

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5284)/1-053/(1982)

STUDIER AV SYRE-REGLERING I BIOLOGISK AVLOPPSRENING

LENNART HANSSON

INSTITUTIONEN FÖR REGLERTEKNIK
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

SEPTEMBER 1982

LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL Box 725 S 220 07 Lund 7 Sweden		Document name	
		Report	
		Date of issue	
		September 1982	
		Document number	
		CODEN:LUTFD2/(TFRT-5284)/1-053/(1982)	
Author(s)		Supervisor	
		Gustaf Olsson	
Lennart Hansson		Sponsoring organization	
Title and subtitle			
Studies of Dissolved Oxygen Control in Biological Wastewater Treatment (Studier av syre-reglering i biologisk avloppsrening)			
Abstract			
<p>In this report, the dynamics of an aertor of an activated sludge process is studied. Two control strategies for the dissolved oxygen concentration are tested. One contains either a PI-controller or a on-off controller, the other a self-tuning controller.</p> <p>There are two key-parameters in the system, K_{La}, the total oxygen transfer rate, and OUR, the oxygen uptake rate of the microorganisms in the aerator. The parameters are difficult to obtain from direct measurements. An estimator is derived. The estimates will be calculated from the process output, DO-concentration, and from the input signal, the air-flow rate.</p> <p>The estimator is also part of a self-tuning controller. Here, the controller works with a minimum variance algorithm.</p> <p>The simulations show, that the estimates contain a bias, if the estimation of the two parameters are done at the same time. Different methods are tested to avoid this problem. Even if bias cannot be avoided, the estimator can be used in a self-tuning controller because the <u>total</u> estimation error is close to zero. To obtain unbiased estimates of the two parameters is important in other aerator control schemes. Therefore different approaches have to be taken.</p> <p>The simulations show that an acceptable control can be obtained both with a PI-controller and with a self-tuning controller.</p>			
Key words			
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information			
ISSN and key title			ISBN
Language	Number of pages	Recipient's notes	
Swedish	053		
Security classification			

DOKUMENTDATABLAD RT 3/81

Distribution: The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 lubbis lund.

STUDIER AV SYRE-REGLERING I BIOLOGISK

AVLOPPSRENING

Författare:

Lennart Hansson

Handledare:

Gustaf Olsson

Studies of Dissolved Oxygen Control in
Biological Wastewater Treatment

In this report, the dynamics of an aerator of an activated sludge process is studied. Two control strategies for the dissolved oxygen concentration are tested. One contains either a PI-controller or a on-off controller, the other a self-tuning controller.

There are two key-parameters in the system, K_a , the total oxygen transfer rate, and OUR, the oxygen uptake rate of the microorganisms in the aerator. The parameters are difficult to obtain from direct measurements. An estimator is derived. The estimates will be calculated from the process output, DO-concentration, and from the input signal, the air-flow rate.

The estimator is also part of a self-tuning controller. Here, the controller works with a minimum variance algorithm.

The simulations show, that the estimates contain a bias, if the estimation of the two parameters are done at the same time. Different methods are tested to avoid this problem. Even if bias cannot be avoided, the estimator can be used in a self-tuning controller because the total estimation error is close to zero. To obtain unbiased estimates of the two parameters is important in other aerator control schemes. Therefore different approaches have to be taken.

The simulations show that an acceptable control can be obtained both with a PI-controller and with a self-tuning controller.

SAMMANFATTNING

I detta examensarbete studeras dynamiken i en luftningsbassäng i ett reningsverk. Härfter provas två stycken reglerstrategier där regleringen sker m.a.p. löst syrehalt i vattnet. Dels utnyttjas konventionell reglering bestående av antingen en PI-regulator eller en on-off regulator, dels testas en självinställande regulator.

Två stycken centrala parametrar i processen utgörs av K_a ,
 L

som anger hastigheten med vilket gasformigt syre övergår i löst syre, samt av bakteriernas syreupptagningsförmåga, OUR (oxygen uptake rate). Dessa två storheter är svårsmätbara varvid nästa steg blir att konstruera en estimator. Denna uppskattar de två parametrarna ur mätt syrehalt ut från bassängen (systemets utsignal) och från tillförd luftmängd (systemets insignal).

Estimatoren ger inte bara viktig information om den biologiska aktiviteten i form av skattningen av OUR, utan den utgör också en nödvändig del i den självinställande regulatorn. I denna studie arbetar estimatorn enligt minsta-kvadrat metoden. Regulatorordelen beräknar en styrlag enligt ett minimalvarianskriterium.

Simuleringarna visar att estimaten inte blir medelvärdesriktiga om K_a och OUR estimeras samtidigt. Olika
 L

försök görs för att undvika detta fenomen. Det visar sig emellertid att trots felet i estimaten kommer det totala felet att bli mycket litet, varvid estimatorn ändå kan användas i en självinställare. Eftersom även en explicit information om estimatens storlek är viktig även av andra skäl än just vid syrerregleringen, måste andra metoder tillgripas för att undvika medelvärdesfel.

Simuleringar visar att en godtagbar reglering kan fås både med PI-regulatorn och självinställaren.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid.
1. INLEDNING	5
2. PROCESSDYNAMIK	6
2.1 Kort beskrivning av processen	6
2.2 Modellekvationer	6
2.3 Störningar	8
3. ENKEL REGLERING AV SYREKONCENTRATIONEN	9
3.1 Kriterier på en bra reglering	9
3.2 On-off reglering	9
3.3 PI-reglering	10
3.4 Slutsatser	16
4. ESTIMERING AV K_L OCH OUR	17
4.1 Problemformulering	17
4.1 Minsta-kvadrat lösning	17
4.3 Uppskattning av båda parametrarna samtidigt	18
4.4 Uppskattning av en parameter åt gången	25
4.5 Slutsatser	28
5. SJÄLVINSTÄLLANDE REGULATOR	29
5.1 Formulering av ekvationer	29
5.2 Självinställare baserad på estimering av K_L och OUR samtidigt	30
5.3 Självinställare där endast K_L uppskattas	34
5.4 Slutsatser	39
6. JÄMFÖRELSE MELLAN PI-REGULATORN OCH SJÄLVINSTÄLLAREN	40
6.1 Deterministiska fallet	40
6.2 Stokastiska fallet	40
6.3 Diskussion	40
7. NOMENKLATUR	41
8. REFERENSER	42
9. APPENDIX 1	43
10. APPENDIX 2	44

1. INLEDNING

Syftet med denna rapport är dels att förverkliga en självinställande regulator för syre-reglering och testa hur bra reglering som kan erhållas jämfört med en konventionell PI-regulator, dels att se under vilka förhållande K_a , anger L

hastigheten med vilket gasformigt syre övergår i löst syre, respektive OUR, mikroorganismernas syreupptagningsförmåga, kan uppskattas.

I kap 2 beskrivs en matematisk modell för processen. Vidare presenteras de störningar som finns på processen. I kap 3 behandlas de kriterier man har på regleringen för att denna ska kunna anses tillfredställande. I detta kapitel diskuteras också reglering av syrekoncentrationen m.h.a. en PI-regulator och en on-off regulator. Hur estimeringen av K_a och OUR sker, behandlas i kap 4. Minsta-kvadratmetoden L

används härvid. Vidare ges en förklaring på bias-fenomenet samt förslag på hur man kan undvika detta problem. Den självinställande regulatorn behandlas i kap 5. Bl.a. härleds den minimalvariansstyrlag som användes då regulatorordelen beräknar en styrlag till processen. I kap 6 görs jämförelser mellan PI- och den självinställande regulatorn i det deterministiska och i det stokastiska fallet. Beteckningar på storheter som använts i rapporten förklaras i nomenklaturavsnittet i kap 7. Slutligen ges i två stycken appendix information om vilka program som utnyttjats vid simuleringarna.

För en härledning av modellekvationerna i kap 2 hänvisas till Olsson-Andrews (1978). Vidare skrivs ekvationerna för minsta-kvadratmetoden och minimalvariansstyrningen upp direkt. En djupare genomgång återfinnes i Åström-Wittenmark (1982).

2 PROCESSDYNAMIK

I detta kapitel uppställs de ekvationer som beskriver en luftningsbassängs dynamik. Även förekommande störningar beskrivs här.

2.1 Kort beskrivning av processen

I en luftningsbassäng i ett reningsverk finns bakteriekulturer som har till uppgift att bryta ned inkommande föroreningar. Inkommande vatten utgör därvid föda för dessa bakterier som dels tillväxer, dels hålls vid liv. I den efterkommande sedimenteringen separeras flockar av organismer av t.ex. den vätska som innehåller lösta föroreningar. Efter sedimenteringen återförs en del av slamflödet till luftningsbassängen, medan resten går vidare för eventuell efterbehandling t.ex. kemisk rening.

För att bakterierna ska kunna växa måste de tillföras syre. Detta görs t.ex genom stora luftkompressorer. En för stor syrehalt förbättrar ej den biologiska aktiviteten i bassängen men en energikostnad tillkommer då syrehalten ska ökas. Vid för låg syrehalt blir bakteriernas tillväxthastighet starkt begränsad. Således finns ett referensvärde vid vilken bakterierna växer tillfredställande under maximal energibesparing. Härvid kommer regleringen in som en naturlig del.

2.2 Modellekvationer

Flödet i en aktiv-slamprocess kan beskrivas av fig 2.1

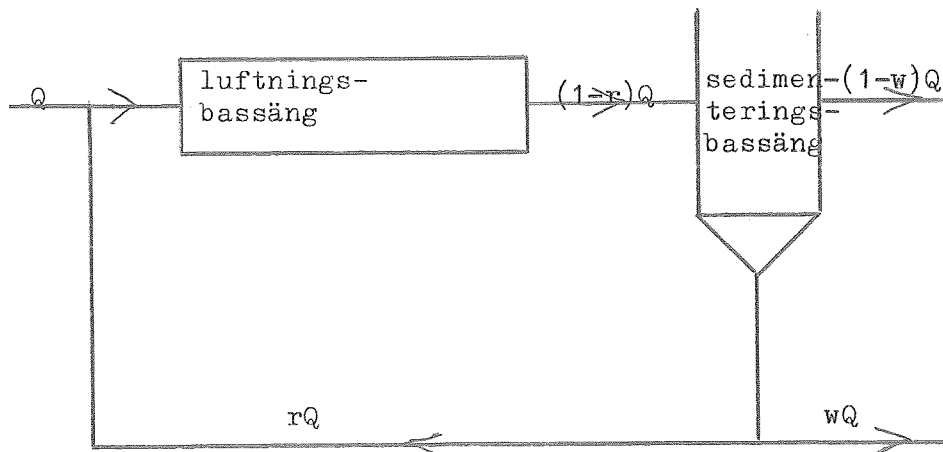


Fig 2.1 Hydrauliken i en aktiv-slamprocess. En del av det inkommande flödet, rQ , bringas att recirkulera.

Ur massbalansen för löst syrehalt, c , erhålles

$$V \frac{dc}{dt} = Q c_{in} - (1+r) Q c + V K_L a (c_s - c) - V k_1 \mu x - V k_2 d_x x \quad (2.1)$$

där de två första termerna är hydrauliktermer, den tredje termen representerar mängden gasformigt syre som övergår i löst syre. De två sista termerna tillkommer p.g.a. bakterierna förbrukar syre när de växer resp. genom endogen respiration. De två sista termerna dividerat med V , är definition på bakteriernas syreupptagningsförmåga, OUR .

$K_L a$ är en funktion av inkommande luftmängd, u . I denna rapport ansättes följande form

$$K_L a = a_1 * u \quad (2.2)$$

För bakteriekoncentrationen, x , erhålles

$$V \frac{dx}{dt} = Q x_{in} - (1+r) Q x + r Q g x + \mu x V - d_x x V \quad (2.3)$$

Normalt förutsätts bakteriehalten in vara noll vilket medför att den första termen försvinner.

Ur massbalans för substrat koncentrationen, s , erhålles

$$V \frac{ds}{dt} = Q s_{in} + r Q s - (1+r) Q s - \frac{1}{Y} \mu x \quad (2.4)$$

där Y i sista termen anger förhållandet mellan den mängd bakterier som bildas och den substratmängd som konsumeras av bakterierna.

Bakteriernas tillväxthastighet, μ , ser ut på följande sätt:

$$\mu = \mu^{\wedge} \frac{s c}{(K_s + s) (K_c + c)} \quad (2.5)$$

Aktiv slamprocessen kan alltså i sin enklaste form beskrivas av ett system bestående av tre icke-linjära differentialekvationer. Dessutom är den bilinjär genom $K_L a$.

2.3 Störningar

Störningar på ett reningsverk förekommer bl.a. genom att substratkoncentrationen i inflödet kan variera. Detta har dels naturliga orsaker så som dygns- och årstidsvariationer, men även industriutsläpp ger ändringar i substratkoncentrationen under några timmar. Även vattenflödet in varierar. En prediktion av vattenflödet kan ibland göras med framgång.

Vid simuleringarna användes följande deterministiska störningar:

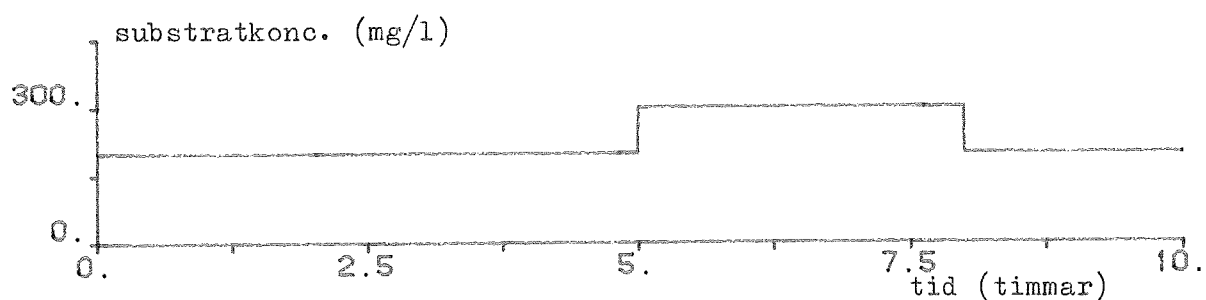


Fig 2.2 Störningen representerar ett kortvarigt industriutsläpp, vilket medför en ändring i inkommande substratkoncentration.

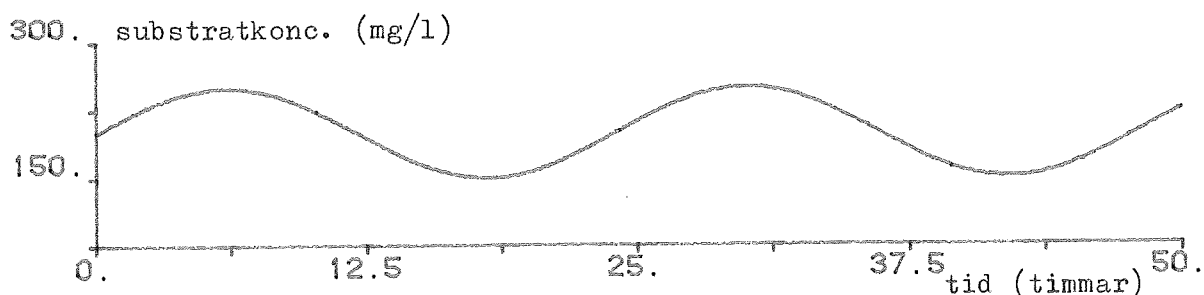


Fig 2.3 Störningen representerar en dygnsvariation i substrathalten s. Periodtiden är ett dygn.

Förutom de deterministiska störningarna överlagras på den lösta syrehalten, c, ett mätbrus simulerat av en brusgenerator. Bruset antages normalfördelat med medelvärde noll.

3 ENKEL REGLERING AV SYREKONCENTRATIONEN

Kriterier på en tillfredställande reglering av processen diskuteras i detta kapitel. Vidare behandlas reglering m.h.a. en PI-regulator och en on-off regulator.

3.1 Kriterier på en bra reglering

För att regleringen ska vara tillfredställande, krävs att vattenkvaliteten naturligtvis ska vara på föreskriven nivå enligt lagstiftningen, samt att detta ska uppnås med minsta möjliga kostnad. Bakterierna skall bl.a. växa tillfredställande d.v.s. syrekonzentrationen ska ligga på ett optimalt referensvärde.

Kostnaderna representeras av följande enkla modell

$$\frac{dK_r}{dt} = u \quad (3.1)$$

vilken innebär att kostnaderna är proportionella mot tillförd luftmängd.

För att slitaget på maskinerna ska minimeras bör styrsignalen, u , vara så jämn som möjligt. Vidare bör kraftiga variationer i c undvikas, så att gynnsamma biologiska villkor skapas.

3.2 On-off reglering

Denna metod innebär att kompressorerna slås av om c överstiger ett visst värde och slås på om c understiger ett annat värde.

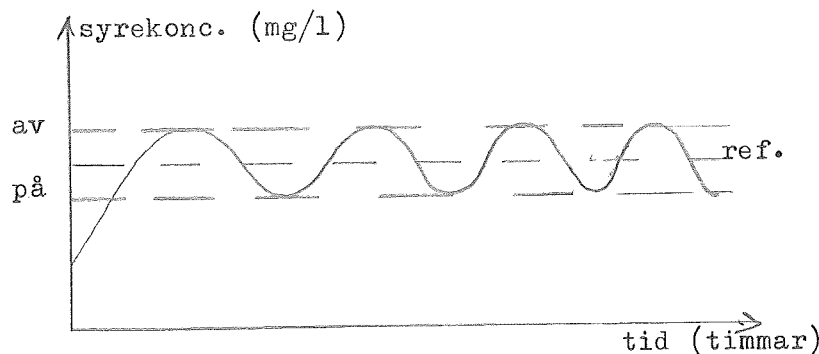


Fig 3.1 Då felet, $c - c_{ref}$, vid on-off regleringen, är större resp. mindre än ett visst värde, slås luftkompressorn av resp. på.

I fig (3.2) visas resultatet av on-off regleringen. Det finns ingen störning på systemet förutom att c har ett initialfel. Det framgår att regleringen ej är särskilt bra. F.ö. erhöles bästa regleringen med $c_{max}=2.3$ och $c_{min}=1.8$. U ligger mellan 0 och 1 dvs K_a är antingen 1 eller 2.

(referensvärdet i löst syrekonzentration sattes till 2)

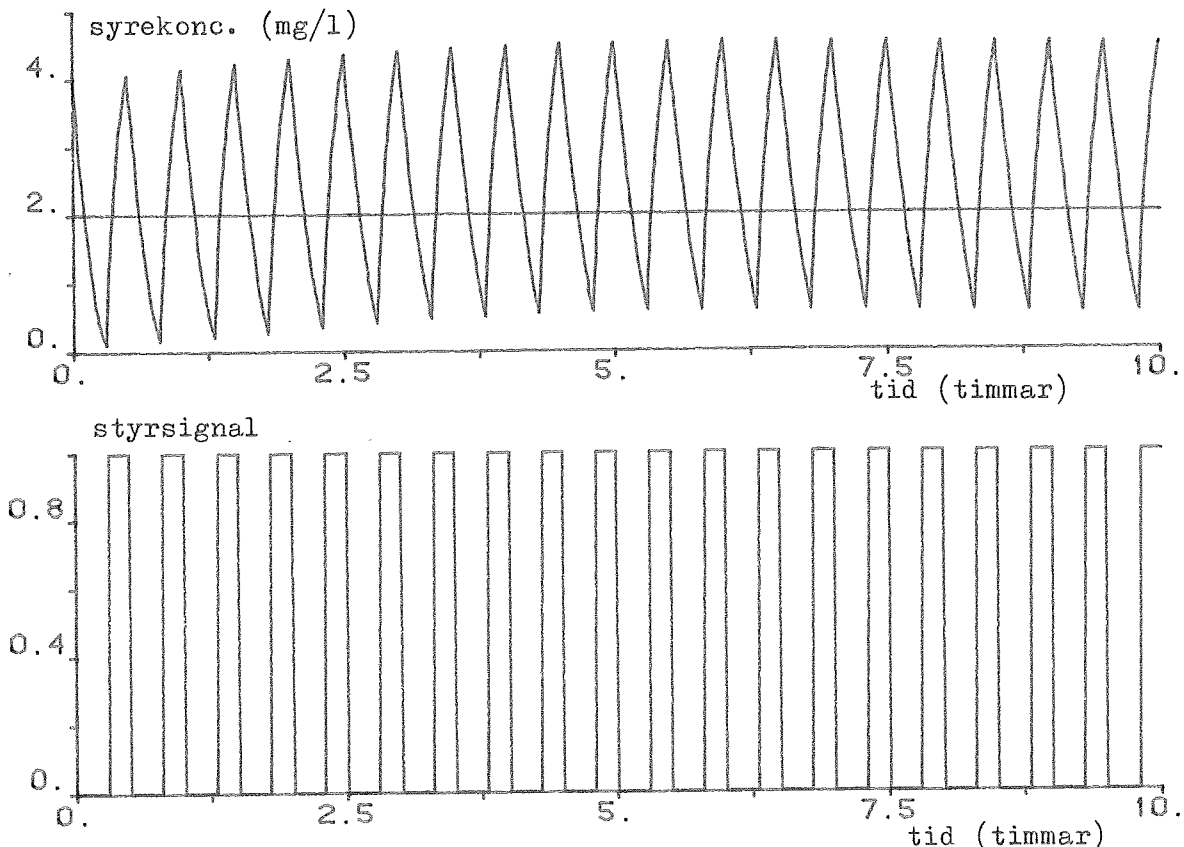


Fig 3.2 Löst syrehalt, c , med motsvarande styrsignal, u , vid on-off reglering. Störningen består av ett initialfel i c .

3.3 PI-reglering

Den datorbaserade PI-regulatorn arbetar enligt följande:

$$e(k) = c_{ref}(k) - c(k)$$

$$u(k) = k(e(k) + i(k-1))$$

$$i(k) = i(k-1) + h e(k) / t_i$$

där e =reglerfelet, c =löst syrehalt, u =inströmmad luftmängd
 k =företärknigen, h =samplingstiden, t_i =integrationstiden och
 i =integrationsdelen i den kontinuerliga PI-regulatorn.

Samplingstiden h sattes till 0.1 h. De kortaste tidskonstanterna i aktiv-slamprocessen är på ca 10 min. Vidare får man se upp så att regulatorn ej mätas (reset-windup).

Följande kriterier användes för att ställa in optimala regulatorparametrar:

1. felet i c ska minimeras
2. förändringarna i u ska minimeras
3. integratoruppvridning ska undvikas

Den bästa regulatorn enligt ovanstående kriterier, erhöles för $k=1$ och $t_i=0.5$.

I följande figurer börjar tidsaxeln vid 4 resp. 10 timmar (stegstörning resp dygnsstörning), för att få bort eventuella ovidkommande transienter i början. Stegstörningen i inkommande substratkoncentration verkar mellan 5 och 8 timmar.

I fig (3.3) och fig(3.4) visas resultatet med de deterministiska störningarna.

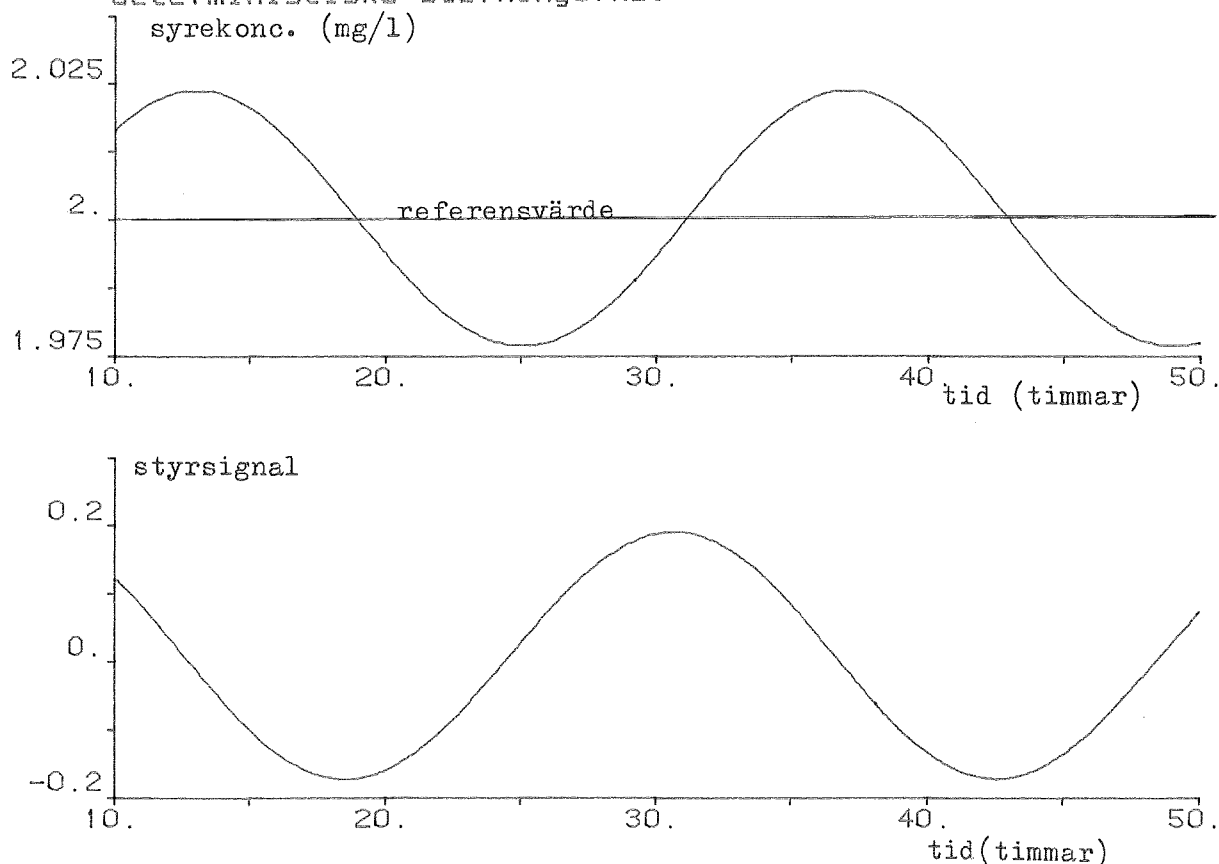


Fig 3.3 Löst syrehalt, c , med tillhörande styrsignal, u , då störningen på systemet är en dygnsvariation i inkommande substratkoncentration, ($k=1$, $t_i=0.5$).

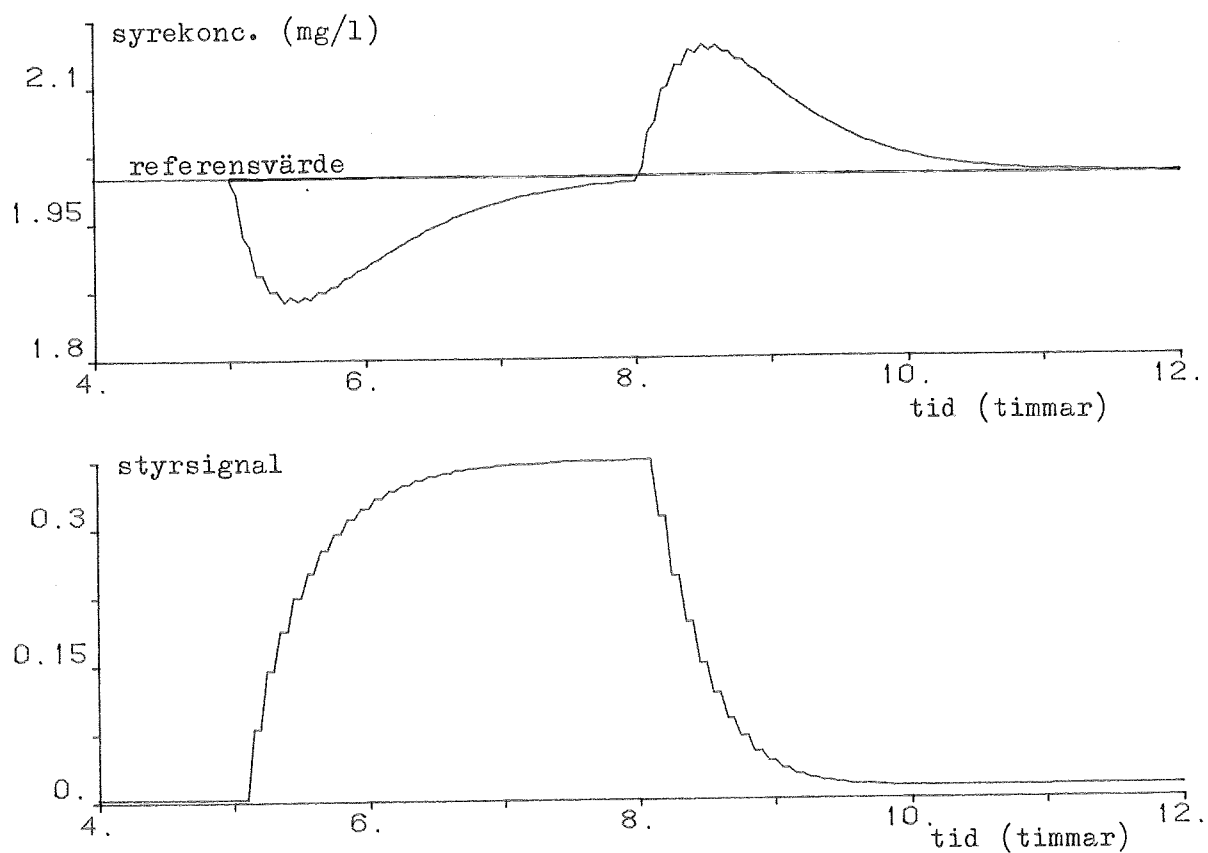


Fig 3.4 Löst syrehalt, c , med tillhörande styrsignal, u , då störningen på systemet är en stegstörning i inkommande substratkoncentration, ($k=1$, $t_i=0.5$).

Inverkan av parameterändringar i regulatorn framgår av fig 3.5 och fig 3.6.

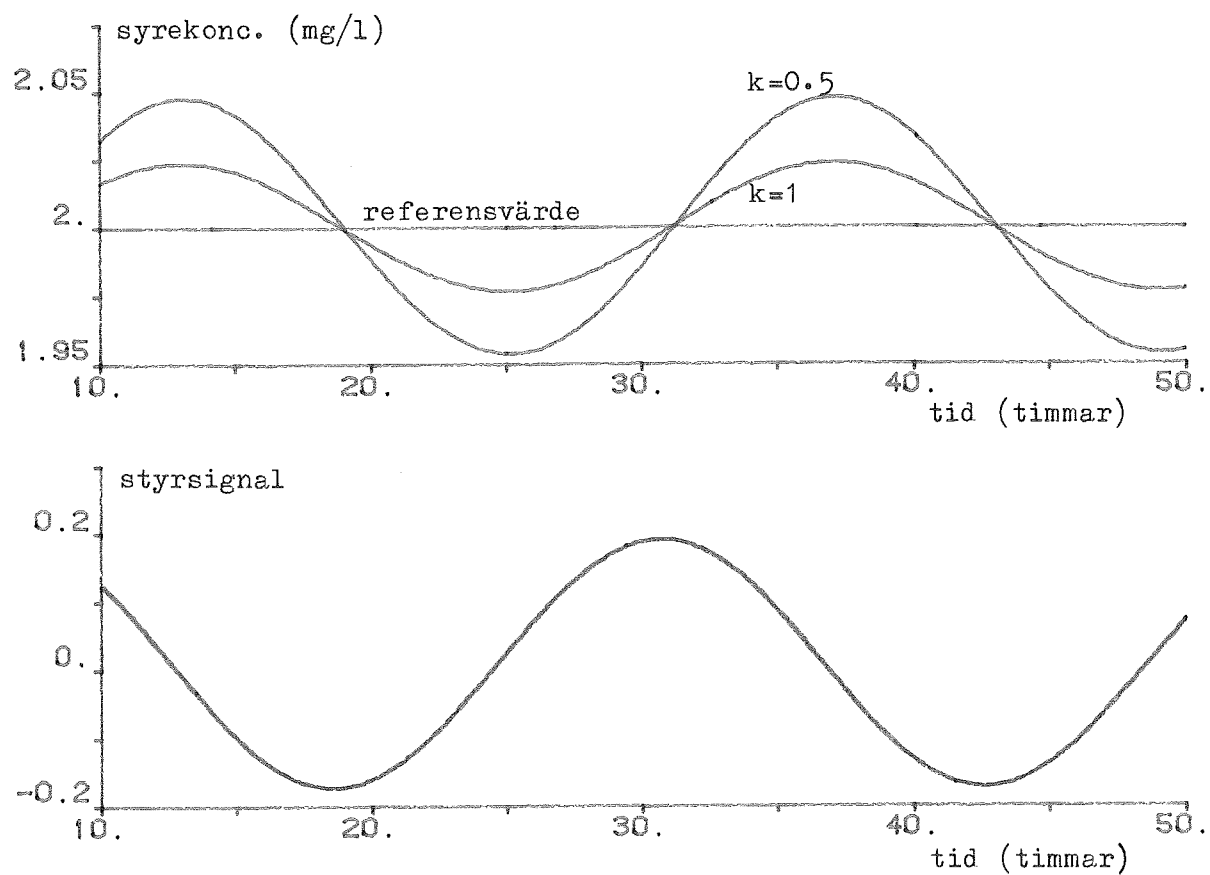


Fig 3.5 Löst syrehalt, c , med motsvarande styrsignal, u , då störningen är en dygnsvariation i inkommande substratkoncentration, ($k=1$ resp. 0.5 , $t_i=0.5$).

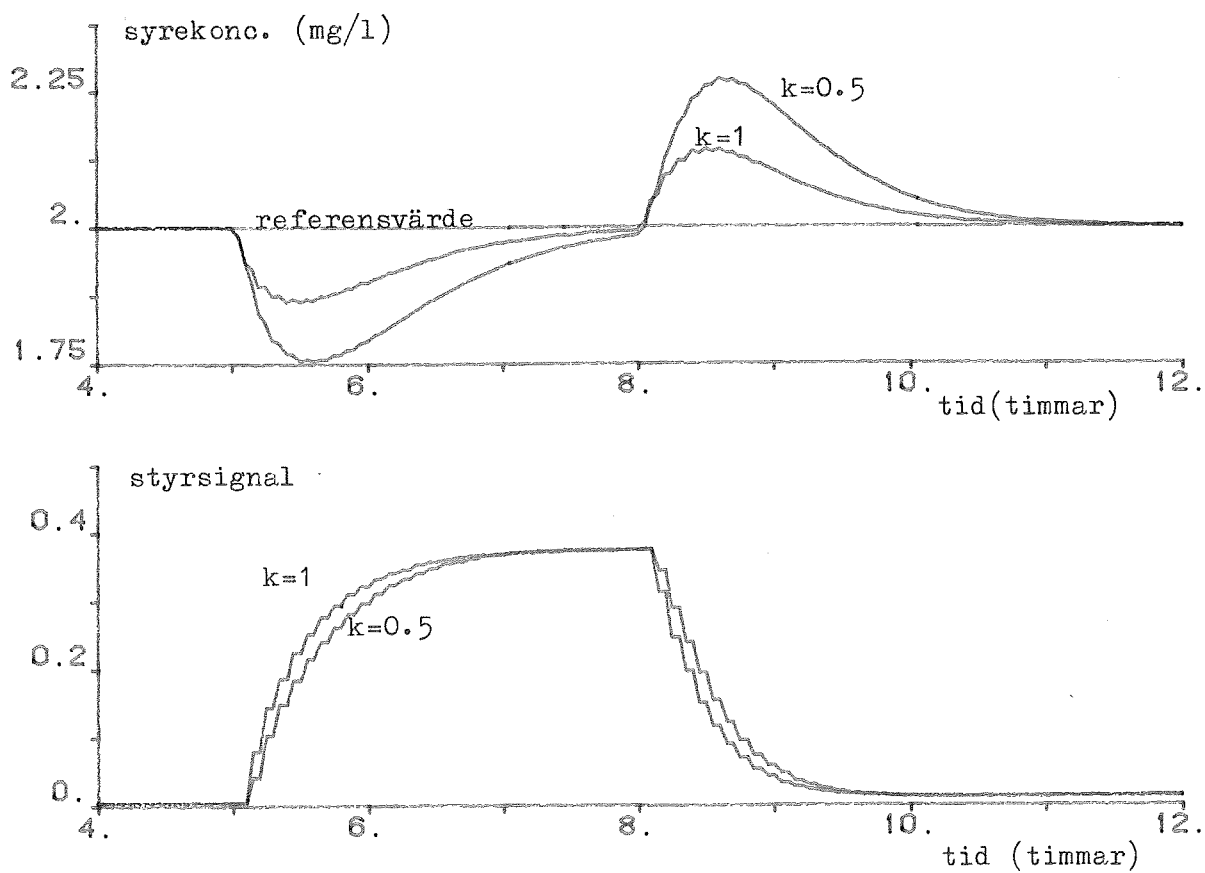


Fig 3.6 Löst syrehalt, c , med motsvarande styrsignal u , då störningen är en stegstörning i inkommande substratkoncentration, ($k=1$ resp. 0.5 , $t_i=0.5$).

Det bör observeras hur styrsignalen, u , ser ut i en tidsdiskret PI-regulator. Vid $k=1.2$ blir systemet instabilt.

I fig 3.7 och fig 3.8 visas resultaten i fallet då stokastiskt mätbrus i c är överlagrat på de deterministiska störningarna.

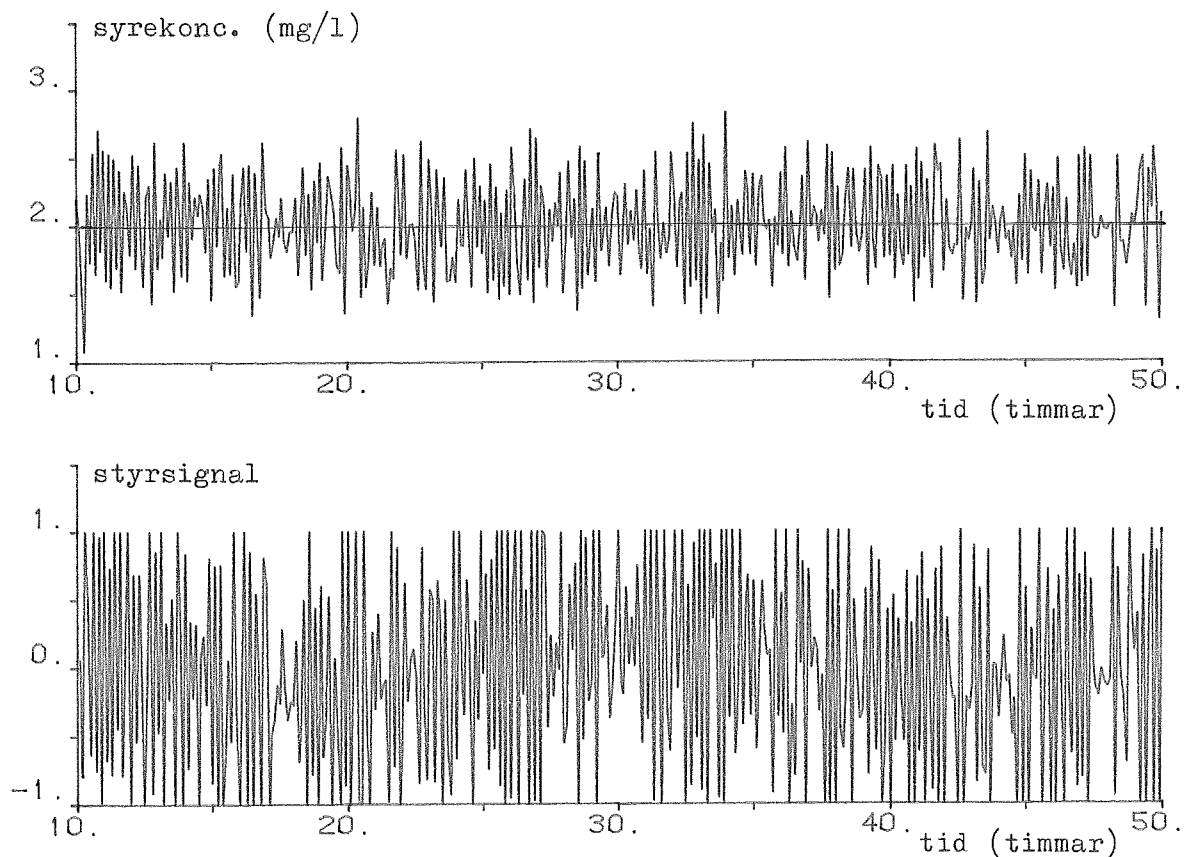


Fig 3.7 Löst syrehalt, c , med motsvarande styrsignal, u , då störningen utgörs av en dygnsvariation i inkommande substratkoncentration plus mätbrus i c med variansen 0.25, ($k=1$, $t_i=0.5$).

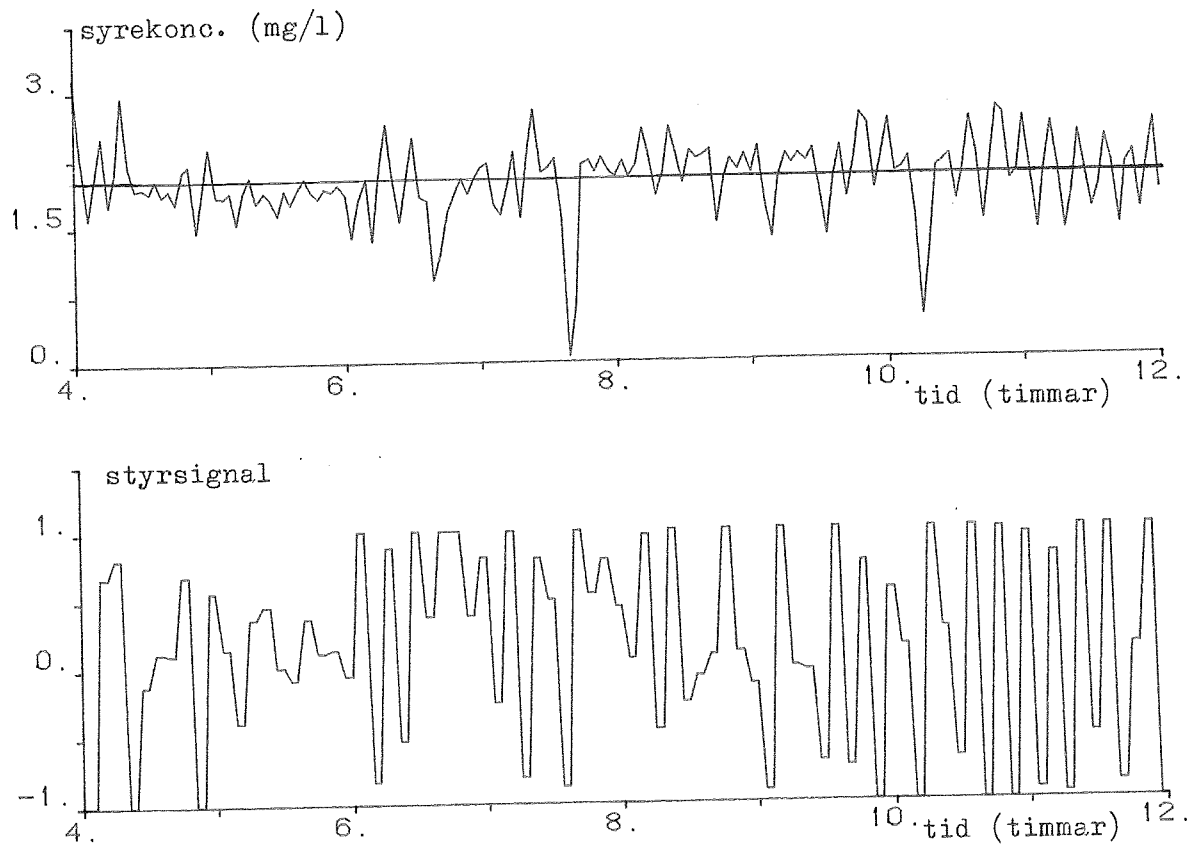


Fig 3.8 Löst syrehalt, c , med motsvarande styrsignal, u , då störningen utgörs av en stegstörning i inkommande substratkoncentration plus mätbrus i c med variansen 0.25, ($k=1$, $t_i=0.5$).

3.4 Slutsatser

I fallet med deterministiska störningar fungerar PI-regulatorn bra. I det stokastiska fallet har syrekoncentrationen, c , en varians på ca. 0.25. Dessutom mättar styrsignalen relativt ofta. För vidare diskussion av resultaten hänvisas till kap 6.

On-off reglering bör försöka undvikas i största möjliga utsträckning.

4 ESTIMERING AV K_L OCH OUR

I detta kapitel diskuteras olika estimatorer samt problem förknippade med estimeringen, så som t.ex. bias.

4.1 Problemformulering

I vår process är K_L och OUR svårsmätbara. P.g.a. detta faktum är det angeläget att kunna estimeras parametrarna ur den information som fås ur lösta syrehalten, c . Genom estimaten erhålls viktig information om den biologiska aktiviteten i systemet. Vidare krävs någon form av estimator i en självinställande regulator.

Som modellekvation används ekv 2.1. Sampling av denna ger (Euler approximation av första ordningen)

$$c(t+h) = c(t) - \frac{h}{V} Q [(1+r) c(t) - c_{in}] - a_1 h u [c(t) - c_s] - k_4 h \quad (4.1)$$

där h =samplingstiden och k_4 =OUR.

En metod att estimeras a_1 och k_4 är m.h.a. minsta-kvadratmetoden.

4.2 Minsta-kvadrat lösningen

Skriv om ekv. 4.1 på följande form:

$$c(t+h) = \varphi^T \theta_0 \quad (4.2)$$

Identifiering med ekv. 4.2 ger följande:

$$\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)^T = (c, Q((1+r)c - c_{in}), u(c - c_s), 1)^T \quad (4.3)$$

och

$$\theta_0 = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T = (1, -\frac{h}{V}, -a_1 h, k_4)^T \quad (4.4)$$

Minsta kvadratlösningen lyder:

$$\hat{\theta}(N+1) = \hat{\theta}(N) + K(N) [c(N+1) - \hat{\theta}(N)^T \varphi(N+1)]$$

där

$$K(N) = P(N) \varphi(N+1) [\lambda + \varphi(N+1)^T P(N) \varphi(N+1)]^{-1}$$

$$P(N+1) = [P(N) - P(N) \varphi(N+1) [\lambda + \varphi(N+1)^T P(N) \varphi(N+1)]^{-1} * \\ * \varphi(N+1) P(N)] 1/\lambda$$

där λ =glömskefaktor, P =kovariansmatrisen

Nu observeras att θ_1 och θ_2 är kända och dessa behöver

således inte estimeras. Detta faktum utnyttjas i simuleringarna. F.ö är P -matrisen alltid en symmetrisk matris. I simuleringarna ansättes $\alpha * I$, där I =enhetsmatrisen och α är en skalär. (α sattes till 1)

4.3 Uppskattning av två parametrar på en gång

I fig. 4.1 och 4.2 visas resultatet då båda parametrarna skattas på en gång. Glömskefaktorn har satts till 0.995 och samplingstiden till 0.01 h.

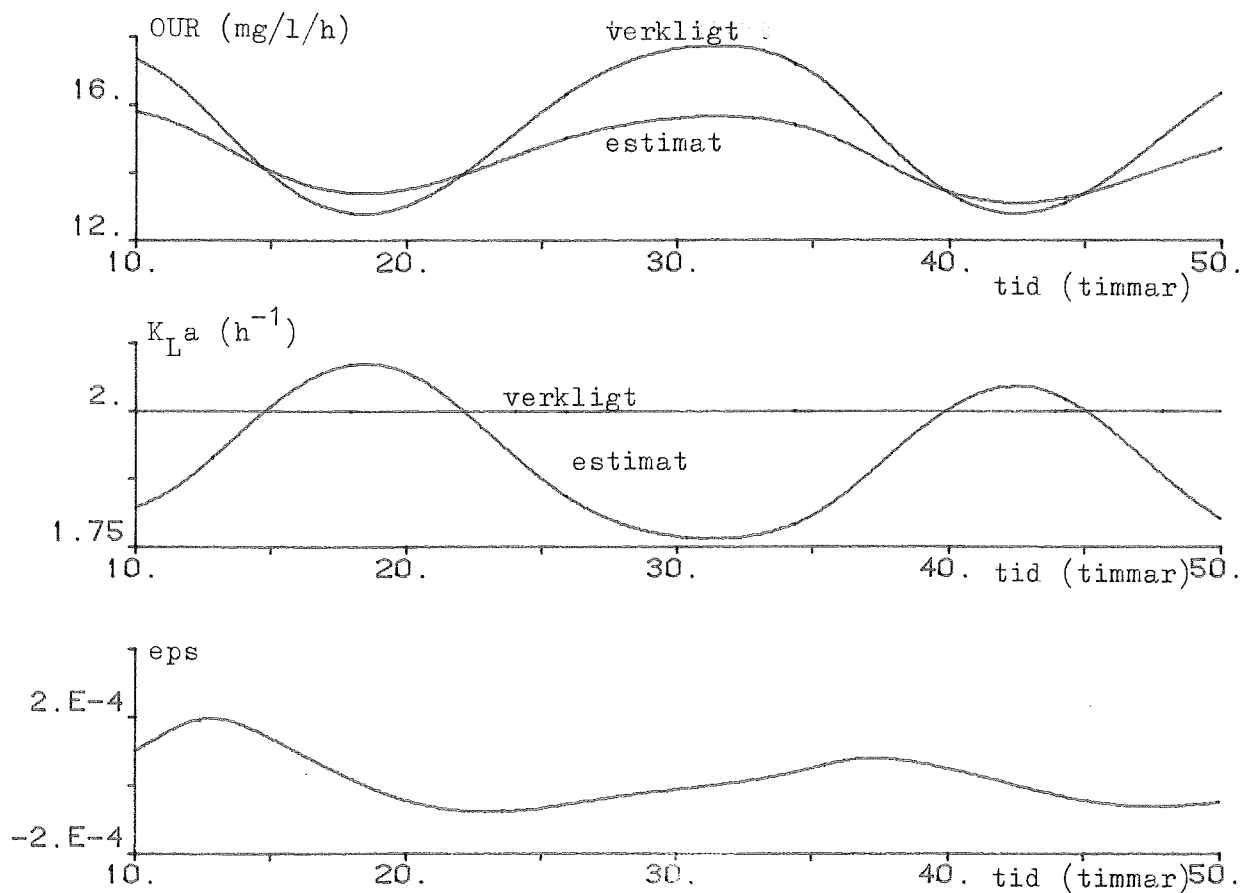


Fig 4.1 $K_L a$ och OUR skattas samtidigt, då systemet påverkas

av en dygnsstörning i substratkoncentrationen.
Totala skattningsfelet, eps, visas också. ($\lambda=0.995$)

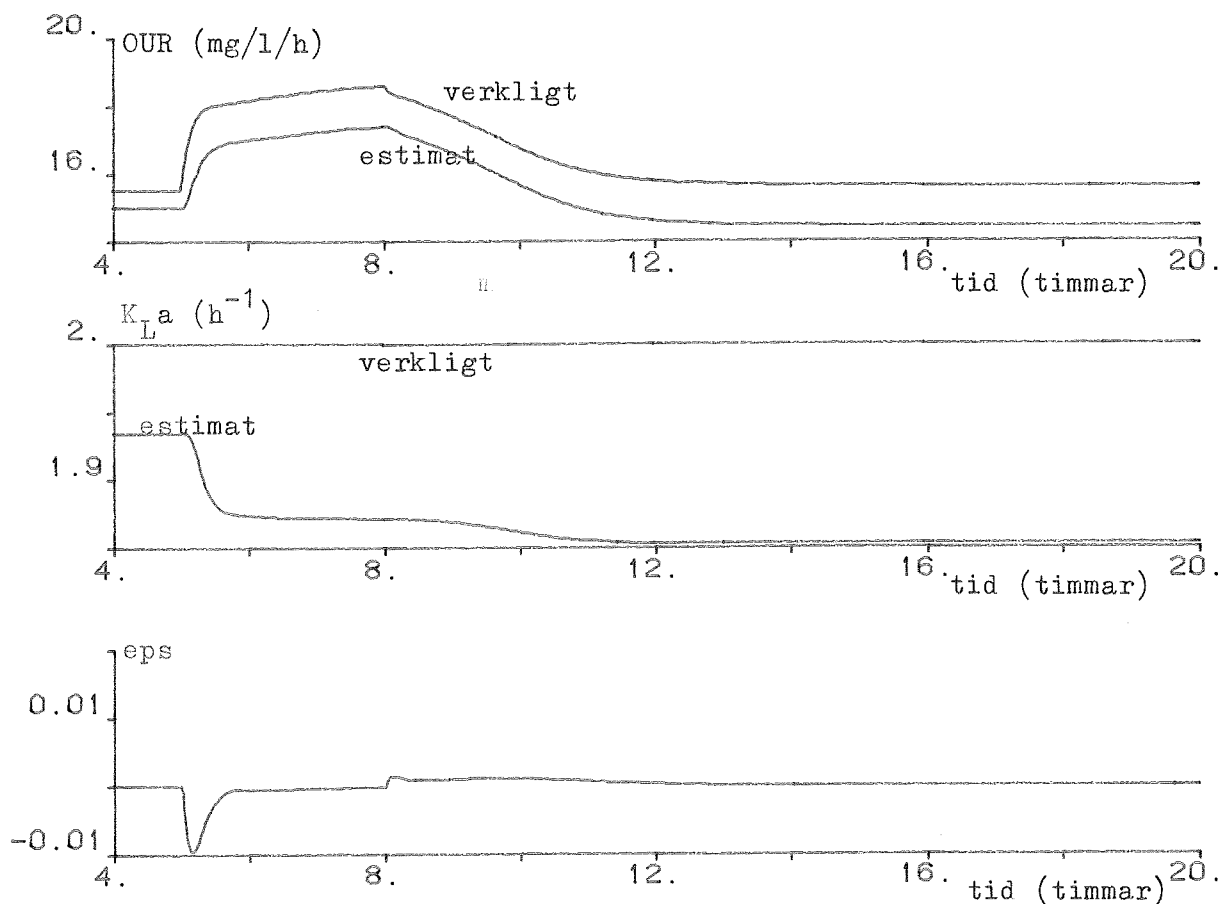


Fig 4.2 $K_L a$ och OUR skattas samtidigt, då systemet påverkas av en stegstörning i substratkoncentrationen; verkande mellan 5 och 8 timmar. Totala skattningsfelet, eps, visas också. ($\lambda=0.995$)

Ur ovanstående simuleringar framgår, att vi får stora fel i estimaten, trots att totala felet, eps, är litet. Att eps blir litet, betyder att $K_L a$ och OUR kompenserar ut varandra

vid varje tidpunkt. För att undvika detta fenomen, inför vi olika glömskefaktorer i estimatorn. Genom detta förfarande, tas hänsyn till dynamiken i resp. parameter. Hos OUR rör det sig om ett par timmar medan hos $K_L a$ rör det sig om dygn. För

$K_L a$ sätts glömskefaktorn till 0.995 och för OUR till 0.5.

Resultaten av estimeringarna visas i fig. 4.3 och i fig 4.4 då de deterministiska störningarna verkar på systemet.

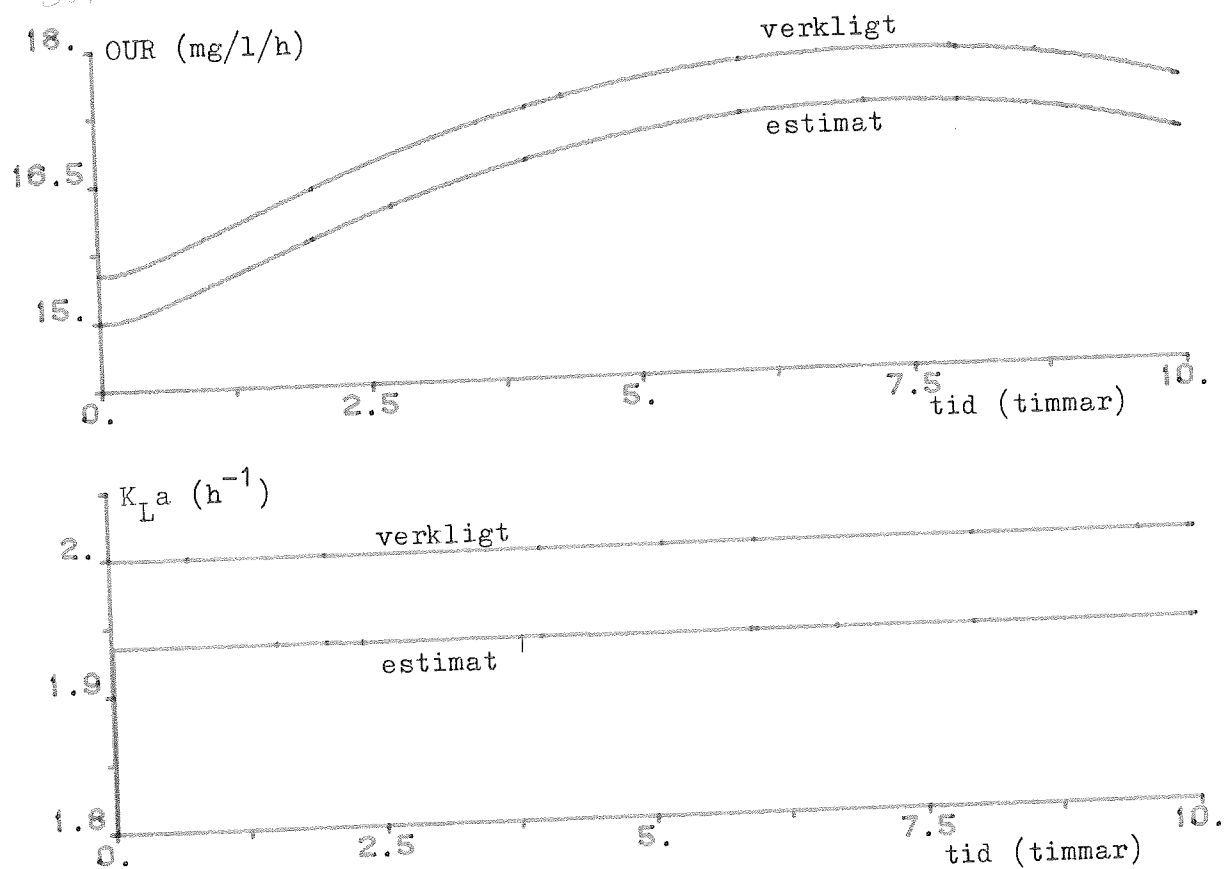


Fig 4.3 K_{La} och OUR skattas samtidigt, då systemet påverkas av en dygnsstörning i substratkoncentrationen.
 $(\lambda_{(KLa)} = 0.995, \lambda_{(OUR)} = 0.5)$

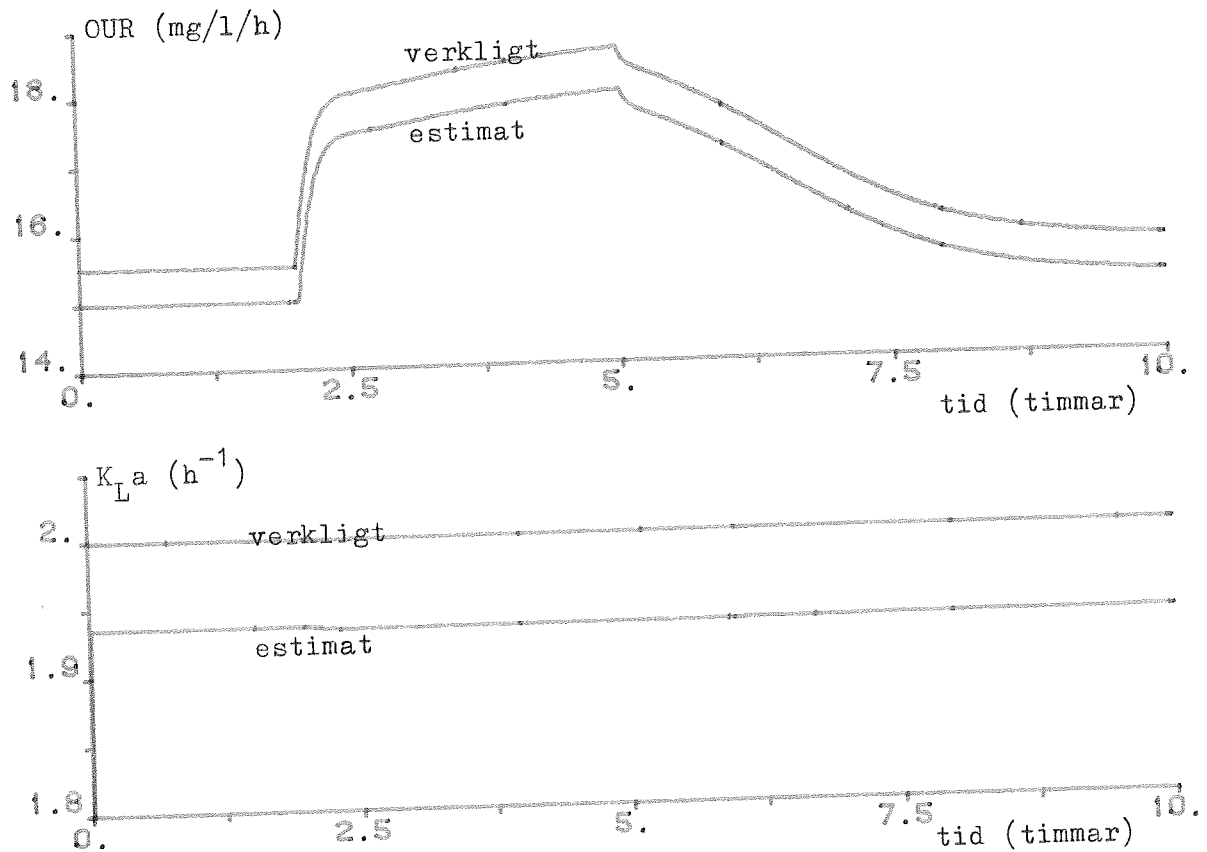


Fig 4.4 $K_L a$ och OUR skattas samtidigt, då systemet påverkas av en stegstörning i substratkoncentrationen, verkande mellan 2 och 5 timmar. ($\lambda_{(KLa)} = 0.995$, $\lambda_{(OUR)} = 0.5$)

Som synes kvarstår bias-problemet, men en avsevärd förbättring har skett, då hänsyn tas till snabbheten i de båda parametrarna. Nästa steg blir att under en kort tid lägga in en sådan störning, att endast den ena parametern estimeras medan den andra är konstant, under ett kort tidsögonblick. En sådan störning bör erhållas, om luftflödet in ändras, ty styrsignalen u , ingår i $K_L a$ direkt.

Följande störning läggs på systemet:

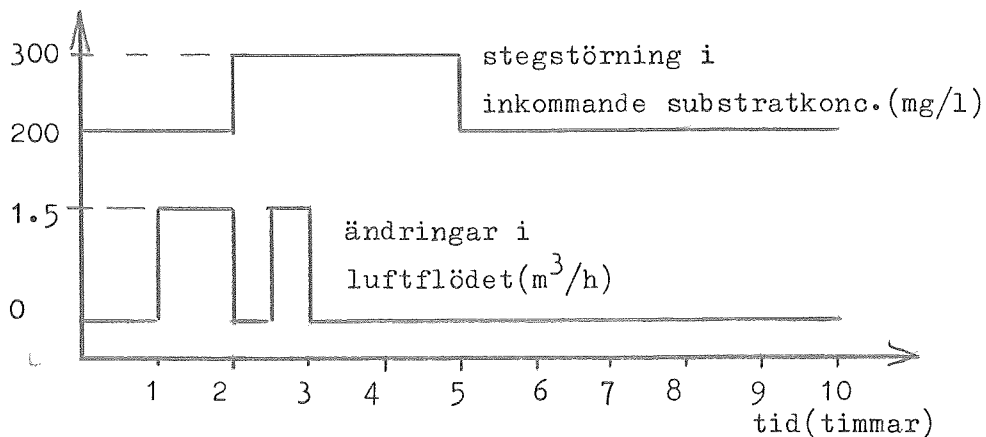


Fig 4.5 Störningen på systemet, vilken består dels i en steg
ändring i substratkoncentrationen, dels ändring i
luftflödet, u. ($\lambda_{(KLa)} = 0.995$, $\lambda_{(OUR)} = 0.5$)

Resultatet visas i figurerna 4.6 och 4.7.

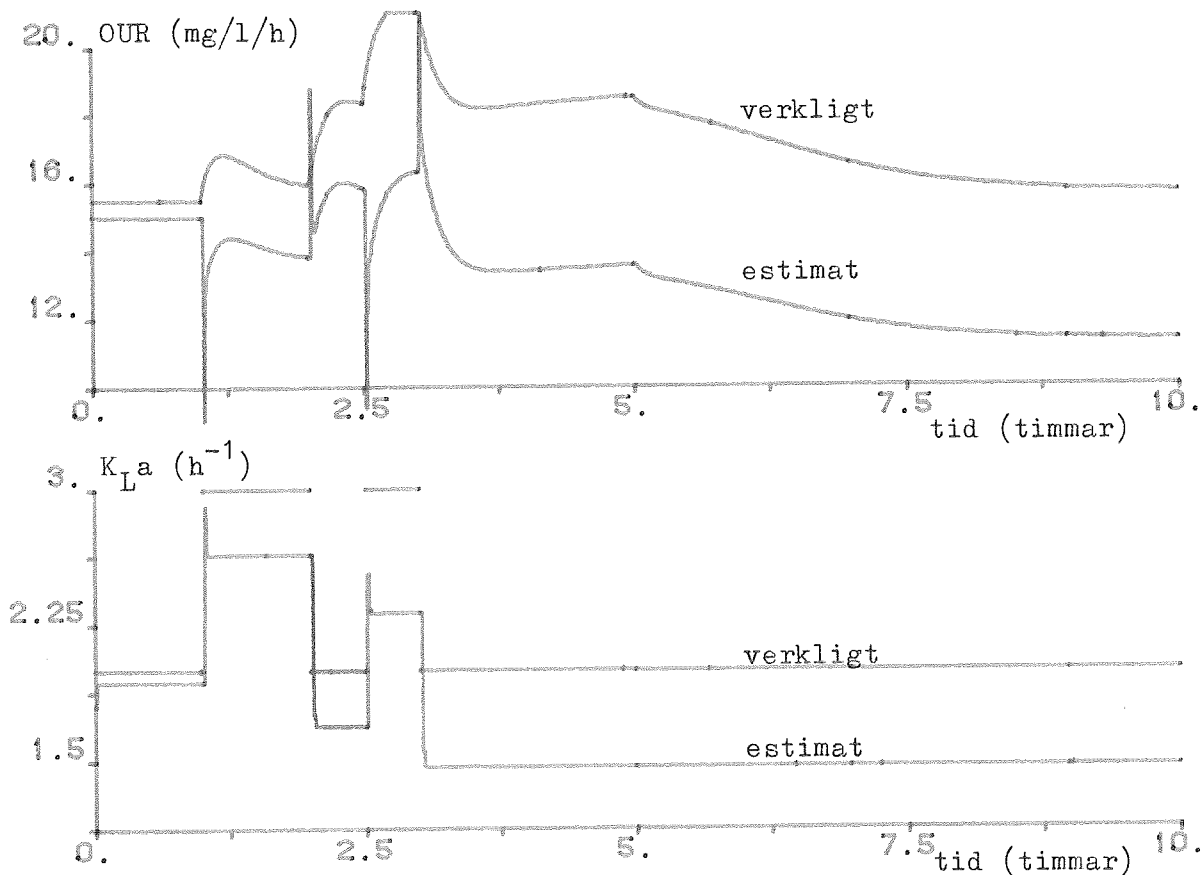


Fig 4.6 Skattningen av K_{La} och OUR då systemet påverkas av
den komplexa störningen i fig 4.7. ($\lambda_{(KLa)} = 0.995$,
 $\lambda_{(OUR)} = 0.5$)

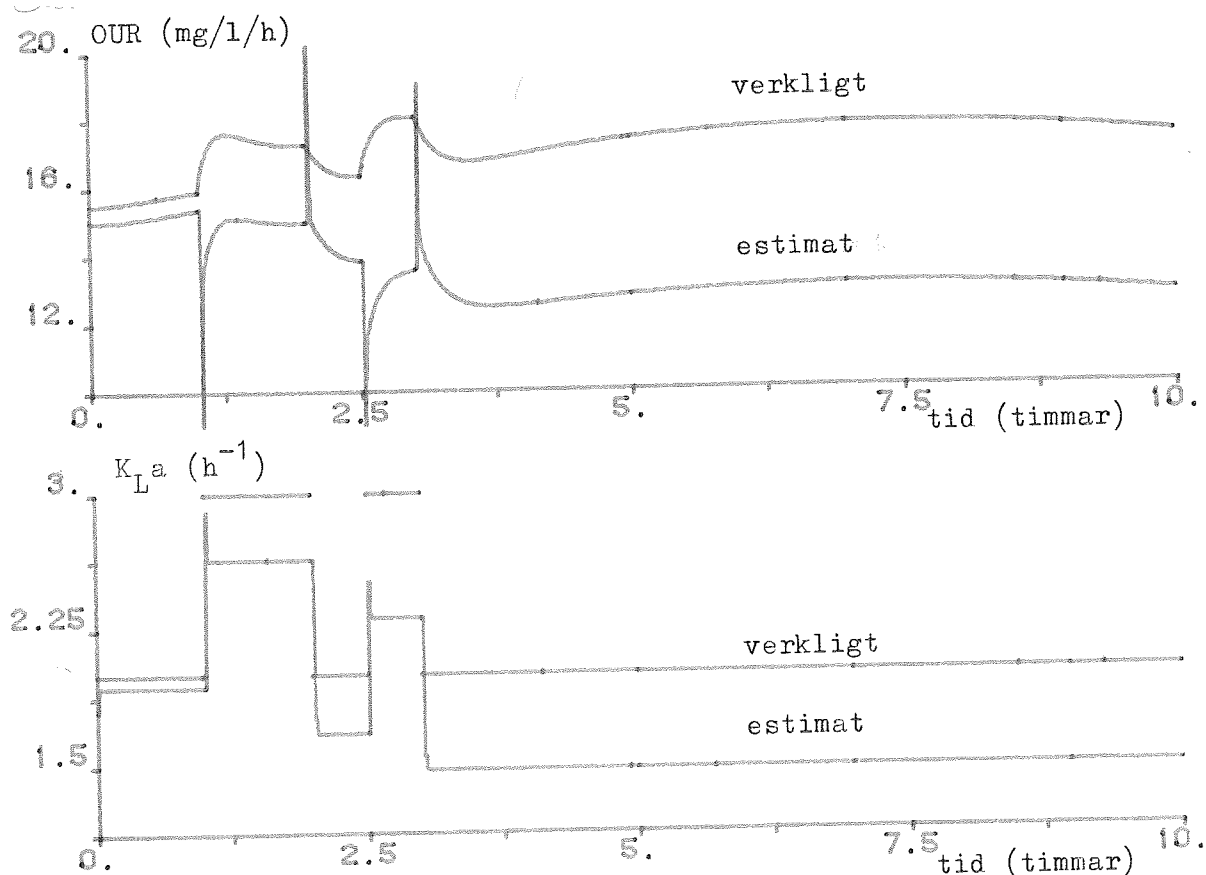


Fig 4.7 Skattningen av $K_L a$ och OUR då systemet påverkas av en dygnsvariation i substratkoncentrationen och luftflödesändringarna enligt fig 4.5.

Fortfarande kvarstår bias-problemet men det bör noteras, att estimaten följer förändringar bra, i de teoretiska parametervärdena.

Ett problem då glömskefaktorerna är små utgör de s.k. burst-outs i komponenterna, i P-matrisen. Detta fenomen uppträder då processen är dåligt exciterad. Ett sätt att undvika detta problem är, att då ej variationer i form av störningar verkar på systemet, sätta glömskefaktorerna till ett. Glömskefaktorer mindre än ett har ju den förmågan att kunna följa snabba ändringar, medan minnesfunktionen försämrats avsevärt vid stationära förhållanden.

Ett sätt att komma till rätta med problemet är att införa villkor på residualerna. Om dessa är mindre än ett visst föreskrivet litet tal, sättes glömskefaktorerna lika med ett.

4.4 Uppskattning av en parameter i taget

Nästa steg att komma vidare då det gäller undvikandet av bias-problemet är att estimeras en parameter åt gången, medan den andre sätts konstant och antages känd. Resultaten i det deterministiska fallet framgår av nedanstående figurer.

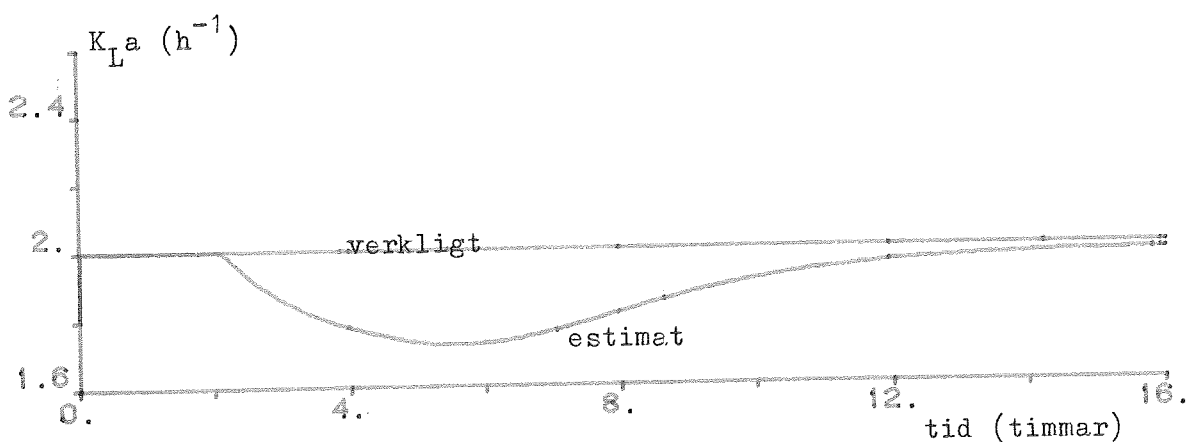
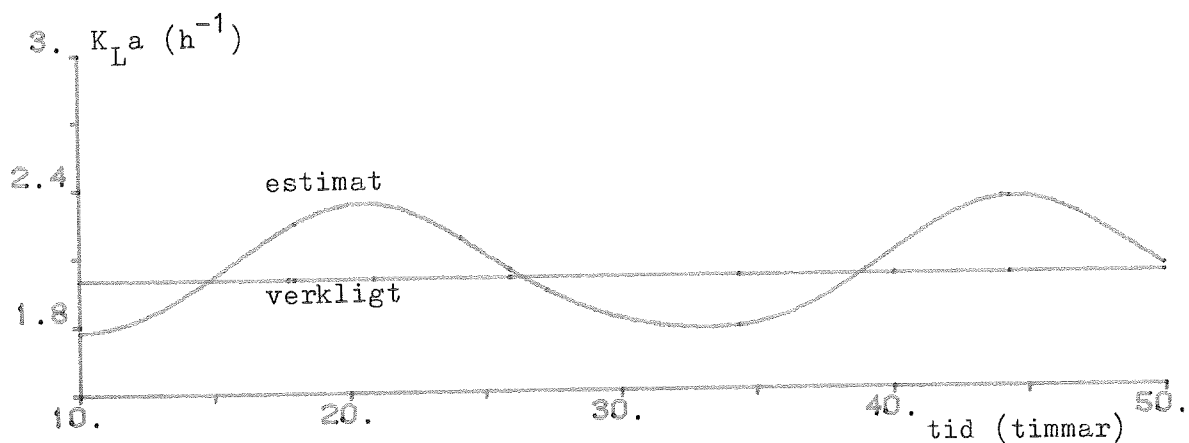


Fig 4.8 Skattning av $K_L a$ då OUR antogs känd och konstant. I

övre bilden finns en dygnsstörning i substratkoncentrationen; i den nedre en stegstörning i substratkoncentrationen verkande mellan 5 och 8 timmar. ($\lambda=0.995$)

Det framgår att estimatet av $K_L a$ blir bra i båda fallen. Att $K_L a$ ej blir konstant beror på att dynamiken, motsvarande OUR-termen, har överförts till $K_L a$ -termen. Om nu mätbrus tillförs systemet i ovan resp. fall, framgår resultatet av fig 4.2.

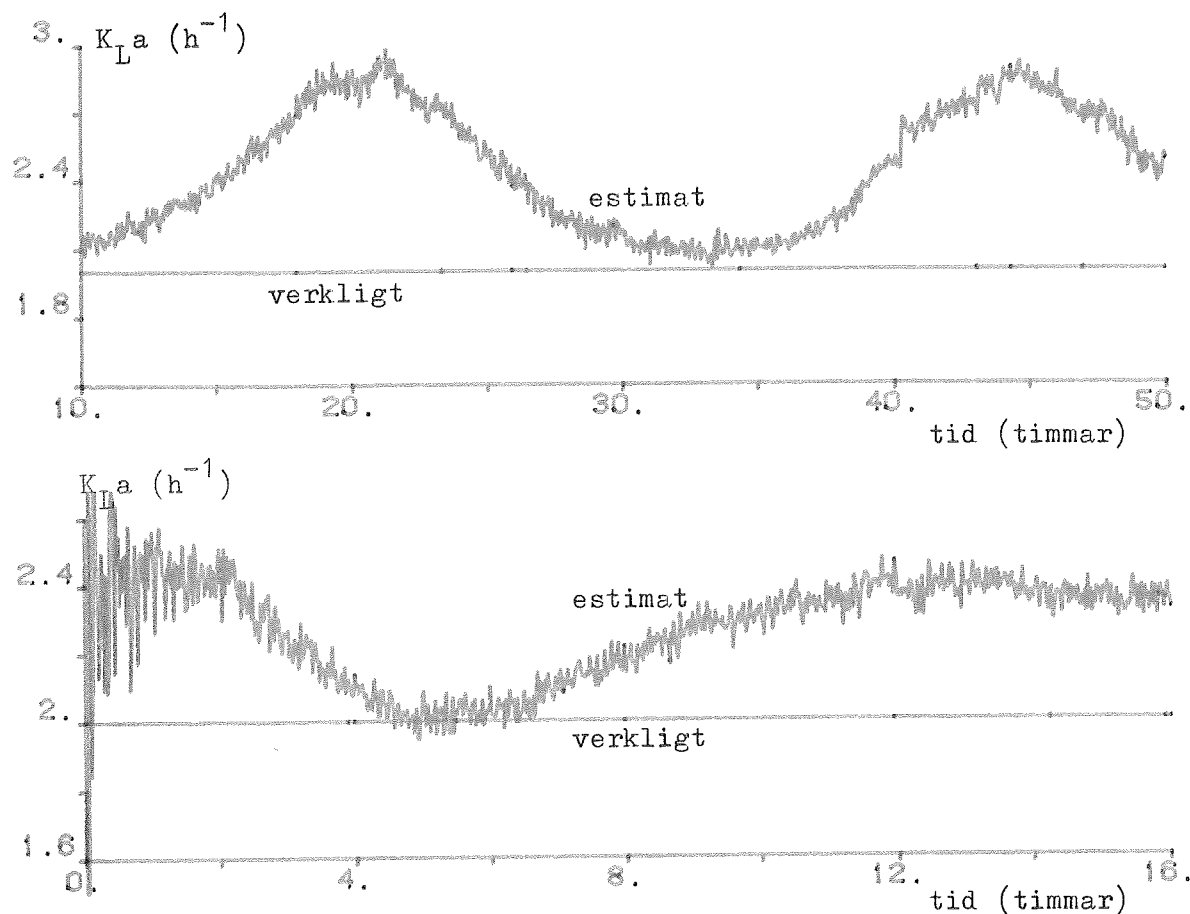


Fig 4.9 Skattning av $K_L a$ då OUR antogs känd och konstant. I

den övre bilden finns en dygnstörning i substratkoncentrationen; i den nedre en stegstörning i substratkoncentrationen verkande mellan 5 och 8 timmar. Övanpå resp. deterministiska störning finns bruset i c , med variansen 0.25.

Då både deterministiska- och stokastiska störningar verkar på systemet, fås i estimatet av $K_L a$, ett bias.

I de nästkommande simuleringarna antages $K_L a$ känd och konstant medan OUR uppskattas.

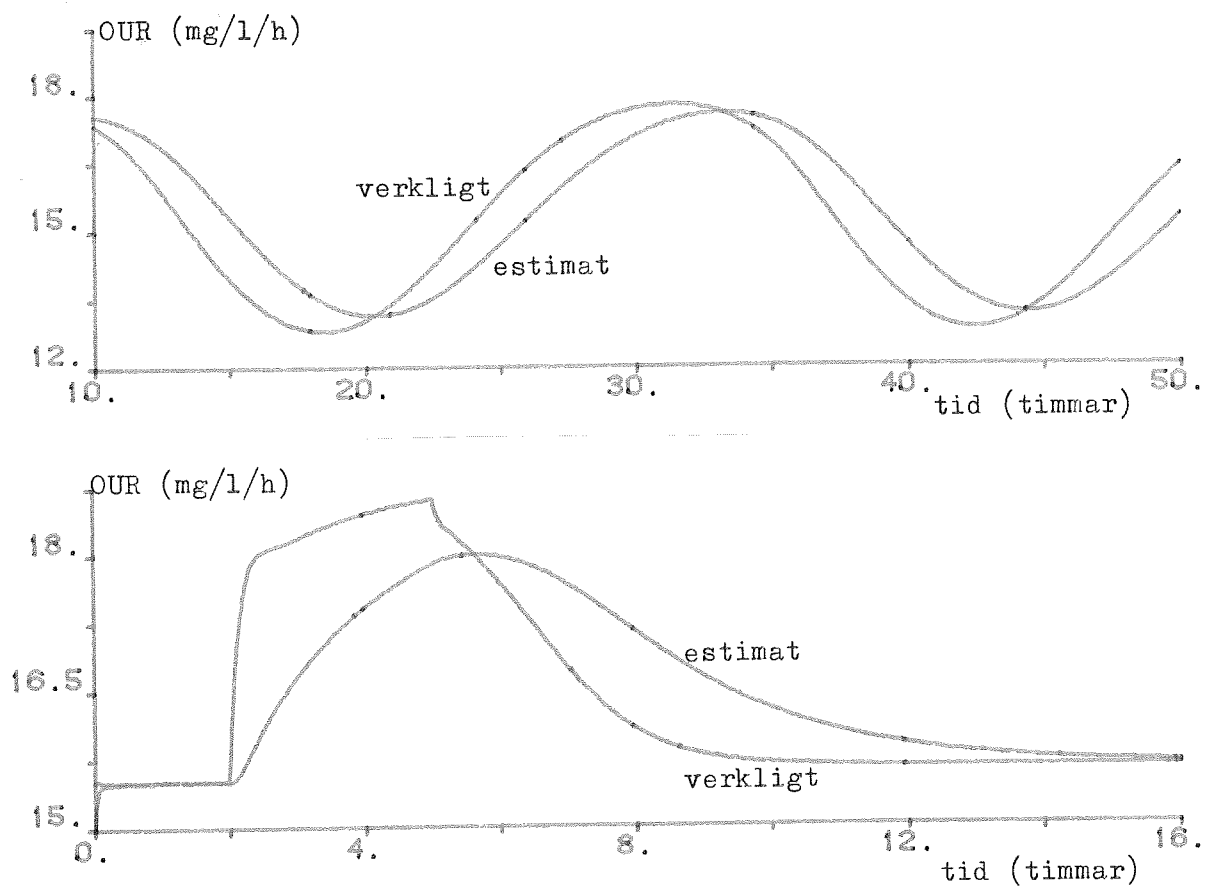


Fig 4.10 Skattning av OUR, då K_a antogs känd och konstant.

I den övre bilden finns en dygnsstörning i substratkoncentrationen, i den nedre en stegstörning i substratkoncentrationen, verkande mellan 5 och 8 timmar.

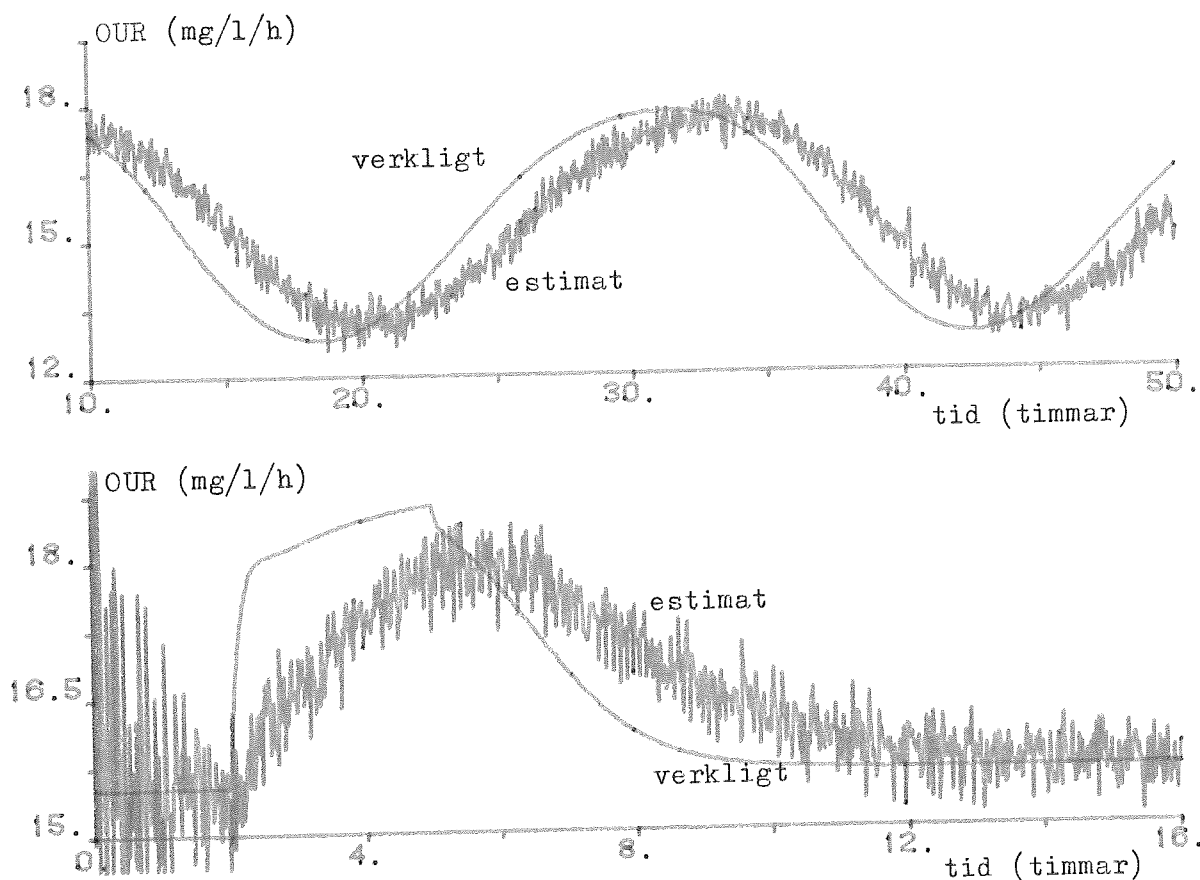


Fig 4.11 Skattningen av OUR, då K_a antogs känd och L

konstant. I den övre bilden finns en dygnsstörning i substratkoncentrationen, i den nedre en stegstörning i substratkoncentrationen verkande mellan 5 och 8 timmar. Övanpå resp. deterministiska störning finns brus i c , vilket har variansen 0.25.

Ur figurerna 4.10 och 4.11 framgår att estimaten är bra i både det deterministiska- och stokastiska fallet, förutom en fasförskjutning på ca 1.5h. Denna är emellertid inom tolerabla gränser.

Det bör påpekas att inga problem med burst-outs förekom i fallet när bara en parameter skattades. Således simulerades processen med $\lambda=0.995$ hela tiden.

4.5 Slutsatser

För att få en bra estimator, i vilken båda parametrarna skattas samtidigt, måste en av parametrarna kalibreras externt. Detta beror på att den ena parametern förekommer i form av konstant (bias) i syreekvationen. En avvikelse i en estimerad parameter kan därför korrigeras med en avvikelse i en annan parameter.

5 SJÄLVINSTÄLLANDE REGULATOR

I detta kapitel beskrivs en självinställande regulator, baserad på estimatorerna i kap 4.

5.1 Formulering av ekvationer

En självinställare innehåller dels en estimator som uppskattar de okända parametrarna i processen, dels en regulator som beräknar en styrlag på någon form. Situationen åskådliggörs i fig 5.1.

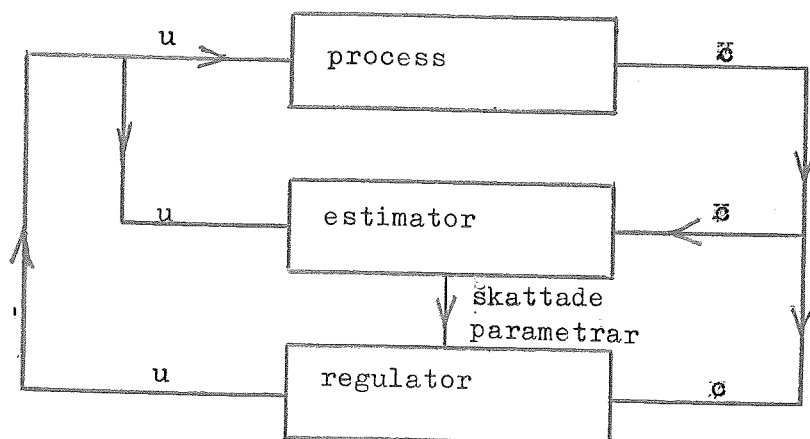


Fig 5.1 Informationsflödet i en självinställare, där c är utsignalen från processen och u är den beräknade styrsignalen.

Estimatoren som användes är den som utvecklades i kap. 4. Regulatorn beräknar en styrlag enligt ett minimalvarianskriterium.

Antag att systemet skrivs på följande form:

$$A^*(q^{-1})c(t) = q^{-k}B^*(q^{-1})u(t) + \lambda C^*(q^{-1}) \quad (5.1)$$

där

$$A^*(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B^*(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_n q^{-n}$$

$$C^*(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_n q^{-n}$$

(k =tidsfördröjning i systemet)

Med denna representation av systemet, ges minimalvariansstyrlagen av följande uttryck:

$$u(t) = - \frac{G^*}{B^* F^*} y(t) \quad (5.2)$$

där

$$F^*(q^{-1}) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{(k-1)} q^{-(k-1)}$$

$$G^*(q^{-1}) = g_0 + g_1 q^{-1} + \dots + g_{n-1} q^{-(n-1)}$$

Koefficienterna fås ur följande polynomidentitet:

$$C^*(q^{-1}) = A^* F^* + q^{-k} G^* \quad (5.3)$$

Identifiering med ekvation 4.1 ger med $C^* = 1$

$$a_1 = \frac{h}{V} Q(t) (1+r) - 1$$

$$b_1 = a_1 h (c_s - c(t))$$

Styrlagen lyder sålunda:

$$u(t) = \frac{a_1 (c(t) - c_{ref})}{b_0} \quad (5.4)$$

där b_0 ej kan skattas direkt. (c_{ref} =referensvärdet i löst syrekoncentrationen)

5.2 Självinställare baserad på estimering av KLa och OUR samtidigt

I detta avsnitt användes estimatorn i kap. 4.3. Uppskattning sker således av båda parametrarna samtidigt. Glömskefaktorn för både K_L och OUR sattes 0.995. Trots att

bias-problemet figurerar, kan denna estimator ändå användas, p.g.a. det totala skattningsfelet, ϵ_{ps} , är nära noll. Först visas resultaten i det deterministiska fallet. Lämpligt b_0

befanns vara 0.2. Då b_0 var 0.1 blev systemet instabilt.

Figurerna 5.2 och 5.3 visar resultaten.

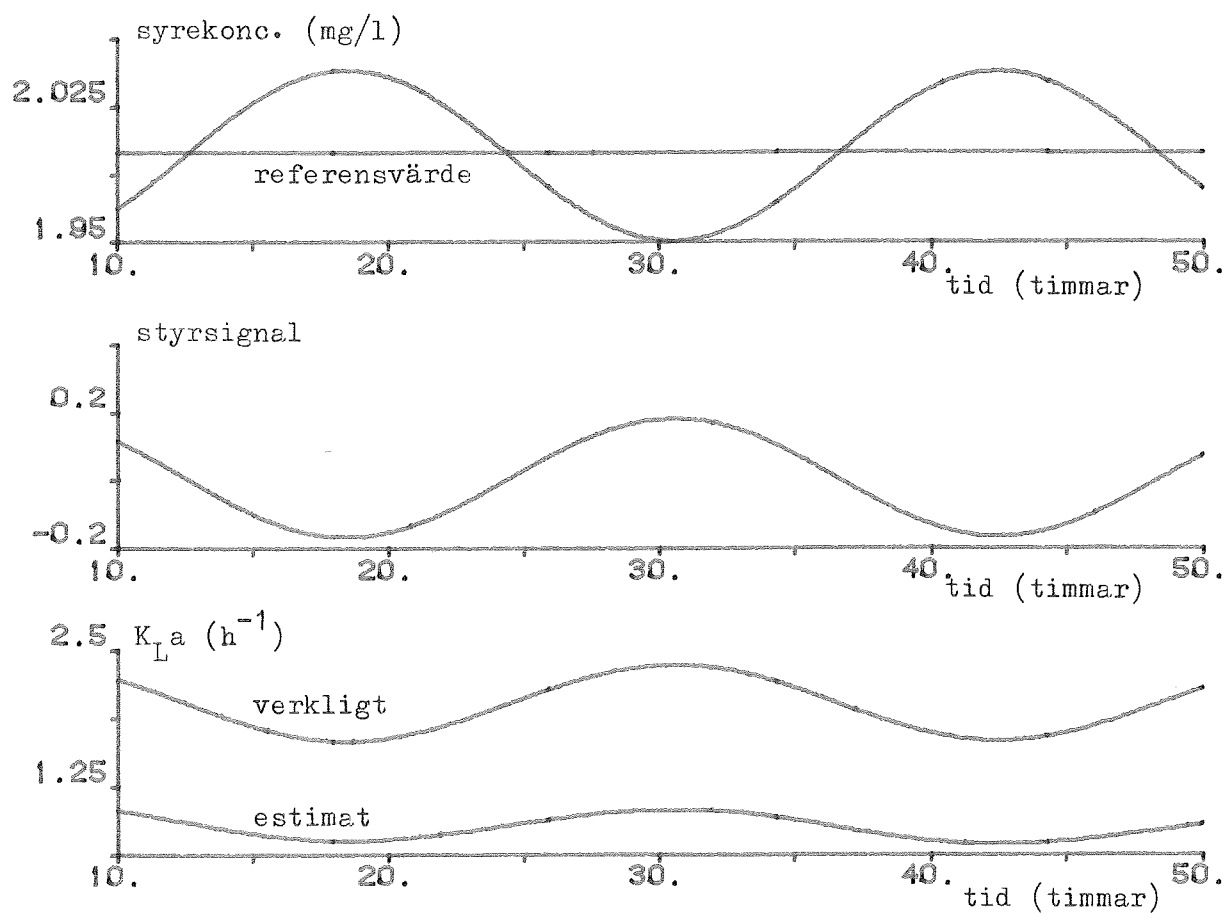


Fig. 5.2 Löst syrekonzentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Störningen utgörs av en dygnsstörning i den inkommande substratkonzentrationen. Lämpligt värde på b_0 befanns vara 0.2. Estimatet av $K_L a$ visas nederst.

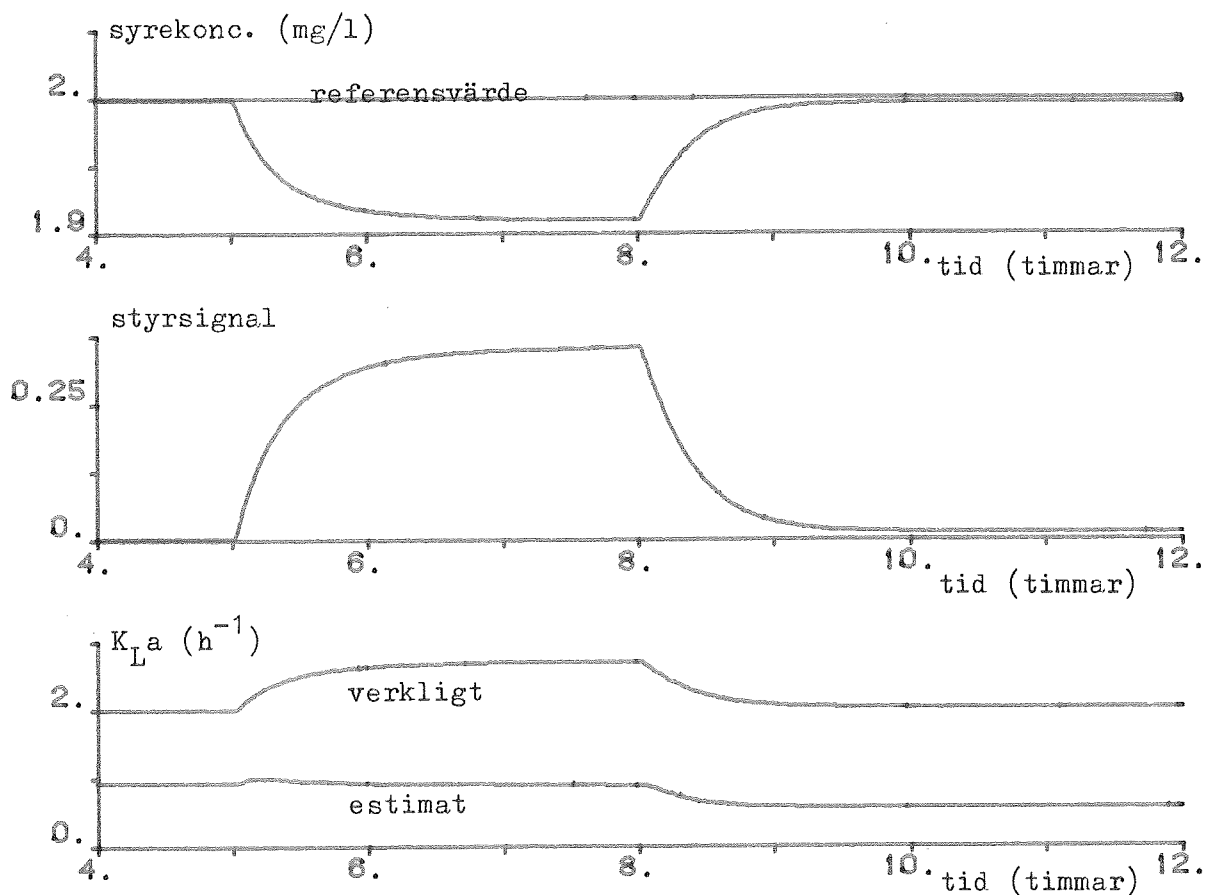


Fig. 5.3 Löst syrekoncentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Störningen utgörs av en stegstörning i inkommande substratkoncentration verkande mellan 5 och 8 timmar. Estimatet av $K_L a$ visas nederst. B_0 sattes till 0.2.

Lägg märke till hur bra reglering som erhålles trots det dåliga estimatet av $K_L a$.

Resultatet i det stokastiska fallet visas i fig. 5.4 och 5.5. Värdet av b_0 sattes till 1. För mindre värden antog estimatet av OUR negativa värden. För framtida bruk bör begränsning ordnas så att estimaten ej kan anta negativa värden.

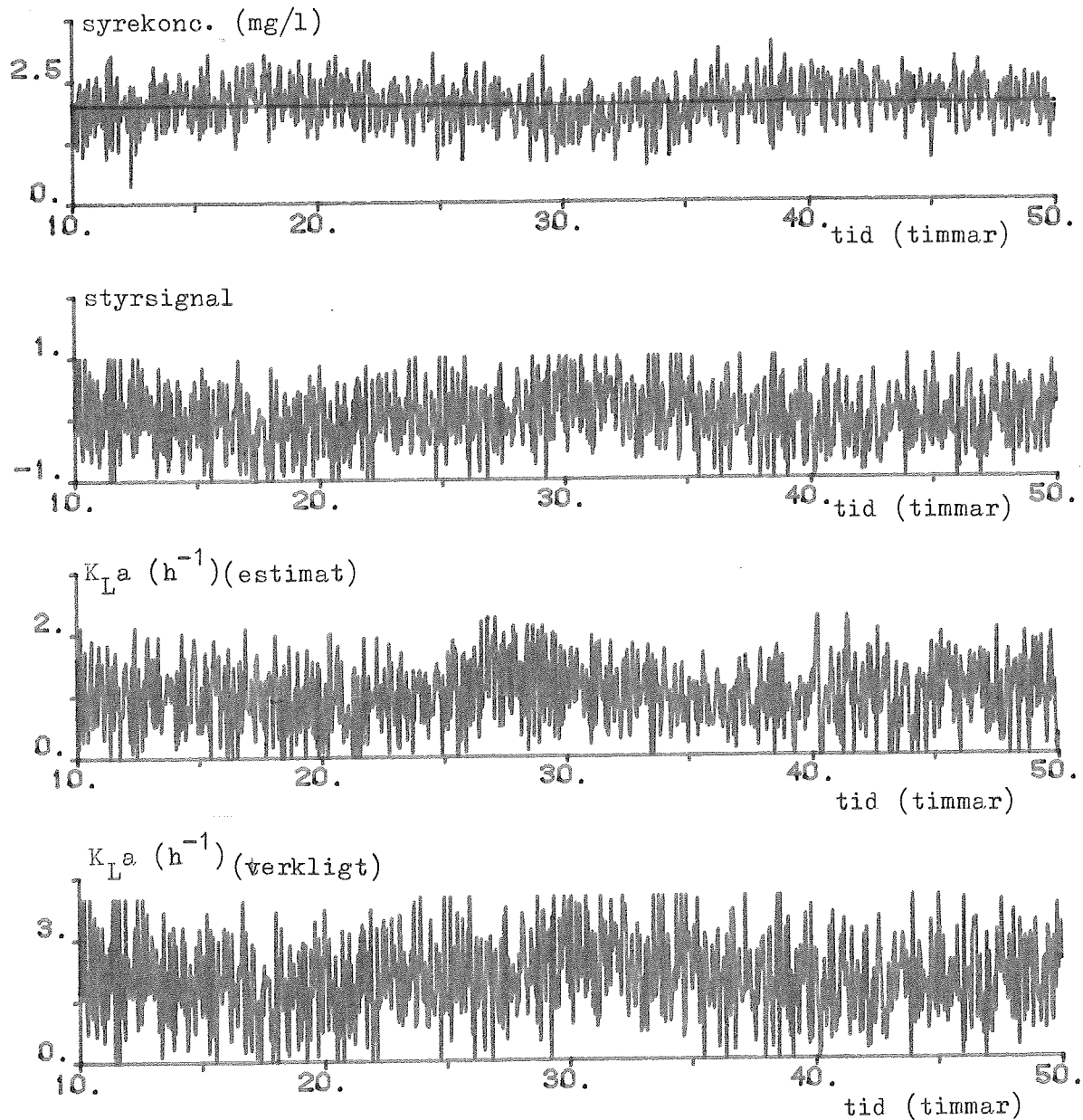


Fig. 5.4 Löst syrekonzentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Förutom en dygnsvariation i inkommande substratkoncentration, finns mätbrus på c , med variansen 0.25. Estimatet av $K_L a$ visas nederst. B_0 sattes till 1.

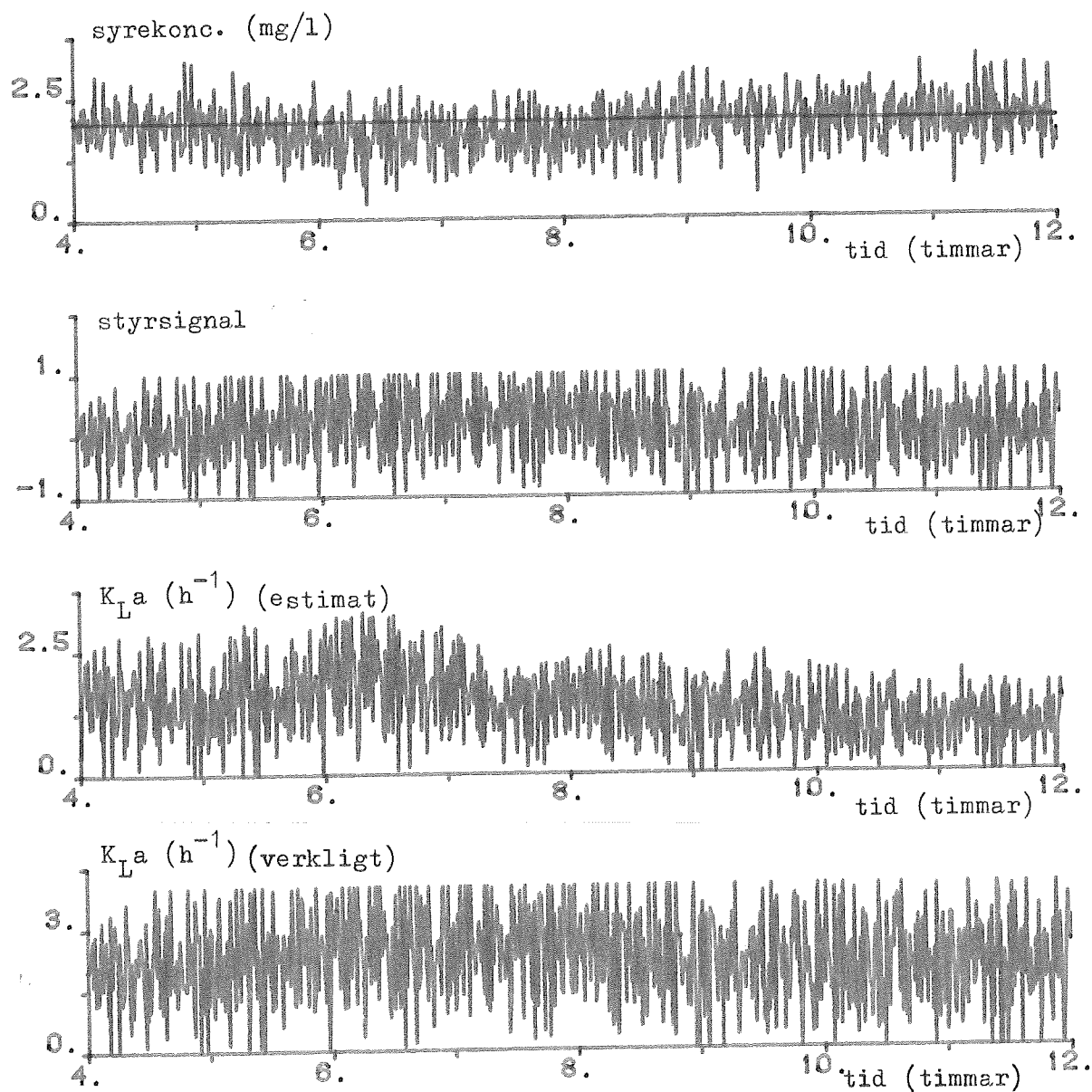


Fig. 5.5 Löst syrekoncentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Förutom en stegstörning i inkommande substratkoncentration, verkande mellan 5 och 8 timmar, finns mätbrus på c , vilket har variansen 0.25. Estimatet av $K_L a$ visas nederst. B_0

sattes till 1.

En relativt bra reglering erhöles även i detta fall.

5.3 Självinställare där endast $K_L a$ skattas

I detta avsnitt används estimatorn i kap. 4.4. Endast $K_L a$ estimeras. Resultatet av simuleringarna i det deterministiska fallet visas i fig. 5.6 och 5.7.

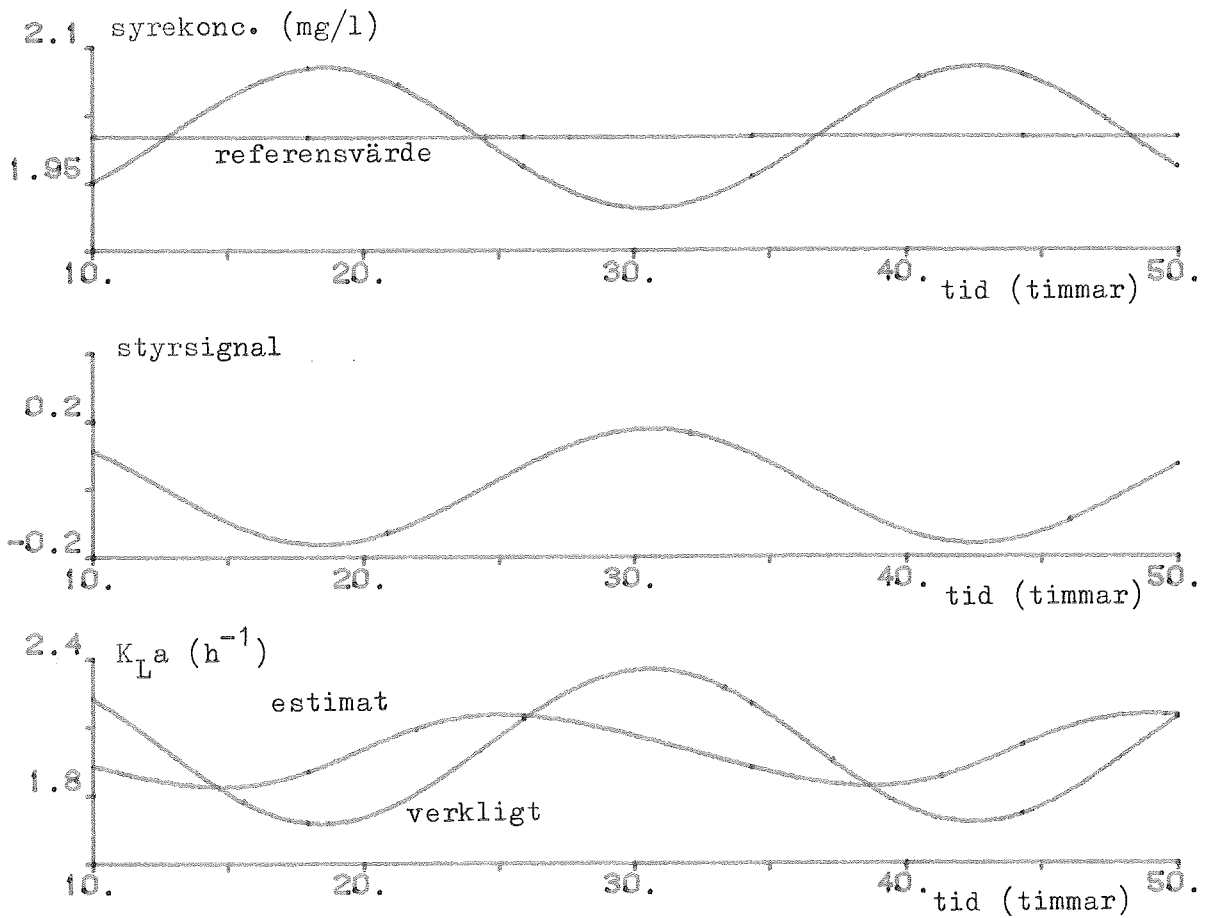


Fig. 5.6 Löst syrekonzentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Störningen utgörs av en dygnsvariation i inkommande substratmängd. Lämpligt värde på b_0 befanns vara 0.3. Längst ned visas estimatet av $K_L a$.

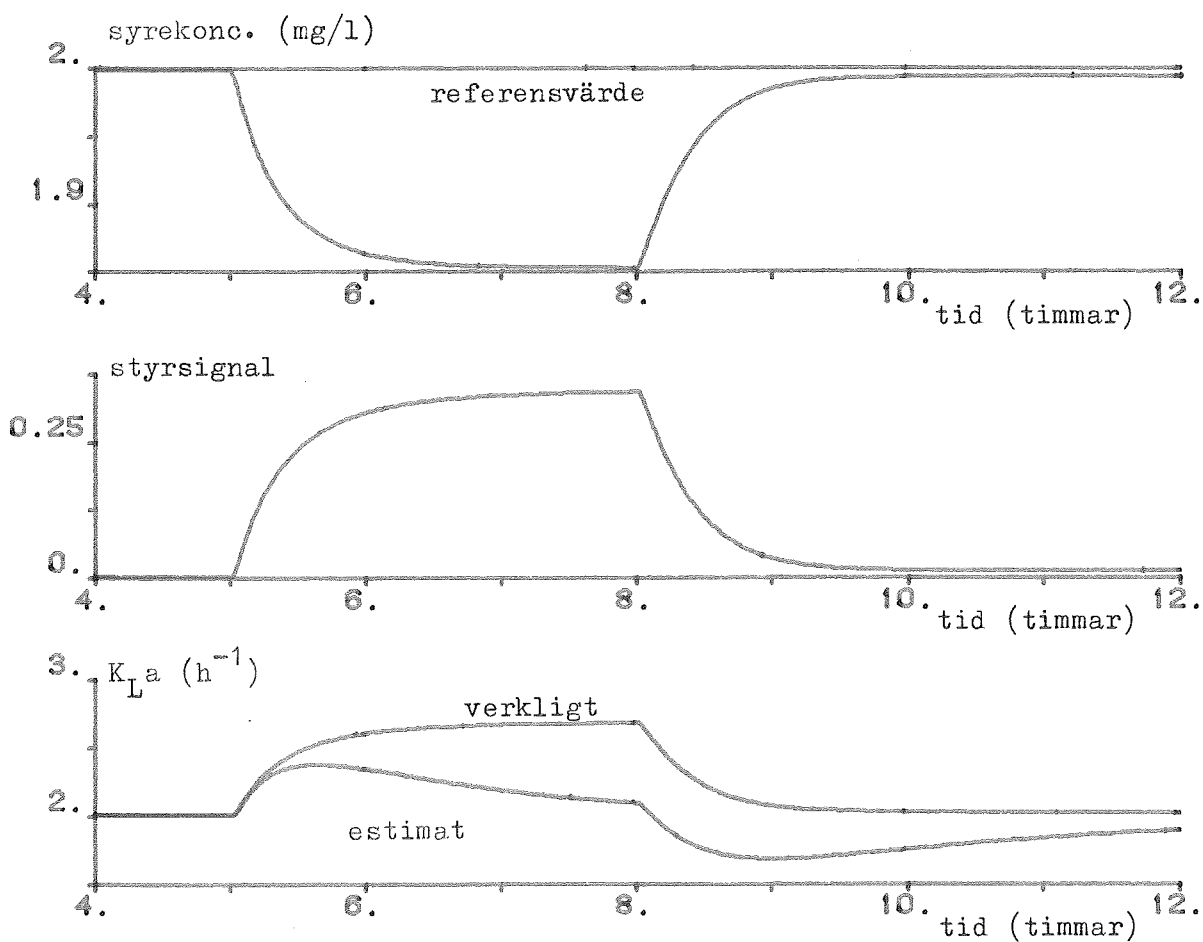


Fig. 5.7 Löst syrekonzentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Störningen utgörs av en stegstörning i inkommande substratkonzentration, verkande mellan 5 och 8 timmar. Längst ned visas estimatet av $K_L a$. B_0 sattes till 0.3.

Det stokastiska fallet visas i fig. 5.8 och 5.9.

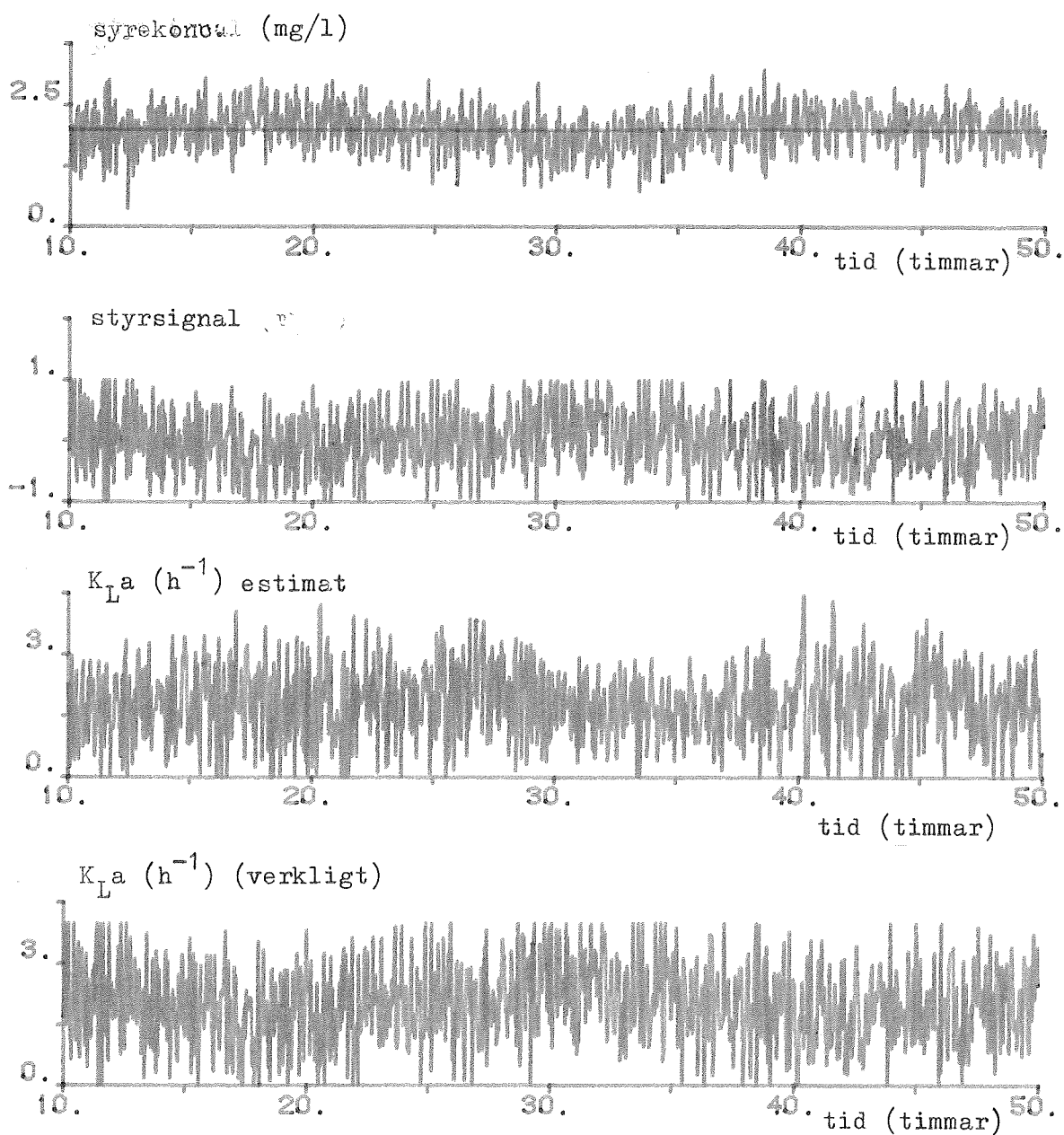


Fig 5.8 Löst syrekonzentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Störningen utgörs av en dygnsvariation i inkommande substratkonzentration plus mätbrus i c , vilket har variansen 0.25. Längst ned visas estimatet av $K_L a$. B_0 sattes till 1.

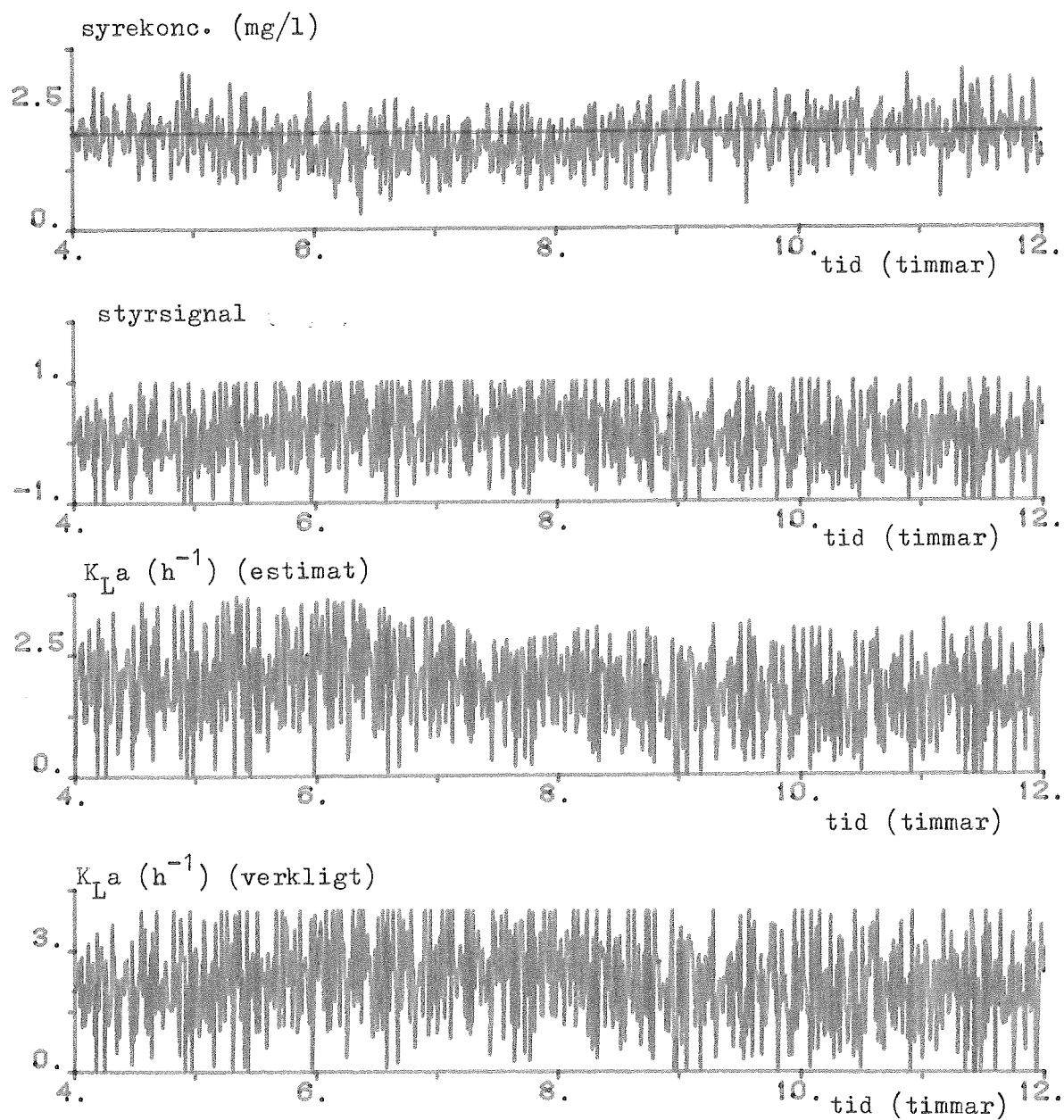


Fig. 5.9 Löst syrekonzentration, c , med motsvarande styrsignal, u , då systemet regleras av en självinställare. Störningen utgörs av en stegstörning i inkommande substratkoncentration, verkande mellan 5 och 8 timmar. Dessutom finns mätbrus på c , vilket har variansen 0.25. Längst ned visas estimatet av $K_L a$. Lämpligt värde på b befanns vara 1.

I det deterministiska fallet erhålls bra reglering medan i det stokastiska fallet fås en hyfsad reglering.

Slutsatser

Självinställaren m.a.p. en resp. två parametrar befanns vara likvärdiga. Emellertid blev estimeringen av K_L betydligt bättre i fallet då enbart K_L estimerades. För närmare diskussion om resultaten i detta kapitel hänvisas till kap 6.

6 JÄMFÖRELSEER MELLAN PI-REGULATORN OCH SJÄLVINSTÄLLAREN

I detta kapitel görs jämförelser mellan PI-regulatorn och självinställaren, baserad på estimering av två parametrar.

6.1 Deterministiska fallet

Då en dygnsstörning verkar i den inkommande substratkoncentrationen, ligger självinställarens styrsignal mellan -0.2 och 0.2 vilket också gäller för PI-regulatorn. Vidare ligger halten löst syre mellan 1.95 och 2.025 (mg/l) i båda fallen.

En stegstörning i substrathalten ger upphov till en styrsignal mellan 0 och 0.3 medan syrekoncentrationen ligger mellan 1.9 och 2.1 (mg/l)

6.2 Stokastiska fallet

Variansen hos utsignalen är ca 0.25 både med självinställaren och med PI-regulatorn då systemet påverkas av resp. störning. Vidare bör läggas märke till att styrsignalerna i självinställaren såväl som i PI-regulatorn mäts väldigt ofta.

Ur ovanstående framgår att det ej finns några anmärkningsvärda skillnader mellan PI-regulatorn och självinställaren då det gäller reglering av löst syrekoncentrationen.

6.3 Diskussion

I verkligheten är processbruset betydligt mer komplext än det simulerade bruset, vilket medför att PI-regulatorn får sämre regleringsegenskaper. Vidare, om det finns variabla parametrar, måste PI-regulatorn hela tiden justeras. Slutligen bör nämnas att modellen som använts i denna rapport, är en stark förenkling av processen i verkligheten. Ju mer komplex dynamik, desto besvärligare blir det för PI-regulatorn att åstadkomma en bra reglering.

Z NOMENKLATUR

Koncentrationer

s_i = inkommande substratkonc. (mg/l)

s = substratkonc. (mg/l)

c = löst syrekonc. (mg/l)

c_s = mättnads koncentrationen för löst syre (10 mg/l)

c_{in} = inkommande löst syrekonc. (0.5 mg/l)

x = bakteriekonc. (mg/l)

Hydrauliska parametrar

V = bassängvolym (1 m^3)

Q_0 = inflöde ($0.25 \text{ m}^3/\text{h}$)

r = återkopplingsfaktor (0.3)

Kinetiska parametrar

K_c = begränsning av tillväxthast. hos löst syrekonc. (1.5)

Λ

μ = max. tillväxthastighet hos bakterierna (0.2 h^{-1})

d_x = fördröjningskoefficient (0.005 h^{-1})

K_L = hastigheten med vilket gasformigt syre övergår

i löst syre (h^{-1}).

g = slamålder (4.1 dygn)

Y = förhållandet mellan mängden bakterier som bildats och mängden substrat som konsumerats av dessa.

Stökiometriska konstanter

$k_1 = 0.5$

$k_2 = 0.75$

REFERENSER

- Olsson, G. och Andrews, J.F (1978)
" The Dissolved Oxygen Profile- A Valuable Tool For
Control Of The Activated Sludge Process" water Research,
12, 985-1004.
- Wittenmark, B., Åström, K.J (1982), "Computer Control
Theory", kap 12-15, Inst. för Reglerteknik, LTH, Lund.

APPENDIX 1

I detta appendix ges information om de macro-kommandon som använts vid simulationerna.

Startup och startup1 simulerar situationen i kap 4.4 d.v.s. då K_a uppskattas och OUR antages känd resp. vice versa.

Startup5 simulerar situationen i kap 4.3 d.v.s. då K_a och

OUR uppskattas samtidigt. Startup6 simulerar den i kap 5.2 angivna regulatorn, i vilken både K_a och OUR skattas.

Startup7 simulerar självinställaren i kap 5.3 vilken enbart bygger på K_a -skattningen. Startup8 innehåller PI-regulatorn

i kap 3.3 och startup9 simulerar on-off regleringen i kap 3.2.

```
macro STARTUP
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do4 noise1 esti conn1
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

```
macro STARTUP3
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do3 noise1 regonoff onoff
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

```
macro STARTUP6
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do3 noise1 rest connres
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

```
macro STARTUP1
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do4 noise1 est conn2
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

```
macro STARTUP5
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do4 noise1 resti conn55
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

```
macro STARTUP7
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do3 noise1 estit conesti
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

```
macro STARTUP8
```

```
let n.noise1=1
let nodd.noise1=179
syst do3 noise1 doregi donna
par dt[noise1]:h
par same[noise1]:1
end
```

APPENDIX_2

I detta appendix listas programmen ingående i de olika macro-kommandona i appendix 1.

Processmodell, D04.

Continuous system D04

"dissolved oxygen dynamics in activated sludge

"The reactor is complete mix

"States: c=dissolved oxygen

" x=organism concentration

" s=substrate concentration

"Input: u=air flow rate, in this program, u is

" changed manually, n=input from noise1

"Output: cm=dissolved oxygen

"

"Author: Lennart Hansson

" 23 April 1982

"

input n

output cm

"if automatic control: input z n

der dc dx ds

state c x s

time t

"expressions to make c non-negative

cm = max(c1,0)

c1=c+n*amp

"model-equations

kla=a0+a1*(uair + u)

my=myh*s*c/((ks+s)*(kc+c))

dc=(q*ci-(1+r)*q*c)/v+kla*(cs-c)-k1*my*x-k2*d*x

dx=(-(1+r)*q*x+r*q*g*x)/v+my*x-d*x

ds=(q*si+r*q*s-(1+r)*q*s)/v-2*my*x

k3teor=k1*my*x+k2*d*x "k3teor=OUR

"constants in the system

ci:0.5

cs:10

k1:0.5

k2:0.75

d:0.005

myh:0.2

ks:50

kc:1.5

r:0.3

v:1

a0:0

a1:2.0

uair:1

```
u:=0
"if automatic control then
"u is equal to z in input list
g:=4.1

"different disturbances in input
"substrateconcentration and waterflow
q:=0.25
"si:=200
"si=200+50*sin(3.14/12*t)
si:=if t>b and t<b+3 then 300 else 200
b:=5
"q=0.25+0.125*sin(3.14/12*t)

"initialvalues of the statevariables
x:=1014.4
s:=12.663
c:=2

"variance from noise1
amp:=0
end
```

Då det refereras till D03, sker regleringen automatiskt d.v.s. en styrlag räknas ut i en regulatorordel. Erforderliga ändringar framgår av kommentarerna i D04.

Program ingående i startup.

```

Discrete system ESTI
"Author:Lennart Hansson
"the estimator estimates KLa from the
"DO-concentration, when OUR is assumed known
"input= y,dissolved oxygen concentration

Input y
time t
tsamp ts
state fi1 fi2 fi3 fi4 p33
state t3
new nfi1 nfi2 nfi3 nfi4 np33
new nt3

"values of the constants
" in the system
lamda:0.995
r1:0.3
q1:0.25
ci1:0.5
cs1:10
v1:1
u1:0
uair1:1
ts=t+h
k3:15.518 "value of OUR
h:0.01 "sampling time

"the components of  $\theta$ -matrix
t1=1
t2=-h/v1
"t3=-a*h t3 is the parameter which is
" estimated
t4=-k3*h "k3=OUR

"initialvalues of the
" new-variables in the system
p33:1
t3:-0.018
fi1:2
fi2:0.525
fi3:-8
fi4:1

"calculation of p*fi
pfi3=fi3*p33

"calculation of fi(t)*p*fi
fpf=fi3*fi3*p33

r2=lamda+fpf

"the estimated KLa
kla1=t33*(u1+uair1)

"updating of the P matrix
np33=(p33-pfi3*pfi3/r2)/lamda

END

"the estimation error
eps=y-fi1*t1-fi2*t2-fi3*t3-fi4*t4

connecting system CONN1
"Author: Lennart Hansson

"connects the systems
"DO4 and ESTI
"
for estimation of KLa
"with the assumption
"that OUR is known

y[esti]=cm[do4]
n[do4]=e1[noise1]
end

```



```

Program ingående i startupi.
Discrete system EST
"Author:Lennart Hansson
"the estimator estimates OUR from the
"DO-concentration, when KLa is assumed known
"input= y, dissolved oxygen concentration

Input y
time t
tsamp ts
state fi1 fi2 fi3 fi4 p44
state t4
new nfi1 nfi2 nfi3 nfi4 np44
new nt4

"the components of  $\theta$ -matrix
t1=1
t2=-h/v1
t3=-a*h
"t4=-k3*h , K3=OUR

"calculation of p*fi
pfi4=p44*fi4

"calculation of fi(t)*p*fi
fpp=p44*fi4*fi4

r2=lamda+fpp

"updating of the P matrix
np44=(p44-pfi4*pfi4/r2)/lamda

"the estimation error
eps=y-fi1*t1-fi2*t2-fi3*t3-fi4*t4

"updsting of the parameter t4
nt4=t4+pfi4/r2*eps

t44=-t4/h

"updating of the  $\theta$ -matrix
nfi1=y
nfi2=q1*((1+r1)*y-ci1)
nfi3=(u1+uair1)*(y-cs1)
nfi4=1

"values of the constants
"in the system
lamda=0.995
r1=0.3
q1=0.25
ci1=0.5
cs1=10
v1=1
u1=0
uair1=1
ts=t+h
h=0.01 "sampling time

"initial values of the
"new-variables in the system
p44=1
t4=-0.15
fi1=2
fi2=0.525
fi3=-8
fi4=1
a=2.0
kla1=a*(u1+uair1)
END

Connecting system CONN2
"Author:Lennart Hansson

"connects the system
"DO4 and EST

"for estimation of OUR
"with the assumption
"that KLa is known.

y[est]=cm[do4]
n[do4]=e1[noise1]
end

```

Program ingående i startup3.

Discrete system REGONOFF

"Author Lennart Hansson, 30/6-82

"On-off regulator around cref:2

"input=y,dissolved oxygen

"output=zm,air-flow

input yref y

output zm

state zz

new zzt

time t

tsamp ts

e=y-yref

z3=if e<c1 and e>c2 and zz>0.5 THEN 1 ELSE 1

z2=if e<c1 and e>c2 and zz<0.5 then 0 else z3

zzt=if e>c1 and e>c2 then 0 else z2

zm=zz

c1:0.3

c2:-0.2

ts=t+h

h:0.1 "sampling time

end

Connecting system DNOFF

"Author:Lennart Hansson

"connects the systems of DO3 and REGONOFF

"on-off control

yref[regonoff]=cref

cref:2

y[regonoff]=cm[do3]

z[do3]=zm[regonoff]

n[do3]=e1[noise1]

end

Program ingående i startup5.

```

Discrete system RESTI
"Author:Lennart Hansson
"the estimator estimates KLa and OUR
"at the same time
"input=y, dissolved oxygen concentration

Input y
time t
tsamp ts
state fi1 fi2 fi3 fi4 p33 p34 p44
state t3 t4
new nfi1 nfi2 nfi3 nfi4 np33 np34 np44
new nt3 nt4

"updating of the  $\theta$ -matrix
t1=1
t2=-h/v1
"t3=-a*h      "KLa= a(u+uair)
"t4=-k3*h     "k3=OUR

"calculation of p*fi
pfi3=p33*fi3+p34*fi4
pfi4=p34*fi3+p44*fi4

"calculation of fi(t)*p*fi
fpf=p33*fi3*fi3+2*p34*fi3*fi4+p44*fi4*fi4

r33=lam3+fpf
r34=lam34+fpf
r44=lam4+fpf

"this section handle the problem with
"burst-outs i the P-components
la33=if abs(pfi3)<l33 then 1 else lam3
la34=if abs(pfi3*pfi4)<l34 then 1 else lam34
la44=if abs(pfi4)<l44 then 1 else lam4

"updating of the P matrix
np33=(p33-pfi3*pfi3/r33)/la33
np34=(p34-pfi3*pfi4/r34)/la34
np44=(p44-pfi4*pfi4/r44)/la44

"estimation error
eps=y-fii*t1-fi2*t2-fi3*t3-fi4*t4

"updating of the parameter
"t3 and t4
nt3=t3+pfi3/r33*eps
nt4=t4+pfi4/r44*eps

t33=-t3/h
t44=-t4/h

"updating of the  $\varphi$ -matrix
nfi1=y
nfi2=q1*((1+r1)*y-ci1)
nfi3=(u1+uair1)*(y-cs1)
nfi4=1

"values of the constants
"in the system
lam3=0.995
lam34=1
lam4=0.5
l33=0.01
l44=0.01
l34=0.01

r1=0.3
q1=0.25
ci1=0.5
cs1=10
v1=1
u1=0
uair1=1
ts=t+h
h=0.01      "sampling time

"initialvalues of the
"new-variables in the system
p33=1
p44=1
p34=0
t3=-0.018
t4=-0.15
fi1=2
fi2=0.525
fi3=-8
fi4=1

"the estimated KLa
kla1=t33*(u1+uair1)

END

Connecting system CONN55
"Author:Lennart Hansson
"connects the systems
"DO4 and RESTI
"
"for estimation of KLa
"and OUR at the same time

y[rest1]=cm[do4]
n[do4]=ei[noise1]

end

```

```

Program ingående i startup6.
Discrete system REST
"Author:Lennart Hansson
"self-tuner controller based
"on the estimates
"of the KLa and OUR

"input=y, dissolved oxygen
"output=u, air-flow rate

Input y
output u
time t
tsamp ts
state fi1 fi2 fi3 fi4 p33 p34 p44
state t3 t4 u1
new nfi1 nfi2 nfi3 nfi4 np33 np34 np44
new nt3 nt4 nul

"updating of the  $\theta$ -matrix
t1=1
t2=-h/v1
"t3=-a*h          "KLa=a(u+uair)
"t4=-k3*h         "k3=OUR

"calculation of p*fi
pfi3=p33*fi3+p34*fi4
pfi4=p34*fi3+p44*fi4

"calculation of fi(t)*p*fi
fpp=p33*fi3*fi3+2*p34*fi3*fi4+p44*fi4*fi4

r33=lam3+fpp
r34=lam34+fpp
r44=lam4+fpp

"this section handle the problem
"with the burst-outs in the P-matrix
la33=if abs(pfi3)<l33 then 1 else lam3
la34=if abs(pfi3*pfi4)<l34 then 1 else lam34
la44=if abs(pfi4)<l44 then 1 else lam4

"updating of the P matrix
np33=(p33-pfi3*pfi3/r33)/la33
np34=(p34-pfi3*pfi4/r34)/la34
np44=(p44-pfi4*pfi4/r44)/la44

"estimation error
eps=y-fi1*t1-fi2*t2-fi3*t3-fi4*t4

```

```

"updating of the parameter
"t3 and t4
nt3=t3+pfi3/r33*eps
nt4=t4+pfi4/r44*eps

t33=-t3/h
t44=-t4/h

"updating of the  $\phi$ -matrix
nfi1=y
nfi2=q1*((1+r1)*y-cil)
nfi3=(u1+uair1)*(y-cs1)
nfi4=1

"calculation of minimum-
"variance parameters
a11=(h/v1)*q1*(1+r1)-1
b11=-t3*(cs1-y)

uu=(a11*(y-cref)-b11*u1)/b0
uu1=max(umin,uu)
u=min(umax,uu1)
nu1=u
b0:1
umax:1
umin:-1
cref:2

"values of the
"constants in the system
lam3:0.995
lam34:1
lam4:0.5
l33:0.01
l44:0.01
l34:0

r1:0.3
q1:0.25
cil:0.5
cs1:10
v1:1
uair1:1
ts=t+h
h:0.01 "sampling time

"initial values of the
"new-variables in the system
p33:1
p44:1
p34:0
t3:-0.018
t4:-0.15
fi1:2
fi2:0.525
fi3:-8
fi4:1

"the estimated KLa
kla1=t33*(u1+uair1)

END

Connecting system CONNRES
"Author:Lennart Hansson
"connects the systems
"REST and CONNRES

"self-tuner controller
"based on the
"estimates of KLa and OUR

y[rest]=cm[do3]
z[do3]=u[rest]
n[do3]=e1[nois1]
end

```

Program ingående i startup7.

```

Discrete system ESTIT
"Author:Lennart Hansson
"self-tuner controller in which
"KLa is estimated with OUR known
"input=y,dissolved oxygen
"output=u,air-flow
Input y
Output u
time t
tsamp ts
state fi1 fi2 fi3 fi4 p33
state t3 u1
new nfi1 nfi2 nfi3 nfi4 np33
new nt3 nu1

"updating of the  $\theta$ -matrix
t1=1
t2=-h/v1
"t3=-a*h
t4=-k3*h      "k3=OUR

"calculation of p*fi
pfi3=fi3*p33

"calculation of fi(t)*p*fi
fpf=fi3*fi3*p33

r2=lamda+fpf

"updating of the P component
np33=(p33-pfi3*pfi3/r2)/lamda

"estimation error
eps=y-fi1*t1-fi2*t2-fi3*t3-fi4*t4

"updating of the parameter t3
nt3=t3+pfi3/r2*eps

t33=-t3/h

"updating of the  $\phi$ -matrix
nfi1=y
nfi2=q1*((1+r1)*y-ci1)
nfi3=(u1+uair1)*(y-cs1)
nfi4=1

"calculation of minimum-
"variance parameters
a11=(h/v1)*q1*(1+r1)-1
b11=-t3*(cs1-y)

uu=(a11*(y-cref)-b11*u1)/b0
uu1=max(umin,uu)
u=min(umax,uu1)
nu1=u
b0=1
umax=1
umin=-1
cref=2

"values of the constants
"in the system
lamda=0.995
r1=0.3
q1=0.25
ci1=0.5
cs1=10
v1=1
u1=0
uair1=1
ts=t+h
k3=15.518
h=0.01      "sampling time

"initialvalues of the
"new-variables in the system
p33=1
t3=-0.018
fi1=2
fi2=0.525
fi3=-8
fi4=1

"the estimated KLa
kla1=t33*(u1+uair1)

END

Connecting system CONESTI
"Author:Lennart Hansson
"connects the systems
"of ESTIT and DO3

"for self-tuning control
"where KLa is estimated

y[estit]=cm[do3]
z[do3]=u[estit]
n[do3]=e1[noise1]

end

```

```
Program ingående i startup8.
Discrete system DOREG1
"Author Lennart Hansson, 28/6-82
"PI-regulator with limiting air flow.
"input=y,dissolved oxygen
"output=zz,air-flow

input y yref
output zz
state inte
new ninte
time t
tsamp ts
e=yref-y
il=inte+k*e*h/ti
z1=k*e+il
ninte=il

"limiting of air-flow
zz=if z1>1 then 1 else if z1<-1 then -1 else z1

ts=t+h
k:1
ti:0.5
H:0.1      "sampling time
end

Connecting system DONNA
"Author:Lennart Hansson
"connects the systems of do3 and doreg1
"for PI-control of dissolved oxygen

yref[doreg1]=cref
cref:2
y[doreg1]=cm[do3]
z[do3]=zz[doreg1]
n[do3]=e1[noise1]
end
```