

# Reglering av vattenflöde och partikelreduktion

- Pilotanläggning Källby reningsverk



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Industriell elektroteknik och automation

Sebastian Memet  
Tobias Günther



©Copyright Sebastian Memet, Tobias Günther

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Lunds universitet  
Lund 2017

## Sammanfattning

Hydrotech har en pilotanläggning som används för att testa nykonstruerade filter för vattenrening. Anläggningen består i korta drag av en pump som pumpar in vatten i anläggningen och två doseringspumpar som doserar kemikalier för att partiklarna i vattnet ska klumpa ihop sig och fastna i filtret. Hydrotech hade en vision om att kunna reglera inflödespumpen utefter ett värde som bestäms av operatören, samt att kunna reglera den kemiska doseringen utefter ett önskat värde på utgående turbiditet. Med en framkoppling som doserar kemikalier efter inkommande turbiditet och en återkoppling med dynamiska parametrar som beror på inflöde, doseringsintervall och förhållande mellan koagulanten och flocculanten, så lyckades vi få ett system där utgående turbiditet svängde in mot börvärdet enligt kraven och höll sig relativt stabilt trots stora variationer i inkommande turbiditet.

Nyckelord: Reglering, Gain-scheduling, Framkoppling, Pumpar, Vattenrening

## Abstract

Hydrotech has a pilot facility which is used to run tests on newly developed filters for water purification. The facility involves a pump that is used to run water through the filter and two pumps that are used for chemical dosages. The chemicals make the particles in the water stick together, so that they will not run past the filter. Hydrotech wanted the ability to control the pump for the inflow by letting the operator type a setpoint. They also wanted to control the pumps for chemical dosages by typing a setpoint for the quality of the outgoing water. With a feedforward controller that slopes chemicals depending on the quality of the incoming water and a feedback controller with dynamic parameters depending on several factors, we managed to fulfill the wishes of Hydrotech.

Keywords: Control system, Gain-scheduling, Feed Forward, Pumps, Water cleaning

## Förord

Vår första kontakt med Hydrotech var genom ett projektarbete i automationsteknik. Vi var då en grupp om fem personer som fick i uppdrag att skapa ett GUI till anläggningen som nämndes i sammanfattningen. Vi skulle även göra det möjligt att logga mätvärdena från olika givare i anläggningen till ett Excel dokument.

När projektarbetet var slutfört ansåg vi att reglering av anläggningens inflödespump, dosering av polymer och polyaluminiumklorid passade utmärkt som examensarbete. Utmaningen verkade ligga på en lagom nivå där vi både fick befästa gamla kunskaper samt ta oss an svårare problem där mer komplicerade regleringslösningar krävdes.

Vi vill tacka vår handledare och kontakt på Hydrotech Janne Väänänen, vår handledare på skolan Johan Björnstedt och självklart vår examinator och bollplank Mats Lilja.

## Notationer

$H(s)$  - Överföringsfunktion i s-planet

$Q_{in}$  – Flöde för vatten som pumpas in i anläggningen, enhet  $m^3/h$

$Q_{polymer}$  - Flöde för polymerdosering i doseringstanken, enhet  $m^3/h$

$Q_{me}^3$  - Flöde för dosering av  $Me_3$  i doseringstanken, enhet  $m^3/h$

## Ordlista

**Turbiditet** - Vätskans grumlighet, enhet NTU

**Nephelometric Turbidity Units (NTU)** – Enhet som mäts genom att ta reda på hur mycket ljus som reflekteras från en ljusstråle. Högre ljusreflektion leder till högre ”NTU-värde”

**Polymer (Flocculant)** - Kemikalie som får partiklarna att klumpa ihop sig

**Polyaluminiumklorid (Koagulant)** - Kemikalie som får partiklarna att flocka sig

**Koagulering** - Partiklar klumpar ihop sig med stark bindning.

**Flockning** - Partiklar klumpar ihop sig med svag bindning

**Backspolning** - Filtrets självrengöring

**GUI** - Graphical User Interface

**Inflektionspunkt** – Punkt på en kurva där andraderivatan byter tecken

## Innehållsförteckning

1 Inledning .....	9
1.1 Syfte och målsättning .....	10
1.2 Problemformulering .....	10
1.3 Teknisk bakgrund .....	11
1.4 Avgränsningar .....	12
2 PID-reglering av inflödespump .....	13
2.1 Gain-scheduling.....	18
2.2 PID-parametrar .....	18
3 Reglering av doseringspumpar .....	20
3.1 Beskrivning av systemet.....	20
3.2 Förenklingar och approximationer .....	22
3.3 Feedforward.....	23
3.4 Återkoppling utan koagulant med konstant inflöde .....	27
3.5 Återkoppling utan koagulant med varierande inflöde.....	30
3.6 Återkoppling med koagulant .....	31
4 Resultat .....	33
4.1 Inflödespump .....	33
4.2 Doseringspumpar.....	34
5 Slutsats.....	37
5.1 Reflektion över etiska aspekter .....	37
6 Förbättringspotential.....	39
6.1 Framtida utvecklingsmöjligheter.....	40
7 Referenser .....	42
Appendix A.....	43
A.1 Beskrivning av systemet.....	43
A.2 Återkoppling utan koagulant med konstant inflöde .....	51
A.3 Återkoppling med koagulant .....	62



## 1 Inledning

Hydrotech är ett företag beläget i Vellinge som grundades år 1984. Företaget sysslar främst med att producera olika typer av filter för vattenrening. Hydrotech har en pilotanläggning på Källby Reningsverk i Lund i vilken nykonstruerade filter testas. Anläggningen består av en dränkpump som är nedsänkt i en bassäng med vatten som har kommit in från avloppssystemet. Flödet från denna pump utgör inflödet till anläggningen. Denna pump refereras härnäst till som inflödespumpen. Vattnet pumpas in tillsammans med polyaluminiumklorid som doseras av en doseringspump i en tank där polymerdosering sker och där efter in i en tank för flockning. Tankarna är utrustade med frekvensstyrda omrörare och doseringen görs av 2st. doseringspumpar. Efter flockningstanken flödar vattnet vidare in till filtret som testas. Filtret är självrengörande och backspolas när det är smutsigt.



*(Bild på anläggningen)*

## 1.1 Syfte och målsättning

Inflödet till anläggningen ska kunna styras efter ett börvärde bestämt av operatören. När det gäller doseringen av polymer och metallsalt så är det Hydrotechs önskemål att operatören ska skriva in önskad turbiditet i form av NTU på vattnet, efter det har gått igenom filtret. Polymer doseras därefter för att uppnå önskad turbiditet på utflödet. Metallsalt har ingen större inverkan på reduktionen av de partiklarna i vattnet utan används för att reducera fosforhalten i vattnet. Metallsalt doseras därför beroende på en faktor av polymerdoseringen. Denna faktor ska bestämmas av operatören.

## 1.2 Problemformulering

I nuläget styrs det inkommande vattenflödet till anläggningen genom att en signal skickas till pumpen som låter den arbeta på en viss procent av maxkapaciteten. Flödet är beroende av vattennivån i bassängen den är nedsänkt i, samt mottrycket från doseringstankarna. Eftersom vattennivån i bassängen är beroende av väderförhållanden medför detta att förhållandet mellan det inkommande vattenflödet och pumpens arbetsområde inte är konstant. Detta innebär att endast varvtalsstyrning av pumpen inte är tillräckligt om man vill uppnå ett konstant flöde. Den första frågan som behöver besvaras är följande:

- ”Är det möjligt att skapa en regulator i Codesys som ser till att ett konstant flöde (bestämt av operatören) kan hållas oberoende av yttre faktorer?”

Dosering av polymer och metallsalt sker i nuläget genom att ett konstant flöde på doseringspumparna bestäms av operatören. Detta innebär att det inte finns någon direkt styrning av utgående turbiditet utöver operatörens kunskap om förhållandet mellan kemikaliedosering och partikelreducering. Eftersom flödet från doseringspumparna är konstant tas ingen hänsyn till variationer i kvalitén hos det inkommande vattnet. Hydrotechs önskemål är att den utgående turbiditeten ska regleras beroende på ett önskat börvärde på turbiditet som bestäms av operatören. När det kommer till partikelreduktion är det främst polymerdoseringen som har betydelse, då metallsaltet främst reducerar fosforhalten i vattnet. Den andra frågan som behöver besvaras är följande:

- ”Är det möjligt att skapa en regulator i Codesys som ser till att operatören kan välja ett börvärde(utgående NTU) som kan uppnås oberoende av inkommande vattenkvalité och flöde?”

## **1.3 Teknisk bakgrund**

### **1.3.1 PLC och HMI**

Till projektet används ett HMI med integrerad PLC av Beijer Electronics, modell iX T12B-SC 12.1. HMI:t består av en 12" touchscreenskärm som programmeras med "iX Developer". I programmet kan man göra det möjligt för användaren att välja önskat flöde, önskad utgående turbiditet osv. Detta fungerar genom att "iX" synkroniserar sina variabler med Codesys, som är programmet som används för att programmera PLC:n.

PLC:n styr alla pumpar och tar emot all data från givarna. För att göra detta används 2st. IO-moduler, en ST-3218 som har 8 st. analoga ingångar och en ST-4214 som har 8st. Analoga utgångar. PLC:n programmerades i Codesys.

### **1.3.2 Codesys**

Codesys är ett program för PLC-programmering utvecklat av 3S-Smart Software. Programmet använder IEC 61131-3 standarden vilket gör det möjligt att använda Codesys till olika PLC tillverkare, i vårt fall Beijer Electronics. I Codesys kan man programmera i 5st. olika språk, instruction list(IL), structured text(ST), ladder diagram(LD), function block diagram(FBD) och sequential function chart(SFC). "FBD" valdes som programmeringsspråk av den enkla anledningen att det förmodligen skulle vara lättast att sätta sig in i för anställda på Hydrotech.

### **1.3.3 Inflödespump**

Inflödespumpen är en centrifugalpump av modellen "Grindex Minor n 8103", med en maxkapacitet på ca 90 m<sup>3</sup>/h. Pumpen är kopplad till en frekvensomriktare som får en 4-20mA signal från PLC:n. Regleringen återkopplas med ytterligare en 4-20 ma signal från

flödesgivaren som är belägen vid anläggningens inflödesrör.

### **1.3.4 Mätinstrument och doseringspumpar**

Mätpunkter som finns tillgängliga i anläggningen är turbiditet hos inkommande vatten, flöde av inkommande vatten och turbiditet hos utgående vatten. För att mäta turbiditeten används en "lange SC1000" display som har 2 st. optiska turbiditetsgivare kopplade till sig, en för ingående turbiditet och en för utgående turbiditet. Mätningen sker genom att givaren skickar ut 2 st. strålar infrarött ljus för att sedan mäta hur mycket som reflekteras tillbaka till givaren. Modulen har två st. 4-20mA utgångar som används för att beräkna turbiditeterna genom att koppla dom till PLC:n. Intervallet som går att mäta är 0,001-4000 NTU, men den är kalibrerad för 0,001-500 NTU, då det täcker våra krav. Polymeren och metallsaltet doseras med 2 st. olika pumpar, en Grundfos DDA 7,5 och en Grundfos DME 60-10. Även dessa pumpar får signaler från PLC:n.

## **1.4 Avgränsningar**

Inflödespumpen har ett maxflöde på ca 90 m<sup>3</sup>/h men eftersom filtret är byggt för vattenflöden upp till 60 m<sup>3</sup>/h så körs pumpen aldrig över det.

Syftet med anläggningen är att både partiklar och fosfor ska reduceras hos det inkommande vattnet. Vi har valt att bara implementera en reglering av partikelreduktionen hos det utgående vattnet. Fosforreducering är metallsaltets huvudsakliga uppgift och vi har valt att det bara ska doseras som en faktor på polymerdoseringen. Denna faktor väljs av operatören efter önskad fosforhalt i det utgående vattnet.

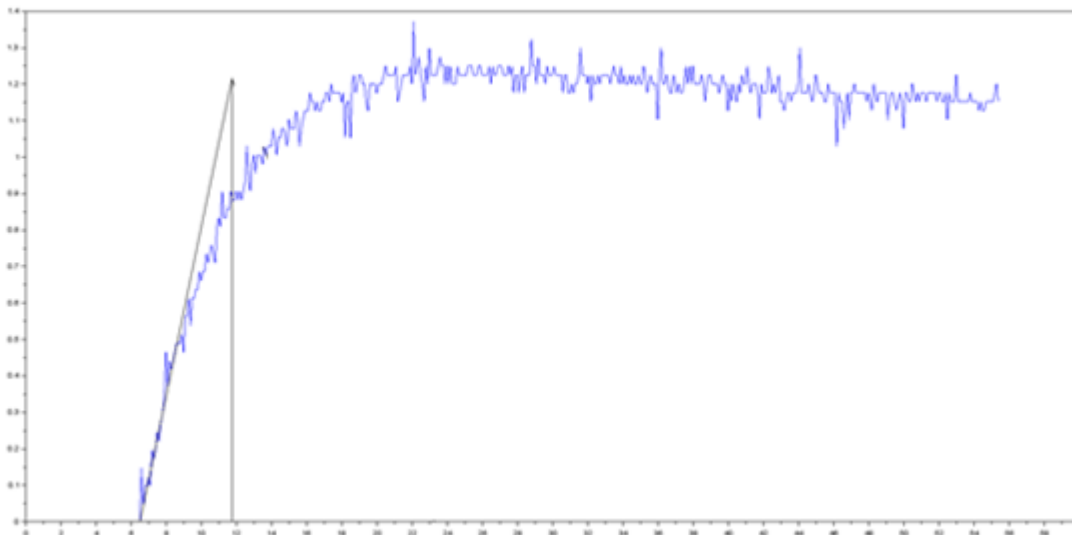
## 2 PID-reglering av inflödespump

Inflödespumpen måste köras på minst 20% av maxkapacitet, vilket motsvarar 12 m<sup>3</sup>/h, för att tillräckligt tryck ska byggas upp för att komma över mottrycket från doseringstankarna. Filtret som ska testas har en maxkapacitet på 60 m<sup>3</sup>/h. 60 m<sup>3</sup>/h motsvarar 70% av inflödespumpens maximala kapacitet. Detta leder till att inflödespumpens arbetsintervall är 20-70% av maxkapacitet, vilket motsvarar 12-60 m<sup>3</sup>/h.

Följande mätningar erhöles genom att mäta flödet när pumpen ökades mellan följande intervall: 0-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60% och 60-70%. Av figur 2.1-2.6 framgår det att pumpens karaktäristik är olinjär. Stegsvaret för varje intervall skalas om så att den statiska förstärkningen kan utläsas genom att dividera förändringen i utsignalen från flödesgivaren med förändringen i insignalen till frekvensomriktaren, båda i mA.

För att bestämma tidskonstanten (T) till stegsvaret används en metod som går ut på att man drar en linje från dödtiden(L) som tangerar stegsvarets inflektionspunkt och slutar vid stegsvarets statiska värde.

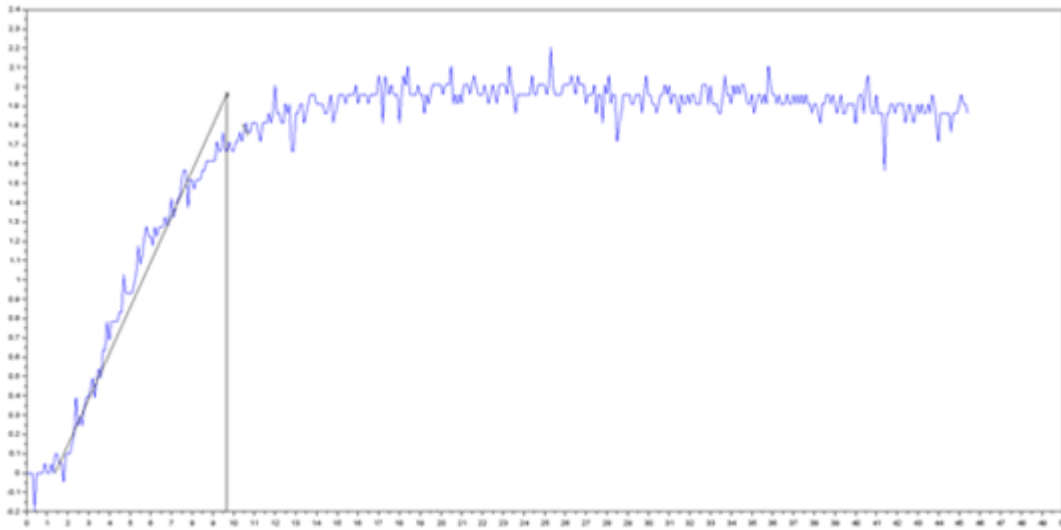
Utifrån denna linje bildar man en rätvinklig triangel som kommer ha värdet L+T där kateterna möter varandra. Eftersom dödtiden är känd så erhålles tidskonstanten direkt.



Figur 2.1 Stegsvaret (0-20%) med triangel för att bestämma tidskonstanten och statiska förstärkningen.

Y-axel: Utsignalen i proportion till insignalen

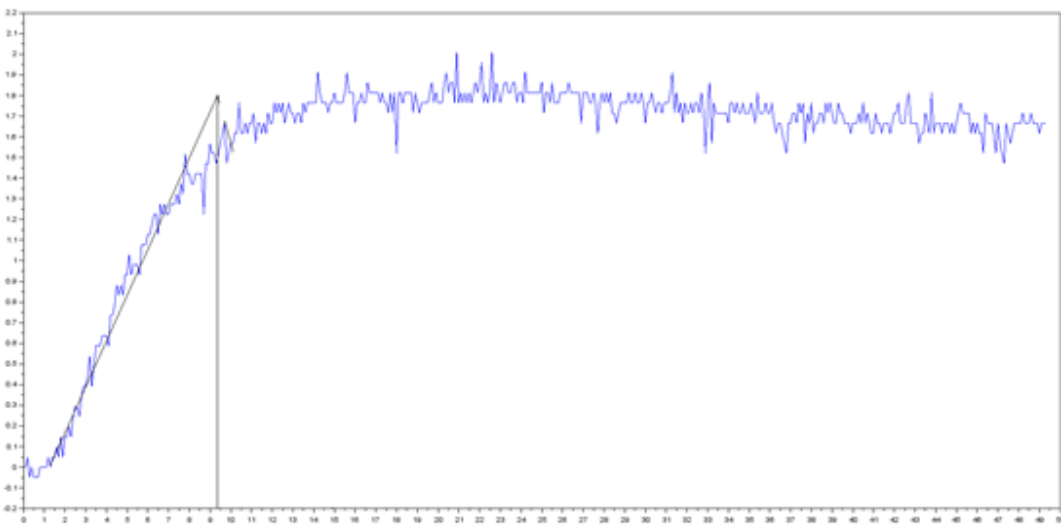
X-axel: Tid i sekunder



Figur 2.2 Stegsvvar(20-30%) med triangel för att bestämma tidskonstanten och statistiska förstärkningen.

Y-axel: Utsignalen i proportion till insignalen

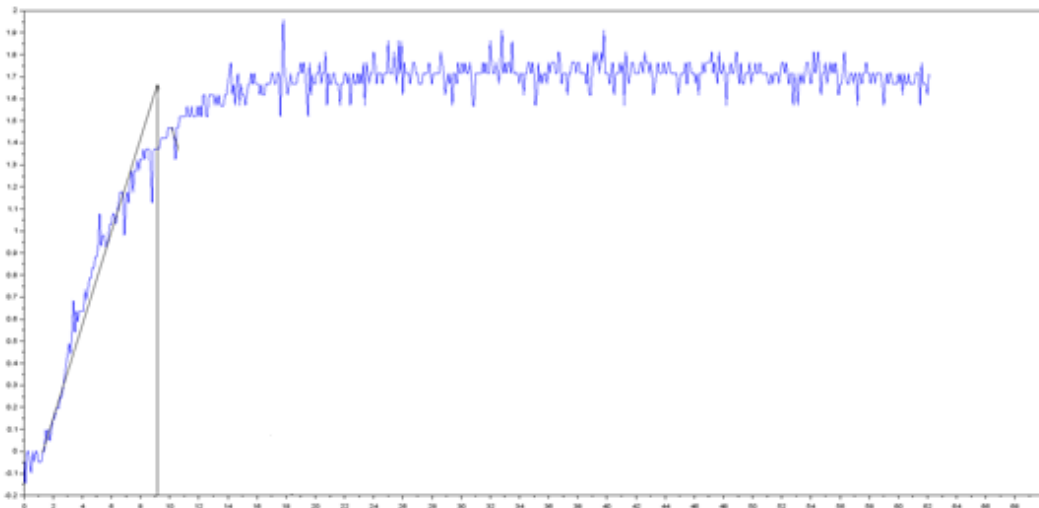
X-axel: Tid i sekunder



Figur 2.3 Stegsvvar(30-40%)r med triangel för att bestämma tidskonstanten och statistiska förstärkningen.

Y-axel: Utsignalen i proportion till insignalen

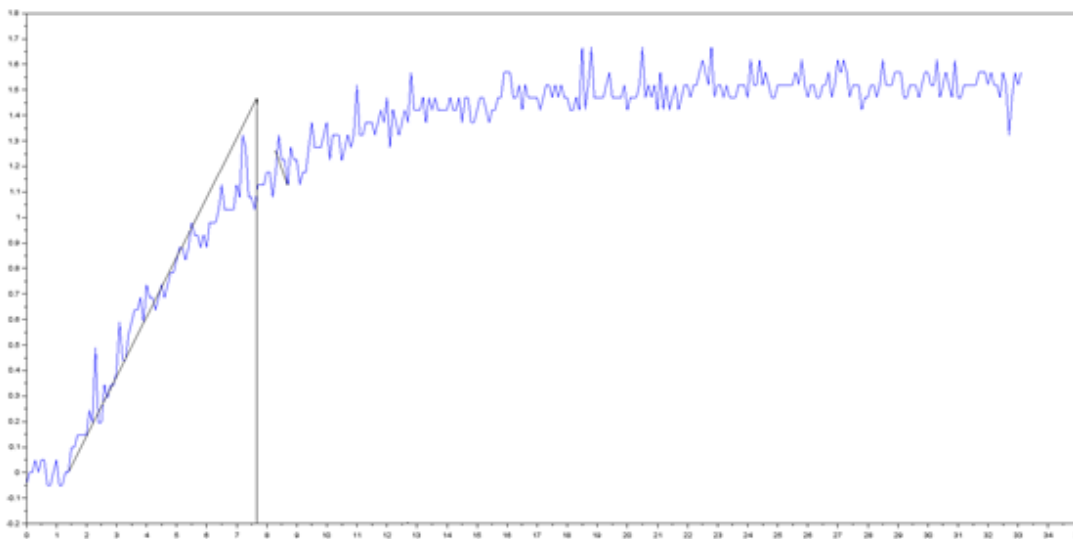
X-axel: Tid i sekunder



Figur 2.4 Stegsvvar(40-50%) med triangel för att bestämma tidskonstanten och statiska förstärkningen.

Y-axel: Utsignalen i proportion till insignalen

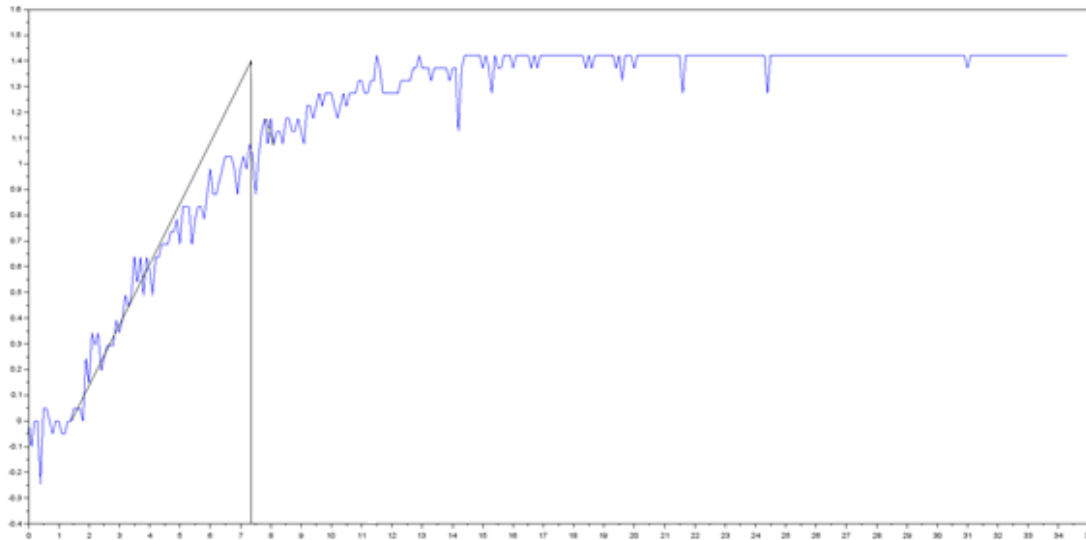
X-axel: Tid i sekunder



Figur 2.5 Stegsvvar(50-60%) med triangel för att bestämma tidskonstanten och statiska förstärkningen.

Y-axel: Utsignalen i proportion till insignalen

X-axel: Tid i sekunder

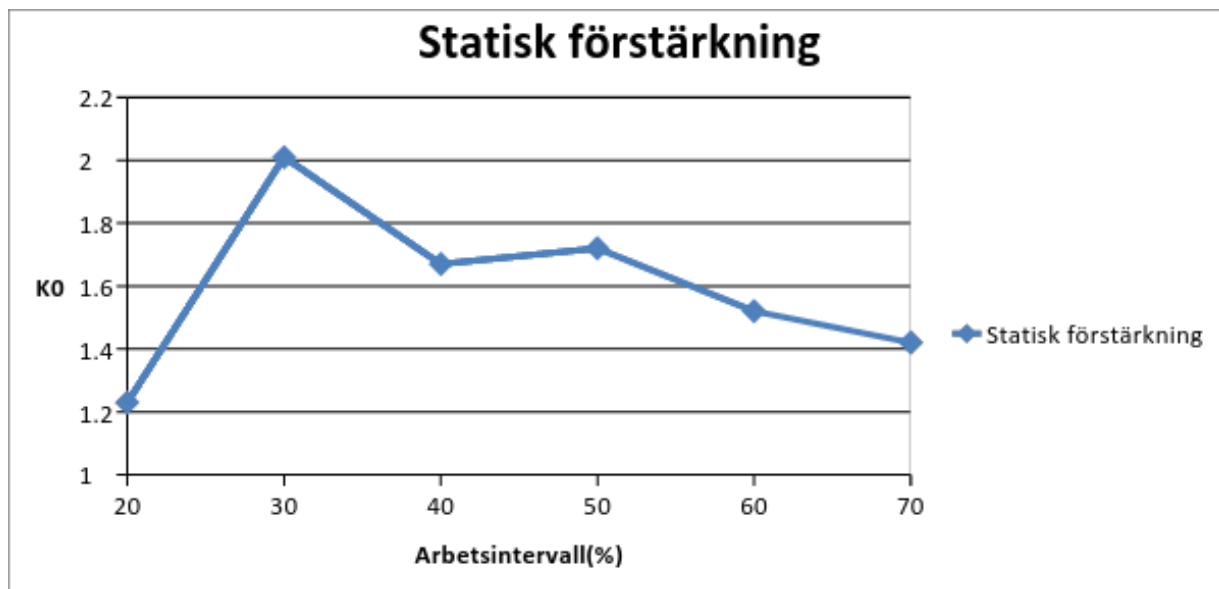


Figur 2.6 Stegsvär(60-70%) med triangel för att bestämma tidskonstanten och statiska förstärkningen.

Y-axel: Utsignalen i proportion till insignalen

X-axel: Tid i sekunder

Figur 2.7-2.9 visar pumpens statiska förstärkning, tidskonstant och dödtid i de ovan nämnda intervallen.

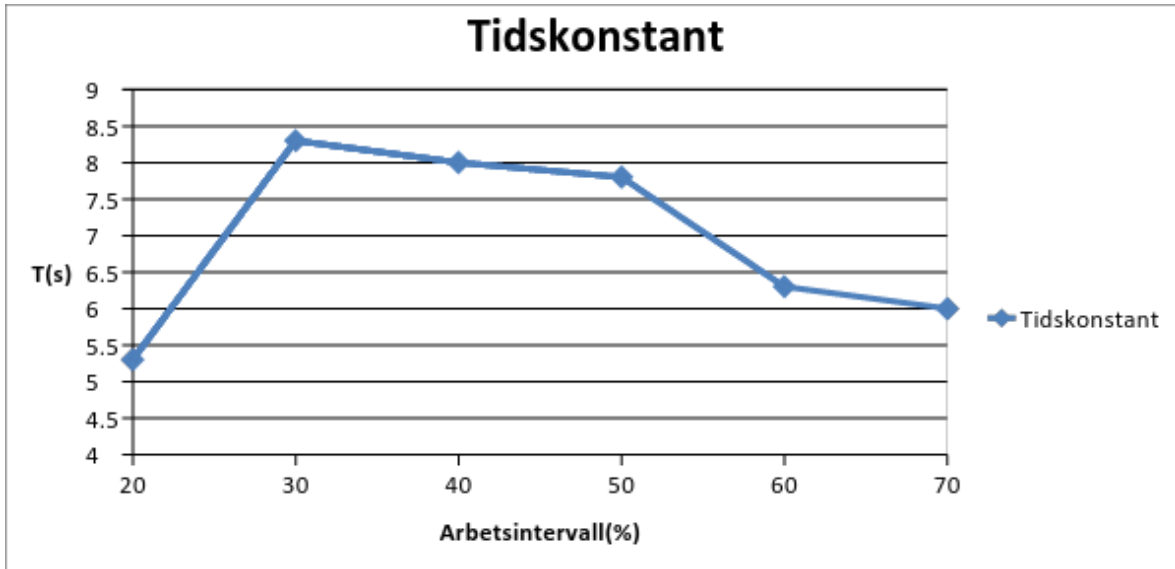


Figur 2.7 Statiska förstärkningen i respektive arbetsintervall.

Y-axel: Statiska förstärkningen

X-axel: Arbetsintervall i %

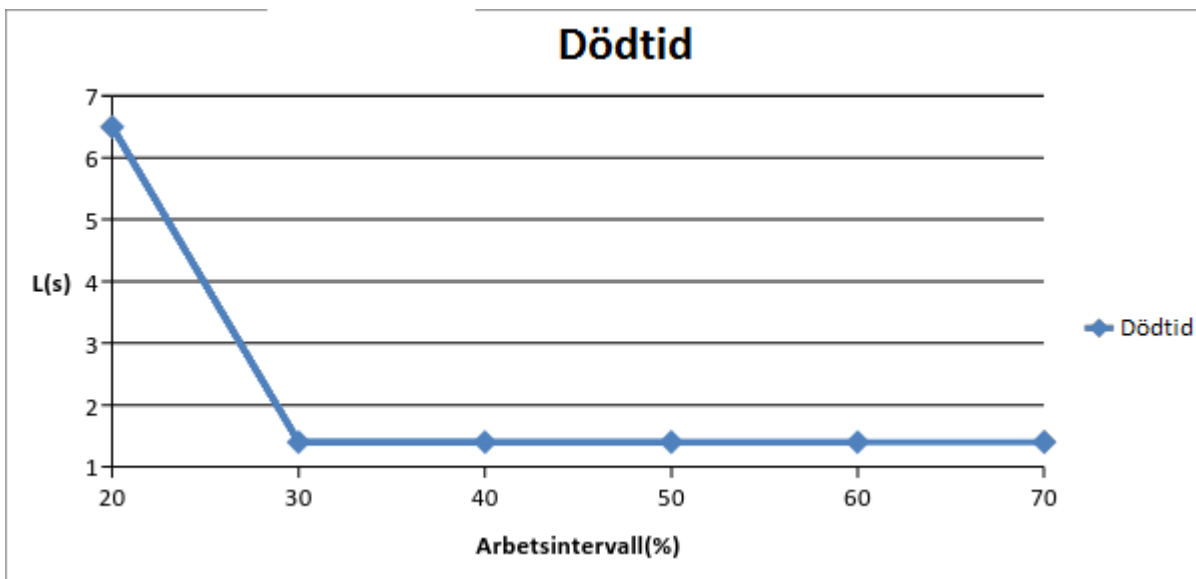




Figur 2.8 Tidskonstant i respektive arbetsintervall.

Y-axel: Tidskonstant i sekunder

X-axel: Arbetsintervall i %



Figur 2.9 Dödtid i respektive arbetsintervall.

Y-axel: Dödtid i sekunder

X-axel: Arbetsintervall i %

Detta leder till att om pumpen hade betraktats som ett system med endast en överföringsfunktion skulle PID-regleringen av denna bli mycket långsam i vissa intervall. Detta ledde till beslutet att använda s.k. gain-scheduling.

## 2.1 Gain-scheduling

Då inflödespumpens dynamik är olinjär är det omöjligt att ta fram konstanta PID-parametrar som ger bra insvängningstid oavsett arbetsintervall, vilket motiverar utnyttjandet av gain-scheduling. Gain-scheduling innebär att man delar upp systemet i flera intervall (i vårt fall intervall på 10% av maxflödet) som är så pass små så att dynamiken kan betraktas som linjär inom varje intervall. Sedan kan man ta fram PID-parametrar för varje intervall med valfri metod. För implementering av gain-scheduling förfärdigades 2 olika funktionsblock i Codesys som ändrar  $K_p$  och  $T_i$  till ett bestämt värde beroende på inflödets momentanvärde.

## 2.2 PID-parametrar

Vid val av PID-parametrar sattes  $T_d$  till 0 eftersom den deriverande delen inte bara ger mer stabilitet, utan även gör systemet mycket brus känsligt [1], vilket kan vara förödande då signalen från flödesgivaren var relativt brusig. Problemet skulle kunna lösas genom att filtrera signalen från flödesgivaren, men istället valdes alltså en PI-regulator. En PI-regulator fungerar i vårt fall eftersom systemet är relativt långsamt, D-delen är nödvändig främst om man har krav på mycket snabba insvängningstider. För att räkna ut  $K_p$  och  $T_i$

används en metod från [2]. Där väljer man  $K_p = \frac{0,4}{K_0} \sqrt{1 + \left(\frac{8T}{5L}\right)^2}$  och  $T_i = \frac{2KK_0(L+T)}{1+2KK_0}$ , vilket ger oss följande värden för de olika intervallen.

<b>Intervall(%)</b>	<b>L</b>	<b>T</b>	<b>K<sub>0</sub></b>	<b>K<sub>p</sub></b>	<b>T<sub>i</sub> (a=0)</b>
0-20	6,5	5,3	1,23	0,53	6,68
20-30	1,4	8,3	2,01	1,90	8,58
30-40	1,4	8,0	1,67	2,20	8,27
40-50	1,4	7,8	1,72	2,09	8,08
50-60	1,4	6,3	1,52	1,91	6,57
60-70	1,4	6,0	1,42	1,95	6,27

*Tabell 2.1 Tabell för dödtid, tidskonstant, statisk förstärkning, K<sub>p</sub> och T<sub>i</sub> i de olika intervallen.*

För att dessa värden på K<sub>p</sub> och T<sub>i</sub> ska fungera för systemet behöver dom multipliceras med en skalfaktor som är härledd från uträkningen av den statiska förstärkningen. I vårt fall är K<sub>s</sub>=0,02.

### 3 Reglering av doseringspumpar

Doseringen av polymer och metallsalt ska regleras så att önskad kvalitet på utgående vattenflöde uppnås. Kvaliteten på vattnet mäts i turbiditet. Polymeren och metallsaltet kan doseras oberoende av varandra. Polymeren och metallsaltet doseras i löst form.

Operatören skriver in andel aktiv produkt i lösningen så att rätt mängd lösning doseras för att uppnå önskad koncentration i tankarna. Polymeren doseras av en pump med en maxkapacitet på 750 l/h och metallsaltet doseras av en pump med en maxkapacitet på 12 l/h. Det är värt att notera att storleken på pumparna inte reflekterar förhållandet mellan polymerkoncentrationen och koncentrationen av metallsalt, då lösningen av metallsalt har en högre andel aktiv produkt. Mängden kemikalielösning doseras beroende på utflöde och andel aktiv produkt i koncentrationen enligt formlerna.

$$q_{\text{polymer}} \left( \frac{l}{h} \right) = \frac{\text{Börvärde polymer} \left( \frac{g}{m^3} \right) * Q_{in} \left( \frac{m^3}{h} \right)}{\text{Andel aktiv produkt} (g/g) * \text{koncentration i moderlösning} (g/l)} \text{ Formel 3.1}$$

$$q_{\text{me}} \left( \frac{l}{h} \right) = \frac{\text{Börvärde } Me^{3+} \left( \frac{g}{m^3} \right) * Q_{in} \left( \frac{m^3}{h} \right)}{\text{Me halt i produkt} \left( \frac{g}{g} \right) * \text{densitet av produkt} \left( \frac{g}{l} \right)} \text{ Formel 3.2}$$

#### 3.1 Beskrivning av systemet

När det kom till att reglera utgående turbiditet fanns det bara ett val när det gällde styrsignal, polymerdoseringspumpen och koagulantpumpen som en faktor av polymerdoseringen, då det är det enda som går att styra som har en direkt inverkan på utgående turbiditet. När det kom till vilken signal som skulle återkopplas ifrån var det inte lika självklart på vilket sätt signalen från utgående turbiditetsgivare skulle användas.

Problemet var att om man enbart skulle återkoppla från utgående turbiditetsgivare skulle ingen hänsyn tas till inkommande turbiditet. Då vårt system har en mycket stor tidskonstant är detta ett problem, eftersom en plötslig förändring i inkommande turbiditet skulle få återkopplingen att över- eller underdosera polymer och metallsalt.

Två olika lösningar diskuterades. Den första lösningen var att systemet kontinuerligt skulle räkna ut en reduktion i procent mellan börvärdet och inkommande turbiditet. Det värdet skulle sedan användas som börvärde. Ärvärdet skulle väljas som kvoten av nuvarande utgående turbiditet och nuvarande inkommande turbiditet i procent.

Den andra lösningen [3] var att implementera en framkoppling som baserat på inkommande turbiditet doserar polymer för att hålla utgående turbiditet konstant. Den inkommande turbiditeten blir då högsta (motsvarande smutsigast) möjliga börvärde.

En framkoppling kommer implementeras för att undvika att börvärdet hela tiden kommer förändras. Detta skulle bli fallet om den första metoden med kvotreglering användes. Nackdelen med att använda en framkoppling är att en övre gräns för turbiditet i utgående vatten måste sättas eftersom effekten av framkopplingen är att utgående turbiditet aldrig överstiger 140. Detta leder till att börvärdet inte kan överstiga 140 NTU.

Framkopplingen ställdes in så att polymer skulle doseras beroende på turbiditet hos inkommande vatten så att utgående turbiditet låg konstant på 140 NTU. Denna siffra är baserad på utgående turbiditet då ingen polymer eller koagulant doseras och lägsta tänkbara inkommande turbiditet på 200 NTU råder. Då reduceras partikelmängden med 30% i ett kemikaliefritt vatten.

Därmed valdes 140 NTU som ett maxvärde för utgående turbiditet eftersom det under dessa förhållande inte gick att få lägre. 140 NTU som ett maxvärde är också inom rimliga gränser för Hydrotechs önskemål. Hur framkopplingen implementerades tas upp i detalj i avsnitt 3.3.

Som det framgår av figur A.1-A.8(Appendix A.1) så är förhållandet mellan polymerdosering ( $\text{g/m}^3$ ) och reduktionen av partiklar (%) inte linjärt. Detta innebär att gain-scheduling måste implementeras. Det tar hänsyn till vilket doseringsintervall systemet befinner sig i och ändrar PI-parametrarna därefter. Gain-scheduling implementeringen tas upp i detalj i avsnitt 3.4.

Då tidskonstanten är omvänt proportionell mot inflödet måste I-delen hos PI-regulatorn ändras beroende på inflödet. Detta beskrivs i detalj i avsnitt 3.5

Som figur A.9-A.14(Appendix A.1) visar påverkar koagulantdoseringen i samband med polymerdosering reduktionen av partiklar på så vis att reduktionen blir större desto mer koagulant som doseras upp till en viss gräns. Eftersom koagulanten inte bara påverkar fosforhalten i vattnet utan också partikelreduktionen måste man ta hänsyn till detta genom att PI-parametrarna ställs om beroende på den faktor koagulat som doseras. Implementationen av denna gain-scheduling beskrivs i detalj i avsnitt 3.6.

## 3.2 Förenklingar och approximationer

För att göra problemet med regleringen av detta system mer överkomligt gjordes en del förenklingar och approximationer.

Framkopplingen antogs fungera perfekt, vilket självfallet inte är hur verkligheten ser ut.

”Partikelreduktion i förhållande till polymerdosering” kurvan delades upp i två intervall och betraktades som linjära.

Förhållandet mellan partikelreduktion och kvoten mellan koagulant och polymer antas vara linjärt.

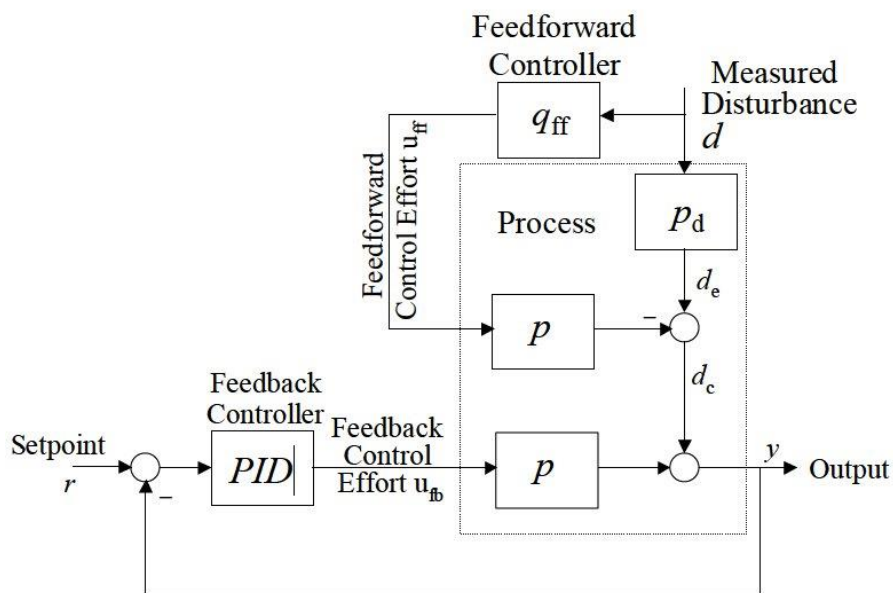
En del faktorer som påverkar systemet försumrades vid beräkningen av PI-parametrarna till regulatorn då de inte påverkar tillräckligt mycket för att tas hänsyn till. Saker som kan påverka utgående turbiditet är bland annat att polymerberedaren har en felmarginal hos koncentrationen av polymerlösningen. Vattnets temperatur och vilken typ av vatten det är påverkar hur vattnet reagerar på kemikalier.

Mätmetoden som används är också en källa för fel. Utgående turbiditet mäts med en turbiditetsmätare som är nedstoppad i en tank på en  $1\text{ m}^3$ , där vårt utgående vatten först passerar genom innan det rinner ut i bassängen. Turbiditet är i sig ett osäkert sätt att mäta vattenkvalité då det är baserat på vad turbiditetsmätaren har framför sig och ger därför inte en helt korrekt bild av vattenkvalitén. Ett annat problem är att givaren (trots att den är självrengörande) lätt blir smutsig och därför ger oriktiga resultat. Detta skulle eventuellt kunna förhindras genom att öka frekvensen av självrengöringen. Ett bättre sätt att mäta vattenkvalité är suspended solids men det är inte logistiskt möjligt att återkoppla från värdet i NTU. Själva tanken rengörs inte heller regelbundet och smutsavlagringar kan påverka turbiditeten i tanken. Men eftersom det inte finns något annat rimligt sätt att mäta utgående turbiditet så ses signalen från turbiditetsmätaren som ett mått på vattnets verkliga kvalité.

### 3.3 Feedforward

Framkopplingen valdes att dosera beroende på inkommande turbiditet på grund av att det är den faktorn som påverkar utgående turbiditet mest. Som framgår av blockschemat nedan [4] så betraktas inkommande turbiditet över 200 NTU som en störning( $v$ ). Det är värt att notera att 200 är inte valt för att det är ett medelvärde utan för att det är det lägsta möjliga inkommande turbiditet under dygnet.

Om ingen polymer doseras är filtrets partikelreduktion 30%. Detta innebär att när kvalitén på inkommande vatten är 200 NTU så är utgående turbiditet 140 NTU. I praktiken är framkopplingens funktion att dosera polymer så att utgående turbiditet ligger konstant på 140 NTU. På grund av detta så kommer maxgränsen för operatören för önskad turbiditet ut att vara 140 NTU.



Figur 3.1, från [4]

$r$  = börvärdet

$y$  = ärvärdet

$q_{ff}$  = framkopplingen

$p_{q_{ff}}$  = framkopplingens inverkan på systemet

$P_d$  = störningens inverkan på systemet

$d$  = störningen (inkommande turbiditet som överstiger 200 NTU)

$d_c$  = störningens inverkan - framkopplingens inverkan

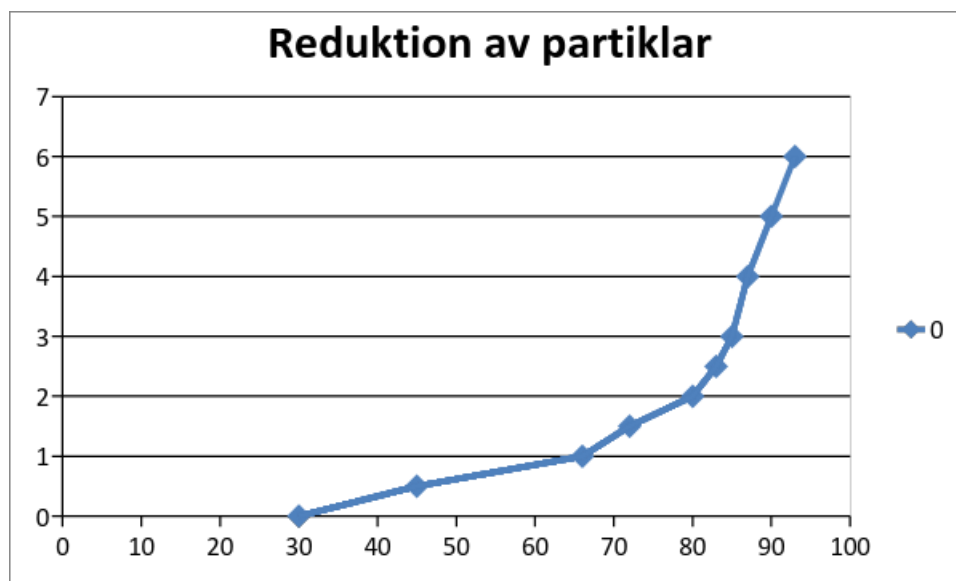
Överföringen mellan  $y$  och störningen  $d$  kan skrivas som

$$Y(s) = \frac{d_c}{1+PPID} = \frac{(p_d - pq_{ff})d}{1+PPID}. \text{ Formel 3.3}$$

För att eliminera felet väljer man  $p_d - pq_{ff} = 0$ .

Det fanns flera anledningar till att det var gynnsamt att implementera en framkoppling för dosering av polymer. Processen är långsam och att framkoppla från inkommande turbiditet kommer att förkorta systemets insvängningstid markant, då framkopplingen försöker åtgärda felet innan det kommer till utsignalen. Att kompensera beroende på inkommande turbiditet kommer också att ha en stabiliserande effekt på systemet vilket ger reglerfelet en bättre chans att svänga in sig.

För att hitta förhållandet mellan polymerkoncentration i doseringstankarna och partikelreduktion gjordes följande mätningar. Mätningar erhöles när systemet var i openloop med på inflödespumpen ett konstant flöde på  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  och inkommande turbiditet låg runt  $300 \text{ NTU}$ . I figur 3.2 är reduktionen av partiklar mätt i % i förhållande till polymer doserat i  $\text{g}/\text{m}^3$ .



Figur 3.2 Reduktion av partiklar mätt i % i förhållande till polymer doserat i  $\text{g}/\text{m}^3$

Y-axel: Dosering av polymer i  $\text{g}/\text{m}^3$

X-axel: Partiklar reducerade i utflödet i förhållande till inflödet i %



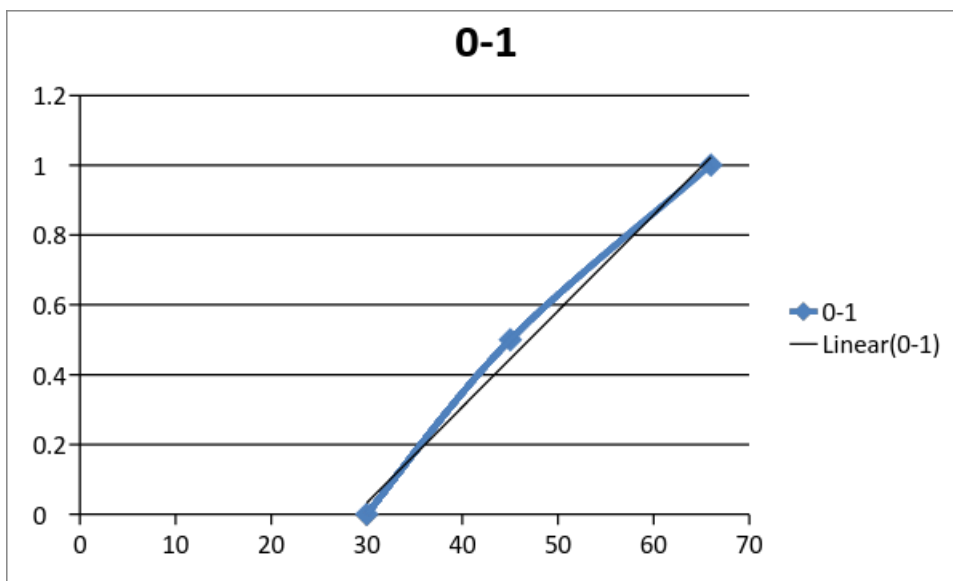
Mätningarna visar att förhållandet mellan polymerkoncentration i doseringstankarna och NTU reduktion inte linjärt. Doseringen delas upp i intervall där förhållandet kan betraktas som linjärt. Följande intervall valdes: 0-1 g/m<sup>3</sup>, 1-2.5 g/m<sup>3</sup>, 2.5-6 g/m<sup>3</sup>.

Förstgradspolynom för förhållandet mellan polymerdosering och partikelreduktion erhöles genom trendlinjefunktionen i Excel. Förstgradspolynom är följande där y är polymerdoseringen i g/m<sup>3</sup> och x är partikelreduktionen i %

$$0-1 \text{ g/m}^3: y = 0.0275x - 0.7936$$

$$1-2.5 \text{ g/m}^3: y = 0.0825x - 4.4594$$

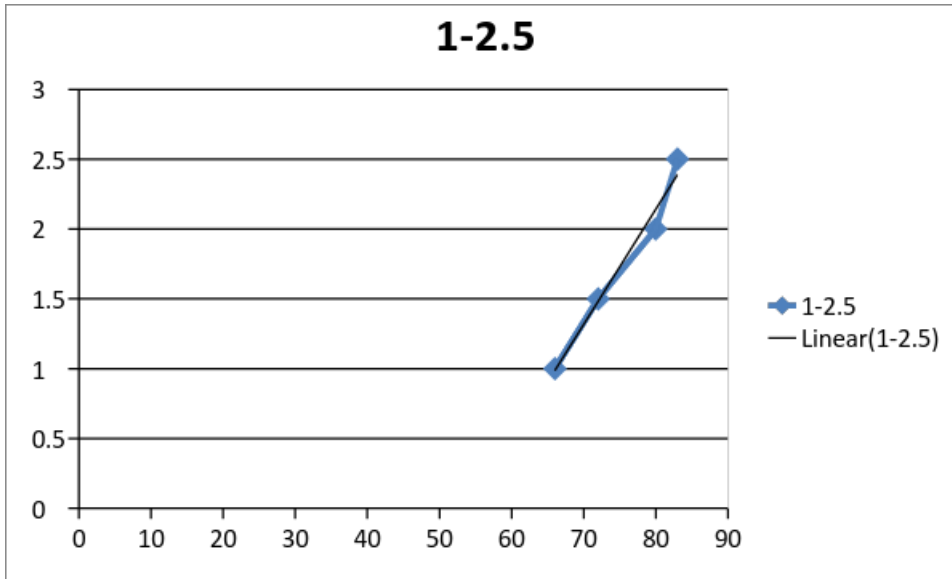
$$2.5-6 \text{ g/m}^3: y = 0.3592x - 27.364$$



Figur 3.3 Reduktion av partiklar mätt i % i förhållande till polymer doserat i g/m<sup>3</sup>

Y-axel: Dosering av polymer i g/m<sup>3</sup>

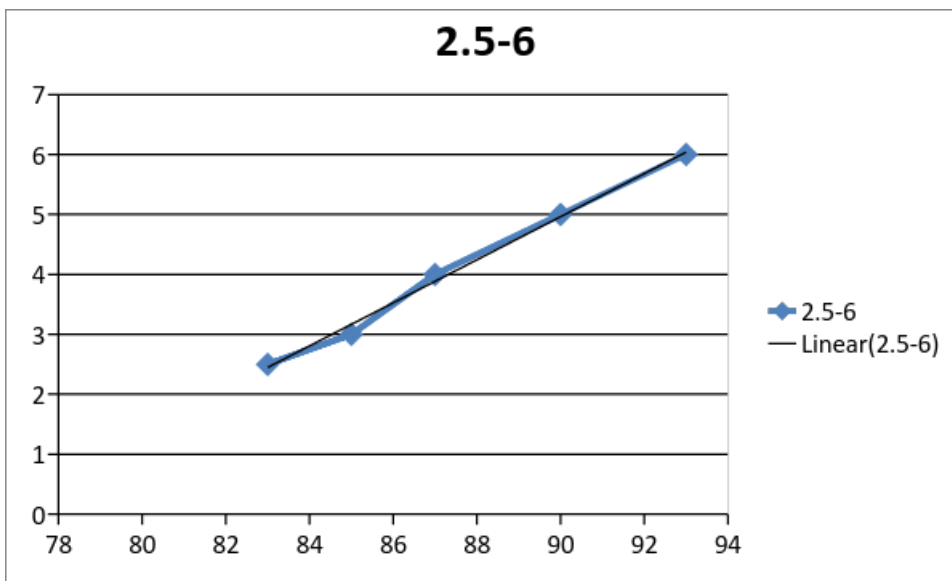
X-axel: Partiklar reducerade i utflödet i förhållande till inflödet i %



Figur 3.4 Reduktion av partiklar mätt i % i förhållande till polymer doserat i g/m<sup>3</sup>

Y-axel: Dosering av polymer i g/m<sup>3</sup>

X-axel: Partiklar reducerade i utflödet i förhållande till inflödet i %



Figur 3.5 Reduktion av partiklar mätt i % i förhållande till polymer doserat i g/m<sup>3</sup>

Y-axel: Dosering av polymer i g/m<sup>3</sup>

X-axel: Partiklar reducerade i utflödet i förhållande till inflödet i %

Programkoden i kodavsnitt 3.1 implementerar framkopplingen för systemet där polymer doseras beroende på vilken reduktion som krävs.

```
REDUKTION:=100.0*(1.0-(140.0/TURBIN));  
IF(REDUKTION<=30.0) THEN  
DOSERING:= 0;  
END_IF  
  
IF(REDUKTION>30.0 AND REDUKTION<=65.0) THEN  
DOSERING:= (0.0275*REDUKTION) -0.7936;  
END_IF  
  
IF(REDUKTION>65.0 AND REDUKTION<=83.0) THEN  
DOSERING:= (0.0825*REDUKTION) -4.4594;  
END_IF  
  
IF(REDUKTION>83.0) THEN  
DOSERING:= (0.3592*REDUKTION) -27.364;  
END_IF
```

*Kodavsnitt 3.1*

### **3.4 Återkoppling utan koagulant med konstant inflöde**

Eftersom återkopplingssignalen (turbiditet ut) minskar när polymerdosen ökar så var det nödvändigt att skapa en ny signal som ökar då polymerdosen ökar för att kunna använda signalen till PI-reglering. Då framkopplingen antas fungera felfritt blir maxvärdet på utgående turbiditet 140 NTU och minsta värdet 0 NTU. För att få en signal lämplig till återkoppling gjordes en signal där 140 NTU motsvarar 0 NTU, och 0 NTU motsvarar maxvärdet för 12 bitar, 4095.

```
IF (TURBIN>140.0) THEN  
    TURBIN := 140.0;  
END_IF  
  
UTSIGNAL := 4095.0 - 29.25 * TURBIN;
```

*Kodavsnitt 3.2*

Då styrsignalen till doseringspumpen är beroende av flödet enligt formel 3.1 bestämdes det att utsignalen från PI-blocket i PLC-programmet skulle vara i form av polymer i  $\text{g/m}^3$ . Detta värde sätts sedan in i kodavsnitt 3.2. Utifrån våra mätningar som visade att över  $5 \text{ g/m}^3$  polymer så är skillnaden minimal, togs beslutet att återkopplingens utsignal skulle vara mellan 0 och  $4 \text{ g/m}^3$ . Anledningen att maxvärdet är 4 och inte 5 är att signalen från återkopplingen och framkopplingen adderas så när båda är verksamma i systemet så kommer den maximala doseringen ligga mellan 5 och  $6 \text{ g/m}^3$ .

När utgående turbiditet skulle regleras skrevs ett PID-block i Codesys [5] för att kunna analysera P och I delarnas momentana inverkan, vilket saknas i det färdiga PID-blocket i Codesys.

```
TI:=27000/INFLOW;  
ERROR:=(BOR-AR)/4095;  
INTEGRAL:=INTEGRAL+(ERROR*0.2);  
DERIVATA:=(ERROR-PREERROR)/0.2;  
IF (INTEGRAL>TI) THEN  
    INTEGRAL:=TI;  
END_IF  
U:=((KP*ERROR) + (KI*INTEGRAL) + (KD*DERIVATA));  
P:=(KP*ERROR);  
I:=(KI*INTEGRAL);  
D:=(KD*DERIVATA);
```

```
IF (I>1) THEN  
    I:=1;  
END_IF
```

```
IF (U>1) THEN  
    U:=1;  
END_IF
```

```
IF (U<0) THEN  
    U:=0;  
END_IF
```

```
PREERROR:=ERROR;
```

*Kodavsnitt 3.3*

Notation:  $\text{TI}:=27000/\text{INFLOW}$  kan vid första anblick verka oklart men detta förklaras i avsnitt 3.5

När tillvägagångssättet var bestämt var det dags att bestämma PI-parametrar. Då PI-parametrarna är dynamiskt beroende av olika faktorer i systemet valdes en instans för att hitta lämpliga parametrar på, för att sedan använda som utgångspunkt för gain-schedulingen.

Ett godtyckligt inflöde på  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  valdes och hölls konstant. Även ett godtyckligt börvärde valdes på 90 NTU. Det är värt att notera att 90 NTU inte är en helt slumpmässigt valt utan valdes för att förhållandet mellan polymerdosering och partikelreduktionen kan betraktas som linjär i börvärdesintervallet 140-90 NTU.

För att hitta ett lämpligt värde på integraldelen användes triangelmetoden på den openloopmätning som visas i figur A.1(Appendix A.1) där 1 g polymer per  $\text{m}^3$  doseras och inflödet är  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dödtiden + tidskonstanter blir 1000 sekunder.  $T_i$  väljs till 1000s och  $K_p$  väljs till 1 som ett grundvärde. Det visade sig att  $T_i = 1000\text{s}$  var en bra första gissning men eftersom verkligheten sällan stämmer överens med teorin så gjordes tester utifrån resultatet av mätningen  $T_i = 1000\text{s}$ . Efter testerna valdes  $T_i = 900\text{s}$ . Figur A.15-A.16(Appendix A.2) visar insvängningen när  $T_i = 1000\text{s}$ , figur A.17-A.18(Appendix A.2)  $T_i = 800\text{s}$  och figur A.19-A.20(Appendix A.2)  $T_i = 900\text{s}$ . Notera att utgående signal är begränsad till 1 även om summan av P-delen och I-delen överstiger 1.

När ett lämpligt  $T_i$  var funnet var det dags att hitta ett bra proportionellt värde. Då utsignalen från PI-regulatorn först går igenom funktion(3) vilken i sin tur är baserad på inkommande turbiditet innan signalen till doseringspumpen. Detta gör det väldigt svårt att matematiskt räkna ut den statiska förstärkningen till systemet. Därför valdes  $K_p = 1$ , för att sedan göra tester och resonera oss fram till ett lämpligt värde på  $K_p$ . Figur A.21- A.22 (Appendix A.2)  $K_p = 1$   $T_i = 900\text{s}$ , Figur A.23-A.24(Appendix A.2)  $K_p = 0.5$   $T_i = 900\text{s}$ , Figur A.25-A.26 (Appendix A.2)  $K_p = 0.3$   $T_i = 900\text{s}$ . Systemet slutar självsvänga vid 0.3 så P valdes till 0.3.

När lämpliga PI-parametrar var funna till 90 NTU,  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , var nästa steg att implementera gain-scheduling med avseende på förhållandet mellan polymerdosering och partikelreduktion. Detta var nödvändigt eftersom partikelreduktionen sett i % minskar i förhållande till polymerdosering. Det innebär att P-delen måste ändras omvänt proportionerligt mot börvärdet, då det krävs mer polymer per NTU som ska reduceras. I mätningen som visas i figur A.27-A.28(Appendix A.2) är börvärdet 60 NTU utan gain-scheduling. P-delen är för svag vilket innebär att insvängningstiden är långsam, samt att p.g.a. systemets långa tidskonstant blir I-delen för stor innan börvärdet uppnås vilket resulterar i en översväng.

I figur A.29-A.30(Appendix A.2) visas ett försök till gain-scheduling i form av  $P\_DEL\_K:=0.3+(90-BOR)*0.02$ ;,. Det framgår av grafen att P-delen fortfarande är för svag.

I figur A.31-A.32(Appendix A.2) visas ett försök till gain-scheduling i form av  $P\_DEL\_K:=0.3+(90-BOR)*0.04$ ;,. Det framgår av grafen att P-delen fortfarande är för svag.

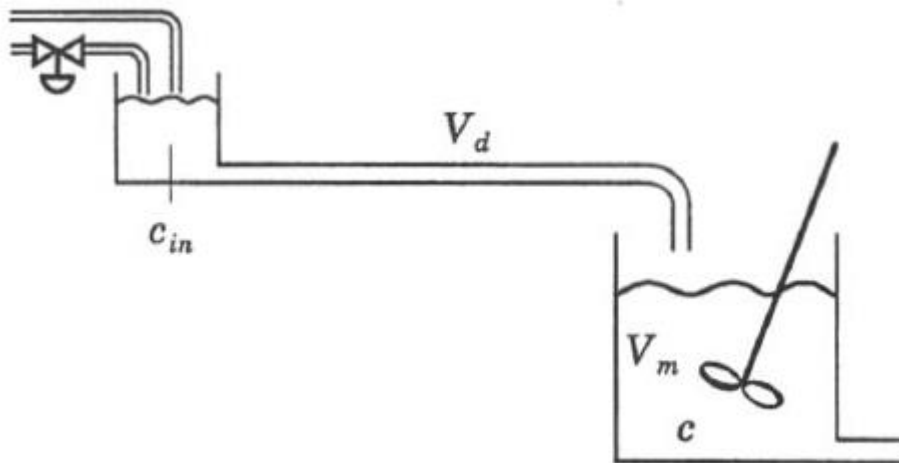
I figur A.33-A.34(Appendix A.2) visas ett försök till gain-scheduling i form av  $P\_DEL\_K:=0.3+(90-BOR)*0.06$ ;.  
Detta ger en bra insvängningstid.

I figur A.35-A.36(Appendix A.2) gjordes en mätning med den slutgiltiga gain-schedulingen för att kontrollera att antagandet om att 90 NTU var en bra brytpunkt för gain-scheduling. Det visade sig att det var ett bra antagande då systemet svängde in sig bra på 80 NTU.

### **3.5 Återkoppling utan koagulant med varierande inflöde**

Hittills har ett konstant flöde på (30m<sup>3</sup>/h) använts för att göra våra mätningar, vilket har gjort det möjligt att ha ett konstant värde på T. Detta beror på att tidskonstanten är direkt beroende av vilket flöde som används.

I [6] beskrivs ett system där en vätska med en viss koncentration rinner genom ett rör för att sedan hamna i en tank.



Figur 3.6, från [6]

Systemet följer sambandet  $V_m \frac{dc(t)}{dt} = q(t) \left( c_{in} \left( t - \frac{V_d}{q(t)} \right) - c(t) \right)$  formel 3.4

där  $V_d(\text{m}^3)$  är rörets volym,  $C_{in}(\text{g}/\text{m}^3)$  är vätskans koncentration,  $V_m(\text{m}^3)$  är tankens volym och  $c(\text{g}/\text{m}^3)$  är tankens koncentration. Ytterligare ett samband som gäller är  $T=V_m/q$ . Systemet som beskrivs i boken är i stora drag samma system som Hydrotechs, vilket innebär att sambanden som beskrivs ovan kan användas. Att systemets tidskonstant  $T=V_m/q$  är mycket användbart, då det gör det möjligt att göra en gain-scheduling mellan  $T(\text{s})$  och flödet( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Då denna matematiska modell är nödvändig för att visa sambandet mellan  $T$ ,  $V_m$  och  $q$  går det inte att följa den helt då perfekt blandning antogs när modellen togs fram. Vattnet i tanken på anläggningen måste uppskattningsvis bytas ut ca 3 gånger för att önskad koncentration ska uppnås. Men även detta är en alltför grov uppskattning för att  $V_m$  ska väljas till tre gånger tankens volym. Det är känt att  $T$  är inversproportionerlig mot inflödet,  $T=V_m/q$  och att  $T=V_m/30 = 900\text{s}$  baserat på tidigare mätningar. Detta ger  $V_m = 900 * 30 = 27000 \text{ m}^3$ .  $T = 27000/q \text{ s}$ .

### 3.6 Återkoppling med koagulant

Enligt Hydrotechs önskan skulle koagulanten doseras proportionellt mot polymerdosen med en viss faktor. Denna faktor skulle bestämmas av operatören.

När dosering sker med en koagulantfaktor krävdes inte lika mycket polymer för att samma resultat skulle uppnås. Detta leder till en liten överdosering när föregående PI-parametrar används, vilket framgår i figur A.37-A.38(Appendix A.3) där koagulant doseras med en faktor på 1.

I figur A.39-A.40(Appendix A.3) visas ett försök till gain-scheduling i form av  $P\_DEL\_K:=(0.3 +(90-BOR)*0.06)-(K\_COAG*0.1)$ ; Det framgår av grafen att P-delen fortfarande är för stark.

I figur A.41-A.42(Appendix A.3) visas ett försök till gain-scheduling i form av  $P\_DEL\_K:=(0.3 +(90-BOR)*0.06)-(K\_COAG*0.2)$ ; Det ger en insvängning utan oacceptabel översväng.

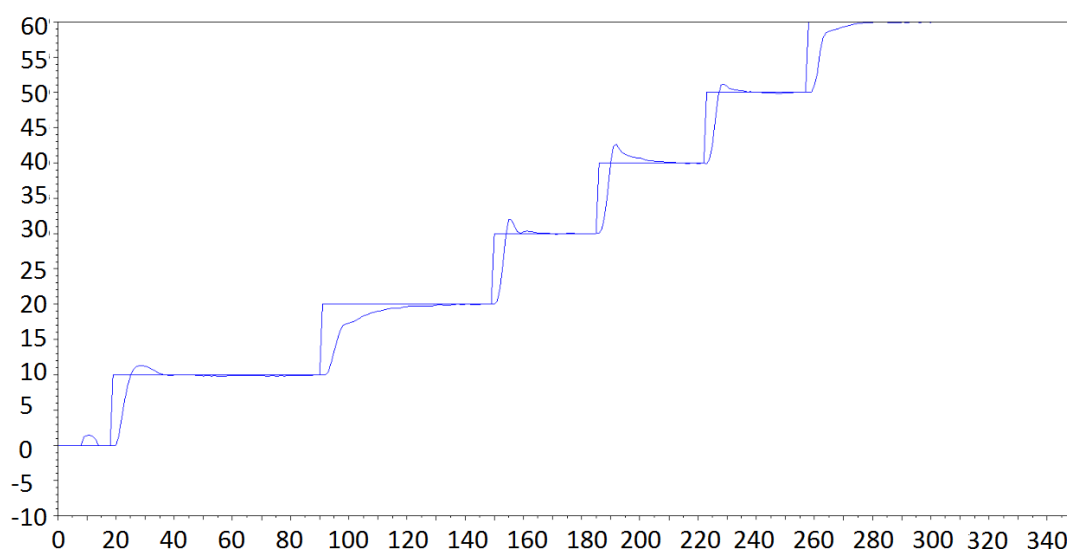


## 4 Resultat

Nedan presenteras resultatet av regleringen. Först för regleringen av inflödespumpen genom att ändra börvärdet för inflödet och mäta systemets insvängningstid och det kvarstående reglerfelet. Sedan regleringen av doseringspumparna genom att ändra börvärdet för turbiditeten av utgående vatten och mäta systemets insvängningstid och det kvarstående reglerfelet.

### 4.1 Inflödespump

I figur 4.1 visas en ”trappa” med olika börvärdesändringar och motsvarande stegsvar. Innan systemet svängde in sig blev det en översväng, vilket var fullt acceptabelt för våra krav. Det kvarstående reglerfelet  $\approx 0$ , vilket är det viktigaste kravet.



Figur 4.1 Flöde inkommande vatten och börvärde.

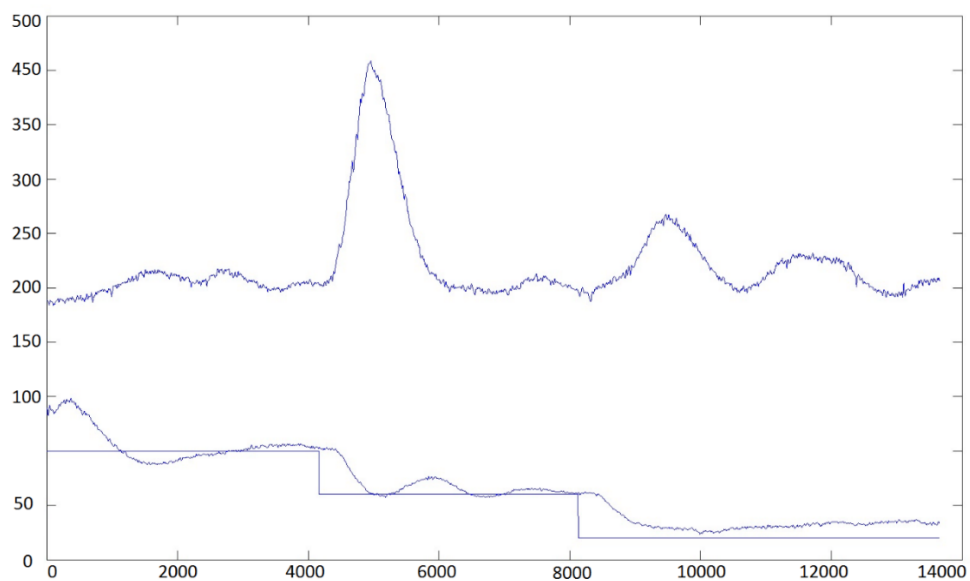
Y-axel: Flöde i m<sup>3</sup>/h

X-axel: Tid i sekunder

Då störningarna på vår process i form av förändringar i vattennivån är svåra att förutsäga är det av stor vikt att se till så att vårt system har goda stabilitetsmarginaler. Vi kallar vår process bestående av inflödespumpen, frekvensomriktaren  $G_p(s)$  och PI-regulatorn  $G_r(s)$ , där  $G_r(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right)$  och  $G_p(s) = \frac{k_0}{T \cdot s + 1}$ . Det återkopplade systemets överföringsfunktion  $G(s) = G_p(s)/(1+G_p(s)*G_r(s))$ .  $G(s)$  är ostabilt när det har poler i högra halvplanet, vilket innebär att om  $G_p(s)*G_r(s) = -1$  så är systemet ostabilt. Då den karakteristiska ekvationen är av andra graden och koefficienterna är positiva kommer polerna alltid vara i det vänstra halvplanet, vilket ger oss oändlig amplitudmarginal.

## 4.2 Doseringspumpar

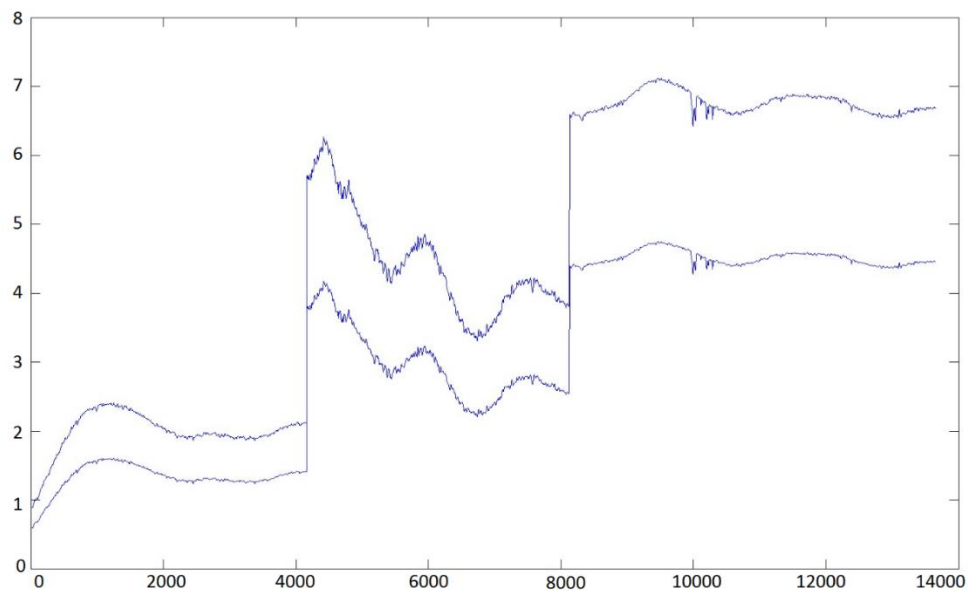
För att se resultatet av doseringsregleringen gjordes en trappa med olika börvärden där koagulantfaktorn är satt till 1.5 gånger polymerdoseringen. I figur 4.2 är börvärdet först satt till 100 och systemet svänger in sig relativt bra, med tanke på kravet på att det kvarstående reglerfelet inte ska överstiga 10NTU. Det andra börvärdet är satt till 60NTU och man ser en liknande insvängning. Det kan även märkas att en turbiditetsspike i inkommande turbiditet inte påverkar insvängningen noterbart, eftersom framkopplingen kompenserar för detta. Som det framgår av grafen når inte ärvärdet börvärdet 20 NTU trots att regleringen doserar med maximal kapacitet. Detta beror på att koagulantfaktorn är för lågt bestämd för att ett så lågt värde ska nås.



Figur 4.2 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant i intervaller).

Y-axel: Turbiditet i NTU

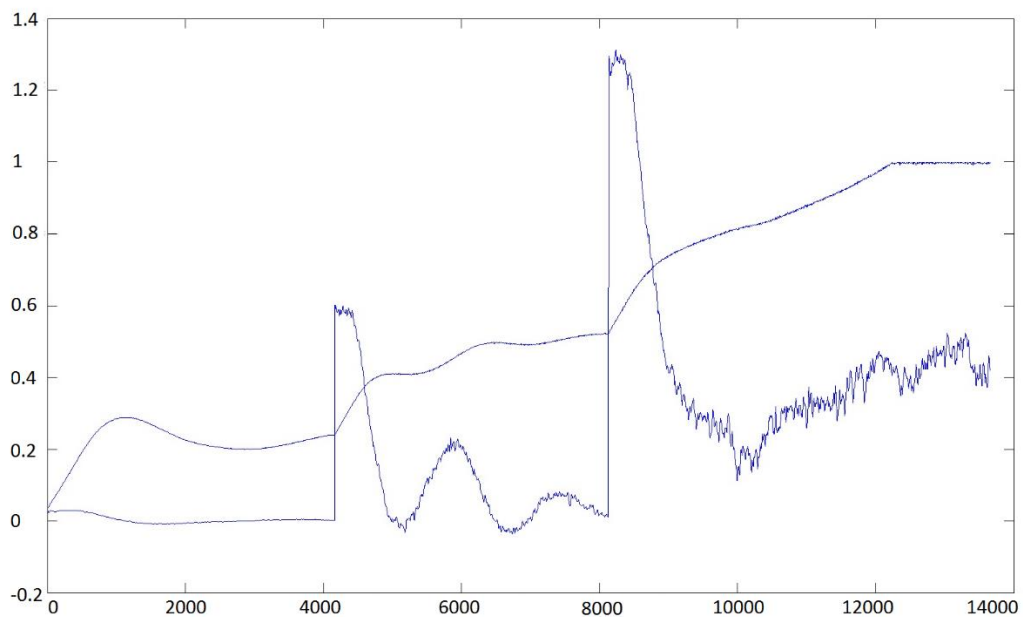
X-axel: Tid i sekunder



Figur 4.3 Doseringen av koagulant(övre kurva) och polymer(undre kurva).

Y-axel: Densitet g/m<sup>3</sup>

X-axel: Tid i sekunder



*Figur 4.4 P-delens inverkan(generellt sjunkande efter börvärdesändring) och I-delens inverkan(generellt stigande).*

*Y-axel: Inverkan 0-1*

*X-axel: Tid i sekunder*

## 5 Slutsats

I inledningen av rapporten ställdes två frågor om styrningen av inflödespumpen och kemikaliedoseringen som nu kan besvaras. När det gäller styrningen av inflödespumpen kan det konstateras att det är möjligt för operatören att ställa in ett relativt konstant flöde oberoende av yttre faktorer (se figur 4.1).

PI-parametrarna kan finjusteras för att få en bättre insvängning, men man kan ändå dra slutsatsen att användning av en PI-regulator med gain-scheduling är en lämplig metod för att reglera ett olinjärt system.

Den andra frågan som skulle besvaras var om det var möjligt att skapa en PI-regulator i Codesys som låter operatören välja ett värde på utgående NTU som kan uppnås oberoende av inkommande vattenkvalité och flöde. Då även detta system var olinjärt användes gain-scheduling. Detta testades framgångsrikt i praktiken och mätningarna är presenterade i figur 4.2.

Då tidskonstanten var mycket stor så var framkoppling lämpligt för att motverka fördröjningen som annars uppstår i systemet. Vi kan bevisa att framkoppling var en effektiv metod för att motverka att turbiditeten på utgående vattenflöde påverkas av plötsliga spikar i turbiditeten på inkommande vattenflöde. Detta visas tydligt i praktiken av mätningarna som är presenterade i figur 6.1. Då understeg turbiditeten på det inkommande vattenflödet 200 NTU, vilket innebar att vår framkoppling sattes ur spel. Mätningarna visar tydligt en utgående turbiditet som inte uppnår börvärdet utan varierar med inkommande turbiditet.

Denna reglering möjliggör testning av nykonstruerade filter oberoende av inkommande vattenkvalité.

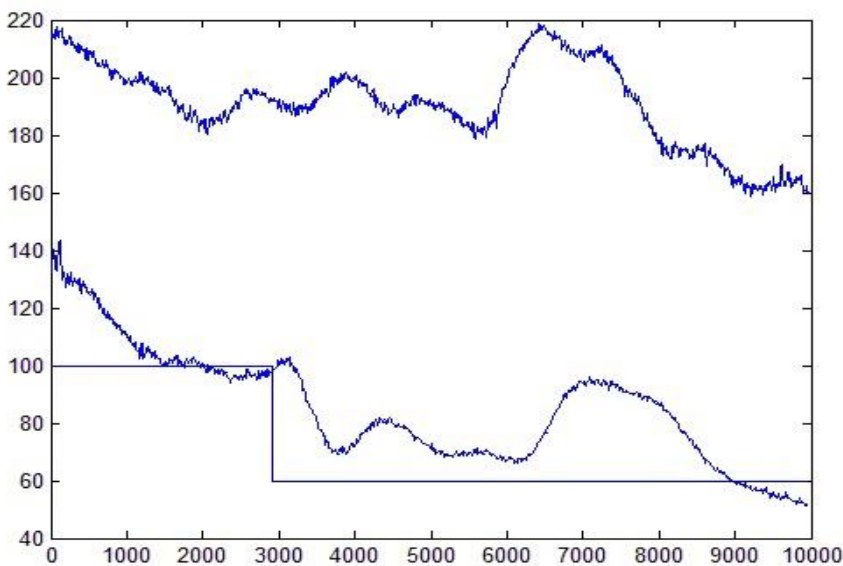
### 5.1 Reflektion över etiska aspekter

Genom att implementera en reglering på kemikalidoseringsprocessen blir doseringen mer exakt till resultatet som ska uppnås. Detta innebär att risken för överdosering minskar vilket leder till lägre kostnader och mindre miljöpåverkan.

Den direkta samhällsnyttan av vårt projekt är begränsad då skalan vi arbetade på är relativt liten. Konceptet som bevisats på testanläggningen kan däremot även användas på reningsverk i större skala och kan då ha en större positiv påverkan på miljön.

## 6 Förbättringspotential

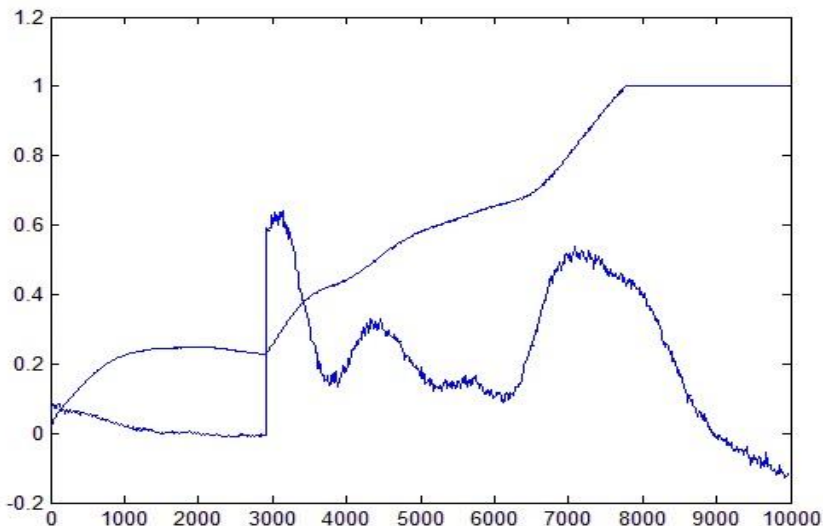
En brist i systemet som uppenbarade sig en solig lördagsmorgon är att framkopplingen inte kopplar in förrän inkommande turbiditet är över 200 NTU. Detta är ett medvetet val och normalt sett inte ett problem då inkommande turbiditet inte går under 200 NTU. Men när nedanstående mätning gjordes var inkommande turbiditet under 200 NTU. Detta berodde på flera faktorer som att det var en lördag morgon, det var under sommaren så flera lokala företag hade semesterstängt. Anläggningen är belägen i Lund och under tidpunkten för mätningen var stadens befolkning kraftigt reducerad till antalet på grund av att studenterna hade åkt hem. Detta ledde till en mycket dålig insvängning vilket kan ses nedan. När framkopplingen inte var aktiv märkte inte återkopplingen av förändringen i turbiditet förrän den mättes av givaren för utgående vatten.



Figur 6.1 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant i intervaller).

Y-axel: Turbiditet i NTU

X-axel: Tid i sekunder



Figur 6.2 P-delens inverkan(generellt sjunkande efter börvärdesändring) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

X-axel: Tid i sekunder

Gain-scheduleringen för den proportionella delen har en undre gräns på  $P = 0.1$  detta värde kan i vissa fall vara något högt t.ex. när börvärdet är under 90 NTU så är P-parametern 0.1 för alla koagulantfaktorer 1 och uppåt. Detta kan leda till en mindre översväng.

När det gäller inflödespumpen så är insvängningstiden i intervallet 10-20 m<sup>3</sup> något långsam, vilket framgår i figur 4.1 Denna skulle kunna snabbas upp med ett högre värde på  $K_p$ .

## 6.1 Framtida utvecklingsmöjligheter

Kvalitén på det inkommande vattnet beror huvudsakligen på tre faktorer; tid på dygnet, veckodag och väder. Det går att se en tydlig trend på den inkommande turbiditeten beroende på tidpunkt och veckodag. T.ex. försämras turbiditeten runt 06-08 på vardagar då arbetsbelastningen är hög för att många människor gör sig redo för arbetet. Väder är också en stor faktor speciellt regn då regnvattnet späder ut avloppsvattnet och gör att vattenkvalitén förbättras.



Då den inkommande turbiditeten är så pass förutsägbar kan det vara en idé att i framtiden utöka framkopplingen så den tar hänsyn till fler yttre faktorerers inverkan på ärvärdet utifrån tidigare data innan faktorerna har hunnit ha en märkbar inverkan på ärvärdet. Baserat på datan från tidigare instanser implementerar man en reglering som neutraliserar de yttre faktorernas inverkan på systemet innan de sker. I vårt fall behöver man ta hänsyn till tid på dygnet, veckodag och väderleksrapport.

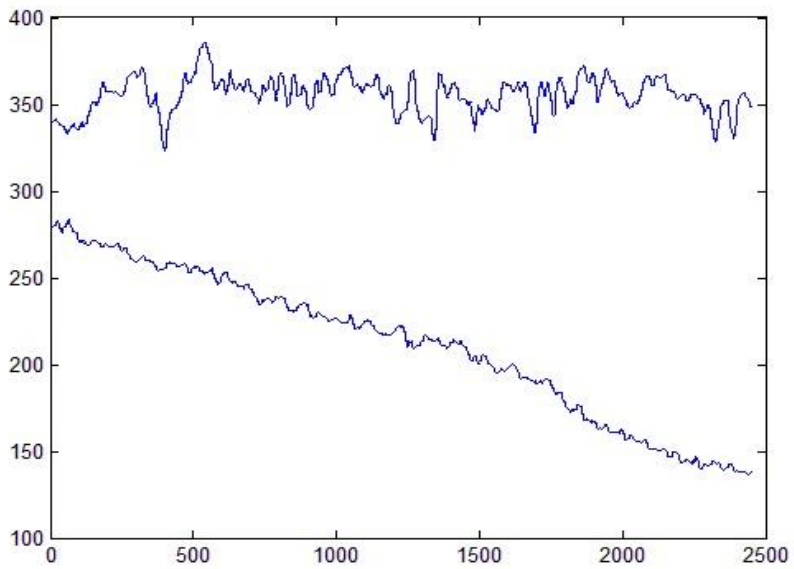
Anläggningens funktion utöver partikelreducering hos det inkommande vattnet är att reducera fosfor. Då fosforreducering är koagulantens huvudsakliga uppgift kan även en reglering av koagulantdoseringsspumpen beroende på önskad fosforhalt implementeras. I nuläget doseras bara koagulenten som en faktor på flocculanten. Då fosfor inte går att mäta visuellt, vilket är fallet med partiklar, är den stora utmaningen med denna utveckling av systemet är att hitta en givare som kan ge ett värde på fosforhalten i vattnet i realtid.

## 7 Referenser

- [1] B. Thomas, Modern Reglerteknik, 2016.
- [2] M. Lilja, "Något om PID-reglering," [Online]. Available: <http://rauni.iea.lth.se:8074/pub/kurser/styreg/pdf/pid.pdf>. [Använd 30 11 2016].
- [3] W. L. a. H. Ratnaweera, "FB,FF vattenrening," [Online]. Available: <http://wst.iwaponline.com/content/ppiwawst/74/2/491.full.pdf>. [Använd 24 06 2017].
- [4] "Fakta om framkoppling," [Online]. Available: [http://www.bgu.ac.il/chem\\_eng/pages/Courses/oren%20courses/Chapter\\_9.pdf](http://www.bgu.ac.il/chem_eng/pages/Courses/oren%20courses/Chapter_9.pdf). [Använd 23 09 2016].
- [5] tipswell, "Codesys programkod," [Online]. Available: [tipswell.com/tag/pid-control-algorithm-using-c-language](http://tipswell.com/tag/pid-control-algorithm-using-c-language). [Använd 14 12 2015].
- [6] B. W. Karl Johan Åström, Adaptive Control, Dover Publications Inc., 2008.

## Appendix A

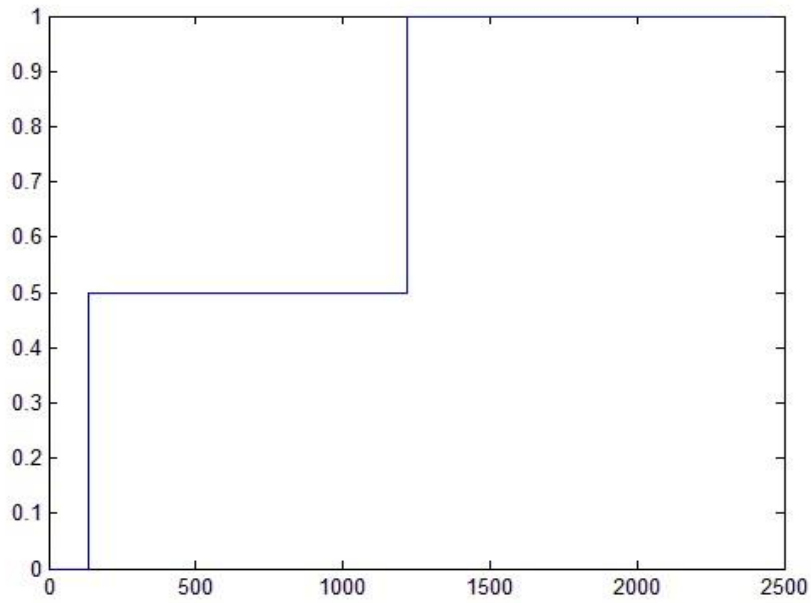
### A.1 Beskrivning av systemet



*Figur A.1 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).*

*Y-axel: Turbiditet i NTU*

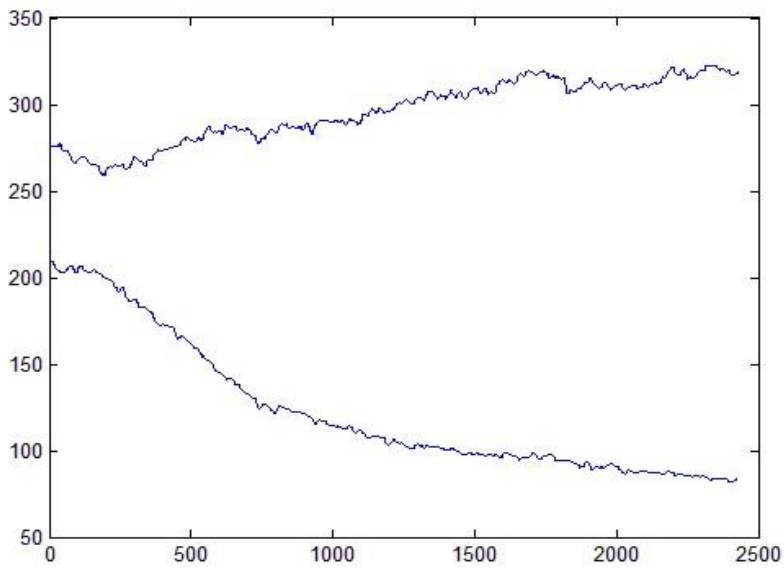
*X-axel: Tid i sekunder*



Figur A.2 Polymerdosering

Y-axel: Densitet i g/m<sup>3</sup>

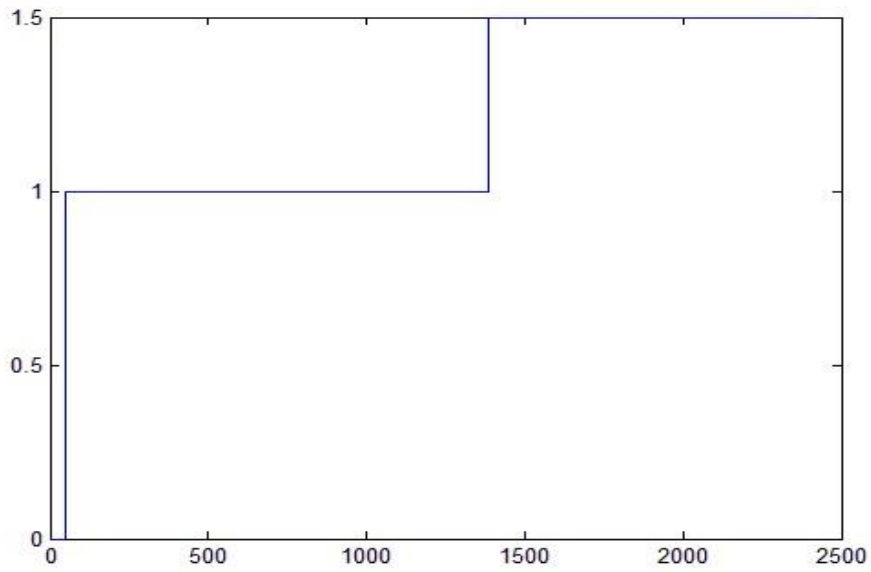
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.3 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).

Y-axel: Turbiditet i NTU

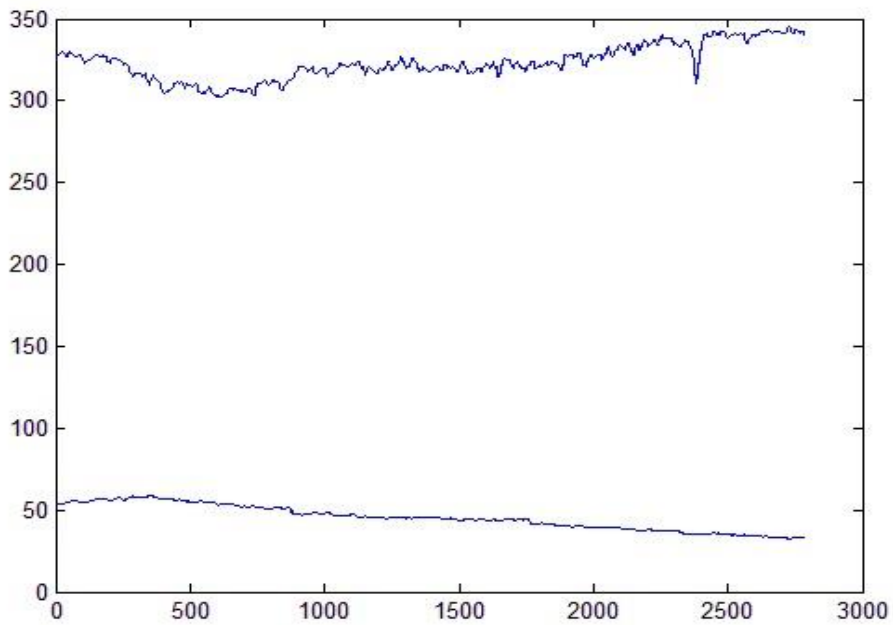
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.4 Polymerdosering

Y-axel: Densitet i g/m<sup>3</sup>

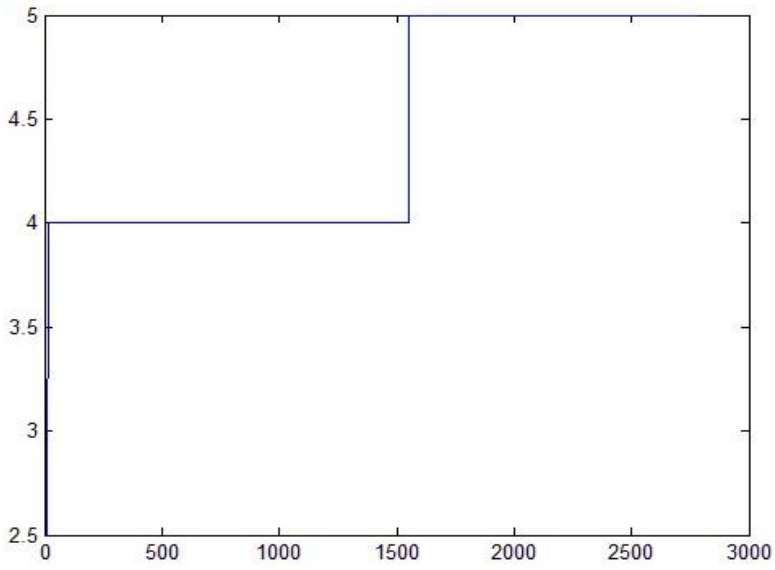
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.5 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).

Y-axel: Turbiditet i NTU

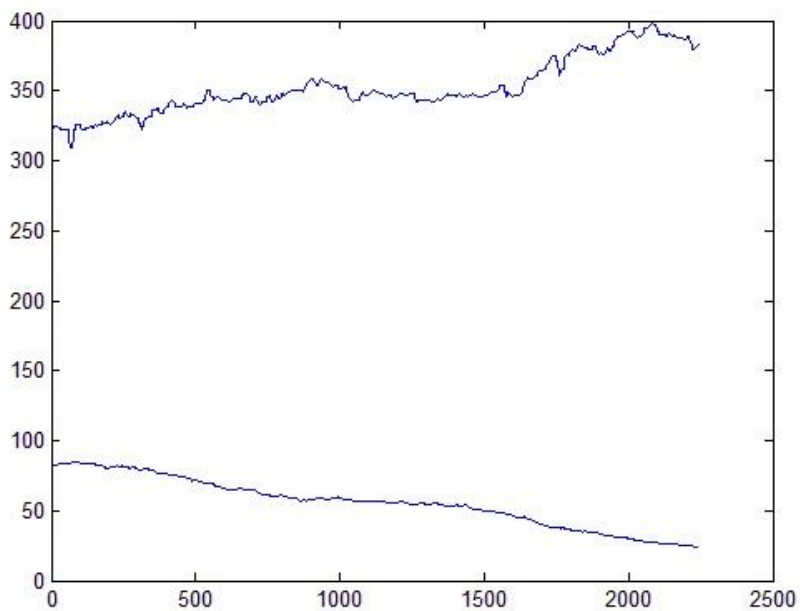
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.6 Polymerdosering

Y-axel: Densitet i g/m<sup>3</sup>

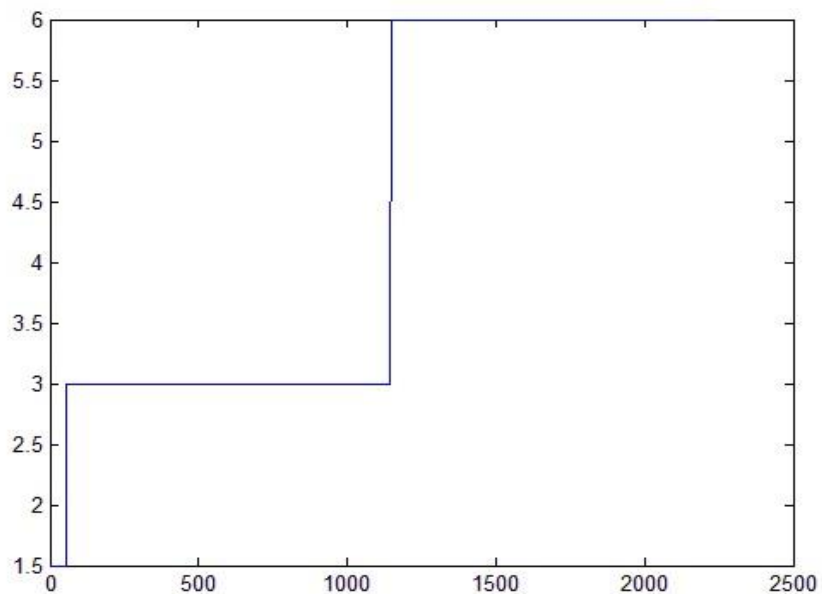
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.7 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).

Y-axel: Turbiditet i NTU

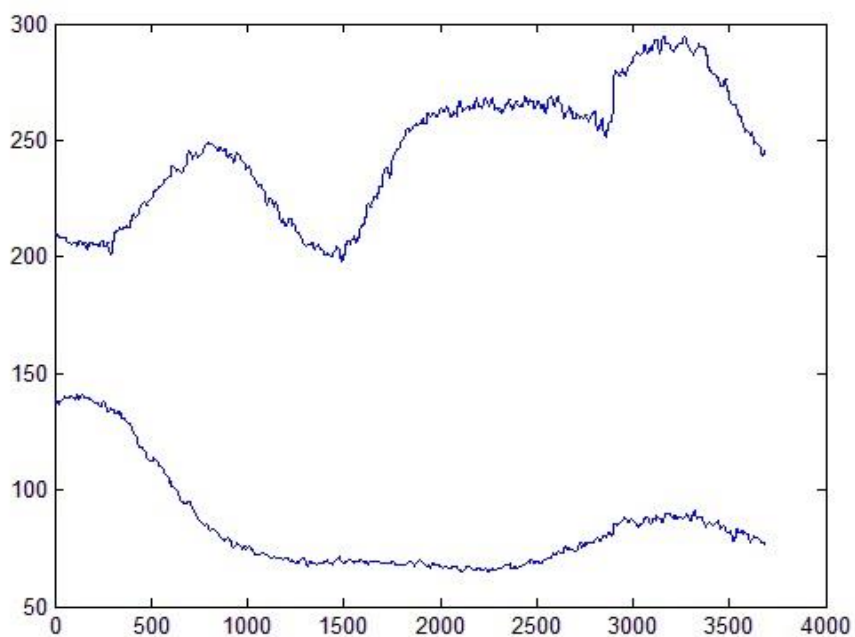
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.8 Polymerdosering

Y-axel: Densitet i g/m<sup>3</sup>

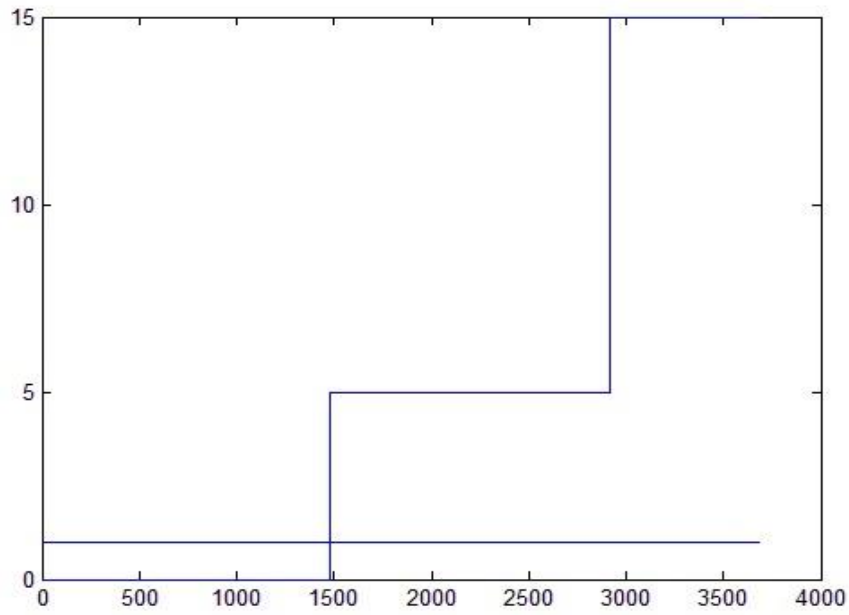
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.9 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).

Y-axel: Turbiditet i NTU

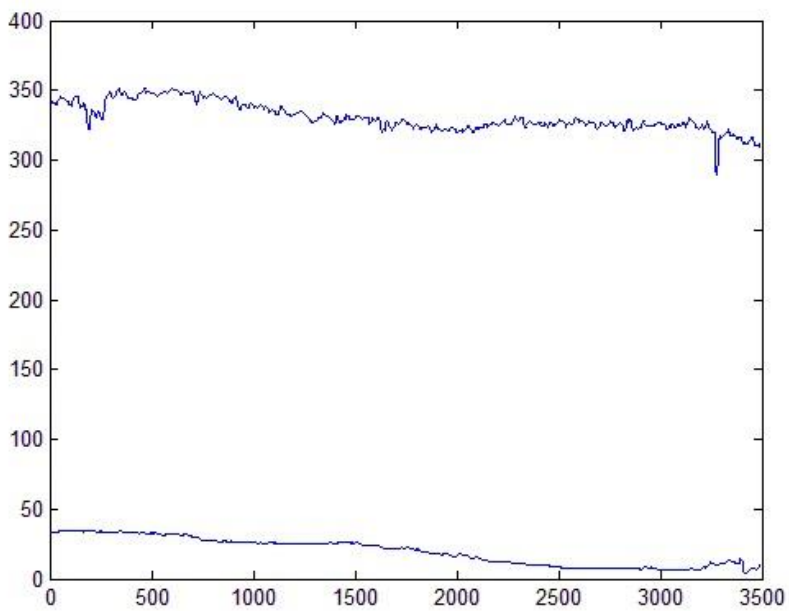
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.10 Polymerdosering(konstant) och koagulantdosering(varierande).

Y-axel: Densitet i g/m<sup>3</sup>

X-axel: Tid i sekunder

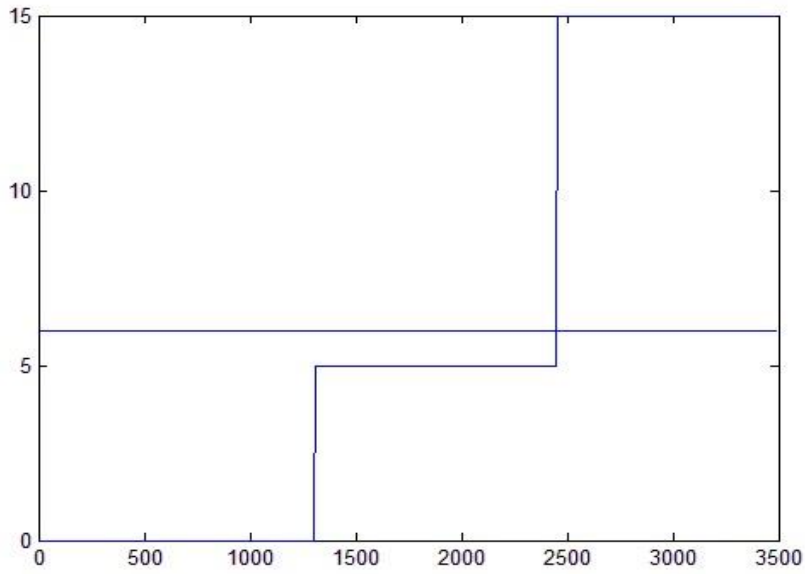


Figur A.11 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).

Y-axel: Turbiditet i NTU

X-axel: Tid i sekunder

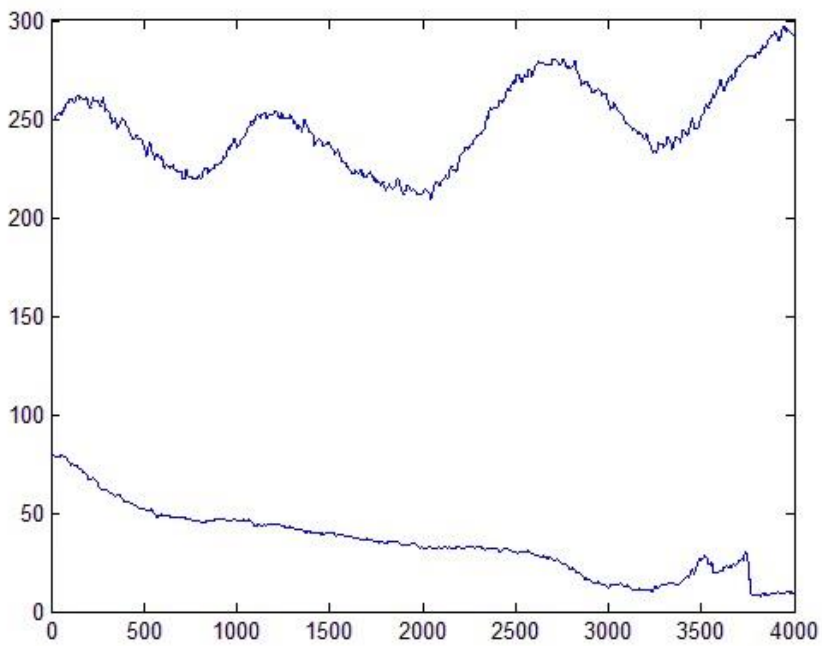




Figur A.12 Polymerdosering(konstant) och koagulantdosering(varierande).

Y-axel: Densitet i g/m<sup>3</sup>

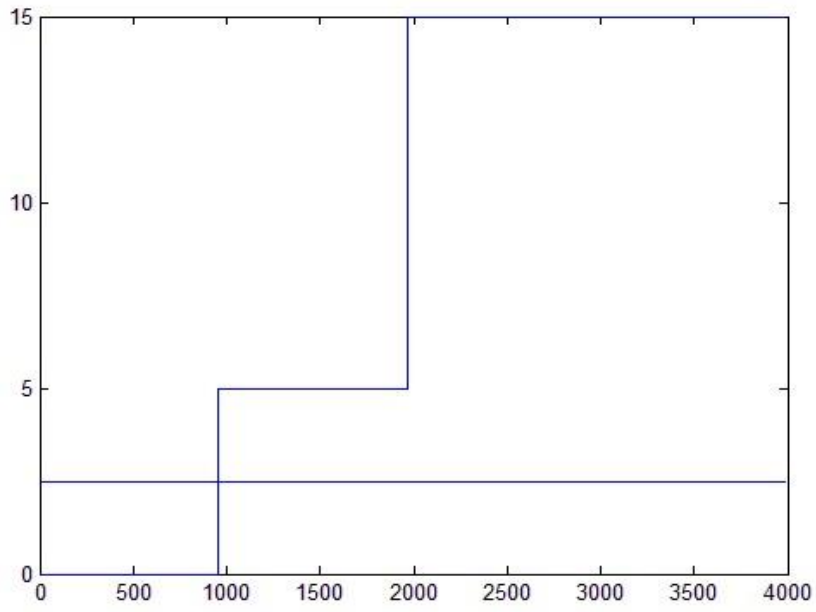
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.13 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva) och turbiditet utgående vatten(undre kurva).

Y-axel: Turbiditet i NTU

X-axel: Tid i sekunder

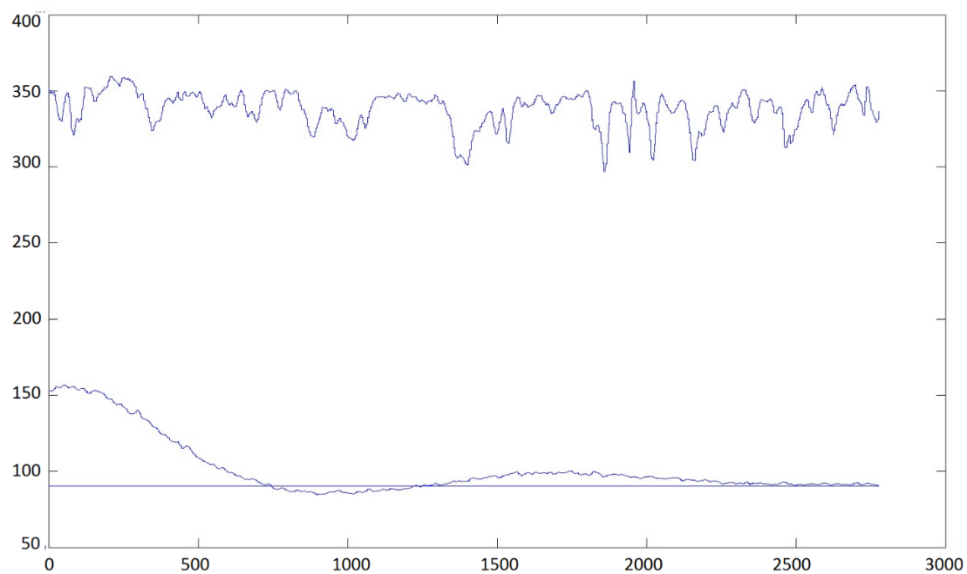


*Figur A.14 Polymerdosering(konstant) och koagulantdosering(varierande).*

*Y-axel: Densitet i g/m³*

*X-axel: Tid i sekunder*

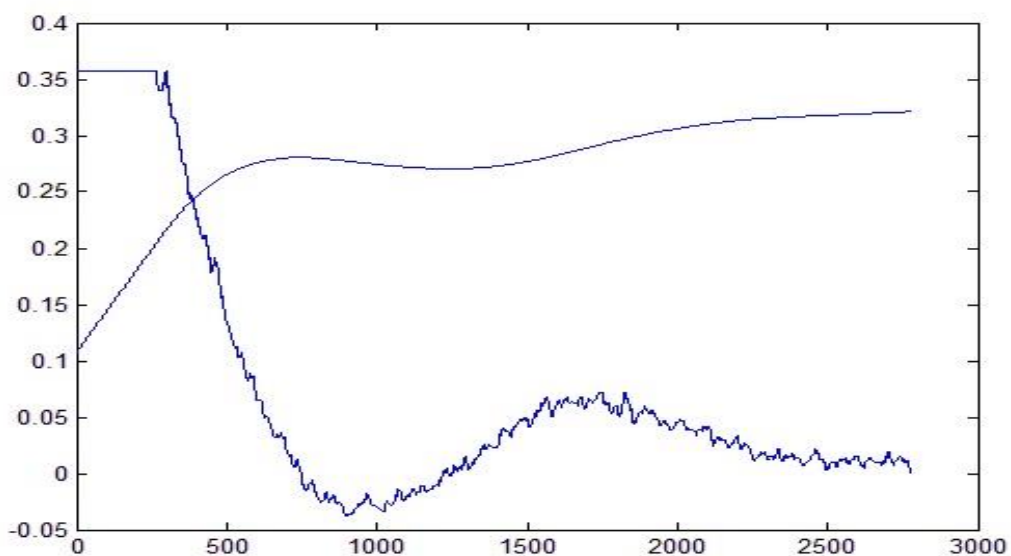
## A.2 Återkoppling utan koagulant med konstant inflöde



Figur A.15 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

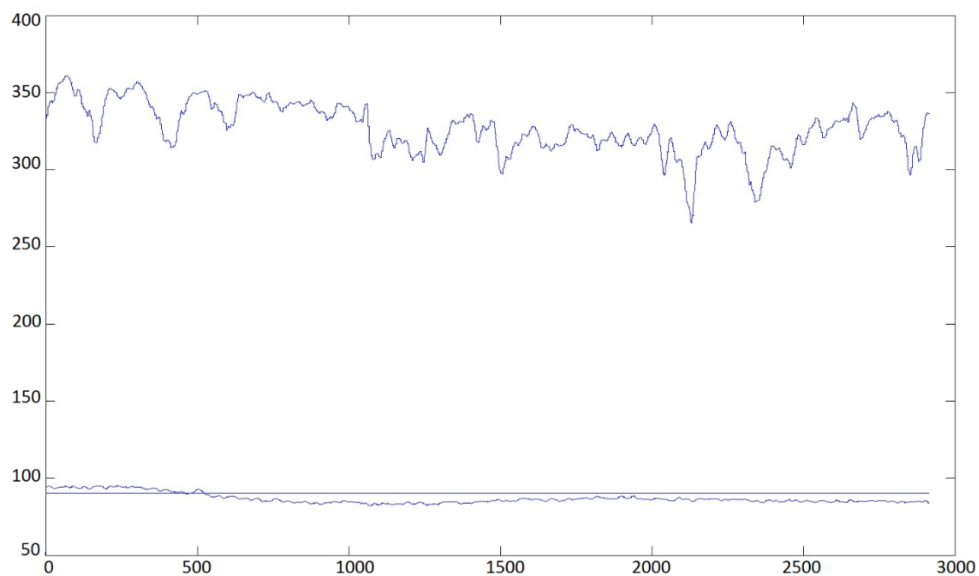
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.16 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

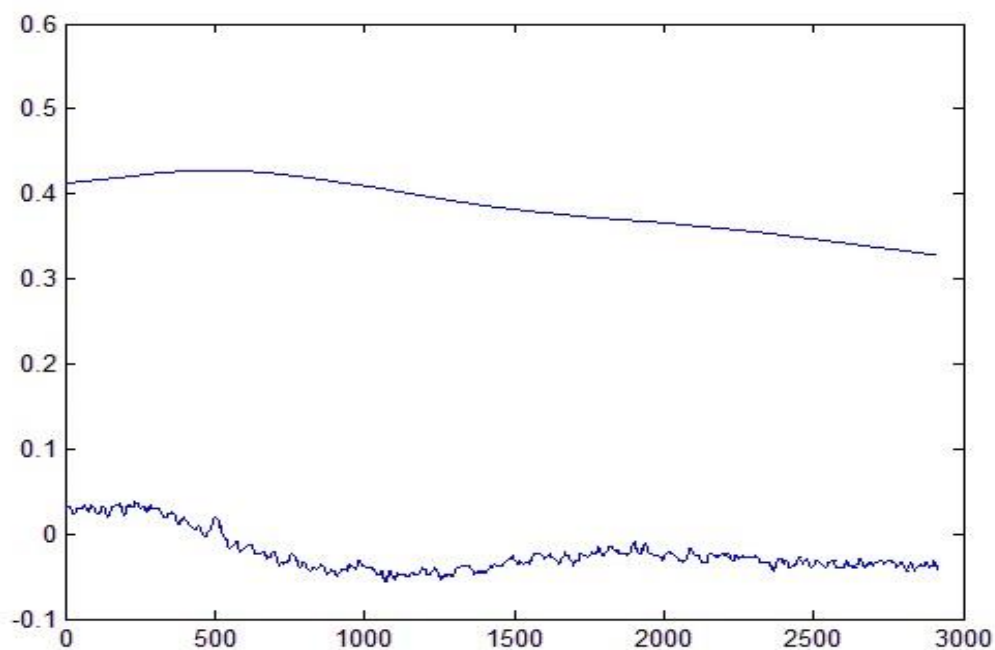
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.17 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

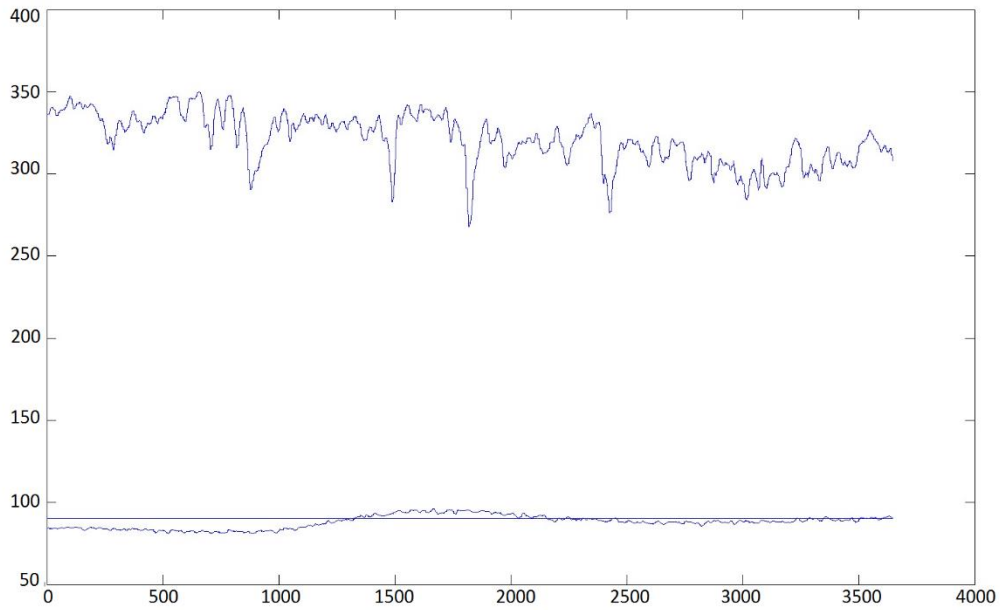
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.18 P-delens inverkan(undre kurva) och I-delens inverkan(övre kurva).

Y-axel: Inverkan 0-1

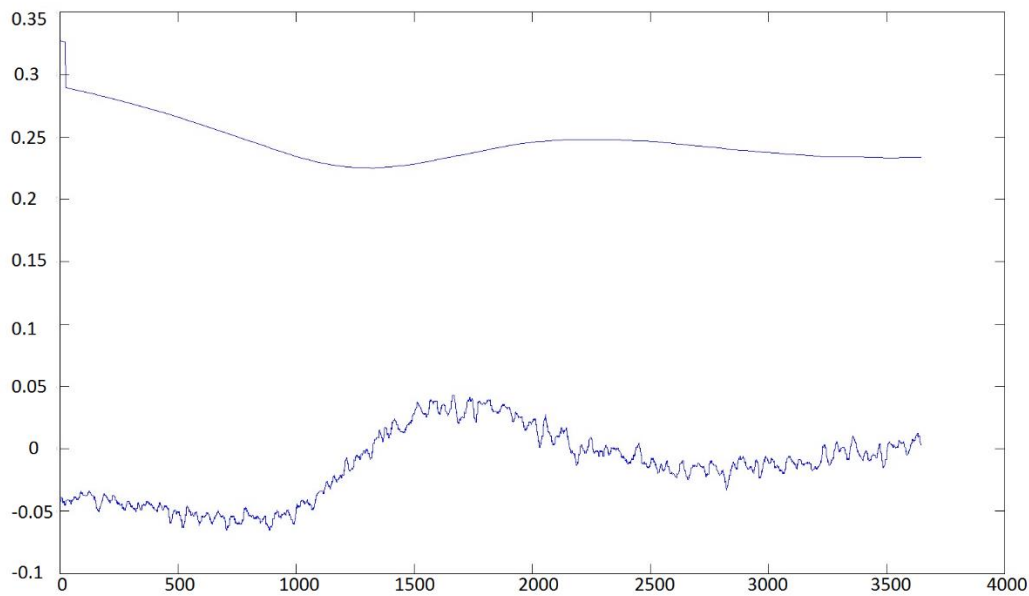
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.19 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

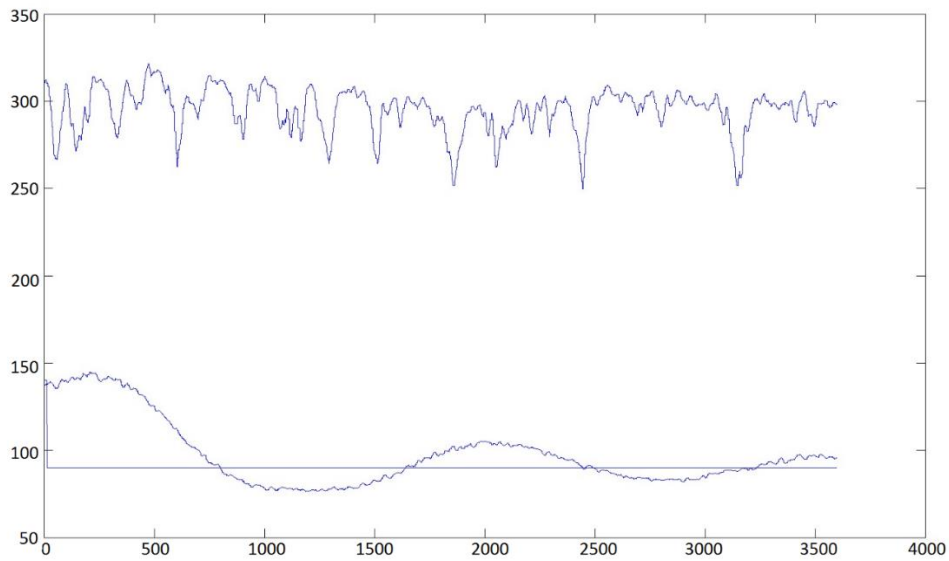
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.20 P-delens inverkan(undre kurva) och I-delens inverkan(övre kurva).

Y-axel: Inverkan 0-1

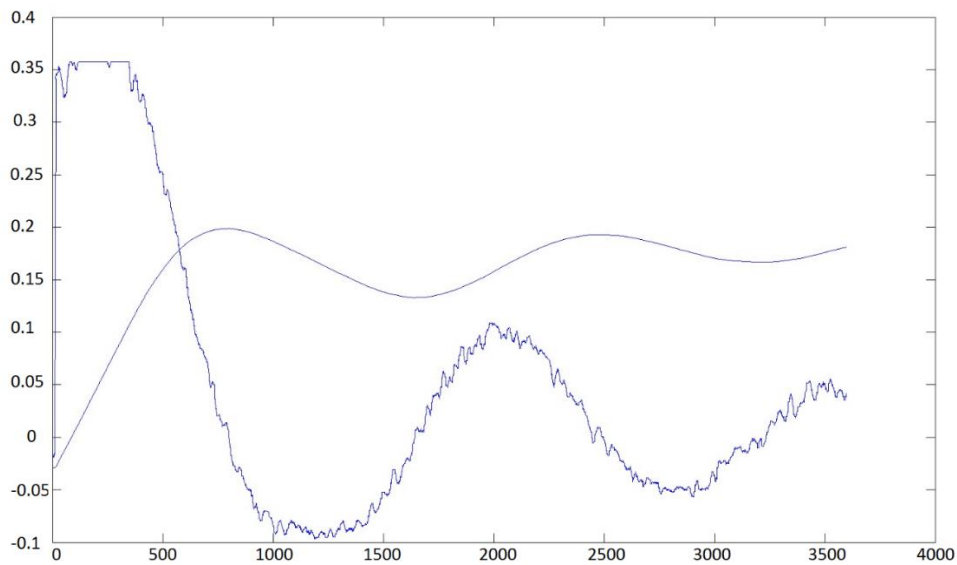
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.21 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

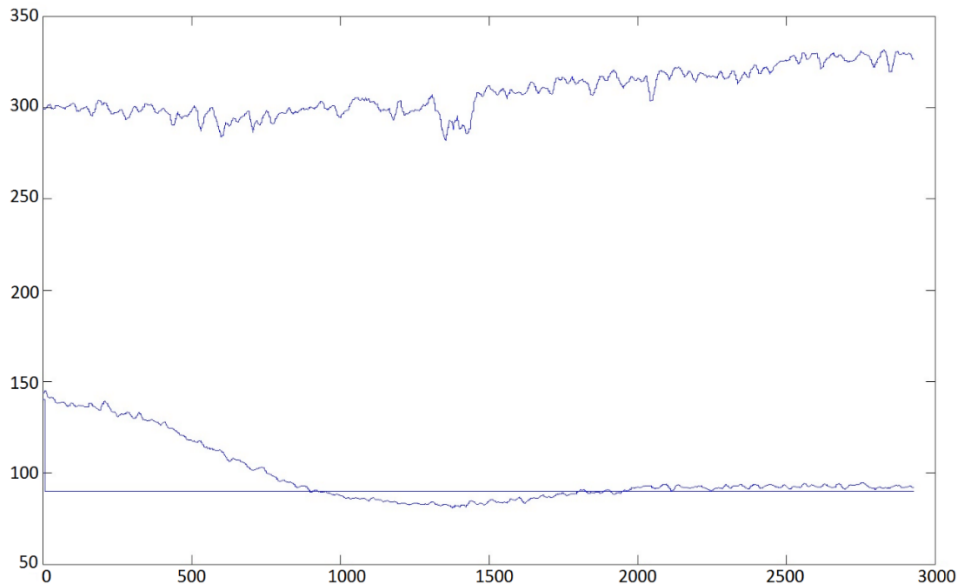
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.22 P-delens inverkan(lägre slutvärde än startvärde) och I-delens inverkan(högre slutvärde än startvärde).

Y-axel: Inverkan 0-1

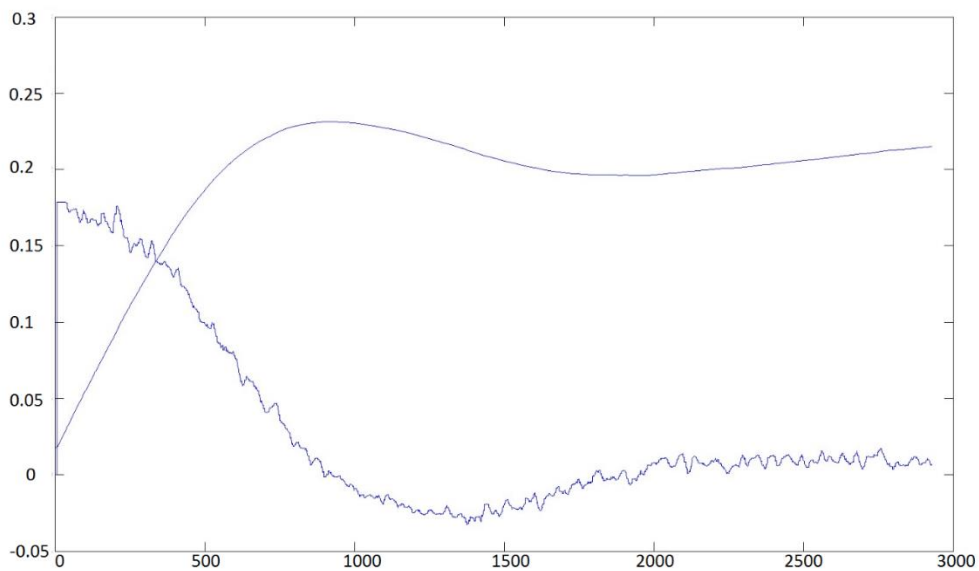
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.23 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

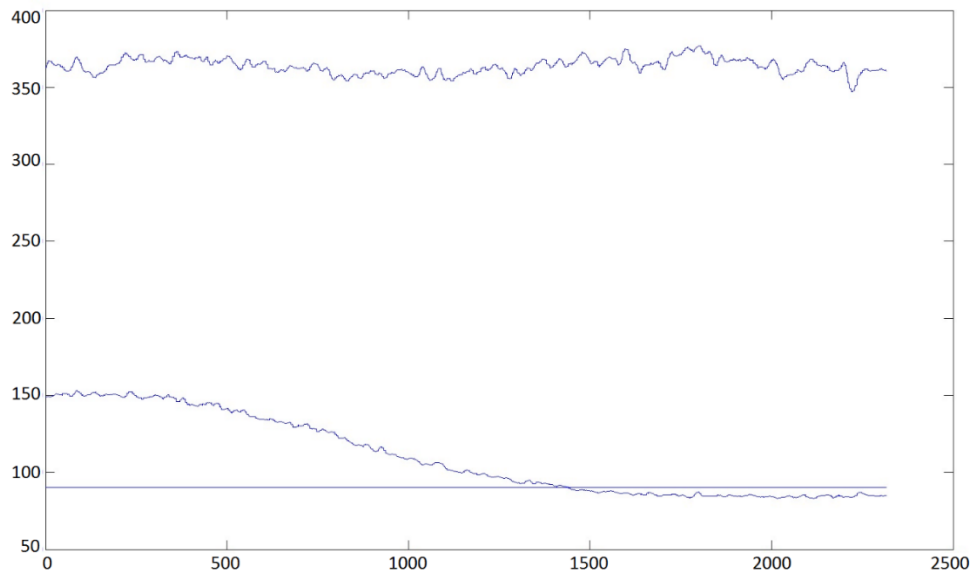
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.24 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

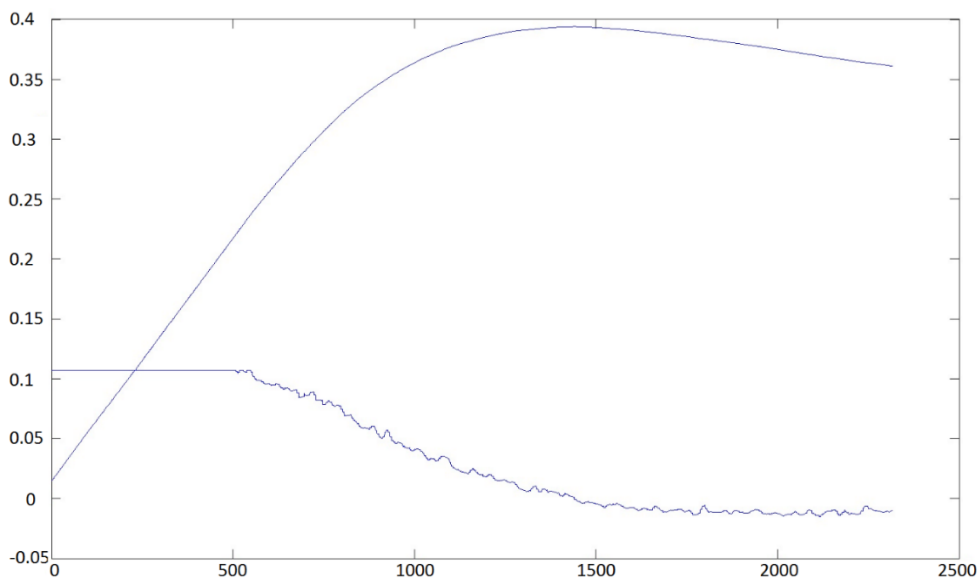
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.25 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

X-axel: Tid i sekunder

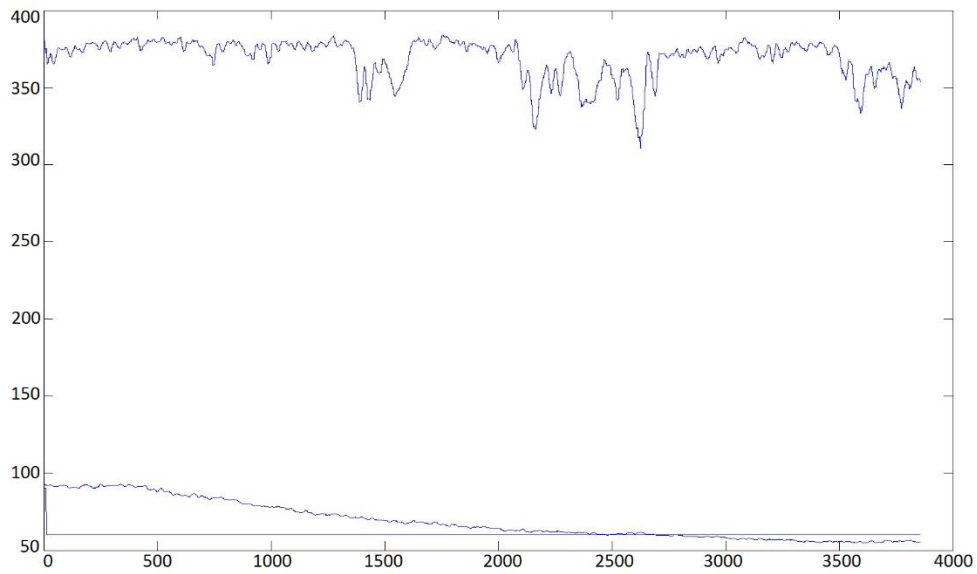


Figur A.26 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

X-axel: Tid i sekunder

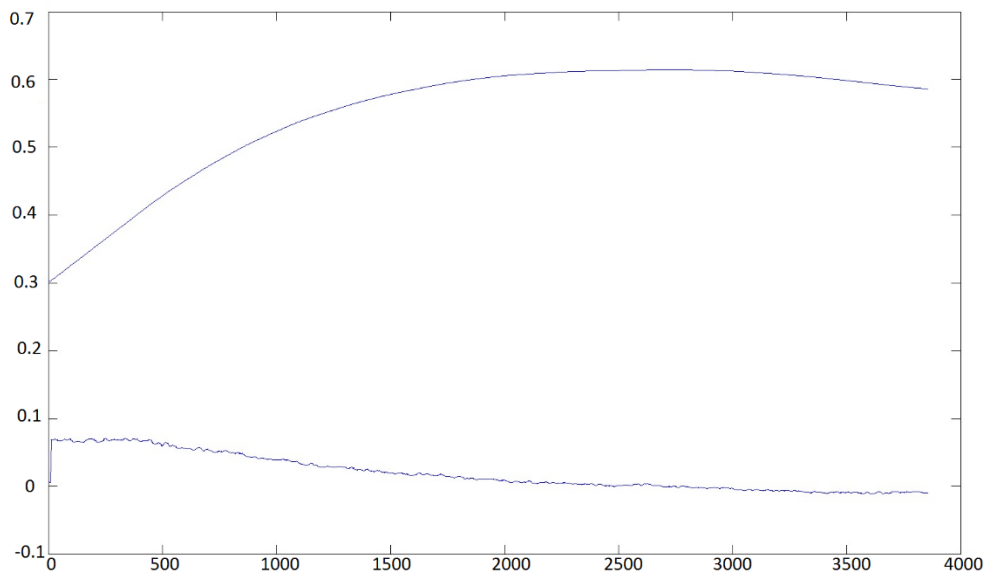




Figur A.27 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

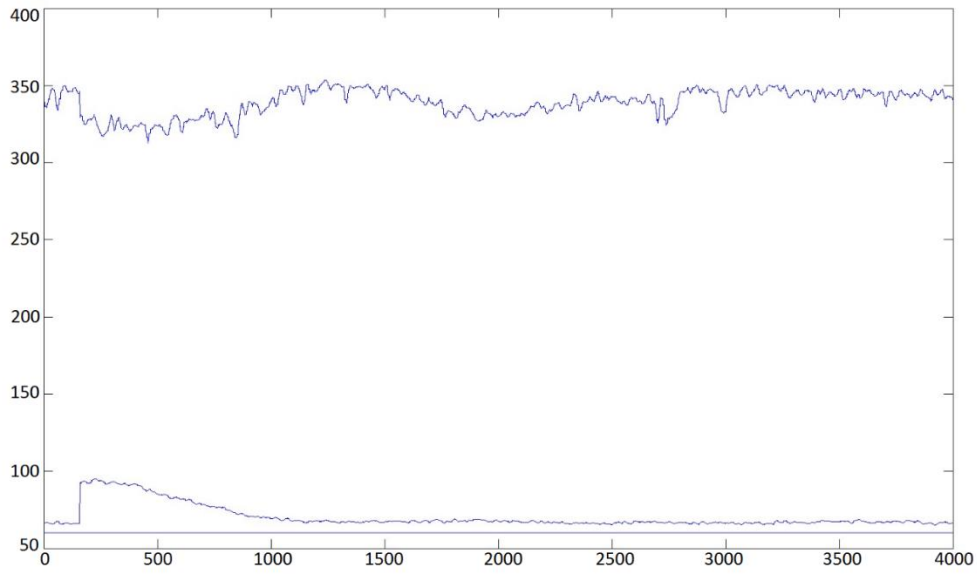
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.28 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

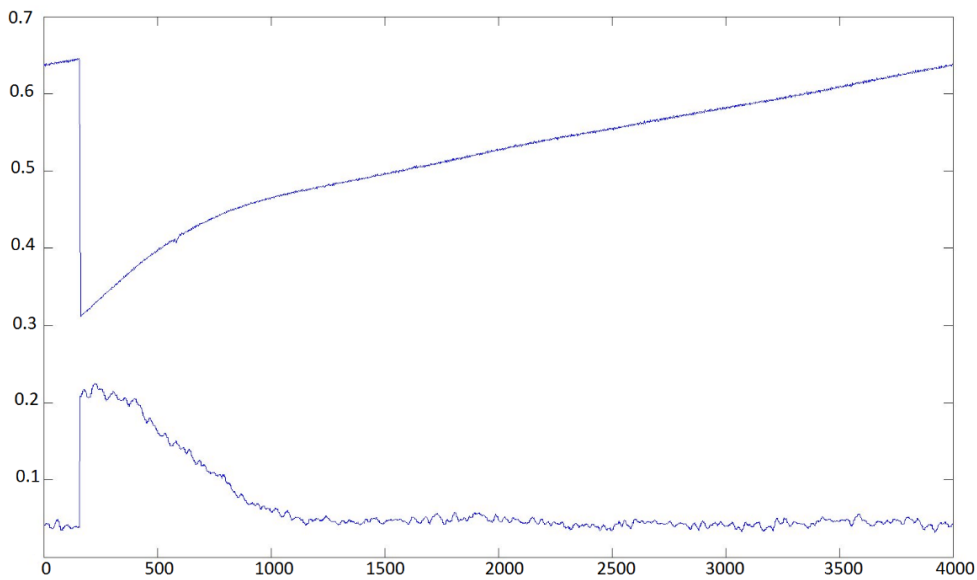
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.29 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

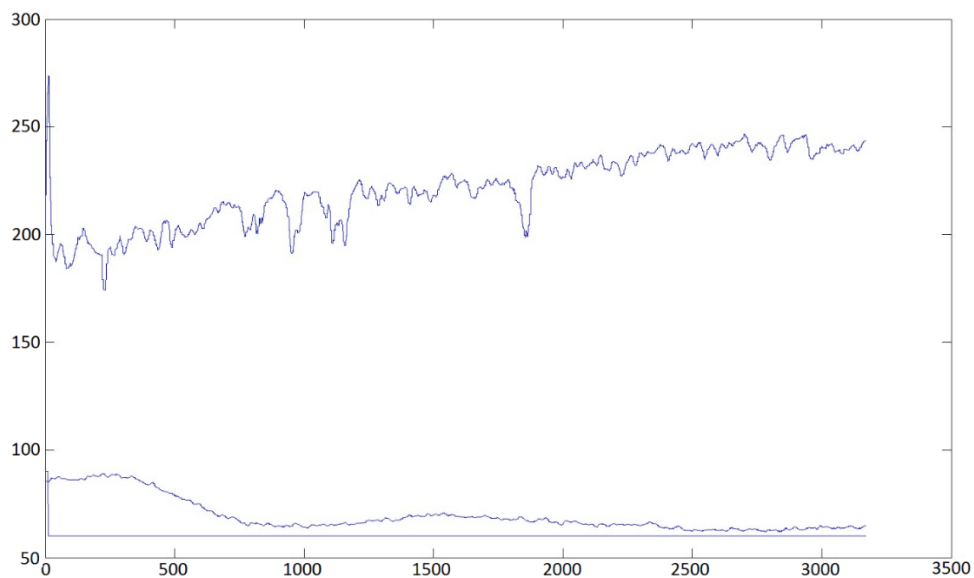
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.30 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

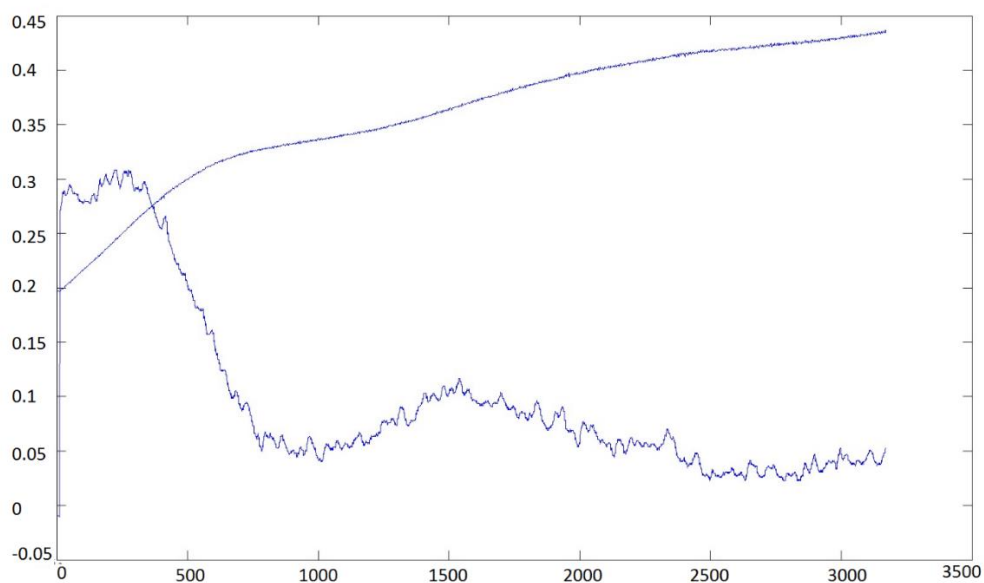
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.31 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

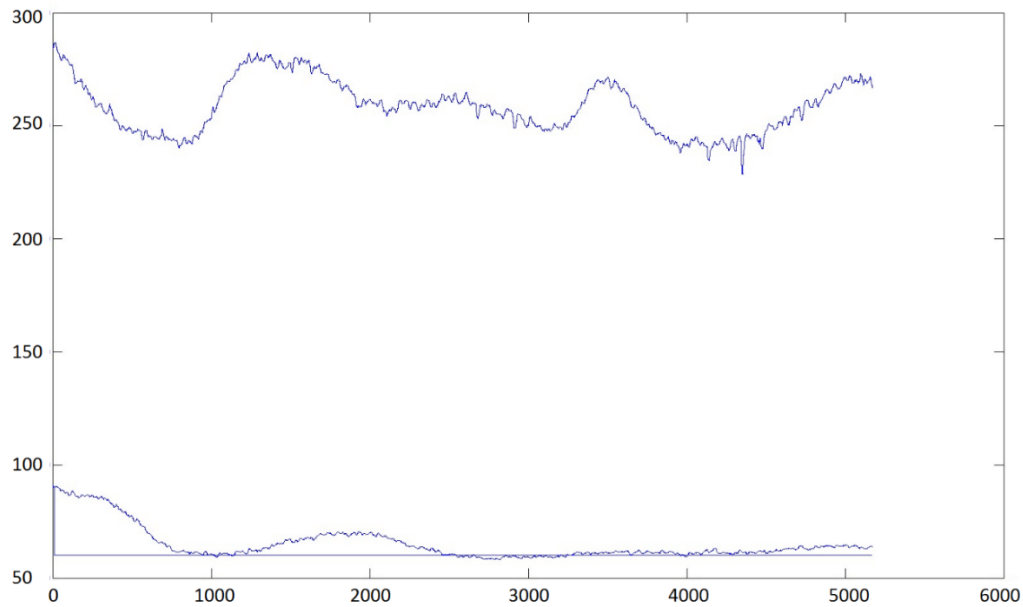
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.32 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

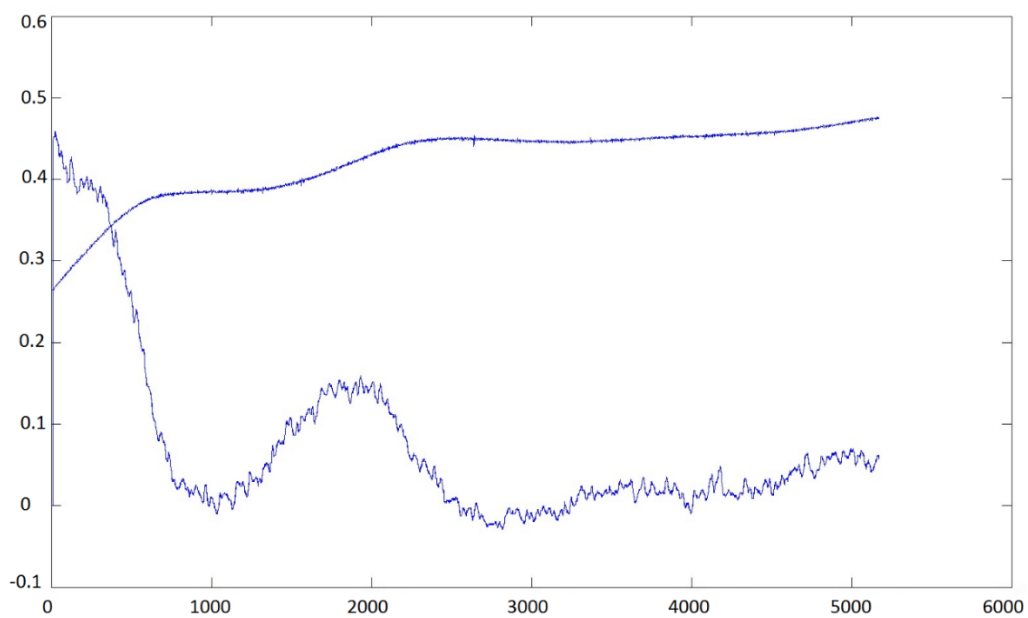
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.33 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

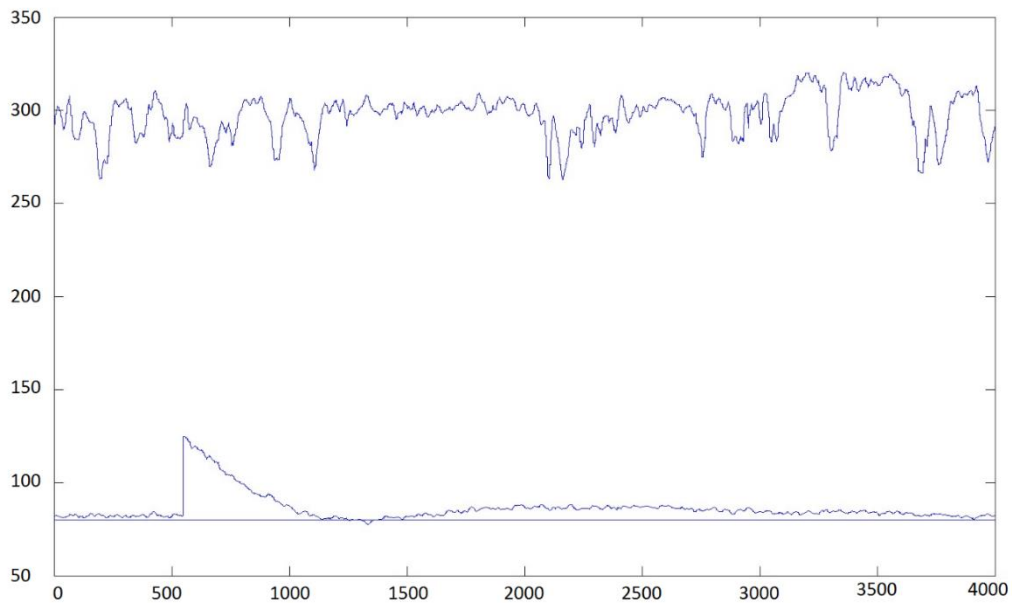
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.34 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

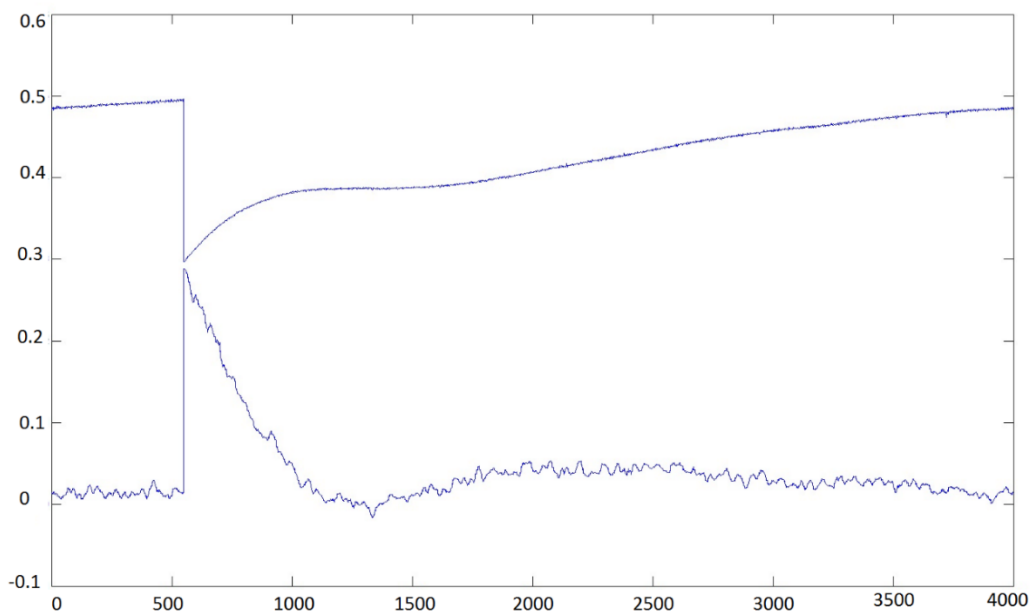
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.35 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

X-axel: Tid i sekunder

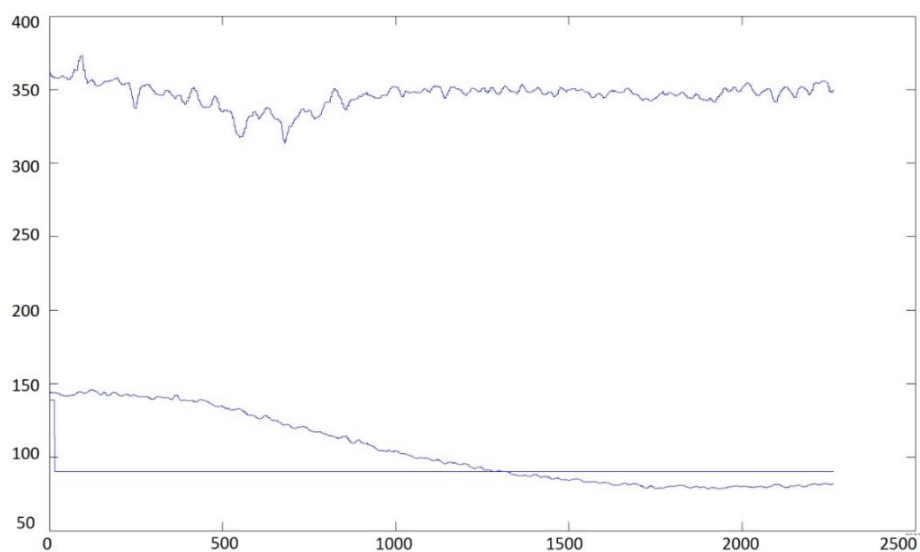


Figur A.36 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

X-axel: Tid i sekunder

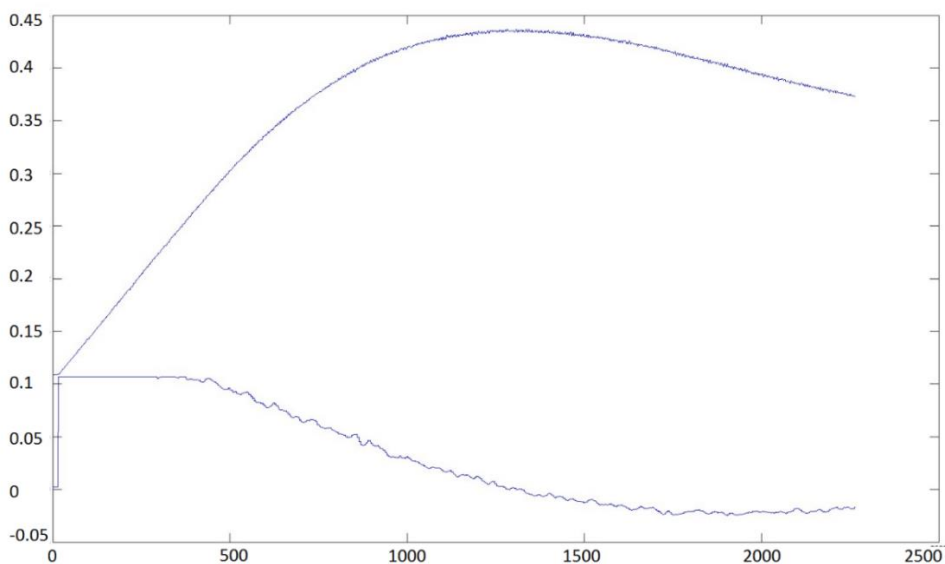
### A.3 Återkoppling med koagulant



Figur A.37 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

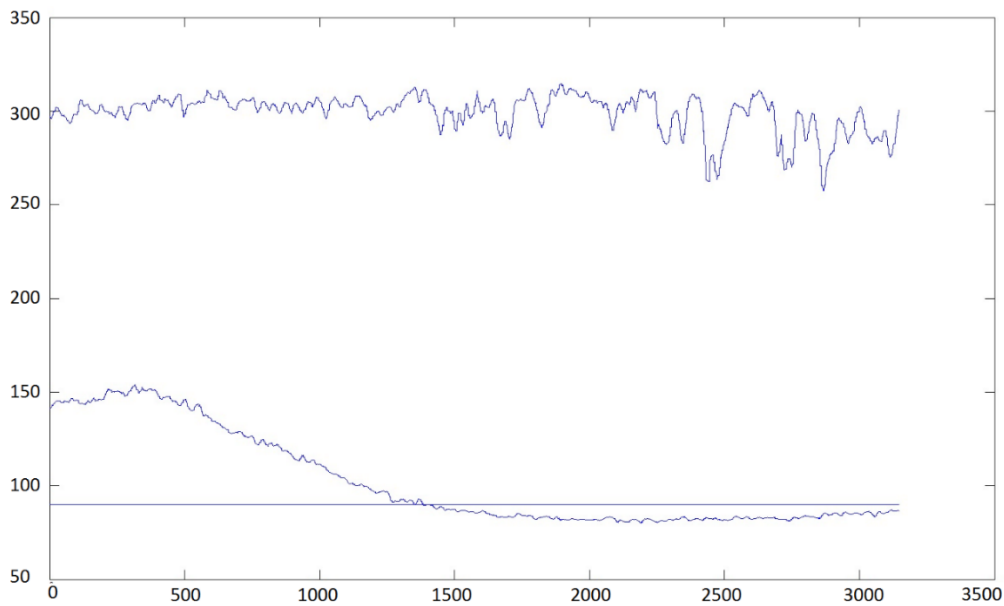
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.38 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

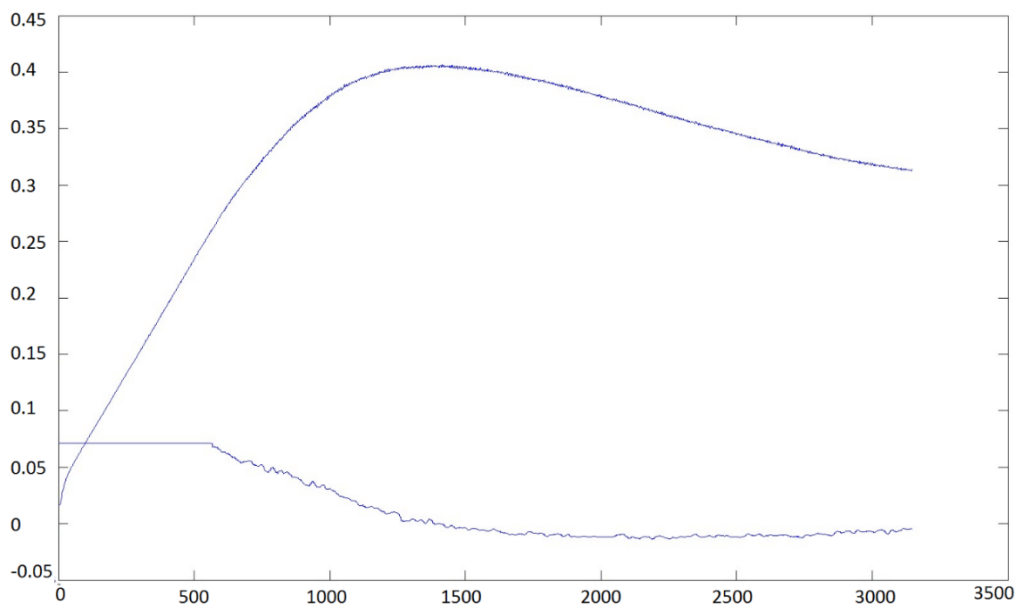
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.39 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

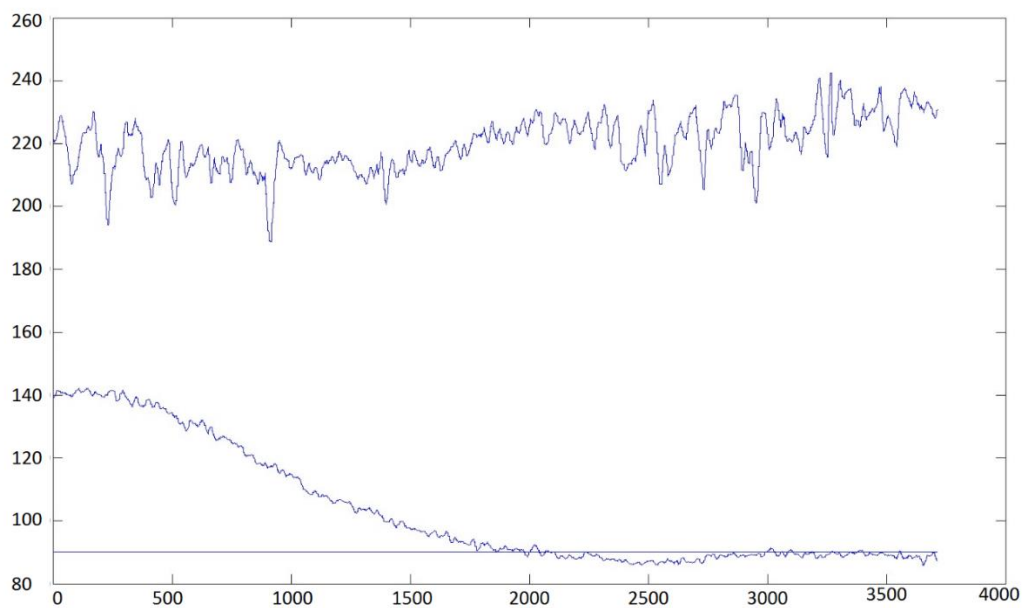
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.40 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

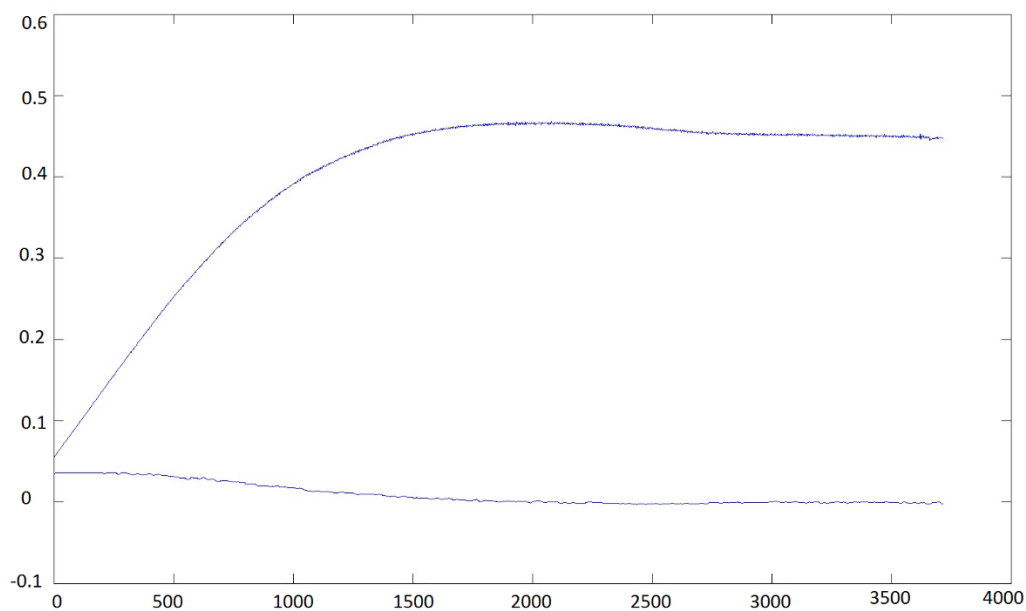
X-axel: Tid i sekunder



Figur A.41 Turbiditet inkommande vatten(övre kurva), turbiditet utgående vatten(undre varierande kurva) och börvärde(konstant).

Y-axel: Turbiditet i NTU

X-axel: Tid i sekunder



Figur A.42 P-delens inverkan(generellt sjunkande) och I-delens inverkan(generellt stigande).

Y-axel: Inverkan 0-1

X-axel: Tid i sekunder