



LUND UNIVERSITY

Nivåreglering av ett tanksystem

Bengtsson, Bengt C T; Johansson, T; Nilsson, R; Aspernäs, Bertil; Egardt, Bo

1974

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Bengtsson, B. C. T., Johansson, T., Nilsson, R., Aspernäs, B., & Egardt, B. (1974). *Nivåreglering av ett tanksystem*. (Technical Reports TFRT-7067). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
5

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

NIVÅREGLERING AV ETT TANKSYSTEM

B.ASPERNÄS
B.C.T. BENGTSSON
B.EGARDT
T.JOHANSSON
R.NILSSON

Report 7416 (C) August 1974
Lund Institute of Technology
Division of Automatic Control

NIVÅREGLERING AV ETT TANKSYSTEM

B. Aspernäs, B.C.T. Bengtsson, B. Egardt, T. Johansson
och R. Nilsson

Denna rapport utgör dokumentation av resultat och erfarenheter från specialgruppen i Reglerteknik AK, ht 1973. Grupparbetet bestod i modellbygge och reglering av ett tanksystem i institutionens laboratorium.

Handledare: Torsten Söderström

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	Sid.
1. Inledning	1
2. Beskrivning av processen	2
3. Modellbygge av processen	4
3.1. Matematisk modell för tankdynamiken	4
3.2. Matematisk modell för nivågivare	12
3.3. Matematisk modell för flödesgivare	25
3.4. Matematisk modell för ventil	31
3.5. Beskrivning av regulatorerna	38
3.6. Sammanfattning av modellen för systemet	42
4. Reglering av processen	45
4.1. Syften med regleringen	45
4.2. Teoretiska beräkningar för dimensionering av regulator för nivåreglering av övre tanken	46
4.3. Underlag för simulering av reglering av övre tanken	50
4.4. Resultat av simuleringar och verkliga reg- leringar av övre tanken.	54
4.5. Reglering av nivån i mellantanken	68
4.6. Sammanfattande synpunkter på regleringen	87

1. INLEDNING.

Detta projekt behandlar modellbygge och nivåreglering av vätsketankar, där en omgivning påverkar systemet med störningar. Denna reglering är mycket vanlig i industrin varför arbetet har ett praktiskt värde.

Reglerproblemet är att hålla vätskenivåerna i tankarna på konstant nivå trots yttre störningar på systemet.

För att få en matematisk modell att arbeta med har vi lineariserat systemet kring en arbetspunkt. Systemet har beskrivits med hjälp av Bernoullis formel tillämpad på inkompressibel vätska, $c = \sqrt{2gh}$ där c är utströmningshastigheten och h höjden i tanken. Övriga komponenter har kalibrerats och analyserats för att få fram dess dynamik. Resultatet av regleringen visar att man kan nöja sig med enkel PI-reglering om inga speciella krav ställs på lösningstid och översläng.

Anm.: Till den oinvigde kan sägas att processen ofta kallas "Plask-och-Pysen". Detta namn har tillkommit hos en fantasifull person vid byggandet av processen. Studerar man processen i arbete förstår man honom.

2. BESKRIVNING AV PROCESSEN.

Processen består av tre tankar på olika nivåer (se fig. 2.1). En matarpump för vattnet från uppsamlingskärlet till en ventil. Vi reglerar vattenflödet genom att strypa ventilen. Flödet kan mätas med en flödesmätare.

Trycket i varje tank kan också mätas. Genom trycket får vi tillräcklig information om vätskenivåerna, ty dessa är proportionella mot trycken i respektive tank.

Till förfogande för reglering finns en PI-regulator, en PID-regulator och en summator. För registrering av förlopp finns också en skrivare för två signaler.

Processen är olinjär i flera avseenden:

- a) Utströmningshastigheten är proportionell mot kvadratroten ur vattenhöjden.
- b) Ventilens förstärkningskaraktistik är olinjär.
- c) Ventilen mättnar vid stor signal.
- d) Inget flöde erhålles från ventilen förrän signalen är ca. 45% av full signal.

Detta medför att teoretiska beräkningar på regulatorparametrarna kan ge icke väntade resultat vid den praktiska regleringen.

Alla signaler i fig. 2.1 är spänningar. Ingen signal motsvarar spänning 0 volt. Full signal motsvarar spänning -10 volt. I fortsättningen anges i regel signalerna som procent (%) av full signal och sorten är skaldelar.

Processen har också en skyddsanordning som stänger flödet då någon vätskenivå är otrevligt stor. Bär man sig maximalt klumpigt åt blir man blöt trots den utmärkta skyddsanordningen.

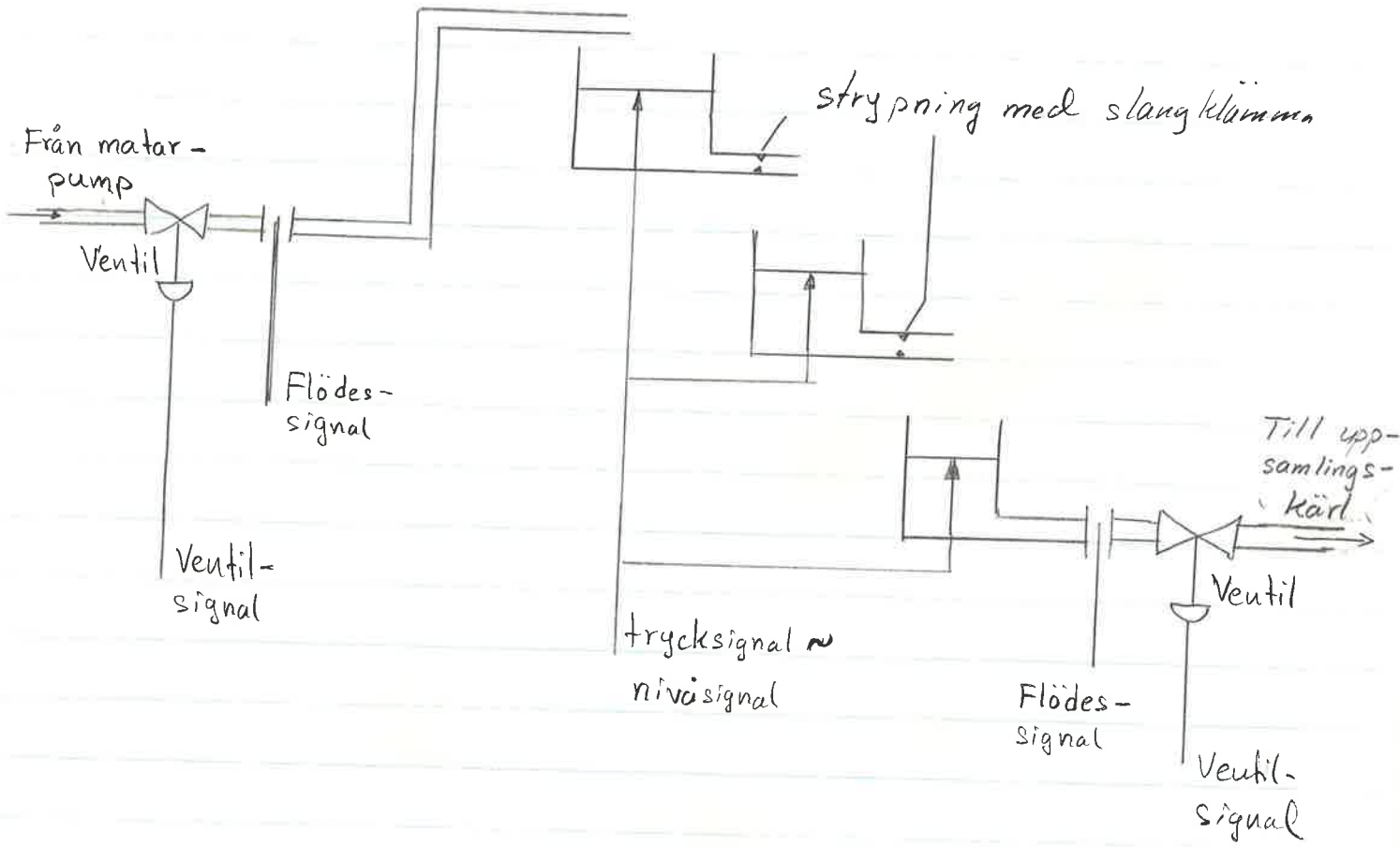


Fig 2.1 Process

3. MODELLBYGGE AV PROCESSEN.

I detta kapitel härleds en matematisk modell av processen. Såväl teoretiska beräkningar som experimentella resultat ligger till grund för modellen. I avsnitt 3.1 ges en modell för dynamiken i tankarna. I avsnitten 3.2 och 3.3 ges beskrivning av givarna för nivå och flöde. Reglerventilerna är beskrivna i avsnitt 3.4, medan en kort presentation av regulatorerna ges i avsnitt 3.5. Slutligen sammanfattas resultaten i en total modell för systemet i avsnitt 3.6.

3.1. Matematisk modell för tankdynamiken.

I detta avsnitt visas hur en matematisk modell för tanksystemet kan fås. Utgångspunkten är fysikaliska samband i form av energiprincipen och kontinuitetsekvationen. Giltigheten för erhållet uttryck på utloppsflöde undersöks experimentellt. Den uppgjorda modellen lineariseras och jämförelsen med processen görs med upptagning av stegsvar. Tidskonstanten bestäms experimentellt på 2 olika sätt.

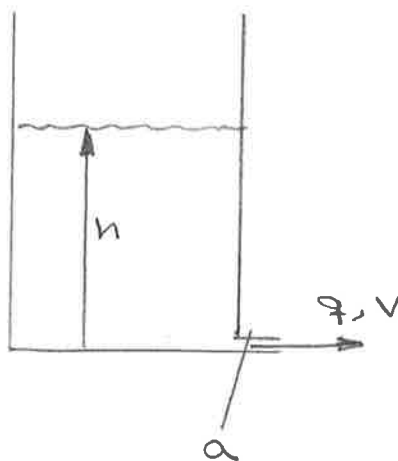


Fig. 3.1.1.

För att kunna ställa upp en matematisk modell för tank-systemet vill vi ha ett samband mellan vattennivå (h) och utloppsflöde (q) eller -hastighet (v). Energiförhållandena ger:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = h \rho g \Rightarrow v = \sqrt{2gh} \Rightarrow q = a\sqrt{2gh} \quad (3.1.1)$$

där a = utloppsarean.

Diagram 3.1.1 visar det uppmätta sambandet mellan q och h för 3 olika inställningar av utloppsarean. En ur praktisk synpunkt lämplig area enl. kurva A ger alltså god överensstämmelse mellan praktik och teori.

I fortsättningen används följande beteckningar:

flöden och nivåer enl. fig. 3.1.2

A = genomskärningsarea för tank 1 och 2

A_3 = d:o för tank 3

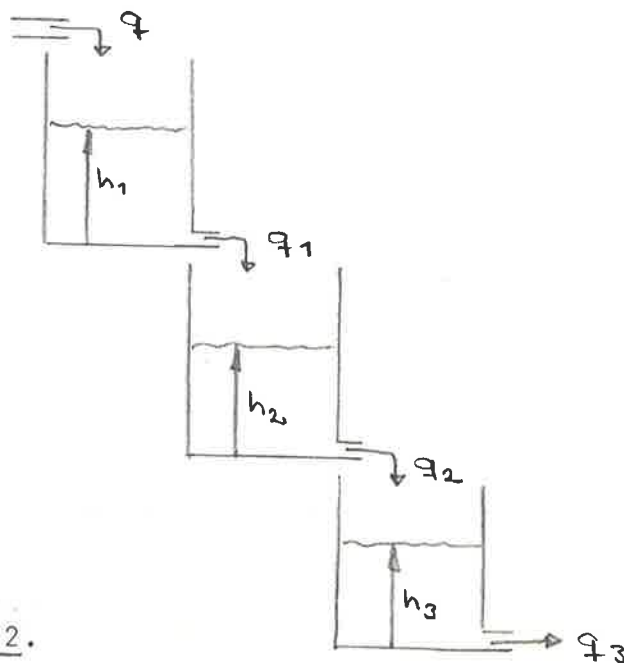
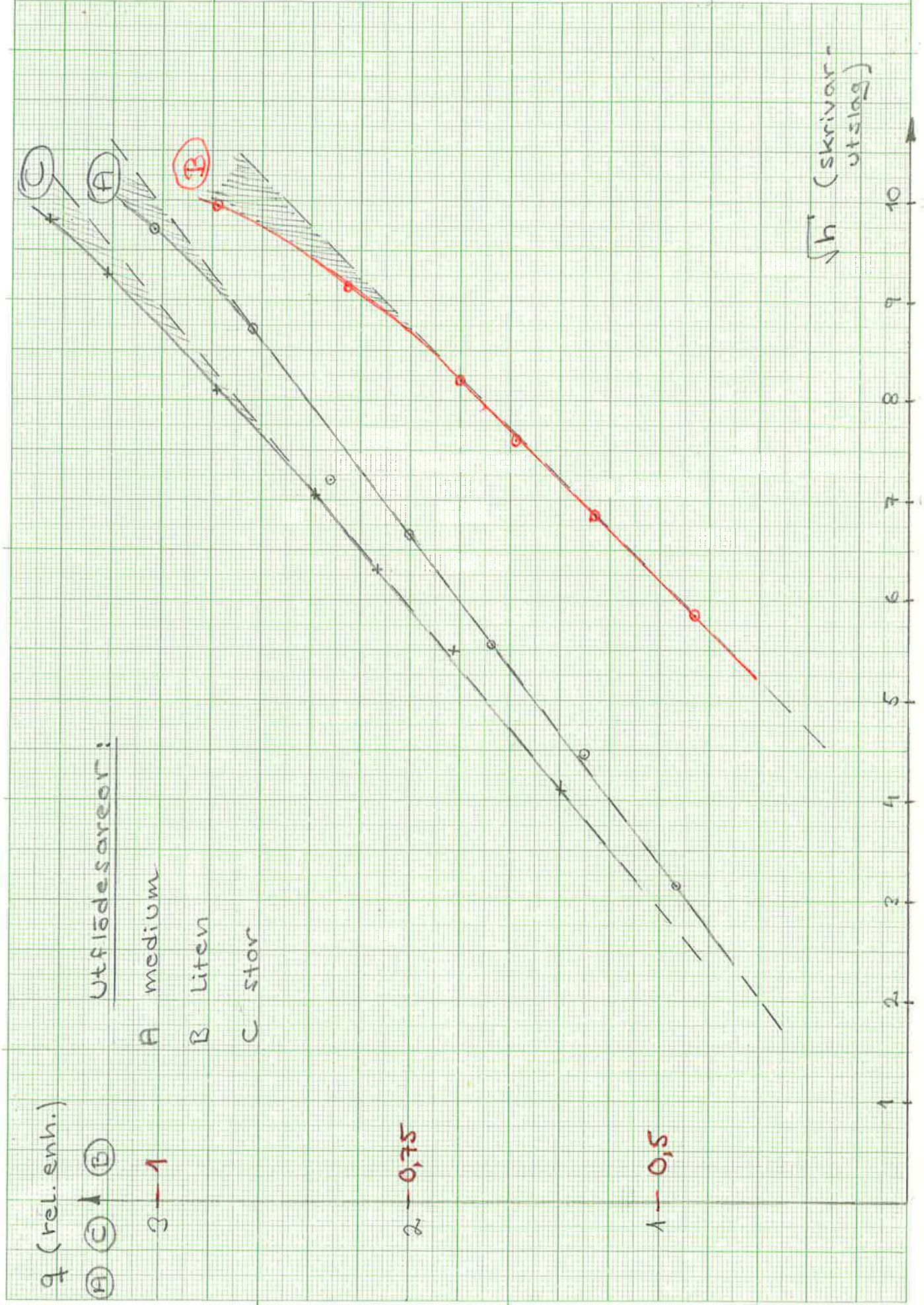


Fig. 3.1.2.

SAMBAND MELLAN FLÖDE OCH NIVÅ FÖR EN TANK



Kontinuitet ger för resp. tank (se ekv. 3.1.1):

$$\begin{cases} A \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 = q - a_1 \sqrt{2gh_1} \\ A \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 = a_1 \sqrt{2gh_1} - a_2 \sqrt{2gh_2} \\ A_3 \frac{dh_3}{dt} = q_2 - q_3 = a_2 \sqrt{2gh_2} - q_3(h_3) \end{cases} \quad (3.1.2)$$

där $q_3(h_3)$ bestäms av en pump i utloppet från tank 3. Experiment gav att q_3 beror obetydligt på h_3 och därför kan behandlas som en konstant med ett värde som alltså bara påverkas av utloppsventilens läge.

Antag att (3.1.2) har en stationär lösning $h_i = h_i^0$ då $q = q_0$. Denna skall senare beräknas. Linearisering av ekv. (3.1.2) ger då:

$$\begin{cases} A \frac{d(h_1 - h_1^0)}{dt} = q - q_0 - (h_1 - h_1^0) a_1 \sqrt{\frac{g}{2h_1^0}} \\ A \frac{d(h_2 - h_2^0)}{dt} = (h_1 - h_1^0) a_1 \sqrt{\frac{g}{2h_1^0}} - (h_2 - h_2^0) a_2 \sqrt{\frac{g}{2h_2^0}} \\ A_3 \frac{d(h_3 - h_3^0)}{dt} = (h_2 - h_2^0) a_2 \sqrt{\frac{g}{2h_2^0}} \end{cases} \quad (3.1.3)$$

Sätt $x_1 = h_1 - h_1^0$; $x_2 = h_2 - h_2^0$; $x_3 = h_3 - h_3^0$; $u = q - q_0$

$$T_1 = \frac{A}{a_1} \cdot \sqrt{\frac{2h_1^0}{g}}; \quad T_2 = \frac{A}{a_2} \cdot \sqrt{\frac{2h_2^0}{g}}$$

Då erhålles av (3.1.3):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{T_1} x_1 + \frac{1}{A} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{T_1} x_1 - \frac{1}{T_2} x_2 \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{T_2} x_2 \end{cases} \quad (3.1.4)$$

Detta ger systemekv. på tillståndsform:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & 0 \end{vmatrix} x + \begin{vmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} u \\ y = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} x \end{cases} \quad (3.1.5)$$

där vi alltså valt nivåavvikelserna x_1 , x_2 och x_3 som ut signaler.

Anm.: Vi får lätt den bekanta styrbarhetsmatrisen W_S :

$$W_s = [B \quad AB \quad A^2B] = \frac{1}{A} \begin{vmatrix} 1 & -\frac{1}{T_1} & \frac{1}{T_1^2} \\ 0 & \frac{1}{T_1} & -\frac{1}{T_1} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_1 T_2} \end{vmatrix}$$

W_s är icke-singulär och detta indikerar alltså att systemet är styrbart.

(2.4) ger efter Laplace-transformering: (3.1.4)

$$\begin{cases} sX_1 = -\frac{1}{T_1} X_1 + \frac{1}{A} U \\ sX_2 = \frac{1}{T_1} X_1 - \frac{1}{T_2} X_2 \\ sX_3 = \frac{1}{T_2} X_2 \end{cases} \quad (3.1.6)$$

och vi får nu överföringsfunktioner från avvikelse i inflöde (u) till resp. nivåavvikelse (x_1, x_2, x_3):

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{X_1(s)}{U(s)} = \frac{1/A}{s + 1/T_1} \\ G_2(s) = \frac{X_2(s)}{U(s)} = \frac{1/AT_1}{(s+1/T_1)(s+1/T_2)} \\ G_3(s) = \frac{X_3(s)}{U(s)} = \frac{1/AT_1 T_2}{(s+1/T_1)(s+1/T_2)s} \end{cases} \quad (3.1.7)$$

I den gjorda lineariseringen, ekv. (3.1.3), har vi lineariserat kring jämviktsvärdena h_1^0 , h_2^0 och q_0 som nu skall bestämmas med hjälp av utloppsareorna a_1 och a_2 (inställning medelst slangklämma). h_1^0 och h_2^0 väljes till 21.5 cm, svarande mot skrivarutslag 50 från nivågivarna. Ett lämpligt värde på flödet hörande till denna höjd är $19 \text{ cm}^3/\text{s}$ (skrivarutslag 16). Sambandet mellan flöde och höjd ges då av kurva A i diagram 3.1.1.

$$\begin{aligned} \text{Vi har alltså nu valt } h_1^0 &= h_2^0 = h_0 = 21,5 \text{ cm} \\ q_0 &= 19 \text{ cm}^3/\text{s} \\ a_1 &= a_2 = a \\ \text{och därmed: } T_1 &= T_2 = T. \end{aligned}$$

Utloppsarean a är svår att mäta direkt och vi vill därför beräkna T . Två metoder har använts:

Metod 1. Återkoppla nivåsignal till ventil med en PI-regulator. Lämplig inställning är $k = 50$, $T_I = 0,6$ som ger ett jämnt flöde i stationärt tillstånd. a varieras tills det stationära q -värdet är $19 \text{ cm}^3/\text{s}$. Sambanden

$$q_0 = \sqrt{2gh_0} \cdot a ; \quad T = \frac{A}{a} \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$$

$$\text{ger } T = \frac{A \cdot 2h_0}{q_0}$$

A uppmättes till $19,6 \text{ cm}^2$ och detta ger $T = 43 \text{ s}$.

Metod 2. Avläs höjden h_0 och stäng av inflödet vid tiden $t = 0$. Avläs höjden h_1 vid tiden $t = t_1$. Ekv. (3.1.1) och (3.1.2) ger:

$$\frac{dh}{\sqrt{h}} = -\frac{a}{A} \sqrt{2g} dt \Rightarrow [2\sqrt{h}]_{h_0}^{h_1} = \left[-\frac{a}{A} \sqrt{2g} t \right]_0^{t_1} \Rightarrow$$

$$\sqrt{h_1} = \sqrt{h_0} \left(1 - \frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_0}} t_1 \right) \Rightarrow T = \frac{t_1}{1 - \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}}$$

Med $h_0 = 50$, $h_1 = 20$ (skrivarutslag) uppmättes T till 44 s, vilket stämmer väl överens med resultatet enl. metod 1.

Resultat. Vi har nu fastställt och beräknat följande konstanter för processen:

$$h_1^0 = h_2^0 = h_0 = 21,5 \text{ cm}$$

$$q_0 = 19 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$a_1 = a_2 = a = 0,091 \text{ cm}^2$$

$$T_1 = T_2 = 43 \text{ s}$$

Med $T_1 = T_2 = T$ blir nu överföringsfunktionerna (3.1.7):

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1(s) = \frac{1/A}{s + 1/T} \\ G_2(s) = \frac{1/AT}{(s + (1/T))^2} \\ G_3(s) = \frac{1/AT^2}{s (s + (1/T))^2} \end{array} \right. \quad (3.1.8)$$

Tillhörande stegsvar blir:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(t) = \frac{T}{A}(1 - e^{-t/T}) \\ x_2(t) = \frac{T}{A}(1 - e^{-t/T}(1 + \frac{t}{T})) \\ x_3(t) = \frac{1}{A}(t - 2T + (2T+t)e^{-t/T}) \end{array} \right. \quad (3.1.9)$$

Dessa 3 stegsvar (enhetssteg) har simulerats på dator och resultatet framgår av diagram 3.1.2, 3.1.3 och 3.1.4.

Uppmätta stegsvar för två olika storlekar på steget framgår av diagram 3.1.5, 3.1.6 (tank 1) och 3.1.7, 3.1.8 (tank 1 + 2).

Jämförelse av teoretiska och praktiska stegsvar (det teoretiska nu multiplicerat med en konstant, så att stegen blir lika stora) framgår av diagram 3.1.9 (tank 1) och 3.1.10 (tank 1 + 2).

Det kan konstateras att snabbheten hos system och modell uppvisar mycket god överensstämmelse, men att felet i lineariseringen gör sig påmint som en avvikelse i slutvärde, större för större steg.

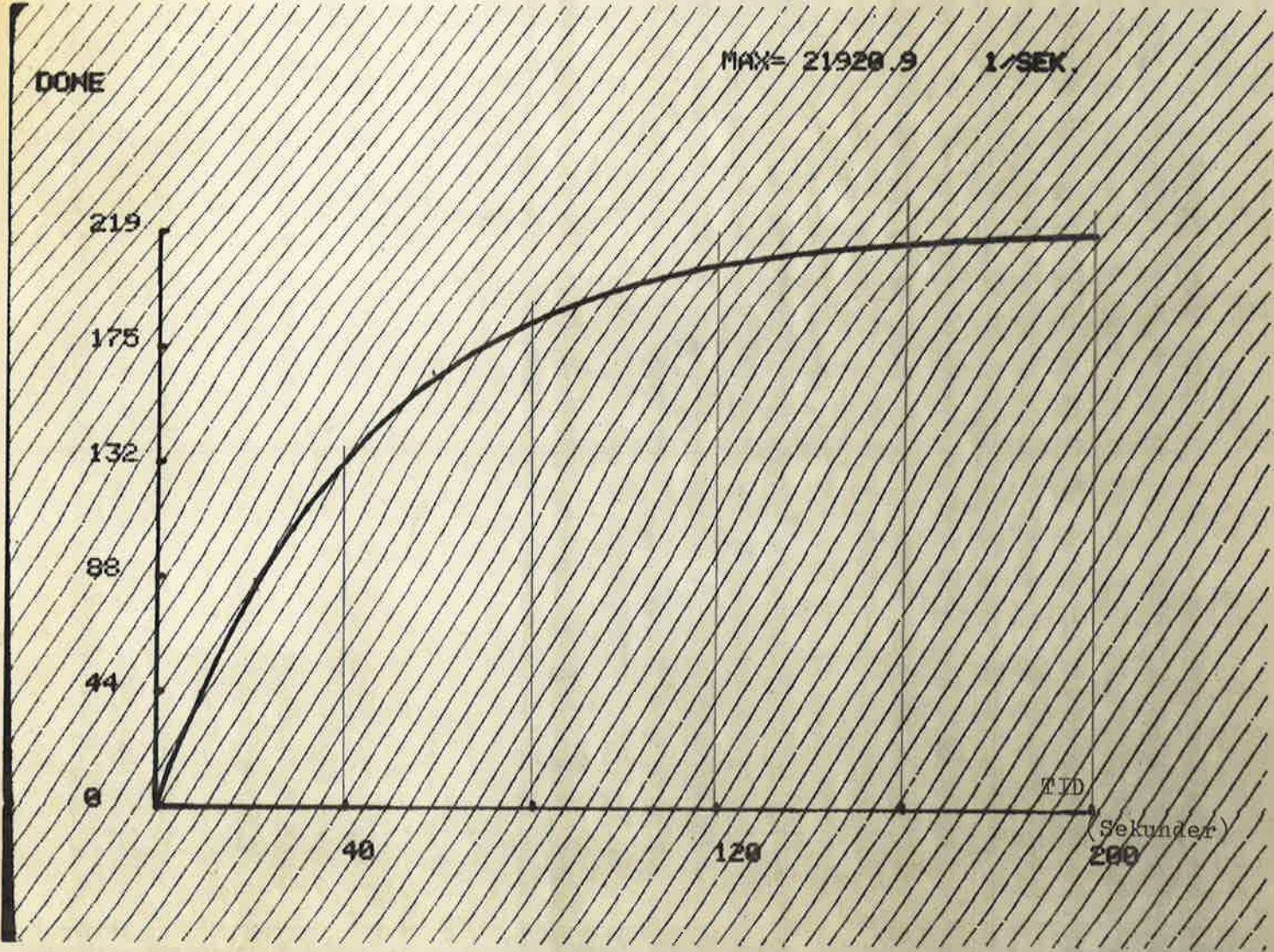
3.2. Matematisk modell för nivågivare.

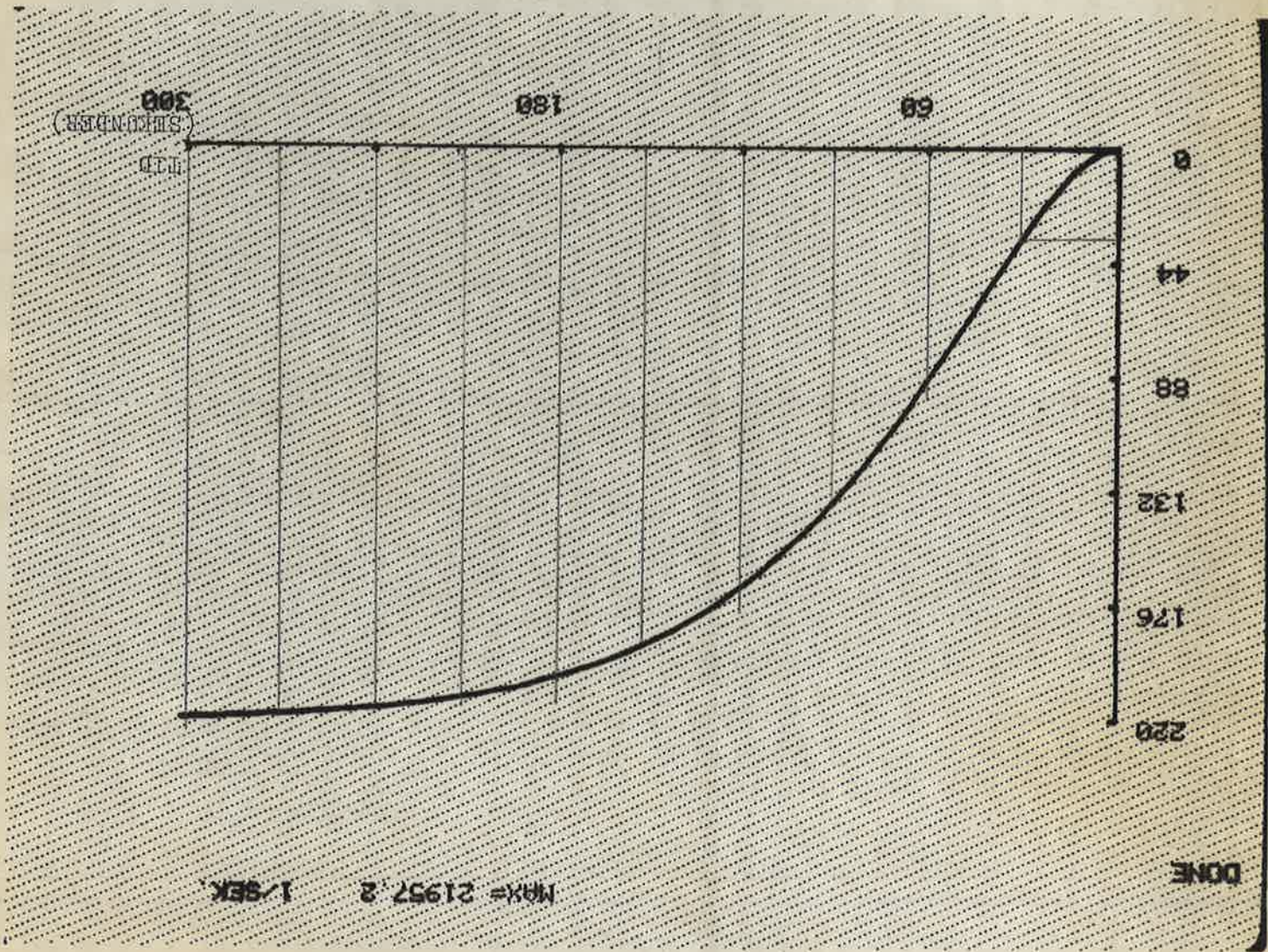
En nivågivare kan realiserats genom en tryckgivare ty nivån i en tank är direkt proportionell mot trycket vid botten i tanken. Principen för en tryckmätare framgår av fig. 3.1.

Tryckgivaren arbetar enligt kraftbalansprincipen. Trycket p omvandlas till kraft i stålbälgen. Kraften F är proportionell mot trycket p . Motkraften fås från en fjäder. Balanseringsarmen är fritt upphängd i ett tunt metallbleck. Varje läge som armen kan ha motsvarar ett visst tryck. Utböjningen hos armen är proportionell mot F . Differentialtransformatorn registrerar balanseringsarmens läge och signalen går till en elektrisk enhet som omformar den till en strömstyrka. Denna ström omvandlas senare till en spänning, ty regulatorerna arbetar med en sådan signalform. En spänning på -10 volt (0 volt) motsvarar full tank 42 cm (tom tank).

Diagram 3.1.2

Stegsvar för tank 1



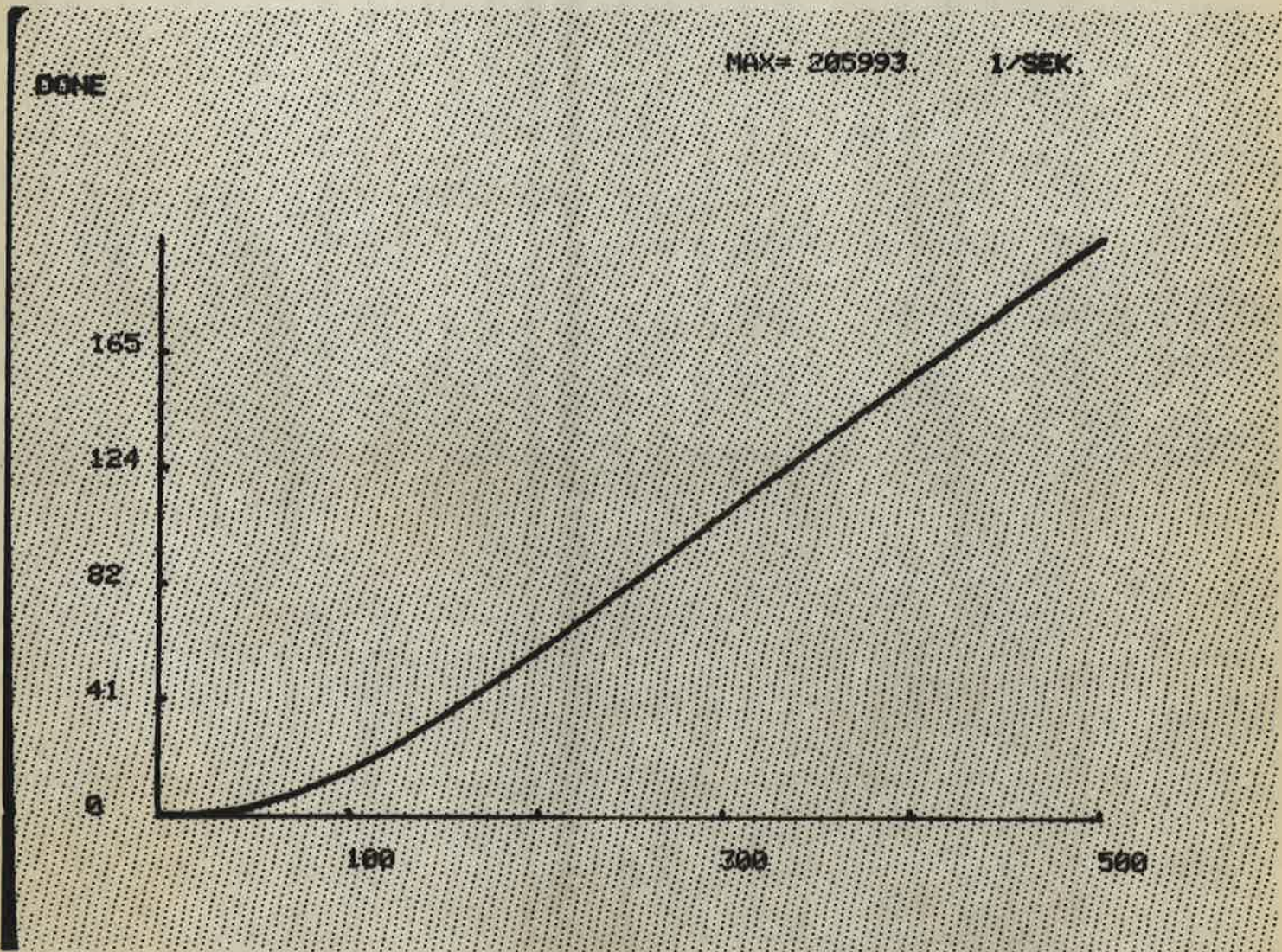


Stegsvar för tank 1 + 2

Diagram 3.1.3

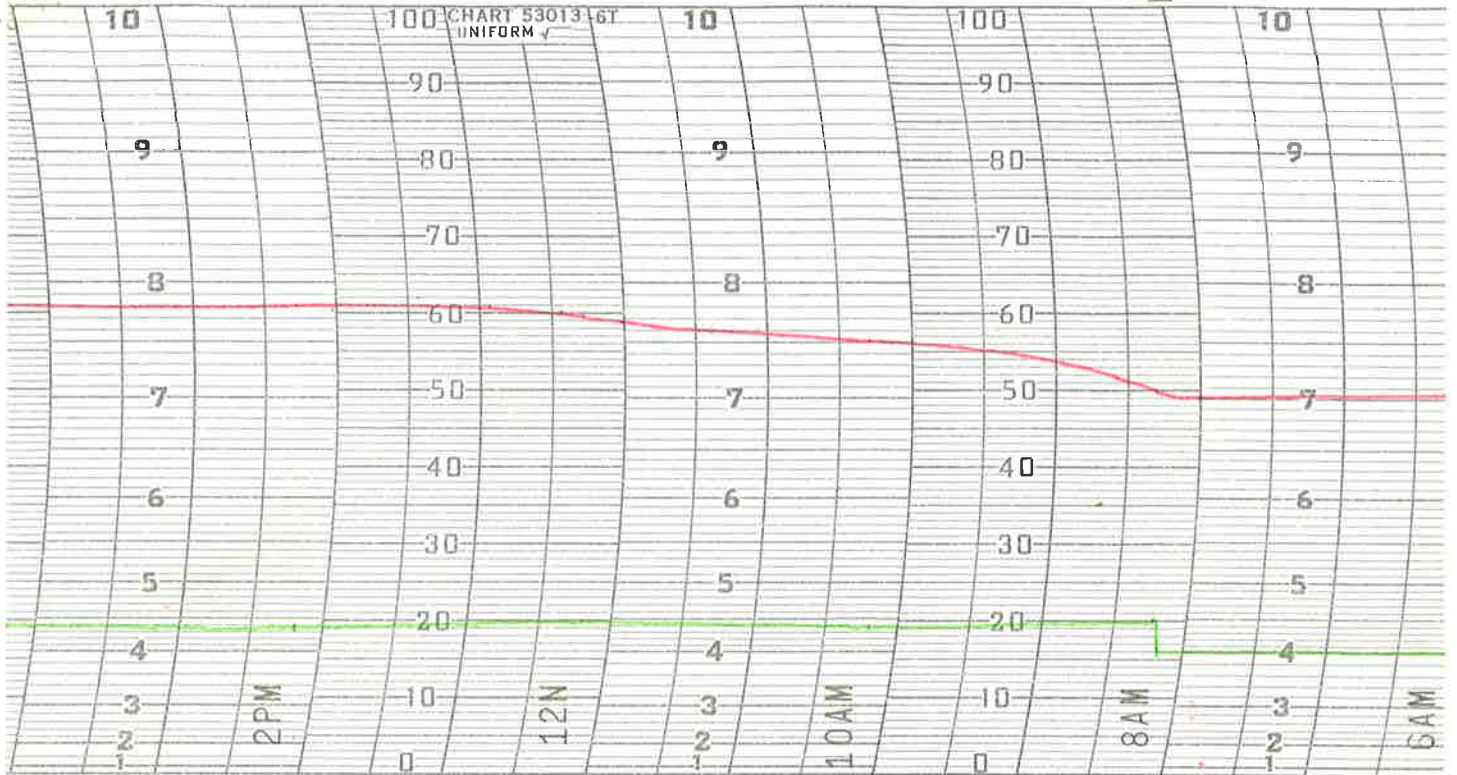
Diagram 3.1.4

Stegsvar för tank 1 + 2 + 3



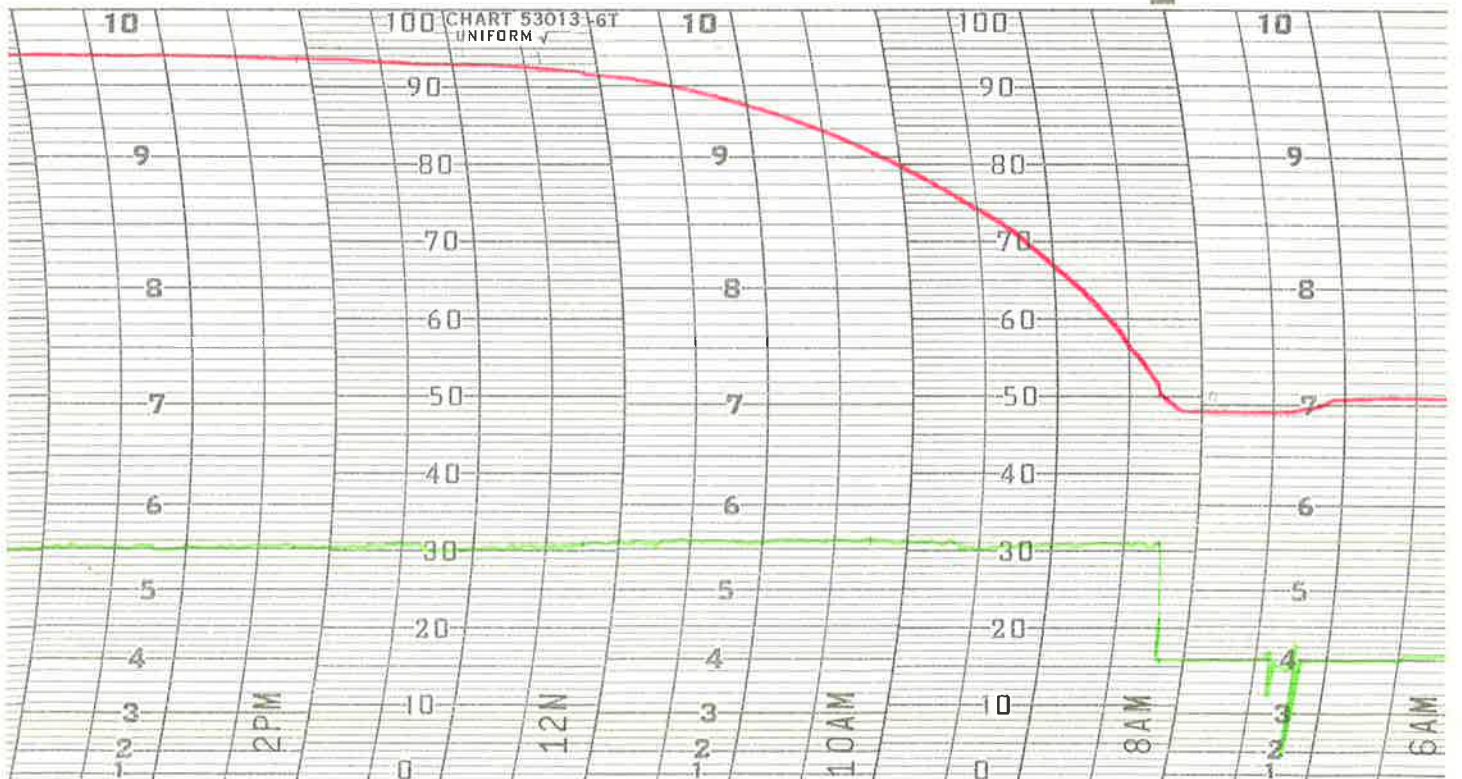
STEGSVAR FÖR TANK 1 - LITET STEG

Diagram 3.1.5



STEGSVAR FÖR TANK 1 - STORT STEG

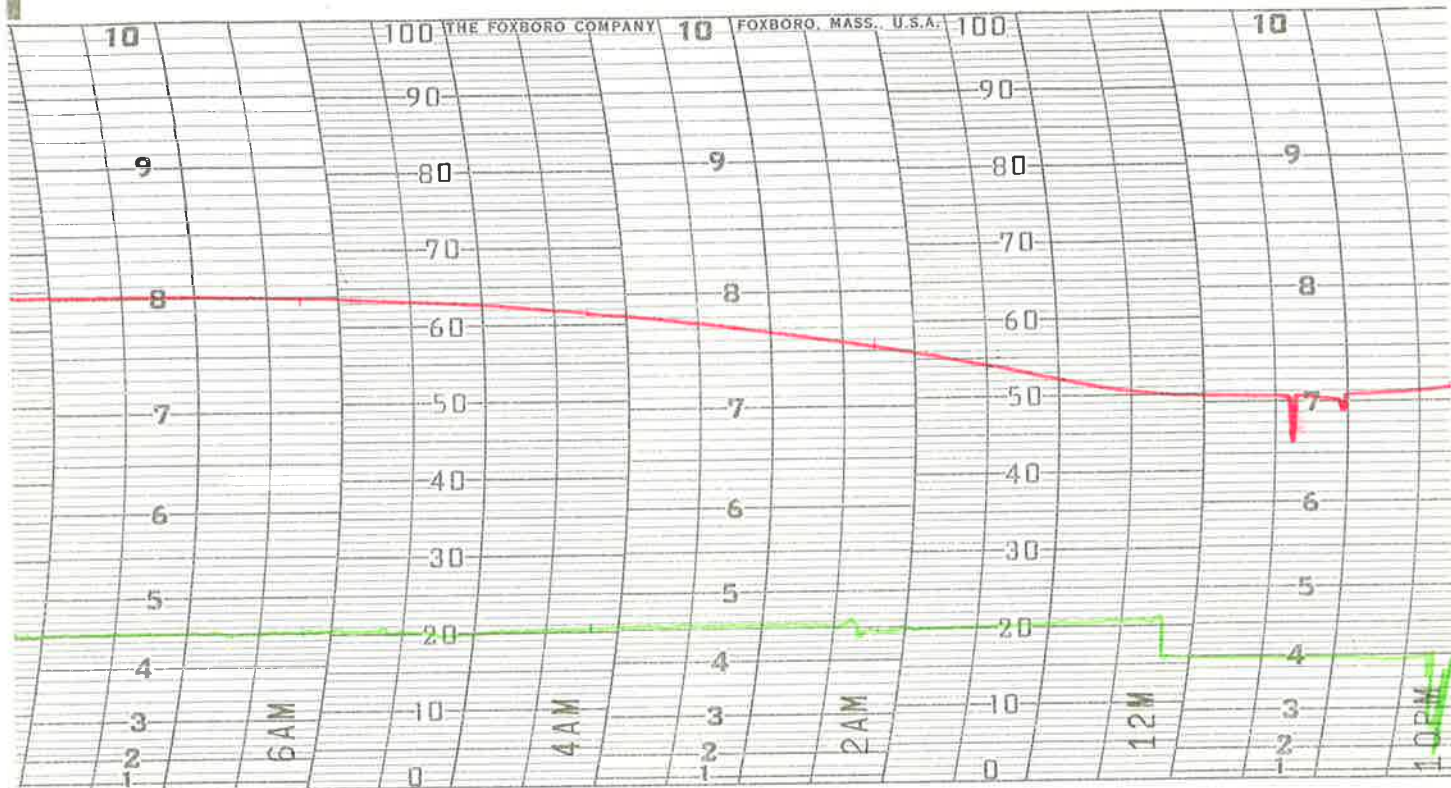
Diagram 3.1.6



OBS! TIDSSKALAN ÄR ÅT VÄNSTER I DIAGRAMMEN

STEGSVAR FÖR TANK 1+2 - LITET STEG

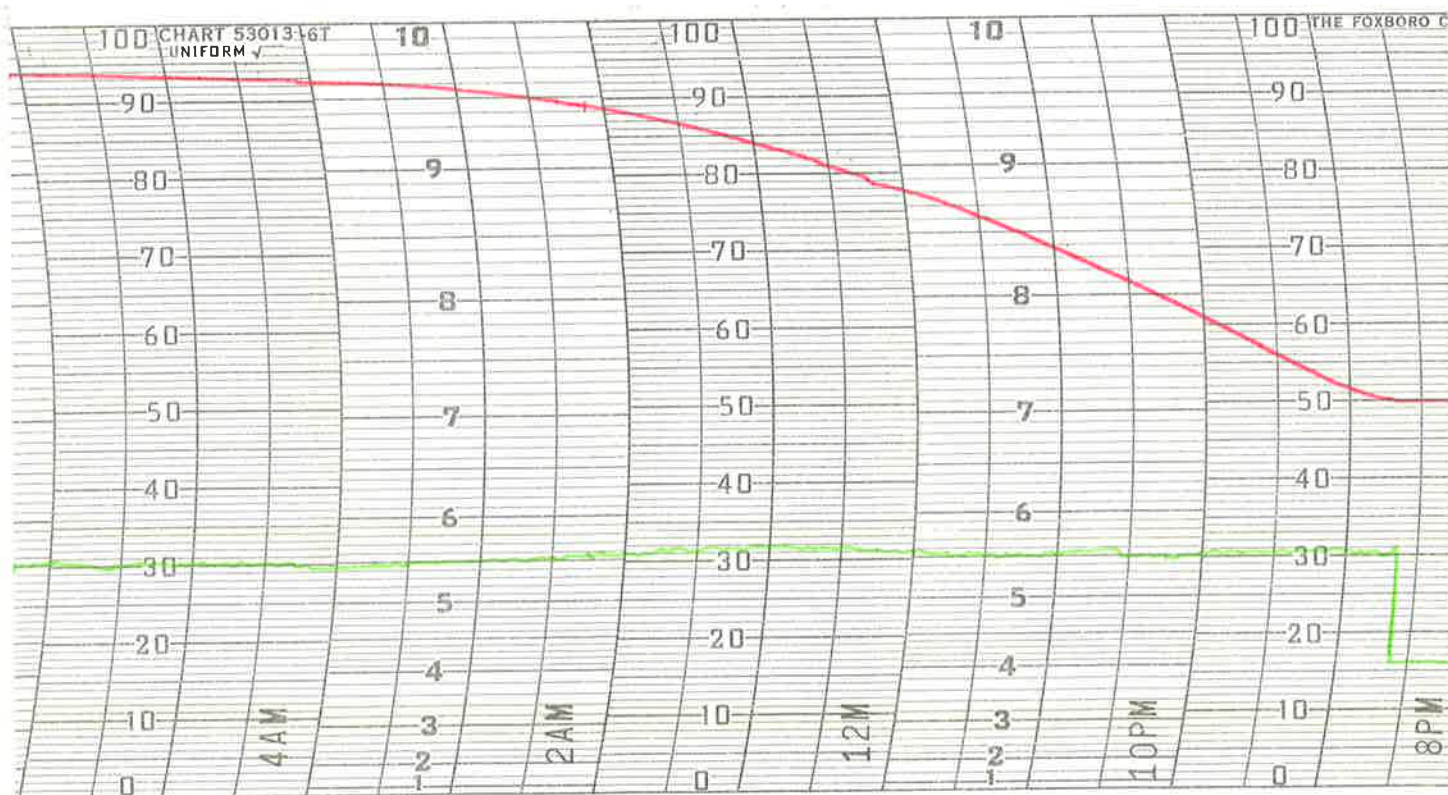
Diagram 3.1.7



16

STEG SVAR FÖR TANK 1+2 - STORT STEG

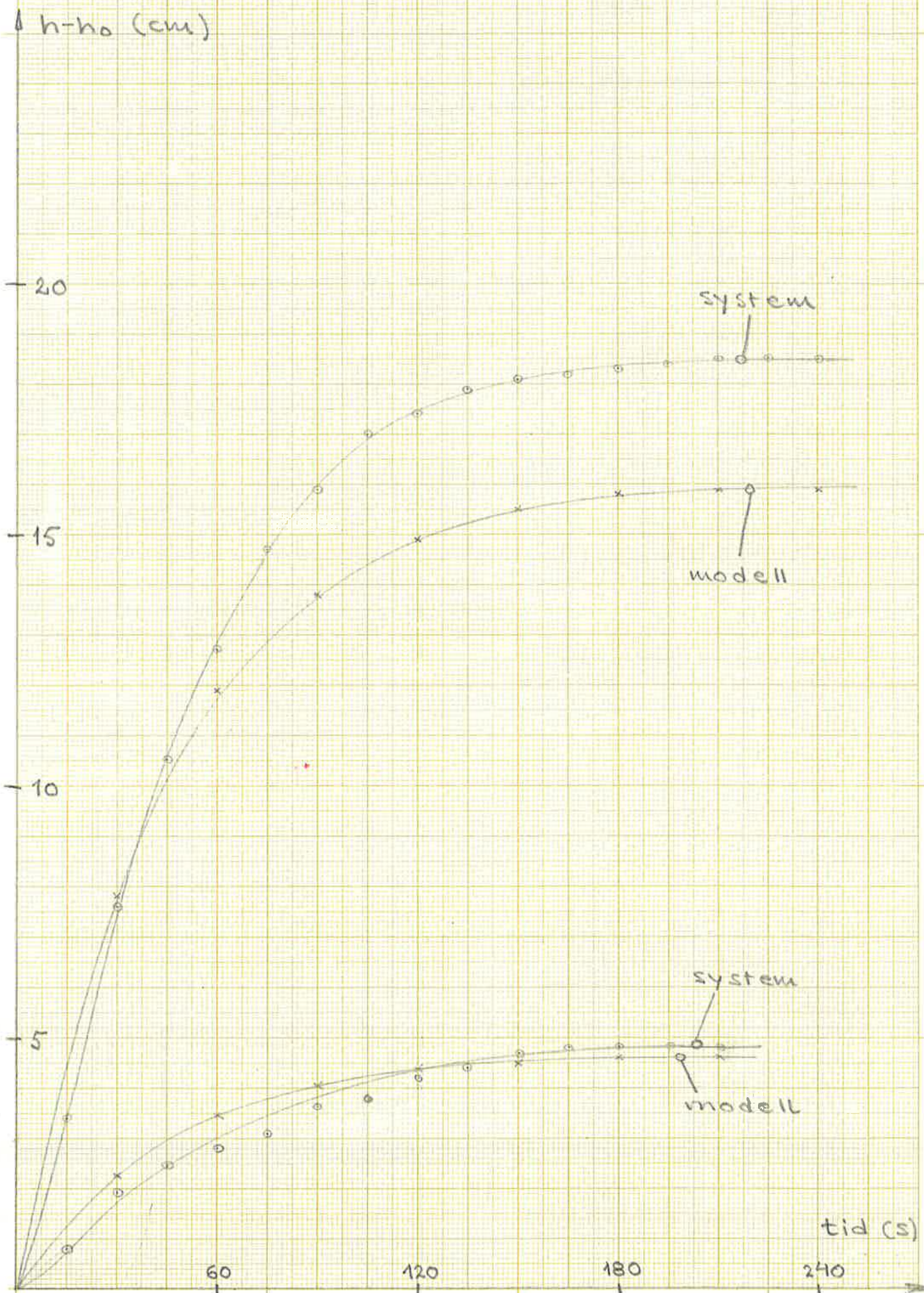
Diagram 3.1.8.

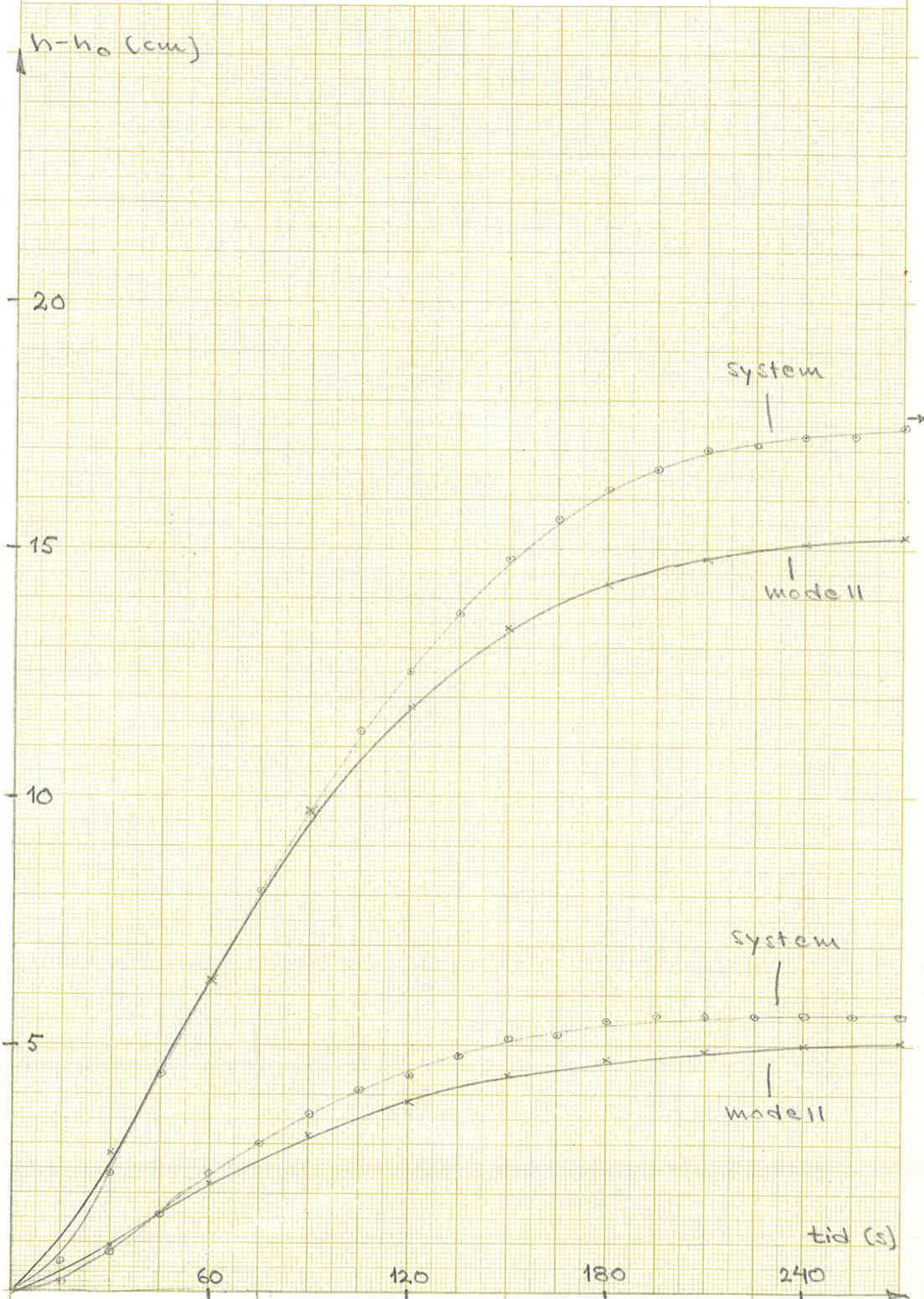


OBS! TIDSSKALAN ÄR ÅT VÄNSTER I DIAGRAMMEN

STEGSVAR FÖR TANK 1

Diagram 3.1.9





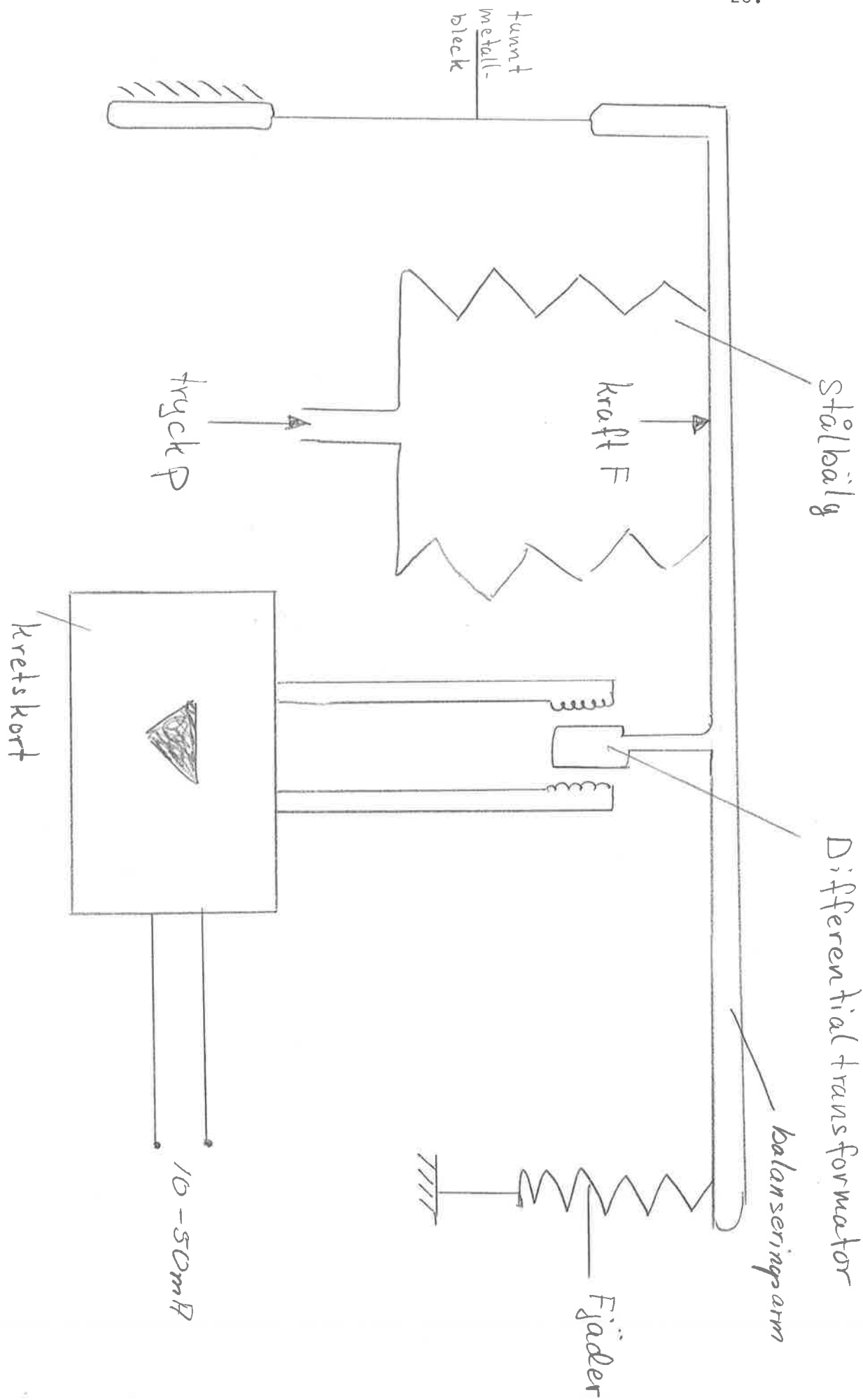


Fig. 3.1

3.2.1. Dynamiska förhållanden i tryckgivare.

Plask-och-pys-processen har relativt stora tidskonstanter, varför någon "snabbhet" ej krävs av tryckgivarna.

Studera fig. 3.2. Kompressibiliteten för vatten är mycket liten och överföringsrummet mellan tanken och tryckmätaren är liten (ca. 5 cm³), varför vi grovt uppskattar en övre gräns för tidskonstanten till 0,3 sek. Uppskattningen har ej verifierats utan den grundar sig på litteraturstudier (Solheim: Instrumenteringsteknik).

3.2.2. Kalibrering av 3 st tryckmätare.

Då strömsignalen från tryckmätarna ej gick att komma åt för mätning med ampèremeter, observerades i stället signalen i form av spänning på den skrivare, som tillhörde processen. Skrivaren är graderad från 0 till 100% av full signal. Vi benämner sorten skaldelar. En trycksignal på 50 skaldelar motsvaras alltså av en spänning på -5 volt, som i sin tur motsvaras av halv tank, d.v.s. 21,5 cm. Tryckmätarnas karakteristik skiljer sig föga åt och lineariteten är mycket god. Den anges av tillverkaren vara mindre än 0,5%. I kalibreringsdiagrammet har trycket angetts som centimeter vattenpelare, då vattennivån är en intressant storhet vid reglering av processen. Lutningen på kalibreringskurvorna fann vi vara 2,54 skaldel/cm. Överföringsfunktionen från nivå till signal blir då

$$G(s) = 2,54 \text{ [skaldel/cm]}$$

Kalibrering har gjorts på följande sätt: Tankarna fylldes till olika nivåer, varefter signalerna mättes på en

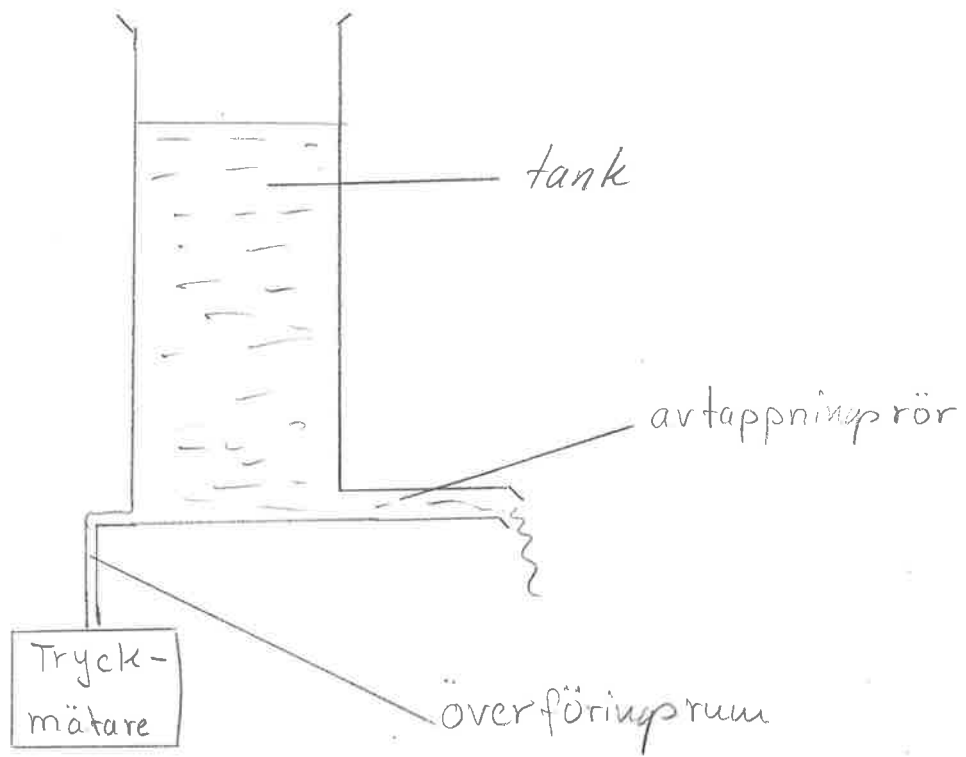


Fig 3.2

skrivare och nivå uppmättes med en linjal. Resultatet redovisas i nedanstående tabell.

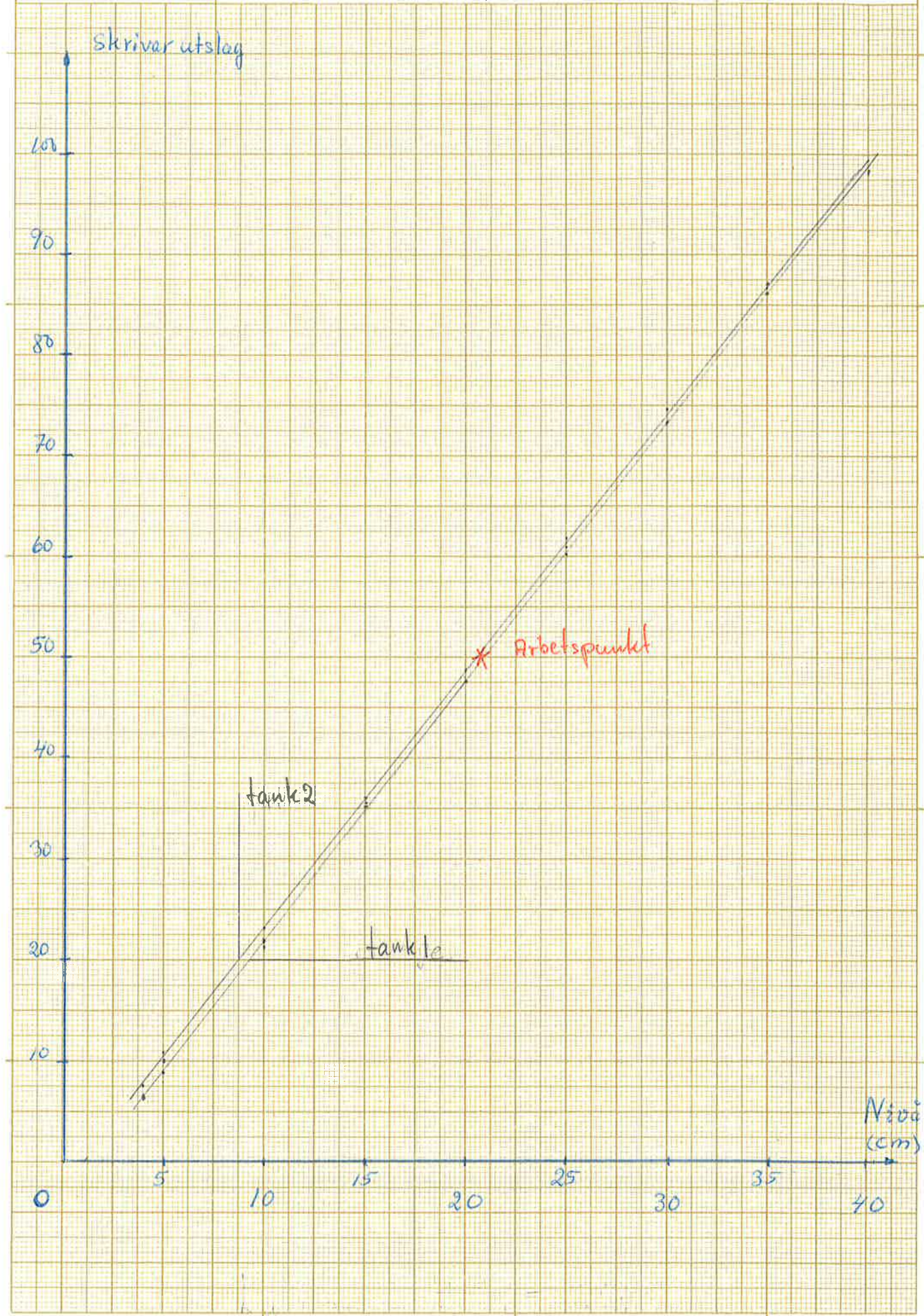
Nivå (cm)	Skrivarutslag (skaldelar)		
	Givare 1	Givare 2	Givare 3
40	98,3	98,1	98,5
35	86,1	86,6	87,0
30	73,3	74,0	74,0
25	60,1	60,9	61,8
20	47,5	48,7	48,8
15	35,1	36,0	35,5
10	21,9	23,2	21,2
5	8,9	10,8	10,0
4	6,7	7,4	6,5

Dessa värden redovisas i följande diagram.

Kalibreringskurva

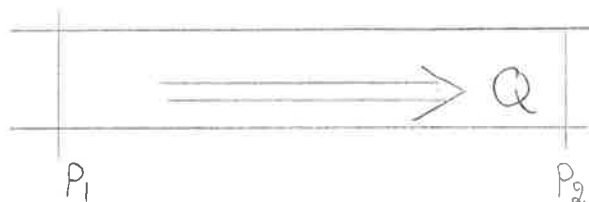
Diaman 3.1 24.

För 3 tryckmätare
NAF 350 451



3.3. Matematisk modell för flödesgivare.

Från fluidmekaniken har vi att flödet i en ledning är proportionellt mot kvadratroten ur tryckdifferensen.



$Q = \text{flöde}$

$P_1, P_2 = \text{tryck}$

$$Q \sim \sqrt{P_1 - P_2}$$

Flödet kan alltså mätas med differenstryckmätare. Dessa är uppbyggda i princip på liknande sätt som vanliga tryckgivare. För att få fram Δp måste ett membran användas. Se fig. 3.3. Membranen utgör ett strömningsmotstånd för vätskan. Tryckdifferensen mellan inflödesmembranet och utflödesmembranet tas upp av silikonolja, som vidarebefordrar tryckskillnaden som en kraft F till en hävare. I övrigt skiljer sig inte tryck och differenstryckmätarna åt. För att få utgångsströmmen proportionell mot $\sqrt{\Delta p}$ används ett speciellt elektriskt förfarande, som vi inte går närmare in på.

Vid kalibrering av övre flödesmätare öppnades slangklämman helt. Ett visst flöde ställdes in och slangklämman ströps helt igen och vi observerade tiden för vätskenivån att höja sig 20 cm. Sedan kunde omräkning till flöde ske. Vi erhöll en karakteristika som var kvadratisk. Se diagram 3.2. med kvadratisk och linjär skala på signalen.

Kalibrering av undre flödesgivare gjordes på något annorlunda sätt, ty vi kunde inte mäta utströmmande mängd

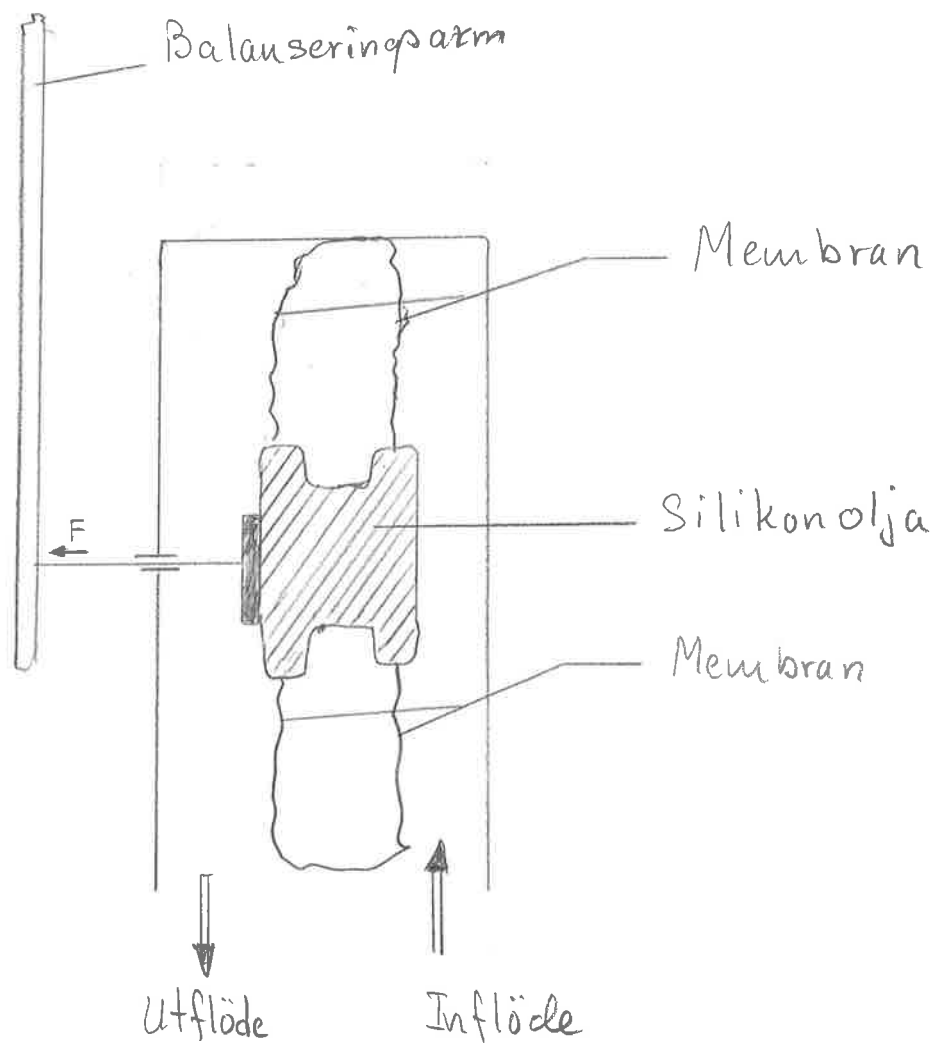


Fig. 3.3

vatten. Nedre ventil stängdes helt och de båda sugpumparna startades. Inom parentes kan sägas att sugpumparnas uppgift var att erhålla tillräckligt stort tryck på vattnet efter nedersta tanken för att vattnet skall kunna strömma igenom ventilen. Understa tanken fylldes nu helt med vatten och ventilen öppnades till ett visst läge motsvarande ett visst flöde. Vi observerade tiden mellan två nivåer på ett inbördes avstånd av 5 cm. Mellan dessa nivåer antog vi att flödet var konstant. Vi fann att karakteristiken var kvadratisk. Se diagram 3.2. där kvadratroten ur signalen är proportionell mot flödet. I arbetspunkten har kalibreringskurvan lutningen 1,68 skaldel/cm³/s. Överföringsfunktionen från flöde till signal blir alltså

$$G(s) = 1,68 \text{ [skaldel} \cdot \text{s/cm}^3 \text{]}$$

Mätvärden vid kalibrering av differenstryckgivare.

Övre givare (inloppet)

tid/20 cm fallhöjd	flöde cm ³ /s	skrivar- utslag	skrivar- utslaget
158,1	2,48	0	0,0
53,3	7,36	2	1,5
40,4	9,72	4	2
29,0	13,52	8	2,8
21,5	18,30	15	3,9
18,3	21,45	20	4,5
17,0	23,09	24	4,85
14,6	26,88	31,5	5,6
13,9	28,34	36	6,0

Undre givare (utloppet)

48,5	5,83	1	0,5
27,9	10,13	4	2
14,8	19,09	18	4,4
11,4	24,36	31,5	5,6

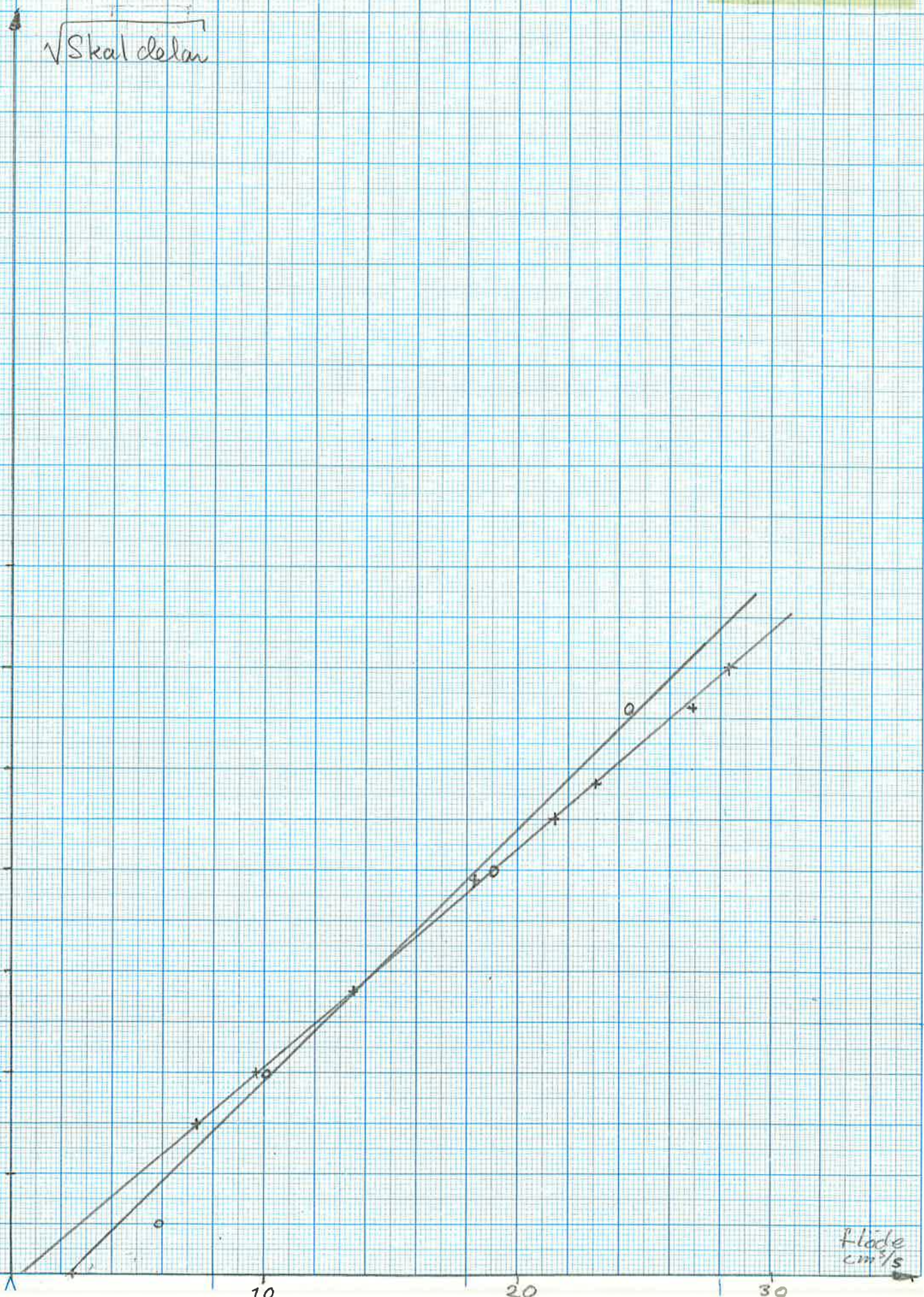
+ övre
o undre

Kalibreringskurva för flödes-
mätare, 2 st, NAF 35560
differens tryckgivare.

Diagram 3.2 29

Skal delar

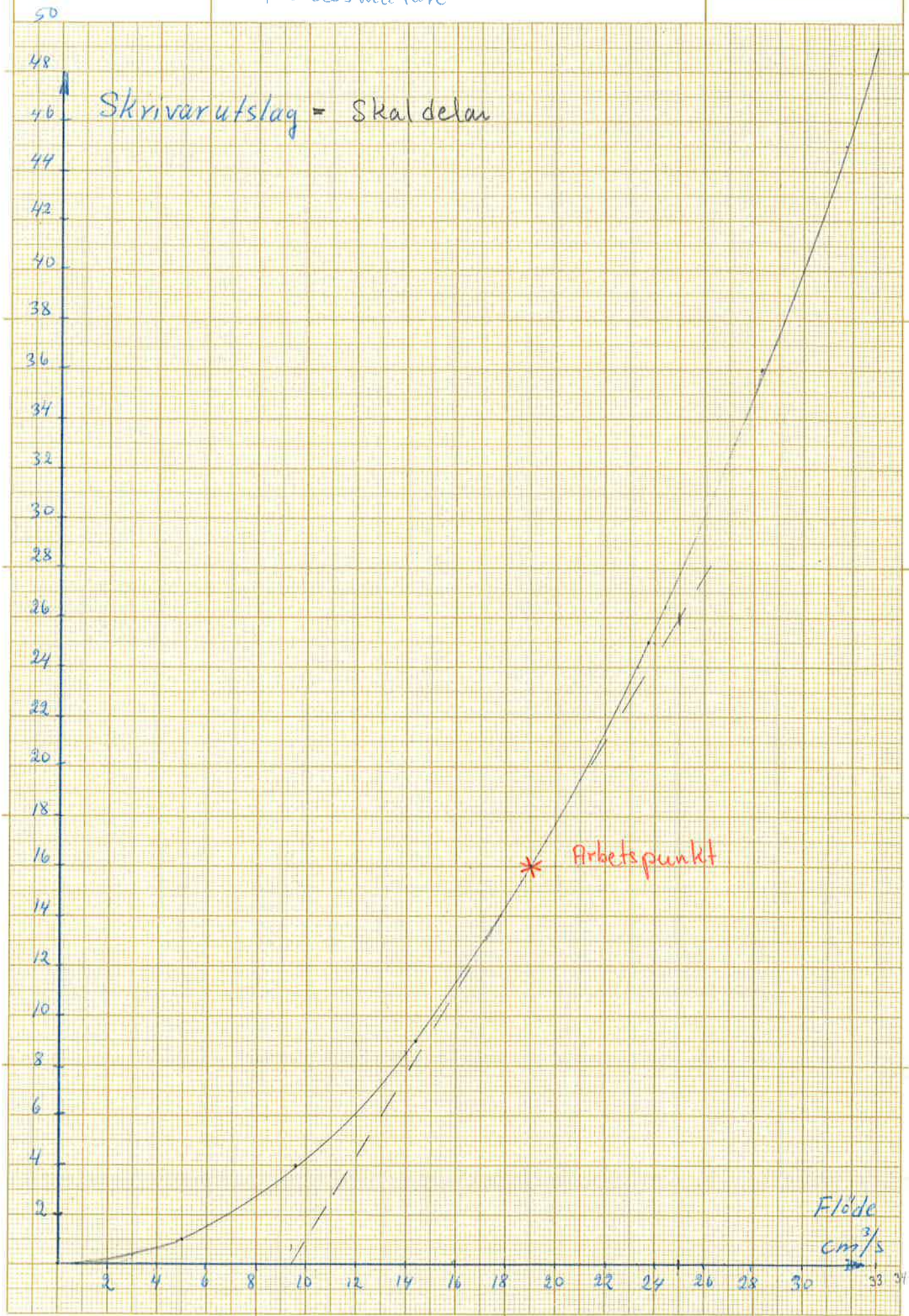
7
6
5
4
3
2
1



Flöde
cm³/s

Kalibreringskurva för flödesmätare

Diagram 3.3^{30.}



3.4. Matematisk modell för ventil.

Ventilen drivs på pneumatisk väg av en yttre kompressor. Se fig. 3.4.1. Styrning av flödet görs genom att man ökar strömningsförlusterna i vattenkretsen. Studera fig. 3.4.2. För en given pump och vid fixt varvtal fås ett samband mellan uppforderingshöjd (H) och flödet (Q). H_{syst} visar vilken uppforderingshöjd en pump måste ha för att ge ett visst flöde. Skärningspunkten ger driftspunkten. H_{syst} är kvadratisk m.a.p. flödet (Q). Genom att öka totaltrycksförlusterna i kretsen fås en brantare stegring av H_{syst} och driftspunkten förskjuts mot lägre flöden. Variering av totaltrycksförluster kan realiseras genom en ventil. Styrning av ventilen sker på följande sätt: En elektrisk signal styr genom signal-tryckomvandlare trycket från kompressorn. Detta tryck styr sedan läget av en nålspets i ventilen och olika strömningsmotstånd erhålles.

Trycket från kompressorn skall vara $1,4 \text{ kp/cm}^2$ men når ibland endast upp till $1,2 \text{ kp/cm}^2$, vilket medför att ventilsens förstärkning minskar.

Av ovan sagda förstår man att det är förknippat med stora problem att få ventilsens karakteristik linjär. Man utformar därför nålspetsen på speciellt sätt som utjämnar olinjäriteterna.

Ventilen har en mekanisk återkoppling från läge till tryck som säkerställer att en viss ventilsignal inställd vid två olika tidpunkter ger samma flöde. Denna återkoppling kan dock kopplas ifrån, vilket inte rekommenderas.

Bestämning av statistiska sambandet mellan ventilsignal och flöde har gjorts med hjälp av kalibreringskurva för flödesmätare. Se fig. 3.4.3. Ventil- och flödessignalerna mättes genom att skicka in dem på skrivaren. Mätvärden finns redovisade i tabell och diagram.

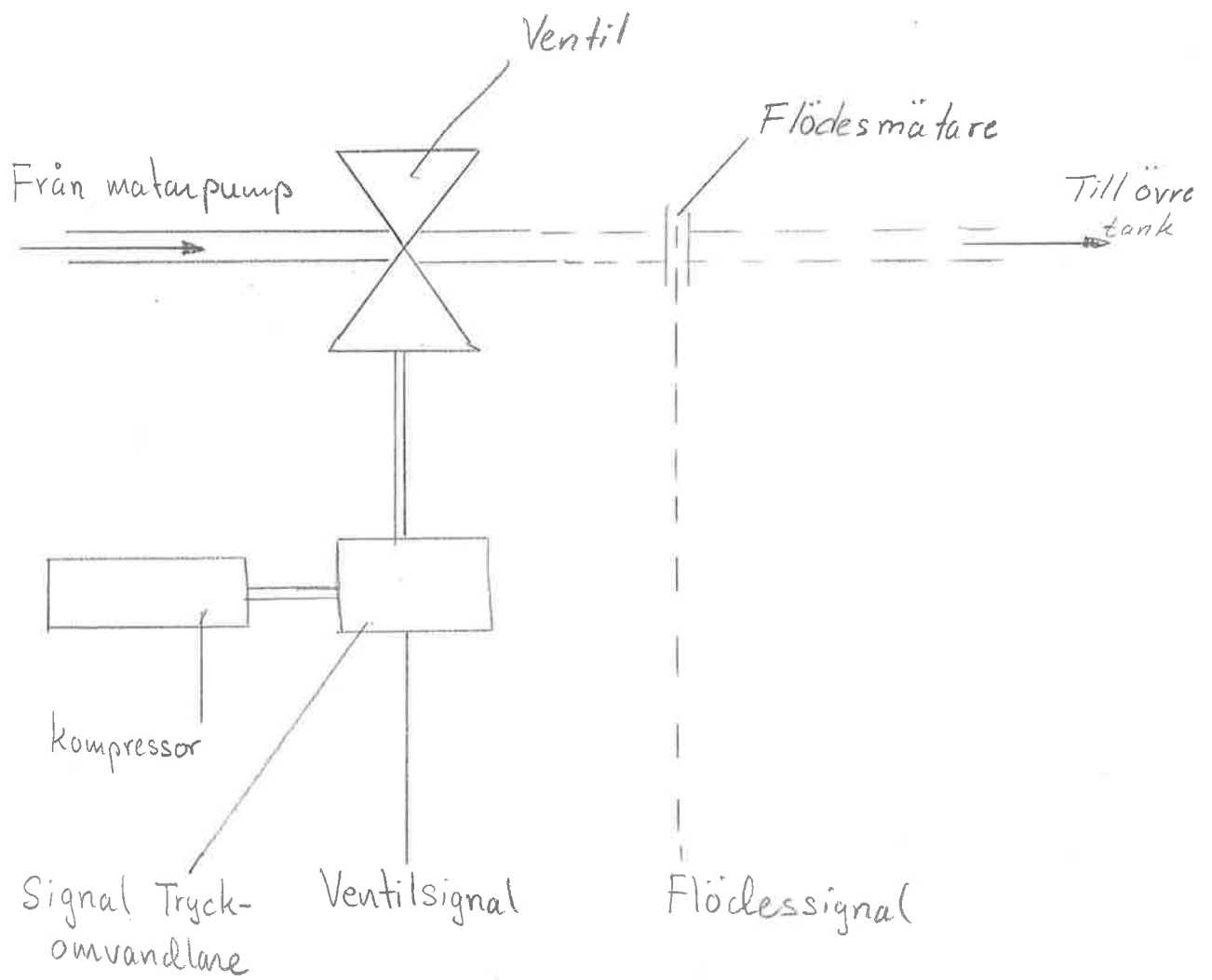


Fig 3.4.1

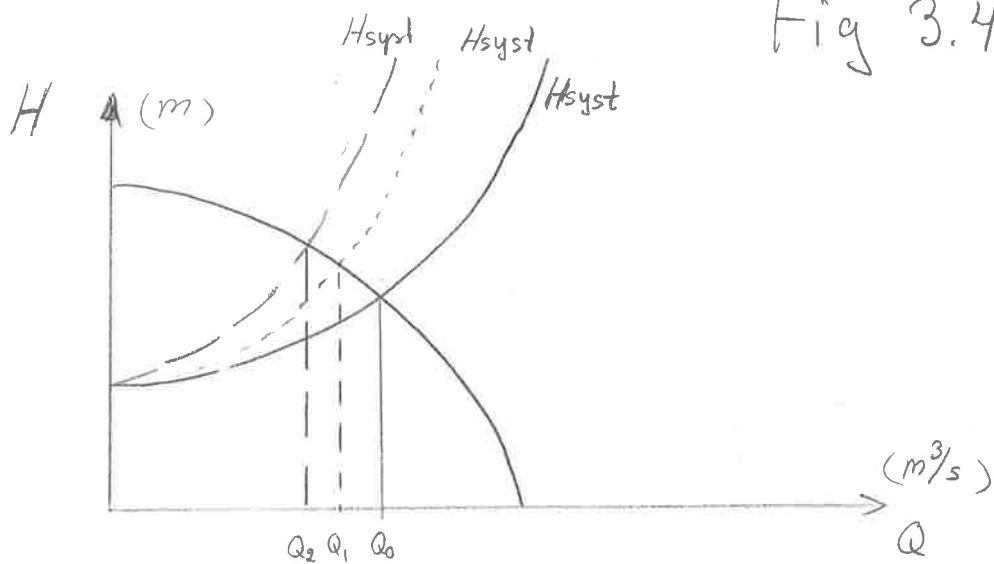


Fig 3.4.2

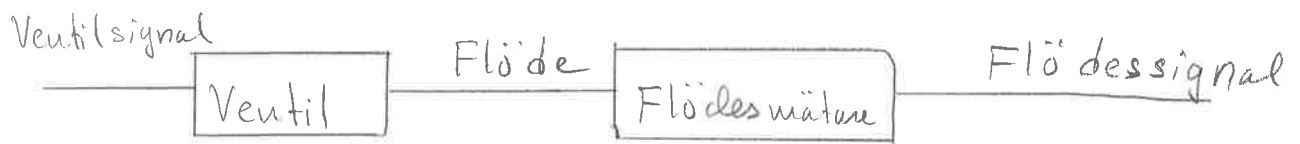


Fig 3.4.3.

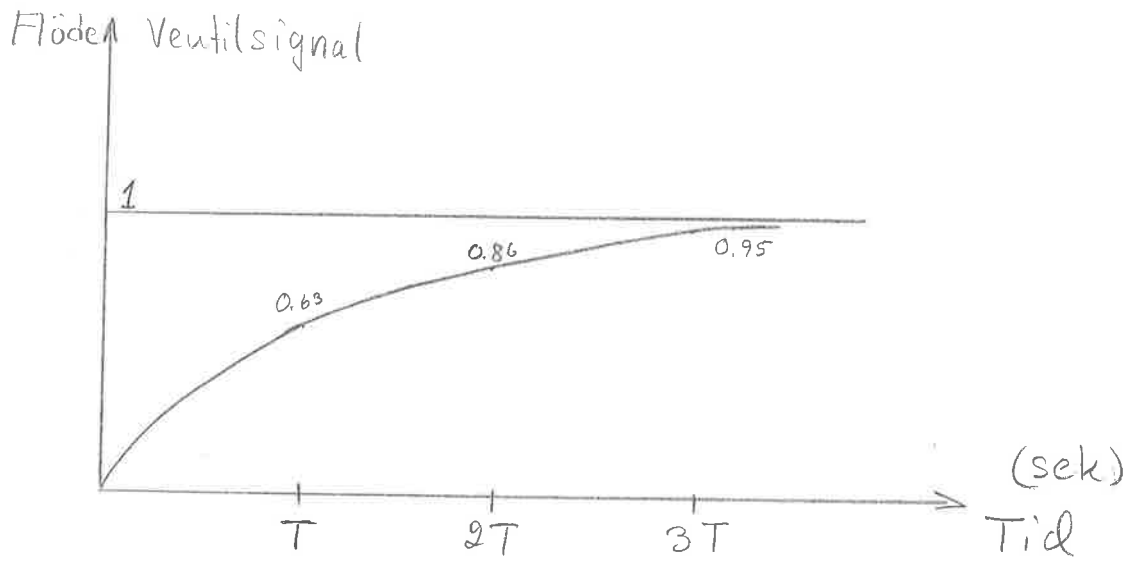


Fig 3.4.4

Ventilsignal	Flödessignal	Flöde cm ³ /s
0-40	0	
50	0,5	3,5
60	2,0	7
65	4,0	9,5
70	7,0	13,0
75	13,0	16,5
80	20,0	21,3
85	26,5	24,5
90	33,0	27,2
95	40,0	≈30
100	45,0	31,5
	≈52	

Tabell 3.4.1.

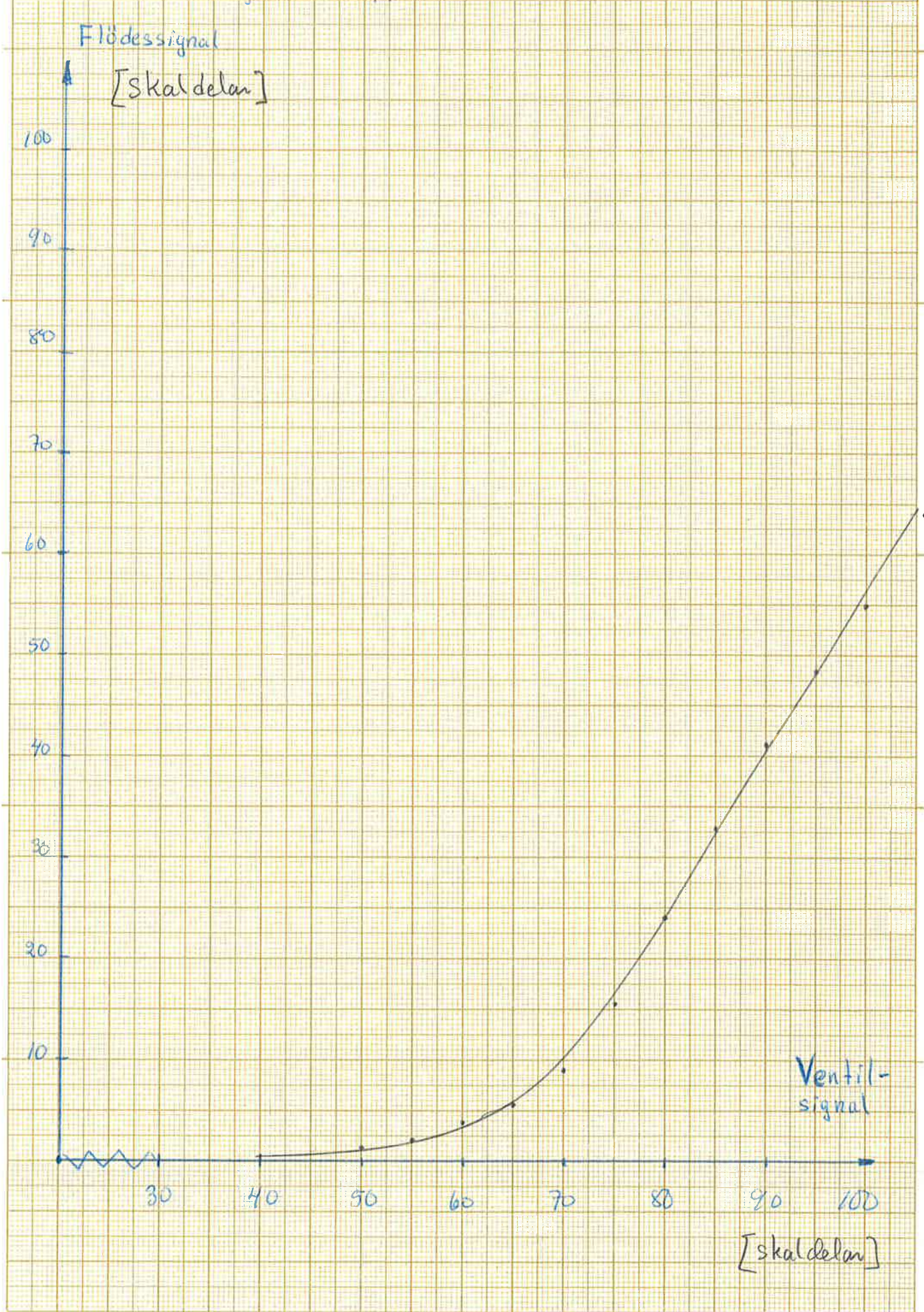
Diagram 3.4.2 visar karakteristiken för ventilen. Den är grovt olinjär (förstärkningen varierar kraftigt). Upp till en ventilsignal på 40 skaldelar fås inget flöde. Detta orsakas av en matarpump med för låg kapacitet. Vi har valt en arbetspunkt där ventilen ger flödet 19 cm³/s vilket motsvaras av en flödessignal 16 skaldelar. Förstärkningen vid arbetspunkten har beräknats ur karakteristikan till 0,86 cm³/sek·skaldel. För att ta reda på ventilens dynamik har vi tagit upp stegsvar och antagit ett 1:a ordningens system. Överföringsfunktionen blir då

$$G(s) = \frac{k}{1 + sT}$$

k = förstärkning, T = tidskonst. Detta G(s) har ett stegsvar som visas i fig. 3.4.4. Stegvarsanalys har gjorts på följande sätt. Man kan på två olika ställen på panelen manuellt ställa in fixa värden på ventilsignalen:

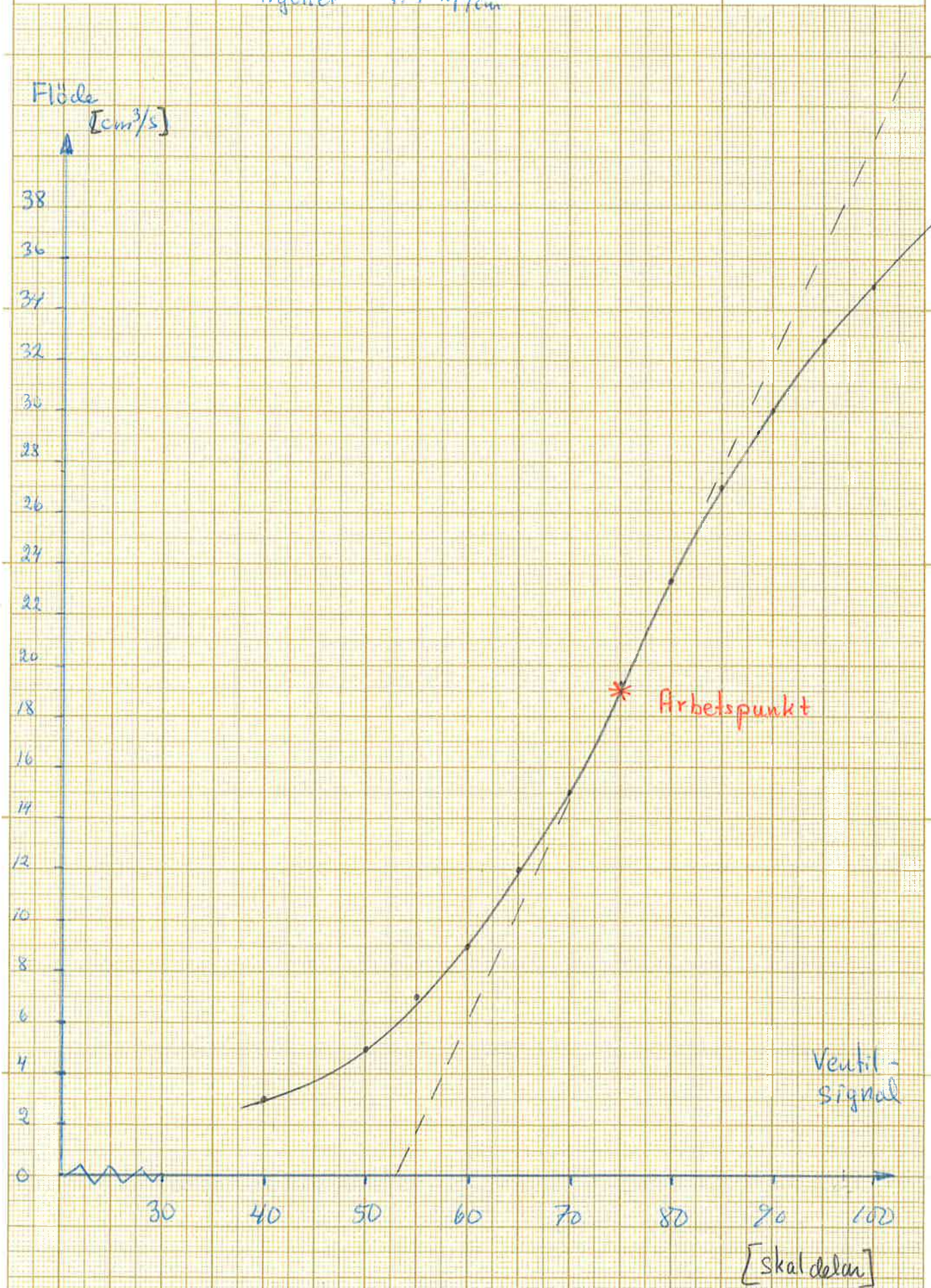
Flödessignal som funktion av ventil signal.

Obs! Luften till ventilen måste ha trycket 1.4 kp/cm^2



Flöde som funktion av
ventilsignal

Obs! Luften till ventilen måste ha
trycket 1.4 kPa/cm^2



- a) genom en separat potentiometer,
- b) genom manuell inställning på regulatorn.

Vilket av dessa som gäller beror av läget av en omkopplare. Man ställer nu in olika ventilsignaler och genom omkoppling fås en momentan stegändring av ventilsignalen. Man observerar då en viss tidskonst. hos ventilen. Genom försök har flödet efter 2 sek. uppmätts till ca. 95% av fullt stegflöde $\Rightarrow 3T = 2 \Rightarrow$ tidskonstanten blir ungefär 0,7 sek. Detta transientförsök innehåller stor osäkerhet då flödet observerades på skrivaren som består av icke-viktslösa, mekaniska delar, var och en med sina tidskonstanter.

Förstärkningen i arbetspunkten har beräknats till 0,86 $\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{skaldel}$. Överföringsfunktionen från signal till flöde:

$$G(s) = \frac{0.86}{1 + 0,7s} \text{ cm}^3/\text{s}\cdot\text{skaldel}$$

Här skall tilläggas att osäkerheten i förstärkningen är betydande p.g.a. variation av kompressortrycket.

3.5. Beskrivning av regulatorerna.

Till processen hör en PID-och en PI-regulator där proportionella, integrerande och deriverande delarna kan ställas in medelst potentiometrar. Fig. 3.5.1 visar en schematisk skiss över en regulator. Mätvärde jämförs med referensvärdet i summatorn. Differensen behandlas i "burken" betecknad med $G_{PID}(s)$. För en PID-regulator gäller:

$$y = -k_1(u-u_{ref}) - k_2 \int^t (u-u_{ref})dt - k_3 \frac{d(u-u_{ref})}{dt}$$

Laplace-transformation ger

$$G_{PID}(s) = -k_1 - \frac{k_2}{s} - k_3 s$$

där parametrarna k_1 , k_2 och k_3 ställes in efter önskemål. Parametrarna på våra regulatorer ser något annorlunda ut.

$$G_{PID}(s) = \pm \frac{100}{k} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

$$k \in [5 - 300\%]$$

$$T_I \in [0,015 - 3 \text{ min}]$$

$$T_D \in [0,015 - 3 \text{ min}]$$

Vi har ej kalibrerat parameterpotentiometrarna men vi har dock observerat att de ej stämmer exakt.

På regulatorerna finns dessutom två visarinstrument. Se fig. 3.5.2. Dessa visar reglerfelet och styrsignalen. Vi har kalibrerat referensvärdesställarna då vi haft trycksignalen som mätsignal. Man kan vid en senare reglering av processen översätta en önskad vätskenivå till ett visst referensvärde.

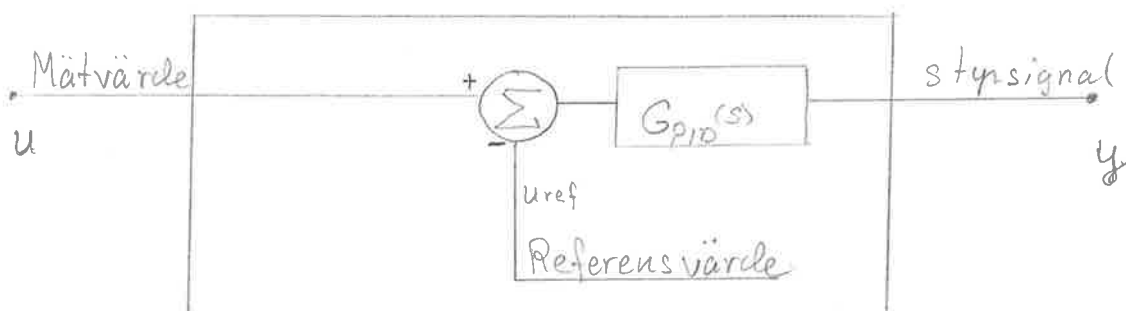


Fig 3.5.1

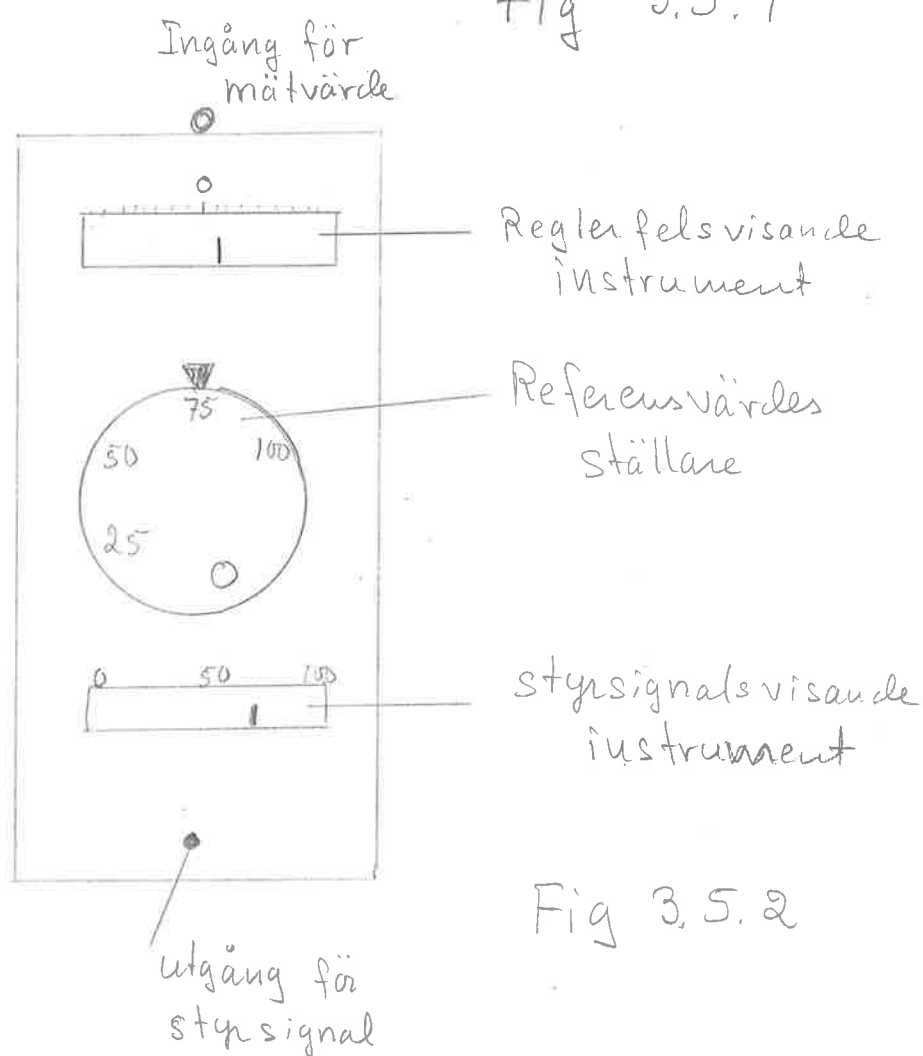


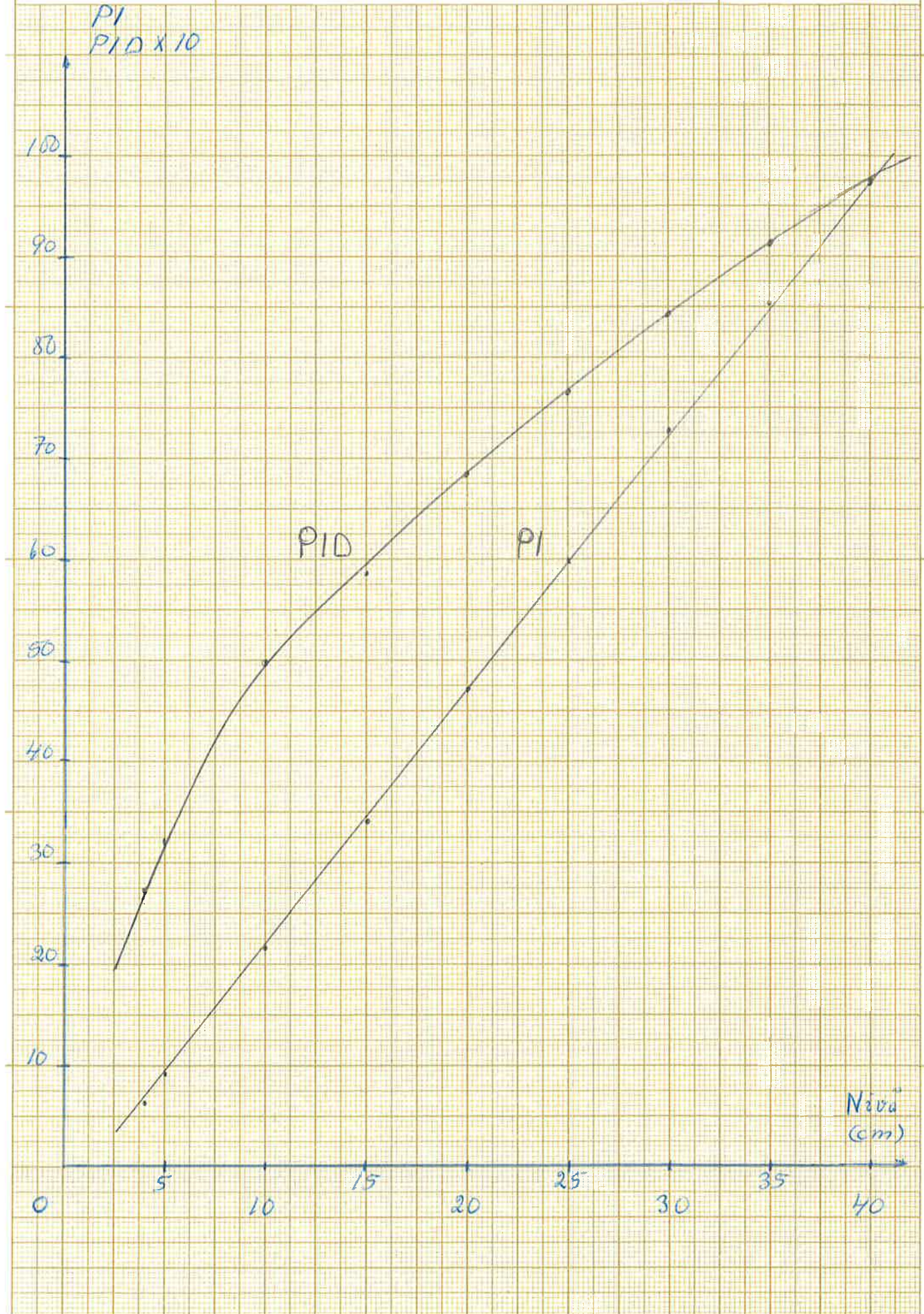
Fig 3.5.2

Kalibrering har tillgått så att en viss tanknivå uppmätts med linjal. Trycksignalen jämfördes sedan med olika referensvärden med hjälp av reglerfelsvisande instrumentet. PI-ratten befanns vara linjär och graderad från 0 till 100 skaldelar medan PID-ratten var kvadratisk och graderad. Resultat finns redovisade i nedanstående tabell och i diagram 3.5.1.

Nivå	PID	PI
40	9,77	97,3
35	9,15	85,3
30	8,44	72,6
25	7,67	59,9
20	6,84	47,2
15	5,85	34,1
10	4,71	21,6
5	3,19	9,1
4	2,71	6,1

Kalibreringskurva för
referensställarna på PI resp
PID-regulator

Diagram 3.5.1^{41.}



3.6. Sammanfattning av modellen för systemet.

Den lineariserade modellen för systemet har tagits fram i avsnitt 3.1:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (3.1.5)$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x$$

Det totala blockschemat för modellen blir enligt fig.

3.6.1: I den matematiska modellen arbetar man med avvikelser från referensvärden (arbetspunkter). Dessa referensvärden representeras i blockschemat med hjälp av summatorer.

$$u_2 = q - q_0 ; \quad x_1 = h_1 - h_1^0$$

$$x_2 = h_2 - h_2^0 ; \quad x_3 = h_3 - h_3^0$$

Utflödesventilen och utflödesgivaren har ej använts för reglering av processen.

OBS! Överföringsfunktionerna i ventil 1 och tank 3 avser styrsignal till flöde respektive nivå till nivå.

Anledningen till att tank 3 och utsugningspumpen tagits samman till en enhet är att utflödet ur tank 3 mycket starkt beror av utsugningspumpen. För detaljer se avsnitt 3.1. I avsnitt 3.1 förklaras också hur tankarnas tidskon-

stanter T beror av utflödesarea, tankarea och referenspunkt.

Vid lineariseringen har följande siffervärde på referenspunkter och konstanter använts:

$$K_1 \quad 0,86 \text{ (cm}^3\text{/s)/skd}$$

$$u_{r0} \quad 75 \quad \text{skd}$$

$$A \quad 19,6 \text{ cm}^3$$

$$T_1 \quad 43 \quad \text{s}$$

$$T_2 \quad 43 \quad \text{s}$$

$$q_0 \quad 19 \quad \text{cm}^3\text{/s}$$

$$h_1^0 \quad 21,5 \text{ cm}$$

$$h_2^0 \quad 21,5 \text{ cm}$$

$$h_3^0 \quad 21,5 \text{ cm}$$

$$k_0 \quad 2,54 \text{ skd/cm}$$

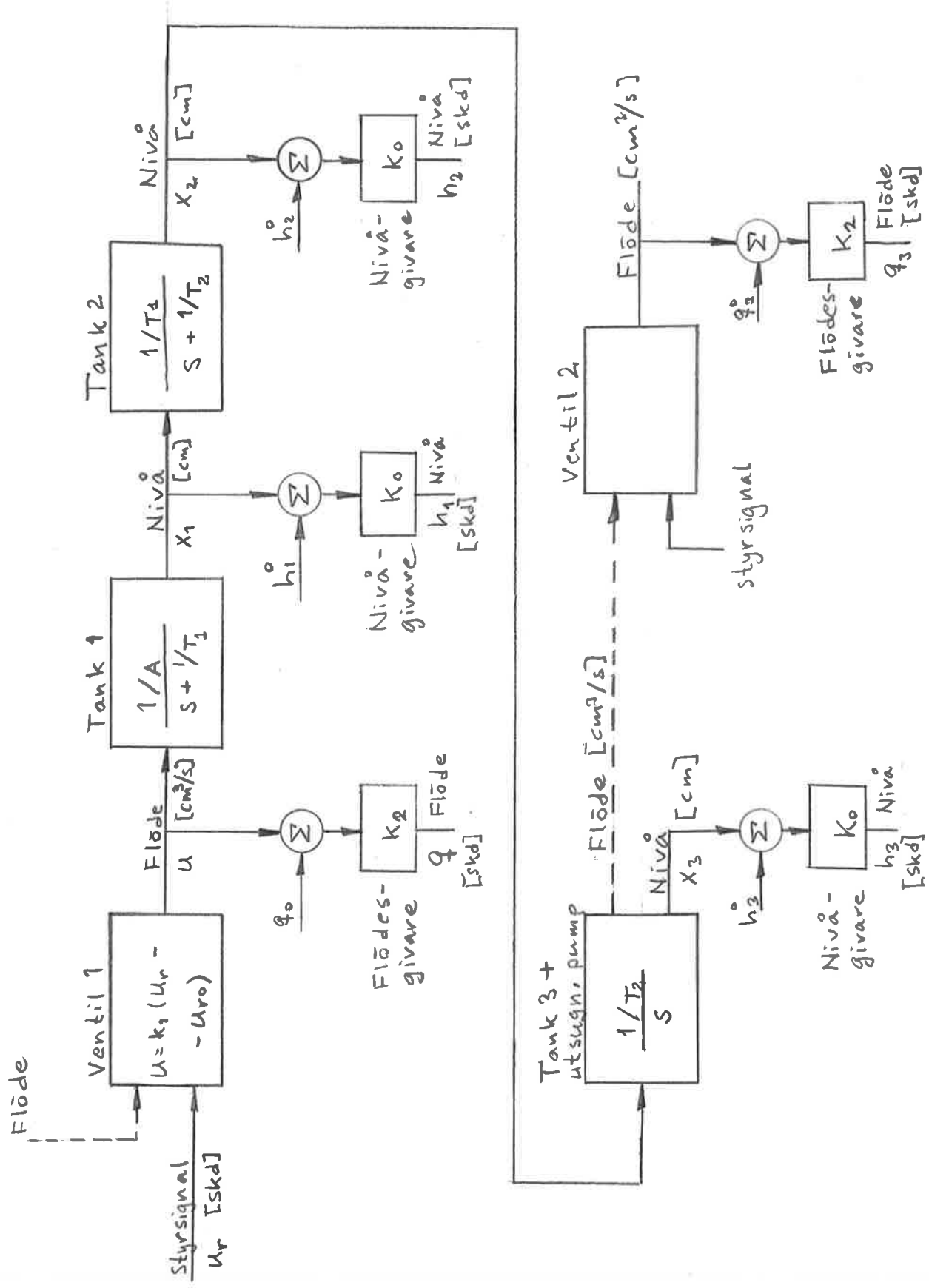


Fig 3.6.1. Blockschemor för den totala lineariserade modellen.

4. REGLERING AV PROCESSEN.

4.1. Syften med regleringen.

Vid reglering av processen kan olika situationer och målsättningar betraktas. I grupparbetet studerades följande problemställning:

Process: a) Endast den övre tanken
b) Den övre och den mellersta tanken
c) Alla tre tankarna.

Störning: Nivån i en av tankarna förändras genom att en flaska vatten hälls i (detta kallar vi "en flaskas stegstörning"). Störningen äger alltid rum i den sista (nedre) av de tankar som ingår i processen.

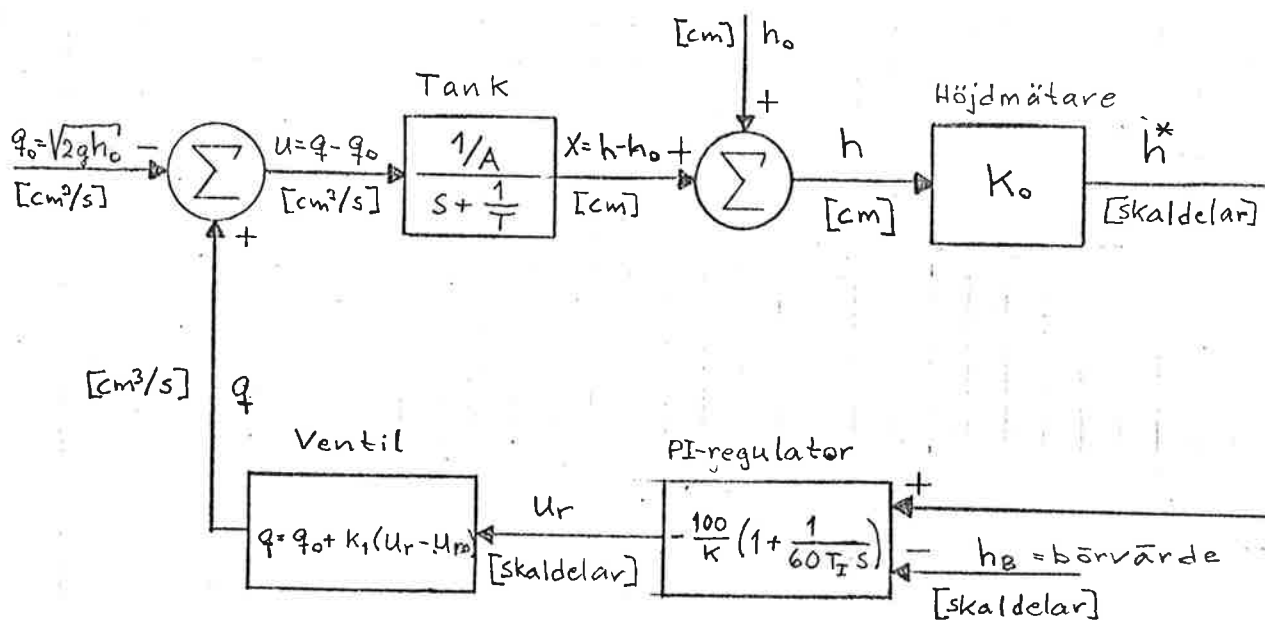
Regleruppgift: Syftet var att så snabbt, stabilt och noggrant som möjligt återföra nivån i den störda tanken till ett givet referensvärde (50 skaldelar).

Hjälpmedel: Den övre ventilen betraktas som insignal till processen, medan den undre förutsättes stå i fixt läge. PI- och PID-regulatorerna får båda användas på valfritt sätt.

I detta kapitel beskrivs reglering av process a) i avsnitt 4.2 - 4.4, reglering av process b) i avsnitt 4.5. Några synpunkter på möjligheten att reglera process c) ges i avsnitt 4.6.

4.2. Teoretiska beräkningar för dimensionering av regulator för nivåreglering av övre tanken.

Vid dimensioneringen används den lineariserade modellen av processen, som beskrivs i avsnitt 3.1. Blockschemat för processen med PI-reglering av nivån i tanken blir enl. fig. 4.2.1.



$$A = 19,6 \text{ cm}^2$$

$$T = 43,4 \text{ s}$$

$$k_0 = 2,54 \text{ skald./cm}$$

$$k_1 = 0,86 \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{skald.}$$

$$u_{r0} = 75 \text{ skald.}$$

$$h_B = 50 \text{ skald.}$$

Fig. 4.2.1 - Blockschemat.

Differentialekvationen för processen är enligt 3.1 (beteckningar enligt fig. 4.2.1).

$$\dot{x} = -\frac{1}{T} x + \frac{1}{A} u \quad (4.2.1)$$

Beräkning av u (se fig. 4.2.1)

$$\left. \begin{aligned} u &= q - q_0 \\ q &= q_0 + k_1(u_r - u_{r0}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow u = k_1(u_r - u_{r0}) \quad (4.2.2)$$

Signalen u_r efter PI-regulatorn är:

$$u_r = -\frac{100}{K}(h^* - h_B) - \frac{100}{KT_I \cdot 60} \int_0^t (h^* - h_B) dt \quad (4.2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} h^* &= k_0 h \\ h &= x + h_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow h^* = k_0(x + h_0) \quad (4.2.4)$$

(4.2.3) och (4.2.4) medför

$$u_r = -\frac{100}{K} (k_0(x + h_0) - h_B) - \frac{100}{KT_I \cdot 60} \int_0^t (k_0(x + h_0) - h_B) dt \quad (4.2.5)$$

Således blir u med hjälp av (4.2.2) och (4.2.5)

$$u = k_1 \left[\frac{100}{K} (h_B - k_0(x + h_0)) + \frac{100}{KT_I \cdot 60} \int_0^t (h_B - k_0(x + h_0)) dt - u_{r0} \right] \quad (4.2.6)$$

Detta uttryck insättes i diff.ekv. (4.2.1). Då erhålles:

$$\dot{x} = -\frac{1}{T}x + \frac{k_1}{A} \left[\frac{100}{K} (h_B - k_0(x+h_0)) + \frac{100}{KT_I \cdot 60} \int_0^t (h_B - k_0(x+h_0)) dt - u_{r0} \right] \quad (4.2.7)$$

derivering ger

$$\ddot{x} = -\frac{1}{T}\dot{x} + \frac{k_1}{A} \left[-\frac{100k_0}{K}\dot{x} + \frac{100}{KT_I \cdot 60} (h_B - k_0(x+h_0)) \right] \quad (4.2.8)$$

Efter förenkling erhålles

$$\ddot{x} + \left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK} \right) \dot{x} + \frac{100k_0k_1}{60AKT_I} x = \frac{k_1 \cdot 100}{60AKT_I} (h_B - k_0h_0) \quad (4.2.9)$$

Denna differentialekvation har den karakteristiska ekvationen:

$$s^2 + \left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK} \right) s + \frac{100k_1k_0}{60AKT_I} = 0 \quad (4.2.10)$$

med rötterna:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK} \right)^2 - \frac{100k_1k_0}{60AKT_I}} \quad (4.2.11)$$

För att få snabb insvängning bör rötterna göras komplexa.

Sätt:

$$\left. \begin{aligned} \omega^2 &= \frac{100k_1k_0}{60AKT_I} > 0 \\ 2\zeta\omega &= \frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2.12)$$

Då blir den allmänna lösningen till (4.2.9):

$$x = \frac{h_B}{k_0} - h_0 + \alpha e^{-\zeta\omega t} \sin(\omega\sqrt{1-\zeta^2}t + \varphi) \quad (4.2.13)$$

där α och φ är arbiträra konstanter.

Eftersom h_B/k_0 utgör börvärdeshöjden uttryckt i cm kan sluthöjden justeras med h_B men hålles i enlighet med målsättningen konstant vid 50 skaldelar. Vid dimensionering av en regulator är det vanligt att välja ett givet värde, ofta $1/\sqrt{2}$, på den relativa dämpningen ζ .

Härledning av sambandet mellan K och T_I vid givet värde på ζ :

(4.2.12) \Rightarrow

$$\frac{(2\zeta\omega)^2}{4\zeta^2} = \omega^2 \quad (4.2.14)$$

$$\frac{\left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK}\right)^2}{4\zeta^2} = \frac{100k_1k_0}{60AKT_I} \quad (4.2.15)$$

$$T_I = \frac{40k_1k_0}{6AK \left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK}\right)^2} \zeta^2 = \frac{0,743}{K \left(0,023 + \frac{11,14}{K}\right)^2} \zeta^2 \quad (4.2.16)$$

OBS! T_I är uttryckt i min. för att stämma med de kommersiella regulatorer som användes. Enligt ekv. (4.2.13) bör $\zeta\omega$ väljas stor för att amplituden snabbt skall avta. K bör således enl. (4.2.12) väljas liten. Verkligheten begränsar dock valmöjligheten. I avsnitt 4.4 visas exempel på den verkliga processens insvängning (eller brist på dito) efter en initialhöjd på 80 skaldelar eller mer och med regulatorn inställd på olika värden på parametrarna T_I och K . I direkt anslutning till dessa kurvor visas motsvarande kurvor för den lineariserade modellen, där förloppet simulerats på analogmaskin.

4.3. Underlag för simulering av reglering av övre tanken.

Differentialekvationen för det slutna, lineariserade systemet är

$$\ddot{x} + \left(\frac{1}{T} + \frac{100k_1k_0}{AK} \right) \dot{x} + \frac{100k_0k_1}{60AKT_I} x = \frac{100k_1}{60AKT_I} (h_B - k_0h_0) \quad (4.2.9)$$

Målsättningen är en snabb, stabil och noggrann insvängning från ett initialtillstånd för höjden på minst 80 skaldelar, d.v.s. $x(0) \geq 12$ cm. Denna insvängning är enkel att simulera på analogmaskin.

Inflödet q kan ju, som lätt inses, svårligen göras mindre än noll. Dessutom har q ett största värde, då pumpen har en begränsad kapacitet. Det visar sig att pumpens kapacitet, trots alla ansträngningar att "lufta" systemet, kan variera med upp till en faktor 2 från dag till dag. Samtliga i denna rapport redovisade värden och diagram, verkliga och simulerade för processen bestående av 1 tank, hänför sig till det maximala flödet $37 \text{ cm}^3/\text{s}$.

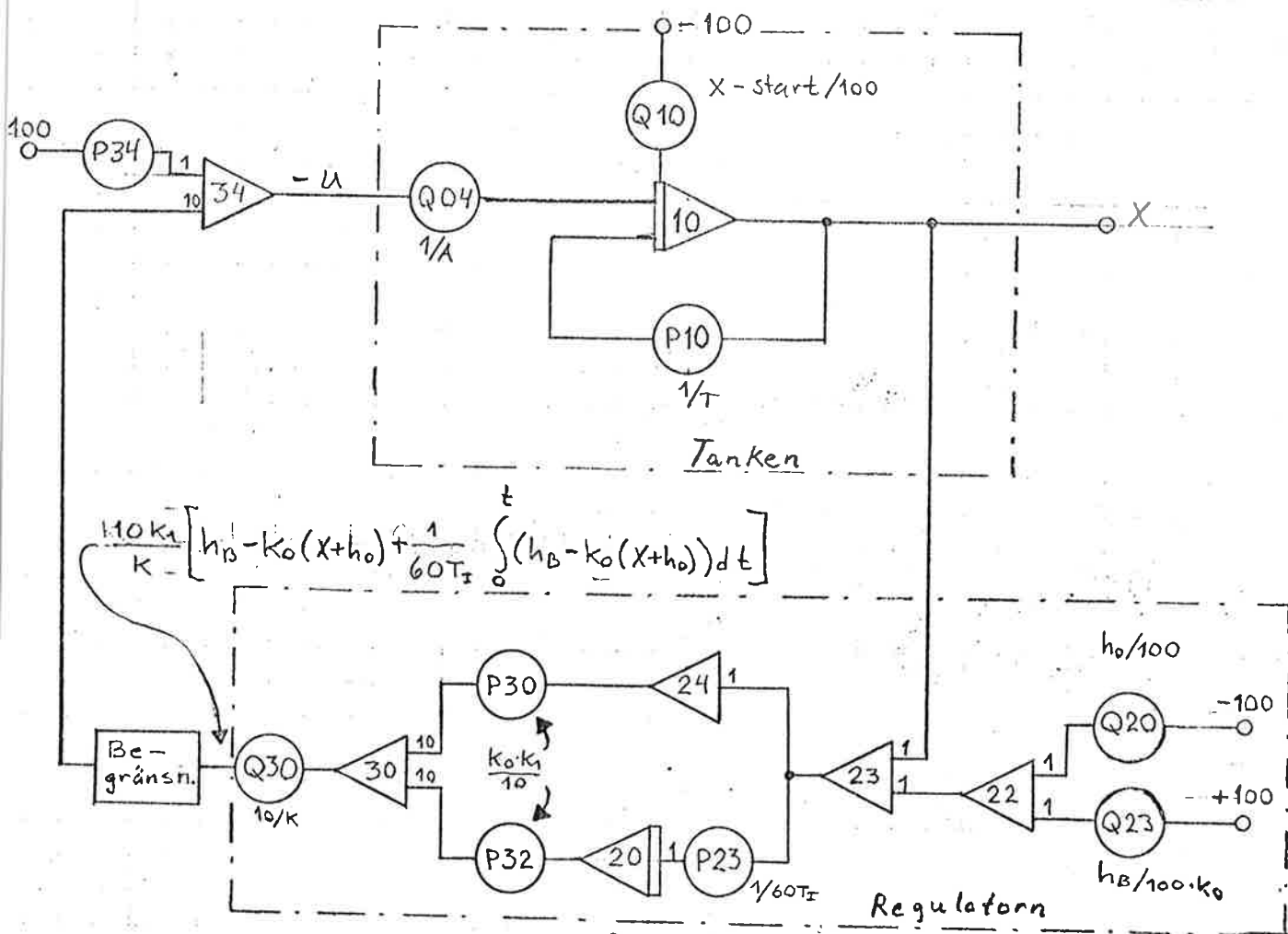
Med hjälp av en komparatorkoppling kan modellen förbättras. I den "ordinarie" uppkopplingen av ekv. (4.2.9), se fig. 4.3.1, finns signalen

$$\frac{10k_1}{K} \left[h_B - k_0(x+h_0) + \frac{1}{60T_I} \int_0^t (h_B - k_0(x+h_0)) dt \right] = u + k_1 u_{r0} \quad (4.3.1)$$

tillgänglig. Från villkoret

$$0 < q = q_0 + u < 37 \quad (4.3.2)$$

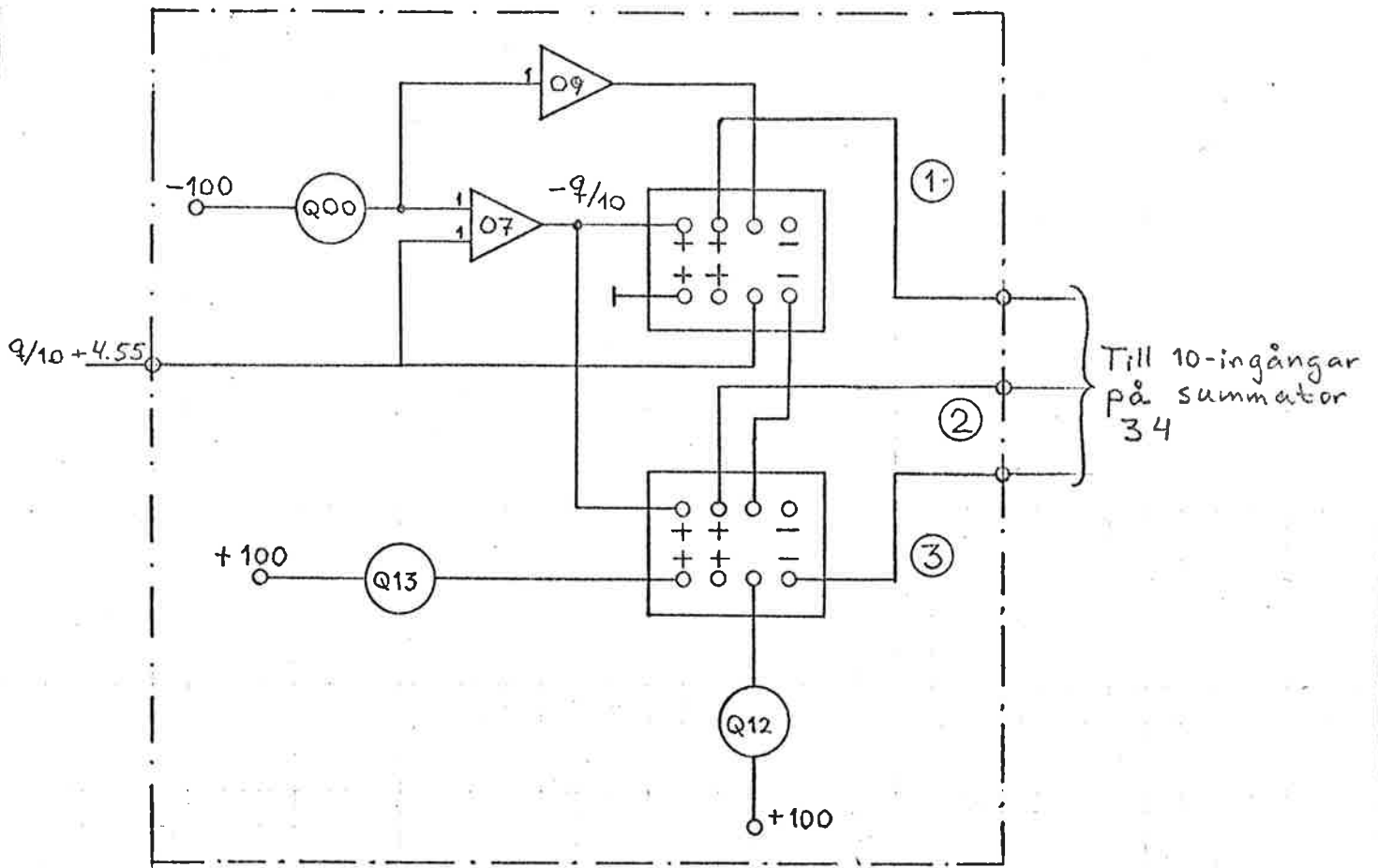
erhålles enkelt två villkor på den tillgängliga signalen. Efter "filtrering" i komparatorkopplingen enl. fig. 4.3.2 uppfyller signalen dessa villkor. I avsnitt 4.4 redovisas för några inställningar av regulatorparametrarna simulerade insvängningsförlopp tillsammans med motsvarande förlopp på det verkliga systemet. Allmänt gäller att de simulerade förloppen har samma tendens som de verkliga, med samma storleksordning såväl vad gäller höjden som flödet men med något mindre oscillativ tendens hos simuleringen.



Potentiometerlista

P34	$k_1 \cdot u_{r0} / 100$	0.645
Q04	$1/A$	0.05
Q10	$x\text{-start}/100$	
P10	$1/T$	0.02
Q20	$h_0/100$	
Q23	$h_B(100 \cdot k_0)$	
P23	$1/60T_I$	
P30	$k_0 \cdot k_1 / 10$	0.218
P32	$k_0 \cdot k_1 / 10$	0.218
Q30	$10/k$	

Fig. 4.3.1. Schema för simulering på analogmaskin. Jfr fig. 4.2.1. Schema för begränsaren, se fig. 4.3.2.



- (1) $+4.55$ när $q < 0 \Rightarrow u = -19$
 (2) $q/10 + 4.55$ när $0 < q < 37 \Rightarrow u = q - 19$
 (3) $+8.25$ när $q > 37 \Rightarrow u = 18$

Potentiometerlista

Q00	0.045
Q12	0.0825
Q13	0.037

Fig. 4.3.2. Begränsare för att simulera ventilens botten- resp mättningsläge.

4.4. Resultat av simuleringar och verkliga regleringar av övre tanken.

För 3 olika värden på relativa dämpningen $\zeta = 0,5$, det ofta valda $1/\sqrt{2}$ ($\approx 0,7$) samt $2/\sqrt{5}$ ($\approx 0,9$) - undersöktes regleringens effektivitet på en nivåstörning på 30 skaldelar. För varje ζ -värde prövades några olika k-värden och motsvarande T_I -värde ges av ekv. (4.2.16). Resultatet framgår av diagram 4.4.1 - 4.4.13, där också lösningstiden T_S , definierad som tiden från det att höjden har värdet 80 skaldelar tills dess att höjden avviker med mindre än en skaldel från 50, har angetts. För de bästa försöken presenteras också en jämförande kurva från simulering av den linjära modellen på analogmaskin. Dessa kurvor uppvisar stora likheter med de praktiska försöken då det gäller lösningstid, storlek för "höjdslängarna" samt flödeskurvor. En återkommande skillnad är att antalet överslängar är större i praktiken än för den linjära modellen.

OBS! För de experimentella kurvorna är tidsaxeln riktad åt vänster, för simuleringarna åt höger. I båda typerna av diagram är övre kurvan höjd (stationärt 21,5 cm = 50 skd) och undre flöde (stationärt 19 cm³/s = 16 skd). Följande skalor används:

Experimentella kurvor

Tid 15 s/ruta
Höjd och flöde enl. avsnitt 2.3.

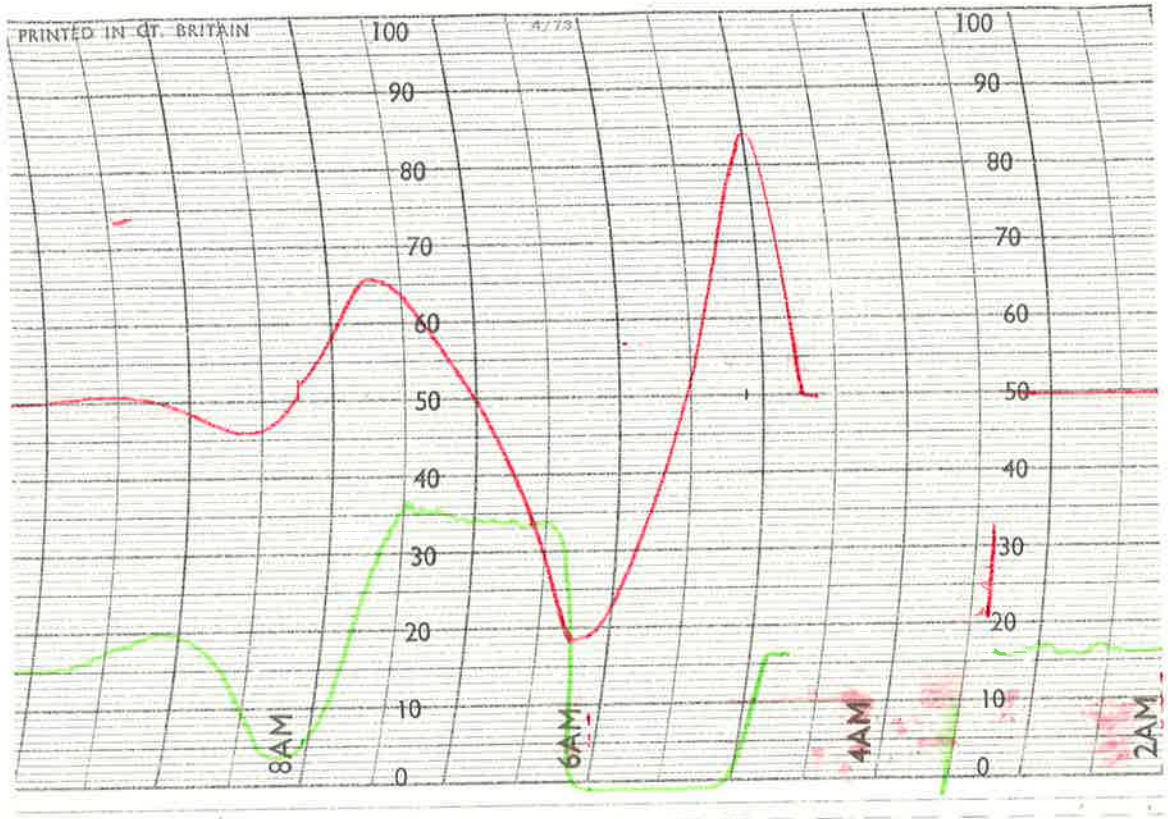
Simuleringar

Tid 1 s/mm
Höjd 1 cm/mm
Flöde 1 cm³/s/mm

(sid 55 och 56 saknas)

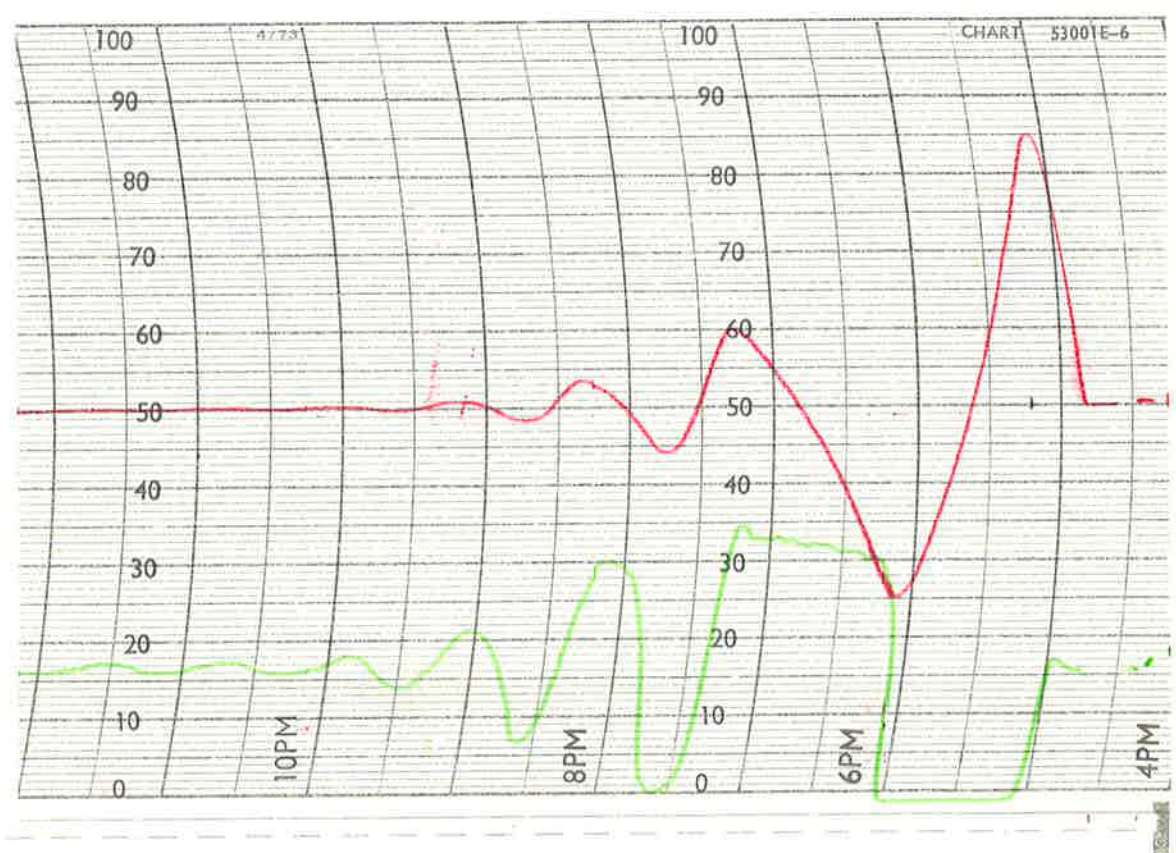
$\zeta = \frac{1}{2}$, $k=100$, $T_I = 0.1$, $T_S = 118$ s

Diagram 4.4.1



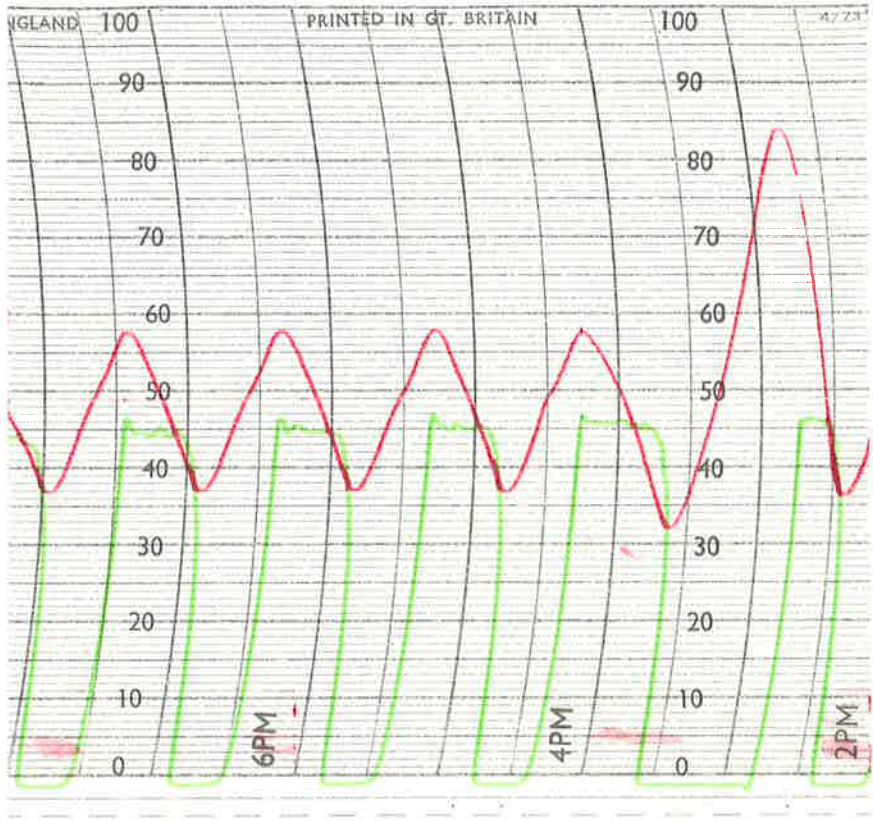
$\zeta = \frac{1}{2}$, $k=50$, $T_I = 0.06$, $T_S = 110$ s

Diagram 4.4.2

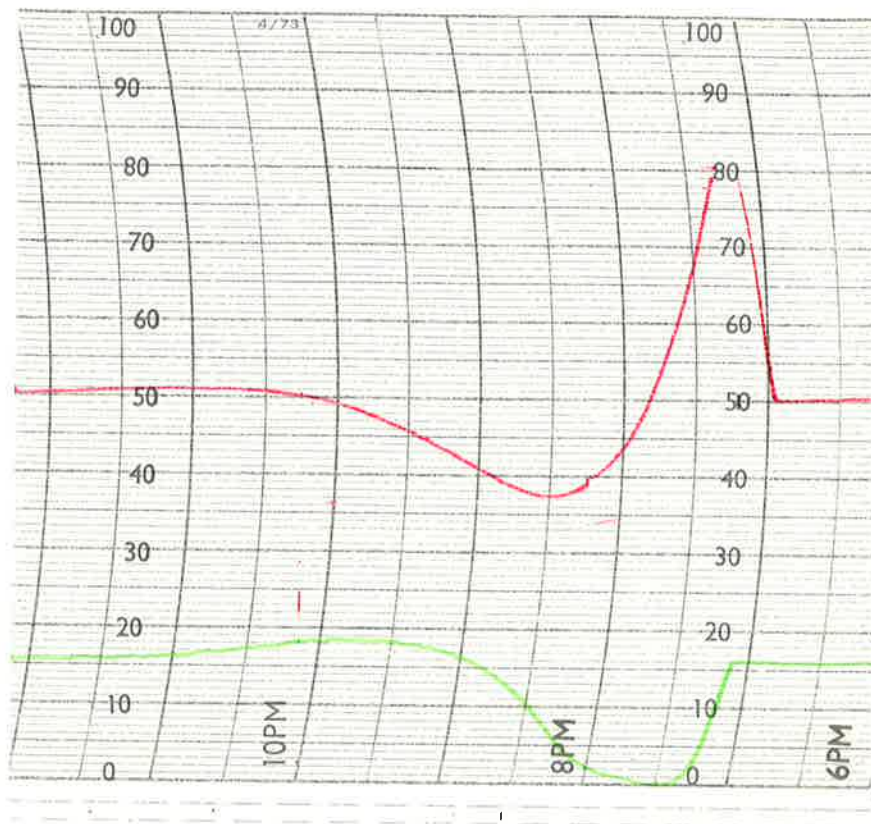


$\xi = \frac{1}{2}, k = 25, T_I = 0.03, T_S = \infty$

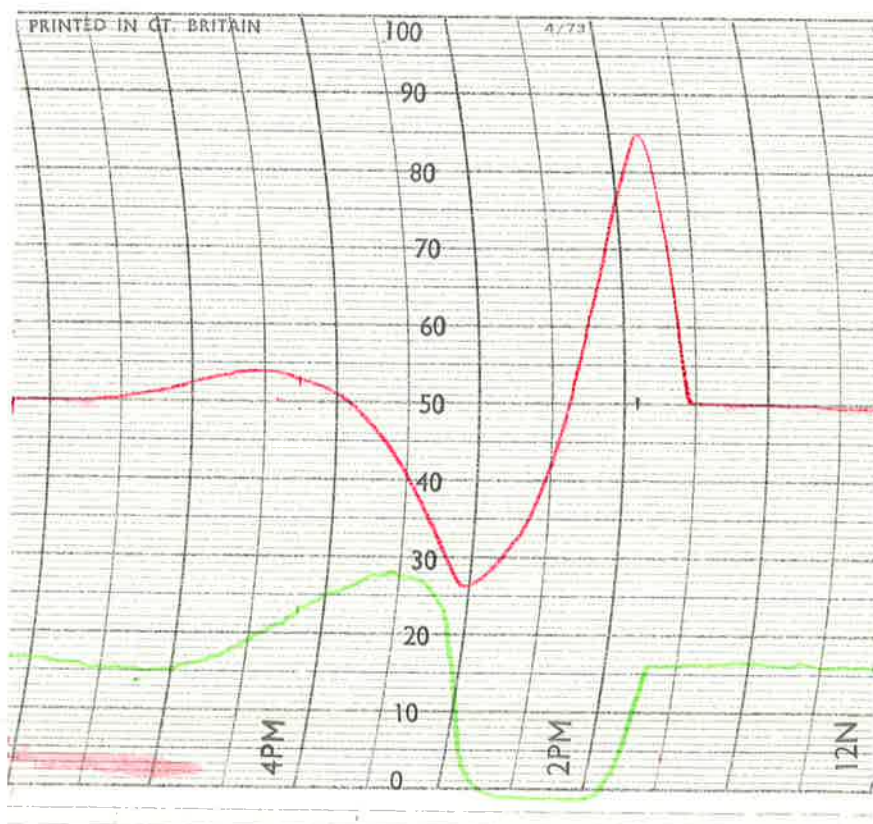
Diagram 4.4.3.



$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $k=150$, $T_I=0.26$, $T_S=83$ s Diagram 4.4.4



$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $k=100$, $T_I=0.2$, $T_S=105$ s Diagram 4.4.5

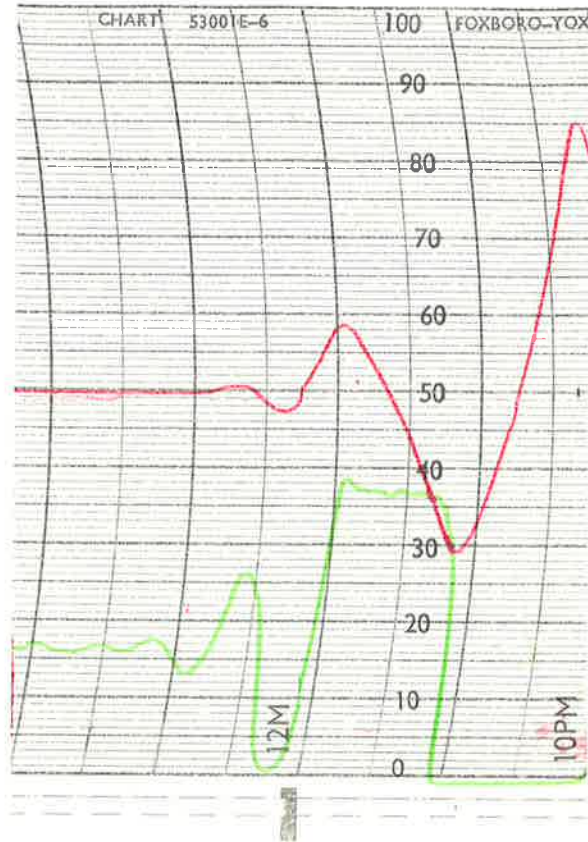


$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $k = 50$, $T_I = 0.12$, $T_S = 85$ s Diagram 4.4.6 60

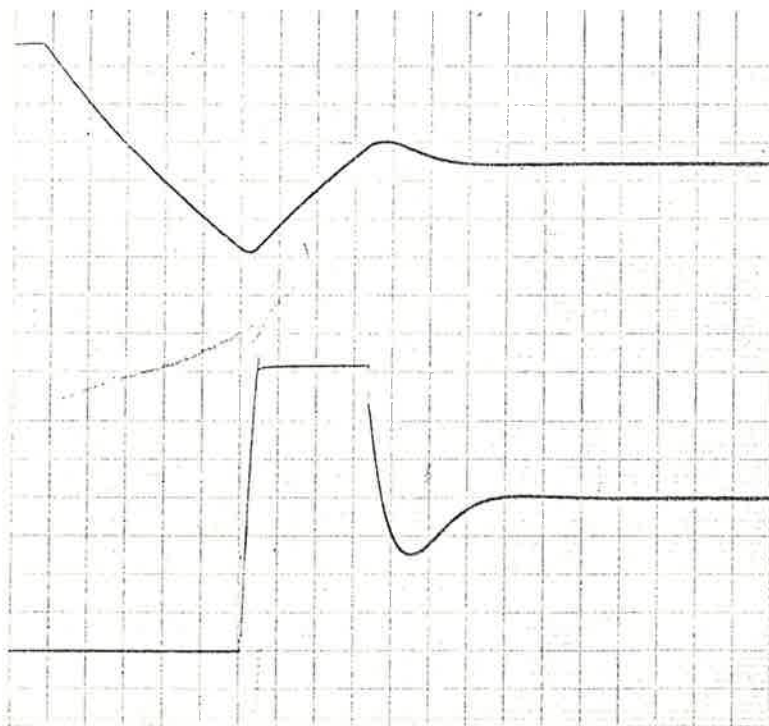


$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}, k = 25, T_I = 0.07, T_S = 67 \text{ s}$$

Diagram 4.4.7 ⁶¹

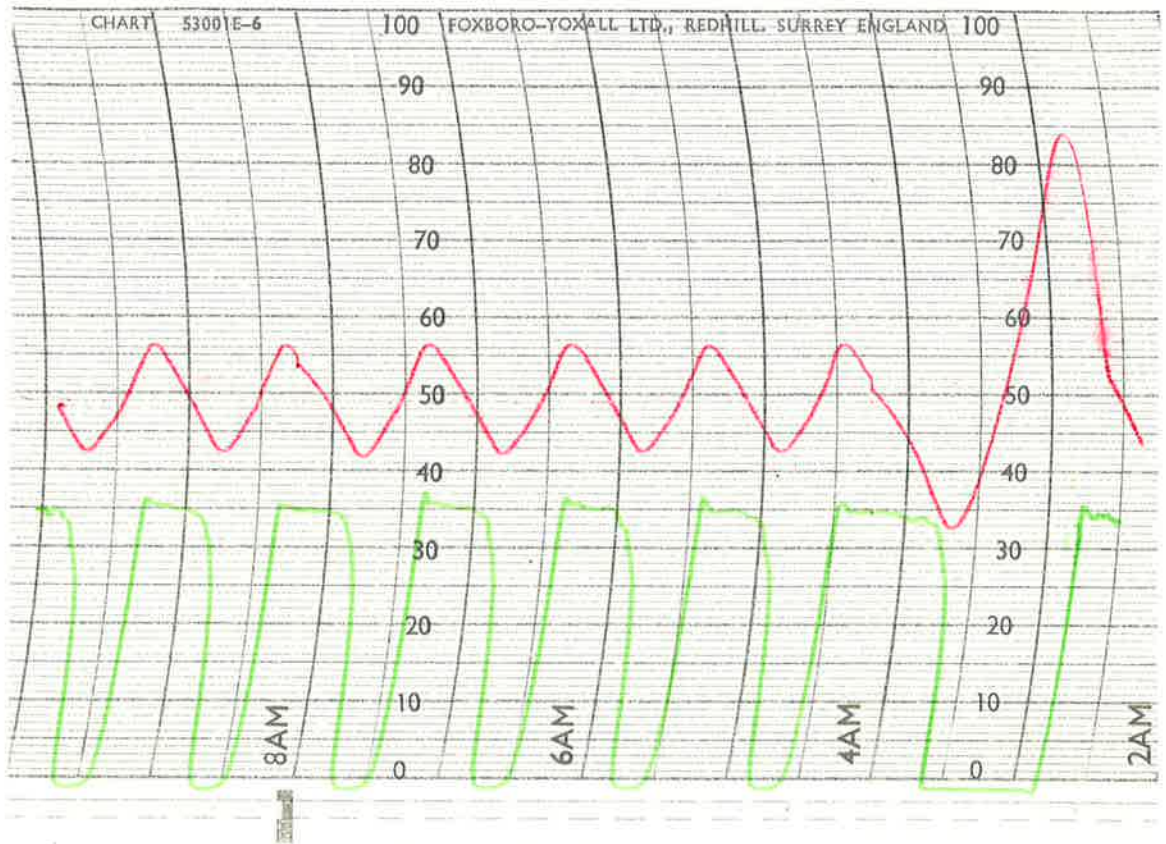


JÄMFÖRANDE SIMULERING, $T_S = 47 \text{ s}$



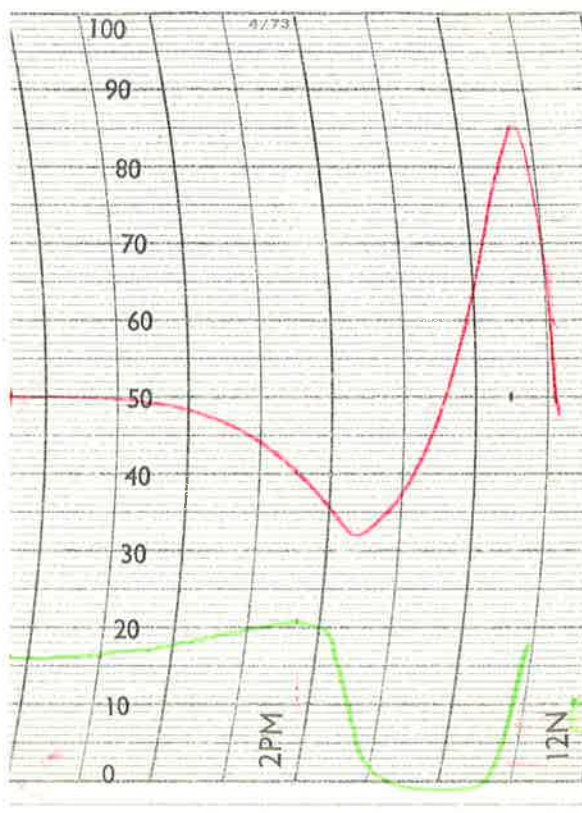
$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}, k=20, T_I=0.06, T_S = \infty$$

Diagram 4.4.8⁶²



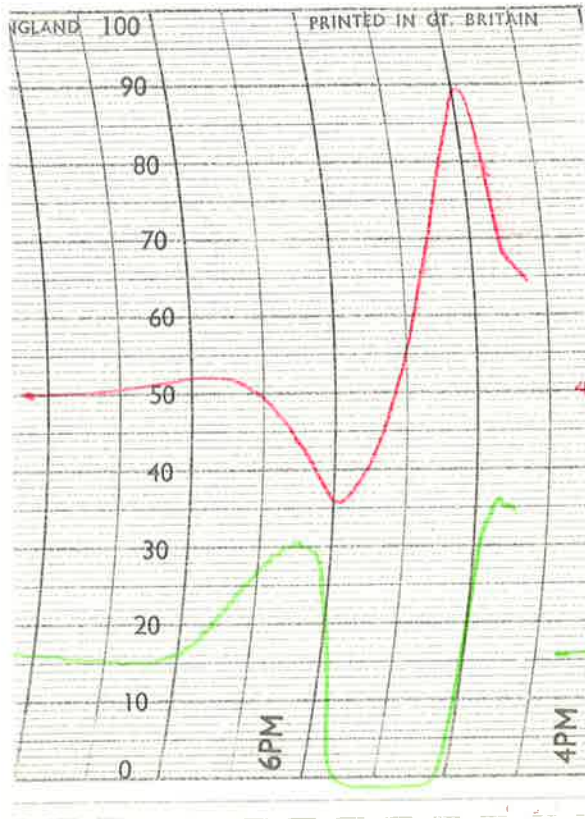
$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad k = 100, \quad T_I = 0.33, \quad T_S = 71.5$$

Diagram 4.4.9

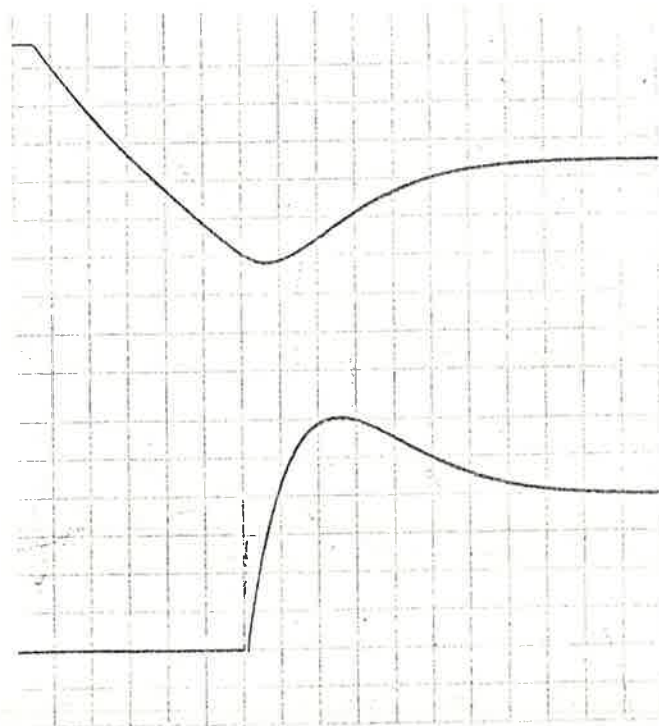


$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $K = 50$, $T_I = 0.20$, $T_S = 73 s$

Diagram 4.4.10

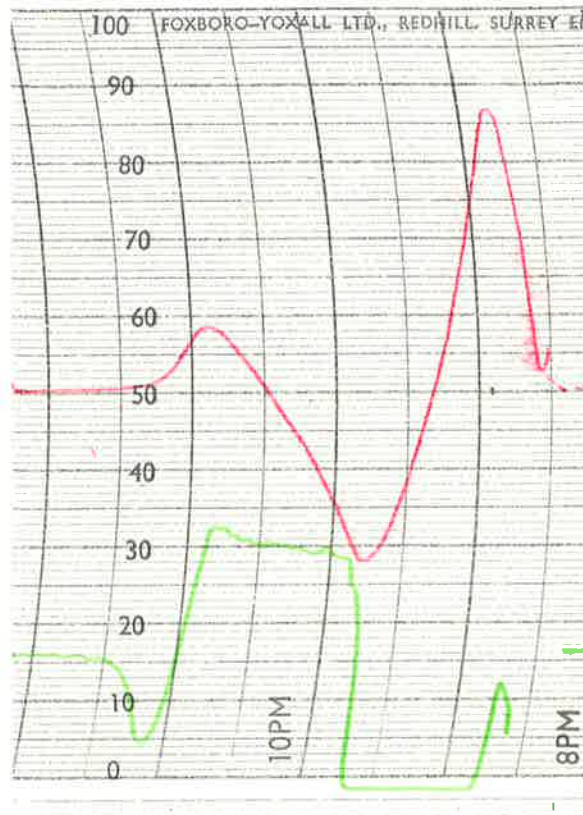


JÄMFÖRANDE SIMULERING, $T_S = 54 s$

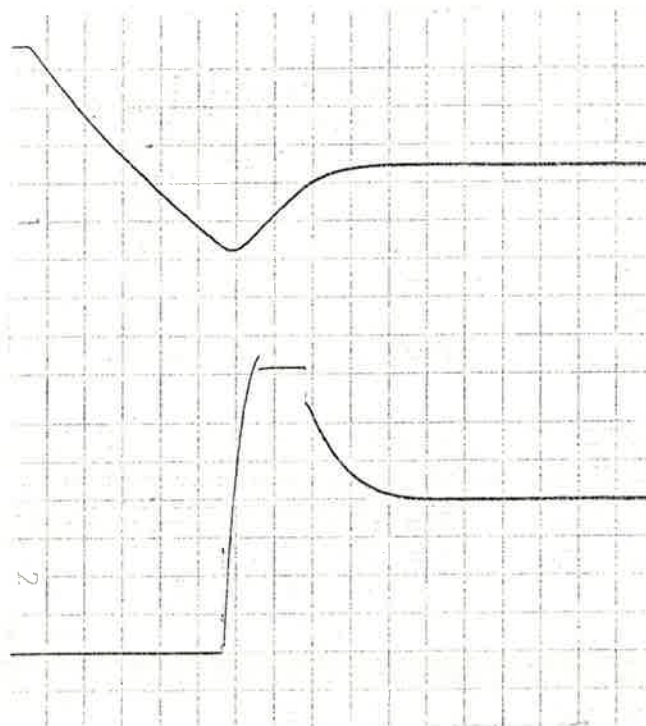


$\xi = \frac{2}{\sqrt{5}}$, $k=25$, $T_I = 0.11$, $T_S = 72$ s

Diagram 4.4.11

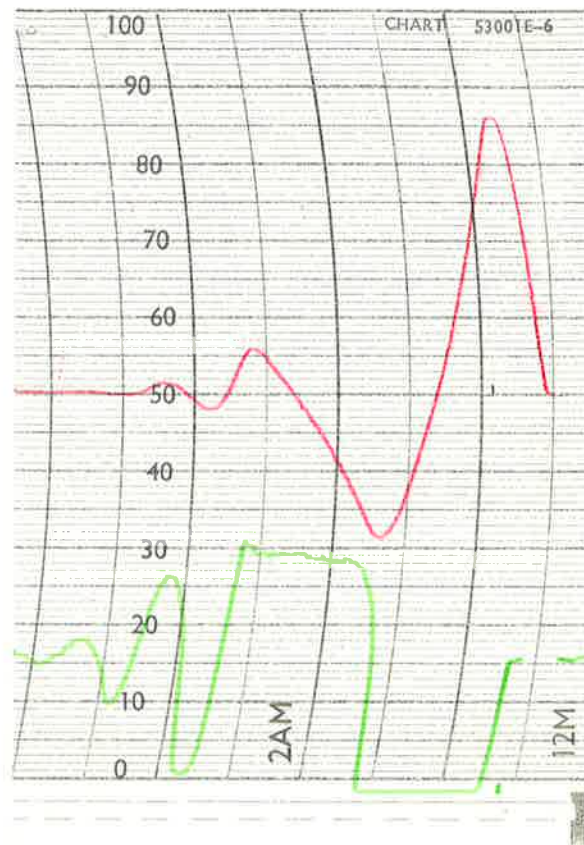
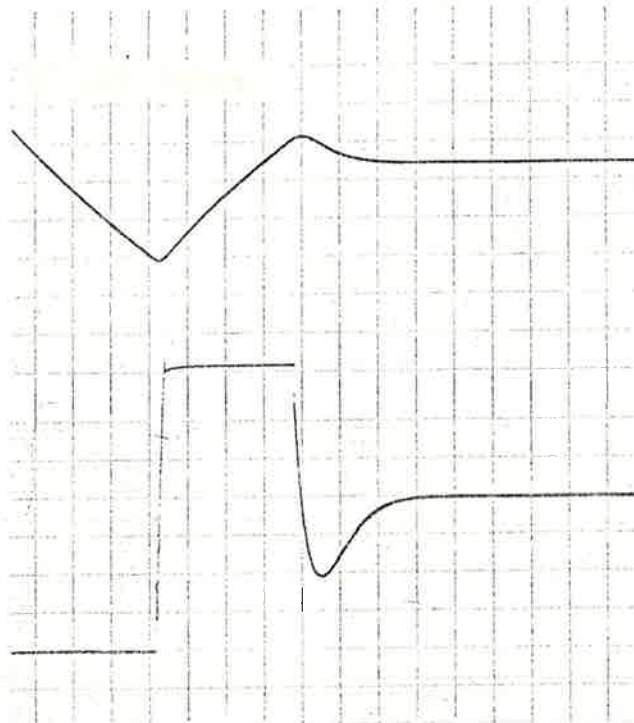


JÄMFÖRANDE SIMULERING, $T_S = 34$ s



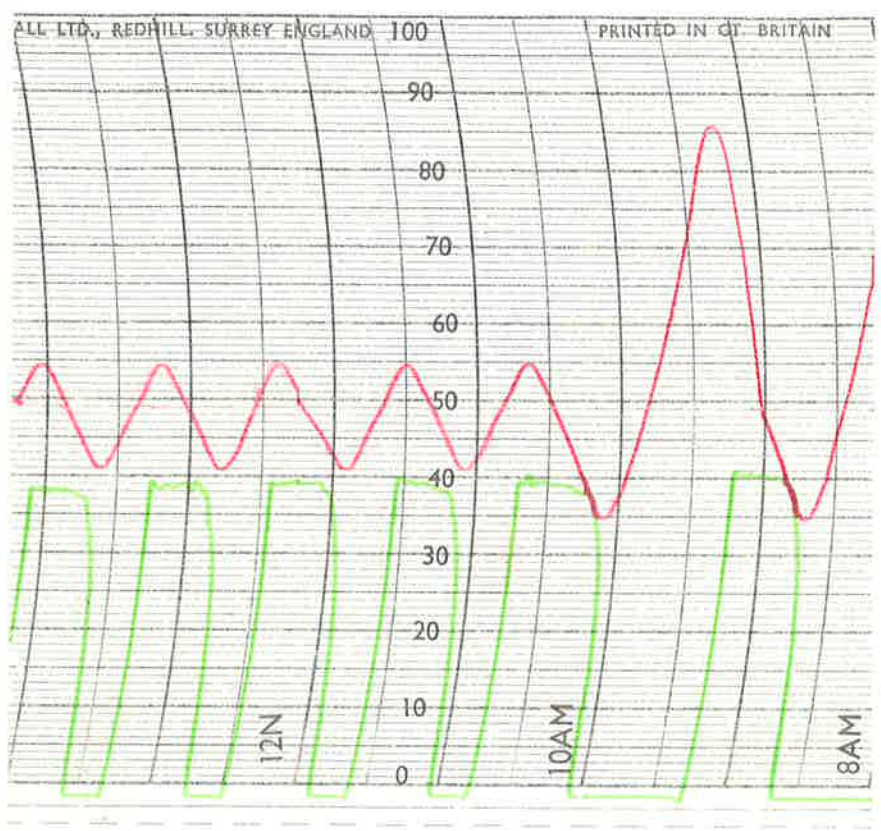
$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1+4k^2}}, \quad k=15, \quad T_I = 0.07, \quad T_S = 71 \text{ s}$$

Diagram 4.4.12

JÄMFÖRANDE SIMULERING, $T_S = 47 \text{ s}$ 

$\xi = \frac{2}{\sqrt{5}}$, $K = 7$, $T_I = 0.03$, $T_S = \infty$

Diagram H.H.13



De bästa kurvorna enl. diagram 4.4.7, 10, 11, 12 har alltså en lösningstid av storleksordningen 70s, något som empiriskt kraftigt kan förbättras. Diagram 4.4.14 visar det bästa resultat som uppnåtts. En lösningstid på 32 s har alltså erhållits. Enligt den linjära modellen skulle vi här ha ett ξ -värde på 4, d.v.s. reella rötter för den kar.ekv. Att den linjära modellen ger ett felaktigt resultat framgår av att återgången faktiskt är oscillativ. Kurva från simulering visas också. På motsvarande sätt framgår kurvan för den bästa regleringen på analogmaskin av diagram 4.4.15. Detta svarar alltså mot den bästa regleringen på den linjära modellen, modifierad med begränsningar för inflödet. Återigen kan vi tala om ett oegentligt ξ -värde (1.3) som skulle gett reella rötter. Den experimentella kurvan för samma k- och T_I -värden ges som jämförelse.

4.5. Reglering av nivån i mellantanken.

Systemet med två tankar är sammansatt av två delsystem, se fig. 4.5.1.

$$G_1(s) = \frac{1}{1 + sT}$$

$$G_2(s) = \frac{T/A}{1 + sT}$$

För regleruppgiften användes en P-regulator och en PID-regulator.

$$G_P(s) = \frac{-100}{k_p}$$

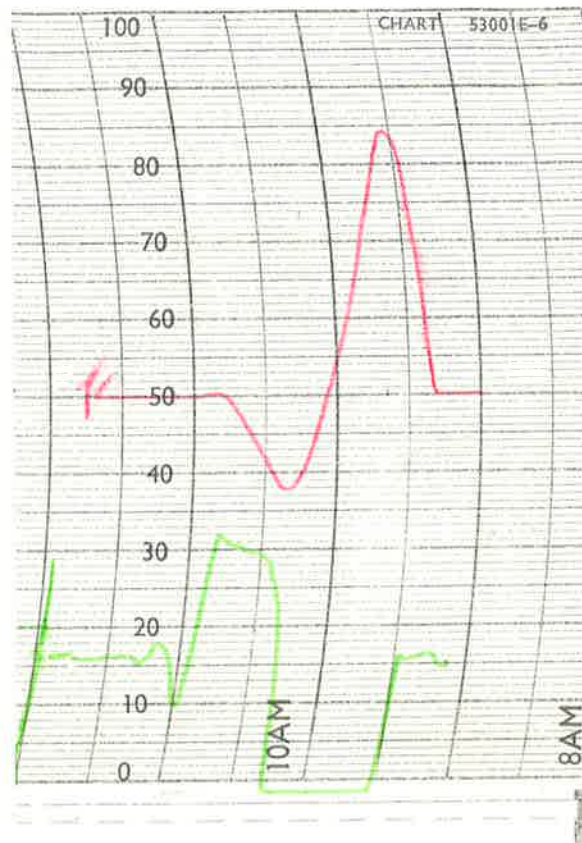
$$G_{PID}(s) = \frac{-100}{k} \left(1 + \frac{1}{60T_I s} + 60T_D s \right)$$

Blockschema visas i fig. 4.5.3.

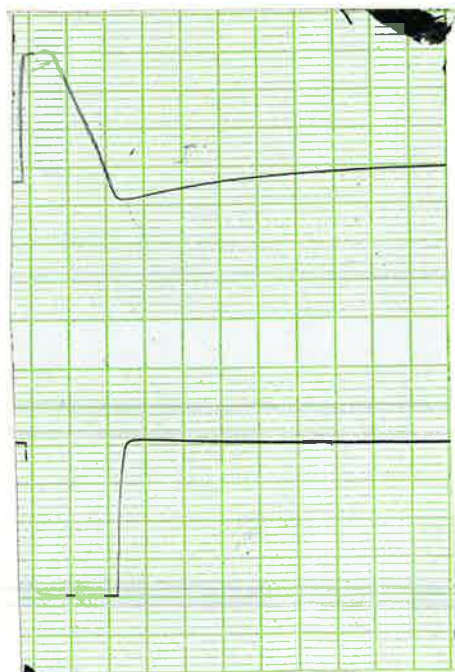
BÄSTA RESULTAT PÅ PROCESSEN

Diagram 4.4.14

$$K=7, T_I=0.6, T_S=32 \text{ s}$$



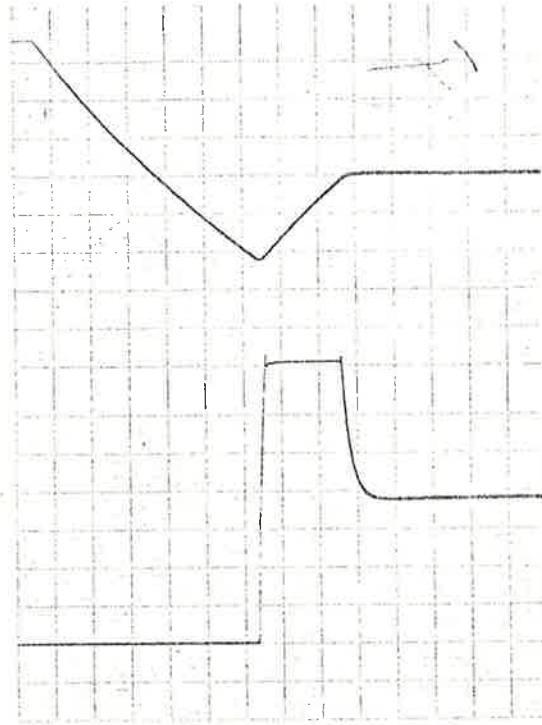
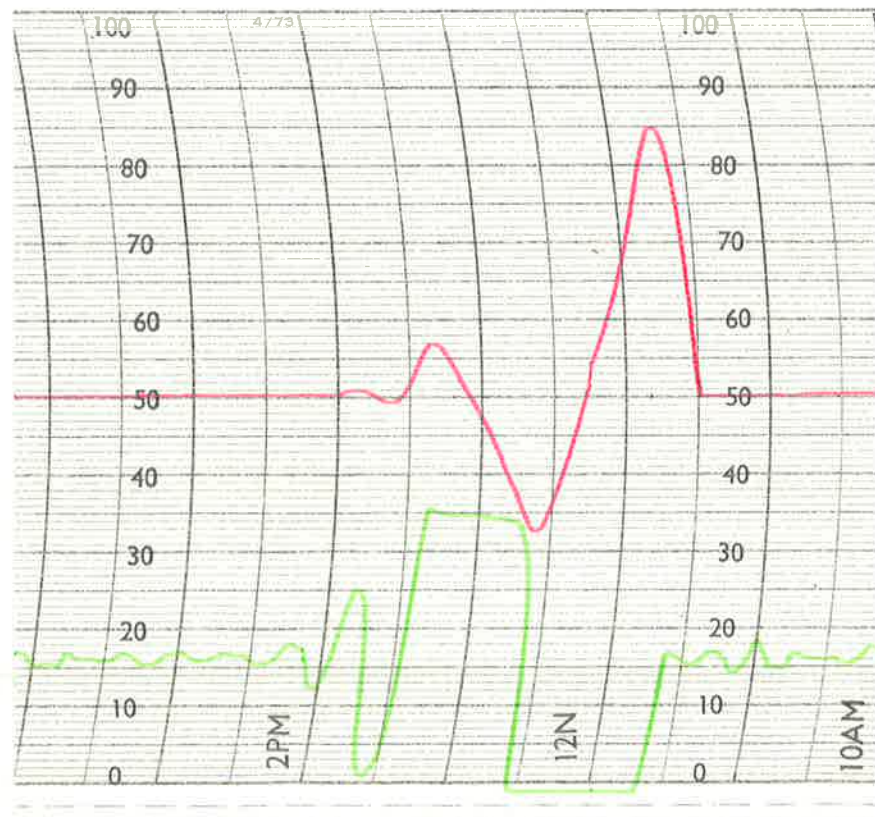
JÄMFÖRANDE SIMULERING, $T_S = 42 \text{ s}$



BÄSTA RESULTAT PÅ ANALOGIMASKIN

Diagram 4.4.15

$$K=10, T_I=0.1, T_S=32\text{ s}$$

JÄMFÖRANDE EXPERIMENT, $T_S = 51\text{ s}$ 

Insignaler är $h_0 = 21,5$ cm

$$h_B = 50 \text{ skaldelar}$$

$$u_{r0} = 75 \text{ skaldelar}$$

$$q_0 = 19 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Utsignal är h_2^* . Stationärt värde: $h_2^* = 50$ skaldelar.

Störning är $V \text{ cm}^3/\text{s}$ i flödet till tank 2.

$$h_1 = \text{nivå i tank 1}$$

$$h_2 = \text{nivå i tank 2}$$

$$k_0 = 2,54 \text{ skaldel/cm}$$

$$k_1 = 0,86 \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{skaldel}$$

Inverkan av störningen kan undersökas genom att sätta alla insignaler $\equiv 0$, ty systemet är linjärt tidsinvariant. Detta medför att vi kan förenkla blockschemat. Se fig. 4.5.2. Vi analyserar nu systemet med avseende på störningen V . För enkelhetss skull sätt $k_p = \infty$ vilket medför endast PID-reglering.

a) Kretsöverföring för systemet utan regulator.

$$G_0(s) = k_0 k_1 G_1(s) G_2(s) = k_0 k_1 \frac{T/A}{(1+sT)^2} = \frac{4,79}{\left(1 + s \frac{1}{0,0233}\right)^2}$$

$G_0(s)$ finns visad i Bode-diagram 4.5.1.



Fig 4.5.1

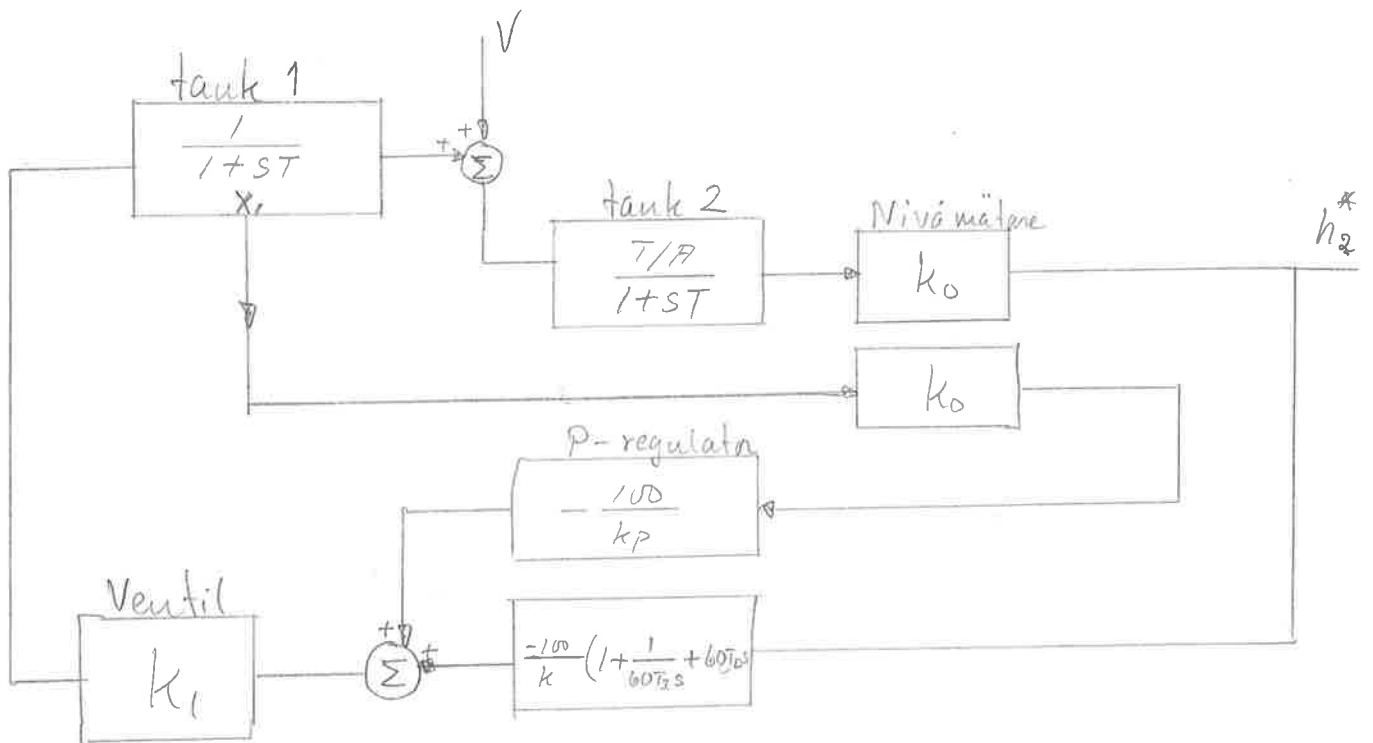
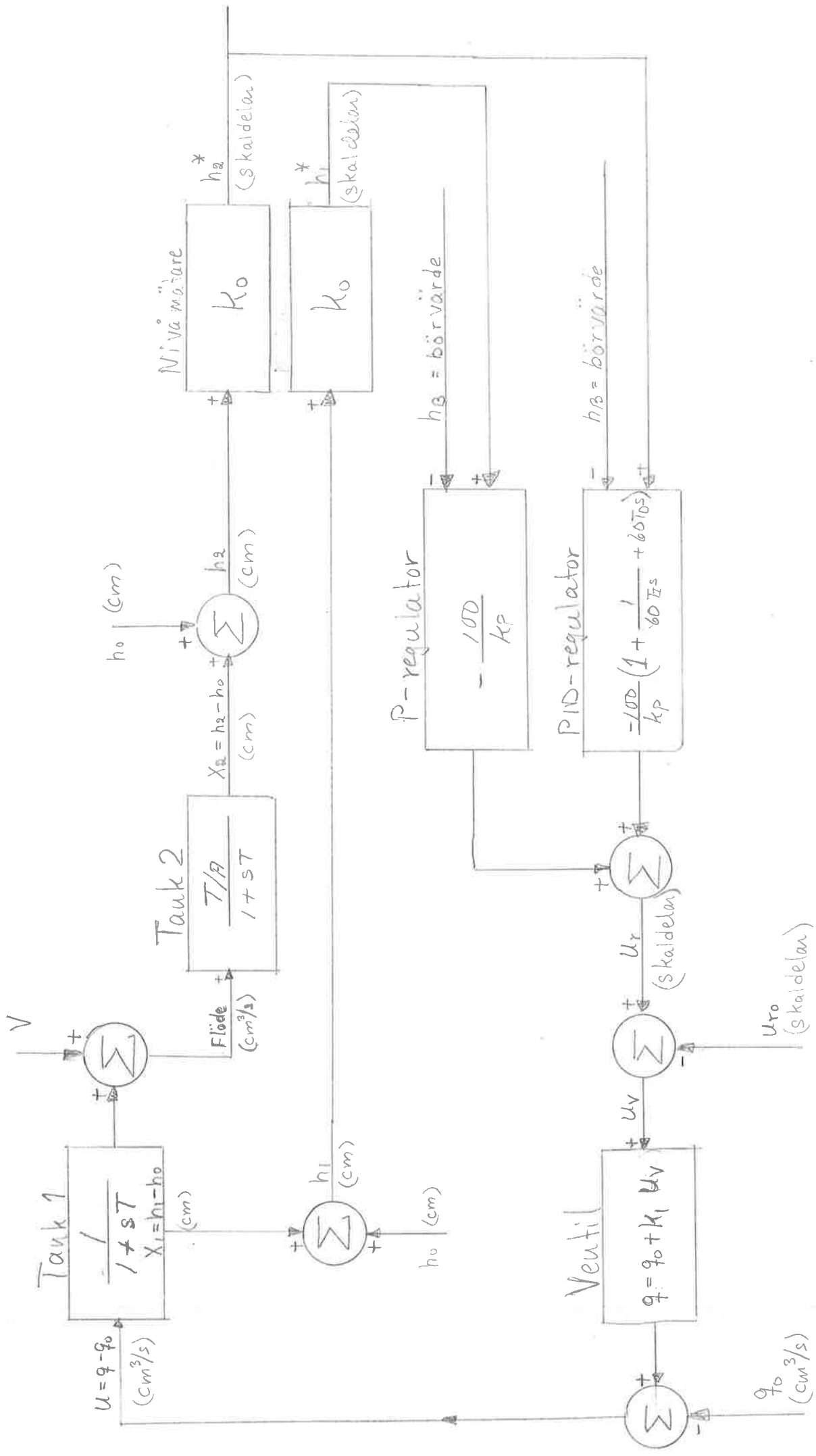


Fig 4.5.2

Fig 4.5.3



b) Kretsöverföring med regulator: $k=60$, $T_I=1,5$, $T_D=0,1$.

Kretsöverföringen blir

$$\begin{aligned}
 G_0(s) &= G_{\text{PID}} k_1 G_1 G_2 k_0 = \frac{100}{k} \left(1 + \frac{1}{60 T_I s} + 60 T_D s \right) k_1 \cdot \\
 &\quad \cdot \frac{T/A}{(1+sT)^2} k_0 = (\text{efter insatta värden}) = \\
 &= \frac{\left(\frac{1}{0,0119709} s + 1 \right) \left(\frac{1}{0,154696} s + 1 \right) 0,0887463}{s \left(1 + s \frac{1}{0,0233} \right)^2}
 \end{aligned}$$

$G_0(s)$ visas i Bode-diagram 4.5.2. Vi ser då att med regulator erhålles en stor förstärkning för låga frekvenser vilket medför att stationära fel integreras bort.

För att kunna analysera och dimensionera slutna system måste vi undersöka störningens inverkan. Vi tar alltså fram överföringsfunktionen mellan V och h_2^* .

c) Utan regulator.

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{h_2^*(s)}{V(s)} = \frac{k_0 G_2}{1 + k_0 k_1 G_1 G_2} = \\
 &= \frac{\frac{T}{A} k_0}{(1+sT) \left(1 + \frac{T/A}{(1+sT)^2} k_1 k_0 \right)} = (\text{efter insatta värden}) \\
 &= \frac{0,962(1+43s)}{\left(\frac{s}{0,056} \right)^2 + 2 \cdot 0,415 \frac{s}{0,056} + 1}
 \end{aligned}$$

$G(s)$ visas i Bode-diagram 4.5.3.

Resonanstopp $M_p = 3.16$

d) Med regulator: $k=60$, $T_I=1,5$ min, $T_D=0,1$ min.

$$G(s) = \frac{h_2^*}{V} = \frac{G_2 k_0}{1 - G_{PID} G_1 G_2 k_1 k_0} =$$

$$= \frac{\frac{T}{A} k_0}{(1+sT) \left(1 + \frac{100}{k} \left(1 + \frac{1}{60T_I s} + 60T_D s \right) \frac{T/A}{(1+sT)^2} k_1 k_0 \right)}$$

= (efter insatta värden) =

$$= \frac{60,1s \left(1 + s \frac{1}{0,0233} \right)}{\left(1 + s \frac{1}{0,0115} \right) \left(\frac{s^2}{0,0662} + 10,41s + 1 \right)}$$

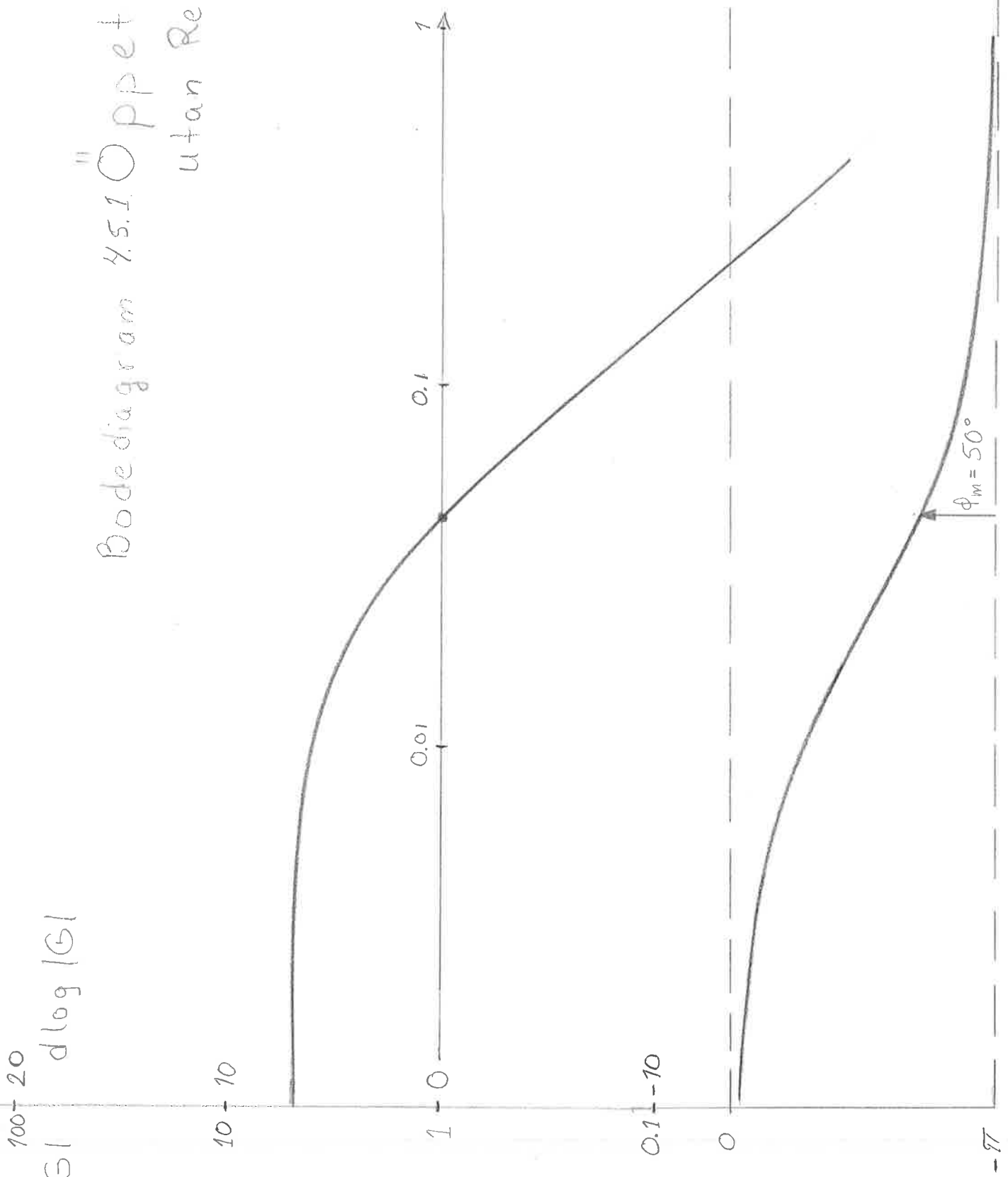
$G(s)$ visas i Bode-diagram 4.5.4.

Resonanstopp $M_p = 3.16$

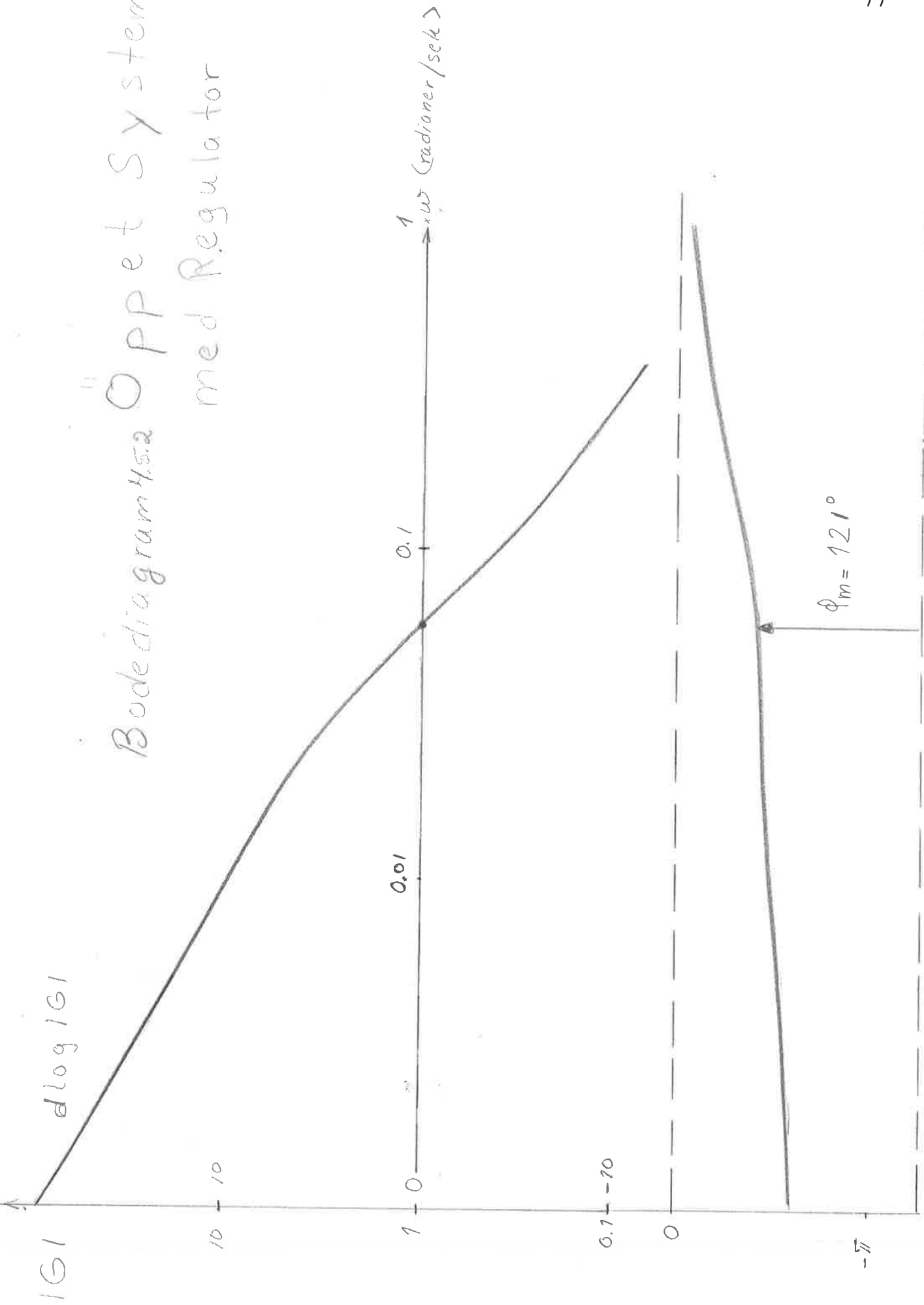
Bode diagram 4.5.1 Oppet System utan Regulator

$|G|$ dlog $|G|$

ω (radianer/sek)



Bodediagram 4.5.2 Öppet System med Regulator



Bodediagram 45.3 Slutet System utan Regulator

$20 \log |G|$

100

10

1

0.1

0

-10

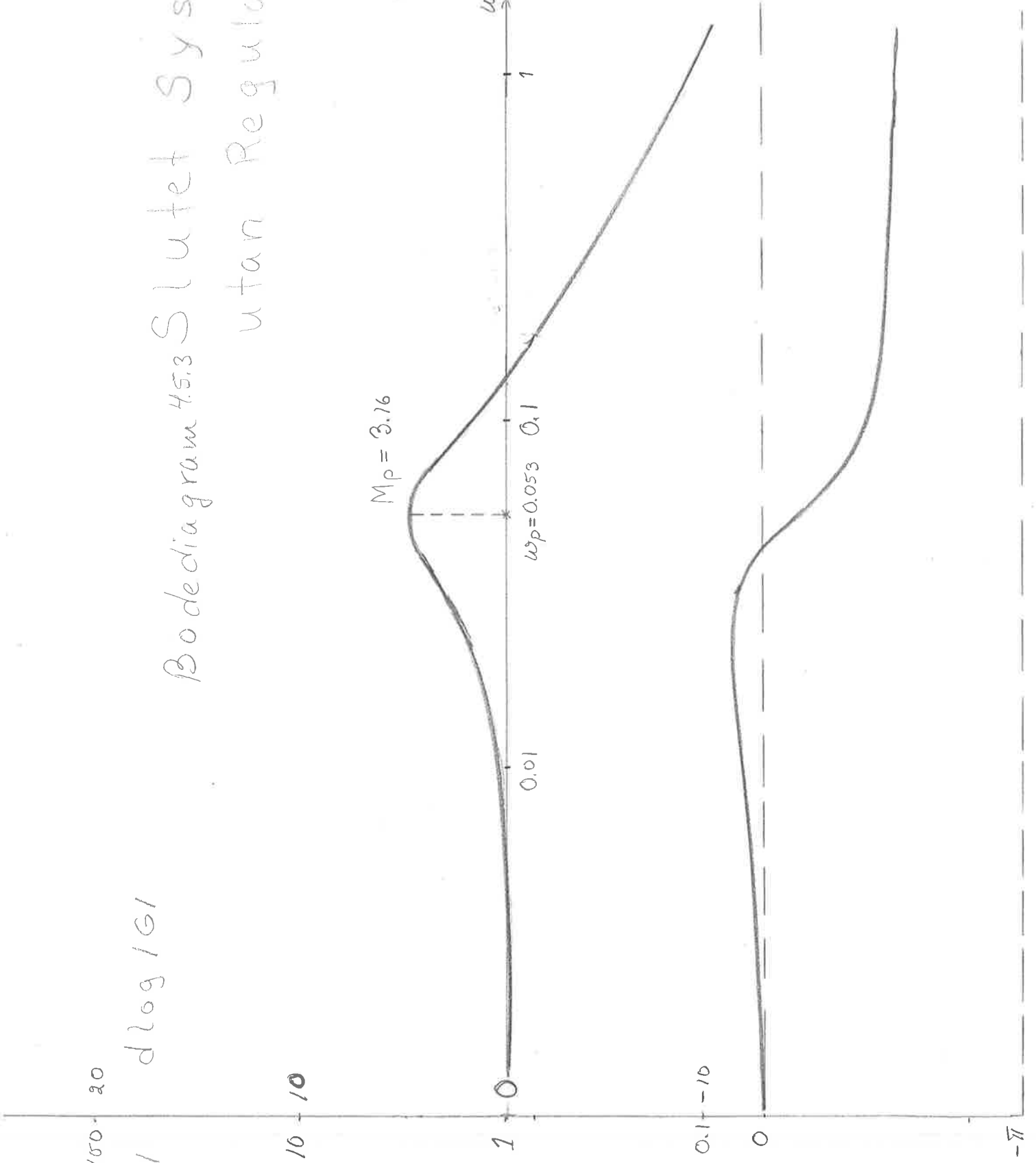
$M_p = 3.16$

0.01

$\omega_p = 0.053$

1

ω (radianer/sek)

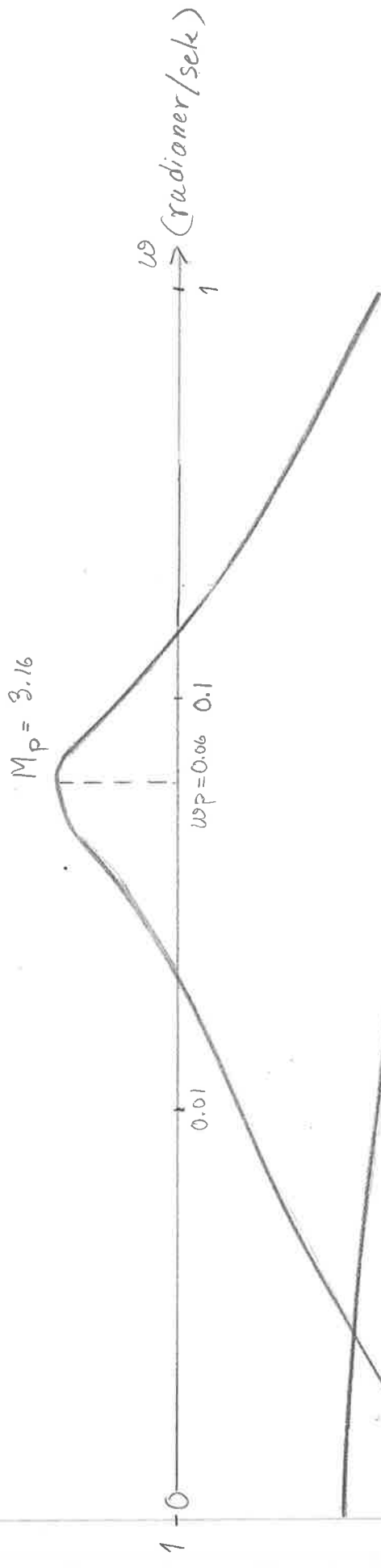


Bodediagram 4.5.4 Slutet System med Regulator

$|G|$ $d \log |G|$

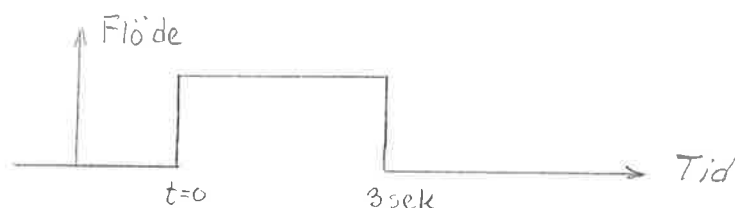
100 - 20

10 - 10



Reglering av processen med en störning.

Vi har kört processen med många olika kombinationer av parametrar. En del resultat visas i figur 4.5.4. Vi har även tagit fram singularitetsdiagram för systemet för att illustrativt kunna se hur kontrollpolerna flyttar sig med olika parameter inställningar. Lösningstiden T_s är den tid processen tar på sig för att svänga in sig mot stationärt värde med avvikelse ± 1 skaldel. Vi ser att övre tanken svänger med större amplitud, vilket är naturligt. Några ord om störningens karaktär. Vi har arbetat med en fix störning som består av en flaska vatten som blir en "låd-funktion" i tiden.



Om vi Laplace-transformerar denna "låda" till s-planet får vi

$$V(s) = \frac{1}{s}(1 - e^{-3s})$$

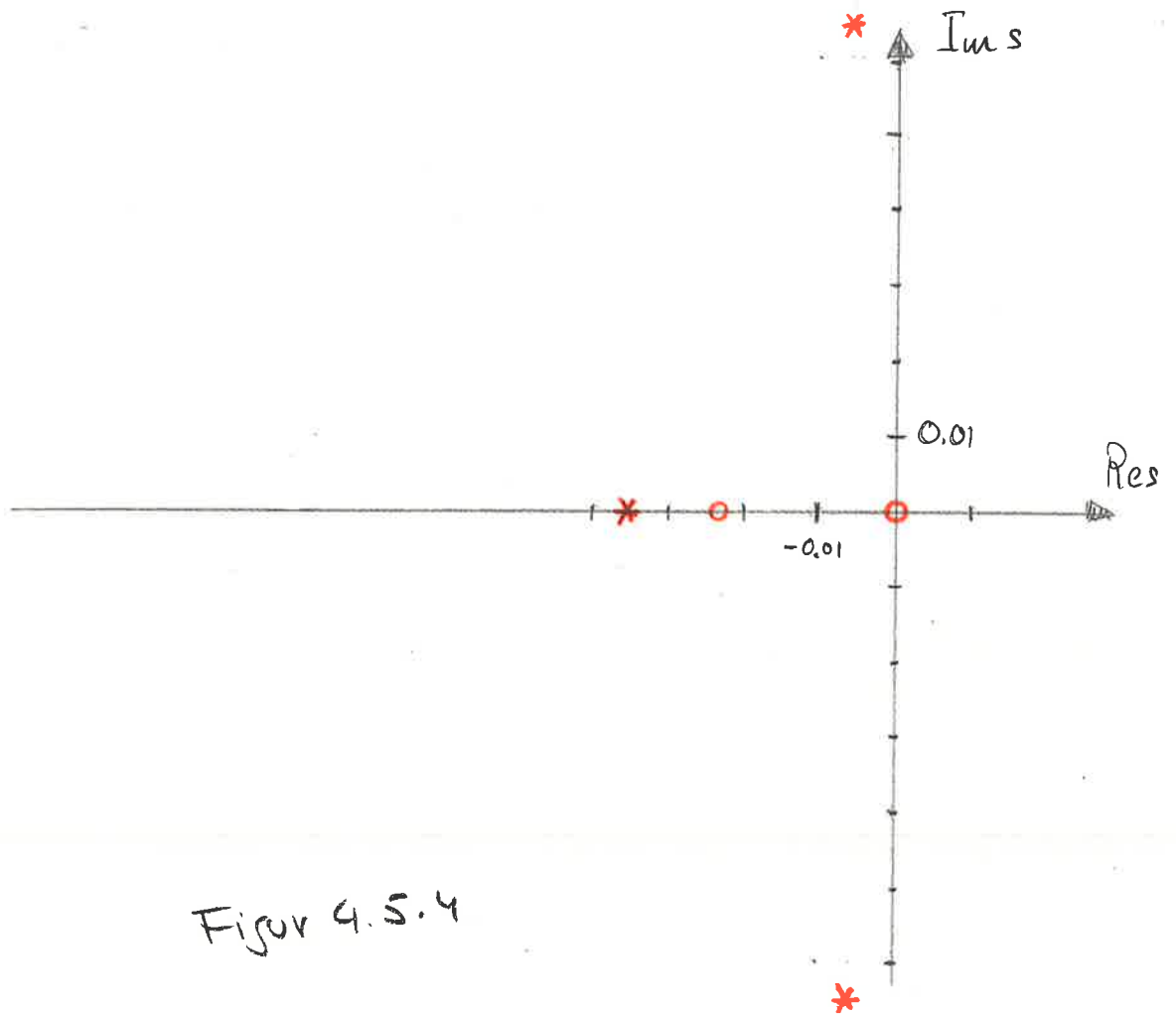
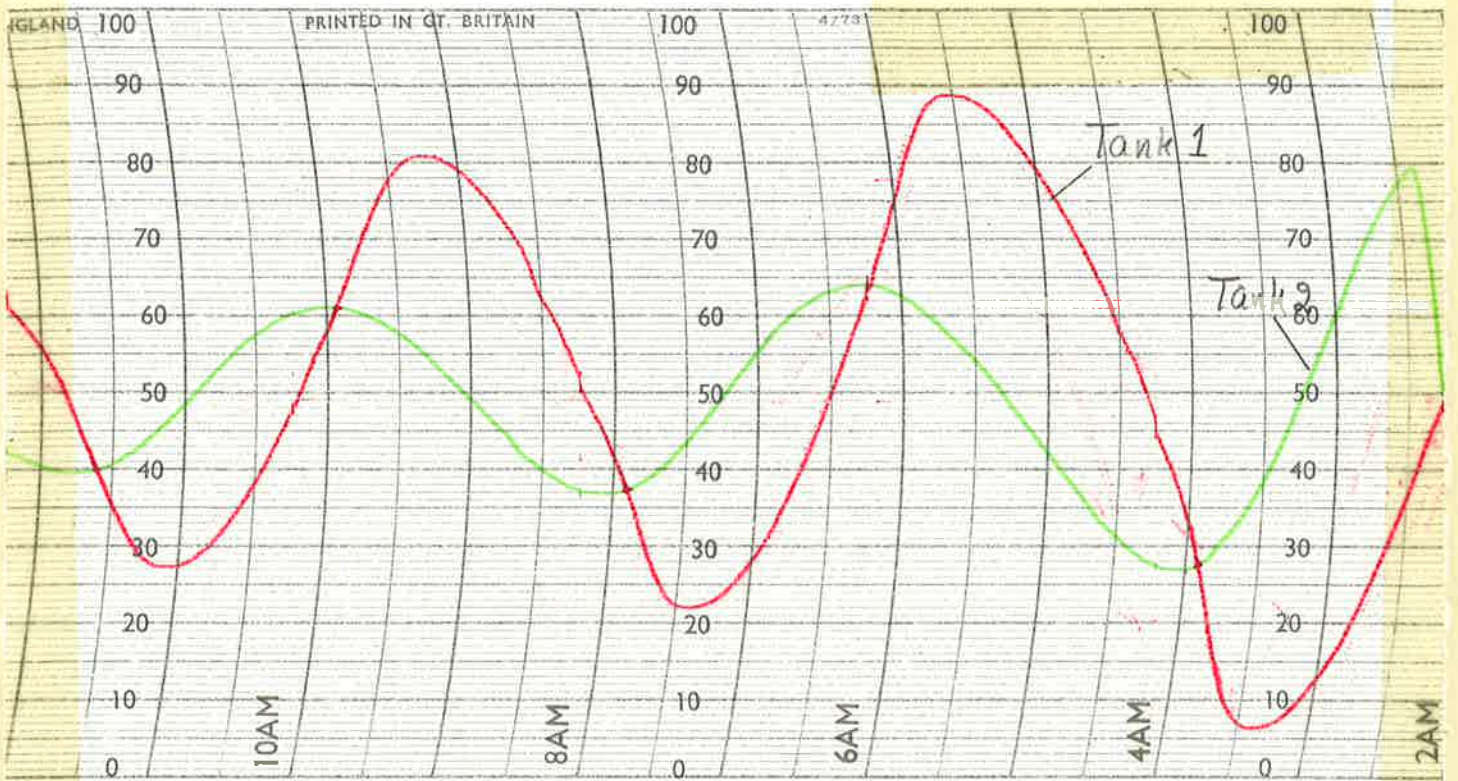
Vi kan dock för att förenkla räkningarna approximera $V(s)$ med en impuls.

Beräkning av poler till slutna systemet med regulator

PID-parametrar	Kar.ekv.	Poler
k, T_I, T_D	$s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3$	$T = \text{svängn. tid}, \xi = \text{dämpning}$
60, 0,45, 0	0,0465 0,00486 0,000160	-0,035, -0,00575±i0,0665 T=94 sek, $\xi=0,086$
60, 0,75, 0	0,0465 0,00486 0,0000959	-0,022, -0,0123±i0,0669 T=92 sek, $\xi=0,181$
60, 1,5, 0	0,0465 0,00486 0,0000479	-0,011, -0,0227±i0,0620 T=101 sek, $\xi=0,376$
60, 1,5, 0,10	0,0724 0,00486 0,0000479	-0,0115, -0,0305±i0,0603 T=104 sek, $\xi=0,451$

PID: 60, 0.45 min, 0 min

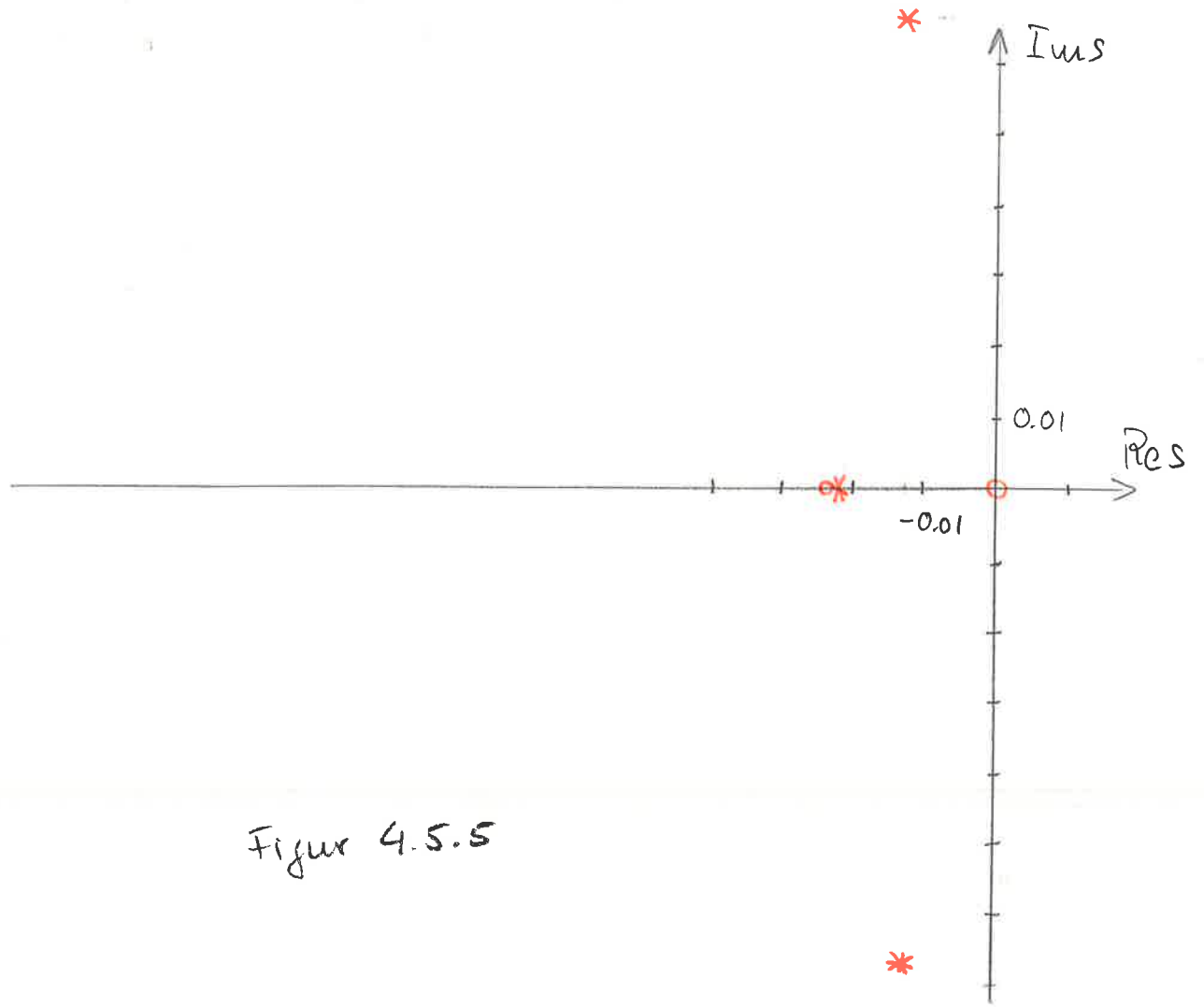
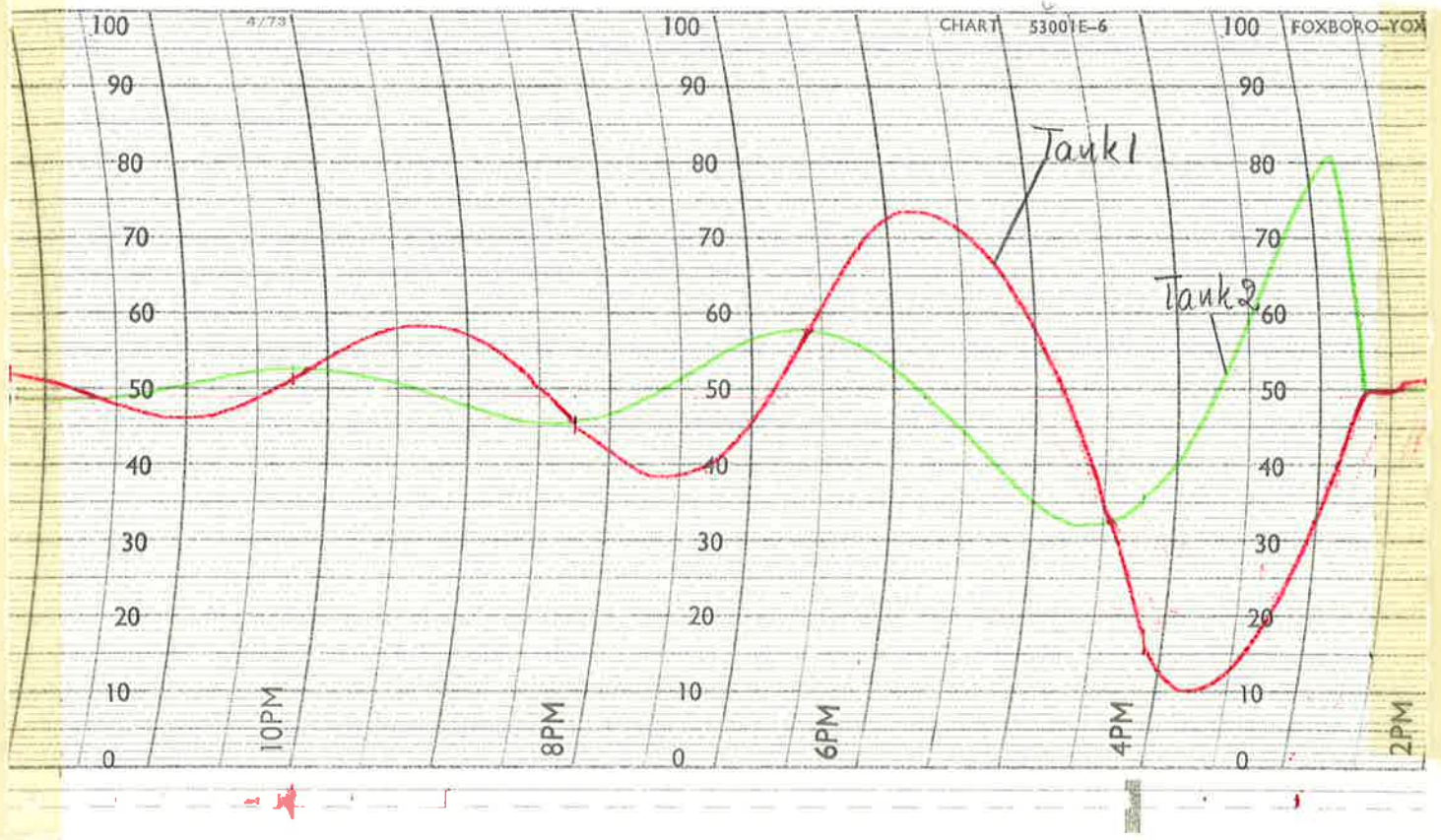
$T_s \gg 200 \text{ sek}$, $\xi \approx 0.086$, 80



Figur 4.5.4

PID: 60, 0.75 min, 0 min

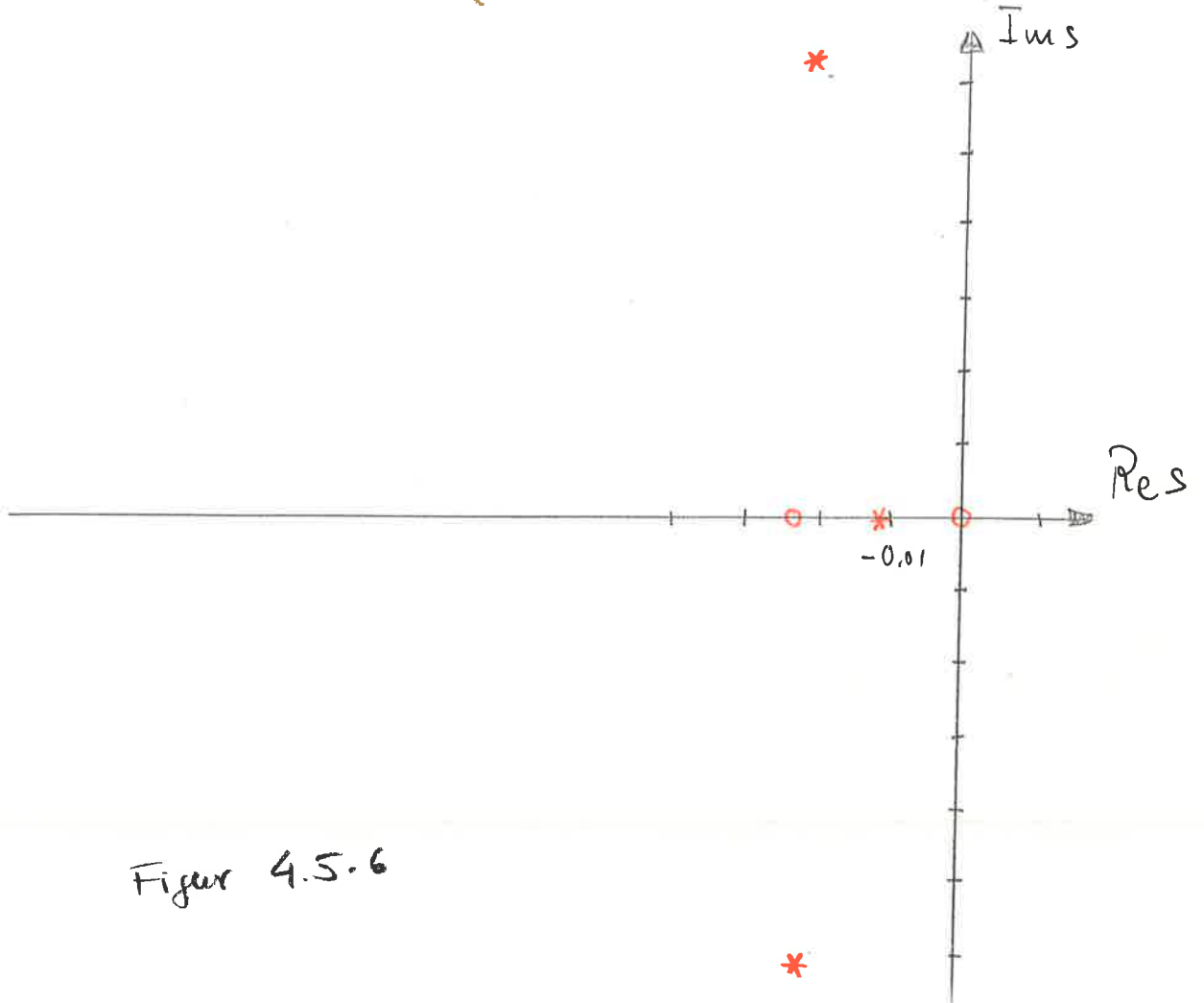
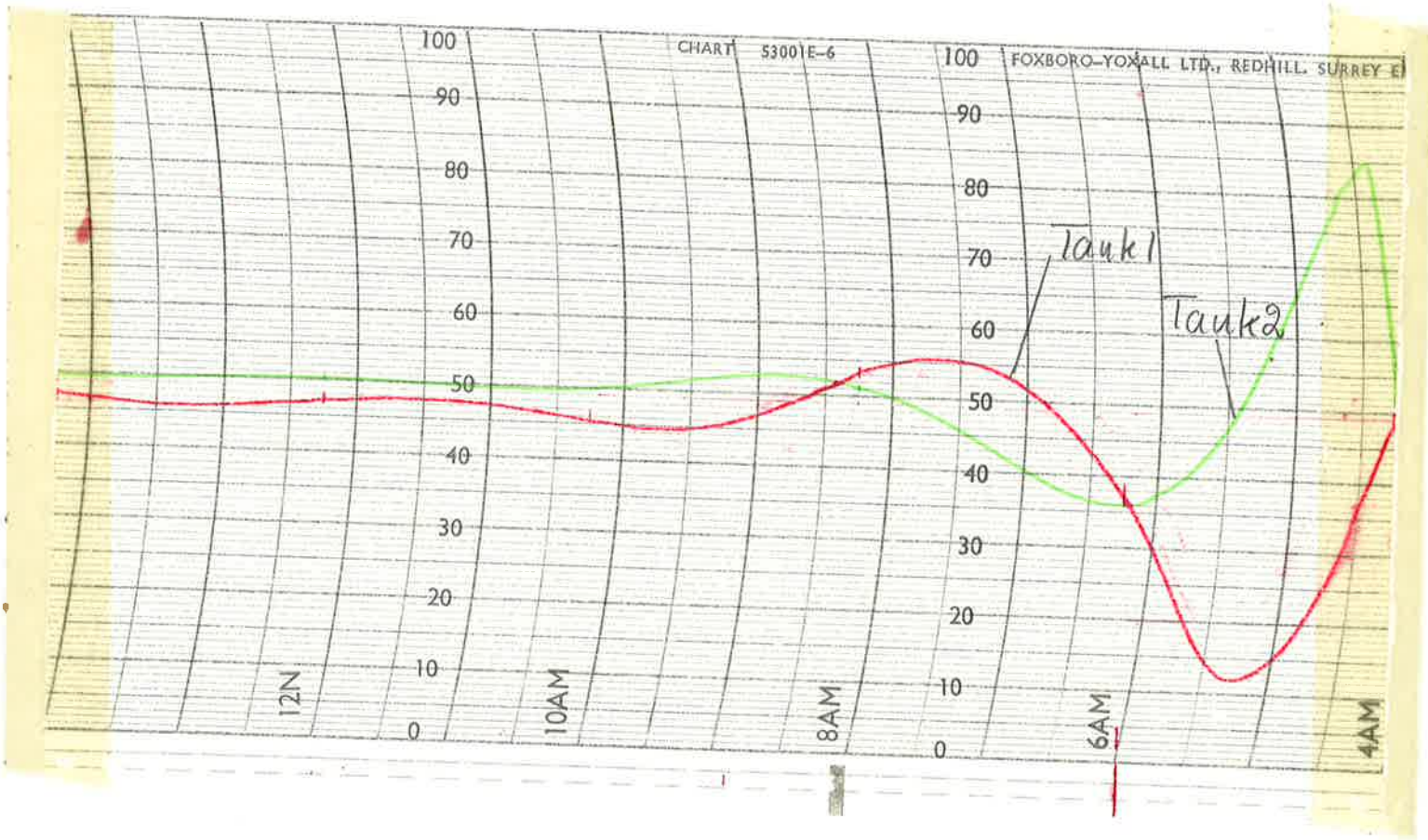
$T_s \approx 300 \text{ sek}$



Figur 4.5.5

PID: 60, 1.5 min, 0 min

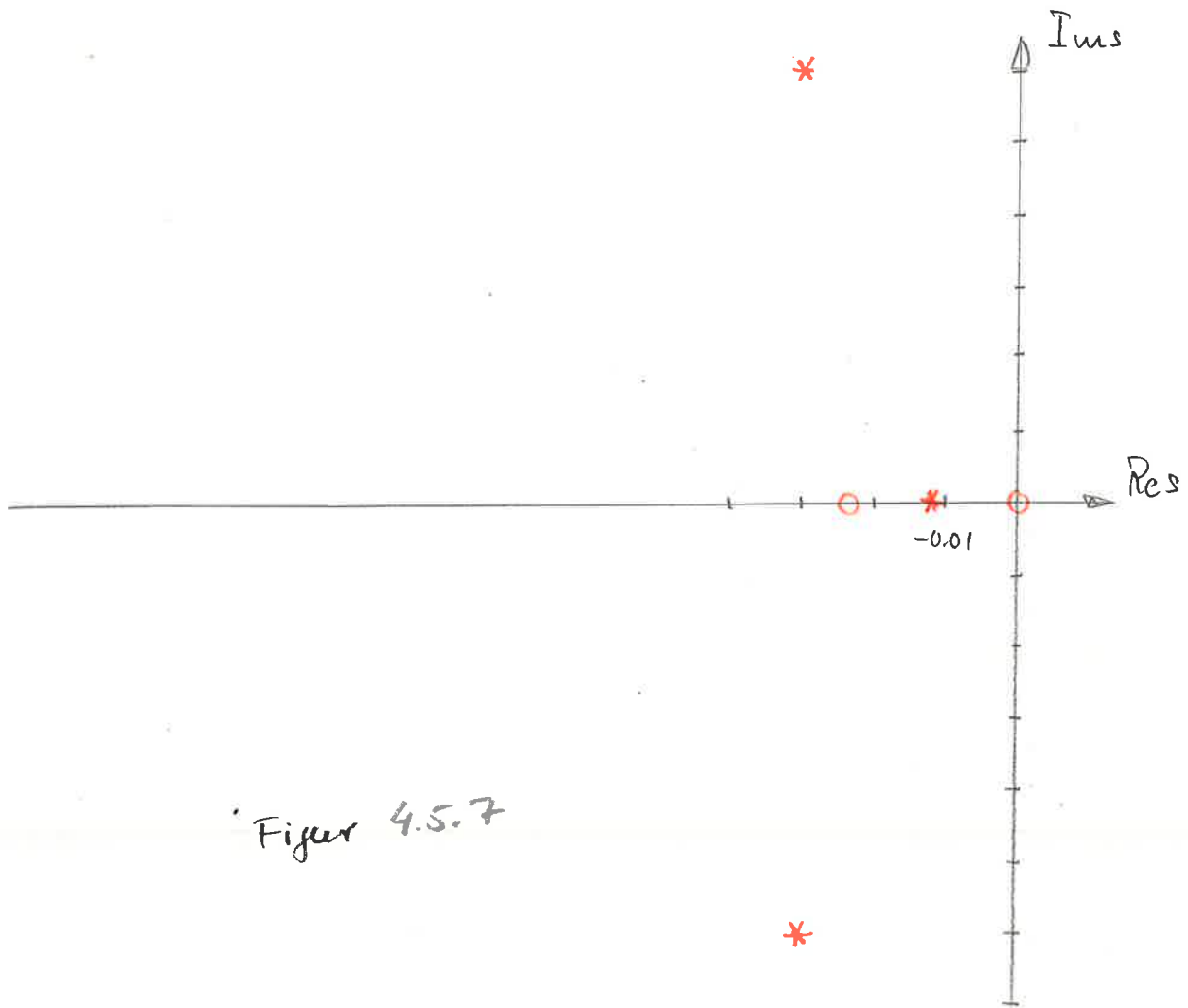
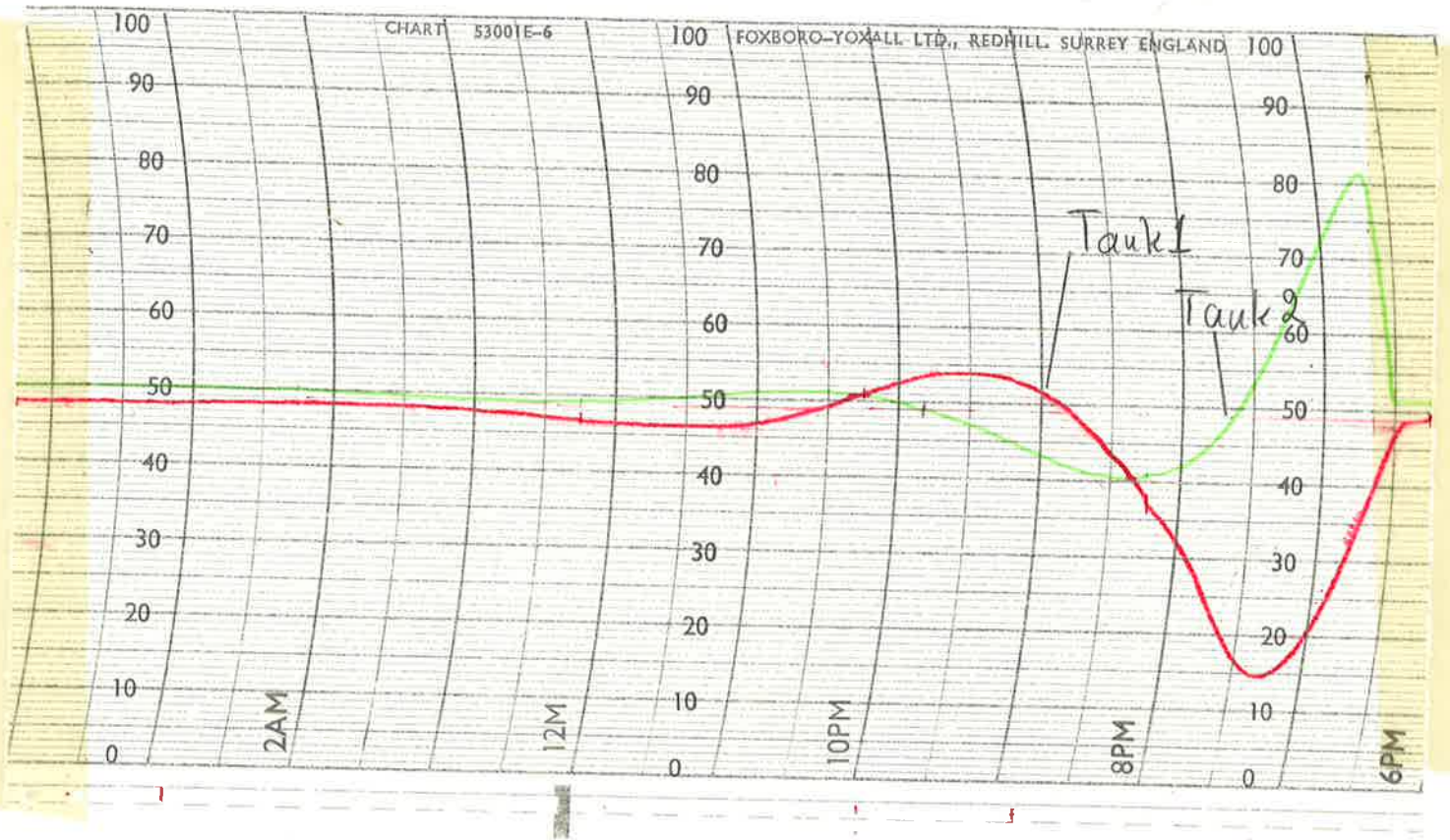
$T_s = 155 \text{ sek}, \zeta = 0.376$



Figur 4.5.6

PID: 60, 1.5 min, 0.10 min

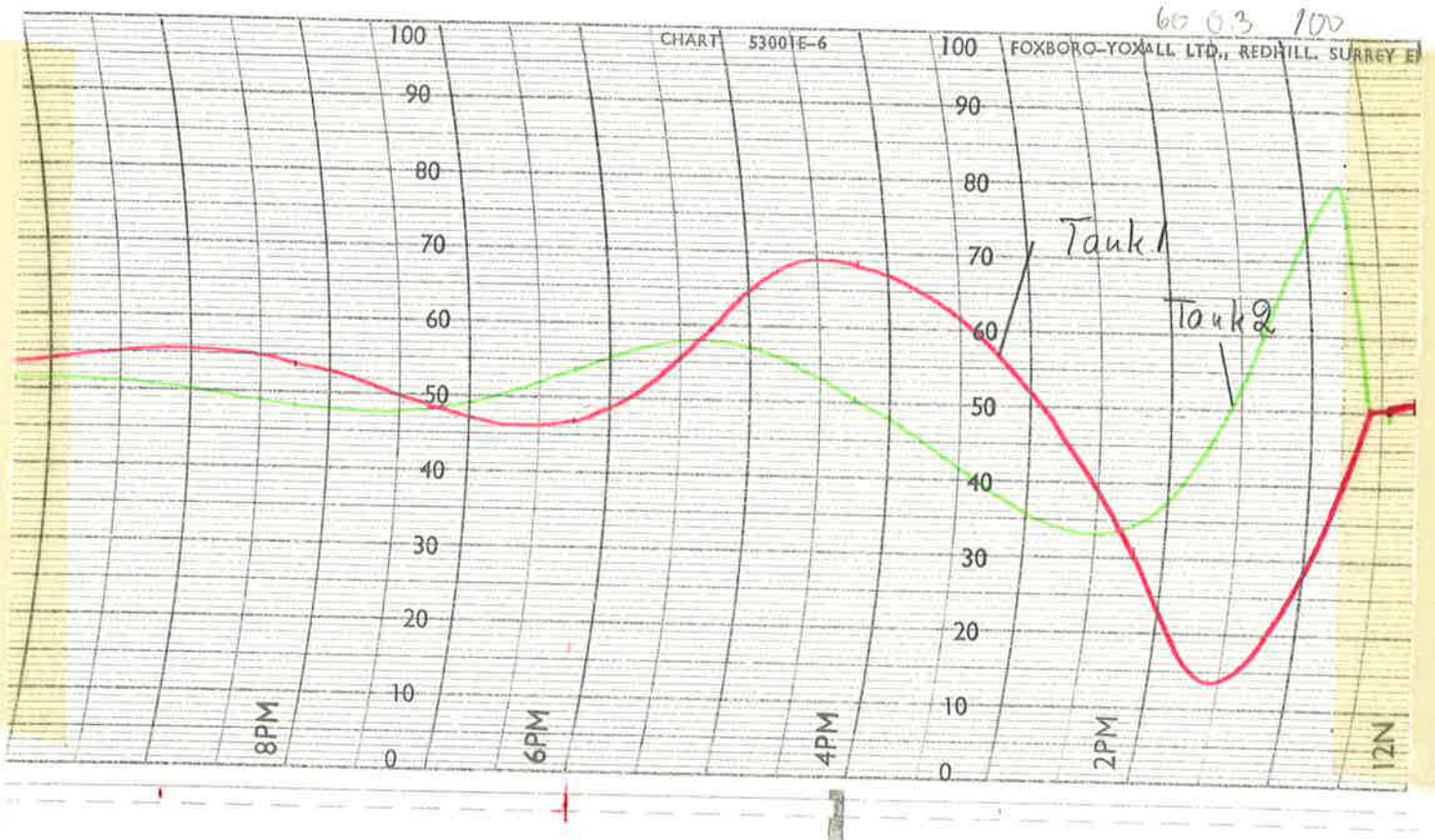
$T_s = 96 \text{ sek}$ $\xi = 0.451$



Figur 4.5.7

P + PID: 100 ; 60, 0.3 min, 0 min

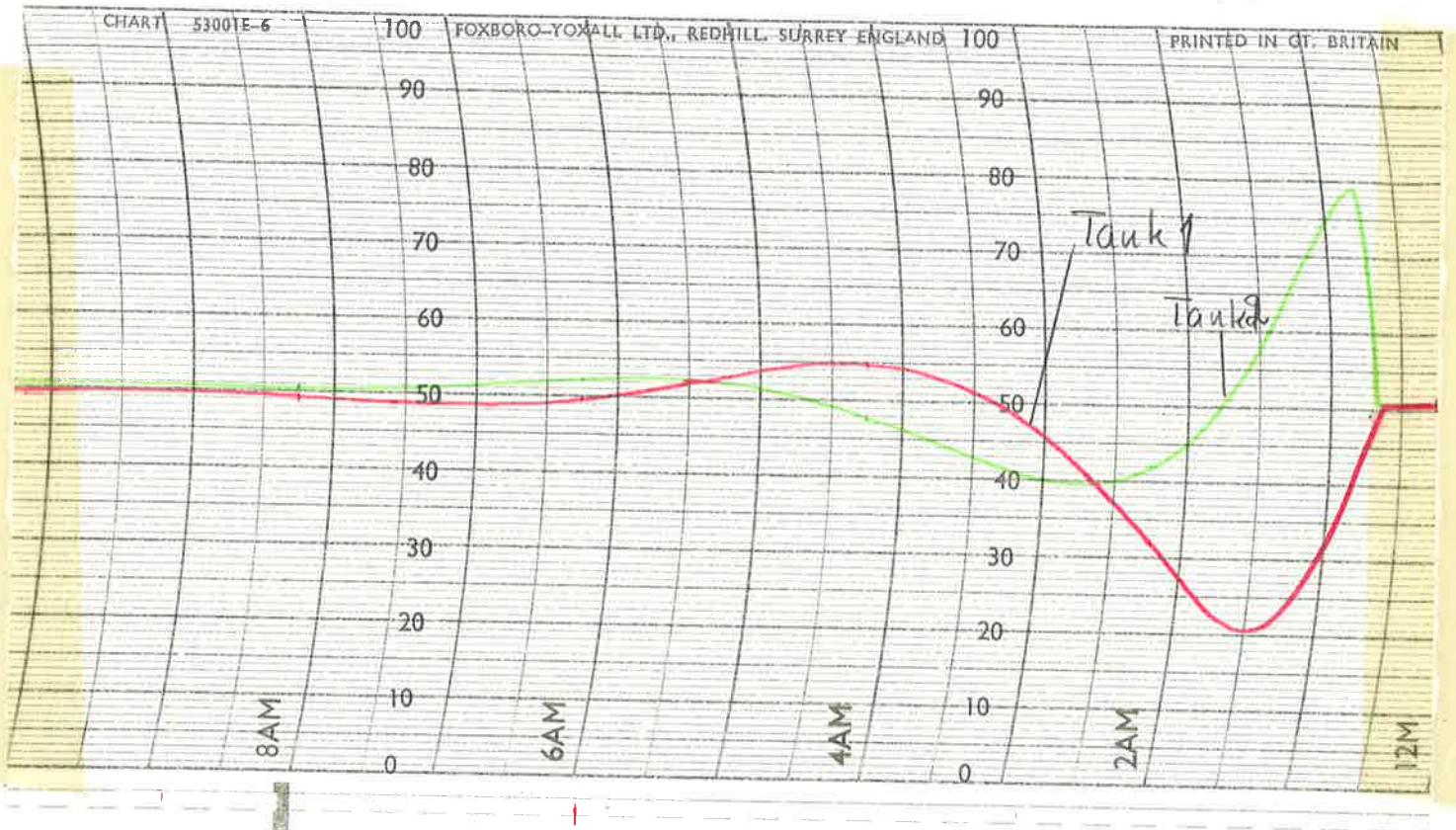
$T_s \approx 300 \text{ sek}$



Figur 4.5-8

P + P10: 100 ; 60, 0.45 min, 0 min

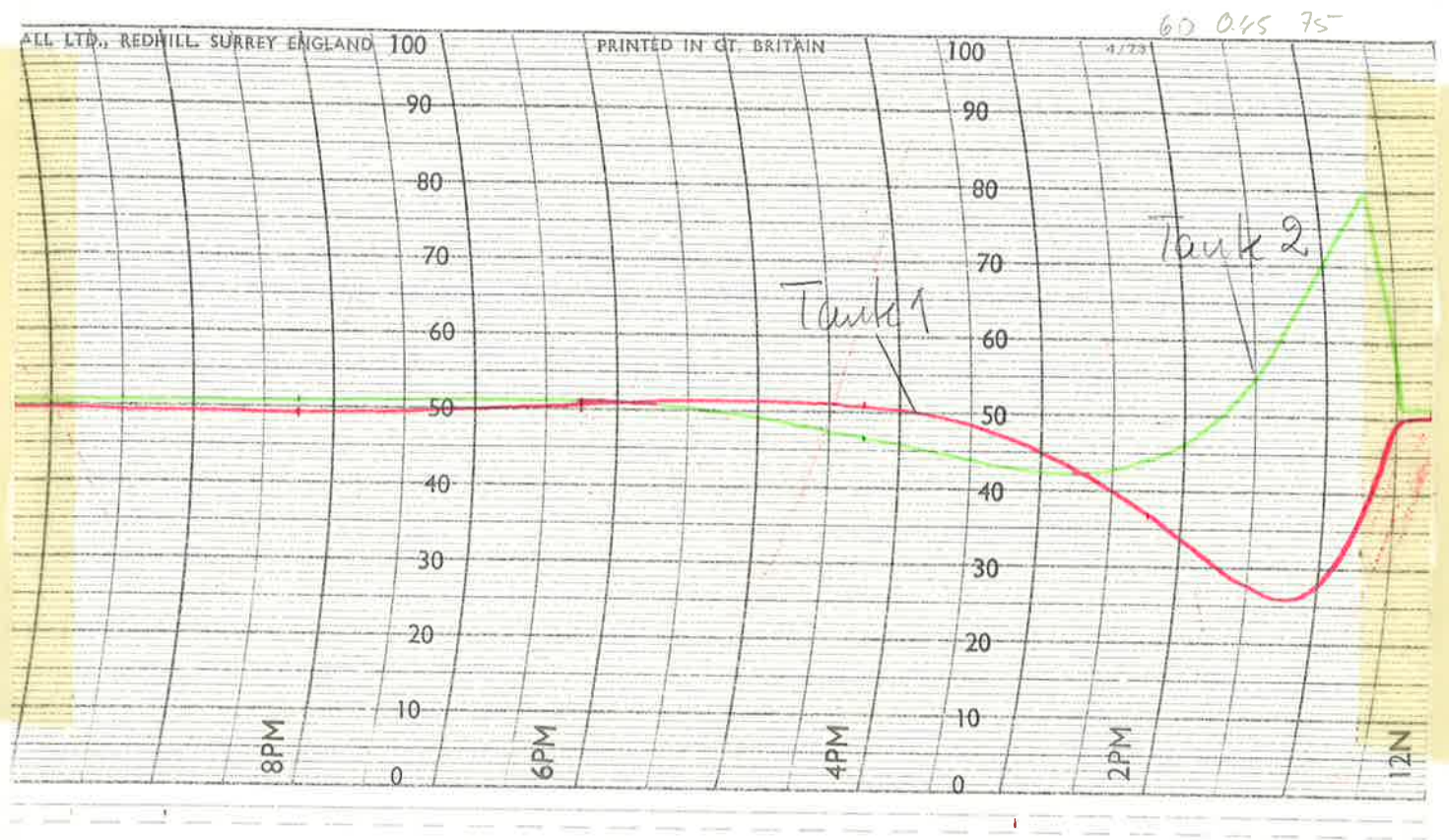
$T_s = 195 \text{ sek}$



Figur 4.5.9

P + PID: 75, 60, 0.45 min, 0 min

$T_s = 130 \text{ sek}$



Figur 4.5.10

Resultat av reglering av mellantanken.

Med en PID-regulator har T_s nedbringats till 96 sek och överslängen är 20 %. Ännu lägre T_s hade erhållits om vi kunde ökat deriveringsdelen i regulatorn, men svängningar i trycksignalen som härrör från uppbromsning mot vattenytan i tank 2 omöjliggjorde detta. Om en P-regulator tillsattes kunde överslängen minskas (spec. tank 1) på bekostnad av ökande T_s .

Optimal reglering har tagits fram på empirisk väg and användandet av två regulatorer ökar antalet parametrar från 3 till 5, vilket gör att sökandet efter optimum blir tidsödande speciellt med tanke på att systemet reagerar långsamt.

För praktiskt bruk av processen måste ju en viktning av egenskapernas stigtid, lösningstid och översläng göras.

4.6. Sammanfattande synpunkter på regleringen.

Det finns uppenbara begränsningar i vår modell:

- i) De olinjära systemekvationerna är inte korrekta.
- ii) Lineariseringen utgör bara en approximation.
- iii) Lineariteten hos givare och ventiler är bara en approximation.
- iv) PI-regulatorernas parametrar är troligen dåligt kalibrerade.
- v) Det finns ett flertal fördröjningar i systemet, vilka här har försummats. De viktigaste av dessa fördröjningar

sakas av slangen mellan inflödesventilen och den översta tanken (ca. 3 s) samt ventilens reaktionstid (ca. 3 s).

Kommentarer.

i), ii) Enligt avsnitt 3.1 är den lineära modellen en "tillräckligt" bra approximation av verkligheten för höjder på ca. 40 - 60 skaldelar. För höjder utanför detta intervall står ventilen i något ändläge, varför man kan påstå att den lineariserade modellen är acceptabel där den över huvud taget är möjlig att applicera.

Däremot är den lineära modellen uppenbarligen grovt felaktig i de områden, där flödet begränsas, varför teoretiska resonemang beträffande t.ex. ξ och K är av tvivelaktigt värde.

Av ovanstående resonemang följer, att analogiuppkopplingen borde ge bra resultat, vilket även kan anses vara fallet.

v) Analogiuppkopplingen tar emellertid inte hänsyn till fördröjningen i "matarslangen". Överföringsfunktionen för denna är av formen $e^{-s\tau}$. I ett Bode-diagram har denna absolutvärdet 1 och en monotont avtagande negativ fas. Således kommer fasmarginalen för det totala systemet att minska, vilket försämrar stabiliteten. Alltså bör det verkliga systemet vara mer oscillativt än det simulerade, vilket ju även är fallet.

Vid reglering av nivån i övre kanten skulle en optimal reglering, som man lätt inser, vara att stänga ventilen helt, invänta höjden 50 skaldelar, och då omedelbart tillföra det vattenflöde som ger jämvikt. Upptagna kurvor visar att denna optimala reglering har lösningstiden 13 s,

jämfört med den optimala PI-regleringens 32 s. En sådan reglering torde emellertid vara möjlig att utföra endast med hjälp av dator, då regulatorn i förväg måste "veta" när rätt höjd kommer att uppnås, för att kompensera fördröjningen i tillflöde. Då t.ex. slangklämman kan ha rubbats bör datorn, efter att ha kopplat in jämviktsflödet, övergå till att fungera som en PI-regulator för finjustering av höjden.

Av avsnitt 4.5 framgår att det är möjligt att med stort värde på lösningstiden reglera även tank 2 till ett stabilt jämviktssläge.

Slutligen kan regleruppgiften bestående i att reglera 3 tankar diskuteras. Det framgår av nedanstående punkter att detta är omöjligt enligt givna förutsättningar (utflödesventilen får inte användas som insignal), samt att det vore en trivial utvidgning av fallet 2 tankar om utflödesventilen finge användas.

- 1) Utan påslagen "sugpump" svämmar tank 3 obönhörligen över vid det flöde som används vid jämvikt.
- 2) Med påslagen "sugpump" men utan regulator kommer p.g.a. att tank 3 då i praktiken har oändlig tidskonstant, denna tank antingen att tömmas eller svämma över beroende på pådraget hos utloppsventilen. Med regulator däremot blir tank 3 nästan helt självständig, och får en lösningstid på ca. 5 s.

Anm.: Empiriskt testades i fallet 1 tank även inverkan av en försiktig ökning av T_D från värdet 0. Dessa försök visade entydigt och med all önskvärd styrka att $T_D > 0$ är klart olämpligt, på grund av den starkt oscillativa tendens som då uppkommer, framför allt hos flödet.

Slutsats.

För att få en regulator som gör att höjden i en tank så snabbt, stabilt och noggrant som möjligt ställer in sig på 50 skd, skall man ställa in $k = 7$, $T_I = 0,6$ min och $T_D = 0$ min.

För övrigt bör det beaktas att pumpens maximala prestanda kan variera med upp till 100% från en dag till en annan. Ovanstående data för optimal styrning har upptagits vid ett maximalt utflöde på $37 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Till slut vill vi ge ett varningens ord till eventuella framtida skeptiker och uttestare till resp. av erhållna optimala resultat: Störningar utförda genom tillförsel av vatten i en tank, leder till en ökning av totala vattenmängden i systemet, vilket vid upprepning ovillkorligen leder till en överbelastning av uppsamlingsenheten. Detta stävjes enklast genom en regelbunden justering av nivån i densamma.