

INLOPPSLÅDEREGLERING

GUSTAV NILSSON

RE-138 mars 1974
Inst. för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET

UTLÅNAS EJ

INLOPPSLÅDEREGLERING

Examensarbete utfört på institutionen för
Regleringsteknik.Handledare Björn Wittenmark.

I mars 74

Gustav Nilsson.

Sammanfattning

I rapporten undersöks reglering av en enkel sluten inloppslåda.

Modellen är baserad på fysikaliska grundekvationer.

Olika reglerstrategier har jämförts. Dels konventionella PI-regulatorer för totaltryck/mäldflödesreglering och för totaltryck/luftflödesreglering. Vidare har använts regulatorer byggda på linjärkvadratisk teori. I dessa regulatorer har integratorer introducerat genom utökning av tillståndsvektorn.

Med de använda kriterierna och restriktionerna gav linjärkvadratisk reglering med integratorer det bästa resultatet.

Abstract

Control of a head-box is investigated in the report. The model is obtained from fundamental physical equations.

Different control strategies have been compared. First conventional PI-control for pressure/pulp flow control and for pressure/air flow control. Second regulators based on linear quadratic theory have been used, with and without integrators in the system. With the used lossfunction and restrictions the linear quadratic regulator with integrator gave the best result.

INLOPPSLÅDEREGLERING.

1.	INLEDNING.....	sid 1
1.1	Målsättning.....	1
1.2	Allmänt om papper.....	1
1.3	Inloppslådan.....	2
1.4	Inloppslådans reglering.....	3
1.5	Olika driftstillstånd.....	3
2.	REGLERMETODER.....	5
2.1	PI reglering.....	5
2.2	PI regulatorernas inkoppling.....	6
2.3	Linjärvadtratisk optimering.....	7
2.4	Problembeskrivning.....	7
2.5	Lösning.....	8
2.6	Realisering.....	8
2.7	Linjärvadtratisk optimering med integratorer	11
2.8	Problembeskrivning.....	11
2.9	Lösning.....	11
2.10	Realisering.....	15
2.11	Förlustmatriserna.....	18
2.12	Brus.....	19
2.13	Lösning.....	19
2.14	Realisering.....	21
3.	MÄTMETODER.....	22
3.1	Totaltrycksmätning.....	22
3.2	Luftkudde trycksmätning.....	23
3.3	Målnivåmätning.....	23
3.4	Mätning av läppöppning.....	24
3.5	Signalbehandling.....	24

4. STÄLLDON.....	sid 25
4.1 Mäldflödet.....	25
4.2 Luftflödet.....	25
4.3 Varvtalsreglering.....	26
4.4 Ventilreglering.....	26
4.5 Exempel.....	27
5. MODELLER.....	28
5.1 Härledning av modellerna.....	28
5.2 Beteckningar.....	29
6. ENKEL SLUTEN INLOPPSLÅDA.....	30
6.1 Olinjär modell.....	30
6.2 linjäriserad modell.....	30
6.3 Materialkonstanter.....	33
6.4 Konstruktionsdata.....	33
6.5 Driftsdata.....	33
6.6 Modellen vid olika driftstillstånd.....	33
6.7 Störningar i tillståndsvariabler och insignaler	35
7. SIMULERING.....	36
7.1	
8. ENKEL SLUTEN INLOPPSLÅDA MED PI REGLERING.....	36
8.1 Intrimning av PI regulatorerna.....	36
8.2 Bedömningskriterier.....	36
8.3 Totaltryck/mäldflödesregulator.....	37
8.4 Totaltryck/luftflödesregulator.....	37
8.5 Resultat.....	38
8.6 Utvärdering.....	40
9. LINJÄRKVADRATISK REGLERING.....	44
9.1 Intrimning av LK regleringen.....	44
9.2 Bedömningskriterier.....	44
9.3 Resultat.....	45

10 LINJÄRKVADRATISK REGLERING MED INTEGRATORER..sid	47
10.1 Intrimning av LKI reglering.....	47
10.2 Bedömningskriterier.....	47
10.3 Resultat.....	47
11. JÄMFÖRELSE MELLAN PI, LK, LKI REGLERING.....	48
11.1 Störning i mäldnivån.....	48
11.2 Störning i luftkuddetrycket.....	48
11.3 Störning i mäldflödet.....	48
11.4 Störning i luftflödet.....	48
11.5 sammanfattning.....	49
APPENDIX.....	53
REFERENSER.....	52

1 INLEDNING

1.1 Målsättning.

Att ange olika sätt att reglera inloppslådan till en pappersmaskin.

Simulera de olika reglersätten på några konkreta modeller av inloppslådor, samt jämföra resultaten.

1.2 Allmänt om papper

Pappersproduktionen utgör en viktig faktor i den svenska ekonomin. 1971 producerades ca. 9000 miljoner ton. Papperet svarade för ca. 4% av den totala exporten. För att producera papper användes ved, som hugges till flis. Flisen kokas i lut för att frilägga cellulosa-fibrerna.

Massan genomgår sedan en renings och tvättningsprocess innan den males i kvarnar för att höja vattenabsorptionen. Den utspädda massan eller mälden pumpas in i pappersmaskinen till inloppslådan vars uppgift är att sprida mälden jämt fördelat över viraduken.

Viraduken är ett finmaskigt nät av plast eller koppar som tillåter vattnet att separera från massan.

Cellulosafibrerna bildar vätebindningar som gör att man får en självbärande pappersbana. Papperet lämnar viran och går in i press och torkpartiet där den önskade fukthalten hos papperet uppnås.

Papperet rullas slutligen kontinuerligt upp på stora valsar sk. tambourer i slutet av pappersmaskinen.

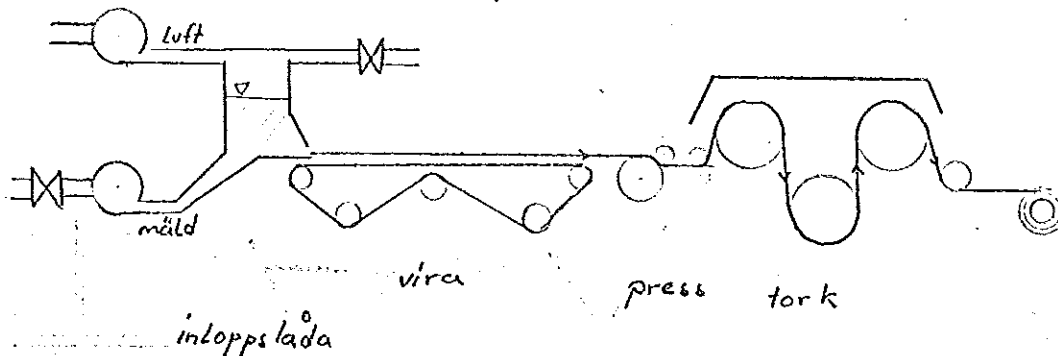


Fig1 Principskiss över pappersmaskin.

1.3 Inloppslådan

Inloppslådans primära uppgift är att fördela mäld-
suspensionen jämnt över virans bredd och på sådant
sätt att ytviktsfördelningen blir så jämn som möjligt.
Följande kriterier måste vara uppfyllda för att
möjliggöra en god papperskvalitet.

1. Strömningshastigheten måste vara likformig över hela strålen.
2. Fibrer och fyllmedel måste vara jämnt fördelade i strålen. Hopklumpning av fibrer får ej förekomma.
3. Differensen mellan virahastighet och strålens hastighet får ej bli för stor, i så fall blir pappret anisotropt, vilket påverkar viktiga kvalitetsparametrar för pappret. T.ex. blir hållfastheten i olika riktningar olika.
4. Strålens hastighet måste vara konstant för att ge konstant ytvikt.
5. Mäldsuspensionen måste ha konstant temperatur och koncentration, samt vara homogen.

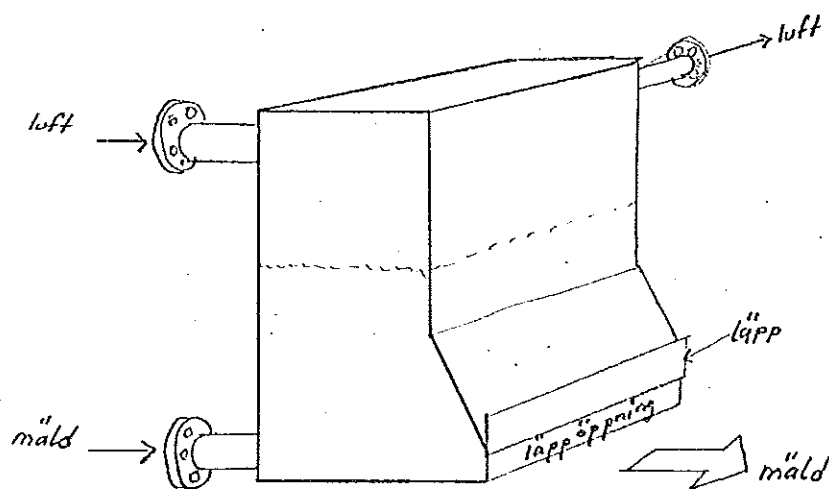


Fig.2 Principskiss över inloppslådan

1.4 Inloppslådans reglering

För att uppfylla funktionskriterierna ovan krävs förutom en jämn mäldkvalitet också en god reglering. Punkt 1,2,5 beror på den mekaniska funktionen vid olika driftsfall, samt mäldkvaliten.

Punkt 3 och 4 har att göra med reglersystemets förmåga att hålla en konstant mäldutsrömningshastighet oberoende av störningar.

Utströmningshastigheten beror på totaltrycket i inloppslådan, denna regleras därför genom att låta totaltrycket och mäldnivån styra mäldflödet och luftflödet.

Inloppslådan kan ses som ett 2:a ordningens system med mäldnivå och luftkuddetryck som tillståndsvariabler och mäldflöde och luftflöde som styrvariabler. Tillståndsvariablerna är starkt kopplade vilket innebär att den slutna inloppslådan är ett sk. sant fler-variabelt system.

Följande tabell anger hur mycket de olika variablerna får variera i ett normalt driftsfall. (ref.1,2,4)

mäldnivå	2-20 mm
spruthastighet	0,1-0,5%
utloppsdifferens	0,5-1 m/min

1.5 Olika driftstillstånd

I en pappersmaskin produceras som regel alltid papper med olika ytvikt. Om pappersmakaren vill ställa om maskinen till en ny ytvikt kan han i princip förfara på följande sätt.

1. Ställa om maskinhastigheten.
2. Ställa om läppöppningen.
3. Justera totaltrycket så att minsta utloppsdifferens erhålles.

Detta innebär att mäldens utloppshastighet skall kunna varieras över samma hastighetsintervall som viran. Utloppshastigheten kan skrivas mha. Bernoullis teorem.

$$V_s = \sqrt{2g \left(h_s + \frac{p_s - p_o}{\rho_s} \right)}$$

men

$$\frac{p_s}{p_o} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_o} \right)^\kappa$$

vilket ger

$$V_s = \sqrt{2g \left[h_s + \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_o} \right)^\kappa - 1 \right] \frac{p_o}{\rho_s} \right]}$$

där

- h_s = mäldnivå
- v_s = stationär utloppshastighet
- ρ_s = " lufttäthet i luftkudden
- ρ_o = lufttäthet i atmosfärstryck
- ρ_s = mäldtäthet
- p_s = luftkuddetryck
- p_o = atmosfärstryck

I dagens moderna pappersmaskiner med sluten inlopps-låda och höga maskinhastigheter beror utloppshastigheten i första hand på luftkuddetrycket, varför det är lämpligt att variera p_s och hålla h_s konstant vid byte av driftstillstånd.

2. REGLERMETODER

Här redovisas principerna för realisering av ett antal reglermetoder.

1. PI-reglering.
2. Linjärkvadratisk optimering.
3. Linjärkvadratisk optimering med integratorer.

2.1 PI-reglering.

Den proportionellt-integrerande regulatorns överföringsfunktion kan skrivas

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

där K = förstärkning
 T = tidskonstant

Den analoga PI-regulatorn realiseras vanligen med elektroniska eller pneumatiska kretsar i standard utförande.

En digital realisering i en processdatamaskin kan göras enligt

$$U(t) = P(t) + I(t)$$

$$P(t) = K_p e(t)$$

$$I(t) = I(t-1) + k_i \frac{\tau}{T} e(t)$$

där $U(t)$ = signal till ställdon
 $e(t)$ = börvärde-ärvärde
 K_p, k_i = förstärkningsfaktorer
 T = tidskonstant
 τ = samplingsintervall
 $I(t-1)$ = föregående samplingsintervalls integraldel

Om ställdonet är av integrerande typ skall signalen till ställdonet beräknas enligt

$$\Delta U(t) = U(t) - U(t-1)$$

2.2 PI-regulatorernas inkoppling.

Regulatorerna kan kopplas på två sätt till inloppslådan. Man kan låta totaltrycket styra mäldflödet och mäldnivån styra luftflödet sk.

Totaltryck/mäldflödes reglering eller man låter totaltrycket styra luftflödet och mäldnivån styra mäldflödet sk. Totaltryck/luftflödes reglering.

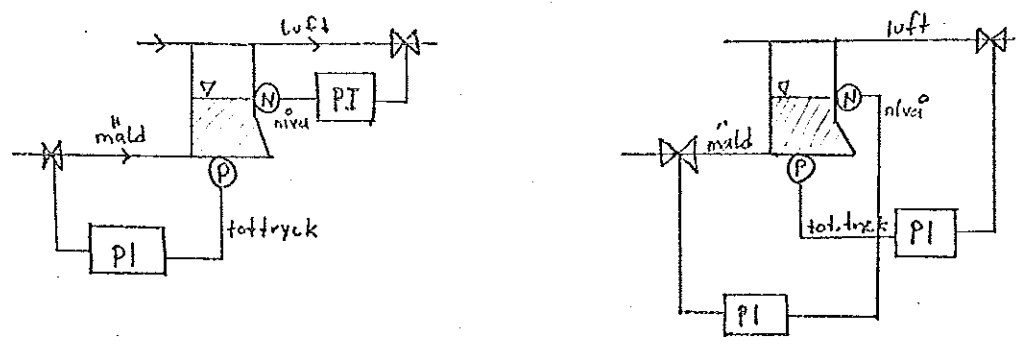


Fig.3 I Totaltr./mäldflöde II Totaltr./luftflöde

ASEA har i en förbättrad version av Totaltr./luftfl.-regulatorkonfigurationen infört en framkoppling från styrsignalen på mälden till styrsignalen på luften och omvänt.

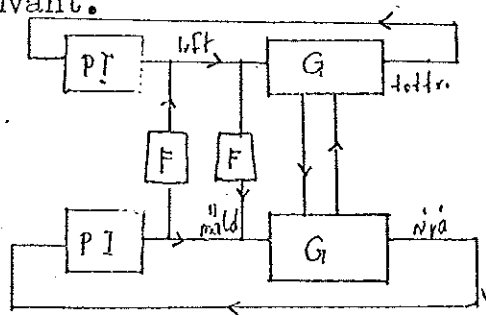


Fig.3b Framkoppling.

2.3 Linjärkvadratisk optimering .

Lko. är en modern syntesmetod för reglering av fler-variabla system. LKO utvecklades i början av 60-talet och är ett specialfall inom optimeringsteorin.

För att syntetisera en LK-regulator måste man ha tillgång till en linjäriserad beskrivning det system som skall regleras.

Den optimala strategin blir då en linjär återkoppling från systemets samtliga tillståndsvariabler, där de optimala förstärkningsparametrarna är oberoende av systemets initialtillstånd.

2.4 Problembeskrivning.

Givet är en linjäriserad beskrivning av systemet

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A \bar{x}(t) + B \bar{u}(t)$$

där $\bar{x}(t)$ = n-dimensionell tillståndsvektor
 $\bar{u}(t)$ = r-dimensionell insignal
A, B = konstanta matriser av ordning n n resp n r

Systemet förutsättes kontrollerbart och observerbart. För att beräkna de optimala förstärkningsparametrarna i återkopplingen ansätter man en kvadratisk förlustfunktion enligt

$$q(x(t) u(t)) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [x^T Q_1 x + u^T Q_2 u] dt$$

där Q₁ och Q₂ är positivt definita symmetriska matriser vars koefficienter anger den fiktiva kostnaden för en störning respektive utstyrning av varje tillstånd och insignal. Problemet blir att bestämma en linjär styr- lag

$$\bar{u} = - L \bar{x}$$

sådan att matrisen L's element ger minimum av q(x(t)u(t)).

2.5 Lösning

Enligt Anderson och Moore (ref 6)

$$L = -Q_2^{-1} B^T S$$

där S är en lösning till den stationära Ricattiekv.

$$A^T S + SA - SB Q_2^{-1} B^T S + Q_1 = 0$$

För att beräkna den stationära lösningen, integreras Ricattiekvationen bakåt i tiden från startvärdet $S(t)=0$ och $S(t)$ konvergerar då mot den konstanta lösningen S där $dS/dt=0$.

Man kan visa att LK alltid ger ett stabilt system, om Q_1 och Q_2 välts enligt förutsättningarna.

Det minimala värdet på förlustfunktionen är

$$J_{min} = x^T(0) S x(0)$$

2.6 Realisering

Vid reglering av inloppslådan i reel tid mha. LK-optimering användes lämpligen en processdataresurs.

Detta medför att systemet blir samplat. Förlustfunktionen uttryckes då som en summa

$$J(u) = \sum_{t_0}^{t_N} \left[x^T \tilde{Q}_1 x + u^T Q_2 u \right]$$

där \tilde{Q}_1 och \tilde{Q}_2 är fiktiva kostnadsmatriser (icke negativt definita) för det samplade systemet.

Det samplade systemet ges av

$$x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma u(t)$$

där

$$\phi = e^{At}$$

$$\Gamma = \int_0^T e^{As} ds B$$

Den längsta tiden mellan två mätningar blir

Den linjärvadratiska styrlagen blir

$$U(t) = -L x(t)$$

vilken beräknas rekursivt bakåt ur

$$\begin{aligned} S(t_N) &= 0 \\ L(t) &= \left[\tilde{Q}_2 + \Gamma^T S(t+1) \Gamma \right]^{-1} \Gamma^T S(t+1) \\ S(t) &= \phi^T S(t+1) \phi + \tilde{Q}_1 - L(t)^T \left[\tilde{Q}_2 + \Gamma^T S(t+1) \Gamma \right]^{-1} L(t) \end{aligned}$$

beräkningen fortgår till dessatt $S(t)$ konvergerar mot den konstanta lösningen \tilde{S} , där $\tilde{S} = S(t) = S(t+1)$.

Återkopplingsmatrisen ges då av

$$\tilde{L} = \left[\tilde{Q}_2 + \Gamma^T \tilde{S} \Gamma \right]^{-1} \Gamma^T \tilde{S}$$

Lösningen kan sammanfattas i form av en algoritm för implementering på en processdatamaskin.

OFF-LINE

1. Läs in matriserna A, B, C , förlustmatriserna för det samplade systemet \tilde{Q}_1 och \tilde{Q}_2 samt samplingsintervallets längd \tilde{T} .
2. Beräkna de transformerade matriserna ϕ, Γ, θ .

$$\begin{aligned} \phi &= e^{A\tilde{T}} \\ \Gamma &= \int_0^{\tilde{T}} e^{A\sigma} B d\sigma & \theta &= C \end{aligned}$$

3. Kontrollera att \tilde{Q}_1 och \tilde{Q}_2 är icke negativt definita.

$$x^T \tilde{Q}_1 x \leq 0 \quad x^T \tilde{Q}_2 x \leq 0 \quad \forall x$$

4. Beräkna

$$\begin{cases} S(t_N) = 0 \\ S(t) = f[L(t), S(t+1)] \\ L(t) = f[S(t+1)] \end{cases} \Rightarrow \tilde{S}$$

$$\tilde{L} = f(\tilde{S})$$

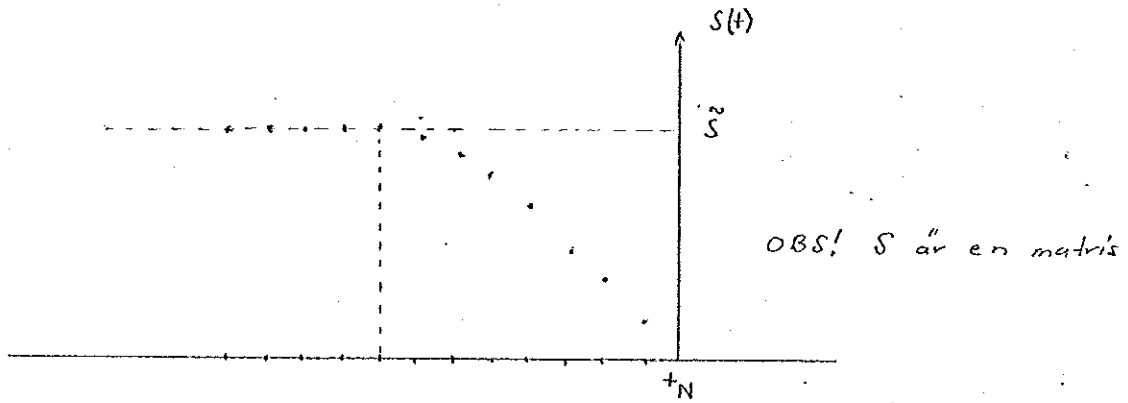


Fig.4 Beräkning av den stationära lösningen \tilde{S}

ON-LINE

1. Tillstånden $x(t)$ läses in.
2. $u(t)$ ställs ut som en konstant styrsignal under intervallet $(t, t + \tilde{\tau})$
3. $x(t + \tilde{\tau})$ beräknas ur

$$x(t+1) = \Phi x(t) + \Gamma u(t)$$
4. \tilde{L} hämtas ur minnet och $u(t + \tilde{\tau})$ beräknas

$$u(t+1) = -\tilde{L} x(t+1)$$
5. $u(t) = u(t + \tilde{\tau})$
6. Vänta på nästa samplingsintervall och gå till punkt 1.

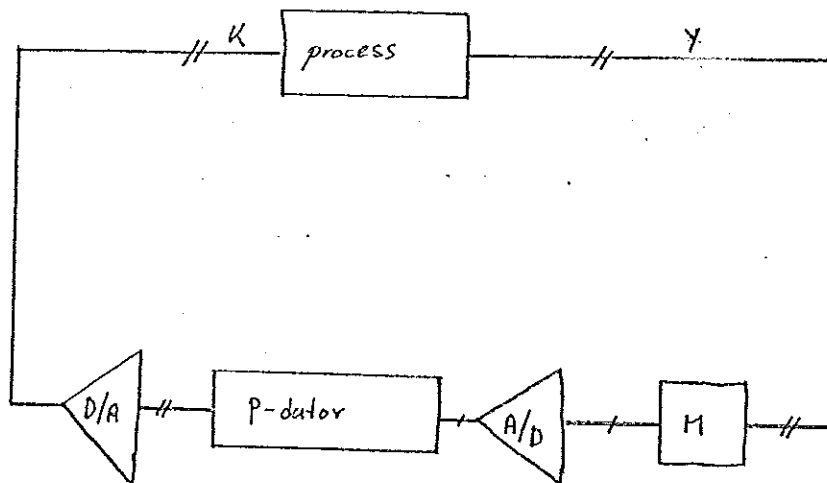


Fig.5 Flödesschema för LK-reglering.

2.7 Linjärkvadratisk optimering med integratorer.

En nackdel med LK-regulatorn är att den ej kan inta och bibehålla det önskade stationära tillståndet för systemet, om det finns en oavbruten sakta varierande störning på insignalen, styrvariablerna.

Problemet blir då att konstruera en optimal linjär regulator med egenskapen att kunna eliminera inverkan av störningar enligt ovan.

2.8 Problembeskrivning.

Systemet genom tillståndsekvationerna

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + Bu$$

$$y = C\bar{x}$$

och förlustfunktionen

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{\infty} \left[\bar{x}^T Q_1 \bar{x} + \bar{u}^T Q_2 \bar{u} + \frac{d\bar{u}}{dt}^T Q_3 \frac{d\bar{u}}{dt} \right] dt$$

där Q_1 och Q_2 är icke negativt symmetriska matriser och Q_3 är en positiv definit symmetrisk matris.

2.9 Lösning.

Systemet ges en ny beskrivning genom att tillståndsvektorn och insignalvektorn definieras som (ref 6)

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{u} \end{bmatrix}$$

$$\hat{u} = \frac{d\bar{u}}{dt}$$

samt att systemmatriserna definieras som

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$$

$$\hat{Q}_1 = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} \quad \hat{Q}_2 = Q_3$$

Systembeskrivningen ges då av

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}\hat{u}$$

$$J(\hat{Q}, \hat{x}) = \int_{t_0}^{\infty} \left[\hat{x}^T \hat{Q}_1 \hat{x} + \hat{u}^T \hat{Q}_2 \hat{u} \right] dt$$

Den optimala styrlagen ges av

$$\hat{u}^* = -\hat{Q}_2^{-1} \hat{B}^T \bar{S} \hat{x}$$

där $\bar{S} = \lim_{t \rightarrow \infty} S$ och \tilde{S} är lösningen till Riccati-ekvationen

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{dS}{dt} = S\hat{A} + \hat{A}^T S - S\hat{B} \hat{Q}_2^{-1} \hat{B}^T S + \hat{Q}_1 \\ S(t_0) = 0 \end{array} \right.$$

u kan uppdelas i

$$u^* = k_1^T x + k_2^T u^*$$

där

$$\begin{cases} k_1^T = -Q_3^{-1} S_{21} \\ k_2^T = -Q_2^{-1} S_{22} \end{cases}$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21}^T \\ S_{12} & S_{22}^T \end{bmatrix}$$

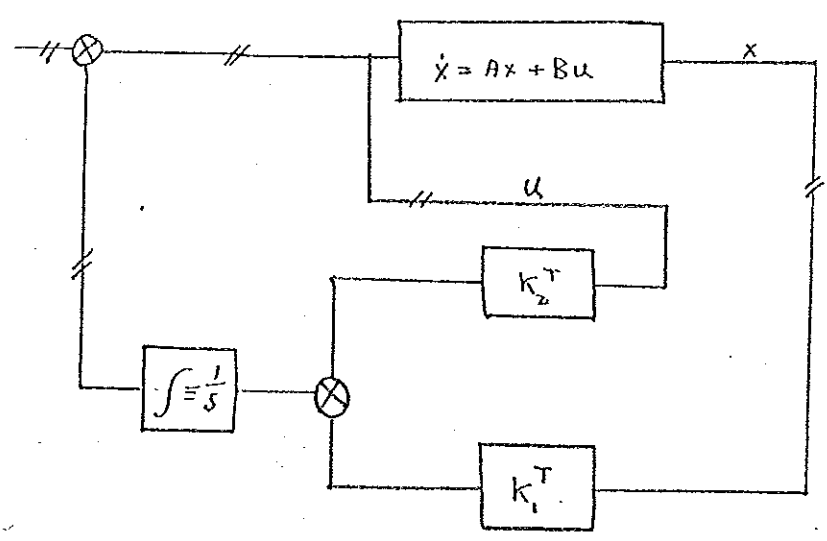


Fig.6 LK-regulator med integratorer.

Insignalen u kan beräknas ur x och $\frac{dx}{dt}$ genom

$$u = (B^T B)^{-1} B^T \left(\frac{dy}{dt} - Ax \right)$$

vilket ger

$$\hat{u} = k_1^T x + k_2^T (B^T B)^{-1} B^T \left(\frac{dy}{dt} - Ax \right) = k_3 \frac{dy}{dt} + k_4^T x$$

där

$$k_3 = k_2^T (B^T B)^{-1} B^T ; \quad k_4 = k_1^T - k_3^T A$$

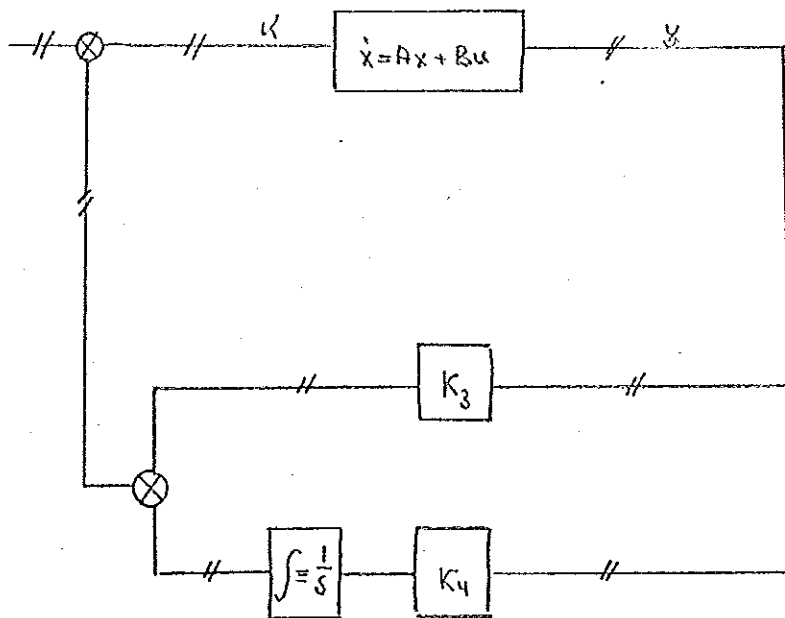


Fig. 7 LK-regulator med integratorer och insignal beräknad ur tillstånden.

En förutsättning för att en styrelag skall existera med ändlig lösning och att det slutna systemet skall vara asymptotiskt stabilt är

1. $\begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \end{bmatrix}$ kontrollerbar
2. $\begin{bmatrix} \hat{A} & G \end{bmatrix}$ observerbar för alla G^T som satisfier $G \cdot G^T = Q_3$.

2.10 Realisering.

En linjärvadratisk styrelag med integratorer kan implementeras på en processdatamaskin för styrning i reell tid.

OFF-LINE

1. Läs in matriserna A, B och C samt förlustmatriserna \tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2 och \tilde{Q}_3 för det samplade systemet.

2. Bilda de nya matriserna $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{Q}_1$ och \hat{Q}_2 enligt

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{Q}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_1 & 0 \\ 0 & \tilde{Q}_2 \end{bmatrix} \quad \hat{C} = C$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad \hat{Q}_2 = \tilde{Q}_3$$

3. Kontrollera att \hat{Q}_1 och \hat{Q}_2 är icke negativt definita

$$x^T \hat{Q}_1 x \leq 0 \quad ; \quad x^T \hat{Q}_2 x \leq 0 \quad \forall x$$

4. Beräkna matriserna ϕ, Γ, Θ för det samplade systemet enligt

$$\phi = e^{\hat{A}t}$$

$$\Gamma = \int_0^T e^{\hat{A}s} ds \hat{B}$$

$$\Theta = \hat{C}$$

5. Kontrollera att $[\phi \Gamma]$ är styrbar

$$\text{rang}[\Gamma, \phi\Gamma, \dots, \phi^{n-1}\Gamma] = n$$

6. Kontrollera att $[\phi G^T]$ är observerbar för alla G^T som satisfierar $G^*G^T = \hat{Q}_2$

$$\text{rang}[G, \phi^T G, \dots, (\phi^T)^{n-1} G] = n$$

7. Beräkna den stationära lösningen S bakåt ur

$$\begin{aligned} S(t_n) &= \hat{Q}_1 \\ L(t) &= [\hat{Q}_2 + \Gamma^T S(t+1) \Gamma]^{-1} \Gamma^T S(t+1) \phi \\ S(t) &= \phi^T S(t+1) \phi - L(t) [\hat{Q}_2 + \Gamma^T S(t+1) \Gamma]^{-1} L(t) + \hat{Q}_1 \end{aligned}$$

8. Beräkna återkopplingsmatrisen \tilde{L} ur

$$\tilde{L} = \hat{Q}_2^{-1} \Gamma^T \tilde{S} \quad ; \quad \hat{K} = -L \hat{x}$$

partitionera enligt

$$\hat{U} = -\hat{Q}_2^{-1} \hat{S}_{21} x - \hat{Q}_2^{-1} \hat{S}_{22} u = -k_1^T x - k_2^T u$$

9. Kontrollera att $\Gamma^T \Gamma$ är positivt definit

$$x^T \Gamma^T \Gamma x > 0 \quad \forall x$$

10. Läs in T_D, T_I, K_D, K_I och $\tilde{\tau}$ där

T_D =derivationstidskonstant

T_I =integrations "

K_D, K_I =förstärkningsparametrar

$\tilde{\tau}$ =samplingsintervall

11. Beräkna

$$\beta = T_D / (T_D + G_D \tilde{\tau})$$

$$\alpha = K_D T_D / \tilde{\tau}$$

$$\gamma = K_I T_I / \tilde{\tau}$$

där G_D är derivationstidskonstant.

12. Beräkna

$$K_4^T = K_2^T (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T$$

$$K_3^T = K_1^T - K_4^T \phi$$

ON -LINE

1. Läs in $x(t)$.

2. $u(t)$ ställs ut som en konstant styrsignal under intervallet $(t, t + \tau)$.

3. Beräkna $x(t+1)$ ur

$$x(t+1) = \phi x(t) + \Gamma u(t)$$

4. Beräkna $D(t+1)$ ur

$$D(t+1) = \beta D(t) + \alpha (1-\beta) [x(t+1) - x(t)]$$

5. Beräkna $I(t+1)$ ur

$$I(t+1) = I(t) + \gamma K_3^T x(t+1)$$

6. Beräkna $u(t+1)$ ur

$$u(t+1) = -I(t+1) - K_4^T D(t+1)$$

7. $u(t) = u(t+1)$.

8. Vänta på nästa samplingsintervall, gå till punkt 1.

2.11 Förlustmatriserna

Om förlustfunktionen endast finnes given för den analoga systembeskrivningen, kan förlustfunktionen transformeras på samplad form genom

$$q^*(v, x) = \sum_{t_n=0}^{T_N} \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix}^T \tilde{Q} \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$$

Matrisen

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}$$

av dimension $(n+r) \times (n+r)$ fås genom transformering av Q1 och Q2 enligt

$$\tilde{Q}_{11} = \int_0^T e^{A^T s} Q_1 e^{As} ds \quad n \times n$$

$$\tilde{Q}_{12} = \int_0^T e^{A^T s} Q_1 G(s) ds \quad n \times r$$

$$\tilde{Q}_{21} = \tilde{Q}_{12}^T \quad r \times n$$

$$\tilde{Q}_{22} = \int_0^T G^T(s) Q_2 G(s) ds + Q_2 \cdot T \quad r \times r$$

$$G(s) = \int_0^s e^{A^T t} B dt$$

Den konstanta återkopplingsmatrisen \tilde{L} beräknas ur

$$S(T_N) = 0$$

$$S(t) = \phi^T S(t+1) \phi - \left[\phi^T S(t+1) \Gamma + \tilde{Q}_{12} \right] \left[\Gamma^T S(t+1) \Gamma + \tilde{Q}_{22} \right]^{-1} \cdot \left[\Gamma^T S(t+1) \phi + \tilde{Q}_{21} \right] + \tilde{Q}_{11}$$

$$\tilde{L} = \left[\Gamma^T \tilde{S} \Gamma + \tilde{Q}_{22} \right]^{-1} \left[\Gamma^T \tilde{S} \phi + \tilde{Q}_{21} \right]$$

2.12 Brus.

Vid praktiska tillämpningar förekommer alltid brus. Bruset påverkar mätvärdena på tillståndsvariablerna vilket gör att den optimala styrstrategin ej nödvändigtvis är densamma som i det deterministiska fallet. Man kan beskriva systemet som

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + e(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t)$$

där $e(t)$ och $v(t)$ är vitt brus med medelvärdet 0 och kovariansen R_1 respektive R_2 .

2.13 Lösning.

1. Den optimala återkopplingsmatrisen för det samplade systemet beräknas på samma sätt som tidigare, genom att försumma bruset $e(t)$ och $v(t)$.
2. Ur mätsignalerna $y(t)$ predikteras systemets tillstånd med hjälp av ett Kalmanfilter. (ref 7,3)

$$\hat{x}(t+1) = \Phi \hat{x}(t) + \Gamma u(t) + \tilde{K} [y(t) - C \hat{x}(t)]$$

3. Den optimala styrsignalen ges av

$$u(t) = -\tilde{L} \hat{x}(t)$$

Följande ekvivalens gäller vid numerisk beräkning av \tilde{L} och \tilde{K} .

\tilde{L}	\tilde{K}
ϕ	ϕ^T
Γ	θ^T
Q1	R1
Q2	R2
S(t)	P(t)
L(t)	$K^T(t)$

där

R1=	kovarians	matrisen	för	bruset	e
R2=	"	"	"	"	v
P(t)=	"	"	"	estimationsfelet	$x(t)-\hat{x}(t)$

Dvs. samma program kan användas vid beräkning av \tilde{K} som vid beräkningen av \tilde{L} , under förutsättning att ϕ^T läses in istället för ϕ osv. enligt dualiteten ovan.

En förutsättning för att dualiteten skall gälla är att $y(t)$ är en medelvärdesbildning av den kontinuerliga utsignalen.

$$y(t) = \int_{t-1}^t y_s(\theta) dt$$

för momentan sampling gäller ej dualiteten.

2.14 Realisering.

- 1. Återkopplingsmatrisen \tilde{L} beräknas på vanligt sätt.
- 2. Kalmanfilterkonstanten \tilde{K} beräknas med hänsyn taget till dualiteten ovan.

ON-LINE

- 1. Vid samplingsögonblicket läses $y(t)$ in från integratorerna som sedan nollställs.
- 2. $u(t)$ ställs ut som en konstant insignal till systemet under intervallet $(t, t+1)$.
- 3. $\hat{x}(t+1)$ beräknas ur

$$\hat{x}(t+1) = \phi \hat{x}(t) + \Gamma u(t) + \tilde{K} [y(t) - C \hat{x}(t)]$$

- 4. $u(t+1)$ beräknas ur

$$u(t+1) = -\tilde{L} \hat{x}(t+1)$$

- 5. $t \equiv t+1$ och nästa samplingsintervall inväntas och hopp sker till 1.

3. Mätmetoder.

De viktigaste variablerna att mäta på en sluten inloppslåda är

Totaltrycket	[mH ₂ O]
Luftkuddetrycket	[mH ₂ O]
Mäldnivå	[m]
Löppöppning	[mm]

De viktigaste variablerna är totaltrycket och mäldnivån eftersom utloppshastigheten på mälden är direkt beroende av totaltrycket medan mäldnivåns stabilitet påverkar möjligheterna att hålla mäldkonc. konstant. I den linjära modellbeskrivningen utgör mäldnivå och luftkuddetryck tillståndsvariabler.

Luftkuddetrycket kan beräknas ur totaltrycket och mäldnivån, vilket medför att programmet för den linjärkvadratiske regulatorn blir mer omfattande.

Med PI-regulatorer behöver luftkuddetrycket ej mätas.

3.1 Totaltrycksmätning.

Totaltrycket mätes i ett uttag på lådans botten.

Mätgivarens mätområde bör ligga mellan 0-0.1 kg/cm².

Mätgivaren kan tänkasvrealiserad på många olika sätt,

tex. med d/p-cell (T≈0.5s) eller bälg med kraft-

balanssystem (T≈0.1s). En ny typ av tryckgivare i integrerat

utförande (National Semiconductor) kan också vara

aktuell. Som referens kan användas bubblrör i vatten

behållare.

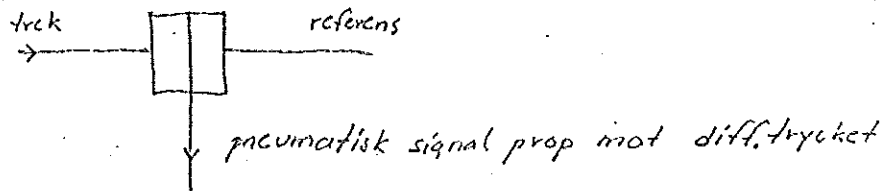


Fig .8 Principskiss på D/P-cell.

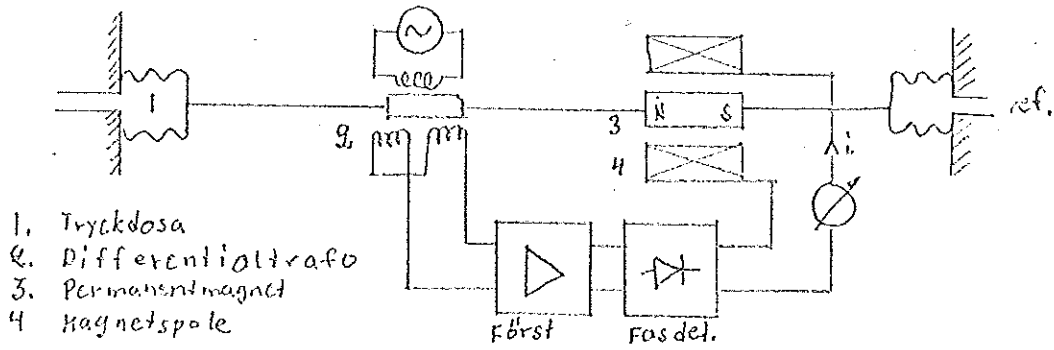


Fig. 9 Princip för bälg med kraftbalanssystem.

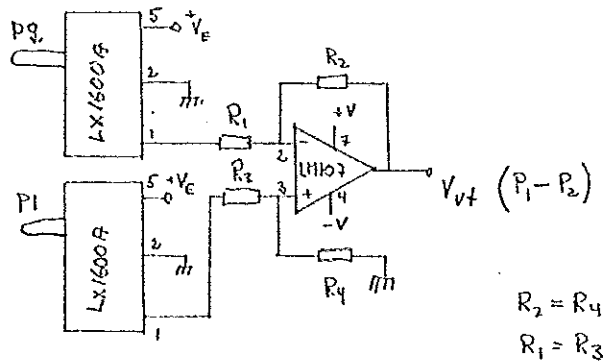


Fig. 10 Koppling av integrerad elektronisk givare (LX 1600A) för mätning av differenstryck.

3.2 Luftkuddetryck.

Luftkuddetrycket mätes i inloppslådans topp. Mätningen kan utföras på samma sätt som mätningen av totaltrycket.

3.3 Mäldnivå.

Mäldnivån mätes genom lämplig applikation av differenstryckmätare, där luftkuddetrycket kompenseras.

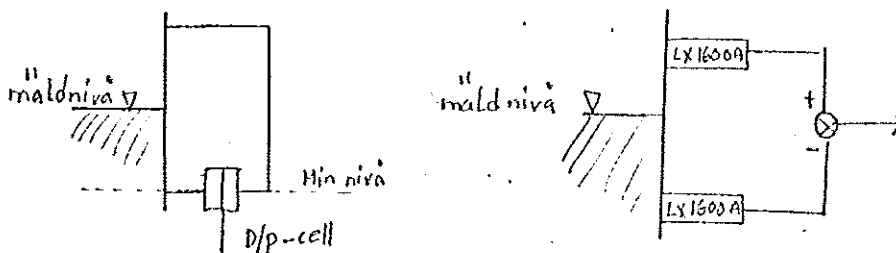


Fig. 11 Applicering av givare för mäldnivå.

3.4 Läppöppning.

Kan mätas med ett mekaniskt system som överför läppens rörelse till en linjär potentiometer.

3.5 Signalbehandling.

Mätsignalerna standardiseras som regel i en mätvärdesomvandlare till strömsignaler (4-20mA Honeywell 10-50mA Foxboro), som i det analoga fallet går till respektive regulator. och i det samplade fallet anpassas till respektive multiplexeringång.

4. STÄLLDON.

Inloppslådans tillstånd (mältnivå och luftkuddetryck) styrs av mäldflödet in i lådan och av luftflödet in och/eller ut ur lådan.

4.1 Mäldflödet.

Mäldflödet kan styras genom

1. Varvtalsreglering av blandningspump $T \approx 0.3-0.6\text{sek.}$
2. Shuntventil förbi blandningspump $T \approx 1\text{sek.}$
3. Nivåändring i nivålåda (KÄLLE).

4.2 Luftflöde.

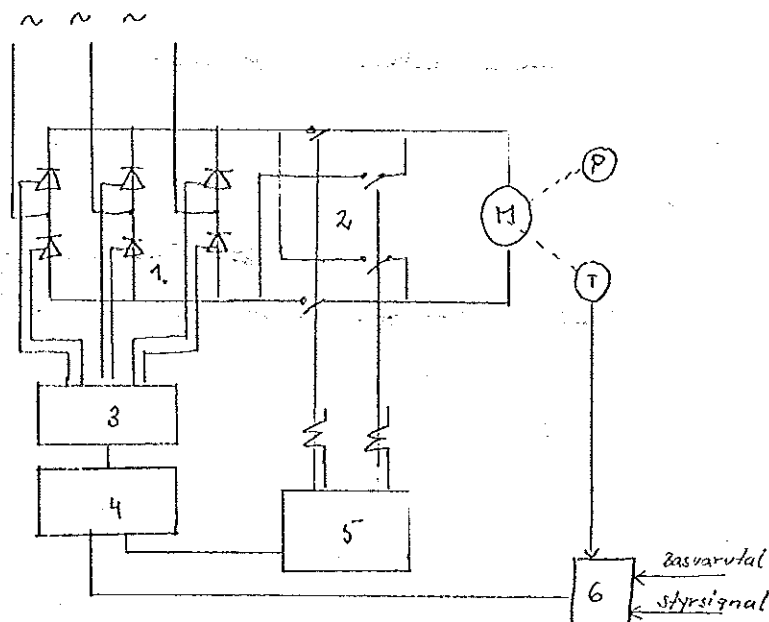
Luftflödet kan styras genom

1. Reglerventil i in eller utflöde.
2. Varvtalsreglering av blåsmaskin.
3. Reglering av kompressorvarvtalet.

eventuellt kombinationer av dessa.

4.3 Varvtalsreglering.

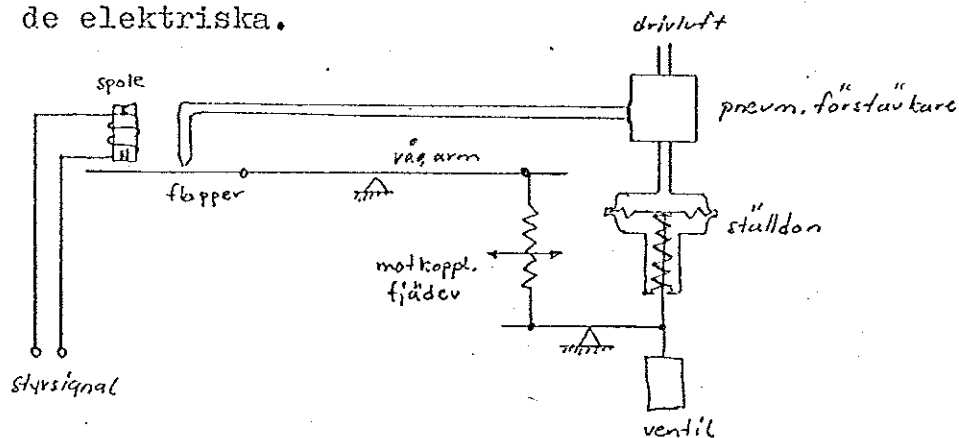
Nedan visas ett system enl. ASEA tidn. 5-6 1962 för varvtalsreglerad reversibel drift av likströmsmotorer med tyristor strömriktare och polomkopplare. Polvändningsautomatik behövs ej vid icke reversibel drift



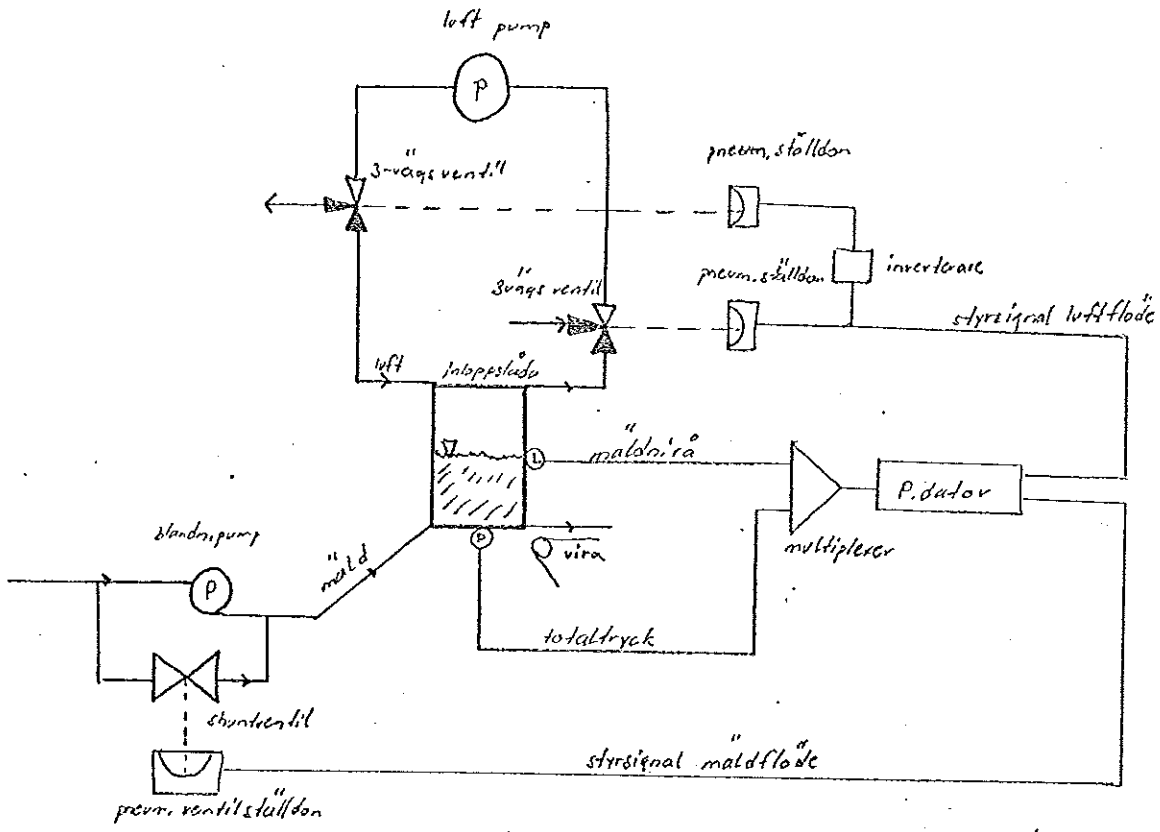
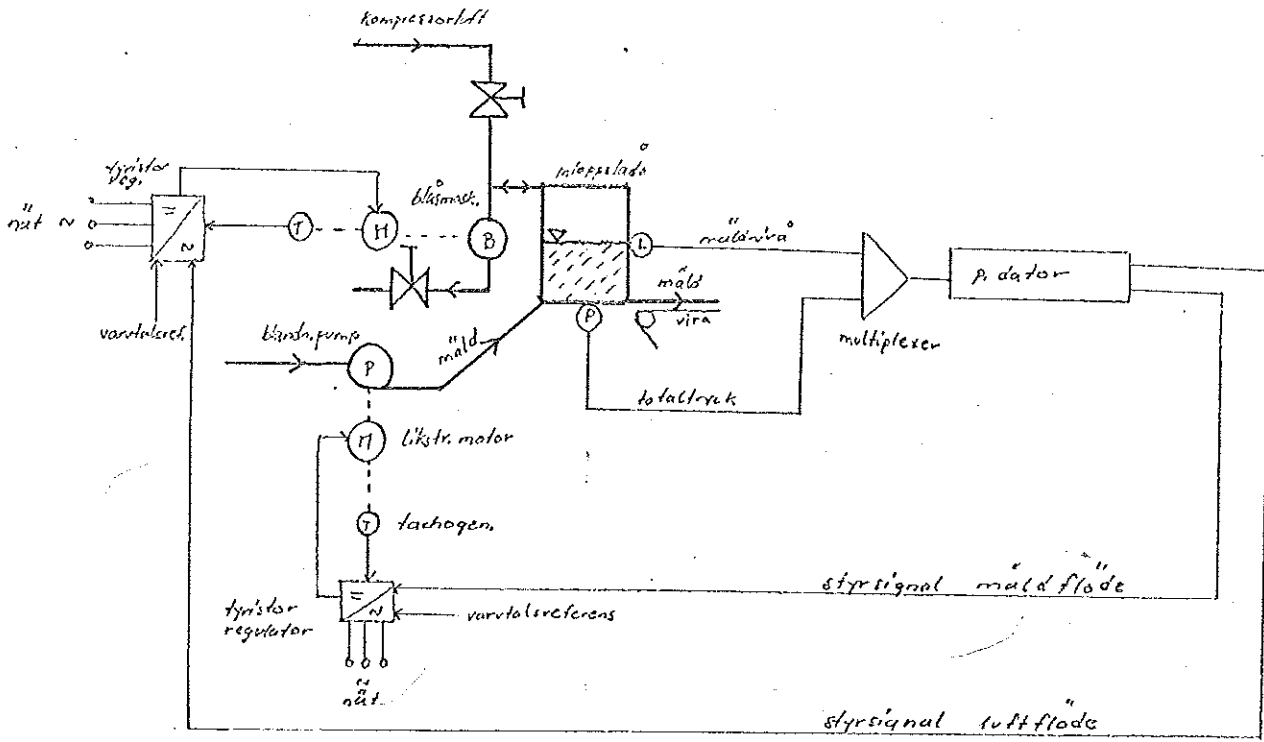
- | | |
|------------------|------------------------|
| 1. strömriktare | 5. polvändn. automatik |
| 2. polomkopplare | 6. varvtalsreferens |
| 3. styrdon | |
| 4. reglerförst. | |

4.4 Ventilreglering.

Vid ventilregleringen kan elektriska eller pneumatiska ställdon användas. De pneumatiska är i regel snabbare än de elektriska.



Exempel på pneumatiskt ställdon med lägesreg. (ref. 8)



Exempel på inloppslådesystem (ref 4,8)

5. MODELLER

Modellerna är hämtade ur SWÄRD-RASSMUSSEN: Reglering av inloppslåda till en pappersmaskin.

1. Enkel sluten inloppslåda
2. Sluten inloppslåda med hornbostelhål
3. Sluten inloppslåda med överlöp.

Dynamiken för lufttank och nivåreglering i överlöp har försumrats emedan dessa ej har någon inverkan på modellernas dynamiska egenskaper (ref. 1).

5.1 Härledning av modellerna.

Principen för härledning av modellerna består i beaktandet av dynamiken för mälden ur en massbalans-ekvation och Bernoullis teorem.

På samma sätt behandlas dynamiken för luften. Resultatet blir en olinjär modell med mäldnivå och lufttätthet som tillståndsvariabler samt med mäldflöde, luftflöde läppöppningsarea och luftutsläppsarea som insignaler. (ref. 1).

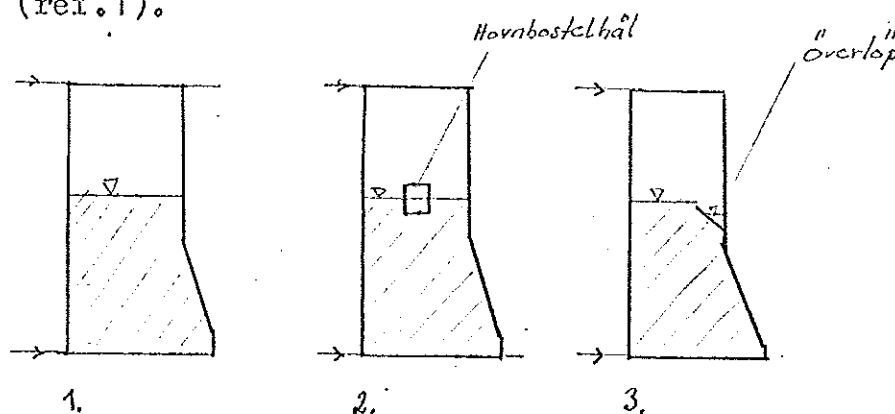


Fig. 12 Principskiss över de olika inloppslådorna.

5.2 Beteckningar.

q_1	= mäldflöde in i inloppslådan	m^3/sek
q_2	= mäldflöde ut ur inloppslådan	m^3/sek
w_1	= luftflöde in i inloppslådan	kg/sek
w_2	= luftflöde ut ur inloppslådan	kg/sek
h	= mäldytans höjd över läppöppningen	m
A	= den fria mäldytan i inloppslådan	m^2
A_1	= luftutsläppets effektiva yta	m^2
A_2	= läppöppningens effektiva yta	m^2
ρ	= luftens täthet i inloppslådan	kg/m^3
ρ_0	= luftens täthet vid atmosfärstryck	kg/m^3
ρ_s	= mäldens täthet	kg/m^3
p	= tryck i inloppslådans luftkudde	N/m^2
p_0	= atmosfärstryck	N/m^2
V	= luftkuddens volym	m^3

6. ENKEL SLUTEN INLOPPSLÅDA .

6.1 Olinjär modell.

$$\text{I} \quad \frac{dh}{dt} = -\frac{A_2}{A} \sqrt{2gh + 2 \frac{p-p_0}{\rho_2}} + \frac{q_1}{A}$$

$$\text{II} \quad \frac{dS}{dt} = -\frac{A_1}{V} \sqrt{\frac{2R}{K-1} p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{S}{S_0} \right)^{K-1} - 1 \right]} + \frac{w_1}{V} - \frac{S A_2}{V} \sqrt{2gh + \frac{2 p_0}{\rho_2} \left[\left(\frac{S}{S_0} \right)^K - 1 \right]} + \frac{S q_1}{V}$$

$$\text{III} \quad \frac{dS}{dt} = -\frac{A_1}{V} \left(\frac{2R}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2R}{K+1} p_0 \rho_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{K+1}} + \frac{w_1}{V} - \frac{S A_2}{V} \sqrt{2gh + 2 \frac{p_0}{\rho_2} \left[\left(\frac{S}{S_0} \right)^K - 1 \right]} + \frac{S q_1}{V}$$

för I gäller

för II gäller $\frac{S}{S_0} > \left(\frac{K+1}{2} \right)^{\frac{1}{K-1}}$

6.2 Linjäriserad modell.

Linjärisering av modellen enligt

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

x_0 singular punkt $f(x_0)=0$, ger jämviktslösningen $x(t)=x_0$

$$A = f_x(x_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix}_{x=x_0}$$

ger den linjära approximationen

$$\frac{dx}{dt} = A(x)$$

som applicerat på den olinjära modellen av en enkel sluten inloppslåda ger de stationära punkterna

$$h_0 = \frac{1}{g} \left[\frac{q_s^2}{2A_{2s}} - \frac{p_0}{s_2} \left[\left(\frac{s_s}{s_0} \right)^k - 1 \right] \right]$$

$$s_s = s_0 \left[1 + \frac{k-1}{2k} \frac{w_s^2}{p_0 s_0 A_{1s}^2} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

samt den linjäriserade approximationen

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_1 \\ -\beta\alpha_1 & -(\alpha_2 + \beta\alpha_1) \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta & 1 \end{bmatrix} \bar{u}$$

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

där

$$\begin{cases} x_1 = h - h_s \\ x_2 = \frac{k \cdot l}{s_s} (s - s_s) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{A} (q_1 - q_s) - \frac{q_s}{A A_{2s}} (A_g - A_{2s}) \\ u_2 = \frac{k l}{s_s V} (w_1 - w_s) - \frac{w_s}{A_{1s}} (A_1 - A_{1s}) \end{cases}$$

och

$$\alpha_1 = \frac{q_s}{2A h_{\text{eff}}} \quad ; \quad h_{\text{eff}} = h_s + l - \frac{p_0}{s_2 g}$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{w_s}{2 s_s V} \frac{(k-1) \left(\frac{s_s}{s_0} \right)^{k-1}}{\left(\frac{s_s}{s_0} \right)^{k-1} - 1} & \text{om } \frac{s_s}{s_0} < \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \\ \alpha_2 = \frac{w_s}{2 s_s V} (k+1) & \text{om } \frac{s_s}{s_0} > \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \end{cases}$$

$$\beta = \frac{k \cdot A \cdot l}{V} \quad ; \quad l = \frac{p_1}{s_2 g}$$

vilket ger med

$$\begin{array}{ll}
 v_s = 2 \text{ m/s} & \rho_s = 1.27 \text{ kg/m}^3 \text{ undertryck} \\
 v_s = 5 \text{ m/s} & \rho_s = 1.37 \text{ kg/m}^3 \\
 v_s = 10 \text{ m/s} & \rho_s = 1.68 \text{ kg/m}^3 \\
 v_s = 15 \text{ m/s} & \rho_s = 2.14 \text{ kg/m}^3
 \end{array}$$

insättning av $\rho_s, q_s, w_s, h_s, S_2, A, p_0, \kappa, A_{2s}, A_{1s}$ i den linjära approximationen av en enkelsluten inloppslåda ger

$$\begin{aligned}
 S_2 = 1,27 \quad \frac{d\bar{x}}{dt} &= \begin{bmatrix} -0,11 & -0,11 \\ -1,56 & -1,563 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 14 & 1 \end{bmatrix} \bar{u} \\
 x_1 &= h - 0,5 & u_1 &= 0,1(q_1 - 1) - \\
 x_2 &= 11,2(S - 1,27) & u_2 &= 1,12(w_1 + 0,245) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 = 1,37 \quad \frac{d\bar{x}}{dt} &= \begin{bmatrix} -0,036 & -0,036 \\ -0,58 & -0,59 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 16 & 1 \end{bmatrix} \bar{u} \\
 x_1 &= h - 0,5 & u_1 &= 0,1(q_1 - 1) - \\
 x_2 &= 11,7(S - 1,37) & u_2 &= 1,17(w_1 - 0,245) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S = 1,68 \quad \frac{d\bar{x}}{dt} &= \begin{bmatrix} -0,0098 & -0,0098 \\ -0,208 & -0,24 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 21,1 & 1 \end{bmatrix} \bar{u} \\
 x_1 &= h - 0,5 & u_1 &= 0,1(q_1 - 1) - \\
 x_2 &= 12,5(S - 1,68) & u_2 &= 1,25(w_1 - 0,245) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S = 2,14 \quad \frac{d\bar{x}}{dt} &= \begin{bmatrix} -0,0044 & -0,0044 \\ -0,132 & -0,1447 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 30 & 1 \end{bmatrix} \bar{u} \\
 x_1 &= h - 0,5 & u_1 &= 0,1(q_1 - 1) - \\
 x_2 &= 14,0(S - 2,14) & u_2 &= 1,4(w_1 - 0,245) -
 \end{aligned}$$

där x_1 =avvikelse i mäldnivå x_2 = av.luftkuddetryck
 u_1 = " " mäldflöde u_2 = " luftflöde.

6.3 Materialkonstanter.

Mäldens täthet	$\rho_s = 1000 \text{ kg/m}^3$
Atmosfärens lufttäthet	$\rho_o = 1.293 \text{ kg/m}^3$
Atmosfärstrycket	$p_o = 10.5 \cdot \rho_o \cdot g$
	$k = 1.4$
	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

6.4 Konstruktionsdata.

Luftkuddens volym	$V = 10 \text{ m}^3$
Fria mäldytan i lådan	$A = 10 \text{ m}^2$
Pappersbanans bredd	$b = 7 \text{ m}$

6.5 Driftsdata.

Stationärt mäldflöde	$q_s = 1 \text{ m}^3/\text{s}$
Stationärt luftflöde	$w_s = 0.245 \text{ kg/s}$
Stationär mäldnivå	$h_s = 0.5 \text{ m}$
Utloppshastighet	$v_s = 2 - 15 \text{ m/s}$

6.6 Modellen vid olika driftstillstånd.

För att förbättra möjligheterna att hålla mäldkonc. konstant, samt av konstruktionstekniska skäl, försöker man hålla mäldnivån konstant vid samma värde.

Vid byte av driftstillstånd ändras därför i huvudsak på trycket i luftkudden.

Ur ekvationen

$$v_s = \sqrt{2gh_s + \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_o} \right)^k - 1 \right] \frac{2p_o}{\rho_s}} = \sqrt{2gh_{\text{eff.}}}$$

beräknas lufttätheten i luftkudden vid motsvarande utloppshastighet v_s . Ur ekvationen ovan får man

$$\rho_s = \left[\left[v_s^2 - 2gh + \frac{2p_o}{\rho_s} \right] \frac{\rho_s}{2p_o} \right]^{\frac{1}{k}} \cdot \rho_o$$

Effektiva läppöppningsarean svarande mot respektive driftstillstånd fås ur

$$h_s = \frac{1}{g} \left[\frac{q_s^2}{2A_{2s}^2} - \frac{P_0}{S_2} \left[\left(\frac{S_s}{S_0} \right)^K - 1 \right] \right]$$

ger med	$S_s = 1.27 \text{ kg/m}^3$	$A_{2s} = 0.42 \text{ m}^2$
	$S_s = 1.37 \text{ kg/m}^3$	$A_{2s} = 0.192 \text{ m}^2$
	$S_s = 1.68 \text{ kg/m}^3$	$A_{2s} = 0.099 \text{ m}^2$
	$S_s = 2.14 \text{ kg/m}^3$	$A_{2s} = 0.067 \text{ m}^2$

En uppskattning av resulterande ytvikt på pappret kan göras ur

$$W = \frac{S_2 \cdot A_{2s} \cdot v_s}{b \cdot v \cdot (1 + f_k) \cdot (1 - f)}$$

där	W = det färdiga papprets ytvikt	g/m^2
	v_s = utloppshastighet	m/s
	v = virans hastighet	m/s
	f_k = fuktkvot hos mälden	$\text{kg H}_2\text{O/kg torr.}$
	f = färdiga papprets fukthalt	$\text{kg H}_2\text{O/kg papper}$
	b = virans bredd	m

i det ideala fallet är $v_s = v$, normalvärden på f_k och f är 100-400 och 0.07-0.075 resp.

6.7 Störningar i tillståndsvariabler och insignaler.

Vid simuleringen antogs 1% a störningar i tillståndsvariabler och insignaler.

vid 2m/s	x1= 0.005	u1= 0.001
	x2= 0.142	u2= 0.00274

vid 5m/s	x1= 0.005	u1= 0.001
	x2= 0.16015	u2= 0.00286

vid 10m/s	x1= 0.005	u1= 0.001
	x2= 0.210	u2= 0.00306

vid 15m/s	x1= 0.005	u1= 0.001
	x2= 0.300	u2= 0.00342

7. SIMULERING.

De linjäriserade modellerna simulerades vid olika driftstillstånd på institutionens datamaskin PDP-15 "HILBERT". Systemet med PI-regulatorer simulerades mha. programpaketet SIMNON medan system med LK och LKI-regulatorerna simulerades mha. SYNPAK, vilket är ett programpaket för sampling, simulering och beräkning av LK-återkopplingar.

8. ENKEL SLUTEN INLOPPSLÅDA MED PI-REGULATORER.

8.1 Intrimning av PI-regulatorerna.

Systembeskrivningen enl. sid. kördes på SIMNON, där regulatorparametrarna valdes på följande sätt

1. Förstärkningsparametrarna K_{NM} K_{TM} K_{NL} K_{TL} trimmades in vid utströmningshastigheten $v_g = 10 \text{ m/s}$ så att 1% störning i mäldnivån x_1 och luftkuddetrycket x_2 gav ett max sving i insignalerna mäldflödet u_1 och luftflödet u_2 $\ll 1\%$.
2. Integrationstidskonstanterna T_{NM} T_{TM} T_{NL} T_{TL} trimmades sedan in för snabbaste utreglering av felet i totaltrycket y_2 vid 1% stegstörning på respektive insignal.

8.2 Bedömningskriterier.

För bedömning av regulatorkonfigurationerna mättes vid $v_g = 5, 10, 15 \text{ m/s}$

1. Lösningstiden för inreglering av totaltrycket y_2 och mäldnivån y_1 till ett sådant värde att avvikelsen i utloppshastighet blir $v \leq 0.5\%$ vid 1% störning i mäldnivå resp. luftkuddetryck samt 1% stegstörning i mäldflöde resp. luftflöde.

2. Svinget i mäldnivå och totaltryck vid störningar enl. punkt 1.

Den maximalt tolererbara avvikelsen i utloppshastigheten är 0.5% av stationära värdet (ref.1,2,4) ,detta motsvarar en avvikelse i totaltrycket 0.01 m vp. vid $v_s = 5\text{m/s}$ $v = \sqrt{2gh_{\text{eff}}}$

8.3 Totaltryck/mäldflödesregulator T/M.

Följande parametervärden erhöles för återkopplingen totaltryck y_2 - mäldflöde u_1

$$G_{tm} = 0.005(1 + 1/15 \text{ s})$$

återkopplingen mäldnivå y_1 - luftflöde u_2

$$G_{ml} = -0.65(1 + 1/100 \text{ s})$$

8.4 Totaltryck/mäldflödesregulator T/L.

Återkoppling totaltryck y_2 - luftflöde u_2

$$G_{tl} = 0.01(1 + 1/20 \text{ s})$$

återkoppling mäldnivå y_1 - mäldflöde u_1

$$G_{mm} = 0.25(1 + 1/75 \text{ s})$$

Regulatorn gav upphov till kraftiga oscillationer i mäldnivå och totaltryck vid $v_s = 5 \text{ m/s}$ varför regulatorparametrarna justerades enl.

$$G_{tl} = 0.015(1 + 1/125 \text{ s})$$

$$G_{mm} = 0.25 (1 + 1/50 \text{ s})$$

vilket blev den slutliga regulatorinställningen vid T/L reglering.

8.5 Resultat

8.5 Resultat.1% störning i mälnivå y1

		5m/s	10m/s	15m/s	
sving y2	T/M	0.008	0.008	0.008	mvp
	T/L	-0.026	-0.053	-0.093	mvp
lösn.tid y2	T/M	ψ_0	ψ_0	ψ_0	s
	T/L	375	70	375	s

ψ T/M regulatoren är mindre känslig för störningar i mälnivån vilket medförde att totaltrycket aldrig överskred toleransgränserna. T/L regulatoren gav minsta svignet för $v_s = 5\text{m/s}$ samt kortaste lösningstid för $v_s = 10\text{m/s}$. Mälnivån uppförde sig städat i båda fallen. Fig. sid 54,55.

1% störning i luftkuddetrycket

		5m/s	10m/s	15m/s	
sving y1	T/M	~ 0.01	~ 0.01	~ 0.01	mvp
	T/L	~ 0.005	~ 0.005	~ 0.005	mvp
underslängy2	T/M	0.01	0.02	0.035	mvp
	T/L	0.02	0.01	0.035	mvp
lösn.tid y2	T/M	35	325	400	s
	T/L	460	80	425	s

De långa lösningstiderna i y2 för T/M regulatoren vid $v_s = 10$ och 15m/s beror på att underslänget överskrider toleransgränserna. samma sak gäller för T/L regulatoren vid $v_s = 5$ och 15m/s . En visuell betraktelse av fig. s 56,57 ~~och~~ säger att T/M regulatoren ger en stabilare reglering. T/L regulatoren har oscillativa tendenser vid $v_s = 5\text{m/s}$.

Svignet i mälnivån blir en aning större vid T/M reglering dock utan att överskrida toleransgränserna. Fig. fig s 56,57

1% stegstörning i mäldflödet u1.

		5m/s	10m/s	15m/s
sving y1	T/M	<< 0.01	<< 0.01	<< 0.01.mvp
	T/L	<< 0.01	<< 0.01	<< 0.01.mvp
sving y2	T/M	0.019	0.046	0.070.mvp
	T/L	0.012	0.024	0.039.mvp
lösn.tid y2	T/M	525	735	525 s
	T/L	70	105	130 s

T/L regulatorn ger här betydligt snabbare reglering och mindre översläng vid samtliga driftsfall. sid 58

1% stegstörning i luftflödet u2.

		5m/s	10m/s	15m/s
sving y1	T/M	< 0.01	< 0.01	< 0.01.mvp
	T/L	< 0.01	< 0.01	< 0.01.mvp
sving y2	T/M	0.01	0.01	0.01.mvp
	T/L	0.145	0.065	0.12.mvp
lösn.tid y2	T/M	0	0	0 s
	T/L	460	600	500 s

För T/L regulatorn är totaltrycket mycket känsligt för störningar i luftflödet, vilket ger långa lösnings-tider. Totaltrycket för T/M regulatorn följer i stort mäldnivåns variation, som ligger klart inom tolerans-området. sid 59,60

8.6 Utvärdering.

Under de förutsättningar som angivits ovan samt med angivna störningstyper kan man anse att T/L reglering är att föredra före T/L reglering beroende på

1. Störningar i mäldnivån y_1 och luftflödet u_1 slår igenom mindre i totaltrycket y_2 än vid T/L reglering.
2. Stabilare reglering vid störningar i luftkuddetrycket.
3. Ingen omställning av regulatorerna vid byte av drifttillstånd. T/L regleringen bör trimmas vid varje driftstillstånd för att ge god reglering.

T/L reglering är att föredra när man har utpräglade störningar i mälåflödet.

```

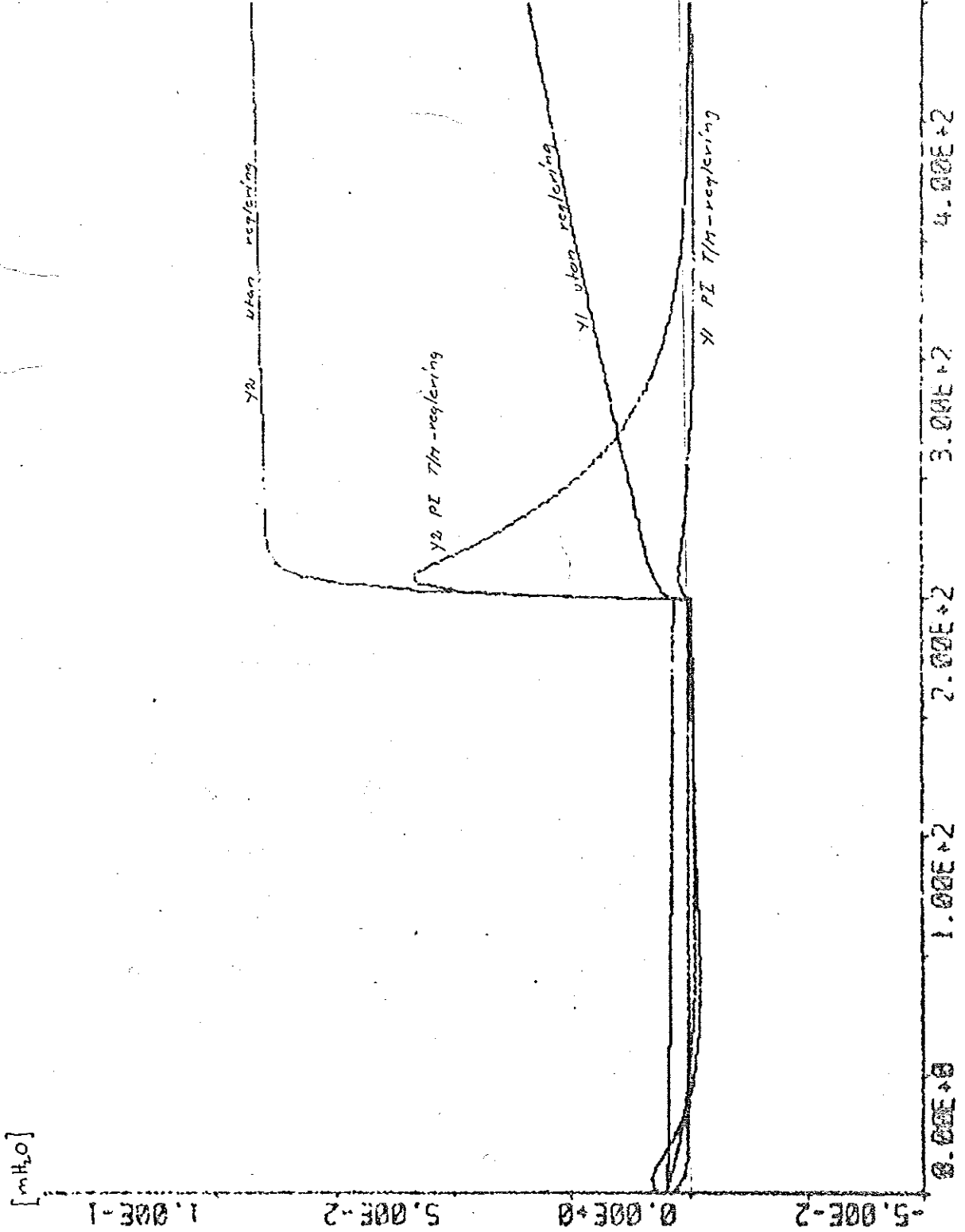
C:0"START TIME FOR STEP
TNM:100"INTEGRAL TIMEKONSTANT STOCKLEVEL-AIRFLOW
TTM:15 " " TOTALPRESSURE-STOCKFLOW
KNM:-0.65"GAIN STOCKLEVEL-AIRFLOW
KTM:0.005"GAIN TOTALPRESSURE-STOCKFLOW
TNL:100"INTEGRAL TIMEKONSTANT STOCKLEVEL-STOCKFLOW
TTL:50" " TOTALPRESSURE-AIRFLOW
KNL:0.01"GAIN STOCKLEVEL-STOCKFLOW
KTL:0.015"GAIN TOTALPRESSURE-AIRFLOW
L:0"CONNECTION PARAMETER T/L-CONTROL
M:0" " T/M-CONTROL
A11:-0.0098"A MATRICE ELEMENT
A12:-0.0098" "
A21:-0.208 " "
A22:-0.24 " "
B21:21.1 "B "
X1:0.005"DISTURBANCE IN STATE VALUE
X2:0.210" "
STEP1:0.001"STEP SIGNAL
STEP2:0.210" "
U1REF=IF T<C THEN 0 ELSE STEP1"REFERENCE STOCKFLOW
U2REF=IF T<C THEN 0 ELSE STEP2" " AIRFLOW
Y1=X1"STOCKLEVEL
Y2=X1+X2"TOTALPRESSURE
U1=U1REF-M*KTM*(X3+Y2)-L*KNL*(X3+Y1)"CONTROL SIGNAL STOCKFLOW
U2=U2REF-M*KNM*(X4+Y1)-L*KTL*(X4+Y2)" " AIRFLOW
DX1=A11*X1+A12*X2+U1"STATE EQUATION
DX2=A21*X1+A22*X2+B21*U1+U2"STATE EQUATION
DX3=M*(Y2/TTM)+L*(Y1/TNL)"INTEGRAL PART IN PI-REGULATOR
DX4=M*(Y1/TNM)+L*(Y2/TTL)" "
*END

```

Simon program för simulering av linjäriserade inloppslåde-
modeller med PI-regulatorer. 20.2.74 Gustav Nilsson.

Målnivå y1 och totaltrycket y2 vid 1% störning i målnivå och måldflöde vid öppen och PI reglerad inloppslåda.

PLOT T-Y1 Y2 10m/s



Målnivå y1 och totaltrycket y2 vid 1% störning i luft-
kuddetrycket och luftflödet vid öppen och PI reglerad
inloppslåda.

PLOT T-Y1 Y2 10 m/s

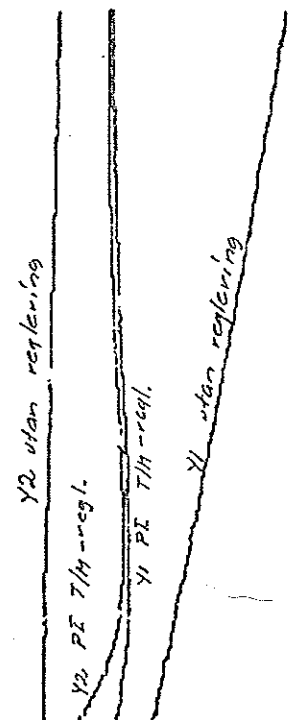
Luft

[m/s]

[s]

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

0.00E+0 1.00E+2 2.00E+2 3.00E+2 4.00E+2 5.00E+2



9 LINJÄR KVADRATISK REGLERING.

9.1 Intrimning av LK-regleringen.

Betalningsmatrisen Q_2 för insignalerna dimensionerades så attsvinget i insignalerna ej överskred 1% vid 1% störning i initialtillstånden vid $v_s = 10\text{m/s}$ enl 8.1. Intrimningen gjordes vid 2 olika fall av betalningsmatriser för tillstånden.

$$x^T Q_1 x = q_{11}x_1^2 + q_{22}x_2^2 + q_{12}q_{21}x_1x_2$$

1. $Q_{1m} = \begin{bmatrix} 15 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ dvs stor straffning vid störningar i mäldnivån.
2. $Q_{1l} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 15 \end{bmatrix}$ dvs stor straffning vid störningar i luftkuddetrycket.

Motsvarändén Q_2 matriser blev

$$Q_{1m} \quad \text{gav} \quad Q_{2m} = \begin{bmatrix} 9000 & 0 \\ 0 & 250 \end{bmatrix}$$

$$Q_{1l} \quad \text{gav} \quad Q_{2l} = \begin{bmatrix} 70000 & 0 \\ 0 & 1500 \end{bmatrix}$$

9.2 Bedömningskriterier.

Samma som vid punkt 8.2.

9.3 Resultat.

1% störning i mäldnivå.

Båda regulator typerna visade god styvhet mot störningar i mäldnivån. Svinget i totaltrycket låg klart inom toleransgränserna. LK med $Q1_1$ gav ett mindre sving i totaltrycket medan lösningstiden till 0 blev betydligt längre än för LK med $Q1_m$. sid 61,62

1% störning i luftkuddetryck.

sving y1	$Q1_m$	-0.01	-0.01	-0.01	mvp
	$Q1_1$	-0.01	-0.01	-0.01	mvp
lösn.tid y2	$Q1_m$	4	10	18	s
	$Q1_1$	4	6	7	s

Regulatorerna kan anses likvärdiga vid störningar i luftflödet map. svinget i mäldnivån, vilket är i stort sett oberoende av utloppshastigheten.

En något större driftstillståndsberoende lösningstid för totaltrycket kan noteras för regulator med $Q1_m$, sid 63,64

1% stegstörning i mäldflöde.

		5m/s	10m/s	15m/s	
stat. avikelse y1	$Q1_m$	0.002	0.005	0.006	mvp
	$Q1_1$		0.05		mvp
stat.avikelse y2	$Q1_m$	0.025	0.03	0.07	mvp
	$Q1_1$		0.09		mvp

Den stationära avikelsen i totaltrycket och mäldnivån blir avsevärt mindre i $Q1_m$ fallet än för $Q1_1$ fallet. Avikelserna blir större med större utloppshastighet. Totaltrycket överskrider i samtliga fall toleransgränserna medan mäldnivån överskrider toleransgränsen endast i $Q1_1$ fallet. sid 65,66

1%_stegstörning i luftflödet.

		5m/s	10m/s	15m/s	
stat.avikelse y1	Q1 _m	<-0.01	-0.0125	-0.014	mvp
	Q1 _l		-0.07		mvp
stat.avikelse y2	Q1 _m	<0.01	0.01	0.015	mvp
	Q1 _l		0.005		mvp

sid 67,68

10 LINJÄRKVADRATISK REGLERING MED INTEGRATORER.

LKI reglering kan tänkas implementerad enligt beskrivning punkt 2.10.

10.1 Inträddning av LKI-regleringen.

samma metod som vid LK reglering. I detta fall utnyttjades samma värden på Q-matriserna.

10.2 Bedömningskriterier.

Se punkt 8.2.

10.3 Resultat.

LKI regleringen uppförde sig på samma sätt som LK reglering vid störningar i tillståndsvariablerna, se punkt 9.3.

1% stegstörning i mäldflödet.

		5 m/s	10m/s	15m/s	
sving y_2	$Q1_m$	0.0075	0.0125	0.0175	mvp
lösn.tid y_2	$Q1_m$	0	3	5	s

Man kan se att svinget i totaltrycket y_2 ökar med ökande utloppshastighet. Svinget i mäldnivån blir litet och i stort sett oberoende av utloppshastigheten. LKI regulatorn uppvisade samma beteende med $Q1_1$. sid 69

1% stegstörning i luftflödet.

LKI regleringen uppvisade mycket litet sving i totaltrycket och mäldnivån, klart inom toleransgränserna.
sid 70

11 JÄMFÖRELSE MELLAN PI, LK, LKI REGLERING.

här jämföres PI reglering av T/M typ respektive LK och LKI reglering med $Q1_m$ där

T/M= totaltryck/mäldflödesreglering

$Q1_m = \begin{bmatrix} 15 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ tillståndskostnadsmatris

11.1 Störning i mäldnivån.

PI, LK och LKI regleringen har liknande egenskaper beträffande störningskänslighet och lösningstider i totaltrycket, dvs regulatorerna uppvisar god styvhet mot störningar i mäldnivån.

11.2 Störning i luftkuddetrycket.

En störning i luftkuddetrycket påverkar ej mäldnivån i någon större utsträckning för samtliga typer. PI regleringen ger dock ett undersläng i totaltrycket vilket påverkar lösningstiden.

11.3 Störning i mäldflödet.

LKI regleringen visade sig vara särklassigt bäst i detta fall. PI regleringen gav stort sving i totaltrycket och långa lösningstider. LK regleringen var mindre känslig för störningar i luftflödet än för störningar i mäldflödet.

11.4 Störning i luftflödet.

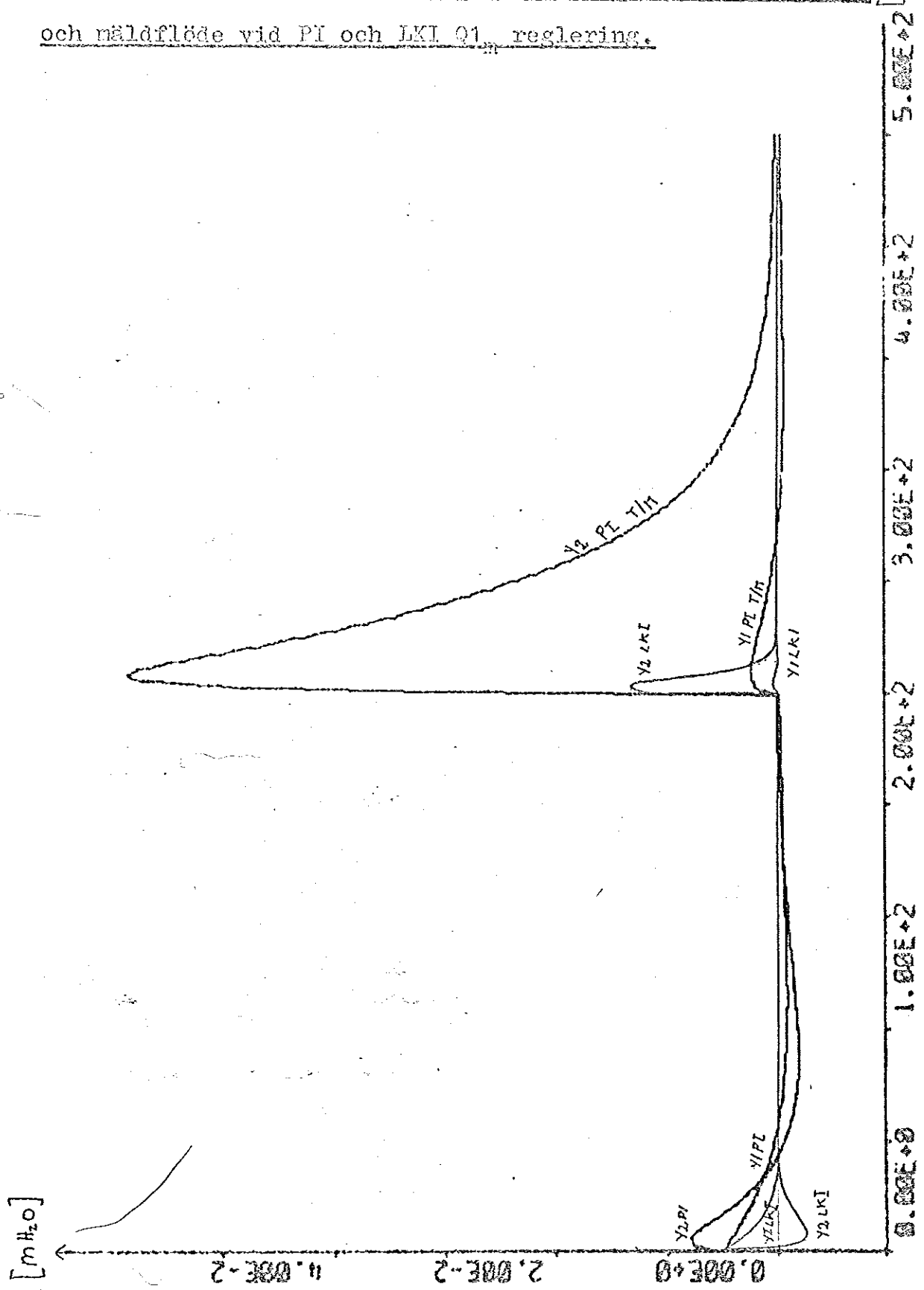
Samtliga regulatorer visade sig vara minst känslig för störningar i luftflödet m.p. på totaltrycket. LKI regleringen visade sig ge det minsta svinget i totaltrycket, medan PI regleringen var mindre beroende av maskinhastigheten. LK reglering ger ett stationärt fel i totaltryck och mäldnivå, detta fel ökar markant för totaltrycket vid ökande maskinhastighet.

11.5 Sammanfattning.

Med de kriterier och restriktioner som tidigare angivits kan man anse att LKI reglering är att föredra i de flesta fall före PI och LK reglering. PI reglering är i de flesta fall billigare och enklare att realisera.

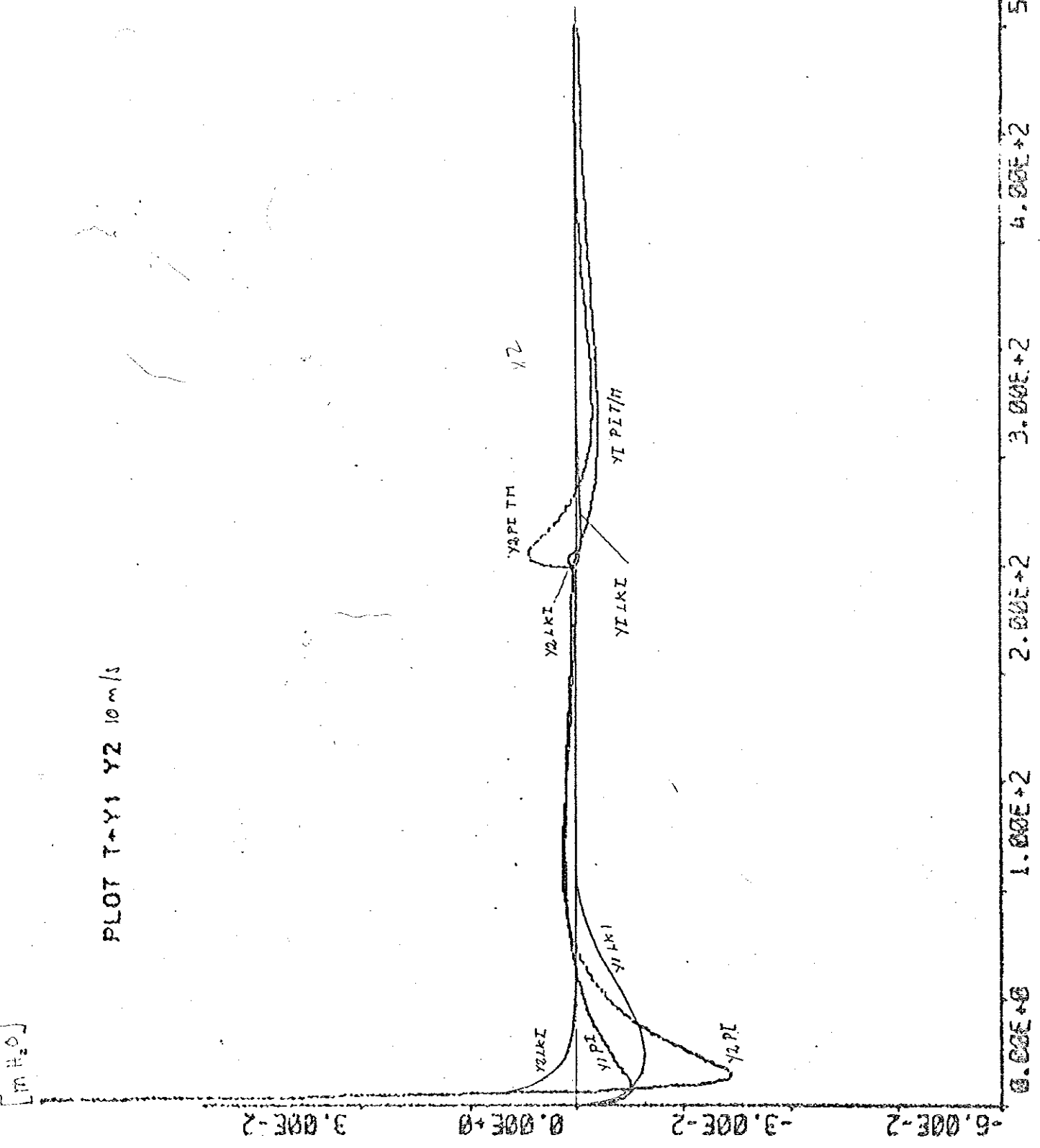
Mäldnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1% störning i mäldnivå [s]
och mäldflöde vid PI och LKI 01₁ reglering.

PLOT T-Y1 Y2 10m/s



Målnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1% störning i luft-
kuddetrycket och luftflödet vid PI och LKI 01, reglering.

PLOT T-Y1 Y2 10m/s



0.00E+0 1.00E+2 2.00E+2 3.00E+2 4.00E+2 5.00E+2

51

REFERENSER.

1. Swärd -Rasmusson : REGLERING AV INLOPPSLÅDA TILL EN PAPPERSMASKIN Ex.arb.1972.
2. K.J. Åström : LECTURE NOTES ON PAPER MACHINE CONTROL.
3. K. Mårtensson : LINJÄRKVADRATISK REGLERTEORI STF Ingenjörsutbildning KM3.
4. K. Gunnarson : ETT NYTT SYSTEM FÖR INLOPPSLÅDE-REGLERING AV PAPPERSMASKINER. ASEA tidn. 1970.nr.5.
5. D. Wahren : EN PAPPERSMAKARES SYN PÅ REGLER-PROBLEM INOM PAPPERSINDUSTRIEN. Särtryck förel. 1972-03-24.
6. Anderson-Moore : LINEAR OPTIMAL CONTROL Prentice-Hall 1971.
7. K.J. Åström : INTRODUCTION TO STOCHASTIC CONTROL THEORY . Academic Press 1970.
8. Anderson -Kördel : PRAKTISK REGLERTEKNIK Läromedels-förlagen Teknik och Ekonomi 1968.
9. Å. Månson : GIVARE FÖR MÄTNING AV ICKE-ELEKTRISKA STORHETER Sigma tryck TLTH 1973.

APPENDIX

Målnivå y_1 och totaltryck y_2 vid 1% störning i målnivå. P/E regulator

PL01 T-Y1 Y2

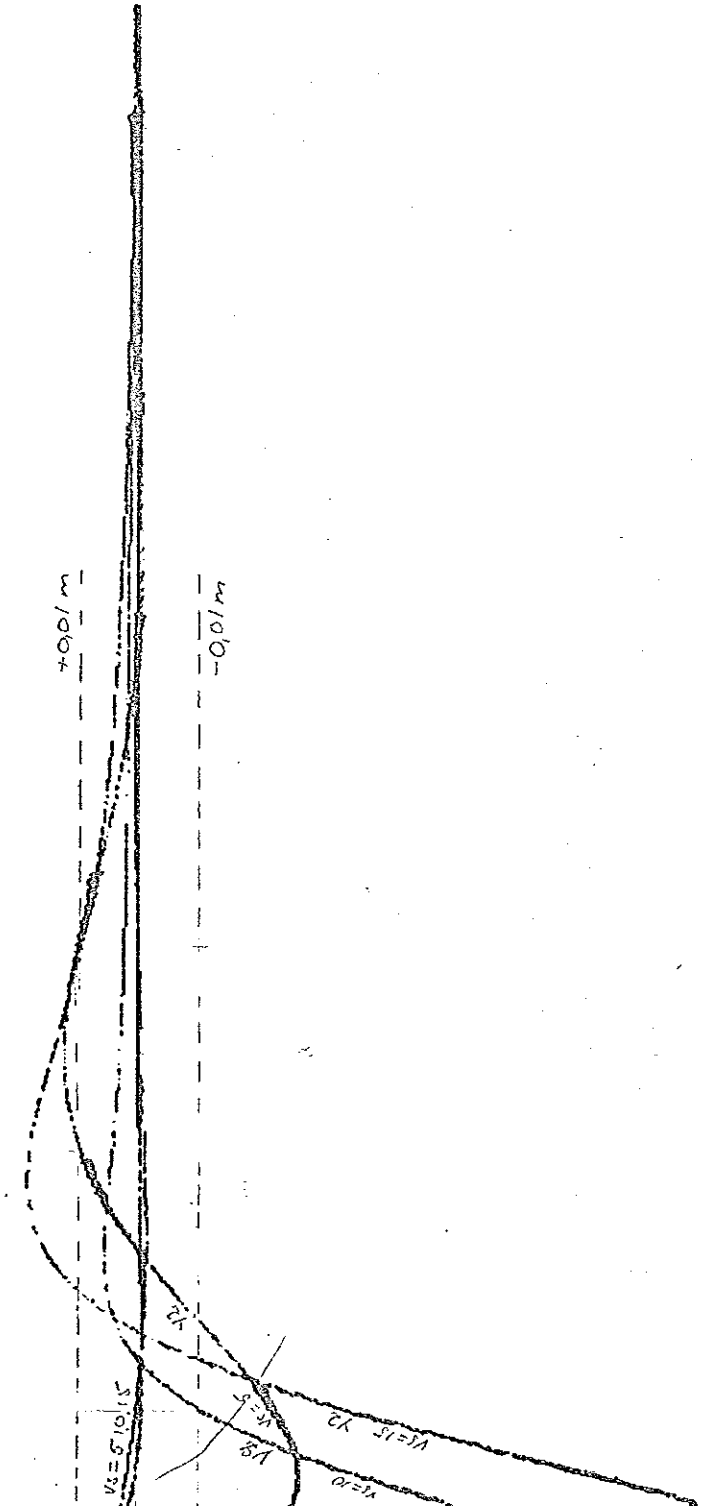


Målnivå y1 och totaltryck y2 vid 1% störning i målnivån vid T/L reglering.

PLOT T-Y1 Y2

[m H₂O]

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



[s]

1.00E+3

8.00E+2

6.00E+2

4.00E+2

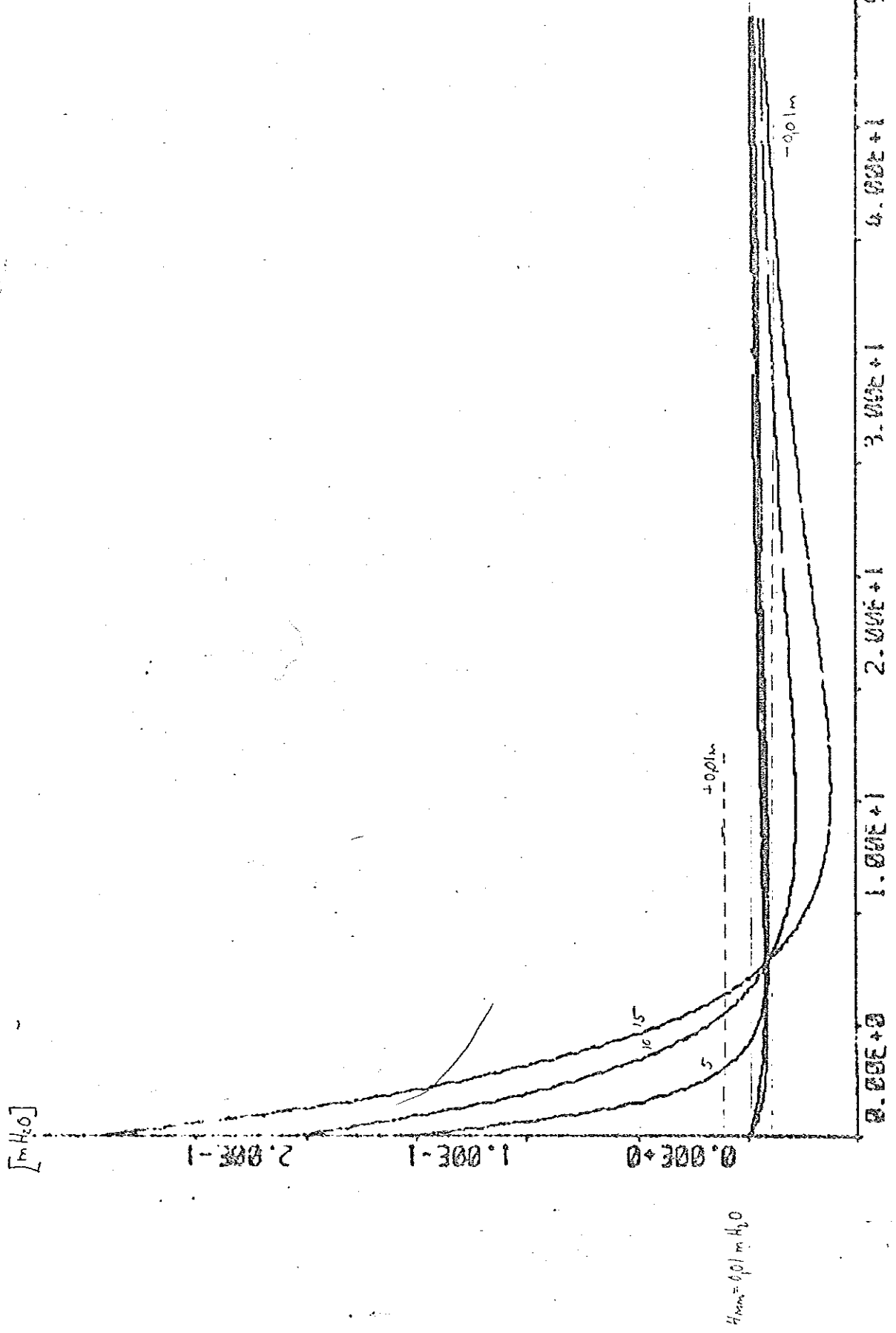
2.00E+2

0.00E+0

$\delta_{mm} = 0.01 \text{ m H}_2\text{O}$

Målnivå y1 och totaltryck y2 vid 1% störning i
luftkuddetrycket x2 vid T/I reglering.

PLOT T-Y1 Y2



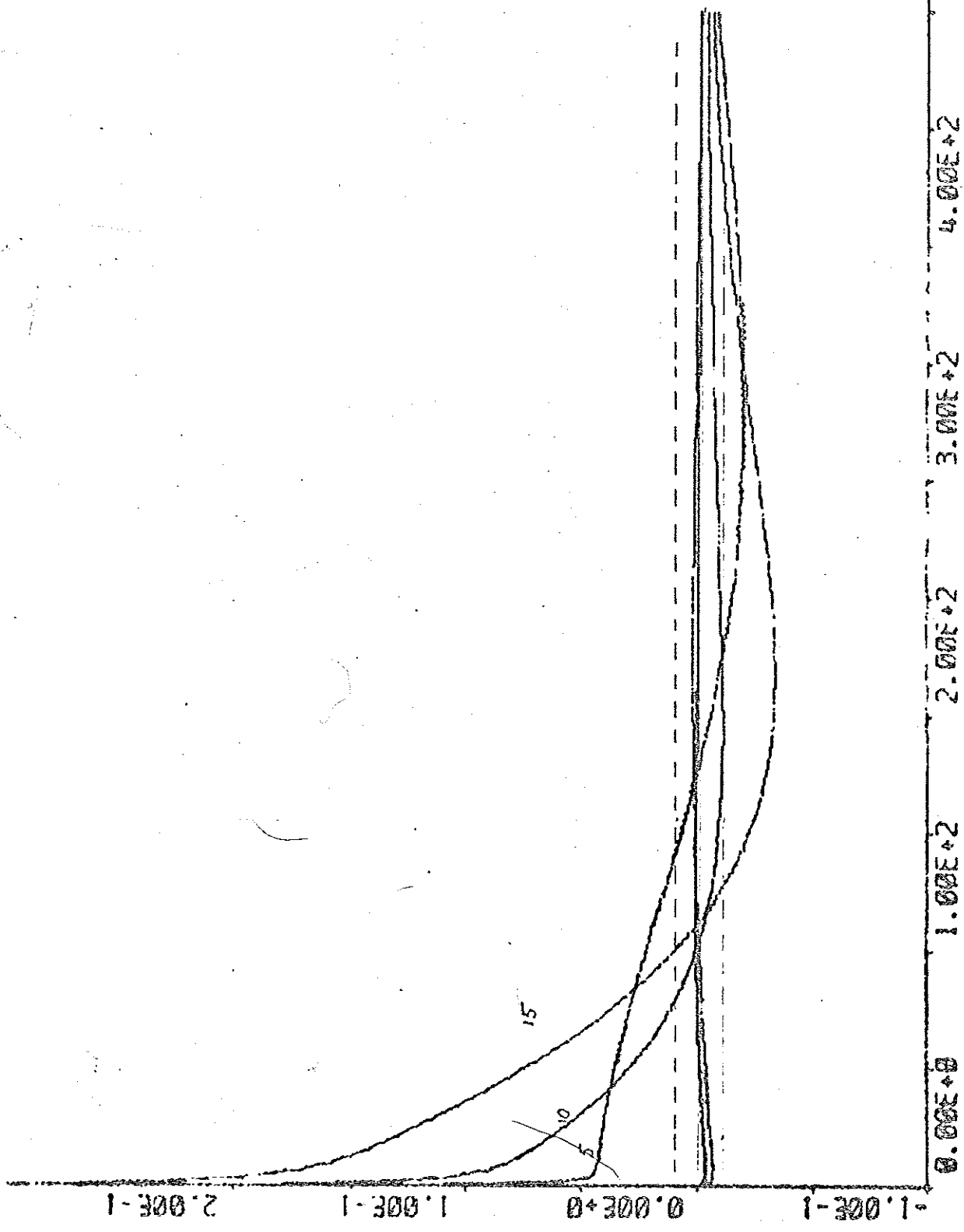
$\delta_{max} = 0.01 \text{ m H}_2\text{O}$

0.00E+0 1.00E+1 2.00E+1 3.00E+1 4.00E+1 5.00E+1 [s]

Käldnivå y1 och totaltryck y2 vid 1% störning i
luftkåddetrycket x1 vid T/L reglering.

PLOT Y-Y1 Y2

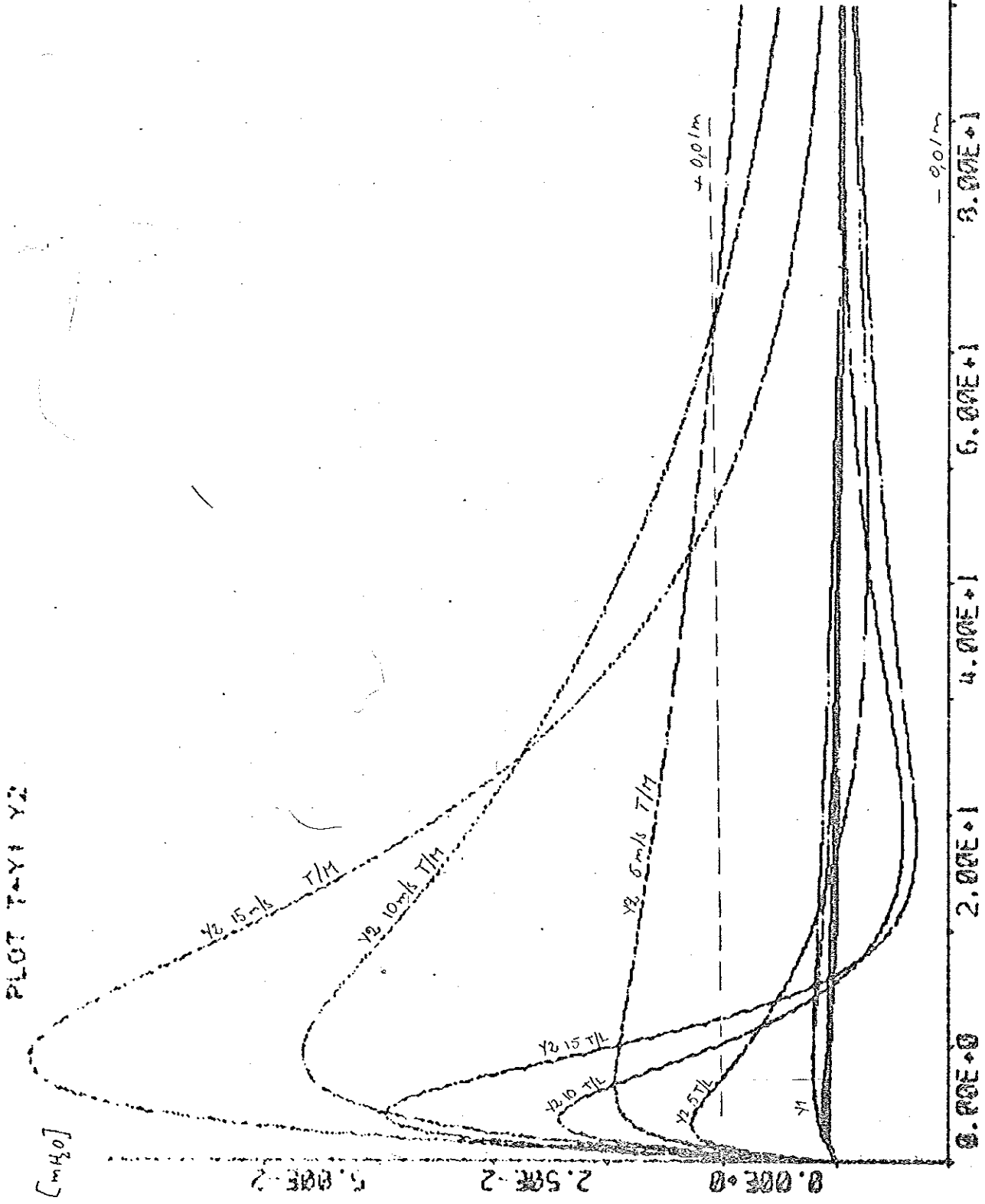
[m_{H₂O}]



$\eta_{pm} = 90/m^2 \cdot s$

[s]

Målnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1% stegstörning
i målnivån u_2 vid T/S och T/L regl.

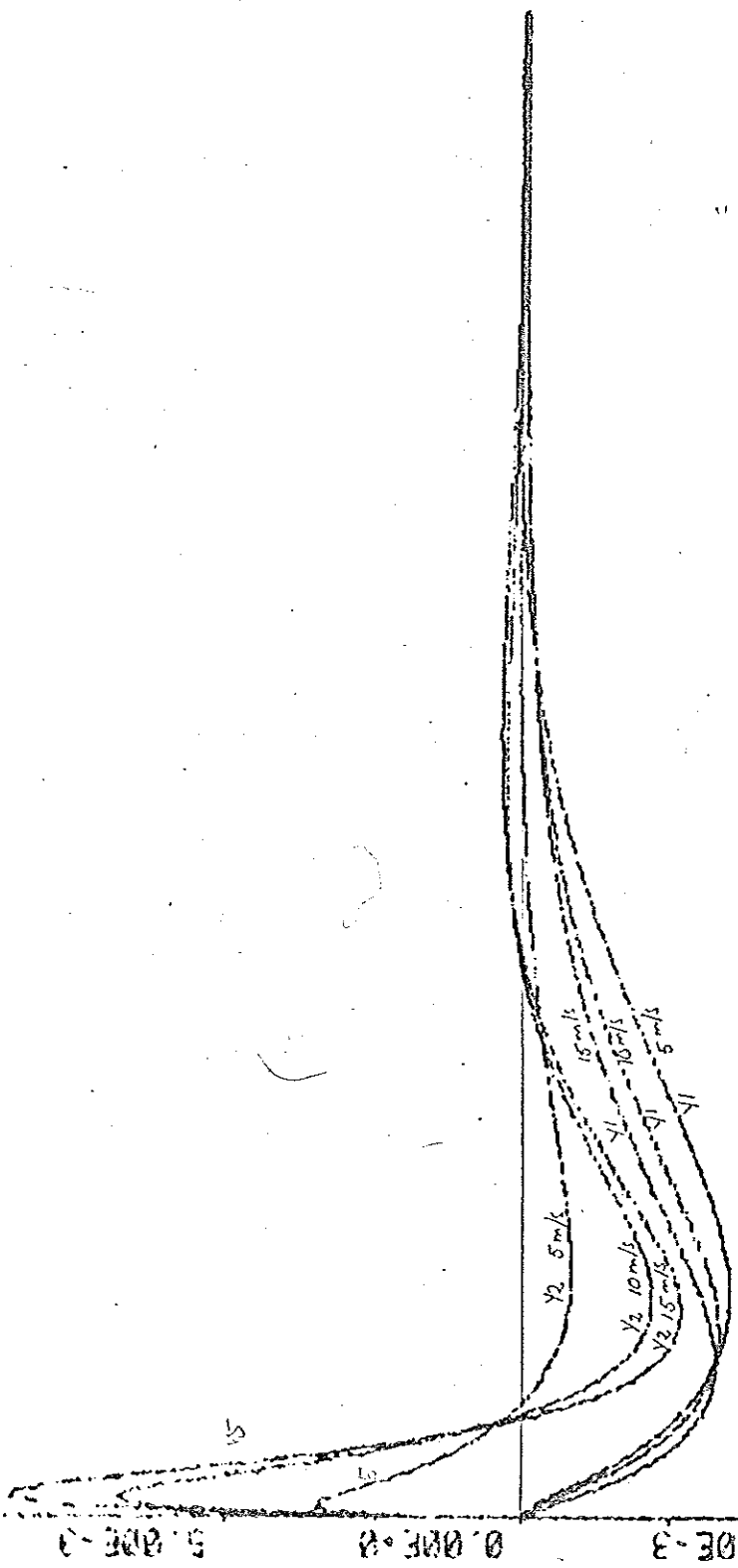


Baldnivå y1 och totaltrycket y2 vid 1% stegstörning
i luft flödet u1 vid T/K reglering.

PLOT T-Y1 Y2

+0,01m

[m H₂O]



8mm = 0,001 m H₂O

- 0,01 m

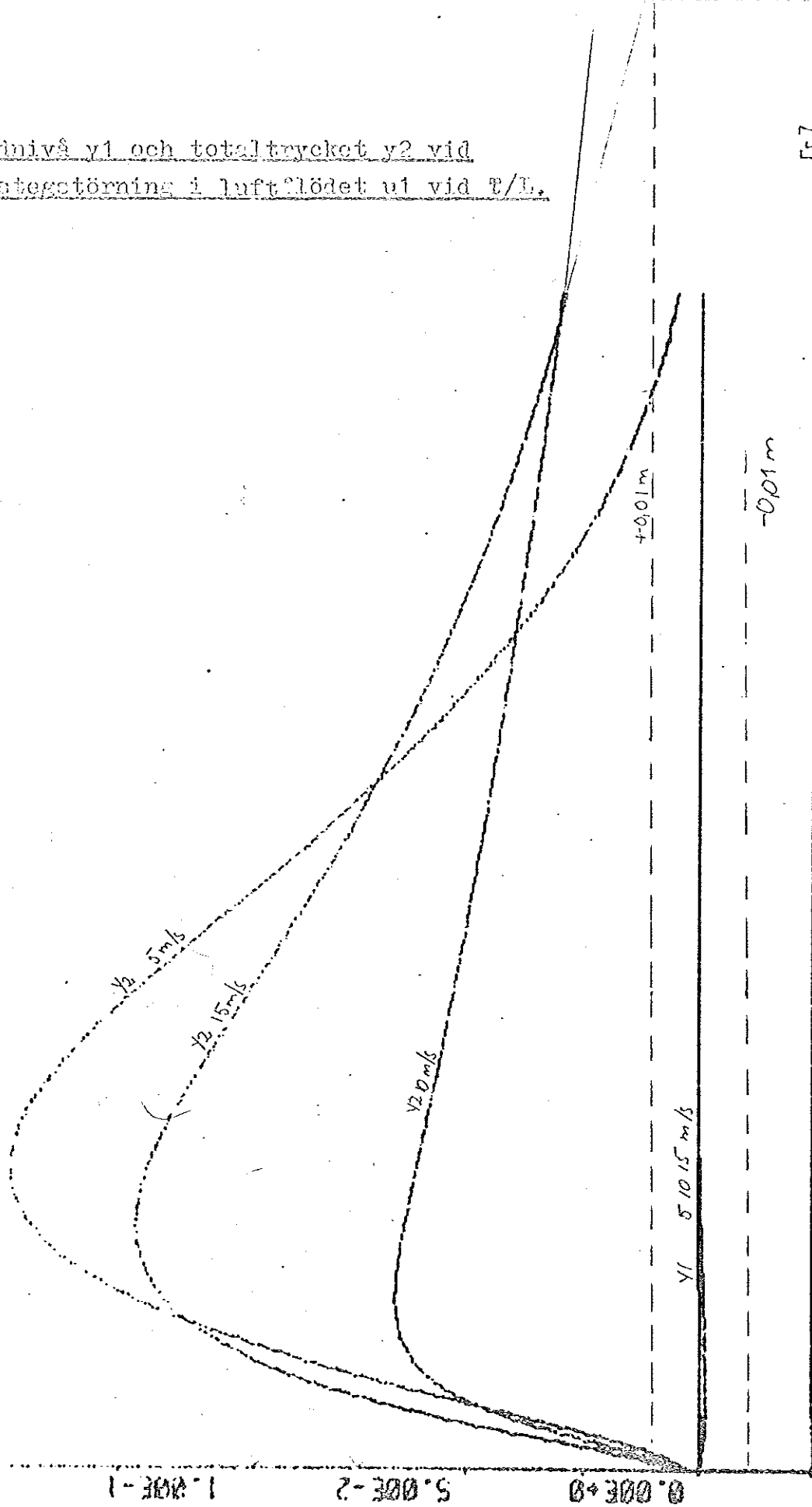
[s]

0.00E+0 1.00E+2 2.00E+2 3.00E+2 4.00E+2 5.00E+2

Målnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid
1% stegstörning i luftflödet ut vid T/L.

PLOT 1-11 YZ

[m H₂O]



0.00E+0	1.00E+2	2.00E+2	3.00E+2	4.00E+2	5.00E+2
					[s]

y_1 5 10 15 m/s

+0.01 m

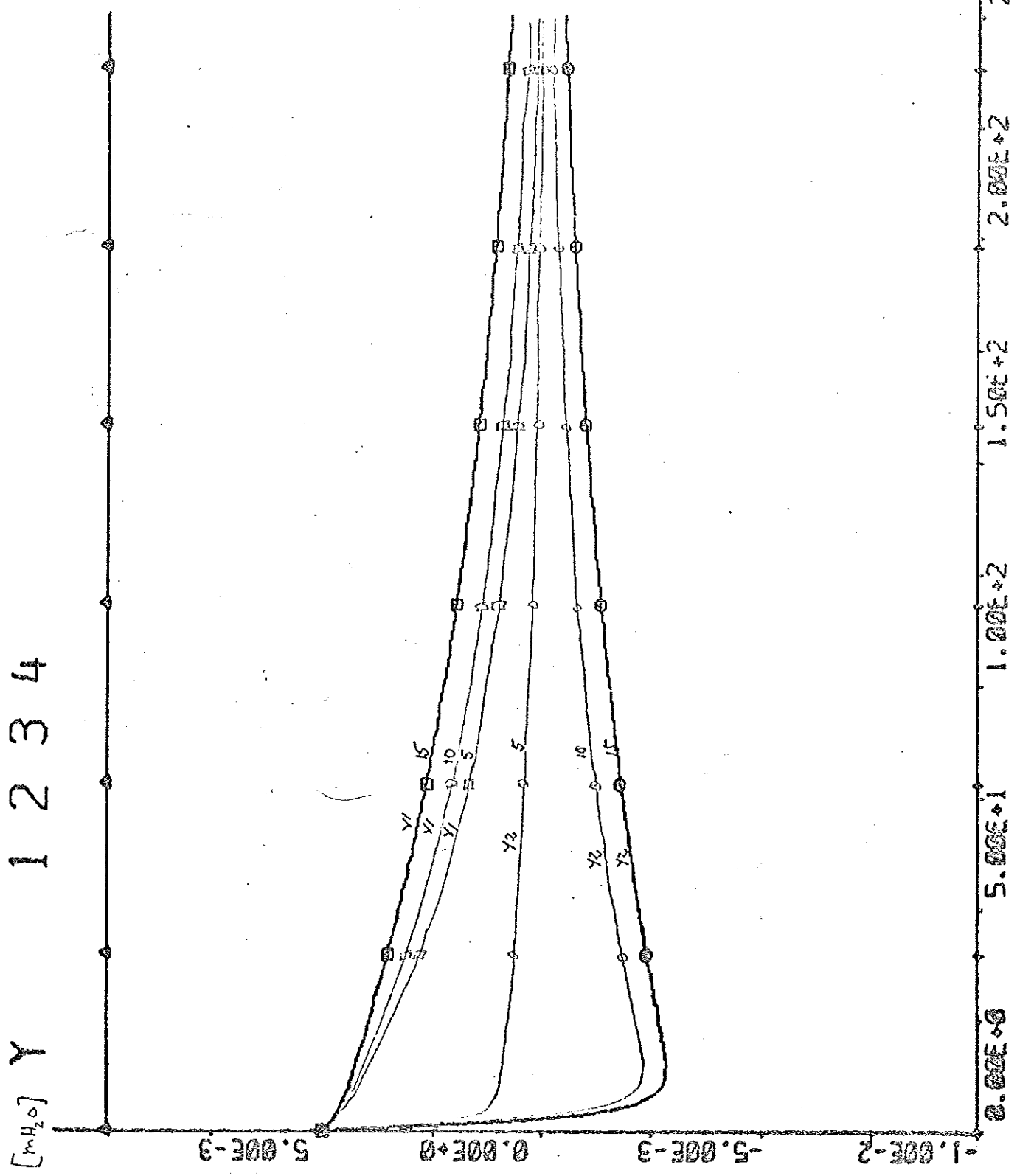
-0.01 m

1.00E-1

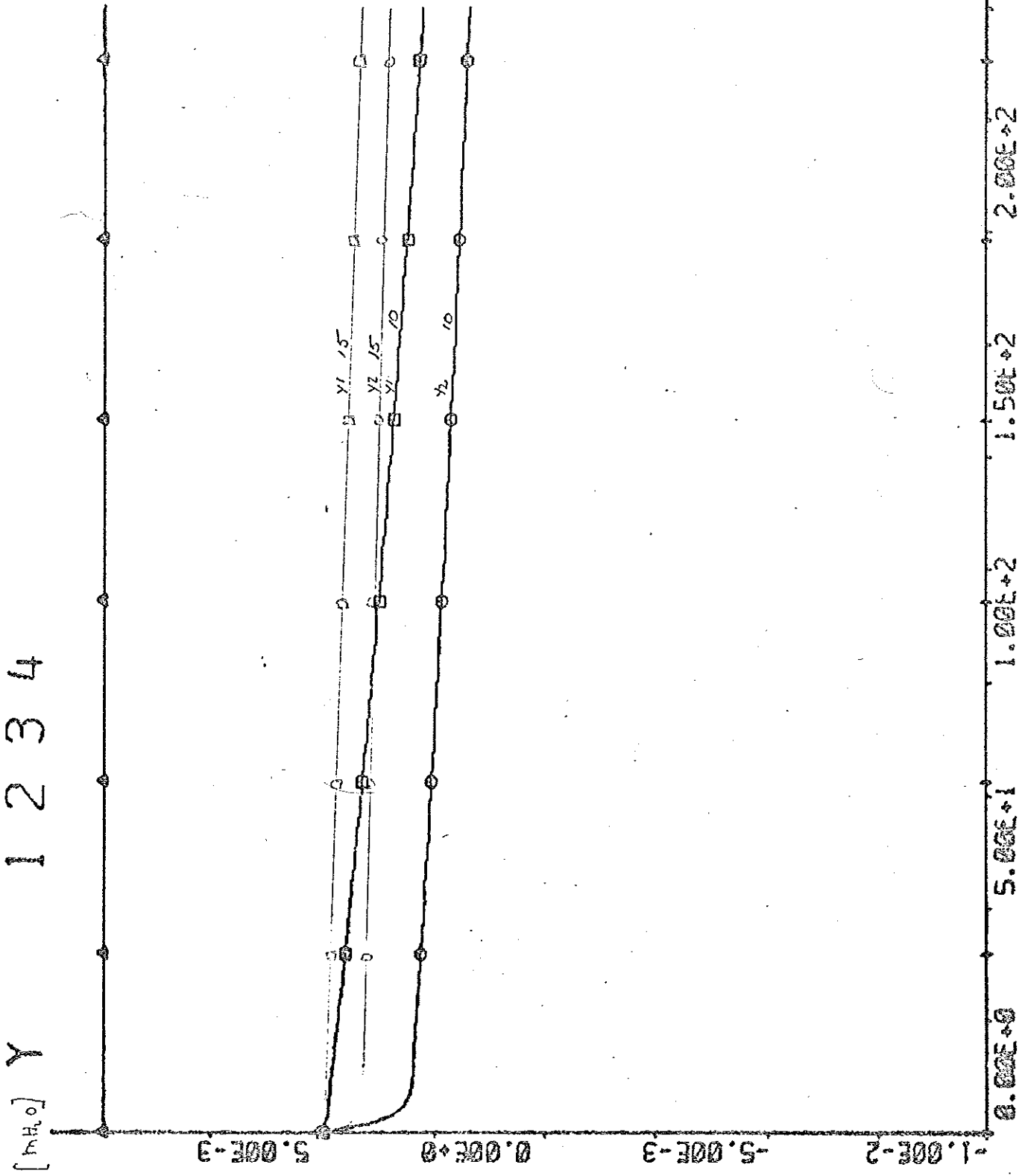
5.00E-2

0.00E+0

Mäldnivå y_1 och totaltryck y_2 vid 1% störning i mäldnivån vid LK reglering med Q_1 m.



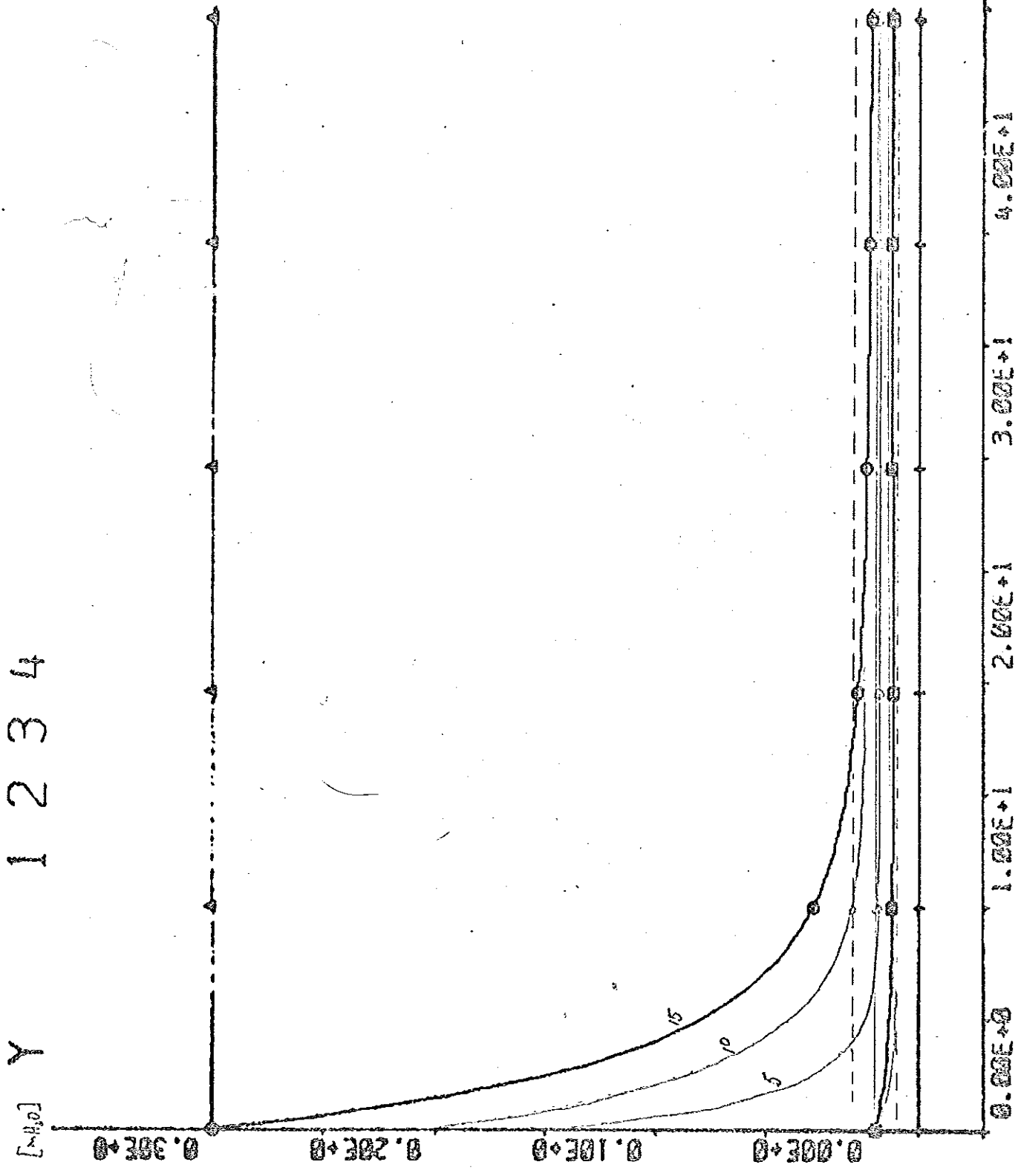
Målnivå y_1 och totaltryck y_2 vid 1% störning i målnivån vid LK reglering med Q_1 .



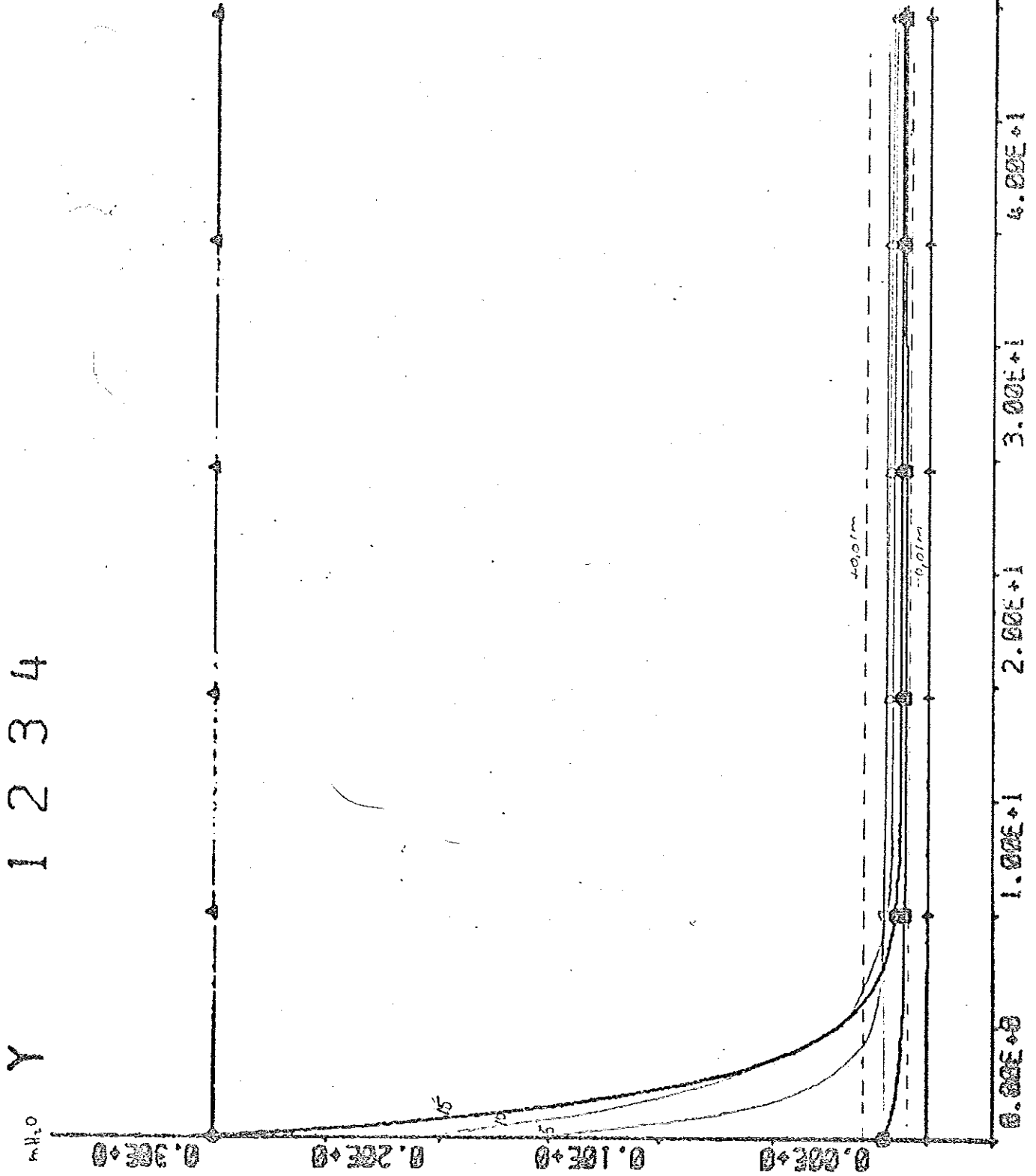
$[mH_2O]$ Y 1 2 3 4

0.00E+0 5.00E+1 1.00E+2 1.50E+2 2.00E+2 2.50E+2 [s]

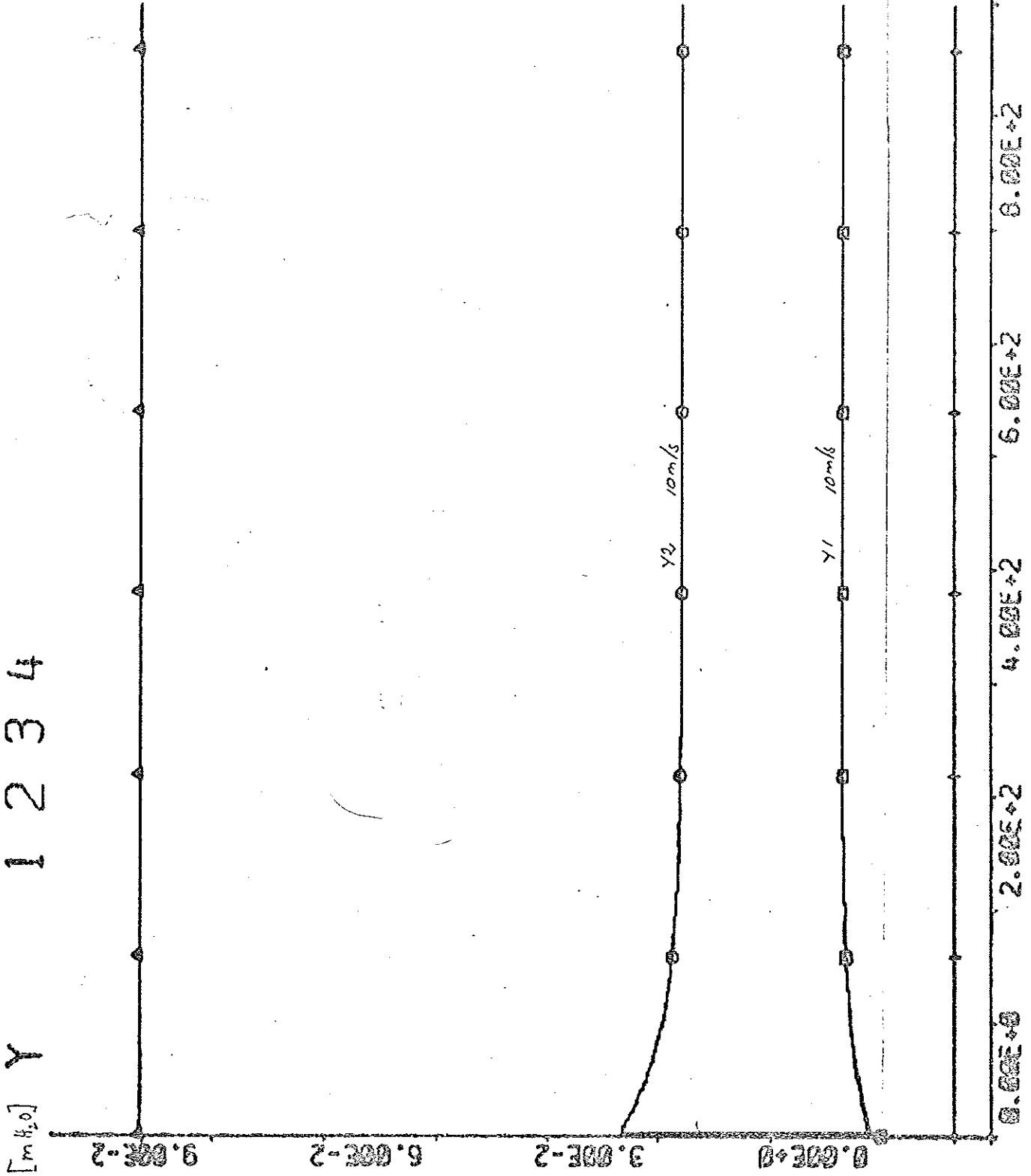
Bildnivå y1 och totaltryck y2 vid 1% störning i luft-
kuddtrycket. IR reglering och 01m.



Målnivå y1 och totaltryck y2 vid 1% störning i luftkudsetrycket vid IK reglering och 01₁.



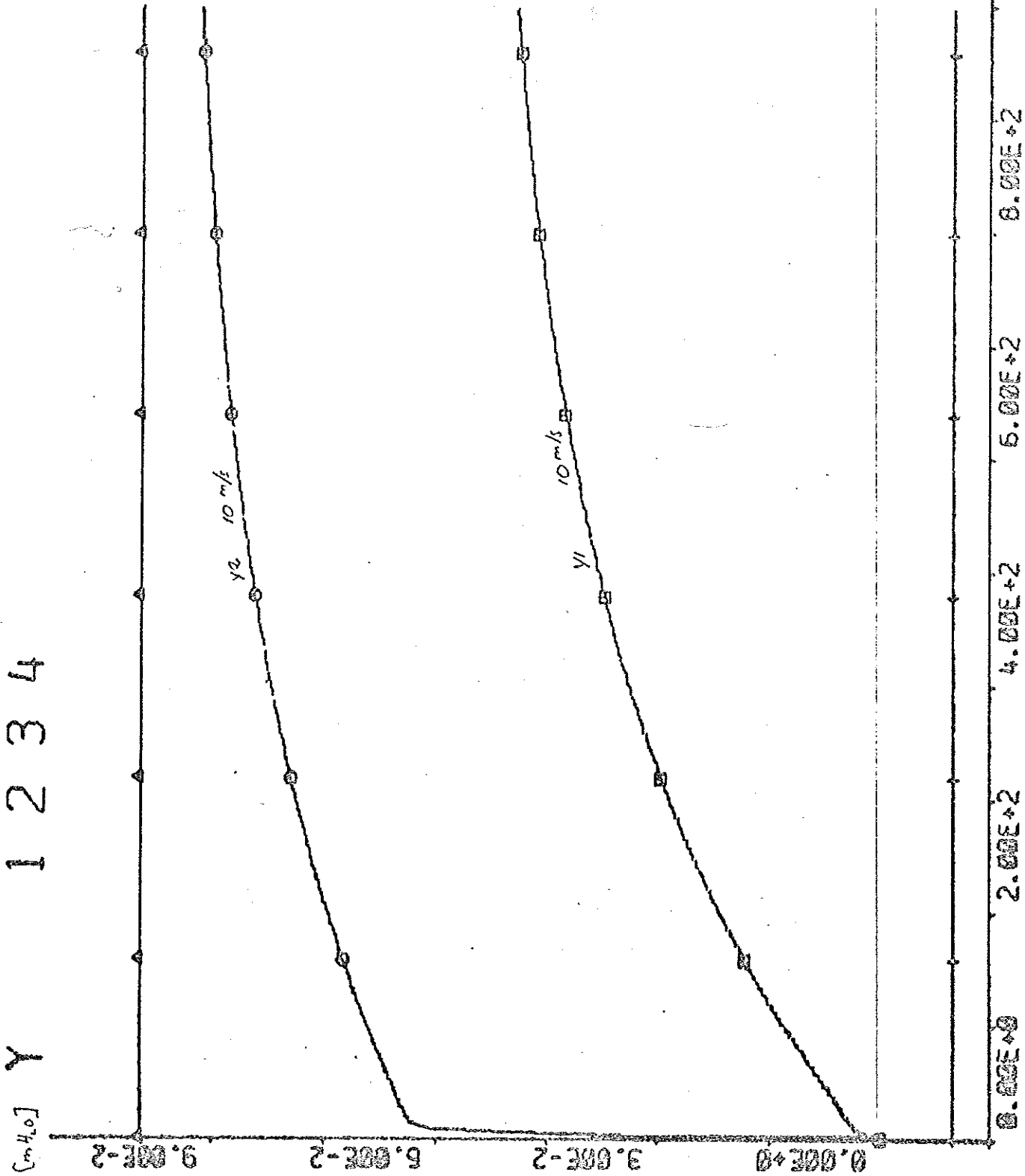
Målnivå y_1 och totaltryck y_2 vid 1% stegstörning i måldflödet vid LK och $O1_{11}$.



7 1 2 3 4
[Pa]

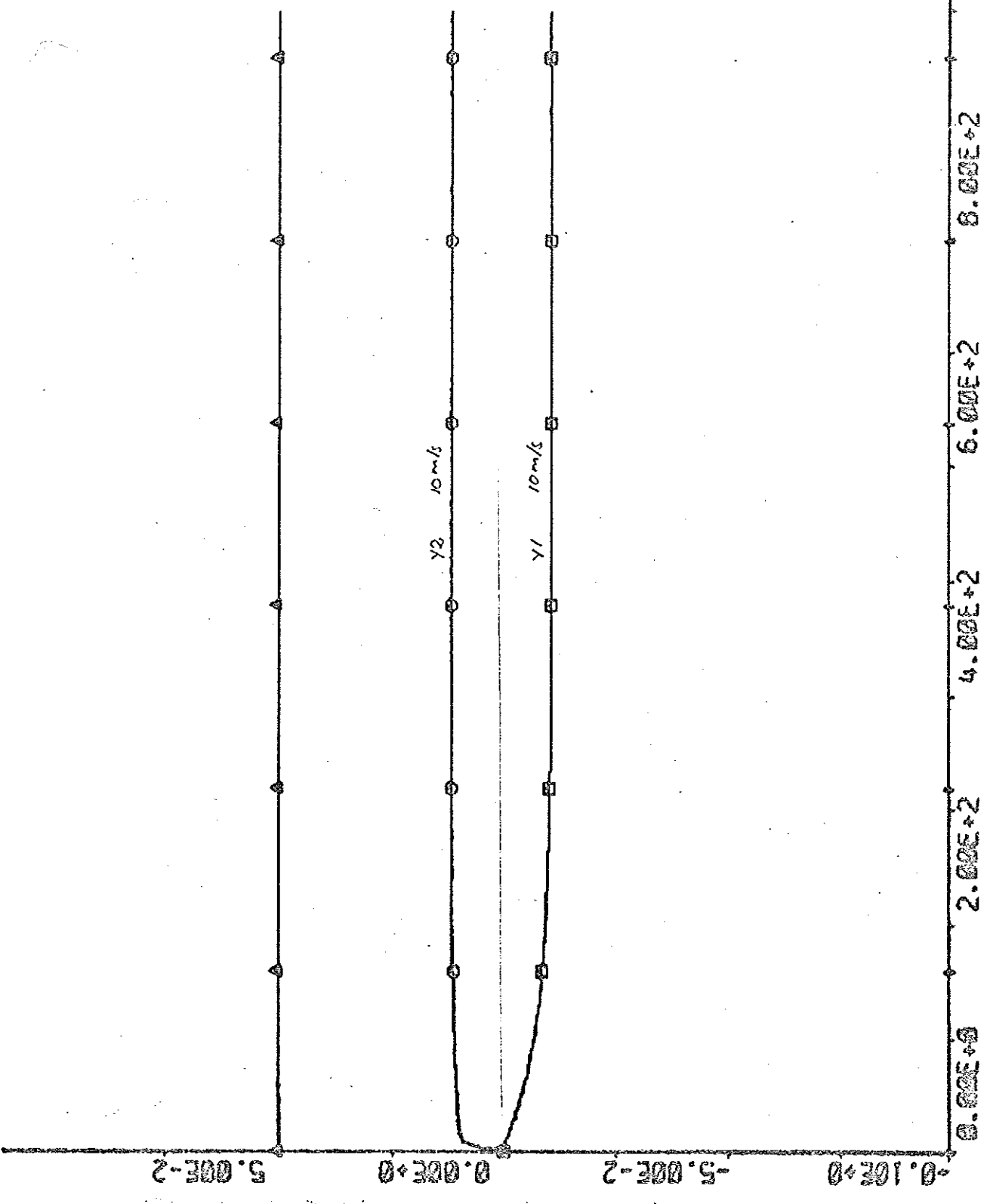
0.00E+0 2.00E+2 4.00E+2 6.00E+2 1.00E+3 [s]

Målnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1% stesstyrning i målnflödet vid JK och G1.

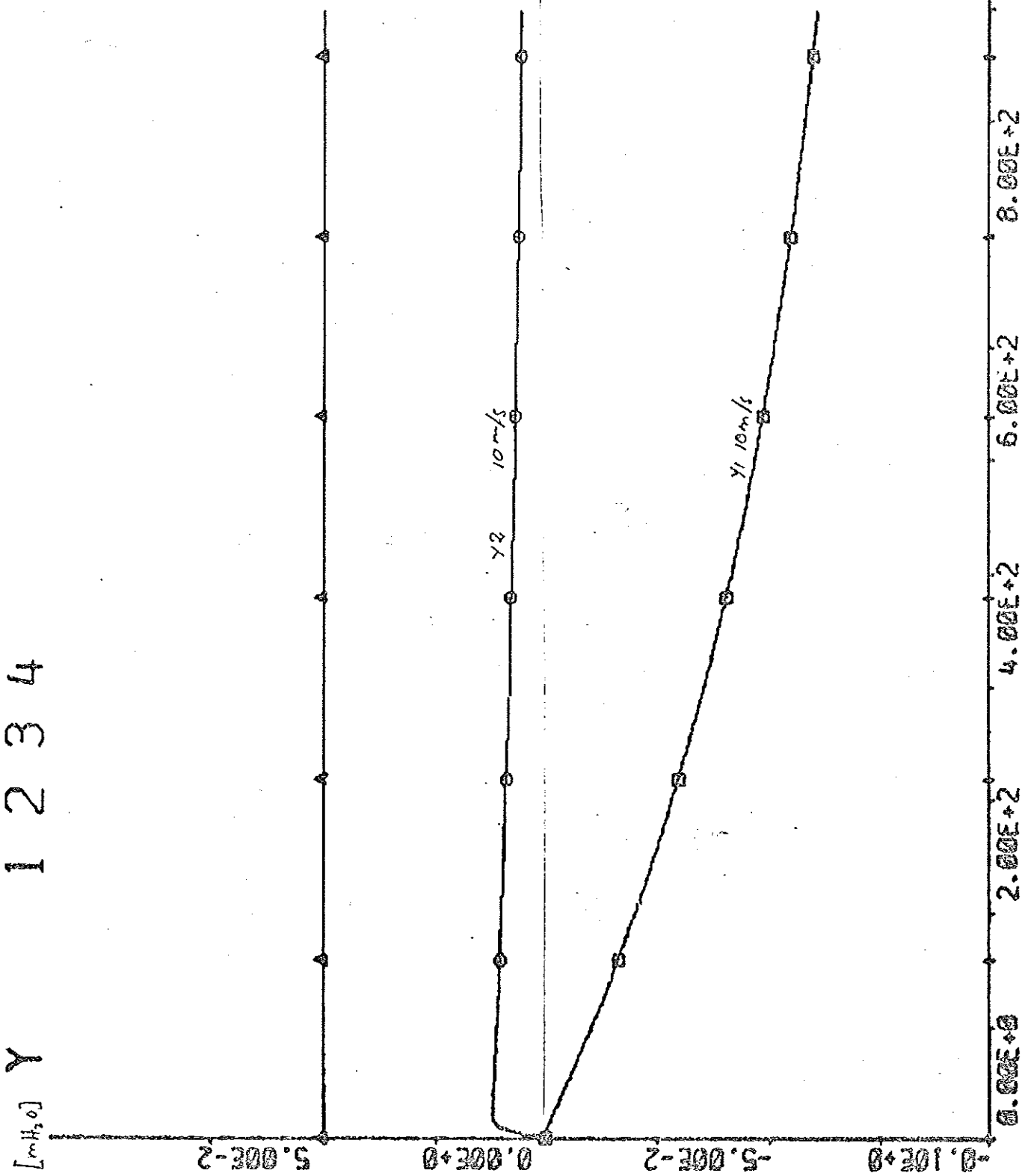


Bildnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1% stegstörning i luftflödet vid LK och $Q1_{me}$

[m²/s] Y 1 2 3 4



Håldnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1%stegstörning i luftflödet vid LK och $Q_{1,1}$.



Y 1 2 3 4

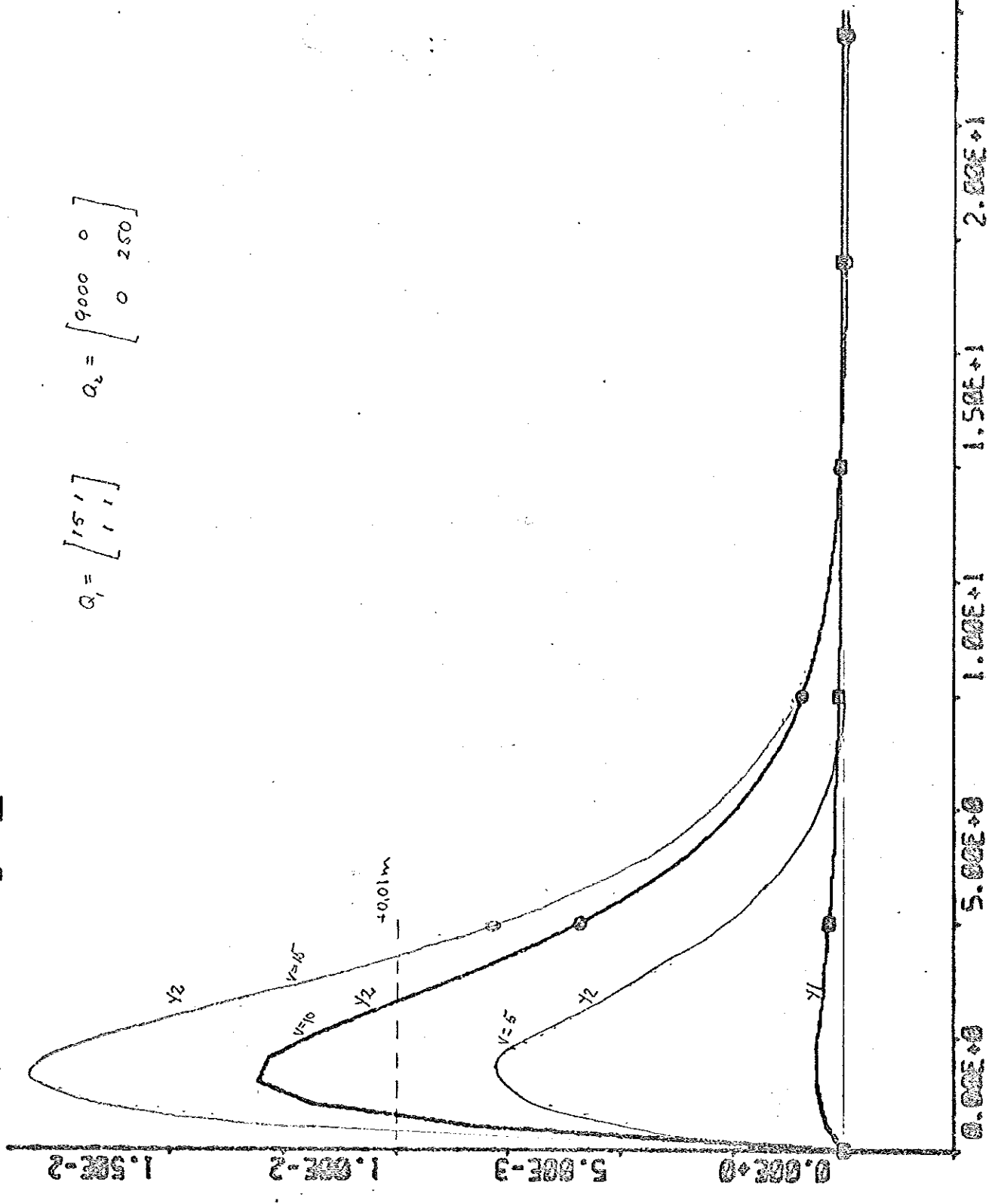
Målnivå y_1 och totaltrycket y_2 vid 1% stegstörning i måldflödet vid LKI och Q_1 .

$$a_1 = \begin{bmatrix} 15 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad a_2 = \begin{bmatrix} 9000 & 0 \\ 0 & 250 \end{bmatrix}$$

12

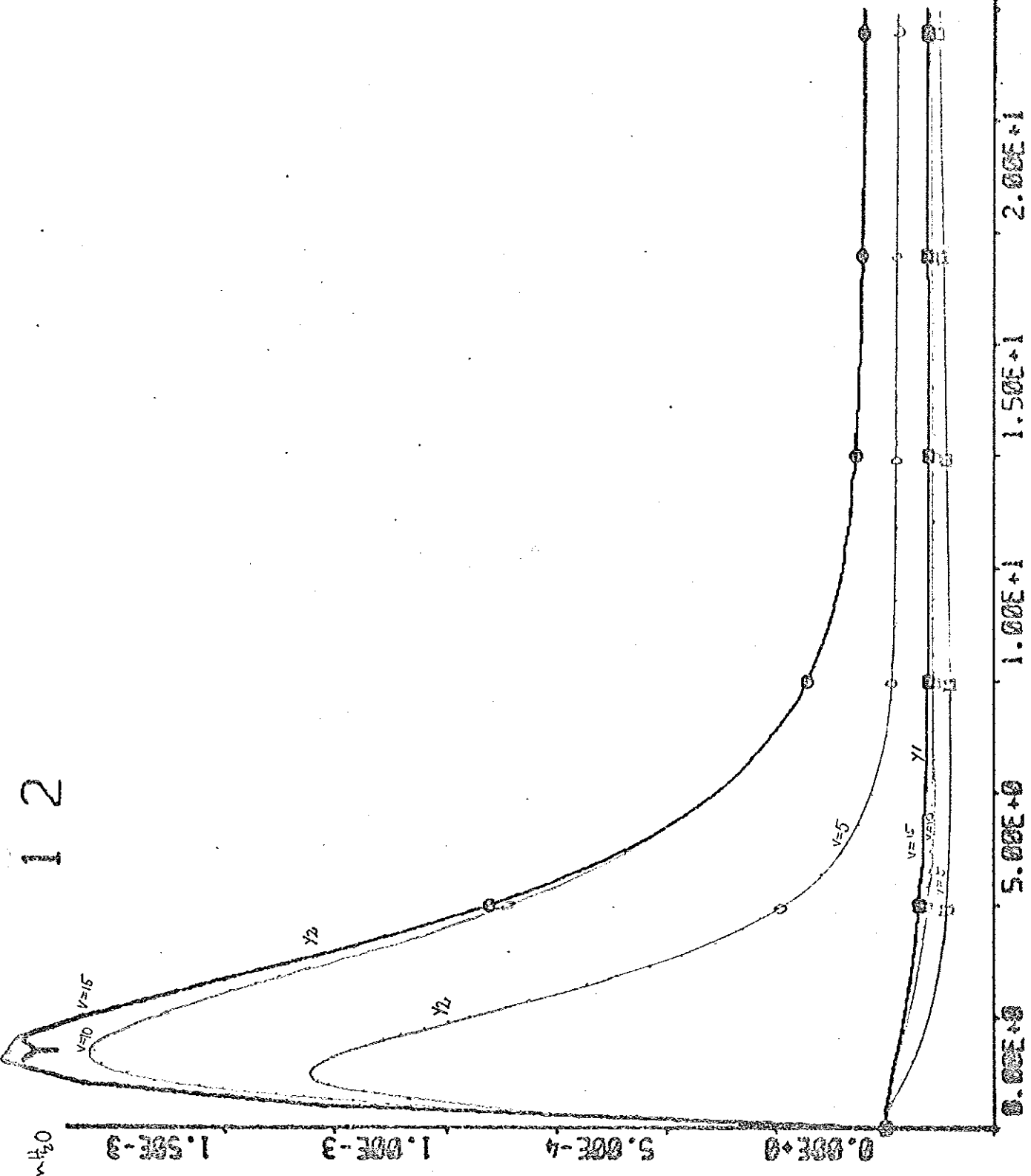
Y

mH_2O



0.00E+0 5.00E+0 1.00E+1 1.50E+1 2.00E+1 2.50E+1 [l/s]

Balånivå γ_1 och totaltrycket γ_2 vid 1% stegförning i luftflödet vid BK1 och 91_m.



12