

EXPERIMENTELL UNDERSÖKNING AV PROCESS-  
DYNAMIKEN HOS EN INDUNSTARE

BENGT SKARMAN

EXPERIMENTELL UNDERSÖKNING AV PROCESSDYNAMIKEN

HOS EN INDUNSTARE

Examensarbete i regleringsteknik

Bengt Skarman

Examensarbetet behandlar en experimentell bestämning av in-utsignalberoendet och störningsspektrum hos en indunstare. Mätdata tages ut på de instrument, som redan finns installerade i processen för driftskontroll. Alla mätningar har gjorts under normal drift. Systemet beskrives med en samplad modell och koefficienterna bestäms med hjälp av datamaskin. Undersökningen skall leda fram till bestämning av en lämplig återkoppling av systemets utsignal.

## Innehållsförteckning

1.	Inledning	1
2.	Beskrivning av processen	4
3.	Signaler och mätinstrument	6
4.A.	Preliminära mätningar	7
B.1.	Slutsatser av de första mätningarna	10
2.	Förbättringar av mätvärdesregistreringen	10
5.A.	Beskrivning av den använda systemmodellen	13
B.	Beskrivning av den använda styrsignalen	16
6.1.A.	Mätserie 1 matning - differenstemperatur	18
B.	Datamaskinberäkningar på mätserie 1	19
2.A.	Mätserie 2 matning - differenstemperatur	25
B.	Beräkningar på mätserie 2	26
C.	Övergång till Laplacetransform	29
D.	Bestämning av koefficientnoggrannheten i $G(s)$	30
3.A.	Mätserie 3 matning - differenstemperatur	33
B.	Beräkningar på mätserie 3	34
7 7.A.	Mätserie ångtryck - differenstemperatur	36
B.	Beräkningar på ångtrycksmätserien	37
C.	Bestämning av koefficientnoggrannheten i $G(s)$	41
8.	Sammanfattning av resultaten av mätningarna	42
9.	Referenser	46
	Diagram	
	Appendix	

## 1. Inledning

Examensarbetet omfattar en undersökning av processdynamiken hos en indunstare, som ingår i en kemisk processkedja i en anläggning vid Perstorp AB, Perstorp.

Ändamålet med examensarbetet var att göra sådana undersökningar, som så småningom kunde leda fram till en styrlag för styrning av koncentrationen hos den massa, som lämnar indunstaren. Man hade därvid två insignaler att välja på såsom beskrivs i avsnitt 2. Undersökningen skall alltså ge underlag för ett avgörande om vilken styrsignal, som är lämpligast. I examensarbetet göres dels en bestämning av in-utsignalsambandet, dels en bestämning av störningarnas utseende. Ett annat syfte med undersökningen var att avgöra med hur pass enkel utrustning åtminstone en preliminär undersökning av en process kan göras.

Den använda metoden för bestämning av processdynamiken bygger alltså på att man kan ta hänsyn även till störningar i processen under förutsättning att de är normalfördelade genom att bestämma deras spektrum. På så sätt har man möjlighet att urskilja styrsignalernas inverkan trots svåra störningar. Detta medger också, att styrsignalerna kan göras så små att mätningarna kan göras, utan att anläggningen behöver tas ur normal drift.

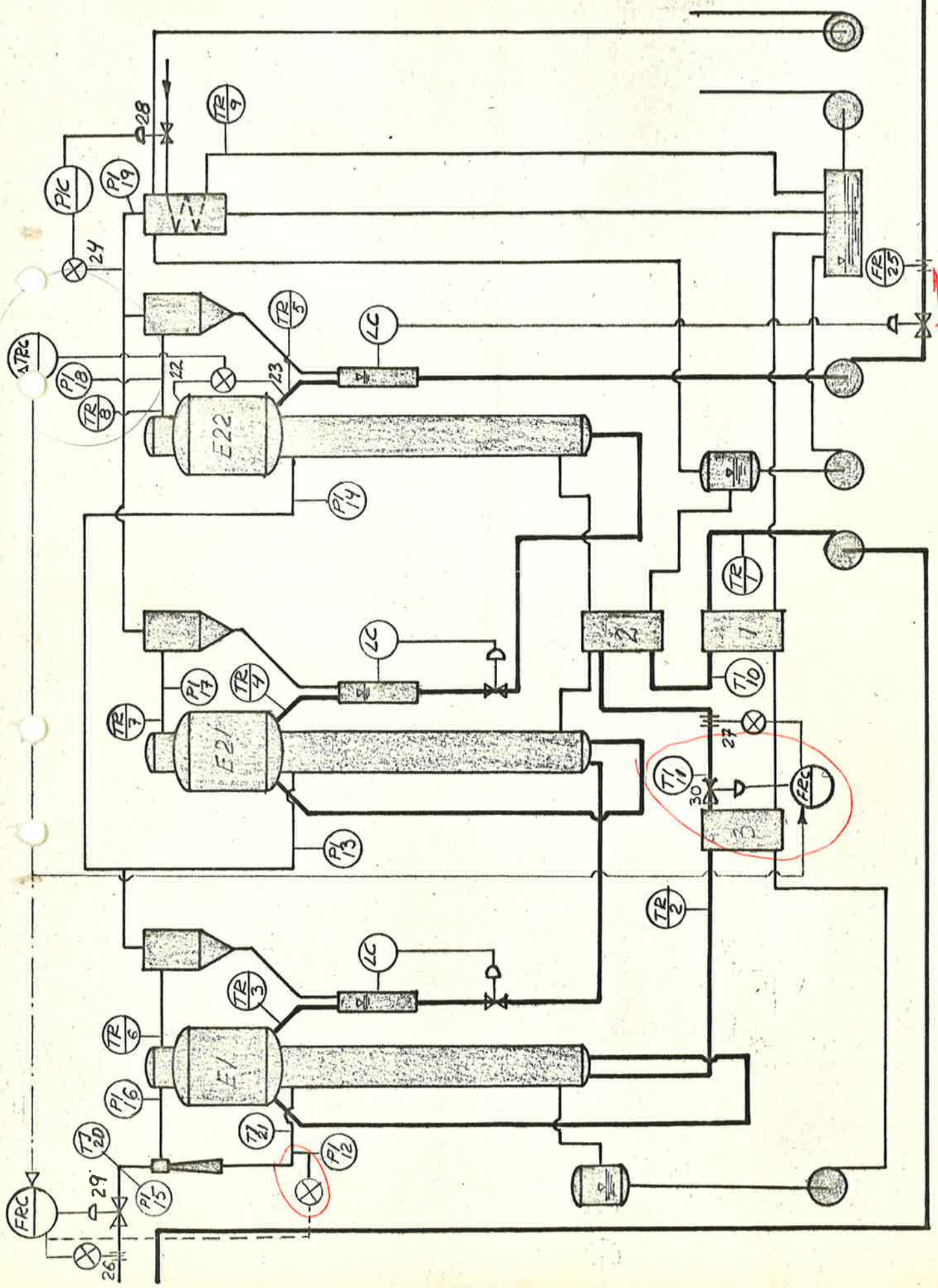
Den använda modellen är ett samplat system d.v.s. processtorheterna avläses i diskreta tidpunkter. Beträffande samplade system se referens 1. Den speciella modell med störningar, som användes beskrives i referens 2. För bestämning av koefficienterna i systemmodellen användes FORTRAN-program utarbetade vid institutionen för regleringsteknik. Principerna för beräkningen finns angivna i referens 3. En kortfattad sammanfattning

av ovanstående referensers innehåll ges i avsnitt 5. Då den studerade processen arbetar med analoga regulatorer har de erhållna pulsöverföringsfunktionerna omräknats till Laplacetransformer. En metod för denna beräkning anges i avsnitt 6.2.C. och 7.C.

Då man med den använda modellen även bestämmer störningarna finns det möjligheter att beräkna en minimumvariansstyrslag. Principerna härför finns angivna i referens 2.

Vid mätningarna förekom en del svårigheter av mätteknisk natur. För dessa redogörs i avsnitt 2, där också den använda mätutrustningen beskrivs.

Dynamiken vid styrning på den ena insignalen beskrivs som ett andra ordningens system av icke-minimumfaskaraktär med fördröjningen 11 minuter. Vidare bestämmas en av tidskonstanterna till 20 minuter. Det kunde också konstateras ett systematiskt mätfel vid fördröjningen 5 minuter. Dynamiken vid styrning med den andra insignalen beskrivs med ett tredje ordningens system med fördröjningen 10.5 minuter. Vidare diskuteras inverkan av ändringar i en av parametrarna vid mätningarna nämligen vakuomet. Närmare studium av mätvärdet på utsignalen visade ytterligare ett mätfel, som förekommer.



Placeras som vätskan vinner ut  
 vax stopp!

Instrumentering för industristare / TMP

21/10-66 Lsj

## 2. Beskrivning av processen

Examensarbetet avser att bestämma in-utsignalberoendet för en indunstningsapparat, som ingår som en del i en större kemisk processanläggning. Man framställer trimetylolpropan (TMP), som ingår som komponent i vissa färger.

Med utgångspunkt från kopplingsschemat följer en kort beskrivning av komponenterna i anläggningen. Indunstaren har som komponent i processkedjan beteckningen råindunstare.

TMP-lösningen, som skall indunstas passerar först en matarpump och sedan två värmeväxlare, där uppvärmning sker med hjälp av kondensvatten. Sedan följer en anordning för flödesreglering, som består av en flödesregulator och en flödesmätare av rotametertyp. Resultatet av mätningen återkopplas med regulatorn till flödesventilen och registreras dessutom på en skrivare. Flödet passerar sedan ännu en värmeväxlare och går därefter in i själva indunstaren, där det cirkulerar i första steget samtidigt som avtappning sker till nästa steg.

Indunstningen sker med hjälp av ånga, vars tryck regleras med en strypventil. Ångan cirkulerar endast i första steget och ny ånga tillföres genom en termokompressor, som höjer värmeinnehållet hos den ånga, som redan passerat värmeväxlaren. Kondensatet föres till en kondensattank genom de värmeväxlare, som redan nämnts. Regleringen av den tillförda värmemängden sker med hjälp av en trycksignal, som fås efter termokompressorn. Ångtrycket hålles konstant med hjälp av en regulator, som återkopplar trycksignalen till strypventilen. Även ångtrycket registreras på en skrivare.

Den ånga, som avgår från TMP-lösningen i första steget passerar en fuktavskiljare och användes sedan i de två följande stegen för indunstningen.



För att möjliggöra detta har TMP-lösningens tryck sänkts i de två sista stegen. Detta har åstadkommits genom att de två kolonnerna kopplats till ett vakuum, som fås genom att kondensera den ånga som lämnat lösningen i de två sista stegen. Kylvattnet är luftkyllt. Vakuumet regleras genom att ändra kylvattenmängden.

Koncentrationen efter indunstningen mätes med hjälp av den kokpunktsförhöjning, som fås när koncentrationen ökar. Observera att denna kokpunktsförhöjningen verkar stabiliserande på hela indunstningsförloppet. För att undvika att tryckvariationer påverkar koncentrationsmätningen mätes kokpunktsförhöjningen som differensen mellan TMP-lösningens och vattens kokpunkt vid det tryck, som ges av kondensor-vakuum. Temperatur-differensen bestäms med två motståndstermometrar kopplade i en brygga. Den elektriska signalen omvandlas till en pneumatisk signal och registreras på en skrivare.

Man önskar nu med hjälp av värdet på differenstemperaturen hålla koncentrationen på en så hög och jämn nivå som möjligt utan att koncentrationen blir så hög att det sker kristallisation och igensättning av rörledningarna med driftstopp som följd.

### 3. Signaler och mätinstrument

Följande signaler finns alltså i första hand tillgängliga för registrering

ångtryck

vakuum

matningsflöde

kokpunktsförhöjning

Samtliga dessa förekommer i form av pneumatiska standardsignaler 0.2 - 1.0 kp/cm<sup>2</sup>. De registreras på skrivare av pneumatisk typ, som använder Bourdonrör (Foxboro).

Fullt utslag på skrivarna (100%) motsvarar

ångtryck            2 kp/cm<sup>2</sup> abs

vakuum            200 torr abs

matningsflöde    7 t/h

kokpunktsförhöjning 50°C

Diagrampapperet har en bredd av 100mm och matningshastigheten är 20 mm/h.

Typiska ändringar i mätutslag under drift är av storleksordningen mm.

Skrivarna mäter nämligen totalvärdet av storheterna och inte avvikelser från börvärdet.

Dessutom sker indikering av de storheter, som är utmärkta i kopplings-schemat. Ett streck genom ringen betyder att mätvärdet är tillgängligt i kontrollrummet.

#### 4.A. Preliminära mätningar

Alla mätningar måste göras under drift och utan nämnvärd försämring av den indunstade lösningens koncentration.

Det förekommer tidskonstanter av storleksordningen minuter i processen. Detta kunde konstateras genom studium på de befintliga skrivarna. Ångtrycket har t.o.m. ännu snabbare variationer kring ett jämviktsläge.

Den första åtgärden blev alltså att koppla in skrivare med större matningshastighet. I första hand användes en skrivare Dreyer, Rosenkrantz + Droop 04/06-03, som har två kanaler och i detta fall matningshastigheten 120 mm/h.

Vid den första mätningen registrerades matningen av TMP och kokpunktsförhöjningen. Se diagram 1. Som insignal användes stegsignaler, som innebar 5-15 % ändring av inmatningen. Den största avvikelser från jämviktsläget vid normal drift var 8 %. Regleringen av matningen var bortkopplad och flödesventilen ändrades direkt med sitt pneumatiska styrdon. Trots bortkopplingen av återkopplingen höll sig inmatningen konstant utan ändringar av ventilen.

Utsignalregistreringen ger inte underlag för någon mera ingående beräkning, men kan ge en uppfattning om fördröjningar och en tidskonstant. För detta ändamål har en förstoring gjorts i diagram 2. Ur detta kan utläsas en fördröjning på 10 minuter och en tidskonstant på mer än 4 minuter. Observera att fördröjningen inte är en distinkt transportfördröjning. Betrakta nämligen en värmeväxlare och antag att man momentant kan ändra den tillförda värmemängden. Den TMP-lösning, som nu lämnar värmeväxlaren har emellertid inte hunnit ändra kvalitet, utan man får en successiv ökning av koncentrationen åtminstone till dess värmeväxlaren tömts på den lösning, som fanns i den före ändringen av energitillförseln.

Denna

process är svår att beskriva på grund av den blandning och återcirkulation, som också sker i värmeväxlaren.

De värden, som erhållits enligt ovan får tjäna som underlag för bestämmande av insignaler vid identifieringen. Angeläget är nu att konstatera att en inmatningsändring inte inverkar på ångtrycket i mer än försumbar utsträckning, eftersom ångtrycket är den andra insignal, som skall betraktas vid identifieringen och det inte får förekomma någon sådan inverkan, om båda insignalerna skall betraktas samtidigt.

Mätningar visade, att någon sådan inverkan inte förekom vad ångtrycksnivån beträffar. Däremot överlagras relativt högfrekventa svängningar med periodtiden 4 sekunder. Vid åtminstone denna mätning började svängningarna vid minskning av inmatningen medan de upphörde efter ökning av inmatningen. Se diagram 3 och 4 och observera att frammatningshastigheten är 36 mm/min. Denna frammatningshastighet har för övrigt använts i alla de efterföljande mätningarna för upptagande av de primära mätvärdena.

Såsom framgår av diagram 5 ändras också vakuomet vid inmatningsändringar. Vakuumändringen kommer alltså också att inverka i dynamiken inmatningskokpunktsförhöjning. Dessutom uppträder den svårigheten att vakuumregleringen tycks vara lättare vid kallare väderlek på grund av att man då har tillgång till kallare kylvatten.

Problemet med vakuumändringen är att referenstemperaturen vid mätning av kokpunktsförhöjningen är bestämd av vattens kokpunkt vid vakuumtrycket. TMP-lösningens kokpunkt är också bestämd av vakuomet. Låt nu vakuomet försämrats. Referenstemperaturen ställer in sig snabbt till den nya kokpunkten på grund av att en mycket liten vattenmängd användes för bestämningen. TMP-lösningen däremot har stor massa och följer ändringen

betydligt långsammare. Man kan alltså vid transienta förlopp få utslag på kokpunktsförhöjningen, som inte motsvarar någon koncentrationsändring. Det är också tänkbart att man kan få mätutslag, som är rakt motsatt styrsignalens inverkan på koncentrationen.

Nästa åtgärd var att göra ändringar i ångtrycket medan inmatningen hölls konstant. Här uppträdde den svårigheten, att en ändring på ångtrycksventilen medförde att trycket ändrade sig ganska långsamt mot det nya värdet. Se diagram 12. Dessutom uppträdde också här ändringar i vakuumet och svängningar i ångtrycket. Se diagram 5 och 6.

#### 4.B.1. Slutsatser av de första mätningarna

På detta stadium förefaller det lättast att undersöka relationen inmatning- kokpunktsförhöjning. Detta på grund av att inmatningen lätt kan ändras snabbt och sedan hållas konstant, vilket är viktigt vid den modell, som skall användas. Inmatningen förefaller också att vara en bättre styrvariabel ur den synpunkten att den ger mindre ändringar i vakuumpet än vad ångtrycksreglering ger. En svårighet är däremot att koncentrationsändringen är i huvudsak omvänt proportionell mot ändringen i inmatningen. Man har alltså en olinjaritet, vilket den modell, som skall användas, inte kan klara av. Styrsignalen måste alltså hållas relativt låten, för att olinjaritetens inverkan skall begränsas.

#### 4.B.2. Förbättringar av mätvärdesregistreringen

Den första åtgärden blev nu att ordna en bättre registrering av kokpunktsförhöjningen eller rättare temperaturdifferensen mellan TMP-lösningen och vatten vid kokning. De små mätutslag, som erhöles med de tillgängliga trycksignalerna och skrivarna var nämligen alltför små för att ge underlag för beräkningar.

Lösningen blev att koppla in en pneumatisk PID-regulator som pneumatisk förstärkare. Integrationstiden sattes på största möjliga värde (mer än 60 minuter) och derivationstiden på minsta möjliga värde (mindre än 0.1 minut). Proportionalbandet sattes på omkring 10 (%).

$$y = \frac{100}{p} \left( u + \frac{1}{T_1} \int u \cdot dt + T_2 \frac{du}{dt} \right)$$

$T_1$  integrationstid

$T_2$  derivationstid

p proportionalband

Som insignal på regulatorn användes nu mätsignalen. Utsignalen från regulatorn registrerades sedan på en skrivare med frammatningshastigheten 36 mm/min.

Genom att ställa in ett börvärde på regulatorn togs nivån på mätsignalen bort, så att ändringarna i signalen fyllde upp hela skrivarens bredd. Observera att regulatorn ger en negativ utsignal på en positiv insignal. Genom att lägga in trycksignaler av känd storlek kunde mätutrustningen sedan kalibreras.

En svårighet var nu att regulatorn inte arbetade så bra som önskvärt vore. Vid hastiga förändringar på insignalen gjorde skrivaren stora överslängar i sitt utslag. En undersökning med stegsignaler visade att derivataverkan i regulatorn inte var helt bortkopplad. Att detta blev så störande visade sig bero på att den elektrisk-pneumatiska omvandlaren, som verkade på den elektriska signalen från differens-temperatur-mätaren ändrade sig stegvis. Att det verkligen var omvandlaren, som ändrade sig stegvis gjordes troligt genom att ökad förstärkning på regulatorn gav större stegvisa förändringar på skrivaren. Lagg också märke till att dessa steg inte är märkbara vid normal registrering utan förstärkning.

Av ovanstående resonemang följer, att man bör kunna släta ut alla sådana kortvariga toppar och på så sätt få en användbar mätserie. Den första mätserien behandlades på detta sätt. Se diagram 7 och jämför med diagram 10.

Förfrågningar hos regulator-tillverkaren gav vid handen att derivataverkan kunde bortkopplas genom en omkoppling av en slang i regulatorn. Integratorverkan bedömdes ha liten inverkan på mätresultatet. I detta skick har sedan regulatorn använts i de följande mätningarna.

En noggrannare undersökning av regulatorns uppförande visade också att det förekom toppar av någon minuts varaktighet och riktade åt samma håll vid konstant insignal. Detta visade sig bero på variationer i den tryckluft av  $6 \text{ kp/cm}^2$ , som reducerad till  $1.4 \text{ kp/cm}^2$  användes för matning av

regulatorn. Genom att koppla två strypventiler efter varandra och med avtagande tryckinställning eliminerades denna variation så gott som fullständigt. Skrivarens registreringar 1) vid stegsignaler, som genererats manuellt direkt på regulatorn och 2) vid konstant insignal till regulatorn före ändringarna av denna framgår av diagram 8.



### 5.A. Beskrivning av den använda systemmodellen

Examensarbetets mål är att bestämma i första hand en samplad beskrivning av induktansens dynamik. De två olika insignalerna kommer att behandlas var för sig.

Följande modell kommer att användas

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t)$$

Här är  $z$  en förskjutningsoperator d.v.s.  $zy(t) = y(t+1)$  eller

$$z^{-1}y(t) = y(t-1).$$

$z^{-k}$  betecknar alltså en förskjutning  $k$  steg bakåt i tiden (jfr  $e^{-sk}$ ).

$y(t)$  är utsignalen och mätes i de diskreta tidpunkterna  $t = 0, 1, 2, \dots$

$u(t)$  är styrsignalen och hålles konstant under samplingsintervallet

( $n \leq t < n+1$ ).

$e(t)$  representerar störningar i styrsignalen, i själva processen, i mätningen av utsignalen o.s.v.

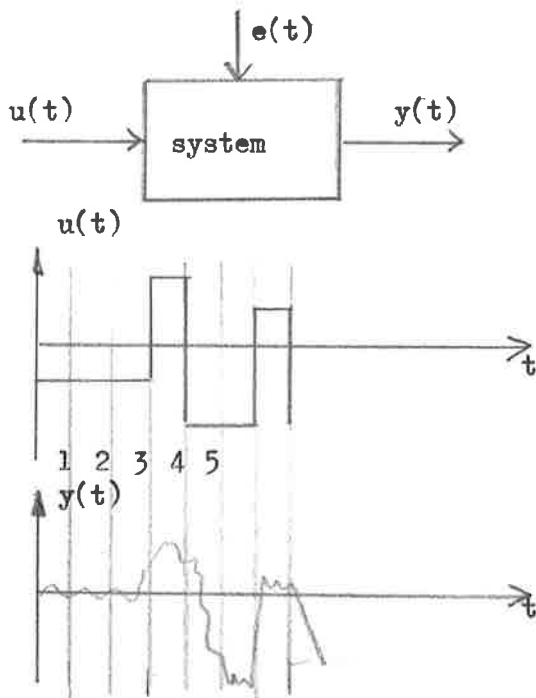
$e(t)$  antages normalfördelad med medelvärdet 0 och standardavvikelsen  $\sigma$ .

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n}$$

För ett samband med Laplacetransformen se 6.2.B.



Denna medell har studerats i ett antal examensarbeten vid institutionen för regleringsteknik. För identifieringen kommer att utnyttjas FORTRAN-program skrivna av Ivar Gustavsson. Se även referens 3).

Man skaffar sig ett stort antal samhörande värden på in- och utsignal. Det gäller nu att bestämma koefficienterna  $a$ ,  $b$ ,  $c$  så att systemekvationen satisfieras under villkoret att man i medelkvadratmening behöver tillgripa så små störningar som möjligt, för att ekvationen i varje samplings-tidpunkt skall satisfieras. Detta betyder att  $V = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^N e^2(t)$  skall ha minimum och där  $N$  är antalet mätpunkter.

$\sigma$  erhålles som  $\sqrt{\frac{2V}{N-3n}}$ , där  $n$  är systemordningen.

För att bestämma minimum av  $V$  användes Newton-Raphson-algoritmen

$$\Theta^{i+1} = \Theta^i - (V_{\Theta\Theta}(\Theta^i))^{-1} \cdot V_{\Theta}(\Theta^i)$$

där  $\Theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, c_1, c_2, \dots, c_n)$  d.v.s. den vektor, som skall bestämmas.

$V_{\Theta} = \text{grad}V$

$V_{\Theta\Theta}$  är en matris med andraderivator av  $V$  som element.

Man får också standardavvikelsen hos koefficienterna i den  $i+1$ :a

iterationen som  $\sigma(\Theta^{i+1}) = (\sigma^2 V_{\Theta\Theta}^{-1}(\Theta^i) I)^{\frac{1}{2}}$ .

$V_{\Theta\Theta}^{-1}$  är nämligen en kovariansmatris.

För att bestämma systemordningen  $n$  användes ett F-test. Man ansätter ett system av ordning  $n$  och får ett värde  $V$ . Man ökar sedan systemordningen och undersöker om man fått en signifikant minskning av  $V$ .

Felen  $e(t)$  antages normalfördelade.

$V_n$  förlustfunktionens värde vid systemordning  $n$

$\sigma^2$  feltermernas varians

$N$  antalet datapar

Då gäller

$$\frac{V_n}{\sigma^2} \in X^2(N - 3n)$$

$$\frac{V_{n+1}}{\sigma^2} \in X^2(N - 3(n + 1))$$

$$\frac{V_n}{\sigma^2} - \frac{V_{n+1}}{\sigma^2} \in X^2(3)$$

Enligt definitionen på F-fördelningen gäller då

$$K = \frac{V_n - V_{n+1}}{3} \cdot \frac{N - 3(n + 1)}{V_{n+1}} \in F(3; N - 3(n + 1)).$$

På 5%-nivån gäller  $F_{\alpha}(2, \infty) = 2.60$ . Avvikelsen från  $F_{\alpha}(2, N)$  är liten om  $N > 200$ . Om  $K > 2.6$  har man då en signifikant förbättring i förlustfunktionen vid övergång från systemordning  $n$  till  $n + 1$ .

För att bestämma fördröjningen  $k$  förskjuter man utsignalregistreringen  $k$  steg, så att den relateras till styrsignalen  $k$  steg tidigare. Beräkningsprogrammet bestämmer nämligen koefficienterna i modellen

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t)$$

Har man nu i stället

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t)$$

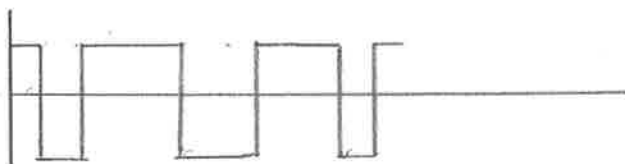
observerar man bara att  $z^{-k}u(t) = u(t - k)$  d.v.s. kombinera  $y(t)$  och  $u(t - k)$ .

Genom att pröva med olika fördröjningar och studera förlustfunktionen  $V$  kan det rätta  $k$  bestämmas. När man har hittat rätt  $k$  är nämligen  $V$  minst. Då har man kopplat samma insignal och utsignal, så att resultatet av signalen inte räknas in bland störningarna. Man inser också att det räcker att testa med  $n = 1$  för att komma i närheten av rätt  $k$ , eftersom man då kan beskriva utsignalens ökning och minskning. Vidare inser man att man inte kan använda en periodisk insignal. Däremot kan vid högre ordningstal  $k$  bli sänkt därför att modellen kan ta hänsyn till även kortvarigare variationer med annat tecken än den dominerande ändringen.

### 5.B. Beskrivning av den använda styrsignalen

Man skall alltså ha en styrsignal, som är konstant under samplingsintervallet och som är icke-periodisk. Vidare bör den vara lätt att ställa in på processregulatorerna, d.v.s. det är önskvärt att den har bara två nivåer. Vidare bör den ha ett sådant frekvensinnehåll att den exciterar alla moder i processen, d.v.s. likna vitt brus.

En signal med de önskade egenskaperna är en s.k. pseudo-randomserie av maximum längd. Den har följande principiella utseende.



Den kan visas ha ett spektrum, som mycket liknar det hos vitt brus.

Beskrivning och referenser angående pseudorandomserien finns i ett examensarbete av Jan-Olof Wintzell. Referens 4.

Betrakta ett polynom i  $d$  av graden  $n$ , som inte går att faktorisera och inte är faktor i något polynom  $d^k + 1$  för  $k < 2^{n-1}$ . Ett sådant polynom av grad 6 är  $d^6 + d + 1$ .  $d^k$  är en operator, som betyder, att man skall ta ut signalens värde  $k$  steg tillbaka och  $\oplus$  betecknar addition modulo 2.  $(d^6 \oplus d \oplus 1)u = 0$  kan nu användas för att generera signalen. Signalen vid tiden  $t$  är nämligen  $lu$  och alltså  $u = (d^6 \oplus d)u$  d.v.s. summan modulo 2 av signalen och 6 tidsenheter tillbaka. En serie genereras nu genom att starta med en godtycklig sekvens av längd  $n$ . Välj t.ex. 000001. Nästa värde blir  $1 \oplus 0 = 1$ , nästa igen 1 o.s.v..

Polynom med egenskaperna enligt ovan finns i Peterson: Errorcorrecting Codes. Referens 5.

Ex.

$$n = 6 \quad d^6 + d + 1$$

$$n = 7 \quad d^7 + d^3 + 1$$

$$n = 8 \quad d^8 + d^4 + d^3 + d^2 + 1$$

I den följd av ettor och nollor, som nu genererats byter man sedan ut nollorna mot minus ett, varefter man har en serie med de önskade egenskaper-na. Serierna blir av längden  $2^n - 1$  varefter en identisk upprepning följer.

I praktiken kan man nu i allmänhet inte avpassa mätningens längd, så att man kan använda en hel serie. Man kan också få svårigheter med att hålla processvariablerna inom tillåtna gränser om man inte ändrar nivån på sin|signal. Men man har ju i alla fall ett enkelt sätt att generera en icke-periodisk signal.

När man skall välja samplingsintervallets längd måste man å ena sidan ha det så kort att tillräckligt höga frekvenser blir tillfredsställande representerade ur energisynpunkt. Blir samplingsintervallet å andra sidan för kort, hinner systemet inte göra några utslag, som kan urskiljas från störningarna. Samplingsintervall användes här som beteckning på det kortaste intervallet mellan två förändringar i styrsignalen. In-och utsignal kan naturligtvis avläsas med kortare intervall.

De tidigare mätningarna på stegsvar visar, att det finns tidskonstanter av storleksordningen 5 minuter. Samplingsintervallets längd valdes därför till 3 minuter. Man bör också beakta att den diffusa tidsfördröjningen gör det nödvändigt att välja ett tillräckligt långt samplingsintervall.

### 6.1.A. Mätserie 1 matning - differenstemperatur

Ofullkomligheterna i denna mätserie var alltså dels de överslängar, som uppkom på grund av derivataverkan i mätförstärkaren, dels topparna på grund av variationer i matningstrycket till den.

Data avlästes ur skrivarregistreringen med ett intervall, som svarar mot 1/4 minut. Alla överslängar av kort varaktighet slätades ut. Diagram 7 visar exempel på skrivarregistreringen av in-och utsignal. Diagram 9 visar variationen av vakuum och ångtryck. De avlästa in-och utsignalvärdena har dessutom plottats med hjälp av datamaskin i diagram 15. Mätserien omfattade ungefär  $2\frac{1}{2}$  timme. Utsignalen förstärktes 16 ggr.

Processtorheterna hade följande medelvärden uttryckta i procent av fullt skrivarutslag under mätningen

differenstemperatur	28%
inmatning	45%
ångtryck	53%
vakuum	63%

### 6.B. Datamaskinberäkningar på mätserie 1

In-och utsignalvärden stansades upp på hålkort i tidsföljd insignal 1, utsignal 1, insignal 2 o.s.v.. Båda stansades med tre siffror plus tecken, vilket vad insignalen beträffar var en siffra mer än vad som kunde avläsas på skrivarremsan.

Den första uppgiften var nu att bestämma fördröjningen  $k$ . Detta gjordes på det sätt som beskrives i 5.A. Till hjälp kan också vara att vid fel fördröjning uppfattas insignalen som brus och följaktligen blir  $b$ -koefficienterna små. Det visade sig nödvändigt att testa alla fördröjningar mellan 0 och 15 minuter.

För att spara räknetid och kostnad användes endast vart fjärde datapar vid dessa körningar. Det administrationsprogram, som användes, plockade alltså ut vart fjärde datapar och reducerade dessutom insignal- och utsignalserierna, så att de fick medelvärdet noll, vilket är nödvändigt för att beräkningsprogrammen skall fungera bra.

Variationen av förlustfunktionen för olika  $k$  med  $n = 1$

$k$	$V$	$k$	$V$
0	113 331	10	97 554
3	98 556	11	97 376
4	92 556	12	95 225
5	92 149	13	90 893
6	94 325	14	94 405
7	95 013	15	99 650
8	96 796	16	148 576
9	97 400	18	159 029
		20	156 499

Värdena för  $k = 3, 8, 16, 18, 20$  gäller med viss reservation eftersom det här förelåg konvergenssvårigheter vid beräkningen. Man finner alltså två minima, ett för  $k = 5$  och ett för  $k = 13$ .

Beräkningar gjordes nu för  $k=5$  med  $n=2$  varvid erhöles  $V=84\ 144$ .

Detta innebär, att man fått en signifikant sänkning i förlustfunktionen enligt 5.A. Övergång till 3:e ordningen ger inte någon signifikant sänkning av  $V$ . Modellen blir då

$$y(t) = \frac{(0.042z^{-1} - 0.011z^{-2})z^{-5}}{1 - 0.690z^{-1} - 0.265z^{-2}} u(t) + \frac{1 + 0.48z^{-1} + 0.34z^{-2}}{1 - 0.690z^{-1} - 0.265z^{-2}} e(t)$$

$$y(t) = \frac{0.042z^{-1}(1 - 0.26z^{-1})z^{-5}}{(1 - 0.97z^{-1})(1 + 0.28z^{-1})} u(t)$$

C-polynomet har komplexa rötter

Resultatet är emellertid inte intressant i så måtto att det inte direkt ger underlag för bestämning av en styrlag. Den verkliga förändringen av koncentrationen skall nämligen ha negativt tecken eftersom ju en ökning av inmatningen måste ge en minskning av koncentrationen.<sup>x</sup> Konsekvenserna av detta mätfel vid bestämningen av en korrektare systemmodell och diskussion av eventuella förklaringar till det kommer att göras när mera sifferunderlag föreligger.

Den riktiga fördröjningen bör alltså vara omkring 13 minuter. Förlustfunktionen för olika  $n$  och  $k$  blir

$k$	$n=1$	$n=2$
10	97 554	88 464
11	97 376	86 833
12	95 225	89 182
13	90 893	86 923
14	94 405	(107 929)

Här är ingen signifikant sänkning i förlustfunktionen vid övergång till 2:a ordningens system.

<sup>x</sup>) Slutvärdet av ettstegsvar fås genom att sätta  $z=1$ .



Koefficienterna för  $n = 1$  är

$$a = -1.005$$

$$b = -0.036$$

$$c = 0.114$$

$z \cdot A(z^{-1})$  har alltså en rot, som är större än 1. Detta betyder ett instabilt system. Eftersom det verkliga systemet är stabilt indikerar detta, att det föreligger för stora fel i indata till beräkningsprogrammet, och samtidigt att A-polynomet har en rot nära 1. En rot nära 1 ett ger upphov till beräkningssvårigheter. Det vore därför önskvärt att på något sätt eliminera inverkan av denna rot. Man skulle på så sätt kunna få en bättre bild av hur systemet ser ut.

Betrakta ett system, där nämnaren i  $\frac{B}{A}$  är skild från nämnaren i  $\frac{C}{A}$ .

Faktorn  $(1 - z^{-1})$  kan nu komma in på något av följande sätt

1.  $\frac{B}{A}$  innehåller faktorn i nämnaren, och den kan inte förkortas bort.

Det betyder att det finns en integration i överföringsfunktionen från styrsignal till utsignal. Ur fysikalisk synpunkt vore en integration svår att förklara. Man får därför tänka sig en stor tidskonstant, som man approximerar med en ren integration.

2. Motsvarande gäller i stället för  $\frac{C}{A}$ . Detta betyder då att man har drift i systemet på grund av en mycket långsam komponent i störningarna.

3. Både 1 och 2 är samtidigt uppfyllda.

Man observerar nu att  $(1 - z^{-1})y(t) = y(t) - y(t - 1) = \Delta y(t)$ . Antag nu att det verkliga systemet är

$$1. y(t) = \frac{B}{A(1-z^{-1})}u(t) + \frac{C}{A}e(t)$$

$$\Delta y(t) = \frac{B}{A}u(t) + \frac{C(1-z^{-1})}{A}e(t)$$

Man har nu eliminerat  $(1 - z^{-1})$  och systemet är på den form, som användes vid beräkningen.

$$2. y(t) = \frac{B}{A}u(t) + \frac{C}{A(1-z^{-1})}e(t)$$

$$\Delta y(t) = \frac{B}{A}\Delta u(t) + \frac{C}{A}e(t)$$

$$3. y(t) = \frac{B}{A(1-z^{-1})}u(t) + \frac{C}{A(1-z^{-1})}e(t)$$

$$\Delta y(t) = \frac{B}{A}u(t) + \frac{C}{A}e(t)$$

Värdena på förlustfunktionen blev

a. differens i utsignalen

k	1:a	2:a
11	89 650	82 839
12	90 455	90 827
13	84 001	80 887
14	88 000	

b. differens i in-och utsignal

11	93 093	
12	97 285	93 675
13	89 730	84 898
14	94 124	90 503

Man får ingenstans en signifikant sänkning i förlustfunktionen vid övergång till 2:a ordningen.

a. ger de lägsta förlustfunktionerna

b. ger en b-koefficient, som är mycket liten och dessutom med mycket stor standardavvikelse.

Den riktiga modellen är alltså enligt 1 eller 3 enligt ovan. Man får en signifikant förbättring av förlustfunktionen om man betraktar detta

nya system som ett andra ordningens system med faktorn  $(1 - z^{-1})$

insatt i efterhand och jämför med det tidigare erhållna systemet av

första ordningen. Eftersom C-polynomet inte innehåller faktorn  $(1 - z^{-1})$

vare sig i 1:a eller 2:a ordningens modell med differenser måste den

riktiga modellen vara enligt 3 ovan.

$k = 13$

2:a ordningen direkt beräkning

$V = 84\ 898$	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$
värde	-1.652	0.648	-0.023	-0.004	-0.571	-0.107
standard- avvikelse	0.137	0.137	0.017	0.020	0.164	0.080

Rötter till A-polynomet är 1.01  
0.69

1:a ordningen med differens i utsignalen

$V = 84\ 001$	$a$	$b$
värde	-0.643	-0.024
standard- avvikelse	0.128	0.008

Pröva nu en modell där integrationen ersatts med en stor tidskonstant.

För fördröjningar skilda från 13 minuter har A-polynomet nästan genomgående en rot 0.993. Pröva därför med denna. Modellen blir

$$y(t) = \frac{-0.024z^{-1} \cdot z^{-13}}{(1-0.993z^{-1})(1-0.643z^{-1})} u(t) + \frac{1 - 0.596z^{-1}}{(1-0.993z^{-1})(1-0.643z^{-1})} e(t)$$

Motsvarande kontinuerliga system blir (in-utsignalsamband)

$$G(s) = e^{-13s} \left( -\frac{0.068}{s+0.007} + \frac{0.055}{s+0.438} \right)$$

Uttryckt i procentuella utslag på de i processen installerade skrivarna

blir modellen

$$G(s) = \frac{-0.008s - 0.019}{s^2 + 0.145s + 0.003} e^{-13s}$$

Tidsenheten är 1 minut. Denna modell kan på sin höjd tjäna som underlag vid uppläggandet av en ny mätserie och eventuellt bekräfta det resultat, som denna ger.

Det fullständiga resultatet för  $k = 13$  med differenser i utsignalen och alltså faktorn  $(1 - z^{-1})$  insatt i efterhand blev

LOSS FUNCTION = 8.40011300+004  
 STANDARD DEVIATION OF ERRORS= 3.39219753+001

GRAD V  
 2.0265579-006 0.0000000+000 -1.1920929-007

EXACT SECOND DERIVATES  
 3.8770988+005 1.5213033+006 -2.1097410+005  
 1.5213033+006 2.9608997+007 -4.7252159+005  
 -2.1097410+005 -4.7252159+005 1.5291086+005

INVERS  
 1.4331705-005 -4.4262434-007 1.8405945-005  
 -4.4262434-007 4.9195598-008 -4.5867434-007  
 1.8405945-005 -4.5867434-007 3.0517414-005  
 V2COND.= 2.71077009+003

NEW COEFF.  
 -6.4260282-001 -2.4161958-002 -5.9592254-001  
 STANDARD DEVIATION OF COEFF.  
 1.2841923-001 7.5239215-003 1.8739371-001

MAX.COEFF.CORR. IS LESS THAN 1.00000000-008

Observera den stora standardavvikelsen vid bestämningen av koefficienterna.  
 Jämför också den relativa inverkan och störningarna och styrsignalen.  
 Förhållandet blir ungefär 2.5:1.

### 6.2.A. Mätserie 2 matning - differensstemperatur

Mätserie 1 gav alltså inte tillräckligt bra resultat. I mätserie 2 har derivationen i regulatorn för signalförstärkning eliminerats liksom matningstryckets variation i den mån detta var möjligt.

Av resultaten i mätserie 1 framgick, att det borde räcka med avläsningar var halva minut. Mättiden har ökats till 4 timmar. Exempel på utsignalregistreringen finns i diagram 10. Ångtryck och vakuum under mätningen finns registrerade i diagram 11. Avläsningarna från skrivarremsan har plottats i diagram 16.

De olika processtorheternas medelvärde under mätningen var uttryckta i procent av fullt skrivarutslag

differensstemperatur	28%
inmatning	45%
ångtryck	53%
vakuum	63%

6.2.B. Beräkningar på mätserie 2

Det visade sig att man med dessa mätvärden inte fick någon rot till A-polynomet i farlig närhet av 1. Det var alltså inte nödvändigt att bilda differenser av utsignalen.

De första beräkningarna för bestämning av fördröjningen gjordes med samplingsintervallet 1 minut. Resultatet blev

k	n = 1	n = 2
11	107 667	94 447
12	109 947	99 107
13	113 581	101 661

Sänkningen i förlustfunktionen vid övergång till 2:a ordningens system är signifikant. Resten av beräkningarna gjordes därför med  $n = 2$  direkt. Dessa beräkningar gjordes med samplingsintervallet en halv minut d.v.s. alla data användes.

k	
20	85 682
21	84 938
22	84 839
23	85 389

$k = 22$  och  $n = 3$  gav  $V = 84 744$  och ingen signifikant förbättring.

Det fullständiga resultatet såsom det ges av beräkningsprogrammet är

Förlustfunktionen  $V = 84 838.6884$

Felens standardavvikelse 20885 129 4

grad V

-0.0076 -0.0085 -0.0321 0.0216 -0.3150 -0.3504

Koefficienterna

$a_1 = -1.919 756 5$      $b_1 = 0.007 962 654 2$      $c_1 = -0.833 050 70$   
 $a_2 = 0.921 231 04$      $b_2 = -0.011 273 61$      $c_2 = -0.000 139 980 52$

Koefficienternas standardavvikelse

$a_1$  0.034 808 433     $b_1$  0.005 985 838 5     $c_1$  0.062 339 806  
 $a_2$  0.034 733 105     $b_2$  0.006 100 976 3     $c_2$  0.052 784 59

$V_{\infty}^{-1}$  har följande utseende

```

INVERS
2.7777592-006 -2.7709621-006 1.0992235-007 -1.4405648-007 2.7448526-006 7.0431539-007
-2.7709621-006 2.7657498-006 -1.0941914-007 1.4348561-007 -2.7388281-006 -6.9163715-007
1.0992235-007 -1.0941914-007 8.2143962-008 -8.1753606-008 1.0795332-007 3.1188973-008
-1.4405648-007 1.4348561-007 -8.1753606-008 8.5334439-008 -1.4211511-007 -3.9439341-008
2.7448526-006 -2.7388281-006 1.0795332-007 -1.4211511-007 8.9095661-006 -4.5720352-006
7.0431539-007 6.9183715-007 3.1188973-008 -3.9439341-008 -4.5720352-006 6.3876347-006
V2COND.= 3. 8034557+004

```

Beräkningar gjordes dessutom med fördröjningar kring 5 minuter. Följande värden erhöles på förlustfunktionen för olika fördröjningar och ordningstal.

k	n = 1	n = 2
7		83 213
8		84 100
9	89 579	84 891
10	90 996	86 251
11	91 821	87 282

Man finner en signifikant sänkning i förlustfunktionen vid övergång till andra ordningens system. Några beräkningar med tredje ordningens system har inte gjorts då den modell, som erhålles ändå endast är av sekundärt intresse. Tiden tillät inte heller beräkningar med fördröjningar mindre än  $3\frac{1}{2}$  minut. Resultaten från mätserie 1 gör det dock troligt att minimumet ligger i närheten av  $3\frac{1}{2}$  minut. Det intressanta är att ett sådant minimum existerar. Av intresse är också A-polynomets utseende, men beräkningen av detta är inte så känsligt för att man inte hittat absolut rätt fördröjning.

Modellens utseende reducerat till procentuella ändringar i processtorheterna blir

$$y(t) = \frac{0.0045z^{-1} - 0.0035z^{-2}}{(1 - 0.963z^{-1})^2} z^{-7} u(t) + \frac{1 - 0.81z^{-1} - 0.0094z^{-2}}{(1 - 0.963z^{-1})^2} e(t)$$

Rötterna till A-polynommet är egentligen  $0.96315 \pm i0.017$ .



### 6.2.C. Övergång till Laplacetransformen.

Modellen blir alltså

$$(1 - 1.9198z^{-1} + 0.9212z^{-2})y(t) = (0.00796z^{-1} - 0.01127z^{-2})z^{-11}u(t) + (1 - 0.8331z^{-1} - 0.0001z^{-2})e(t).$$

Faktorera polynomen

$$y(t) = \frac{0.008z^{-1}(1 - 1.42z^{-1})z^{-11}}{(1 - 0.9740z^{-1})(1 - 0.9458z^{-1})} u(t) + \frac{1 - 0.833z^{-1}}{(1 - 0.9740z^{-1})(1 - 0.9458z^{-1})} e(t)$$

Betrakta nu bara in-utsignalberoendet. Partialbråksuppdelning ger

$$y(t) = \left( -\frac{0.126z^{-1}}{1 - 0.9740z^{-1}} + \frac{0.134z^{-1}}{1 - 0.9458z^{-1}} \right) z^{-11}u(t)$$

Om man har det kontinuerliga systemet

$$\frac{dy}{dt} = -\alpha y + \chi u$$

med konstant insignal så blir lösningen

$$y(t) = e^{-\alpha t} y(0) + \frac{\chi}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})u(0)$$

Betrakta nu ett intervall  $T$ , som skall bli samplingsintervallet och låt

begynnelse ögonblicket vara  $t-T$

$$y(t) = e^{-\alpha T} y(t-T) + \frac{\chi}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T})u(t-T)$$

eller

$$y(t) = \frac{\chi(1 - e^{-\alpha T})z^{-1}}{1 - e^{-\alpha T}z^{-1}} u(t)$$

Identifiering av koefficienter ger då

$$G(s) = \left( -\frac{0.255}{s + 0.0529} + \frac{0.276}{s + 0.112} \right) e^{-11s}$$

Med in-och utsignalen angivna som procentutslag på processinstrumenten

$$G(s) = \left( -\frac{0.196}{s + 0.0529} + \frac{0.213}{s + 0.112} \right) e^{-11s}$$

Under mätningen var medelvärdet av

inmatningen 45% av fullt skrivarutslag

ångtrycket 53% " " "

vakuomet 63% " " "

### 6.2.D. Bestämning av koefficientnoggrannheten i $G(s)$

Värdena på koefficienterna och standardavvikelserna i dessa liksom kovariansmatrisen för frekvensfunktionen till koefficienterna är kända.

Härur skall koefficientnoggrannheten bestämmas i

$$G(s) = \frac{B_1 s + B_2}{s^2 + A_1 s + A_2}$$

Låt rötterna till  $z^2 A(z^{-1})$  vara  $r_1$  och  $r_2$ .

$$\text{Man har } \alpha = -\frac{1}{T} \ln r = -\frac{1}{T} \ln(1 + (-1 + r)).$$

Om  $1 - r_1$  litet så får man genom serieutveckling

$$\alpha = \frac{1}{T}(1 - r)$$

Partialbråksuppdelning nu

$$H(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{(1 - r_1 z^{-1})(1 - r_2 z^{-1})} = \frac{b'_1 z^{-1}}{1 - r_1 z^{-1}} + \frac{b'_2 z^{-1}}{1 - r_2 z^{-1}}$$

$$b'_1 + b'_2 = b_1$$

$$r_2 b'_1 + r_1 b'_2 = -b_2$$

$$G(s) = \frac{b'_1 \frac{\alpha_1}{1 - e^{-\alpha_1 T}}}{s + \frac{1}{T}(1 - r_1)} + \frac{b'_2 \frac{\alpha_2}{1 - e^{-\alpha_2 T}}}{s + \frac{1}{T}(1 - r_2)}$$

Serieutveckling av  $e^{-\alpha T} = 1 - \alpha T$  ger

$$G(s) = \frac{\frac{1}{T} b'_1 s + \frac{1}{T} b'_1 (1 - r_2) + \frac{1}{T} b'_2 s + \frac{1}{T} b'_2 (1 - r_1)}{s^2 + \frac{1}{T}(2 - r_1 - r_2)s + \frac{1}{T}(1 - r_1 - r_2 + r_1 r_2)}$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{T} b_1 s + \frac{1}{T} 2(b_1 + b_2)}{s^2 + \frac{1}{T}(2 - r_1 - r_2)s + \frac{1}{T}(1 - r_1 - r_2 + r_1 r_2)}$$

Men  $r_1$  och  $r_2$  är rötter till A-polynommet d.v.s.

$$r_1 + r_2 = -a_1$$

$$r_1 r_2 = a_2$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{T} b_1 s + \frac{1}{T} 2(b_1 + b_2)}{s^2 + \frac{1}{T}(2 + a_1)s + \frac{1}{T} 2(1 + a_1 + a_2)}$$

För att bestämma standardavvikelsen för  $a_1 + a_2$  och  $b_1 + b_2$  utnyttjas att

$\mathbf{V}_{\theta e}^{-1}$  är kovariansmatrisen för den mångdimensionella stokastiska variabeln

$(a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2)$  Av intresse här är delmatrisen för  $a_1, a_2$  (se sid 27).

$$R = \begin{vmatrix} 2.778 & -2.771 \\ -2.771 & 2.766 \end{vmatrix} \cdot 10^{-6}$$

För  $(a_1, a_2)$  gäller då frekvensfunktionen

$$f_{a_1, a_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \det R} \exp\left(-\frac{1}{2}(x_1 - m_1, x_2 - m_2)^T R^{-1} (x_1 - m_1, x_2 - m_2)\right)$$

Gör nu transformationen  $y = Tx$ .

Den nya  $R^{-1}$  blir då  $R_1^{-1} = TR^{-1}T^{-1}$  och man får  $f_{a_1+a_2, -a_1+a_2}(y_1, y_2)$   
om  $T = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}$ .

Den nya kovariansmatrisen är  $R_1 = (TR^{-1}T^{-1})^{-1} = TRT^{-1}$ .

Diagonalelementen ger då standardavvikelseerna som  $\sigma\sqrt{v_{11}}$  och  $\sigma\sqrt{v_{22}}$  enligt sid 14.

Standardavvikelseerna i  $A_1$  och  $A_2$  blir 0.07 resp. 0.002. Intressant är att egenvektorn  $(1.02, 1)$  till  $R_1$  ger det minsta egenvärdet.  $a_1+a_2$  är alltså nästan den lineärkombination av  $a_1$  och  $a_2$ , som ger minsta standardavvikelsen.

På samma sätt fås standardavvikelsen hos  $B_1$  och  $B_2$  som 0.012 och 0.004.

Även här är  $b_1+b_2$  den lineärkombination av  $b_1$  och  $b_2$ , som har minsta standardavvikelsen.

Resultatet av mätningen nr 2 av relationen inmatning-differenstemperatur blir alltså

$$G(s) = \frac{0.021s - 0.0139}{s^2 + 0.164s + 0.0055} e^{-11s}$$

eller med angivande av standardavvikelseerna

$$G(s) = \frac{B_1 s + B_2}{s^2 + A_1 s + A_2} e^{-11s}$$

$$B_1 = 0.021 \pm 0.012$$

$$B_2 = -0.0139 \pm 0.004$$

$$A_1 = 0.164 \pm 0.07$$

$$A_2 = 0.0055 \pm 0.002$$

Ett konfidensintervall för koefficienterna på 10%-nivån och med antagande om t-fördelning erhålles som

$$(m - 1.64\sigma, m + 1.64\sigma)$$

Man kan alltså med 10% felsannolikhet säga att en koefficients värde ligger i detta intervall.

Om man iakttar, att mätförstärkaren förstärkte 13 ggr under denna mätning och att skrivarens procentuella utslag multiplicerades med en faktor 100 när det gäller styrsignalen och en faktor 10 när det gäller utsignalen får man en överföringsfunktion, som opererar på procentuella ändringar i processtorheterna och med tidsenheten minuter

$$G(s) = \frac{0.016s - 0.0107}{s^2 + 0.16s + 0.0055} e^{-11s}$$

Om insignalen  $u = 250$  (den använda) och störningarna  $e = 20.9$  (den erhållna standardavvikelsen) fås en jämförelse av inverkan av var och en av dessa

$$\text{som } \left| \frac{(b_1 + b_2) 250}{(1 + e_1 + e_2) 20.9} \right| = 0.2$$

Ett önskvärt förhållande vore 1:1. För att uppnå detta skulle man styra med 5 ggr större amplitud eller förlänga mättiden med en faktor 25 d.v.s. reducera standardavvikelsen med en faktor  $1/\sqrt{25}$ . Detta senare endast under förutsättning att man inte har några parametervariationer.

### 6.3.A. Mätserie 3 matning - differensstemperatur

I ett försök att minska felens och koefficienternas standardavvikelse gjordes en tredje mätserie. Då det var ogörligt att enbart öka styrsignalens amplitud 5 ggr eller enbart öka mättiden 25 ggr vidtogs en kombination av dessa åtgärder på så sätt att styrsignalens amplitud ökades 2.5 ggr och mättiden ökades 3 ggr till 12 timmar. Avläsningar gjordes liksom tidigare var halva minut. Däremot ändrades styrsignalen så att det kortaste intervallet mellan två styringrepp ökades till 5 minuter. Exempel på vakuumregistreringen under mätningen finns i diagram 12. Observera de stora vakuumvariationerna i jämförelse med under mätserie 2.

Processtorheterna hade följande medelvärden uttryckta i procent av fullt skrivarutslag under mätningen

differensstemperatur	28%
inmatning	45%
ångtryck	62.5%
vakuum	65%

### 6.3.B. Beräkningar på mätserie 3

Vid jämförelse av resultaten från denna mätserie med mätserie 2 måste iakttas att förstärkningen var reducerad till 8 ggr och styrsignalen multiplicerades bara med faktorn 10 vid avläsningen från skrivarremsan.

Om man jämför med resultaten från mätserie 2 skulle sålunda den nu erhållna standardavvikelsen hos felens vara 13 utan att hänsyn tagits till mättidens förlängning. Samplingstiden är en halv minut.

Värdena på förlustfunktionen för olika  $n$  och  $k$  blir

$k$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
21	438 134	432 908	
22	437 445	430 767	422 599
23	435 651	430 607	428 425
24			423 036

Sänkningarna införlustfunktionen är signifikanta till och med tredje ordningens system. Beräkningar har inte gjorts för högre ordningstal och ej heller för fler fördröjningar med tredje ordningens system på grund av tidsbrist. För jämförelse med mätserie 2 bör det också räcka med beräkningar med fördröjningen 11 minuter. Detta senare eftersom inmatningens medelvärde under de båda mätserierna var lika. Resultatet för  $k = 22$

Förlustfunktionen 422 588,8

Felens standardavvikelse 25,31

Koefficienter

$a_1 = -2.380$	$b_1 = 0.0462$	$c_1 = -1.071$
$a_2 = 1.966$	$b_2 = -0.115$	$c_2 = 0.216$
$a_3 = -0.584$	$b_3 = 0.621$	$c_3 = 0.0577$

Koefficienternas standardavvikelse

$a_1$	0.102	$b_1$	0.0254	$c_1$	0.106
$a_2$	0.185	$b_2$	0.0485	$c_2$	0.0732
$a_3$	0.0892	$b_3$	0.0262	$c_3$	0.0466

Rötterna till A-polynomet är

0.9763

0.7018+i0.322

0.7018-i0.322

Polynomen innehåller inte några gemensamma faktorer. Modellen blir då med processparameterna uttryckta i procentuella ändringar på skrivarna

$$y(t) = \left( -\frac{0.0049z^{-1}}{1-0.976z^{-1}} + \frac{0.0106z^{-1}-0.0109z^{-2}}{1-1.404z^{-1}+0.596z^{-2}} \right) e^{-22s} u(t) + \frac{1-1.07z^{-1}+0.216z^{-2}+0.058z^{-3}}{(1-0.976z^{-1})(1-1.404z^{-1}+0.596z^{-2})} e(t)$$

Man har alltså större standardavvikelse hos felen än i mätserie två. Modellen, som beräknats företer också stora avvikelser från tidigare resultat även om en term med nämnaren  $(1-0.97z^{-1})$  och negativt tecken återkommer. Dessa förhållandes samband med de stora vakuumvariationerna kommer att diskuteras i avsnitt 8.

7.A. Mätserie ångtryck - differensstemperatur

Utsignalen mättes på samma sätt som tidigare. Den intressanta instorheten var ångtrycket. Svårigheten var att ångtrycket ställde in sig långsamt efter att vid en ändring först ganska snabbt ha närmat sig det nya värdet. Under samplingsintervallet var emellertid ångtrycket ganska konstant. Ångtrycket approximerades därför med en konstant under samplingsintervallet.

Styrsignalens amplitud var ungefär 5 % ändring av ångtrycket. Mättiden var 4 timmar med det kortaste intervallet mellan ändringar på ångtrycksventilen 3 minuter. Med sampling av in- och utsignalen var halva minut erhöles 480 datapar. Diagram 13 visar exempel på in-och utsignalens utseende under mätningen. Diagram 14 visar vakuomet och inmatningen under mätningen. Mätpunkterna avlästa från skrivarremsan finns också plottade i diagram 17.

De olika processtorheternas medelvärde under mätningen var

inmatning	41 %
ångtryck	50 %
vakuum	62.5 %

av fullt skrivarutslag.



7.B. Beräkningar på ångtrycksmätserien

Beräkningar med olika fördröjningar och ordningstal gav följande resultat

k	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
20			797 642	797 354
21	848 437	821 108	793 287	780 295
22	848 304	824 019	816 087	

Ökning av systemordningen ger statistiskt signifikanta sänkningar i förlustfunktionen till och med tredje ordningen. Vid övergång till fjärde ordningen ligger man precis på gränsen till en signifikant sänkning. Systemet identifieras alltså som ett tredje ordningens system, med fördröjningen  $10\frac{1}{2}$  minut.

Vid mätningen förstärktes utsignalen 13 ggr. Vid avläsningen multiplicerades dessutom insignalregistreringens procentvärde med 100 och utsignalregistreringens med 10. Resultatet av beräkningar på dessa siffror blev när samplingsintervallet var en halv minut

Förlustfunktion 793 286.6

Felens standardavvikelse 59.845

Koefficienter

$$\begin{array}{lll} a_1 = -2.723 & b_1 = 0.0363 & c_1 = -1.546 \\ a_2 = 2.488 & b_2 = -0.0613 & c_2 = 0.209 \\ a_3 = -0.761 & b_3 = 0.0274 & c_3 = 0.381 \end{array}$$

Standardavvikelse hos koefficienterna

$$\begin{array}{lll} a_1 & 0.100 & b_1 & 0.0161 & c_1 & 0.0989 \\ a_2 & 0.186 & b_2 & 0.0331 & c_2 & 0.131 \\ a_3 & 0.0979 & b_3 & 0.0174 & c_3 & 0.051 \end{array}$$

$\sqrt{\sigma^2}$  är given bland diagrammen.

In-utsignalsambandet i den samplade modellen blir alltså

$$y(t) = \frac{0.036z^{-1} - 0.061z^{-2} + 0.027z^{-3}}{1 - 2.723z^{-1} + 2.488z^{-2} - 0.761z^{-3}} z^{-21} u(t)$$

Rötterna till A-polynomet är

0.8597

0.9315 + i0.1342

0.9315 - i0.1342

Partialbråsuppdelning ger

$$H(z^{-1}) = 0.047 \frac{z^{-1}}{1-0.86z^{-1}} - 0.011 \frac{z^{-1}-0.93z^{-2}}{(1-0.93z^{-1})^2+0.13^2z^{-2}} + 0.007 \frac{z^{-2}}{(1-0.93z^{-1})^2+0.13^2z^{-2}}$$

För övergång till en motsvarande Laplacetransform användes på den första termen samma metod som tidigare. På de två andra tillämpas metoden generaliserad till komplexa tal.

Betrakta

$$H(z^{-1}) = \frac{z^{-1}-az^{-2}}{(1-az^{-1})^2+b^2z^{-2}} = \frac{1}{2} \left( \frac{z^{-1}}{1-az^{-1}+ibz^{-1}} + \frac{z^{-1}}{1-az^{-1}-ibz^{-1}} \right)$$

$$e^{-(\alpha-i\omega)T} = a+ib$$

$$e^{-\alpha T} e^{i\omega T} = \sqrt{a^2+b^2} e^{i \arctan \frac{b}{a}}$$

$$\alpha = \frac{1}{T} \log \sqrt{\frac{1}{a^2+b^2}} \quad \alpha \text{ dämpningskonstant}$$

$$\omega = \frac{1}{T} \arctan \frac{b}{a} \quad \omega \text{ vinkelfrekvens}$$

$$\frac{\gamma+i\delta}{\alpha+i\omega} (1-e^{-(\alpha+i\omega)T}) = 1$$

$$\gamma+i\delta = \frac{\alpha+i\omega}{1-a+ib}$$

Överföringsfunktionen uttryckt som Laplacetransform blir då för denna del

$$G(s) = \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma+i\delta}{s+\alpha+i\omega} + \frac{\gamma-i\delta}{s+\alpha-i\omega} \right) = \frac{\gamma+s(\alpha+\omega)\delta}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$$

Om i stället

$$H(z^{-1}) = \frac{z^{-2}}{(1-az^{-1})^2+b^2z^{-2}} = \frac{1}{2b} \left( \frac{z^{-1}}{1-az^{-1}+ibz^{-1}} + \frac{z^{-1}}{1-az^{-1}-ibz^{-1}} \right)$$

så fås  $\gamma$  och  $\delta$  ur

$$\gamma+i\delta = \frac{\alpha+i\omega}{1-a+ib} \cdot \frac{i}{b}$$

I detta fall blir då

$$G(s) = \left( 0.047 \frac{2.17}{s+0.304} - 0.011 \frac{1.82s+0.27}{(s+0.046)^2+0.29^2} + 0.007 \frac{-4.9s+3.78}{(s+0.046)^2+0.29^2} \right) e^{-10.5s}$$

Uttryckt i procentuella utslag på processinstrumenten blir modellen alltså.

$$G(s) = \frac{0.035s^2 + 0.015s + 0.014}{s^3 + 0.40s^2 + 0.11s + 0.026} e^{-10.5s}$$

### 7.C. Bestämning av koeficientnoggrannheten i G(s)

En överläggning liknande den, som gjordes vid inmatning-differenstemperatur

ger en första approximation av G(s) som

$$G(s) = \frac{\frac{1}{T}b_1s^2 + \frac{1}{T^2}(2b_1+b_2)s + \frac{1}{T^3}(b_1+b_2+b_3)}{s^3 + \frac{1}{T}(3+a_1)s^2 + \frac{1}{T^2}(3+2a_1+a_2)s + \frac{1}{T^3}(1+a_1+a_2+a_3)} e^{-10.5s}$$

Man får standardavvikelsen i

$a_1$	0.10
$2a_1+a_2$	0.0060
$a_1+a_2+a_3$	0.0084
$b_1$	0.016
$2b_1+b_2$	0.015
$b_1+b_2+b_3$	0.0025

Även här får man sådana lineärkombinationer av de primärt bestämda

koeficienterna att den här angivna formen på överföringsfunktionen är

den, som har de minsta standardavvikelserna i sina koeficienter. I

$$G(s) = \frac{B_1s^2+B_2s+B_3}{s^3+A_1s^2+A_2s+A_3} e^{-10.5s}$$

blir då koeficienterna och deras standardavvikelser om ut-och insignalen

anges som procentuella utslag på processinstrumenten

$$B_1 = 0.035 \pm 0.025$$

$$B_2 = 0.015 \pm 0.0046$$

$$B_3 = 0.014 \pm 0.015$$

$$A_1 = 0.40 \pm 0.10$$

$$A_2 = 0.11 \pm 0.024$$

$$A_3 = 0.026 \pm 0.070$$

### 8. Sammanfattning av resultaten av mätningarna

Den första punkten av intresse är att man får en ändring i utsignalen, som deterministiskt beror av insignalen med någon minutsfördröjning. Tecknet på ändringen visar emellertid, att det inte kan vara någon ändring i koncentrationen. Detta pekar på att mätningen av koncentrationen inte ger ett riktigt värde vid ändringar i inmatningen. Att det bara är ändringar, som åstadkommer mätfelet framgår av att ytterligare fördröjning ger ett mätutslag med rätt tecken.

En möjlig förklaring till fenomenet skulle nu vara följande. För att undvika att vakuumnivån, som ju påverkar TMP-lösningens kokpunkt så att sämre vakuum ger högre kokpunkt, skall påverka koncentrationsbestämningen har man infört en referenstemperatur, som bestäms av vattens kokpunkt vid det tryck, som råder vid bestämningen TMP-lösningens kokpunkt och mäter kokpunktsförhöjningen som en differens till denna. Problemet är nu att vid ändringar av vakuomet så ändrar sig referenstemperaturen snabbt på grund av att man har en liten mängd vatten för bestämning av den. TMP-lösningen däremot har stor massa och det tar relativt lång tid innan inte bara ytskiktet utan hela lösningsmängden har ändrat temperatur. Slutsatsen blir alltså att med hjälp av referenstemperaturen får man en korrekt mätning av koncentrationen vid stationärt tillstånd. I transient tillstånd blir mätningen emellertid felaktig.

Obanstående ger alltså en förklaring till ett mätfel, som uppstår vid variationer i vakuomet. Det återstår emellertid att finna en förklaring till att en ökning av inmatningen ger en förbättring av vakuomet, d.v.s. den i de två sista stegen avgivna ångmängden minskar.

I de störningar, som modellen tar hänsyn till vid fördröjningen mindre än 5 minuter ingår styrsignalens verkningar på den verkliga koncentrationen, som ju inte märks förrän efter ytterligare fördröjning. På samma sätt kommer vid den längre fördröjningen det, som vid den kortare var deterministiskt beroende av styrsignalen att hänföras till störningarna och på så sätt försämrade noggrannheten i koefficienterna. Till störningarna kommer också att räknas de felaktigheter, som uppkommer på grund av att ändringar i differenstemperaturen registreras stegvis. Detta fel kan uppskattas till 5-10 % av de totala felen.

Från upptagningarna av vakuumvariationerna under de olika mätserierna kan man se att vakuumregleringen i hög grad har ändrat sig mellan de olika mätningarna. Detta beror på att kylvattnet ändrat temperatur på grund av olika väderlek. De parametervariationer, som förekommer måste i stor utsträckning skyllas på detta fenomen.

När det gäller överföringsfunktionen, som beräknats vid omkring 11 minuters fördröjning, kan det först konstateras att under mätserie 2, som gav den minsta standardavvikelsen hos felen när parametrarna reducerats till samma skala gjordes när vakuumvariationerna under mätningen var minst.

På grund av att vakuumvariationen var så stor vid upptagandet av mätserie 3 och beräkningen av in-utsignalberoendet därigenom stördes kan inte någon större vikt läggas vid resultaten av dessa beräkningar. Eftersom samplingsintervallet var en halv minut liksom vid mätserie 2 kan dessa resultat direkt jämföras. Man återfinner då fördröjningen 11 minuter och en negativ term med nämnaren  $(1-0.975z^{-1})$ . Man bör alltså ha funnit den fundamentala tidskonstanten i induktansen. Tidskonstanten är 20 minuter.

Om man räknar om resultatet från mätserie 2, så att samplingsintervallet blir 1 minut kan mätserie 1 och 2 jämföras. Ändra dessutom antagandet om en faktor  $(1-0.993z^{-1})$  i mätserie 1:s A-polynom så att man får  $(1-0.97z^{-1})$  i stället. Detta är den faktor som fås vid fördröjningen 5 minuter.

mätserie 1

$$y(t) = \frac{-0.015z^{-2}z^{-12}}{(1-0.970z^{-1})(1-0.643z^{-1})} u(t) + \frac{1-0.596z^{-1}}{(1-0.970z^{-1})(1-0.643z^{-1})} e(t) =$$

$$= \left( -\frac{0.0466z^{-1}}{1-0.970z^{-1}} + \frac{0.0569z^{-1}}{1-0.643z^{-1}} \right) z^{-12} u(t) + \frac{1-0.596z^{-1}}{(1-0.970z^{-1})(1-0.643z^{-1})} e(t)$$

$$G(s) = \frac{0.103s-0.0189}{s^2+0.472s+0.0137} e^{-12s}$$

Mätserie 2

$$y(t) = \frac{(0.012z^{-1}-0.023z^{-2})z^{-11}}{(1-0.948z^{-1})(1-0.892z^{-1})} u(t) + \frac{1-0.60z^{-1}}{(1-0.948z^{-1})(1-0.892z^{-1})} e(t) =$$

$$= \left( -\frac{0.194z^{-1}}{1-0.948z^{-1}} + \frac{0.206z^{-1}}{1-0.892z^{-1}} \right) z^{-11} u(t) + \frac{1-0.60z^{-1}}{(1-0.948z^{-1})(1-0.892z^{-1})} e(t)$$

$$G(s) = \frac{0.016s-0.011}{s^2+0.16s+0.055} e^{-11s}$$

De båda modellerna har alltså samma principiella utseende med ett icke-minimumfasbeteende. Koefficienterna i Laplacetransformen för mätserie 1 ligger vad beträffar B-koefficienterna inom felgränserna, som angivits för mätserie 2. A-koefficienterna visar mindre överensstämmelse, men modellen är ju också byggd på ett antagande om den ena tidskonstantens storlek och på allmänt dåliga mätdata. Dessutom är det nog ganska klart att man även mellan dessa mätningar haft parametervariationer.

Resultatet av examensarbetet kan då i korthet sammanfattas så att indunstarens fundamentala tidskonstant fastställts till omkring 20 minuter. Vidare är fördröjningen mellan ett styringrepp och mätutslaget på koncentrationen omkring 11 minuter. Man har ett icke-minimumfasbeteende hos systemet. För att förbättra noggrannheten i mätningen av koncentrationen

måste vakuumvariationerna nedbringas och mätvärdesomvandlaren förbättras.

Vad beträffar styrning av koncentrationen med ångtrycksreglering råkar man här i ännu större svårigheter på grund av mätfelen.



## 9. Referenser

### 1. K.J. Åström

Samplade system

Föreläsningar vid LTH

### 2. K.J. Åström

Stokastiska system

Föreläsningar vid LTH

### 3. E. Andersson

Processidentifiering med datamaskin

Examensarbete i regleringsteknik

### 4. Jan-Olof Wintzell

Identifiering av processdynamik med korrelationsanalys då signalen

är en nollsekvens av maximal längd

Examensarbete i regleringsteknik

### 5. W.W. Peterson

Error Correcting Codes 1961

Massachusetts Inst. Technol.

Press and John Wiley & Sons , New York.

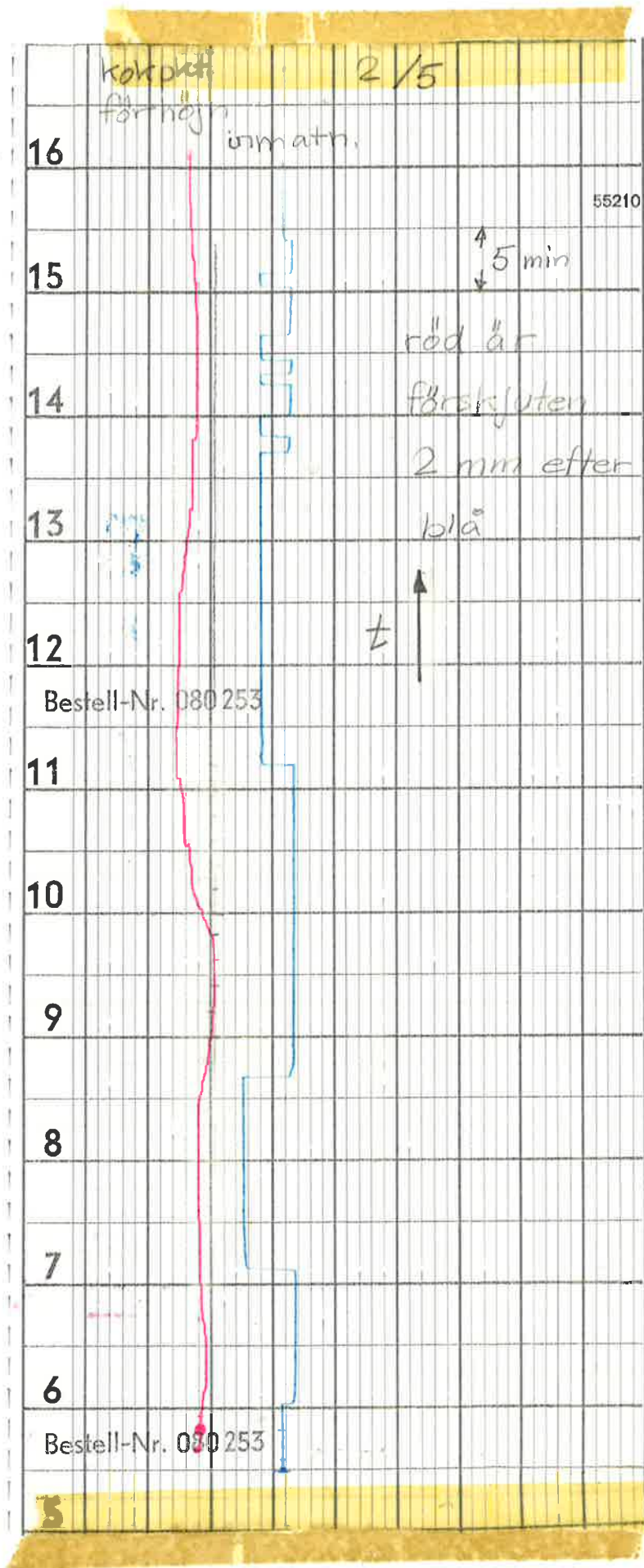


Diagram 1. Registrering av inmatning (blå)  
och differenstemperatur (röd)

ändring  
i  
differens-  
temperatur  
relativt  
mått

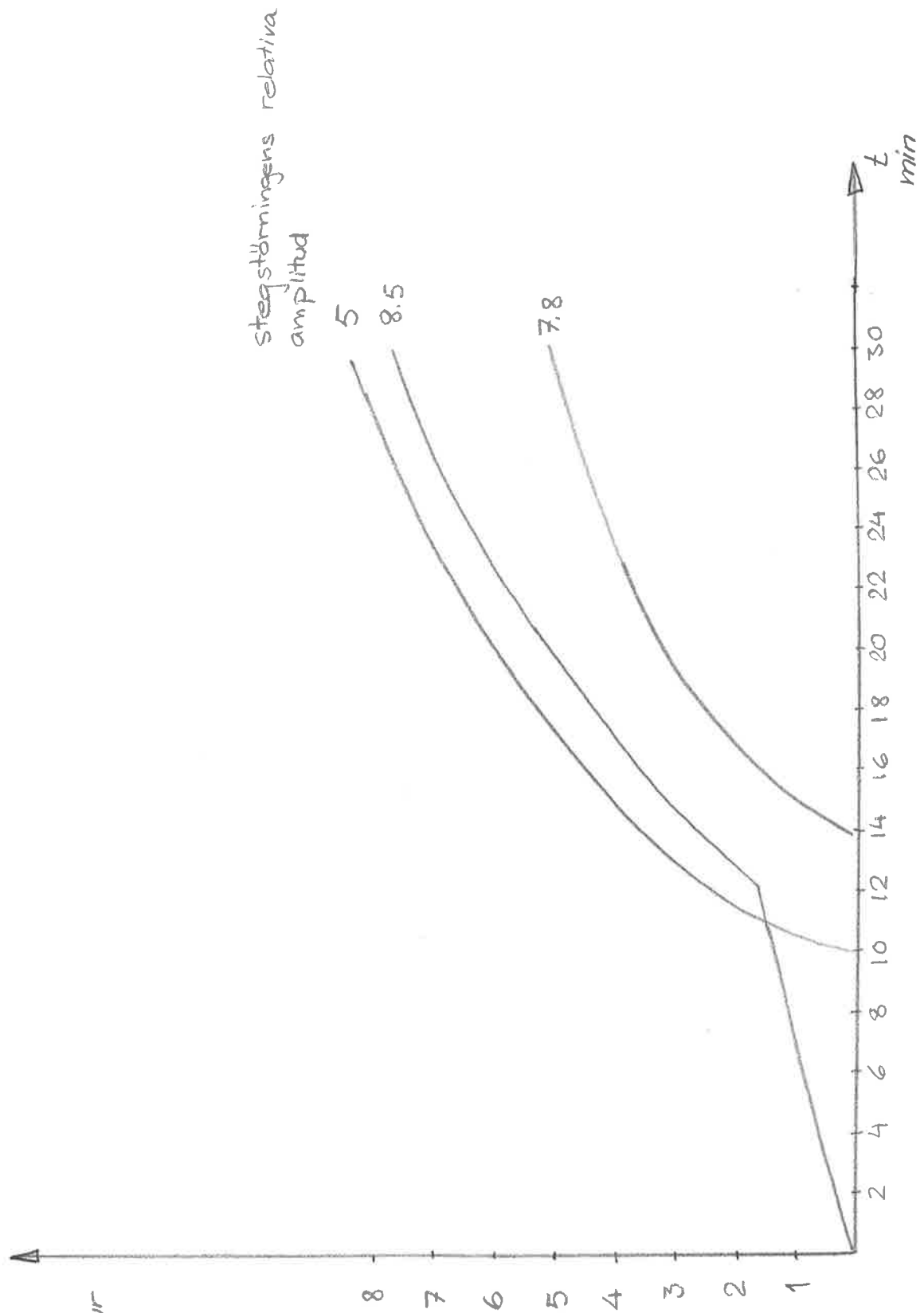


Diagram 2. Förstoring av detaljer i  
diagram 1.

diff.  
temp.

ångtryck ①

6/5

②

ång-  
tryck

Bestell-Nr. 080256

16.40

54297

080256

16.30

steg  
i in-  
matning

54297

Bestell-Nr. 080256

t ↑

56

16.35

1 minut

Diagram 3. Inverkan av minskning av  
inmatningen på ångtrycket.



6/5

①

②

differens-  
temp.

ång  
tryck

36

17.00

Bestell-Nr. 080256

54297

16.50

steg i  
inmatn.

6

54297

Bestell-Nr. 080256

t

Diagram 4. Inverkan av ökning av  
inmatningen på ångtrycket.

7/5

13  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
24

Bestell-Nr. 080 253

Bestell-Nr. 080 253

Bestell-Nr. 080 253



ändrat ångtryck

②

diff.

temp.

vakuum

ångtryck

11.54

Bestell-Nr. 080 253

-11.34

11.00

55210

Bestell-Nr. 080 253

-13.13

10.36

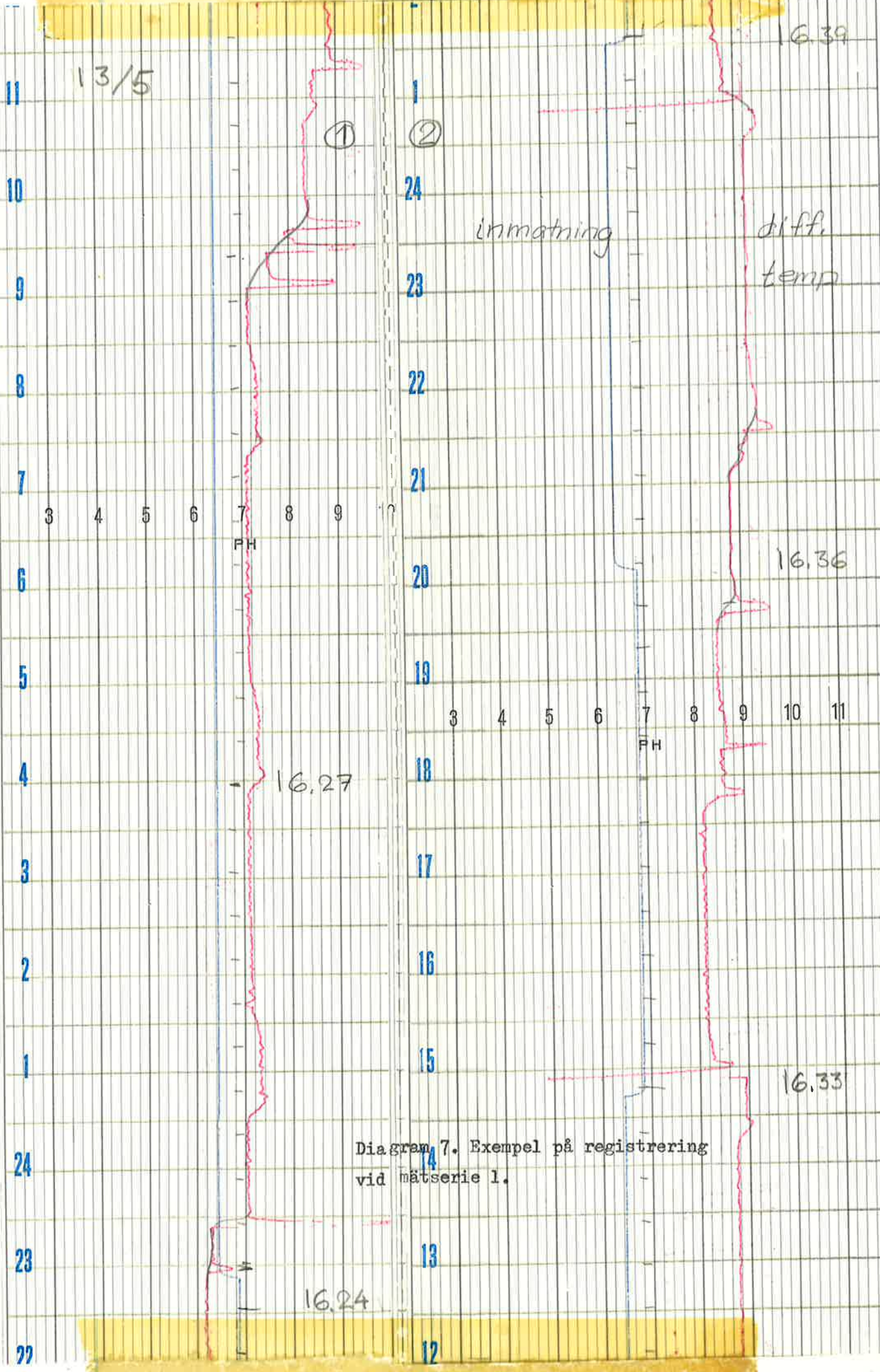
12.59

55210

Diagram 6. Inverkan av ändringar i ångtrycket på vakuum och differenstemperatur.

12.33





13/5

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

24

23

22

3 4 5 6 7 8 9

FH

16.27

16.24

1

24

23

22

21

20

19

18

17

16

15

14

13

12

3 4 5 6 7 8 9 10 11

FH

inmatning

diff.  
temp

16.36

16.33

16.39

Diagram 7. Exempel på registrering vid mätserie 1.

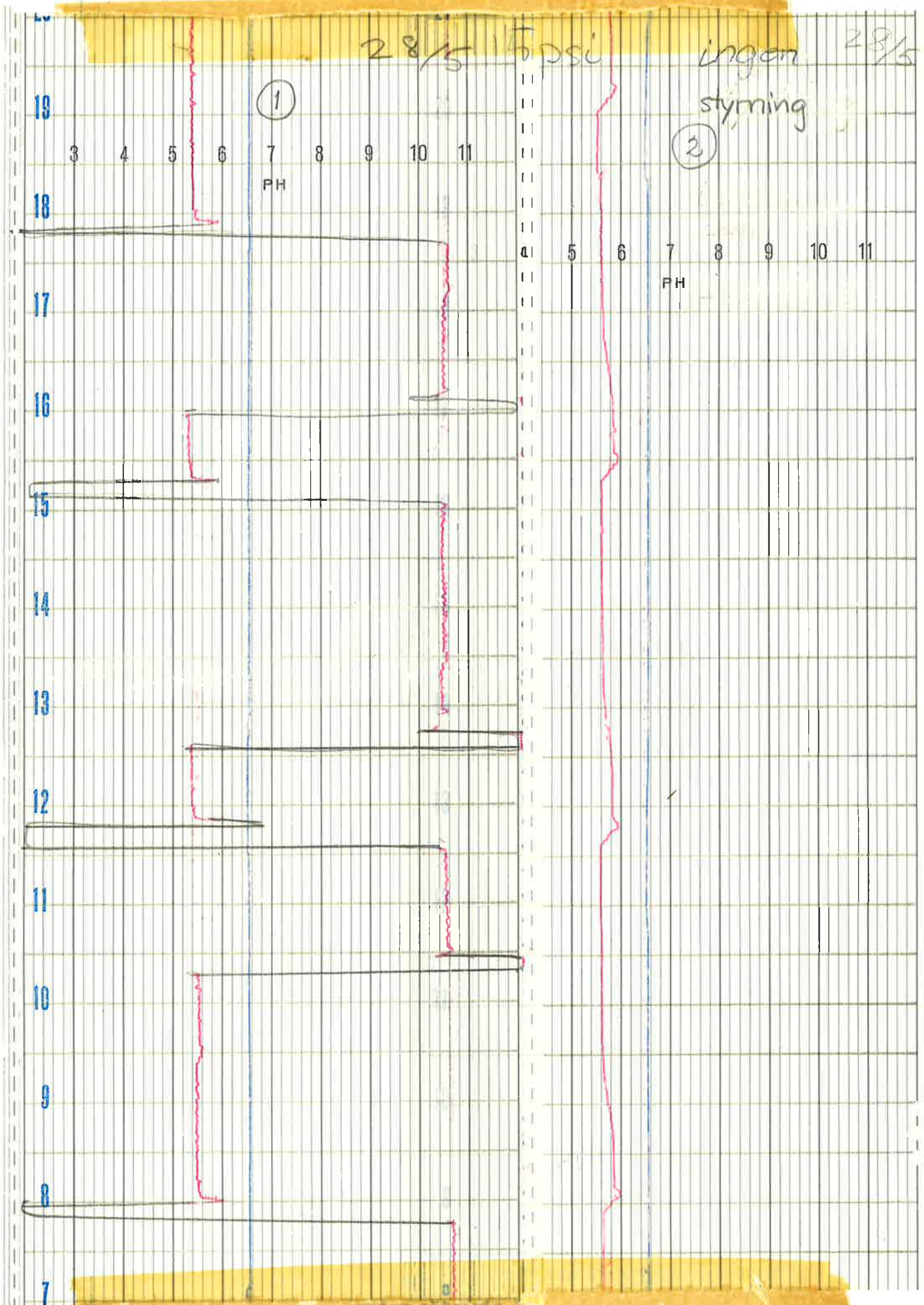


Diagram 8. Utsignal från regulatorn vid stegsignaler och ingen signalhalls vid inställning som i mätserie 1.



31/5

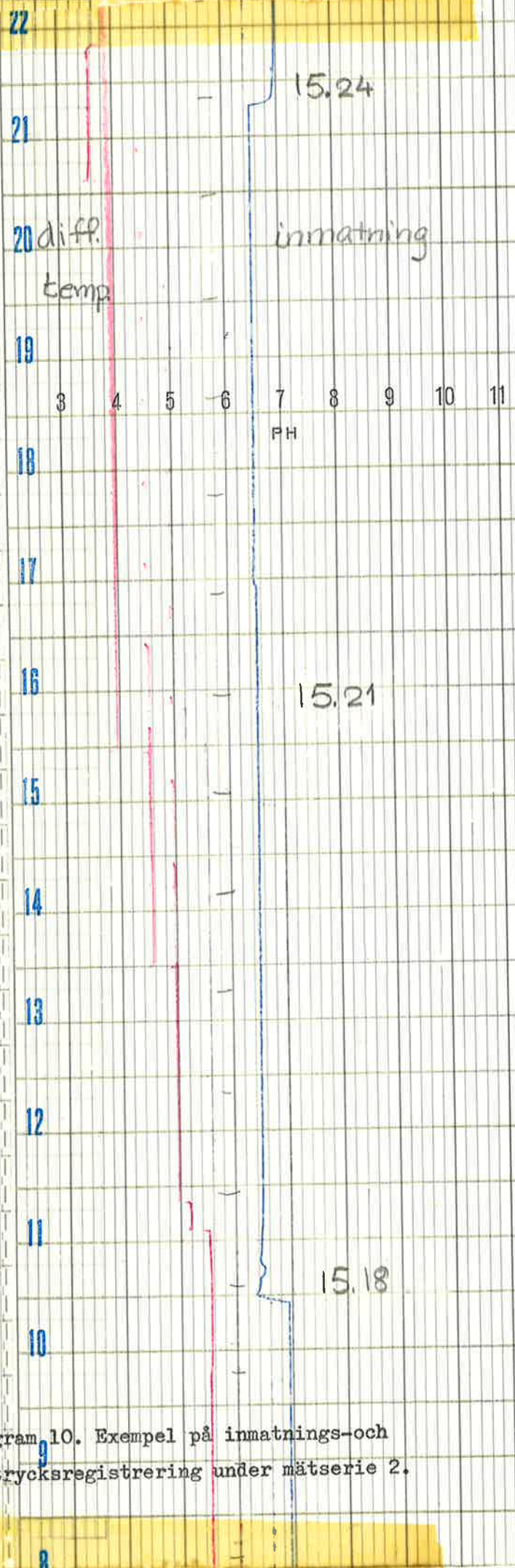
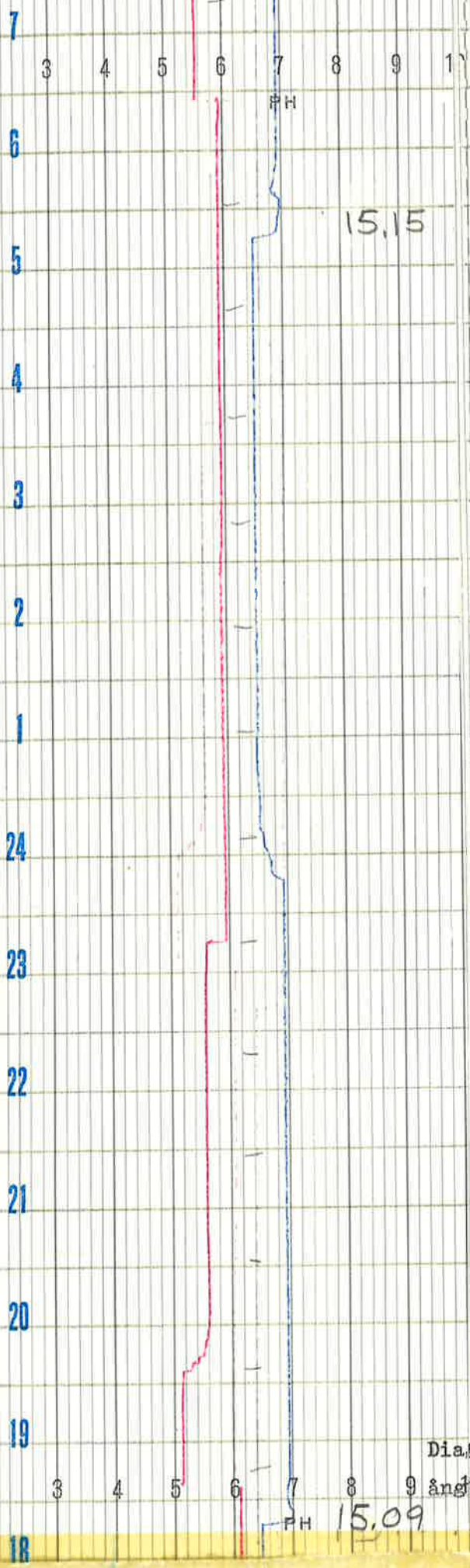


Diagram 10. Exempel på inmatnings- och ångtrycksregistrering under mätserie 2.

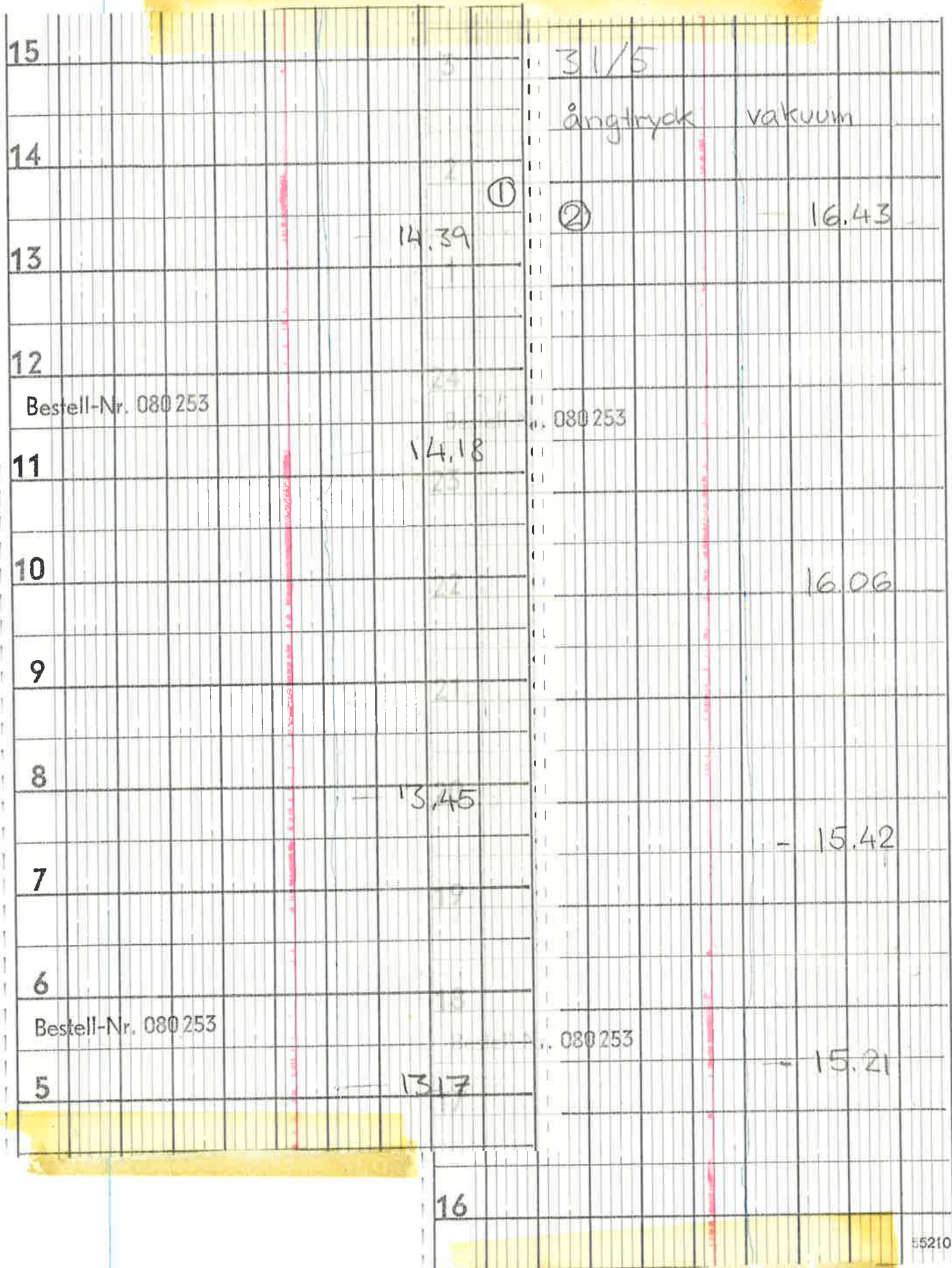


Diagram 11. Vakuüm och ångtryck under mätserie 2.



10 vakuum

25/6

②

20

①

9

19

8

18

Bestell-Nr. 080 253

7

17

6

16

Bestell-Nr. 080 253

55210

5

15

4

14

3

13

2

12

Bestell-Nr. 080 253

1

11

24

10

Bestell-Nr. 080 253

23

9

22

8

Diagram 12. Vakuum under mätserie 3.

21

7

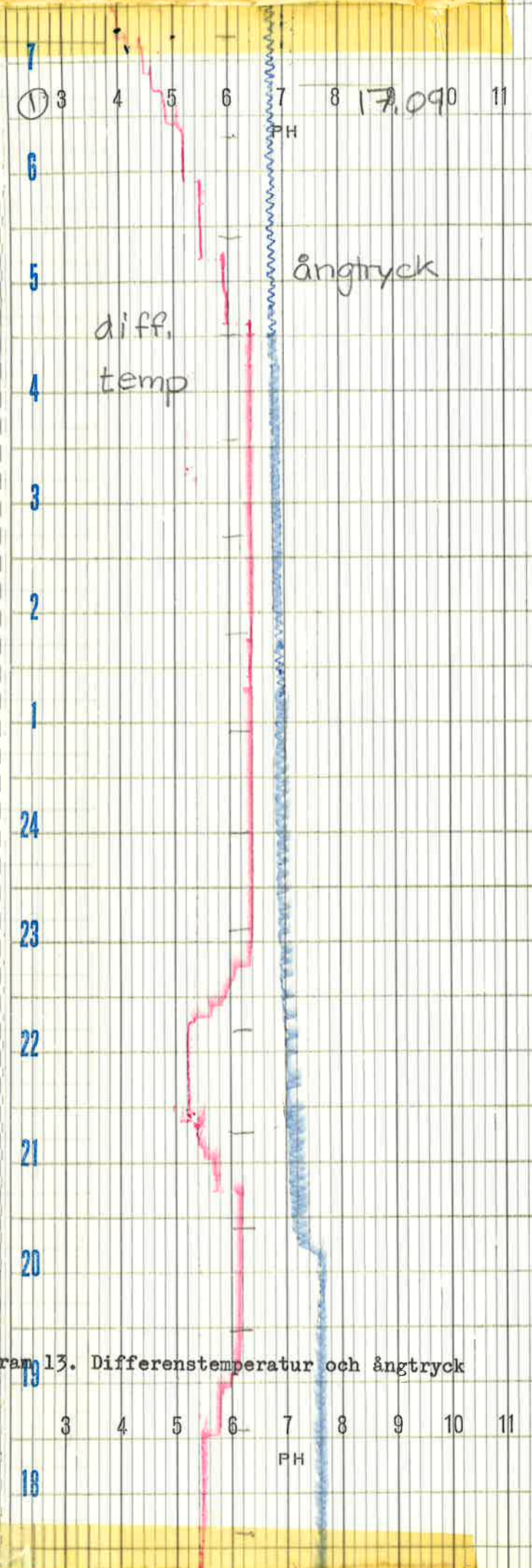
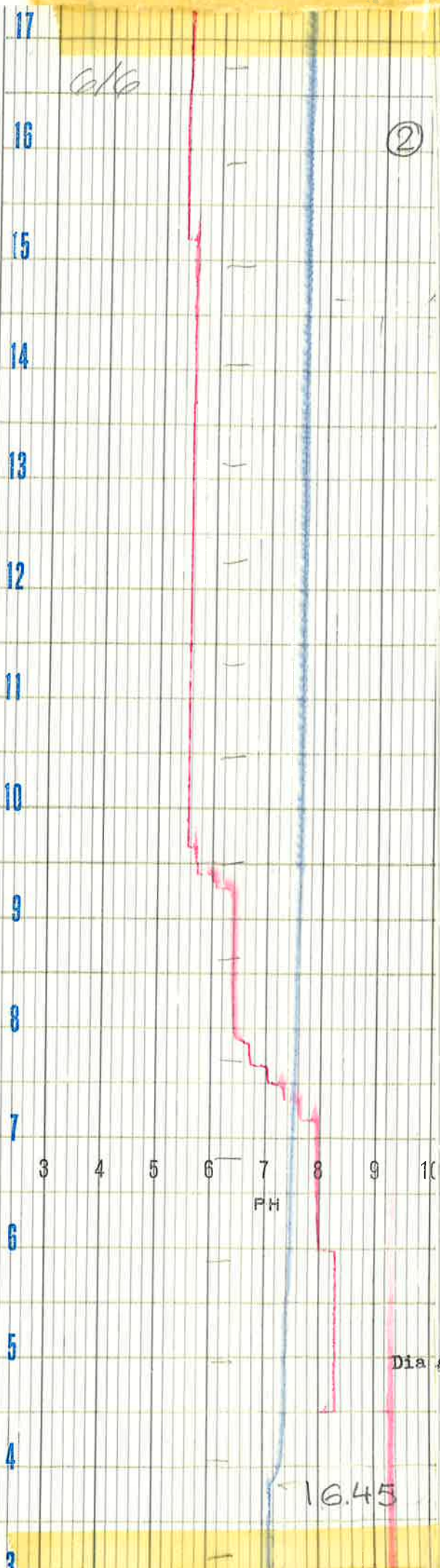


Diagram 13. Differenstemperatur och ångtryck



3

6/6

14.56

2

13

55210

1

15

24

14

1646

Bestell-Nr. 080 253

23

13

22

12

Bestell-Nr. 080 253

21

11

20

10

1605

19

9

18

8

Bestell-Nr. 080 253

17

7

16

6

Diagram 14. Valsrum vid ändrat ångtryck.

15

5.7  
12.54

14

10245

PERS 70A 17

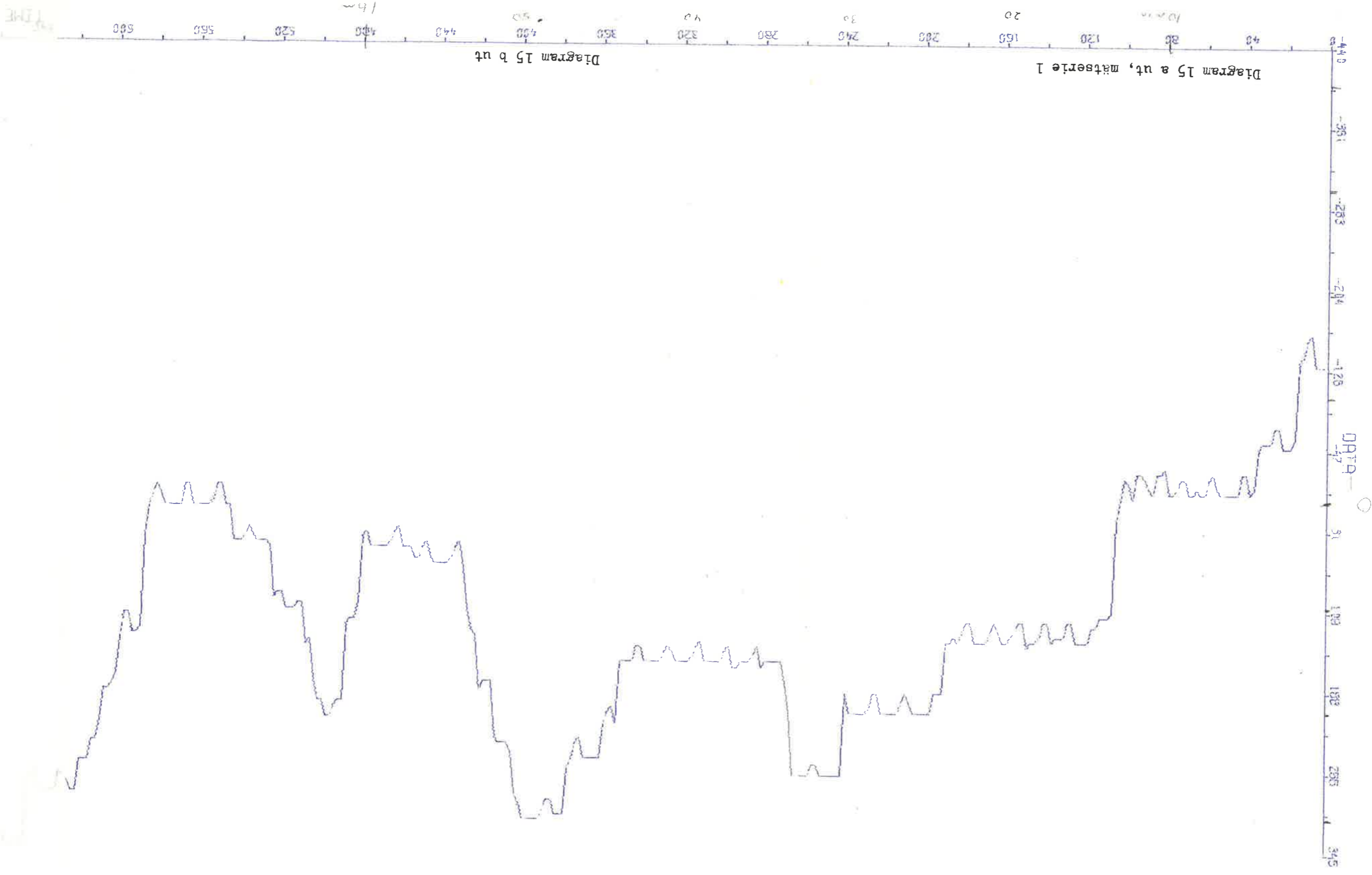
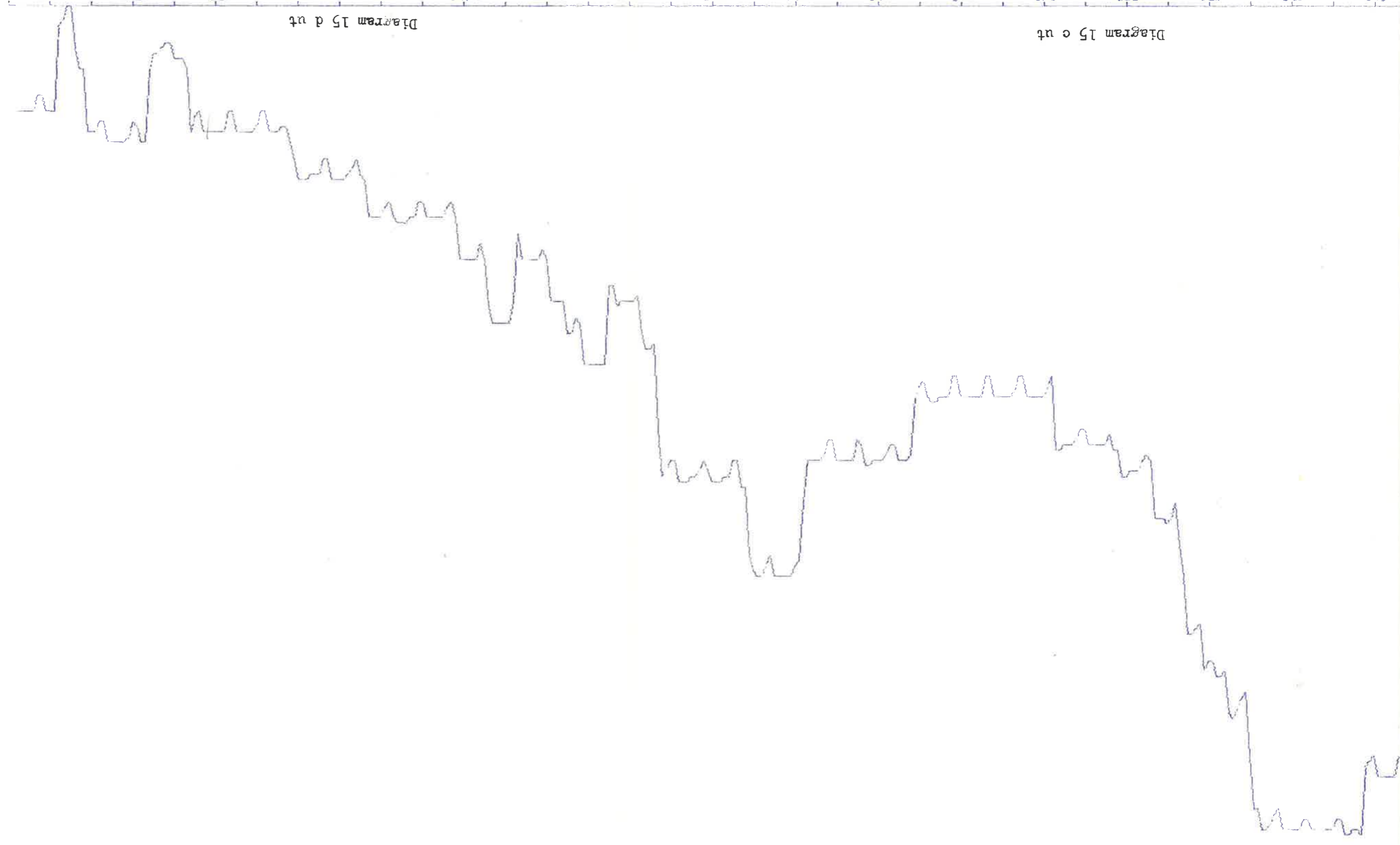
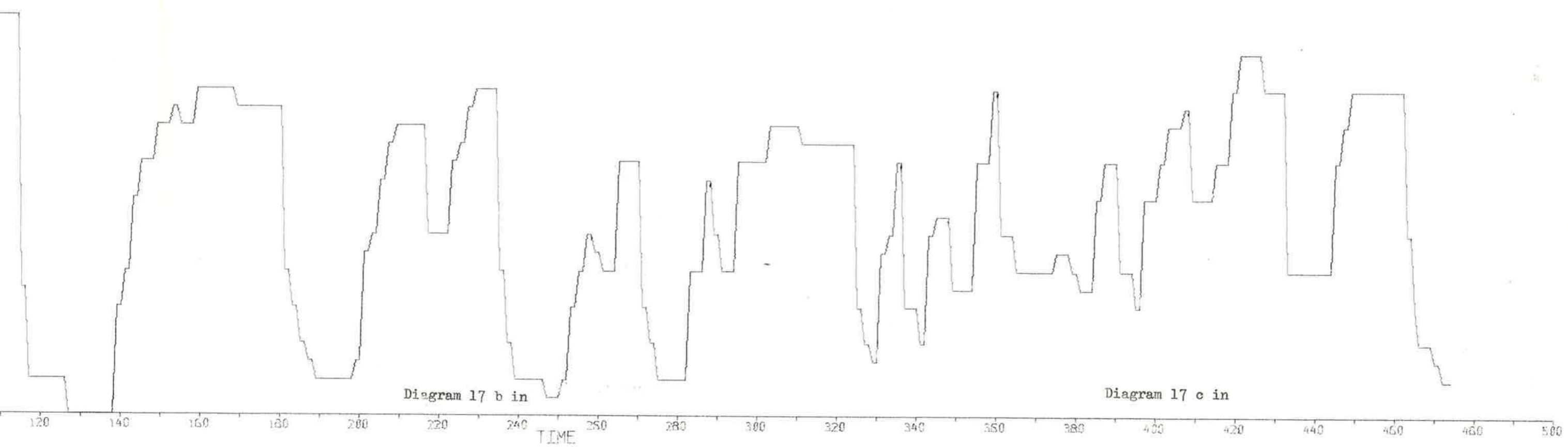




Diagram 15 c ut

Diagram 15 d ut







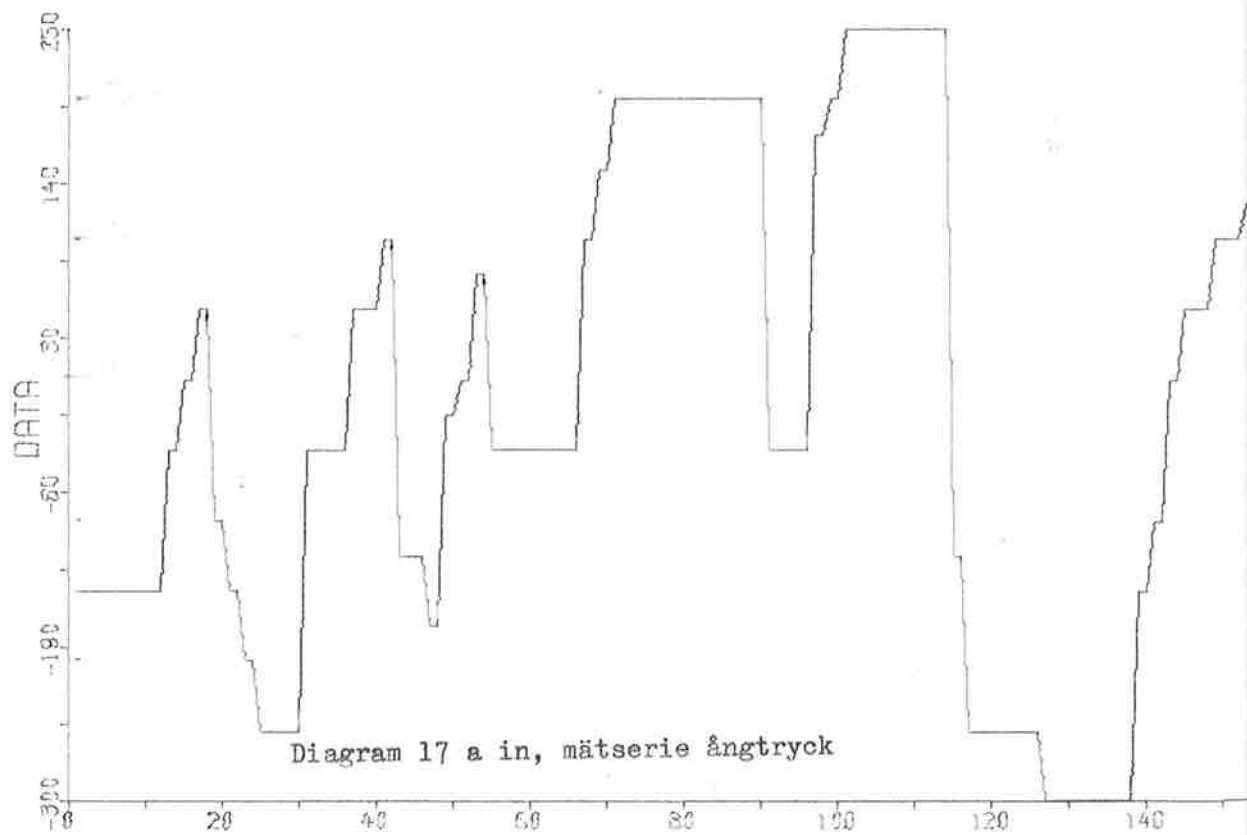
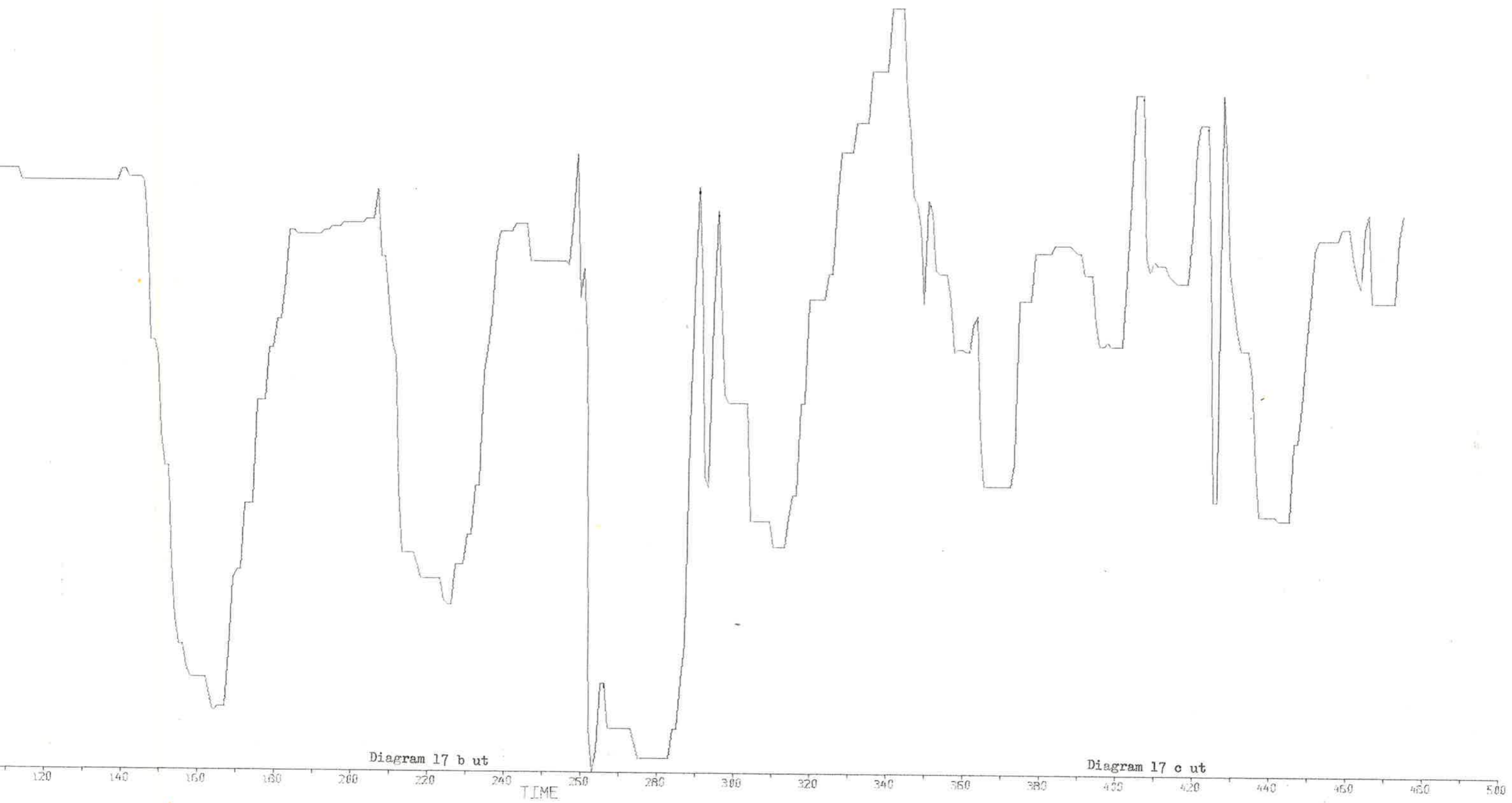


Diagram 17 a in, mätserie ångtryck



Mätserie 3

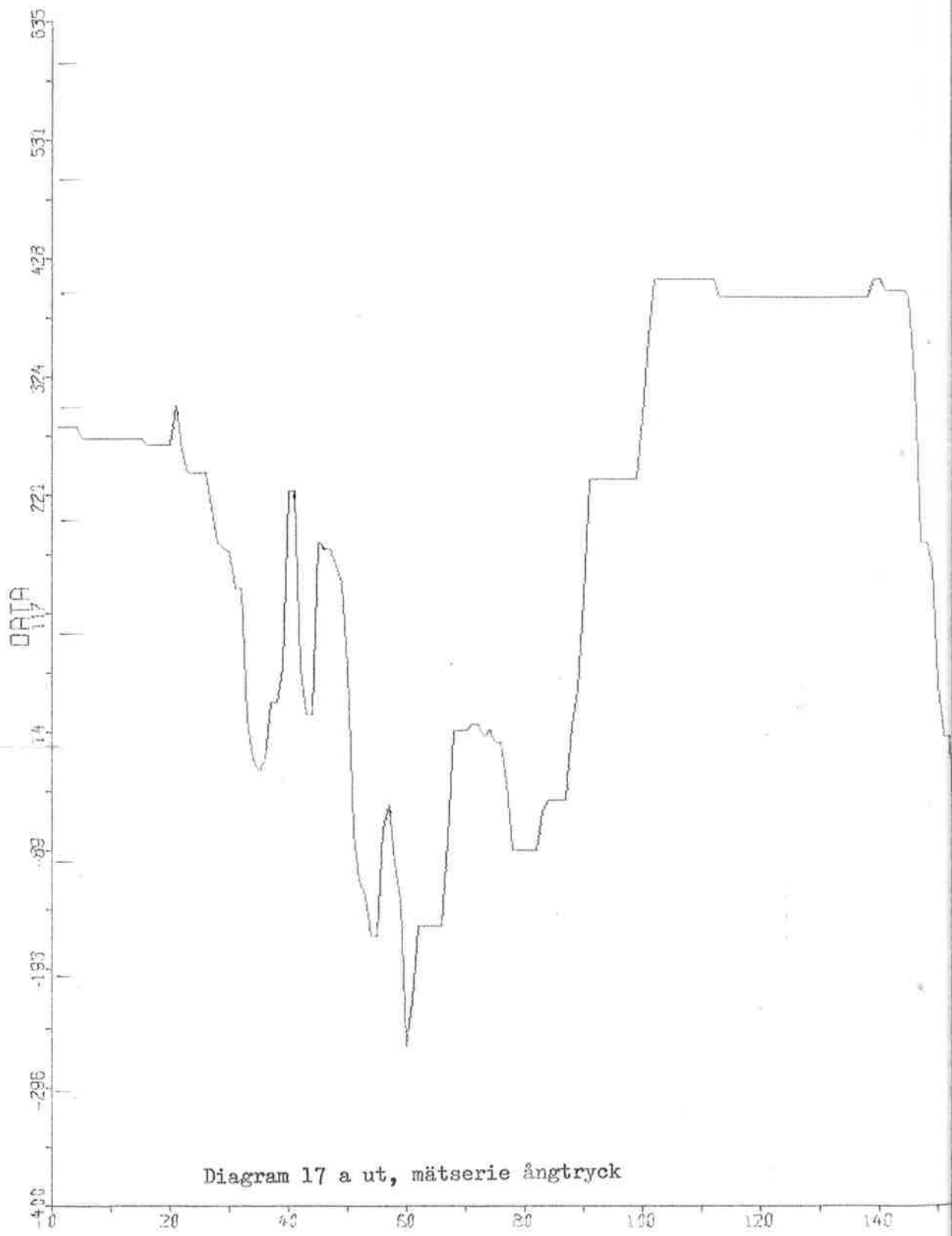


Diagram 17 a ut, mätserie ångtryck

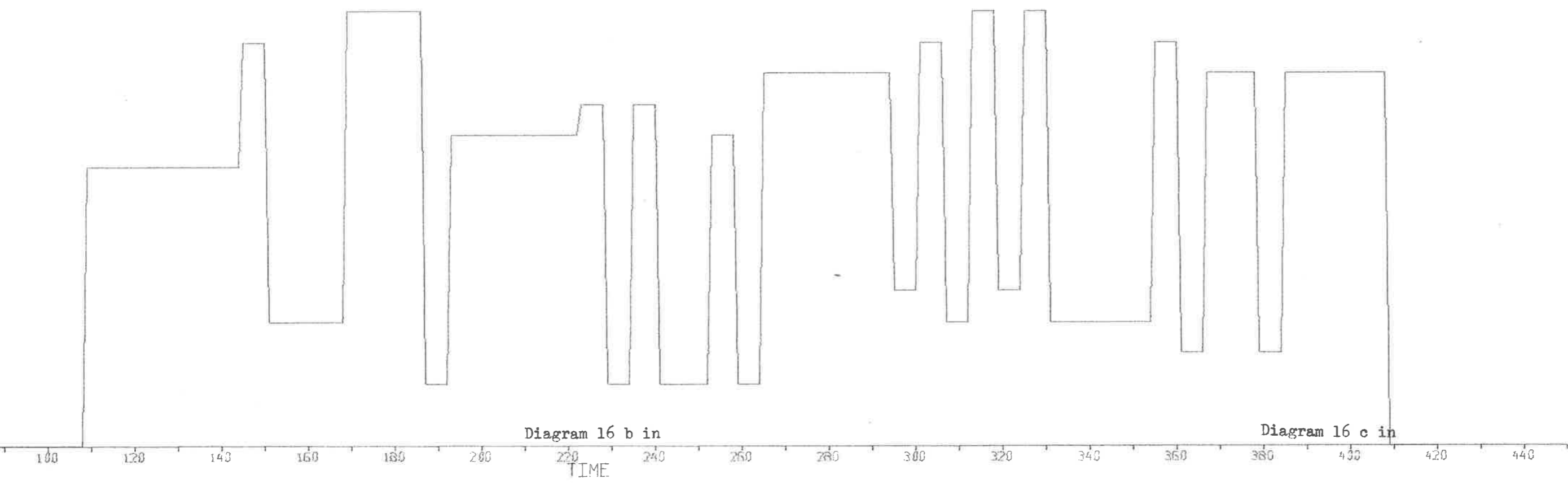
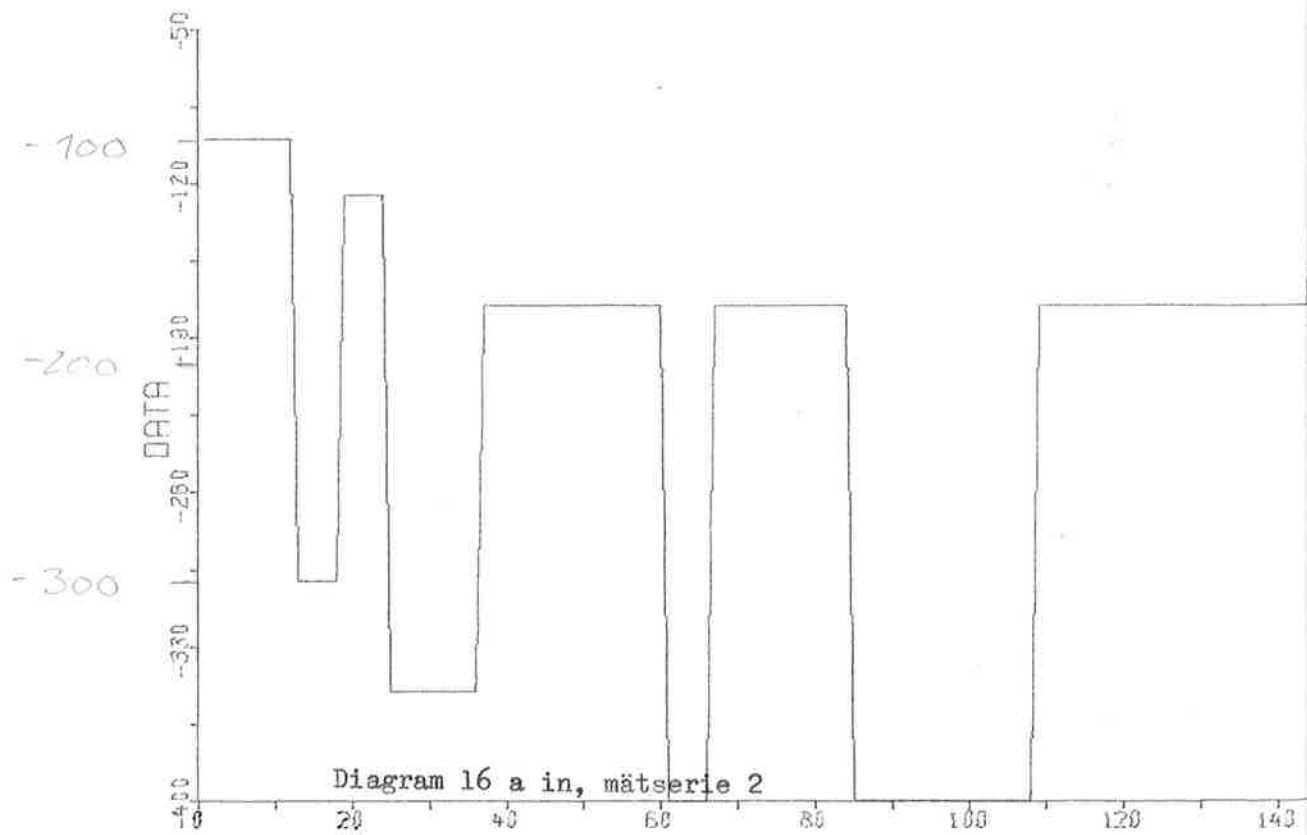


Diagram 16 b in

Diagram 16 c in



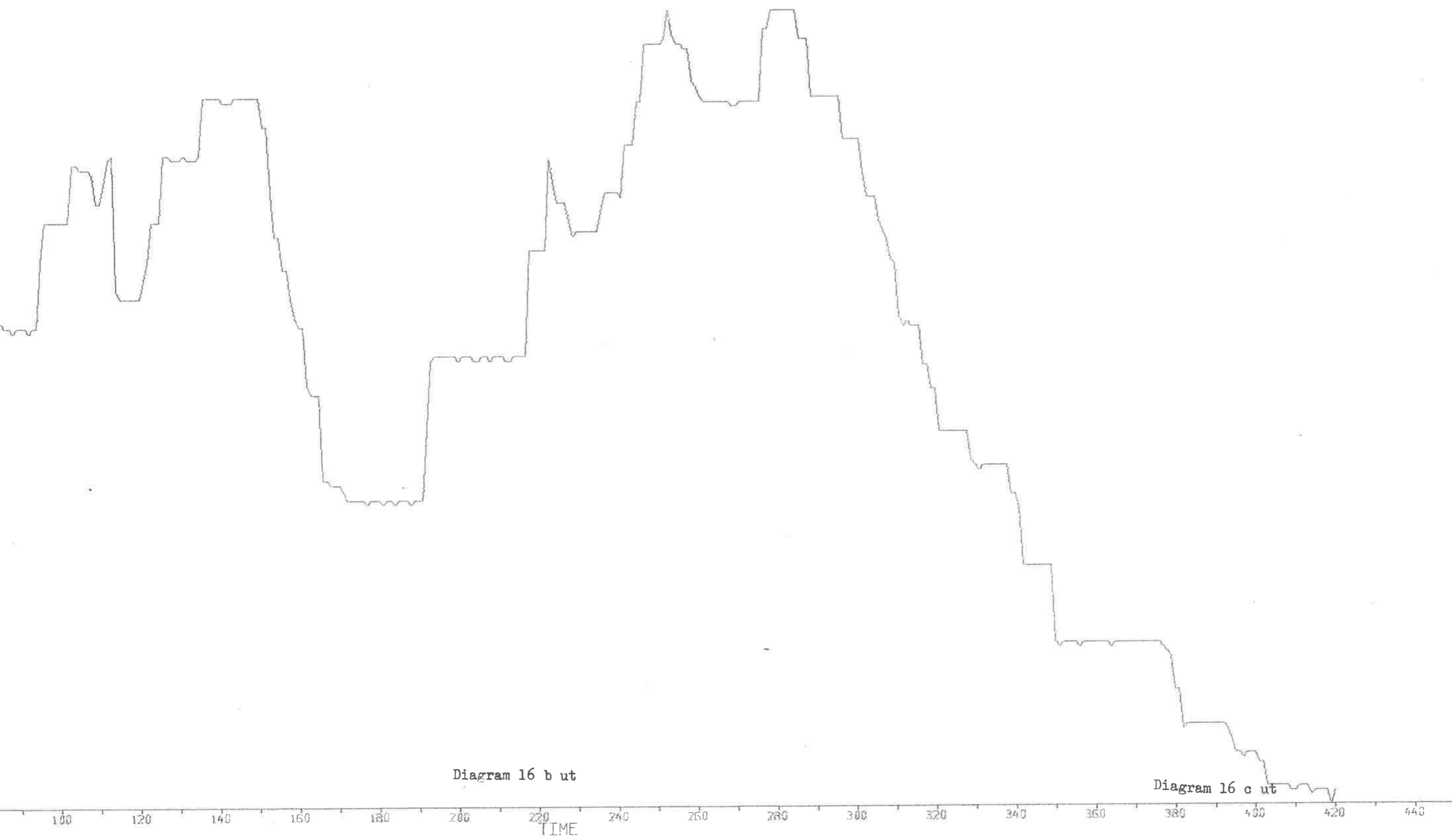


Diagram 16 b ut

Diagram 16 c ut

PERS TO P B.

+ 300  
+ 200  
+ 100  
0  
- 100  
- 200  
- 300  
- 400

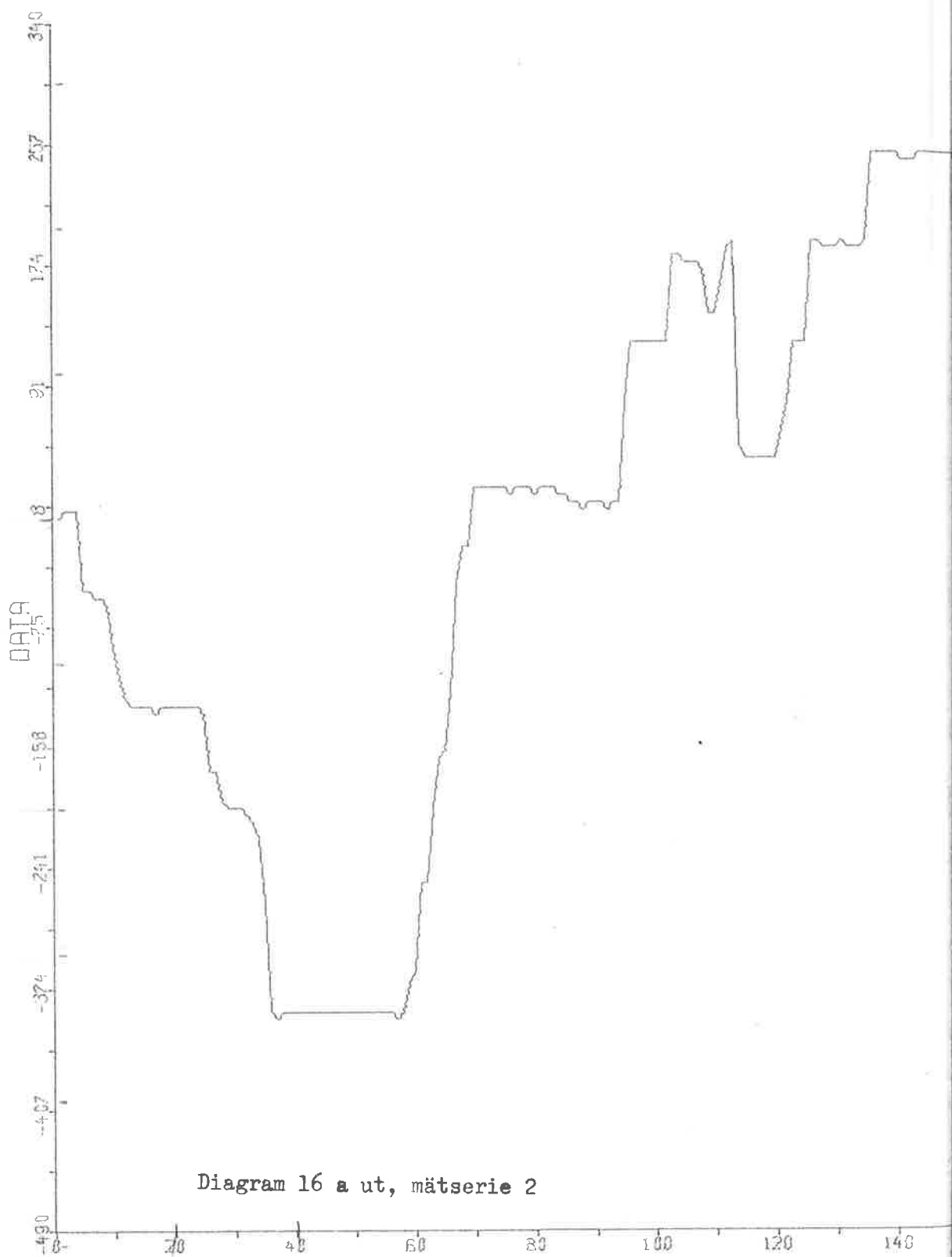
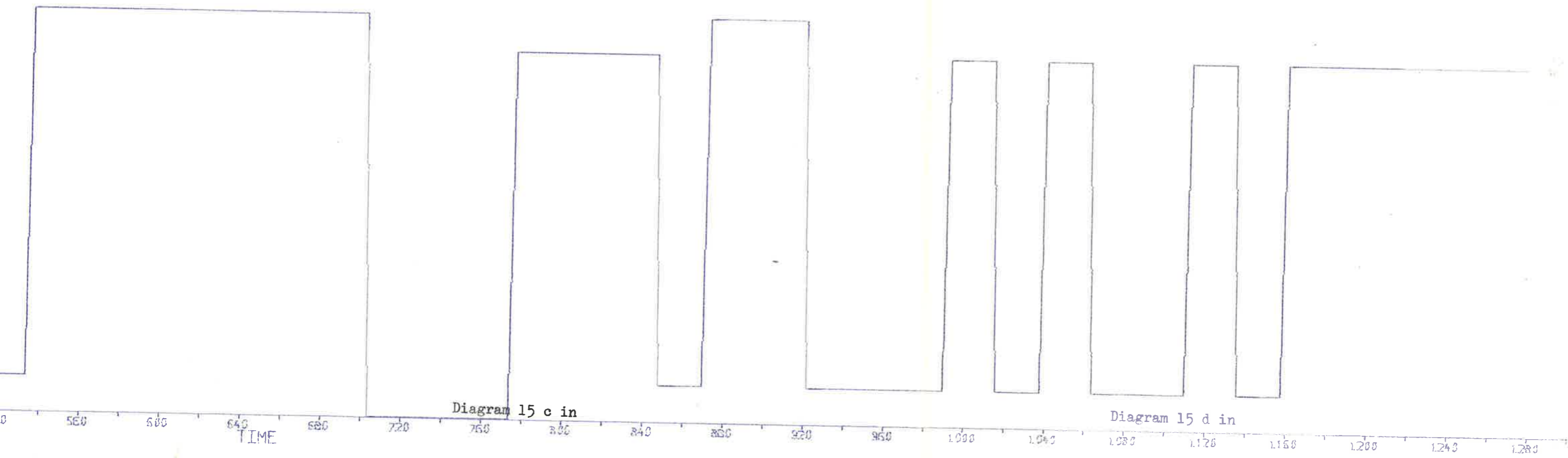


Diagram 16 a ut, mätserie 2

10 min

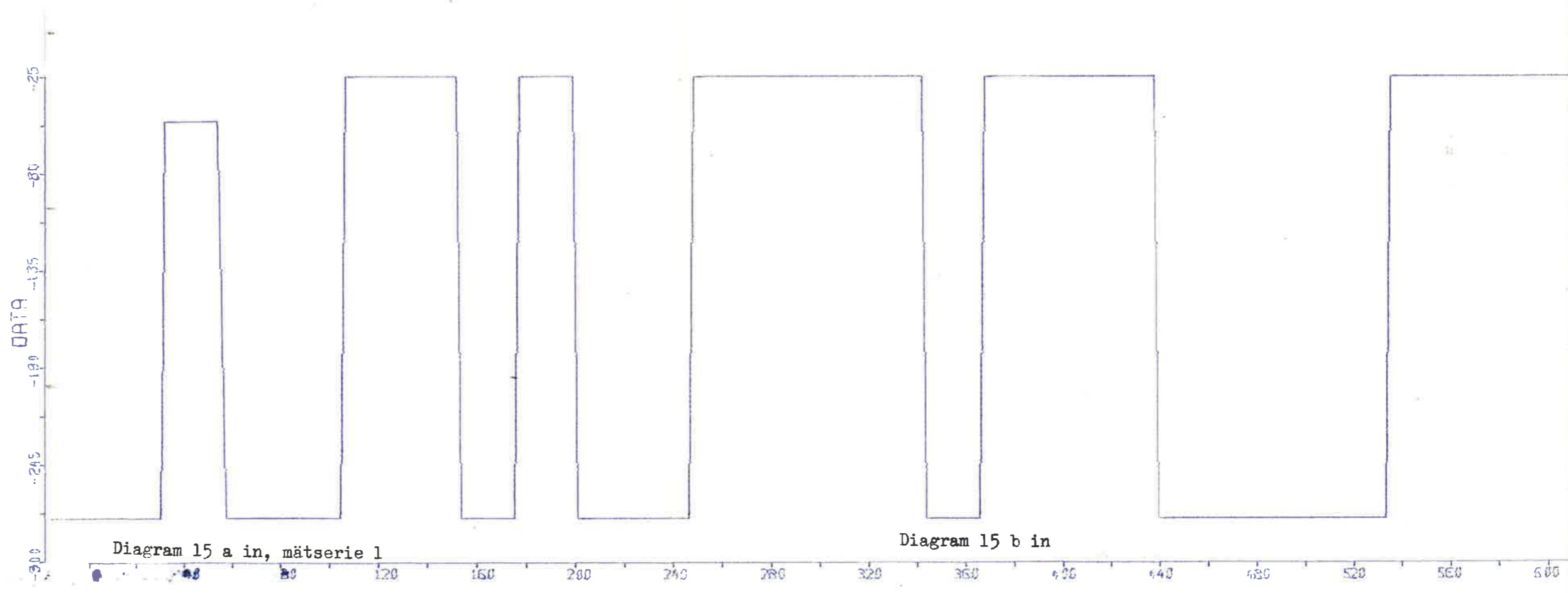




Mätserie 1

Original

U-signal



	12	13	14	15
11. INVERS				
2,7888645-006	-5,2004049-006	2,4499267-006	-2,8134449-008	1,2531306-007
5,1017807-007	9,7042475-006	-4,5751562-006	5,6103490-008	-2,4238711-007
9,6354815-007	-4,5751562-006	2,1587685-006	-2,7253968-008	1,1634619-007
2,4499267-006	5,6103488-008	-2,7253967-008	7,2966806-008	-1,4844554-007
4,6090181-007	-2,4238711-007	1,1634619-007	-1,4844554-007	3,0510562-007
-2,8134448-008	1,5356158-008	7,7490327-008	7,7343324-008	-1,5980233-007
1,2629844-009	-6,7490327-008	-6,3564866-008	7,7343324-008	-1,5980233-007
1,2531306-007	-9,3460507-009	2,4387706-006	-2,9792332-008	1,2007628-007
1,5356158-008	2,4387706-006	2,1393603-006	-2,9792332-008	1,2007628-007
-6,7490327-008	2,4387706-006	2,1393603-006	-2,9792332-008	1,2007628-007
-9,3460507-009	4,9371451-006	-2,3331086-006	3,2028468-008	-1,3105337-007
2,4387706-006	-9,6354816-007	4,6090181-007	-1,2629828-009	1,5356155-008
9,8851667-007	7,3994961-007			
-2,6404621-006	V2COND.= 5,80066655+006			
-1,6651985-006				
5,1017807-007				
7,3994961-007				

16	17	18
-6,7490328-008	2,4387706-006	-2,6404621-006
1,3152719-007	-4,5448008-006	4,9371451-006
-6,3564868-008	2,1393603-006	-2,3331086-006
7,7343324-008	-2,9792333-008	3,2028471-008
-1,5980233-007	1,2007628-007	-1,3105337-007
6,4168380-008	-6,4292026-008	7,1943198-008
-6,4292025-008	2,7303993-006	-3,4267165-006
7,1943196-008	-3,4267165-006	4,7769482-006
-9,3460490-009	9,8851668-007	-1,6651985-006

4 vid beräkningen på ångtryck - differensstemperatur

## Appendix

### Något om planerade förändringar av processen, som kan motivera förnyade mätningar

Följande skall bl.a. ändras på indunstaren samtidigt som dess kapacitet ökas. För att reglera den tillförda värmemängden skall man övergå till ångmängdsreglering. Genom en strypning i ångledningen försöker man samtidigt fixera ånganstryck och därmed dess specifika värmeinhåll. Den ånga, som tillförs utifrån är därmed noggrannare bestämd till mängd och värmeinhåll. Samtidigt skall den avdunstade ånga, som termokompressorn arbetar på regleras så att även denna mängd blir konstant. Resultatet av detta skall då bli att man får en konstant avdunstning i första effekten.

I vakuumregleringen användes förutom kylvattenregleringen även ett kontrollerat luftinsläpp. Detta luftinsläpp skall ändras så att luften inte når kondensörytorna och där påverkar kylförloppet. Vidare skall det bli möjligt att tillföra större kylvattenmängd till kondensorn. Till detta kommer en förbättrad reglering av vätskenivåer på en del ställen.

Resultatet av de beskrivna förändringarna bör bli att man får en konstant avdunstning i första steget oberoende av variationer i ångans kvalitet och ändringar i inmatningen. Med ångtrycksreglering var det ju nämligen så att den tillförda ångmängden ändrades om temperaturen i indunstaren ändrades d.v.s. om koncentrationen ändrades. Med en konstant avdunstning minskar också påfrestningen på vakuumregleringen. I förening med den förbättrade vakuumregleringen bör också störningarna i koncentrationsmätningen minskas.

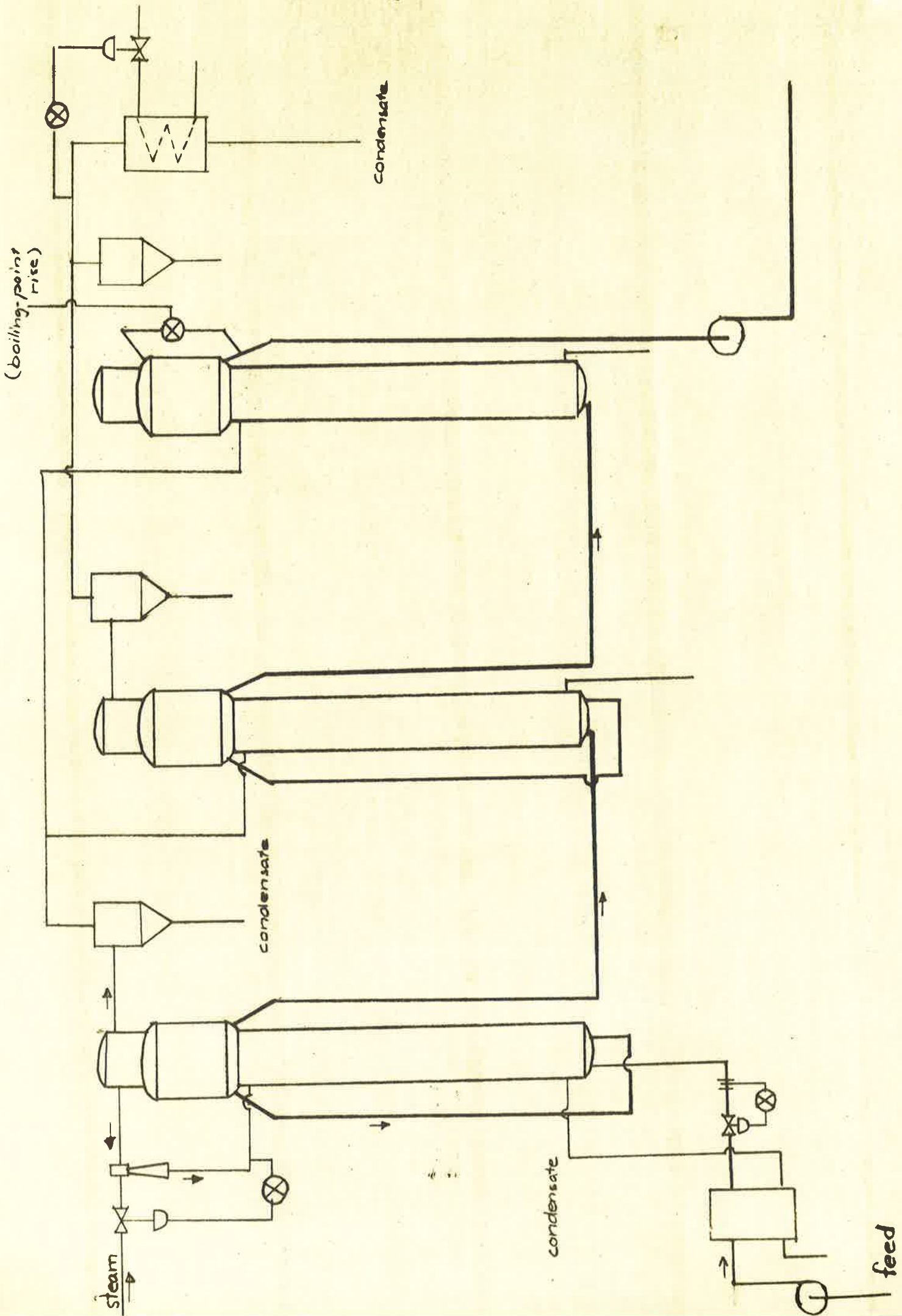
Övriga fel vid mätningarna var de stegvisa förändringarna i mätvärdesomvandlaren. Ett visst fel infördes p.g.a. att signalerna inte kunde bestämmas ur skrivaregistreringen med riktigt samma noggrannhet som utsignalen. Vidare var det inte möjligt att exakt bestämma tidpunkten för

# Investigation of the Dynamics of An Evaporator with Simple Experimental Equipment.

## Introduction

An evaporator was investigated. The purpose was to get a better physical knowledge of the process to design a feed back structure. We also wanted to examine how complicated the measurement should be in order to get accurate results. In fact only small modifications were made on the instruments used for supervision of the process and then their registrations were used directly. The simple instrumentation and the high noise level on the other hand required a rather sophisticated model and computing program, that accounted for the noise. A sampled system with normal distributed noise was used as a model.

To get a reasonable accuracy of coefficients each series of measurement was carried out for around four hours. The time delay from input to output and the fundamental time constant were determined with an error of less than 10 per cent. Knowledge of the principal performance of the system was established. The measurements showed an unexpected irregularity in the output. (Due to this an immediate design of a feed back structure was not possible, but on the other hand it is possible to change the process and then repeat the measurements with the same equipment.)





## Description of the Process

Fig. 1 is a simplified figure of the evaporator. It is a multiple-effect evaporator, which means that vapor generated in the first effect is the steam supply to the second and third effect. The advantage of this arrangement lies in steam economy. Part of the vapor is also fed back into the main steam supply line, with a thermo compressor. In the second and third effects vacuum is established by making a condenser work on the vapor from these effects.

*At the highest in / and ...*

The concentration of the liquid leaving the third effect is determined by measuring the boiling-point rise that occurs at increased concentration. Now the boiling-point also rises with the pressure. Therefore the boiling-point rise is determined as the difference in temperature between the boiling liquid and boiling water at the same pressure.

The purpose of the investigation was to make possible a feed back of the concentration value to the valve controlling the feed of liquid, so that concentration can be kept as high as possible without any risk of crystallization. The measurements must be made during normal running with not too apparent changes in concentration.

\* The fact that the C and A polynomials do not have the long time constant in a common factor indicates that a considerable part of the noise is introduced into the first effect through variations in feed and steam quality. The signal to noise ratio was 1:4 in these measurements.

### References

2) Ivar Gustavsson

### Parametric Identification of Time Series

Report 6803 April 16 1968

Lund Institute of Technology  
Division of Automatic Control

1) K.-J. Åström and T. Bohlin

Numerical Identification of Linear Dynamic Systems from Normal Operating Records"

Proceedings of the IFAC Conference on Self-Adaptive Control Systems, Teddington (1965)

## Abstract.

This paper describes the identification of the dynamics of an evaporator.

The purpose of the investigation was ~~to~~ twofold.

- (i) To demonstrate that a process identification on a noisy plant can be performed with simple equipment
- (ii) To get a good understanding of the dynamics of the plant for the purpose of ~~its~~ designing control laws

To introduce the perturbations we used

