt jämföra ett medelvärde av  $\text{NO}_x$ -halten före och efter en ändring av K-faktorn. T.ex. såhär

Under en visst tidsintervall,  $T$ , bestående av  $N$  sampel, innan en ändring av K-faktorn beräknas medelvärdet och standardavvikelsen för  $y$  och  $u$ .

$$y_{avb} = \sum y(t) / N \text{ och p.s.s. } u_{avb}$$

$$y_{sdb} = \sqrt{\sum (y(t) - y_{avb})^2 / (N - 1)} \text{ och p.s.s. } u_{sdb}$$

Efter det att effekterna från *ändringen* av K-faktorn stabiliserat sig beräknas åter för ett lika långt tidsintervall medelvärde och standardavvikelse för  $y$  och  $u$ .

$$y_{ava} = \dots, u_{ava} = \dots, y_{sda} = \dots, u_{sda} = \dots$$

Sedan jämförs givetvis  $y_{avb}$  med  $y_{ava}$  och skillnaden kan betecknas signifikant t.ex. om

$$|y_{avb} - y_{ava}| > n \cdot y_{sdb} \quad \text{och} \quad |y_{avb} - y_{ava}| > n \cdot y_{sda}.$$

Med ovanstående beräkningar gör man antagandet att  $y$  är normalfördelat kring sitt medelvärde. Som vi sett på korrelationsanalysen av  $\nabla u$  och  $\nabla y$  tidigare så är det också i det närmsta ett korrekt antagande för överfarterna med Aurora och följaktligen så borde en sådan lösning fungera där. Spörsmålet är vad som sker om ett sådant antagande inte är korrekt, om belastningen aldrig ligger så konstant som den gör på Aurora?

Under båtturen med Scandica så var det förutom strålände solsken, 23 grader i skuggan, gratis Piña Colada i baren och fullt med blondiner i poolen ett förhållande som måste betraktas som normal sjögång. Stod man på däck hördes ändå tydligt hur varvtalet på motorerna varierade då fartyget mötte vågtoppar och dalar. I de få mätningarna som jag lyckades prestera då syns det också en tydlig periodicitet av  $\text{NO}_x$ -halten som utan annan förklaring måste tillskrivas havets makter.

Det kan hända att sådana variationer inte har någon praktisk betydelse men valet av  $T$  blir kanske kritiskt beroende på vågornas periodicitet. *Ett alternativ i harmoni med stora talens lag vore att välja  $T$  till en väldigt lång tid som garanterat täcker många perioder.* Kravet är då att lastsignalens medelvärde före och efter inte avviker för mycket från varandra. En toleransgräns där görs lämpligen som ovan med hjälp av  $u_{avb}$ ,  $u_{sdb}$ ,  $u_{ava}$  och  $u_{sda}$ .

### 4.3.6 Implementering av prediktor

Låt oss för ögonblicket anta att lösningen med modellbaserad prediktion fungerar. Vi antar också att

$$\nabla y(t) = b \cdot \nabla u(t-s) + e(t)$$

är en korrekt modellstruktur vilket i fysikalisk mening skulle betyda att ökning och minskningar av belastningen ger direkt upphov till ökning och minskningar av  $\text{NO}_x$ -halten, med en tidsfördröjning  $s$ . Det förefaller naturligt och analyserna tidigare visar inte heller på något annat.

För att välja  $b$  används som tidigare lämpligen en minstakvadrat-anpassning. d.v.s  $b$  väljs så att

$$J = \sum_N \varepsilon(t)^2$$

minimeras,  $N$  är antal datapunkter och

$$\varepsilon(t) = \nabla y(t) - b \cdot \nabla u(t-s)$$

För att minska beräkningarna i varje tidpunkt kan minstakvadrat algoritmen skrivas om i rekursiv form och dessutom modifieras för tidsvarierande parametrar med en glömskefaktor,  $\lambda$ ,  $0 < \lambda < 1$ . De antal datapunkter bakåt i tiden som används vid skattningen av  $b$  kan uppskattningsvis beräknas enligt

$$N \approx 1 / (1 - \lambda)$$

Om vi inför beteckningen  $\phi(t) = \nabla u(t-s)$  så blir algoritmen för skattning av  $b$  i ovanstående modell med rekursiv minstakvadratskattning och glömskefaktor följande:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \nabla y(t) - b(t-1) \cdot \phi(t) \\ p(t) &= p(t-1) / [\lambda + p^2(t-1) \cdot \phi^2(t)] \\ b(t) &= b(t-1) + p(t) \cdot \phi(t) \cdot \varepsilon(t) \end{aligned}$$

$p(t)$  brukar pga. sina egenskaper kallas för kovariansmatrisen. I detta fallet är det dock ingen matris utan en skalär eftersom bara en parameter skattas. Kovariansmatrisen är ett mått på osäkerheten i parameterskattningen och en återställning innebär en tilldelning av ett stort värde.

Det kriterium som minimeras är.

$$J(t) = \lambda \cdot J(t-1) + \varepsilon^2(t)$$

Den bästa prediktionen av  $\nabla y(t)$  med denna modell blir

$$\nabla y_p(t) = b(t-k) \cdot \nabla u(t-s)$$

och följaktligen blir den bästa prediktionen av  $y(t)$

$$y_p(t) = y(t-k) + b(t-k) \cdot [u(t-s) - u(t-s-k)]$$

Prediktionsfelet och dess skattade standardavvikelse beräknas som tidigare enligt

$$\begin{aligned} \delta(t) &= y_p(t) - y(t) \\ S(t) &= \sqrt{1 - \lambda} \cdot F(t) \\ F(t) &= \lambda \cdot F(t-1) + \delta^2(t) \end{aligned}$$



*I princip* så består den programkod som behövs för RMK-skattning av de rader som ovan står inom ramar. Det är trots det förmodligen ingen bra idé att trycka in raderna direkt in i en PC eller PLC och förvänta sig att det skall fungera. Den person som skall göra programmeringen bör nog vara åtminstone lite bekant med datornumerik, modellering och RMK-skattning.

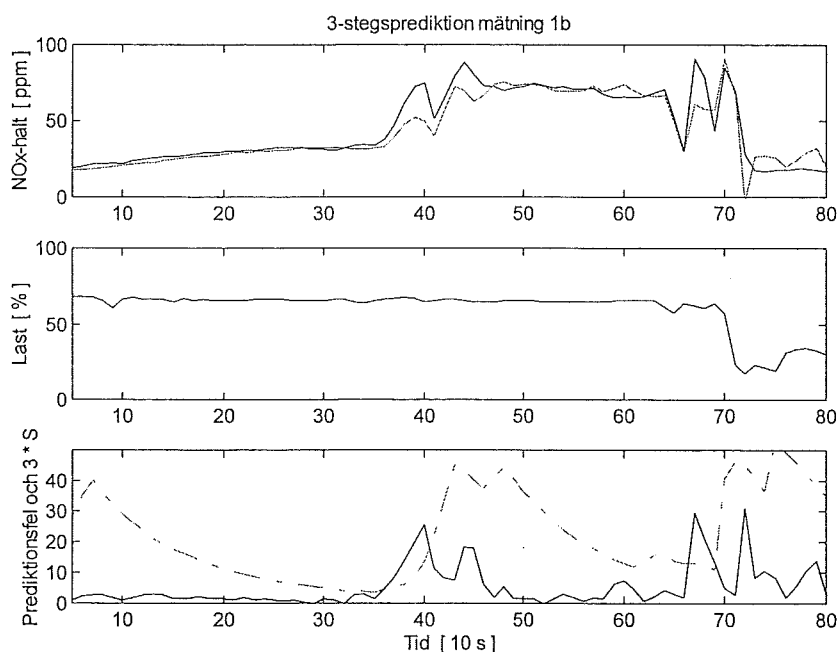
## 4.4 Verifiering och slutsats

### 4.4.1 Kompletterande mätningar

Efter det att föregående avsnitt skrevs gjorde jag den 2/9-96 ytterligare en utflykt till Aurora för att försöka göra mätningar som skulle kunna verifiera att det tänkta förslagen fungerar. De består alla av ändringar av K-faktorn i olika intervall mellan  $K = 0.7$  och  $K = 0.9$  och finns redovisade i appendix B.

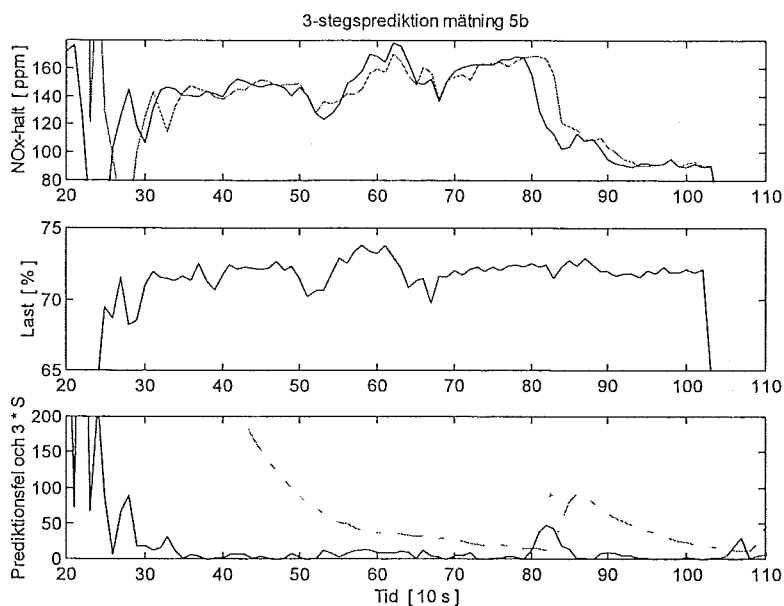
I följande simuleringarna är samma modell som tidigare använd,  $\lambda = 0.80$  vilket är väldigt lågt men nödvändigt p.g.a. den korta överfartstiden.

Första steget är ett steg tillbaka från  $K=1$  till  $K=0.8$ . Exakt var stegändringen av  $K$  sker glömde jag att notera men det är uppenbart någonstans mellan 30 och 40 [10 s].



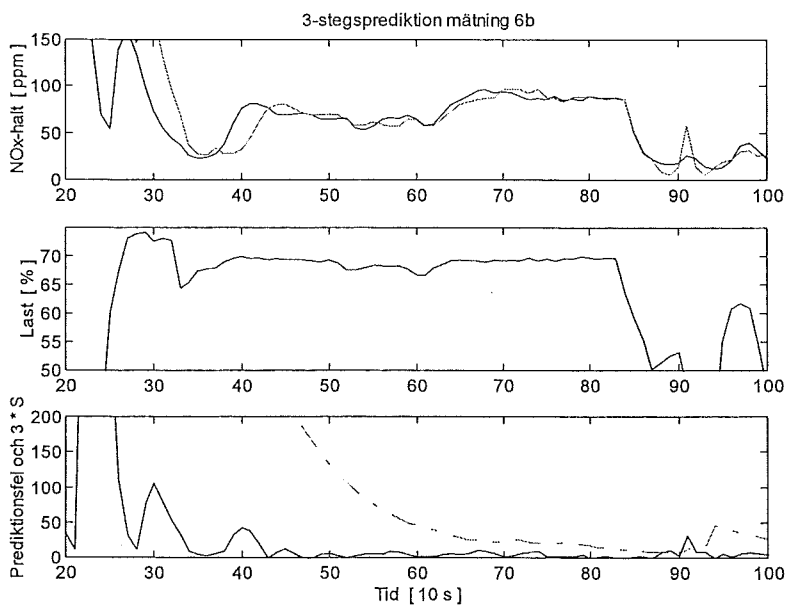
Vid medelvärdesbildning av  $\text{NO}_x$ -halten innan och efter stegändringen av  $K$ -faktorn så syns det att i detta fallet inte vore några problem att konstatera effekterna av ändringen. Prediktionsfelet är efter stegändringen större än tre gånger sin standardavvikelse så även metoden med prediktion skulle ha detekterat en signifikant ökning.

Nästa figur visar en ändring av K-faktorn från 0.7 till 0.8 vid  $t = 72$  [ 10 s ].



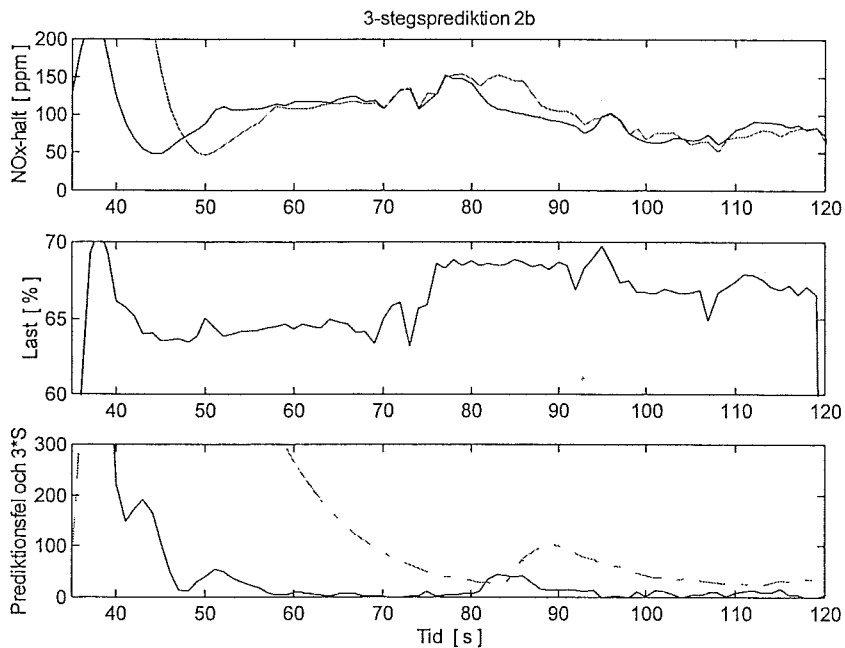
Åter igen kan det konstateras att minskningen av  $\text{NO}_x$ -halten detekterades av metoden med prediktion och med blotta ögat ser man så även skulle ha skett vid en jämförelse av medelvärden.

I figuren nedan visas en mätning där det var tänkt att ändra K-faktorn från 0.8 till 0.9 men precis när jag skulle slå om brytaren så påbörjades manövreringen in i hamn. Figuren visar dock en annan intressant sak: Medelvärdet kan bli väldigt olika beroende på hur långt intervall man väljer att medelvärdesbilda över och när man gör det. Lösningen är som tidigare att medelvärdesbilda över ett längre intervall men då förutsätter man åter igen att belastningens inte avviker för mycket från ett konstant värde.

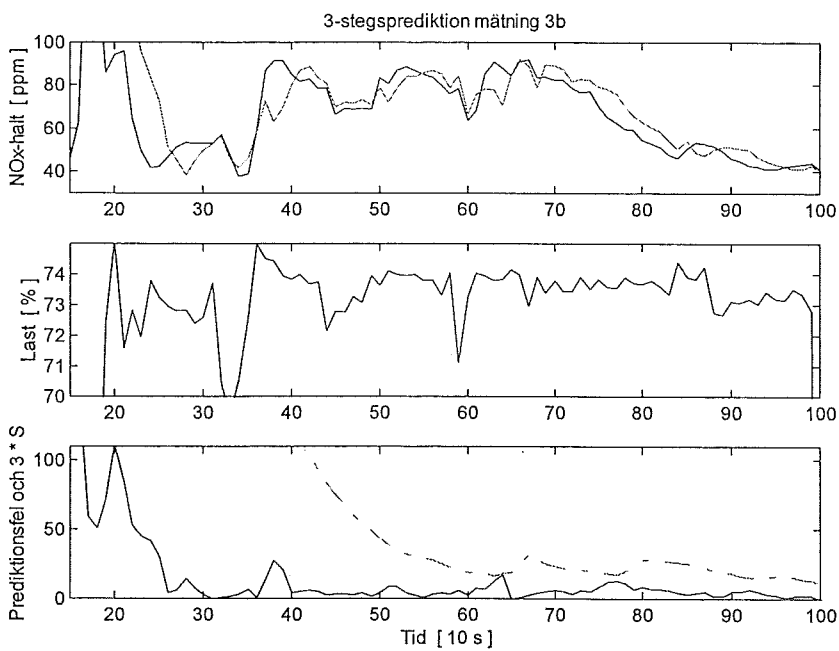


De tre återstående försöken är alla med  $\delta K = 0.05$

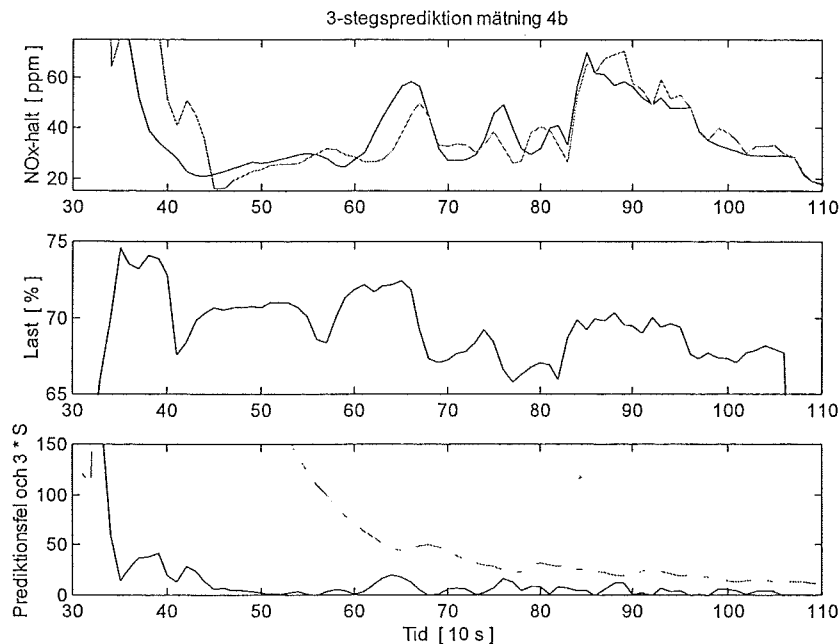
$K : 0.75 \rightarrow 0.8$  vid  $t = 78$  [ 10 s ]



$K : 0.8 \rightarrow 0.85$  vid  $t = 72$  [ 10 s ]



$K : 0.85 \rightarrow 0.9$  vid  $t = 96$  [ 10 s ]



Om vi inleder med den sista figuren så tror jag till att börja med att topparna i  $\text{NO}_x$ -halten beror på att regleringen av ventilen inte hinner med som den borde. Tyvärr påbörjas manövreringen strax efter ändringen av  $K$ -faktorn så det är kanske en förhastad slutsats att säga att 0.85 är optimalt men det är tydligt att frågan om när och hur en medelvärdesbildning ska ske inte är trivial.

Första figuren,  $K : 0.75 \rightarrow 0.8$ , är inte mycket att bråka om, båda metoderna hade detekterat en signifikant skillnad i  $\text{NO}_x$ -halten. För  $K : 0.8 \rightarrow 0.85$  däremot detekterar inte metoden med prediktion någon minskning av  $\text{NO}_x$ -halten och under förutsättning att den hade detekterat en minskning för  $K : 0.8 \rightarrow 0.9$  skulle  $K_{\text{slutligt}}$  enligt kapitel 4.2 valts till 0.85 eller 0.9, om inte förutsättningen gällde hade  $K_{\text{slutligt}}$  valts till 0.8. Tveklöst så hade en jämförelse mellan medelvärden här detekterat en signifikant minskning av  $\text{NO}_x$ -halten.

#### 4.4.2 Slutsatser

För den optimalsökande algoritmen finns det kanske inte så mycket att tillägga förutom initialvärden och gränsvärden för  $K$  och  $\delta K$ . Personligen tycker jag att den är genomtänkt och som jag ser det är det verkliga problemet att vid ändringar av injiceringen kunna göra observationer av  $\text{NO}_x$ -halten och dra korrekta slutsatser.

Jag är övertygad om att båda metoderna för detektering av minskningar i  $\text{NO}_x$ -halten hade fungerat bättre om bara regleringen av ventilen hade varit bättre men framför allt borde detta gynna prediktionsmetoden eftersom den bygger på att det finns ett direkt beroende mellan last och  $\text{NO}_x$ .

Man kan fråga sig varför man överhuvudtaget skall bry sig om att beakta den kanske mer komplicerade metoden med prediktion som ett alternativ när det förefaller som om att jämföra medelvärden ger bättre resultat. Frågan är berättigad men *det enda vi vet säkert är att den sistnämnda metoden hade fungerat bättre på Aurora kvällen den 2/9-96*. Det har redan tidigare spekulerats kring vad som sker om belastningen har en annan karaktär och det finns dessutom många andra saker som kan förändra förutsättningarna för *båda* metoderna som t.ex. katalysatorn ålder eller storlek.

Nu kan det mycket väl finnas en person som sitter och trycker på en bättre lösning på problemet än vad jag föreslår men fram tills dess att han kliver ut ur mörkret och talar till folket så tror jag på prediktionsmetoden som plan A och medelvärdesmetoden som plan B. Det bästa vore naturligtvis att under en försöksperiod implementera båda metoderna och testköra, jämföra och därefter utvärdera vad som fungerar bäst i praktiken.

## 5 Sammanfattning

Även om saker och ting nu kan förefalla naturliga så var de verkligen inte det för tre månader sedan. Mycket tid har gått åt till att undersöka och prova saker som till slut visat sig leda ingenstans och det dröjde en hel månad innan de första *användbara* mätningarna gjordes. Det finns också många självklara saker som man borde insett snabbare som t.ex. att mätinstrumentet bara mäter den procentuella sammansättningen och inte alls ger ett mått på det totala utsläppet av  $\text{NO}_x$ .

Om man med erfarenhet avser alla felaktiga antaganden och misstag man gjort så måste jag helt klart ha samlat på mig en hel del erfarenhet.

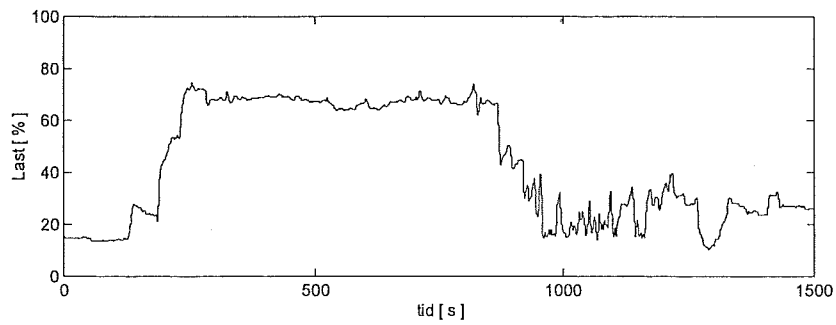
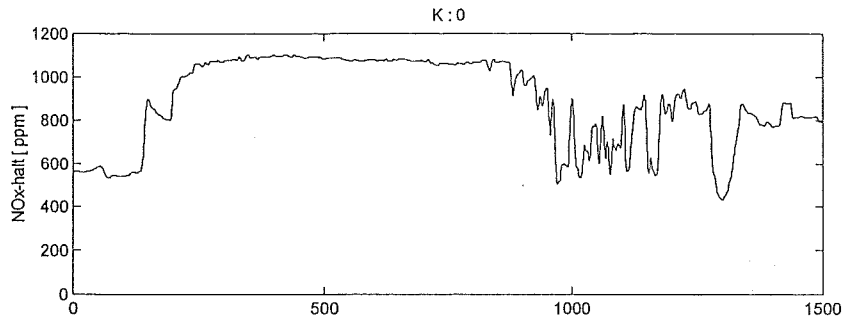
Det kanske mest intressanta och oväntade som framkommit av mätningarna är den stora skillnad i systemets dynamik som finns mellan under- och överinjicering och som har lett till en lite annorlunda metod att söka optimal injicering. Det visade sig dock att det verkliga problemet ligger i att kunna avgöra om ett steg i optimalsökningen i närheten av optimum orsakar en ökning eller minskning av  $\text{NO}_x$ -halten. Vi har sett att för Aurora så är den enklaste lösningen på detta problem förmodligen att jämföra ett medelvärde av  $\text{NO}_x$ -halten före och efter steget men för att inte dra för stora slutsatser av dessa mätningar så är metoden med modellering och prediktion i allra högsta grad en metod att överväga för kommande installationer.

Torbjörn Aukland

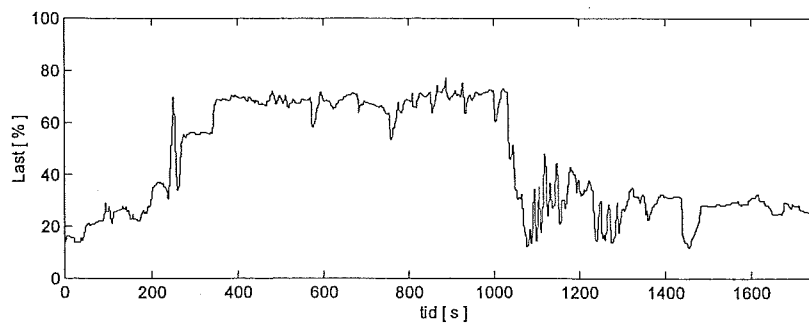
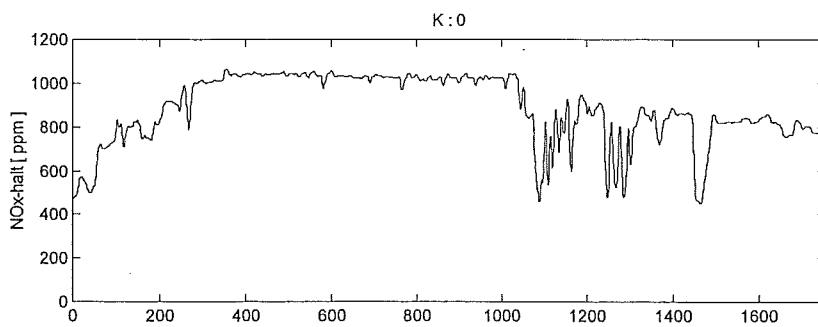
Göteborg 5/9-96

# APPENDIX A.

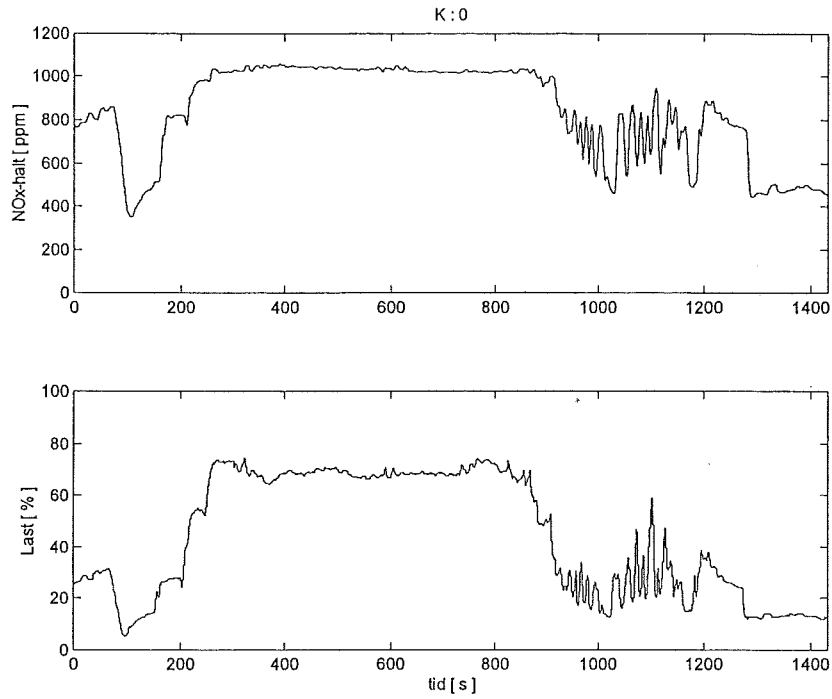
## *mätning 1*



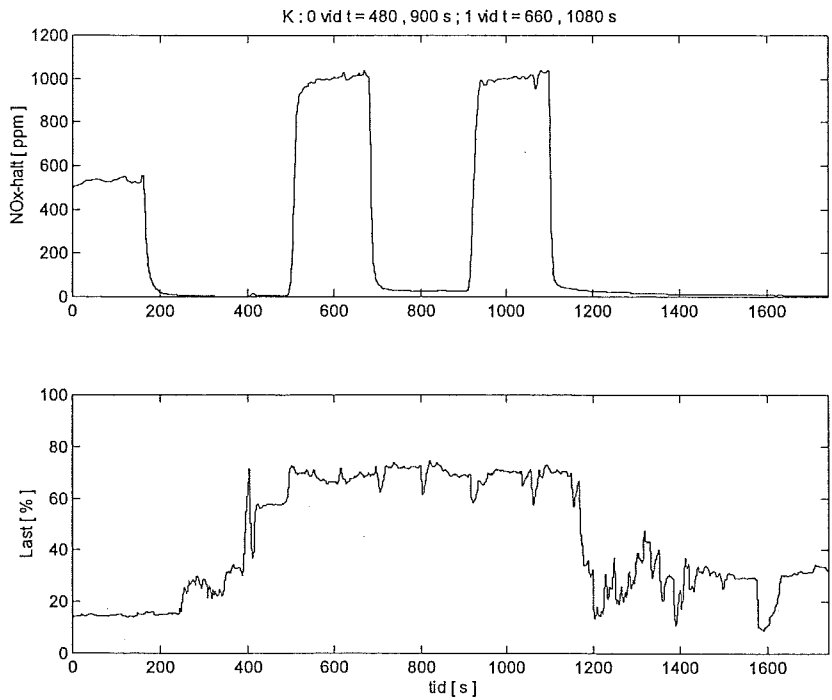
## *mätning 2*



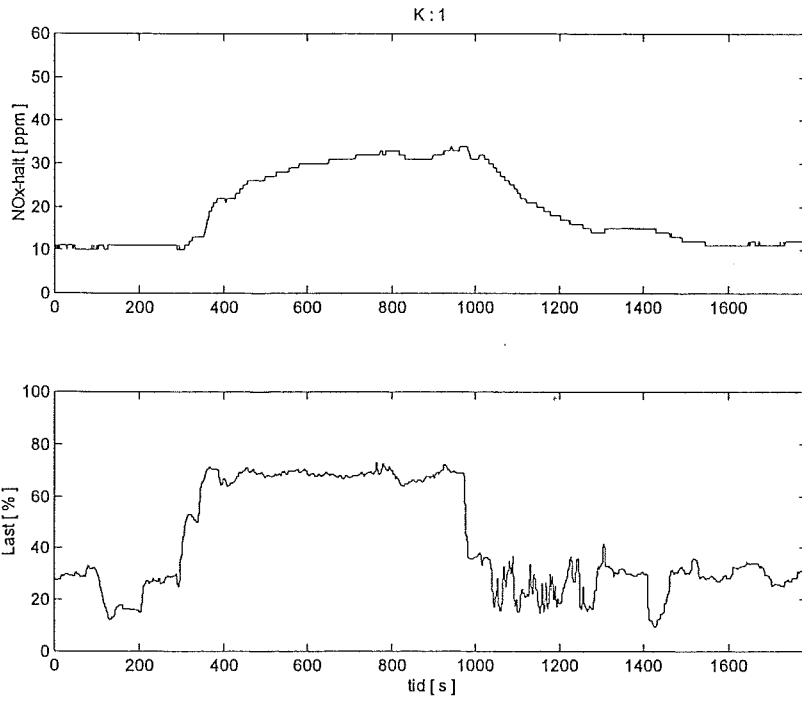
*mätning 3*



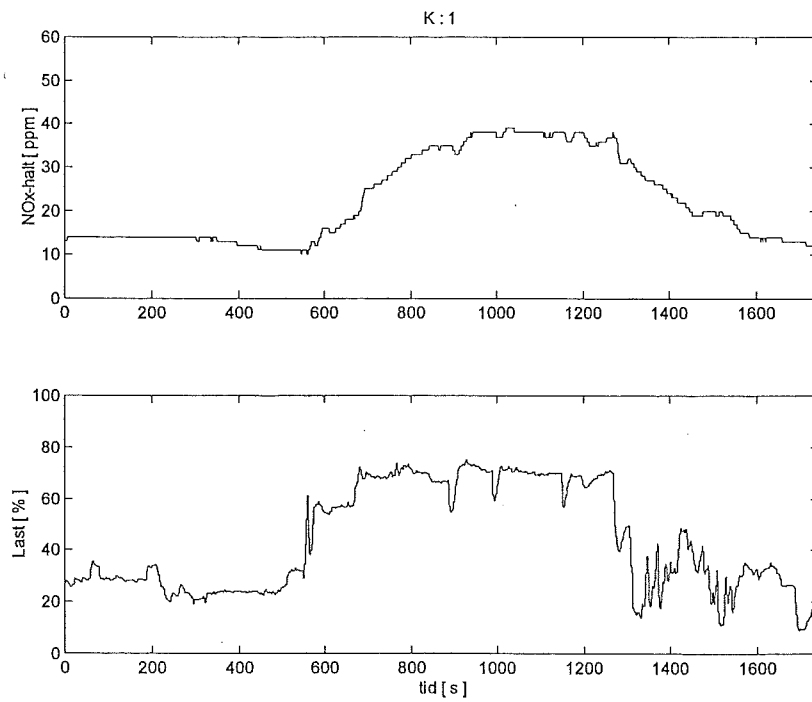
*mätning 4*



*mätning 5*

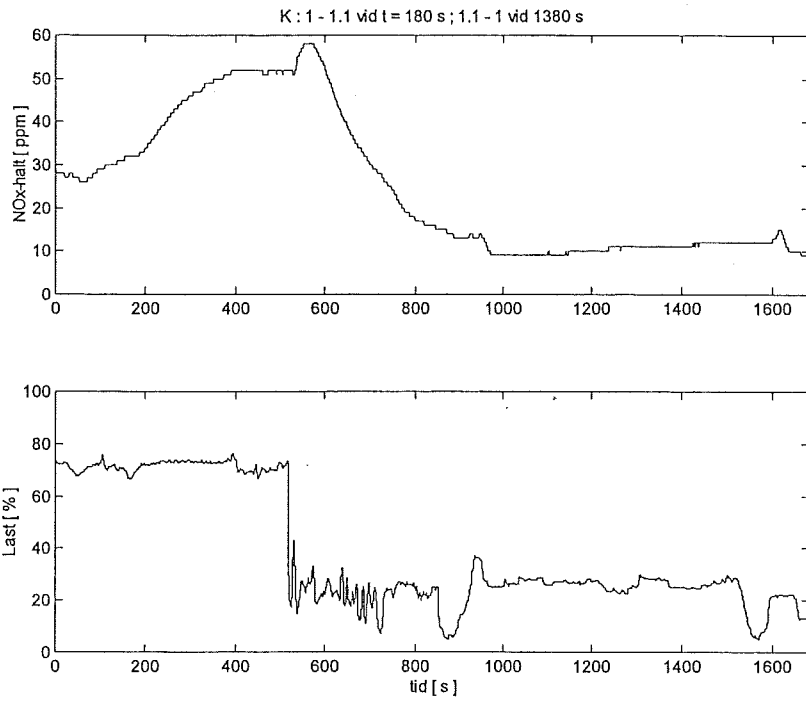


*mätning 6*

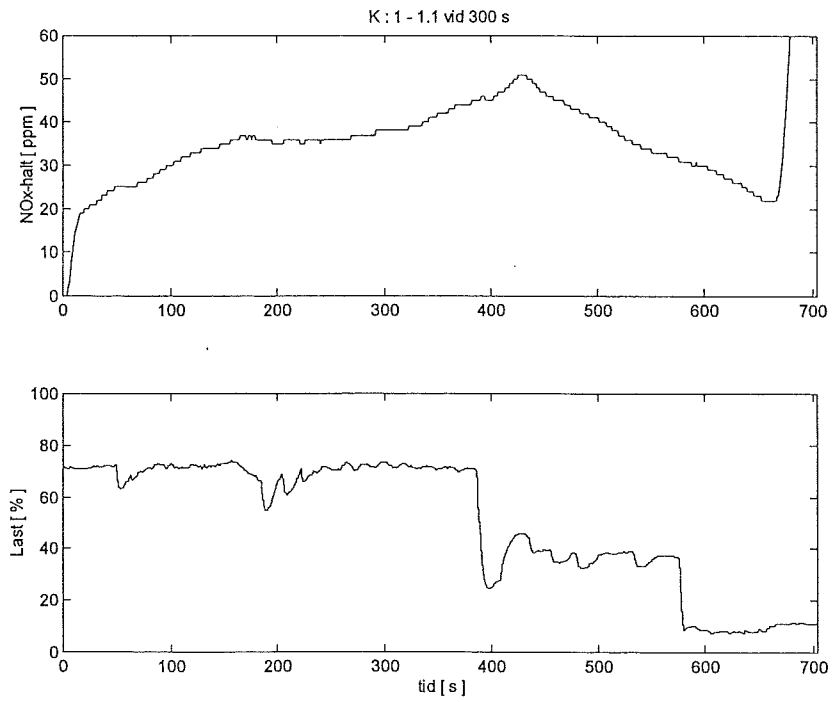




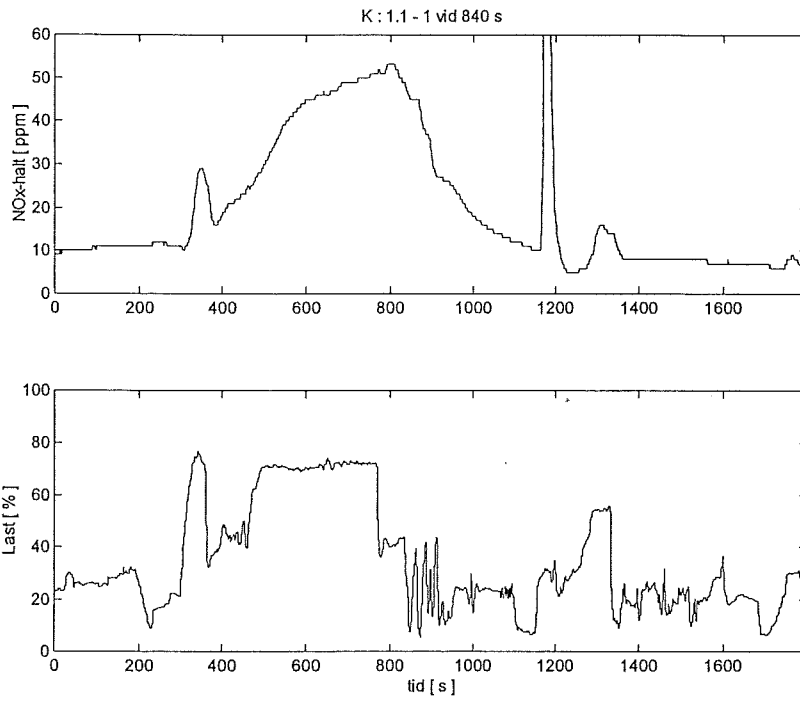
mätning 7



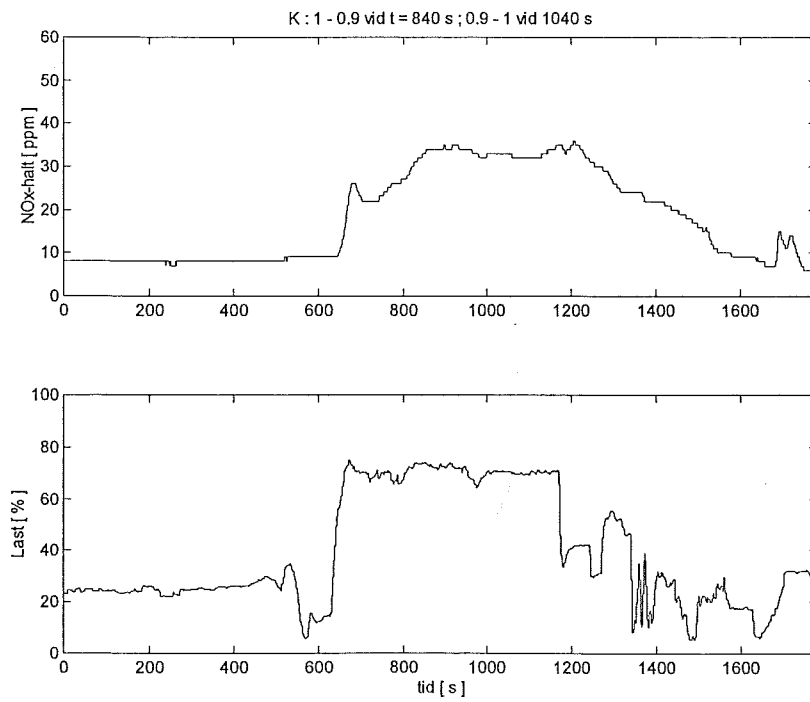
mätning 8



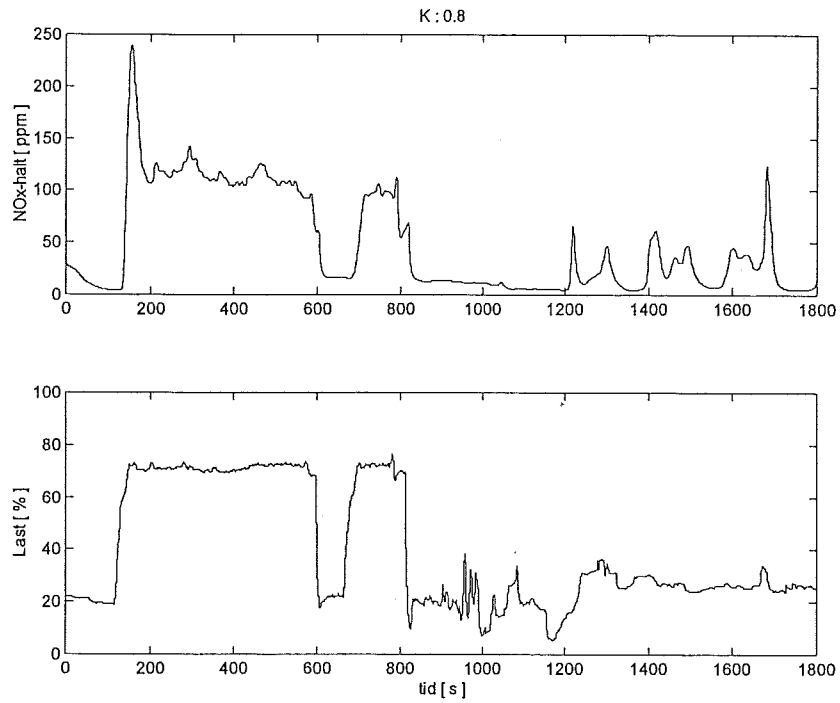
mätning 9



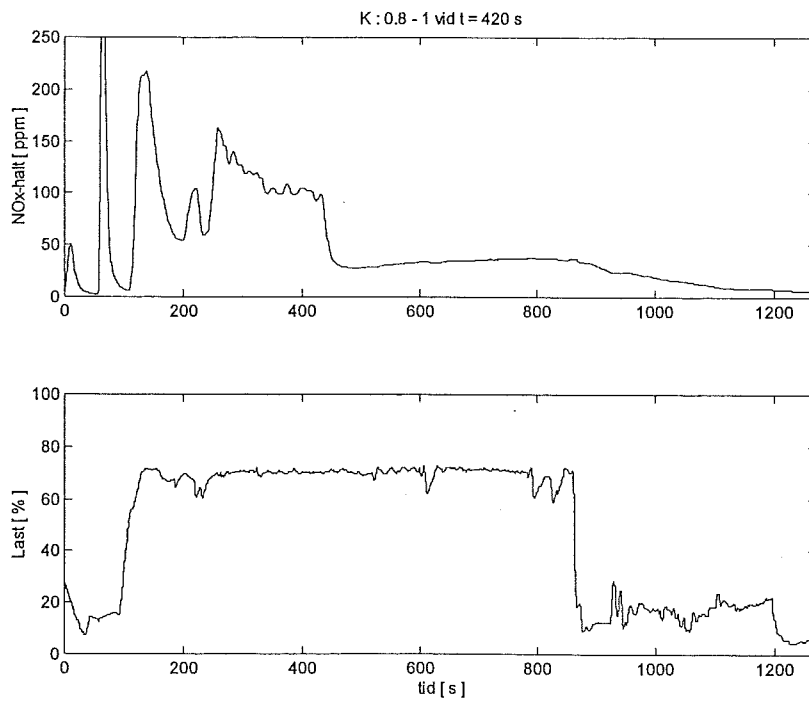
mätning 10



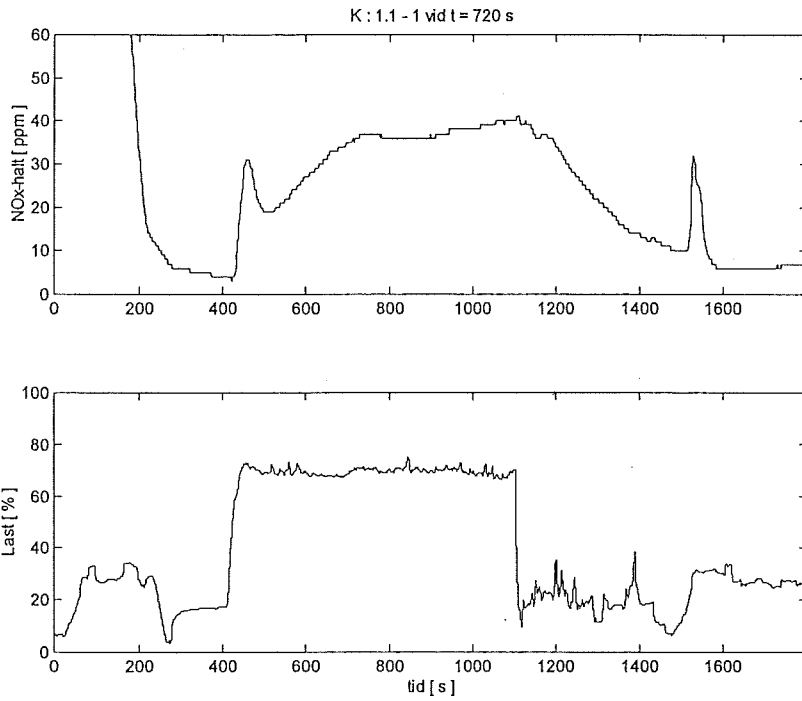
mätning 11



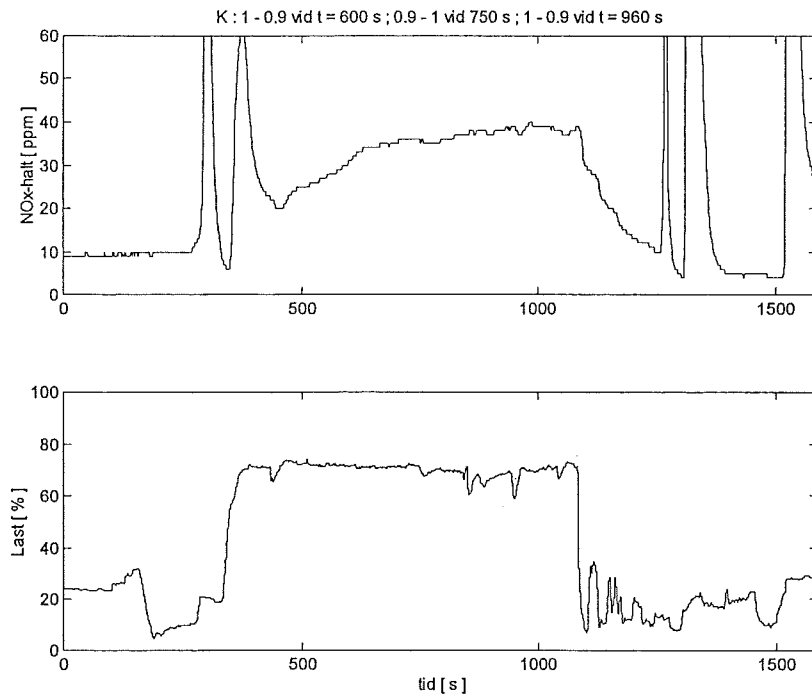
mätning 12



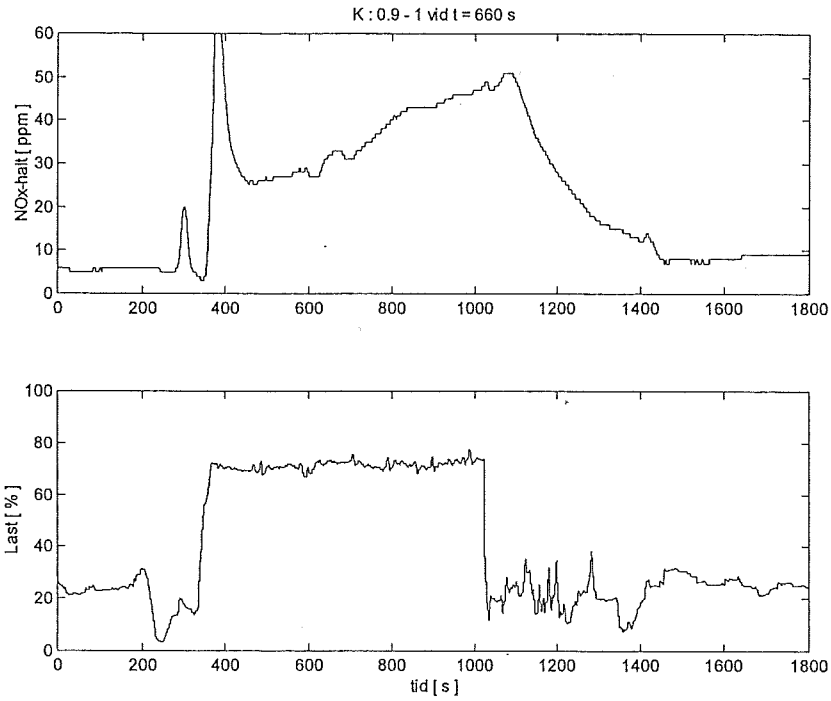
mätning 13



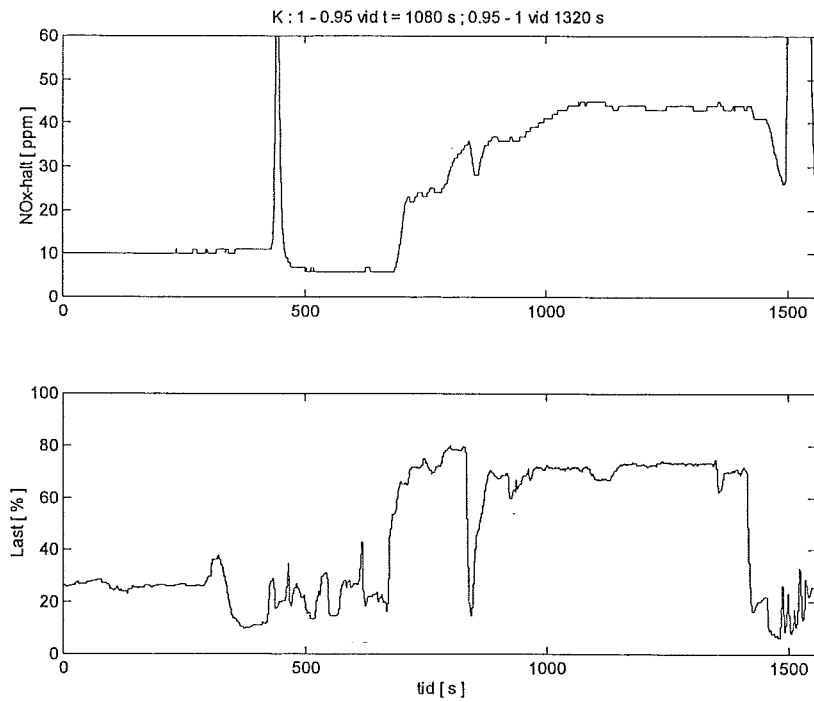
mätning 14



mätning 15

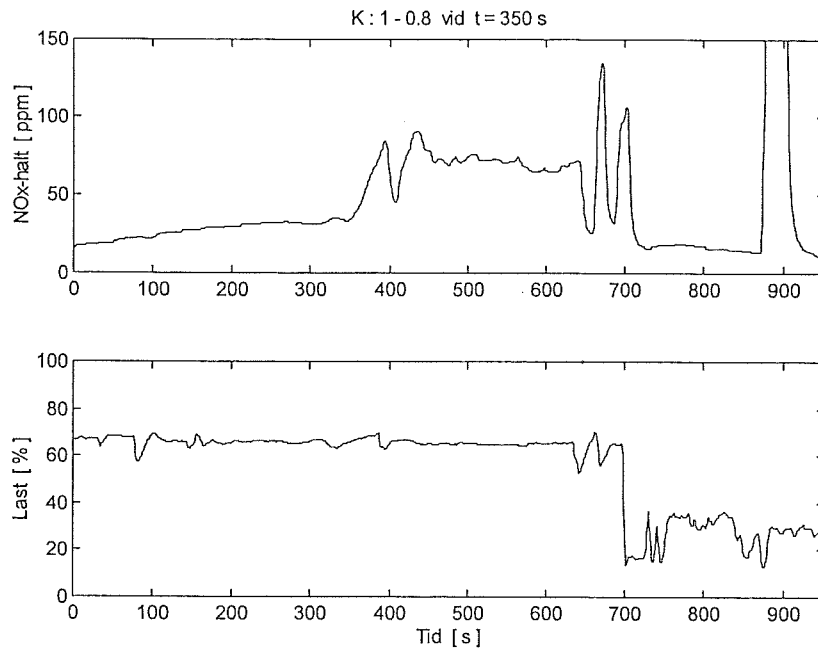


mätning 16

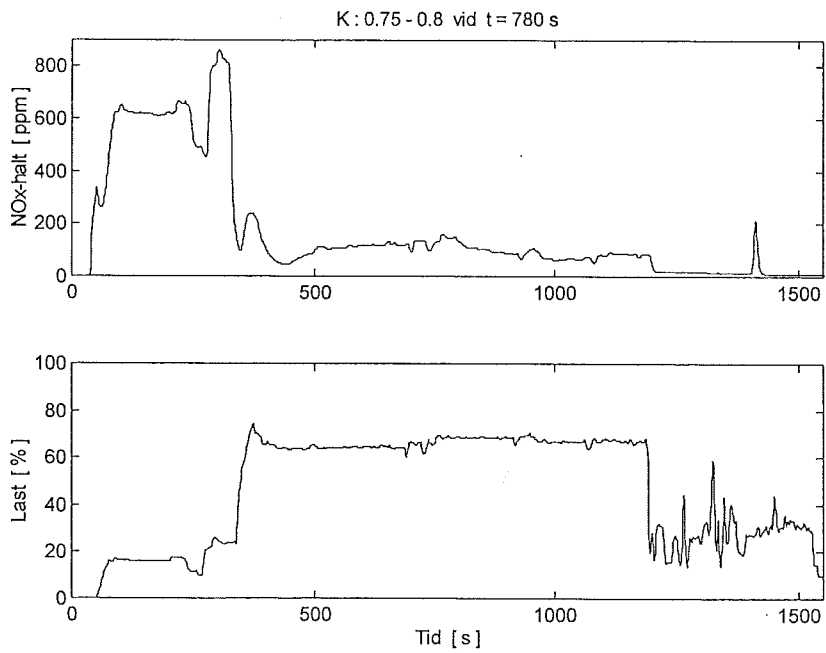


## APPENDIX B.

### *mätning 1b*

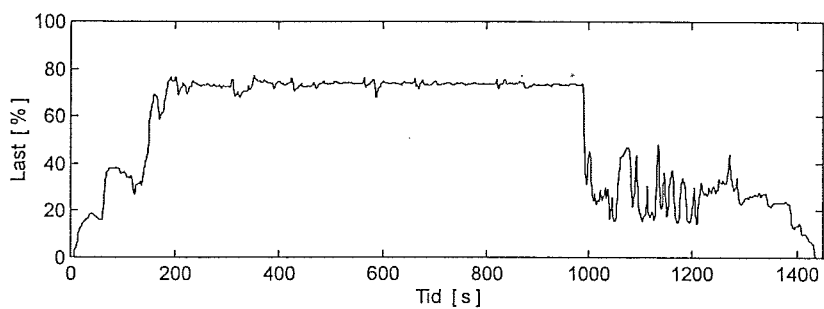
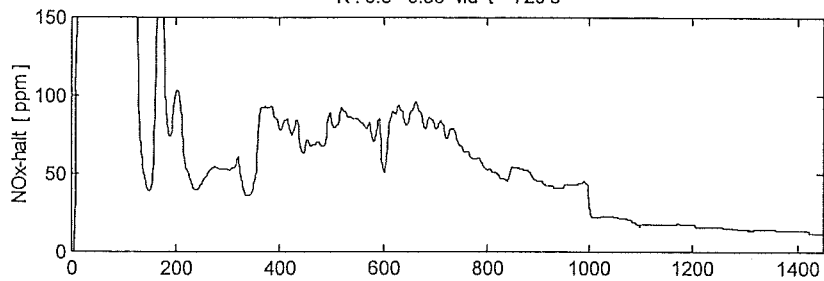


### *mätning 2b*



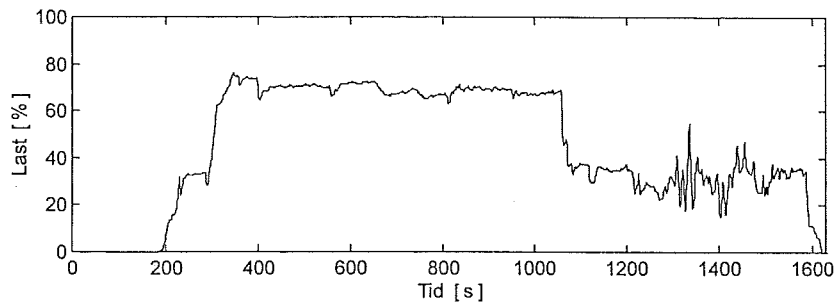
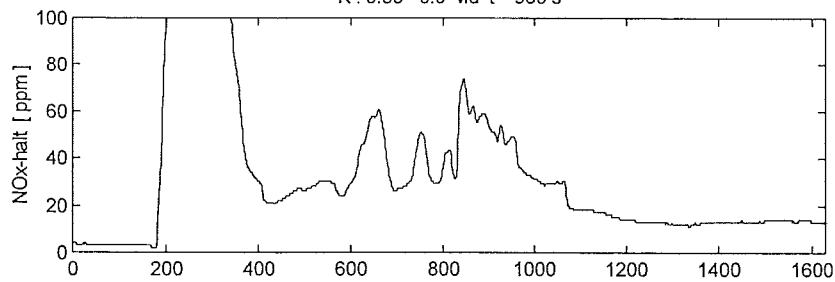
*mätning 3b*

K: 0.8 - 0.85 vid t = 720 s

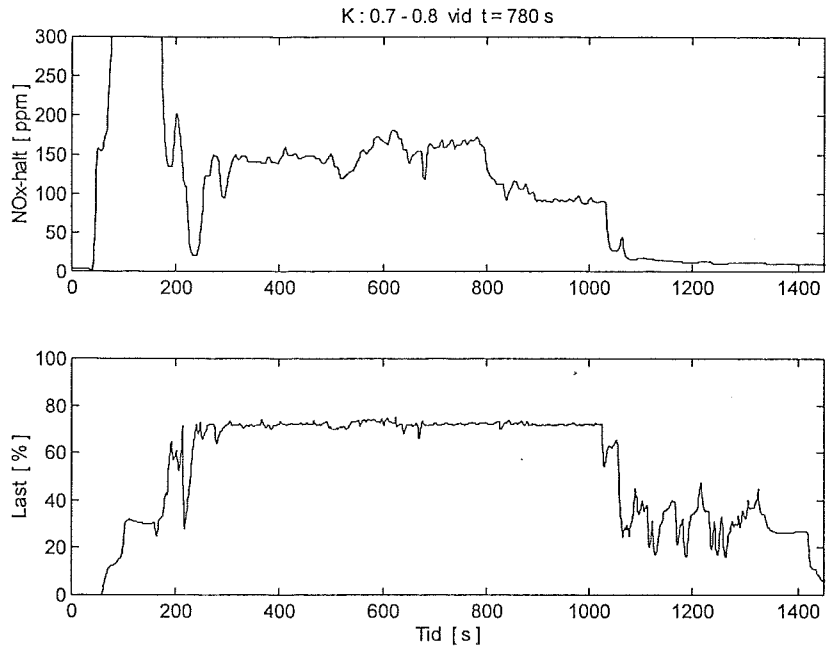


*mätning 4b*

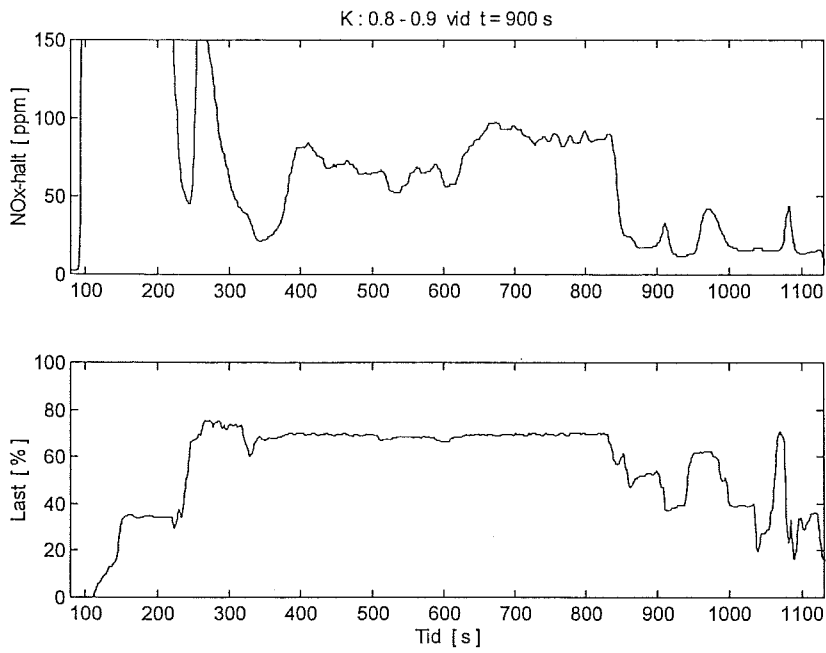
K: 0.85 - 0.9 vid t = 960 s



*mätning 5b*



*mätning 6b*





## APPENDIX C.

*Matlabfunktioner som kan vara bra att ha sparat*

```
function svar=resamp(zr,n)
% resamp(Z,n) plockar ut var n:te sampel ur Z
s=[];
for k=1:size(zr(:,1))
    if rem(k,n)==0
        s=[s ; zr(k,:)];
    end;
svar=s;
end;
```

```
function [thm,yhat3,Spe,p,phi] = myrplr4(zfr,nn,adm,adg,th0,p0,phi)

C=[1 -1];
z(:,1)=filter(C,1,zfr(:,1));
z(:,2)=filter(C,1,zfr(:,2));

[nz,ns]=size(z);
if ns==1,if length(nn)~=2,error('For a time series nn should be nn = [na nc]!'),end,end
if ns==2,if length(nn)~=6,error('The argument should be nn = [na nb nc nd nf nk]!'),end,end
if ns==2,na=nn(1);nb=nn(2);nc=nn(3);nd=nn(4);nf=nn(5);nk=nn(6);
else na=nn(1);nc=nn(2);nk=1;nb=0;nd=0;nf=0;end
if nk<1,error('Sorry, this routine requires nk>0; Shift input sequence if necessary!'),end
d=na+nb+nc+nd+nf;
if ns>2,error('Sorry, this routine is for single input only!'),end

nbm=nb+nk-1;
tia=1:na;tib=na+1:na+nb;tic=na+nb+1:na+nb+nc;tid=na+nb+nc+1:na+nb+nc+nd;
tif=na+nb+nc+nd+1:d;
ia=tia;ib=na+nk:na+nb+nk-1;ic=tic+nk-1;id=tid+nk-1;iff=tif+nk-1;
iib=na+1:na+nb+nk-1;
dm=na+nbm+nc+nd+nf;
ii=[ia iib ic id iff];i=[ia ib ic id iff];

if nargin<7, phi=zeros(dm,1);end
if nargin<6, p0=10000*eye(d);end
if nargin<5, th0=eps*ones(d,1);end
if isempty(phi),phi=zeros(dm,1);end
if isempty(p0),p0=10000*eye(d);end
if isempty(th0),th0=eps*ones(d,1);end
if length(th0)~=d,error('The length of th0 must equal the number of estimated parameters!'),end
[th0nr,th0nc]=size(th0);if th0nr<th0nc,th0=th0';end
```

```

Jpe0=0*(zfr(1,1))^2/(1-lam);
p=p0; th=th0; Jpe=Jpe0;
if adm(1)=='f', R1=zeros(d,d);lam=adg;end
if adm(1)=='k', [sR1,SR1]=size(adg);
    if sR1~=d | SR1~=d,error('The R1 matrix should be a square
matrix with dimension equal to number of parameters!'),end
    R1=adg;lam=1;
end
if adm(2)=='g', grad=1;else grad=0;end

for kcou=1:nz
    yh=phi(i)'*th;
    epsi=z(kcou,1)-yh;
    if kcou>1
        if ((zfr(kcou-1,2)<50) & (zfr(kcou,2)>49)) p=p0; end
        if ((zfr(kcou-1,2)>49) & (zfr(kcou,2)<50)) p=p0; end
    end

    K=p*phi(i)/(lam + phi(i)'*p*phi(i));
    p=(p-K*phi(i)'*p)/lam+R1;
    th=th+K*epsi;

    if nb+nf>0,w=th([tib tif]')*phi([ib iff]);else w=0;end
    v=[z(kcou,1);-phi(ia)]'*[1;th(ia)]-w;
    epsilon=v-th([tic tid]')*phi([ic id]);

    phi(ii+1)=phi(ii);
    if na>0,phi(1)=-z(kcou,1);end
    if nb>0,phi(na+1)=z(kcou,2);end
    if nc>0,phi(na+nbm+1)=epsilon;end
    if nd>0,phi(na+nbm+nc+1)=-v;end
    if nf>0,phi(na+nbm+nc+nd+1)=-w;end

    thm(kcou,:)=th'; epsim(kcou)=epsi;yhat(kcou)=yh;);

    m=3; % m-stegsprediktion

    if kcou>(m+nk)
        NOxhat(kcou)=zfr(kcou-m,1)+[zfr(kcou-nk,2)-zfr(kcou-nk-
m,2)]*th'
    else
        NOxhat(kcou)=0;
    end

    pe=zfr(kcou,1)-NOxhat(kcou);
    Jpe=lam*Jpe+pe^2;
    Spe(kcou)=sqrt((1-lam)*Jpe);
end

yhat=yhat';
Spe=Spe';
yhat=[[0;zfr(:,1)]]+[yhat;0]];
yhat=yhat(1:max(size(yhat))-1);
yhat3=NOxhat';

```