



LUND UNIVERSITY

Ångpannereglering

Andersson, Bertil; Andersson, Göran; Axelsson, Bengt; Bergkvist, Erik; Bohman, Thomas; Bäckström, Peter; Cronholm, Lars-Åke; Dufva, Leif; Engman, Hans; Gupta, B.N.; Jönsson, Arne; Persson, Hans; Lars, Persson; Olsson, Olle; Ottosson, Henry

1974

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Andersson, B., Andersson, G., Axelsson, B., Bergkvist, E., Bohman, T., Bäckström, P., Cronholm, L.-Å., Dufva, L., Engman, H., Gupta, B. N., Jönsson, A., Persson, H., Lars, P., Olsson, O., & Ottosson, H. (1974). *Ångpannereglering*. (Technical Reports TFRT-7064). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
15

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

ÅNGPANNEREGLERING

BERTIL ANDERSSON
GÖRAN ANDERSSON
BENGT AXELSSON
ERIK BERGKVIST
THOMAS BOHMAN
PETER BÄCKSTRÖM
LARS-ÅKE CRONHOLM
LEIF DUFVA
HANS ENGMAN
B.N. GUPTA
ARNE JÖNSSON
HANS PERSSON
LARS PERSSON
OLLE OLSSON
HENRY OTTOSSON

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET

UTLÅNAS EJ

Rapport 7408(C) April 1974
Lund Institute of Technology
Division of Automatic Control

ÅNGPANNEREGLERING

PROJEKTGRUPP 1973

Bertil Andersson
Göran Andersson
Bengt Axelsson
Erik Bergkvist
Thomas Behman
Peter Bäckström
Lars-Åke Cronholm
Leif Dufva
Hans Engman
B.N. Gupta
Arne Jönsson
Hans Persson
Lars Persson
Olle Olsson
Henry Ottosson

INNEHÅLL

I REGLERING AV ÅNGKRAFTANLÄGGNINGAR ALLMÄNT

II REGLERING AV EN ÅNGKRAFTANLÄGGNING GRUNDAT
PÅ SIMULERING AV EN OLINJÄR MODELL AV
K.J. ÅSTRÖM & K. EKLUND

III ANALYS OCH REGLERING AV EN 1: A ORDNINGENS
LINJÄR MODELL ERHÅLLEN UR DEN OLINJÄRA
MODELLEN

REGLERING AV ÅNGKRAFTVERK

Ett ångkraftverk är en mycket komplicerad anläggning (fig. 1.) med ett flertal regler-loopar, som alla är beroende av varandra. Om man ändrar någon storhet i "ena änden" i ett verk får detta efter ett tag konsekvenser för andra storheter i hela verket. Man kan köra upp ett verk till toppeffekt på t.ex. 120 min. men innan man har nått driftpunkten d.v.s. bästa verkningsgrad och då alla storheter har stabiliserat sig, har det gått ytterligare ca 2-3 timmar.

Då det gäller att ge några siffror på hur lång tid det tar att starta upp ett verk beror detta till stor del på i vilken situation man tänker använda verket. Begrepp som spetslast, mellanlast och grundlast ligger till grund för hur man skall dimensionera, bygga och driva sitt verk. Figur 2-7 är exempel på olika uppstartningssituationer.

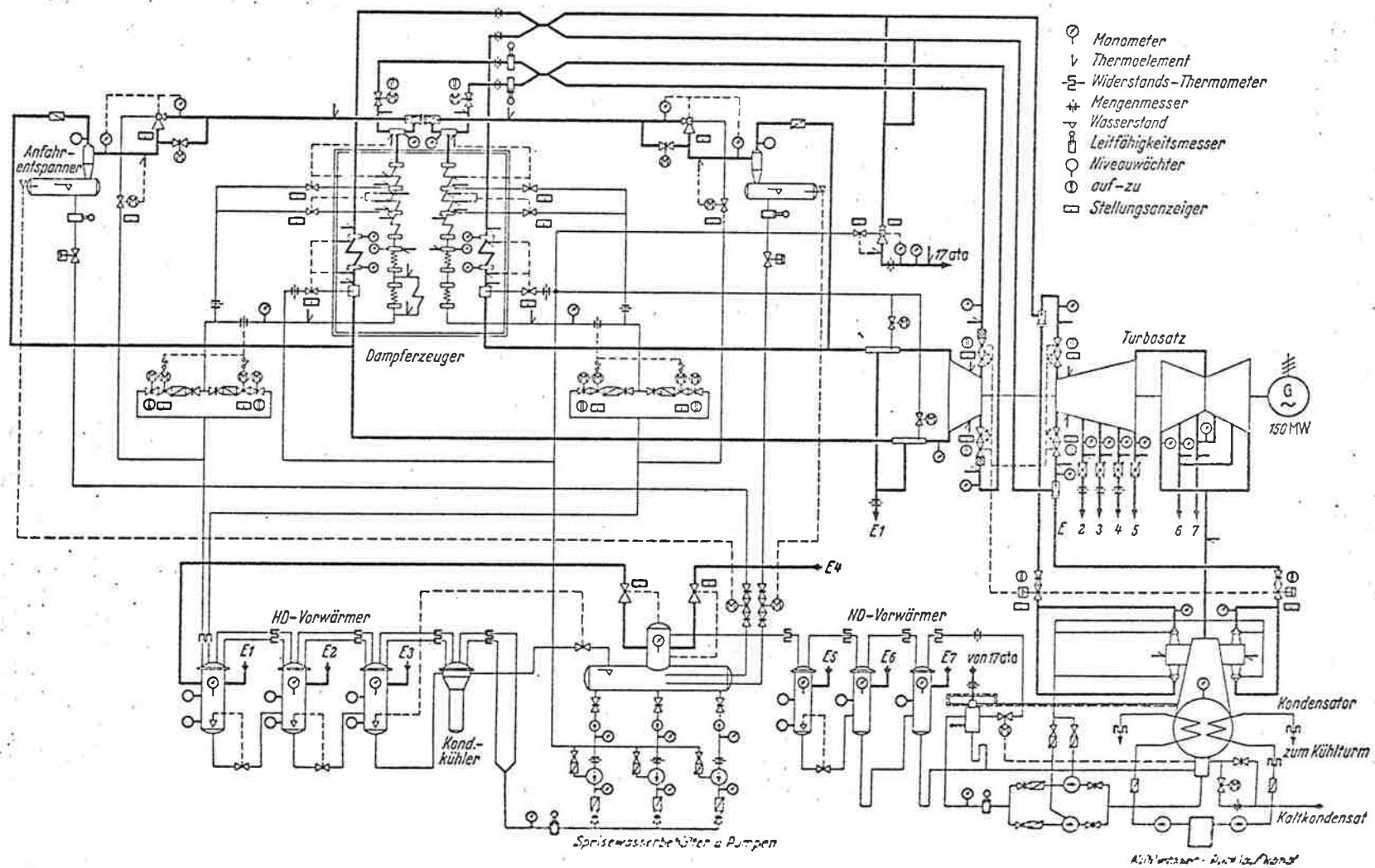


Abb. 74 Modifikation des Systems Fortuna, 3. Ausführung

Ungefärligt tidsprogram för programmerad varmstart

Utgångstillstånd Panntryck ca 110 atö → 180 atö
Turbinen baxas
Panncirkulationspumpar i drift

Den automatiska uppstartningen av blocket följer efter inställning av lastbörvärde och tillkoppling av block-automatiken i stort nedanstående tidsschema:

1-6 min	Eldrivna matarvattenpumpen startar. Oljeförvärmningen påbörjas. Luftfläktar startar. Rökgasfläktar startar. Kylvattenpumpar startar. Kondensatpumpar startar. Vacuumupptagning påbörjas.
6-10 min	Luftning av eldstaden. Tändning av brännare.
10-16 min	By-pass drift. Dränering av ångledningar. Dränering av turbin. Uppkörning av matarpumpturbin.
16-20 min	Uppkörning av huvudturbin.
20-21 min	Spänningsupptagning. Förberedelser för fasning.
21-22 min	Infasning.
22-40 min	Lastpåläggning med ca 20 MW/min.

I verkligheten sker den fast programmerade uppstartningen av blocket i 157 steg, vilket motsvarar ca 500 manövrar. Ca 700-800 avfrågningar av diverse kriterier angående blockets drifttillstånd sker parallellt härmed.

Fig 2.

Anfahrzeit bis auf Vollast

Stillstand

4 h (Mittagsstillstand)	15 min
14 h (Nachtstillstand)	30 min
60 h (Wochenendstillstand)	60 min

Tafel 1: Geschätzte Anfahrzeiten bis Nennleistung für einen 150-MW-Spitzenlastblock

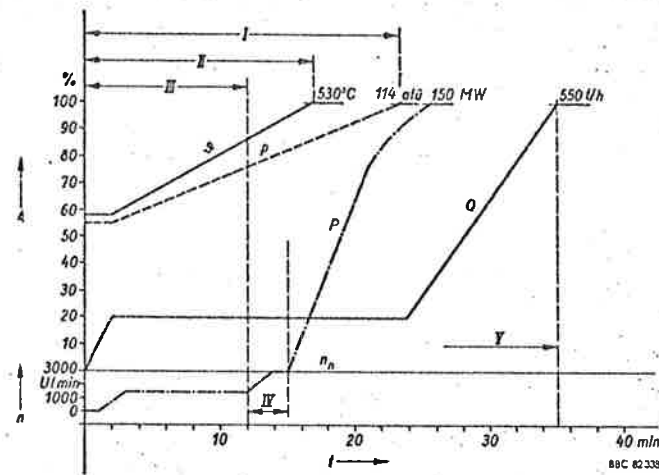


Fig 3

Bild 4: Schematisches Anfahrtdiagramm für einen 150-MW-Spitzenlastblock mit 111 ata/525°C vor der Turbine und Naturumlaufofessel nach einem Nachtstillstand

- P = Leistung
- t = Anfahrzeit
- n_n = Turbinennendrehzahl
- θ = Frischdampf Temperatur
- p = Frischdampfdruck
- Q = Frischdampfmenge
- I = Zeit bis zum Kesselnenddruck
- II = Zeit bis zur Kesselnentemperatur
- III = Hochfahren des Kessels auf 450°C und Zuschalten der Turbine
- IV = Hochfahren und Synchronisieren der Turbine
- V = Zeit bis Nennlast
- A = Prozentuale Belastung

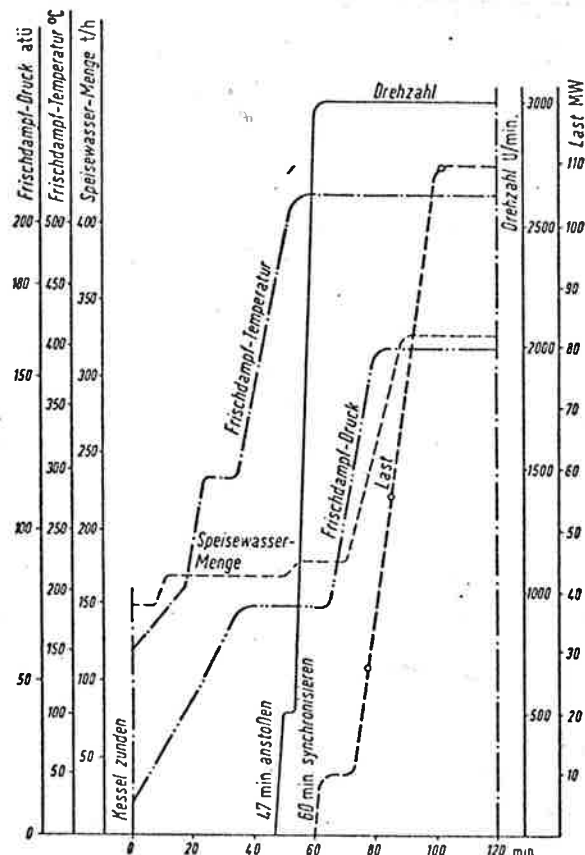


Fig 4.

Abb. 155. Anfahrtdiagramm für 110 MW-Block, Warmstart

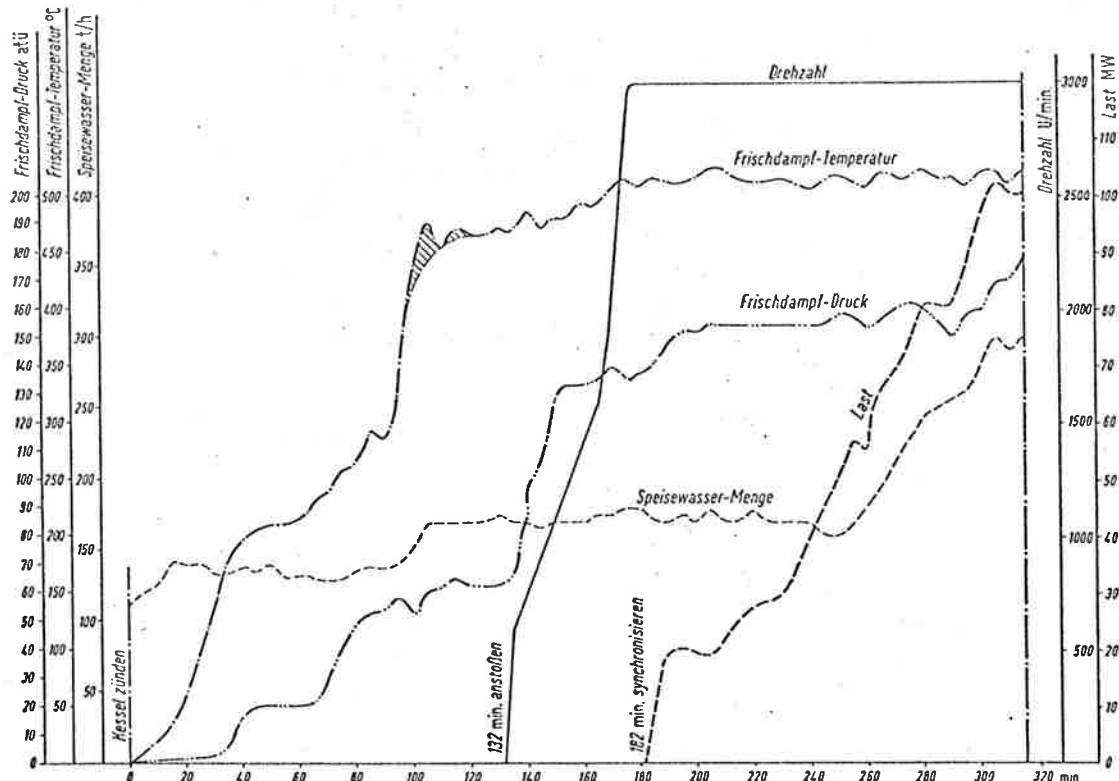


Abb. 153. Anfahrtdiagramm für 110 MW-Block, Kaltstart nach Betriebsaufzeichnungen

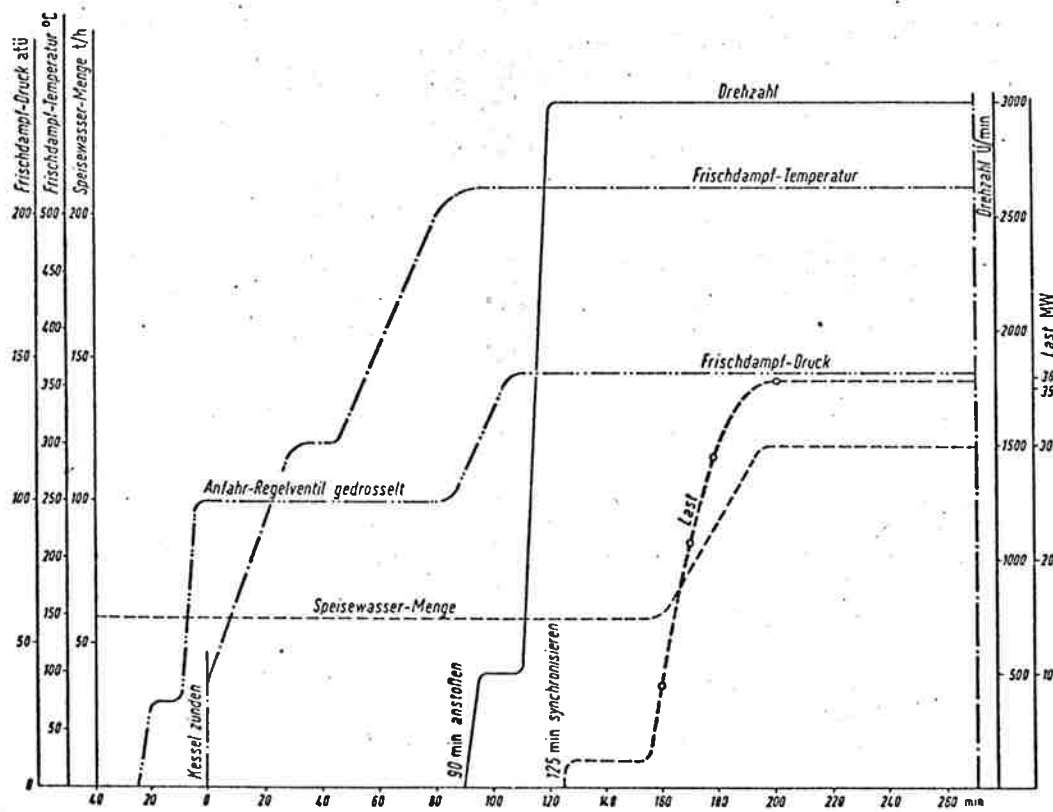


Abb. 154. Anfahrtdiagramm für 36 MW-Block, Kaltstart nach Betriebsvorschrift

Fig 506.

OSKARSHAMNSVERKET, G1
TIDSDIAGRAM FÖR START FRÅN KALL
STATION OCH EFFEKTUPPGÅNG TILL
FULL EFFEKT, 460 MW BRUTTO

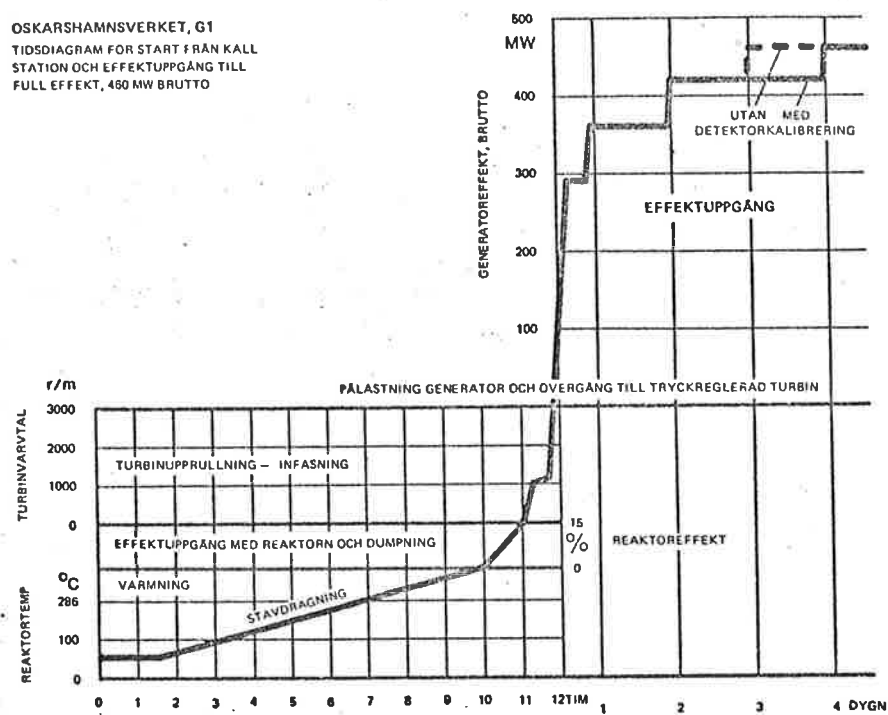


Fig 7.

Reglerkretsar i ett ångkraftverk.

Följande kretsar regleras på pannblocket:

1. Drag i eldstaden
2. Nivå i matarvattebtank
3. Ångtemperatur
4. Oljeflöde, luftflöde
6. Nivå i ångdom

Långsystemet regleras följande kretsar:

7. Ångtryck efter reducerstationen
8. Ångtemperatur efter reducerstationen
9. Temperatur på utgående vatten från direktvärmväxlaren

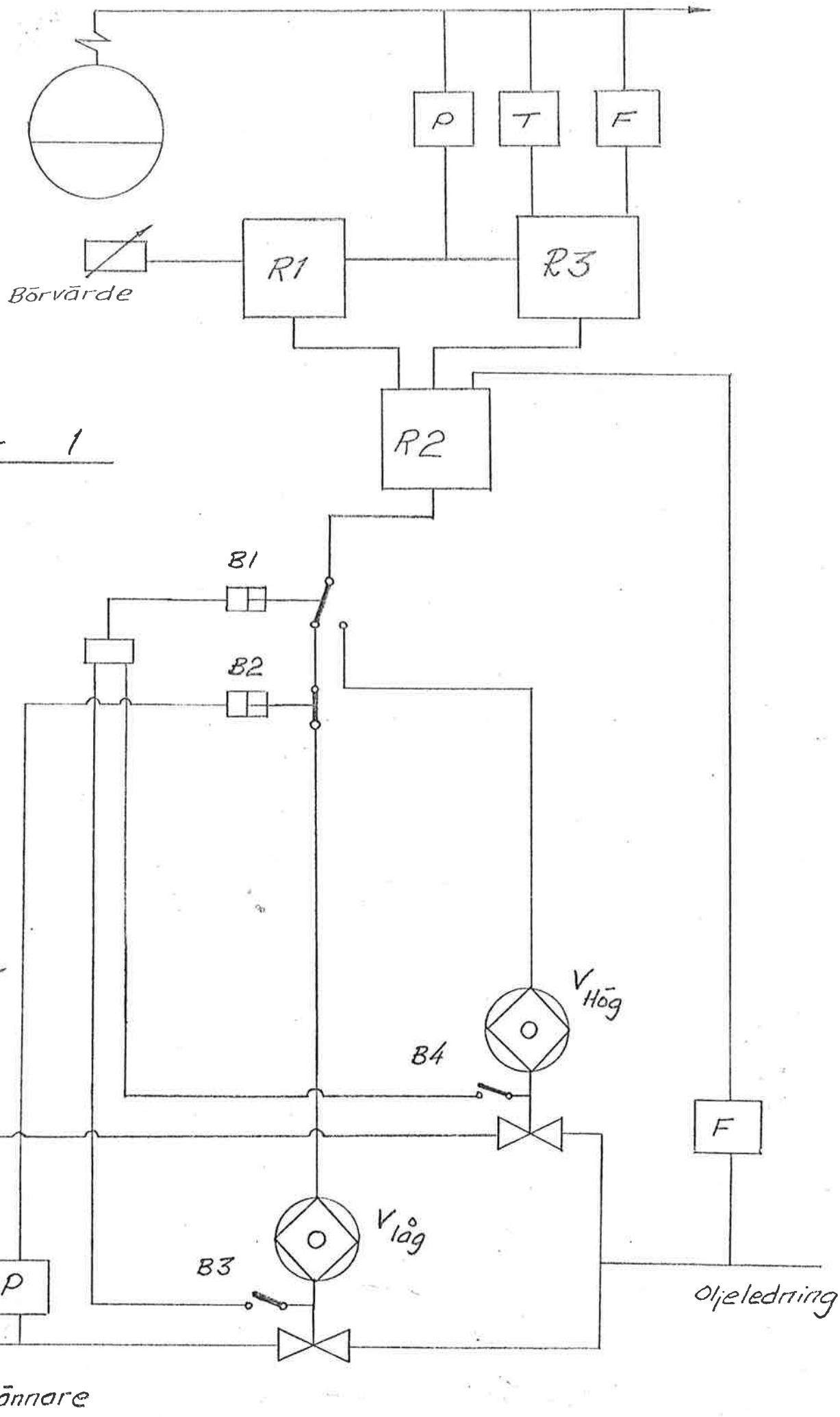
Viser här närmre på reglering av oljeflöde (punkt 4 ovan)

Reglering av oljeflöde (se fig. 1)

Utgående ångans tryck omvandlas i tryckgivaren till en likspänning som i regulatorn R1 jämförs med börvärdet. vid skillnad går signalen vidare till regulatorn R2. I denna inkommer signaler från oljeflöde och kompletterande information om ångtemperatur och ångflöde från R3. Signalen går sedan vidare till oljeventilerna V låg och V hög beroende på brytaren B1:s läge. Genom en tryckgivare på ojeledning ser brytaren B2 till att lågan på brännare låg ej slocknar då vi drar ner eldningen för lågt.

Beskrivning av lastökning: I låglast står brytarens som på fig 1.

Om belastningen ökar sjunker trycket i utgående ånledning. Givaren ger en impuls att öppna V låg. då denna har öppnats slås B3 till och B1 slår över så att V hög kan öppnas och eldningen öppnas till fulllast.



Figur 1

REGLERING AV EN ÅNGKRAFTANLÄGGNING GRUNDAT PÅ SIMULERING AV EN
OLINJÄR MODELL AV K J ÅSTRÖM OCH K EKLUND

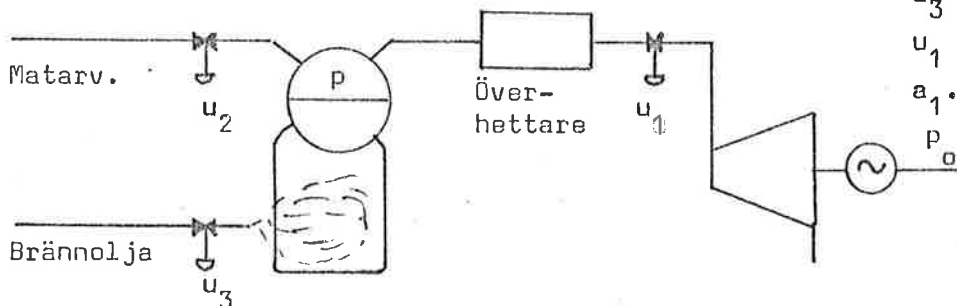
REGLERING AV EN ÅNGKRAFTANLÄGGNING GRUNDAT PÅ SIMULERING
AV EN OLINJÄR MODELL AV K J ÅSTRÖM OCH K EKLUND

Som utgångspunkt för vårt arbete hade vi en olinjär modell av Öresundsverket i Malmö gjord av Å&E av formen:

$$\frac{dp}{dt} = a_1(u_1 p^{5/8} - a_5) + a_2 u_3 - a_3 u_2$$

$$P_o = a_6(u_1 p^{5/8} - a_5)$$

Skiss av panna-turbin arrangemanget



Beteckningar i modellen:

- p domtryck kp/cm^2
- P_o uteffekt MW
- u_2 Matarvattenflöde ton/h
- u_3 Brännoljaflöde ton/h
- u_1 Reglerventilläge %
- $a_1 \dots a_6$ Konstanter

Alla värden på konstanter och driftstillstånd är hämtade från Öresundsverket.

En liten analys av regleruppgifterna

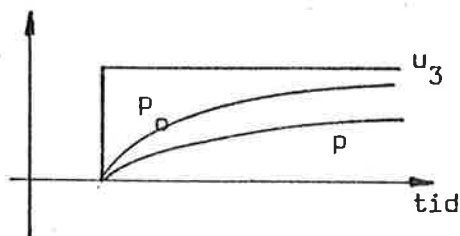
I Domtrycket

Genom en liten litteraturstudie kom vi fram till att man vanligen av konstruktionsmässiga skäl vill hålla domtrycket konstant.

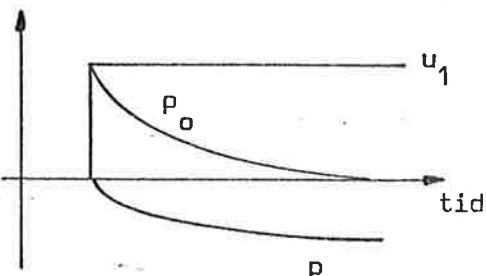
En regleruppgift blir alltså att hålla domtrycket konstant vid olika belastningsfall.

Intressant är nu att studera vad som händer med domtrycket då man varierar på u_1 och u_3 . Ur Å&Es rapport hämtar vi nu stegsvaren för stegökningar på u_1 och u_3 då u_2 är konstant.

Stegsvar för p, P_o $u_2 = \text{konst}$,
 $u_1 = \text{konst}$ och stegökning av u_3



Stegsvar för p, P_o $u_2 = \text{konst}$,
 $u_3 = \text{konst}$ och stegökning av u_1



Man noterar med speciellt intresse att uteffekten i fallet stegökning av u_1 , följer reglerventilen för att sedan sjunka tillbaka till sin ursprungliga nivå exponentiellt. Dvs man har en upplagrad energi i systemet som skulle kunna användas vid snabba regleringar av uteffekten.

Studerar man sedan tryckändringarna i de båda fallen så ser man att tryckfallet vid en stegökning av u_1 har ungefär samma tidskonstant som tryckökningen har vid stegökning av u_3 . Man ser också att samma förhållande gäller för uteffekterna.

Slutsatsen av detta resonemang blir att man skulle kunna öka eller minska uteffekten med en dynamik som enbart är beroende av reglerutrustningen för u_1 , om man inför en framkoppling av P_0 till u_3 . Ett krav som måste vara uppfyllt är för att detta skall vara genomförbart att reglerutrustningen för u_3 kan tillåtas ha en rimlig dynamik. Normalt så reglerar man nämligen eldningen genom att koppla in och ur ett antal brännare, Endast mindre variationer kan göras med brännarnas ventiler då de är inkopplade.

II Matarvattenregulatorn

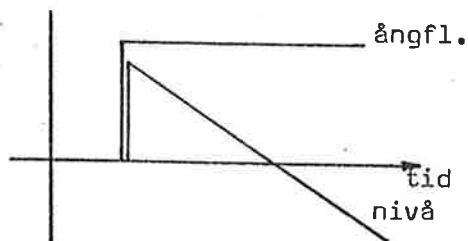
Kraven på denna reglering är att den skall kunna hålla domnivån inom givna toleranser (för Öresundsverket ± 10 cm) vid variationer i ånguttaget, som kan variera från 0 till 100% av pannans kapacitet. Tyvärr är nu inte domnivån i minimum fas då man varierar på ång- och matarvattenflödena, utan följande överföringsfunktioner gäller:

Ångflöde-domnivå

$$G(s) = -\frac{A-Bs}{s}$$

Som har stegsvaren:

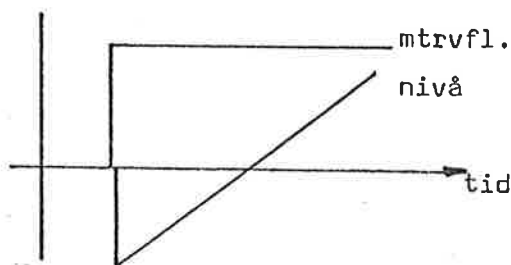
Domnivån vid stegökning av ångflöde



Matarvattenflöde-domnivå

$$G(s) = \frac{A-Bs}{s}$$

Domnivån vid stegökning av matarvattenflöde



Av detta följer nu helt klart att domnivån inte ensam är lämplig som styrvariabel vid reglering av domnivån.

Men man skulle däremot kunna använda sig av en framkoppling till ångflödet som ju skall vara lika med matarvattenflödet om nivån skall ligga kvar. Denna lösning har först och främst fördelen av att ångflöde-matarvattenflödes sambandet är 1 och i min fas. En annan fördel följer också, för när man tittar på stegsvaren så ser man att ett språng i ångfl och ett språng i matatv.fl. kompenserar varandras "icke min fas" beteende.

III Ångreglerventilens reglering

Av stegsvaret från en ändring på u_1 , så ser man att tidskonstanten vid reglering av uteffekten till största delen beror på reglerventilen u_1 s tidskonstant. Förmågan att "ligga kvar" på den effekten ventil-öppningen motsvarar beror sedan i sin tur på ökningen av eldningen. Av Å&Es modell ser man ur ekvationen för P_o att uteffekten är inte linjär med ändringar på u_1 . Men om man förutsätter att trycket är konstant, vilket var en regleruppgift, så kan man säga att

$$u_1 = k_1 P_o + k_2$$

Inom det område där modellen gäller dvs driftsområdet för verket. Man skulle alltså kunna använda detta som en styrlag om P_o är den önskade effekten. Utanför modellens område och för att kompensera för eventuella skillnader modell verklighet skulle man kunna ha en kontroll loop med en PI-regulator till uteffekten. Man får alltså en snabb regulator inom driftsområdet.

IV Kompensering av skillnader mellan modell och verklighet

a) Domtrycket

Som vi tidigare konstaterat kan man reglera med en framkoppling till uteffekten. För att nu kompensera för eventuella variationer i t.ex. verkningsgrad och stationära fel så kan man införa en kontroll loop med PI-regulator från tryck till brännare.

b) Domnivån

Här skulle man kunna "kontrollera" med en PI-regulator från domnivån för att på samma sätt som tidigare kompensera för skillnader modell-verklighet och stationära fel.

c) Uteffekten

Denna kompensering kan utföras av samma regulator som skulle kompensera modellens styrlag vi små uteffekter..

Dimensionering av framkopplingsloopar

Från litteraturstudien fann vi att man kunde snabba upp systemet avsevärt genom att införa framkopplingar. Här följer nu en liten diskussion över dimensioneringen av dessa loopar för fallet Öresundsverket.

I Framkoppling av uteffekt till brännoljeflöde

Från Å&Es modell hämtar vi verkningsgraden till:

$$\eta = k P_o / u_1$$

Från samma källa ser vi att verkningsgraden varierar i verkligheten från 0.41 vid full effekt till 0.36 vid halv effekt. Modellens verkningsgrad är däremot i stort sett konstant 0.40. Om man använder detta värde och beräknar k från experimenten så fås:

$$u_3 = 0.225 P_o$$

Som får bli vår framkoppling till uteffekten.

II Framkoppling av matarvattenflödet till ångflödet

Från Å&Es modell hämtar vi ångflödet till

$$q_a = k u_1^2 P^{1/2} \text{ ton/h}$$

Ur experimenten får vi $k=37.4$

Detta flöde q_a återkopplas till matarvattenflödet med en konstant +1 ty flödena ska ju vara lika stora.

För att kunna studera framkopplingen i modellen infördes dom nivån som

$$h = k \int (q_m - q_a) dt \text{ cm} \quad \begin{aligned} q_m &= \text{Matarvattenflöde ton/h} \\ k &= 0.93 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Denna rekonstruktion tar inte hänsyn till att domnivån inte är i min fas.

III Framkoppling av uteffekten till lastbehovet

Från Å&Es modell fann vi att en lämplig framkoppling hade formen

$$u_1 = k_1 P_o + k_2 \%$$

Från experimenten bestämdes $k_1 = 0.4 \cdot 10^{-2}$ och $k_2 = 0.37$

Konstanten k_2 härstammar med största sannolikhet från kraftförbrukningen hos verkets hjälpmaskiner t.ex. matarvattenpumpar, kylvattenpumpar, rökgasfläktar och från strålning och konvektion från anläggningen.

För att kunna justera in tillstånden hos styrvariablerna behöver vi någon form av ställorgan med en rimlig dynamik.

I Brännoljeservot (u_3)

För att variera eldningen har man vanligen ett antal brännare som kopplas in och ur. En uppskattning ger att en lämplig tidskonstant för brännarna är ungefär 8 s. Om man sedan approximerar ställorganet till en servo motor som är lägesåterkopplad får överföringsfkn till:

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

II Matarvattenventilservo (u_2)

Från Öresundsverket hämtas en tidskonstant för servot till 8s. Vi antar att servot är en lägesåterkopplad motor och får då:

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

III Effektreglerventilservo (u_1)

Dessa ventiler kan ofta göra mycket snabba vi ger därför detta servo en tidskonstant 1.4. Som i de båda andra fallen antar vi att servot är en lägesåterkopplad motor med överföringsfkn till:

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

Kommentar

Alla dessa ställorgan är av första ordningen dvs de har stationära fel. Vidare kommer på grund av dynamiken trycket och domnivån att sjunka vid en stegökning av uteffekten, för att lägga sig på en lägre nivå. För att komma ifån dessa nackdelar kan man införa korrektionsloopar med PI-regulatorer.

Kontroll loopar med PI-regulatorer

Man kan befara att modellen inte är helt en exakt bild av verkligheten, för att korrigera våra framkopplingar inför vi nu återkopplingar med PI-regulatorer som har överföringsfkn:

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

Dessa återkopplingar skall även ta bort de stationära felen hos ställorganen och hos framkopplingarna som ju endast var proportionella.

I Domnivån

Här kan man införa en PI-regulator mellan domnivå och matarvattenflöde. Den skall ha en sådan liten förstärkning att domnivåns icke min fas beteckande påverkar framkopplingen.

II Trycket

Här kan man införa en PI-regulator mellan domtryck och eldning som skall justera trycket till ett börvärde. Den skall precis som i fallet domnivå inte ta hänsyn till de stora variationerna, utan enbart göra finjusteringar.

III Uteffekten

Här infördes en PI-regulator mellan uteffekt och reglerventil. Den har i stort sett samma funktion som de båda övriga för tryck och domnivå.

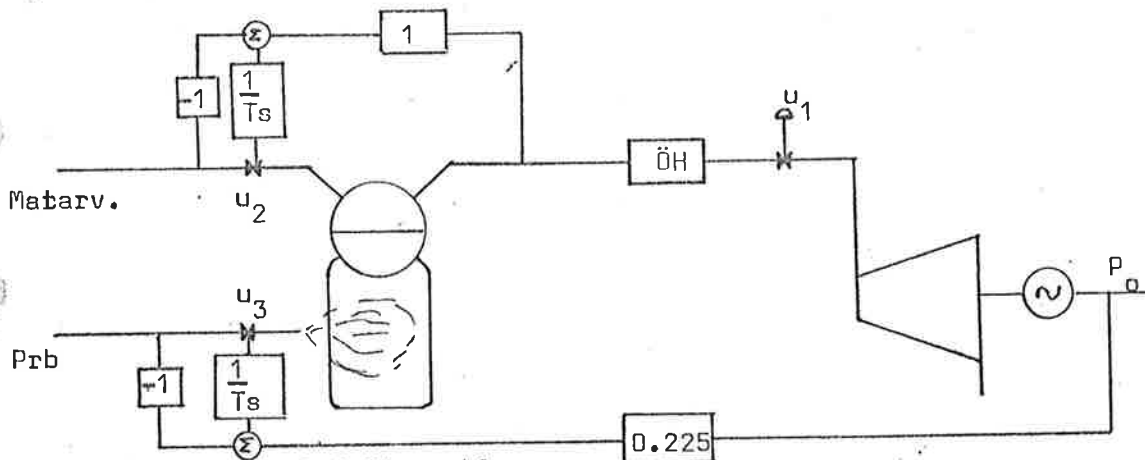
Dimensionering

Dimensionering skedde med simulering av den olinjära modellen. Se bilaga 2.

Simulering av systemet med framkopplingar till ångflöde och uteffekt

Systemet simulerades med hjälp av ett program (Simnon) på institutionens dator PDP-15, för att man skulle få en uppfattning av hur bra framkopplingarna av uteffekt och ångflöde. Resultatet kan studeras på de efterföljande stegsvaren.

Schema över framkopplingarna



Programmet i Simon blev:

```

A1:0.035
A2:0.02
A3:4.4E-4
A4:11.45
A5:8.2
A6:0.93E-3
A7:37.6
A8:0.125
A9:0.225
DU1:0
UR1:0.75
U1=IF T<100 THEN UR1 ELSE UR1+DU1
DX1=-A1*(U1*X1+(5/8)-A5)+A2*X3-A3*X2
Y=A4*(U1*X1+(5/8)-A5)
DX2=-A8*(X2-A7*U1+(2)*X1+(1/2))
DX3=-A8*(X3-A9*Y)
DX4=A6*(X2-A7*U1+(2)*X1+(1/2))
*END

```

Beteckningar:

DU1 ändring i ventilläge på u_1 i %
 UR1 utgångsvärde på u_1 i %
 X1 domtryck kp/cm^2
 Y uteffekt MW
 X2 matarvattenflöde ton/h
 X3 brännoljaflöde ton/h
 X4 domnivå cm
 A1..A9 konstanter

Resultat

Som man kan se av stegsvaren kan man reglera effekten till en ny nivå med en tidskonstant som bara kommer att bli beroende av regulatorn för u_1 . Vidare ser man att uteffekten vid en reglering på u_1 stannar kvar på den nivå som motsvarar u_1 s läge, Trycket och domnivån ligger nästan konstant (de minskar något). Några överslängar finnes inte då regleringen endast är proportionell.

PLOT T-X1
 PLOT T-Y
 PLOT T-X3
 PLOT T-X4

$$u_3 = f(u_1, t)$$

$$u = f(u_1, t)$$

$$P = f(u_1, t)$$

$$P = f(u_1, t)$$

$$u_1 = 0.2 \rightarrow u_1 = 0.8$$

REGERING VIA HALV LAST

0.00E+0 5.00E+1 1.00E+2 1.50E+2

0.00E+0

1.00E+2

2.00E+2

3.00E+2

4.00E+2

5.00E+2

u3

P

h

P

REGLERING VIA FULL LAST

$$u_1 = 1.0 \rightarrow u_1 = 0.90$$

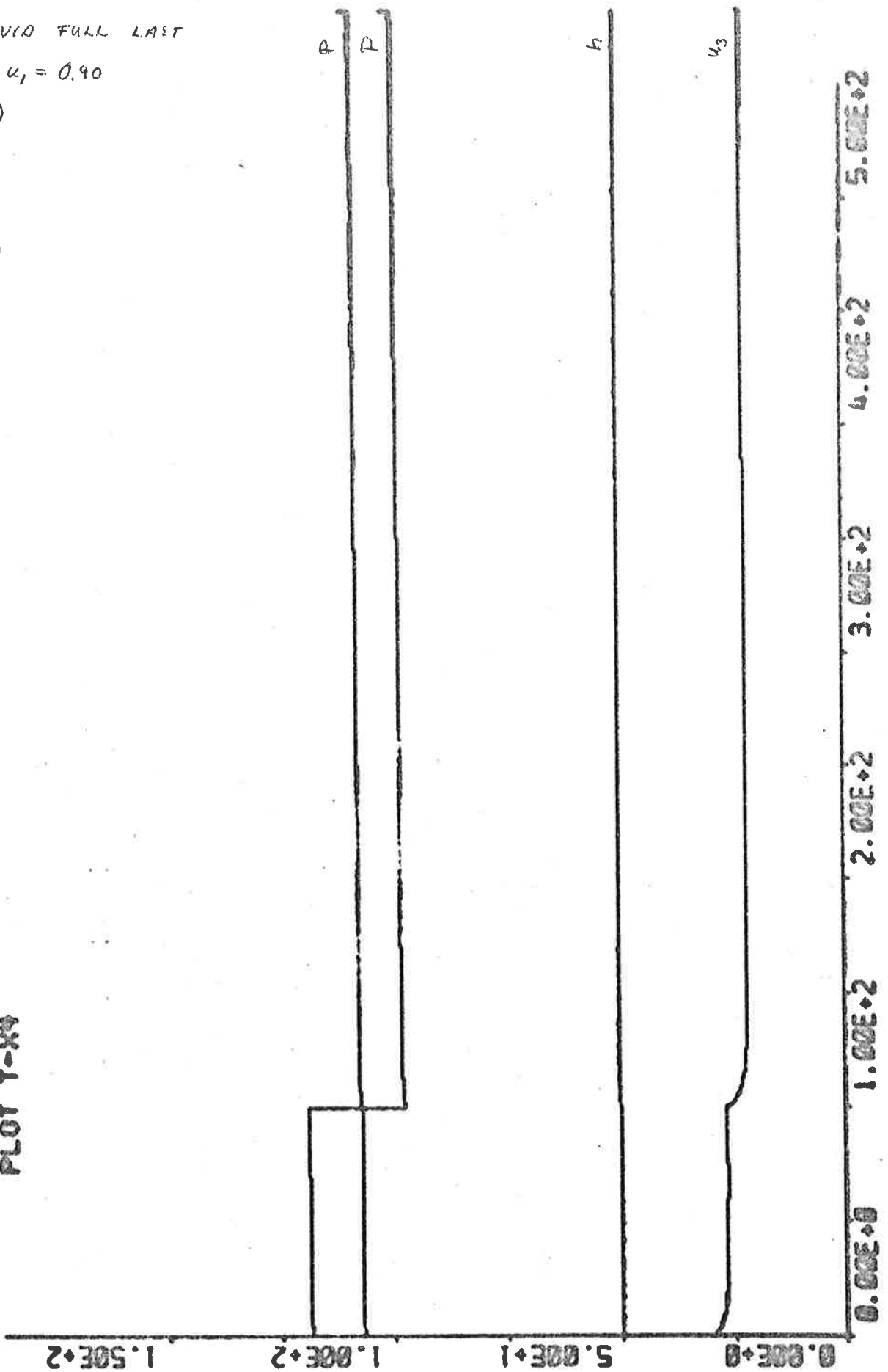
$$p = f(u_1, t)$$

$$P = f(u_1, t)$$

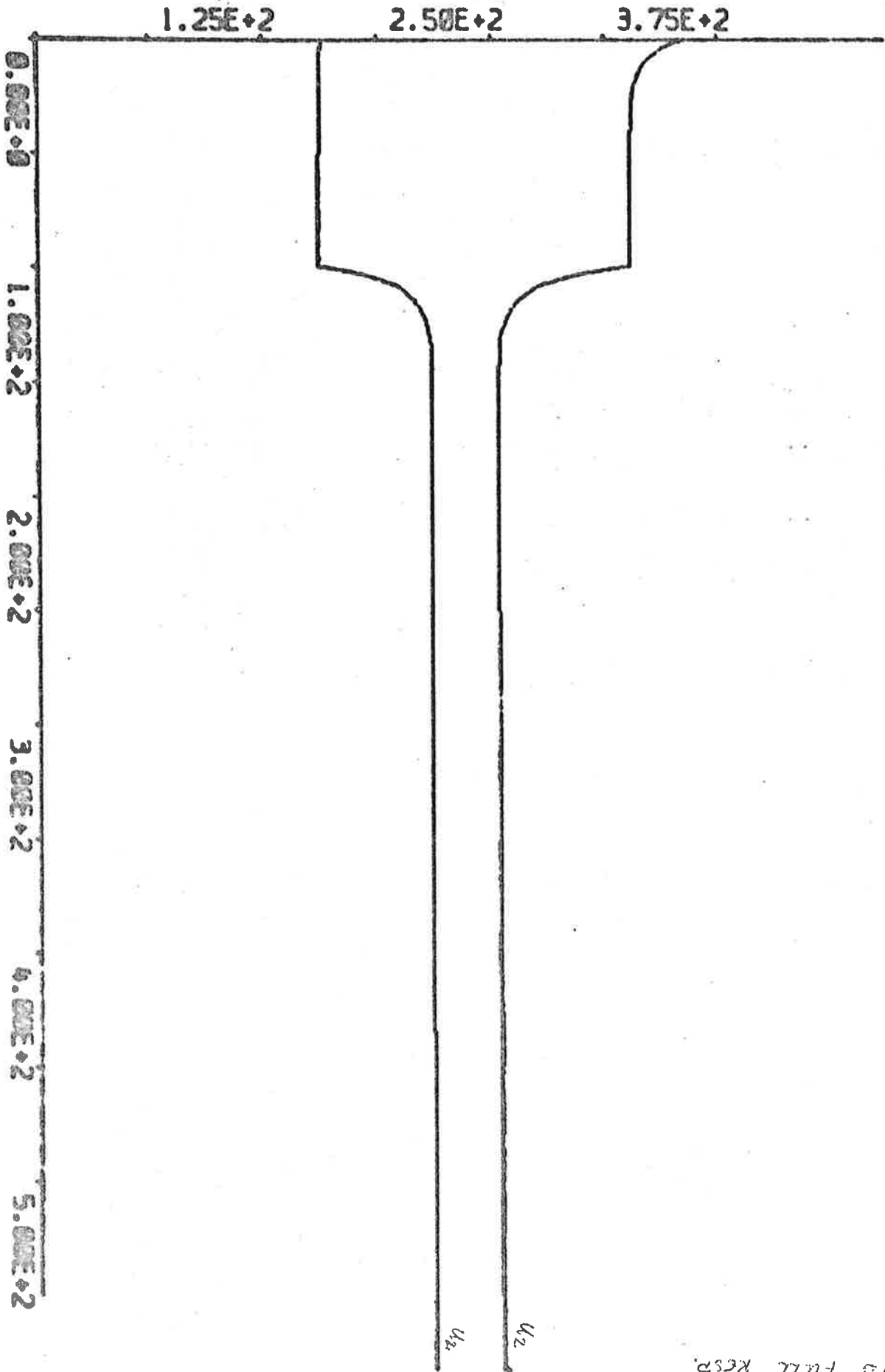
$$h = f(u_1, t)$$

$$u_3 = f(u_1, t)$$

PLOT T-Y
PLOT T-X1
PLOT T-X2
PLOT T-X3



PL01 T-X2



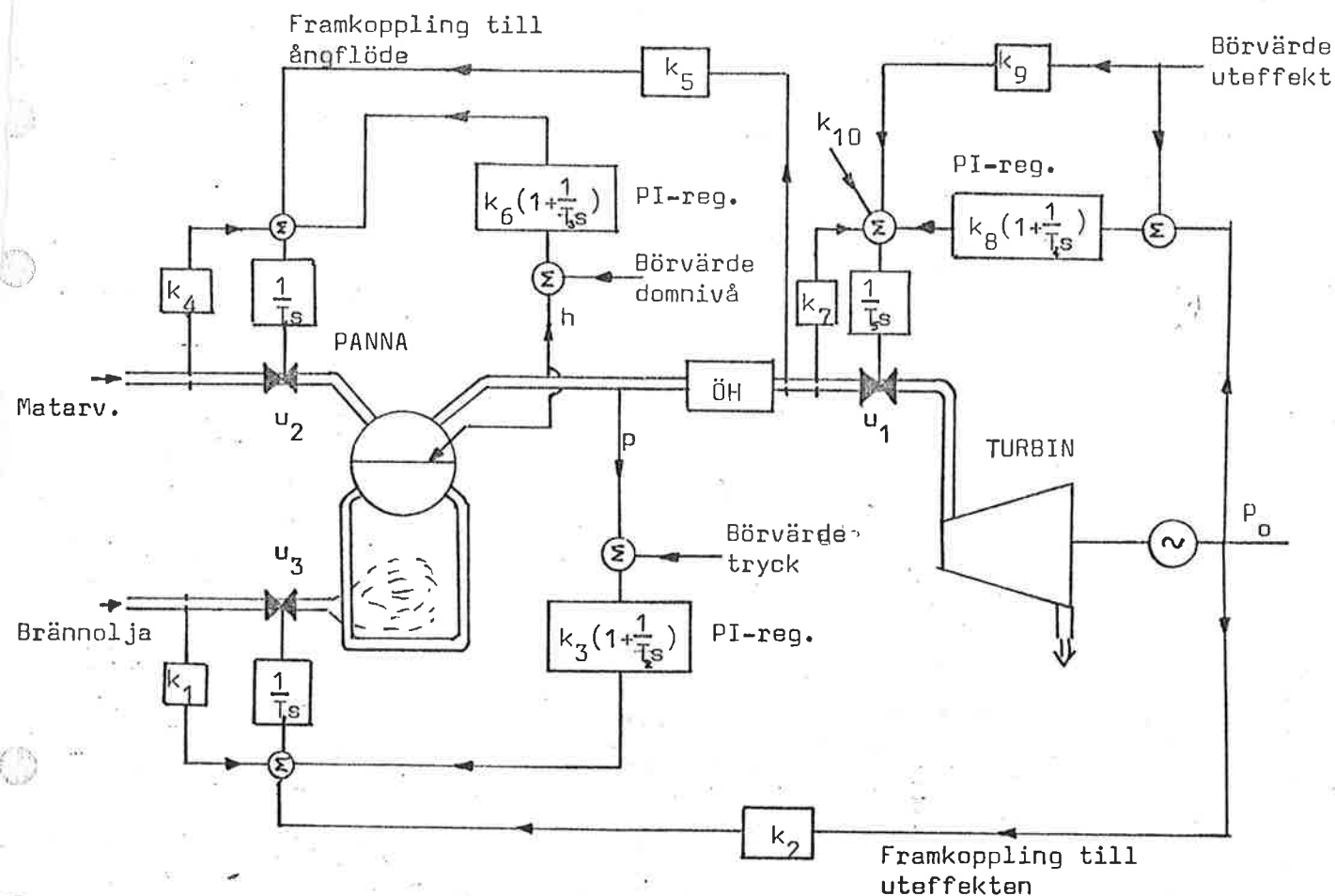
$$u_2 = f(u_1, t)$$

HALV LAST

REGLENDIG VID FULL RESP.

Simulering av systemet med alla regulatorerna inlagda.

Systemet simulerades på samma sätt som det i bilaga 1, genom simulering i Simnon på institutionens datamaskin PDP-15.

Schema över det kompletta reglersystemet:

De numeriska värdena på konstanterna i fallet reglering av Öresundsverket finnes på sidan 2, 3

Konstanten k_{10} användes för att starta upp kraftverket till uteffekten 0 MW dvs för att kompensera bort tomgångsförluster (pumpar, fläktar mm). Vid uppstartning av turbinen sker detta alltså med k_{10} , som då manuellt ökas från 0 till driftsläget för verket i tomgång.

Programmet för systemet blev i Simnon:

```

A1:0.035
A2:0.02
A3:4.4E-4
A4:11.45
A5:8.2
A6:0.93E-3
A7:37.4
A8:0.125
A9:0.225
A10:0.05
A11:0.3
A12:0.7
A13:0.2E-3
A14:0.8E-2
A15:2
A16:20
A17:0.4E-2
A18:0.37
P:140
H:100
DU:0
UR:82
U=IF T<100 THEN UR ELSE UR+DU
DX1=-A1*(X7*X1+(5/8)-A5)+A2*X3-A3*X5
Y1=A4*(X7*X1+(5/8)-A5)
Y2=A7*X7+(2)*X1+(1/2)
DX2=A6*(X5-Y2)
DX3=-A8*(X3-A9*Y1-A15*(P-X1)-A10*X4)
DX4=P-X1
DX5=-A8*(X5-Y2-A16*(H-X2)-A11*X6)
DX6=H-X2
DX7=-A12*(X7-U*A17-A18-A14*(U-Y1)-A13*X8)
DX8=U-Y1
*END

```

Beteckningar:

DU ändring i uteffekt MW
 UR startvärde uteffekt MW
 X1 domtryck kp/cm^2
 X2 domnivå cm
 X3 brännoljeflöde ton/h
 X4 I-reg börvärde tryck
 X5 Matarvattenflöde ton/h
 X6 I-reg börvärde domnivå
 X7 ventilläge %
 X8 I-reg börvärde uteffekt
 Y1 uteffekt MW
 Y2 ångflöde ton/h
 A1..A18 konstanter
 P börvärde tryck kp/cm^2
 H börvärde domnivå cm

Regulatorernas inställning

Justeringen av framkopplingslooparna till uteffekt och ångflöde gjordes med endast dessa inlagda i modellen enl Bilaga 1.

För att ställa in PI-regulatorerna, simulerades systemet tills önskat stegsvar erhöles på följande sätt.

Först ställdes regulatorerna för tryck och uteffekt på 0, börvärdet på uteffekten gavs en stegstörning på 68 MW (från 82 MW till 150 MW) omjeflödet och pådragsventilen styrdes då endast av framkopplingarna. Fördelarna med detta sätt är att ångflödet växer exponentiellt utan några överslängar och de överslängar som då uppkommer på matarvattenflödet härstammar endast från PI-regulatorn till domnivå. Regulatorn justerades nu med upprepad simulering av domnivå och matarvattenflöde, tills att önskat stegsvar erhöles.

Efter att matarvattenregulatorn injusterats kopplades PI-regulatorn för domtrycket in och justerades på samma sätt som matarvattenregulatorn med hjälp av upprepad simulering.

Slutligen justerades regulatorn för uteffekten på samma sätt som de båda övriga.

Resultaten kan studeras i de efterföljande stegsvaren, som är upptagna vid en stegökning av uteffekten från 82 MW till 150 MW. Det bör påpekas att överslängarna på matarvattenflödet och bränsleflödet ligger inom verkets kapacitet.

Numeriska inställningsvärden på regulatorer och framkopplingar

Beteckningar från skissen på sidan 1 i bilaga 2.

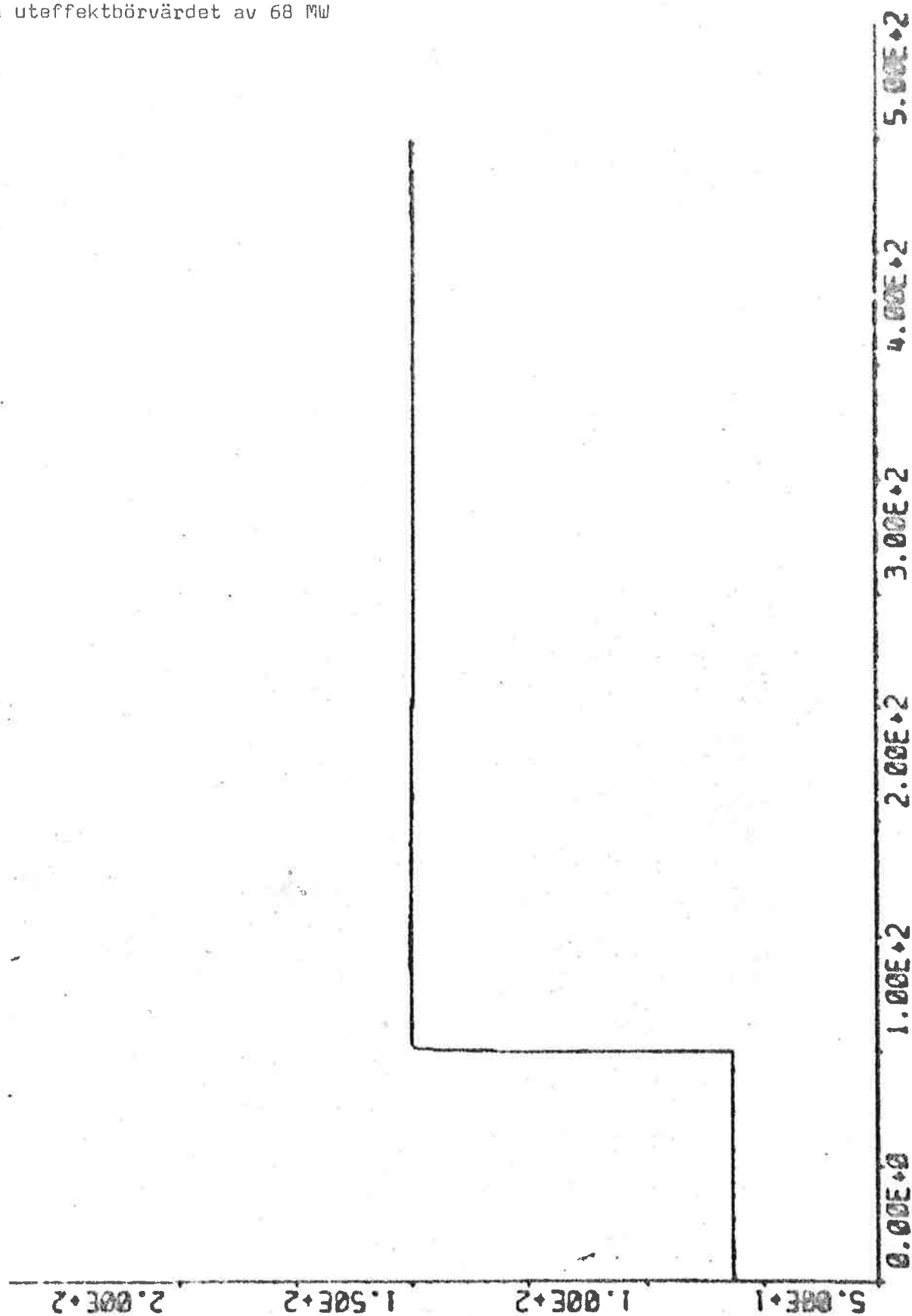
$k_1 = -1$	$k_7 = -1$	$T_3 = 1.4 \text{ s}$ Ångpådragsventilservo
$k_2 = +0.225$	$k_8 = +0.8 \cdot 10^{-2}$	$T_4 = 40 \text{ s}$ I-reg uteffekt
$k_3 = +2.0$	$k_9 = +0.4 \cdot 10^{-2}$	
$k_4 = -1$	$k_{10} = +0.37$	
$k_5 = +1.0$	$T_1 = 8 \text{ s}$ Brännoljeservo	
$k_6 = +20$	$T_2 = 40 \text{ s}$ I-reg brännolja	
	$T_3 = 67 \text{ s}$ I-reg mtrvatten	
	$T_1 = 8 \text{ s}$ Matarvattenservo	

Resultat

Som man kan se av de efterföljande stegsvaren har nu de stationära felen i uteffekt, domtryck och domnivå eliminerats av PI-regulatorerna. För att man inte skall få för stora överslängar på matarvattenflöde och brännoljaflöde har PI looparna givits liten förstärkning och en stor integreringstid. Av stegsvaren kan man se att de har en insvängningstid av 200 s i fallet domnivå och domtryck, detta är ingen större nackdel då de stora variationerna tas upp av framkopplingarna. Av detta följer att systemets stegsvar är mycket beroende av att framkopplingarna är riktiga ty annars så måste ju PI-regulatorerna slå ned felen och regleringen får en mycket större tidskonstant. Som man ser av stegsvaret för uteffekten så är det nu möjligt att öka effekten med dessa regulatorer inlagda och de tidskonstanter (realistiska) på ställorganen med en lösningstid på någon sekund från halv till full effekt. Det som nu begränsar kraftverkets förmåga att ta upp dynamiska laständringar på kraftnätet är nu endast de hållfasthetsmässiga egenskaperna hos ångkraftverket.

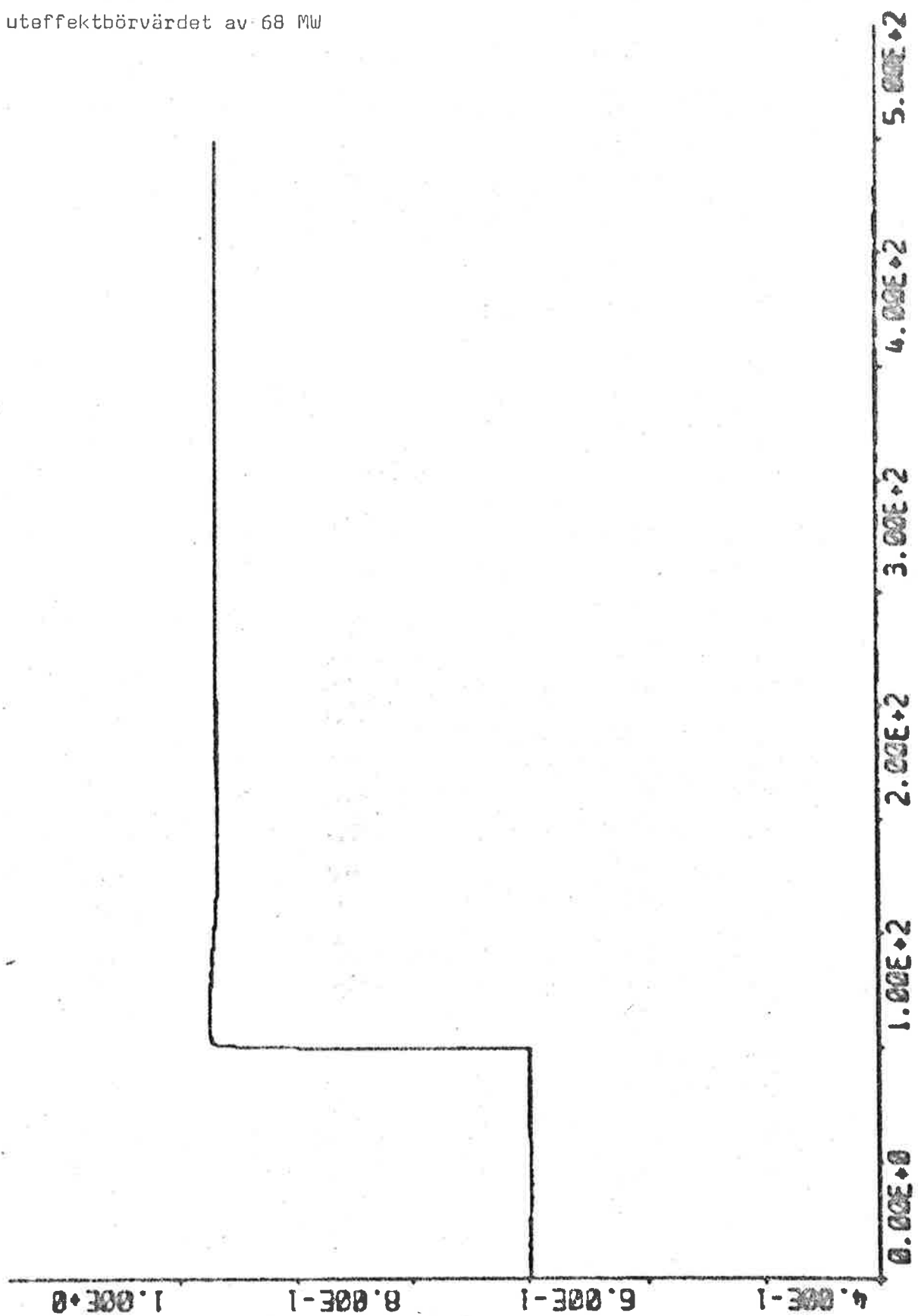
Stegsvar för uteffekten MW vid ett
steg på uteffektbörvärdet av 68 MW

PLOT T-Y1



Stegsvar för ångpådragsventilen % vid ett
steg på uteffektbörvärdet av 68 MW

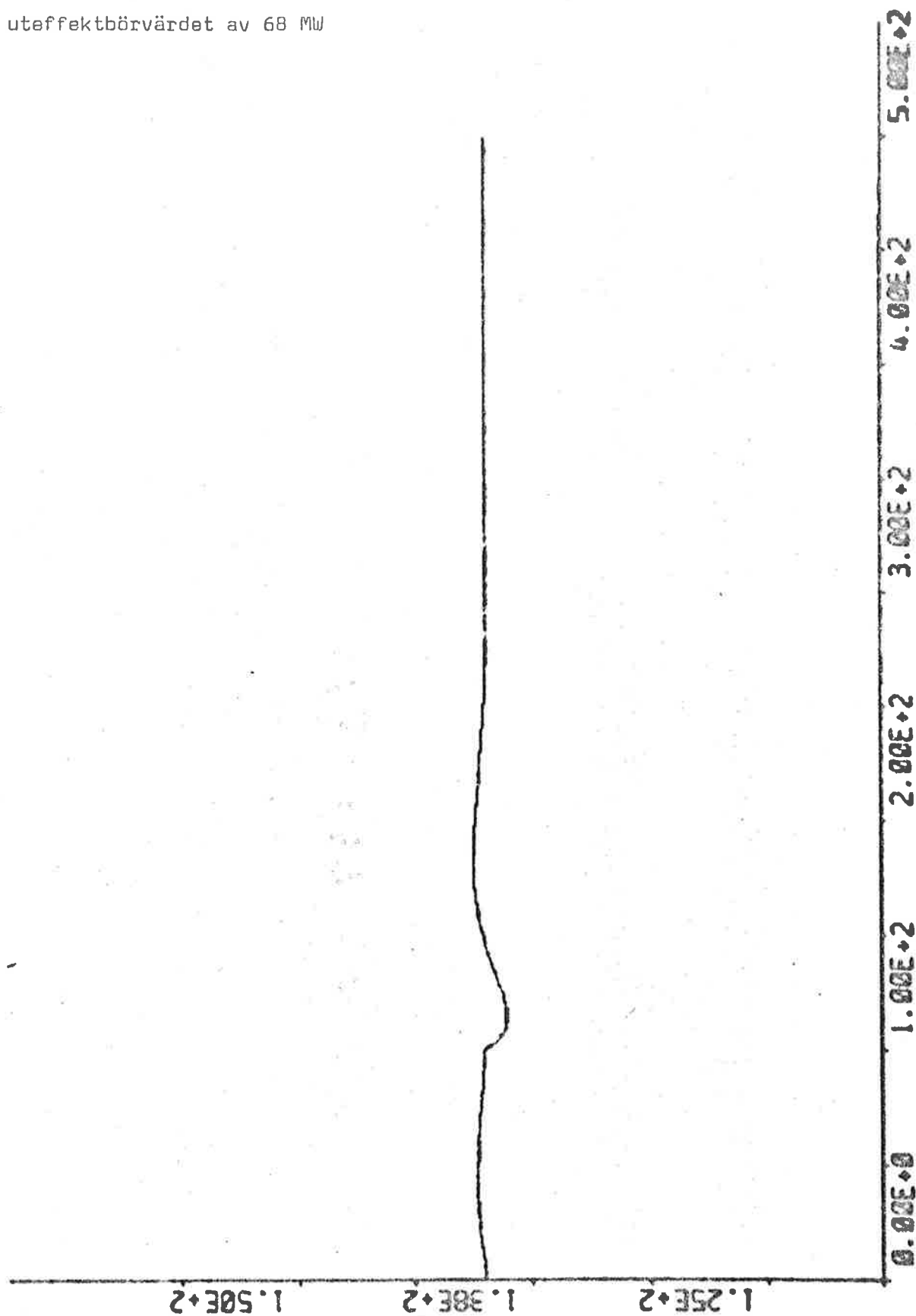
PLOT T-X7



Stegsvar för domtrycket vid ett
steg på uteffektbörvärdet av 68 MW

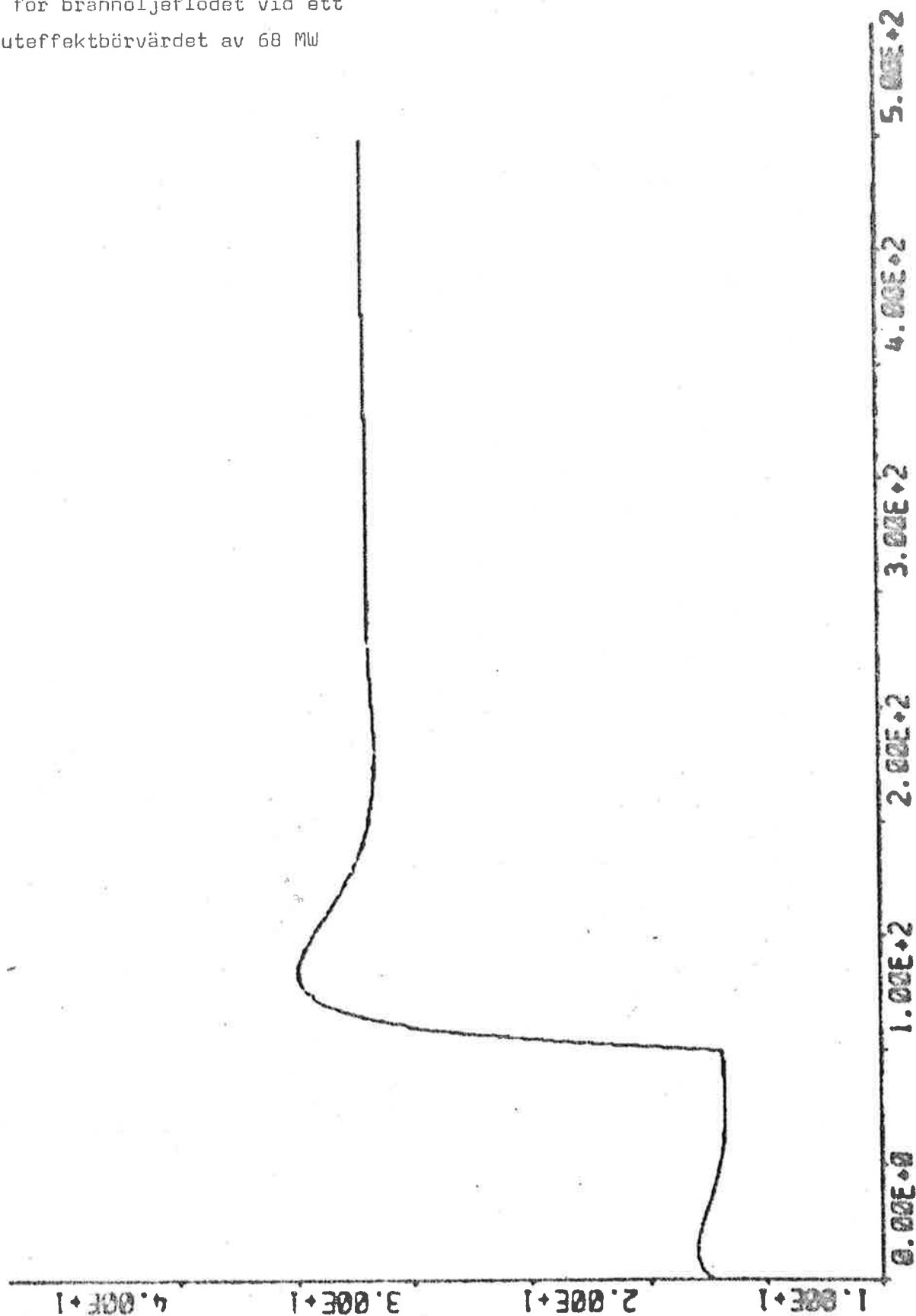
Bilaga 2, 7

PLOT T-X1



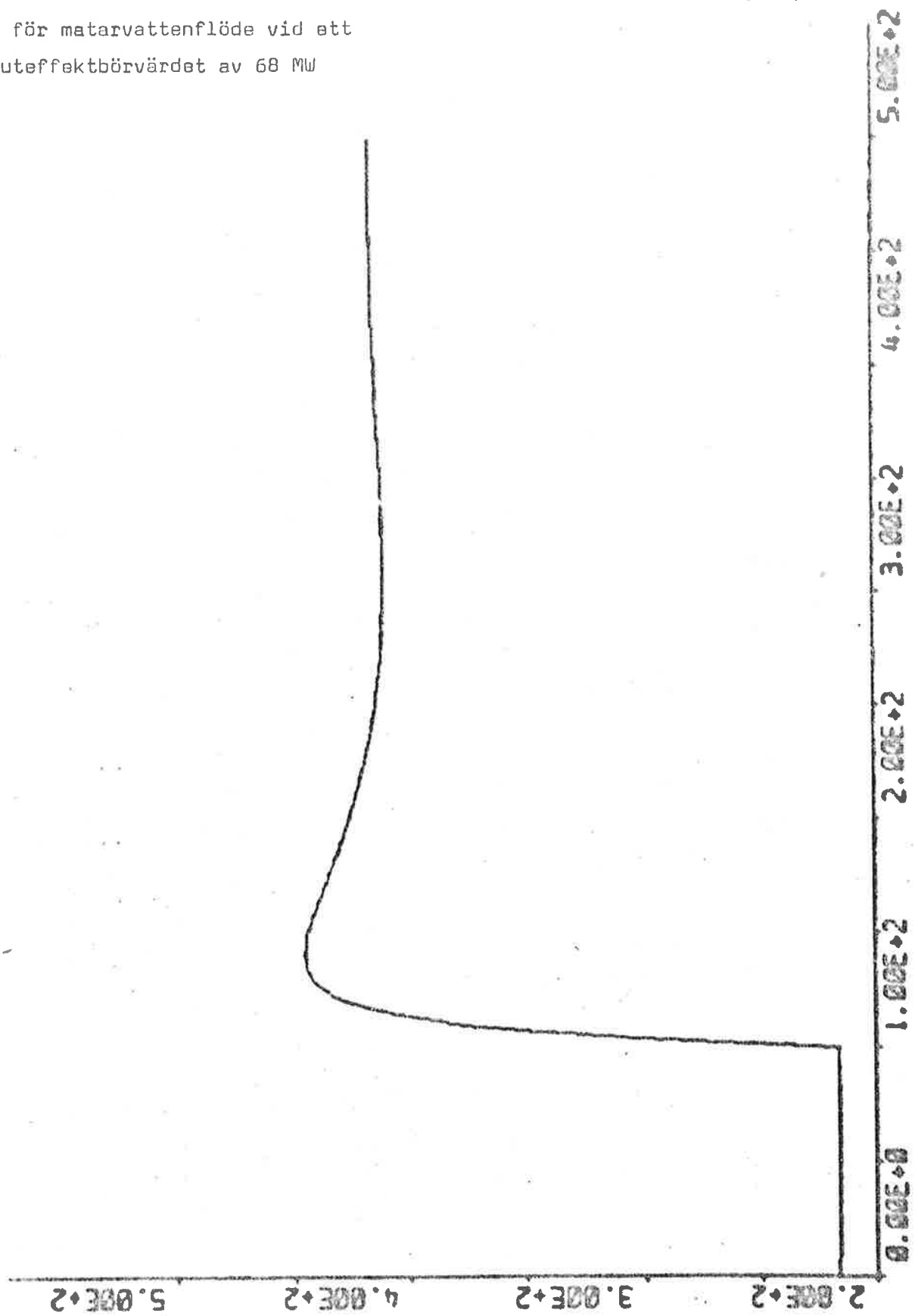
Stegsvar för brännoljeflödet vid ett
steg på uteffektbörvärdet av 68 MW

PLOT T-X3



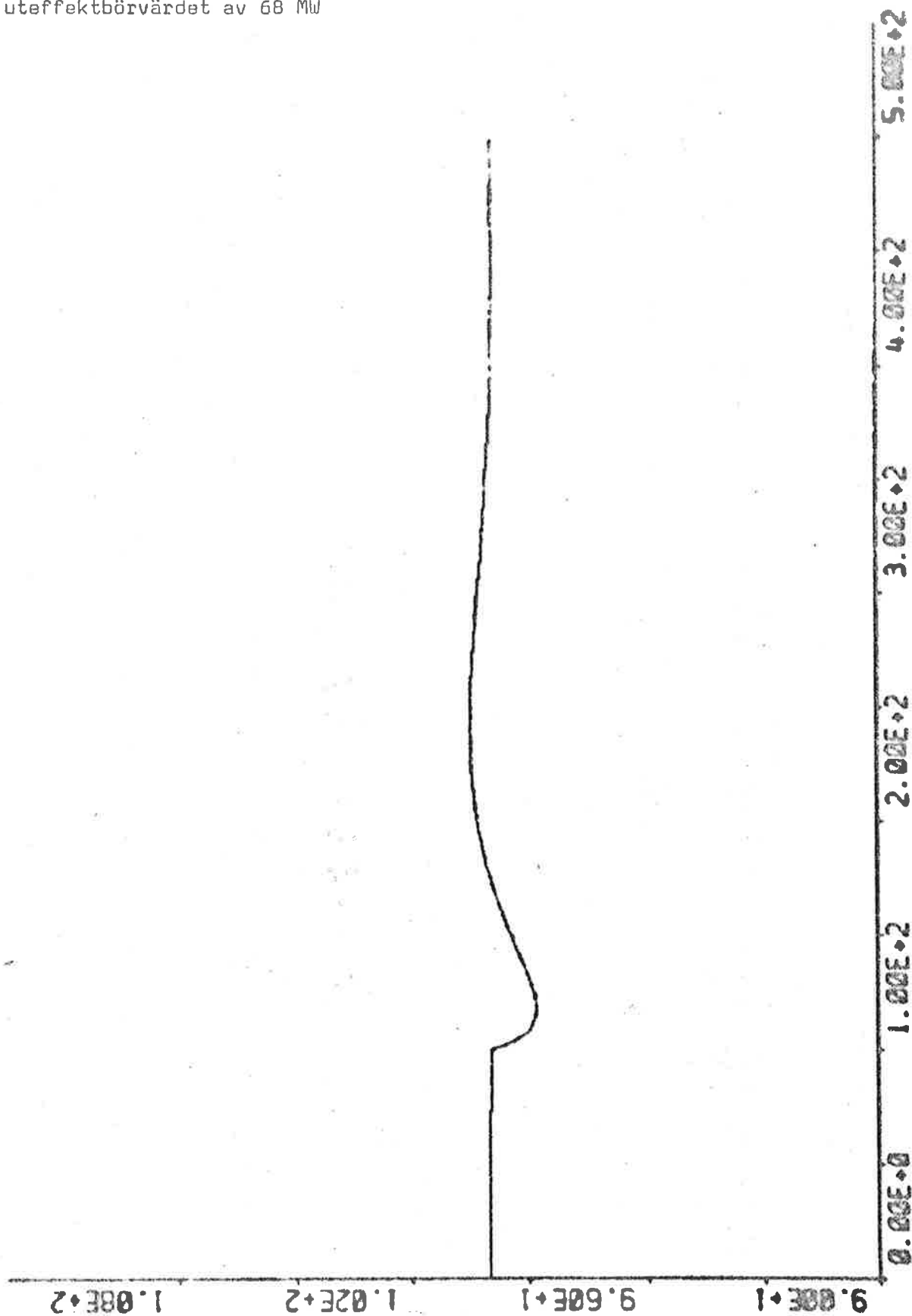
Stegsvar för matarvattenflöde vid ett
steg på uteffektbörvärdet av 68 MW

PLOT Y-X5



Stegsvar för domnivån vid ett
steg på uteffektbörvärdet av 68 Mw

PLOT T-X2



Simulering på analogmaskin.

Systemet tidsskalas så att simuleringen går 100 ggr snabbare än i verkligheten.

Ekvationerna erhålles då som:

$$\dot{x} = -0,432 \cdot x + 2 \cdot u_1 - 0,714 \cdot u_2$$

$$\dot{y} = 1,117 \cdot x + 2,34 \cdot u_2$$

där y = effekten mätt i MW
 x = domtrycket " " bar
 u_1 = bränsleflödet " " ton/h
 u_2 = reglerventilen " " %

Vår uppgift bestod främst i att göra systemet snabbare jämfört med fjolårets system genom att ändra konstanterna, dvs. få det att svänga in sig snabbare efter en störning. Vid inställning av den proportionella delen K_1 gjorde vi så att PI-loppen först bortkopplades varefter vi som insignal kopplade en initialstörning. K_1 bestämdes sålunda till 1,0. Ett större K_1 ger ett snabbare system men förstärker brusot oacceptabelt.

Därefter kopplades PI-loopen in med den integrerande delen ~~bortkopplad~~. Den ~~proportionella~~ ^{integrerande} delen a bestämdes till 10,0 eftersom insvängningstiden minskas obetydligt för $a > 10,0$ medan däremot risken för instabilitet ökar. K_2 bestämdes till 0,48. Diagram 1-6 visar samma kurvor som fjolårets upplaga. Diagram 7-10 visar systemen med de förbättrade konstanterna. Diagram 1 visar effekt och domtryck för det öppna systemet med bränsleflödet $u_1 = 0$ och en steginsignal på reglerventilens läge med 10 %.

Diagram 2 visar effekt och domtryck för det öppna systemet med en ~~initialstörning~~ steginsignal på bränsleflödet med 5 ton/h och reglerventilen $u_2 = 0$.

Diagram 3 visar effekt och domtryck för det öppna systemet med en initialstörning i tryck på 5 kp/cm^2 .

Diagram 4 visar samtliga mätstorheter för det återkopplade systemet med en initialstörning i tryck på 5 kp/cm^2 .

Diagram 5 visar samtliga mätstorheter för det återkopplade systemet där uteffekten momentant har ändrats med 5 MW och trycket hållits konstant.

Diagram 6 visar samtliga mätstorheter för det återkopplade systemet där man lagt på en momentan ändring av domtrycket med 5 kp/cm^2 medan uteffekten hållits konstant.

Diagram 7 visar uteffekt och domtryck för det öppna systemet med en initialstörning i tryck på 5 kp/cm^2 för några olika värden på K_1 .

Diagram 8 visar samtliga mätstorheter för det återkopplade systemet med en initialstörning i tryck på 5 kp/cm^2 .

Diagram 9 visar samtliga mätstorheter för det återkopplade systemet med en ~~initialstörning~~ momentan ändring i uteffekt på 5 MW och domtrycket konstant.

Diagram 10 visar samtliga mätstorheter för det återkopplade systemet med en momentan tryckökning på 5 kp/cm^2 och konstant uteffekt.

Utvärdering:

Det återkopplade systemet med en initialstörning i tryck på 5 kp/cm^2 svänger, med de nya konstanterna, in sig på 250 sek. och med de tidigare konstanterna på 400 sek. Det återkopplade systemet med en momentan ändring i uteffekt på 5 MW har fått en förkortning av insvängningstiden från 250 sek. till 170 sek. i och med att vi införde de nya konstanterna.

Det återkopplade systemet med en momentan tryckökning på 5 kp/cm^2 får insvängningstiden förkortad med en faktor 2 från 300 sek. till 150 sek.

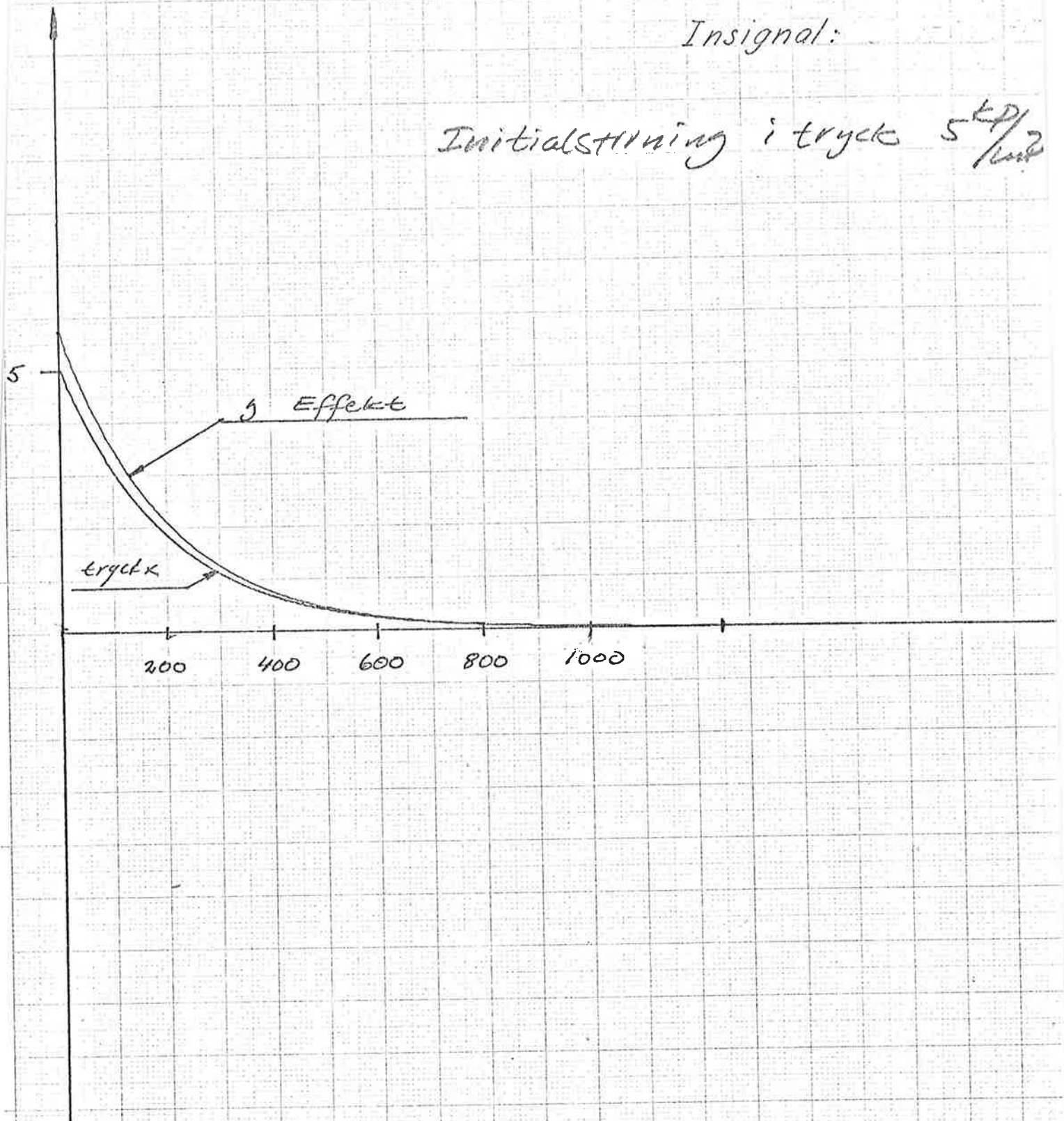
Jämför man det slutna systemet med det öppna får man en insvängningstid som är en faktor 4 kortare för det slutna systemet för domtrycket och en faktor 6 för effekten.

" ÖPPET SYSTEM

1

Insignal:

Initialstyrning i tryck $5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

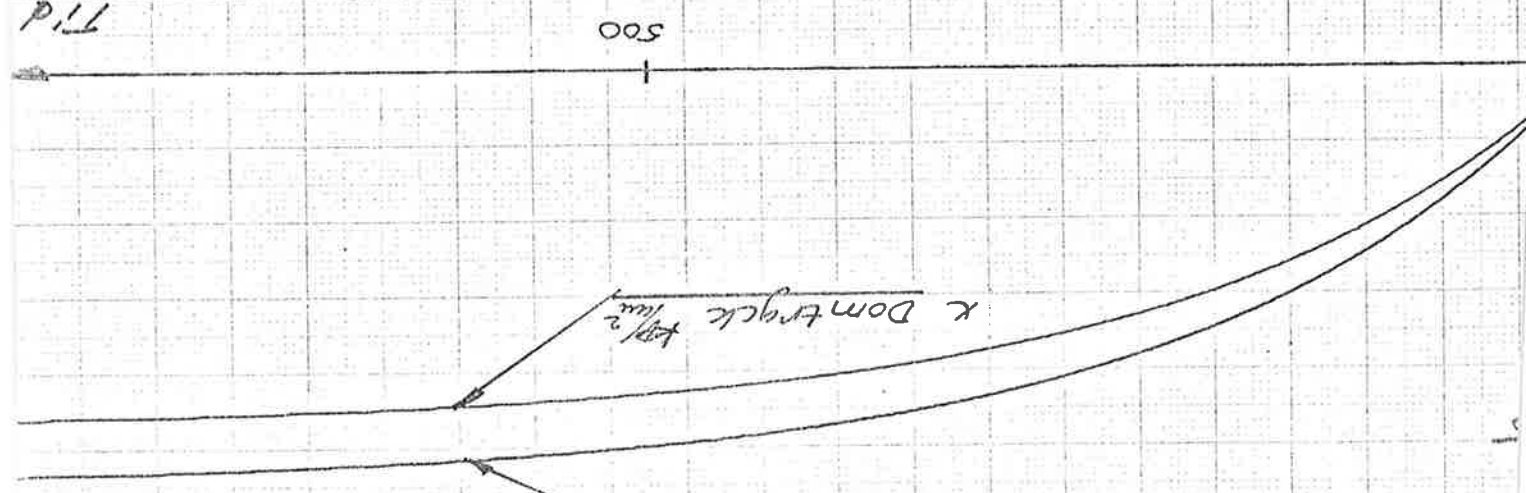


Öppna syst
 Steg $U_1 = 5 \text{ ton/h}$
 $U_2 = 0$

y effekt MW

x Dometryck kg/cm^2

P.I.I



Effekt (MW)
Tryck (bar)

Öppna systemet

Insignal: Initialstörni.
i tryck 5 kg/cm^2

— = effekt

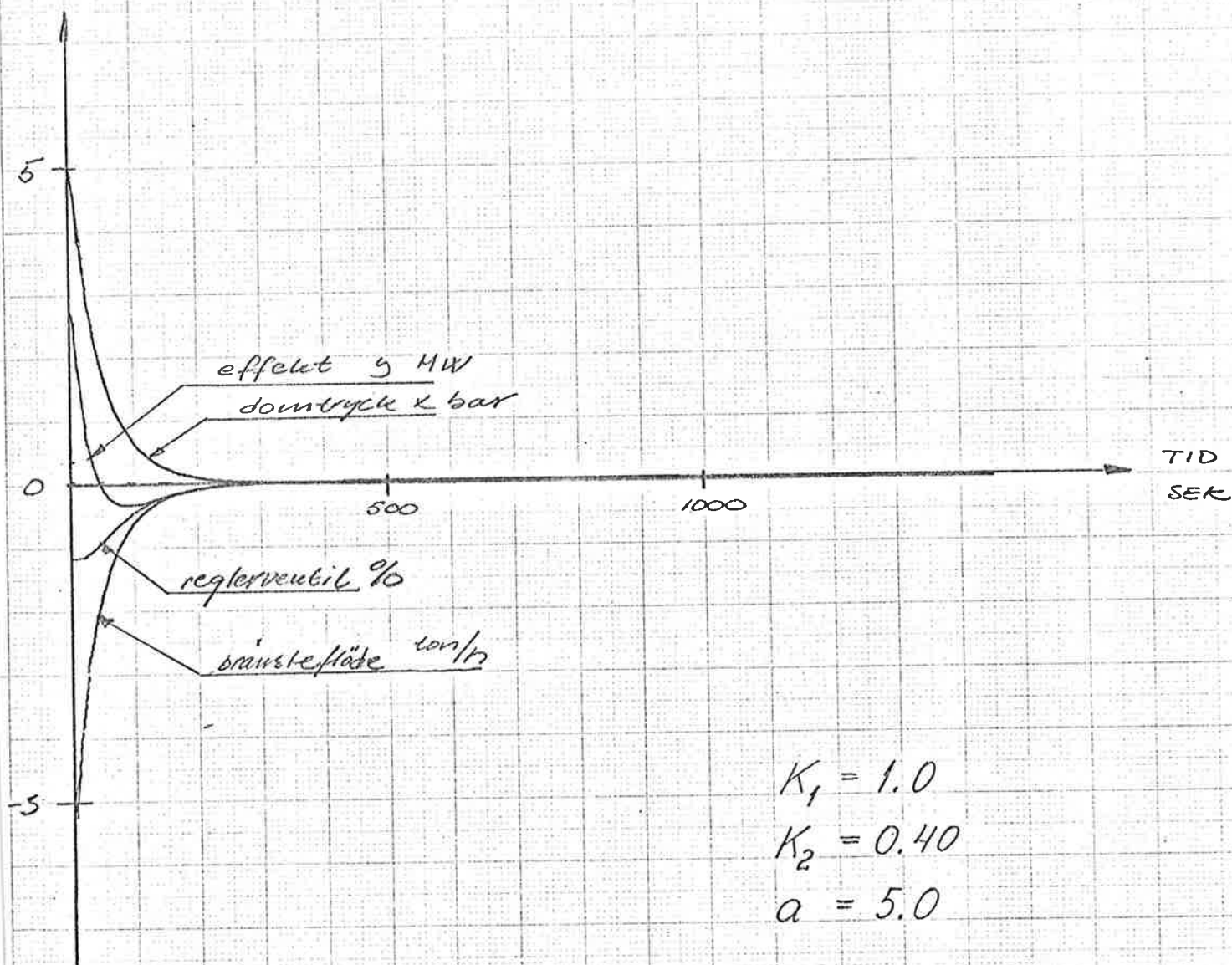
— = tryck

$K_1 = 10, 1, 0.8, 0.4, 0.2$

500

1000

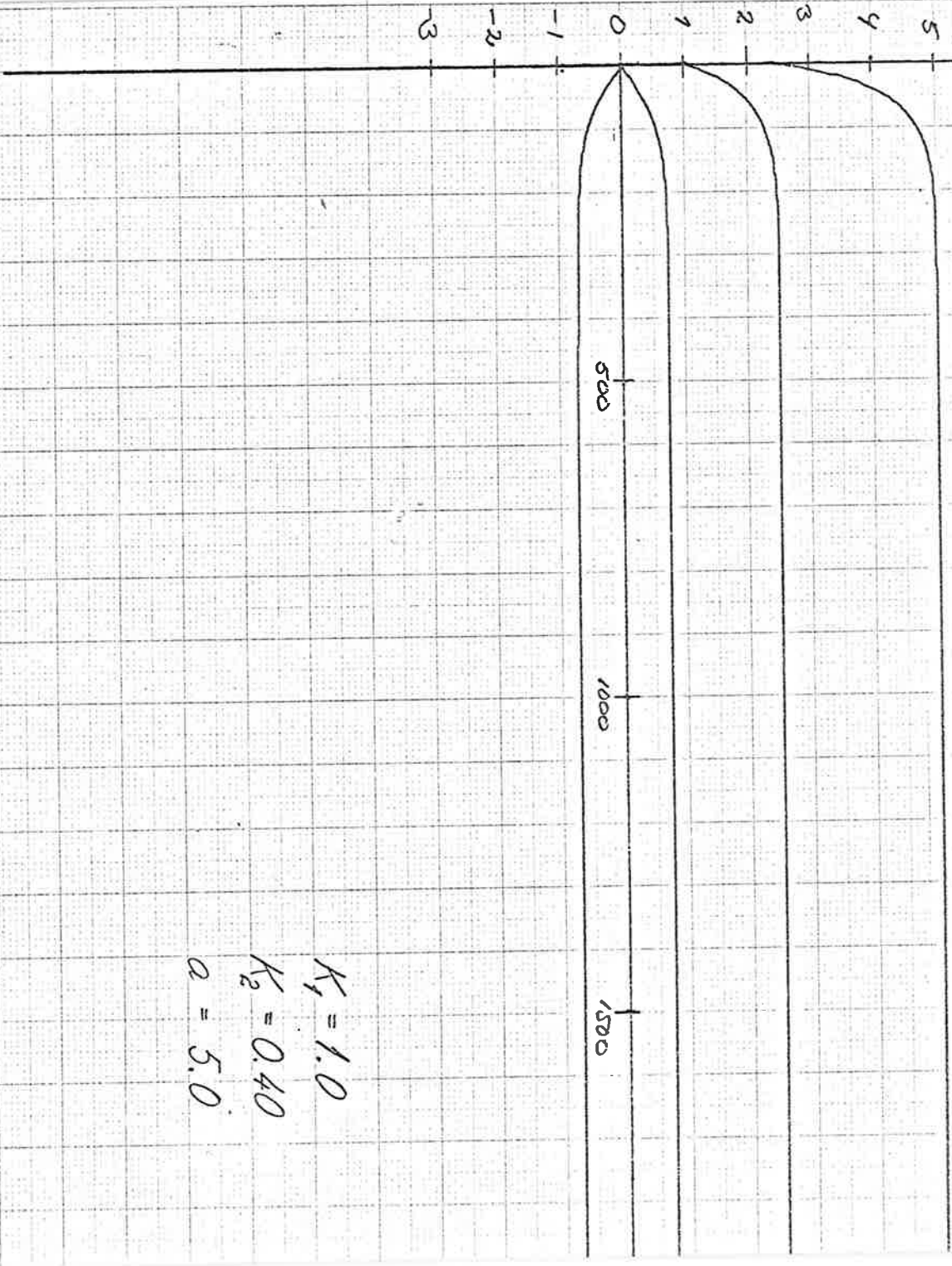
Återkopplade

INITIALSTÖRNING I TRYCK 5 kP/mm²

Heterkopplac

$$\Delta y_r = 5 \text{ MW}$$

$$\Delta k_R = 0 \text{ kP/cm}^2$$



$$K_1 = 1.0$$

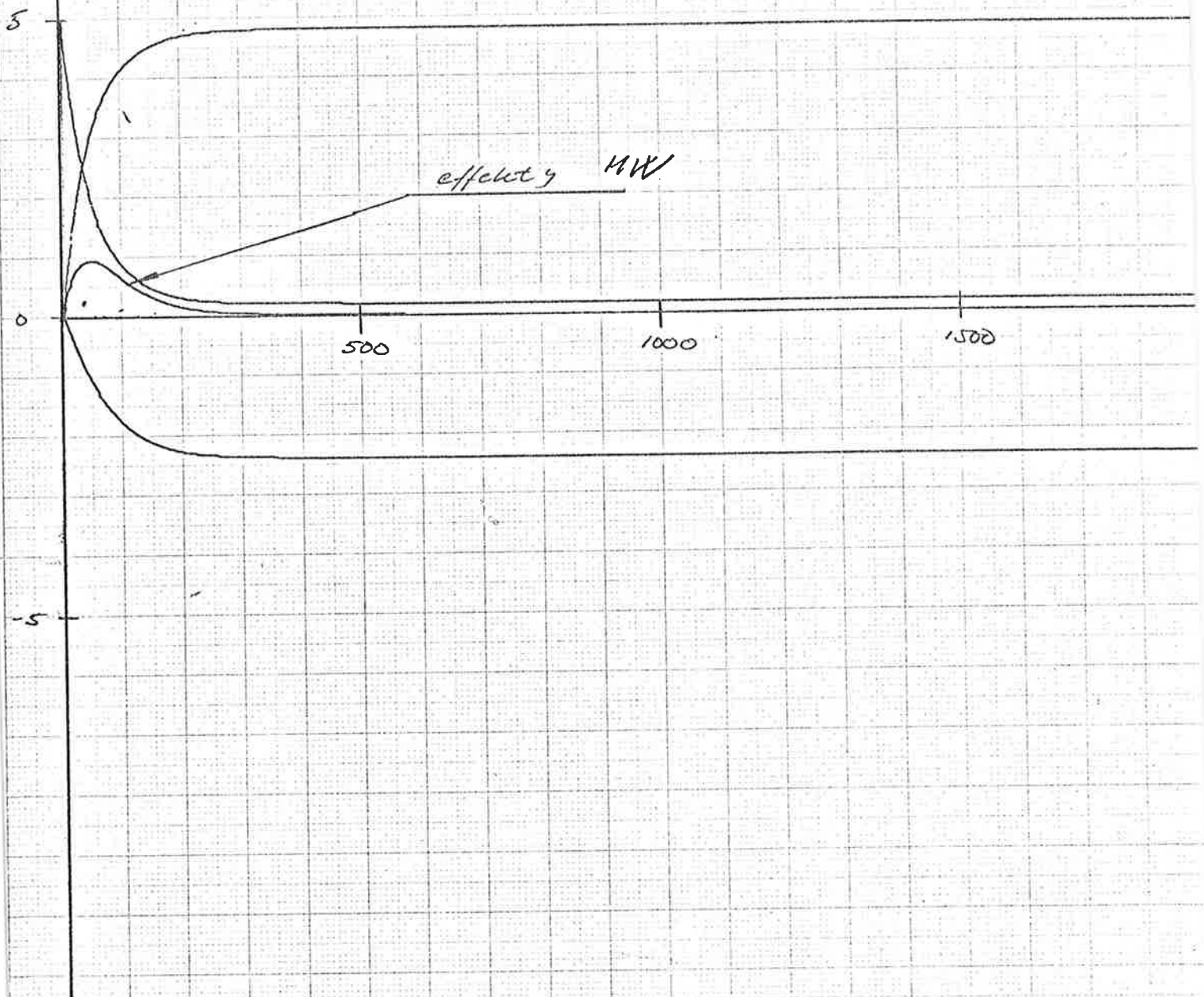
$$K_2 = 0.40$$

$$a = 5.0$$

Återkopplade sys

$$x_r = 5 \text{ kp/cm}^2$$

$$y_R = 0 \text{ MW}$$



Slutna systemet (åt

Insignal: Initialstö
i tryck 5 kg/cm^2

Domtryck (bar)

Effekt (MW)

Reglerventll (%)

Bränsleflöde (ton/h)

1000

$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = 0.48$$

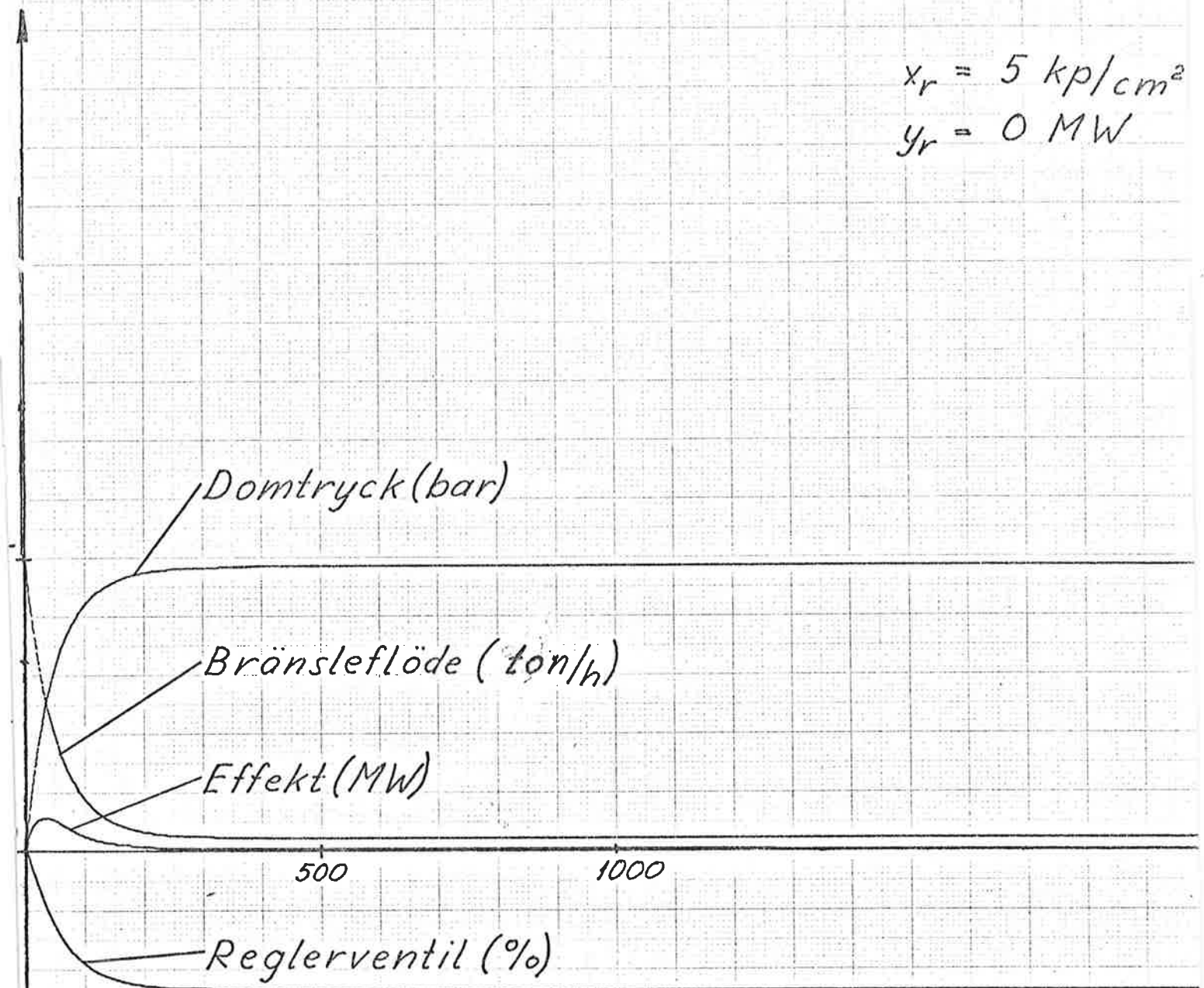
$$a = 10.0$$

8

Slutna system

$$x_r = 5 \text{ kp/cm}^2$$

$$y_r = 0 \text{ MW}$$



$$K_1 = 1.0$$

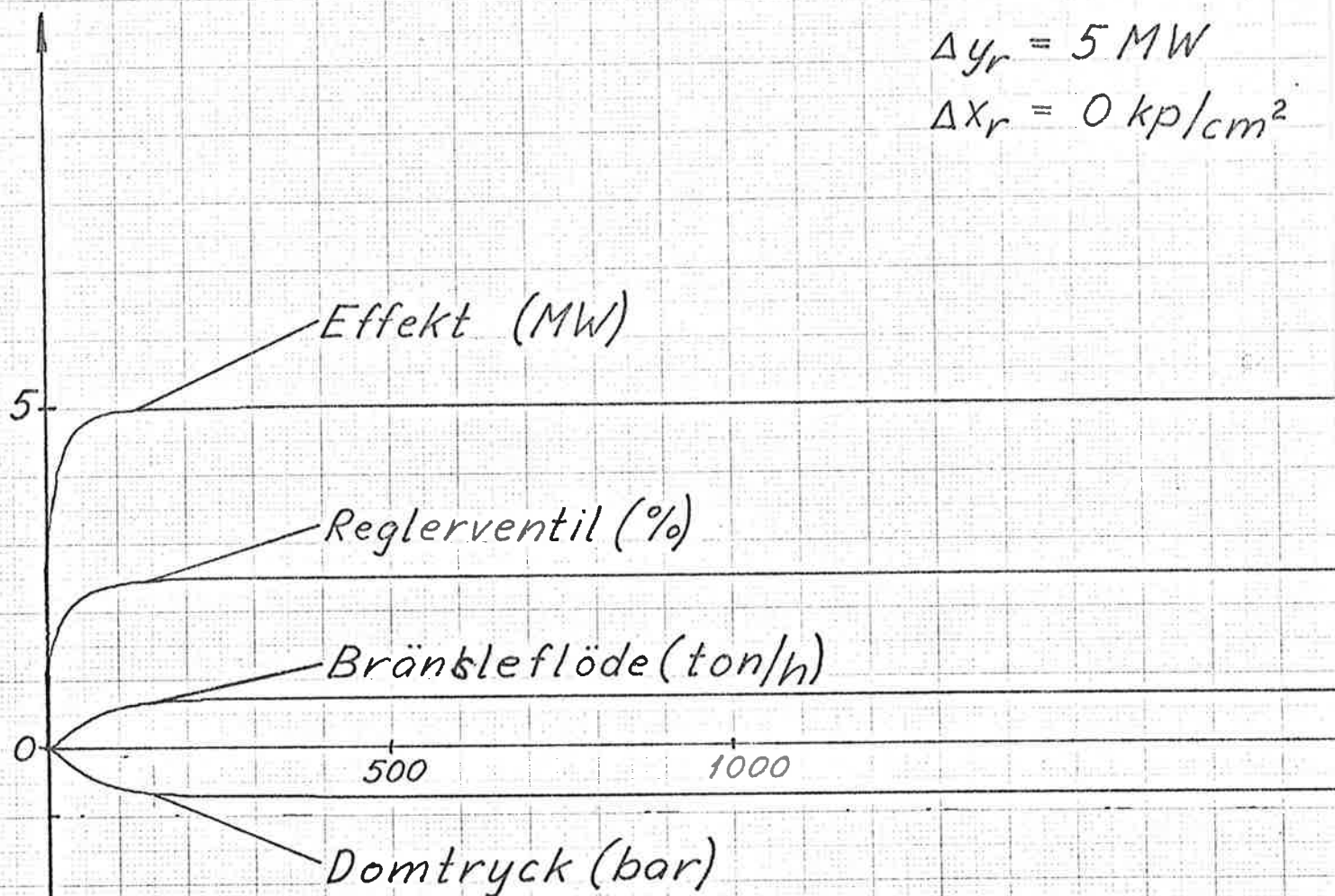
$$K_2 = 0.48$$

$$a = 10.0$$

Slutna systeme

$$\Delta y_r = 5 \text{ MW}$$

$$\Delta x_r = 0 \text{ kp/cm}^2$$



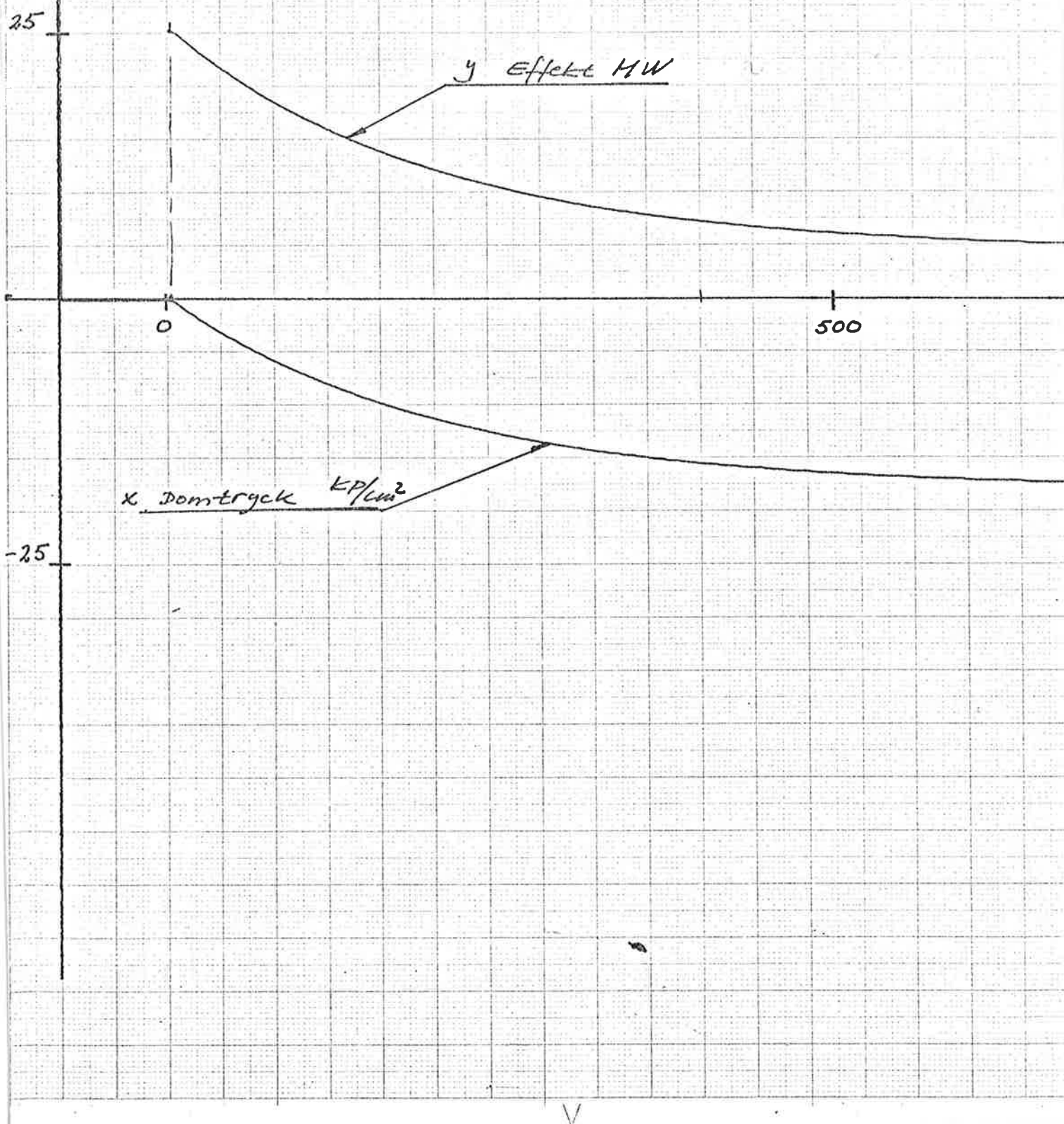
$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = 0.48$$

$$a = 10.0$$

Bränsleflöde $u_1 = 0$

Reglerventilläge u_2 10% steg.



ANALYS OCH REGLERING AV EN 1:A ORDNINGENS LINJÄR
MODELL ERHÅLLEN UR DEN OLINJÄRA MODELLEN AV
9:E ORDNINGEN

Innehållsförteckning:

- 1) Sammanfattning
- 2) Systembeskrivning
 verkligheten
 modellen
- 3) Systemets egenskaper
- 4) Olika reglermetoder
 diskussion
 resultat
- 5) Fysikaliska tolkningar
- 6) Linjär - kvadratisk optimering.
- 7) Referenser

SAMMANFATTNING

Föreliggande projektarbete definieras;

Förutsättningar:

Systemet som skall regleras är ett enkelt ångkraftverk bestående av en dompanna och en turbingrupp. Insignaler är bränsleflöde, matarvattenflöde och reglerventilläge. Utsignal är den avgivna effekten och som tillstånd väljes domtrycket i pannan.

Uppgift:

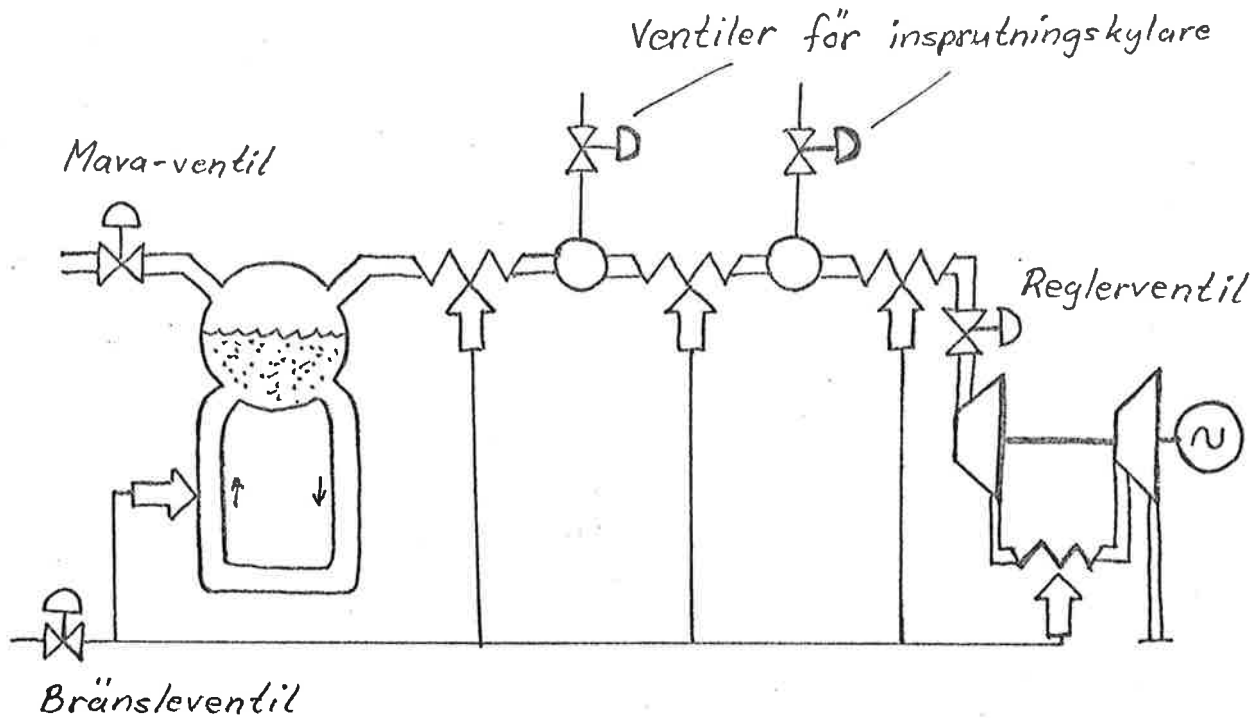
Reglera systemet genom att införa lämplig återkoppling, så att man efter en störning erhåller önskad uteffekt så snabbt som möjligt utan att tillståndet och insignalerna överskrider maximalt tillåtna värden. Använd en tidigare framtagna modell för systemet och utför syntesen på institutionens processdator med hjälp av linjär-kvadratisk-optimering.

Två olika alternativ har studerats, konstanteffektreglering, vilket ges av återkoppling från enbart domtrycket och resulterar i en relativt långsam insvängning hos både tryck och uteffekt, samt reglering med återkoppling från både domtryck och skillnaden mellan producerad uteffekt-önskad uteffekt vilket ger dels önskad uteffekt utan stationärt fel, dels en snabb insvängning hos ut-effekten. Nackdelen med den sistnämnda regleringen är att man får ett stationärt fel i domtrycket så fort uteffekten inte överensstämmer med den effekt kring vilken modellen, som rent fysikaliskt är olinjär, har linjäriserats.

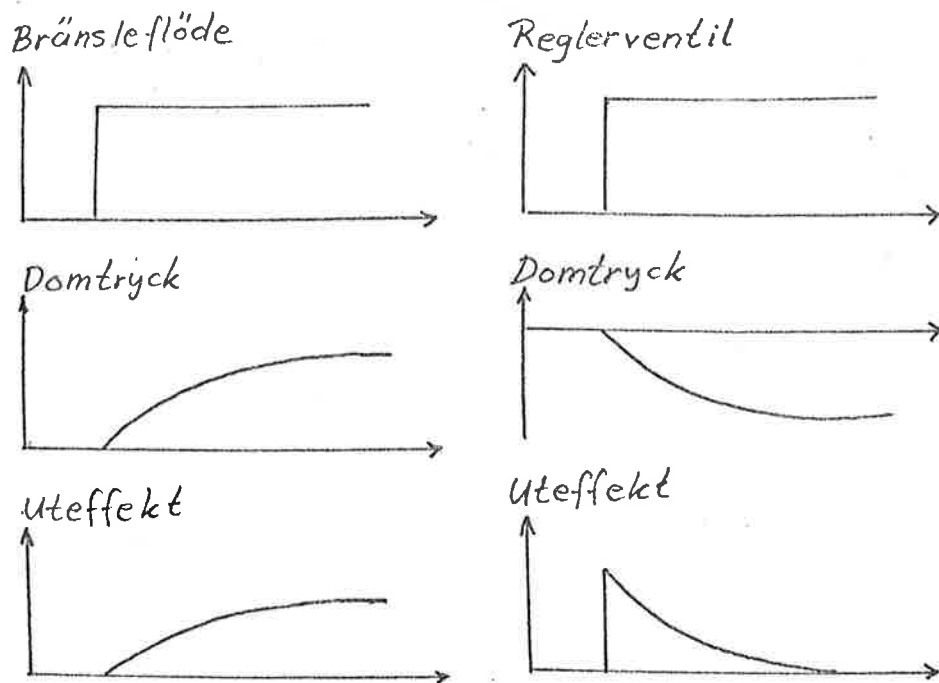
SYSTEMBESKRIVNING

Verkligheten:

Ett förenklat kopplingsschema över systemet visas i nedanstående figur.



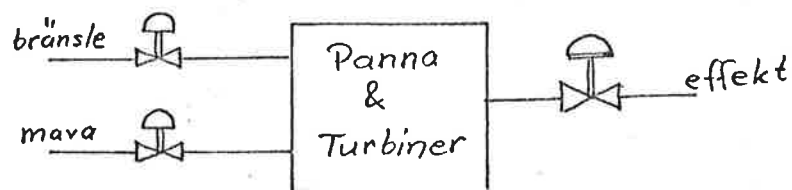
Pannan är en oljeeldad dompanna av självcirkulations-typ och ger en maximal uteffekt av 160 MW. Pannans uteffekt bestäms av matarvattenflödet och bränsleflödet till densamma. Systemets uppförande då steg lägges på insignalerna visas av fig. nedan. Vänd.



Kurvornas utseende indikerar att systemet kan beskrivas av en första ordningens modell.

Modellen:

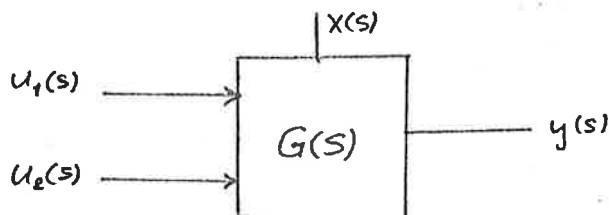
Panna-turbingrupp betraktas som en energireservoar. Energi tillföres via bränsle och matarvatten och anläggningen avger energi i form av elektrisk effekt. Se fig. nedan.



Den i systemet upplagrade energin uttryckes som en funktion av domtrycket. Vidare inför man en lokal återkoppling som styr matarvattenflödet från domtrycket för att få en enklare modell.

Avgiven effekt betraktas som en funktion av reglerventilens läge och av ångans tillstånd vid turbininloppet.

Ovanstående ger en modell enligt fig. nedan.



u_1 = bränsleflöde

u_2 = reglerventilläge

x = domtrycket

y = uteffekten

Modellen linjäriserades kring följande driftspunkt:

$$x = 142.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$y = 140 \text{ MW}$$

$$u_1 = 34.4 \text{ ton/h}$$

$$u_2 = 1.0 \text{ (h. öppen)}$$

Detta utmynnar så småningom i följande systemekvationer:

$$\dot{x} = -0.0042 x + \begin{pmatrix} 0.02 & -0.78 \end{pmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1.145 \\ 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 257 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u$$

Med u_1 i kg/s och u_2 i % erhålles slutligen:

$$\dot{x} = -0.0042 x + \begin{pmatrix} 0.072 & -0.0078 \end{pmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1.145 \\ 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 2.57 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u$$

Variablerna x , u och y står alltså för avvikelserna från driftspunkten. C- och D-matrisernas andra rad är tillagda bara för att kunna observera tillståndet x . En komplett beskrivning av modellens härledning finns i Referens 1.

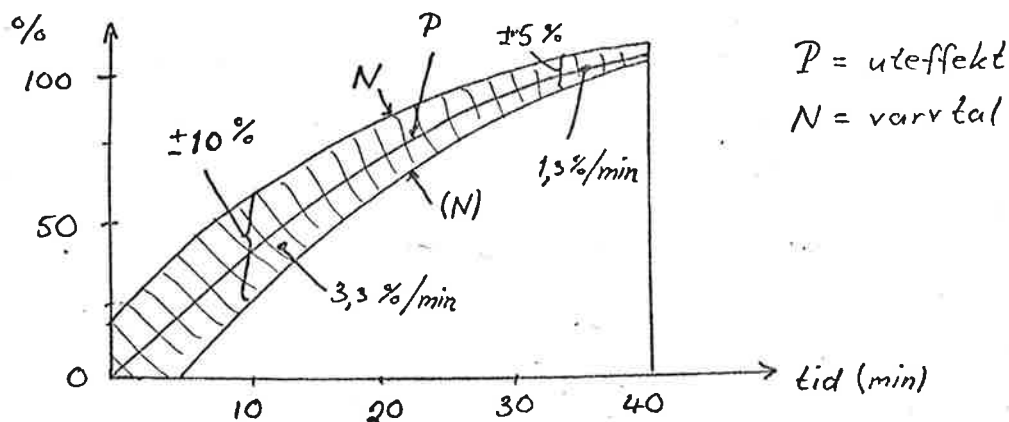
SYSTEMETS FYSIKALISKA EGENSKAPER

Själva domen i dompannan arbetar under stora påkänningar. För att undvika sprickbildning i denna måste man se till att domtrycket dels inte varierar för mycket, dels att de variationer som förekommer inte sker för snabbt. Eftersom pannan dessutom är av självcirkulationstyp (se ref. 2) finns det dessutom risk för sönderbränning av stigrören om domtrycket sjunker för snabbt.

Eftersom domtrycket påverkas ogynnsammast av reglerventilen innebär riskerna ovan att man alltid måste reglera reglerventilen varsamt, dvs ej göra för snabba eller/och stora ändringar i ventilläget.

Dessutom "hinner inte domtrycket med" om man gör för snabba ändringar. Detta påverkar snabbheten hos effektsvaret. Om domtrycket p. g. a. tidigare regleringar ej hunnit svänga in sig vid en viss tidpunkt utan ligger för lågt t. ex. och man just då öppnar reglerventilen erhåller man den önskade effekten långsammare än om domtrycket varit det riktiga. Detta är ju ganska naturligt eftersom domtrycket ju är ett direkt mått på pannans energiinnehåll; ju lägre energinivå i pannan som "trycker på" desto långsammare svarar pannan då man öppnar reglerventilen. Motsatta förhållanden gäller om domtrycket ligger för högt då man reglerar.

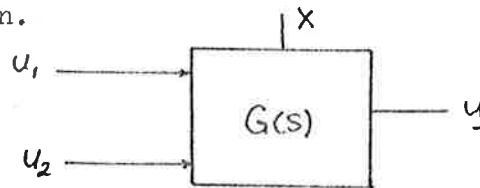
För den dyrbara turbingruppen gäller speciella restriktioner beträffande driftstillståndet. Fabrikanten utfärdar ett speciellt s. k. lastbegränsningsdiagram som anger hur man får reglera turbinerna utan att överskrida de tillåtna temperaturspänningarna i turbinhusen. Se fig. nedan.



OLIKA REGLERMETODER

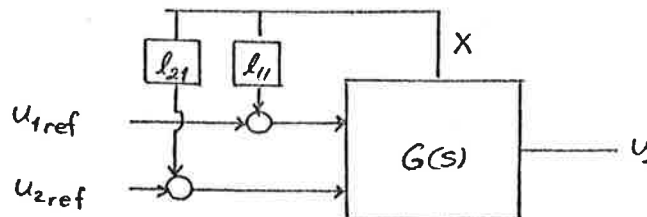
Diskussion:

Systemet åskådliggöres enligt tidigare av fig. nedan.

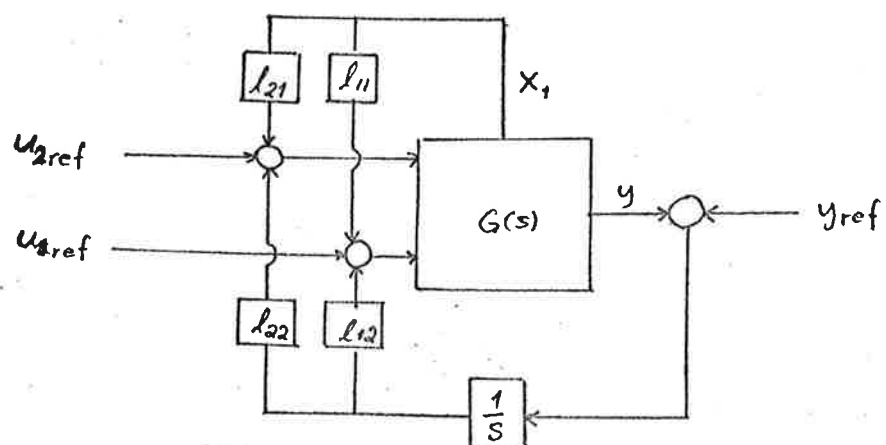


- a) Enligt kapitel 3 vill man hålla domtrycket konstant. Detta åstadkom vi enkelt genom att återkoppla domtrycket och låta det påverka insignalerna på lämpligt sätt. Den optimala återkopplingen erhöll vi med hjälp av linjär-kvadratisk optimering på institutionens processdator. Se kap 6.

Med denna reglering kommer domtrycket alltid att svänga in sig mot önskat värde medan man däremot erhåller ett stationärt fel hos uteffekten om den ej ska vara densamma som i den punkt kring vilken systemet är linjäriserat. Det återkopplade systemet ser ut som fig. nedan visar.

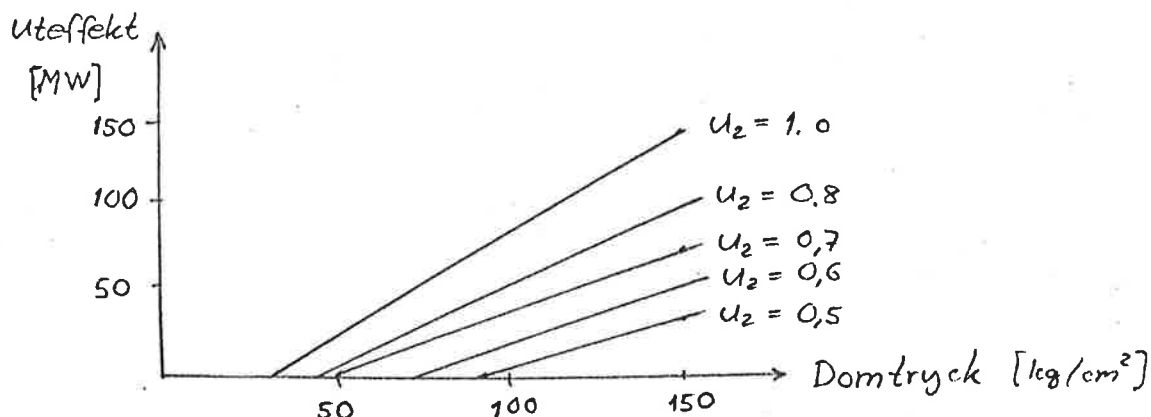


- b) För att dessutom kunna variera uteffekten införde vi en integrerande återkoppling från skillnaden mellan den önskade effekten - avgiven effekt (=reglerfelet). Se fig. nedan.



Med denna reglering erhåller man alltid önskad uteffekt, men samtidigt får man i stället en stationär avvikelse i domtrycket. Eftersom systemet är linjäriserat kring en viss driftspunkt erhåller man i detta fall endast rätt domtryck vid det effektuttag som man hade i den valda driftspunkten.

- c) Dompannans uteffekt beror dels av domtrycket, dels av regler-ventilens läge enligt fig. nedan.



Den optimala regleringen erhåller man om man även inför en referens för domtrycket och återkopplar med integrering från tryckfelet (verkligt domtryck - referenstryck).

Systemets uppförande enligt b) ovan anses emellertid tillfredsställande speciellt om det valda ångkraftverket alltid arbetar kring den valda driftspunkten. Regleringen klarar av en stegstörning i effekten av 20 MW (maxeffekt 160 MW) utan att domtrycket sjunker mer än ca 7 bar (nivå 142.5 bar), och insignalerna håller sig inom de angivna gränserna. För insignalerna gäller att man får reglera maximalt 10 % av totalt reglerområde med reglerventilen samt maximalt 1 kg/s med bränsleflödet.

Man kan alltså reglera systemet enligt tre olika metoder:

- Konstanteffektreglering med konstant domtryck
- Variabel uteffekt med begränsade variationer i domtrycket
- Variabel uteffekt med konstant domtryck

Resultat:

Det öppna systemets uppförande för stegstörning i domtrycket syns i fig 1. Insvängningstid 1100 sek.

- a) Med återkoppling från enbart domtrycket erhöll vi snabbaste insvängningstiden för både domtryck och uteffekt till drygt 300 sek. Se fig. 2a. Insignaler-na visas i fig 2b.

Systemet blir alltså ca 4 ggr snabbare än det öppna systemet.

- b) Med återkoppling även från reglerfelet får man vid stegstörning i effekten på 5 MW den önskade effekten efter ca 50 sek. Redan efter ungefär 20 sek. levererar systemet 80 % av den önskade uteffekten. Se fig 3 a o. b. Systemets uppförande för måttlig rampstörning syns i fig 4 a o. b.

Måttliga störningar i både domtryck och uteffekt syns i fig 5 a o. b.

Systemets uppförande vid kraftiga störningar kan slutligen studeras i fig 6 a -b , 7 a -b

De optimala matriserna blir:

i fall a)

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0.31 \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 9.5 & 0 \\ 0 & 0.11 \end{bmatrix}$$
$$L = \begin{bmatrix} 0.09681 \\ -0.9058 \end{bmatrix}$$

i fall b)

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 2000 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 150000 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$
$$L = \begin{bmatrix} 0.1006 & -0.00031 \\ 0.2278 & -0.0389 \end{bmatrix}$$

FYSIKALISKA TOLKNINGAR

Enligt figuren i Kap. 2 som visar domtryck och uteffekt som funktion av stegstörningar i resp. bränsleflöde och reglerventilläge framgår att domtrycket reagerar relativt långsamt för båda störningarna medan däremot uteffekten reagerar snabbt för ändringar i reglerventilläget och långsamt för ändringar i bränsleflödet.

Orsakerna till dessa egenskaper hos systemet förklaras av nedanstående resonemang.

En stegstörning i bränsleflödet ger sekundsnavt en stegstörning i eldningen av pannan. Den ökade värmeproduktionen i eldstaden skall emellertid först absorberas av atmosfären i eldstaden, överföras till stigrörens ytterväggar, ledas genom godset i stigrören och överföras till vattnet i stigrören innan den resulterar i en temperatur- och tryckändring inne i själva domen. Allt medium mellan brännarlågorna och vattnet i stigrören kan alltså betraktas som ett buffertlager som måste exciteras till en högre värmenivå innan man erhåller någon förändring i själva domtillståndet. Dvs. det är fysikaliskt sett den stora trögheten hos värmeöverföringsprocessen som begränsar bränsleregleringens snabbhet.

I och med den stora tidskonstanten hos värmeöverföringen mellan brännare och vatten-ång-blandningen i domen har man ingen chans att producera den önskade effekten i samma ögonblick som den efterfrågas. Detta gör att man förutom domens funktion som ångproducent måste ge den en funktion som energibuffert, dvs domen måste lagra en viss energimängd. Ur rent reglerteknisk synpunkt vill man ha så liten lagring som möjligt eftersom systemet då blir snabbare, men samtidigt vill man ha ett större lager eftersom domen då blir okänsligare för yttre störningar, dvs stabilare och de dynamiska påkänningarna blir mindre. Den slutligt valda energikapaciteten hos domen är tydligen en kompromiss mellan olika motstridande krav vilket ju ej är speciellt förvånansvärt.

Dompannans egenskap som energibuffert innebär också att det energiflöde man tar ut är litet i förhållande till det energiinnehåll som finns i domen så länge man reglerar inom de tillåtna gränserna enligt Kap. 3. Domtrycket är ju ett direkt mått på domens energiinnehåll vilket alltså innebär att domtrycket reagerar långsamt för störningar i reglerventilläget. Däremot svarar ju uteffekten naturligtvis direkt.

Om vi nu jämför regleralternativ a) och b) ser vi att domtrycket reagerar lika trögt i de båda fallen. Domtryckets insvängningstid kan man enligt resonemanget ovan ju ej få snabbare än vad fysikens lagar tillåter. Minimitiden för vårt system är således ungefär 300 sekunder dvs 5 minuter.

Med reglering enligt a) är man endast intresserad av att erhålla rätt domtryck efter en störning i driftspunkten.

I figur 8 a o. b syns systemets uppförande efter en stegstörning i domtrycket på 10 kg/cm^2 . Reglerventilen släpper ut övertrycket och domtrycket sjunker tillsammans med uteffekten. Samtidigt ökar matarvattenflödet och bränsleflödet igen tills systemet åter är i jämvikt i driftspunkten. Med denna reglering ställer systemet alltid in sig i driftspunkten vid jämvikt dvs ger konstant uteffekt vid konstant domtryck.

Alternativ b) tar emellertid hänsyn till att systemet ska kunna lämna olika uteffekt. Eftersom modellen är exakt endast i den punkt kring vilken den linjäriserades innebär detta att så fort uteffekten inte är densamma som i driftspunkten får man en avvikelse från börvärdet hos domtrycket. Systemets uppförande för samma störning som under a) ovan syns i figur 9 a o. b. Reglerventilen stänger först momentant mer för att strypa ner uteffekten, därefter öppnar den långsamt igen för att domtrycket ligger för högt. Domtrycket sjunker; matarvattenflödet och bränsleflödet ökar och jämvikt uppstår då systemet lämnar rätt uteffekt.

Uteffekten reagerar mycket snabbt för reglerventilläget medan domtrycket påverkas mycket litet av snabba momentana ändringar i ventilläget. Den erhållna regleringen är därför rent fysikaliskt väl motiverad. Jämfört med a) ser man en annan rent praktisk fördel ; ventilen reglerar bara inom ett hälften så stort intervall.

Vi antar hela tiden att en annan viktig förutdättning är uppfylld, nämligen att domnivån hålls konstant av matarvattenventilens reglerloop, så att man alltid har samma ångmängd i domen då jämvikt råder.

Till den mkt intresserade hänvisas Referens 3 som givande läsning.

LINJÄR - KVADRATISK OPTIMERING

(Kalman m.fl. 1960)

Linjär - kvadratisk optimering användes för att konstruera regulatorer till system där konventionella syntesmetoder är otillräckliga t. ex. för system med flera in- och utsignaler.

För att metoden skall kunna användas krävs att systemet går att beskriva med linjära differentialekvationer samt att systemets förlustfunktion kan antas vara kvadratisk. Dessutom måste givetvis systemet vara styrbart. Metoden fungerar i korthet enligt följande:

Givet ett linjärt tidsinvariant system

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (\text{initialtillstånd})$$

Optimeringsproblemet formuleras då:

Givet t_1 och t_0 , bestäm en insignal $u(t)$ sådan att i intervallet (t_0, t_1) systemets förlustfunktion;

$$V(u) = \frac{1}{2} x^T(t_1) \cdot Q_0 \cdot x(t_1) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [x^T(s) Q_1 \cdot x(s) + u^T(s) Q_2 u(s)] ds$$

blir så liten som möjligt. Q_1 och Q_2 antages vara positivt semidefinita matriser.

En regulator dimensioneras ofta med ansättning av integrationsgränserna $t_0 = 0$ och $t_1 = \infty$. Regulatorns uppgift är då att styra systemet tillbaka till jämviktstillståndet $x = 0$ då en störning inträffat.

Den optimala strategin för att minimera förlustfunktionen blir att införa en linjär återkoppling från systemets samtliga tillstånd; $u(t) = u_{\text{ref}} - L \cdot x(t)$

L -matrisen blir entydigt bestämd av systemmatriserna A , B , C , D samt förlustmatriserna Q_0 , Q_1 , Q_2 . Eftersom vi i vårt fall har $t_1 = \infty$ spelar matrisen Q_0 bara en roll för tiden $t = \infty$ vilket är ointressant. Vi ansätter därför bara $Q_0 = \text{nollmatrisen}$.

Finessen med linjär - kvadratisk optimering är att om man enligt förutsättningarna valt förlustmatriserna positivt semidefinita så blir det återkopplade systemet alltid stabilt.

Man väljer alltså i praktiken olika kombinationer av matriselementen (=olika mycket straff på resp. tillstånd och insignaler) minimerar den erhållna förlustfunktionen numeriskt eller på dator, samt inför den erhållna återkopplingen och simulerar det återkopplade systemet.

Genom att studera systemets uppförande för olika förlustfunktioner kommer man så småningom fram till den återkoppling som ger den snabbaste regleringen under uppfyllande av de givna systembegränsningarna.

För mera uttömmande beskrivning se Ref. 4.

REFERENSER

1. A simplified non-linear model of a drum boiler-turbine unit.

K.J.Åström and K.Eklund
Lund Institute of Technology,
Division of Automatic Control 1971

2. Projektarbeten 1972.

Björn Wittenmark, Sture Lindahl,
J. Sternby

3. Die Regelung von Dampfanlagen.

Paul Profos
Springer-Verlag 1962

4. Linjär - kvadratisk reglérteori.

C.ing. Krister Mårtensson
Institutionen för Reglerteknik
Tekniska Högskolan i Lund

Y

1 2

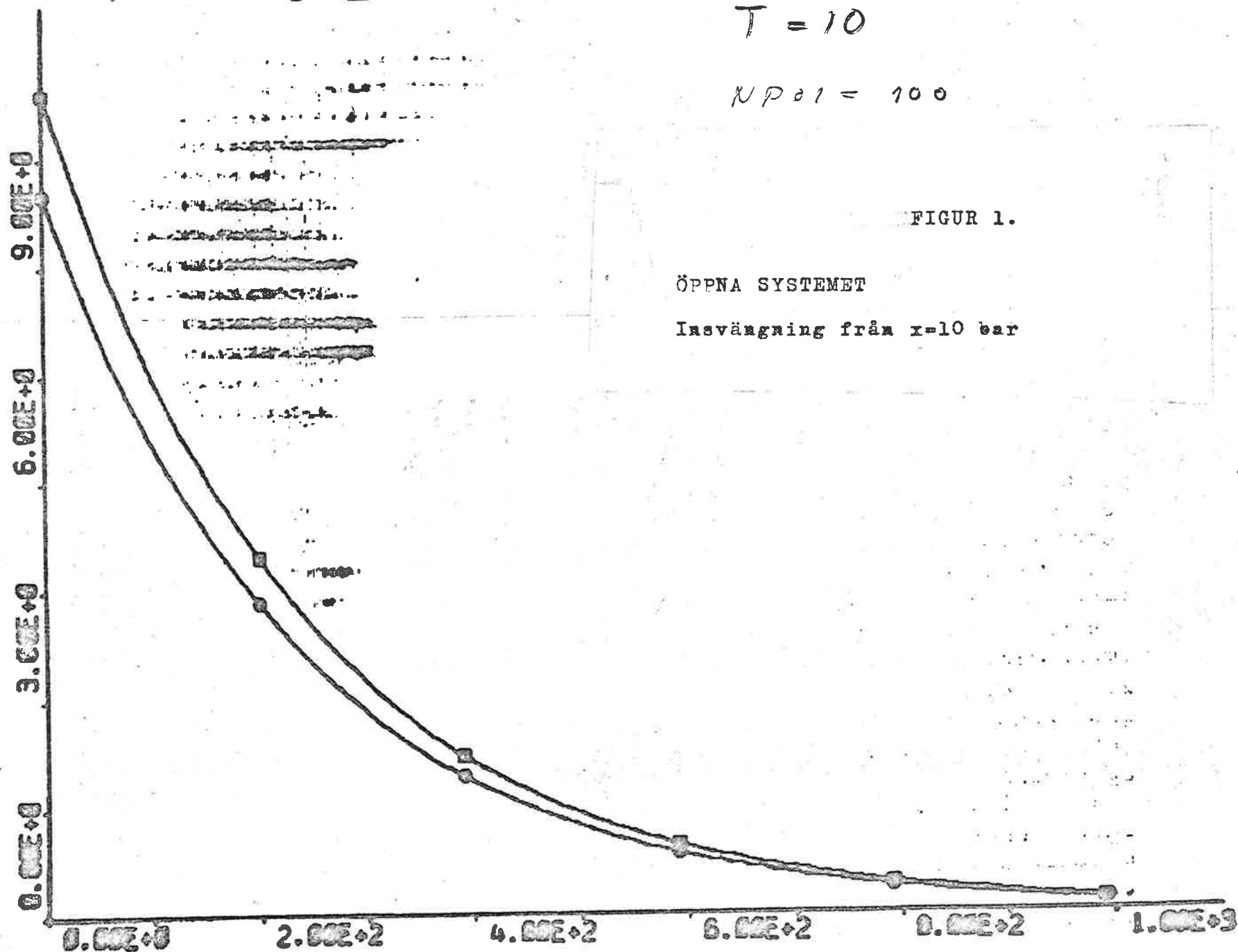
$$T = 10$$

$$NP_{01} = 100$$

①

FIGUR 1.

ÖPPNA SYSTEMET

Insvängning från $x=10$ bar

Y

1 2

[0,31]

[9.5 0]

NPT=50

(2a)

FIGUR 2a.

DOMTRYCKET ÅTERKOPPLAT

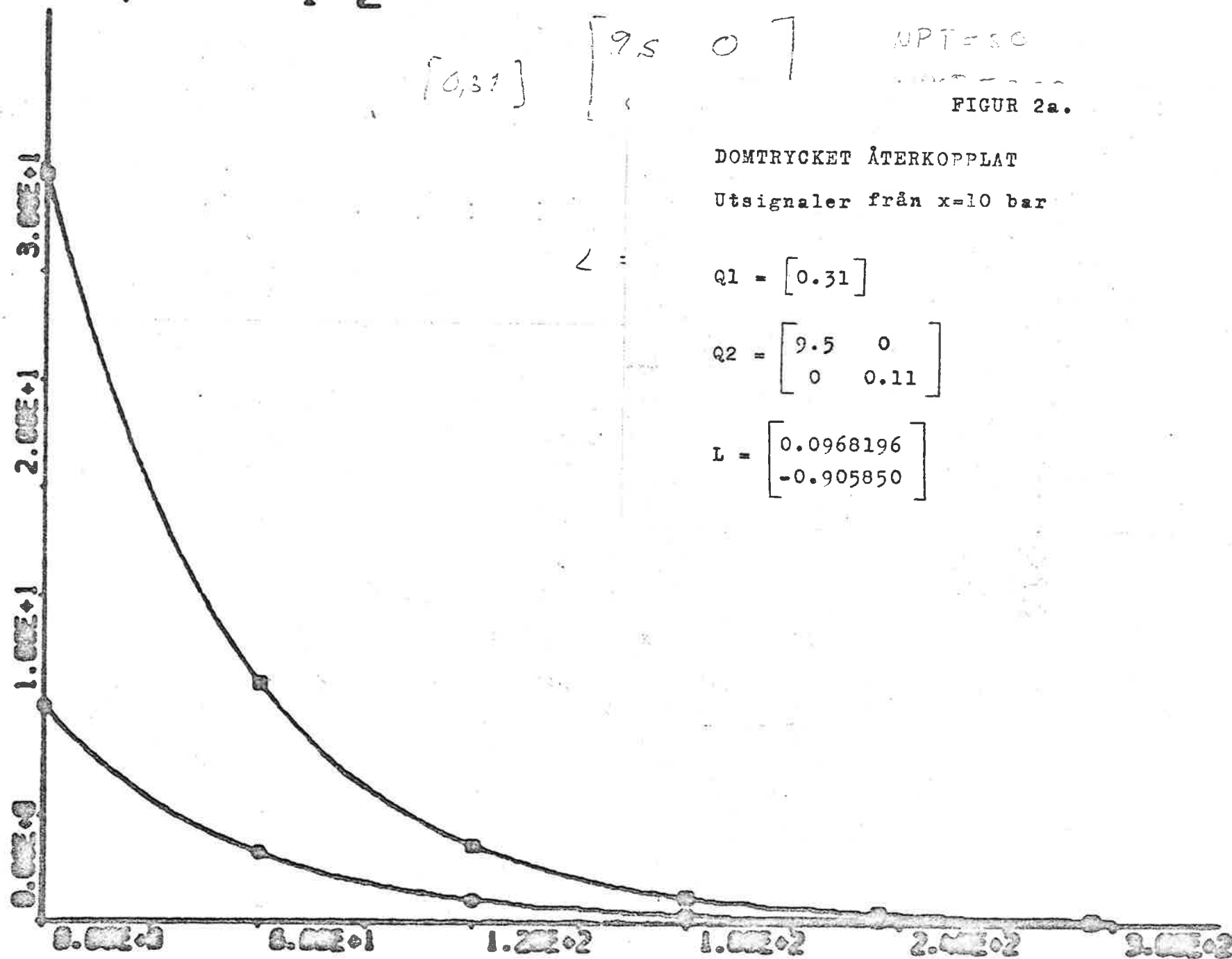
Utsignaler från x=10 bar

L =

$$Q1 = [0.31]$$

$$Q2 = \begin{bmatrix} 9.5 & 0 \\ 0 & 0.11 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.0968196 \\ -0.905850 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 0,31 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9,5 & 0 \\ 0 & - \end{bmatrix}$$

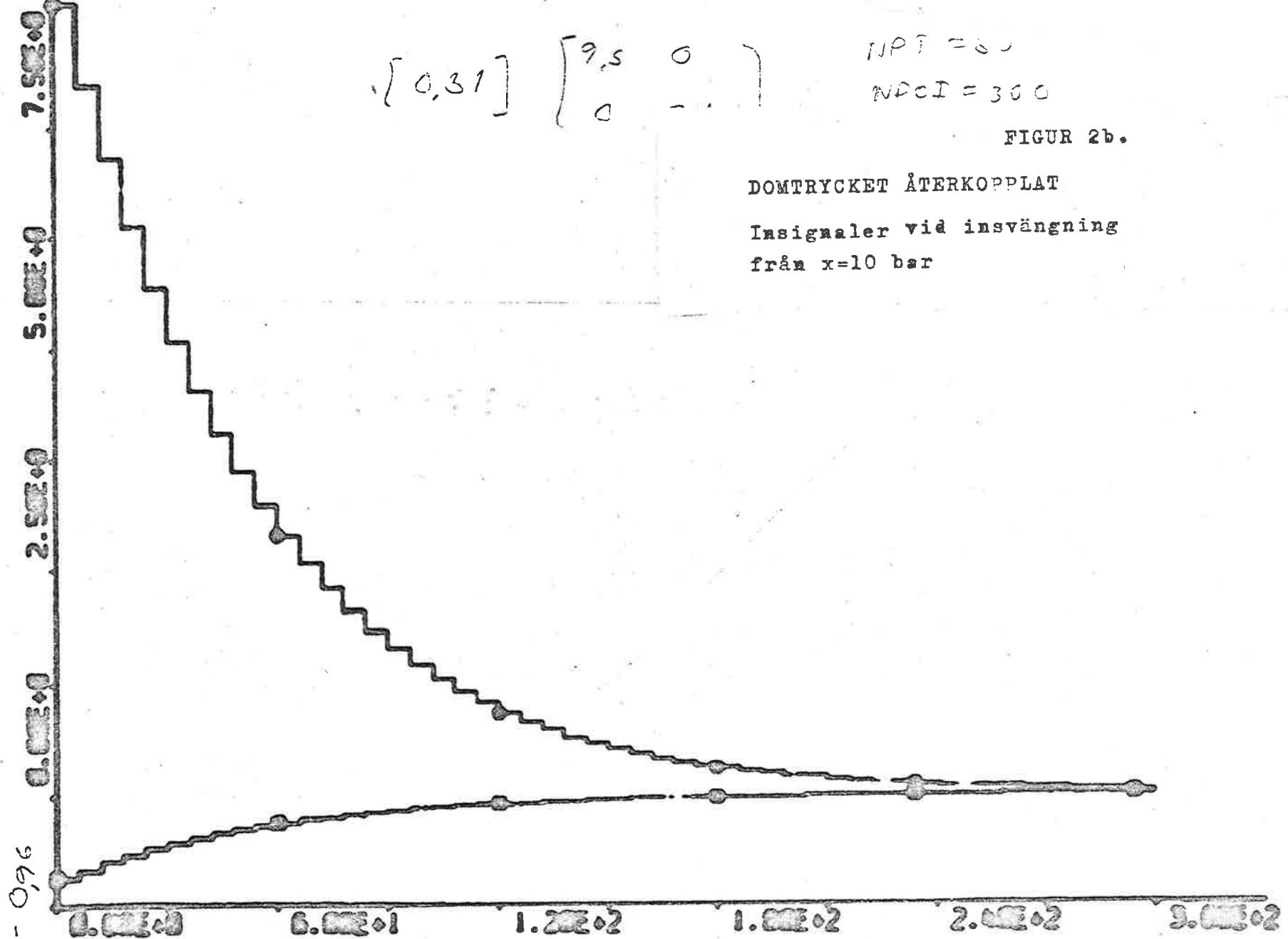
NPT = 80

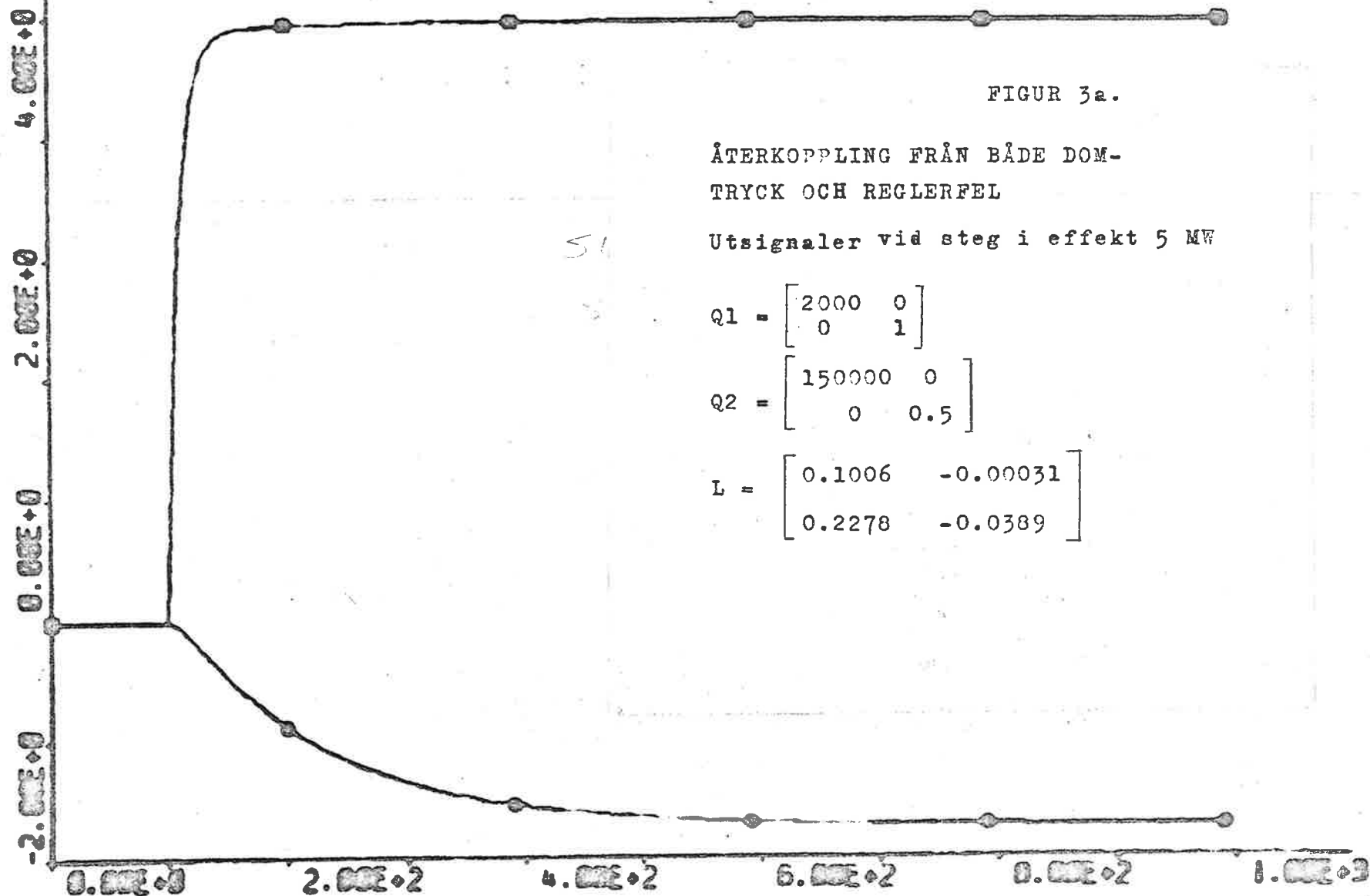
NDCI = 300

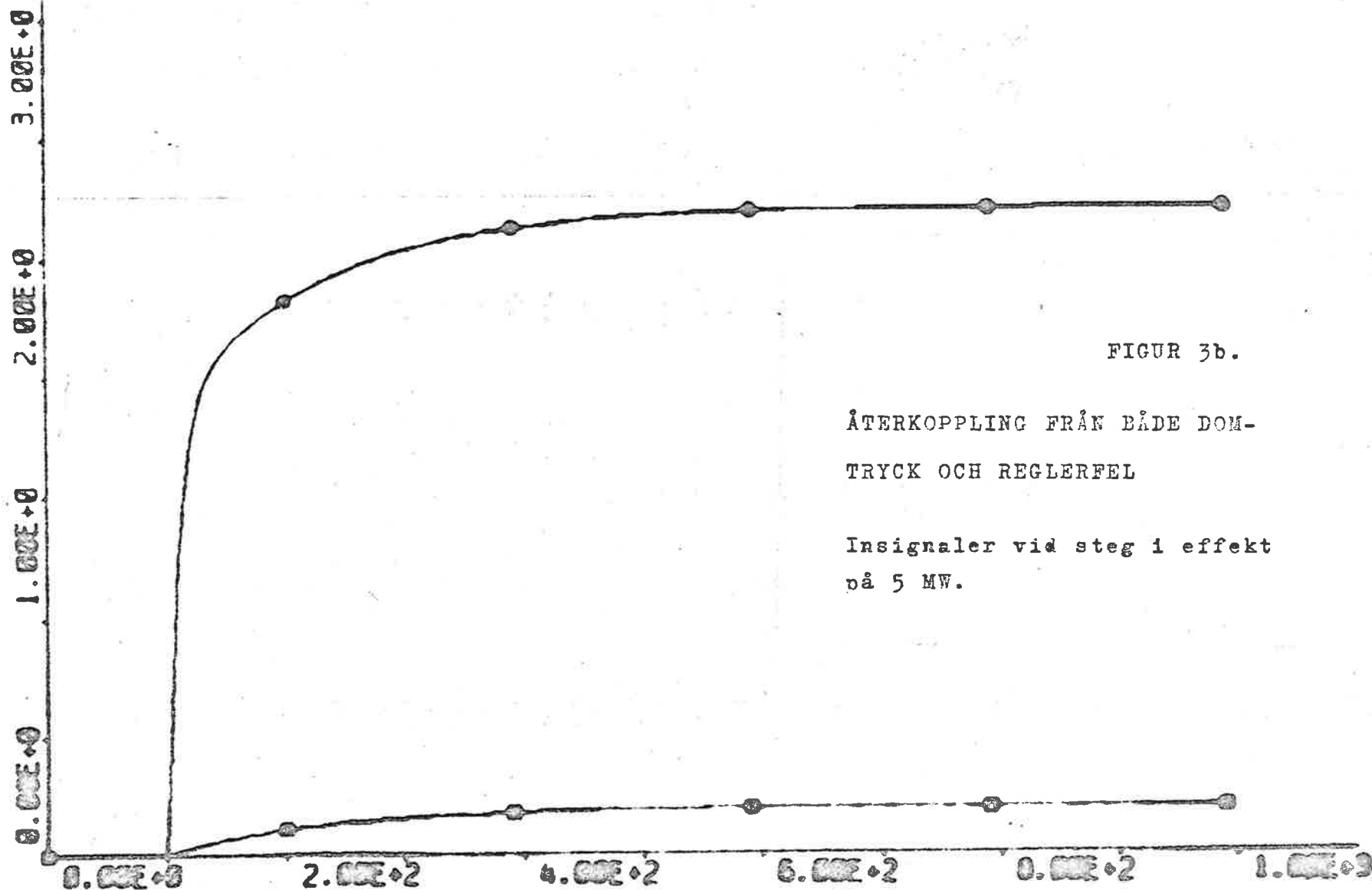
FIGUR 2b.

DOMTRYCKET ÅTERKOPPLAT

Insignaler vid insvängning
från x=10 bar



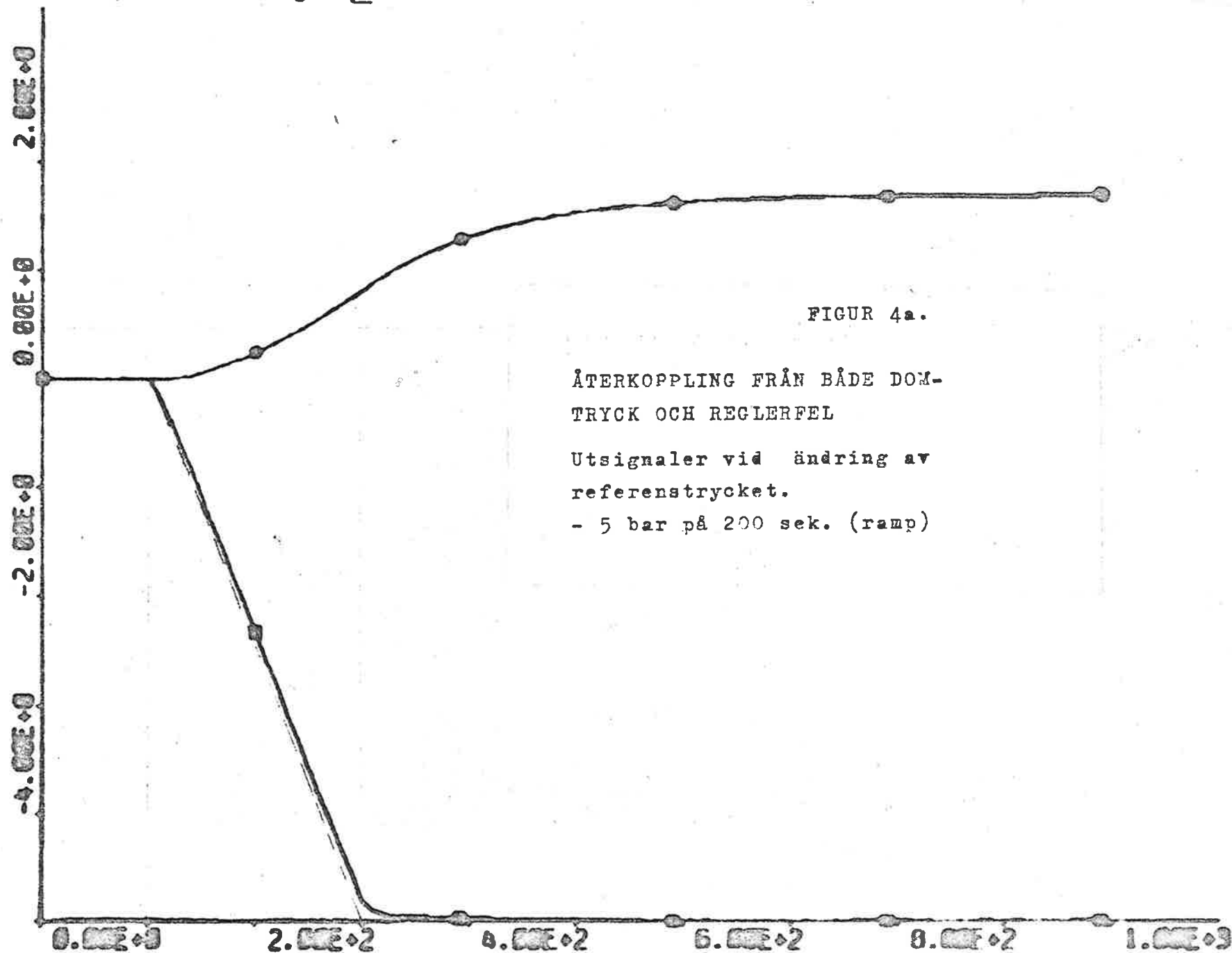


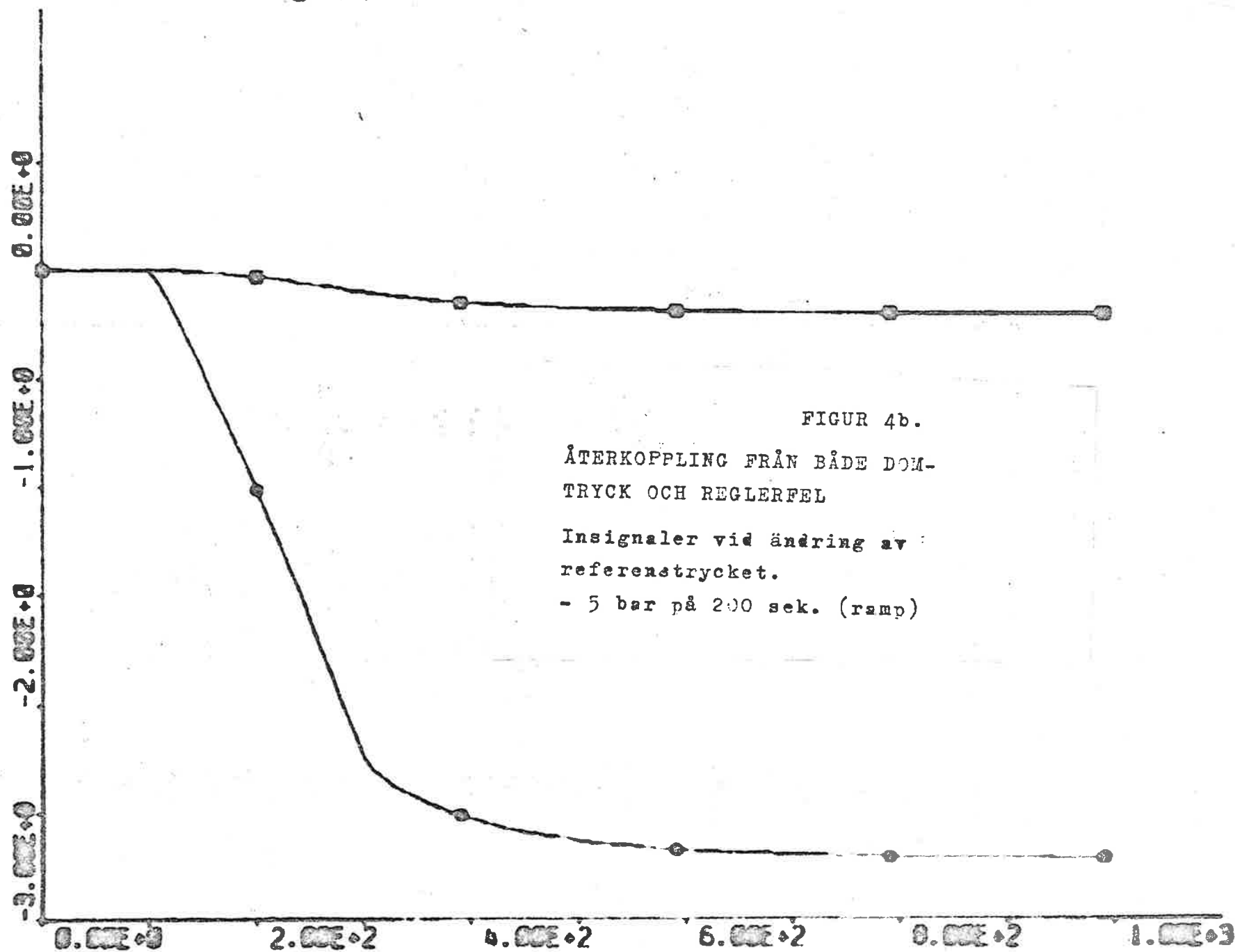


FIGUR 3b.

ÅTERKOPPLING FRÅN BÅDE DOM-
TRYCK OCH REGLERFEL

Insignaler vid steg 1 effekt
på 5 MW.



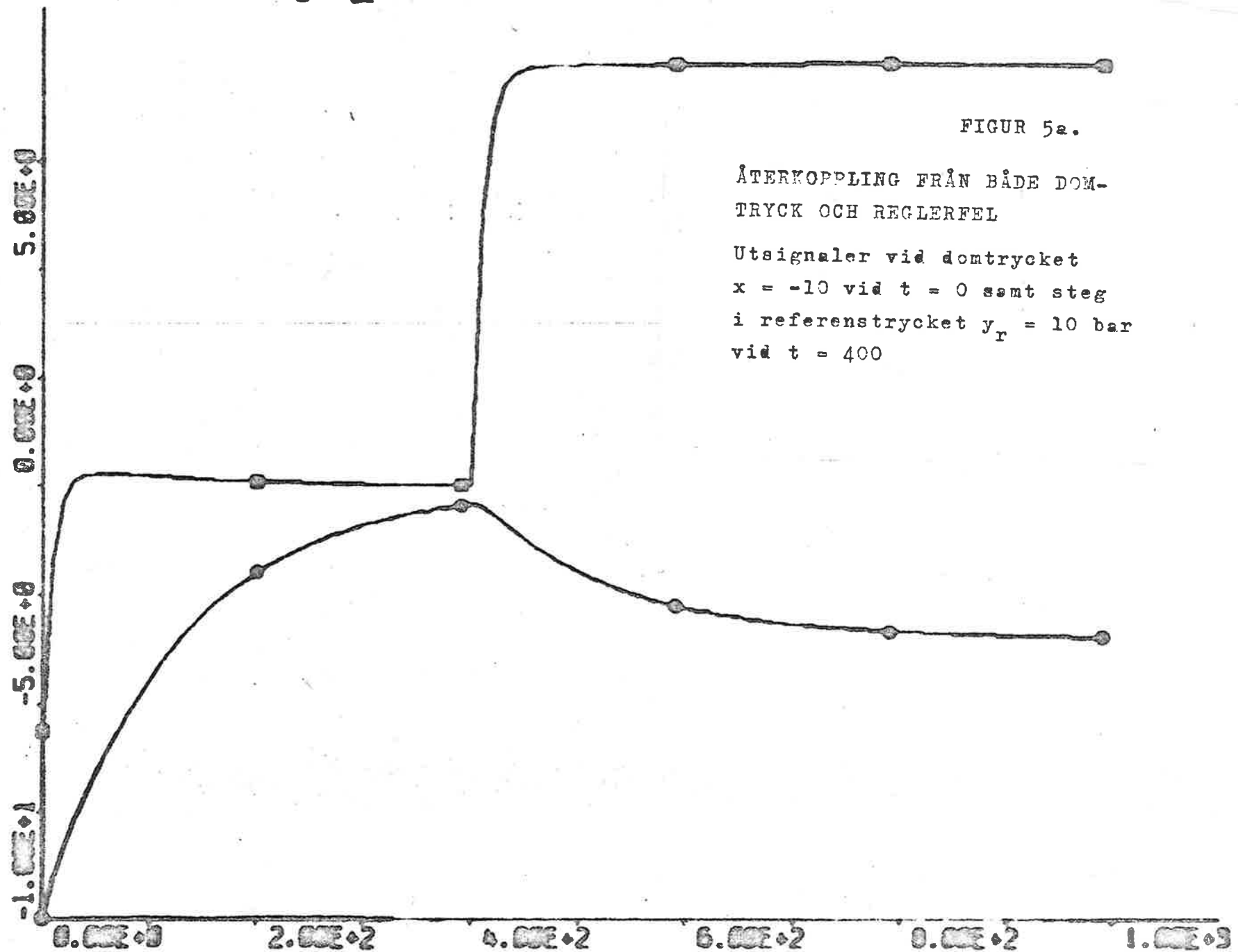


FIGUR 4b.

ÅTERKOPPLING FRÅN BÅDE DOM-
TRYCK OCH REGLERFEL

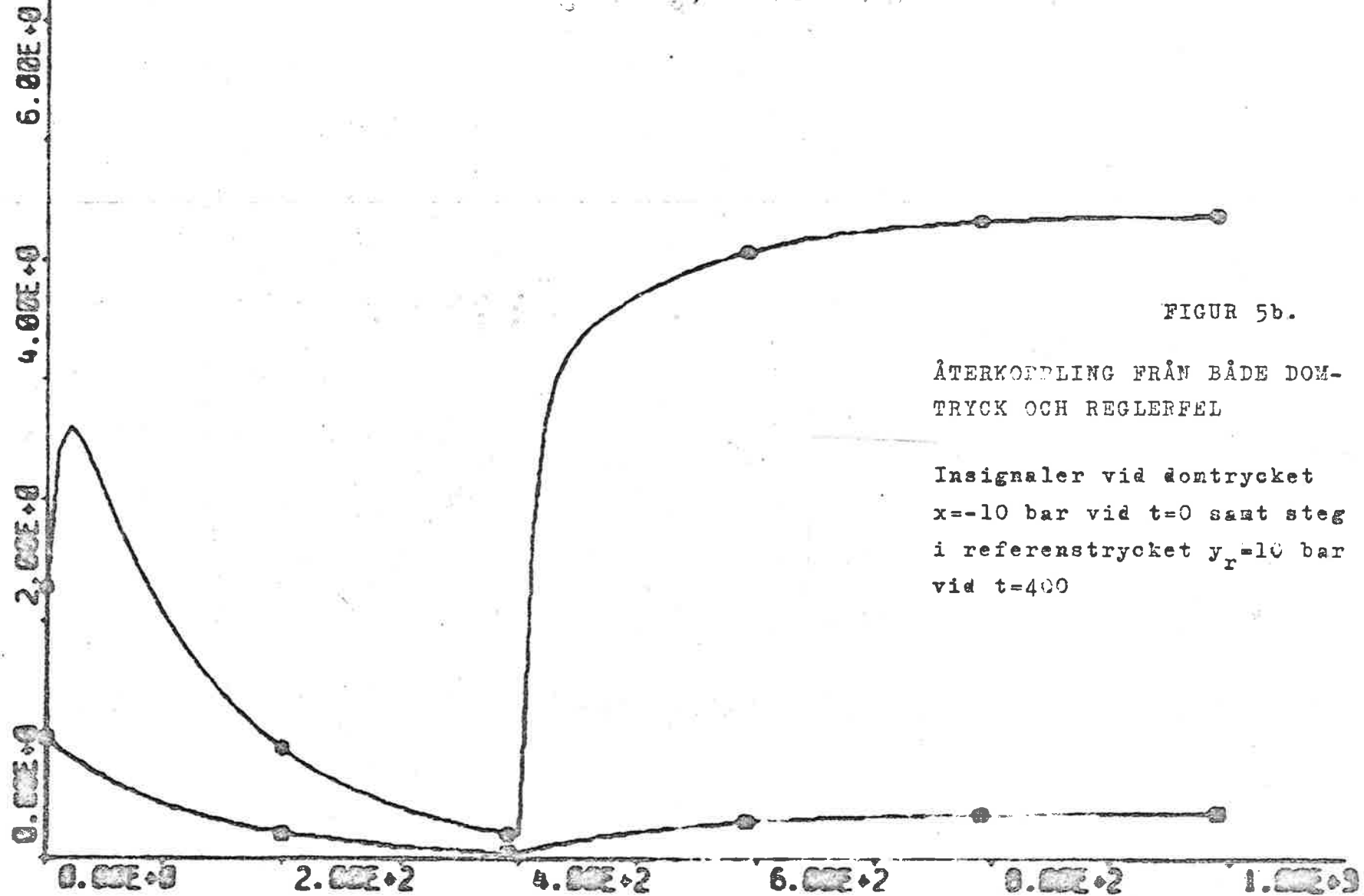
Insignaler vid ändring av
referenstrycket.

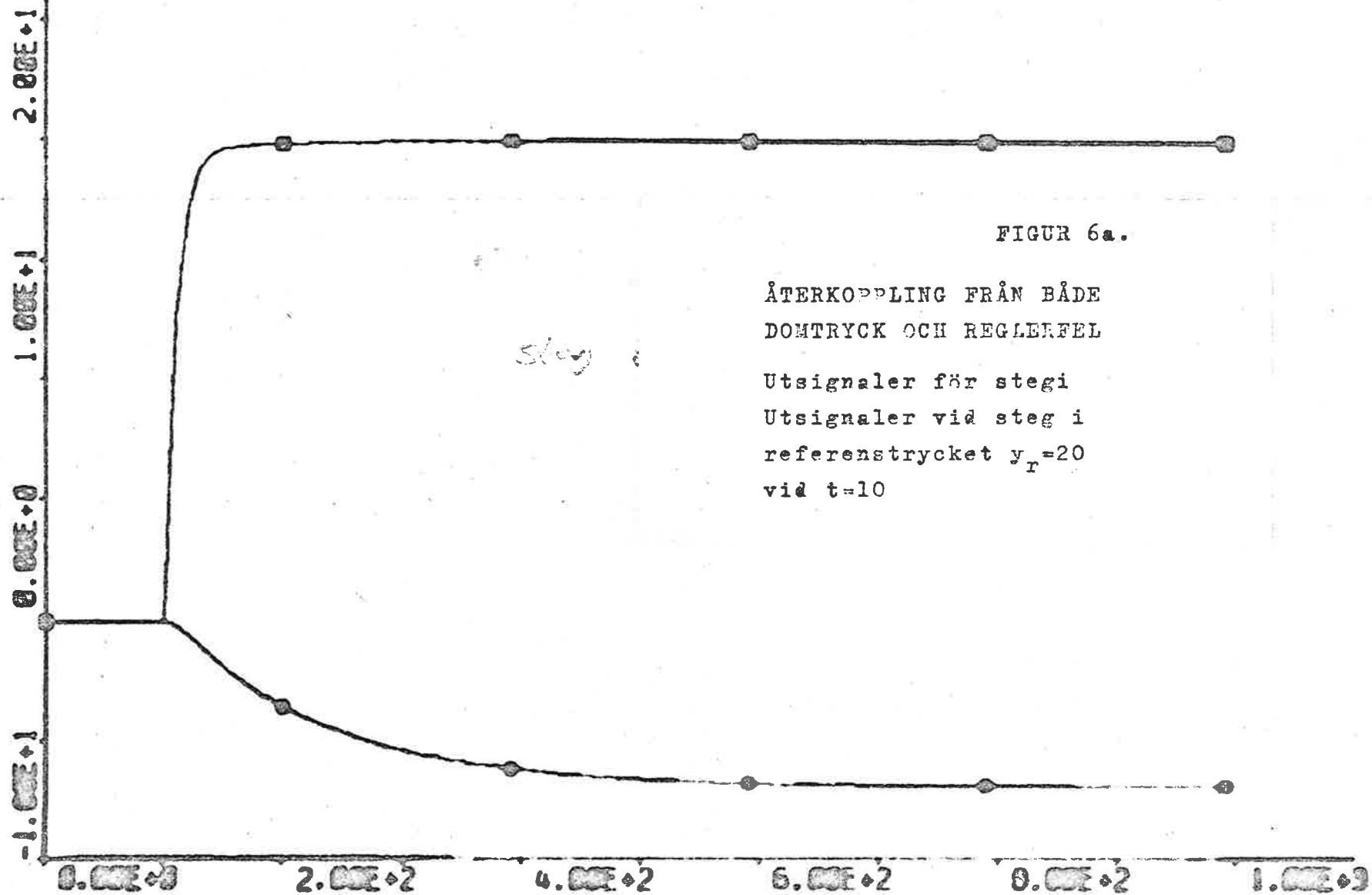
- 5 bar på 200 sek. (ramp)



Domtryck $x_1 = -10$ vid $t=0$

Steg i $y_r = 10$ vid $t=400$

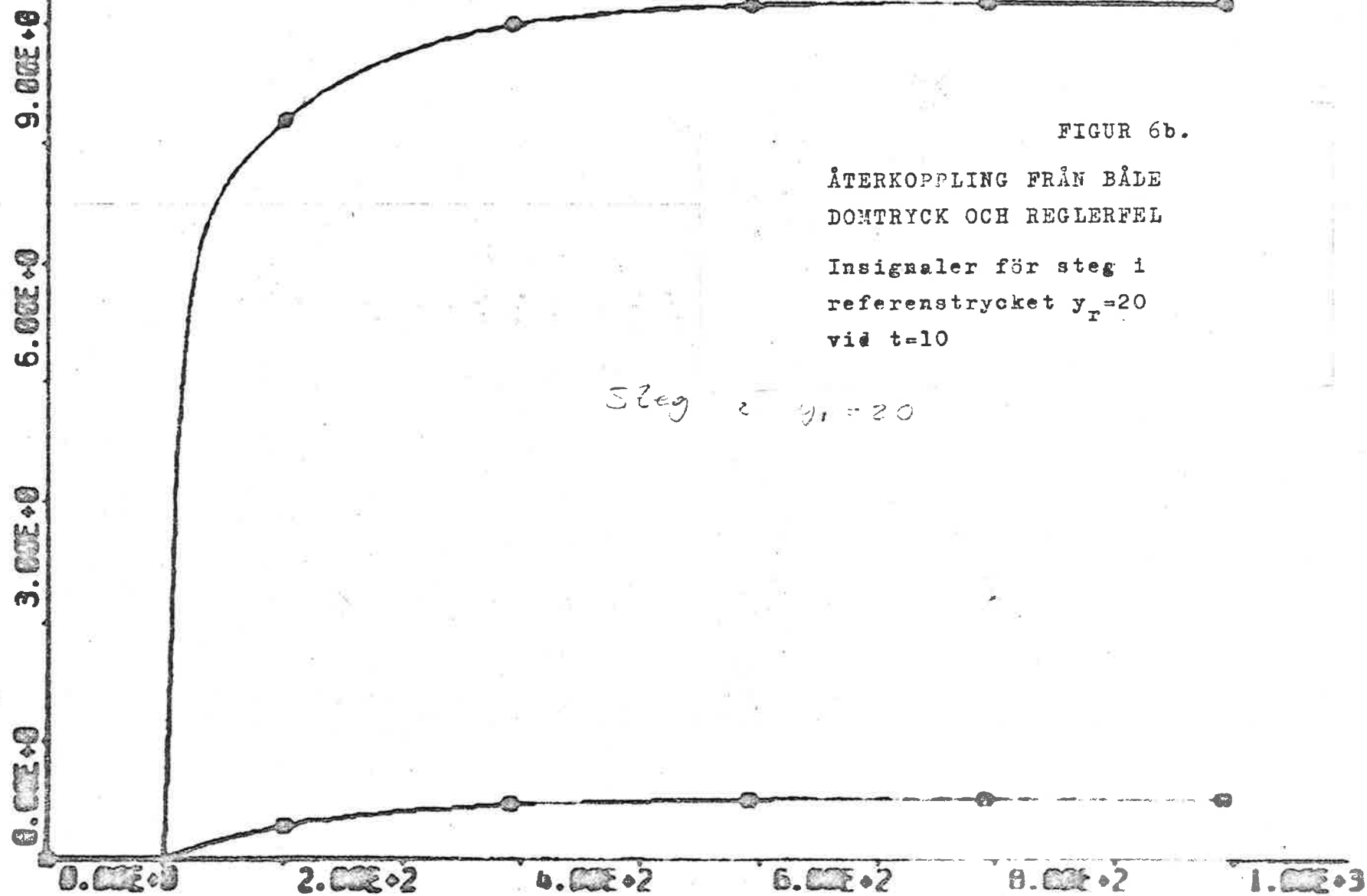


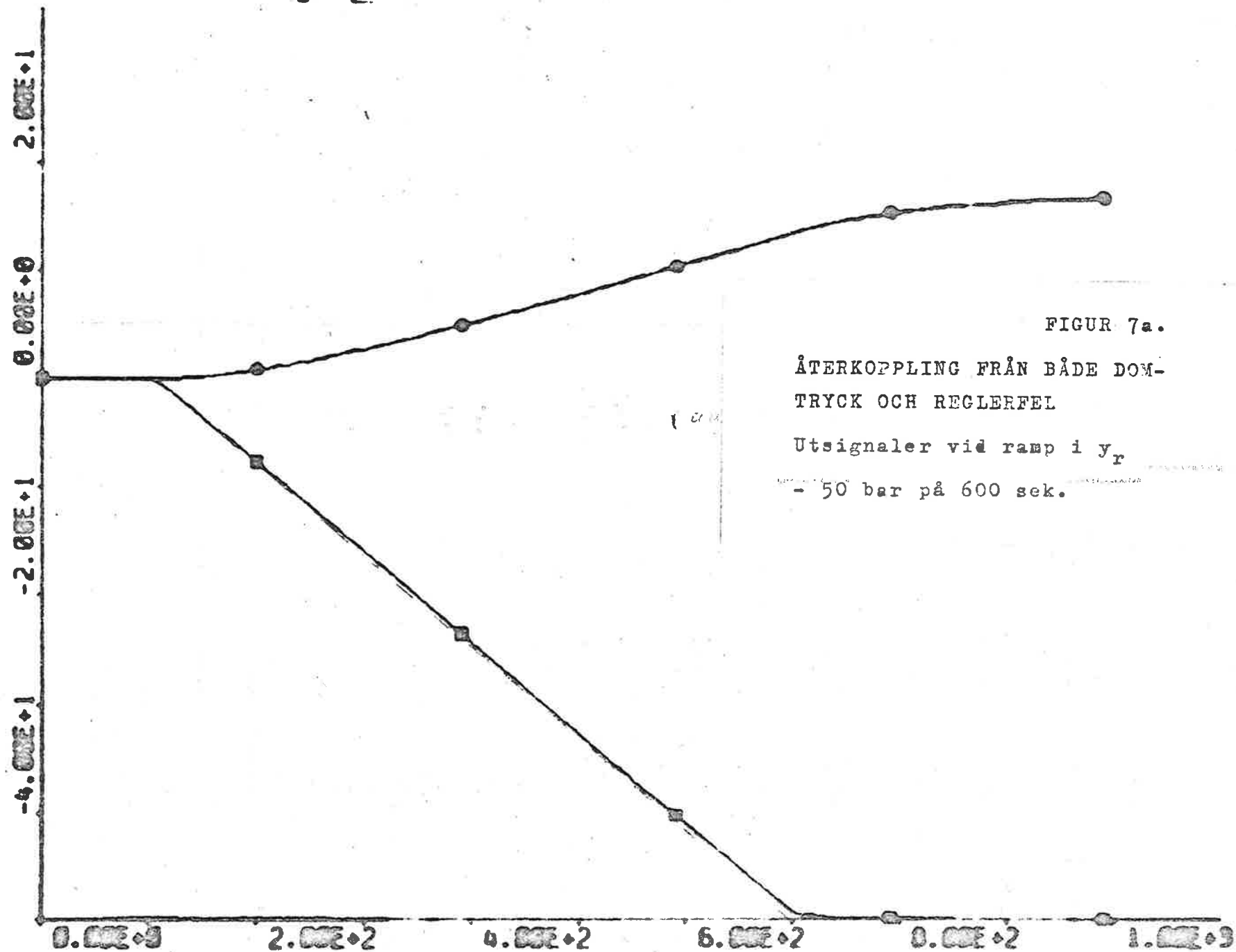


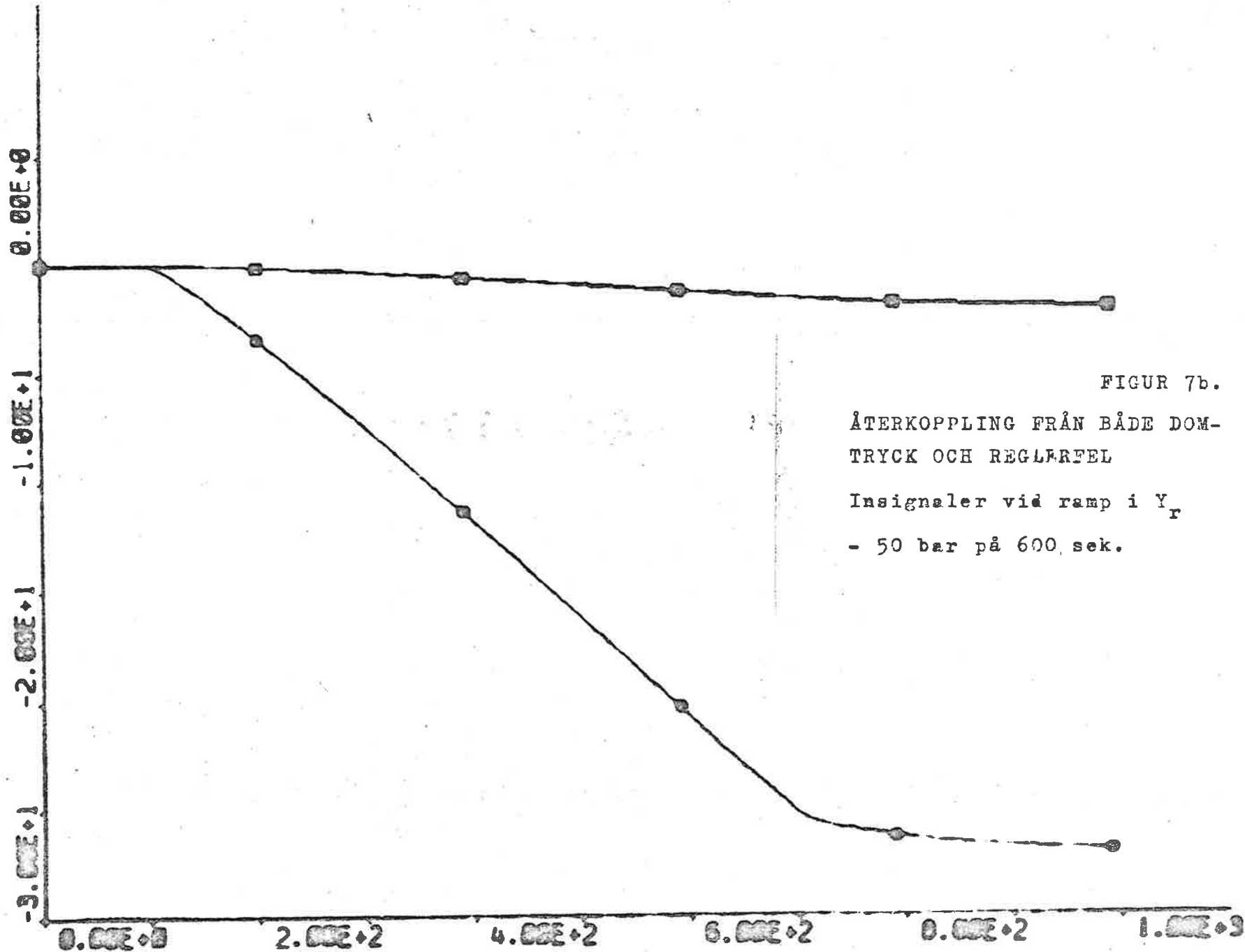
FIGUR 6a.

ÅTERKOPPLING FRÅN BÅDE
DOMTRYCK OCH REGLERFEL

Utsignaler för stegi
Utsignaler vid steg i
referenstrycket $y_r=20$
vid $t=10$







FIGUR 7b.

ÅTERKOPPLING FRÅN BÅDE DOM-
TRYCK OCH REGLERFEL

Insignaler vid ramp i Y_r

- 50 bar på 600 sek.