



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Kybernetikk/signalbehandling	Vårsemesteret, 2010 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Bjørnar Langeland (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Morten Tengesdal Veileder(e): Morten Tengesdal	
Tittel på masteroppgaven: Forholdsregulering av tilsetningsstoff i drivstoff Engelsk tittel: Ratio control of additive in fuel	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Forholdsregulering (ratio control), Strømningsregulator, Foroverkopler, Volumregulator, Kalman-filter, Tilstands- og parameterestimering	Sidetall: 155 + vedlegg/annet: 10 + 1 cd Stavanger, 10/6 - 2010 dato/år

Forholdsregulering av tilsetningsstoff i drivstoff

Hovedoppgave
våren 2010

Bjørnar Langeland

Institutt for data- og elektroteknikk,
Det teknisk- naturvitenskapelige fakultet,
Universitetet i Stavanger

Sammendrag

Denne hovedoppgaven omhandler forholdsregulering av tilsetningsstoff i drivstoff. Når tankingen av en tankbil er ferdig, skal tilsetningsstoffet utgjøre en spesifisert del av det totale drivstoffvolumet. Forholdsreguleringen er realisert ved et reguleringssystem med to regulatorer i kaskade; en strømningsregulator med foroverkopler og en volumregulator. Strømningsregulatoren har i oppgave å følge strømningsreferansen som genereres ut fra drivstoffmålingen, mens volumregulatoren skal rette opp dersom strømningsregulatoren ikke klarer følge referansen 100%. Ut fra referanse og strømnings- og volummåling, beregner regulatorene en ønsket strømningsverdi, q , gjennom en reguleringsventil. Denne strømningsverdien inngår så i en invers ventilligning, som gir et pådrag, u , til ventilen.

Reguleringssystemet er implementert i LabVIEW, og er laget med utgangspunkt i tankanlegget på prosesslaboratoriet E-459 på Universitetet i Stavanger. For at reguleringssystemet skal fungere optimalt, er det viktig å ha mest mulig informasjon om prosessen, og spesielt ventilen som skal reguleres, her ventil LV001. Det ble derfor utført et eksperiment på ventilen som kartla ventilkarakteristikken, $f(u)$, slik at ventilligningen, $q_v = q_{max} \cdot f(u)$, ble mest mulig korrekt. Eksperimentet ga til slutt opphav til en lineær ventilkarakteristikk.

Utgangspunktet i denne hovedoppgaven har vært at differensialtrykket over ventilen ikke blir målt, og dette trykket kan variere i et drivstoffanlegg. Siden en ikke måler differensialtrykket, kjenner en heller ikke verdien på maksimal strømming gjennom ventilen, her gitt av parameteren q_{max} . For å få informasjon om denne, ble det derfor utviklet et stasjonært Kalman-filter som **estimerte** denne parameteren.

Resultatdelen i denne oppgaven viser hvor viktig det er å ha en foroverkopler i strømningsregulatoren. Uten foroverkopleren sliter reguleringssystemet å følge referansen når denne endres. Resultatene viser også at reguleringssystemet bør inneholde en volumregulator som retter opp dersom en får et avvik i volumet. I resultatdelen er det også sammenlignet reguleringen ved bruk av konstant og estimert verdi på q_{max} . Resultatene viser at dersom q_{max} velges konstant og differensialtrykket over ventilen endres, er en avhengig av at regulatorene i reguleringssystemet kompenserer for feilen i q_{max} . Dersom en bruker et Kalman-filter for å estimere q_{max} , ser en at estimatet av q_{max} følger endringene i differensialtrykket, og regulatorene vil da bare rette opp små feil.

Hovedulempen med testanlegget, er at strømningsmålingen, q_a , er beheftet med veldig mye støy. Dette fører til at bidraget fra strømningsregulatoren blir støyfullt, som igjen fører til et støyfullt ventilpådrag. I tillegg blir også estimatet av q_{max} basert på strømningsmålingen, slik at dette estimatet også blir støyfullt. Dette begrenser presisjonen sterkt. Et forslag til videre arbeid kan derfor være å installere en ny strømningsmåler som gir raskere og mindre støyfulle målinger. Med en bedre måling, kan en forbedre både Kalman-filterets og reguleringssystemets ytelse og presisjon.

Forord

Denne hovedoppgaven er den avsluttende oppgaven på masterstudiet i kybernetikk ved institutt for data- og elektroteknikk på Universitetet i Stavanger. Hovedoppgaven er hovedsaklig en oppgave i reguleringsteknikk og systemidentifikasjon, hvor jeg har brukt mye av tillært kunnskap fra fagene BIE240 Reguleringsteknikk, MIK140 Videregående Reguleringsteknikk og MIK130 Systemidentifikasjon ved UiS.

Oppgaven har til tider vært veldig krevende, med både små og store utfordringer. Det har da vært bra å ha en god veileder som kommer med gode innspill. Jeg vil derfor rette en stor takk til veileder Morten Tengedal, for god veiledning og korrektur. I tillegg vil jeg også takke Tormod Drennstig for hjelp ved reguleringstekniske problem. Begge personene nevnt her, er ansatte ved UiS.

Oppgaven er utført i henhold til Universitetet i Stavangers retningslinjer og oppgavebeskrivelser.

Stavanger, Juni 2010

Bjørnar Langeland

Innhold

Sammendrag	i
Forord	ii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Oppgavebeskrivelse	2
1.3 Testanlegg	2
1.4 Rapportens innhold og struktur	4
2 Oppsett av testanlegg	7
2.1 Vanntanker	7
2.1.1 Tank 1 - tilsetningsstofftank	7
2.1.2 Skalering av trykktransmitter LT001	8
2.1.3 Tank 2	9
2.1.4 Skalering av trykktransmitter LT002	11
2.2 Pumpe	13
2.2.1 Pumpekarakteristikk	13
2.3 Ventiler	15
2.4 Datalogging og programvare	16
3 Teori	19
3.1 Matematisk modell av testanlegg	19
3.2 Forholdsregulering	20

3.3	Estimering ved bruk av Kalman-filter	22
3.3.1	Kalman-filterets virkemåte og anvendelse	22
3.3.2	Prosessmodell	23
3.3.3	Linearisering	24
3.3.4	Observerbart system	25
3.3.5	Diskretisering	26
3.3.6	Forutsetninger/antagelser	26
3.3.7	Generelt Kalman-filter	28
3.3.8	Stasjonært Kalman-filter	29
3.3.9	Augmentert Kalman-filter	30
4	Eksperiment på ventil	33
4.1	Kartlegging av ventilens karakteristikk, $f(u)$	33
4.1.1	Oppskrift for å finne ventilkarakteristikk, $f(u)$	34
4.1.2	Resultat fra eksperiment	35
4.1.3	Valg av modell for ventilkarakteristikk, $f(u)$	39
4.2	Tidskonstant til ventil	41
4.2.1	Oppskrift for eksperiment	41
4.2.2	Resultat fra eksperiment	41
4.2.3	Beregning av ventilkonstant	43
5	Utvikling av reguleringsystem	45
5.1	Valg av samplingsintervall	45
5.2	Nivåregulator for tilsetningsstofftank	47

5.2.1	Foroverkopler for nivåregulator	53
5.3	Beregning av strømning gjennom ventil ved bruk av den deriverte av nivå i tank 2	57
5.3.1	Bestemmelse av filterkonstant	58
5.3.2	<i>mean</i> -funksjon i LabVIEW	60
5.4	Valg av invers ventilligning	62
5.4.1	Feil i invers ventilligning	62
5.5	Strømningsregulator	64
5.5.1	Test av reguleringsparametre	68
5.6	Volumregulator	78
5.6.1	Test av reguleringsparametre	79
5.7	Kalman-filter	88
5.7.1	Utvikling av prosessmodell	89
5.7.2	Observerbart system	90
5.7.3	Valg av støymatriser, Q og R	91
5.7.4	Valg av korreksjonsfaktorer til stasjonært Kalman-filter	101
5.7.5	Bruk av Kalman-filter til å bestemme form på ventilkarakteristikk	104
6	Implementering i LabVIEW	107
6.1	Grafisk grensesnitt i LabVIEW	107
6.2	LabVIEW-kode i blokkdiagram	110
6.2.1	Innstilling av simuleringsløkke	110
6.2.2	Modell av testanlegget	111
6.2.3	Kommunikasjon med testanlegg	112

6.2.4	Invers ventilkarakteristikk	114
6.2.5	Generering av simulert strømming av drivstoff	115
6.2.6	Nivåregulator	116
6.2.7	Strømningsregulator	117
6.2.8	Volumregulator	118
6.2.9	Kode for Kalman-filter i LabVIEW	118
7	Resultat	121
7.1	Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator . .	121
7.1.1	Regulering ved bruk av bare strømningsregulator uten foroverkopler .	121
7.1.2	Regulering ved bruk av bare strømningsregulator med foroverkopler .	122
7.1.3	Regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator uten foroverkopler	122
7.1.4	Regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler	123
7.2	Regulering ved bruk av feil modell v/foroverkopling (feil q_{max})	132
7.3	Regulering ved bruk av Kalman-filter	135
7.3.1	Regulering ved gode startverdier på Kalman-estimat	135
7.3.2	Regulering ved dårlige startverdier på Kalman-estimat	136
7.3.3	Kalman-filterets evne til å oppdage endringer i q_{max}	142
7.4	Resultatenes presisjon	152
8	Diskusjon og konklusjon	153
	Referanser	155

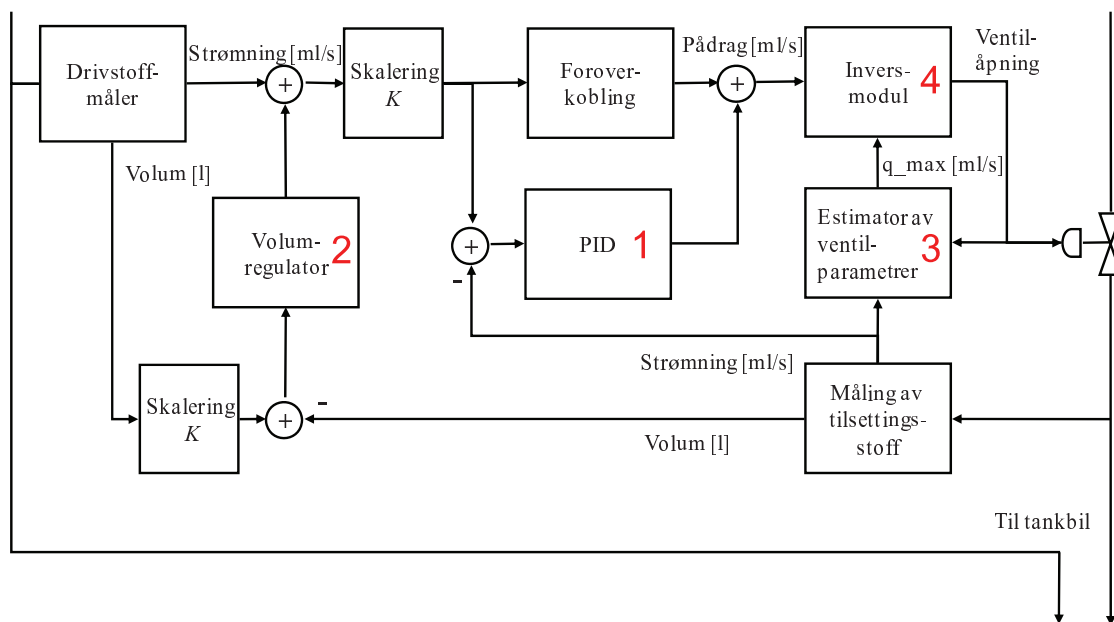
Vedlegg	156
A P & ID for testanlegg	156
B LabVIEW-kode	158
C Matlab-kode	159
C.1 KF_generelt_bjla.m	159
C.2 KF_stasj_bjla.m	162

1 Innledning

Denne hovedoppgaven er et samarbeid med Universitetet i Stavanger og Omron Electronics Norway AS sitt regionkontor i Stavanger. Omron bistår kunder med konvertering og videreutvikling av styresystem for tilsetninger i drivstoff. Gamle og nye system er installert på tankingsanlegg hos blant annet Statoil og Shell i Norden og Baltikum.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Ved fylling av tankbiler skal drivstoffet ha ulike tilsetninger, og disse må doseres presist. Når en stanser tankingen, skal tilsetningsstoffet utgjøre en spesifisert del av det totale volumet. For å få til dette, må det brukes et reguleringsystem som består av to regulatorer i kaskade; en strømningsregulator og en volumregulator. Strømningsregulatoren har i oppgave å følge referansestrømningen som genereres ut fra drivstoffmålingen, mens volumregulatoren skal rette opp dersom strømningsregulatoren ikke klarer følge referansen 100%. Figur 1.1 viser et forenklet oppsett av reguleringsystemet.



Figur 1.1: Forholdsregulering av tilsetning i drivstoff

Ytterst i kaskaden står volumregulatoren, (vist som nummer 2 i figur 1.1), som har ansvaret for volumforholdet. Innenfor denne er en strømningsregulator, (nummer 1 i figur 1.1), som her er en PID-regulator med føroverkobling. Denne gir ut en verdi som sier hvor stor tilsetningsstrømningen skal være gjennom ventilen. Hvor stor åpningen på ventilen da må være, blir regnet ut ved hjelp av den inverse ventilligningen (som er bestemt av ventilkarakteris-

ikken) (nummer 4 i figur 1.1). Hovedproblemet er at karakteristikken for ventil med røroplegg er tidsvarierende. Et varierende antall tankbiler er inne til fylling samtidig. Dette samt andre forhold i systemet påvirker differensialtrykket over ventilen og formen på karakteristikken. Differensialtrykket blir ikke målt, slik at det ikke er mulig å beregne maksimal strømningsrate gjennom ventilen. Dette gjør at reguleringen ikke fungerer tilfredsstillende.

1.2 Oppgavebeskrivelse

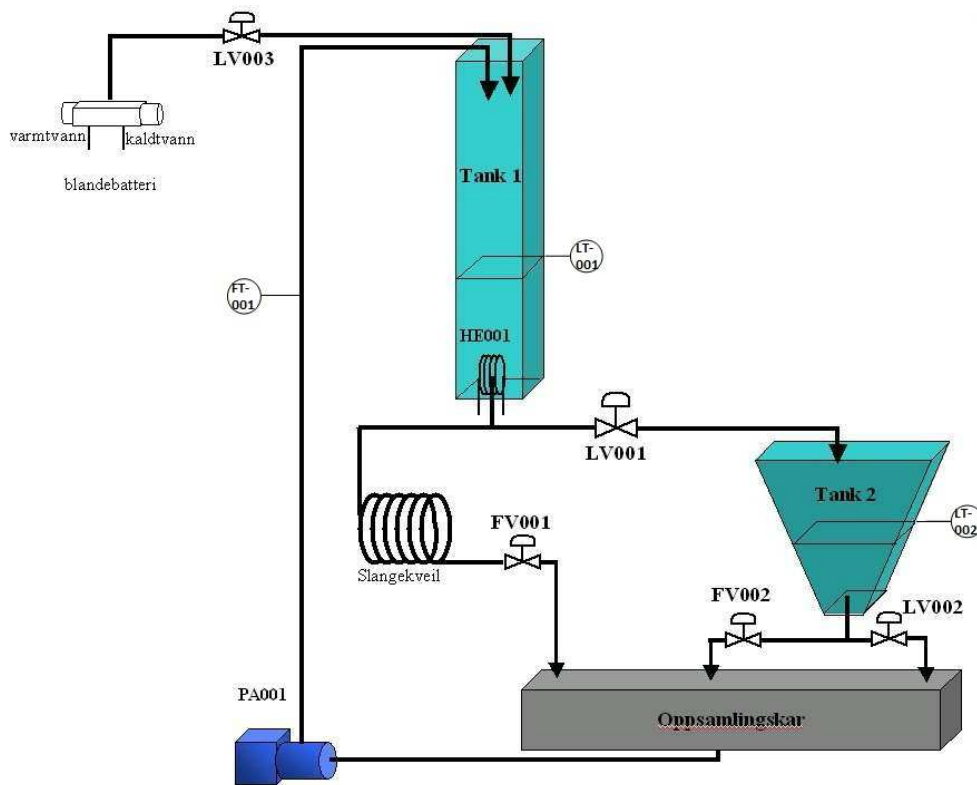
På grunn av tidsvarierende ventilkarakteristikk har utfordringen i denne oppgaven vært å utvikle en robust parameterestimator, (nummer 3 i figur 1.1), som estimerer maksimal strømningsrate gjennom ventilen.

Parameterestimatoren skal inngå i et reguleringssystem som består av en strømningsregulator og en volumregulator. Reguleringssystemet skal utvikles i LabVIEW og kommunisere med prosessanlegget på laboratoriet E-459 på Universitetet i Stavanger. Utfordringen ved utviklingen av reguleringssystemet er å finne de beste regulatorparametrene slik at reguleringen blir mest mulig optimal.

1.3 Testanlegg

Prosessanlegget på E-459 er et velkjent anlegg for studentene på Universitetet i Stavanger, og har vært brukt i undervisning i flere av fagene på både bachelor- og mastergradsnivå. Anlegget har mye instrumentering, noe som gjør det relativt enkelt å teste ut flere problemstillinger. Figur 1.2 viser en skjematisk oversikt over prosessanlegget.

For en mer fullstendig oversikt over anlegget, se P&ID for anlegget i vedlegg A.



Figur 1.2: Skjematisk oversikt over totankanlegget. [1]

Operasjonsscenarie

For å kunne bruke tankanlegget på Universitetet i Stavanger, er det nødvendig å bruke både fysiske og simulerte målinger. Tilførselen med drivstoff er i denne oppgaven en simulert strømning i LabVIEW, og er illustrert med rødt i figur 1.3. Videre tenkes det at tank 1 er tilsetningsstofftanken. Det vil si at det er strømmingen ut fra denne tanken som skal reguleres slik at den stemmer med forholdet til strømmingen av drivstoff. Tank 2 tenkes å være tankbilen, det vil si at det skal strømme drivstoff og tilsetningsstoff i tank 2. Dette betyr at en får følgende scenarie (jfr. både figur 1.2 og 1.3):

- Vannet (her: tilsetningsstoffet) i tank 1 hentes fra oppsamlingskaret ved bruk av pumpe PA001. På vei opp til tank 1 blir strømmingen målt ved bruk av strømningsmåleren FT001 eller via pumpekaraktistikken (ref. kapittel 2.2). Tank 1 har også en tilførsel fra LV003, men denne er alltid stengt i denne oppgaven.
- I tank 1 benyttes trykktransmitter LT001 til å bestemme nivået i tanken. Denne målingen brukes som prosessvariabel for en nivåregulator som holder nivået stabilt i tanken. Det er også et varmelement i bunn av tanken, men dette blir ikke brukt i denne oppgaven.

- Videre fra tank 1 strømmes vannet gjennom LV001 til tank 2 eller gjennom FV001 til oppsamlingskaret. LV001 er ventilen som skal reguleres.
- I tank 2 benyttes trykktransmitter LT002 til å bestemme nivået i tanken. Basert på denne målingen kan en beregne strømmingen gjennom LV001 (FV002 og LV002 må være stengt). Denne strømningsmålingen blir da prosessvariabel til strømningsregulatoren. Fra nivåmålingen kan en også bestemme volumet i tanken. Denne volummålingen brukes som prosessvariabel for volumregulatoren.
- Videre fra tank 2 strømmes vannet gjennom LV002 og ut i oppsamlingskaret. FV002 er hele tiden stengt, mens LV002 brukes til å tømme tanken.

Figur 1.3 illustrerer hvordan anlegget brukes i denne oppgaven.

1.4 Rapportens innhold og struktur

Kapittel 1 er en kort innledning som tar for seg bakgrunn og problemstilling for oppgaven.

Kapittel 2 gir en beskrivelse av prosessanlegget på Universitetet i Stavanger.

Kapittel 3 er teoridelen som beskriver de matematiske delene av oppgaven.

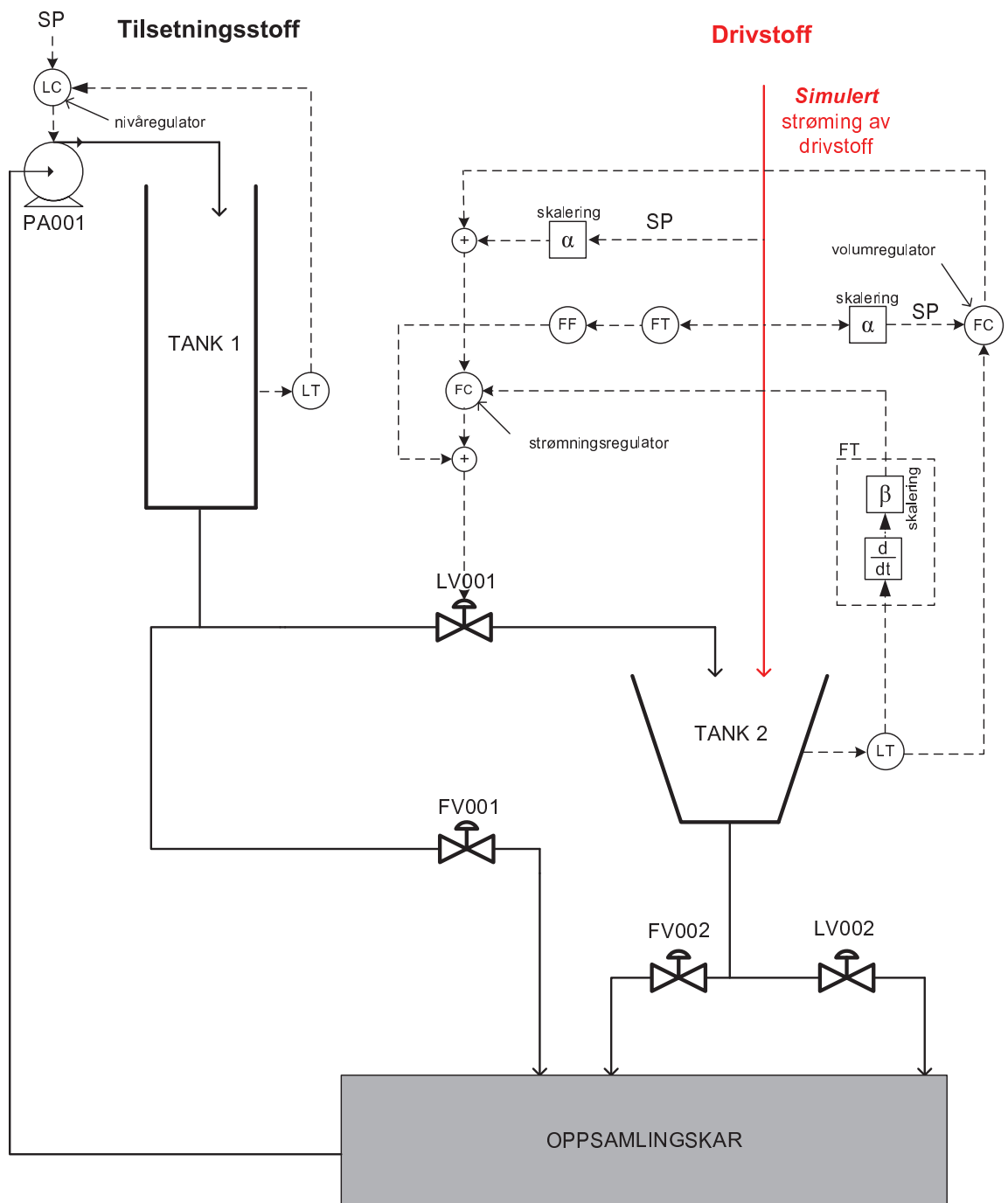
Kapittel 4 beskriver eksperiment gjort på ventilen på anlegget.

Kapittel 5 beskriver hvordan reguleringsystemet er bygget opp. Beregningen av reguleringsparametre i de forskjellige sløyfene er vist her.

Kapittel 6 viser hvordan reguleringsystemet er implementert i LabVIEW.

Kapittel 7 tar for seg resultater funnet i denne oppgaven.

Kapittel 8 er diskusjon- og konklusjonsdelen.



Figur 1.3: Skjematisk skisse over prosessanlegget inkludert simulert strøming av drivstoff.

2 Oppsett av testanlegg

2.1 Vanntanker

Som en ser ut fra figur 1.2 og 1.3 består anlegget av to vanntanker. Dimensjonen til tankene og instrumenteringen koblet til tankene er forklart i de to neste delkapitlene.

2.1.1 Tank 1 - tilsetningsstofftank

Tank 1 har en rektangulær form og er 1.0 meter høy. Det innvendige arealet er konstant og lik 0.0096 m^2 . Det vil si at det maksimale volumet i tanken er $V_{max} = A \cdot h = 0.0096 \text{ m}^2 \cdot 1.0 \text{ m} = 0.0096 \text{ m}^3 = 9.6 \text{ liter}$. Dette er maksimalt teoretisk volum, mens det virkelige vil være noe mindre. I virkeligheten kan tanken aldri fylles helt opp. Dette skyldes avløpsrøret på toppen av tanken som svelger unna når tanken begynner å nærme seg full (hvitt rør i figur 2.1). I tillegg tar også varmeelementet noe av plassen i tanken, som fører til at maksimalt volum blir noe mindre. Figur 2.1 viser tank 1 og komponenter koblet til denne.



Figur 2.1: Tank 1 med tilhørende instrumentering.

Som en kan se fra figuren er utløpet fra tank 1 plassert litt ovenfor bunnen av tanken. Dette er gjort for at varmeelementet HE001 alltid skal være under vann.

2.1.2 Skalering av trykktransmitter LT001

Ved skalering av LT001 er det antatt en lineær sammenheng mellom avlest spenning inn på I/O-kortet, PCI-6024, og avlest høyde i tank 1. Den lineære sammenhengen har vist seg å fungere bra ved tidligere forsøk, ref. [8] og fra faget Reguleringssteknikk på Universitetet i Stavanger. For å finne skaleringskoeffisientene er det brukt følgende oppskrift:

1. Les av spenning på I/O-kort når nivå i tanken er på bunn, det vil si 136 mm.
2. Fyll tanken helt full og les av spenning.
3. Disse to avlesningene gir utgangspunkt i to ligninger med to ukjente. Løs ligningene

$$aX_1 + b = Y_1 \text{ [mm]}$$

$$aX_2 + b = Y_2 \text{ [mm]}$$

hvor X_1 [V] og Y_1 [mm] er spennings- og nivåavlesning ved bunn-nivå hhv, mens X_2 [V] og Y_2 [mm] er spennings- og nivåavlesning ved toppnivå hhv. Bruk skaleringskoeffisientene a og b i LabVIEW som vist i figur 2.2

Følger oppskriften gitt ovenfor og får følgende ligningssystem:

$$3.15a + b = 136$$

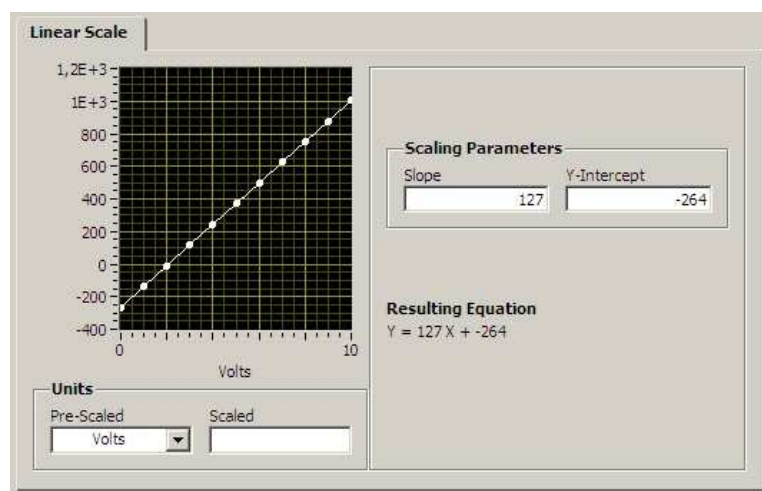
$$9.39a + b = 928$$

Etter litt regning finner en at

$$a = 127 \text{ [mm/V]} \quad (2.1)$$

$$b = -264 \text{ [mm/V]} \quad (2.2)$$

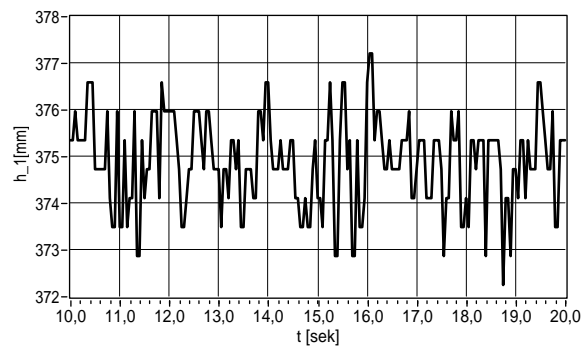
Implementert i LabVIEW gir det følgende kurve:



Figur 2.2: Sammenheng mellom avlest spenning og høyde i tank.

Etter litt testing i LabVIEW viser det seg at skaleringen er rimelig nøyaktig. Figur 2.3 viser en trendkurve for nivået i tank 1 når det er helt rolig i tanken. Leser av virkelig verdi til å være 375 mm, mens figur 2.3 viser at mesteparten av verdiene varierer innenfor et intervall på ± 2 mm. Ut fra statistikkberegninger kan en si at dersom 95 % av målingene er innenfor 2 standardavvik, er standardavviket lik:

$$\sigma_{\text{tank1}} = \frac{1}{2} \cdot 2 \text{ [mm]} = 1 \text{ [mm]} \quad (2.3)$$



Figur 2.3: Målestøy i tank 1.

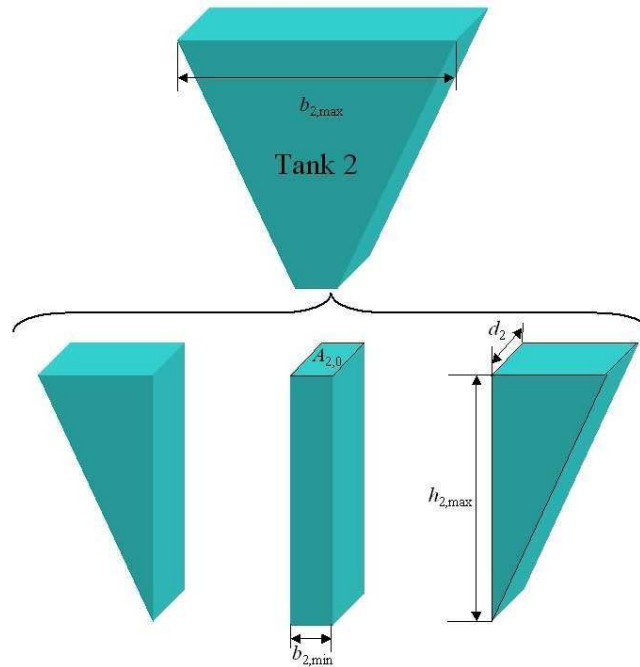
2.1.3 Tank 2

Tank 2 har en konisk form, noe som fører til en litt mer kompleks beregning for å finne volumet. Den spesielle formen til tanken gjør at arealet i tanken endrer seg som en funksjon av nivået; $A_2(h_2(t))$. Figur 2.4 viser tank 2 og komponenter koblet til denne:



Figur 2.4: Dimensjoner og instrument knyttet til tank 2.

For å beregne volumet er det enklest å ta utgangspunkt i figur 2.5 hvor tanken er delt opp i tre deler. Figur og beregning av volum er hentet fra [1].



Figur 2.5: Tank 2 delt opp i deler. [1]

Variablene i figuren ovenfor har følgende verdier:

$A_{2,0}$	Arealet i bunn av tank 2	0.0040 m^2
d_2	Dybden til tank 2	0.080 m
$b_{2,max}$	Øvre bredde på tank 2	0.40 m
$b_{2,min}$	Nedre bredde på tank 2	0.050 m
$h_{2,max}$	Max høyde til tank 2	0.40 m

En starter med å ta utgangspunkt i vinkelen til tanken:

$$\tan\phi = \frac{(b_{2,max} - b_{2,min})/2}{h_{2,max}} \quad (2.4)$$

Det betyr videre at arealet (uten bunnarealet) i høyde $h_2(t)$ er:

$$A(h_2(t)) = h_2(t) \cdot \tan\phi \cdot d_2 \cdot 2 \quad (2.5)$$

Ved å sette inn for $\tan\phi$ samt og legge til $A_{2,0}$, får vi følgende arealfunksjon¹:

$$A(h_2(t)) = 0.070 \cdot h_2(t) + 0.0040 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.6)$$

¹Merk: dette uttrykket vil senere bli brukt for å bestemme strømmingen gjennom LV001, ref. kapittel 5.3

Hva volumet i tanken er til en hver tid kan finnes ved å integrere arealfunksjonen vist i (2.6). En får da følgende volumfunksjon²:

$$\begin{aligned} V_2(t) &= \int_0^{h_2(t)} (a h_2(t) + b) dh \\ &= \frac{1}{2} a h_2(t)^2 + b h_2(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

hvor $a = 0.070$ og $b = 0.0040$. Ved å sette inn $h_{2,max}$ får en at maksimal volum i tank 2 er:

$$\begin{aligned} V_{2,max} &= \frac{1}{2} 0.070 \cdot 0.40^2 + 0.0040 \cdot 0.40 \\ &= 7.2 \cdot 10^{-3} m^3 = 7.2 \text{ liter} \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.1.4 Skalering av trykktransmitter LT002

Skaleringen av LT002 er gjort ved samme oppskrift som for LT001. Det gir opphav til følgende ligningssystem:

$$3.43a + b = 30.0$$

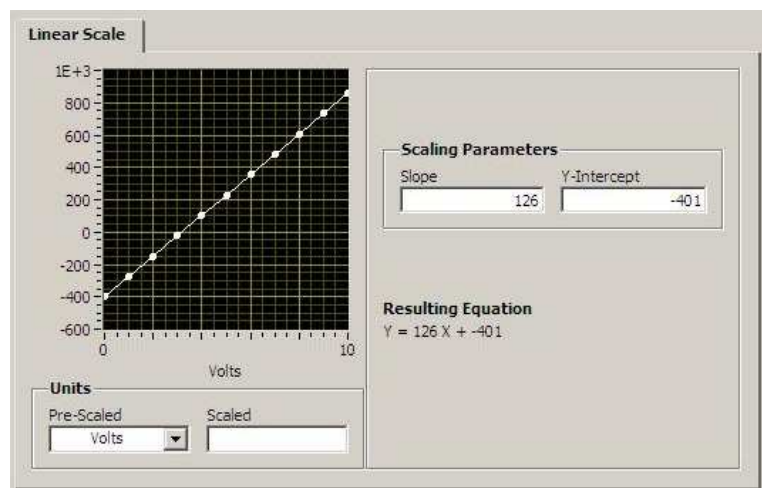
$$6.00a + b = 353$$

Etter litt regning finner en at

$$a = 126 \text{ [mm/V]} \quad (2.9)$$

$$b = -401 \text{ [mm/V]} \quad (2.10)$$

Implementert i LabVIEW gir det følgende kurve:

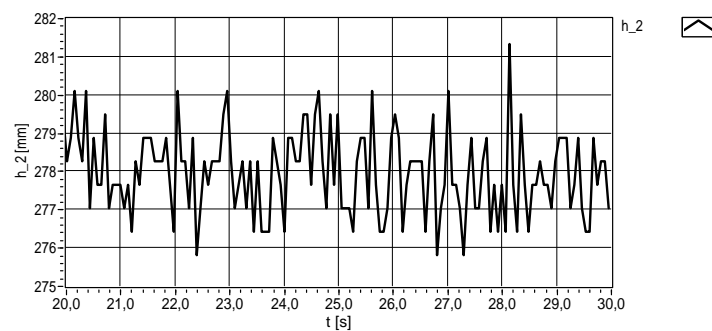


Figur 2.6: Sammenheng mellom avlest spenning og høyde i tank.

²Merk: volumfunksjonen vil senere i oppgaven bli brukt til å beregne volumet av tilsetningsstoffet.

Etter litt testing i LabVIEW viser det seg at skaleringen er rimelig nøyaktig. Det er noe mer støy i forhold til tank 1. Figur 2.7 viser en trendkurve for nivået i tank 2 når det er helt rolig i tanken. Leser av virkelig verdi til å være 278 mm, mens figur 2.7 viser at mesteparten av verdiene varierer innenfor et intervall på ± 2 mm. En får da samme standardavvik som for tank 1, nemlig $\sigma_{tank2} = 1$ mm.

Nivåmålingen av tank 2 brukes senere i oppgaven til å beregne både strømming, q_a , og volum, v_a . For å beregne strømmingen brukes den deriverte av nivåmålingen sammen med arealfunksjonen gitt i ligning (2.6). Siden en deriverer nivåmålingen er det viktig at en klarer å fjerne/reducere den verste målestøyen. For å få til dette, er nivåmålingen filtrert i LabVIEW, mer om dette i kapittel 5.3.



Figur 2.7: Målestøy i tank 2.

2.2 Pumpe

Pumpen som er installert på anlegget, er en sentrifugalpumpe av typen Flygt ETX 20/03. Pumpen styres av et signal mellom 0-1 i LabVIEW som tilsvarer 0-10 volt tilført til pumpen. På grunn av faktorer som høyde fra Pumpe til topp av tank og friksjon i rør, klarer pumpen ikke levere vann til tanken før pådraget er over 0.465. Derfor er pådraget skalert fra 0.465 til 1 i LabVIEW. Karakteristikken er funnet ut fra identiske forhold, med det menes det at trykket fra oppsamlingstanken alltid har vært det samme ved oppstart av Pumpe.



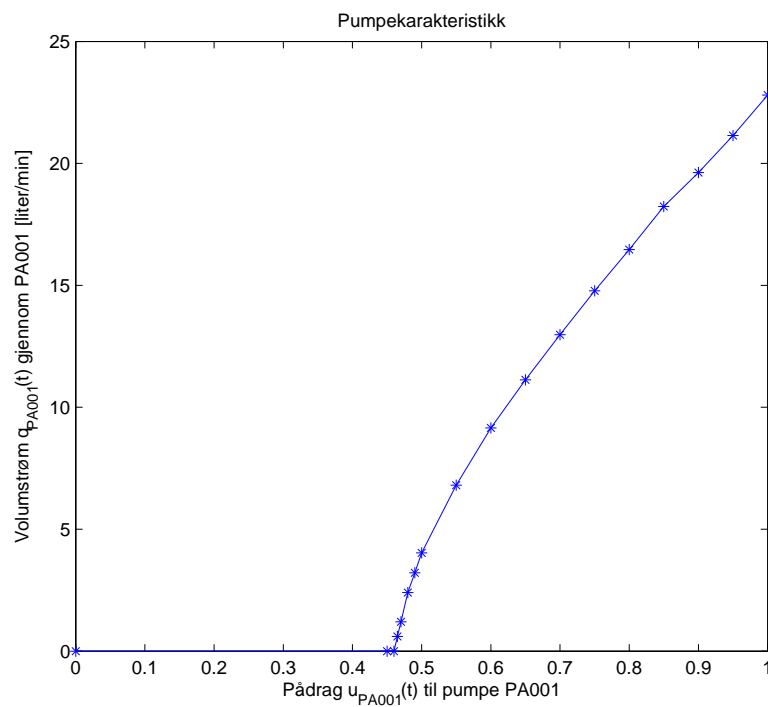
Figur 2.8: Pumpe på anlegget.

2.2.1 Pumpekaraktistikk

Pumpens karakteristikk er funnet ved å ta tiden det tar for å fylle en bestemt mengde vann i tank 1 ved ulike pådrag. Ved maks pådrag klarer pumpen å levere litt i overkant av 22 liter/min. Karakteristikken vises i form av tabell 2.1 og figur 2.9. Ved å studere figuren kan det se ut som om pumpekaraktistikken er en rotfunksjon av pumpepådraget, hvor økningen i normalisert volumstrømning er størst i starten, før økningen avtar ved større pumpepådrag.

u_{PA001}	q [liter/min]
0.45	0
0.46	0
0.465	0.600
0.47	1.21
0.48	2.40
0.49	3.21
0.50	4.03
0.55	6.80
0.60	9.15
0.65	11.1
0.70	13.0
0.75	14.8
0.80	16.5
0.85	18.2
0.90	19.6
0.95	21.1
1.0	22.8

Tabell 2.1: Pumpepådrag med tilhørende strømning.



Figur 2.9: Pumpekararakteristikk.

2.3 Ventiler

Dette delkapittelet er basert på [1]. Teksten som er markert med ” ” er direkte sitat.

Ventilene brukt i denne oppgaven er av to forskjellige typer; LV001, som er ventilen som skal reguleres, og LV002, som blir brukt til tømning av tank 2. Disse er seteventiler av type Fisher Baumann 24000 1”. FV001 er en noe mindre seteventil av typen Fisher Baumann 6 mm ($\approx 1/4$ ”). For å få aktuatoren i ventilen til å bevege seg benyttes trykkluft. Går trykkluft inn på oversiden av membranen, stenger ventilen når styresignalet øker. Dette gjelder FV001 og FV002. Disse er derfor fail open (FO) eller normally open (NO), som betyr at den åpner hvis trykkluften (ved en feil) forsvinner. Går trykkluften inn på undersiden av membranen, åpner ventilen når styresignalet øker. Dette gjelder LV001 og LV002. Disse er fail close (FC) eller normally closed (NC). Alle ventilene styres av et signal mellom 0 og 1 i LabVIEW som tilsvarer 0-10 volt tilført til aktuatoren.

”På alle ventilene i anlegget er det en *positioner*. Dette er en enhet som sørger for å sette ventilen i den posisjonen, $z(t)$, som pådraget, $u(t)$, gir beskjed om. Grunnen til at det er behov for *positioner* er at friksjon i pakkboxen mange ganger vil hindre ventilen i å bevege seg, særlig hvis pådraget endrer seg lite, f.eks 1%. *Positioneren* sørger da internt for å øke pådraget tilstrekkelig slik at ventilen beveger seg.” $u(t)$ er da altså posisjonsreferanse.

I figur 2.10 vises ventilene med tilhørende aktuator og *positioner* som er installert på anlegget.

Ventilkonstanten til LV001 og LV002 er gitt ved $K_v = 9.68 \left[\frac{m^3}{time \cdot \sqrt{\Delta p}} \right]$, mens ventilkonstanten til FV001 er gitt ved $K_v = 1.29 \left[\frac{m^3}{time \cdot \sqrt{\Delta p}} \right]$. Dette er et mål på hvor mye som maksimalt kan strømme gjennom ventilen i løpet av en time ved 1 bar trykkfall.

Ventilkarakteristikken til LV001, $f_1(u_{LV001})$, er funnet etter eksperiment og er nøye dokumentert i kapittel 4.



Figur 2.10: Ventilene på testanlegget. Oppe til venstre: LV001, oppe til høyre: LV002, nede til venstre: FV001 og nede til høyre: FV002

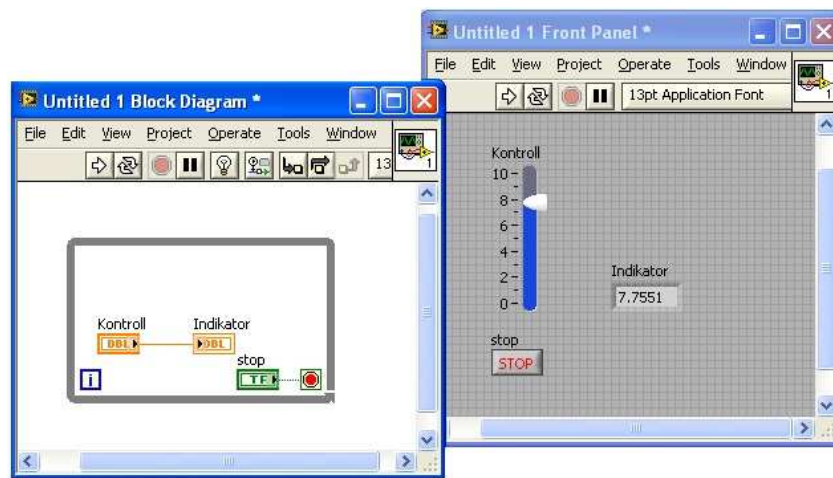
2.4 Datalogging og programvare

Reguleringssystemet i denne oppgaven er styrt av LabVIEW som ved hjelp av to I/O-kort kommuniserer med prosessanlegget. Både LabVIEW og I/O-kortene er produkter utviklet av National Instruments.

De to neste avsnittene er hentet direkte fra kapittel 3.1 i [8].

”LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench) er et programmeringsverktøy for grafisk programmering. Verktøyet er lite brukt i industrien i Norge. Mye av grunnen til dette er at programvare som MatLab og SimuLink har et godt fotfeste i de aktuelle bedriftene her til lands. En annen grunn er at LabVIEW har ligget etter i utviklingen, og har i mange år fremstått som et noe ”uferdig” produkt. Dette har imidlertid endret seg i løpet av de siste årene, der LabVIEW har dratt nytte av flere gode oppdateringer og tilleggsfunksjoner. Dagens LabVIEW er et svært omfattende verktøy. Samtidig oppdateres verktøyet med nye versjoner ca. to ganger i året og blir stadig bedre.

LabVIEW har flere fordeler, der to egenskaper skiller seg særlig ut. Den ene er den grafiske programmeringen og enkelheten av oppsettet til grensesnittet mellom brukeren og programmet som kjøres. Den andre er løsningen for datainnsamlings- og analysefunksjoner som gjør at utviklere uavhengig av erfaring enkelt kan samle inn data og få dette analysert og behandlet på ønskelig måte. Grafisk programmering i LabVIEW består av en kobling mellom to vinduer, frontpanelet og blokkdiagrammet, vist i figur 2.11. Frontpanelet representerer det som til slutt blir grensesnittet mellom det utviklede program og bruker. Blokkdiagrammet er programmet som kjøres bak grensesnittet. En utvikler har dermed under hele utviklingsprosessen mulighet til å endre på designet til frontpanel, for å skape en best mulig fremvisning og funksjonalitet.”



Figur 2.11: Frontpanel og blokkdiagram i LabVIEW. [8]

Figur 2.11 viser også de viktigste byggesteinene i LabVIEW, nemlig kontrollere, indikatorer og sktrukturer/løkker. I figuren er det vist en skyver (kontroll) og et digitalt display (indikator) som kjøres i en *while*-løkke. *While*-løkken kjører helt til en trykker stop-knappen.

I/O-kortene som er bindeleddet mellom reguleringssystemet og målingene på det fysiske anlegget er to PCI-kort kalt PCI-6024E og PCI-6703. Inn- og utgangene på disse kortene stilles inn ved hjelp av et tilleggsprogram kalt *Measurement & Automation* (MAX). I dette programmet blir inn- og utgangene skalert fra volt til SI-verdier. PCI-6703, som er kortet som gir ut signaler har syv utganger/kanaler, mens PCI-6024E, som tar imot målinger, har 8 innganger/kanaler. Tabell 2.2 viser hvilke kanaler som er koblet til hvilke komponenter.

Inn/ut	Kanal (analog utgang/inngang)	Tag-navn	Type komponent
UT PCI-6703	ao0	FY001	Aktuator for FV001
	ao1	FY002	Aktuator for FV002
	ao2	LY002	Aktuator for LV002
	ao3	LY003	Aktuator for LV003
	ao4	LY001	Aktuator for LV001
	ao5	FE001	-
	ao6	PA001	Pumpe
INN PCI-6024E	ai0	-	-
	ai1	FT001	Strømningstransmitter
	ai2	TT003	Temperaturtransmitter
	ai3	LT001	Nivåtransmitter tank 1
	ai4	TT002	Temperaturtransmitter
	ai5	LT002	Nivåtransmitter tank 2
	ai6	TT001	Temperaturtransmitter
	ai6	PT001	Trykktransmitter

Tabell 2.2: Kanaler på I/O-kort.

3 Teori

3.1 Matematisk modell av testanlegg

Dette kapittelet er basert på kapittel 1 i [1].

For å få en bra regulering og estimering av tilstander og parametre er det viktig å ha en god modell av den fysiske prosessen. Prosessen i denne oppgaven er tank 1, tilsetningsstoff-tanken. Prosessvariabelen er nivået i tanken, og den kan finnes ved å ta utgangspunkt i massebalansen til tanken. Massebalansen er gitt ved følgende uttrykk:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum_i w_i(t) \quad (3.1)$$

som også kan skrives på følgende form:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum \text{innstrømning} - \sum \text{utstrømning} + \sum \text{generert} \quad (3.2)$$

Antar i denne oppgaven at det ikke blir generert eller fordampet noe masse. Derfor blir det siste leddet i ligning (3.2) neglisjert. Har da:

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= w_{inn}(t) - w_{ut}(t) \\ &= \rho \cdot q_{inn}(t) - \rho \cdot q_{ut}(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

hvor massen i tanken er gitt ved følgende uttrykk:

$$m(t) = \rho \cdot A \cdot h(t) \quad (3.4)$$

Setter (3.4) inn i (3.3). Antar at ρ og A er konstanter slik at disse kan settes utenfor deriveringen. Får da:

$$\rho \cdot A \cdot \frac{d(h(t))}{dt} = \rho \cdot q_{inn}(t) - \rho \cdot q_{ut}(t) \quad (3.5)$$

Eliminerer ρ og flytter A over på andre side av likhetstegn og får:

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A} (q_{inn}(t) - q_{ut}(t)) \quad (3.6)$$

som er differensialligningen for nivået i tanken. Denne ligningen kan også uttrykkes mer detaljert ved å finne uttrykk for $q_{inn}(t)$ og $q_{ut}(t)$. $q_{inn}(t)$ er strømmingen tilført fra pumpen PA001 og er gitt ved følgende:

$$q_{inn}(t) = f_1(u_{PA001}(t)) \quad (3.7)$$

Som en ser er strømmingen tilført fra pumpen en funksjon av pumpepådraget. Tabell 2.1 og figur 2.9 i kapittel 2.2 viser disse sammenhengene.

Strømningen ut av tanken, $q_{ut}(t)$, er gitt av ventilligningen. Denne ligningen er ventilens matematiske modell, og beskriver ventilens karakteristik. I kapittel 4 er det gjort et eksperiment for å finne denne karakteristikken. I forbindelse med dimensjonering av nivåregulatoren i kapittel 5.2 antas $q_{ut}(t)$ å være en forstyrrelse, slik at en ikke trenger et mer detaljert uttrykk for denne. Differensialligningen for nivået i tank 1 kan da uttrykkes ved følgende:

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A} (f_1(u_{PA001}(t)) - q_{ut}(t)) \quad (3.8)$$

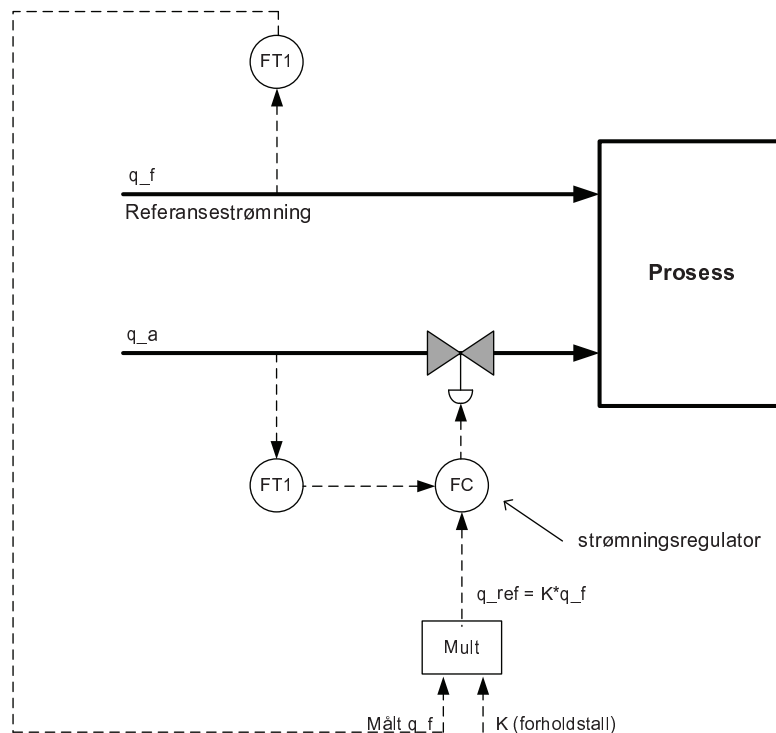
3.2 Forholdsregulering

Dette kapittelet er basert på kapittel 11.2 i [6].

Forholdsregulering har som mål å regulere en strømning, q_a (her: strømning av tilsetningsstoff), slik at forholdstallet mellom strømningen og en annen gitt strømning, q_f , (her: strømning av drivstoff) blir som spesifisert:

$$q_a = K \cdot q_f \quad (3.9)$$

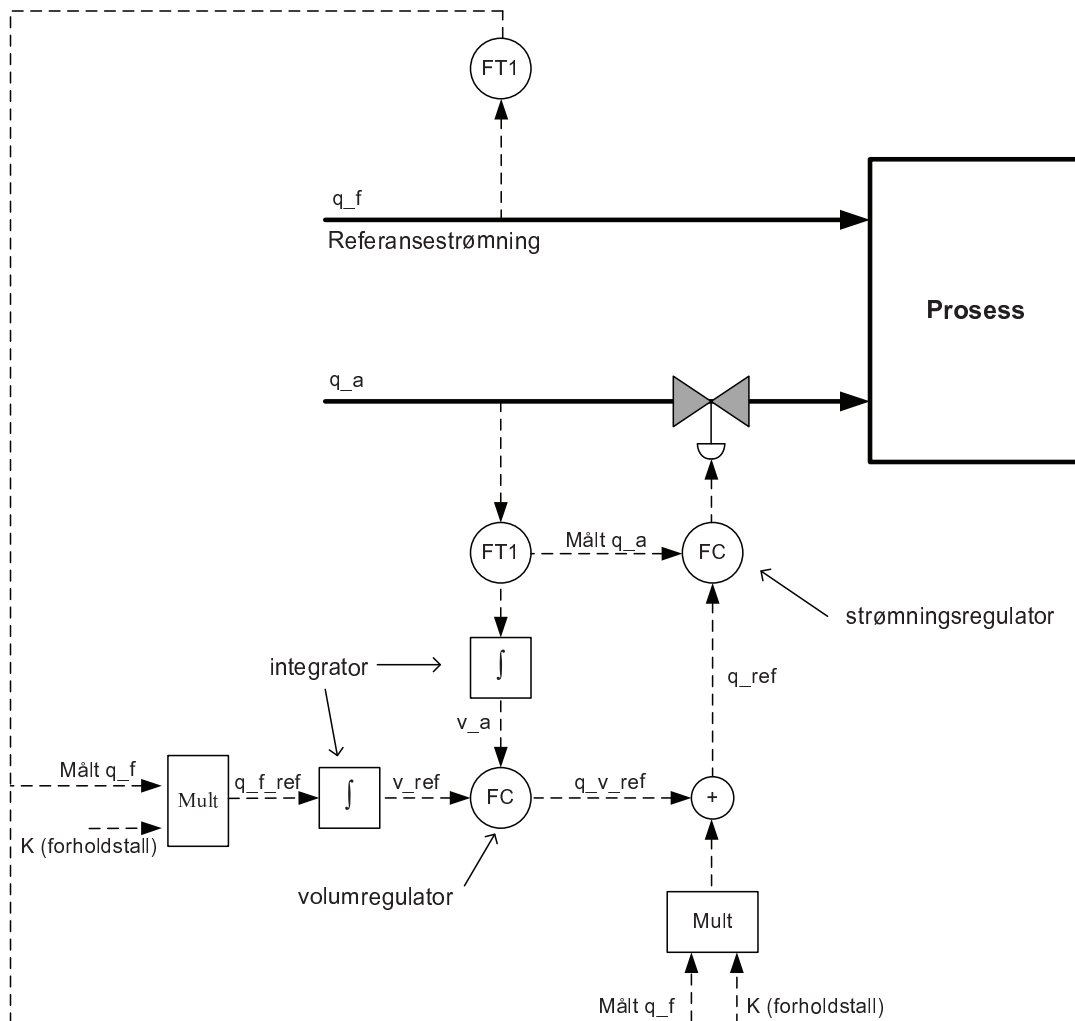
der K er et spesifisert forholdstall. Forholdsreguleringen kan illustreres ved hjelp av figur 3.1:



Figur 3.1: Forholdsregulering. Figuren er laget med utgangspunkt i figur 11.5 i [6].

I figuren ser en at strømningsreferansen, q_{ref} , til strømningsregulatoren framkommer som

K multiplisert med måleverdien for q_f . q_f er i denne oppgaven en simulert strømning i LabVIEW, jfr. kapittel 1.3. I tillegg til strømningsregulatoren har en også en volumregulator som bidrar dersom $V_a \neq K \cdot V_f$. Utgangen fra volumregulatoren blir da et ekstra bidrag til strømningsreferansen, q_{ref} , vist i figur 3.2. Her ser en at referansen, v_{ref} , til volumregulatoren framkommer som integralet av q_{f_ref} . Prosessvariabelen til volumregulatoren er integralet av den målte strømningen q_a .



Figur 3.2: Forholdsregulering med strømnings- og volumregulator. Figuren er laget med utgangspunkt i figur 11.5 i [6].

Figur 1.3 viser hvordan forholdsreguleringen fungerer på testanlegget i denne oppgaven.

3.3 Estimering ved bruk av Kalman-filte

Dette kapitlet tar for seg den generelle teorien bak et Kalman-filte, mens kapittel 5.7 tar for seg hvordan Kalman-filte i denne oppgaven er utviklet. Teorien i dette kapitlet er hentet fra [10, 9], mens kapittel 3.3.1 er basert på [7].

3.3.1 Kalman-filteets virkemåte og anvendelse

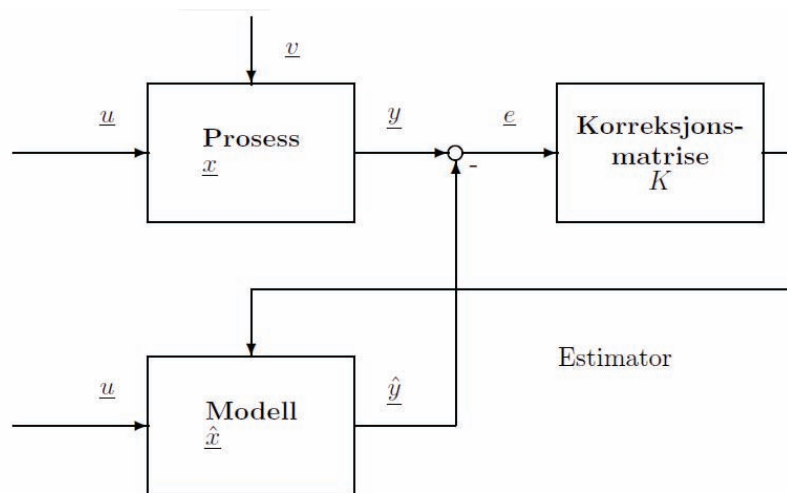
Prosessmålinger brukes til regulering og overvåking. Disse målingene gjøres vanligvis med fysiske sensorer, men de kan også 'måles' ved hjelp av et Kalman-filte. En Kalman-filte er en tilstand- og parameterestimator som beregner variabler ut fra en kjent modell av prosessen i kombinasjon med målingen fra prosessen. Hensikten med et Kalman-filte kan være:

- Skaffe informasjon om tilstander som ikke er direkte målbare.
- Filtrere støyfulle målinger.
- Å erstatte en fysisk sensor ut fra vurdering knyttet til kostnad eller tilgjengelighet.
- Å dublisere en fysisk sensor for å erstatte fysiske målinger dersom den fysiske sensoren feiler.

For å forklare hvordan en tilstandsestimator fungerer, tar en utgangspunkt i figur 3.3. Her ser en at estimatoren får løpende informasjon om prosessen fra to kilder, nemlig prosessmodellen og en målevektor. Tilstandsestimatoren fungerer som følger:

Når et nytt sampleintervall starter, vil modellen stå klart med et forhånds-estimat, kalt *apriori*-estimat, av de modellerte tilstandene. Målingen blir så utført, og tilstandsestimatoren regner så ut det beste estimatet, kalt *aposteriori*-estimatet, av tilstandene basert på målingen og *apriori*-estimatet. *Aposteriori*-estimatet gir altså det beste estimatet av tilstanden i prosessen på et gitt tidspunkt.

Ved neste sampleintervall vil *aposteriori*-estimatet bli brukt som startverdi for modellen. Modellen blir så kjørt et sampleintervall frem i tid, og resultatet etter neste sampleintervall er altså en oppdatert tilstandsvektor som sier hvordan modellen tror prosessstilstandene vil være ved neste tidsskritt. Denne tilstandsvektoren er altså *apriori*-estimatet for neste tidsskritt. I tillegg regner estimatoren ut løpende *apriori* og *aposteriori* kovarians-matriser for tilstandsestimatene.



Figur 3.3: Illustrasjon som viser estimatorens virkemåte. [10].

3.3.2 Prosessmodell

Utleddningen i dette kapittelet er hentet direkte fra kapittel 2.1 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål.

Utgangspunktet for å konstruere en tilstandsestimator er at en lager en matematisk modell av prosessen. Denne kan være lineær eller ulineær. Den lineære modellen er gitt på følgende form:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = A\underline{x} + B\underline{u} + C\underline{v} \quad (3.10)$$

$$\underline{y} = D\underline{x} + \underline{w} \quad (3.11)$$

hvor

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \underline{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_l \end{bmatrix}, \underline{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix}, \underline{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_l \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

der \underline{x} , \underline{y} , \underline{u} og \underline{w} er tilstands-, måle-, pådrags- og målestøyvektorer hhv.

Antar at \underline{w} er hvit støy der forventningen $E(\underline{w}) = 0$, og at \underline{v} er hvit støy med kjent middelverdi:

$$\overline{\underline{v}} = \begin{bmatrix} \overline{v_1} \\ \vdots \\ \overline{v_m} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

A, B, C og D er systemmatrisene.

3.3.3 Linearisering

Utleddningen i dette kapittelet er hentet direkte fra kapittel 2.2 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål.

Som oftest er modellen ulineær:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{v}) \quad (3.14)$$

$$\underline{y} = \underline{g}(\underline{x}) + \underline{w} \quad (3.15)$$

For å kunne studere visse egenskaper ved modellen samt kunne realisere algoritme for utregning av estimat-kovarians, må en ulineær modell lineariseres rundt et vilkårlig arbeidspunkt

$$P = (\underline{x}_0, \underline{u}_0, \bar{v})$$

Tar utgangspunkt i 1.ordens Taylorrekke-utvikling av $\dot{\underline{x}}$

$$\dot{\underline{x}} \approx \underline{f}(P) + \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{x}}(\underline{x} - \underline{x}_0) + \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{u}}(\underline{u} - \underline{u}_0) + \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{v}}(\underline{v} - \bar{v}) \quad (3.16)$$

$$\underline{y} \approx \underline{g}(P) + \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}}(\underline{x} - \underline{x}_0) \quad (3.17)$$

Da en i tillegg har at

$$\underline{f}(P) = \dot{\underline{x}}_0, \underline{g}(P) = \underline{y}_0$$

får en følgende:

$$\underline{\Delta \dot{x}} = A \underline{\Delta x} + B \underline{\Delta u} + C \underline{\Delta v} \quad (3.18)$$

$$\underline{\Delta y} = D \underline{\Delta x} + \underline{w} \quad (3.19)$$

der

$$\underline{\Delta x} = \underline{x} - \underline{x}_0$$

$$\underline{\Delta u} = \underline{u} - \underline{u}_0$$

$$\underline{\Delta v} = \underline{v} - \bar{v}$$

$$\underline{\Delta y} = \underline{y} - \underline{y}_0$$

Matrisene A, B, C og D for systemet ved arbeidspunktet P er:

$$\begin{aligned}
 A &= \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{x}} \right|_P = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \\
 B &= \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{u}} \right|_P = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \\
 C &= \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{v}} \right|_P = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial v_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial v_m} \end{bmatrix} \\
 D &= \left. \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}} \right|_P = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

A, B, C og D er såkalte Jacobi-matriser.

3.3.4 Observerbart system

Teorien i dette kapittelet er hentet direkte fra kapittel 2.3 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål.

Definisjonen av et observerbart system er som følger:

Et system er observerbart, dvs. alle de modellerte tilstandene er estimerbare, dersom observerbarhetsmatrisa Q_0 er slik at

$$\text{rang} Q_0 = n \quad (3.20)$$

der n er antall tilstander og Q_0 er gitt ved

$$Q_0 = [D^T \quad A^T D^T \quad (A^2)^T D^T \quad \dots \quad (A^{n-1})^T D^T] \quad (3.21)$$

Matrisene A og D finnes direkte ut fra prosessmodellen ved lineære system, eller ved linearisering ved ulineære system, som vist i kapittel 3.3.2 og 3.3.3. Rangen til en matrise, A, er definert som dimensjonen til kolonnerommet til A. Rangen kan også finnes ved å ta utgangspunkt i determinanten:

Rangen til en matrise er pr. def. lik p dersom det finnes en determinant DET av orden p der

$$DET \neq 0$$

mens alle determinanter av høyere orden er null.

3.3.5 Diskretisering

Teorien i dette kapittelet er hentet direkte fra kapittel 2.4 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål.

For å kjøre tilstandsestimatoren i sann tid vil det være best å tilpasse denne til kjøring på datamaskinen. Prosessmodellen må da diskretiseres. Den mest vanlige metoden er da å bruke Euler-diskretisering som gir en førsteordens approksimasjon av de deriverte. Nedenfor er det vist hvordan Eulers-diskretisering er gjort for et lineært system:

$$\dot{\underline{x}} \approx \frac{\underline{x}(t+1) - \underline{x}(t)}{T_s} = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) + C\underline{v}(t) \quad (3.22)$$

$$\underline{y}(t) = D\underline{x}(t) + \underline{w}(t) \quad (3.23)$$

hvor T_s er sampleintervallet.

Ligning (3.22) kan videre manipuleres til følgende:

$$\underline{x}(t+1) = \underline{x}(t) + T_s(A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) + C\underline{v}(t)) = \underline{x}(t) + T_s\dot{\underline{x}}(t) \quad (3.24)$$

En diskret versjon av den lineære modellen blir nå:

$$\underline{x}(k+1) = \Phi\underline{x}(k) + \Gamma\underline{u}(k) + \Omega\underline{v}(k) \quad (3.25)$$

$$\underline{y}(k) = D\underline{x}(k) + \underline{w}(k) \quad (3.26)$$

hvor systemmatrisene Φ , Γ og Ω kan finnes ved følgende

$$\Phi = I + AT_s \quad (3.27)$$

$$\Gamma = BT_s \quad (3.28)$$

$$\Omega = CT_s \quad (3.29)$$

Dersom modellen er ulineær, blir den diskretiserte versjonen slik:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{x}(k) + T_s f(\underline{x}(k), \underline{u}(k), \underline{v}(k)) \quad (3.30)$$

$$\underline{y}(k) = \underline{g}(\underline{x}(k)) + \underline{w}(k) \quad (3.31)$$

3.3.6 Forutsetninger/antagelser

Teorien i dette kapittelet er hentet direkte fra kapittel 1.4 i [9].

Kalman-filteet bygger på en del forutsetninger for å si at det er optimalt:

- Prosessen er påvirket av tilfeldig (stokastisk) prosessstøy, $\underline{v}(k)$.
- Stokastisk målestøy, $\underline{w}(k)$.

- Hvit initialtilstand.

Antar også at prosesstøy, $\underline{v}(k)$, og målestøy, $\underline{w}(k)$, har forventningsverdi lik 0:

$$E[\underline{v}(k)] = 0, E[\underline{w}(k)] = 0 \quad (3.32)$$

og at $\underline{v}(k)$ og $\underline{w}(k)$ er ukorrelerte:

$$E[\underline{v}(k + \tau)\underline{w}^T] = R_{vw}(\tau, k) = 0 \quad (3.33)$$

og at støyen er hvit, det vil si uavhengig av tidligere verdier:

$$E[\underline{v}(k + \tau)\underline{v}^T] = R_v(\tau, k) = \delta(\tau)R_v(0, k) = Q(k) = Q \quad (3.34)$$

$$E[\underline{w}(k + \tau)\underline{w}^T] = R_w(\tau, k) = \delta(\tau)R_w(0, k) = R(k) = R \quad (3.35)$$

Q og R er da autokovariansmatriser for prosesstøy, $\underline{v}(k)$, og målestøy, $\underline{w}(k)$ henholdsvis. I tillegg ønskes initialtilstanden $x(0)$ å være en hvit stokastisk variabel med forventningsverdi $E[x(0)] = m_0$.

Ved å ta utgangspunkt i forutsetningene i dette kapittelet, kan algoritmen for et generelt Kalman-filter utledes. Utledningen er ikke vist i denne rapporten. For å se denne henvises det til kapittel 2 i [9].

3.3.7 Generelt Kalman-filte

Teorien i dette kapitlet er hentet direkte fra kapittel 3.4 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål. I tillegg er det valgt å presentere den diskretiserte modellen med tids-benevning k i stedet for t , som er benevningen som er brukt i [10]. Symbolet på støymatrisene er også endret fra W og V til R og Q hhv.

I dette kapitlet vises det hva som må gjøres for å utvikle et generelt Kalman-filte. I tillegg til forutsetningene beskrevet i forrige delkapittel må en ha følgende opplysninger før en kan starte estimatoren:

- En kjent diskretisert prosessmodell på lineær eller ulineær form (jfr. kapittel 3.3.5):

Lineær:

$$\begin{aligned}\underline{x}(k+1) &= \Phi \underline{x}(k) + \Gamma \underline{u}(k) + \Omega \underline{v}(k) \\ \underline{y}(k) &= D \underline{x}(k) + \underline{w}(k)\end{aligned}$$

Ulineær:

$$\begin{aligned}\underline{x}(k+1) &= \underline{x}(k) + T \underline{f}(\underline{x}(k), \underline{u}(k), \underline{v}(k)) \\ \underline{y}(k) &= \underline{g}(\underline{x}(k) + \underline{w}(k))\end{aligned}$$

- Startverdi på *a priori*-estimatet, $\bar{\underline{x}}(0)$ av \underline{x} med tilhørende kovariansmatrise $\bar{X}(0)$
- Målestøymatrise, R , og prosessstøymatrise, Q , må bestemmes. Dette er Kalman-filteets tunings-matriser.

En kan nå starte den rekursive Kalman-filte-algoritmen.

Algoritme for generelt Kalman-filte

1. Finn *a priori*-informasjon, $\bar{\underline{x}}(k)$, $\bar{X}(k)$ samt pådragssignal $\underline{u}(k)$ og prosessstøy $\underline{v}(k)$.
2. Utfør målingen $\underline{y}(k)$. Dersom måleligningen er ulineær, finn D -matrisen ved å linearisere $\underline{g}(\underline{x}(k))$ rundt $\bar{\underline{x}}(k)$ som gir det nåværende arbeidspunkt for prosessen.
3. Finn optimal filter-forsterkning:

$$K(k) = \bar{X}(k) D^T (D \bar{X}(k) D^T + R)^{-1} \quad (3.36)$$

4. Finn *a posteriori*-estimat og *a posteriori* kovarians:

$$\hat{\underline{x}}(k) = \bar{\underline{x}}(k) + K(k)(\underline{y}(k) - D \bar{\underline{x}}(k)) \quad (3.37)$$

$$\hat{X}(k) = (I - K(k)D) \bar{X}(k) (I - K(k)D)^T + (K(k)R K(k))^T \quad (3.38)$$

Dersom måleligningen er ulineær, erstatt $D \bar{\underline{x}}(k)$ i ligning (3.37) med $\underline{g}(\bar{\underline{x}}(k))$.

5. Finn *a priori*-informasjon for neste tidsskritt $k + 1$:

Lineær modell:

$$\underline{\bar{x}}(k+1) = \Phi \underline{x}(k) + \Gamma \underline{u}(k) + \Omega \underline{\bar{v}}(k) \quad (3.39)$$

$$\overline{X}(k+1) = \Phi \hat{X}(k) \Phi^T + \Omega Q \Omega^T \quad (3.40)$$

Ulineær modell:

$$\underline{\bar{x}}(k+1) = \hat{\underline{x}}(k) \Phi + T f(\hat{\underline{x}}(k), \underline{u}(k), \underline{\bar{v}}(k)) \quad (3.41)$$

$$\overline{X}(k+1) = \Phi(k) \hat{X}(k) \Phi(k)^T + \Omega(k) Q \Omega(k)^T \quad (3.42)$$

$\Phi(k)$ og $\Omega(k)$ kan finnes ved å linearisere $f(\dots)$ rundt $\hat{\underline{x}}(k)$, $\underline{u}(k)$ og $\underline{\bar{v}}(k)$.

6. Inkrementer k og gå til punkt 1.

3.3.8 Stasjonært Kalman-filter

Teorien i dette kapittelet er hentet direkte fra kapittel 3.5 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål. I tillegg er det valgt å presentere den diskretiserte modellen med tidsbenedning k i stedet for t , som er benedningen brukt i [10]. Symbolet på støymatrisene er også endret fra W og V til R og Q hhv.

Dersom prosessmodellen er lineær, slik at matrisene Φ , D og Ω er konstante, og i tillegg matrisene Q og R er konstante, vil en ha følgende situasjon:

- Korreksjonsfaktorene vil innta en konstant verdi etter en viss innsvingningstid.
- Estimat-kovariansene vil innta konstant verdi i løpet av samme innsvingningstid.

Dette fører til at en kan bruke konstante korreksjonsfaktorer i estimatoren. Dette fører til en mye mindre kompleks algoritme og dermed mindre krevende når en ser på regnekapasitet, sammenlignet med et generelt Kalman-filter. Eneste ulempe er at innsvingningen ved oppstart blir noe tregere.

Korreksjonsfaktorene kan finnes ved å kjøre et generelt Kalman-filter, og lese av korreksjonsfaktorverdiene når disse har 'flatet ut' til en konstant verdi. Algoritmen til filteret blir dermed:

Algoritme for stasjonært Kalman-filter

1. Finn *a priori*-informasjon, $\underline{\bar{x}}(k)$, pådragssignal $\underline{u}(k)$ og prosesstøy $\underline{\bar{v}}(k)$.

2. Utfør målingen $\underline{y}(k)$.
3. Finn *aposteriori*-estimatet:

$$\hat{\underline{x}}(k) = \bar{\underline{x}}(k) + K(k)(\underline{y}(k) - D\bar{\underline{x}}(k)) \quad (3.43)$$

4. Finn *apriori-informasjon* for neste tidsskritt $k + 1$:

$$\bar{\underline{x}}(k + 1) = \Phi\underline{x}(k) + \Gamma\underline{u}(k) + \Omega\bar{\underline{v}}(k) \quad (3.44)$$

5. Inkrementer k og gå til punkt 1.

3.3.9 Augmentert Kalman-filte

Teorien i dette kapitlet er hentet direkte fra kapittel 3.8 i [10], men er skrevet om fra nynorsk til bokmål. I tillegg er symbolet på støymatrisene endret fra W og V til R og Q hhv.

Kalman-filteet kan også benyttes som en kombinert tilstands- og parameterestimator. Filteet kalles da et augmentert Kalman-filte. Det nye her er at modellen bare er delvis kjent. For at modellen her skal være i stand til å produsere *apriori*-informasjon om tilstandene, må de ukjente modellparametrene kvantifiseres. Parameterestimatoren produserer da et løpende estimat av disse, i parallell med selve tilstandsestimatorene. Et vilkår er at modellparametrene er langsomt-varierende i forhold til selve prosessdynamikken. Det er ellers vanskelig å skille effektene av parameterendringer og tilstandsendringer fra hverandre.

Et augmentert Kalman-filte skiller seg fra et generelt Kalman-filte ved at det ser på de ukjente parametrene, θ , som langsomt varierende tilstandsvariabler. En får at den augmenterte prosessmodellen blir seende slik ut:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{v}, \theta) \quad (3.45)$$

$$\dot{\underline{\theta}} = \underline{0} + \underline{v}_\theta \quad (3.46)$$

hvor

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_p \end{bmatrix}, \quad \underline{v}_\theta = \begin{bmatrix} \underline{v}_{\theta_1} \\ \vdots \\ \underline{v}_{\theta_p} \end{bmatrix}$$

De ukjente parametrene er altså modellert som tilnærma konstante, men med en viss drift gitt av prosesstøyen \underline{v}_θ .

Modellen danner så basis for algoritmen for et generelt Kalman-filte, som forklart i kapittel 3.3.7. Det augmenterte Kalman-filteet har noen viktige sider som det er verdt å merke seg:

- Valget av prosesstøy-matrisen Q er spesielt viktig. Verdiene på koeffisientene, \underline{v}_{θ_i} , i Q , er kritiske for oppførselen til parameterestimatene. Dersom en setter lave verdier på \underline{v}_{θ_i} , vil Kalman-filteret tolke dette som at parametrene endres langsomt i prosessen, og estimatene blir dermed trege og glatte. Dersom en setter store verdier på \underline{v}_{θ_i} vil filteret kunne følge mer rasktvarierende parametere, men estimatene vil imidlertid inneholde mer rusk, dvs. ha større varians.
- Systemet er generelt ikke observerbart, dvs. at en generelt ikke kan få ut entydig informasjon av samtlige tilstander bare ved hjelp av målingene og den matematiske modellen. Dersom systemet er påvirket av målbare eksitasjoner eller aller helst kontrollerbare eksitasjoner, vil en kunne identifisere parametere selv om systemet ikke er observerbart. Dette avhenger sterkt av karakteren til eksitasjonene, og en har ingen garanti for at estimatene blir brukbare. Dette er problemstillingen i kapittel 5.7.5.
- Dersom en har et lite antall målevariabler og eksitasjoner, er tallet på identifiserbare parametere sterkt avgrenset. Dersom tallet på ukjente parametere er urealistisk stort, vil det være mange parameterkombinasjoner som gir tilsynelatende minimum av objektfunksjonen J ,

4 Eksperiment på ventil

Før en kan dimensjonere reguleringsystemet og Kalman-filteret, er det viktig at en har mest mulig informasjon om prosessen, og da spesielt ventilen LV001. Det er denne ventilen som brukes til regulere strømmingen med tilsetningsstoff. I dette kapitlet er det gjort to eksperimenter på ventilen. Det første, og mest omfattende, er å kartlegge ventilens karakteristikk, og er beskrevet i kapittel 4.1. Det andre går ut på å finne ventilens tidskonstant, T_v , og er beskrevet i kapittel 4.2.

4.1 Kartlegging av ventilens karakteristikk, $f(u)$

Strømningen gjennom en ventil kan generelt beskrives ved følgende ventilligning: (hentet fra [3])

$$q_v = K_v \cdot f(u) \cdot g(\sqrt{\Delta p}) \quad (4.1)$$

hvor:

- q_v er strømmingen gjennom ventilen. $[\frac{m^3}{time}]$
- K_v er ventilkonstanten, lik 9.68 for ventil LV001, jfr. kapittel 2.3. $[\frac{m^3}{time \cdot \sqrt{Bar}}]$
- $f(u)$ er ventilkarakteristikken, som beskriver sammenhengen mellom strømning og ventilåpning ved konstant trykkfall over ventilen. $[-]$
- $g(\sqrt{\Delta p})$ er en funksjon av differensialtrykket over ventilen. $[\sqrt{Bar}]$

Som forklart innledningsvis i kapittel 1.1, blir ikke differensialtrykket over ventil LV001 målt. En vet derfor ikke hva som er maksimal strømning gjennom ventilen. For å få informasjon om dette, er det i denne oppgaven brukt et Kalman-filter til å estimere parameteren q_{max} , som er gitt av $K_v \cdot g(\sqrt{\Delta p})$. Mer om Kalman-filteret i kapittel 5.7. Med utgangspunkt i q_{max} og ligning (4.1) kan den matematiske modellen av ventilen skrives på følgende form:

$$q_v = q_{max} \cdot f(u) \quad (4.2)$$

For at Kalman-filteret skal estimere gode estimat, er det avhengig av at den matematiske modellen av ventilen er god. Valget av ventilkarakteristikken, $f(u)$, avgjør om modellen blir bra eller ikke. Eksperimentet forklart i dette kapitlet har derfor gått ut på å finne ventilkarakteristikken. I tillegg er det gjort tester for å undersøke om ventilkarakteristikken endrer seg ved forskjellige differensialtrykk over ventilen. For å finne ut av dette ble det logget strømning gjennom ventilen ved forskjellige åpninger av ventilen, og ved ulike nivå i tank 1 (ulike differensialtrykk over ventilen). Siden det ikke er strømningsmåler ut fra LV001 ble det tatt utgangspunkt i strømmingen fra pumpen PA001, ref. kapittel 2.2. For at avlesningene skulle stemme, måtte nivået i tank 1 holdes konstant. Da er strømmingen fra pumpen lik strømmingen gjennom ventilen. Det var derfor nødvendig med en regulator som passet på at

nivået i tank 1 alltid holdt seg konstant. Mer info om regulatoren finnes i kapittel 5.2.

Når nivået i tank 1 kommer over et visst nivå, blir differensialtrykket over ventilen så stort at det medfører at strømmingen ut fra tanken blir større enn det pumpen klarer å levere. Derfor ble det laget både halve og fulle karakteristikker av ventilen. Det vil si at fra nivå 200 mm til 250 mm i tank 1 ble det laget full karakteristikk for ventilen, mens fra 300 mm til 900 mm ble det laget halv karakteristikk, det vil si at posisjonsreferansen, u , gikk fra 0 til 0.5 i stedet for 0 til 1.

Når nivået i tanken er under 200 mm, vil ikke hele utløpet fra tank 1 være under vann, noe som fører til at ved åpninger større enn 0.3 vil strømmingen gjennom ventilen være den samme. Derfor er det valgt å starte ved et nivå på 200 mm.

4.1.1 Oppskrift for å finne ventilkarakteristikk, $f(u)$

For å finne karakteristikken til ventil LV001 er det brukt følgende oppskrift:

1. Regulér nivået i tank 1 til et gitt nivå, slik at trykkfallet over LV001, Δp , er konstant.

2. **Full ventilkarakteristikk:**

Start med 0.1 som pådrag på u_{LV001} . Vent til nivået er stabilt og les av strømming. Øk deretter pådraget med steg på 0.1 og vent til regulatoren har regulert nivået i tank 1.

Halv ventilkarakteristikk:

Start med 0.05 som pådrag på u_{LV001} . Vent til nivået er stabilt og les av strømming. Øk deretter pådraget med steg på 0.05 og vent til regulatoren har regulert nivået i tank 1. Stans ved $u_{LV001} = 0.5$.

Les så av, for hvert steg, strømming levert fra pumpen og plott i tabell lik 4.1. Når nivået i tank 1 holder seg konstant på et nivå, vil strømming levert fra pumpen være det samme som strømming gjennom LV001.

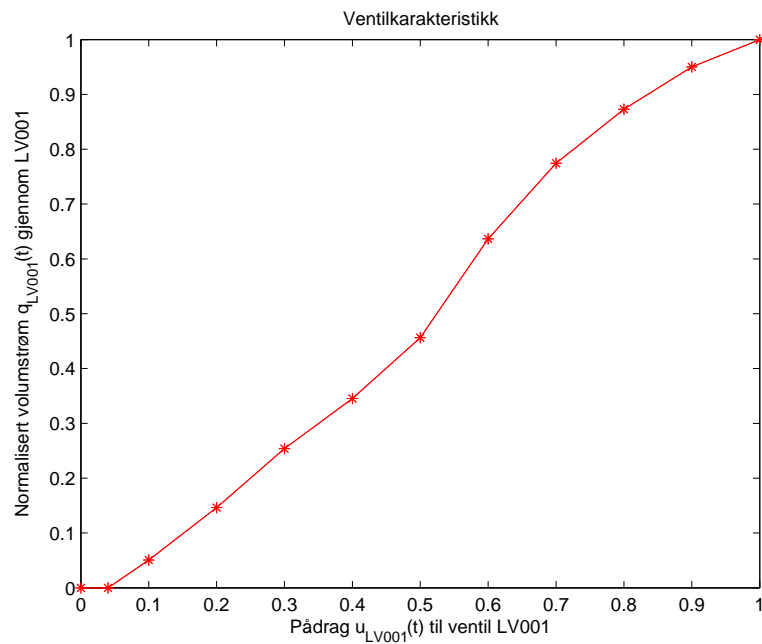
3. Normaliser ventilkarakteristikken, det vil si divider strømningsmåling q_a på $q_{a,max}$ slik at q_a blir et tall mellom 0 og 1. Plott deretter verdiene i Matlab slik at en får noe lignende figur 4.1.

4. Øk nivået i tank 1 med 100 mm, og gjør steg 1-3 om igjen.

Tabell 4.1 og figur 4.1 viser et eksempel på hvordan ventilkarakteristikken er funnet, her ved nivå på 200 mm:

u_{LV001}	q_a [liter/min]	q_a normalisert
0.1	1.00	0.051
0.2	2.88	0.146
0.3	5.00	0.254
0.4	6.80	0.345
0.5	8.99	0.456
0.6	12.5	0.637
0.7	15.3	0.775
0.8	17.2	0.873
0.9	18.7	0.953
1.0	19.7	1.00

Tabell 4.1: Logget strømming ved ulike pådrag ved nivå på 200 mm.



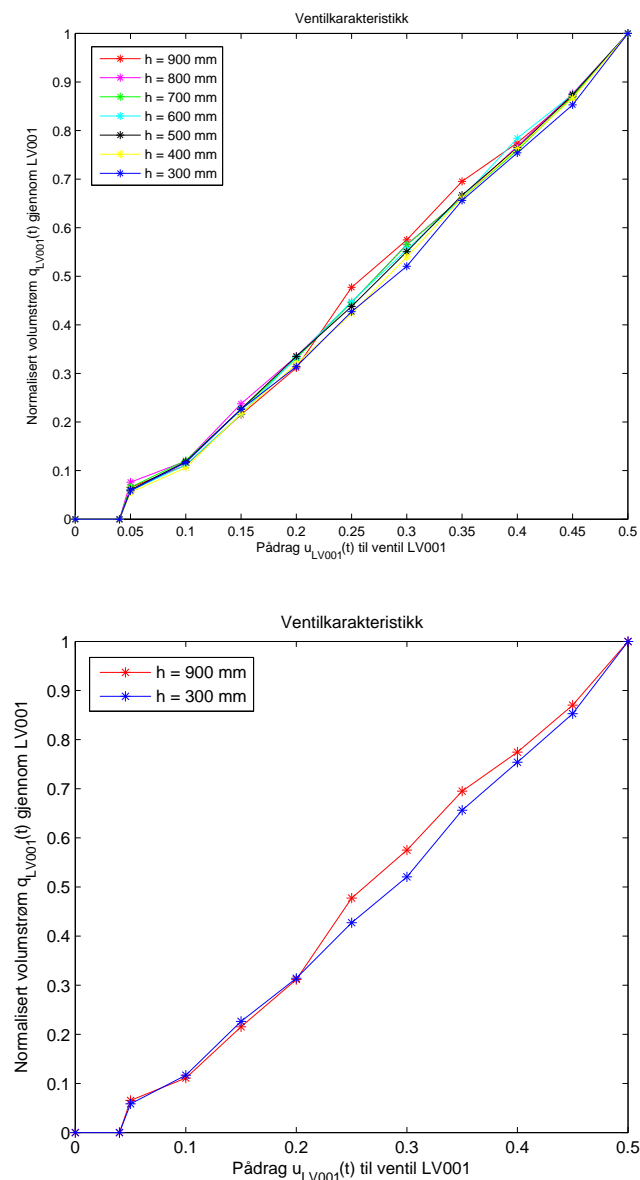
Figur 4.1: Ventilkarakteristikk ved nivå på 200 mm.

4.1.2 Resultat fra eksperiment

Eksperimentet viser at det er forskjell på ventilkarakteristikken ved høyt og lavt differensialtrykk over ventilen. Forskjellen er såpass stor at det ikke kan skyldes dårlige målinger/avlesninger. Ved å ta utgangspunkt i den halve ventilkarakteristikkene funnet for nivåene 300 mm - 900 mm kan en se klare forskjeller i karakteristikken, jfr. øverste figur i figur 4.2.

I tillegg til endring av formen til ventilkarakteristikken, ble det også avdekket at ventilen har et dødbånd, $u_{min} = 0.04$. Det vil si at pådraget u må være større enn $u_{min} = 0.04$ før det strømmer vann gjennom ventilen.

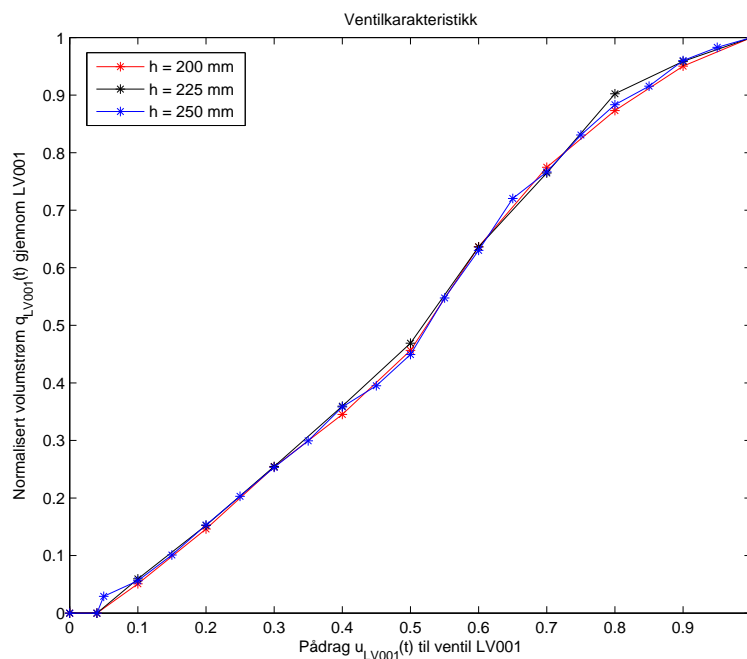
Ved små pådragsverdier over u_{min} ble målingene ganske dårlige. Dette på grunn av at strømmingen gjennom ventilen er veldig lav, slik at pumpen må operere på et alt for lavt pumpepådrag (rundt $u_{PA001} = 0.465$, jfr. kapittel 2.2). Ved et så lavt pumpepådrag blir strømmingen fra pumpen pulserende, slik at det blir vanskelig å lese av nøyaktig pumpestrømning. Det er derfor litt usikkerhet knyttet til nøyaktigheten til $f(u)$ ved $u = 0.05$.



Figur 4.2: Sammenligning av halve ventilkarakteristikker ved ulike nivå i tank. Her er $q_{a,max}$ ved $u = 0.5$.

Som en kan se, er det relativt store forskjeller når ventilåpningen varierer mellom 0.2 og 0.4. Det er en klar tendens på at den normaliserte volumstrømmen blir mindre ved lavere nivå i tank 1. Dette illustreres best ved å plote bare $h = 900$ mm og $h = 300$ mm i samme figur, vist nederst i figur 4.2. Den største forskjellen finnes når posisjonsreferansen er lik 0.3. Da er forskjellen på 5.40%, mens den ellers i intervallet $[0.2 - 0.4]$ varierer rundt 4.5%. Formen på ventilkarakteristikken kan estimeres ved bruk av et Kalman-filter, men dette er ikke realisert i denne oppgaven. Mer om dette i kapittel 5.7.5.

Den fulle ventilkarakteristikken viste seg å ikke avdekke noen spesielle hemmeligheter. Dette skyldes hovedsaklig at nivåendringen i tank 1 endret seg for lite (fra 200 mm til 250 mm). Dermed ble ventilkarakteristikken ganske lik i alle tilfellene, jfr. figur 4.3. Fra figuren kan en se karakteristikkene er tilnærmet lineær frem til $u = 0.5$, hvor den endres til å følge en buform frem til $u_{max} = 1$.



Figur 4.3: Full ventilkarakteristikk ved nivå på 200, 225 og 250 mm.

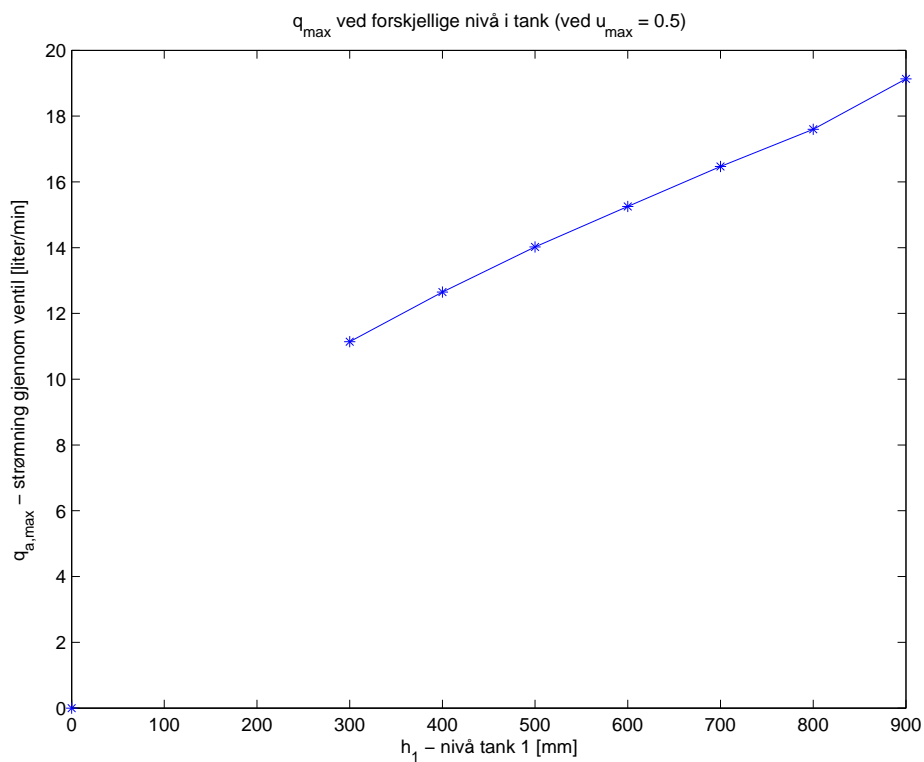
Dersom pumpen hadde hatt større kapasitet, slik at tanken kunne vært regulert på et høyere nivå, ville en kunne sammenligne den fulle ventilkarakteristikken og fått et enda bedre bilde på hvordan ventilen oppfører seg.

I tillegg til figurene som viser halv og full ventilkarakteristikk, $f(u)$, er det også laget en tabell og en figur som viser hvordan q_{max} endrer seg ved økende differensialtrykk (det vil si økende nivå i tank 1). På grunn av begrenset pumpekapasitet er det tatt utgangspunkt i q_{max} for den halve ventilkarakteristikken, det vil si ved $u_{max} = 0.5$. Figur 4.4 og tabell 4.2 gir derfor ikke helt riktig bilde over hvordan q_{max} endrer seg, men en god indikasjon. Ser at

q_{max} øker tilnærmet lineært ved økende nivå i tanken (økende diff.trykk).

u_{max}	Nivå i tank 1 [mm]	$q_{a,max}$ [liter/min]
0.5	0	-
0.5	100	-
0.5	200	-
0.5	300	11.1
0.5	400	12.7
0.5	500	14.0
0.5	600	15.3
0.5	700	16.5
0.5	800	17.6
0.5	900	19.1

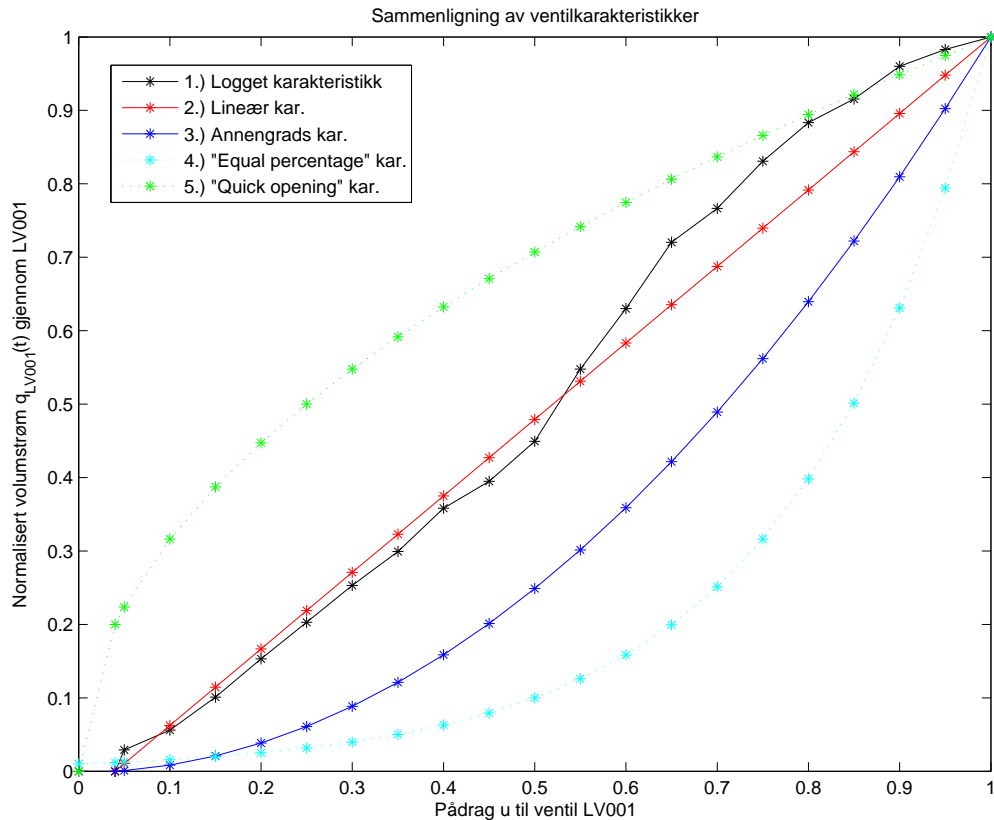
Tabell 4.2: Maks strømning gjennom ventilen ved $u_{max} = 0.5$.



Figur 4.4: q_{max} som funksjon av nivå i tank 1.

4.1.3 Valg av modell for ventilkarakteristikk, $f(u)$

Basert på resultatene fra eksperimentet kan en bestemme hvilken modell av ventilkarakteristikken som ligger nærmest den virkelige. Ved å plote kjente ventilkarakteristikker i samme figur som karakteristikken funnet i eksperimentet, kan en sammenligne og finne den modellen som passer best. Figur 4.5 viser sammenligningen.



Figur 4.5: Sammenligning av ventilkarakteristikk.

hvor uttrykkene til de forskjellige modellene er gitt ved

$$2. f(u) = \frac{1}{(1-u_{min})} \cdot (u - u_{min}).$$

$$3. f(u) = \frac{1}{(1-u_{min}^2)} \cdot (u^2 - u_{min}^2).$$

$$4. f(u) = R^{u-1}, \text{ hvor } R \text{ er en design-parameter som er satt lik 100. jfr. [3].}$$

$$5. f(u) = \sqrt{u}. \text{ jfr. [3].}$$

Ut fra figur 4.5 ser en at det er den lineære modellen 2. som er nærmest den virkelige karakteristikken. Den lineære modellen stemmer bra for ventilpådrag $u \leq 0.5$. Ved å studere figuren nærmere finner en da at det største avviket mellom den virkelige og den lineære modellen av ventilkarakteristikken er lik 4.66 %. For ventilpådrag større enn 0.5 er avviket noe større; ved ventilpådrag i intervallet $[0.6 - 0.9]$ varierer avviket mellom 6.4 % og 10.3 %, mens i intervallene $[0.5 - 0.6]$ og $[0.9 - 1.0]$ er avviket noe mindre igjen.

Ventilen i reguleringsystemet i denne oppgaven opererer bare med ventilpådrag $u \leq 0.5$, slik at den lineære modellen vil fungere bra i denne oppgaven. Denne modellen vil bli brukt i Kalman-filteret, som er nærmere beskrevet i kapittel 5.7.

Den lineære modellen vil også bli brukt i den inverse ventilligningen. Dette er beskrevet i kapittel 5.4, der kapittel 5.4.1 tar for seg hvor presis denne modellen er, sammenlignet med den virkelige karakteristikken ved to forskjellige nivå i tanken; $h = 900$ mm og $h = 300$ mm.

4.2 Tidskonstant til ventil

For å stille inn reguleringsystemet slik at hurtigheten og stabiliteten blir optimal, er det viktig å ha kjennskap til alle betydelige tidskonstanter i systemet. Tidskonstanten til ventilen er av betydelig størrelse, og denne skal finnes ved hjelp av et lite eksperiment omtalt i dette kapitlet.

4.2.1 Oppskrift for eksperiment

Tidskonstanten til ventilen finnes ved å sette sprang i ventilpådraget, og så lese av responsen på utgangen, som her er strømningsmålingen q_a . Når q_a når 63% av stasjonær verdi, kan tidskonstanten leses av. For at den avleste tidskonstanten skal stemme, er det viktig at nivået i tank 1 er konstant, selv ved store sprang i ventilpådraget. Det er derfor utviklet en foroverkoper i tillegg til nivåregulatoren som 'ser' når ventilpådraget endrer seg og gir et ekstra pådrag til pumpa. Mer om foroverkopleren i kapittel 5.2.1. Nedenfor er det gitt en oppskrift til dette eksperimentet:

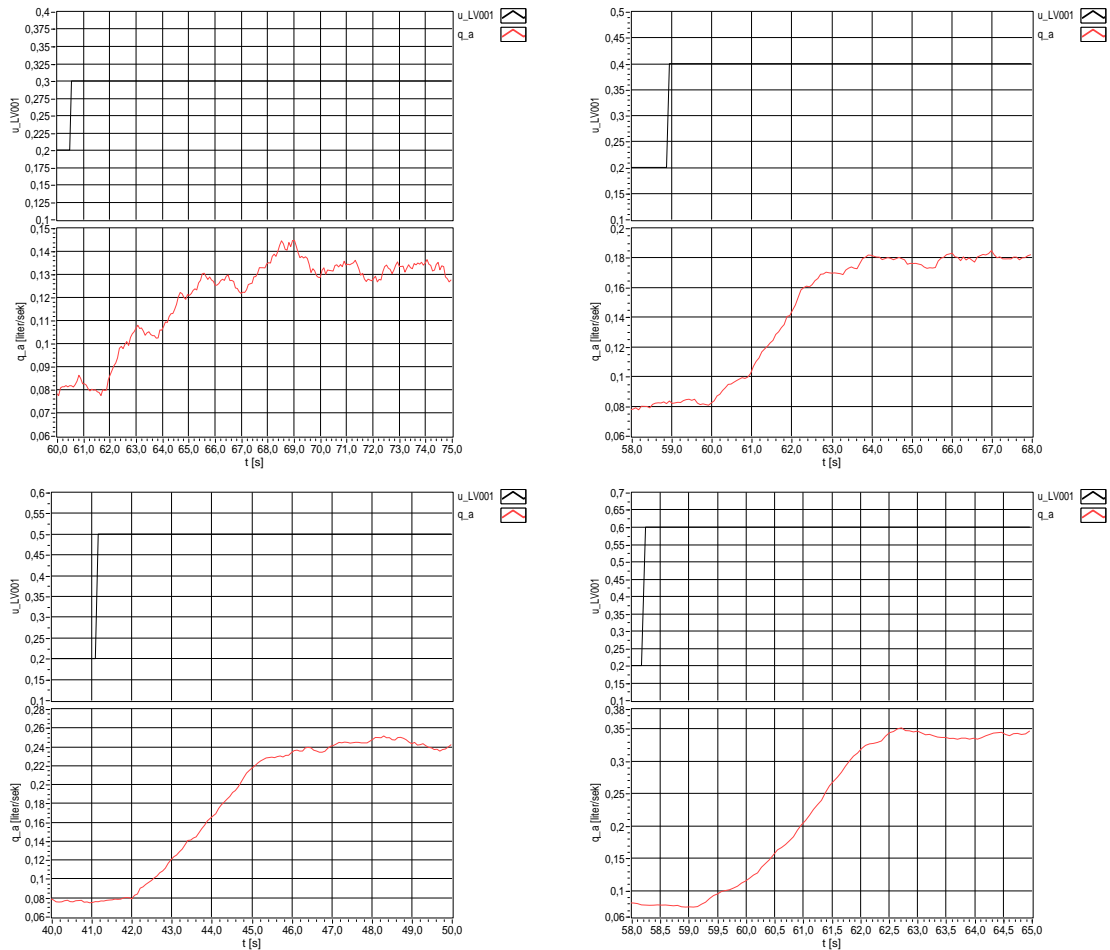
1. La regulatoren med foroverkoper stille seg inn til referansenivå. Bruk $h = 500$ mm. La ventilpådraget til LV001 starte på 0.2.
2. Sørg for at LV002 er helt åpen ved start, slik at tank 2 er tom.
3. Steng så LV002, slik at strømningsmålingen blir aktiv. La strømningsmålingen svinge seg inn til konstant verdi.
4. Sett så sprang i ventilpådraget til LV001. Start med sprang lik $\Delta u = 0.1$.
5. Les av strømningsmålingen og finn tidskonstanten.
6. Gjenta punktene 1-5 med følgende sprang i ventilpådraget til LV001: $\Delta u = 0.2$, 0.3 og 0.4 .

4.2.2 Resultat fra eksperiment

Ved å utføre oppskriften gitt i forrige delkapittel, får en responsene gitt i figur 4.8. Ved å studere disse responsene kan en lese av tidskonstanten, T_{tot} , til å være 2.2 sek. Denne avleste tidskonstanten er ikke tidskonstanten til ventilen, men en sum av flere tidskonstanter satt sammen. Grunnen til dette, er at strømningsmålingen, q_a , er forsinket av et lavpassfilter (med $T_f = 1.0$ sek) og LabVIEW-funksjonen *mean* (med $T_M = 0.85$ sek), jfr. kapittel 5.3.

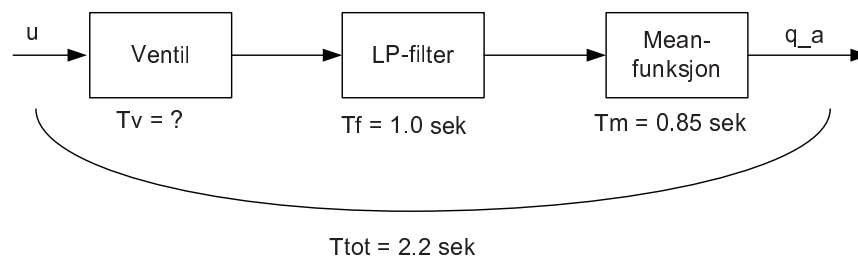
Fra figur 4.8 kan en også observere en transportforsinkelse fra ventilen åpner til vannet når tanken. Størrelsen på denne varierer alt etter hvor stort ventilspranget u er. Ved $\Delta u = 0.1$

er transportforsinkelsen rundt $\tau = 1.3$ sek, mens for $\Delta u = 0.4$ er $\tau = 0.9$ sek. Velger å bruke $\tau = 1.0$ sek i beregningene videre.



Figur 4.6: Øverst til venstre: $\Delta u = 0.1$, øverst til høyre: $\Delta u = 0.2$, nederst til venstre: $\Delta u = 0.3$ og nederst til høyre: $\Delta u = 0.4$.

En har nå situasjonen som vist i figur 4.7.



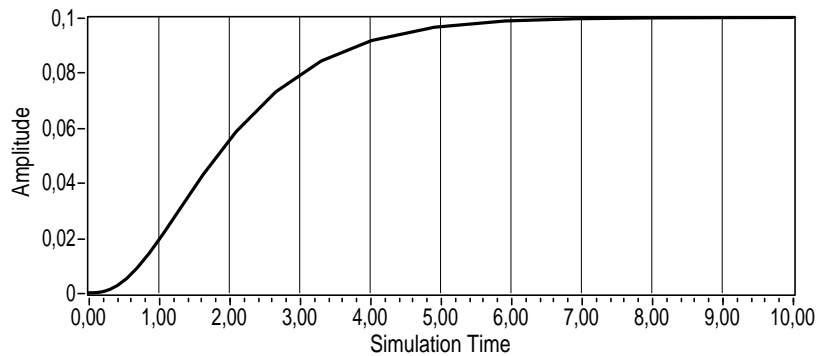
Figur 4.7: Skisse over eksperiment for å finne tidskonstant til ventil.

4.2.3 Beregning av ventilkonstant

Ved å ta utgangspunkt i figur 4.7, der en antar at en har tre førsteordens system i kaskade, hvor en kjenner den totale responstiden, og har gitt to av tre tidskonstanter, kan en grovt beregne den siste tidskonstanten på følgende vis:

$$\begin{aligned} T_v &= T_{tot} - T_f - T_M \\ &= 2.2 - 1.0 - 0.85 \\ &= 0.35 \text{ sek} \end{aligned} \quad (4.3)$$

For å undersøke om denne verdien på T_v er bra, kan en implementere alle førsteordens systemene i LabVIEW og sette sprang på inngangen. Dersom $T_{tot} \approx 2.2$ sek er $T_v = 0.35$ sek en bra tilnærming. Figur 4.8 viser responsen ved $T_v = 0.35$ sek.



Figur 4.8: Respons når $T_v = 0.35$ sek.

Leser av T_{tot} til å være 2.3 sek, som betyr at $T_v = 0.35$ sek er en bra tilnærming. Men på grunn av usikkerheter i nøyaktigheten til verdiene i ligning (4.3) (i form av unøyaktige avlesninger og målefeil), økes T_v til **0.50 sek**, som er verdien som vil bli brukt i beregningene videre i denne oppgaven.

5 Utvikling av reguleringsystem

Under utvikling av reguleringsystemet er det tatt utgangspunkt i en reguleringsstruktur som er utviklet av Omron Electronics Norway AS ved Roger Eriksen. Reguleringsstrukturen er i grove trekk lik oppsettet som er vist i figur 5.1 (som også er forklart innledningsvis i kapittel 1.1). Denne reguleringsstrukturen består av to regulatorer; en strømningsregulator og en volumregulator. Strømningsregulatoren har i oppgave å sørge for at tilsetningsstoffstrømningen følger drivstoffstrømningen, mens volumregulatoren har i oppgave å korrigere dersom strømningsregulatoren ikke følger referansen 100%. Utgangen fra regulatorene er en ønsket strømningsverdi, q , gjennom ventil LV001. Denne strømningsverdien inngår så i et matematisk uttrykk for den inverse ventilligningen som beregner hvor stort ventilpådraget skal være. I det matematiske uttrykket for den inverse ventilligningen inngår parameteren q_{max} (jfr. kapittel 4.1). Denne parameteren bestemmer hva som er maksimal strømningsrate gjennom ventilen, og er estimert ved hjelp av et Kalman-filter.

I tillegg til regulatorene og Kalman-filteret i reguleringsstrukturen er det også utviklet en nivåregulator som jobber utenfor denne reguleringsstrukturen. Denne regulatoren sørger for at nivået i tilsetningsstofftanken (tank 1) holder seg på ønsket nivå, som igjen betyr at differensialtrykket over ventilen er konstant. Ved å endre nivået i tank 1 kan en teste hvordan systemet takler endringer i differensialtrykket, Δp .

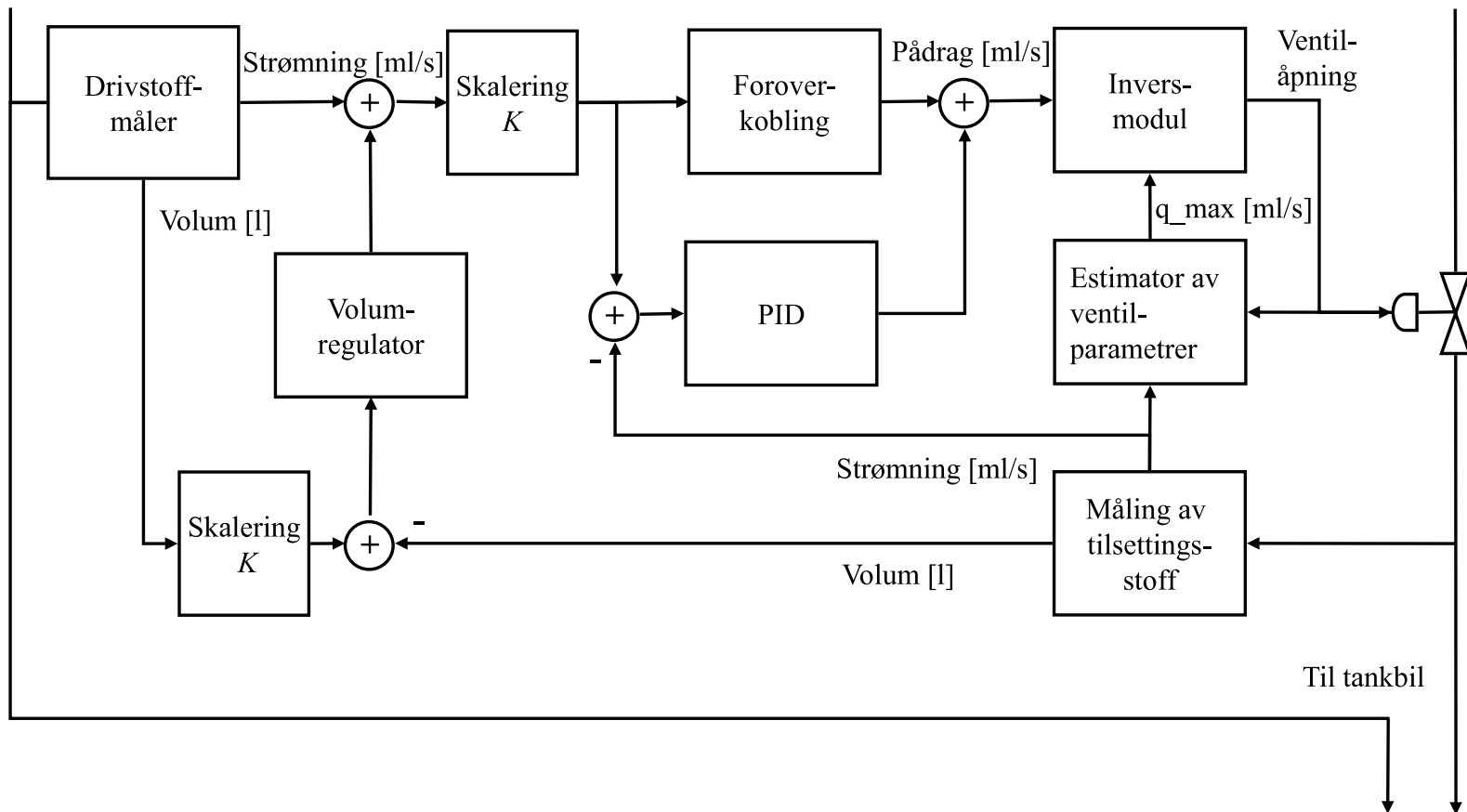
De neste delkapitlene tar for seg hvordan regulatorene og Kalman-filteret i reguleringsystemet er utviklet.

5.1 Valg av samplingsintervall

Dette delkapittelet er basert på [6].

Når en skal bestemme samplingsintervallet, T_s , er det viktig at det velges slik at reguleringsløyfens ytelse ikke avhenger av størrelsen. En tommelfingerregel er at T_s bør være minst en tidel av den raskeste dynamikken i prosessen. I dette reguleringsystemet er det dynamikken til ventilen som er den raskeste. Ventilens tidskonstant, T_v , ble i kapittel 4.2 funnet til å være lik 0.50 sek. Velger derfor $T_s = \frac{1}{10} \cdot 0.50 = 0.05$ sek.

Figur 5.1: Reguleringsstruktur for reguleringsystemet.



5.2 Nivåregulator for tilsetningsstofftank

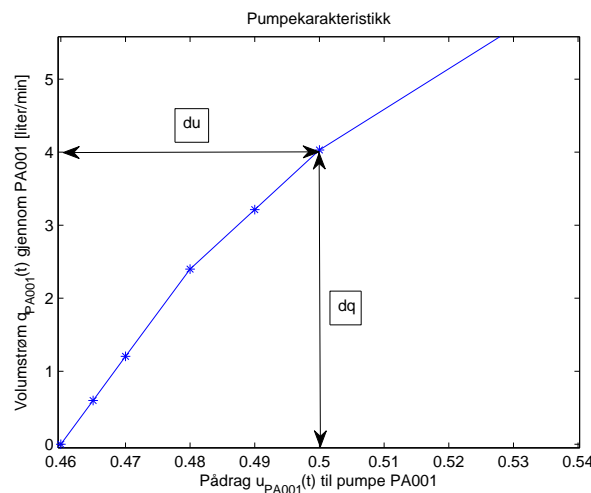
Beregning av reguleringsparametrene i dette kapittelet er basert på eksempelet i kapittel 8.3.2 i [6].

For å finne de rette regulatorparametrene er det tatt utgangspunkt i følgende modell for nivået i tanken: (ref. kapittel 3.1)

$$\begin{aligned} \dot{h}_1(t) &= \frac{1}{A} (q_{inn}(t) - q_{ut}(t)) \\ &= \frac{1}{A} (K_u \cdot u(t) - q_{ut}(t)) \end{aligned} \quad (5.1)$$

hvor:

- A er arealet til tanken, $0.0096 \text{ [m}^2\text{]}$
- K_u er prosessforsterkningen gitt av pumpa. Denne varierer alt etter hvilket arbeidsområde pumpen opererer i. Forsterkningen finnes ved å derivere pumpekararakteristikken. Ved innstilling av nivåregulatoren, tar en utgangspunkt i den største forsterkningen til prosessen. Ved å studere pumpekararakteristikken i figur 2.9, ser en at forsterkningen er størst ved lave pådrag på pumpa. Finner forsterkningen ut fra figur 5.2.



Figur 5.2: Beregning av pumpeforsterkning ved å derivere pumpekararakteristikken.

Dette gir:

$$K_u = \frac{dq}{du} = \frac{4.0 - 0.0}{0.50 - 0.46} = 100 \quad [\text{liter}/\text{min}] \quad (5.2)$$

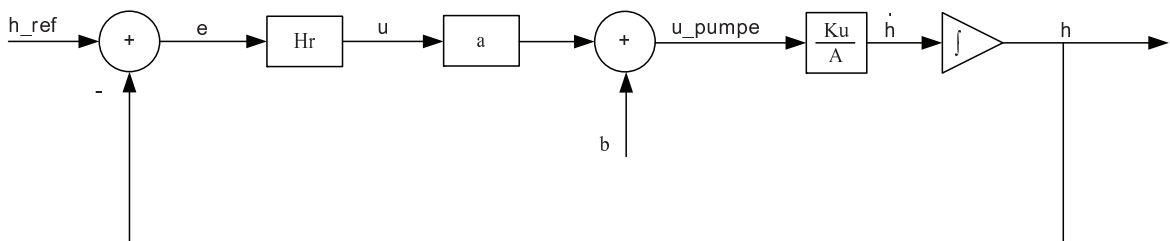
Ønsker å ha forsterkningen i SI-enheter, slik at liter/min \rightarrow m^3/s . Må derfor dividere ligning (5.2) med 60000. Får da

$$K_u = \frac{100}{60000} = 1.67 \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5.3)$$

- $u(t)$ er pumpepådrag i størrelsesorden $0 - 1 [-]$. Dette er verdien som nivåregulatoren beregner. Siden pumpen ikke klarer å levere vann til tank før $u(t) = 0.465$ må utgangen fra regulatoren skaleres, slik at $u(t) = 0$ gir $u_{pumpe}(t) = 0.465$ og $u(t) = 1$ gir $u_{pumpe}(t) = 1$. Dette realiseres ved følgende ligning:

$$\begin{aligned} u_{pumpe}(t) &= a \cdot u(t) + b \\ &= 0.535 \cdot u(t) + 0.465 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Skaleringen av regulatorutgangen gjør at reguleringsstrukturen for nivåregulatoren blir som følger:



Figur 5.3: Reguleringsstruktur for nivåregulator.

- $q_{ut}(t)$ er strømning ut fra tank. Den regnes her som forstyrrelse. [m^3/s]

LaPlacetransformasjon av (5.1) gir følgende modell:

$$sh_1(s) = \frac{1}{A} (K_u \cdot u(s) - q_{ut}(s)) \quad (5.5)$$

som igjen gir følgende transferfunksjon for prosessen:

$$H_p(s) = \frac{h_1(s)}{u(s)} = \frac{K_u}{A \cdot s} = \frac{K}{s} \quad (5.6)$$

Dette tilsvarer en integrator med forsterkning³ $K = \frac{K_u}{A}$. For å regulere denne integratoren er det brukt en PI-regulator på følgende form:

$$H_r(s) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (5.7)$$

K_p og T_i blir så beregnet ut fra en spesifisert båndbredde som på en måte uttrykker systemets *hurtighet*. I tillegg kreves det også at systemets *stabilitet* er akseptabel. For å kunne si noe om disse, må en finne følgeførelset $M(s)$ som er gitt på følgende form:

$$M(s) = \frac{H_0(s)}{1 + H_0(s)} \quad (5.8)$$

³Ved å studere figur 5.3 ser en at skaleringskonstanten a også bidrar i forsterkningen K . I en tidlig fase av dimensjoneringen av nivåregulatoren ble skaleringsfaktoren ikke tatt med i beregningene. Resultatene vist i resten av dette kapittelet er derfor basert på en integrator med forsterkning $K = \frac{K_u}{A}$ og ikke $K = \frac{K_u \cdot a}{A}$ som er den virkelige forsterkningen når en skalerer regulatorutgangen.

hvor sløfjetransferfunksjonen, $H_0(s)$, er gitt ved:

$$H_0(s) = H_r(s) \cdot H_p(s) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s} \cdot \frac{K}{s} \quad (5.9)$$

Får da følgende $M(s)$:

$$\begin{aligned} M(s) &= \frac{K_p K \frac{T_i s + 1}{T_i s^2}}{1 + K_p K \frac{T_i s + 1}{T_i s^2}} \\ &= \frac{K_p K (T_i s + 1)}{T_i s^2 + K_p K T_i s + K_p K} \\ &= \frac{\frac{K_p K}{T_i} (T_i s + 1)}{s^2 + K_p K s + \frac{K_p K}{T_i}} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Sammenligner nevneren i (5.10) med det karakteristiske 2. ordens standardpolynomiet $k(s)$

$$k(s) = s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (5.11)$$

der ω_0 er udempet resonansfrekvens og ζ er relativ dempningsfaktor. Ved sammenligning får en følgende sammenhenger:

$$\begin{aligned} K_p K &= 2\zeta\omega_0 \\ \frac{K_p K}{T_i} &= \omega_0^2 \end{aligned}$$

som gir følgende uttrykk for K_p og T_i :

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_0}{K} = \frac{2\zeta}{K T_r} \quad (5.12)$$

$$T_i = \frac{2\zeta}{\omega_0} = 2\zeta T_r \quad (5.13)$$

For et generelt andreordens system på formen

$$M(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (5.14)$$

kan en si følgende; ω_0 sier noe om reguleringsystemets responstid og er gitt på formen $\omega_0 = \frac{1}{T_r}$, hvor T_r er reguleringsystemets responstid. Ved å bestemme T_r finner man ω_0 . ζ bestemmer hvor stort oversvinget blir. Settes ζ lik 1, betyr dette null oversving, ref. figur 4.7 i [4]. Ved å studere ligning (5.10) ser en at en har et nullpunkt i venstre halvplan ($s = -\frac{1}{T_i}$). Dette nullpunktet fører til at responsen kan få raskere innsvingningstid og høyere oversving enn forventet.

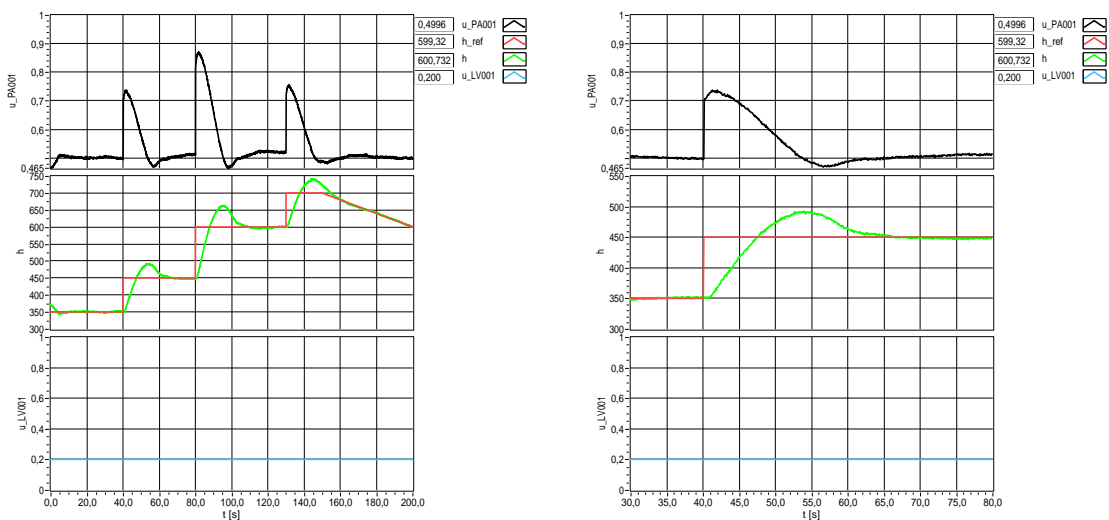
Som tidligere nevnt, ønskes nivåregulatoren å være raskest mulig, det vil si at T_r ønskes minst mulig. Med utgangspunkt i kjennskap til prosessen, velger en å ta utgangspunkt i

$T_r = 3.0$ sek. Ønsker ingen oversving, slik at ζ velges lik 1. Dette gir følgende K_p - og T_i -verdier:

$$K_p = \frac{2 \cdot 1}{\frac{1.67 \cdot 10^{-4}}{0.0096} \cdot 3.0} = 3.8 \text{ m}^{-1} \quad (5.15)$$

$$T_i = 2 \cdot 1 \cdot 3.0 = 6.0 \text{ sek} \quad (5.16)$$

For å teste reguleringsparametrene ble det laget et konkret reguleringsforløp for å se hvor bra regulatoren fungerer. Figur 5.4 viser hvordan regulatoren svinger seg inn ved sprang i referansen. Forstyrrelsen her er strømmingen ut fra tank gjennom ventil LV001. Ventilpådraget i dette reguleringsforløpet er satt lik 0.2 - som er ca gjennomsnittet i det området strømningsregulatoren opererer i.



Figur 5.4: Til venstre vises hele reguleringsforløpet, mens til høyre vises en mer detaljert sprangrespons ved sprang i referansen.

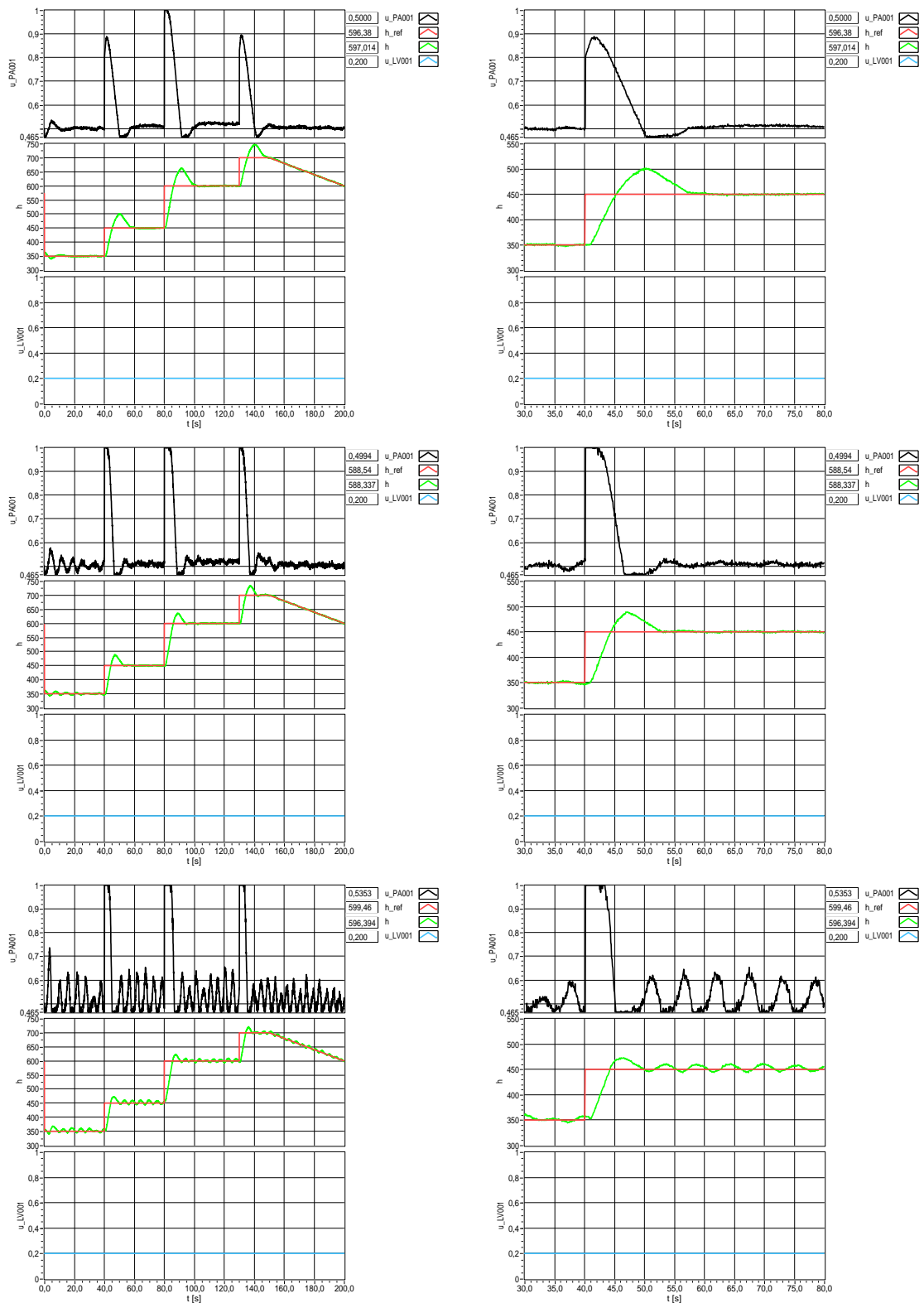
Ser at regulatoren svinger seg fint inn til referansenivå. Ved sprang i referansen får regulatoren et oversving på rundt 40 %, selv om regulatoren er dimensjonert til å ikke ha oversving, $\zeta = 1$. Grunnen til oversvinget skyldes trolig nullpunktet i $M(s)$, jfr. ligning (5.10). Ser også at regulatoren følger bra ved synkende referansenivå, avviket i nivået varierer rundt ± 1 mm. Pumpepådraget oppfører seg rolig, med noen brå endringer der hvor referansenivået endrer seg. Med utgangspunkt i disse analysene, kan en se at regulatoren kan stilles inn med enda lavere responstid. Velger derfor å lage nye parametersett basert på lavere T_r -verdier. Det gir opphav til tabell 5.1:

-	$T_r = 2$ sek	$T_r = 1$ sek	$T_r = 0.5$ sek
K_p	5.7	11.5	23.0
T_i	4.0	2.0	1.0

Tabell 5.1: K_p - og T_i -verdier ved forskjellige T_r -verdier.

Tester så disse reguleringsparameterne på samme reguleringsforløp som vist i figur 5.4. Resultatet er vist i figur 5.5 på neste side. Ut fra disse resultatene kan en se at regulatoren blir veldig hissig ved lave T_r -verdier. Ved $T_r = 0.5$ sek er regulatoren på kanten til å bli ustabil, dette kan en se ut fra svingningene i pådraget u_{PA001} og nivået i tanken. Forkaster derfor $T_r = 0.5$ sek. Ved $T_r = 1$ sek er pådragsbruken mye bedre enn ved $T_r = 0.5$ sek. Oversvinget ved sprang i referansen er her rundt 40 %, og avviket i nivået varierer med ± 2 mm ved konstant og synkende referansenivå. Ved $T_r = 2$ sek er pådragsbruken til pumpen enda bedre enn ved $T_r = 1$ sek. Dette fører til at nivået følger referansen noe bedre, men at oversvinget her blir rundt 50 %. Ved konstant og synkende referansenivå, er avviket i nivået rundt ± 1 mm.

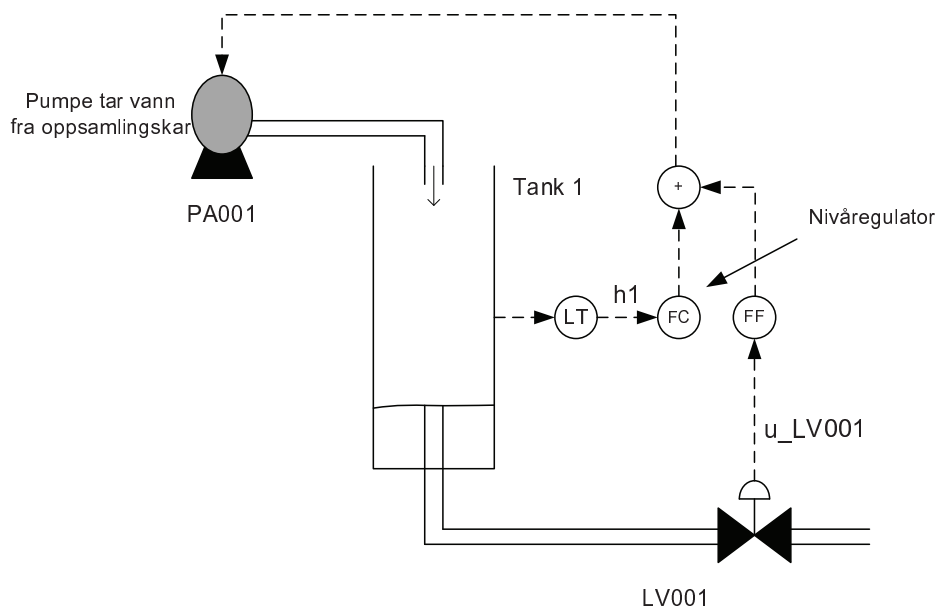
Til tross for et relativt stort oversving, velger en å bruke reguleringsparametrene til $T_r = 2$ sek. Disse gir den beste pådragsbruken, og følger referansen best.



Figur 5.5: De to øverste figurene: $T_r = 2\text{sek}$, figurene i midten: $T_r = 1\text{sek}$ og figurene nederst: $T_r = 0.5\text{sek}$. Figurene til venstre viser hele reguleringsforløbet, mens de til højre viser mere detaljert sprangrespons ved sprang i referansen.

5.2.1 Foroverkoper for nivåregulator

Under eksperimentet som ga opphav til tidskonstanten for ventilen, T_v , (jfr. kapittel 4.2) ble det utviklet en foroverkoper for nivåregulatoren. Grunnen til at denne ble brukt her, var for å holde et konstant nivå i tanken ved sprang i ventilpådraget u_{LV001} . Figur 5.6 viser en skjematisk skisse av hvordan foroverkopleren fungerer:



Figur 5.6: Tank 1 og tilhørende nivåregulator med foroverkoper.

Foroverkopleren er et matematisk uttrykk som kan finnes ved å ta utgangspunkt differensialligningen som ble utledet i kapittel 3.1, nemlig:

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A} (f_1(u_{PA001}(t)) - q_{ut}(t)) \quad (5.17)$$

hvor $q_{ut}(t)$ er strømmingen, q , ut av tanken og gjennom ventilen. I kapittel 4.1 ble det funnet at den matematiske formen til ventilligningen kan tilnærmes med uttrykket:

$$q = \frac{q_{max}}{1 - u_{min}} (u_{LV001}(t) - u_{min}) \quad (5.18)$$

Setter (5.18) inn i (5.17) og får da:

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{A} \left(f_1(u_{PA001}(t)) - \frac{q_{max}}{1 - u_{min}} (u_{LV001}(t) - u_{min}) \right) \quad (5.19)$$

Setter $u_{PA001}(t) = u_{ff}(t)$ og $\dot{h}(t) = 0$. Løser med hensyn på $f_1(u_{ff}(t))$ og får:

$$f_1(u_{ff}(t)) = \frac{q_{max}}{1 - u_{min}} (u_{LV001}(t) - u_{min}) \quad (5.20)$$

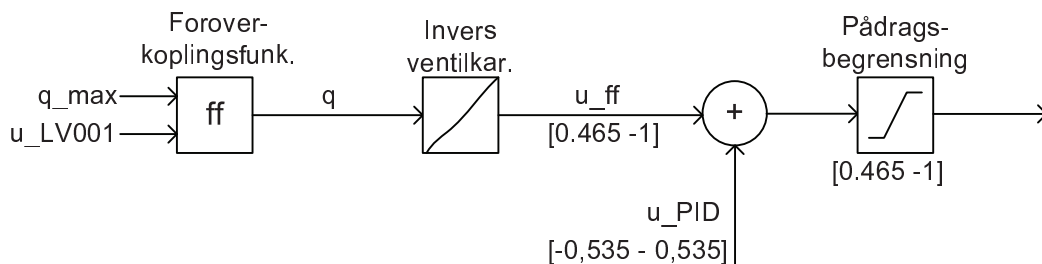
Fører (5.20) gjennom den inverse pumpekarakteristikken og får følgende uttrykk:

$$u_{ff}(t) = f_1^{-1} \left(\frac{q_{max}}{1 - u_{min}} (u_{LV001}(t) - u_{min}) \right) \quad (5.21)$$

Fra denne ligningen ser en at en må bestemme q_{max} og u_{min} for at foroverkopplingsfunksjonen skal være riktig. Ved $h = 500$ mm (som er nivået en opererer på i eksperimentet i kapittel 4.2) er q_{max} større enn hva pumpen klarer å levere. Bruker derfor maksimal strømming fra pumpen, $q_{max,pumpe}$, som verdi på q_{max} . Verdien på $q_{max,pumpe}$ er i kapittel 2.2.1 funnet til å være 22.8 l/min. Verdien på u_{min} er også kjent (jfr. kapittel 4.1), og lik 0.04. Får da at foroverkopplingsfunksjonen blir lik:

$$u_{ff}(t) = f_1^{-1} \left(\frac{22.8}{1 - 0.04} (u_{LV001}(t) - 0.04) \right) \quad (5.22)$$

Ser at det er $u_{LV001}(t)$ som bestemmer størrelsen på $u_{ff}(t)$. Ved å studere (5.22), figur 2.9 og tabell 2.1, kan en se at $u_{LV001}(t) = 1$ gir $u_{ff}(t) = 1$, og $u_{LV001}(t) = 0.04$ gir $u_{ff}(t) = 0.465$. Siden den matematiske modellen av ventilen ikke er 100 % nøyaktig, må nivåregulatoren kompensere for modellfeil. Dette er illustrert i figur 5.7:



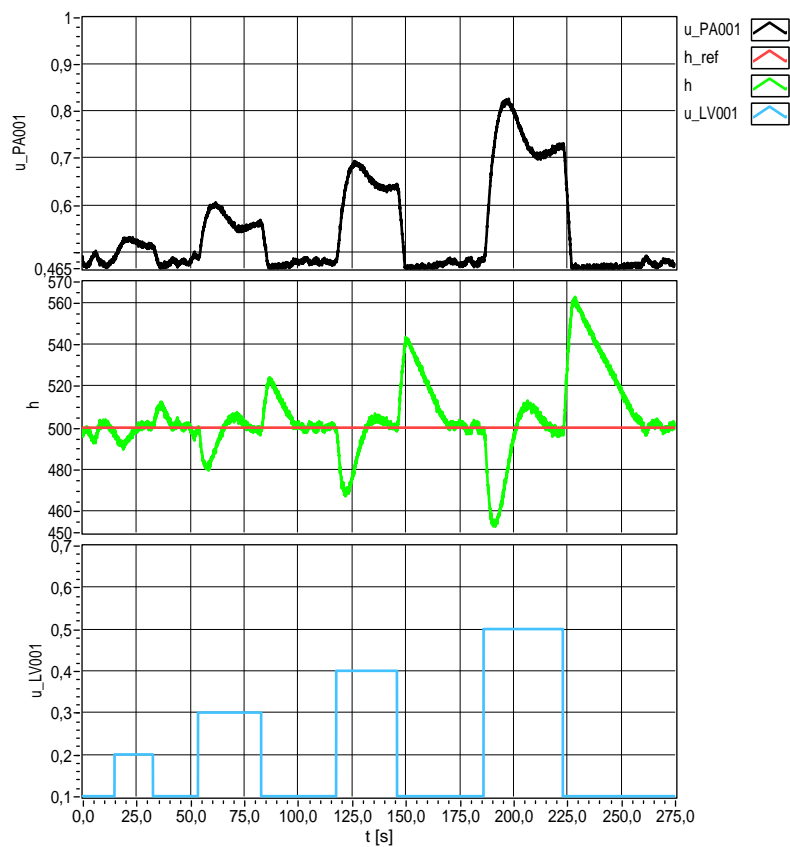
Figur 5.7: Nivåregulator med foroverkopleter.

Metningsgrensen til regulatoren er satt til $[-0.535 - 0.535]$. Dette på grunn av at regulatoren skal kunne rette opp foroverkopleter dersom den gir ut maksimal verdi når pumpepådraget skal være på minimum, og omvendt. Resultat ved bruk av foroverkopleter er vist i figur 5.9 og 5.10. Figur 5.9 viser responsen ved sprang i ventilpådraget $u_{LV001}(t)$, mens figur 5.10 viser pådragsbruken, det vil si hvor mye foroverkopplingsfunksjonen og regulatoren bidrar med til det totale pumpepådraget. Reguleringsparametrene til regulatoren er de samme som funnet i kapittel 5.2, nemlig $K_p = 5.7$ og $T_i = 4.0$

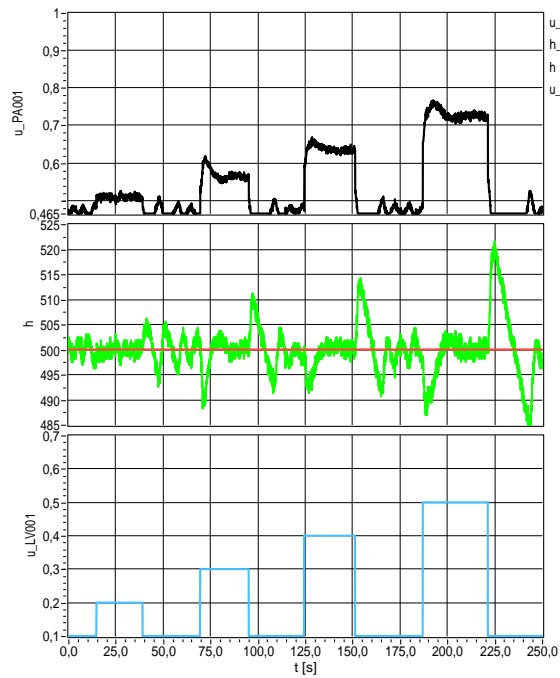
Ved å studere figur 5.9 ser en at nivåregulatoren klarer å holde et noenlunde konstant nivå. Avviket er størst ved negative sprang, det vil si når ventilen lukker. Det største avviket er da ≈ 25 mm. Nivået holdes mer stabilt når ventilen åpner. Ved et sprang på $\Delta u = 0.4$ har en et avvik opp i mot 12-13 mm. Figur 5.10 viser at foroverkopplingsfunksjonen gir det største bidraget, mens regulatoren gir noen små bidrag for å rette opp.

I figur 5.8 er det vist resultatet ved bruk av en PI-regulator uten foroverkopler. En ser da at avviket er mye større enn ved bruk av foroverkopler. Ved sprang på $\Delta u = 0.4$ kan en se at avviket er rundt 45 mm, som er nesten fire ganger så stort ved bruk av PI-regulator **med** foroverkopler. Basert på disse resultatene ser en at det er hensiktsmessig å bruke en PI-regulator **med** foroverkopler i eksperimentet forklart i kapittel 4.2.

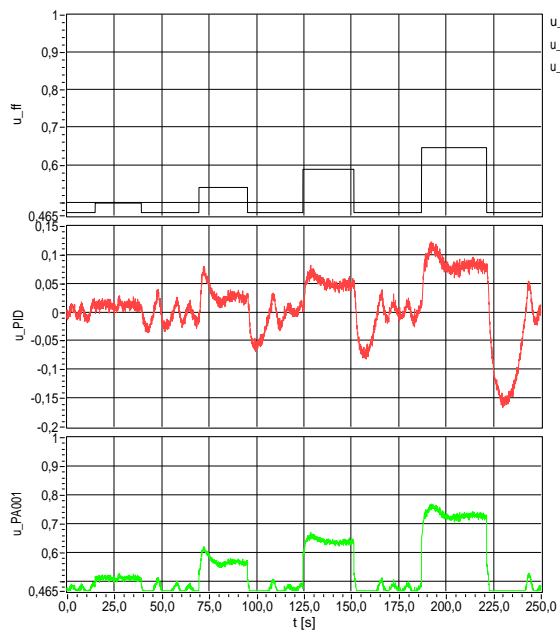
På grunn av at nivået i eksperimentet i kapittel 4.2 skal operere på et konstant nivå, er det ikke vist hvordan foroverkopleren fungerer ved sprang i nivåreferansen. Foroverkopleren er bare brukt i dette eksperimentet, mens ellers i reguleringsystemet brukes en PI-regulator **uten** foroverkopler.



Figur 5.8: Resultat ved bruk av nivåregulator **uten** foroverkopler.



Figur 5.9: Resultat ved bruk av nivåregulator med foroverkopler.



Figur 5.10: Pådragsbruk ved bruk av nivåregulator med foroverkopler. Øverst er bidraget fra foroverkopplingsfunksjonen vist, mens i midten vises bidraget fra regulatoren. Nederst vises det totale pumpepådraget.

5.3 Beregning av strømning gjennom ventil ved bruk av den deriverte av nivå i tank 2

Strømningen gjennom ventil LV001 blir ikke målt, derfor må det brukes en alternativ metode for å finne denne. Metoden som er brukt i denne oppgaven benytter den deriverte av nivået i tank 2 multiplisert med arealet. Arealet i tank 2 er en funksjon av nivået i tanken, og er gitt ved ligning (5.23), jfr. kapittel 2.1.3.

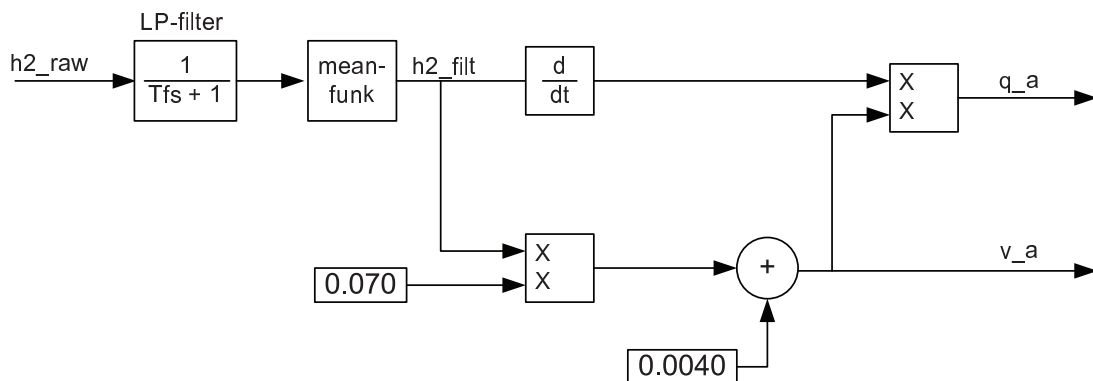
$$A(h_2(t)) = 0.0040 + 0.070 \cdot h_2(t) \quad (5.23)$$

Strømningen gjennom ventilen kan da finnes ved følgende uttrykk:

$$q_a = \frac{d(h_2(t))}{dt} \cdot A(h_2(t)) \quad (5.24)$$

$$\left[\frac{m^3}{s} \right] = \left[\frac{m}{s} \right] \cdot [m^2]$$

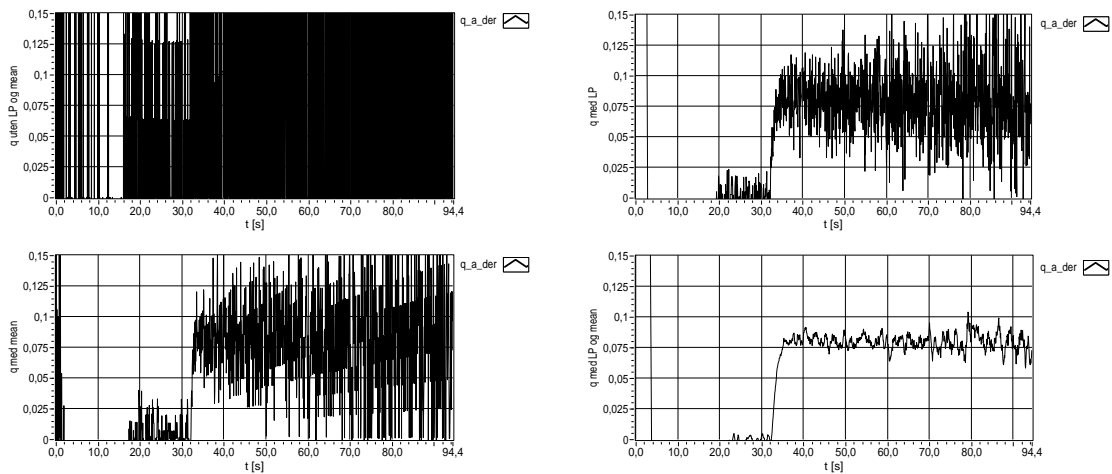
Som en ser ut fra ligning (5.24), blir nivået i tank 2 derivert. Før en kan derivere nivåmålingen er det viktig å en klarer å filtrere bort mest mulig støy. Dette er kritisk for at strømningsmålingen q_a skal bli god. For å fjerne støyen er det i denne oppgaven brukt et lavpass-filter i kombinasjon med en *mean*-funksjon i LabVIEW som beregner gjennomsnittet over et bestemt antall samplepunkt. Figur 5.11 viser en skisse av hvordan dette er løst i LabVIEW. Figuren viser også hvordan volumet, v_a , blir beregnet i LabVIEW.



Figur 5.11: Beregning av strømning gjennom ventil.

Denne metoden for å filtrere støyen i målingen viste seg å fungere, men er langt i fra optimalt. Strømningsmålingen, q , inneholder fortsatt støy som setter begrensninger til reguleringssystemet. Mer om dette i kapitlene 5.5 - 5.7.

For å motivere for bruk av lavpass-filter og *mean*-funksjonen kan en studere figur 5.12 som viser en konkret situasjon med og uten bruk av LP-filter og *mean*-funksjon.



Figur 5.12: Jfr. figur 5.11. Øverst til venstre er rådatasignalet, q_a , uten noen form for filtrering. Øverst til høyre er rådatasignalet filtrert med et lavpass-filter. Nede til venstre er rådatasignalet filtrert av *mean*-funksjonen. Figuren nederst til høyre viser resultatet ved bruk av LP-filter kombinert med *mean*-funksjonen.

Som en kan se fra figuren endrer signalet seg fra å være støyfullt og ubrukelig til å bli en relativt fin kurve. De neste delkapitlene viser hvordan lavpass-filteret og *mean*-funksjonen er stilt inn.

5.3.1 Bestemmelse av filterkonstant

For å finne tidskonstanten til lavpassfilteret er det tatt utgangspunkt i en teoretisk beregning av knekkfrekvensen. Samplingsintervallet, T_s , i LabVIEW er satt lik 0.05 sek, (jfr. kapittel 5.1) noe som gir følgende regnestykke:

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi f = \frac{2\pi}{T_s} \\ &= \frac{2\pi}{0.05} \approx 125 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Dette gir en Nyquist-frekvens på 62.5 rad/s. Tar utgangspunkt i Nyquist-frekvensen og at en ønsker å slippe gjennom frekvenser som er under en dekode mindre enn Nyquistfrekvensen. Det vil si at knekkfrekvensen er $\omega_c \approx 6$. Tidskonstanten til filteret blir da:

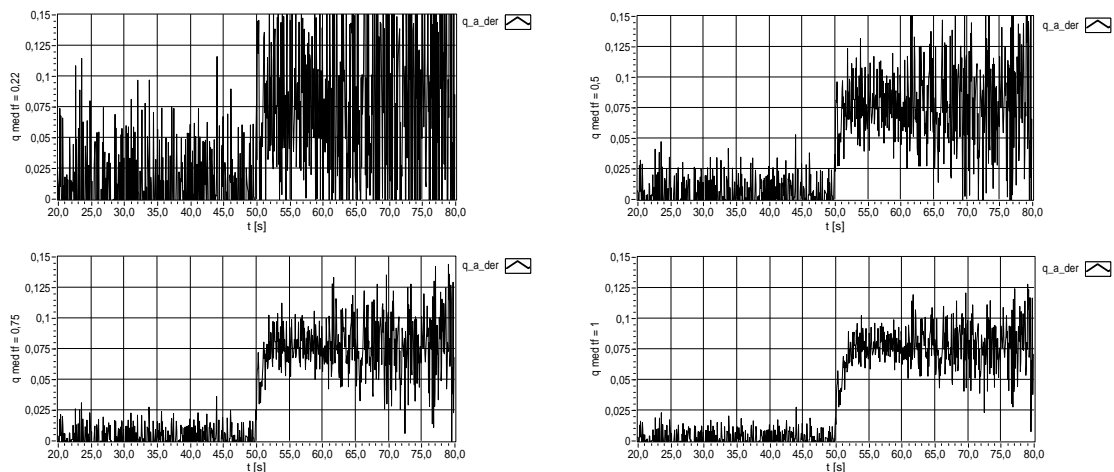
$$T_f = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{6} = 0.17 \tag{5.26}$$

Med utgangspunkt i denne filterkonstanten ble det gjort et lite eksperiment på et konkret scenario på testanlegget. Oppskriften på det lille eksperimentet er som følger:

1. Regulær tank 1 slik at nivået i tanken er konstant. Her er det brukt $h = 500$ mm og ventilpådrag på LV001 lik 0.2.

2. Sett deretter LV002 fullt åpen, det vil si $u_{LV002} = 1$ slik at nivået i tank 2 er helt på bunn.
3. Når nivåregulatoren har svinget seg inn på ønsket nivå, vil strømning tilført fra pumpen være lik strømning gjennom ventil LV001. Steng nå LV002 og sammenlign q_a gitt ved ligning (5.24) og strømningsmåling fra pumpe (ut fra pumpekar. jfr. kapittel 2.2).
4. Tøm tank 2 når tanken er full. Endre filterkonstant og kjør punkt 1-3 om igjen.
5. Sammenlign resultatene og finn riktig tidskonstant for filteret.

Figur 5.13 sammenligner resultatene ved fire ulike tidskonstater for en konkret situasjon, det vil si at det er det samme rådatasignalet som er filtret i alle fire tilfellene.

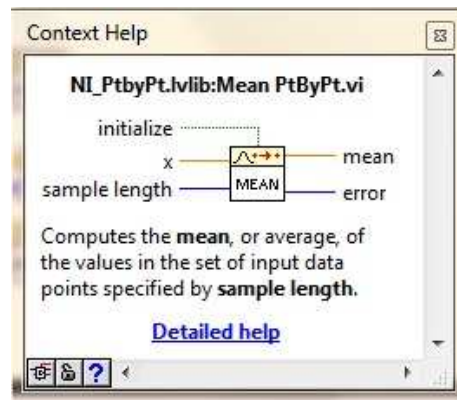


Figur 5.13: Sammenligning av forskjellige tidskonstanter for lavpass-filteret. Øverst til venstre: $T_f = 0.17$, øverst til høyre: $T_f = 0.50$, nederst til venstre: $T_f = 0.75$ og nederst til høyre: $T_f = 1.0$

Når en skal velge verdi på T_f er det viktig at denne ikke velges for stor eller for liten. Dersom T_f velges for stor, setter dette begrensninger til hurtigheten til reguleringen. Settes T_f for liten, kan målingen bli veldig støyfull og ubrukelig. I denne oppgaven velges $T_f = 1.0$ sek.

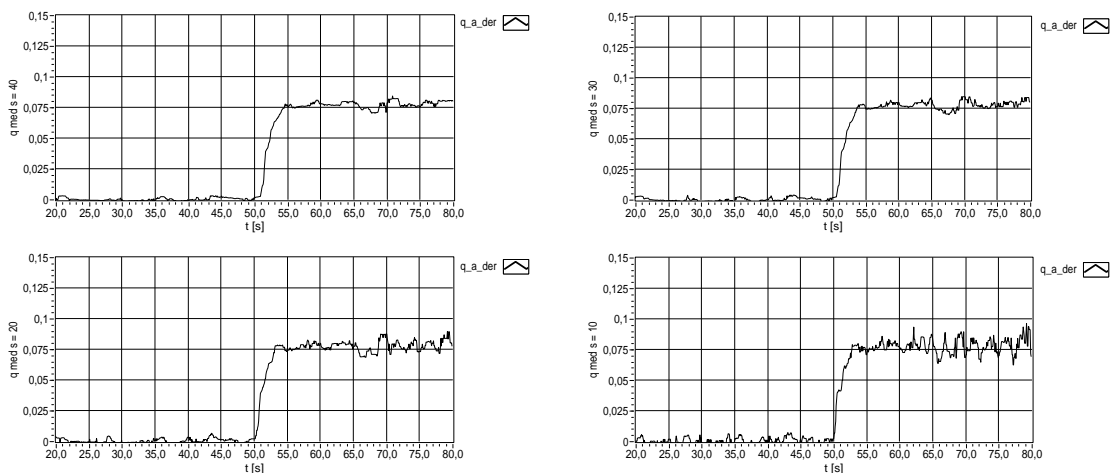
5.3.2 *mean*-funksjon i LabVIEW

Mean-funksjonen i LabVIEW brukes til å beregne gjennomsnittet i et datapunkt ved bruk av de S forrige datapunktene, og et sampleintervall på $T_s = 0.05$ sek. (jfr. kapittel 5.1) Figur 5.14 viser hvordan funksjonsblokken ser ut i LabVIEW-koden.



Figur 5.14: *Mean*-funksjonen i LabVIEW.

S er her *sample length*, og det er valget av denne som avgjør om gjennomsnittet blir bra eller dårlig. Dersom datasettet er langsomt varierende, vil en stor S kunne gi en glatt og fin kurve. Dersom datasettet varierer mye, vil det passe bedre med en lav S for å kunne følge brå endringer. I figur 5.15 er det vist fire forskjellige S -verdier på signalet med $T_f = 1.0$ fra figur 5.13.

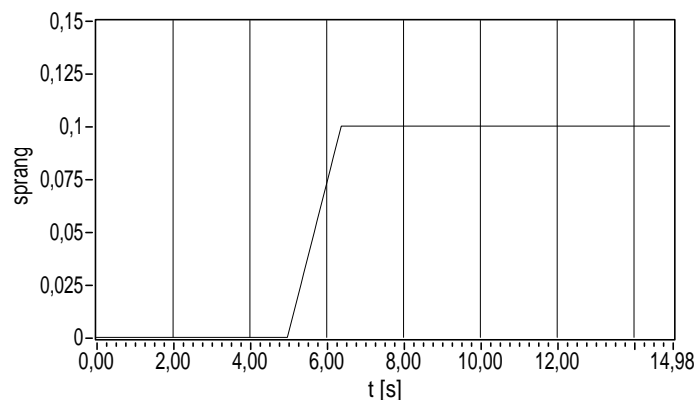


Figur 5.15: Øverst til venstre: $S = 40$, øverst til høyre: $S = 30$, nederst til venstre: $S = 20$ og nederst til høyre: $S = 10$.

Som en ser fra figur 5.15 gir store S -verdier den glatteste kurven, men dette går på bekost-

ning av hurtighet. Ved høye S -verdier vil en få en betydelig 'forsinkelse' på grunn av at gjennomsnittet skal svinge seg inn. Dette kan ses ved å studere $S = 40$ og $S = 10$ i figur 5.15. I tilfellet ved $S = 40$ begynner gjennomsnittet å svinge seg inn etter 51 sek, mens ved $S = 10$ begynner det å svinge seg inn ved 50 sek. Etter en del testing viser det seg at $S = 20$ gir det beste resultatet.

Sammen med lavpassfilteret er *mean*-funksjonen med på å bidra til at strømningsmålingen blir noe treg. Hvor mye *mean*-funksjonen bidrar med, kan finnes ved å sette et sprang på inngangen av funksjonen og lese av utgangen. Dette ble utført i LabVIEW og ga følgende resultat:

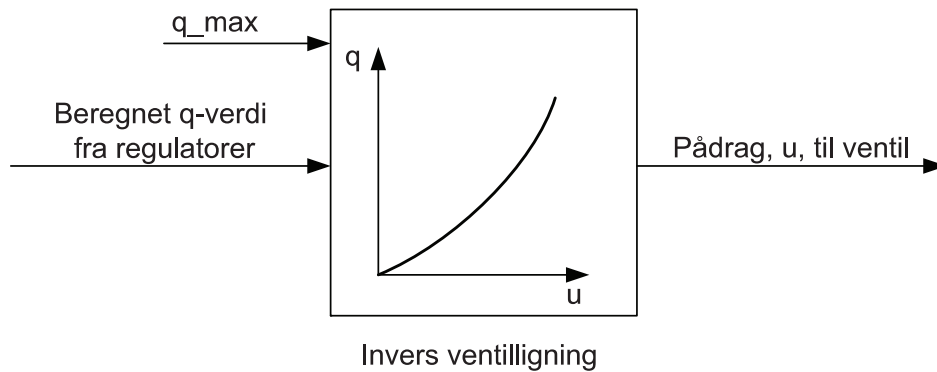


Figur 5.16: Respons ved sprang i *mean*-funksjonen, med $S = 20$.

Figur 5.16 viser responsen ved et sprang på 0.1. Spranget går ved $t = 5$ sek. Ved å lese av tiden når utgangen når 63% av stasjonær verdi, har en responstiden til funksjonen. Responstiden her er avlest til $T_M = 0.85$ sek. Til sammenligning vil *mean*-funksjonen med $S = 10$ gi en responstid på 0.41 sek, $S = 30$ gir en responstid på 1.29 sek, mens ved $S = 40$ er responstiden lik 1.70 sek.

5.4 Valg av invers ventilligning

Som nevnt innledningsvis i dette kapittelet beregner regulatorene en strømningsverdi, q , som en ønsker å ha gjennom ventilen. Hva pådraget til ventilen da skal være, blir bestemt av den inverse ventilligningen. Dette kan illustreres ved skissen vist i figur 5.17:



Figur 5.17: Skisse over hvordan den inverse ventilligningen brukes i dette reguleringsystemet.

For å bestemme hva den inverse ventilligningen skal være, tas det utgangspunkt i figur 4.5 i kapittel 4.1. Her ble det funnet at den modellen som best beskriver virkelig ventilkarakteristikk er på formen:

$$f(u) = \frac{1}{(1 - u_{min})}(u - u_{min})$$

Med utgangspunkt i denne modellen og introduksjonen i kapittel 4.1, ser en at ventilligningen nå kan skrives på følgende form:

$$\begin{aligned} q &= q_{max} \cdot f(u) \\ &= \frac{q_{max}}{(1 - u_{min})}(u - u_{min}) \end{aligned}$$

Ved å løse ventilligningen ovenfor med hensyn på u , får en følgende uttrykk for den inverse ventilligningen:

$$u = \frac{q}{q_{max}}(1 - u_{min}) + u_{min} \quad (5.27)$$

5.4.1 Feil i invers ventilligning

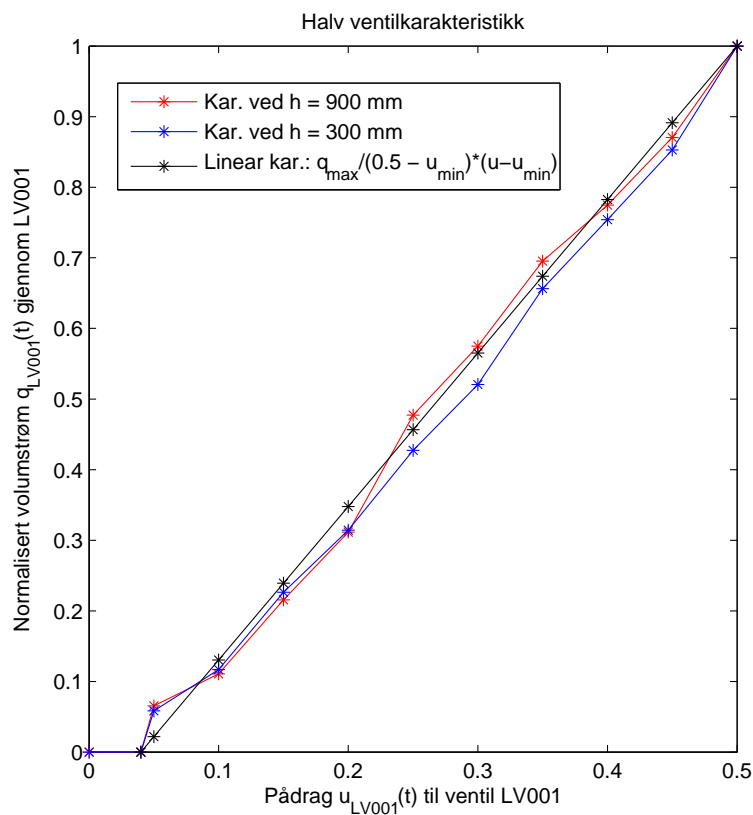
Ettersom modellen for ventilkarakteristikken ikke er helt riktig, vil heller ikke den inverse ventilligningen være helt riktig. Dette fører til at den inverse ventilligningen gir ut feil pådragsverdier til ventilen. Figur 5.18 viser avviket mellom den lineære modellen og virkelig karakteristikk⁴ ved nivå $h = 300$ og $h = 900$. Ser at det største avviket ved $h = 300$ er

⁴merk: sammenligner med den halve ventilkarakteristikken, jfr. kapittel 4.1

ved ventilpådrag lik 0.3 og 0.05. Forskjellen i karakteristikken er da på 4.46 % og 3.66 % henholdsvis.

Den lineære modellen passer noe bedre til karakteristikken ved $h = 900$. Den største feilen er her ved ventilpådrag lik 0.2 og 0.05. Forskjellen i karakteristikken er da på 3.62 % og 4.36 % henholdsvis. Dette vil kunne påvirke reguleringen, men strømningsregulatoren vil kompensere for denne feilen, jfr. kapittel 5.5 og 7.1.

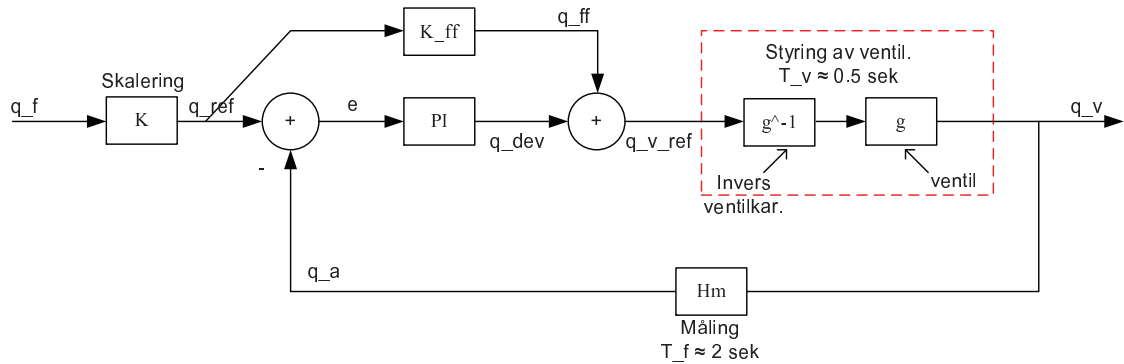
Fra eksperimentet i kapittel 4.1.2 vet en at det er knyttet noe usikkerhet opp mot målingene tatt ved $u = 0.05$. Dette betyr at uventede avvik ved små ventilpådrag kan skyldes denne målingen.



Figur 5.18: Feil i ventilkarakteristikk, $f(u)$.

5.5 Strømningsregulator

Strømningsregulatoren i dette reguleringsystemet har i oppgave å følge referanse som blir generert av drivstoffstrømmingen. For å finne de beste reguleringsparametrene til strømningsregulatoren er det tatt utgangspunkt i figur 5.19.



Figur 5.19: Reguleringsstruktur for strømningsregulatoren

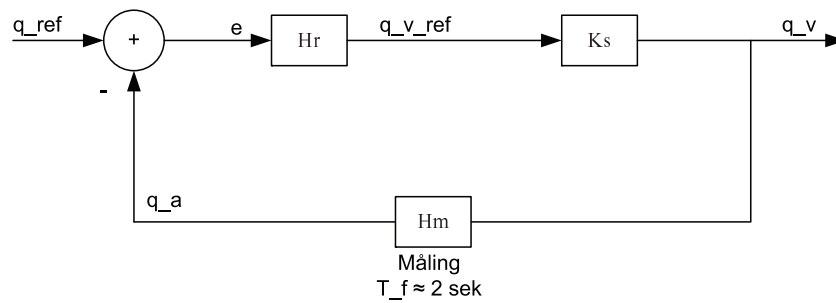
En får her en kaskaderegulering hvor styring av ventilen er sekundærsøyfen, mens strømningsregulatoren er primærsøyfen. Hensikten med kaskaderegulering er at sekundærsøyfen skal kompensere for forstyrrelser før det slår ut på prosessens primærutgang, her q_v . Det er derfor et krav at sekundærsøyfen er mye raskere enn primærsøyfen, det vil si: $T_v \ll T_{stromreg}$. Har i kapittel 4.2.3 funnet at ventilkonstanten, T_v , er 0.50 sek. Tidskonstanten til målefilteret har en informasjon om fra kapittel 5.3.1 og 5.3.2. Ut fra informasjon i disse kapitlene settes $T_f = 2.0$ sek (1 sek i LP-filter + 0.85 sek i *mean*-funksjon i LabVIEW).

Videre i beregningene vil sekundærsøyfen modelleres som en skaleringskonstant K_s . Denne settes lik 1 med en drift på Δ_{K_s} . Dette kan uttrykkes ved følgende uttrykk:

$$K_s = 1 \pm \Delta_{K_s} \quad (5.28)$$

For at en skal kunne gjøre dette er en avhengig av at den inverse ventilligningen er tilnærmet riktig. Dersom den er helt riktig får en at $K_s = g \cdot g^{-1} = 1$. Ved feil i den inverse ventilligningen vil en få et bidrag i Δ_{K_s} . (kapittel 5.4.1 viser at den inverse ventilligningen er noe feil. En vil derfor få et lite bidrag i Δ_{K_s} .)

En skal nå analysere den tilbakekoblede delen av reguleringsstrukturen. Forenkler reguleringsstrukturen i figur 5.19 til reguleringsstrukturen vist i figur 5.20.



Figur 5.20: Forenklet reguleringsstruktur for strømningsregulatoren

Neste steg er å finne følgeforholdet, $M(s)$, som er uttrykket ved:

$$M(s) = \frac{H_0(s)}{1 + H_0(s)} = \frac{\text{utgang}}{\text{inngang}} = \frac{q_v}{q_{ref}} \quad (5.29)$$

hvor $H_0(s)$ er uttrykket ved:

$$H_0(s) = H_r(s)H_p(s)H_m(s) \quad (5.30)$$

der $H_r(s)$ er transferfunksjonen til regulatoren, $H_p(s)$ er transferfunksjonen for prosessen (som her er sekundærsløyfen, forenklet til $K_s \approx 1$) og $H_m(s)$ er transferfunksjonen til målefilteret, et førsteordens filter med tidskonstant T_f .

Velger først å bruke en P-regulator, $H_r(s) = K_p$. Det gir følgende beregninger:

$$\begin{aligned} H_0(s) &= K_p K_s \frac{1}{T_f s + 1} \\ M(s) &= \frac{\frac{K_p K_s}{T_f s + 1}}{1 + \frac{K_p K_s}{T_f s + 1}} \\ &= \frac{K_p K_s}{T_f s + K_p K_s + 1} \\ &= \frac{\frac{K_p K_s}{1 + K_p K_s}}{T_{stromreg} s + 1} \end{aligned}$$

der $T_{stromreg}$ er gitt ved

$$T_{stromreg} = \frac{T_f}{1 + K_p K_s} \quad (5.31)$$

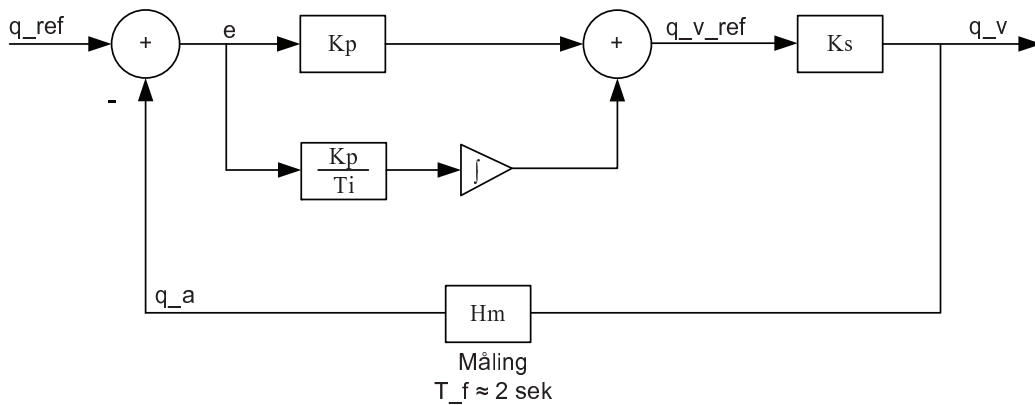
Regner så ut $\lim_{s \rightarrow 0} M(s) = M_s$. Ønsker at verdien på denne skal være ≈ 1 . En har da at utgangen, q_v , følger referansen q_{ref} , jfr. ligning (5.29).

$$\lim_{s \rightarrow 0} M(s) = M_s = \frac{K_p K_s}{1 + K_p K_s} \quad (5.32)$$

K_s er som kjent ≈ 1 . Det betyr at det er størrelsen på K_p som avgjør hvor stor M_s blir. Dersom en velger K_p liten, f.eks lik 0.05, vil også M_s blir liten, ≈ 0.05 . En må derfor velge

K_p stor, helst over 10 for at M_s skal være i nærheten av 1. Ulempen ved å bruke store K_p -verdier er at primærsløyfen blir raskere enn sekundærsløyfen, jfr. ligning (5.31). Dette er ikke bra når kravet er $T_v \ll T_{stromreg}$.

Dersom $K_p = 10$ vil en få at $T_{stromreg} = \frac{2}{11} \approx 0.2$ sek. Det vil si at primærsløyfen er over dobbel så rask som sekundærsløyfen! I tillegg vil en få et stasjonært avvik dersom den inverse ventilkarakteristikken er feil. Velger derfor å bruke en PI-regulator, som har et I-ledd som kompenserer for modellfeil i den inverse ventilligningen. En får da følgende reguleringsstruktur:



Figur 5.21: Reguleringsstruktur ved bruk av PI-regulator.

Gjør nye beregninger av $M(s)$ når en nå bruker PI-regulator, og får da:

$$\begin{aligned}
 H_0(s) &= K_p K_s \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \left(\frac{1}{T_f s + 1} \right) \\
 M(s) &= \frac{K_p K_s \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \left(\frac{1}{T_f s + 1} \right)}{1 + K_p K_s \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \left(\frac{1}{T_f s + 1} \right)} \\
 &= \frac{K_p K_s (T_i s + 1)}{T_i s (T_f s + 1) + K_p K_s (T_i s + 1)} \\
 &= \frac{K_p K_s (T_i s + 1)}{T_i T_f s^2 + (1 + K_p K_s) T_i s + K_p K_s} \\
 &= \frac{\frac{K_p K_s}{T_i T_f} (T_i s + 1)}{s^2 + (1 + K_p K_s) \frac{1}{T_f} s + \frac{K_p K_s}{T_i T_f}} \tag{5.33}
 \end{aligned}$$

Fra ligning (5.33) ser en at $\lim_{s \rightarrow 0} M(s)$ blir lik 1, uansett hvilke parameterverdier som brukes. Det vil si null stasjonært avvik.

Velger å bruke Skogestads metode (ref. kapittel 8.4 i [6]) til å stille inn reguleringsparametrene K_p og T_i . For å bruke denne metoden må en kjenne prosessens forsterkning, K , og

tidskonstant, T . Prosessens forsterkning er her skaleringskonstanten K_s , mens tidskonstanten er summen av ventilkonstanten, $T_v = 0.5$, og målefilterkonstanten, $T_f = 2.0$. I tillegg vet en at det er en transportforsinkelse, $\tau = 1.0$ sek, (jfr. kapittel 4.2) fra ventilen åpner til strømningsmålingen, q_a , blir aktiv. En får da at prosessen som skal reguleres er gitt på følgende form⁵:

$$H_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{K_s}{(T_v + T_f)s + 1} e^{-\tau s} = \frac{1}{2.5s + 1} e^{-1.0s} \quad (5.34)$$

Basert på verdiene gitt i ligning (5.34) og ønsket responstid, $T_C = T_{stromreg}$, på reguleringsystemet, kan en bestemme K_p og T_i ut fra følgende ligninger:

$$K_p = \frac{T_v}{K_s(T_C + \tau)} \quad (5.35)$$

$$T_i = \min[T_v, k_1(T_C + \tau)] \quad (5.36)$$

der k_1 er en konstant som velges lik 1.44, mer info om denne i kapittel 8.4 i [6].

Velger å ta utgangspunkt i en T_C -verdi på 4.0 sek. Det gir følgende K_p - og T_i -verdier:

$$K_p = \frac{2.5}{1.0(4.0 + 1)} = 0.50$$

$$T_i = \min[2.5, 1.44(4.0 + 1.0)] = 2.5$$

I neste delkapittel blir reguleringsparametrene testet på anlegget. I forbindelse med testingen ble det også beregnet flere sett med reguleringsparametre ut fra andre $T_{stromreg}$ -verdier, vist i tabell 5.2 nedenfor:

-	$T_{stromreg} = 4$ sek	$T_{stromreg} = 5$ sek	$T_{stromreg} = 6$ sek	$T_{stromreg} = 7$ sek
K_p	0.50	0.42	0.36	0.31
T_i	2.5	2.5	2.5	2.5

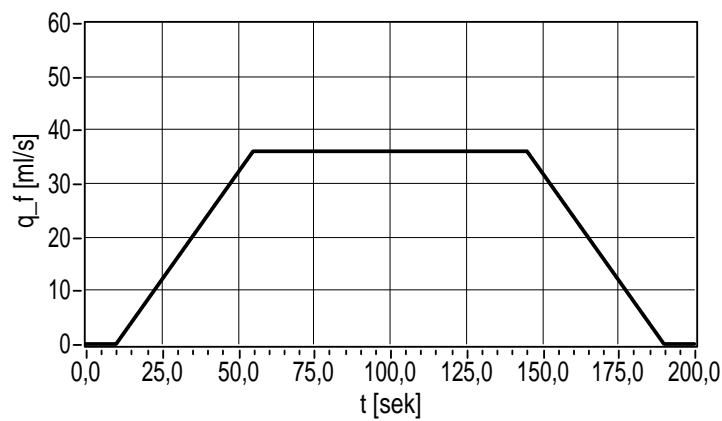
Tabell 5.2: K_p - og T_i -verdier ved forskjellige $T_{stromreg}$ -verdier.

⁵merk: En vil fortsatt få null stasjonært avvik ($M_s = 1$) selv om $H_p(s)$ endrer form

5.5.1 Test av reguleringsparametre

Ved innstilling av strømningsregulatoren, er parameteren q_{max} konstant, og lik 300 ml/s (jfr. kapittel 4.1 og 5.4). Denne verdien tilsvarer maksimal strømming når nivået i tank 1 er 300 mm. En bruker altså ikke Kalman-filteret her.

For å teste hvordan strømningsregulatoren med foroverkopler følger referansen, q_{ref} , er det utviklet et konkret reguleringsforløp i LabVIEW. Referansen, q_{ref} , genereres ut fra en simulert drivstoffstrømning, q_f , i LabVIEW. Profilen på q_f (og da også q_{ref}) er vist i figur 5.22. Mer om hvordan denne er generert, og hvorfor den er på denne formen i kapittel 6.2.5.



Figur 5.22: Profilen til drivstoffstrømning, q_f . Som også blir profilen til referansen q_{ref} .

Basert på K_p - og T_i -verdiene i tabell 5.2 får en responsene som vist i figurene 5.23 - 5.34. For hver tidskonstant, $T_{stromreg}$, er det vist tre forskjellige figurer med resultater; en figur som viser en generell oversikt over reguleringsforløpet (figur 5.23), en figur som viser et utsnitt fra reguleringen (figur 5.24), og en figur som viser hvor mye strømningsregulatoren og foroverkopleren bidrar til den inverse ventilligningen (figur 5.25).

Tar utgangspunkt i $T_{stromreg} = 4$ sek og kommenterer resultatene gitt i figurene 5.23 - 5.25; Fra 5.23 kan en se at strømningsmålingen, q_a , følger referansen, q_{ref} , bra. En kan også registrere at strømningsmålingen er beheftet med ganske mye støy. Dette fører til at ventilpådraget blir noe hissig, som skyldes et støyfullt reguleringsavvik, $e = q_{ref} - q_a$, i kombinasjon med en for høy K_p -verdi, jfr. figur 5.24 og 5.25. Figur 5.25 viser hvor mye strømningsregulatoren bidrar med i forhold til foroverkopleren. Dersom foroverkopleren hadde vært helt riktig, det vil si at ventilkarakteristikken, $f(u)$, og maksimal strømming gjennom ventilen, q_{max} , (jfr. kapittel 4.1 og 5.4) var helt korrekt i forhold til virkeligheten, hadde bidraget fra strømningsregulatoren vært lik null. Ser fra figur 5.25 at dette ikke er tilfelle. Strømningsregulatoren retter opp ganske mye i starten, ca 10 ml/s, mens den ved konstant q_{ref} svinger seg inn, og varierer rundt -5 ml/s. Bidraget fra strømningsregulatoren i starten, skyldes trolig feil i den inverse ventilligningen ved små ventilpådrag. Jfr. kommentarer om feil ved små u i kapittel 4.1 og 5.4.

Siden bidraget fra strømningsregulatoren er negativt, kan det tyde på at verdien på q_{max} er valgt litt for liten. Dette kan sees ut fra uttrykket for den inverse ventilligningen;

$$u = \frac{q}{q_{max}}(1 - u_{min}) + u_{min}$$

der q er den beregnede strømningsverdien fra strømningsregulatoren. Dersom q_{max} hadde vært noe større hadde bidraget fra strømningsregulatoren vært mindre.

Etter å ha studert resultatene for $T_{stromreg} = 4$ sek og $T_{stromreg} = 5$ sek, ser en at dette er litt for lave tidskonstanter, da ventilpådraget er for hissig. Ved å studere figur 5.24 og 5.27 ser en at ventilpådraget hovedsaklig varierer mellom 0.13 og 0.16 for $T_{stromreg} = 4$ sek, og mellom 0.13 og 0.15 for $T_{stromreg} = 5$ sek. Ønsker et roligere ventilpådrag, forkaster derfor disse settene med reguleringsparametre.

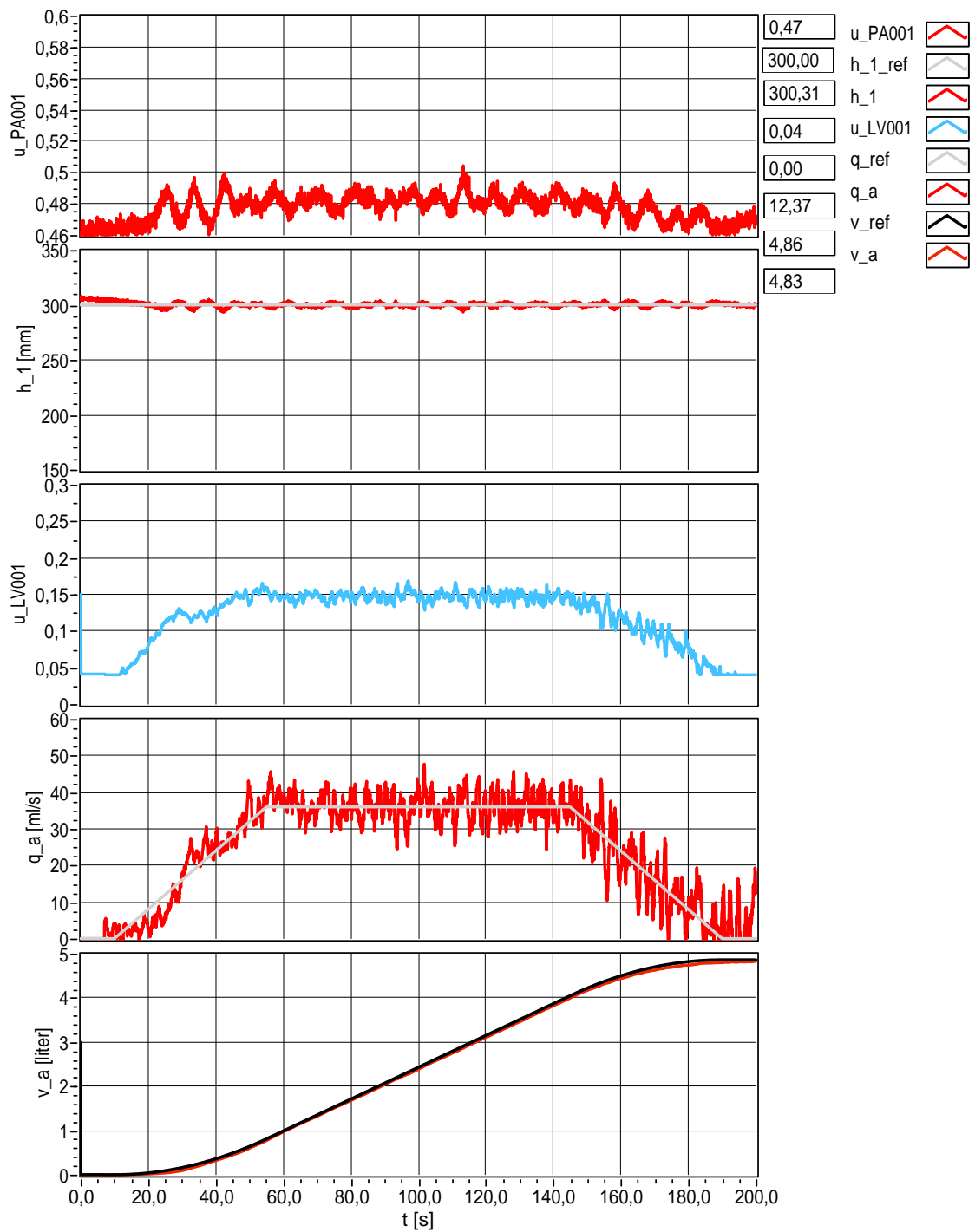
Ved å sammenligne $T_{stromreg} = 6$ sek og $T_{stromreg} = 7$ sek, ser en at ventilpådraget nå er mye roligere. Ved å studere figur 5.30 og 5.33 ser en at ventilpådraget hovedsaklig varierer mellom 0.14 og 0.15 for både $T_{stromreg} = 6$ sek og $T_{stromreg} = 7$ sek, men at pådraget for $T_{stromreg} = 7$ sek oppfører seg noe mer rolig. Velger derfor dette settet med reguleringsparametre.

Det vil si at reguleringsparametre som blir brukt for strømningsregulatoren er som følger:

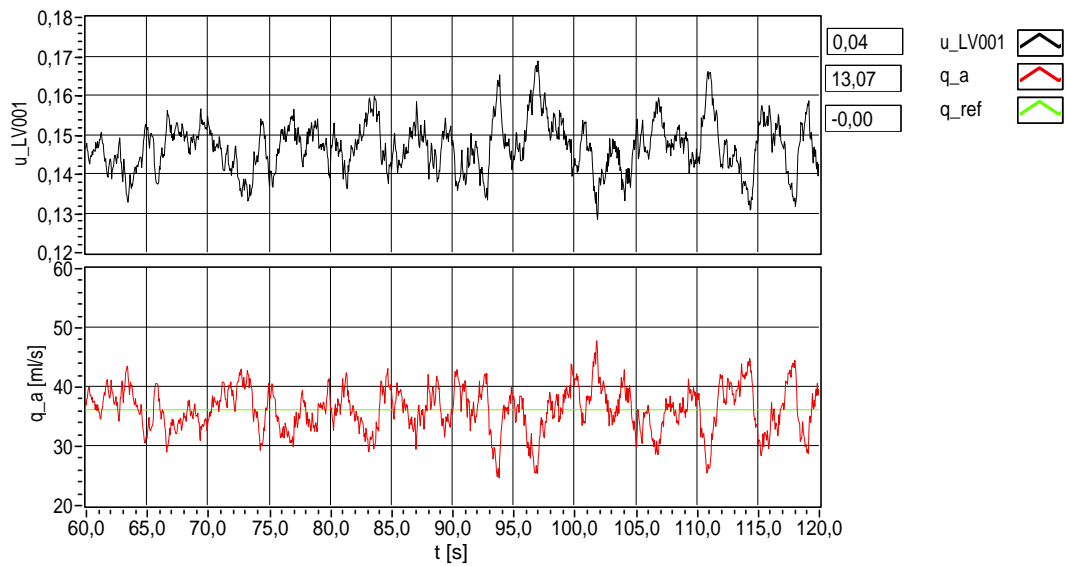
$$\begin{aligned} K_p &= 0.31 \\ T_i &= 2.5 \end{aligned}$$

som er settet med reguleringsparametre for $T_{stromreg} = 7$ sek.

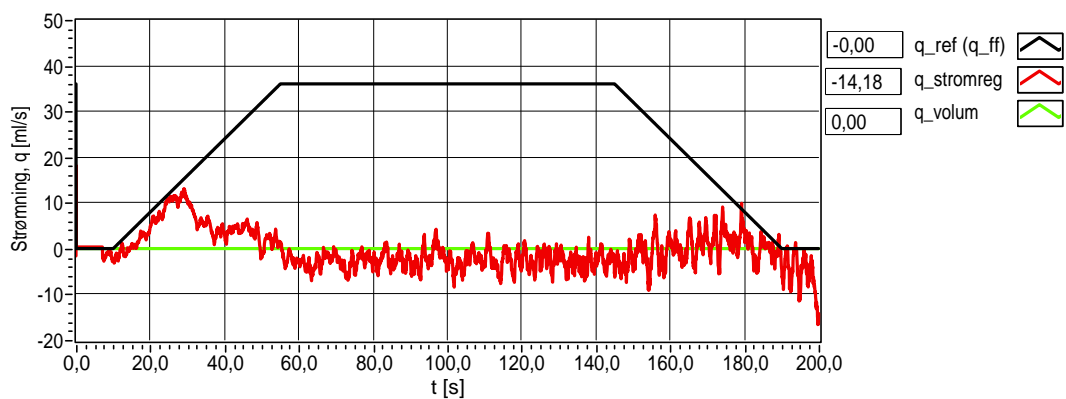
Fra figurene 5.23 - 5.34 kan en merke seg at volumet av tilsetningsstoffet, v_a , følger referansen, v_{ref} , ganske bra. Følgeforskjellen er så bra at volumregulatoren ikke vil kunne gjøre store merkbare forskjeller. Oppe til høyre i figurene 5.23, 5.26, 5.29 og 5.32 står det hvor mye tilsetningsstoff, v_a (i liter), som er tilført i drivstoffet. Her står også referansen, v_{ref} , som her er lik 4.86 liter.



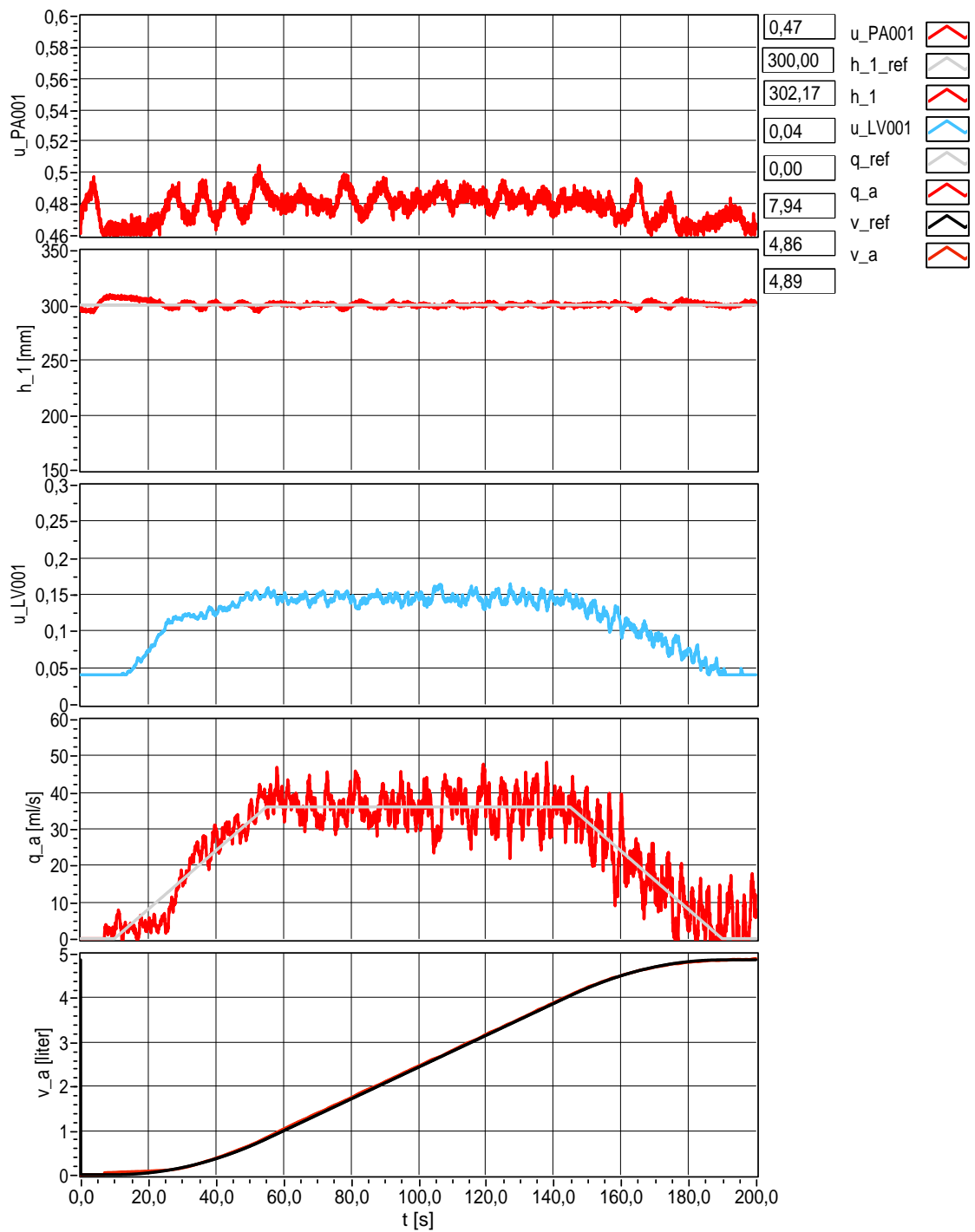
Figur 5.23: Reguleringsforløp når $T_{stromreg} = 4$ sek.



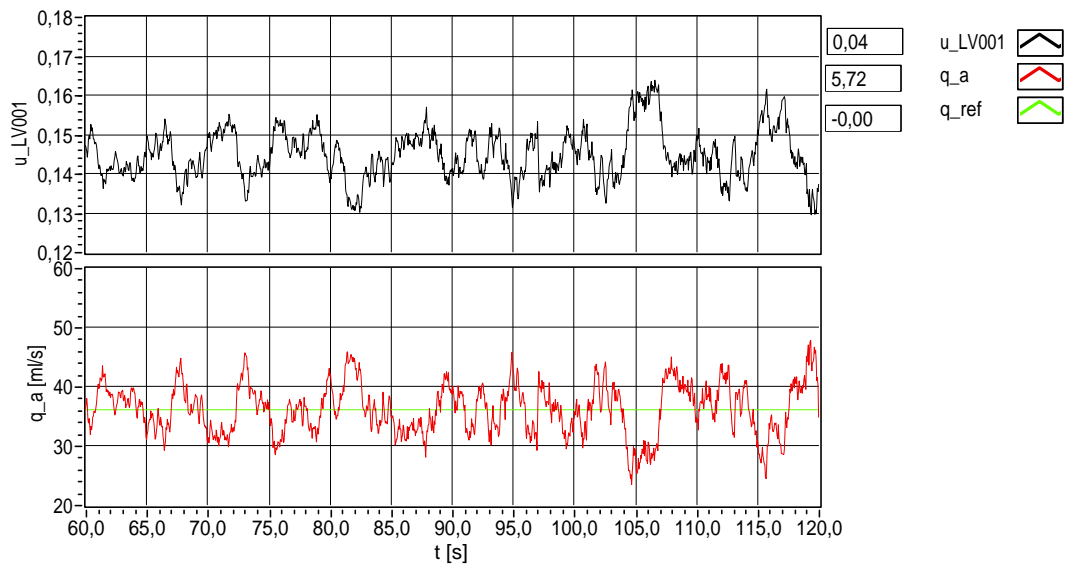
Figur 5.24: Utsnitt av reguleringsforløpet ved $T_{stromreg} = 4$ sek.



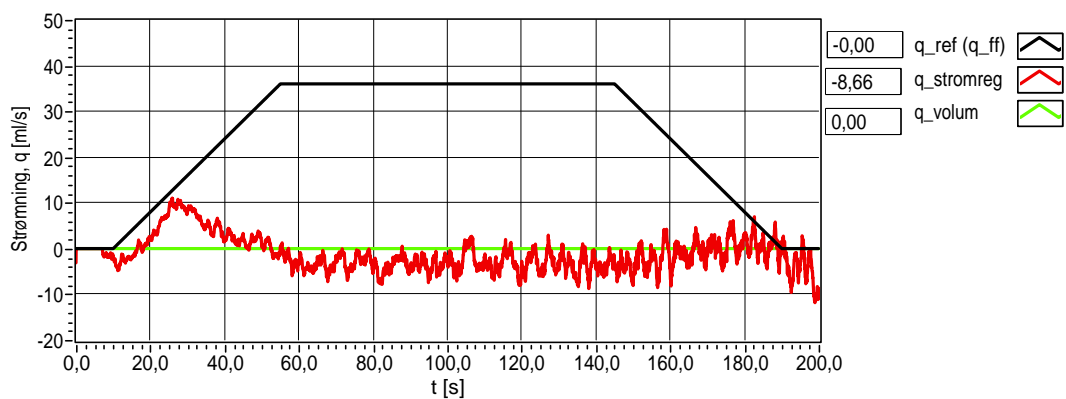
Figur 5.25: Bidrag fra foroverkopleren og strømningsregulatoren ved $T_{stromreg} = 4$ sek. Her er volumregulatoren ikke brukt, slik at bidraget fra denne er lik 0. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).



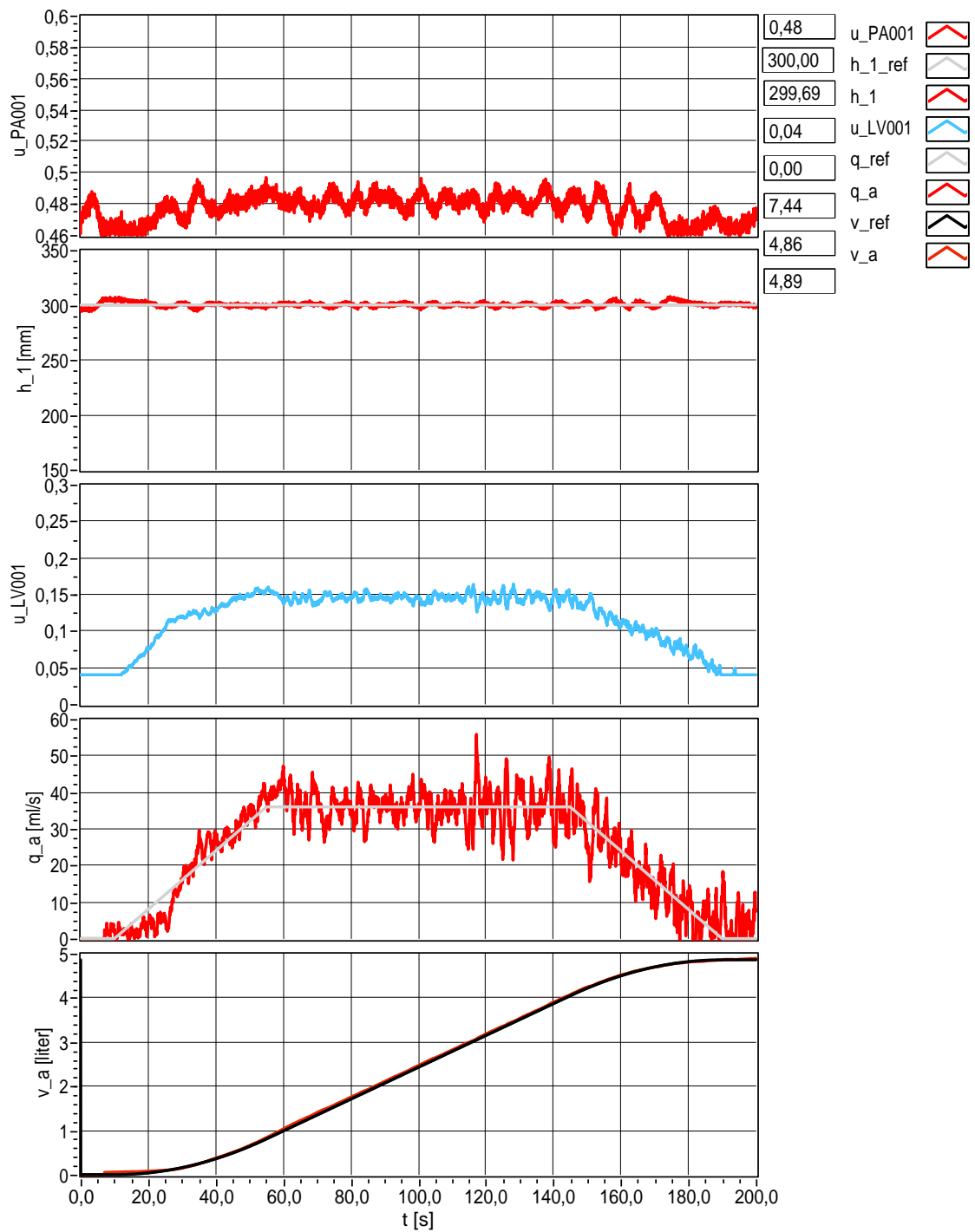
Figur 5.26: Reguleringsforløp når $T_{stromreg} = 5$ sek.



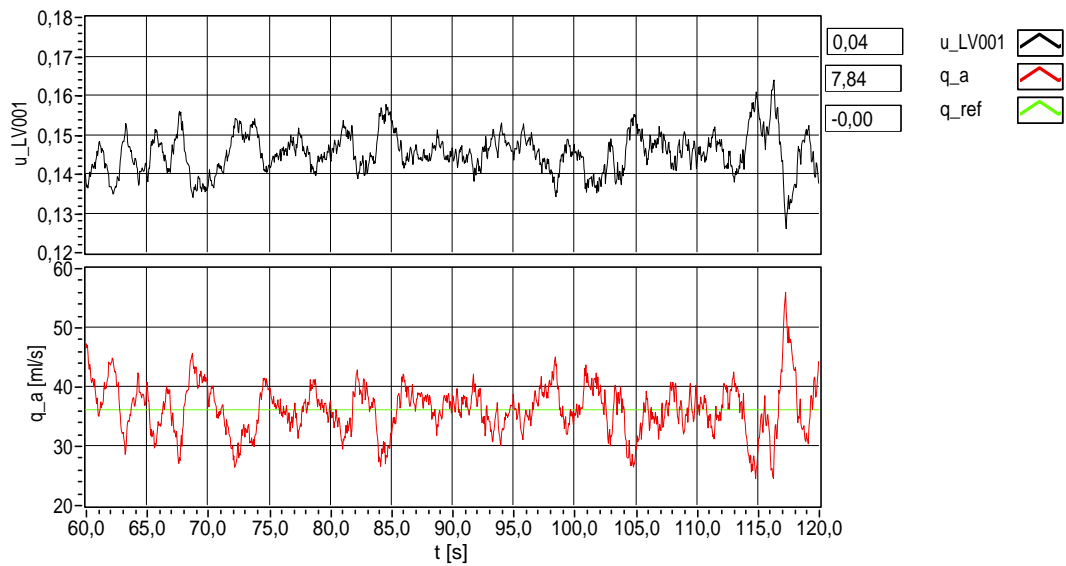
Figur 5.27: Utsnitt av reguleringsforløpet ved $T_{stromreg} = 5$ sek.



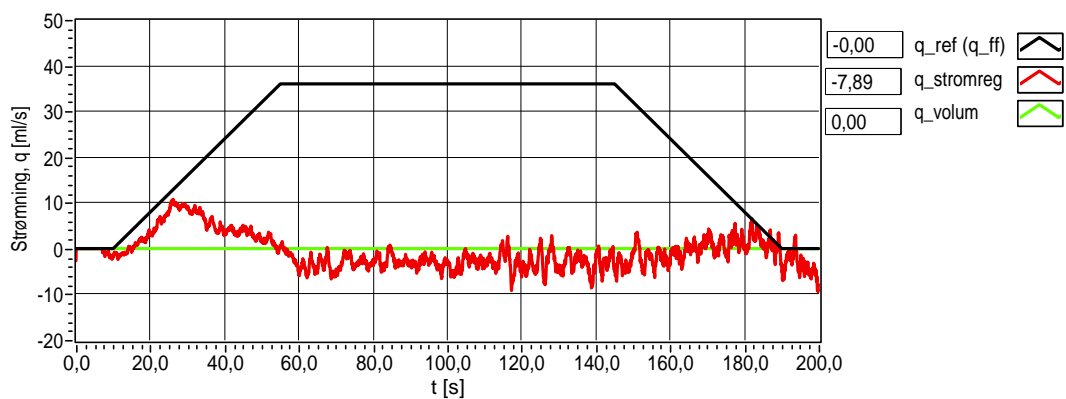
Figur 5.28: Bidrag fra foroverkopleren og strømningsregulatoren ved $T_{stromreg} = 5$ sek. Her er volumregulatoren ikke brukt, slik at bidraget fra denne er lik 0. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).



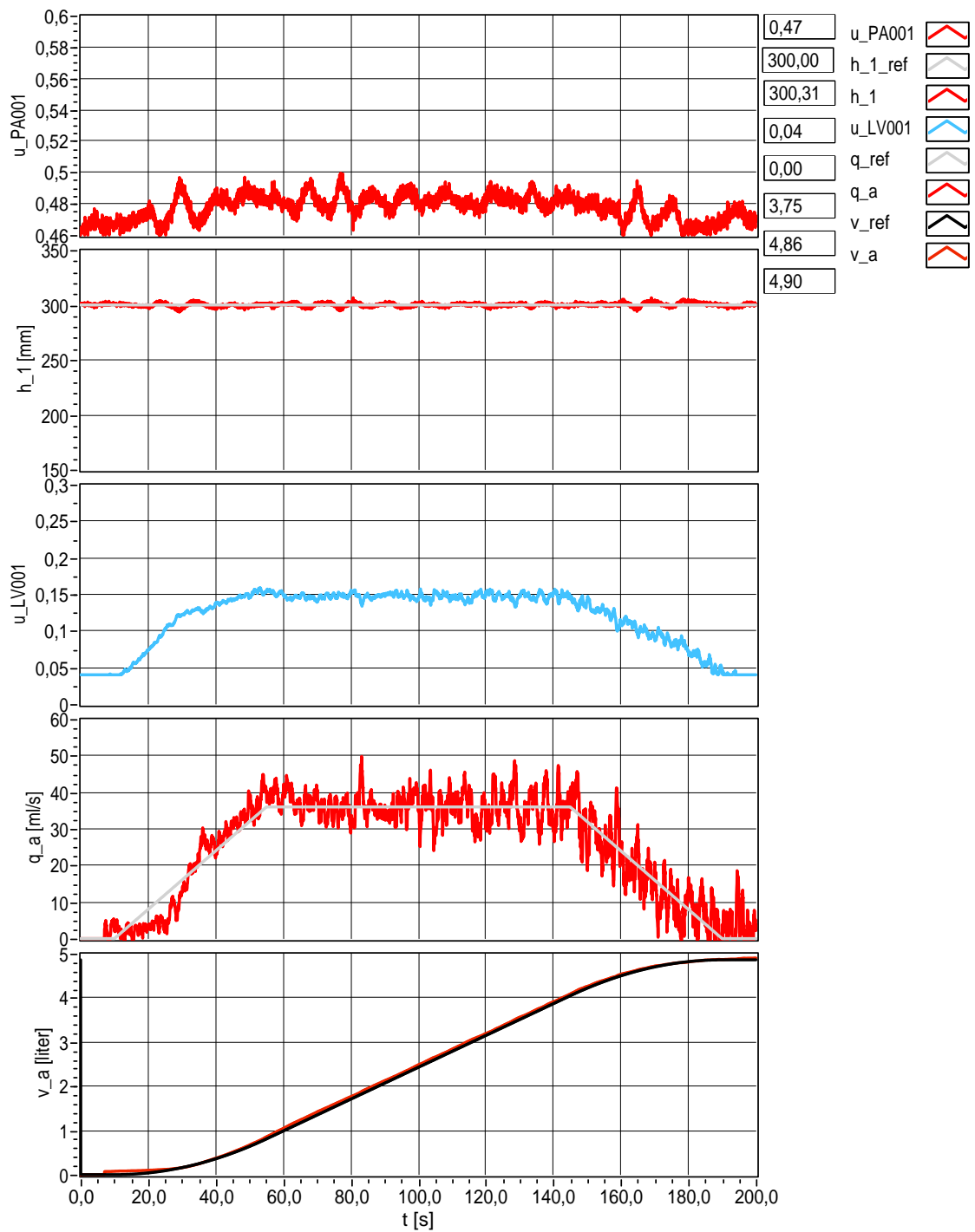
Figur 5.29: Reguleringsforløp når $T_{stromreg} = 6$ sek.



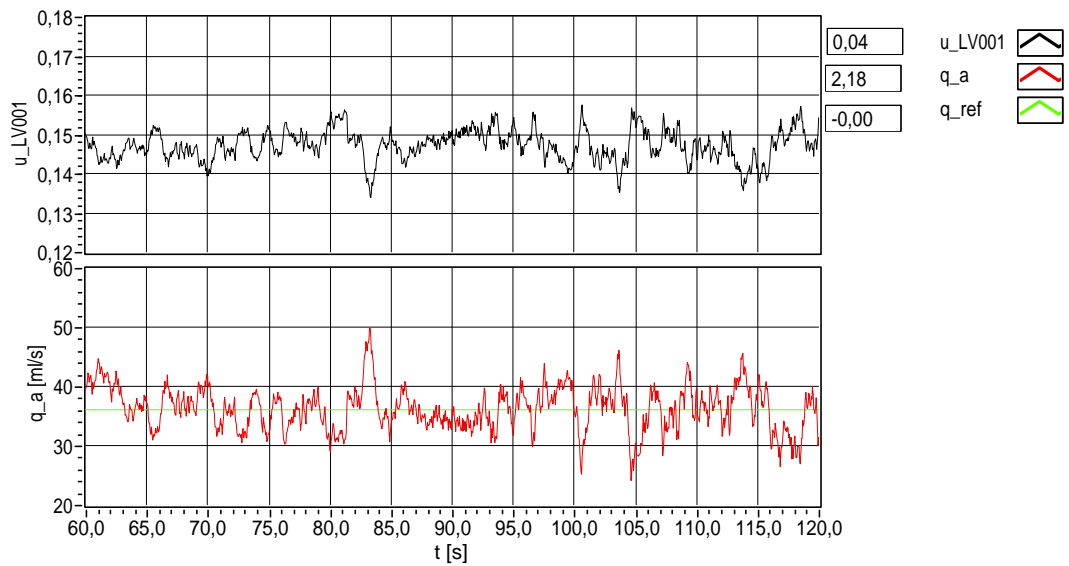
Figur 5.30: Utsnitt av reguleringsforløpet ved $T_{stromreg} = 6$ sek.



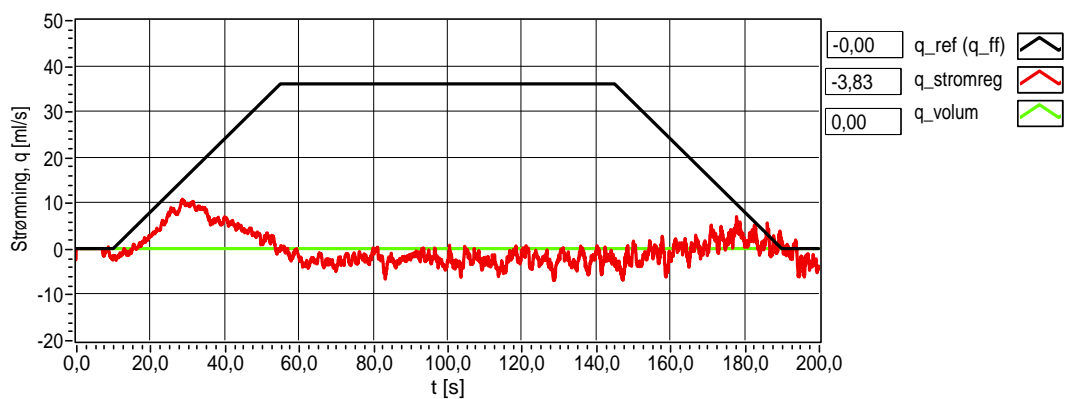
Figur 5.31: Bidrag fra foroverkopleren og strømningsregulatoren ved $T_{stromreg} = 6$ sek. Her er volumregulatoren ikke brukt, slik at bidraget fra denne er lik 0. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).



Figur 5.32: Reguleringsforløp når $T_{stromreg} = 7$ sek.



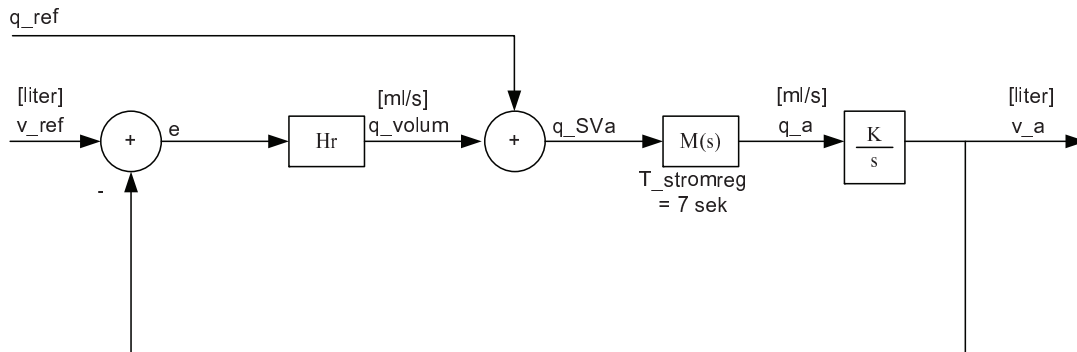
Figur 5.33: Utsnitt av reguleringsforløpet ved $T_{stromreg} = 7$ sek.



Figur 5.34: Bidrag fra foroverkopleren og strømningsregulatoren ved $T_{stromreg} = 7$ sek. Her er volumregulatoren ikke brukt, slik at bidraget fra denne er lik 0. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

5.6 Volumregulator

For å stille inn volumregulatoren, er det tatt utgangspunkt i en forenklet reguleringsstruktur, vist i figur 5.35. Strukturen er forenklet ved at de to indre sløyfene (styring av ventil og strømingsregulatoren) inngår i $M(s)$, hvor $|M(s)| = 1$ med tidskonstant $T_{stromreg} = 7$ sek, jfr. kapittel 5.5.



Figur 5.35: Reguleringsstruktur for volumregulator.

Volumet av tilsetningsstoffet, v_a , blir målt/beregnet ut fra volumfunksjonen som ble utledet i kapittel 2.1.3. Prosessen som skal reguleres er en integrator, $\frac{K}{s}$, hvor $K = 0.001$. Grunnen til at K er 0.001 er fordi strømningsmålingen, q_a , er gitt i benevnningen ml/s, mens benevnningen til utgangen av integratoren skal være i liter. En må derfor multiplisere q_a med 0.001 slik at milliliter \rightarrow liter.

Kravet til volumregulatoren er at den skal være den tregeste reguleringsløyfen, som betyr at følgende krav må være oppfylt: $T_{volumreg} > T_{stromreg} = 7$ sek. For å stille inn volumregulatoren er det brukt Skogestads metode (ref. kapittel 8.4 i [6]). Velger å bruke en PI-regulator, og får da følgende uttrykk for K_p og T_i :

$$K_p = \frac{1}{K \cdot T_C} \quad (5.37)$$

$$T_i = k_1 \cdot T_C \quad (5.38)$$

hvor k_1 er en konstant, og lik 1.44 (jfr. kapittel 8.4 i [6]). T_C er ønsket tidskonstant på reguleringsssystemet, dvs $T_C = T_{volumreg}$

Velger å ta utgangspunkt i $T_{volumreg} = 10$ sek. Får da følgende parametersett:

$$K_p = \frac{1}{0.001 \cdot 10} = 100 \quad (5.39)$$

$$T_i = 1.44 \cdot 10 = 14.4 \quad (5.40)$$

Neste delkapittel viser testing av forskjellige parametersett.

5.6.1 Test av reguleringsparametre

Ved innstilling av volumregulatoren blir strømningsregulatoren satt i auto, hvor den bruker K_p - og T_i -verdiene som funnet i kapittel 5.5, nemlig $K_p = 0.31$ og $T_i = 2.5$. For å teste reguleringsparametrene for volumregulatoren er det brukt samme reguleringsforløp som i kapittel 5.5.1. q_{max} er også her satt konstant, og lik 300 ml/s.

Starter med å teste parametersettet for $T_{volumreg} = 10$ sek. Får da resultatet som vist i figurene 5.36 - 5.38. Ser at reguleringen blir veldig dårlig. Bidraget fra volumregulatoren fører til at ventilpådraget svinger veldig mye, som igjen fører til at strømmingen med tilsetningsstoff svinger mye. Forkaster dette settet.

Øker så $T_{volumreg}$ til 15 sek. Får da parameterne $K_p = 66.7$ og $T_i = 21.6$. Resultatet ved bruk av disse verdiene er vist i figurene 5.39 - 5.41. Reguleringen er fortsatt ikke god, volumregulatoren er fortsatt litt for hissig, som fører til at ventilpådraget varierer mye, hovedsaklig mellom 0.13 og 0.16, jfr. figur 5.40. Forkaster også dette settet.

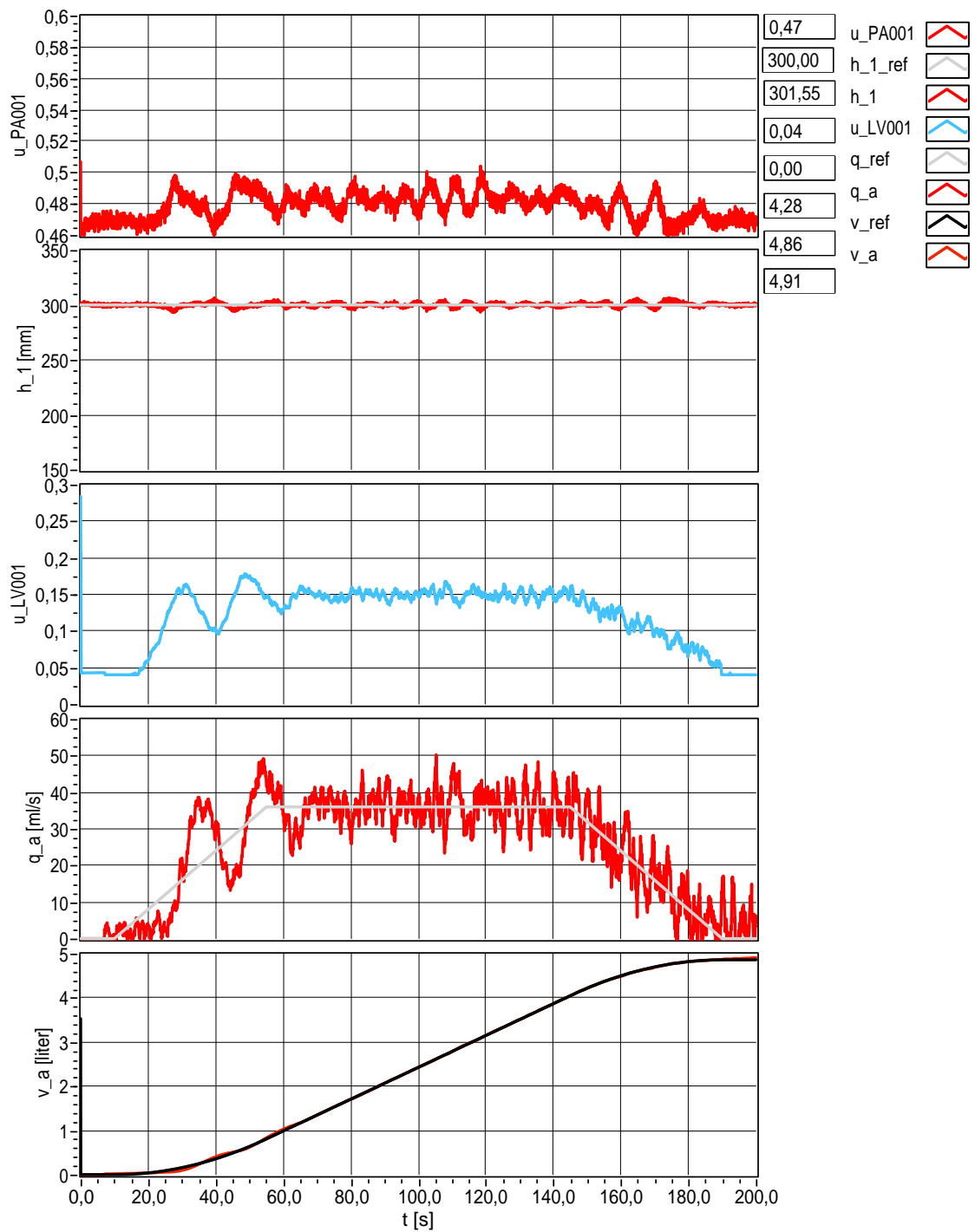
Prøver så med $T_{volumreg} = 20$ sek. Dette gir parametersettet $K_p = 50.0$ og $T_i = 28.8$. Får da resultatet som vist i figurene 5.42 - 5.44. Reguleringen er nå mye bedre. Strømmingen, q_a , følger referansen, q_{ref} , bra og volumet, v_a , følger referansen, v_{ref} , bra. Fra figur 5.43 kan en se at ventilpådraget varierer hovedsaklig mellom 0.14 og 0.16. Ellers kan en også registrere at bidraget fra volumregulatoren i figur 5.43 er lite og følger en rolig kurve, med en liten topp i starten.

Tester også reguleringsparametrene for $T_{volumreg} = 25$ sek, som gir $K_p = 40.0$ og $T_i = 36.0$. Får da resultatet som vist i figurene 5.45 - 5.47. Reguleringen blir ikke bedre enn ved $T_{volumreg} = 20$ sek. Ved å sammenligne figur 5.43 og 5.46, ser en at ventilpådraget ved $T_{volumreg} = 20$ sek varierer mindre, og har en roligere profil enn ved $T_{volumreg} = 25$ sek. I tillegg synes også strømningsmålingen, q_a , å bruke litt lenger tid i innsvinningsfasen ved $T_{volumreg} = 25$ sek enn ved $T_{volumreg} = 20$.

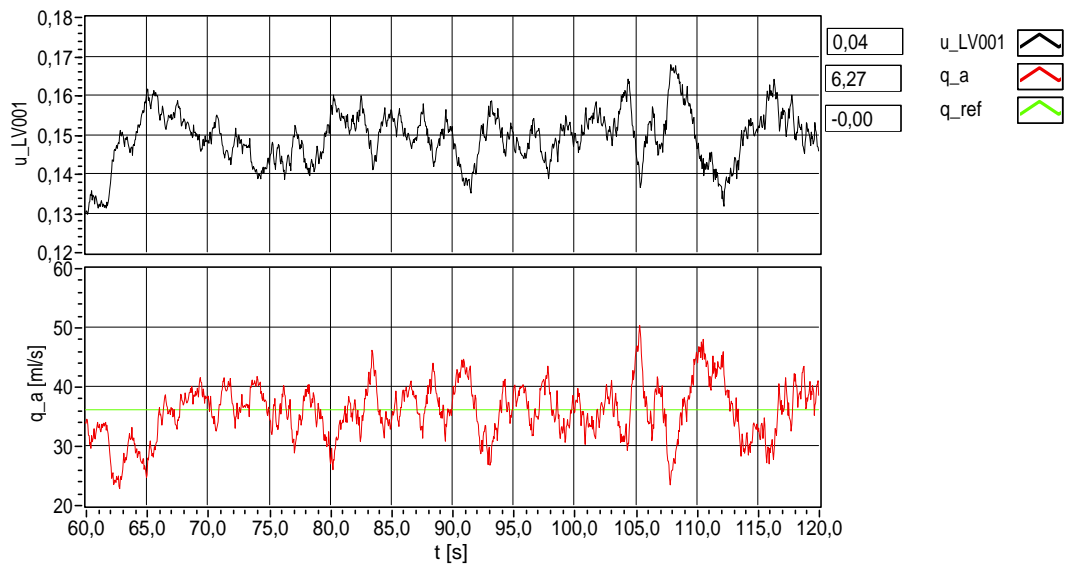
På bakgrunn av analysene gjort i dette kapitlet velger en å bruke settet for $T_{volumreg} = 20$ sek i denne oppgaven, nemlig

$$K_p = 50.0$$

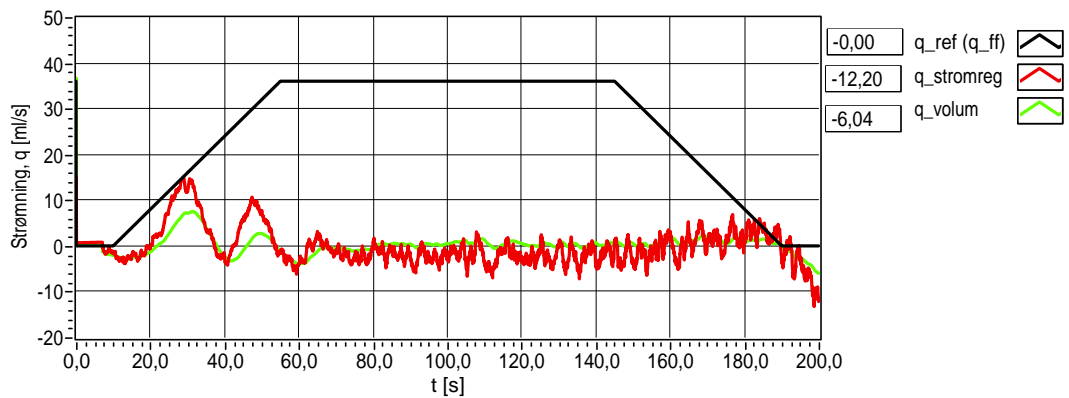
$$T_i = 28.8$$



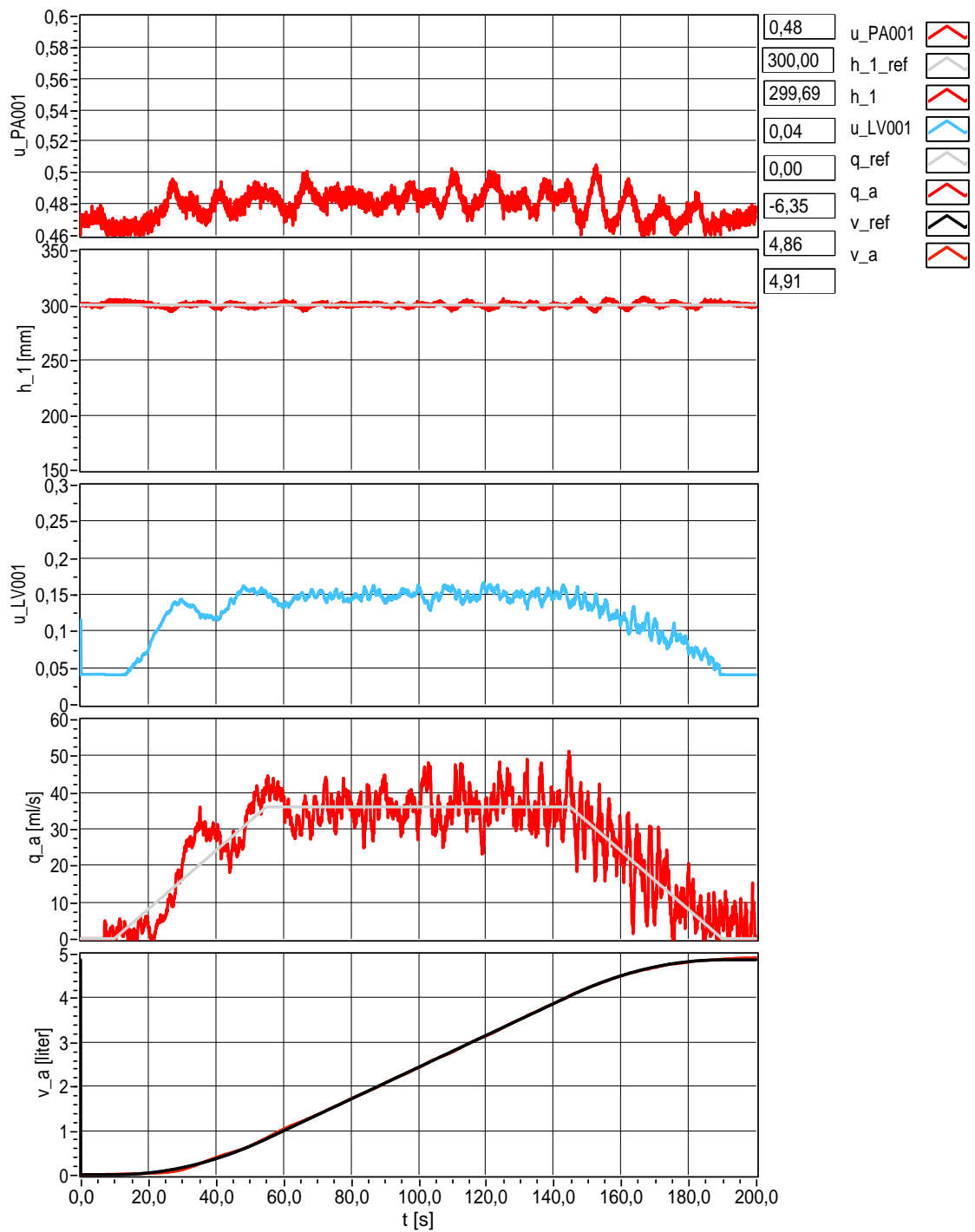
Figur 5.36: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 10$ sek.



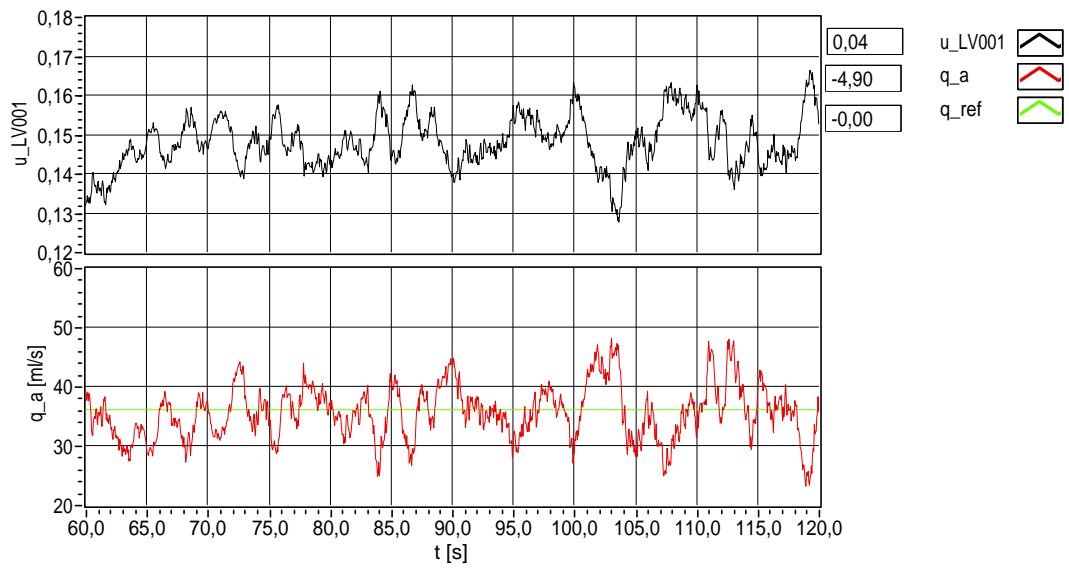
Figur 5.37: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 10$ sek.



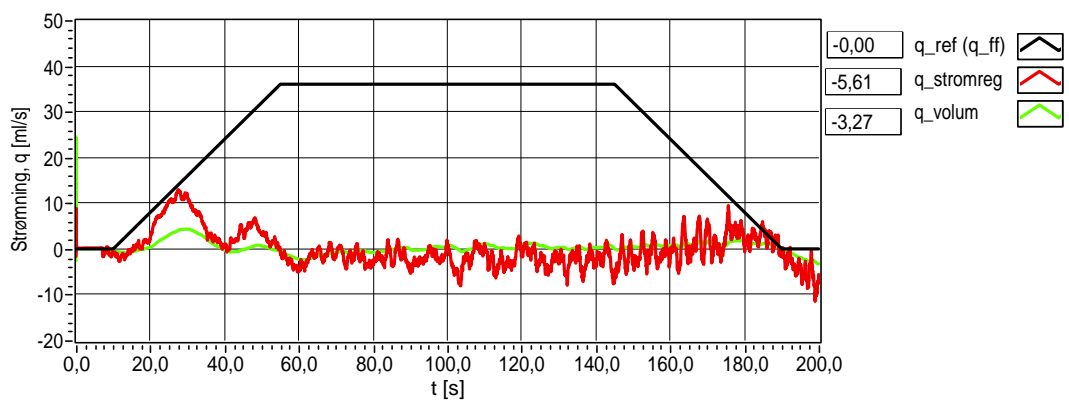
Figur 5.38: Bidrag fra volumregulator når $T_{volumreg} = 10$ sek. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).



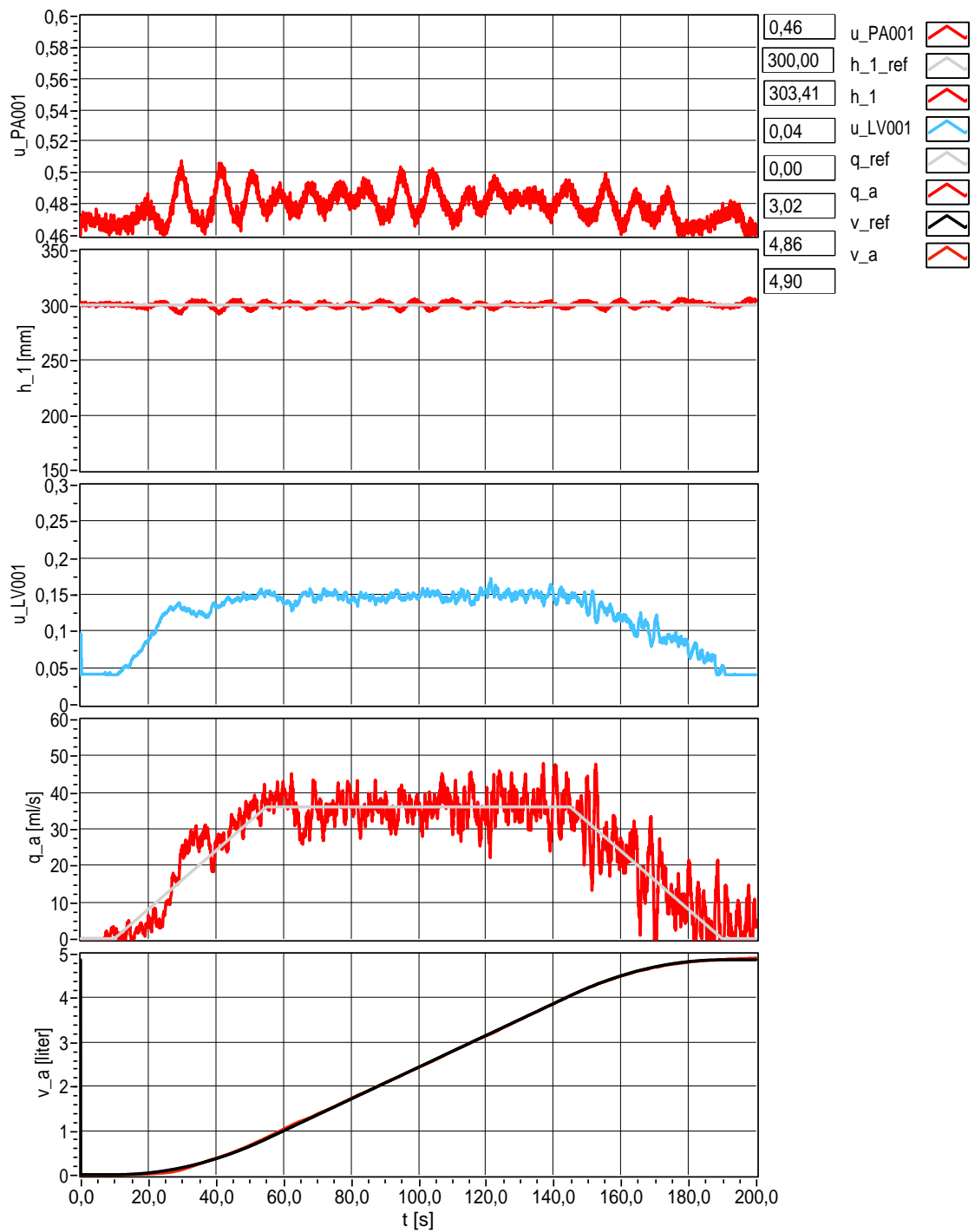
Figur 5.39: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 15$ sek.

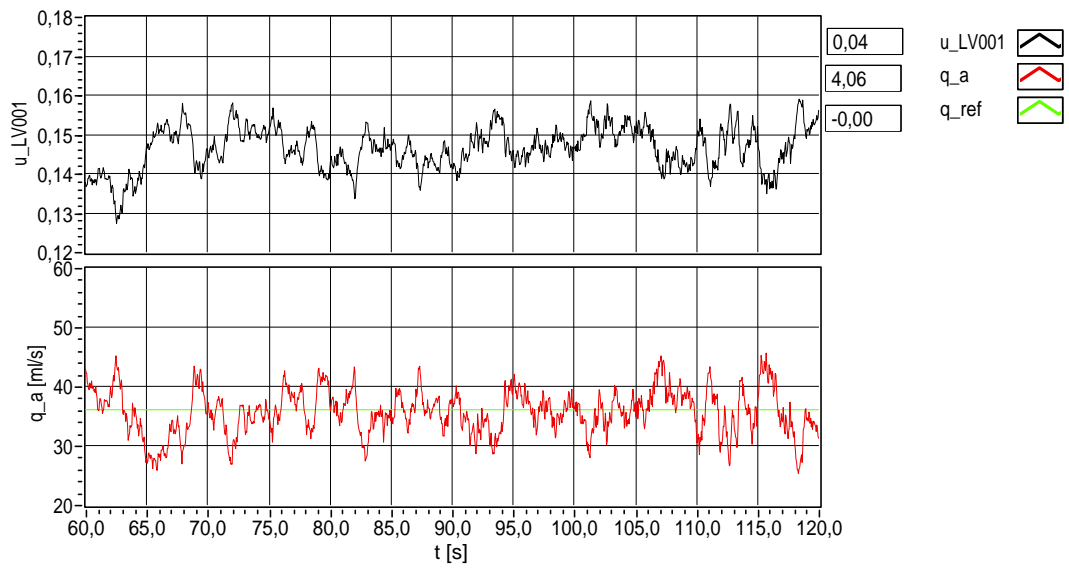


Figur 5.40: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 15$ sek.

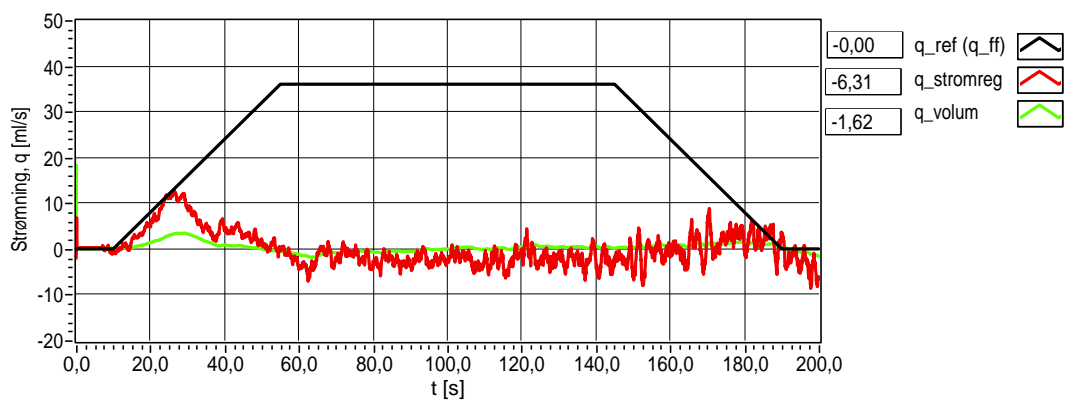


Figur 5.41: Bidrag fra volumregulator når $T_{volumreg} = 15$ sek. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

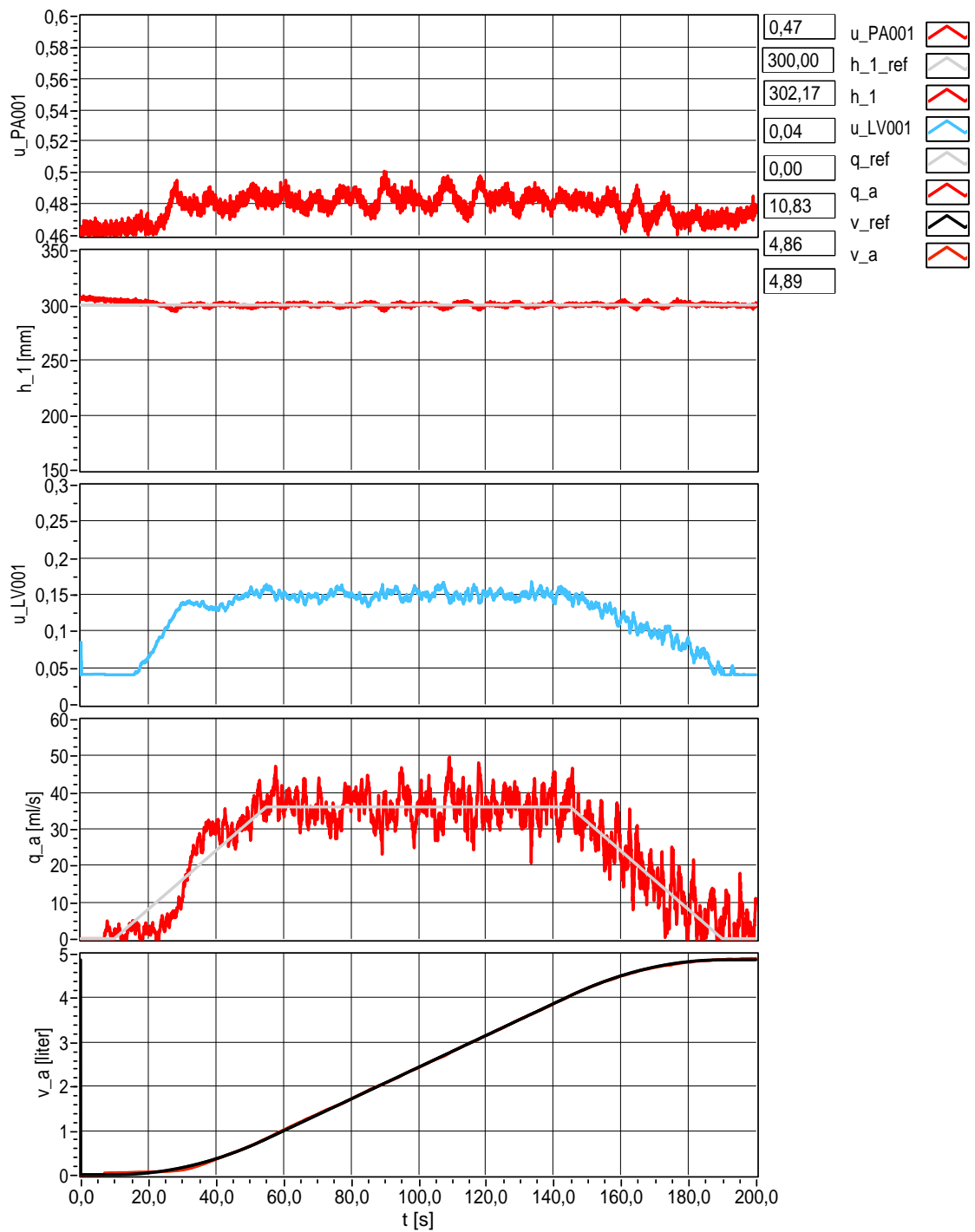
Figur 5.42: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 20$ sek.

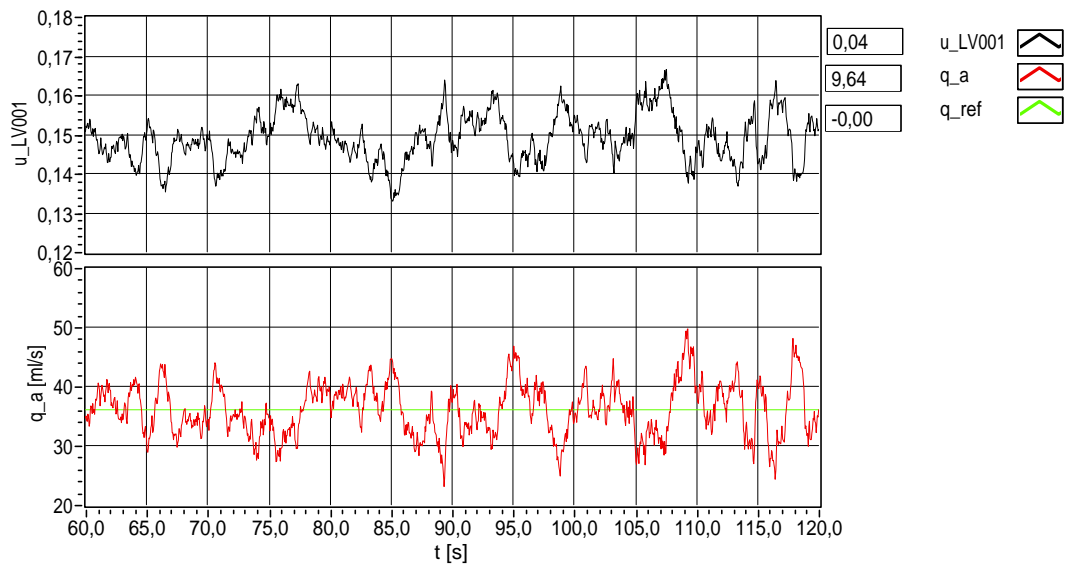


Figur 5.43: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 20$ sek.

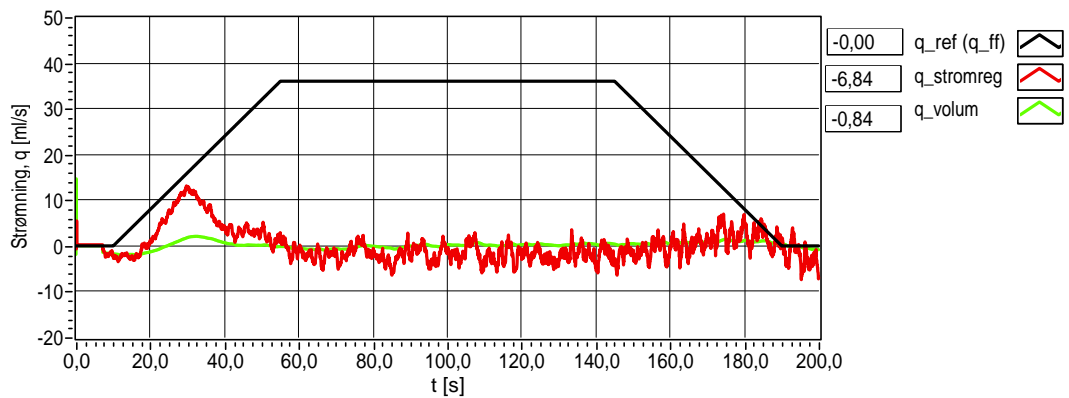


Figur 5.44: Bidrag fra volumregulator når $T_{volumreg} = 20$ sek. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

Figur 5.45: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 25$ sek.



Figur 5.46: Reguleringsforløp når $T_{volumreg} = 25$ sek.



Figur 5.47: Bidrag fra volumregulator når $T_{volumreg} = 25$ sek. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

5.7 Kalman-filter

Dersom en ønsker en best mulig regulering av systemet, er det viktig å ha god kontroll over reguleringsventilen. Reguleringsventilen styrer som kjent strømmingen av tilsetningsstoffet. Hvor stor denne strømmingen er, bestemmes av ventilkarakteristikken, $f(u)$, og differensialtrykket over ventilen. I innledningen i kapittel 4.1 er det vist at strømmingen, q_v , kan beskrives ved følgende ventilligning;

$$q_v = q_{max} \cdot f(u) \quad (5.41)$$

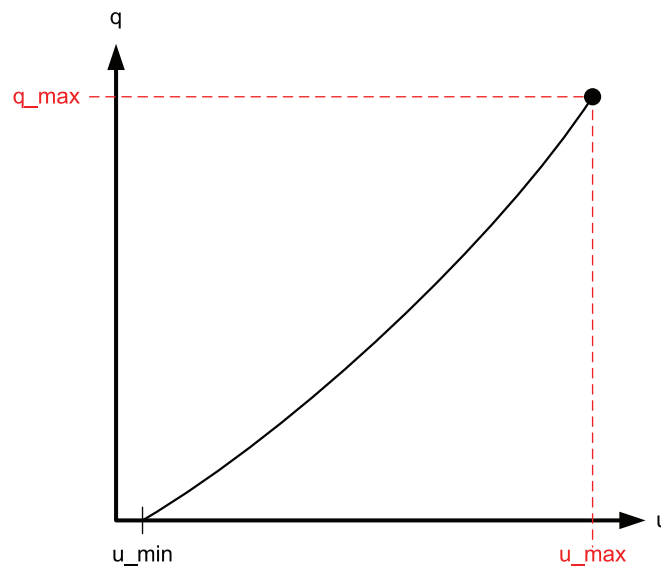
hvor ventilkarakteristikken, $f(u)$, i kapittel 4.1 ble funnet til å være på følgende form:

$$f(u) = \frac{1}{(1 - u_{min})} (u - u_{min})$$

Ligning (5.41) kan dermed skrives på følgende form:

$$q_v = \frac{q_{max}}{(1 - u_{min})} (u - u_{min}) \quad (5.42)$$

Som forklart tidligere, blir ikke differensialtrykket over ventilen målt. En vet derfor ikke maksimal strømming gjennom ventilen. En skal derfor i denne oppgaven **estimere** parameteren q_{max} som inngår i ligning (5.42). Denne parameteren sier indirekte hvor stort differensialtrykket er over ventilen. q_{max} brukes videre til å bestemme makspunktet i den inverse ventilligningen, vist i figur 5.48 og ligning (5.43) utledet i kapittel 5.4.



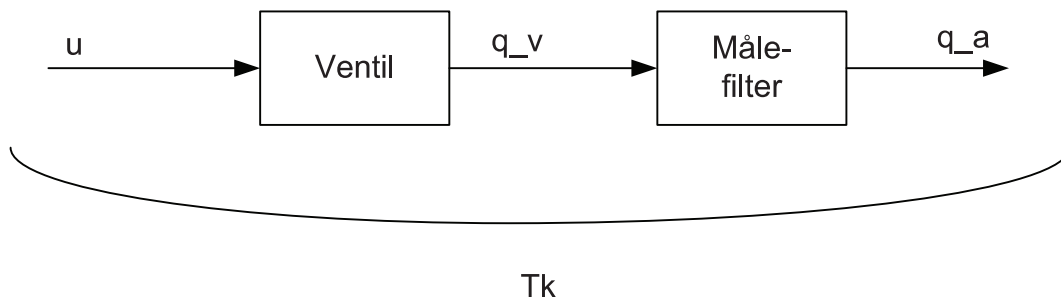
Figur 5.48: Skisse som viser hvordan ventilpådraget, u , blir beregnet ut fra invers ventilkarakteristikk og q_{max} . q_{max} estimeres av Kalman-filteret.

$$u = \frac{q}{q_{max}} (1 - u_{min}) + u_{min} \quad (5.43)$$

Resten av dette kapittelet tar for seg hvordan Kalman-filteret er utviklet. Starter med å finne prosessmodellen som skal brukes i Kalman-filteret.

5.7.1 Utvikling av prosessmodell

Kalman-filteret tar som kjent utgangspunkt i en matematisk modell av prosessen. Denne modellen kan finnes ved å ta utgangspunkt i figur 5.49, kapittel 3.3.2 og 3.3.3.



Figur 5.49: Illustrasjon over strømningsmåling, målefilter og ventil.

Tidskonstanten T_k gitt i figuren ovenfor er en sum av flere tidskonstanter. Denne er gitt av tidskonstanten til lavpass-filteret ($T_f = 1.0$ sek), tidskonstanten *mean*-funksjonen ($T_M = 0.85$ sek), ventilkonstanten ($T_v = 0.5$ sek) og transportforsinkelsen ($\tau = 1.0$ sek). Tilsammen gir dette en tidskonstant på $T_k = 3.35$ sek. I en tidlig fase av dimensjoneringen ble det bruk en mindre tidskonstant, $T_k = 3.1$ sek, for Kalman-filteret. Resultatene i dette kapittelet er altså basert på tidskonstant $T_k = 3.1$ sek.

Dynamikken til strømningsmålingen, q_a , kan beskrives ved følgende modell:

$$\dot{q}_a = -\frac{1}{T_k}q_a + \frac{1}{T_k}q_v \quad (5.44)$$

hvor q_v er den matematiske modellen for ventilen, vist i ligning (5.43) innledningsvis. Setter uttrykket for q_v inn i ligning (5.44) og får da:

$$\dot{q}_a = -\frac{1}{T_k}q_a + \frac{1}{T_k} \left(\frac{q_{max}}{(1 - u_{min})} \cdot (u - u_{min}) \right) \quad (5.45)$$

Ved å velge $x_1 = q_a$ og $x_2 = q_{max}$ kan følgende tilstandsrommodell settes opp:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_k}x_1 + \frac{1}{T_k} \left(\frac{x_2}{(1 - u_{min})} (u - u_{min}) \right) + v_1 \equiv \underline{f}_1(x_1, x_2, u, v_1) \quad (5.46)$$

$$\dot{x}_2 = 0 + v_2 \equiv \underline{f}_2(x_2, v_2) \quad (5.47)$$

$$y = x_1 + w \equiv \underline{g}(x_1, w) \quad (5.48)$$

der v_1 og v_2 er prosessstøy/modellfeil og w er målestøy. Denne modellen er ulineær, og må dermed lineariseres. Finner *Jakobi*-matrisene ved å følge oppskriften i kapittel 3.3.3:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_k} & \frac{u-u_{min}}{T_k(1-u_{min})} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_2}{T_k(1-u_{min})} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial v_1} & \frac{\partial f_1}{\partial v_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial v_1} & \frac{\partial f_2}{\partial v_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Når en nå har systemmatrisene A, B, C og D, må en videre diskretisere prosessmodellen slik at den kan kjøres i sann tid på datamaskinen. Finner systemmatrisene Φ , Γ og Ω ut fra uttrykkene gitt i kapittel 3.3.5:

$$\begin{aligned}
 \Phi &= I + AT_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{T_s}{T_k} & \frac{T_s}{T_k} \frac{u-u_{min}}{1-u_{min}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s}{T_k} & \frac{T_s}{T_k} \frac{u-u_{min}}{1-u_{min}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \Gamma &= BT_s = \begin{bmatrix} \frac{x_2}{T_k(1-u_{min})} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{T_k} \frac{x_2}{1-u_{min}} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \Omega &= CT_s = \begin{bmatrix} T_s & 0 \\ 0 & T_s \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Målematrisen, D, endrer seg ikke ved diskretisering, slik at denne er den samme som vist øverst på siden. Parameteren T_s , er her sampleintervallet i reguleringssystemet. Denne er konstant, og lik 0.05 sek, jfr. kapittel 5.1.

5.7.2 Observerbart system

For å undersøke om systemet er observerbart, tas det utgangspunkt i matrisen Q_0 . Denne er bestemt av matrisene A og D (jfr. kapittel 3.3.4) og er gitt ved:

$$Q_0 = [D^T \quad A^T D^T]$$

for et system med $n = 2$ tilstander.

D^T er kjent fra før, mens $A^T D^T$ må regnes ut:

$$A^T D^T = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_k} & 0 \\ \frac{u-u_{min}}{T_k(1-u_{min})} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_k} \\ \frac{u-u_{min}}{T_k(1-u_{min})} \end{bmatrix}$$

Setter inn i Q_0 og får da følgende matrise:

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{T_k} \\ 0 & \frac{u-u_{min}}{T_k(1-u_{min})} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

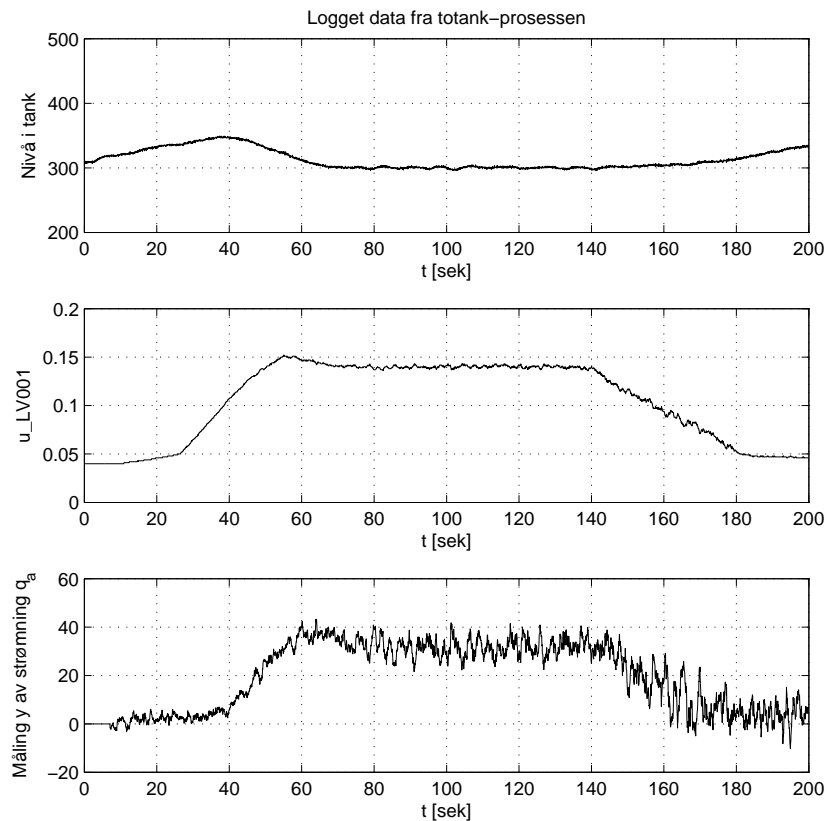
Finner determinanten:

$$DETQ_0 = \frac{u - u_{min}}{T_k(1 - u_{min})} \quad (5.50)$$

Systemet er som kjent observerbart dersom $DET \neq 0$. Det vil si at dette systemet er observerbart dersom $u > u_{min}$ og $T_k \neq 0$. Dersom systemet har stor T_k -verdi og små u -verdier vil systemet være **lite observerbart**. Det er dette som er problemet for systemet i denne oppgaven. Mer om dette i de etterfølgende kapitlene.

5.7.3 Valg av støymatriser, Q og R

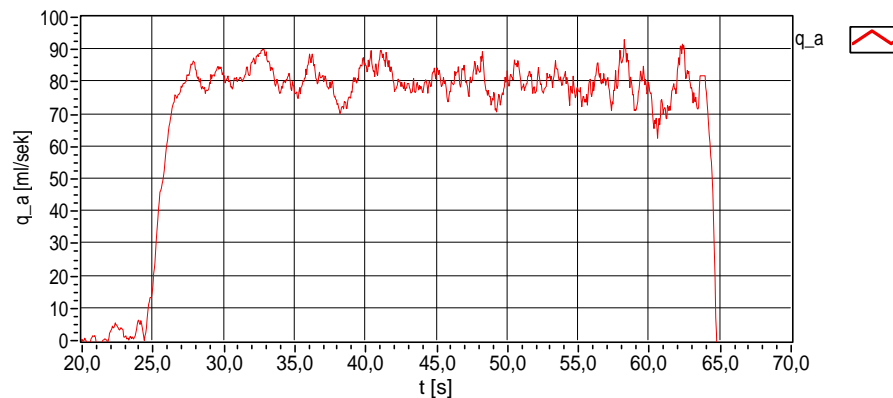
For at Kalman-filteret skal kunne estimere optimale estimater, er det viktig at dimensjoneringen av støymatrisene, Q og R , er riktig. I dette kapitlet skal en se på hva disse matrisene har å si for Kalman-filterets oppførsel. For å gjøre dette er det tatt utgangspunkt i et logget reguleringsforløp fra testanlegget, vist i figur 5.50. I dette forløpet har en logget nivå i tank 1, h_1 , ventilpådrag, u_{LV001} , og strømningsmåling, q_a .



Figur 5.50: Reguleringsforløp brukt i det generelle Kalman-filter.

Måleserien brukes så i et generelt Kalman-filter til å finne de beste verdiene til koeffisientene i Q og R . Koden til det generelle Kalman-filteret er utviklet i Matlab, og er vist i vedlegg C. Koden er basert på algoritmen vist i kapittel 3.3.7.

Den enkleste metoden for å stille inn støymatrisene er å først finne R , for så å bruke diagonalelementene i Q som tuningsparametere [2]. Målestøymatrisen, R , settes ofte tilnærmet lik variansen til målestøyen i systemet. I dette systemet er variansen funnet ut fra en måleserie av q_a , vist i figur 5.51. q_a er her målt ved konstant nivå i tank 1, og med et ventilpådrag på $u_{LV001} = 0.2$. Maksimal strømming gjennom ventilen er i dette tilfellet funnet til å være ≈ 300 ml/s. Det er denne parameteren Kalman-filteret skal estimere.



Figur 5.51: Målestøy i strømningsmåling.

Ved å ta utgangspunkt i datapunktene mellom $t = 30$ og $t = 60$ kan en regne ut gjennomsnittet μ , standardavvik σ , og variansen σ^2 , ut fra følgende ligninger:

$$\mu = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{n}, \quad \sigma^2 = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(x_i - \mu)^2}{n} \quad (5.51)$$

hvor x_i er datapunkt nr i , og n er antall datapunkter.

Funksjonen *Std Deviation and Variance.vi* i LabVIEW benytter disse ligningene til å beregne standardavviket og variansen. Får da at $\sigma = 4.16$ ml/s og $\sigma^2 = 17.32$ ml/s. Basert på disse resultatene bestemmes R lik:

$$R = 4^2 = 16 \text{ [ml/s]} \quad (5.52)$$

Når en nå har størrelsesbestemt R , er det koeffisientene i Q som brukes som tuningsparametre for Kalman-filteret. Diagonalelementene i Q er kovariansen til prosesstøyen, og denne er gitt ved:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

Koeffisientene q_1 og q_2 har benevnningen ml/s^2 , og disse kan være vanskelig å bestemme. Generelt kan en si at store verdier på q_1 og q_2 betyr at Kalman-filteret antar at det er mye

støy/feil i modellen, og filteret legger derfor mer vekt på målingen. Dersom q_1 og q_2 er små vil det si at modellen er bra, og modellen tillegges mer vekt enn målingen. Hvor stor vekt som tillegges modellen avhenger også av størrelsen på målestøymatrisen R . Ligningen nedenfor gir et bra bilde av hvordan *a posteriori*-estimatet beregnes.

$$\hat{\underline{x}}(k) = \underline{\bar{x}}(k) + K(k)(y(k) - D\underline{\bar{x}}(k)) \quad (5.54)$$

Dersom en studerer ligningene i algoritmen i kapittel 3.3.7, ser en at dersom Q er stor og R er liten, vil $K(k)$ bli stor. Da kan en se ut fra ligning (5.54) at Kalman-filteret legger stor vekt på ny måling $y(k)$, og liten vekt på *a priori*-estimatet $\underline{\bar{x}}(k)$. Dersom Q er liten og R er stor vil det være motsatt. For flere kommentarer til hvordan R og Q kan stilles inn, henvises det til [5].

Ønsker i denne oppgaven at Kalman-filteret ved oppstart skal klare å svinge seg inn til riktig estimat av q_{max} raskest mulig. Ønsker også at estimatet av q_{max} inneholder minst mulig støy. Antar at en har såpass mye informasjon om prosessen slik at en kan gjette en noenlunde riktig initialverdi på *a priori*-estimatet $\underline{\bar{x}}(0)$. Antar derfor at initialverdien til $\bar{x}_2(0)$ ligger innfor et intervall på ± 50 ml/s av riktig verdi på q_{max} , mens initialverdien til $\bar{x}_1(0)$ er lik null, da systemet starter i ro, det vil si uten noe strømming.

For å finne de beste verdiene på q_1 og q_2 er det brukt 'prøv-og-feil'-metoden. Resten av dette kapittelet vil sammenligne forskjellige verdier på q_1 og q_2 . I de følgende eksperimentene er det satt følgende initialverdier på $\underline{\bar{x}}(0)$ og $\bar{X}(0)$:

$$\bar{x}_1(0) = 0, \quad \bar{x}_2(0) = 250, \quad \bar{X}_{11}(0) = 1000, \quad \bar{X}_{22}(0) = 1000 \quad (5.55)$$

Små verdier på q_1 og q_2

Dersom en setter $q_1 = q_2 = 0$ vil Kalman-filteret tolke dette som at modellen er perfekt og derfor legge stor vekt på modellestimatene. Dette kan en se ut fra figur 5.52. Estimatet av strømmingen, q_{est} , er veldig glatt og bryr seg lite om målingen av q_a . Estimatet av q_{max} har en dupp i starten før den begynner å svinge seg inn til riktig verdi. Dette skyldes den trege målingen av q_a og at systemet her er lite observerbart. (små u -verdier og forholdsvis stor T_f . jfr. kapittel 3.3.4). En kan se at pådaget til ventilen begynner å øke rundt $t = 25$. Først ved $t \approx 35$ kan en registrere merkbare økninger i strømmingen q_a . På grunn av veldig lave q -verdier blir q_{max} -estimatet veldig glatt, men det tar til gjengjeld lang tid på å svinge seg inn. Estimatet svinger seg ikke inn før rundt $t = 140$. Figur 5.53 viser et utsnitt estimatet q_{max} .

Når q_1 og q_2 velges små kan en også registrere at verdiene på korreksjonsfaktorene K_{11} og K_{21} blir lave. Det samme gjelder estimatvariansen.

Store verdier på q_1 og q_2

Ved å velge q_1 og q_2 veldig store, f.eks $q_1 = q_2 = 1000000$, betyr det at en antar mye støy/feil i modellen. $q_1 = q_2 = 1000000$ vil si at en antar at standardavviket til prosesstøyen er $\sigma = 1000 \text{ ml/s}^2$. Ved bruk av disse q -verdiene får en responsen vist i figur 5.54 og 5.55. En ser nå at estimatet, q_{est} , tar mye mer hensyn til målingen q_a . Dette fører til at q_{est} blir mer støyfull. Det samme gjelder estimatet av q_{max} . q_{max} får i dette tilfelle ikke den samme innsvingningen som i forrige eksempel ved små q -verdier. Duppen i innsvingningsfasen er redusert ved at filteret bare tar hensyn til målingen. Dette kan en se ut fra profilen på korreksjonsfaktoren K_{21} som er lik 1 fra $t = 40$ til $t = 140$. Etter $t = 140$ synker korreksjonsfaktoren for å ta mer hensyn til modellen igjen. Dette på grunn av at strømmingen, q_a , går mot null, og fordi det er mye støy i målingene. q_{max} - estimatet svinger seg inn til riktig verdi rundt $t = 80$ sek og varierer med $\pm 10 \text{ ml/s}$ omkring riktig verdi.

'Optimale' verdier på q_1 og q_2

Basert på ønskene om raskest mulig innsvingning og at q_{max} - estimatet skal være mest mulig glatt, ble det funnet følgende verdier på q -verdiene: $q_1 = q_2 = 100$. Responsen er vist i figur 5.56 og 5.57. q_{max} - estimatet svinger seg inn til riktig verdi ved $t = 70$ sek og varierer med $\pm 5 \text{ ml/s}$ omkring riktig verdi.

Fra $t = 140$ sek kan en se at q_{max} - estimatet begynner å synke. Dette er på grunn av at systemet er lite observerbart (små u -verdier og forholdsvis stor T_f , jfr. kapittel 3.3.4), og at modellen brukt i Kalman-filteret er noe feil.

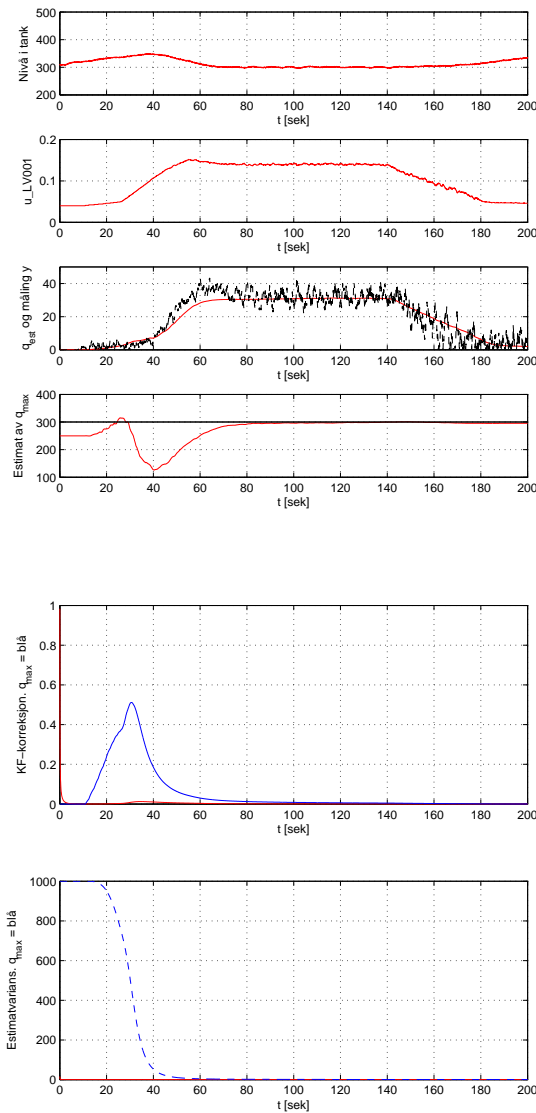
Verdien til K_{11} holder seg tilnærmet konstant lik 0.1, mens K_{21} varierer noe, med blant annet en merkbar topp på 0.4 ved $t = 40$.

Større verdier på T_k

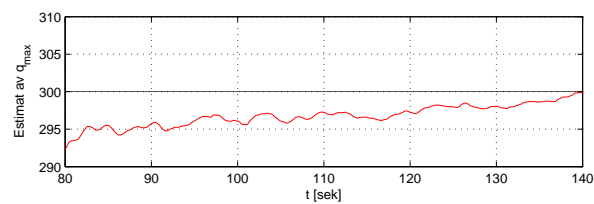
Det er også gjort noen tester med større verdier på parameteren T_k . Estimaten vist i figurene 5.52 - 5.57 kan tyde på at T_k er satt for liten. Prøver derfor å øke parameteren til $T_f = 5$ og 10 sek. Bruker i disse forsøkene $q_1 = q_2 = 100$. Responsene er vist i figurene 5.58 - 5.61.

Ved å studere responsene ser en at q_{max} - estimatet nå svinger seg raskere inn til virkelig verdi. Ved $T_k = 5$ svinger estimatet seg inn ved $t \approx 65$, mens ved $T_k = 10$ svinger det seg inn ved $t \approx 60$. Dette er på grunn av at filteret her ikke får den samme duppen i q_{max} - estimatet som det får ved $T_k = 3.1$. Dette er fordi at filteret nå antar at målingen er så treg som den faktisk viser seg å være. q_{max} - estimatet er til gjengjeld mer støyfulle, og avviket i slutten er nå $\approx 20 \text{ ml/s}$.

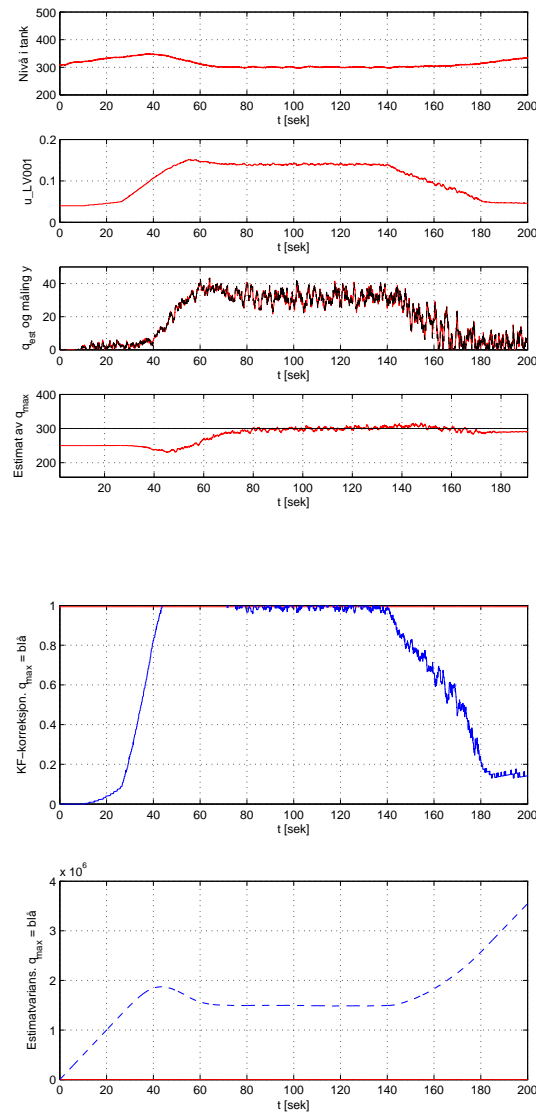
Testene med større verdi på T_k ble gjort i etterkant av at resultatene i kapittel 7 ble funnet. Det betyr at resultatene i resten av oppgaven er basert på en T_k - verdi lik 3.1 sek. Resultatene i figurene 5.58 - 5.61 viser at estimatene blir noe bedre ved bruk av en større verdi på T_k .



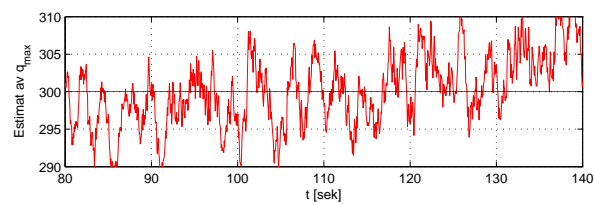
Figur 5.52: $q_1 = q_2 = 0$ og $T_k = 3.1$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Deretter vises korreksjonsfaktorene og estimatvariansen.



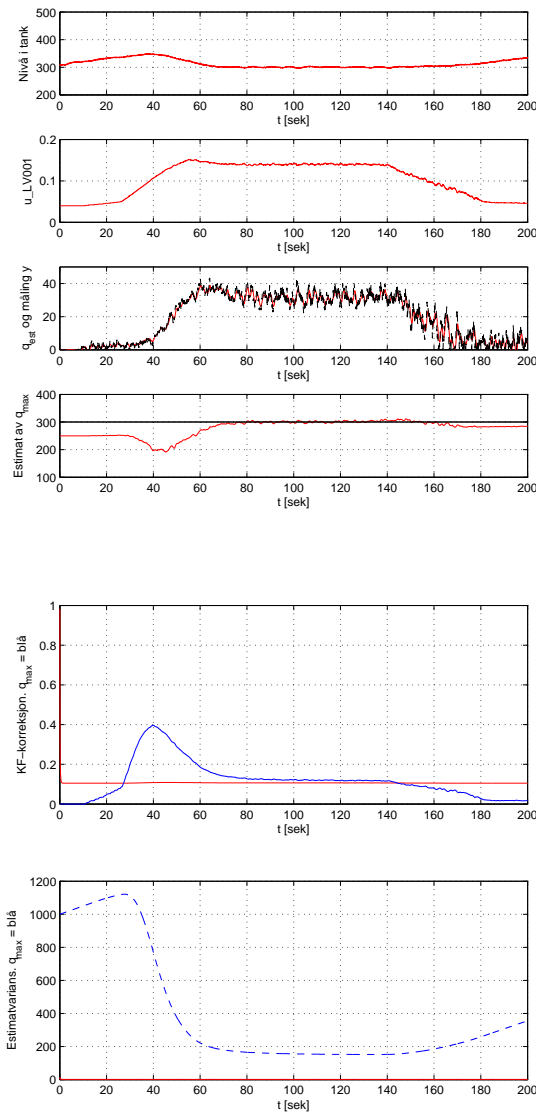
Figur 5.53: Utsnitt fra estimat av q_{max} ved $q_1 = q_2 = 0$ og $T_k = 3.1$



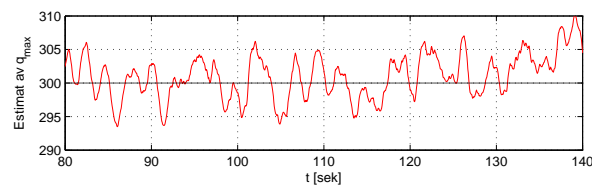
Figur 5.54: $q_1 = q_2 = 1000000$ og $T_k = 3.1$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Deretter vises korreksjonsfaktorene og estimatvariansen.



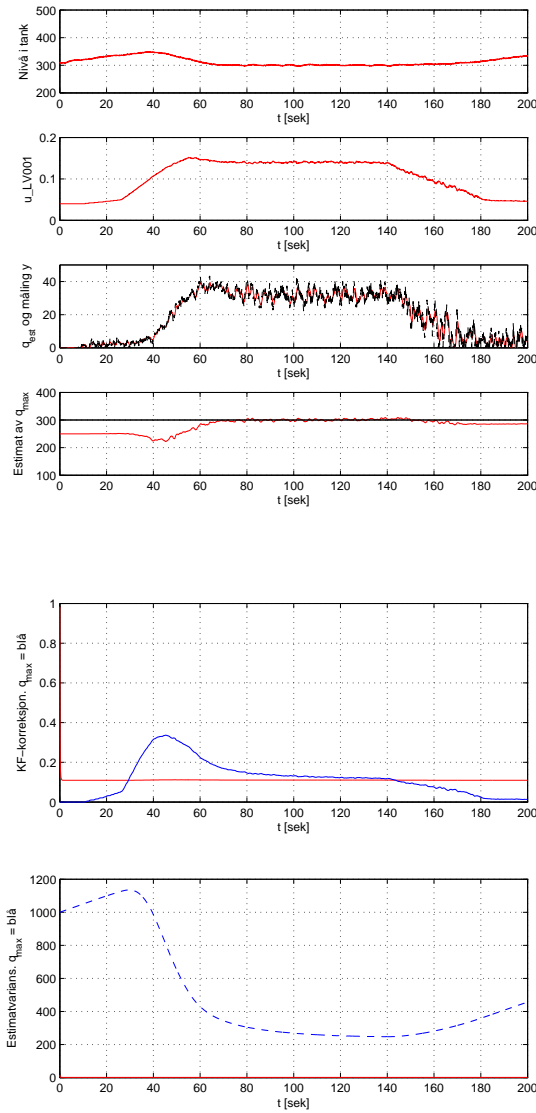
Figur 5.55: Utsnitt fra estimat av q_{max} ved $q_1 = q_2 = 1000000$ og $T_k = 3.1$.



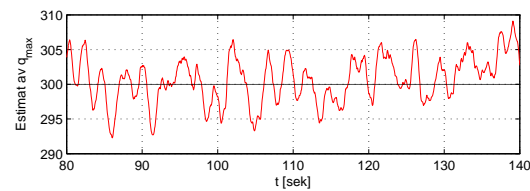
Figur 5.56: $q_1 = q_2 = 100$ og $T_k = 3.1$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Deretter vises korreksjonsfaktorene og estimatvariansen.



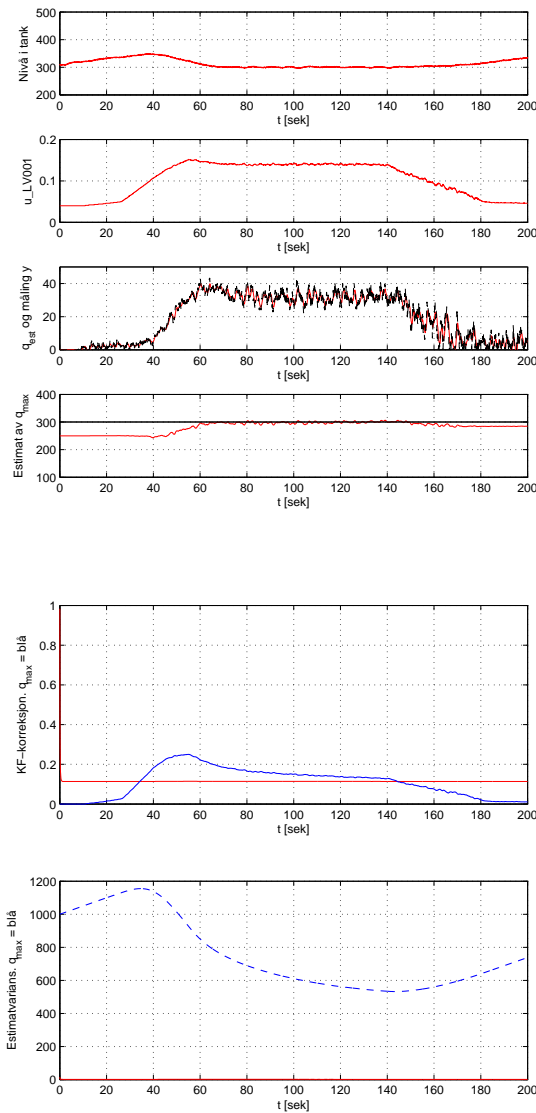
Figur 5.57: Utsnitt fra estimat av q_{max} ved $q_1 = q_2 = 100$ og $T_k = 3.1$.



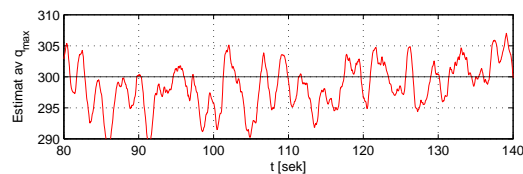
Figur 5.58: $q_1 = q_2 = 100$ og $T_k = 5$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Deretter vises korreksjonsfaktorene og estimatvariansen.



Figur 5.59: Utsnitt fra estimat av q_{max} ved $q_1 = q_2 = 100$ og $T_k = 5$.



Figur 5.60: $q_1 = q_2 = 100$ og $T_k = 10$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Deretter vises korreksjonsfaktorene og estimatvariansen.



Figur 5.61: Utsnitt fra estimat av q_{max} ved $q_1 = q_2 = 100$ og $T_k = 10$.

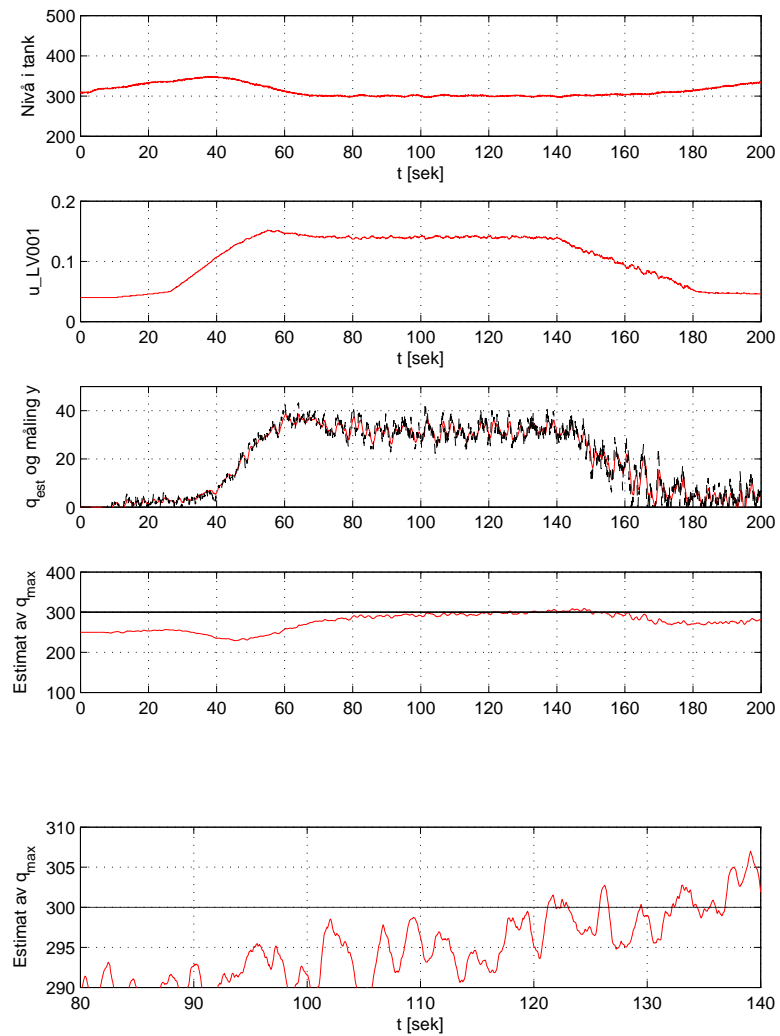
5.7.4 Valg av korreksjonsfaktorer til stasjonært Kalman-filter

Ved å studere resultatene ved optimale tuningsparametre, Q og R , i figur 5.56 og 5.57, ser en at profilen på korreksjonsfaktorene K_{11} og K_{21} er relativt konstante. K_{11} er konstant hele tiden, og lik ≈ 0.11 . K_{21} varierer noe mer, med en topp rundt $t = 40$. Fra $t = 80$ til $t = 140$ er også K_{21} konstant, og lik ≈ 0.11 . Basert på disse observasjonene kan en konkludere med at det generelle Kalman-filteret kan forenkles til et stasjonært Kalman-filter, hvor en har konstante verdier på korreksjonsfaktorene. Dette er ønskelig siden en da får en mye enklere algoritme (jfr. kapittel 3.3.7 og 3.3.8) som fører til et mindre krav til prosessorkraft for beregningene. En ulempe med et stasjonært Kalman-filter er at det gir litt tregere innsvingning i starten.

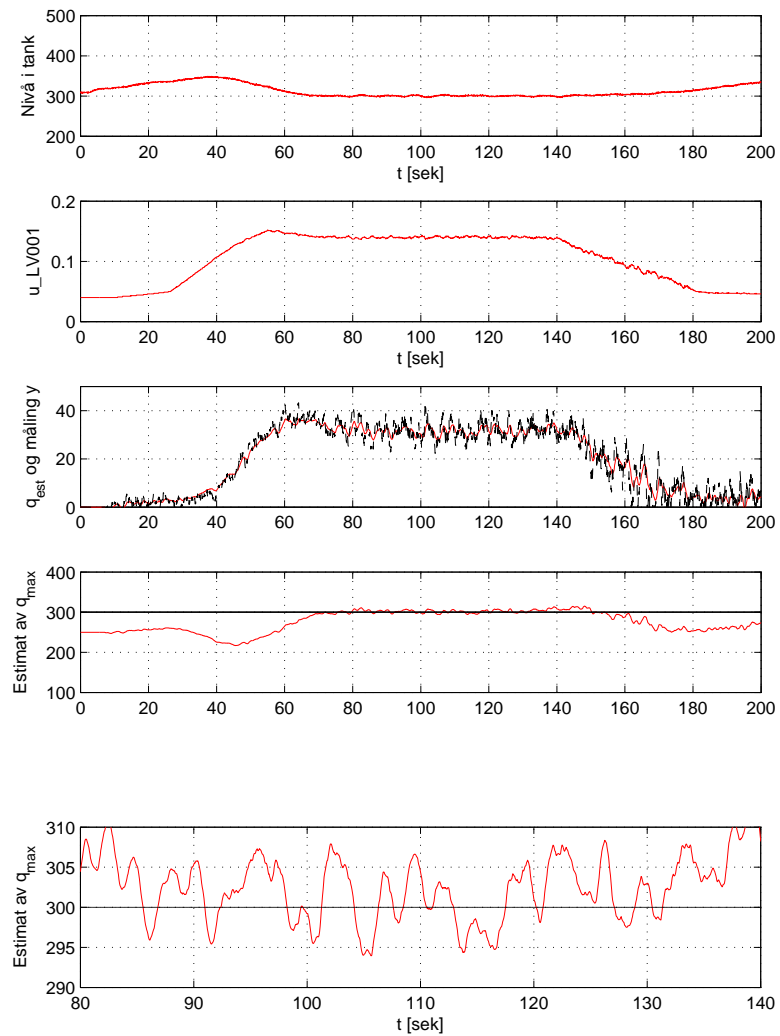
Ut fra observasjonene gjort i avsnittet ovenfor velger en å bruke $K_{11} = K_{21} = 0.1$ som et utgangspunkt i det stasjonære filteret. T_k er satt lik 3.1 sek. Det gir responsen som vist i figur 5.62. Responsen er ikke så ulik responsen i figur 5.56. Den største forskjellen er at det stasjonære filteret bruker lenger tid på å svinge seg inn, nærmere bestemt 120 sekund tar det før det stasjonære filteret når $q_{max} = 300$. Det stasjonære filteret har også et større avvik enn det generelle i slutten av reguleringsforløpet.

Utfører flere tester med forskjellige sett med korreksjonsfaktorer, og ender til slutt opp med at $K_{11} = 0.05$ og $K_{21} = 0.1$ gir det beste resultatet. Responsen er vist i figur 5.63. Filteret svinger seg her inn etter rundt 70 sekund, som er ganske likt det generelle filteret. Duppen i q_{max} - estimatet er også redusert i det stasjonære filteret i forhold til det generelle. Avviket i slutten av forløpet er derimot noe større for det stasjonære filteret, nærmere bestemt ca 40 ml/s mot ca 20 ml/s i det generelle filteret.

Basert på testene utført på det generelle og det stasjonære Kalman-filteret velges det å bruke et stasjonært filter med korreksjonsfaktorer $K_{11} = 0.05$ og $K_{21} = 0.1$ i denne oppgaven. En får da bra og glatte estimat, og en slipper unna med en enklere algoritme sammenlignet med det generelle filteret.



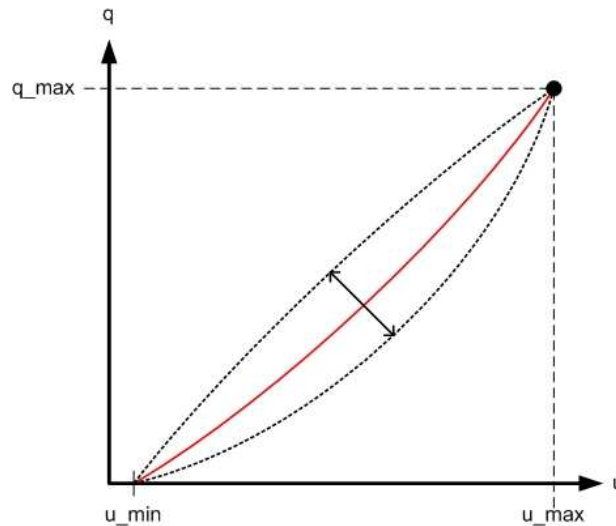
Figur 5.62: $K_{11} = K_{21} = 0.1$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Figuren nedenfor viser et utsnitt av q_{max} - estimatet



Figur 5.63: $K_{11} = 0.05$ og $K_{21} = 0.1$. Figuren øverst viser deler av prosessen i form av pådrag til ventil u_{LV001} , og måling q_a , samt estimatene q_{est} og q_{max} . Figuren nedenfor viser et utsnitt av q_{max} - estimatet

5.7.5 Bruk av Kalman-filter til å bestemme form på ventilkarakteristikk

Ved å studere figur 4.5 i kapittel 4.1, kan det tenkes at ventilkarakteristikken følger en andregradsfunksjon. I tillegg er det også mulig at formen på ventilkarakteristikken er tidsvarierende, som vist i figur 5.64. Årsaken til dette, kan være at flere tankbiler er inne til tanking samtidig. Dette samt andre forhold i systemet kan påvirke formen på karakteristikken.



Figur 5.64: Endring av formen på ventilkarakteristikk, $f(u)$.

I denne oppgaven vet en fra eksperimentet i kapittel 4.1 at formen på ventilkarakteristikken endrer seg noe ved ulike differensialtrykk over ventilen. Denne endringen kan detekteres ved hjelp av et Kalman-filter, for eksempel på formen:

$$q_v = K_{v1}du + K_{v2}du^2 \quad (5.56)$$

der du er pådraget gitt ved $u - u_{\min}$. K_{v1} er en linearitetsparameter og K_{v2} er en andregradsparameter. Disse parametrene kan estimeres med et Kalman-filter på visse vilkår. En bruker da samme modell som vist i kapittel 5.7.1, bare en her bytter ut modellen for q_v med ligning (5.56). I tillegg legger en til en ekstra tilstand, x_3 . Får da følgende modell:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{T_k}x_1 + \frac{1}{T_k}(x_2du + x_3du^2) + v_1 \\ \dot{x}_2 &= 0 + v_2 \\ \dot{x}_3 &= 0 + v_3 \\ y &= x_1 + w \end{aligned}$$

hvor da x_2 er linearitetsparameteren og x_3 er andregradsparameteren. Problemet med dette systemet er at det ikke er observerbart, jfr. kapittel 3.3.4. Dette kan vises ved å beregne

Q_0 -matrisen. Finner Q_0 til å være:

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{T_k} & \frac{1}{T_k^2} \\ 0 & \frac{du}{T_k} & -\frac{du}{T_k^2} \\ 0 & \frac{du^2}{T_k} & -\frac{du^2}{T_k^2} \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

Beregner så determinanten til Q_0 :

$$\text{DET}Q_0 = 1 \cdot \left[-\frac{du^3}{T_k^3} - \left(-\frac{du^3}{T_k^3} \right) \right] = 0 \quad (5.58)$$

$\text{DET} Q_0 = 0$ betyr at systemet ikke er observerbart. Det vil si at en trenger mer pådragsaktivitet for å få filteret til fungere, noe som kan være vanskelig å gjennomføre. I denne oppgaven har en også en strømningsmåling som er veldig treg og støyfull. På grunn av dette, vil dette Kalman-filteret sannsynligvis være vanskelig å realisere i denne oppgaven.

6 Implementering i LabVIEW

For å realisere reguleringsystemet beskrevet i kapittel 5, er det valgt å bruke LabVIEW som programmeringsverktøy. Grunnen til at LabVIEW er brukt, er fordi en kjenner til programmet fra bacheloroppgaven utført våren 2008, jfr. [8]. Fordelen med LabVIEW er at det har en egen simuleringsmodul, kalt *Control & Simulation Module*, som ligner veldig på Matlab Simulink. I tillegg har en også muligheten til å presentere resultatene i et grafisk grensesnitt. En får derfor samme resultat som ved bruk av Simulink, og i tillegg et grafisk grensesnitt som presenterer resultatene.

Som forklart i kapittel 2.4 og vist i figur 2.11, består LabVIEW av to deler, nemlig et frontpanel og et blokkdiagram. Frontpanelet inneholder det grafiske grensesnittet hvor resultatene fra reguleringsystemet blir presentert, mens blokkdiagrammet inneholder koden som beregner resultatene. Dette kapitlet tar for seg hvordan frontpanelet og blokkdiagrammet ble utviklet.

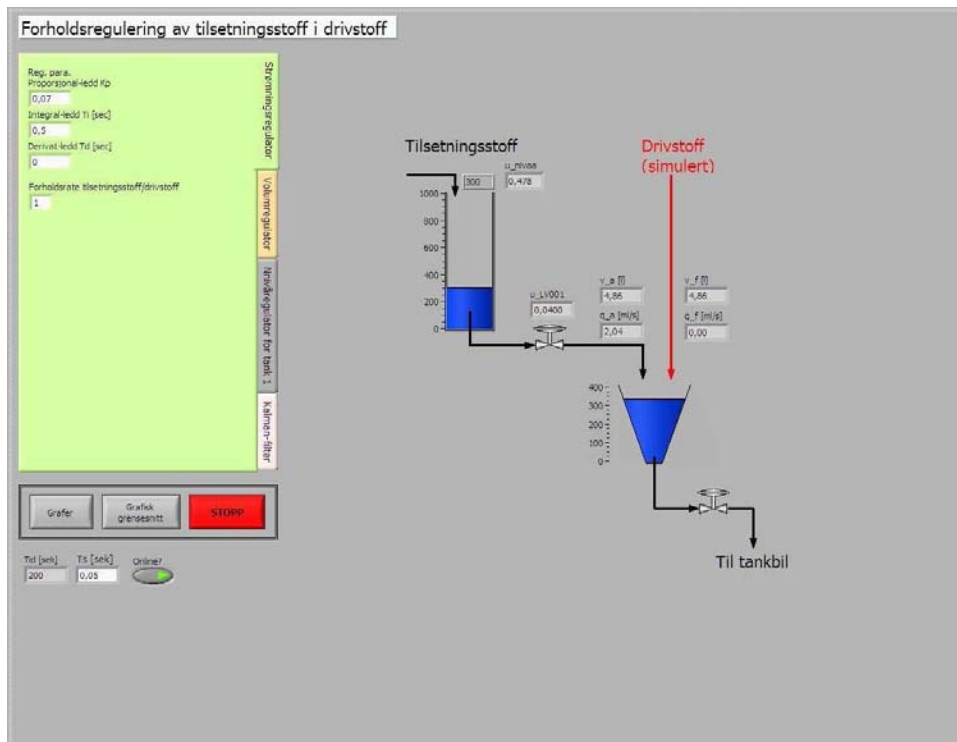
6.1 Grafisk grensesnitt i LabVIEW

Frontpanelet i LabVIEW ble utviklet med utgangspunkt i to forskjellige visninger; den ene visningen er en modell av prosessen med tilhørende prosessmålinger, vist i figur 6.1, mens den andre visningen er de viktigste variablene plottet i grafer, vist i figur 6.2.

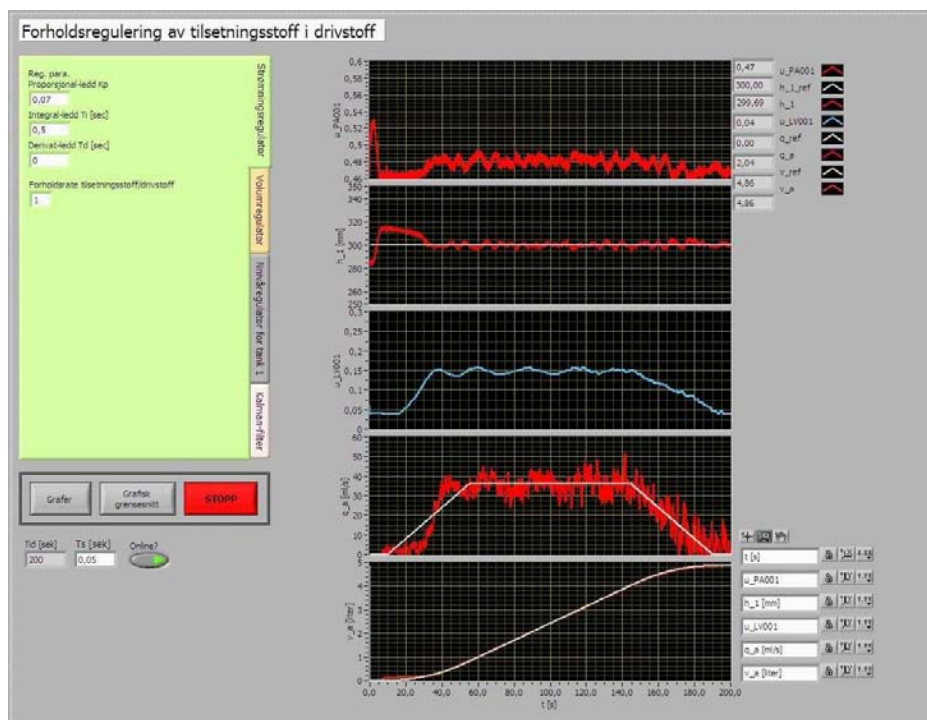
Som en kan se fra figur 6.1 og 6.2, er det plassert en tabulator (den store boksen) til venstre i bildet. Denne tabulatoren består av fire sider hvor en kan stille inn reguleringsystemet. Hver enkelt side er vist i figur 6.3. I siden for strømningsregulatoren er det mulig å bestemme hvordan forholdet tilsetningsstoff/drivstoff skal være. Her er den satt lik 1, det vil si at det skal være like mye tilsetningsstoff som drivstoff i blandingen. Valget av denne verdien har ikke så mye å si i denne oppgaven, da strømmingen med drivstoff er en simulert strømning.

På siden til Kalman-filteret, vist nede til høyre i figur 6.3, må en gi inn informasjon om prosessmodellen. For å vite hvilke verdier en bør bruke her, refereres det til kapittel 5.7.

Fra figur 6.1 og 6.2 kan en også registrere at en det er en *online?*-knapp nede til venstre i bildet. Denne brukes til å velge om en skal regulere den virkelige prosessen eller en modell av prosessen. For mer informasjon om modell av testanlegget, refereres det til kapittel 3.1 og 4.1.3.



Figur 6.1: Grafisk visning av prosessen.



Figur 6.2: Resultat vist i grafer.

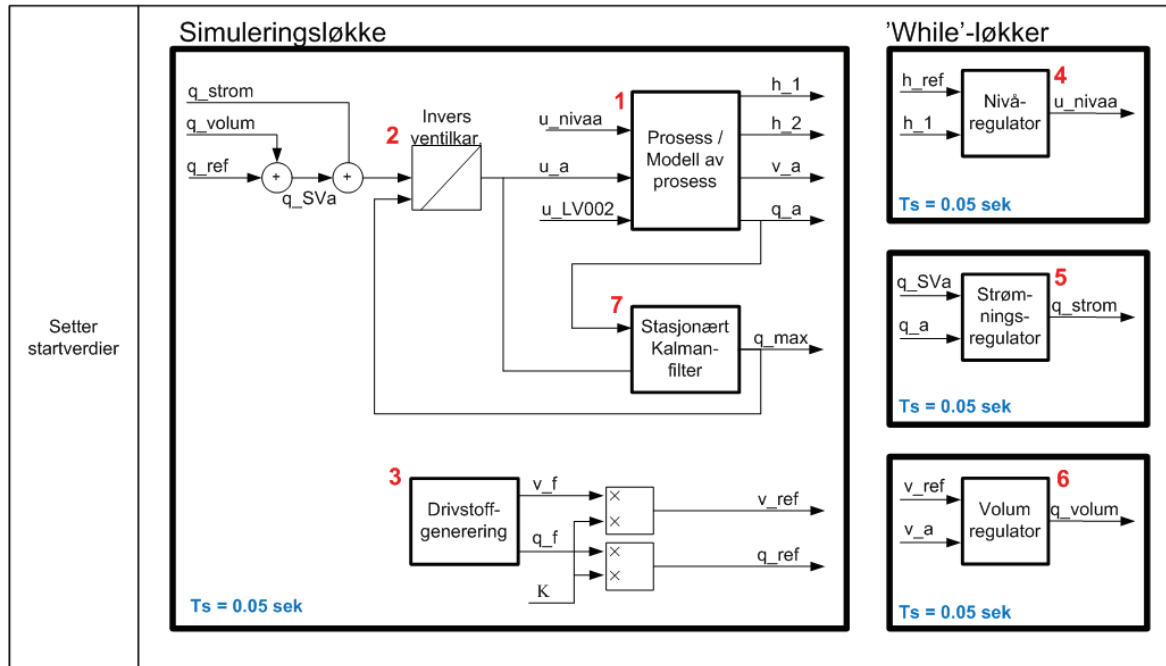


Figur 6.3: Tabulator hvor en kan bestemme reguleringsparametre. Merk: reguleringsparametrene her stemmer ikke helt overens med de endelige verdiene funnet i kapittel 5.

6.2 LabVIEW-kode i blokkdiagram

Koden som er utviklet i blokkdiagrammet i LabVIEW er vist i vedlegg B. Denne koden kan ved første øyekast se noe uoversiklig ut, derfor er det laget en skisse som forklarer koden på en forenklet og mer forståelig måte, vist i figur 6.4. Jamfør også figur 1.3 i kapittel 1.3 og P&ID i vedlegg A.

Sekvenser



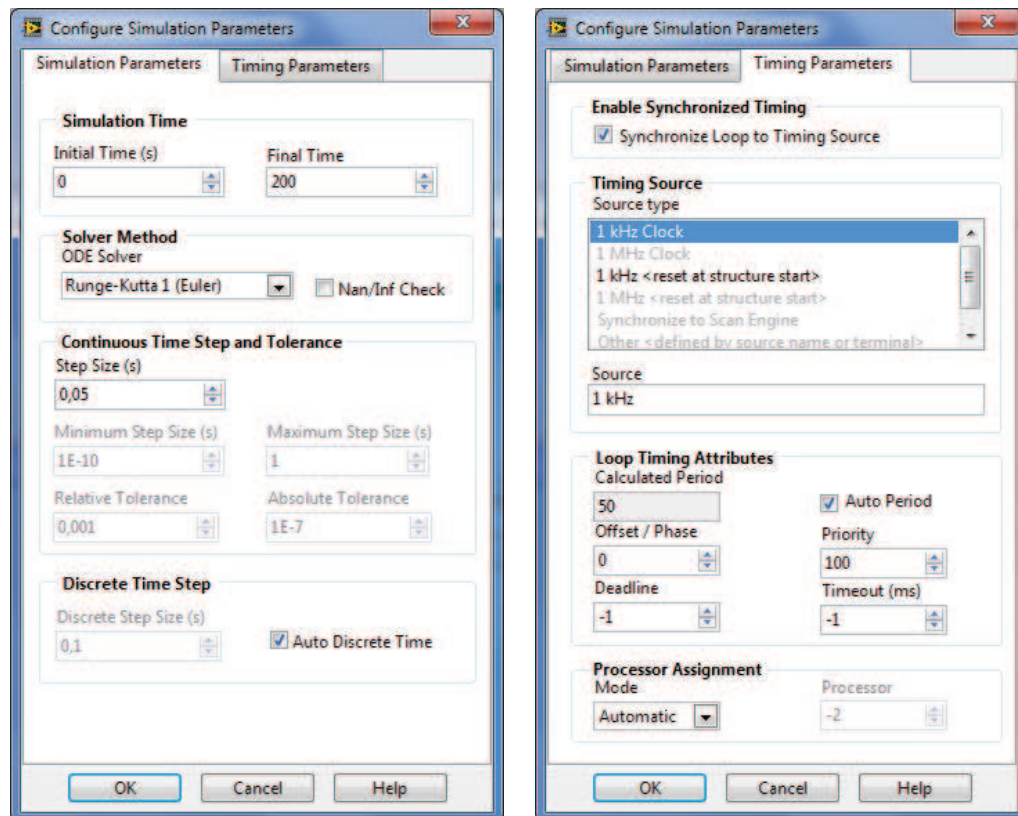
Figur 6.4: Forenklet skisse over koden i blokkdiagrammet.

Reguleringsystemet består av en simuleringsløkke og tre *while*-løkker som kjører i parallell med samme samplingsintervall, $T_s = 0.05$ sek. De viktigste delene av koden er nummerert fra 1-7, og disse blir beskrevet i de etterfølgende kapitlene. Men først litt om innstilling av simuleringsløkken.

6.2.1 Innstilling av simuleringsløkke

Simuleringsløkken i LabVIEW har mange av de samme funksjonene som MathWorks SimuLink og programmeringsmåten er tilnærmet identisk. Simuleringsløkken brukes hovedsaklig til å simulere modeller av virkelige prosesser, men det er også mulig å implementere virkelige prosesser, jfr. kapittel 6.2.3. Av typen numeriske utregningsmetoder er det brukt den enkleste metoden, nemlig Runge-Kutta 1 (Euler). Denne metoden bruker minst prosessorkraft ved utregning av en gitt simulerings situasjon. Metoden bruker en fast steglengde og regner

dermed ut verdier ved faste tidsintervall. Figur 6.5 viser hvordan simuleringsløkken er stilt inn i denne oppgaven.



Figur 6.5: Innstilling av simuleringsløkke

Steglengden som er brukt i simuleringsløkken er $T_s = 0.05$ sek, jfr. kapittel 5.1.

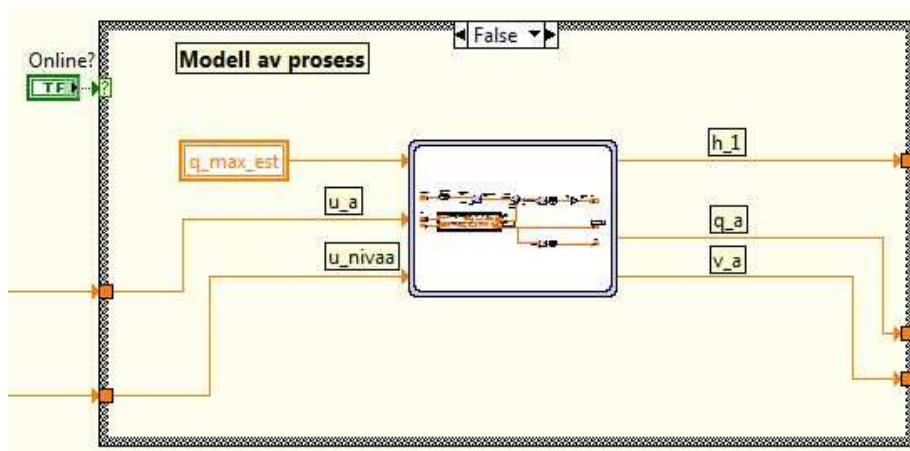
6.2.2 Modell av testanlegget

Vist som nummer 1 i figur 6.4.

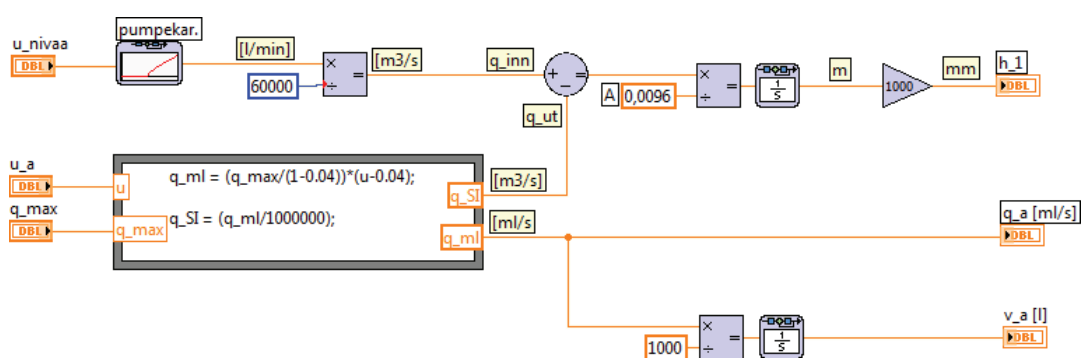
I reguleringssystemet som er utviklet i LabVIEW, kan en velge om en ønsker å regulere en modell av prosessen eller den virkelige prosessen, vist i figur 6.6. Dersom den boolske kontrolleren *online?* er aktiv, vil reguleringssystemet regulere den virkelige prosessen, mens når *online?* ikke er aktiv, er det modellen av prosessen som blir regulert.

I figur 6.6 vises tilfellet hvor en regulerer modellen av prosessen. For å gjøre koden mer oversiktlig, er det valgt å legge koden for modellen av testanlegget i et *subsystem*. Koden i *subsystemet* er vist i figur 6.7. Denne koden er basert på den matematiske modellen av testanlegget, beskrevet i kapittel 3.1, og modellen av ventilkarakteristikken, beskrevet i

kapittel 4.1.3.



Figur 6.6: *Online?* bestemmer om en skal regulere den virkelige prosessen eller en modell av prosessen.



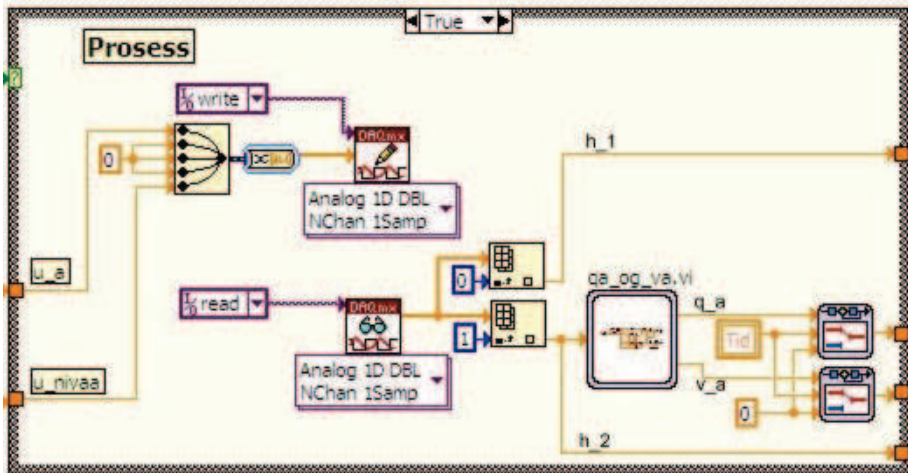
Figur 6.7: Modell av testanlegget. Koden av *subsystemet* vist i figur 6.6

Ser ut fra figur 6.7 at en har inngangene u_{nivaa} , u_a og q_{max} , mens utgangene er h_1 , q_a og v_a . Modellen av testanlegget benytter seg av SI-enheter, en må derfor gjøre om benevningen til q_{inn} og q_{ut} til m^3/sek .

6.2.3 Kommunikasjon med testanlegg

Vist som nummer 1 i figur 6.4.

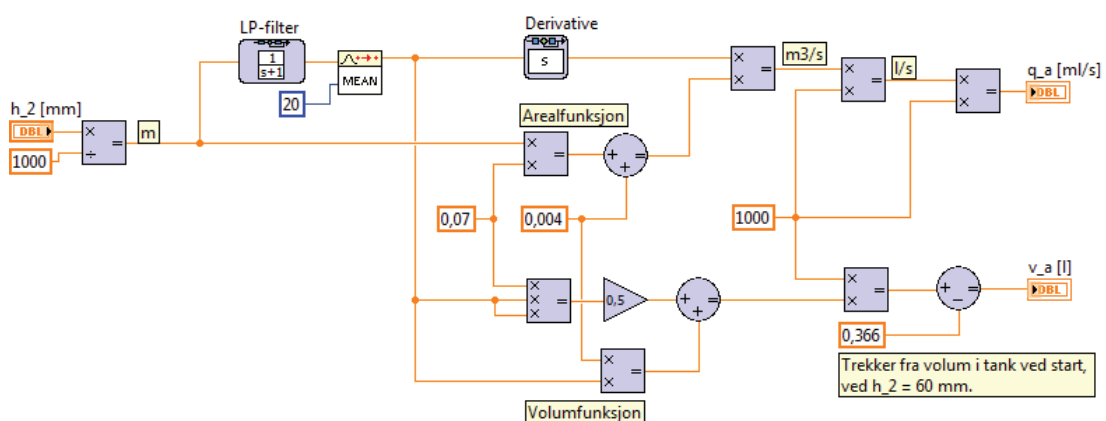
For å kommunisere med testanlegget er det brukt to funksjoner i LabVIEW, kalt *DAQmx - read* og *DAQmx - write*. Disse funksjonene bruker I/O-kortene (jfr. kapittel 2.4) til å skrive og lese informasjon til og fra prosessen. Bruken av funksjonene er vist i figur 6.8.



Figur 6.8: Kommunikasjon med virkelig prosess ved bruk av funksjoner i LabVIEW.

Øverst i figur 6.8 vises bruken av *DAQmx - write*; funksjonen får informasjon om reguleringsvariablene (her u_a og u_{nivaa}), verdiene på disse variablene blir så skalert om til analoge verdier (volt), som deretter blir påført pumpe og ventil. En kan også se at tre av inngangene til *DAQmx - write* er satt lik 0. Dette er pådraget til ventilene LV002, FV001 og FV002, som hele tiden skal være stengt i dette systemet, jfr. kapittel 1.3.

Nederst i figur 6.8 er det vist hvordan *DAQmx - read* brukes. Denne funksjonen henter analoge målinger fra anlegget og skalerer de om til digitale verdier som brukes i reguleringsystemet, jfr. skaleringer i kapittel 2.1.2 og 2.1.4. Målingene i dette systemet er nivåmåling av tank 1 og 2. Nivået i tank 2 brukes til å bestemme strømming gjennom LV001, q_a , og volum, v_a , i tank 2. Disse to variablene blir beregnet i *subsystemet qa_og_va.vi*, som vist i figur 6.9. Koden i *subsystemet* er vist i figur 6.9.



Figur 6.9: Beregning av q_a og v_a .

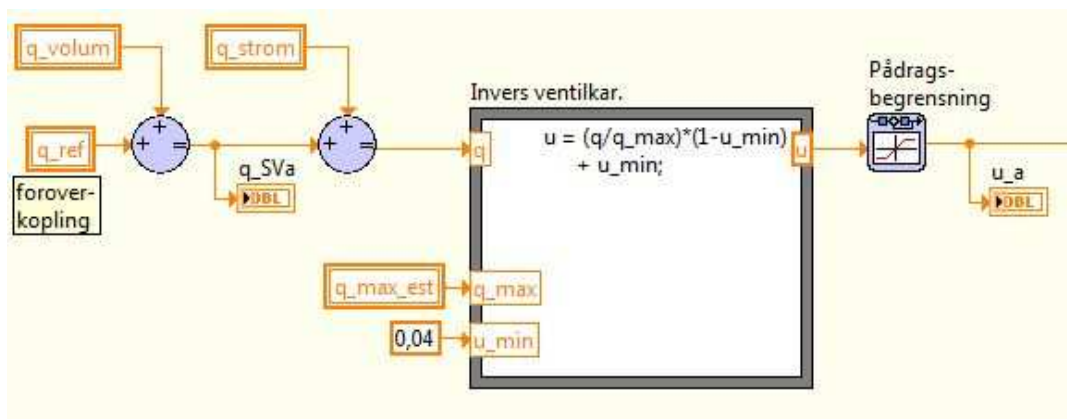
Strømningsmålingen, q_a , beregnes ut fra den deriverte av nivået i tank 2 multiplisert med arealfunksjonen til tank 2 (jfr. kapittel 5.3 og 2.1.3.). Volummålingen, v_a , beregnes/måles ut fra volumfunksjonen for tank 2 (jfr. kapittel 2.1.3.). Øverst til venstre i figur 6.9 kan en se hvordan nivået i tanken blir filtrert med et lavpass-filter og en *mean*-funksjon før det blir derivert.

I figur 6.8 kan også se at utgangene fra *subsystemet* går videre til to brytere. Dette er to tidsbrytere som gir ut 0 så lenge $t < 7$ sek. Dette er gjort for at målingene skal få tid til å svinge seg inn. (pga. filtrering, *mean*-funksjonen og derivator)

6.2.4 Invers ventilkarakteristikk

Vist som nummer 2 i figur 6.4.

For å implementere den inverse ventilligningen er det tatt utgangspunkt i kapittel 5.4. Regulatorene i systemet beregner ønsket strømningsverdi gjennom ventilen. Denne verdien, q , blir så brukt i et matematisk uttrykk for den inverse ventilligningen. Fra ligning (5.27) kan en se at q_{max} og u_{min} inngår i dette uttrykket. q_{max} blir estimert av et Kalman-filter (jfr. kapittel 5.7 og 6.2.9), mens u_{min} er en konstant, og lik 0.04 (jfr. kapittel 4.1). Utgangen fra den inverse ventilligningen er et pådrag, u , til ventilen LV001. Implementeringen er vist i figur 6.10.



Figur 6.10: Beregning av ventilpådrag ved bruk av den inverse ventilligningen.

Til venstre i figuren kan en se de lokale⁶ variablene q_{ref} , q_{strom} og q_{volum} . q_{ref} er foroverkoplingen for strømningsregulatoren, og denne er generert direkte ut fra drivstoffmålingen, q_f . q_{volum} er bidraget fra volumregulatoren. Summen av q_{volum} og q_{ref} blir da referansen, q_{SVa} , til strømningsregulatoren. Ut fra referansen, q_{SVa} , og prosessvariabel, q_a , beregner

⁶lokale variabler betyr her at variablene blir beregnet et annet sted i den grafiske koden. Bruken av lokale variabler er brukt for å unngå 'spagetti-kode', det vil si linjer som krysser hverandre over alt.

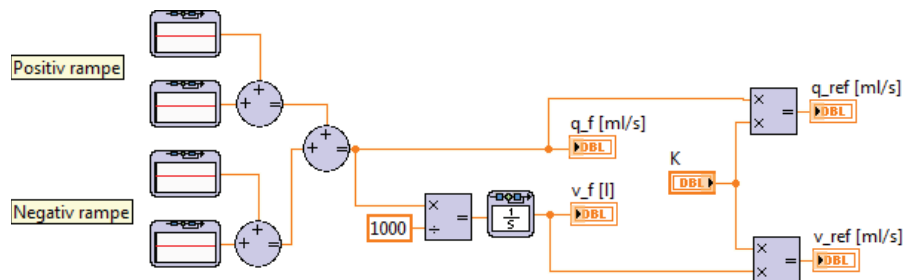
strømningsregulatoren verdien q_{strom} . Kode for regulatorene er vist i kapittel 6.2.7 og 6.2.8

På utgangen til den inverse ventilligningen er det også satt en pådragsbegrensning med grensene [0.04 - 1].

6.2.5 Generering av simulert strømning av drivstoff

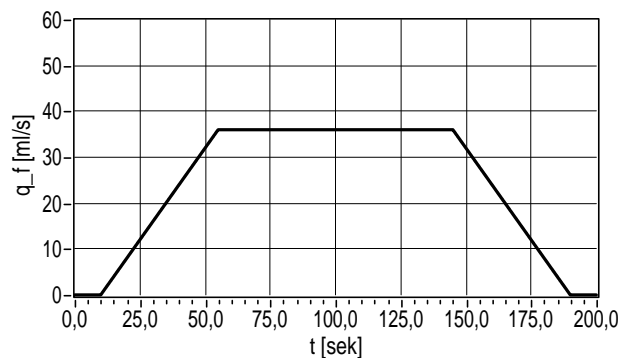
Vist som nummer 3 i figur 6.4.

Strømningen med drivstoff, q_f , er som kjent en simulert strømning i LabVIEW (jfr. kapittel 1.3). Strømningen er generert ved hjelp av rampefunksjoner i simuleringssløykken. Ut fra drivstoffstrømningen genereres også strømningsreferansen, q_{ref} , og volumreferansen, v_{ref} . Koden for dette er vist i figur 6.11.



Figur 6.11: Generering av drivstoffstrømning, q_f .

Strømningen med drivstoff har en profil som vist i figur 6.12. De første 10 sekundene er strømmingen lik null. Dette på grunn av at reguleringen ikke skal starte med en gang, slik at målinger og estimat skal få tid til å svinge seg inn. Etter $t = 10$ øker strømmingen med et stigningstall på 0.8 ml/s i 45 sekund. Deretter flater strømmingen ut og holder seg konstant, lik 36 ml/s, i 100 sekund. Ved $t = 155$ synker strømmingen igjen med samme rate som i starten, og fra $t = 190$ til $t = 200$ er strømmingen lik 0 igjen.



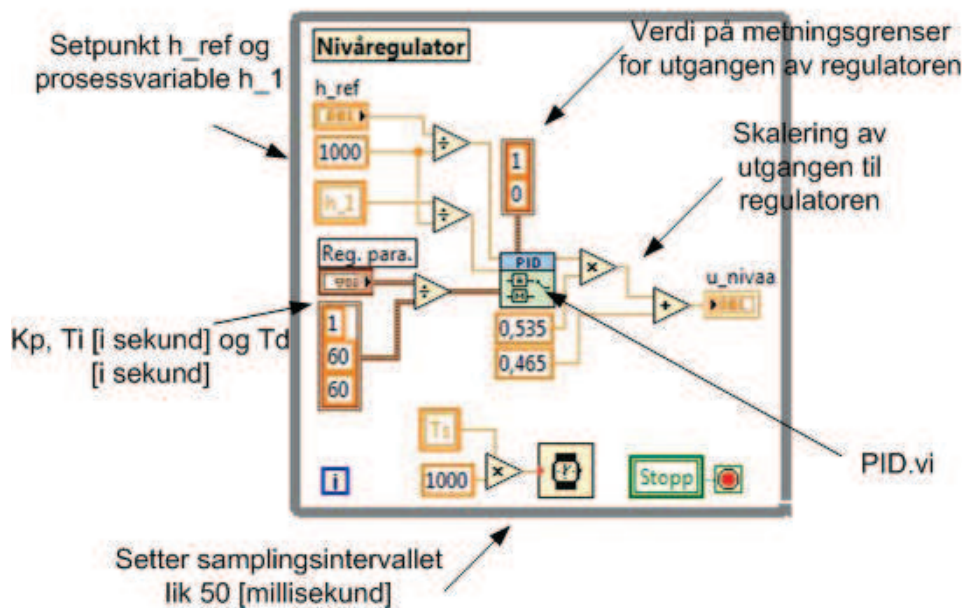
Figur 6.12: Profil på drivstoffstrømning, q_f .

Grunnen til at en har brukt en såpass lav strømningsrate som 36 ml/s, er på grunn av at reguleringsystemet bruker den deriverte av nivået i tank 2 for å beregne målingen q_a . Når tank 2 er full, vil ikke strømningsmålingen fungere lenger. Dette er også grunnen til at profilen med drivstoffstrømning er såpass kort.

6.2.6 Nivåregulator

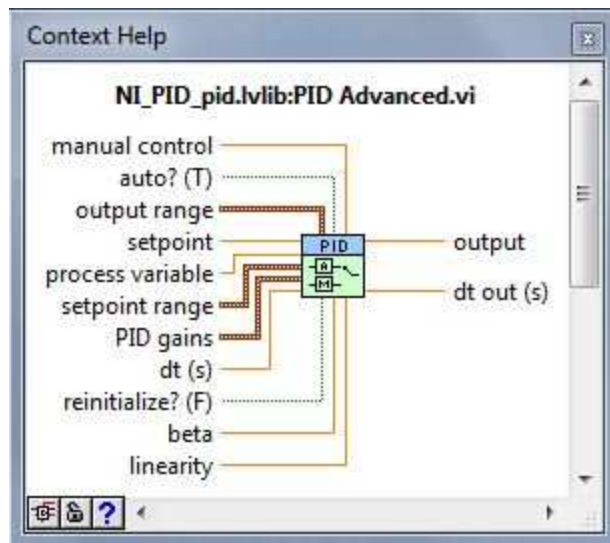
Vist som nummer 4 i figur 6.4.

Som en ser ut fra figur 6.4, kjører *while*-løkken med nivåregulatoren i parallell med simuleringsløkken. Koden i *while*-løkken er basert på kapittel 5.2. Figur 6.13 viser hvordan koden er implementert i LabVIEW.



Figur 6.13: Nivåregulatoren implementert i LabVIEW.

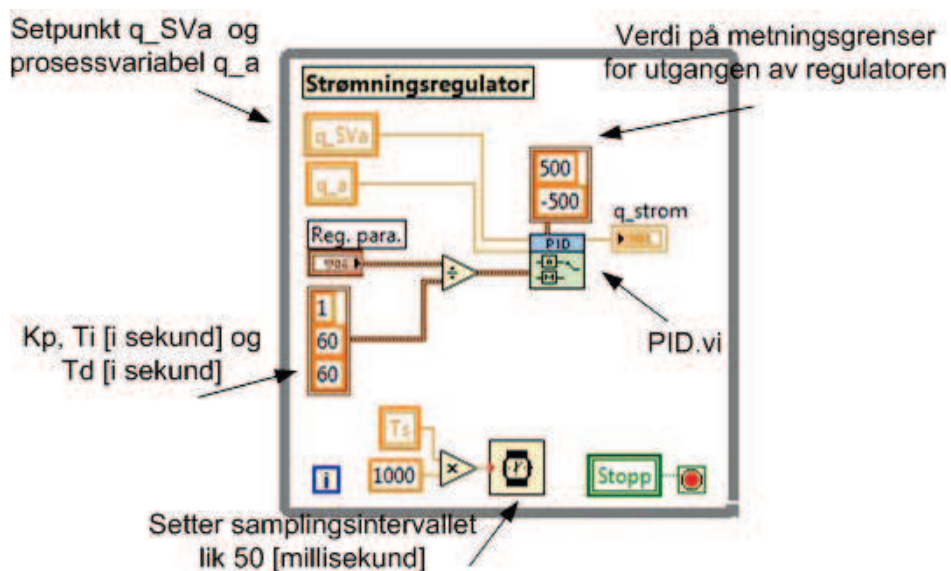
PID.vi vist i figuren ovenfor er funksjonen som inneholder koden for regulatoren. Denne funksjonen er brukt for alle regulatorene i dette reguleringsystemet. En oversikt over inn- og utgangene til funksjonen er vist i figur 6.14.

Figur 6.14: Inn- og utgangene til funksjonen `PID.vi`.

6.2.7 Strømningsregulator

Vist som nummer 5 i figur 6.4.

Strømningsregulatoren er implementert som vist i figur 6.15. Koden er basert på kapittel 5.5. Merk at setpunktet til regulatoren her er variabelen q_{SVa} . Størrelsen på denne er gitt av summen av q_{ref} og q_{volum} som er bidraget fra volumregulatoren.

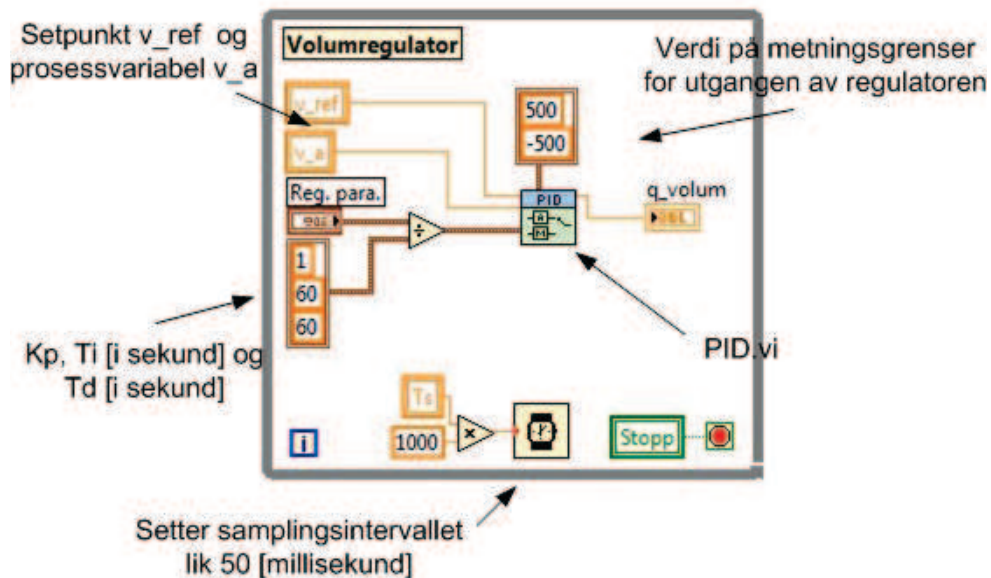


Figur 6.15: Strømningsregulatoren implementert i LabVIEW.

6.2.8 Volumregulator

Vist som nummer 6 i figur 6.4.

Volumregulatoren er implementert som vist i figur 6.16. Koden er basert på kapittel 5.6.

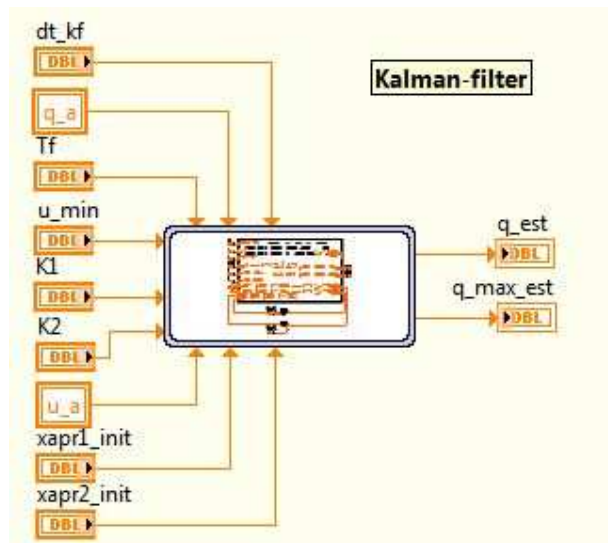


Figur 6.16: Volumregulatoren implementert i LabVIEW.

6.2.9 Kode for Kalman-filteer i LabVIEW

Vist som nummer 7 i figur 6.4.

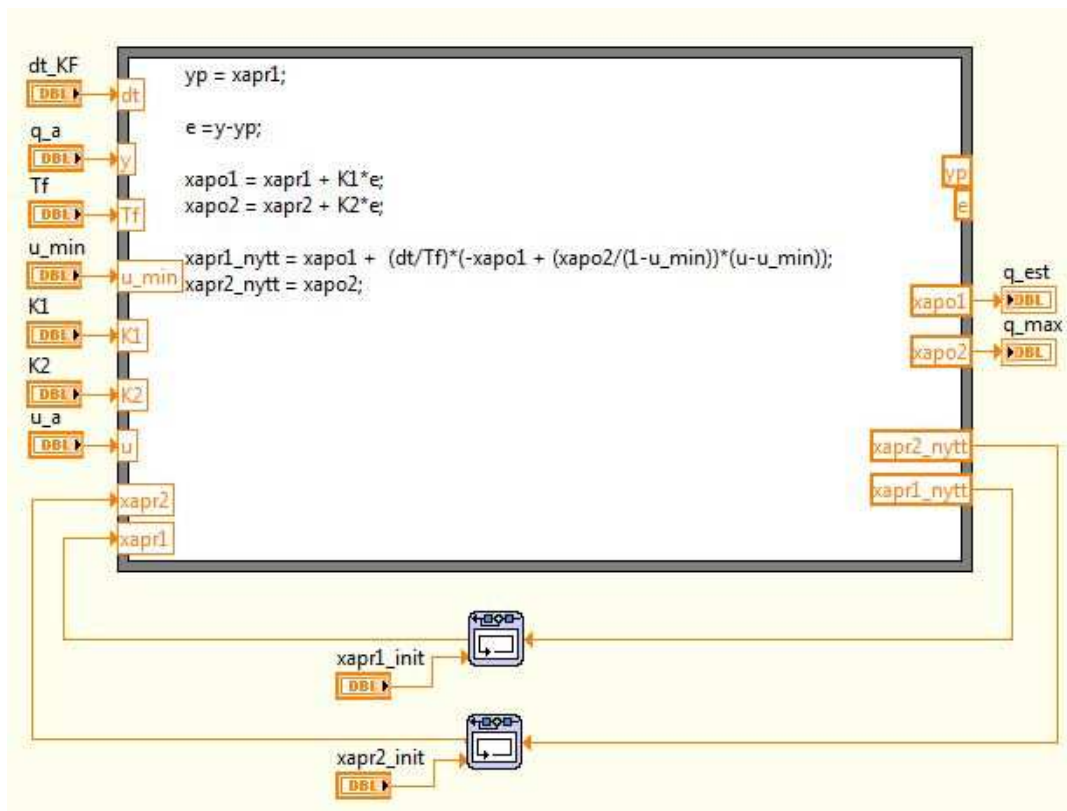
Det stasjonære Kalman-filteeret som er implementert i dette systemet, er implementert med utgangspunkt i algoritmen gitt i kapittel 3.3.8. Det stasjonære filteeret bruker konstante korreksjonsfaktorer, noe som betyr at algoritmen og kravet til beregningskraft er mye mindre sammenlignet med et generelt Kalman-filteeret, mer om Kalman-filteeret i kapittel 5.7. Figur 6.17 viser hvordan Kalman-filteeret er implementert i LabVIEW.



Figur 6.17: Stasjonært Kalman-filter i LabVIEW.

Fra figuren kan en se at de lokale variablene q_a og u_a er innganger til filteret. I tillegg til disse, må en også gi informasjon om prosesskonstantene for Kalman-filteret. Disse konstantene kan sees ut fra figuren ovenfor, og ut fra tabulatorsiden nede til høyre i figur 6.3. Samplingsintervallet dt_{KF} er det samme som for resten av reguleringsystemet, nemlig 0.05 sek. Målefilterets tidskonstant, T_f , settes her lik 3.1 sek. Korreksjonsfaktorene K_{11} og K_{21} settes lik 0.1 og 0.05 henholdsvis, og u_{min} er som kjent lik 0.04. I tillegg kan en bestemme startverdier på *a priori*-estimatene $\bar{x}_1(0)$ og $\bar{x}_2(0)$. Disse bestemmes ut fra forhåndsinformasjon om estimatene.

Selve koden for algoritmen for Kalman-filteret er gitt i *subsystemet* vist i figur 6.17. Algoritmen er implementert i en *formula node*, vist i figur 6.18.



Figur 6.18: Kode for algoritme for stasjonært Kalman-filter i LabVIEW.

Algoritmen vist i figuren ovenfor viser seg å kjøre veldig glatt i LabVIEW, uten store krav til prosessorkraft.

Generelt kan en si at reguleringsystemet implementert i LabVIEW kjører problemfritt. Eneste ulempe er at systemet trenger noe lang tid å compilere dersom en gjør endringer i koden. Kombinasjonen med en simuleringsløkke og *while*-løkker i parallell gjør at den grafiske koden i vedlegg B blir relativt oversiktlig. Kommunikasjonen mellom simuleringsløkken og *while*-løkkene fungerer også smertefritt.

7 Resultat

I dette kapittelet skal en se på hvordan reguleringen fungerer på testanlegget, dersom en bruker reguleringssystemet slik det er beskrevet i kapittel 5. Kapittel 7.1 viser resultatene ved bruk av en fast verdi på q_{max} , som er satt tilnærmet riktig ut fra kjennskap til prosessen. I kapittel 7.2 brukes det fortsatt en konstant verdi på q_{max} , men nå er verdien på denne feil i forhold til virkelig verdi. Kapittel 7.3 tar for seg reguleringen dersom en bruker Kalman-filteret til å estimere q_{max} . Til slutt, i kapittel 7.4, blir presisjonen til resultatene diskutert.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator

Fra kapittel 5.5 er det kjent at strømningsregulatoren er en PI-regulator med foroverkopler. Foroverkoplingsfunksjonen genereres direkte fra strømningsreferansen, q_{ref} . Dette bidraget gir det største bidraget til den inverse ventilligningen, mens strømningsregulatoren bare gir små bidrag for å rette opp. I kapittel 5.6 ble det også utviklet en volumregulator som bidrar dersom en har avvik i volumet, dvs. når $v_{ref} - v_a \neq 0$. Bidraget fra volumregulatoren blir så et ekstra bidrag til referansen til strømningsregulatoren. For å vise hvordan foroverkopleren og de forskjellige regulatorene bidrar i den inverse ventilligningen, kan en ta utgangspunkt i kapittel 5.4 hvor følgende invers ventilligning ble utledet:

$$\begin{aligned} u &= \frac{q}{q_{max}}(1 - u_{min}) + u_{min} \\ &= \frac{(q_{ff} + q_{stromreg})}{q_{max}}(1 - u_{min}) + u_{min} \end{aligned} \quad (7.1)$$

der q_{ff} er bidraget fra foroverkopleren, mens $q_{stromreg}$ er bidraget fra strømningsregulatoren.

I dette kapittelet skal en teste hvordan reguleringen fungerer med og uten volumregulator og strømningsregulator med og uten foroverkopler. I reguleringen brukes en konstant q_{max} , lik 300 ml/s. Dvs. at estimatene fra Kalman-filteret ikke blir brukt i den første delen av resultatkapittelet.

7.1.1 Regulering ved bruk av bare strømningsregulator uten foroverkopler

Tester her reguleringen ved bare bruk av strømningsregulator uten foroverkopler. Får da resultatet som vist i figurene 7.1 - 7.3. Ved å studere figurene ser en at strømningsregulatoren har en veldig lang innsvingningstid i starten. Strømningsmålingen, q_a , begynner ikke å svinge seg inn før $t = 30$. Dette fører til et avvik i volumet, v_a , på rundt 0.35 liter. Ved endt regulering er volumavviket blir noe mindre, vist oppe til høyre i figur 7.1. Ser at avviket nå er $e_{v,slutt} = |v_{ref} - v_a| = 0.11$ liter. Ellers kan en se at ventilpådraget er ganske rolig, jfr. figur 7.2, hvor pådraget varierer mellom 0.14 og 0.15. I figur 7.3 kan en også observere at det

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 122

er strømningsregulatoren alene som bidrar til q i den inverse ventilligningen. Den sorte grafen er strømningsreferansen, q_{ref} , som også er bidraget fra foroverkoplingsfunksjonen, q_{ff} , når en bruker foroverkopler. Men i dette tilfellet brukes altså bare strømningsregulatoren **uten** foroverkopler.

7.1.2 Regulering ved bruk av bare strømningsregulator med foroverkopler

Prøver nå å regulere ved bruk av foroverkopler i strømningsregulatoren. En får da resultatet som vist i figurene 7.4 - 7.6. Ser nå at strømningsmålingen, q_a , har mye raskere innsvingningstid enn tilfellet vist i figur 7.1. Dette er på grunn av at foroverkopleren gir bidrag med en gang strømningsreferansen, q_{ref} , begynner å øke. Dette fører også til at volumet, v_a , følger referansen, v_{ref} , mye bedre. Fra figur 7.6 kan en se at det er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} , som er størst, mens strømningsregulatoren retter opp feil i modellen. Ved $t \approx 30$ sek, kan en observere en ekstra stor topp, rundt 10 ml/s, som tyder på en ekstra stor feil ved lave pådrag, u , i ventilkarakteristikken, jfr. kapittel 4.1.2 og 5.4.

Ventilpådraget varierer hovedsaklig mellom 0.14 og 0.15, jfr. figur 7.5, mens volumavviket ved endt regulering er $e_{v,slutt} = 0.06$ liter.

7.1.3 Regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator uten foroverkopler

Tester nå reguleringen ved bruk av volumregulator og strømningsregulator uten foroverkopler. Får da resultatet som vist i figurene 7.7 - 7.9. Ser at innsvingningen i starten ligner noe på innsvingningen i figur 7.1. Siden en ikke bruker foroverkopler, sliter strømningsregulatoren når referansen, q_{ref} , endres. Forskjellen her, sammenlignet med responsen i figur 7.1, er at volumregulatoren retter opp avviket en får i starten. Dette fører til at volumet, v_a , følger referansen bra frem til slutten av reguleringen. Her synker strømningsreferansen med en konstant rate, og dette klarer ikke regulatorene kompensere for umiddelbart. Ved litt lenger regulering, ville volumregulatoren svinget seg inn til referanseverdi.

Fra figur 7.9 kan en se at også volumregulatoren bidrar til den totale q . Her kan en spesielt merke seg at volumregulatoren gir et ekstra stort bidrag ved $t \approx 40$. Dette er på grunn av volumavviket som oppstår ved treg innsvingning i starten, jfr. figur 7.7 ved $t \approx 40$. Den sorte grafen i figur 7.9 er her strømningsreferansen, q_{ref} , og ikke bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} .

Ventilpådraget varierer også her hovedsaklig mellom 0.14 og 0.15, jfr. figur 7.8, mens volumavviket ved endt regulering er $e_{v,slutt} = 0.10$ liter.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 123

7.1.4 Regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler

Bruker nå både volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler. Får da resultatet som vist i figurene 7.10 - 7.12. Ser nå at volumet, v_a , følger referansen gjennom hele reguleringsforløpet, med unntak av et lite avvik ved $t \approx 30$. For å få til dette kreves det mer aktiv pådragsbruk, jfr. 7.11. Dette fører til at strømningsmålingen, q_a , svinger noe mer enn de andre tilfellene vist tidligere. Fra figur 7.12 kan en se hvordan volumregulatoren gir små bidrag underveis i reguleringen, slik at volumet, v_a , hele tiden følger volumreferansen, v_{ref} . Volumavviket ved endt regulering er her $e_{v,slutt} = 0.04$ liter.

Fra figur 7.12 kan en se at bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} , er størst, mens strømnings- og volumregulatoren gir små bidrag for å rette opp feil. En ser her viktigheten av å ha med regulatorene i reguleringsystemet dersom foroverkopleren ikke er helt riktig.

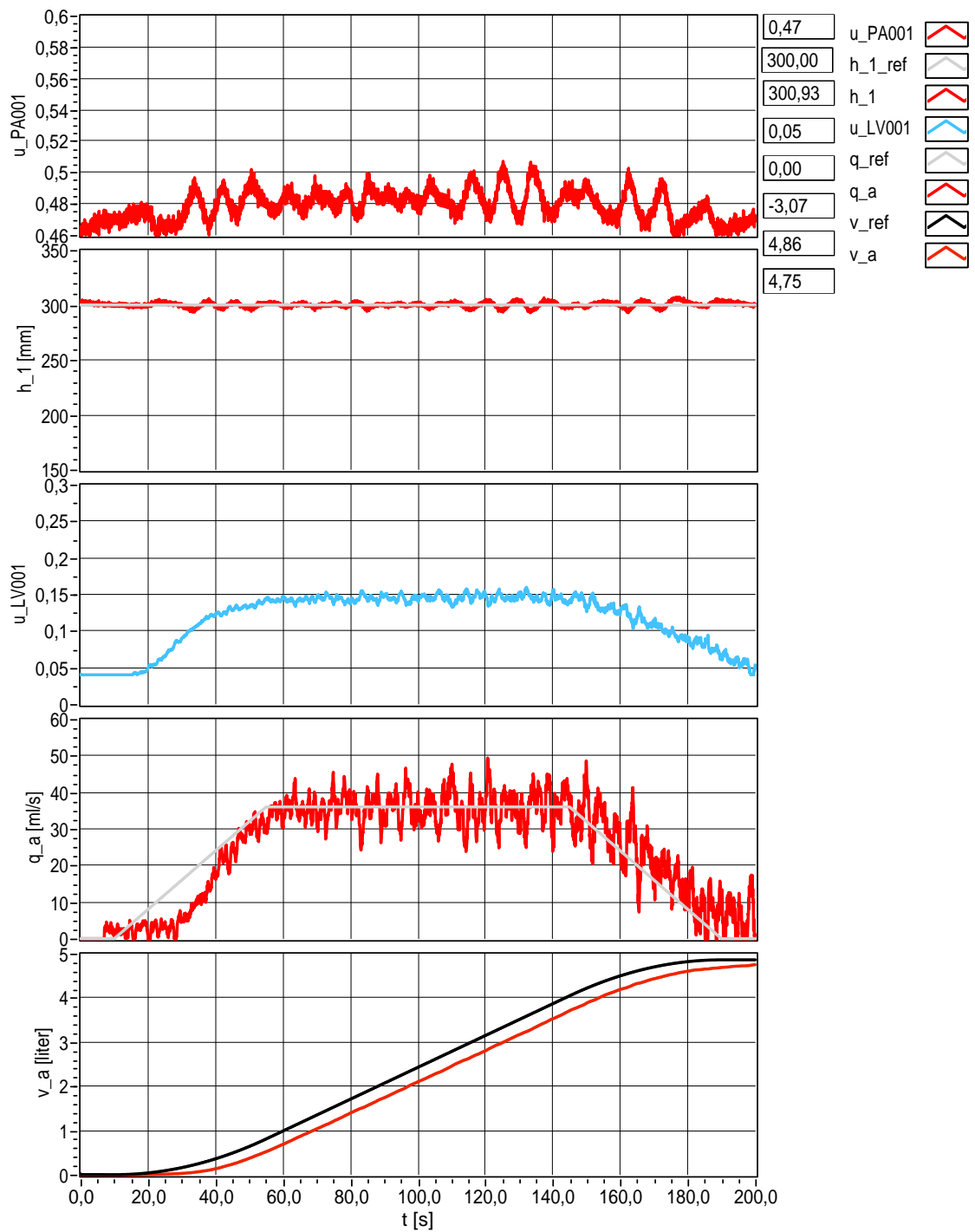
Resultatene fra dette delkapittelet viser at reguleringen er best dersom en bruker en strømningsregulator med foroverkopler kombinert med en volumregulator. En får da at volumet, v_a , følger referansen, v_{ref} , best, og avviket ved endt regulering er også minst her. Tabell 7.1 sammenligner avviket ved endt simulering i de forskjellige tilfellene.

-	Strømreg u/forover	Strømreg m/forover	Strømreg u/forover + volumreg	Strømreg m/forover + volumreg
$e_{v,slutt}$	0.11 liter	0.06 liter	0.10 liter	0.04 liter

Tabell 7.1: Sammenligning av avvik, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering.

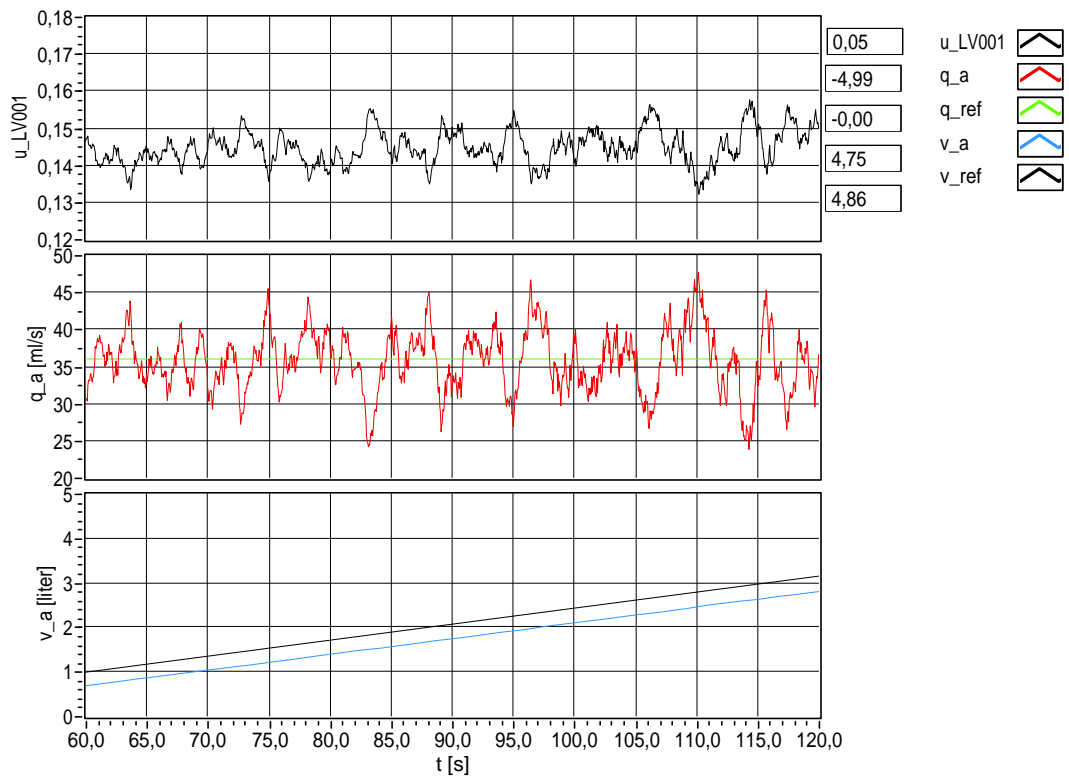
OBS: Jamfør også kommentarer om resultatenes presisjon i kapittel 7.4.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 124

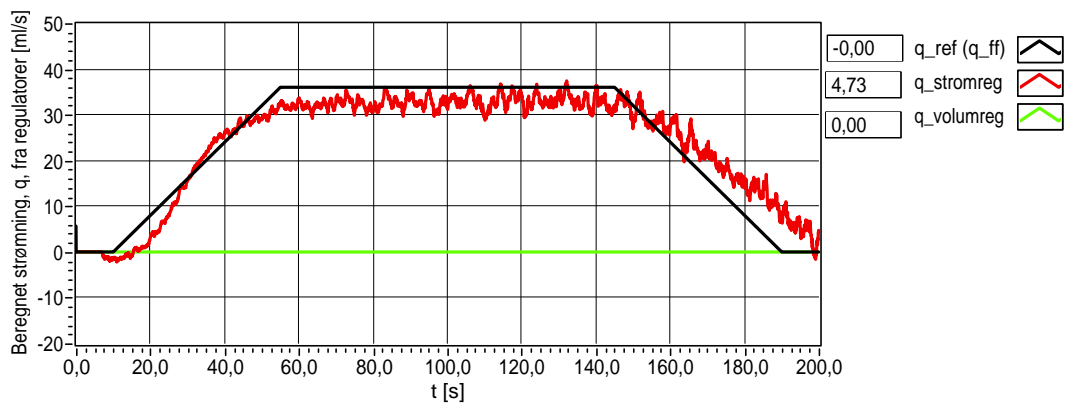


Figur 7.1: Regulering ved bruk av strømningsregulator uten foroverkopler.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 125

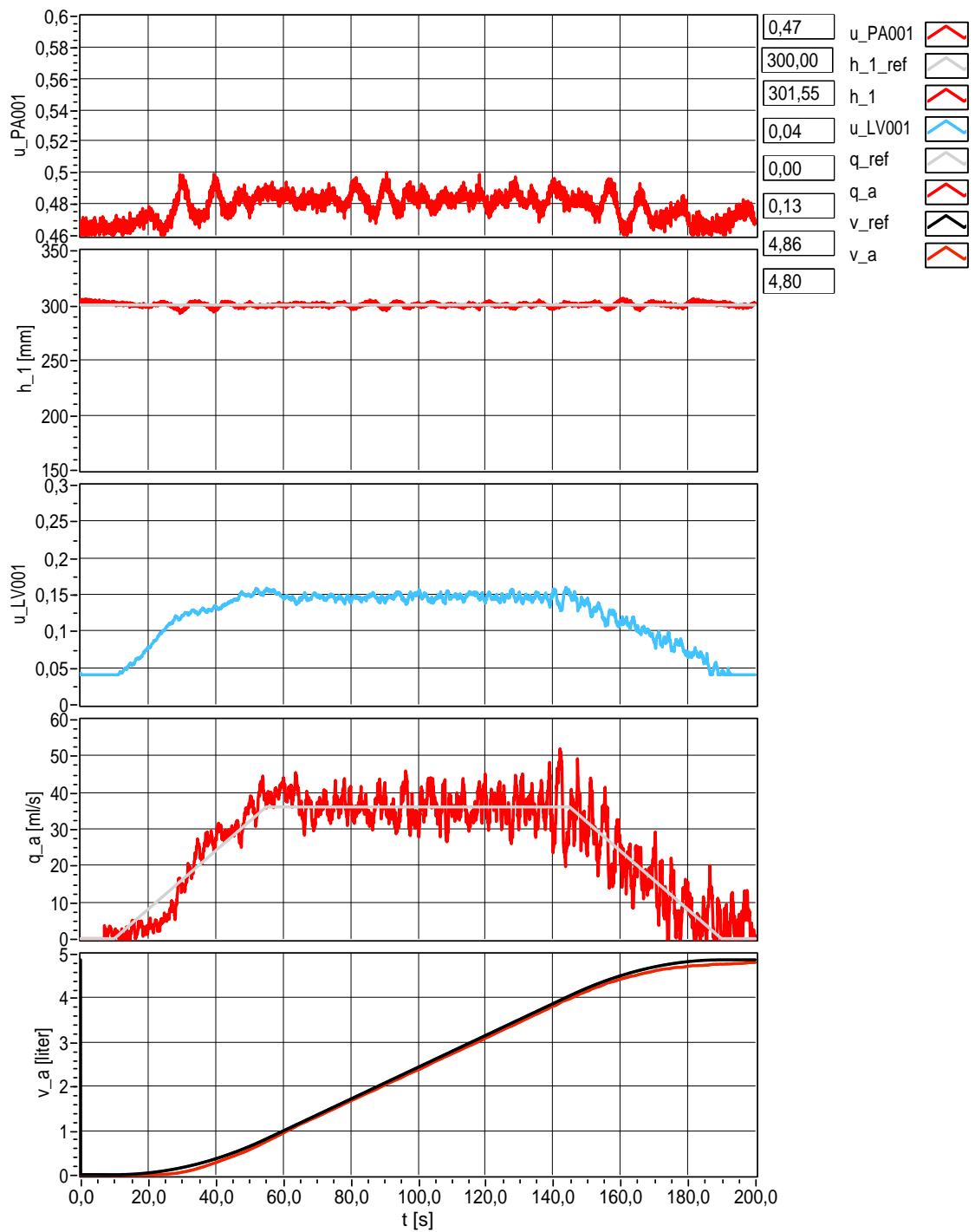


Figur 7.2: Utsnitt av regulering ved bruk av strømningsregulator uten foroverkopler.



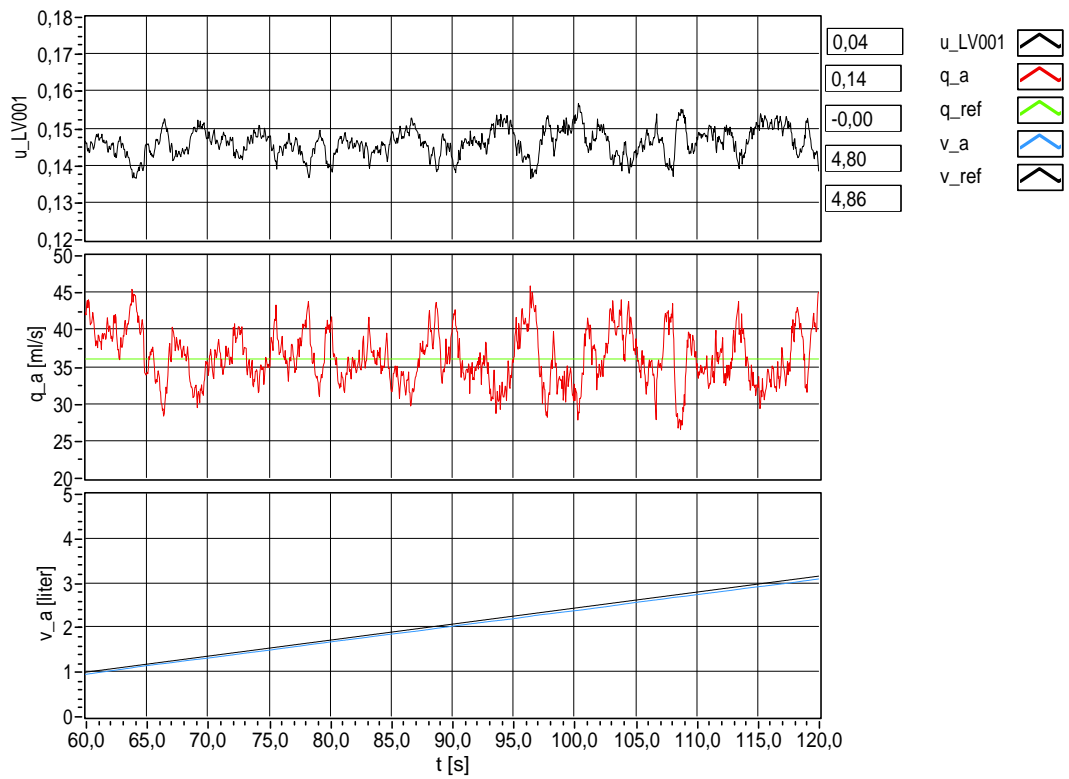
Figur 7.3: Bidrag fra strømningsregulator uten foroverkopler. Den sorte grafen er referansen, q_{ref} .

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 126

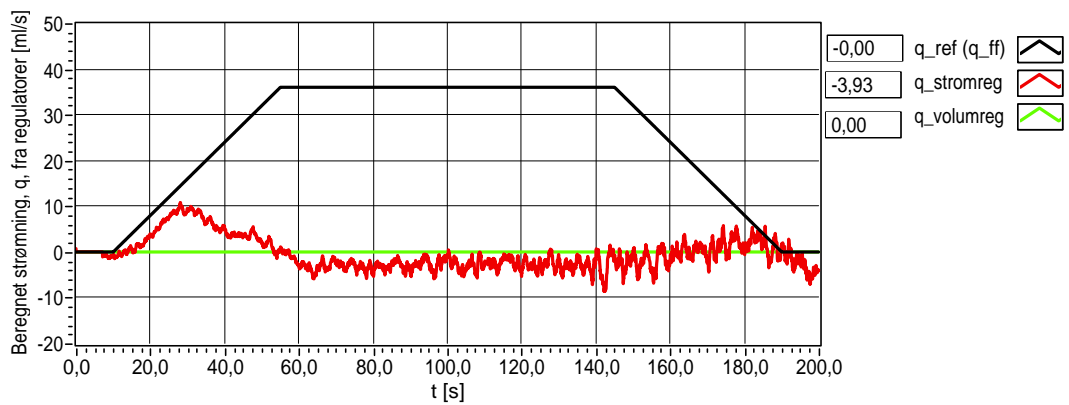


Figur 7.4: Regulering ved bruk av strømningsregulator med foroverkopler.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 127

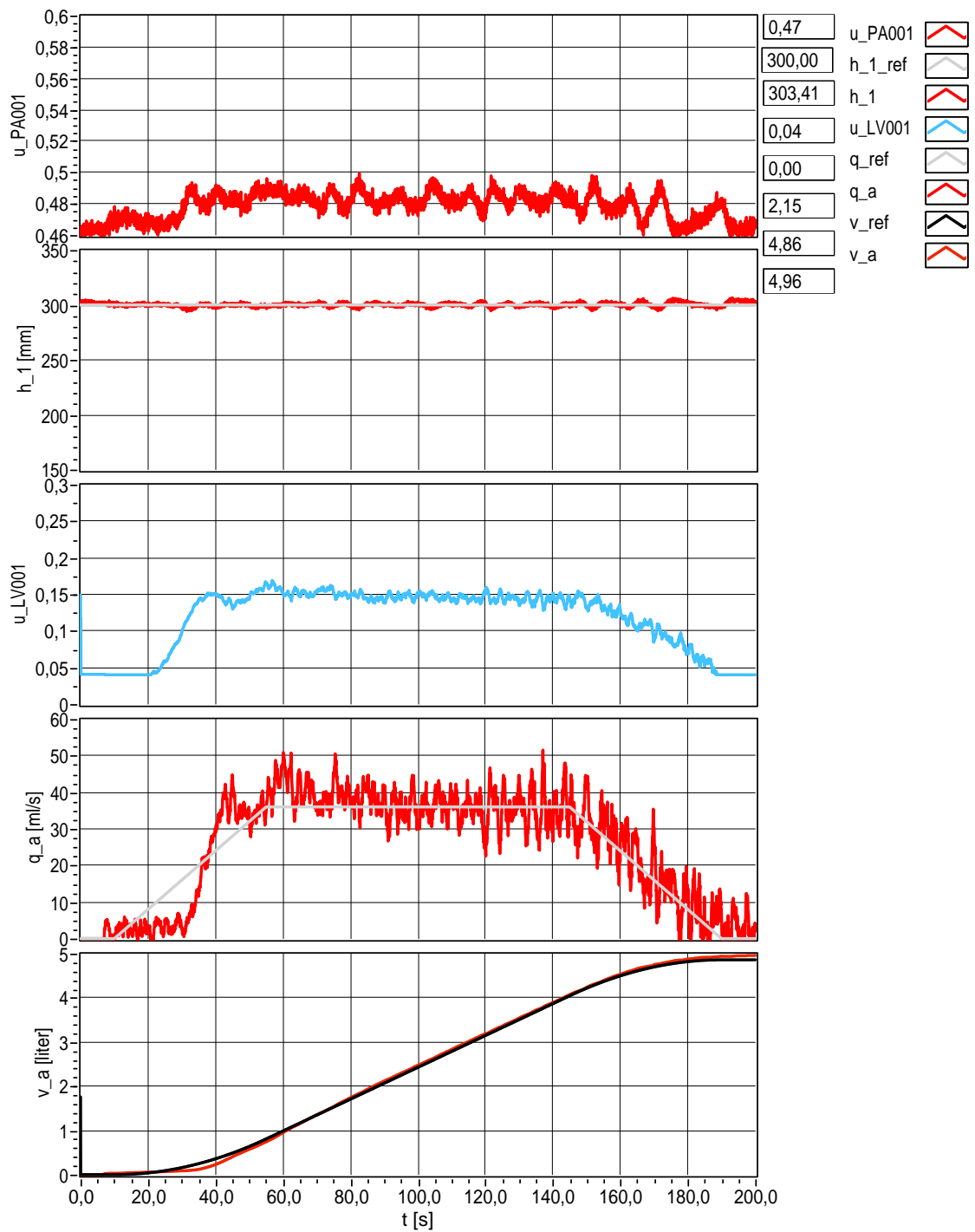


Figur 7.5: Utsnitt av regulering ved bruk av strømningsregulator med foroverkopler.



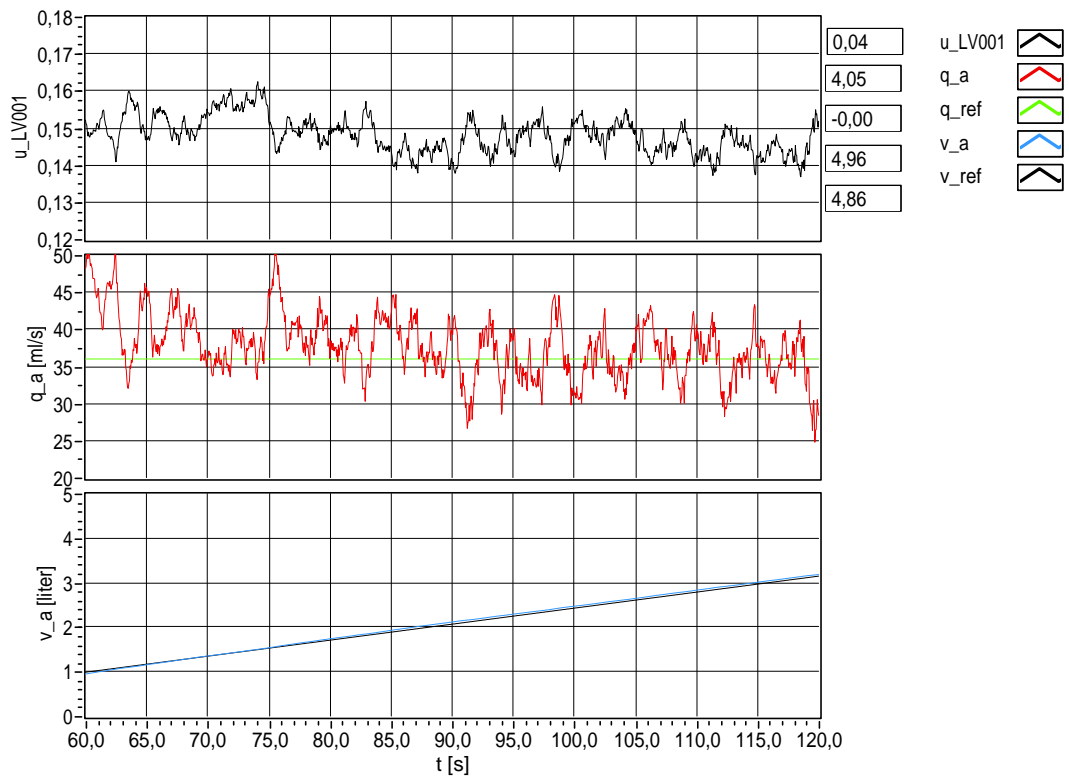
Figur 7.6: Bidrag fra strømningsregulator med foroverkopler, hvor bidraget fra foroverkopleren er den sorte grafen. (som også er referansen, q_{ref} .)

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 128

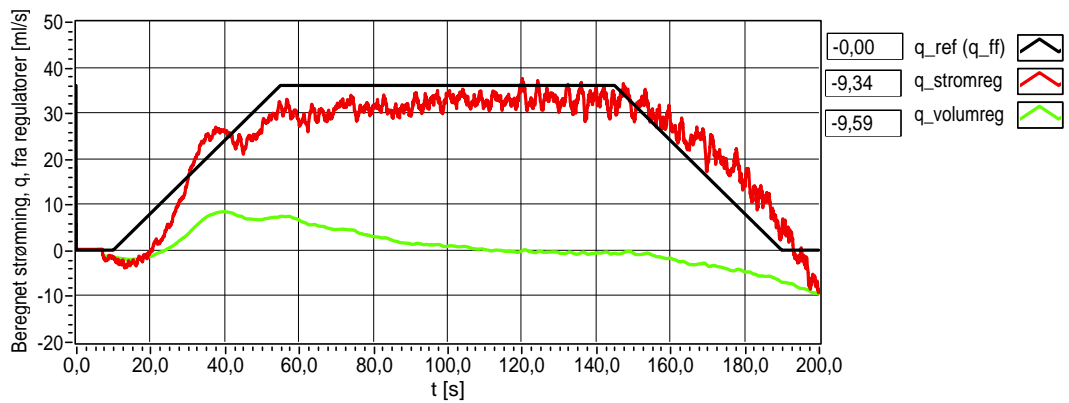


Figur 7.7: Regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator uten foroverkopler.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 129

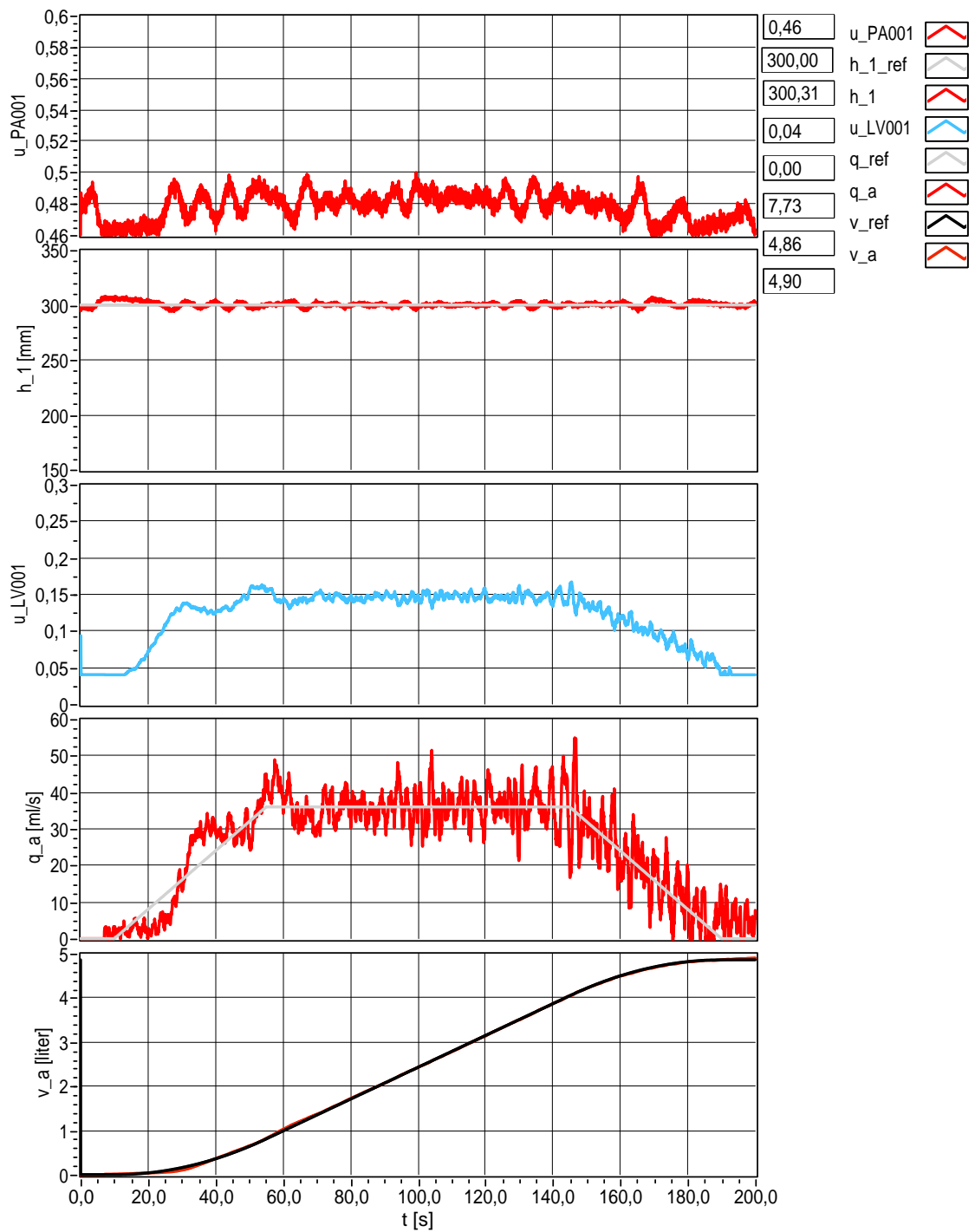


Figur 7.8: Utsnitt av regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator uten foroverkopler.



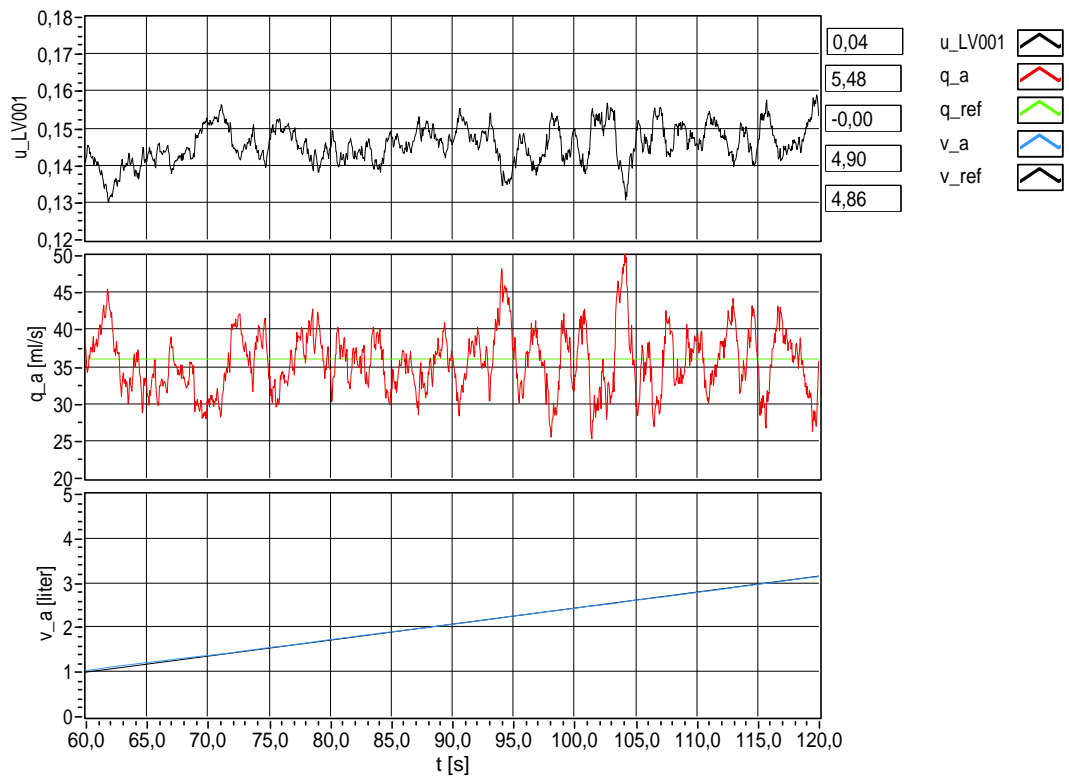
Figur 7.9: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator uten foroverkopler. Den sorte grafen er referansen, q_{ref} .

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 130

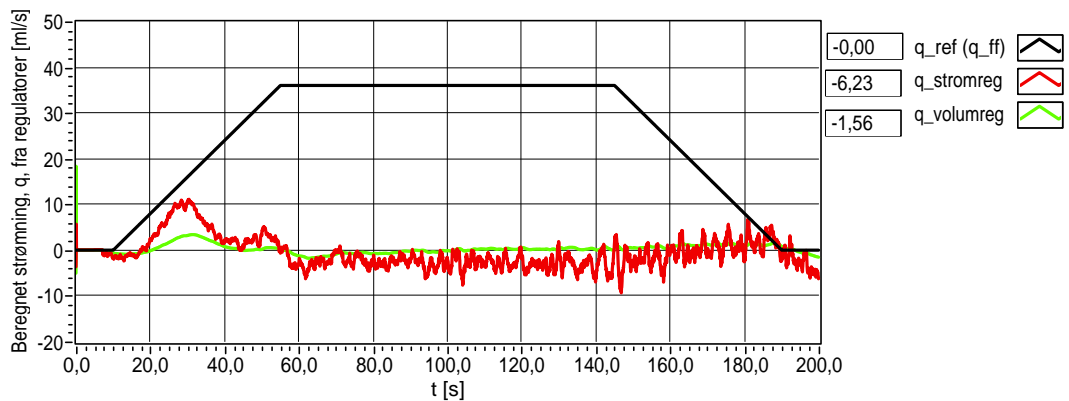


Figur 7.10: Regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler.

7.1 Sammenligning av bruk og uten bruk av foroverkopler og volumregulator 131



Figur 7.11: Utsnitt av regulering ved bruk av volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler.



Figur 7.12: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

7.2 Regulering ved bruk av feil modell v/foroverkopling (feil q_{max})

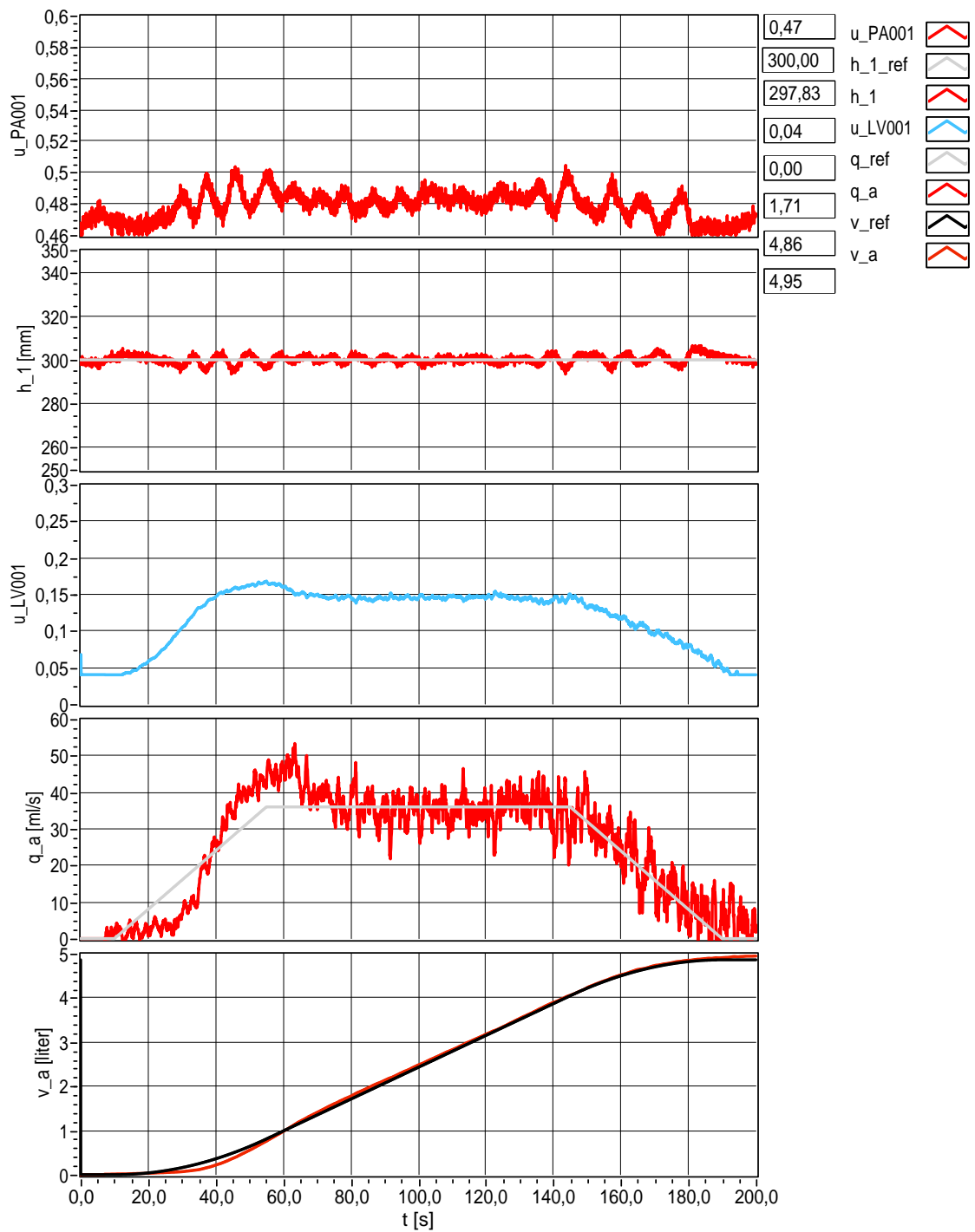
I kapittel 7.1 ble det brukt en fast verdi på q_{max} . Verdien på denne ble valgt ut fra kjennskap til prosessen, og ble satt lik 300 ml/s, som er tilnærmet lik virkelig verdi. I dette kapitlet skal en undersøke hvordan reguleringen fungerer dersom en har feil verdi på q_{max} .

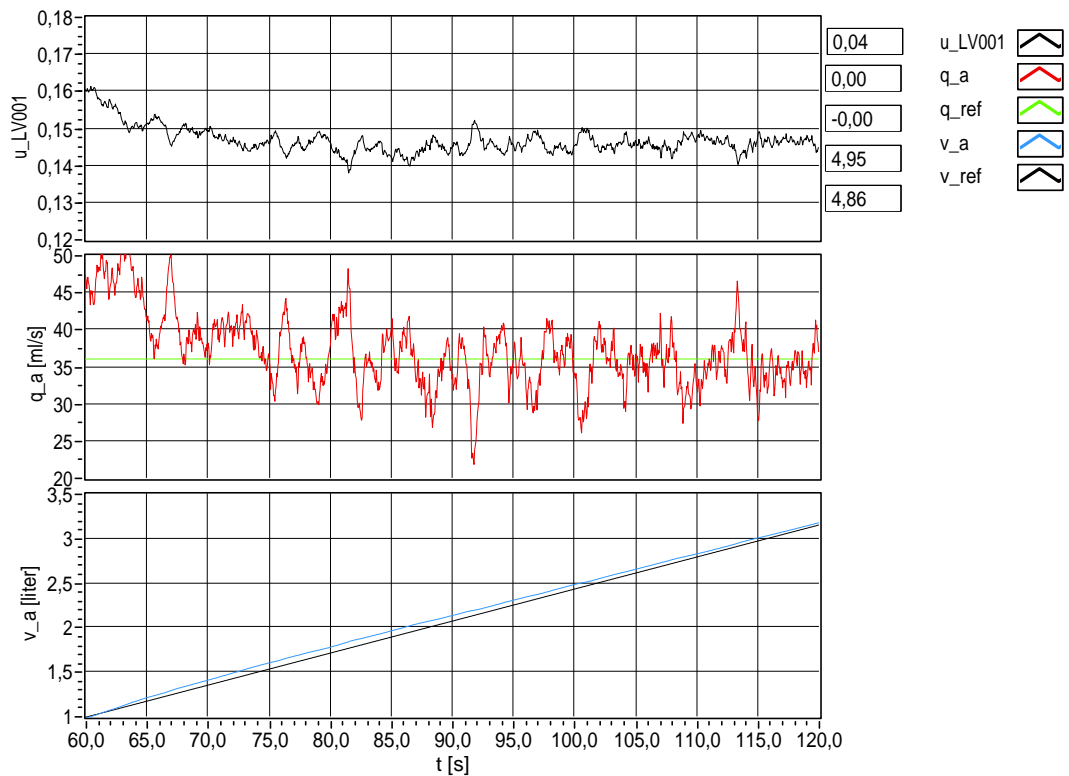
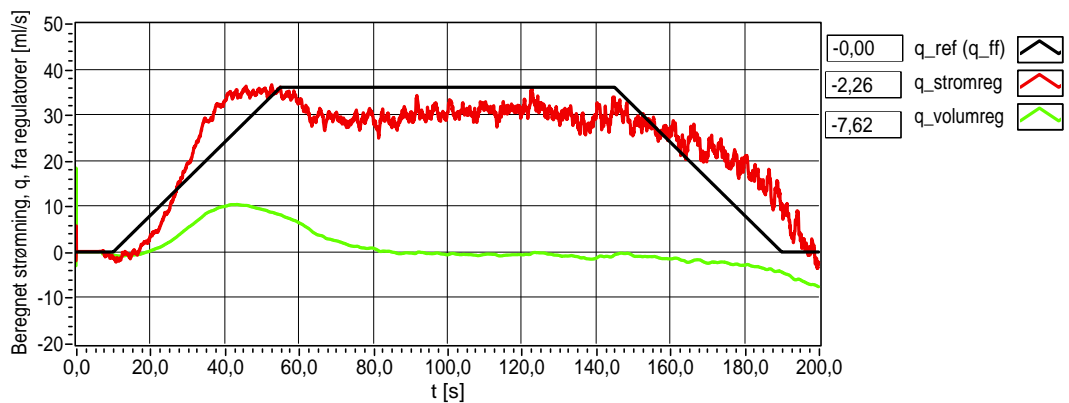
Velger nå q_{max} lik 600 ml/s, dvs. dobbel så stor som i kapittel 7.1. Fra ventilligningen (7.1) kan en da se at større q_{max} fører til at bidraget fra regulatorene og foroverkopleren må være større for at en skal ha samme ventilpådrag, u , ut. Bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} , er her det samme som i kapittel 7.1. Dette bidraget alene er for lite for at reguleringen skal bli bra. En er da avhengig av at regulatorene kompenserer for dette.

Resultatet ved regulering med feil q_{max} er vist i figurene 7.13 - 7.15. Fra figur 7.13 ser en at innsvingningen i starten er treg. Strømningsmålingen, q_a , begynner ikke å stige før $t \approx 30$, og den svinger seg ikke inn til referansen før $t \approx 75$. Dette er på grunn av at strømningsregulatoren bruker tid på å svinge seg inn. Fra figur 7.15 ser en at bidraget fra strømningsregulatoren, $q_{stromreg}$, begynner å stige ved $t = 20$, og ved $t \approx 50$ har $q_{stromreg}$ et toppunkt. Dette toppunktet skyldes avviket i volumet ved $t = 40$. Avviket fører til at volumregulatoren guffer litt ekstra på, som igjen fører til at bidraget fra strømningsregulatoren øker. Resultatet av dette er toppunktet i strømningsmålingen, q_a , ved $t = 60$ i figur 7.13. Fra $t = 50$ til $t = 150$ varierer $q_{stromreg}$ rundt 30 ml/s. I tilfellet hvor en bruker riktig verdi på q_{max} , vist i figur 7.12, ser en at $q_{stromreg}$ ligger litt under 0 i det samme intervallet, som indikerer at $q_{max} = 300$ ml/s er en mer riktig verdi enn $q_{max} = 600$ ml/s.

Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering blir her 0.09 liter. Dette viser at resultatet ikke blir helt elendig selv med en q_{max} - verdi som er feil i forhold til virkelig verdi. Det er takket være strømnings - og volumregulatoren.

OBS: Jamfør også kommentarer om resultatenes presisjon i kapittel 7.4.

Figur 7.13: Regulering ved feil verdi på q_{max} .

Figur 7.14: Utsnitt av regulering ved feil verdi på q_{max} .Figur 7.15: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

7.3 Regulering ved bruk av Kalman-filte

I kapittel 7.1 ble det brukt en fast verdi på q_{max} . Dette fører til at det bare er q som kan gi endringer i den inverse ventilligningen. I dette kapitlet skal en bruke Kalman-estimatet av q_{max} , slik at også denne er med på å variere den inverse ventilligningen. Fra kapittel 5.7 ble det bestemt at en skal bruke et stasjonært Kalman-filte for å estimere strømning, q_a , og maksimal strømning, q_{max} . Det ble også gjort tester for å finne de beste verdiene på korreksjonsfaktorene K_{11} og K_{21} . De verdiene som viste seg å gi best resultat var $K_{11} = 0.05$ og $K_{21} = 0.1$.

I de neste delkapitlene skal en se på hvordan reguleringen fungerer ved bruk av det stasjonære Kalman-filte. En skal også teste det stasjonære Kalman-filteets evne til å detektere endring i q_{max} . Det vil si når nivået i tilsetningsstoff-tanken (tank 1) varierer (differensialtrykket over ventilen varierer).

Før en starter reguleringen må en sette startverdier på estimatene. Disse bestemmes ut fra kjennskap til prosessen. Strømningsmålingen starter alltid i ro, det vil si null strømning. Det vil si at startverdien på *a priori*-estimatet, $\bar{x}_1(0)$, av strømning, q_a , alltid settes lik null. Startverdien på *a priori*-estimatet, $\bar{x}_2(0)$, av maksimal strømning, q_{max} , kan være noe vanskeligere å bestemme. Settes denne i nærheten av riktig verdi, vil også den inverse ventilligningen bli tilnærmet riktig, og reguleringen vil fungere bra. Dersom startverdien er langt unna virkelig verdi, vil den inverse ventilligningen være veldig feil, og reguleringen blir dårlig i starten.

7.3.1 Regulering ved gode startverdier på Kalman-estimat

Starter med å se hvordan reguleringen fungerer dersom en har god kjennskap til startverdien på *a priori*-estimatet, $\bar{x}_2(0)$, av maksimal strømning, q_{max} . Vet at maksimal strømning gjennom ventilen ved et nivå på 300 mm i tanken er rundt 300 ml/s. En får da reguleringsforløpet som vist i figurene 7.16 - 7.18.

Som en ser fra figur 7.16 har estimatet, q_{max} , en dupp i starten. Dette er på grunn av den trege målingen, q_a , og at systemet er lite observerbart (liten verdi på u og forholdsvis stor T_k , jfr. kapittel 5.7). En kan se at ventilpådraget, u_a , begynner å øke ved $t \approx 10$ sek, mens strømningen, q_a , ikke stiger skikkelig før rundt $t \approx 20$ sek. Denne informasjonen tolker Kalman-filteet som at q_{max} er mindre enn hva som er antatt ved start. Men når strømningen øker ved $t \approx 20$ sek, øker estimatet på q_{max} igjen. Slik svinger Kalman-filteet frem til rundt $t \approx 80$ sek, hvor estimatet varierer rundt 320 ml/s. Figur 7.17 viser et utsnitt av hvordan estimatet varierer. I slutten av reguleringen kan en også se at q_{max} -estimatet igjen begynner å duppe. Dette er av samme grunn som nevnt tidligere, nemlig at systemet er lite observerbart ved at Kalman-filteet får lite informasjon fra prosessen; strømningsmålingen, q_a , og pådraget, u_a ⁷, går mot null og u_{min} henholdsvis. I tillegg er det også noe feil i modellen

⁷Bruker her notasjonen u_a , som er den samme som u_{LV001} brukt tidligere i oppgaven

i Kalman-filteret.

Fra figur 7.18 kan en se at bidraget fra strømningsregulatoren, $q_{stromreg}$, varierer omkring 0 fra $t = 80$ til $t = 180$. Grunnen til dette er at verdien på q_{max} - estimatet nå stemmer bedre med virkeligheten enn tilfellet var i kapittel 7.1. Her var $q_{max} = 300$ ml/s, noe som førte til at bidraget fra strømningsregulatoren lå noe under 0. Dette for å kompensere for feil verdi i q_{max} , jfr. figur 7.12.

Til tross for et relativt støyfullt q_{max} - estimat, fungerer reguleringen bra. Volumet, v_a , følger referansen bra, og det samme gjør strømmingen, q_a , dersom en ser bort fra innsvingningen i starten. Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering er her 0.05 liter.

7.3.2 Regulering ved dårlige startverdier på Kalman-estimat

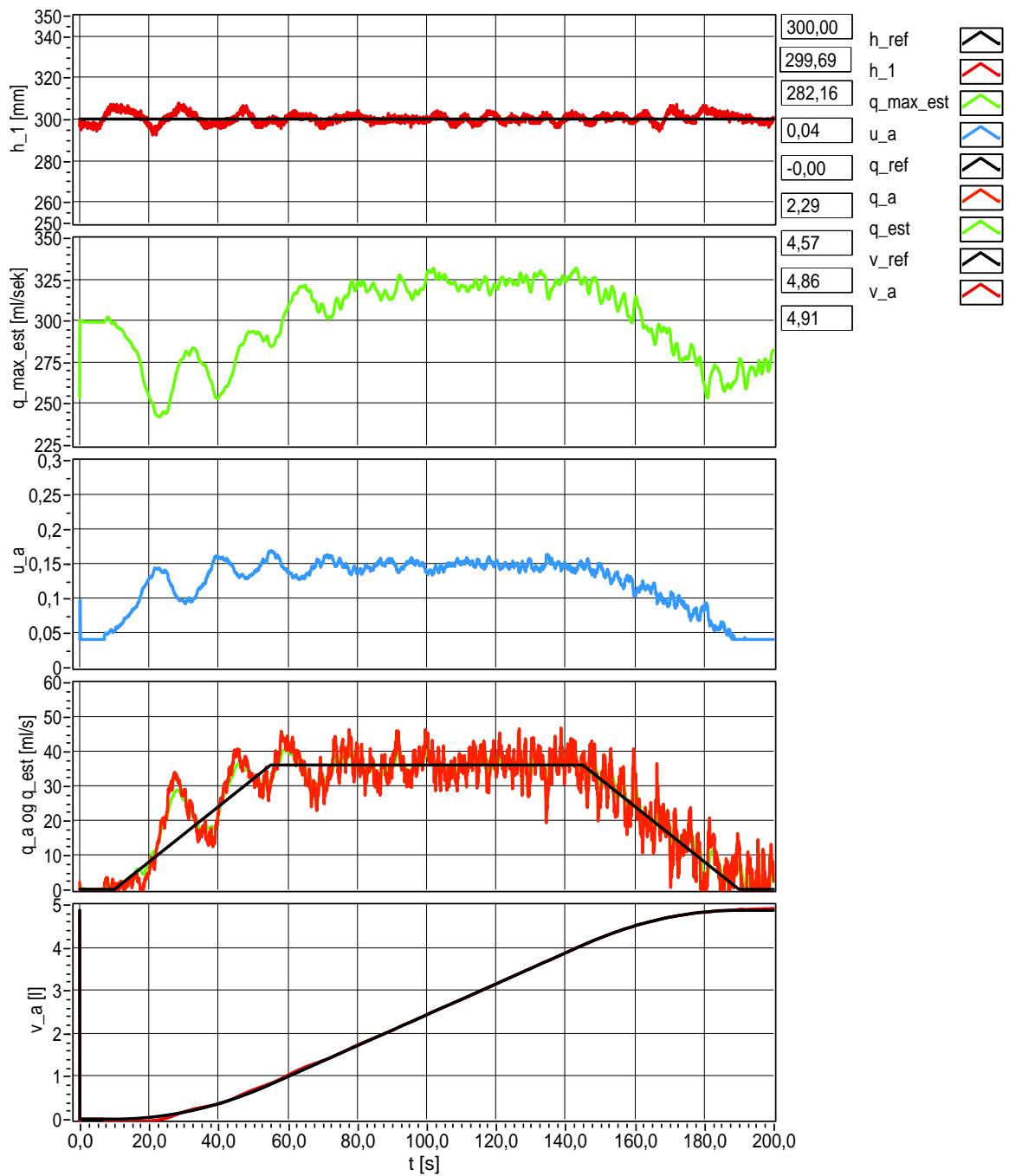
Dersom en har dårlig informasjon om startverdien på *a priori*-estimatene til Kalman-filteret, kan en få dårlig regulering i starten. Ved å velge startverdien på *a priori*-estimatet, $\bar{x}_2(0)$, lik 50 ml/s, når virkelig q_{max} er rundt 300 ml/s, får en resultatet som vist i figurene 7.19 - 7.22.

Ved å studere figur 7.19 ser en at estimatet, q_{max} , bruker omtrent 80 sek på å svinge seg inn til 300 ml/s. I innsvingningsfasen er estimatet av q_{max} mye mindre enn hva den virkelige verdien er. Dette betyr at den inverse ventilligningen (jfr. ligning 7.1) beregner feil ventilpådrag. Ventilpådraget blir mye større enn hva som trengs for at strømmingen, q_a , skal følge referansen. Når strømningsregulatoren merker at strømmingen, q_a , er mye større enn ønsket, vil den kompensere for dette ved å sette ned verdien på $q_{stromreg}$ i ligning (7.1). Dette fører til store svingninger (jfr. figur 7.21 og 7.22) før estimatet av q_{max} flater ut, og reguleringen blir roligere. Figur 7.20 viser hvordan q_{max} - estimatet varierer fra $t = 80$ sek til $t = 140$ sek. Ser at q_{max} - estimatet også her varierer omkring 320 ml/s.

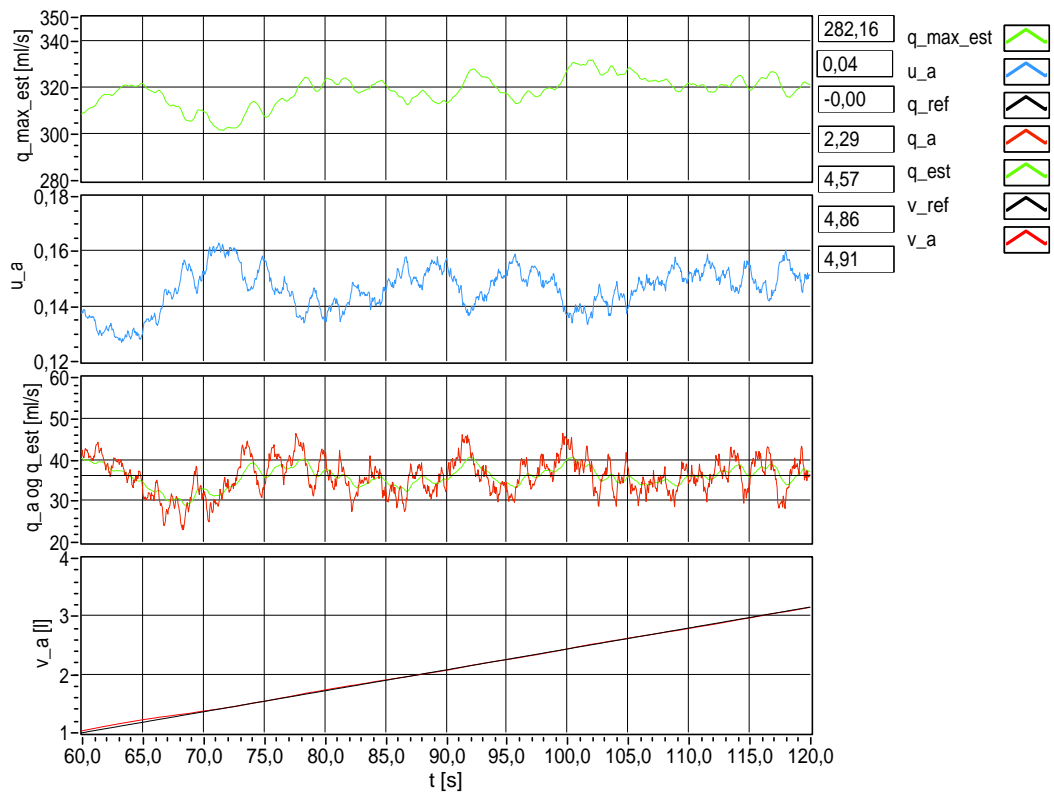
Fra figur 7.22 ser en hvordan strømningsregulatoren svinger i starten før den roer seg ned ved $t = 80$, hvor den varierer rundt 0.

Til tross for svingningene i starten, fungerer reguleringen også her. Volumregulatoren retter opp feil i volumet, slik at v_a er tilnærmet lik referansen v_{ref} ved $t = 200$ sek. Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering er også her 0.05 liter.

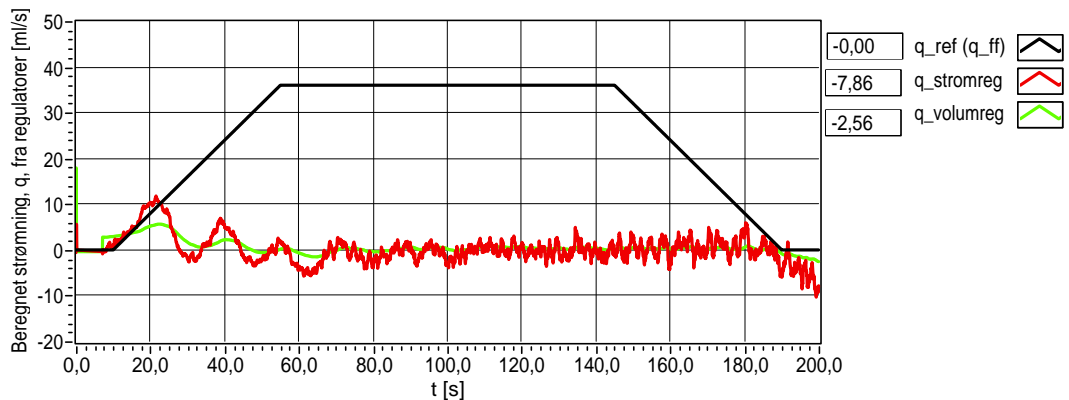
OBS: Jamfør også kommentarer om resultatenes presisjon i kapittel 7.4.



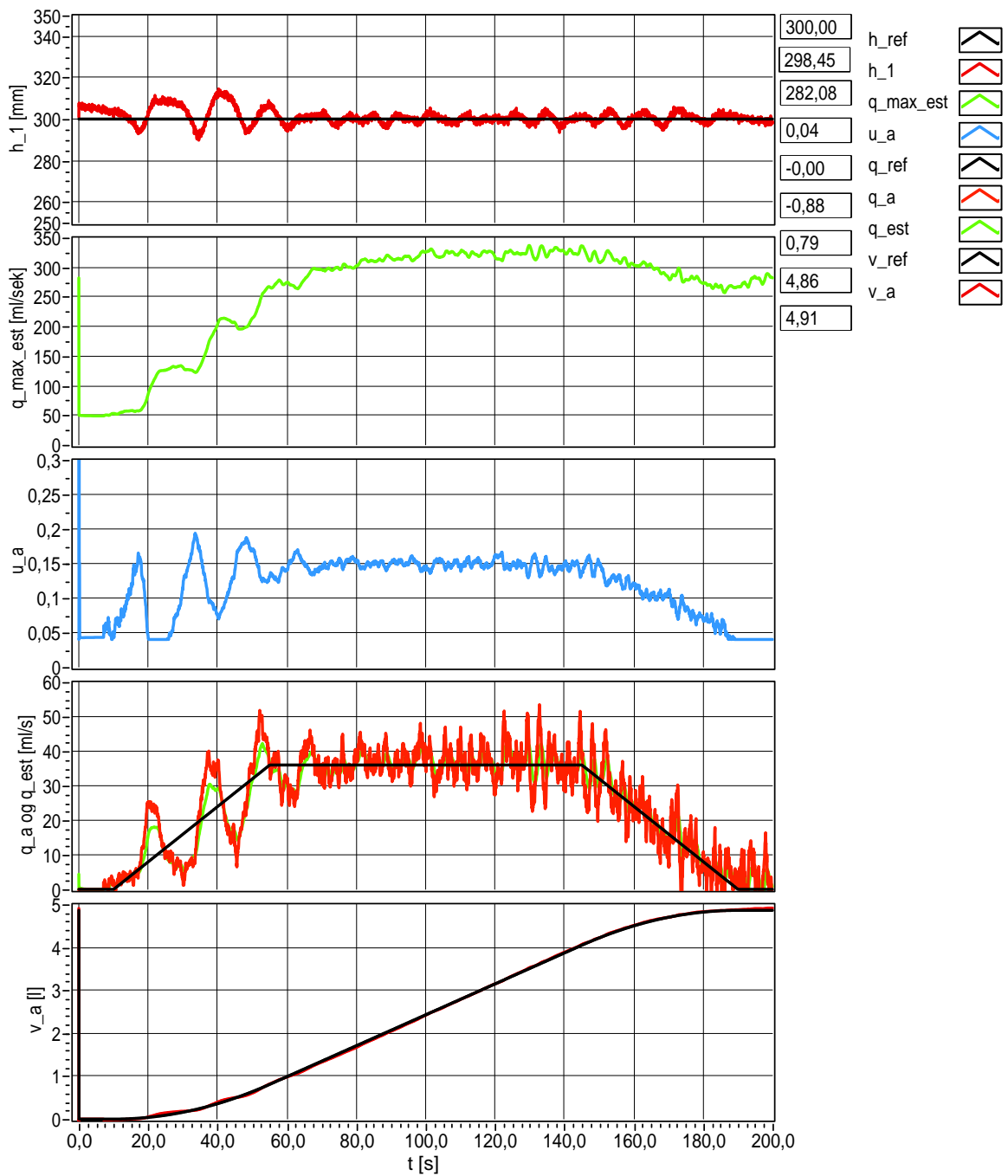
Figur 7.16: Regulering ved bruk av Kalman-filter. Her med gode startverdier på Kalman-estimat.



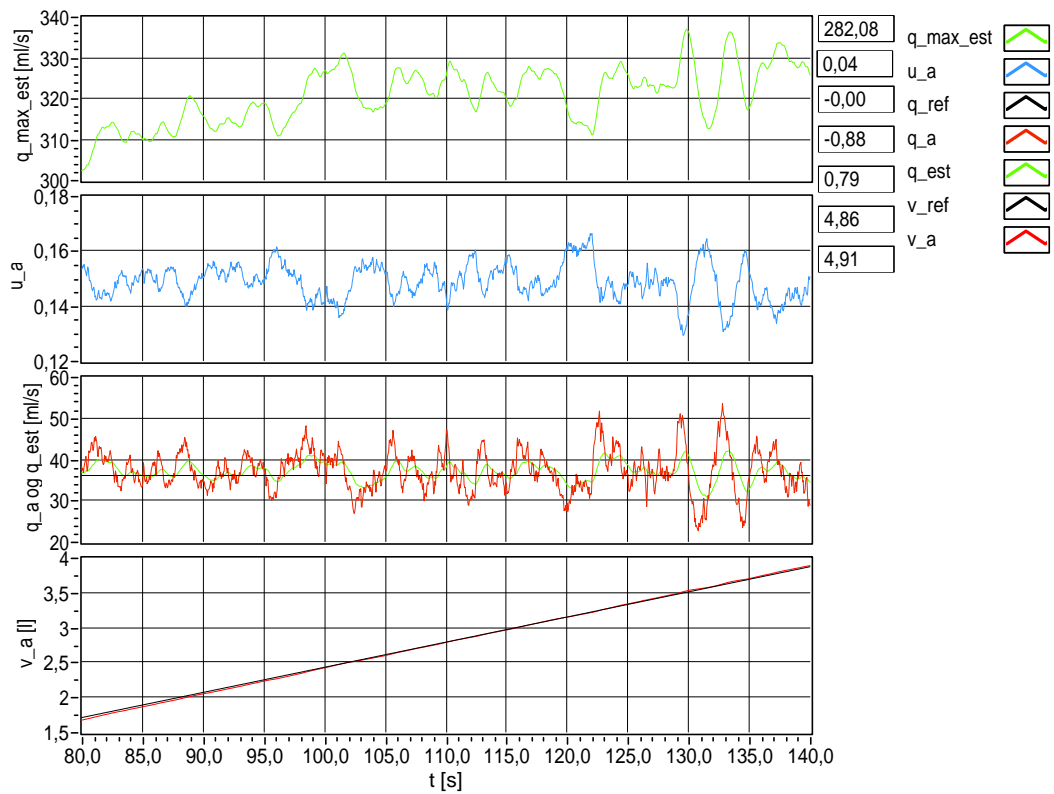
Figur 7.17: Utsnitt av regulering ved bruk av Kalman-filter. Her med gode startverdier på Kalman-estimat.



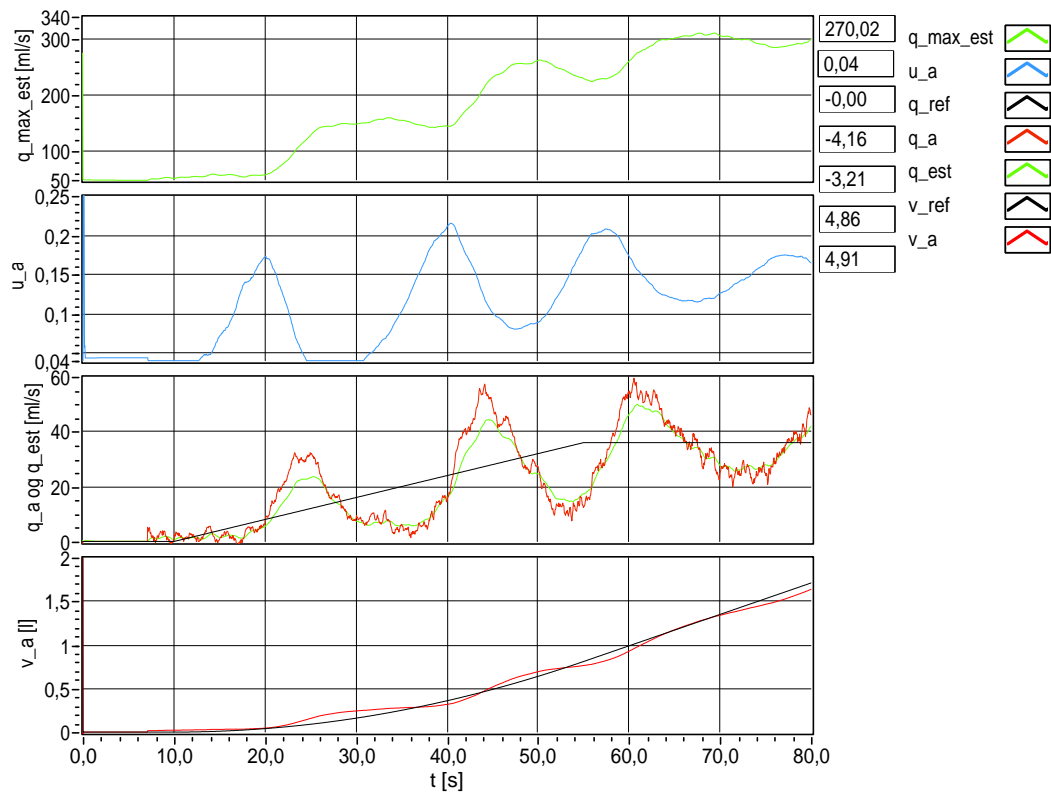
Figur 7.18: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).



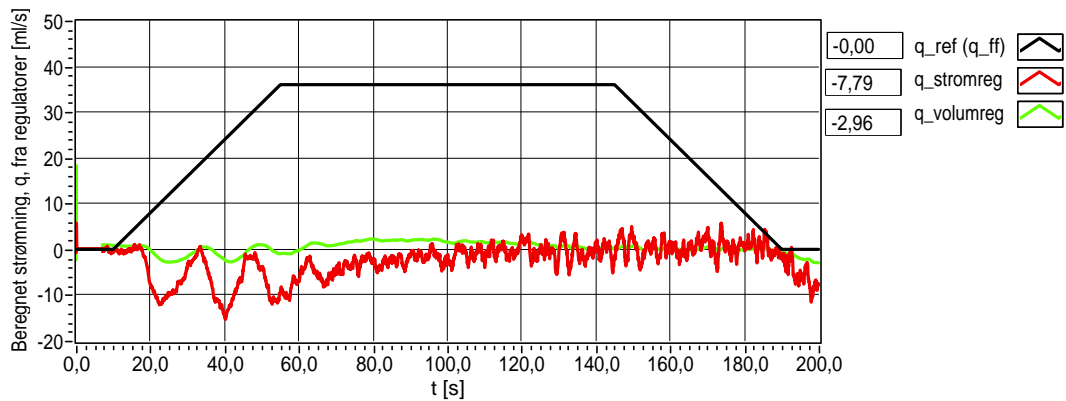
Figur 7.19: Regulering ved bruk av Kalman-filter. Her med dårlige startverdier på Kalman-estimat.



Figur 7.20: Utsnitt av regulering ved bruk av Kalman-filte. Her med dårlige startverdier på Kalman-estimat.



Figur 7.21: Regulering ved bruk av Kalman-filter. Figuren viser innsvningningen ved bruk av dårlige startverdier på Kalman-estimat.



Figur 7.22: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkoper. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkoperen, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

7.3.3 Kalman-filterets evne til å oppdage endringer i q_{max}

For å teste hvor bra Kalman-filteret oppdager endringer i q_{max} , ble det gjort et par tester på testanlegget. Ved å endre nivået i tank 1, vil differensialtrykket over ventilen endre seg. Dette fører også til at verdien på q_{max} endres.

Tester med økende og synkende nivå i tanken:

Økende nivå i tank

Setter sprang i referansen til nivåregulatoren og får responsen som vist i figurene 7.23 - 7.25. Spranget går ved $t = 60$ sek, og ved $t = 70$ sek kan en se at q_{max} - estimatet øker merkbart fra rundt 300 ml/s til rundt 370-380 ml/s. Estimatet varierer omkring 380 ml/s frem til rundt $t = 150$ sek. Da begynner estimatet å falle igjen. Dette er av samme grunn som forklart i forrige delkapittel, nemlig at systemet blir lite observerbart, ved at Kalman-filteret får lite informasjon fra prosessen, og feil i modellen i Kalman-filteret. Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering er her 0.07 liter.

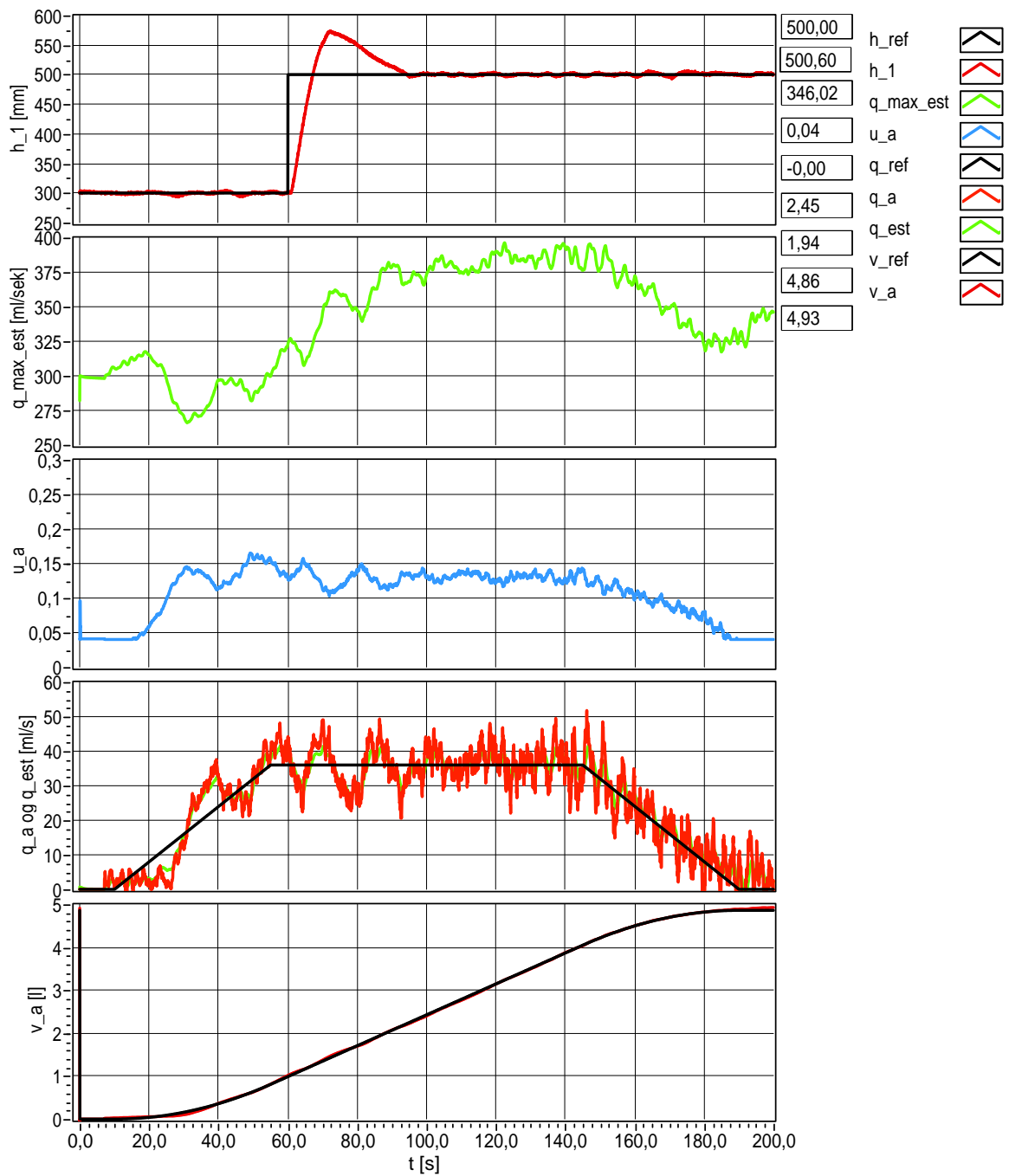
For å motivere for bruken av Kalman-filter til å estimere q_{max} , er reguleringsforløpet vist i figur 7.23 gjentatt ved bruk av en fast verdi på q_{max} . Resultatet av dette er vist i figurene 7.26 - 7.28. q_{max} er her lik 300 ml/s gjennom hele reguleringen, selv om nivået i tank 1 øker. Dette fører til at q_{max} er feil i forhold til virkelig verdi fra $t = 60$. Regulatorene i reguleringssystemet må derfor kompensere for denne feilen. Dette kan sees ut fra figur 7.28 hvor bidraget fra strømningsregulatoren endres fra rundt 0 ml/s til -10 ml/s ved tidspunktet spranget i nivået går. I figur 7.26 kan en også registrere at spranget i nivåreferansen gjør at volumavviket blir noe større ved $t \approx 70$, sammenlignet med tilfellet i figur 7.23. Dette avviket kompenserer volumregulatoren for, ved å sette ned bidraget i $q_{volumreg}$, vist i figur 7.28 ved $t \approx 75$. Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering er her 0.06 liter, altså bedre enn dersom en bruker Kalman - estimatet av q_{max} !

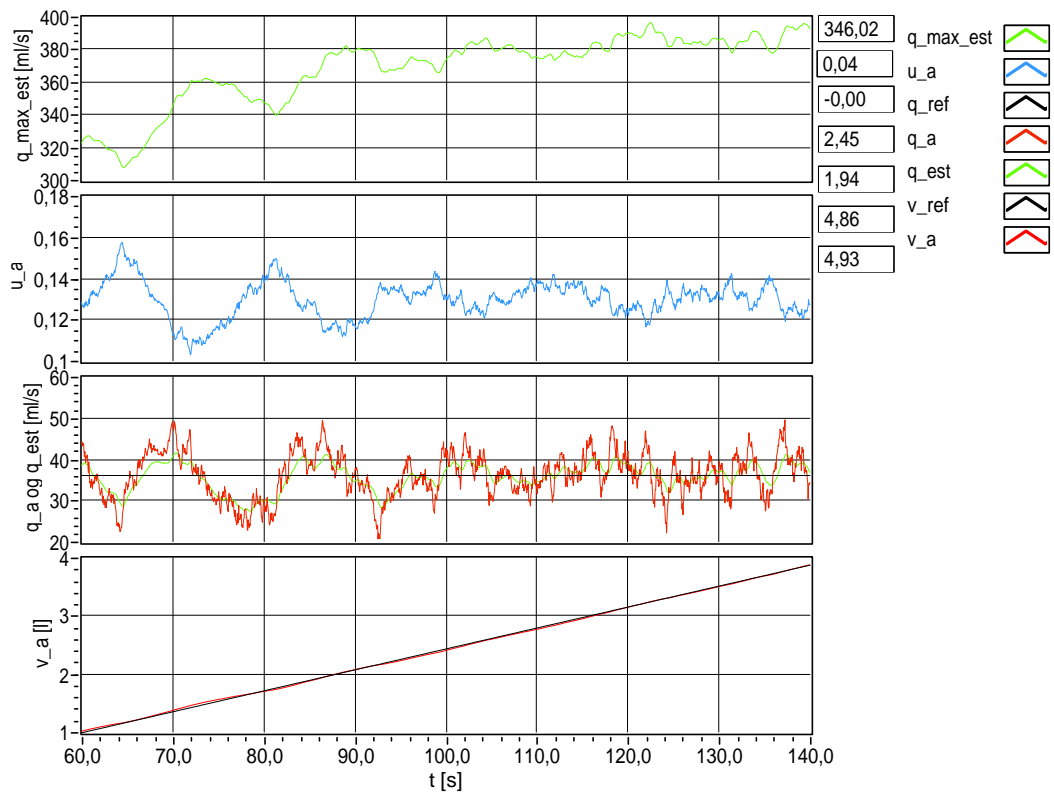
Synkende nivå i tank

Tester nå hvordan Kalman-filteret reagerer på synkende q_{max} . Synkende q_{max} realiseres ved å sette et negativt sprang i referansen til nivåregulatoren. En får da responsen som vist i figurene 7.29 - 7.31. Spranget går ved $t = 60$ sek, fra 600 mm til 300 mm. Setter startverdien på q_{max} - estimatet lik 400 ml/s, ut fra kjenneskap til prosessen. Etter at spranget går, kan en registrere at nivået begynner å synke momentant. Ved å studere kurven til q_{max} - estimatet, ser en at verdien på q_{max} begynner å synke rundt $t = 70$ sek. Estimatet synker da sakte, samtidig som nivået i tanken synker. Ved $t = 150$ sek er nivået i tanken konstant igjen, mens estimatet fortsetter å synke. Dette på grunn av at systemet blir lite observerbart, ved at Kalman-filteret får lite informasjon fra prosessen. Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering er her 0.06 liter.

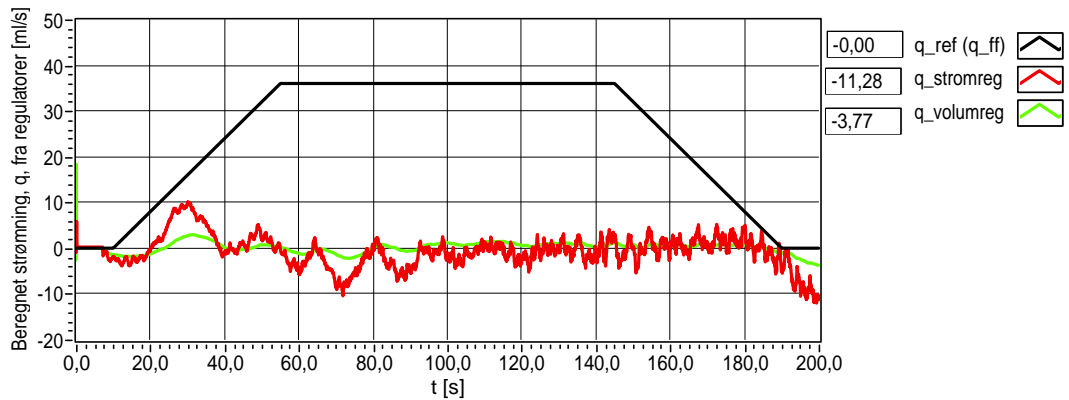
Også her er reguleringsforløpet i figur 7.29 gjentatt, men hvor en nå bruker en konstant verdi på q_{max} . q_{max} er nå satt lik 400 ml/s som er tilnærmet riktig verdi ved et nivå på 600 mm i tank 1. En får da resultatet som vist i figurene 7.32 - 7.34. Fra figur 7.32 kan en merke seg at ventilpådraget, u , øker ved synkende nivå i tanken. Dette er logisk, da det må et større ventilpådrag til for å holde samme strømming dersom differensialtrykket over ventilen synker. Fra figur 7.34 kan en også se hvordan strømningsregulatoren kompenserer for feilen i q_{max} , ved at bidraget fra regulatoren øker ved synkende nivå i tank 1 (fra $t = 60$). Avviket, $e_{v,slutt}$, ved endt regulering er her 0.06 liter.

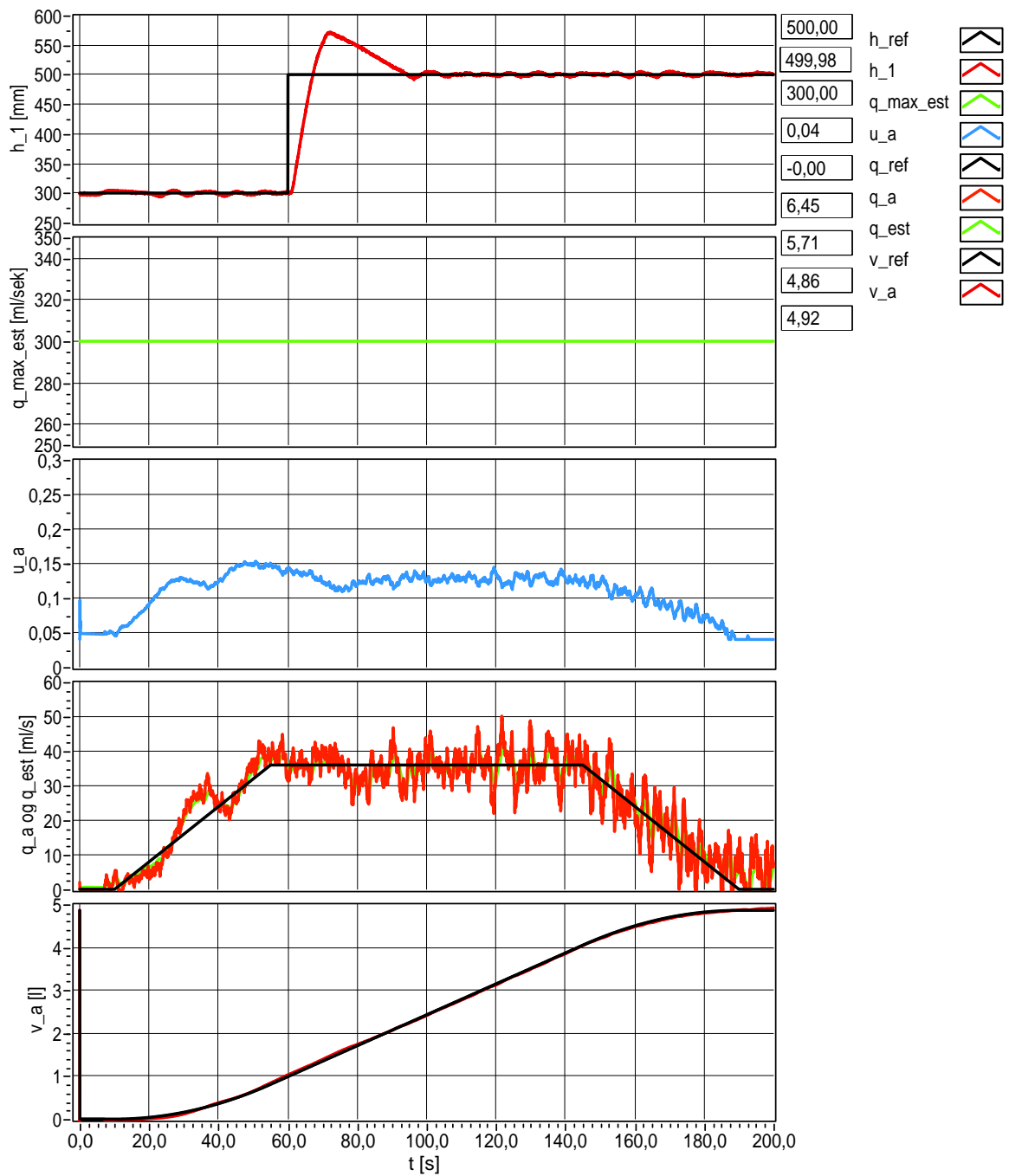
MERK: På grunn av et relativt kort reguleringsforløp (200 sek) vil ikke testene være optimale. Det augmenterte Kalman-filteret krever at modellparameterne er langsomt-varierende i forhold til selve prosessdynamikken, jfr. kapittel 3.3.9. Dersom en kunne regulert prosessen over lengre tid kunne en lettere sett effekten av økende og synkede nivå i tanken.

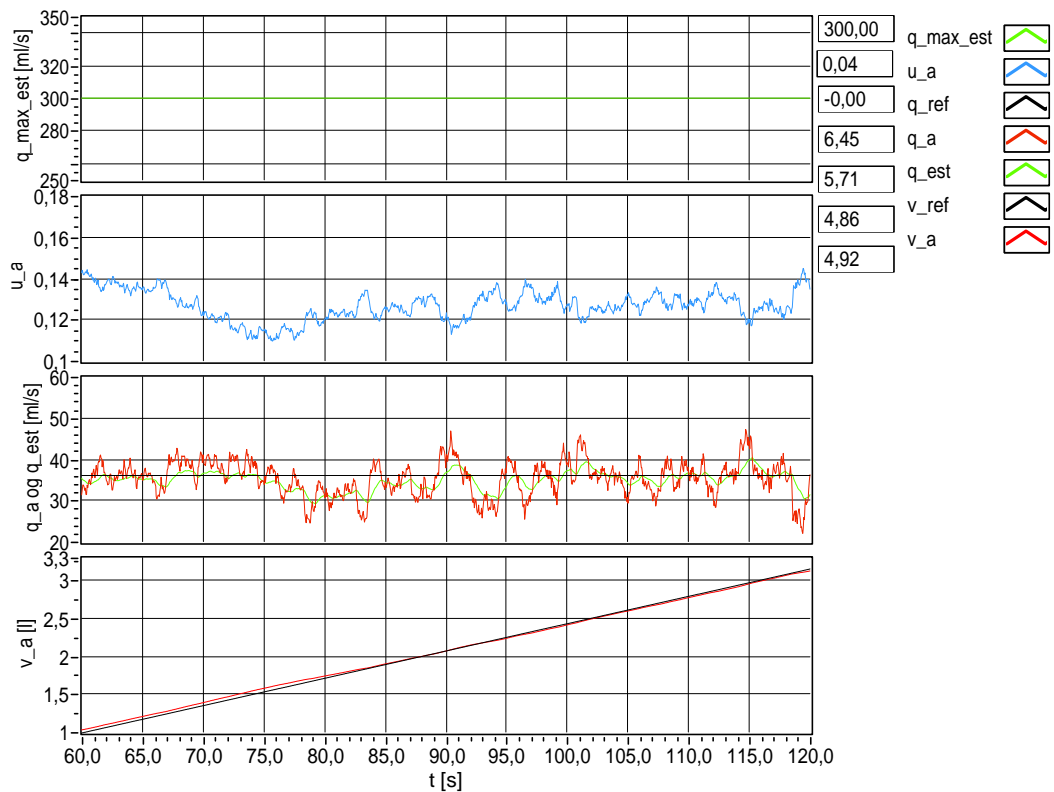
Figur 7.23: Kalman-filterets evne til å detektere økende q_{max} .



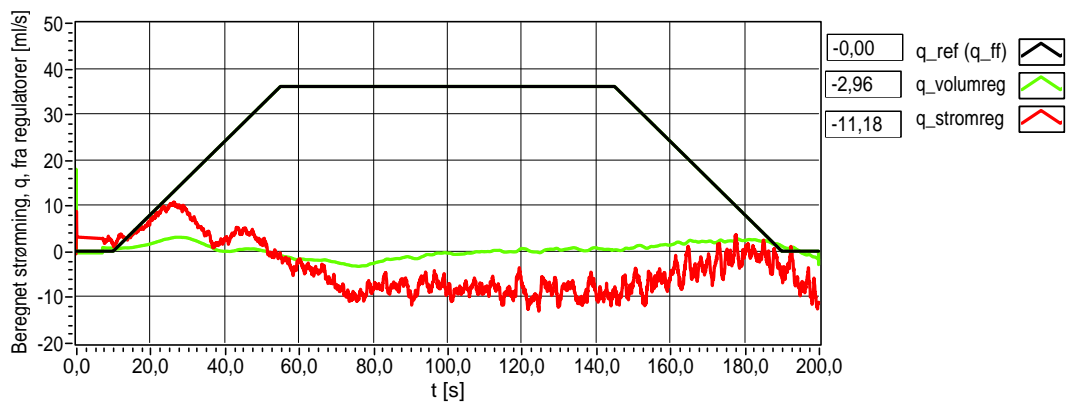
Figur 7.24: Utsnitt av figur 7.23.

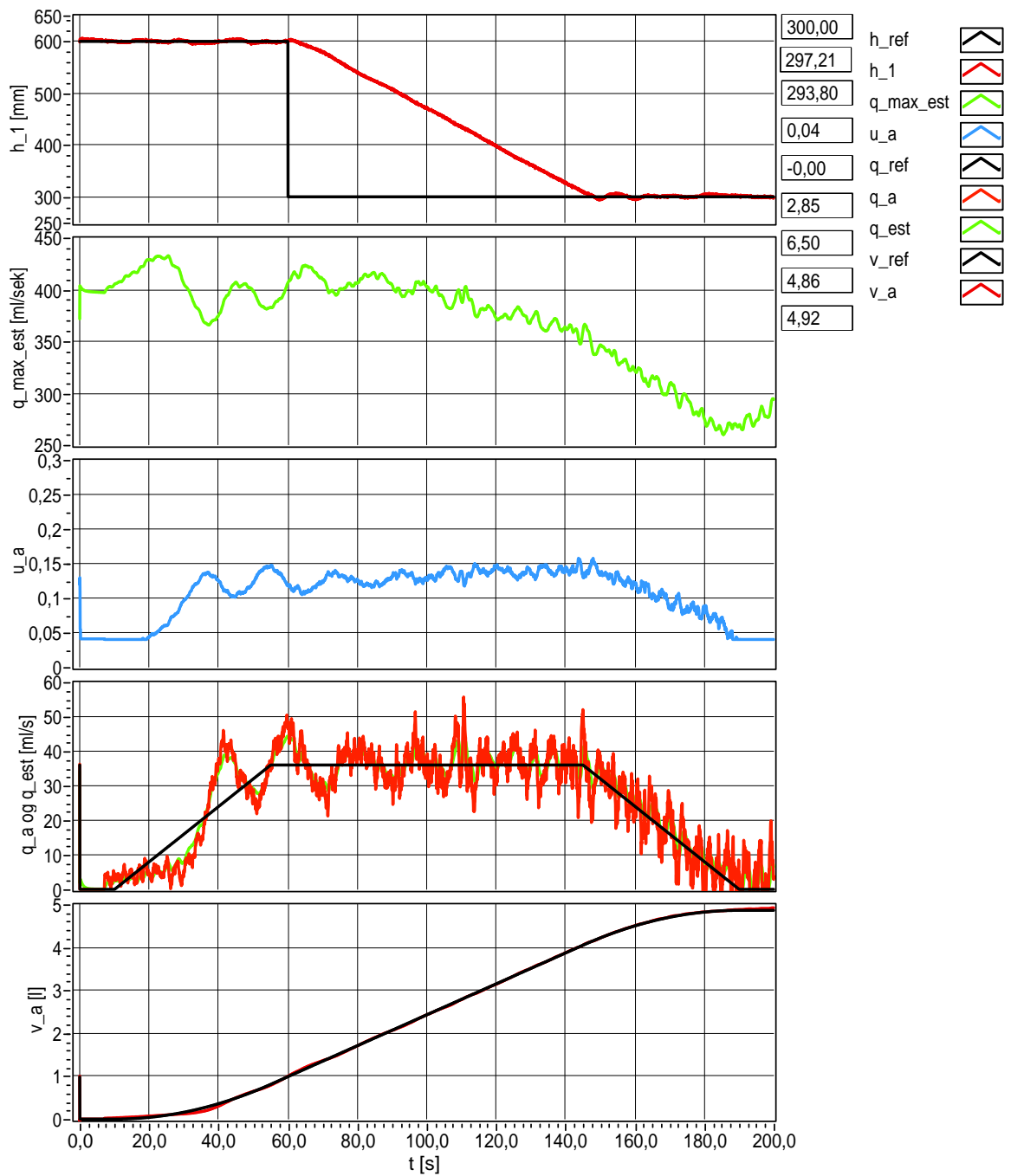
Figur 7.25: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

Figur 7.26: Regulering med bruk av fast q_{max} ved sprang i nivå.

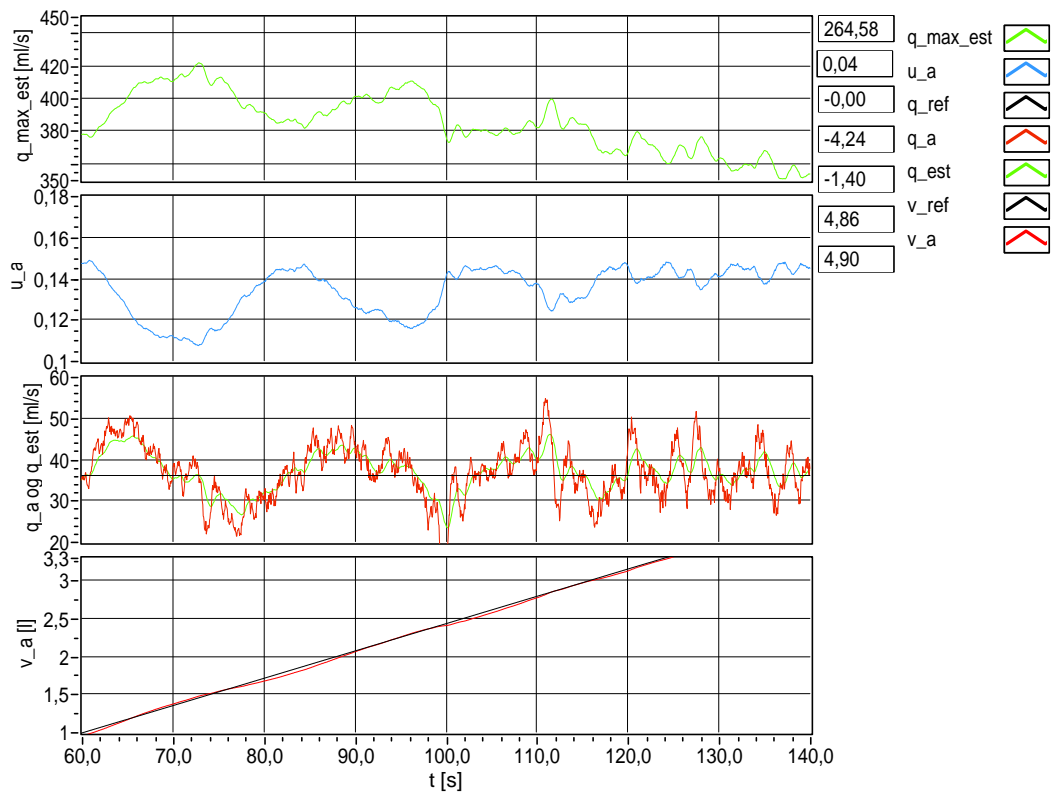


Figur 7.27: Utsnitt av figur 7.26.

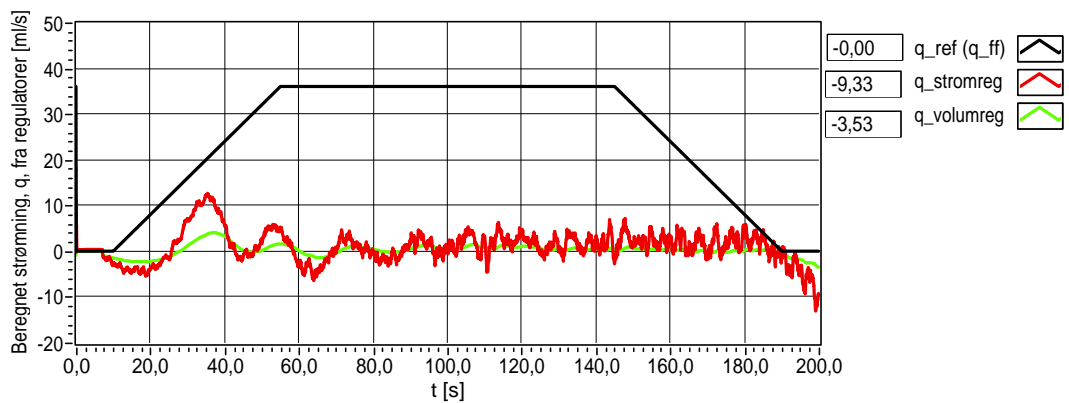
Figur 7.28: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkopler. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkopleren, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

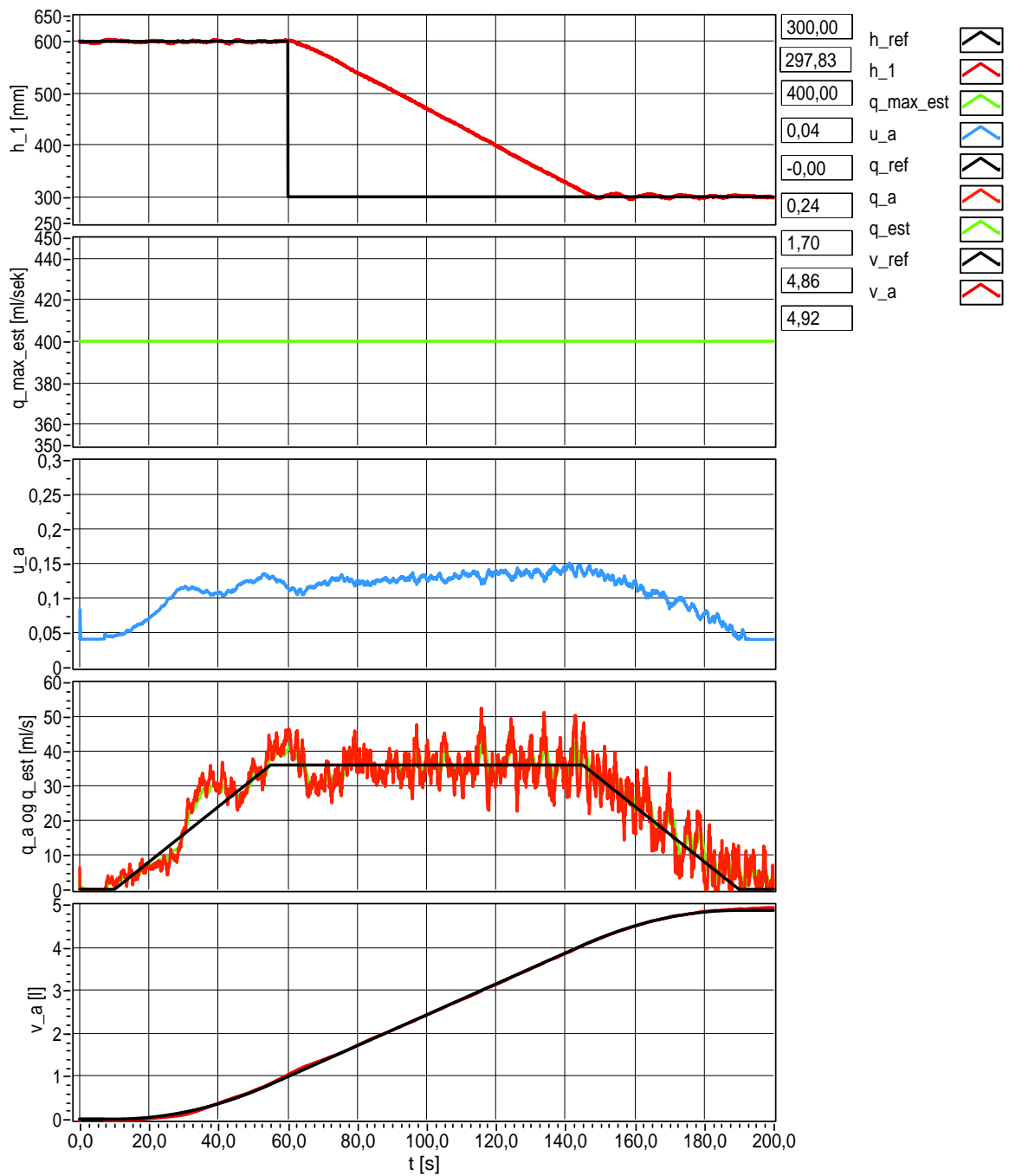


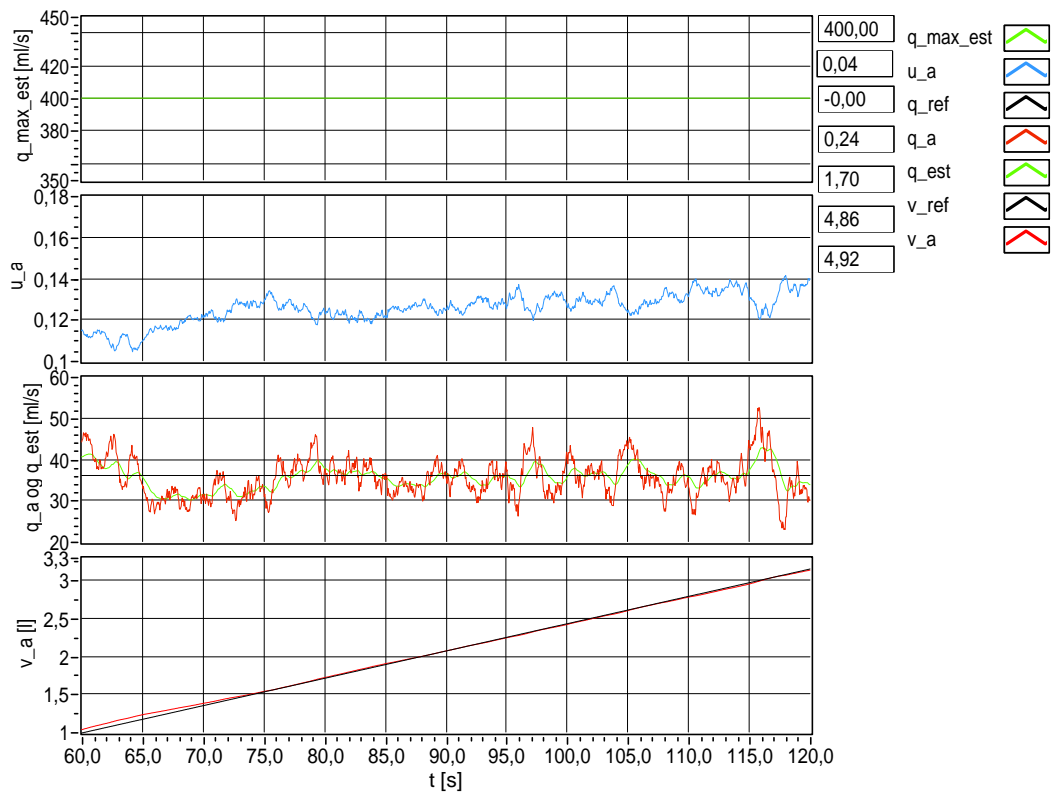
Figur 7.29: Kalman-filterets evne til å detektere synkende q_{max} .



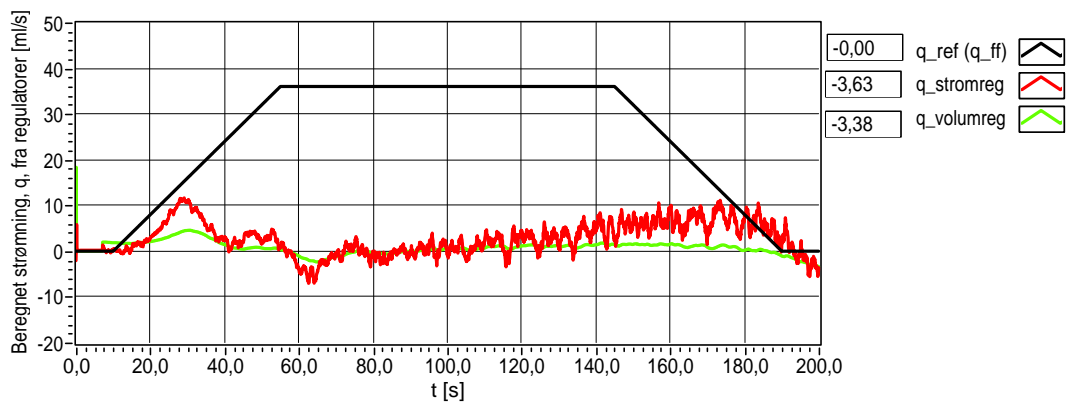
Figur 7.30: Utsnitt av figur 7.29.

Figur 7.31: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkoper. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkoperen, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

Figur 7.32: Regulering med bruk av fast q_{max} ved sprang i nivå.



Figur 7.33: Utsnitt av figur 7.32.

Figur 7.34: Bidrag fra volumregulator og strømningsregulator med foroverkoper. Den sorte grafen er bidraget fra foroverkoperen, q_{ff} . (som også er referansen, q_{ref}).

7.4 Resultatene presisjon

Teorien om IAE og TV er hentet fra kapittel 7.1 i [6].

Figurene vist i kapittel 7 gir et dårlig bilde av presisjonen i hver enkelt regulering. For å bestemme om reguleringen er god, er det tatt utgangspunkt i hvordan volumet, v_a , følger v_{ref} , og hvordan strømmingen, q_a , følger q_{ref} . I tillegg er avviket ved endt regulering, $e_{v,slutt}$, sammenlignet ved de forskjellige reguleringsforløpene. I etterpåklokskap ser en at en burde benyttet seg av et ytelsesmål for å kvantifisere reguleringsystemets ytelse. To kjente ytelsesmål er IAE (integral of absolute error) og TV (total variation), og disse er definert på følgende vis:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (7.2)$$

der $e = v_{ref} - v_a$ er reguleringsavviket.

$$TV(u) = \sum_{k=0}^{\infty} |u(t_{k+1}) - u(t_k)| \quad (7.3)$$

Den mest brukte metoden er IAE -integralet. IAE integrerer opp feilen, slik at jo mindre IAE -verdi, jo bedre ytelse. TV sier noe om pådragsbruken til reguleringsystemet, og denne ønskes minst mulig for å få et glattest mulig pådrag.

Dersom en for hver enkelt reguleringsforløp hadde hatt informasjon om TV , IAE og $e_{v,slutt}$, kunne en laget en tabell (jfr. tabell 7.2) som sammenlignet resultatene. En får da et bedre bilde over hvilket reguleringsforløp som er best.

-	Strømreg u/forover	Strømreg m/forover	Strømreg u/forover + volumreg	Strømreg m/forover + volumreg
$e_{v,slutt}$	0.11	0.06	0.10	0.04
IAE	?	?	?	?
TV	?	?	?	?

Tabell 7.2: Reguleringsystemets ytelse.

I tillegg til å gi et mål på ytelsen av resultatene i kapittel 7, ville IAE og TV også gjort det lettere å velge de beste reguleringsparametrene ved dimensjonering av strømnings- og volumregulator i kapittel 5.5 og 5.6.

Dersom denne oppgaven skal utvides, i for eksempel en ny hovedoppgave, bør en bruke IAE og TV .

8 Diskusjon og konklusjon

Resultatene i kapittel 7 viser at forholdsreguleringen fungerer. Strømningen, q_a , følger strømningsreferansen, q_{ref} , bra. De stedene strømningsmålingen ikke klarer følge strømningsreferansen, vil volumregulatoren hjelpe til, slik at også volumet, v_a , hele tiden følger volumreferansen, v_{ref} . Fra kapittel 7.1 ser en viktigheten av å bruke strømningsregulator med foroverkoper i kombinasjon med en volumregulator. Dersom en ikke bruker disse, vil en få treg regulering i starten, som fører til et avvik i volumet, $v_{ref} - v_a \neq 0$. Dette avviket i volumet vil en ha problemer med å hente inn dersom en ikke har en volumregulator i reguleringsystemet.

En viktig grunn til at reguleringen fungerer, er eksperimentene gjort på ventil LV001. Spesielt viktig har eksperimentet som kartla ventilkarakteristikken, $f(u)$, (jfr. kapittel 4.1) vært for at reguleringen fungerer bra. Fra figur 4.5 ser en at dersom en velger feil modell for ventilkarakteristikken, vil en kunne få store feil i reguleringen. I denne oppgaven ble det brukt en lineær modell for ventilkarakteristikken, som gir små feil ved ventilpådrag, $u \leq 0.5$. Maksimal feil er da 4.66%, mens ved ventilpådrag, $u > 0.5$, er feilen opp i mot 10.3%. Reguleringsystemet i denne oppgaven opererer bare med ventilpådrag $u \leq 0.5$, slik at den lineære modellen for ventilkarakteristikken fungerer bra her. Eksperimentet viser hvor viktig det er å vite hvilken karakteristikk ventilen har. Dersom ventilen har oppgitt en spesifikk karakteristikk i databladet, bør en likevel verifisere denne for å kartlegge eventuelle feil.

Målet om å utvikle et robust Kalman-filteret ble delvis vellykket. Resultatene fra det generelle Kalman-filteret, som ble utviklet først, la grunnlag for et stasjonært Kalman-filter. Ved bruk av det stasjonære Kalman-filteret slapp en unna med en mye enklere algoritme og et mindre krav til prosessorkraft ved beregning av algoritmen. I kapittel 7.3 kan en se at reguleringen med det stasjonære Kalman-filteret fungerer bra, så lenge en velger gode startverdier på Kalman-estimatene. Ved dårlige startverdier får en dårlig regulering i starten, men siden det tenkes at tankingsanlegget kjører kontinuerlig over lengre perioder, vil ikke dette innsvingningsforløpet spille så stor rolle i den store sammenheng. Det stasjonære Kalman-filteret er noe tregt, og sliter spesielt i starten og slutten av reguleringen. Dette er på grunn av at systemet starter og slutter i ro, med null ventilpådrag og ingen strømning, som betyr at systemet er lite observerbart. I tillegg stemmer modellen i Kalman-filteret dårlig her. I disse periodene vil Kalman-estimatene svinge veldig, men etter hvert som reguleringen kommer i gang, vil også Kalman-estimatene svinge seg inn.

En ulempe med testanlegget i denne oppgaven er at strømningsmålingen, q_a , er beheftet med veldig mye støy. Dette påvirker reguleringen ved at reguleringsavviket til strømningsregulatoren blir støyfullt. I tillegg påvirker støyen Kalman-filteret, ved at estimatet av q_{max} blir støyfullt. q_{max} inngår som kjent i den inverse ventilligningen:

$$u = \frac{q}{q_{max}}(1 - u_{min}) + u_{min}$$

Fra denne ligningen ser en at dersom både q_{max} og q (bidrag fra regulatorer) er støyfulle, vil også ventilpådraget, u , bli støyfullt. En kan dermed si at strømningsmålingen, q_a , har

vært en begrensende faktor for denne oppgaven. I tillegg har det heller ikke vært mulig å teste ut Kalman-filteret grundig, på grunn av at strømningsmålingen, q_a , er gitt av den deriverte av tank 2. Når tank 2 er full, blir den deriverte lik 0, og strømningsmålingen blir inaktiv. Alle testene av Kalman-filteret har derfor blitt gjort innenfor en tidsperiode på 200 sek.

Et forslag til videre utvikling, i for eksempel en ny hovedoppgave, kan derfor være å installere en strømningsmåler på utgangen av ventil LV001, og så gjenta det som er gjort i denne oppgaven. Med en direkte måling av strømmingen ut fra ventilen vil en få en raskere og mindre støyfull måling. Dette vil kunne føre til **raskere regulering** og **bedre Kalman-estimat**.

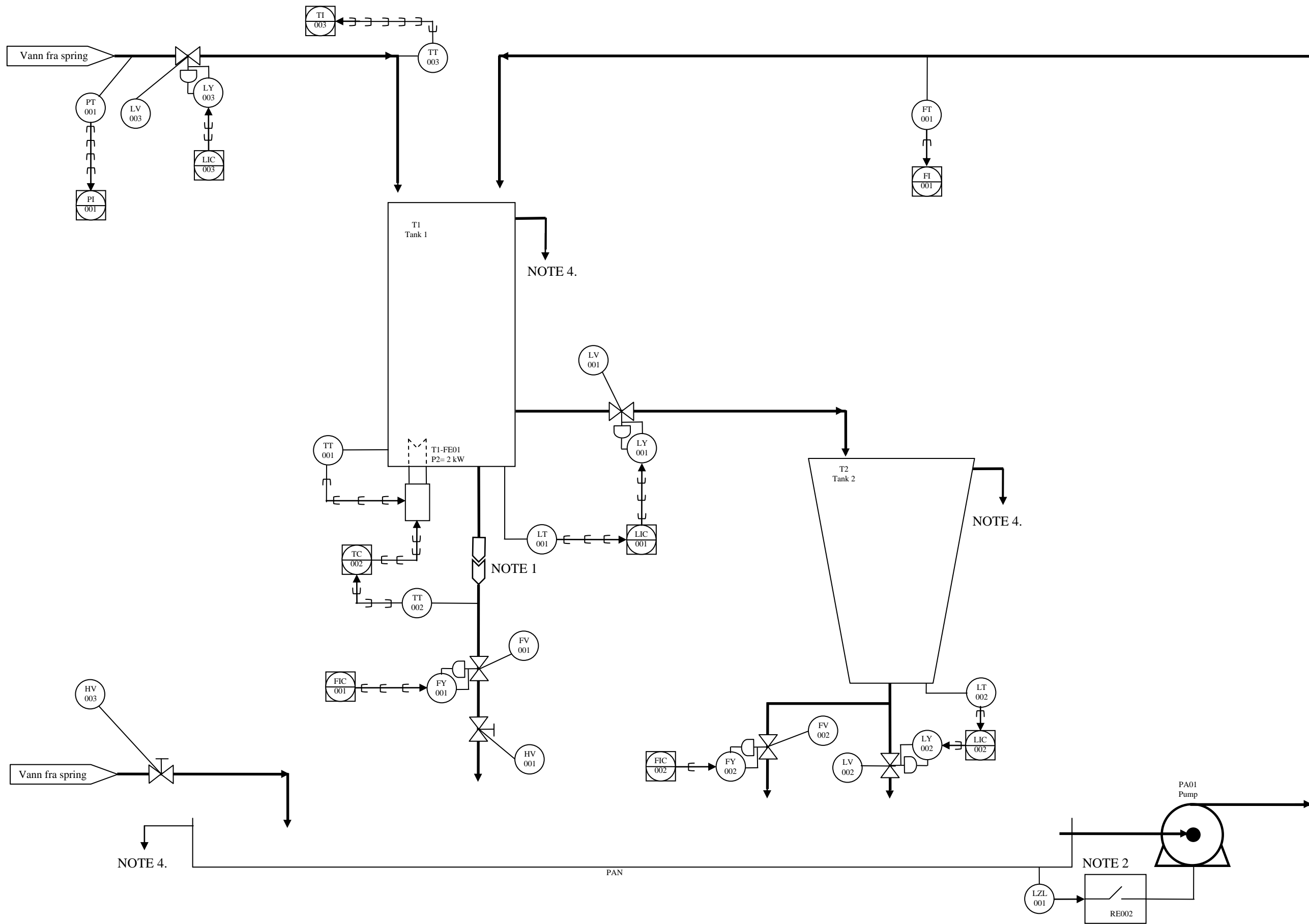
I et eventuelt videre arbeid bør en også benytte seg av metoder som sier noe om ytelsen til reguleringssystemet, for eksempel metodene IAE og TV , beskrevet i kapittel 7.4.

Referanser

- [1] Tormod Drengstig. *Totankøving 2 - Modelling*, 2008.
- [2] Atle Gjengedal. *Sammenligning av EKF- og UKF- kalmanfilter anvendt på totankprosessen*. Master's thesis, Universitetet i Stavanger, 2009.
- [3] Finn Haugen. *Regulering av dynamiske systemer*. Tapir forlag, 1994.
- [4] Finn Haugen. *Dynamiske systemer, 2 utgave*. Tapir Akademiske forlag, 2003.
- [5] Finn Haugen. *Lecture notes in models, estimation and control*. Tapir Akademiske forlag, 2003.
- [6] Finn Haugen. *Praktisk reguleringsteknikk, 2 utgave*. Tapir Akademiske forlag, 2003.
- [7] Finn Haugen. *Softsensor (Kalman-filter)*. www.techteach.no, November 2008.
- [8] Ben Ove Landa og Bjørnar Langeland. Bachelor-oppgave: *Interaktiv totank*, 2008.
- [9] Karl Skretting. *Notat 3 - MIK130 Systemidentifikasjon*. <http://www.ux.uis.no/karl-sk/MIK130/>, 2009.
- [10] Morten Tengedal. *Tilstands-estimering*. Universitetet i Stavanger, 4.utgåve, 2009.

Notes

1. A spiral made by a hose. Time delay.
2. Safety relay for 230V AC power supply to pump.
3. Spillway.











Rev	Date	Description	Sign	Chk	Appr
01	08.03.2005	Issued for creation.	TN		
Kandidatoppgave 2005					






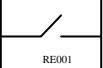
Tittel: P&ID PROCESS	
Drawing no: UIS-PID-001	Rev 01

Library and symbol











Tag symbols control-room

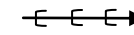
	Control room – Valve position indication and control
	Control room – Position indication
	Control room – Valve (level) position indication and control
	Control room – Temperature control
	Control room – Temperature indication
	Control room – Flow indication
	Control room – Pressure indicator
	Control room – Valve (flow) position indication and control

equipment symbols

	Valve with positioner
	Manual valve
	Pump
	Relay

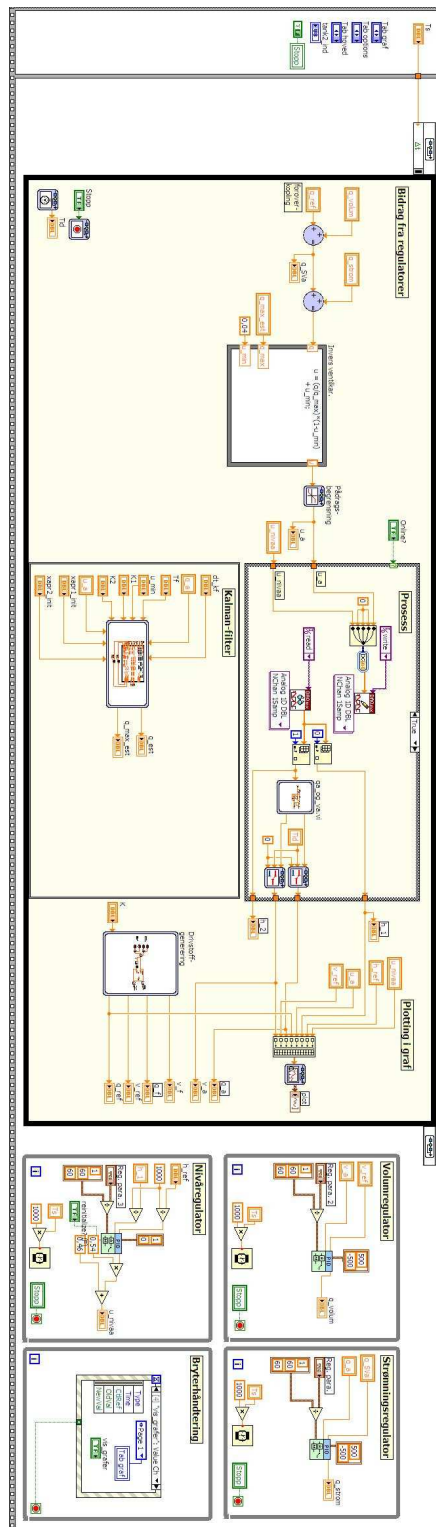
Tag symbols control-room

	Field – Temperature transmitter
	Field – Level switch low
	Field – Position transmitter
	Field – Level controlled valve
	Field – Actuator on level valve
	Field - Valve
	Field – Flow transmitter
	Field – Pressure transmitter
	Field – Flow controlled valve
	Field – Actuator on flow valve



Electrical Signal

B LabVIEW-kode



Figur B.1: Hele koden til reguleringssystemet i LabVIEW.

C Matlab-kode

C.1 KF_generelt_bjla.m

```
{%
%% Laster inn logget data
clear all
logg = xlsread('logg_fra_totank.csv');

% Deklarerer variabler fra excel-ark
h = logg(:,2)';
u = logg(:,3)';
y = logg(:,4)';

%% Augmentert Kalman-filter.
% Kode basert på m-fil fra Morten Tengedal

% Definerer systemorden, samplelengde og sampleintervall.
nx = 2;
ny = 1;
ns = length(y);
dt = 0.05;

% Definer tidsvektor
t = zeros(1,ns);
for i = 1 : ns
    t(1,i) = (i-1)*dt;
end

% Verdier paa prosesskonstanter
Tf = 3.1; %
u_min = 0.04;

% Definer aprioriestimat og aposterioriestimat samt prediktert maaling.
xapr = zeros(nx,ns);
xapo = zeros(nx,ns);
ypred = zeros(ny,ns);

% Definer kovariansmatriser
Xapr = zeros(nx,nx);
Xapo = zeros(nx,nx);
Q = zeros(nx,nx);
R = zeros(ny,ny);
```

```

% Diverse systemmatriser
phi = zeros(nx,nx); % Linearisert transisjonsmatrise for diskret system
D   = zeros(ny,nx); % Maalematrise
I   = eye(nx);      % Identitetsmatrisa
Omega = dt*I;      % Omega = C*dt,C koblar inn v i den kont. modellen

% Definer korreksjonsmatrise for Kalmanfilteret
K   = zeros(nx,ny); %Korreksjon av nx estimat basert paa ny maalingar.

% Definer historiedata for kovariansar og korreksjonar
Xapo_hist = zeros(nx,ns);
K_hist    = zeros(nx,ns);

% 2. ESTIMERING AV TILSTANDAR OG PARAMETRAR MED AUGMENTERT KALMAN-FILTER

Xapr(1,1) = 1000; % Startverdi ventilstraumsvarians
Xapr(2,2) = 1000; % Startverdi for variansen til q_max-estimatet

R(1,1)    = 16; % Maalestoeyvarians (Gaar utfraa stdavvik = 4ml/sek)

Q = diag([ 100 % Prosesstoeyvarians for q_est-likninga % 50
          100]); % Prosesstoeyvarians for q_max-likninga %50

D(1,1)    = 1; % Maaler bare den filtrerte ventilstrømmen her

% Til slutt startverdiar for tilstandsestimata

xapr(1,1) = 0; % Ventilstrøm q_v %100
xapr(2,1) = 250; % q_max %100

% Start saa estimeringa
echo off
for i = 1 : ns
    %i
    K = Xapr*D'/(D*Xapr*D' + R);
    K_hist(:,i) = K;

    ypred(:,i) = D*xapr(:,i);
    xapo(:,i) = xapr(:,i) + K*(y(:,i) - ypred(:,i));

    Xapo = (I-K*D)*Xapr*(I-K*D)' + K*R*K';
    Xapo_hist(:,i) = diag(Xapo);

    phi = [(1.0 - (dt/Tf)) (dt/Tf)*((u(i) - u_min)/(1 - u_min))
           0                1.0];

```

```

    xapr(:,i+1) = xapo(:,i) + (dt/Tf)*[ -xapo(1,i) + ...
        (xapo(2,i)/(1 - u_min))*(u(i) - u_min)
        0];

    Xapr = phi*Xapo*phi' + Omega*Q*Omega';

end
echo on

% figure(1)
% clf
% subplot(311), plot(t,h,'k-')
% grid
% axis([0 200 200 500])
% title('Logget data fra totank-prosessen')
% xlabel('t [sek]')
% ylabel('Nivå i tank')
% subplot(312), plot(t,u,'k-')
% grid
% xlabel('t [sek]')
% ylabel('u\LV001')
% subplot(313), plot(t,y,'k-')
% grid
% xlabel('t [sek]')
% ylabel('Måling y av strømning q_a')

figure(2)
clf
% subplot(311), plot(t,xapo(1,:), 'r-',t,y, 'k',t,xapo(2,:), 'b--',t,300, 'k--')
% grid
% axis([0 200 0 400])
% xlabel('t [sek]')
% ylabel('Estimert q og q_{max}')
subplot(211),plot(t,K_hist(1,:), 'r-',t,K_hist(2,:), 'b-')
axis([0 200 0 1])
xlabel('t [sek]')
ylabel('KF-korreksjon. q_{max} = blå')
grid
subplot(212),plot(t,Xapo_hist(1,:), 'r-',t,Xapo_hist(2,:), 'b--')
xlabel('t [sek]')
ylabel('Estimatvarians. q_{max} = blå')
grid

figure(3)

```

```
clf
subplot(411), plot(t,h,'r-')
grid
axis([0 200 200 500])
xlabel('t [sek]')
ylabel('Nivå i tank')
subplot(412), plot(t,u,'r-')
axis([0 200 0 0.2])
grid
xlabel('t [sek]')
ylabel('u\ LV001')
subplot(413), plot(t,xapo(1,:), 'r-',t,y, 'k--')
axis([0 200 0 50])
ylabel('q_{est} og måling y')
xlabel('t [sek]')
grid
subplot(414), plot(t,xapo(2,:), 'r-',t,300, 'k--')
axis([0 200 100 400])
ylabel('Estimat av q_{max}')
xlabel('t [sek]')
grid

figure(4)
plot(t,xapo(2,:), 'r-',t,300, 'k--')
axis([80 140 290 310])
ylabel('Estimat av q_{max}')
xlabel('t [sek]')
grid
```

C.2 KF_stasj_bjla.m

```
{%
%% Laster inn logget data
clear all
logg = xlsread('logg_fra_totank.csv');

% Deklarerer variabler fra excel-ark
h = logg(:,2)';
u = logg(:,3)';
y = logg(:,4)';

%% Generelt Kalman-filter.
% Kode basert på m-fil fra Morten Tengedal
```



```
% Definerer systemorden, samplelengde og sampleintervall.
    nx = 2;
    ny = 1;
    ns = length(y);
    dt = 0.05;

% Definer tidsvektor
    t = zeros(1,ns);
    for i = 1 : ns
        t(1,i) = (i-1)*dt;
    end

% Verdier paa prosesskonstanter
    Tf = 3.1; %
    u_min = 0.04;

% Definer aprioriestimat og aposterioriestimat samt prediktert maaling.
    xapr = zeros(nx,ns);
    xapo = zeros(nx,ns);
    ypred = zeros(ny,ns);

% Diverse systemmatriser
    phi = zeros(nx,nx); % Linearisert transisjonsmatrise for diskret system
    D = zeros(ny,nx); % Maalematrise

% Definer korreksjonsmatrise for Kalmanfilteret
    K = zeros(nx,ny); %Korreksjon av nx estimat basert paa ny maalingar
    K_hist = zeros(nx,ns);

% Til slutt startverdier for tilstandsestimata

    D(1,1) = 1;
    xapr(1,1) = 0; % Ventilstrøm q_v %
    xapr(2,1) = 300; % q_max %

% Start saa estimeringa
echo off
for i = 1 : ns
    %i
    K = [0.5; 0.5];
    K_hist(:,i) = K;

    ypred(:,i) = D*xapr(:,i);
    xapo(:,i) = xapr(:,i) + K*(y(:,i) - ypred(:,i));
```

```
xapr(:,i+1) = xapo(:,i) + (dt/Tf)*[ -xapo(1,i) + ...
    (xapo(2,i)/(1 - u_min^2))*(u(i)^2 - u_min^2)
    0];

end
echo on

figure(1)
clf
subplot(311), plot(t,h,'k-')
grid
axis([0 200 200 500])
title('Logget data fra totank-prosessen')
xlabel('t [sek]')
ylabel('Nivå i tank')
subplot(312), plot(t,u,'k-')
grid
xlabel('t [sek]')
ylabel('u\ LV001')
subplot(313), plot(t,y,'k-')
grid
xlabel('t [sek]')
ylabel('Måling y av strømming q_a')

figure(2)
clf
subplot(211), plot(t,xapo(1,:), 'r-', t,y, 'k', t,xapo(2,:), 'b--')
grid
axis([0 200 0 1000])
xlabel('t [sek]')
ylabel('Estimert q og q_{max}')
subplot(212), plot(t,K_hist(1,:), 'b-', t,K_hist(2,:), 'r-')
axis([0 200 0 1])
ylabel('KF-korreksjon')
grid

figure(3)
clf
subplot(411), plot(t,h,'r-')
grid
axis([0 200 200 500])
xlabel('t [sek]')
ylabel('Nivå i tank')
subplot(412), plot(t,u,'r-')
grid
xlabel('t [sek]')
```

```
ylabel('u\LV001')
subplot(413),plot(t,xapo(1,:), 'r-',t,y, 'k--')
axis([0 200 0 50])
ylabel('q_{est} og måling y')
grid
subplot(414),plot(t,xapo(2,:), 'r-',t,300, 'k')
axis([0 200 100 400])
ylabel('Estimat av q_{max}')
grid

figure(4)
plot(t,xapo(2,:), 'r-',t,300, 'k--')
axis([80 140 290 310])
ylabel('Estimat av q_{max}')
xlabel('t [sek]')
grid
```