



# LUND UNIVERSITY

## Reglering av nivå och temperatur

Bertilsson, Hans; Bergström, Jan; Hallström, Lars Göran; Johansson, Bo; von Knorring, Olof; Larsson, Björn; Lindsten, Lars Göran; Pettersson, Hans Åke; Tyrén, Calle; Vollmer, Lorenz; Ahlström, Anders; Skoglund, Tomas; Hägglund, Tore

1978

*Document Version:*  
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*  
Bertilsson, H., Bergström, J., Hallström, L. G., Johansson, B., von Knorring, O., Larsson, B., Lindsten, L. G., Pettersson, H. Å., Tyrén, C., Vollmer, L., Ahlström, A., Skoglund, T., & Hägglund, T. (1978). *Reglering av nivå och temperatur*. (Technical Reports TFRT-7138). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

*Total number of authors:*  
13

### 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

REGLERING AV NIVÅ OCH TEMPERATUR

ANDERS AHLSTRÖM  
JAN BERGSTRÖM  
LARS GÖRAN HALLSTRÖM  
TORE HAGGLUND  
BO JOHANSSON  
OLOF von KNORRING  
BJÖRN LARSSON  
LARS GÖRAN LINDSTEN  
HANS ÅKE PETTERSSON  
TOMAS SKOGLUND  
CALLE TYRÉN  
LORENZ VOLLMER

Institutionen för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
Mars 1978

Dokumentutgivare  
Lund Institute of Technology  
Dept of Automatic Control  
Handläggare

Gösta Olsson

Författare

Anders Ahlström  
Jan Bergström  
Lars Göran Hallström  
Tore Hägglund  
Bo Johansson  
Olof von Knorring  
Björn Larsson  
Lars Göran Lindsten  
Hans Ake Pettersson

Tomas Skoglund  
Calle Tyrén  
Lorenz Vollmer

1074

Dokumentnamn  
REPÖRT LUTFD2/(TFRT-9138)/1-53/(1978)  
Utgivningsdatum  
March 1978

Dokumentbeteckning  
ARENDEBETECKNING  
06T6

Dokumenttitel och undertitel

Reglering av nivå och temperatur (Tank level and temperature control)

Referat (sammandrag)

This report describes studies of two laboratory processes, a water tank system and an air-heater. The investigations cover mathematical modeling, frequency- and step response, measurements, PID-control and state reconstruction using Kalman filtering. The work was one as a project work in the basic course in Automatic Control (F9a)

Referat skrivet av

Gösta Olsson

Förslag till ytterligare nyckelord

44T0

Klassifikationssystem och -klass(er)

50T0

Indextermer (ange källa)

52T0

Omfang

53Tpages

Språk

Swedish

Övriga bibliografiska uppgifter

56T2

Sekretessuppgifter

60T0

ISSN

60T4

ISBN

60T6

Dokumentet kan erhållas från

Department of Automatic Control  
Lund Institute of Technology  
Box 725, S-220 07 LUND 7, Sweden

Mottagarens uppgifter

62T4

Pris

66T0



REGLERING AV NIVA OCH TEMPERATUR

Specialarbete i Reglerteknik AK  
Höstterminen 1977

Författarna:

Anders Ahlström  
Jan Bergström  
Lars Göran Hallström  
Tore Hägglund  
Bo Johansson  
Olof von Knorring  
Björn Larsson  
Lars Göran Lindsten  
Hans Åke Pettersson  
Tomas Skoglund  
Calle Tyrén  
Lorenz Vollmer

Ansvarig handledare: Gustaf Olsson

## REGLERING AV NIVA OCH TEMPERATUR

Specialarbete i Reglerteknik AK  
Höstterminen 1977

### Sammanfattning

Denna rapport beskriver studier av två laboratorieprocesser, tanksystemet och varmlufts-systemet. Modellbygge frekvensanalys, PID-reglering och rekonstruktion av tillstånd med Kalmanfiltrering har utförts. Arbetet utfördes som projektarbete i reglerteknik AK (Kurs F9a)

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING. Syftet med arbetet.
2. PROCESSBESKRIVNINGAR
  - 2.1 Nivåreglersystem
  - 2.2 Varmluftaggregat
3. MODELLBYGGE FÖR NIVAREGLERSYSTEM
  - 3.1 Tankarnas dynamik
  - 3.2 Ventildynamiken
4. ANALYS OCH SIMULERING AV TANKSYSTEM
  - 4.1 Tankar utan ventildynamik
  - 4.2 Tankar med ventildynamiken medräknad
  - 4.3 Simulering av tanksystemet utan reglering
5. FREKVENSANALYS
  - 5.1 Tanksystemet
  - 5.2 Varmluftsystemet
6. STEGVARSEXPERIMENT
  - 6.1 Tanksystemet
  - 6.2 Varmluftsystemet
7. ATERKOPPLING MED PID-REGULATOR
  - 7.1 Simuleringar av tanksystemet
  - 7.2 Praktiska inställningar av PID-regulatorn för tanken
  - 7.3 Experiment på varmluftsystemet
8. REKONSTRUKTION MED KALMANFILTER
9. SLUTSATSER
10. ERFARENHETER AV ARBETET

## 1. INLEDNING

Föreliggande rapport är en redovisning av ett frivilligt specialarbete i Reglerteknik AK under ht 1977. I gruppen har deltagit

Anders Ahlström (E), Jan Bergström (E), Lars Göran Hallström (F), Tore Hägglund (F), Bo Johansson (M), Olof von Knorring (M), Björn Larsson (M), Lars Göran Lindsten (M), Hans Åke Pettersson (M), Tomas Skoglund (F), Calle Tyrén (M) och Lorenz Vollmer (E).

under handledning av univ lektor Gustaf Olsson.

Två processer har undersökts, ett nivåreglersystem (allmänt kallat "plask o pysen") samt ett varmluftssystem. Syftet med arbetet har framför allt varit att söka finna anknytning till verkligheten i de metoder som läres ut i kursen. Därför har inte strävan först och främst varit att finna nya resultat, utan snarare att i verkliga tillämpningar söka bemästra några av de vanligaste reglertekniska svårigheterna.

Sammanfattningsvis tror vi oss ha uppfyllt det primära syftet (därmed inte sagt, att tentamensresultatet blir bra utan enbart att vi genom "specialgruppsarbetet" kommer bättre rustade), dessutom har intresset för ämnet ökat högst betydligt varför vi beklagar de bristande matematikkunskaper (M-teknologer läser mindre matematik än E- och F-teknologer) som lägger hinder i vägen för fortsatta studier i ämnet.

Vi vill härmed också ta tillfället i akt att framföra vårt tack till Gustaf för visat intresse och behjälplighet i olika frågor.

## 2. PROCESSEBSKRIVNINGAR

Två fysikaliska processer har använts parallellt av olika delgrupper. Den ena är ett system bestående av tre tankar i serie, allmänt känd under namnet "plask och pysen". Den andra processen är ett undervisningsystem från Feedback Ltd och utgöres av ett varmluftsaggregat. Den första processen har utgjort den dominerande arbetsuppgiften. Varmluftsaggregatet har undersökts av tre personer.

### 2.1 Nivåreglersystemet

Den process som studeras är den så kallade plask o pysen. Processen består av tre stycken vattentankar monterade på olika höjd så att utloppet från den översta tanken utgör inlopp till tanken i mitten. På samma sätt kopplas mittentankens utlopp till den understa tanken. Mellan den understa tankens utlopp och den översta tankens inlopp finns en stor vattenbehållare och en pump, så att processen utgör ett slutet system. Flödet till den översta tanken och från den understa tanken styrs med pneumatiska ventiler. För mätning av in och utflöde finns flödesgivare monterade, och vattennivåerna i de tre tankarna mätes med en tryckgivare i varje tank. Processen åskådliggörs med en schematisk figur över plask o pysens kontrollpanel. Se figur 1.

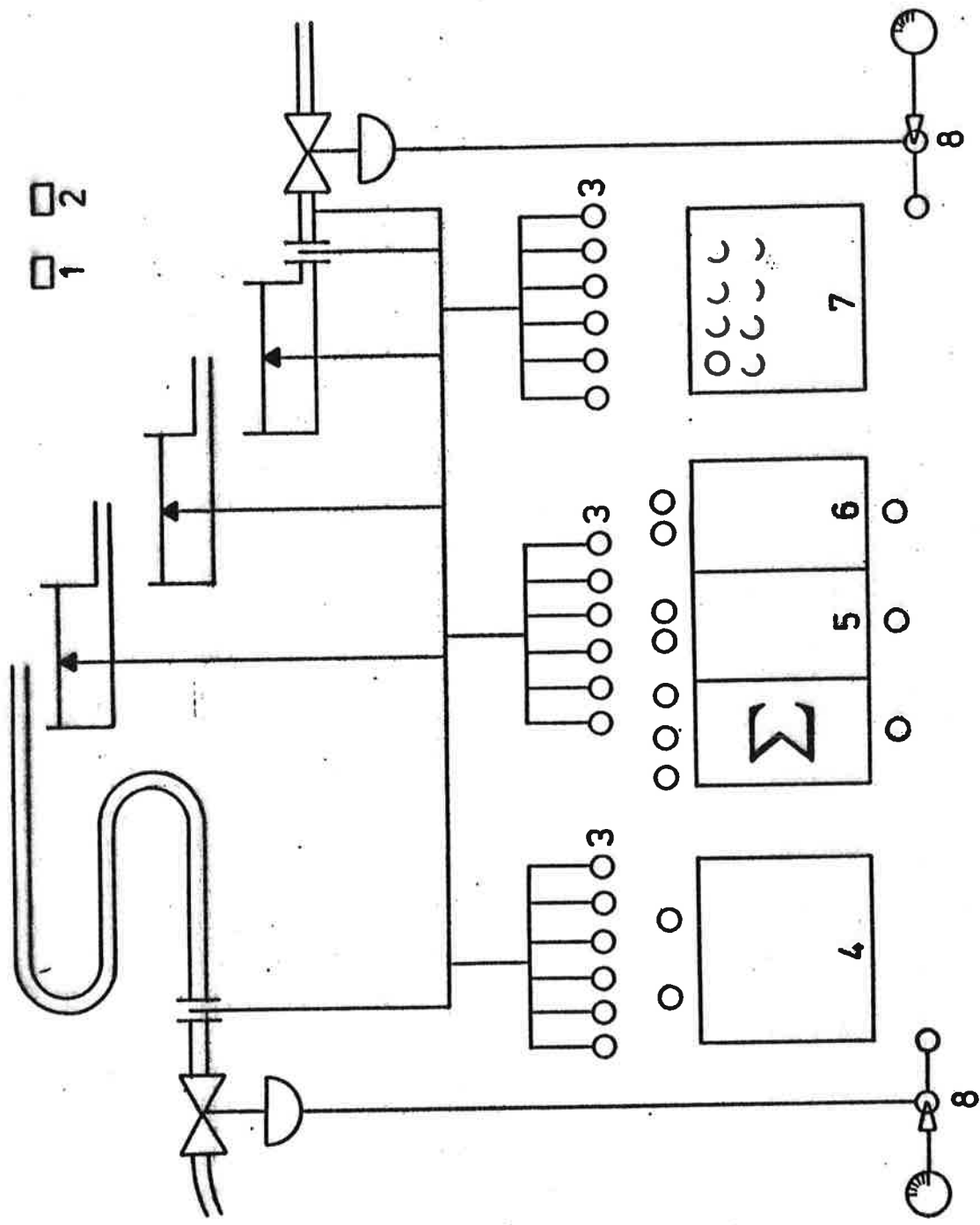


Fig. 2.1 Plask-och-pysens panel.

- |                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Aterställning av skyddskretsen | 5. PID-regulator                 |
| 2. Nätströmbrytare                | 6. PI-regulator                  |
| 3. Mätutgångar                    | 7. Interface                     |
| 4. Skrivare                       | 8. Omkopplare för ventilstyrning |

## 2.2 Varmluftssaggregat (PT 326 Process Trainer, Feedback Instruments Ltd)

Processbeskrivning:

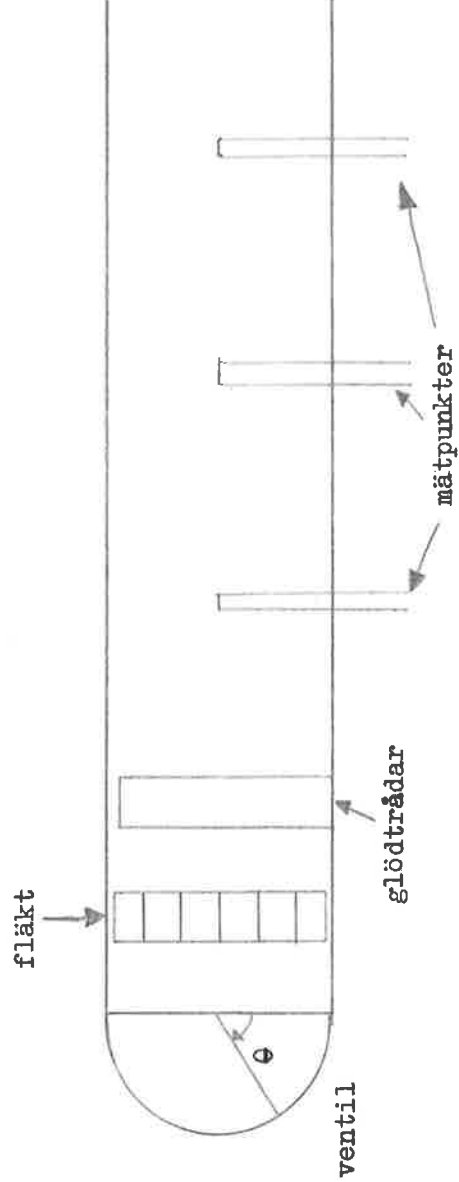
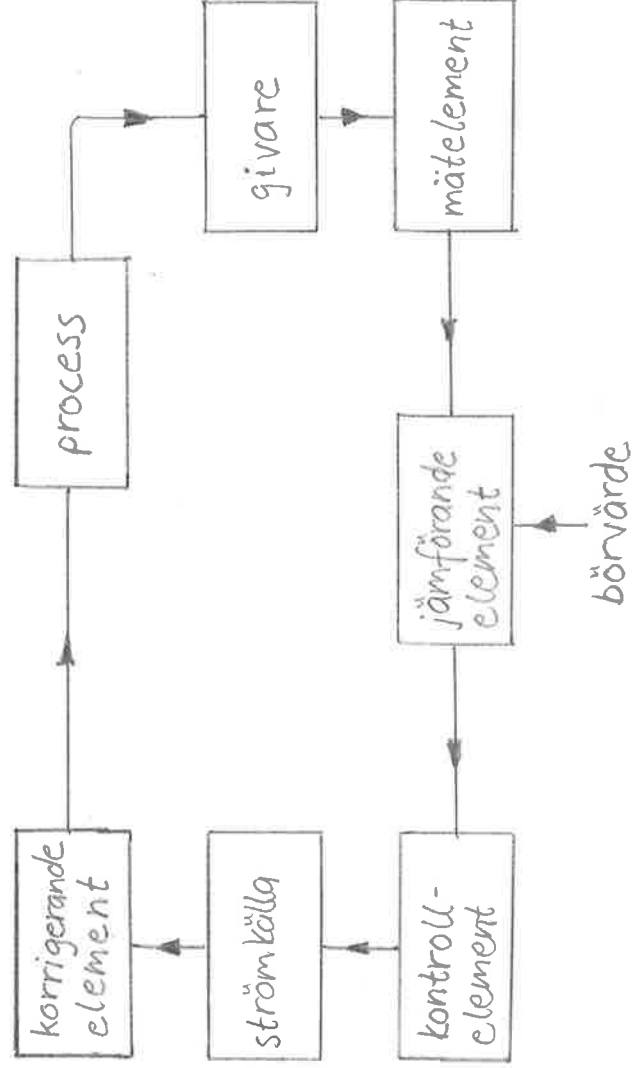


Fig.2.2. Principskiss för varmluftsaggregatet.

En centrifugalfläkt blåser luft från atmosfären via ett värmegaller genom ett rör tillbaka till atmosfären. Processen består av att upphetta luftströmmen genom röret till önskad temperaturnivå, temperaturen mätes och jämföres med inställt värde.

Uppmätt fel förstärkes och genererar en signal som bestämmer den elektriska strömmen in till ett korrigeringselement, i detta fall en värmekälla placerad i anslutning till fläkten.

Blockschema över PT 326:



### 3 MODELLBYGGE FÖR NIVÅREGLERSYSTEMET

Massbalanskvationerna för tankarna härledes i 3.1. Ventildynamiken formuleras i 3.2.

#### 3.1 Tankarnas dynamik

Tankarnas dynamik kan beskrivas med följande figur.

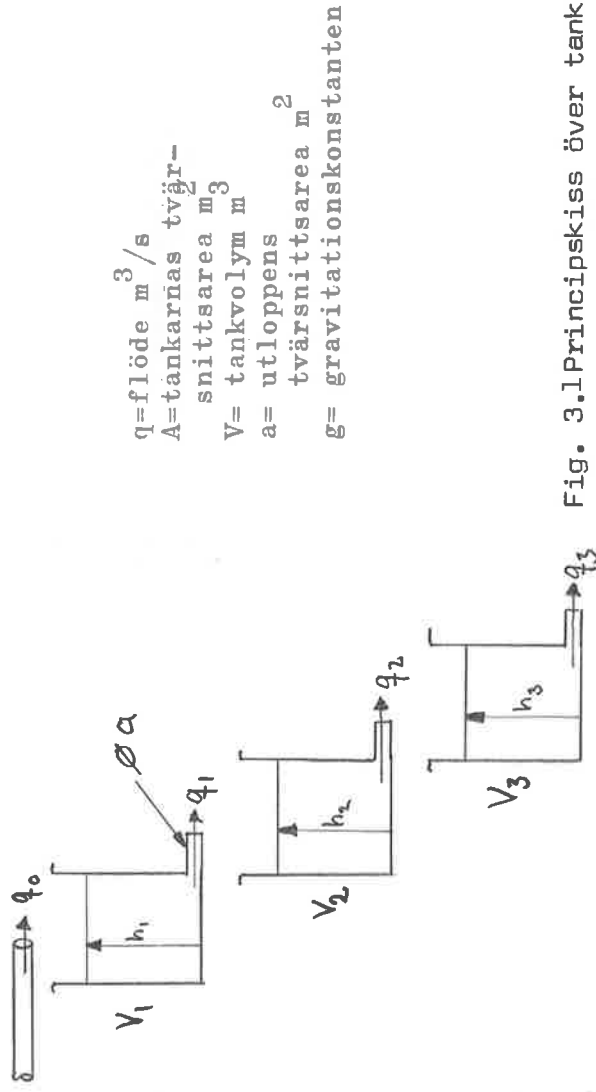


Fig. 3.1 Principskiss över tanksystemet.

Massbalansen tillämpad på systemet ger nu

$$\frac{dV_1}{dt} = q_0 - q_1$$

$$\frac{dV_2}{dt} = q_1 - q_2$$

$$\frac{dV_3}{dt} = q_2 - q_3$$

Sambanden  $V = A \cdot h$ ,  $q_1 = a \sqrt{2gh_1}$  och  $q_2 = a \sqrt{2gh_2}$

insatt i massbalanskvationerna ger

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{q_0}{A} - \frac{a \sqrt{2gh_1}}{A}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{a \sqrt{2gh_1}}{A} - \frac{a \sqrt{2gh_2}}{A}$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{a \sqrt{2gh_2}}{A} - \frac{q_3}{A}$$

Linearisering kring höjden  $h_0$

$$\Delta h_i = h_i - h_i^0$$

$$q = q - q$$

$$\frac{d\Delta h_1}{dt} = -\frac{a\sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_0}} \Delta h_1 + \frac{1}{A} \Delta q_0 = -k_1 \Delta h_1 + \frac{1}{A} \Delta q_0$$

$$\frac{d\Delta h_2}{dt} = \frac{a\sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_1}} \Delta h_1 - \frac{a\sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_2}} \Delta h_2 = k_1 \Delta h_1 - k_2 \Delta h_2$$

$$\frac{d\Delta h_3}{dt} = \frac{a\sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_2}} \Delta h_2 - \frac{1}{A} \Delta q_3 = k_2 \Delta h_2 - \frac{1}{A} \Delta q_3$$

Beräkning av konstanterna

Genom direkt mätning på systemet erhöles

$$\frac{1}{A} = 500 \text{ m}$$

$$a = 9.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$k_1 = \frac{a\sqrt{2g}}{2A\sqrt{h_0}} \approx \frac{0.10}{\sqrt{h_0}}$$

$$k_2 \approx \frac{0.10}{\sqrt{h_2}}$$

Maximala flödet uppmättes till  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

### 3.2 Ventildynamiken

Vi antar att ventilen beskrivs av en första ordningens dynamik,

$$T \frac{dq}{dt} = -q + Ku$$

där

T = tidskonstanten

q = vätskeflödet genom ventilen

u = insignalen till ventilen (i skaldelar)

Ventilerna har överföringsfunktionen

$$G = \frac{K}{1+Ts}$$

Ventilen har en olinjär karakteristik, och därför är den statiska förstärkningen K såväl som tidskonstanten T beroende av vätskeflödets storlek.

Den statiska förstärkningen bestämdes på följande sätt. Med igentäppt utlopp och för olika öppningar på ventilen mättes fyllnadstiden för den övre tanken. Tankvolymen bestämdes genom mätning av radie och höjd. Ur dessa värden beräknades sedan flödet som funktion av ventilöppningen.

Detta plottades i ett diagram där riktningskoefficienten gav K-värdet

Detta blir enligt figuren  $K \approx 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{skaldel}}$

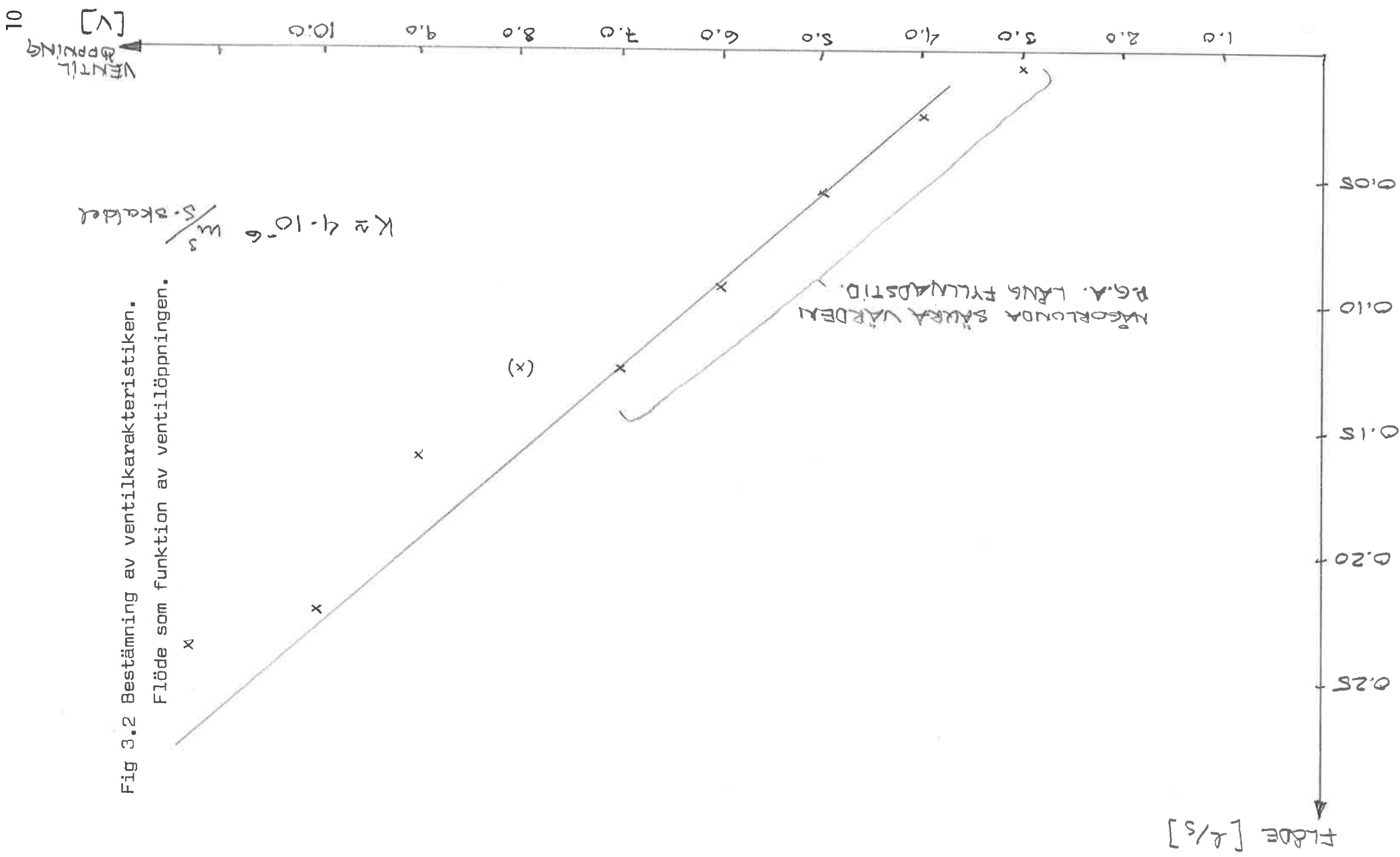


Fig 3.2 Bestämning av ventilkarakteristiken.  
Flöde som funktion av ventilöppningen.

## 4. ANALYS OCH SIMULERING AV TANKSYSTEMET

De linjäriserade ekvationerna för tanksystemet med ventil är följande:

$$\Delta \dot{h} = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & 0 \\ k_1 & -k_2 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \end{bmatrix} \Delta h + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \Delta q \quad (4.1)$$

där  $k_i = \frac{a_i \sqrt{g}}{A} \sqrt{2h_i}$

med A lika med tankarnas areor,

$a_i$  respektive tankars utloppsareor

och  $h_i$  - " - nivåer kring

vilka linjärisering ägt rum.

Dessutom gäller för flödet från ventilererna:

$$\Delta q = K(1 - \exp(-t/T))\Delta u \quad \text{om } \Delta u \text{ är ett steg} \quad (4.2)$$

där u är spänningen in på ventilen.

Vektorn  $\Delta q$  betecknar inflödet  $\Delta q_0$  resp utflödet ur tank 3,  $\Delta q_3$

## 4.1. Tankar utan ventildynamik

Med systemet (4.1) erhålls överföringsfunktionen

$$G(s) = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} \frac{1}{s+k_1} & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{(s+k_1)(s+k_2)} & 0 & 0 \\ \frac{k_1 k_2}{s(s+k_1)(s+k_2)} & -\frac{1}{s} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

då vi satt  $y = I\Delta h$

Stegsvaret för tank 1 och 2 blir då  $t \rightarrow +\infty$

$$(\Delta h_1)_{\text{stat.}} = \frac{1}{Ak_1} \quad (4.4)$$

Kräver vi dessutom att övre och undre ventilen lämnar

lika stora flödessteg fås för tank 3

$$(\Delta h_3)_{\text{stat.}} = -\frac{k_1 + k_2}{Ak_1 k_2} \quad (4.5)$$

Tidslösningen av stegsvaret blir

$$\Delta h = \begin{bmatrix} (1 - \exp(-k_1 t)) / Ak_1 \\ (1 + (k_1 \exp(-k_2 t) - k_2 \exp(-k_1 t)) / (k_2 - k_1)) / Ak_2 \\ f(t) \end{bmatrix} \quad \text{om } k_1 \neq k_2 \quad (4.6)$$

Om däremot  $k_1 = k_2 = k$  övergår  $\Delta h_2$  till

$$\Delta h_2 = (1 - (1 + kt) \exp(-kt)) / Ak \quad (4.7)$$

För  $f(t)$  gäller

$$f(t) = k_2 \int_0^t \Delta h_2 dt - t/A \quad (4.8)$$

där första termen härrör från övre ventilen och **andra** från nedre.

Styrbarhetsmatrisen och observerbarhetsmatrisen har båda rang en 3 varför systemet är styrbart och observerbart.

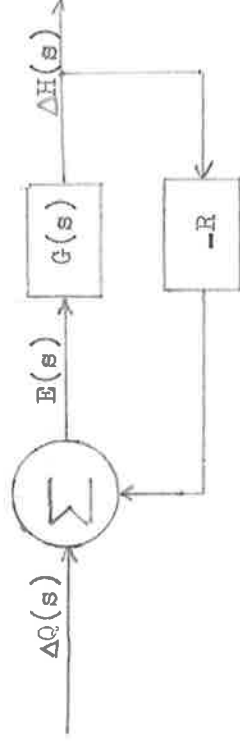
Stationära tillstånd fås för  $\Delta \dot{h} = 0$ . För tank 1 och tank 2 fås

$$(\Delta h_i)_{stat.} = \Delta q / Ak_i$$

där  $\Delta q$  är flödet in i och ut ut systemet. Den stationära nivån i tank 3 kan då väljas godtyckligt.

Inga element i överföringsmatrisen (4.3) har någon pol i högerhalvplanet. Däremot existerar en pol i origo för tank 3, både m.a.p. övre och m.a.p. undre ventilen. Tank 3 är således inte asymptotisk stabil.

Enkel återkoppling tankvis ger



För tank 1 och 2 blir stationära felet vid flödessteg från övre ventilen

$$(e(t))_{stat.} = 1 / (1 + R / Ak_1) \quad (4.9)$$

Rampflöde klaras icke av.

För tank 3 blir stationära felet vid flödessteg noll, både m.a.p. övre och m.a.p. undre ventilen. Vid flödesramp fås dock

$$e(t)_{stat.} = 1 / (1 + R/A) \quad \text{m.a.p. övre ventilen} \quad (4.10)$$

$$e(t)_{stat.} = -A/R \quad \text{m.a.p. undre ventilen} \quad (4.11)$$

#### 4.2 Tankar med ventildynamiken medräknad

Ventilerna antages beskrivbara med differentialekvationen

$$T \dot{\Delta q} = -\Delta q + K \Delta u$$

Lösningen till denna differentialekvation utgörs av ekvation

$$(4.2) \text{ om } \Delta u \text{ är ett steg. Vi kan således skriva}$$

$$\Delta Q(s) = G_v(s) \Delta U(s)$$

där

$$G_v(s) = K / (1 + Ts)$$

$G_v(s)$  är således ventilernas överföringsfunktion. Om vi antar att ventilererna har olika karaktäristik  $K_o$  och  $T_o$  för den övre ventilen resp.  $K_3$  och  $T_3$  för den undre ventilen, fås den totala överföringsfunktionen

$$G_{tot.}(s) = G_v(s)G(s)$$

där

$$G_v(s) = \begin{bmatrix} K_o/(1+T_o s) & 0 \\ 0 & K_3/(1+T_3 s) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Således blir

$$G_{tof.}(s) = 1/A \begin{bmatrix} K_o/((s+k_1)(1+T_o s)) & 0 \\ K_o k_1/((s+k_1)(s+k_2)(1+T_o s)) & 0 \\ K_o k_1 k_2/(s(s+k_1)(s+k_2)(1+T_o s)) & -K_3/(s(1+T_3 s)) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

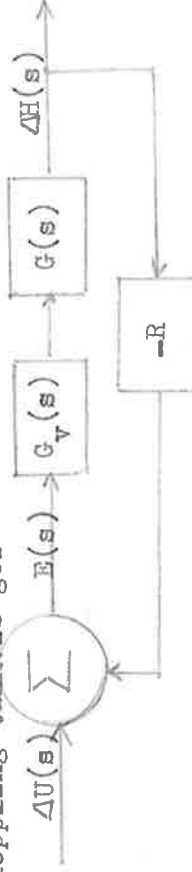
Motsvarigheten till ekv. (4.4) blir

$$(\Delta h_i)_{stat.} = \mathbb{W}_o/Ak_i \quad (4.14)$$

Kräver vi dessutom att  $K_o \Delta u_o = K_3 \Delta u_3 = K \Delta u$  och sätter  $\Delta u = 1$  fås motsvarigheten till ekv. (4.5)

$$(\Delta h_3)_{stat.} = -K(k_1+k_2-k_1 k_2 (T_3 - T_o)/Ak_1 k_2) \quad (4.15)$$

Enkel återkoppling tankvis ger



Motsvarigheterna till ekvationerna (4.9), (4.10) och (4.11) blir respektive

$$(e(t)_i)_{stat.} = 1/(1+RK_o/Ak_i) \quad (4.16)$$

$$e(t)_{stat.} = 1/(1+RK_o/A) \quad (4.17)$$

$$e(t)_{stat.} = -A/K_3 R \quad (4.18)$$

#### 4.3. Simulering av tanksystemet utan reglering.

Sambandet mellan tanknivåerna och flödena beskrivs av

$$\dot{\Delta h}_1 = -k_1 \Delta h_1 + \frac{\Delta q_0}{A}$$

$$\dot{\Delta h}_2 = k_1 \Delta h_1 - k_2 \Delta h_2$$

$$\dot{\Delta h}_3 = k_2 \Delta h_2 - \frac{\Delta q_2}{A}$$

$$\text{där } k_i = \frac{0.1}{\sqrt{h_i}}$$

Ventilernas dynamik påverkar systemet högst påtagligt. För att studera denna påverkan antogs att ventilen är ett första ordningens system,  $G(s) = k/(1+sT)$ . Mätningar av  $k$  och  $T$  gav (se kap. 3.2.):  $k = -4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sv}$  och  $T = 1 \text{ s}$ . Härvid anses styrspänningen  $u \in [-10, 0] \text{ V}$  vara systemets insignal och flödet  $q$  utsignal från ventilen.  $ku$  är alltså positiv.

Tillståndsekv. för ventilen blir:

$$\dot{q} = -q + ku$$

Ekvationen linjäriseras, divideras med  $A$  och  $T=1$  insättes:

$$\frac{\Delta \dot{q}}{A} = -\frac{\Delta q}{A} + \frac{k \Delta u}{A}$$

På analogmaskinen gjordes följande uppkoppling:

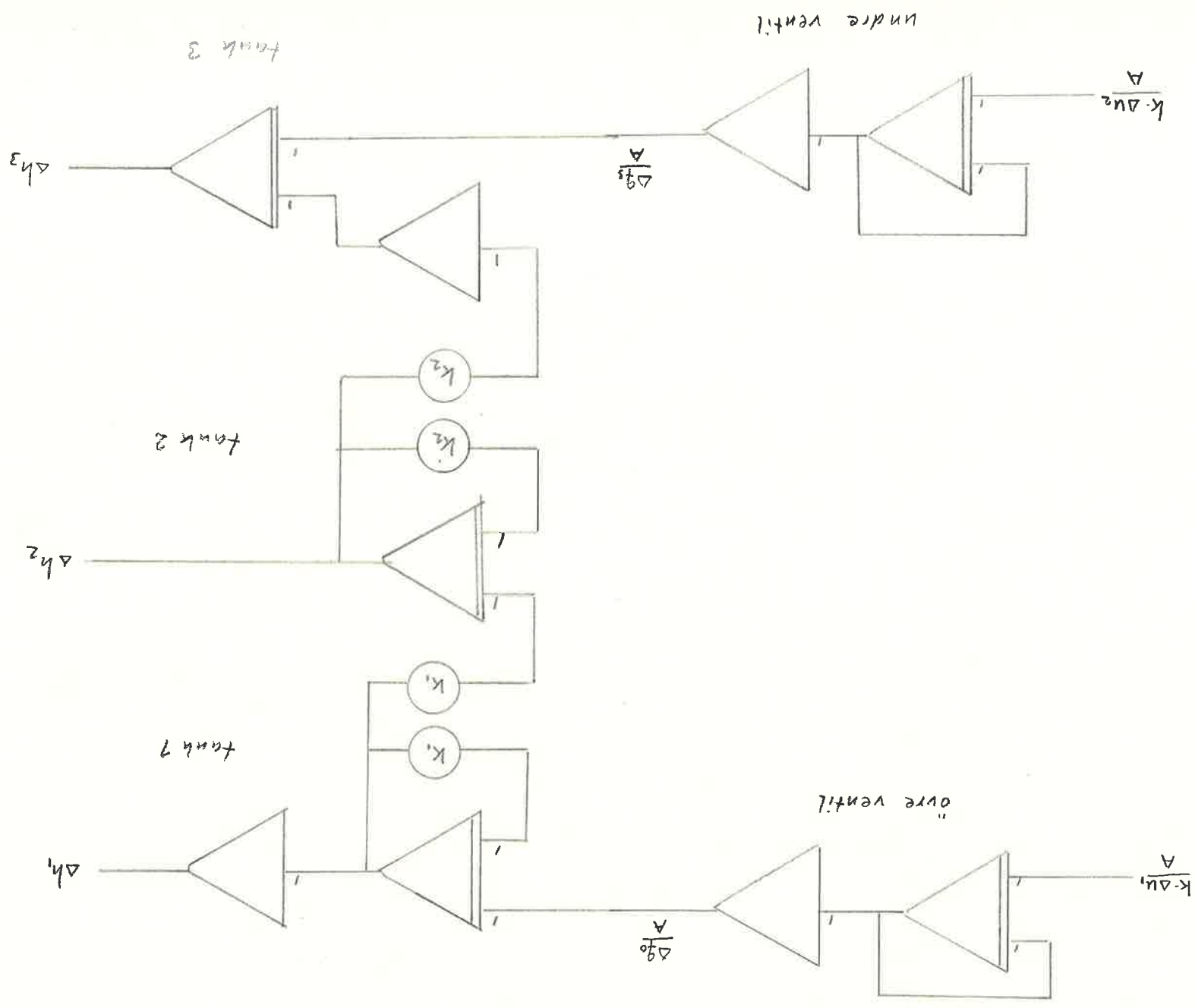


Fig. 4.1.1. Analogsimulering av tanksystemet med tankdynamiken inkluderad. Ingen reglering förekommer.

Några resultat av simuleringen visas i fig. 4.2 - 4.7 .

I fig. 4.2 .-4.5 har ventilerernas inverkan försumrats, dvs de togs inte med i uppkopplingen. De två sista figurerna inkluderar ventildynamiken.

4.2 .  $h_1^0 = h_2^0 = 0.4$  m  $\Delta q_0/A = 0.005$   $\Delta q_3/A = 0$

BV:  $\Delta h_1(0) = \Delta h_2(0) = 0$

Nivån ökar i tank 1 och 2. Tank 3 överfylls.

4.3 .  $h_1^0 = h_2^0 = 0.5$  m  $\Delta q$  som ovan

BV:  $\Delta h_1(0) \neq 0$   $\Delta h_2(0) \neq 0$

Nivån stabiliseras vid samma värde oberoende av BV.

4.4 . Nivån i tank 1 för olika insignaler. Parametrar som ovan.

4.5 . Stegsvär för tank 3. Parametrar som ovan.

1)  $\Delta q_0/A = 0.005$   $\Delta q_3/A = 0$  Tanken överfylls.

2)  $\Delta q_0/A = 0.008$   $\Delta q_3/A = 0.005$  Nivån sänks till en början (det tar en stund innan  $\Delta q_0$  påverkar tank 3) men sedan överfylls tanken.

Kurva 1 och 2 har ej gemensam nollpunkt.

Ur tillståndsekv. följer direkt att  $\Delta q_0 = \Delta q_3$  är ett villkor för stationariteten i tank 3. Detta verifierades också vid simuleringen.

4.6 . Stegsvär för tank 1.  $h_1^0 = h_2^0 = 0.23$  m  $\Delta u = 0.1$  V

Ur fig. erhålles tidskonstanten 6.4 s.

4.7 . Stegsvär för tank 2.  $h_1^0 = h_2^0 = 0.23$  m  $\Delta u = 0.1$  V

Ur fig. erhålles tidskonstanten 11.7 s.

Av kurvornas utseende vid små t framgår det att  $h(t)$  är sammansatt av två exponentialfunktioner, varav den ena snabbt dämpas ut. (Lösning av ekv. för ventil+tank 1 ger ungefär

$$h_1(t) = 10C + Ce^{-t} - Ce^{-0.1t}, \text{ där } C = \text{konst.}$$

Fig. 4.2 Stegwar, funk 1,2,3

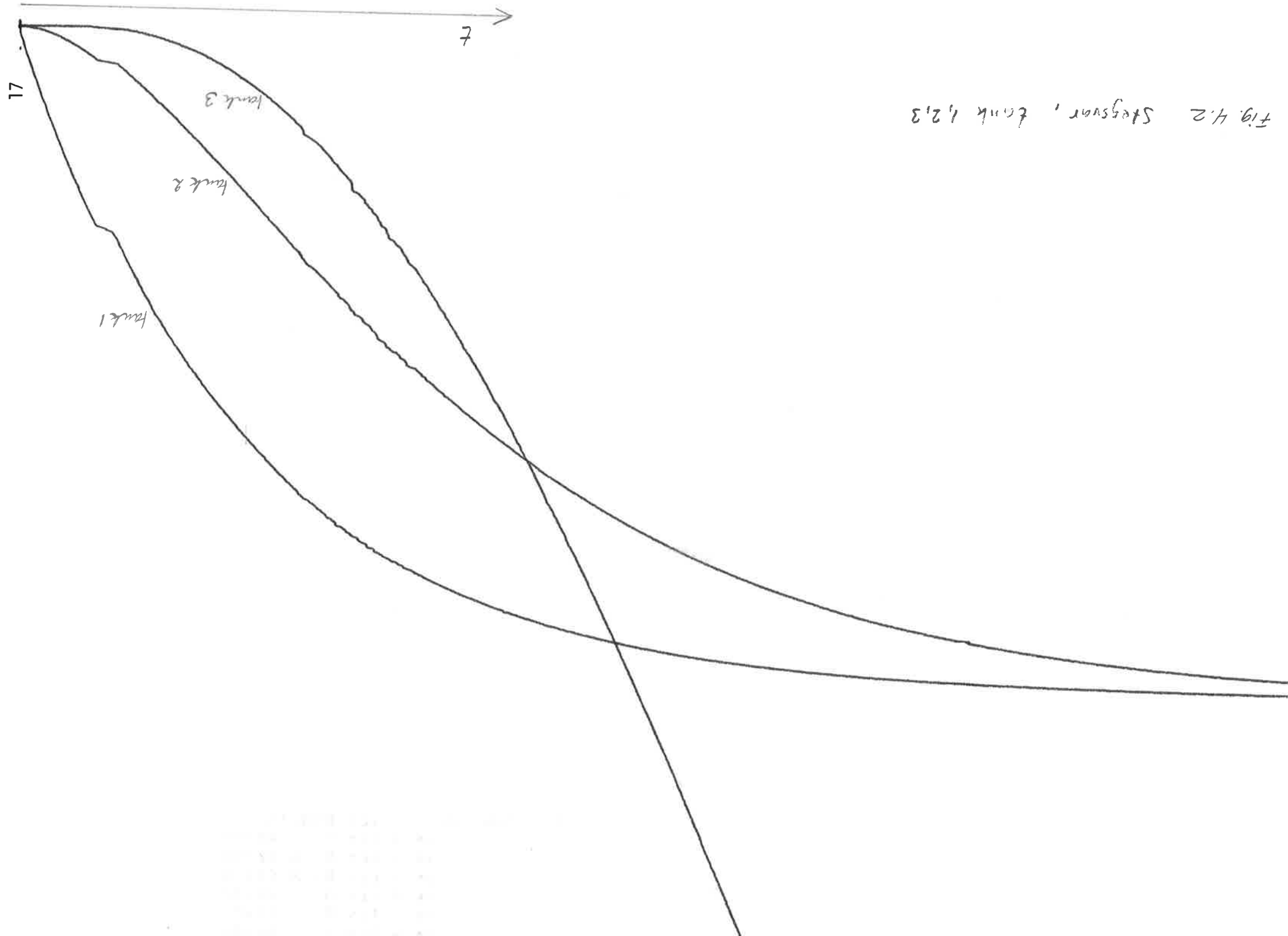


Fig 4.3. Stegsvær, tank 1.2.

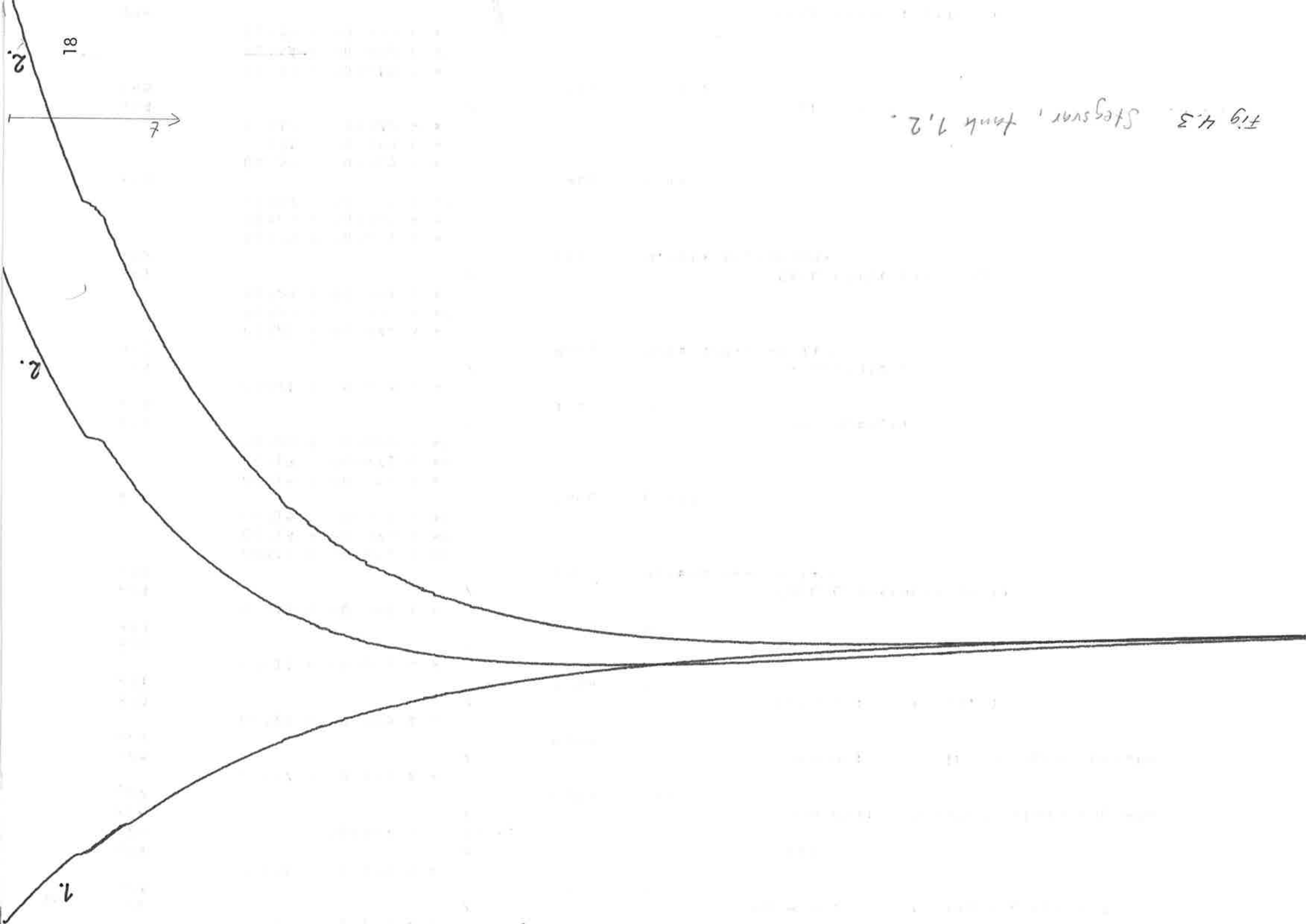
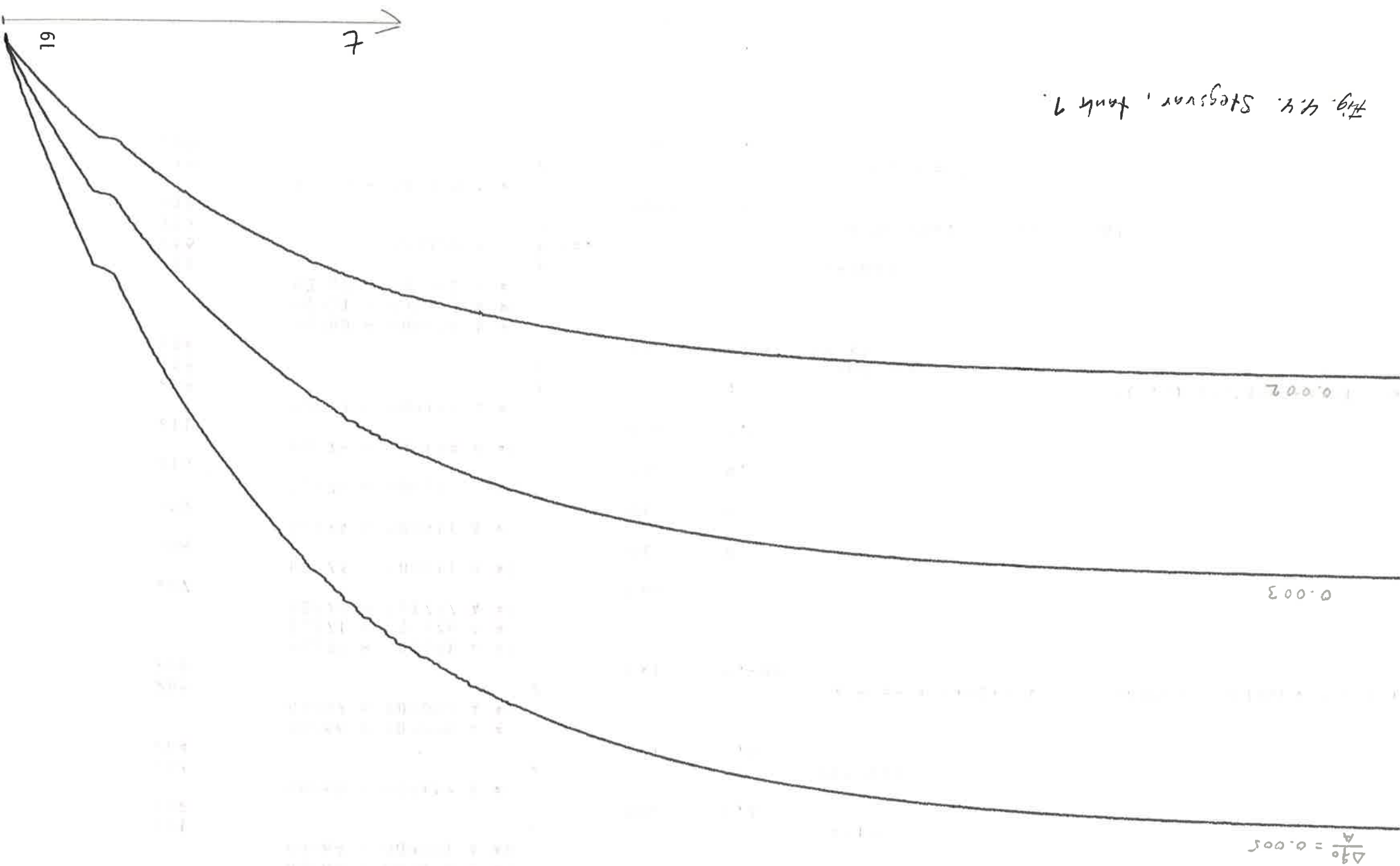


Fig. 4.4. Stegvar, tank 7.



Stegvar, tank 7. Other tank.

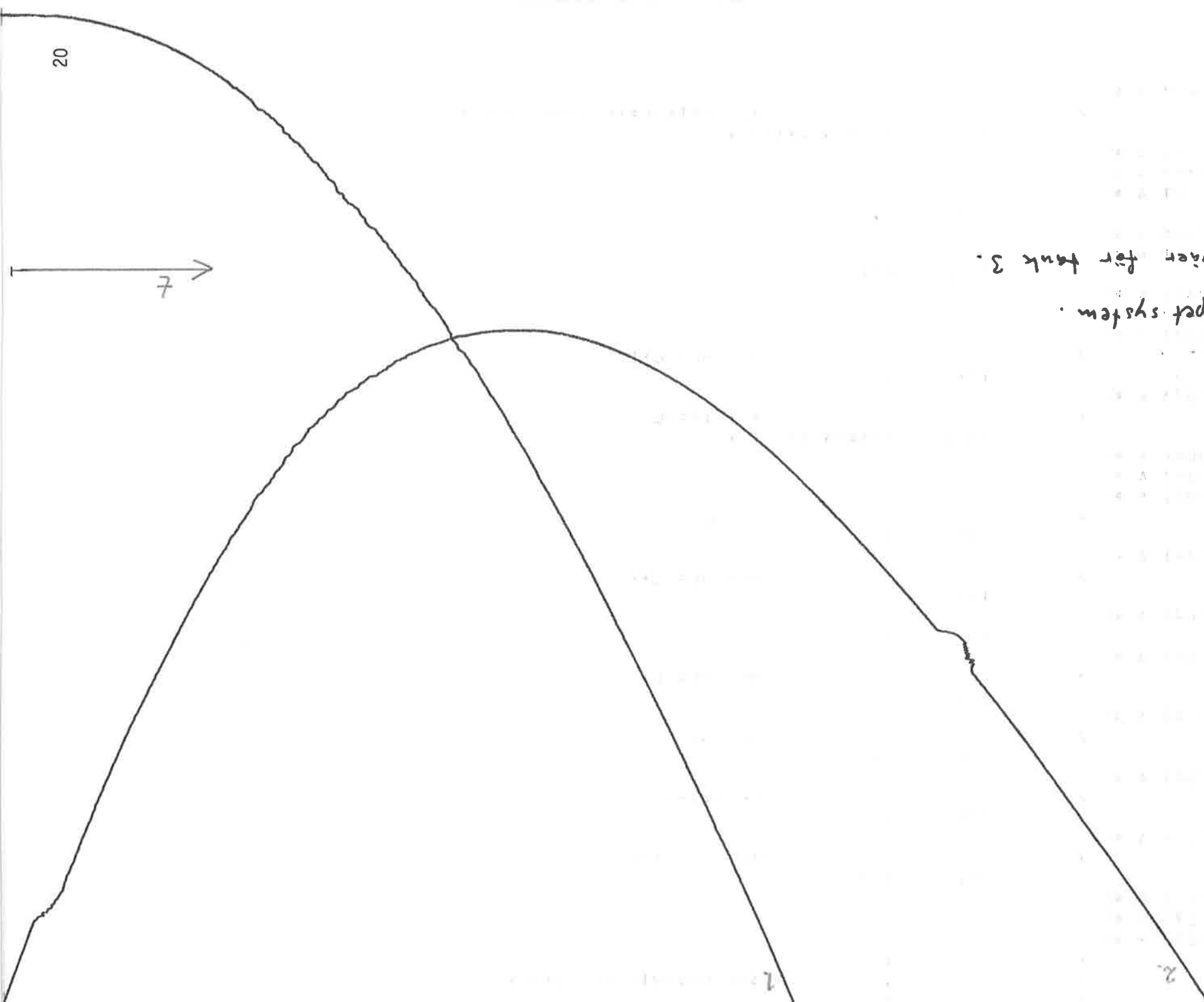


Fig 4.5 Öppet system.  
Nivåer för tank 3.

Fig. 4.6  
Stegsvar for tank 1 inkl. ventildynamik.

$$T = \frac{2.1}{3.5} \cdot 32 = 6.4 \text{ s}$$

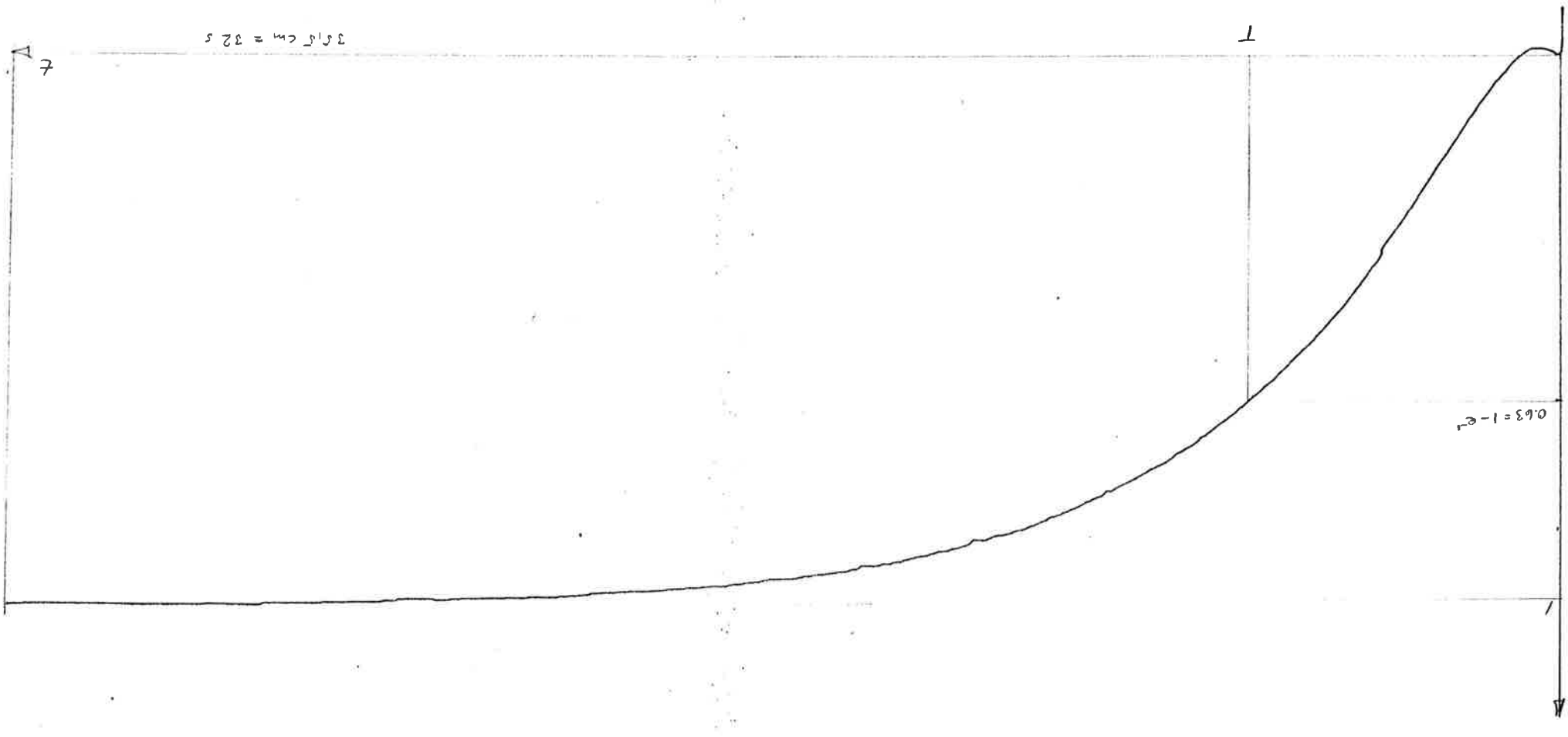
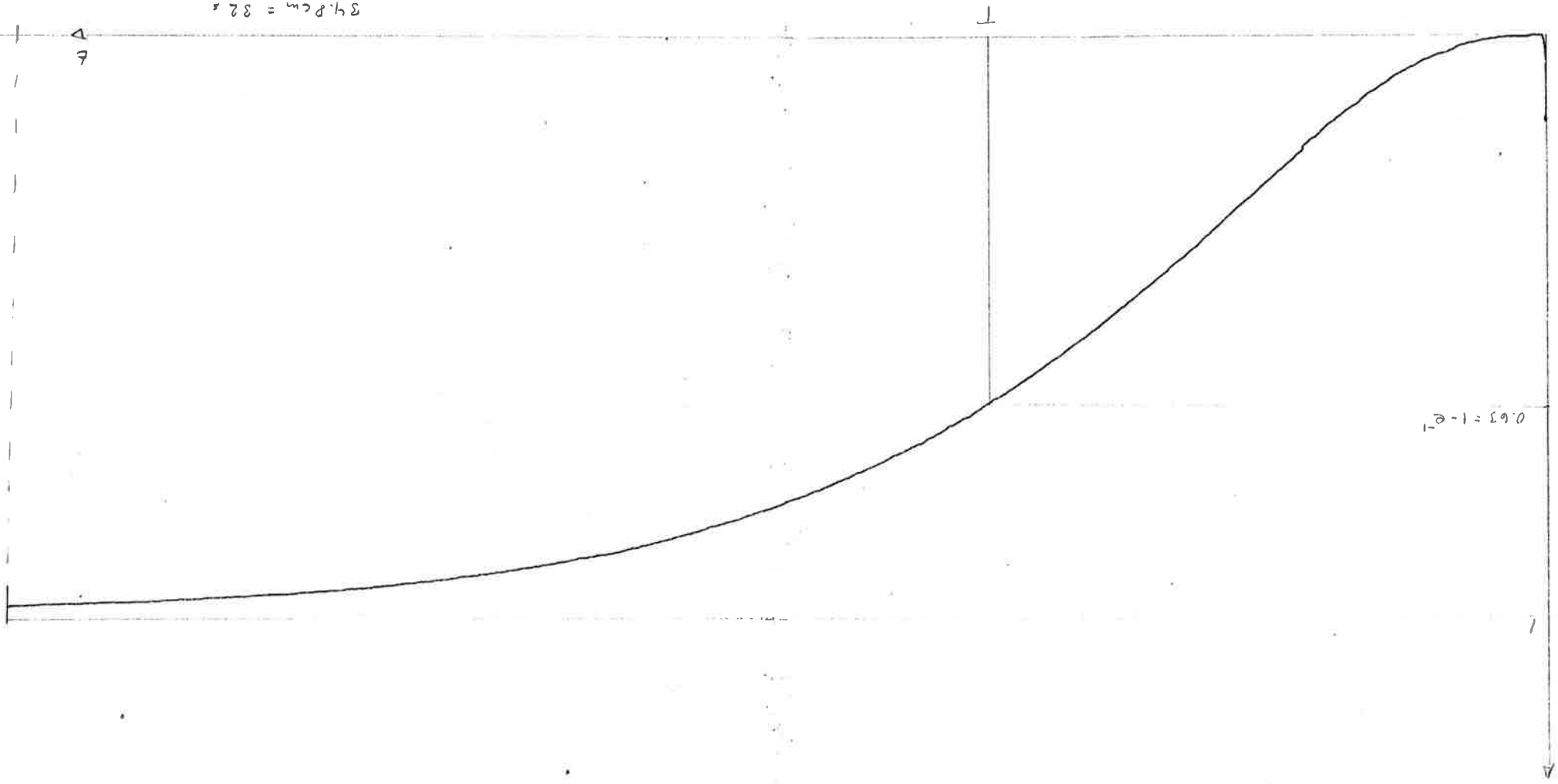


Fig. 4.7  
Stegsvar på tank 2, inkl. ventildynamik.

$$T = \frac{12.7}{34.8} \cdot 32 = 11.75$$

$$34.8 \text{ cm} = 82 \%$$

$$0.63 = 1 - e^{-1}$$



## 5. FREKVENSPANALYS

Frekvensanalys har utförts på både tank- och varmluftssystemet. Det förra systemet analyseras i 5.1 och det senare i 5.2.

### 5.1 FREKVENSPANALYS AV TANKSYSTEMET

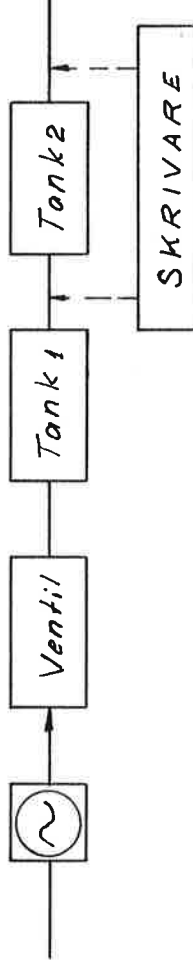
#### SYFTE:

Undersöka dynamiken hos de två översta tankarna med hjälp av frekvensanalys. Resultatet presenteras i form av Bode-diagram, vilka sedan kan användas som utgångspunkt för fortsatta undersökningar.

#### HJÄLPMEDEL:

Sinusgenerator (tongenerator) och skrivare.

#### MODELL:



#### ARBETSGÅNG:

Inställningen av huvudventilen, som reglerar vattenflödet till tank 1, varierar sinusformigt med tongeneratorn och tanknivån registreras med skrivaren. Önskad jämviktsnivå är 50% av tankens volym (höjd). Tryck-&-errormetoden används för att bestämma lämpliga värden på sinuskurvans amplitud, frekvens och likspänningsnivå, för att variationerna skall kunna mätas och registreras, dvs ingen av tankarnas får helt tömmas eller fyllas. Detta medför att insignalens amplitud blir c:a 10% av ventilens maximala utslag kring en jämviktsnivå, som svarar mot 50% av tankens volym. Med hänsyn till presentationsformen är det lämpligt att undersöka hur amplitud och fas ändras inom en dekad ur vinkelfrekvens synpunkt. Gränsen för den lägsta inmatade frekvensen (0,01 Hz) bestäms av tongeneratorn.

Efter gjorda mätningar uppritas Bode-diagram för såväl tank 1 som för tankarna 1&2. (Vg. se tabell 1 samt diagramblad).

RESULTAT:

Tank 1.

Beloppskurvan faller kontinuerligt 20 dB/dekad, dvs indikerar ett första ordningens system. Brytpunkt saknas! Faskurvan varierar mellan  $-63^\circ$  och  $-147^\circ$ .

Tankarna 1&2.

Beloppskurvan faller kontinuerligt 40 dB/dekad, dvs ett andra ordningens system. Brytpunkt saknas! Faskurvan varierar från  $-116^\circ$  till  $-260^\circ$ .

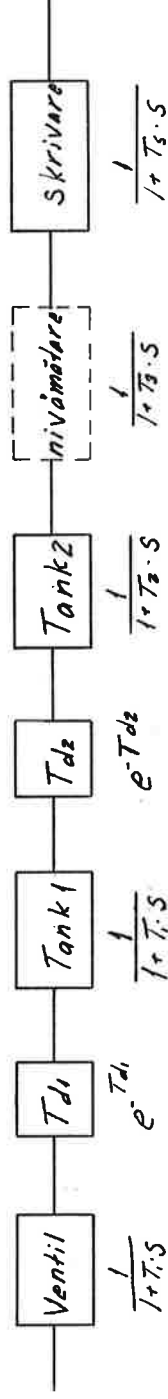
ANMÄRKNING:

För såväl tank 1 som tankarna 1&2 saknas brytpunkt. Genom att mäta likspänningsförstärkningen kan brytfrekvenserna dock beräknas. Enligt diagrammen är brytfrekvensen i båda fallen ungefär 0,04 rad/sek.

För tank 1, som är ett första ordningens system, skall faskurvan bli max.  $-90^\circ$  och för systemet med två tankar, som är ett andra ordningens system, skall faskurvan bli max.  $-180^\circ$ .

Med tanke på att de båda systemens faskurvor beter sig som man väntar sig för låga frekvenser men sedan aviker mer och mer för högre frekvenser, så måste andra faktorer börja göra sig gällande här.

NY MODELL:



$T_{d1}$  och  $T_{d2}$  är transportfördröjningar, dvs den tid som åtgär från det att man påverkar ventilen, tills en nivåändring inträffar i tank 1 resp. tank 2. Genom mätningar har  $T_{d1}$  &  $T_{d2}$  uppskattats till ungefär 1,5 respektive 1 sekund.

### VENTILENS DYNAMIK.

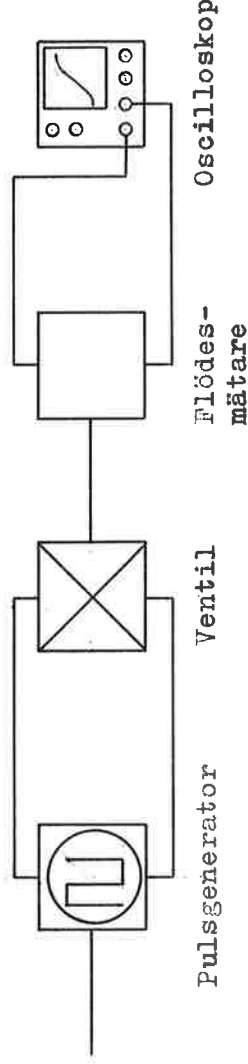
Ventilens överföringsfunktion:

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT_v}$$

Då statiska förstärkningen,  $K$ , är av mindre betydelse i det här sammanhanget, sätts den lika med 1 för att underlätta räknandet. Ventilens överföringsfunktion blir således:

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

En uppskattning av tidskonstanten  $T_v$  erhålles med hjälp av följande uppställning:



Fyrkantvågens amplitud (från pulsgenerator) är lika stor som topp till topp värdet av insignalen (sinus) till systemet vid upptagning av dess Bode-diagram.

Mätning av stig och falltider ger:

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{stig}} = 300 \text{ ms} \quad (0-90\%) \\ t_{\text{fall}} = 520 \text{ ms} \quad (0-90\%) \end{array} \right\} \Rightarrow t_{\text{medel}} = 410 \text{ ms}$$

$$T_v = \frac{t_{\text{medel}}}{2,3}$$

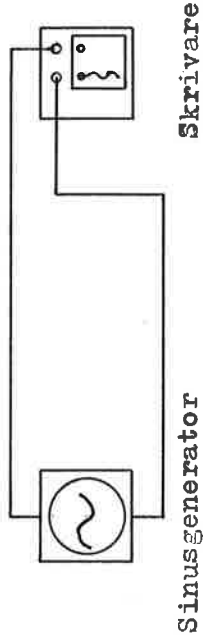
Tidskonstanten alltså ungefär:  $T_v = 0,18 \text{ sek}$

### SKRIVARENS DYNAMIK.

Skrivarens överföringsfunktion:

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

Skrivarens tidskonstant uppskattas med hjälp av en mätning enligt följande försöksupställning:



Tillvägagångssätt:

Vid en låg frekvens (0.01 Hz) justeras sinussignalens amplitud, så att skrivarens utslag varierar mellan max. och min. värde på papperet. Frekvensen höjs till ett värde,  $f_g$ , vid vilket utslaget har sjunkit till 71% av startvärdet.

Som gränshfrekvens erhålles:  $f_g = 0,7 \text{ Hz}$

$$\Rightarrow \omega_g = 4,4 \text{ rad/s}$$

Tidskonstanten blir således:  $T_s = \frac{1}{\omega_g}$

$$\Rightarrow T_s = 0,23 \text{ sek.}$$

### TRANSPORTFÖDRÖJNINGEN.

Systemets överföringsfunktion (i sex punkter) utan ventilens och skrivarens inverkan erhålls ur tabell 1, genom att dra ventilens och skrivarens amplitud resp. fasfunktion ifrån det okompenserade systemets amplitud- resp. fasfunktion.

Härvid erhålles följande överföringsfunktioner:

|        | $\omega$      | 0,063 | 0,078 | 0,105 | 0,157 | 0,314 | 0,628  |
|--------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| TANK 1 | $10 \log  G $ | 5,23  | 4,68  | 3,06  | 1,47  | -1,17 | -3,91  |
|        | $\arg(G)$     | -61,2 | -67,9 | -75,4 | -92,0 | -106  | -132   |
| TANK 2 | $10 \log  G $ | 4,16  | 3,08  | -0,43 | -3,29 | -8,50 | -14,00 |
|        | $\arg(G)$     | -115* | -123* | -151  | -165  | -201  | -245   |

Faskurvorna skall jämföras med ett 1:a ordningens (tank 1) respektive 2:a ordningens system (tank 2) som har en gränsvinkelhastighet på:  $\omega_g = 0,04$  rad/s

Tankarnas fasfunktioner borde alltså vara så här:

|        | $\omega$  | 0,063 | 0,078 | 0,105 | 0,157 | 0,314 | 0,628 |
|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TANK 1 | $\arg(G)$ | -57,5 | -63,0 | -69,1 | -75,7 | -82,7 | -86,4 |
| TANK 2 | $\arg(G)$ | -115* | -126* | -138  | -151  | -165  | -173  |

\* Värdena ger en felaktig uppfattning om transportfördröjningens storlek ( $\approx 0$  s) och beaktas ej vid den fortsatta diskussionen.

Det extra tillskottet i fasen beror på transportfördröjningens inverkan.

Transportfördröjningens överföringsfunktion:

$$G_1(s) = e^{-s T_1} \quad \text{tank 1}, \quad G_2(s) = e^{-s T_2} \quad \text{tank 2.}$$

Genom att i varje mätpunkt räkna ut ett lämpligt värde på  $T_1$  respektive  $T_2$  som motsvarar fasdifferansen, kan följande värden erhållas:

|       | $\omega$ | 0,063 | 0,078 | 0,105 | 0,157 | 0,314 | 0,628 |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_1$ |          | 1,02  | 1,09  | 1,05  | 1,81  | 1,29  | 1,27  |
| $T_2$ |          | -     | -     | 2,13  | 1,51  | 1,97  | 2,01  |

Genom medelvärdesbildning erhålles:  $\bar{T}_1 = 1,26$  s

$$\bar{T}_2 = 1,91 \text{ s}$$

Dessa värden är att jämföra med de i inledningen grovt uppskattade värdena på transportfördröjningen:

$$T_1 = 1,5 \text{ s}$$

$$T_2 = 2,5 \text{ s}$$

Överensstämmelsen är att betrakta som god.

TABELL 1

|   | $\omega$ | 0,063 | 0,078 | 0,105  | 0,157  | 0,314  | 0,628  |
|---|----------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| <u>OKOMPENSERAT-</u><br><u>SYSTEM</u>     |          |       |       |        |        |        |        |
| TANK 1                                    | 10log G  | 5,23  | 4,68  | 3,06   | 1,47   | -1,19  | -3,98  |
|   | arg(G)   | -62,7 | -69,7 | -77,9  | -95,7  | -113   | -147   |
| TANK 2                                    | 10log G  | 4,16  | 3,08  | -0,428 | -3,29  | -8,52  | -14,0  |
|   | arg(G)   | -116  | -125  | -153   | -169   | -208   | -260   |
| <u>VENTILLENS-</u><br><u>DYNAMIK</u>      |          |       |       |        |        |        |        |
|   | 10log G  | 0     | 0     | 0      | 0      | -0,01  | -0,03  |
|   | arg(G)   | -0,65 | -0,81 | -1,08  | -1,62  | -3,24  | -6,45  |
| <u>SKRIVARENS-</u><br><u>DYNAMIK</u>      |          |       |       |        |        |        |        |
|   | 10log G  | 0     | 0     | 0      | 0      | -0,01  | -0,04  |
|   | arg(G)   | -0,83 | -1,03 | -1,38  | -2,07  | -4,13  | -8,22  |
| <u>TRANSPORT-</u><br><u>FÖRDRÖJNINGEN</u> |          |       |       |        |        |        |        |
| TANK 1                                    | arg(G)   | -4,54 | -5,67 | -7,56  | -11,34 | -22,68 | -45,36 |
| TANK 2                                    | arg(G)   | -6,88 | -8,59 | -11,46 | -17,19 | -34,38 | -68,76 |
| <u>ENBART</u><br><u>TANKEN</u>            |          |       |       |        |        |        |        |
| TANK 1                                    | 10log G  | 5,2   | 4,7   | 3,1    | 1,5    | -1,2   | -3,9   |
|   | arg(G)   | -57   | -62   | -68    | -81    | -83    | -87    |
| TANK 2                                    | 10log G  | 4,2   | 3,1   | -0,4   | -3,3   | -8,5   | -14    |
|   | arg(G)   | -108  | -114  | -140   | -148   | -167   | -176   |

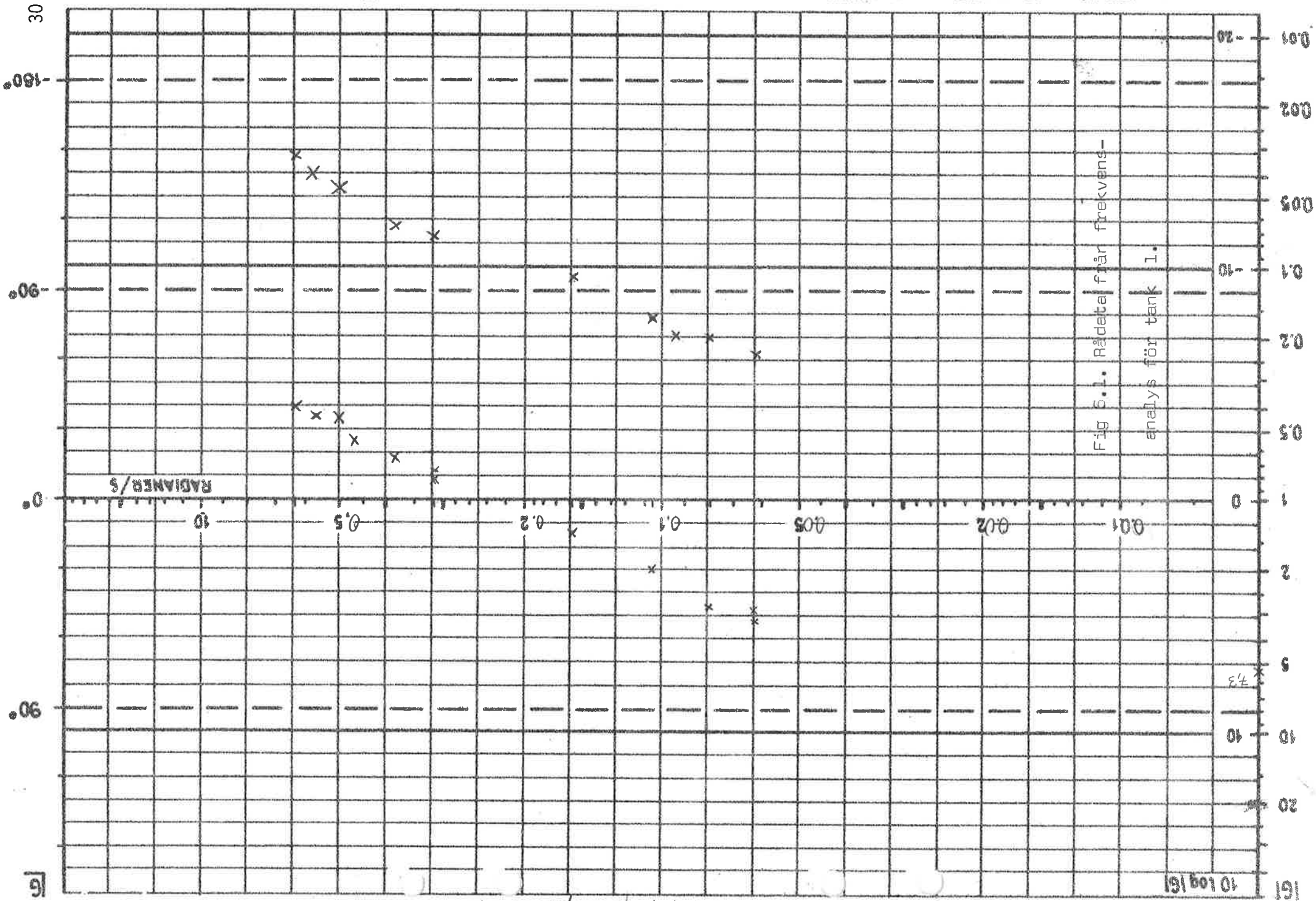


Fig 6.1. Rådata från frekvens-  
analys för tank 1.

Tank 1 (oberoende)

10 log |s|

lg

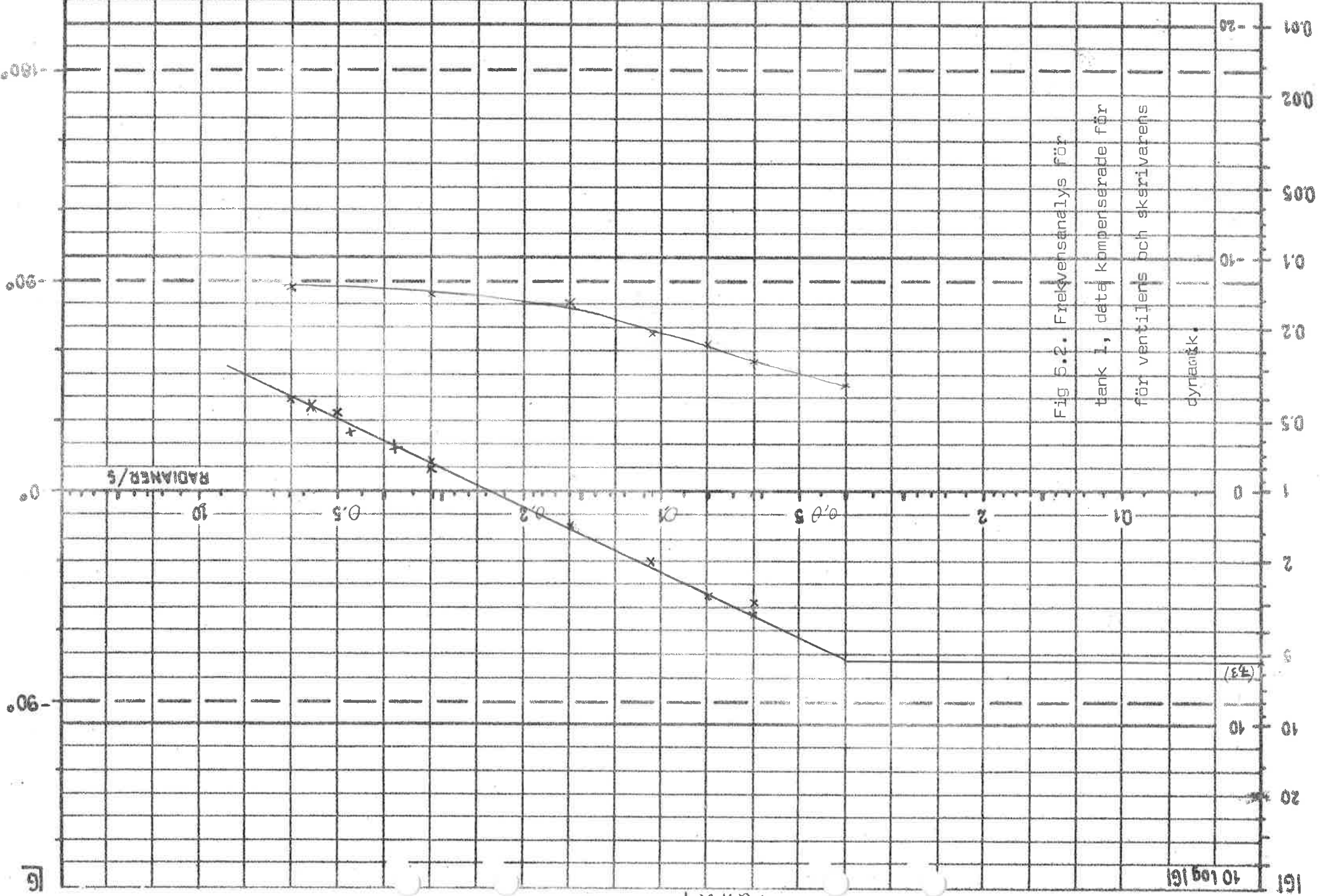


Fig 5.2. Frekvensanalys för tank 1, data komparerade för för ventillens och skrivarens dynamik.

Tank 1

-180° 210

-90° 150

0° 50

90°

16

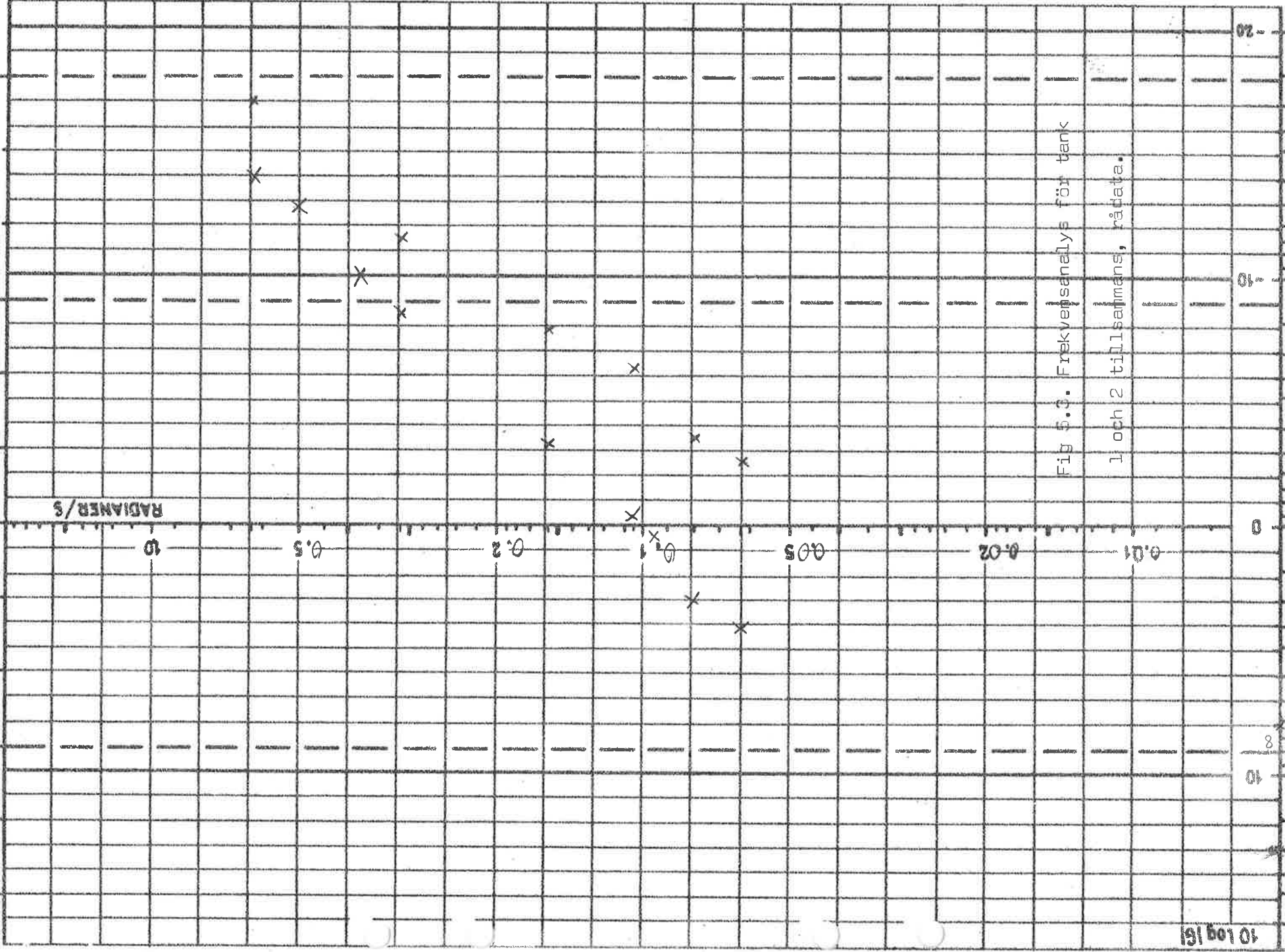


Fig 5.3. Frekvensanalys för tank 1 och 2 tillsammans, rådata.

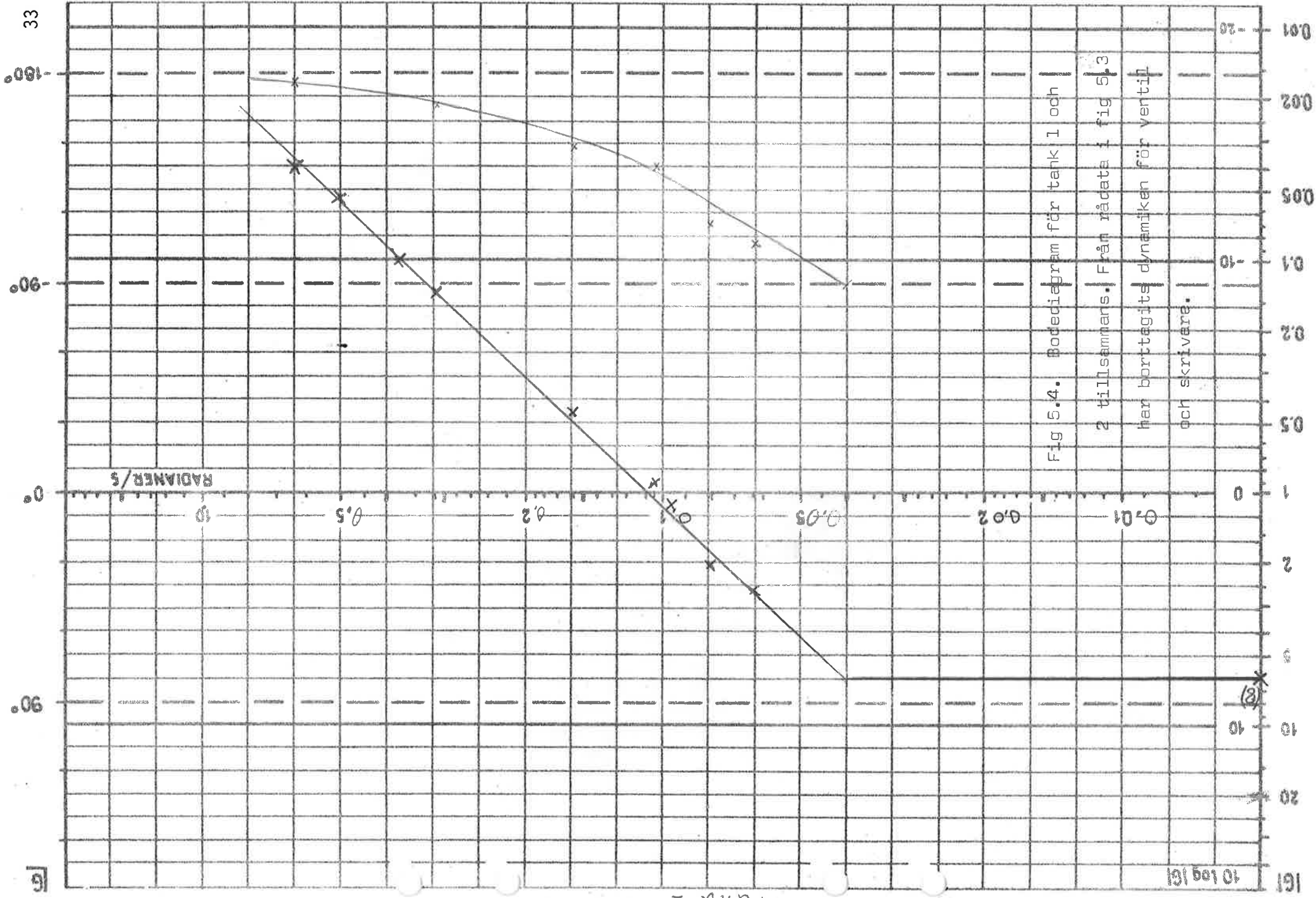


Fig 5.4. Bodediagram för tank 1 och 2 tillsammans. Från rådata i fig 5.3 har borttagits dynamiken för vertikal och skrivare.

## 5.2. Frekvensanalys av varmluftssystemet

Vid frekvensanalys av PT 326 Process Trainer (måtläge II", ventil-  
öppning 30°) erhöles ett Bodediagram (fig. ) som visade på ett andra  
ordningens system.

Tidskonstanterna har en storlek på c:a 0.25 s (brytfrekvenserna  
är ungefär lika med 4 rad/s), och ligger så nära varandra att  
de inte kan åtskiljas med hjälp av diagrammet. Eftersom brytfrekvenserna  
är så lika borde färförskjutningen för denna frekvens vara c:a 90°,  
diagrammet visar emellertid en extra fas på c:a 65° vilket motsvarar  
en tidsfördröjning på ungefär 0.3 s.

En överföringsfunktion för systemet bör därför ha formen

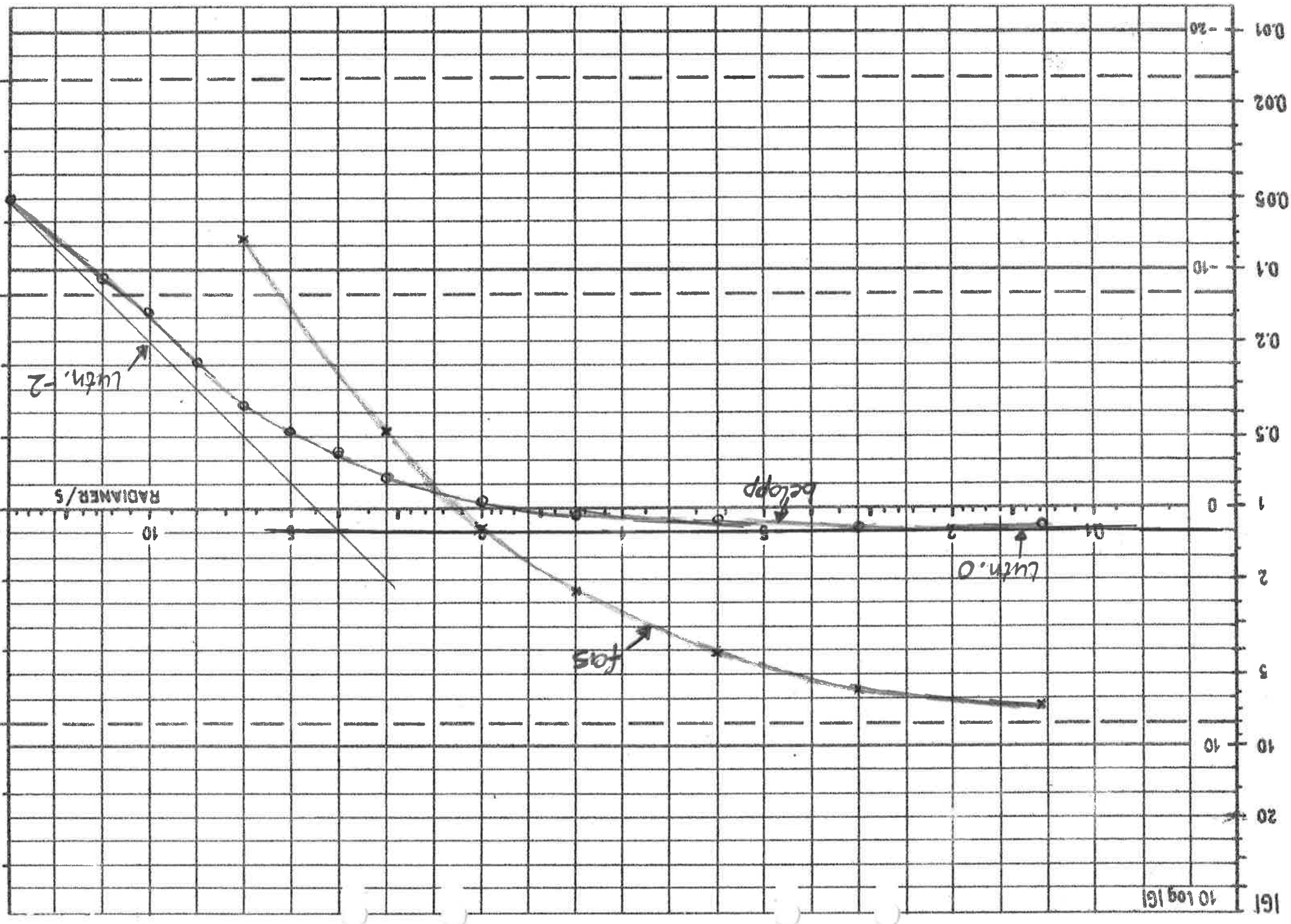
$$G(s) = \frac{K \cdot \exp(-Ls)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad \text{där}$$

$$K \approx 1.1/16 \approx 0.069$$

$$L \approx 0.3 \text{ s}$$

$$T_1 \approx T_2 \approx 0.25$$

Fig 5.5. Bodediagram erhållt vid frekvensanalys av varmluftssystemet (läge 11", 30° öppning)



## 6. STEGSVARSANALYS

I stegsvarsanalysen har gjorts en uppskattning av framför allt tidskonstanterna i systemen. Experimenten på tank-systemet redovisas i 6.1 och på varmluftsaggregatet i 6.2. Resultaten skall jämföras med dem som erhållits vid härledning av modellekvationerna, kap 3 och 4, och vid frekvensanalysen, kap 5.

### 6.1 Tanksystemet

Stegsvarsanalys har utförts för tank 4 och tank 2. För att isolera tankarnas stegsvar ur mätningarna har vi mätt kringnivån 50%. Från denna nivå har vi påfört en liten flödesändring in i processen. Steget består av en liten ändring av styrspänningen till inloppsventilen. Stegsvaret togs upp med en skrivare och ur de erhållna diagrammen beräknade vi tankarnas tidskonstanter. För tank 1 erhöll vi vid ökning av flödet tidskonstanten 23s och vid flödesminskning 20s. Se figur 6.1 På samma sätt erhölls för tank 2 vid flödesökning 46s och vid flödesminskning 40s. Vid mätningarna konstaterade vi att ventilt potentiometrarna är väldigt grova i inställning varför två identiskt lika stora steg ej kan utföras i praktiken. De teoretiska värdena på tidskonstanterna i kapitel 4 är för tank 1 6.4s och för tank 2 11.7s. Skillnaden förklaras av att rören i processen är böjda och har flera kopplingar, vilket reducerar den effektiva flödesarean varvid tidskonstanten ökar.

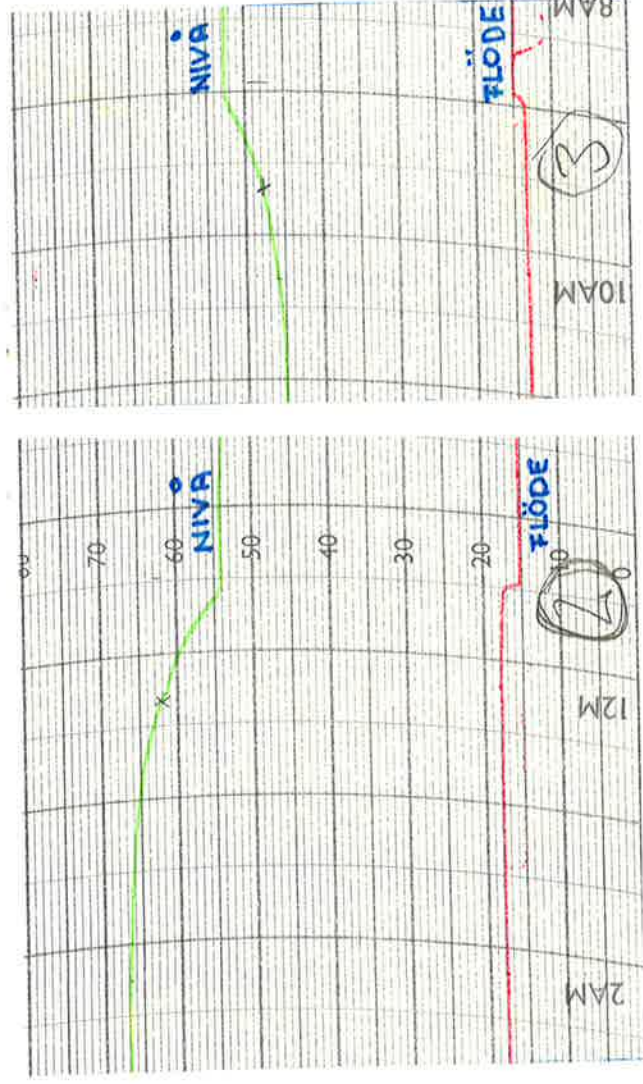


Fig. 6.1. Stegsvarexperiment med tank 1.

## 6.2. Stegsvarsanalys

Vid en grundinställning motsvarande börvärdet  $30^{\circ}\text{C}$ , pålades ett steg på 2.5 V (motsvarande  $6^{\circ}\text{C}$ ), stegsvar togs upp för olika ventilöppningar på luftintaget vid olika avstånd från glödtråden.

Följande resultat erhöles:

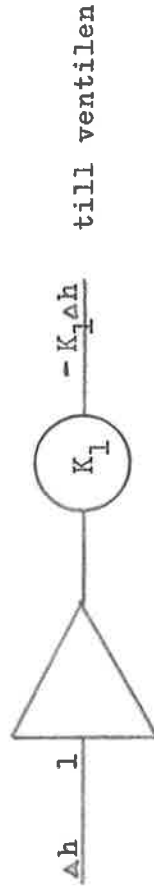
- a) vid mätning av temperaturen i de olika mätpunkterna visade det sig att, vid i övrigt samma förhållanden, temperaturen och tidsfördröjningen ökade med ökat avstånd från värmekällan
- kommentar: tidsfördröjningsökningen är självklar, men det något förvånande resultatet av temperaturmätningen (verifierat med kvicksilvertermometer) kan möjligen förklaras av en olikformig uppvärmning av luften i rörets tvärsnitt i kombination med temperaturlagningens placering
- b) ökad ventilöppning medför lägre temperatur pga det ökade luftflödet, samt en minskning av tidsfördröjningen beroende på den ökade lufthastigheten
- c) vid begynnelsevärdet  $36^{\circ}\text{C}$  och med ett negativt steg av samma storlek, erhöles i princip spegelvända kurvor
- kommentar: resultatet indikerar ett linjärt system, dvs superpositionsprincipen gäller
- d) tidskonstanterna varierade kring 0.2 s, vilket kan jämföras med frekvensanalysens erhållna värde på c:a 0.25 s
- e) tidsfördröjningen uppmättes till 0.05-0.20 s beroende på temperaturlagningens placering, detta överensstämmer någorlunda med resultatet av frekvensanalysen som för mätpunkten 11" och ventilöppningen  $30^{\circ}$  visade på en tidsfördröjning på 0.3 s

## 7. ÅTERKOPPLING MED PID-REGULATOR

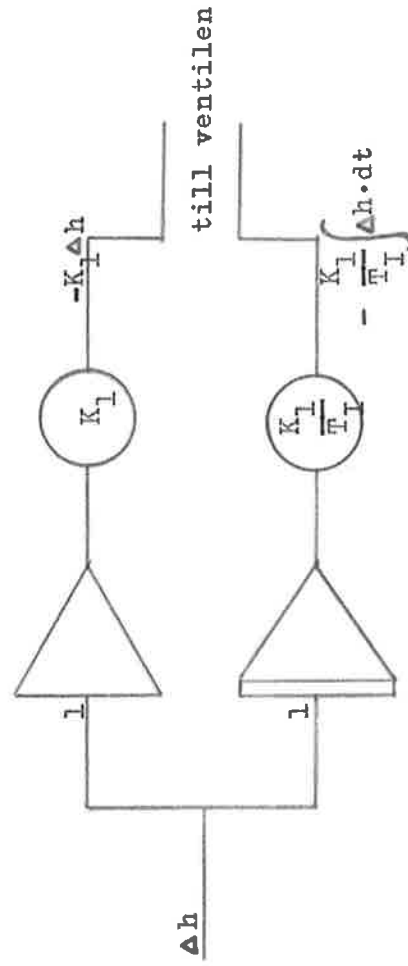
Reglering med PID-regulator har utförts i två etapper. I den första etappen hade inga beräkningar på systemdynamiken gjorts. Rent intuitiva inställningar gjordes för att lära känna inverkan av de olika knapparna på PID-regulatorn, både för tanksystemet och för varmlufts-systemet. I den andra etappen gjordes inställningar, baserade på analys och simuleringar **samt** med Ziegler-Nichols metod.

### 7.1 Simuleringar av tanksystemet

En reglering av de två översta tankarna simulerades på analogmaskinen. Mellan utsignalen från respektive tank och ventilen kopplades dels en P-regulator, dels en PI-regulator enligt figuren nedan.



P-regulator



PI-regulator

Den översta tanken blir aldrig instabil. Man kan med andra ord välja godtyckligt stora  $K_1$ -värden på P-regulatorn.

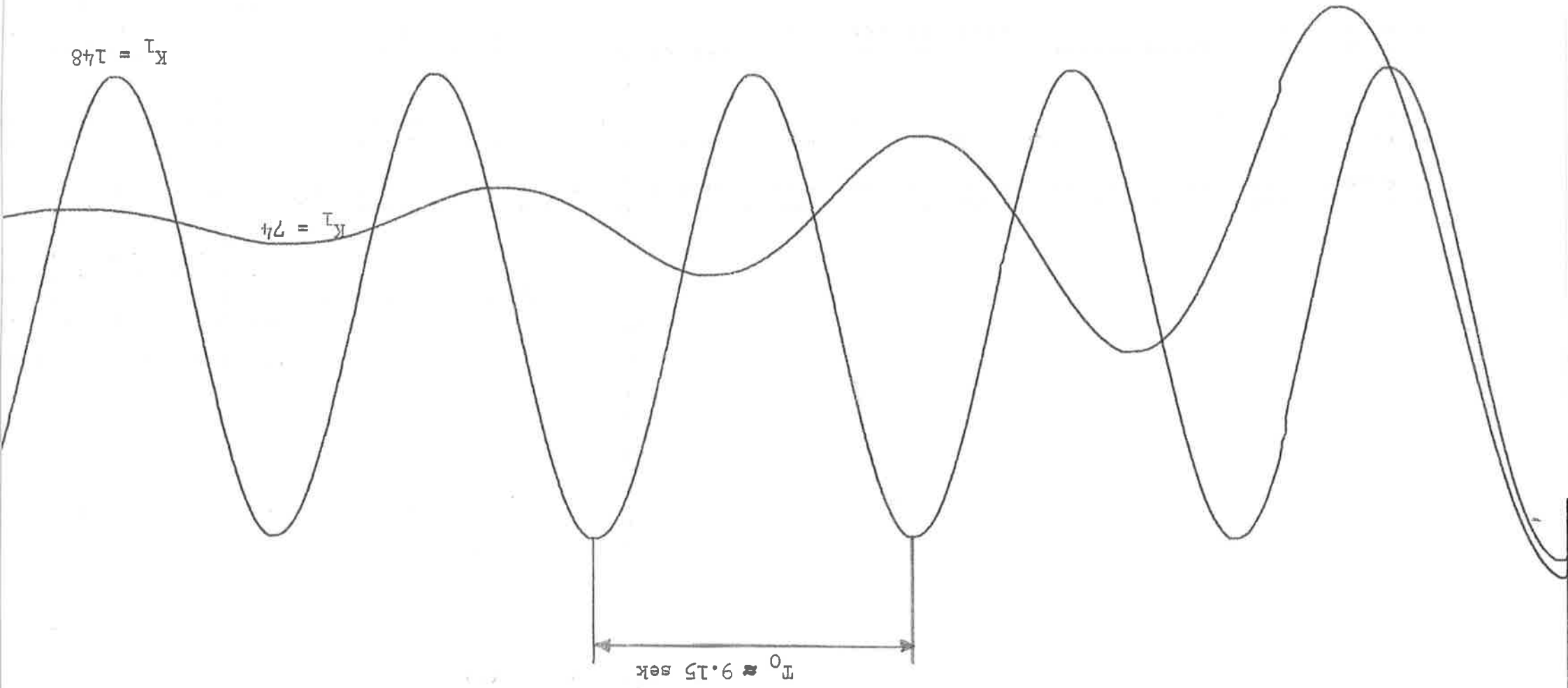
Eftersom man inte har någon kritisk förstärkning kan man inte ställa in någon PI-regulator enligt Ziegler-Nichols metod.

Den andra tanken går däremot att ställa in med Ziegler-Nichols metod. I figur 7.1 framgår att den kritiska förstärkningen blir  $K_1 = K_{\max} = 148$  ( enbart P-regulator ). Om enbart P-regulator användes skall  $K_1$  väljas till  $0.5 \cdot K_{\max}$  dvs 74. Processens förlopp vid denna förstärkning finns också upprättad i figur 7.1.

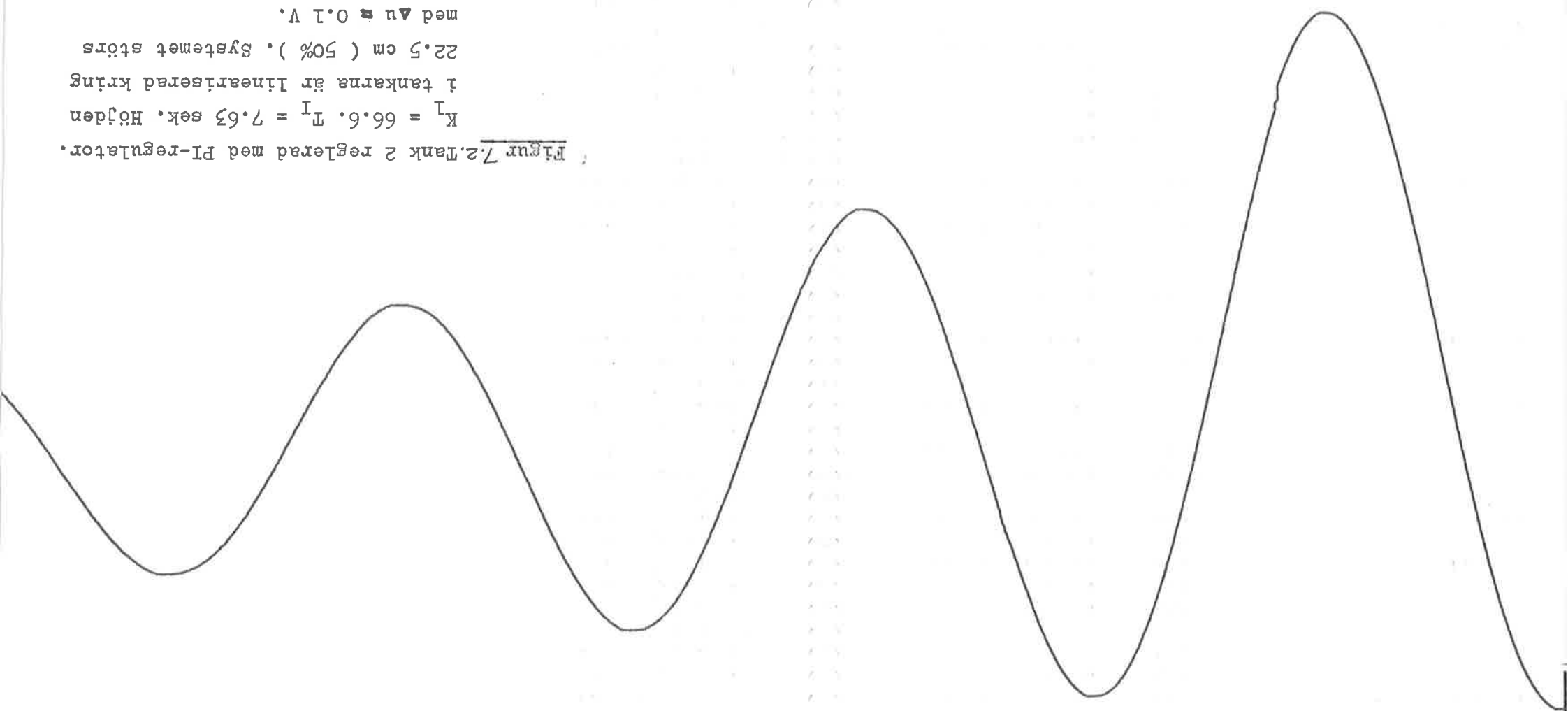
Om PI-regulator användes skall  $K_1$  väljas till  $0.45 \cdot K_{\max}$  dvs c:a 66.6.  $T_I$  skall vara  $T_0/1.2$ , där  $T_0$  är periodtiden då förstärkningen med enbart P-regulator är  $K_{\max}$  ( se figur 7.1 ).  $T_I$  blir c:a 7.63 sek. Processens förlopp vid denna regulatorinställning framgår av figur 7.2.

störns med  $\Delta u \approx 0.1$  V.  
kring 22.5 cm (50%). Systemet  
Höjden i tankarna är lineariserad  
Förstärkningen  $K_1 = 148$  resp. 74.

Figur 7. Tank 2 reglerad med P-regulator.



Figur 7.2. Tank 2 reglerad med PI-regulator.  
 $K_I = 66.6$ .  $T_I = 7.63$  sek. Höjden  
i tankarna är lineariserad kring  
22.5 cm (50%). Systemet störs  
med  $\Delta u = 0.1$  V.



## 7.2 Praktiska inställningar av PID- regulatorn för tanken

Systemet bestående av ventil och två tankar har återkopplats med en PI-regulator. Zeigler-Nichols metod har använts för att få en god första inställning av regulatorn.

Praktiska mätningar ger:

$$K_{\max} = 173$$

$$T = 41,0 \text{ sek}$$

Enligt Zeigler-Nichols schema för inställning av en PI-regulator blir således inställningen:

$$K = 0.45 K_{\max} = 78$$

$$T_I = T/1.2 = 34.2 \text{ sek} = 0,57 \text{ min.}$$

Då Z-N värdena endast är en form av fingervisningsvärden så provade vi oss med dessa som utgångsvärden fram till en något sånär optimal inställning vilken erhöles för :

$$K = c:a 90$$

$$T_I = 1.50 \text{ min}$$

Det vill säga vi ökade förstärkningen något, medan vi minskade integreringens inverkan något för att få en något mera dämpad insvängning vid störningar.

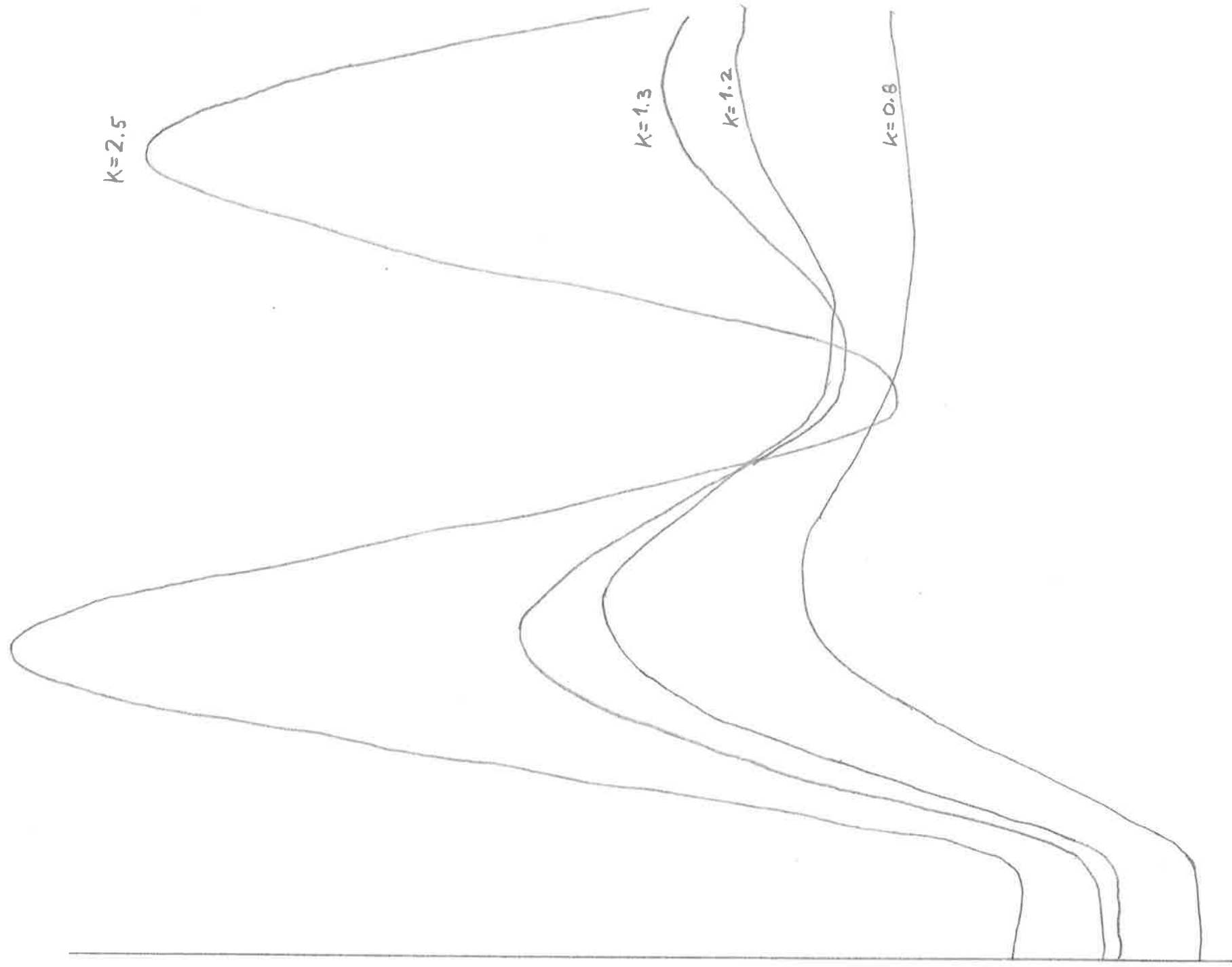
Jämför vi dom här erhållna resultaten med de i avsnitt 7.1 framtagna, så finner vi god överensstämmelse. Se till exempel figur 7.1 och 7.2. Skillnaderna i integreringstiden beror på transportfördröjningar, olineariteter i mätinstrument och ventiler. För övrigt visade sig Z-N metoden vara ett användbart instrument för att få riktmärken vid inställning av en PI-regulator för ifrågavarande system.

### 7.3 Experiment på varmluftssystemet

P-regulator: inställningen gjordes med hjälp av Ziegler-Nichol's metod, vilket gav ett tillfredsställande resultat (se fig 7.3)

PI-regulator: inställningen försökte vi även här göra med hjälp av Ziegler-Nichol's metod, men beroende på en för oss okänd skala på integrationsdelen hänvisades vi till "trial and error"-metoden, resultatet kan skådas i följande diagram (notera skillnaden i stationärt värde, de små variationerna beror på att det pålagda steget ej var konstant emedan det lades på meddelst vridning av en potentiometer

Fig. 7.3. Inställning av regulator för varmluftsaggregatet med Ziegler-Nichols.  
P-regulator: Ziegler-Nichol's metod



## Stegsvar med kommersiell regulator (PI)

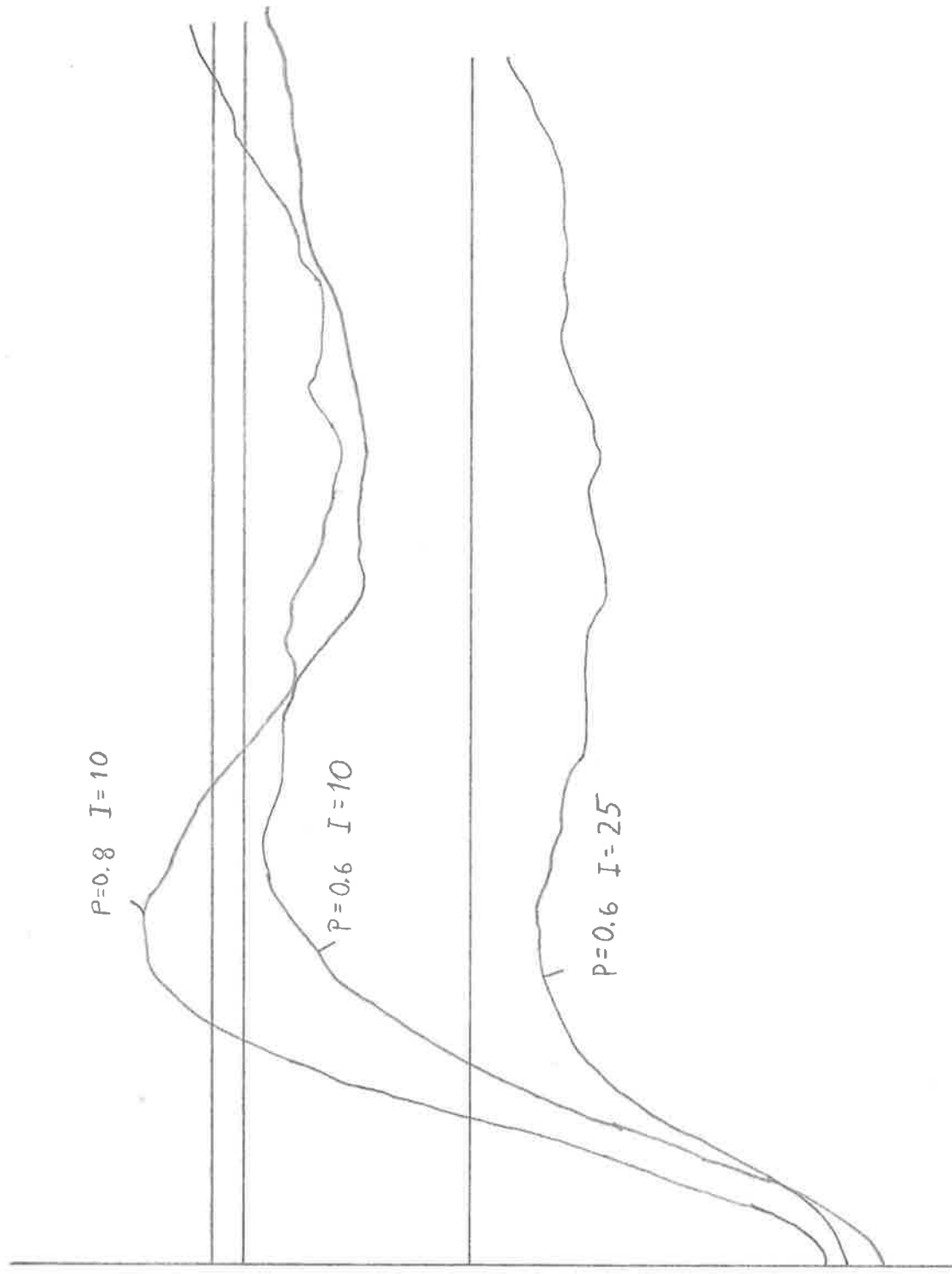


Fig. 7.4. Inställning av regulator för varmluftsaggregatet med Ziegler-Nichols metod.

PI-regulator: Ziegler-Nichol's metod ( $P=3.5$  i samtliga fall)

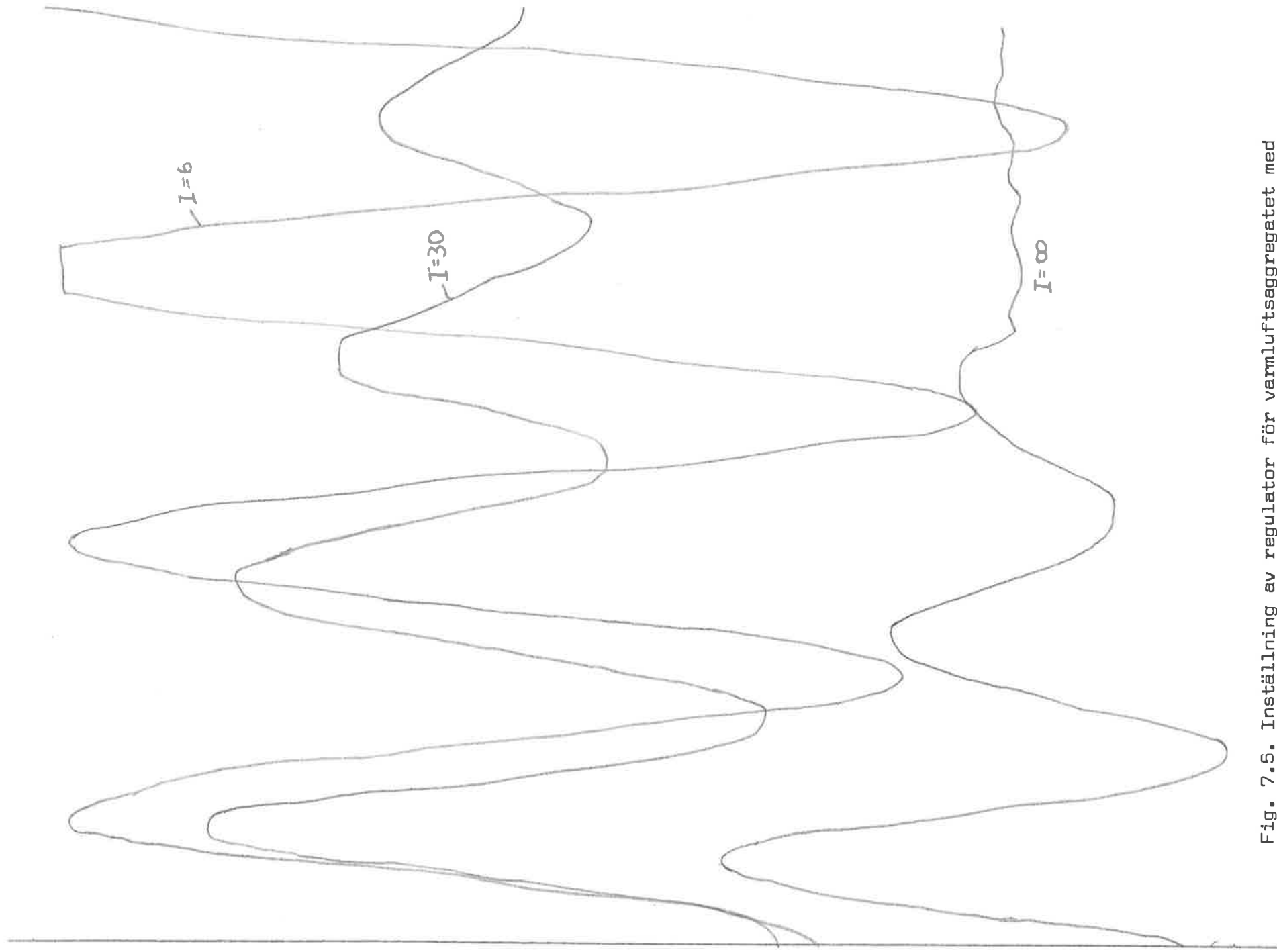
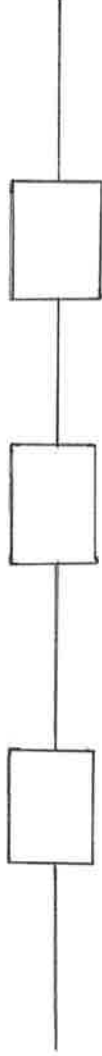


Fig. 7.5. Inställning av regulator för varmluftsaggregatet med Ziegler-Nichols metod.  $P$  konstant.

## 8. REKONSTRUKTION MED KALMANFILTER.



$$\Delta u \quad \frac{K}{1+T_V s} \quad \Delta q_0 \quad \frac{K_1}{1+T_1 s} \quad \Delta h_1 \quad \frac{K_2}{1+T_2 s} \quad \Delta h_2$$

Insignal till ventilen  $\Delta u$

Venti1  $K/1+T_V s$

Flöde  $\Delta q_0$

Tank 1  $K_1/1+T_1 s$

Nivå i tank 1  $\Delta h_1$

Tank 2  $K_2/1+T_2 s$

Utsignal=nivå i tank 2  $\Delta h$

Fig: Process plask och pys.

Systemets ekvationer blir skrivna på matrisform med  $\Delta q_0$ ,  $\Delta h_1$  och  $\Delta h_2$  [dm /s, dm, dm] som tillstånd och  $\Delta h_2$  som utsignal.

$$\dot{\hat{x}} = \begin{pmatrix} -1/T_V & 0 & 0 \\ K_1/T_1 & -1/T_1 & 0 \\ 0 & K_2/T_2 & -1/T_2 \end{pmatrix} \hat{x} + \begin{pmatrix} K/T_V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta u \quad \hat{y} = \begin{pmatrix} \Delta q_0 \\ \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \end{pmatrix}$$

$$y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0,933 \end{pmatrix} x$$

där 0,933 är en skalning av utsignalen.

Konstanter:

|        |              |              |
|--------|--------------|--------------|
| Venti1 | $K = 0,01$   | $T_V = 0,20$ |
| Tank 1 | $K_1 = 23,8$ | $T_1 = 4,76$ |
| Tank 2 | $K_2 = 1,11$ | $T_2 = 5,26$ |

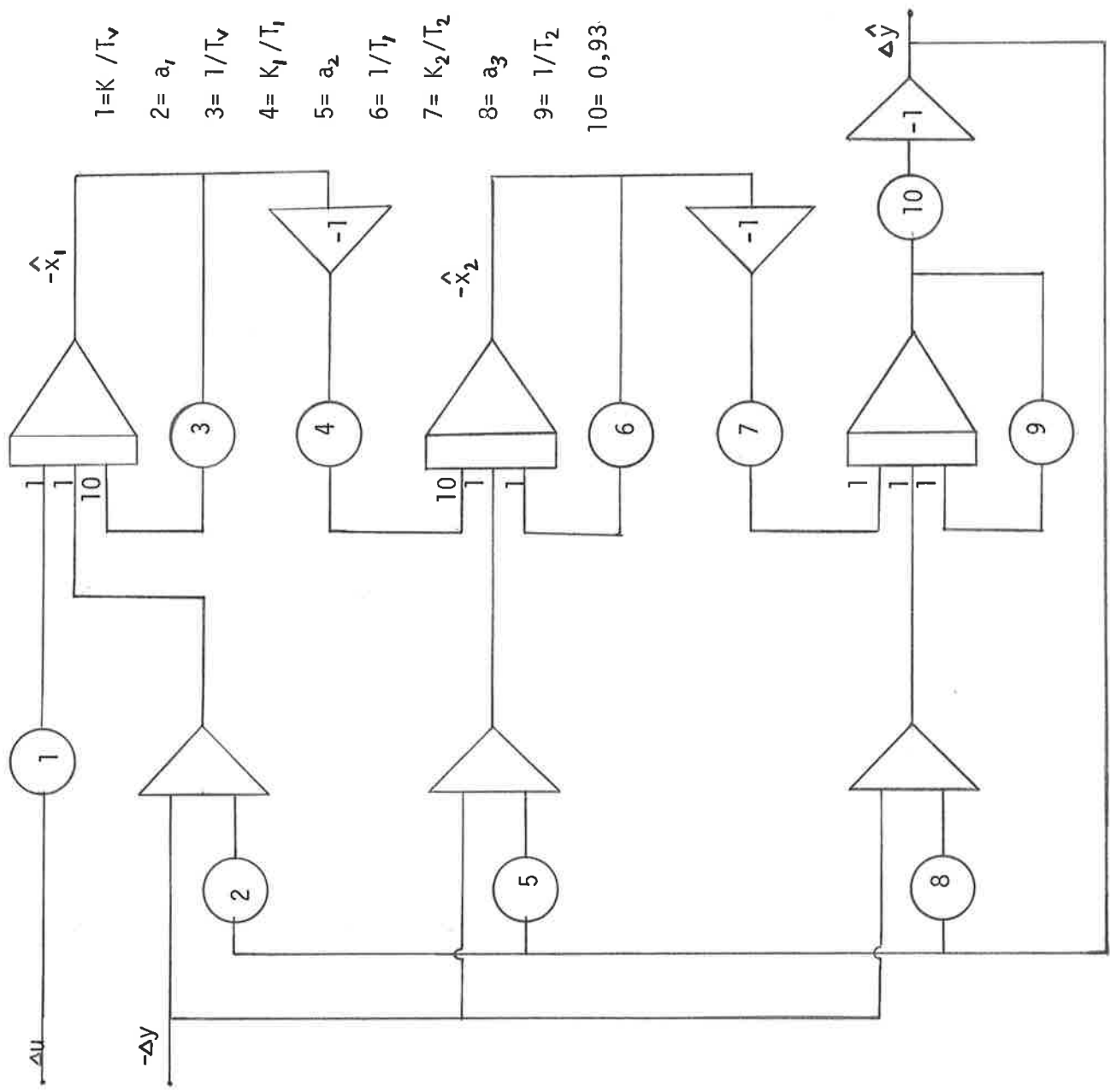
Återkoppling med vektorn  $K = (a_1, a_2, a_3)^T$  i vårt  
rekonstruerade system  $\dot{\hat{x}} = (A - KC)\hat{x} + B\Delta u + K\Delta y$  ger

$$\dot{\hat{x}} = \begin{pmatrix} -1/T_v & 0 & -0,933a \\ K_1/T_1 & -1/T_1 & -0,933a \\ 0 & K_2/T_2 & -1/T_2 - 0,933a \end{pmatrix} \hat{x} + \begin{pmatrix} K/T_v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta u + \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \Delta y \\ a_3 \end{pmatrix}$$

Vid analogmaskinuppkopplingen nästa sida användes följande potentiometerinställningar.

- Pot. 1 = 0,053
- Pot. 2 = 0,001
- Pot. 3 = 5,000
- Pot. 4 = 5,000
- Pot. 5 = 0,040
- Pot. 6 = 0,210
- Pot. 7 = 0,210
- Pot. 8 = 0,214
- Pot. 9 = 0,190
- Pot. 10 = 0,933

Sorten är dm/s



- 1=K / T<sub>v</sub>
- 2= a<sub>1</sub>
- 3= 1/T<sub>v</sub>
- 4= K<sub>1</sub>/T<sub>1</sub>
- 5= a<sub>2</sub>
- 6= 1/T<sub>1</sub>
- 7= K<sub>2</sub>/T<sub>2</sub>
- 8= a<sub>3</sub>
- 9= 1/T<sub>2</sub>
- 10= 0,93

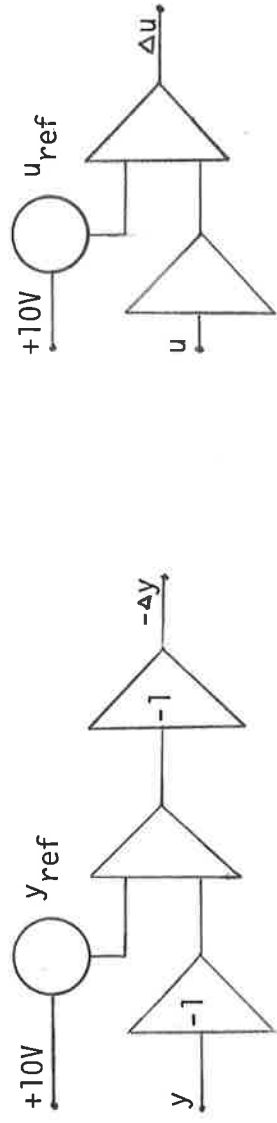


Fig: 8.1. Analogmaskinupkoppling.

Om man ställer in potentiometrarna med följande ändringar:

$$\text{Pot. 1} = (K_1/T_1)3 = 0,159$$

$$\text{Pot. 4} = (K_1/T_1)2 = 10$$

$$\text{Pot. 7} = (K_2/T_2)3 = 0,63$$

erhålles bättre överensstämmelse med utsignalens verkliga värde. Man får då maximalt 0,1 V fel, troligen på grund av obalans i förstärkarna. En felaktig uppkoppling där  $\Delta y$  multiplicerades med 0,933 kan även ha inverkat.

Insvängningstiden vid ett steg på 15% av stationära värden vid olika värden på  $a$ . Om man lade polerna i (-0,3, -0,3, -5) fick man  $a$ -värden ( 0.001, 0.040, 0.214 ) och en insvängningstid på ca. 13s.

Polerna i (-1, -1, -5 ) ger  $a$ -värden (-0.31, 3.47, 1.71 ) med en insvängningstid på ca. 3s.

Polerna i (-2,-2,-6 ) ger  $a$ -värden (9.5, 10.21, 4.93 ) med en insvängningstid på ca. 1s. Insvängningen hade dock en tendens till översläng. Eftersom 10V är max. spänning i analogi-maskinen kunde polerna ej läggas längre till vänster i det vänstra halvplanet.

## 9. SLUTSATSER

Både tanksystemet och varmluftsaggregatet visar upp egenskaper som inte kan beskrivas som linjära fenomen.

I tanksystemet måste ventilens dynamik linjäriseras kring ett lämpligt flöde. Ventilkaraktistiken är svår att bestämma noggrant, eftersom flödet genom ventilen är besvärligt att fastställa, speciellt vid större flöden.

Det visade sig, att tidskonstanterna för tankarna fastställdes till betydligt större värden vid stegsvarexperiment och frekvensanalys än vid teoretiska modellbyggnaden. En rimlig förklaring är, att effektiva tvärsnittsarean för slangarna som förbinder tankarna är betydligt mindre än den fysiska arean som mättes upp.

Vid frekvensanalysen framgick det, att fasförskjutningen är större än väntat. En rimlig förklaring är, att det förekommer transportfördröjningar i systemet. Detta är rimligt, eftersom vattenflödet behöver en viss tid att rinna från ventilen till den första tanken.

I varmluftssystemet erhöles vissa mätresultat, vilka verkar underliga, speciellt detta att temperaturen ökar mot utloppet av röret. Det är tydligt, att flera fenomen måste tas med i beräkningen då en noggrann modell skall göras. Turbulensen av luften och kalibreringen av mätarna spelar här en viktig roll.

## 10. ERFARENHETER AV ARBETET

Projektgruppen har varit helt frivillig och ingått som en del i Reglerteknik AK. Vi tycker att frivilligheten är bra.

Vi har haft vissa praktiska problem och har saknat lämpliga manualer att tillgripa för att handskas bättre med apparaturen. Likaså har det varit besvärligt att samsas om apparatur med laborationsgrupper i de ordinarie laborationerna, t ex oscilloskop och analogmaskiner.

Vi har fått se att teorin kan användas för att beskriva verkliga fenomen. Ämnet är därför inte längre "obegripligt och skrämmande". Genom arbetet har vi dessutom fått en fin kontakt med institutionen.

Det vore säkert bra om vissa delar av vad vi gjort i gruppen kunde vara med i laborationerna.

För M-teknologerna kändes det svårt att göra elektriska kopplingar alltför mycket på egen hand. Vi har för dålig förberedelse för detta.