

DYNAMISKA MODELLER FÖR PRIMÄRSEDIMEN-  
TERING I RENINGSVERK

ROLAND LARSSON  
GÖRAN SCHRÖDER

RE-146 september 1974  
Inst. för Reglerteknik  
Lunds Tekniska Högskola

DYNAMISKA MODELLER FÖR PRIMÄRSEDIMENTERING I  
RENINGSVERK

Roland Larsson  
Göran Schröder

Handledare: Gustaf Olsson

Augusti 1974

## ABSTRACT

I examensarbetet har uppställts en rumsberoende och tidsberoende matematisk modell för en primärsedimenteringsprocess i ett (biologiskt) reningsverk, i form av en uppsättning koplade olinjära differentialekvationer.

Arbetet har inneburit litteraturstudier, uppställande av matematiska modeller, samt framtagning av ett programpaket för simulering av primärsedimenteringsförloppet.

Ett antal simuleringar har gjorts, med olika variationer i inkommande vätskeflöde och inkommande suspenderade ämneskoncentrationen, för att undersöka systemets dynamiska beteende.

Några enkla regleringar har gjorts genom att variera slam-borttagningsintervallet, vilka gav vissa positiva resultat. En annan viktig möjlighet för att styra utgående suspenderade ämneskoncentrationen är genom tillsättandet av kemikalier i primärsedimenteringsbassängen.

Detta har ej medhunnits inom ramen för examensarbetet. Bristen på mätdata är mycket stor, därför är modellen endast i vissa delar verifierad mot verkliga förhållanden. Fler och bättre mätdata från primärsedimenteringsprocessen behövs för att utveckla bättre processmodeller och bättre regleralgoritmer.

## ABSTRACT

This report describes a mathematical model for a primary sedimentation process of a (biological) wastewater treatment plant.

The space and time dependent dynamics are described by coupled non-linear ordinary differential equations. The model illustrates the dynamic behaviour of suspended solids in a primary sedimentation basin, as a function of space and time.

The work has included literature studies of wastewater treatment, developing of a mathematical model as well as a computer programming for simulation of the differential equations.

A number of simulations have been performed with different variations of influent flow rate and suspended solids, in order to study and to verify the dynamics of the system. Some simple control schemes for sludge removal in order to control the output water quality have been tried out.

Control by chemical precipitation is another control possibility. Because of lack of time this control has not been tried.

Due to lack of measurement data, it has only been possible to verify parts of the models to real data. More and better data from primary sedimentation processes are needed to evaluate better process models and control algorithms.

Författarna till denna rapport tackar Sören Gothardsson, LTH, Institutionen för vattenbyggnad, för hans visade intresse att hjälpa oss med litteratur, mätvärden och personliga råd.

Pollution.

1. If you visit American city  
You will find it very pretty.  
Just two things of which you must beware,  
Don't drink the water and don't breathe the air.  
Pollution, Pollution,  
They got smog and sewage and mud,  
Turn on your tap and get hot and cold running crud.
  
2. See the halibuts and the sturgeons,  
Being wiped out by detergeons.  
Fish gotta swim and birds gotta fly,  
But they don't last long if they try.  
Pollution, Pollution,  
You can use the latest toothpaste,  
And then rinse your mouth with industrial waste.
  
3. Just go out for a breath of air,  
And you'll be ready for medicare,  
The city streets are really quite a thrill,  
If the hoods don't get you, the monoxide will.  
Pollution, Pollution,  
Wear a gasmask and a veil  
Then you can breathe long as you don't inhale.
  
4. Lots of things there that you can drink,  
But stay away from the kitchen sink.  
The breakfast garbage that you throw into the Bay,  
They drink at lunch in San José.  
So go to the city, see the crazy people there,  
Like lambs to the slaughter  
They're drinking the water  
And breathing (cough....) the air.

Tom Lehrer

INNEHÅLL:	Sida
1. Inledning och problemställning.	1
2. Uppbyggnad av ett biologiskt reningsverk.	2
2.1.    Vad är smutsvatten?	
2.2.    Ingående processer och deras funktion.	
2.2.1.    Förbehandling.	
2.2.2.    Primärsedimentering.	
2.2.3.    Aktiv - slamprocess.	
2.2.4.    Slambehandling.	
2.3.    Driftstekniska problem.	
3. Primärsedimentering.	7
3.1.    Olika slag av sedimentering.	
3.2.    Turbulent diffusion.	
4. Dynamiska modellen - massflödesekvation.	10
4.1.    Kontinuitetsekvationen.	
4.2.    Indelning av sedimenteringsbassäng.	
4.3.    Modell approximationer.	
4.4.    Massflödesekvationen utan diffusion.	
4.5.    Partiklarnas sjunkhastighet.	
4.6.    Randvillkor.	
4.7.    Turbulent diffusion.	
4.8.    Partikelklasser.	
4.9.    Slamzon.	
4.10.    Sammanfattning av modellekvationer.	
5. Problemlösningsmetodik.	21
5.1.    Lösning av massflödesekvationen.	
5.2.    Blockschema till dataprogrammet.	
5.3.    Lösningsgång i dataprogrammet.	

6. Simuleringar.	26
6.1. Parameterbestämningar.	
6.2. Öppna systemet.	
6.2.1. Steg störningar.	
6.2.2. Puls störningar.	
6.2.3. Sinus störningar.	
6.3. Reglering av utgående suspenderade ämnes- konc. med slamborttagning.	
6.3.1. Steg störning.	
6.3.2. Puls störning.	
6.3.3. Sinus störning.	
6.4. Insignal - utsignal samband.	
7. Summering.	33
7.1. Slutsatser.	
7.2. Modellutvidgningar och råd.	
8. Referenser.	
Appendix A.	
Appendix B.	
Appendix C.	



## 1. Inledning och problemställning.

Understött av STU och i samarbete med Datema AB utförs vid bl.a LTH ett projekt att bestämma dynamiken hos ett biologiskt reningsverk. Som en underavdelning i detta projekt har vi gjort en förstudie av och uppställt en dynamisk modell av primärsedimentering.

Tidigare arbeten på primärsedimentering, har i regel gått ut på att ställa upp statistiska modeller, vilka har visat sig vara otillräckliga. Eftersom speciellt ingående vätskeflödet aldrig är konstant måste därför dynamiskt beskrivningssätt sökas, vilka kan användas som underlag för simuleringar och regleringar av primärsedimenteringsprocessen.

Modellen ger ingen detaljerad bild av enskilda partiklarnas rörelse eller vätskeflödets fullständiga strömningar. Förloppet har istället beskrivits med utgångspunkt från de dominerade företeelserna vid primärsedimentering, såsom partiklarnas sjunkhastighet, flockning, flödes hastighet och diffusion.

Ekvationerna har därefter anpassats till vissa mätdata, erhållna från litteraturen.

Liknande arbeten har utförts av Bryant, Wilcox och Andrews (12) och (13) och av Schainker och Wells(19).

## 2. Uppbyggnad av ett biologiskt reningsverk.

En kort orientering om processerna i ett biologiskt reningsverk ges i detta kapitel. Fler detaljer kan inhämtas i någon standardbok på området, exempelvis Eckenfelder (1) och Metcalf-Eddy (2).

Vagt uttryckt kan sägas att målsättningen med ett reningsverk är, att erhålla ett godtagbart rent vatten ut ur reningsverket, oberoende av variationer och störningar i ingående smutsvattnets sammansättning, inflöde och föroreningsgrad.

Smutsvatten används som en sammanfattning av allt vatten, som innehåller föroreningar som exempelvis kommer ifrån hushåll och/eller industri. Förutom stor skillnad i de ingående föroreningarnas fysikaliska egenskaper är det stora variationer i koncentrationer, giftighet och biologisk nedbrytbarhet.

### 2.1. Vad är smutsvatten.

Smutsvatten innehåller förhållandevis små mängder främmande ämnen. Olsson, Dahlquist m.fl. (3) säger att av smutsvatten ifrån hushåll är 99.95 % vatten. Detta visar klart svårigheten att mäta, påvisa och angripa föroreningarna.

De ingående föroreningarna är av vitt skilda slag och kan förekomma som fasta olösta eller fasta lösta partiklar samt förekommer i olika kemiska föreningar. Alla föroreningar tillsammans benämnes totala suspenderade ämnen, TSS. Indelning kan göras i fysiska, kemiska och biologiska grupper.

- Fysisk -

Fasta ämnen

- Kemisk -

Organiska ämnen (protein, fett)

Oorganiska ämnen (kväve, fosfor, tunga metaller, giftiga ämnen)

Gaser (syre, metan)

- Biologisk -

Virus

Mera detaljerade uppgifter kan fås ur Metcalf-Eddy (2) och Eckenfelder (1), kap. 1.

Koncentrationen av de olika ämnena är för det mesta så små att enskilda bestämmningar är oftast omöjliga att utföra. På grund av detta införes andra kvalitativa variabler för att karakterisera smutsvattnet.

	Inflöde	Utflöde
Biokemiskt syrebehov (BOD) mg/l	100 - 250	5 - 15
Kemiskt syrebehov (COD) mg/l	200 - 700	15 - 75
Total fosforhalt mg/l	6 - 10	0.2 - 0.6
Kväve mg/l	20 - 30	2 - 5
Suspenderade ämneskonc. mg/l	100 - 400	10 - 25

Fig. 2.1. Typiska värden på några viktiga parametrar.

För exakta definitioner av BOD och COD, se (1).

Ytterligare svårigheter utgör kraftiga variationer i flödes-hastighet och smutsgrad av inkommande smutsvatten, inte bara mellan olika reningsverk, utan även inom samma reningsverk beroende på dygnsvariationer, och momentana variationer.

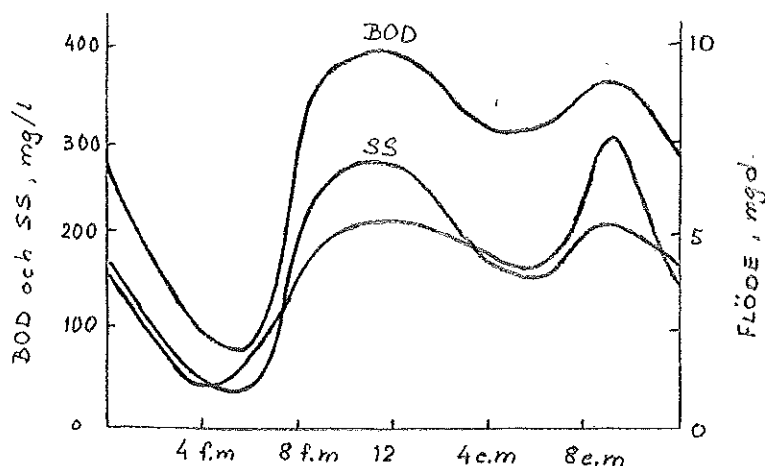


Fig. 2.2. Typiska värden på dygnsvariationer i ett reningsverk.

Liknande fig. finns angivna i en hel rad artiklar exempelvis art. (12) och (13).

## 2.2. Ingående processer och deras funktioner.

Ett reningsverk består av ett stort antal processer. Fig. 2.1. visar en schematisk bild över ett biologiskt reningsverk. För närmare studium av reningsverk se Metcalf-Eddy (2) och Eckenfelder (1).

### 2.2.1. Förbehandling.

Förbehandling används för att ta bort större enheter, fett, olja, skum och dylikt från det inkommande smutsvattnet, för att härigenom göra primärsedimenteringen effektivare.

Finmaskiga galler används för att avlägsna de större enheterna. En annan möjlighet är att mala sönder dessa större smutspartiklarna innan de kommer in i sedimenteringsbassängen.

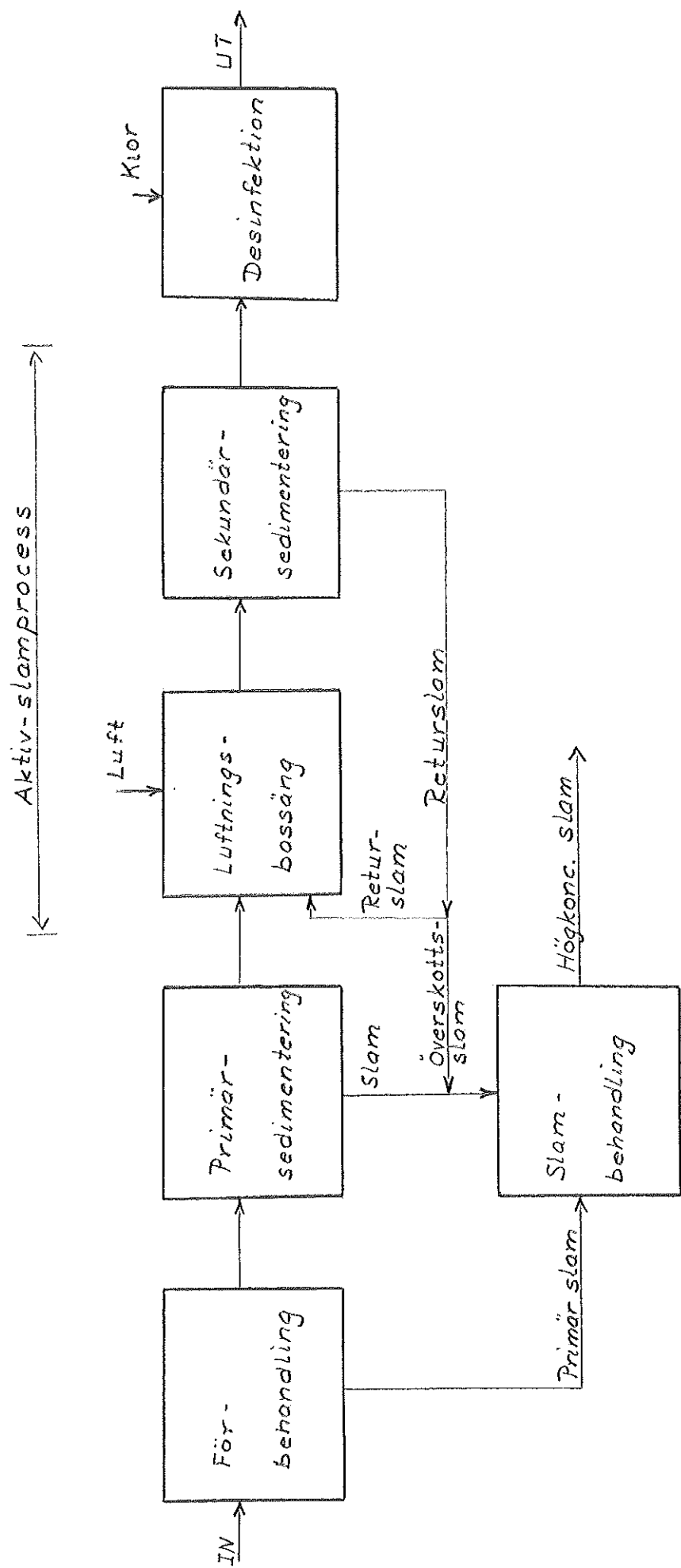
I förbehandlingen kan dessutom tillsättas kemikalier för att öka flockningsgraden och därigenom även öka sjunkhastigheten i primärsedimenteringen, vilket medför bättre rening.

### 2.2.2. Primärsedimentering.

Primärsedimenteringens två huvuduppgifter är dels att er-hålla en låg halt av utgående sedimenterbara suspenderade ämnen (SS) innan det behandlas i luftningsbassängen, dels att erhålla ett koncentrerat slam. Genom att låta smutsvattnet långsamt flyta fram i bassängen, kommer smutspartiklarna med densitet större än vattnet att sjunka till botten genom påverkan av gravitation. Primärsedimenteringen har ingen effekt på lösta komponenter i smutsvattnet utan dessa tas om hand i aktiva slamavläggningsbassängerna. Bra sedimenteringsbassänger skall ta bort c:a 50 - 65% av totala suspenderade partiklarna, och 65 - 75% av sedimenterbara partiklarna. Närmare detaljer kan erhållas ur (2) kap. 11, (1) kap. 2, (17).

### 2.2.3. Aktiv - slamprocess.

Aktiva - slamprocessen består av två huvudenheter, dels en luftningsbassäng dels en sekundärsedimenteringsbassäng. Utflödet från primärsedimenteringsbassängen passerar in i



Figur 2:1 Biologiskt reningssystem

Källa: Gustaf Olsson, m.fl.(3); J.O. Bryant Jr., L.C. Wilcox (12).

luftningsbassängen där det kommer i kontakt med ett koncentrerat slam av mikroorganismer (aktivt slam) och luft. Det aktiva slammet förbrukar lösliga organiska material (BOD reducering), och omvandlar det till inaktiva produkter ( $\text{CO}_2$  och vatten) och fast cellmassa.

I bassängen sker en kraftig omrörning, vilket medför att utflödet från luftningsbassängen utgörs av en homogen vätskeblandning. Detta utflöde passerar nu in i sekundärsedimenteringsbassängen vilken har två funktioner. Dels skall den ge ett rent utgående vattenflöde, dels erhålla en mycket hög koncentration på det biologiska slammet (aktivt slam).

Mängden tillsatt syre, luftningsgraden och kvantiteten slam från sekundärsedimentering som leds tillbaka till luftningsbassängen, är de viktigaste reglermöjligheterna för att erhålla bra BOD borttagning, samt ett slam som sjunker och förtjockas bra.

#### 2.2.4. Slambehandling.

Avvattning och torkning är fysiska operationer använda för att reducera fukthalten i slammet, och göra detta mera lätthanterligt. Andra sätt att minska vattenmängden i slammet är genom vacuum filtrering eller centrifugering.

#### 2.3. Driftstekniska problem.

Önskemålet är att erhålla ett reningsverk utrustat med noggrann mätapparat och reglerutrustning, och som med hjälp av detta möjliggör en högre grad av rening. Möjligheterna begränsas för närvarande starkt av den ringa kännedom om de ingående processerna, konstruktion av mätutrustning, kraftiga variationer i inflöde och suspenderade ämneskoncentrationen, störningar etc. Dessutom uppstår problemet var i bassängen eventuella mätare bör placeras, för att ge de mest signifikanta upplysningarna om tillståndet i bassängen.

På grund av ovannämnda osäkerheter framgår svårigheten att konstruera on - line utrustning, med dess behov av ordentliga styr - och regleralgoritmer. För djupare kännedom se (3), kap.4.

### 3. Primärsedimentering.

På basis av koncentrationen och på partiklarnas tendens att påverka varandra, indelas partiklarnas sätt att sedimentera i fyra klasser. Oftast inträffar mer än en sedimenteringstyp samtidigt.

På grund av turbulens både lokalt och i hela bassängen, uppkommer diffusion, vilket ger en rörelse som motverkar partiklarnas sedimentering.

#### 3.1. Olika slag av sedimentering.

Som ovan nämnts är antalet sedimenteringstyper fyra och utgöres av:

a. Diskret sedimentering hänför sig till den sedimentering, som sker då diskreta partiklar i en lösning med låg koncentration sjunker. Partiklarna sjunker individuellt, och ingen påverkan inträffar mellan närliggande partiklar. Detta innebär att ingen förändring i varken storlek, form eller densitet sker.

En annan förekommande benämning på denna typ av sedimentering, är fri sedimentering.

Vid denna sedimenteringstyp kan partiklarnas rörelse fullständigt beskrivas av Newton's och Stokes' klassiska rörelselagar för sfäriska partiklar.

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot D^2}{18 \cdot \mu}$$

v = partikelhastigheten

$\rho_s$  = suspenderade ämnenas densitet (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  = vattnets densitet (kg/m<sup>3</sup>)

g = tyngdacc. (m/sek<sup>2</sup>)

$\mu$  = viskositeten (kg/m sek)

D = sfäriska partiklarnas diameter (m)

Exempel på denna typ av sedimentering utgör sandpartiklar i vatten.

b. Om partiklarna har tendens att påverka varandra genom sammanslagning till större enheter, talar man om flocksedimentering. Partiklarnas massa ökar, vilket medför en större sjunkhastighet. Sannolikheten för flockning varierar beroende på flödes-

hastighet, bassängdjup, partikelkoncentration, partikelstorlek och kanske viktigast, partiklarnas uppehållstid i bassängen. Att bestämma nödvändiga parametrar är inte möjligt genom matematisk analys, utan dessa fås genom sedimenteringsexperiment i laboratorium.

Experimentet tillgår i en behållare ( 2,5m hög, 15 cm diam.), som fylls med en enhetlig välblandad slamlösning. Temperaturen bör under försöket vara konstant, för att undvika termiska effekter. Genom att ta prover på lösningen vid olika tidpunkter och höjder, erhålles diagram enl. fig. 3.1. Nivåkurvorna anger i procent borttagna suspenderade ämnen av initialkoncentrationen.

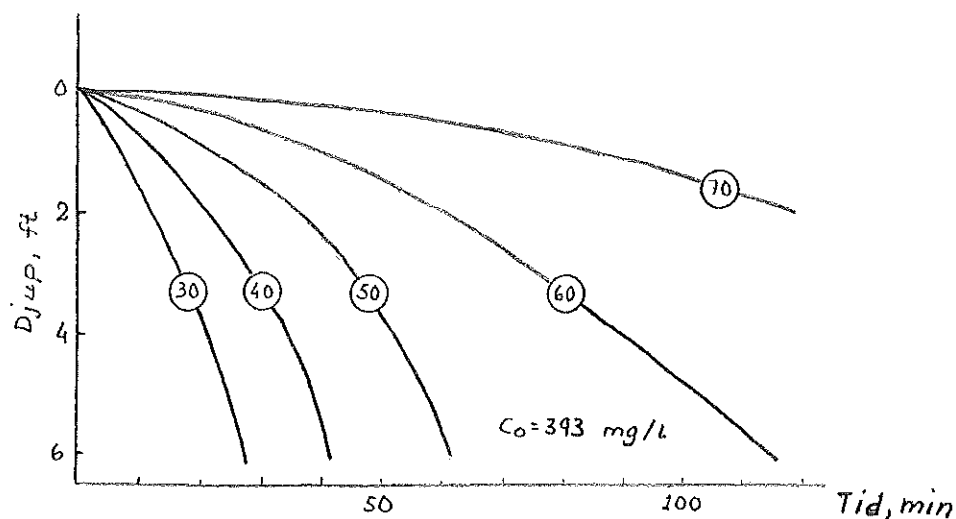


Fig. 3.1. Nivåkurvor angivande procent borttagna suspenderade ämnen av initialkonc.

Kurvorna får efter en tid en konstant lutning, dvs. konstant sedimenteringshastighet, beroende på att ett jämviktstillstånd inträffar mellan flockbildning och flockuppbyggnad.

Flocksedimentering är den dominerande sedimenteringstypen vid primärsedimentering.

c. Vid aktivt slam och då koncentrationen av suspenderade ämnen överstiger c:a 500 mg/l, talar man om zonsedimentering.

Partiklar flockas, men hindras dessutom att sedimentera av närliggande partiklar. Därvid har partiklarna en benägenhet att bibehålla inbördes avstånd och sedimentera i form av zoner. Sjunkprofilerna uppvisar här en flackare struktur, dvs. smuts-



partiklarna har lägre hastighet, än för floccsedimentering. Ekvationer erhålles på experimentell basis.

d. Längst ner i en bassäng är koncentrationen av suspenderade partiklar, slam, så hög att ytterligare sedimentering endast kan inträffa genom kompression. Detta kallas kompression-sedimentering.

För beräkningar av sedimenteringshastighet vid zon - och kompressionssedimentering, utnyttjas Kynch-teori. Denna grundar sig på att sedimenteringshastigheten endast beror av den lokala koncentrationen. Se vidare art. (16) och (14). Mer detaljer om kap. 3.1. se (1), kap. 2 och (2), kap. 8.

### 3.2. Turbulent diffusion.

Turbulent diffusion utgör benämningen på den process, som vill utjämna koncentrationsskillnader i bassängen. De komplicerade matematiska uttryckena som beskriver diffusionstermens utseende, dvs. framför allt diffusionskonstantens utseende, finns beskrivet i art. (15). Härav framgår att diffusionskonstanten är proportionell mot vätskeflödets hastighet.

#### 4. Dynamiska modellen - Massflödesekvationen.

Primärsedimenterings modellen bygger i första hand på Bryant och Wilcox (12) och på Schainker och Wells (19) artiklar. I referens (13) finns en inventering och korta omdömen av primärsedimenterings modeller i litteraturen. Tyvärr har författaren inte hunnit få tag på de artiklarna i hänvisningarna.

Med utgångspunkt ifrån referenserna har uppställts en modell över dynamiken hos en primärsedimenteringsanläggning. Modellen har gett en uppsättning tidsberoende, olinjära, kopplade, partiella differential-ekvationer med sedimenterbara suspenderade ämneskoncentrationen (SS), som tillståndsvariabler, kallad massflödesekvationen.

##### 4.1. Kontinuitetsekvationen.

Allmänna kontinuitetsekvationen lyder enligt ref. (4)

$$\operatorname{div} \bar{i} + \frac{\partial n}{\partial t} = h \quad (1)$$

$i$  = strömmen av SS. ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{tim}$ )

$h$  = utifrån tillförd mängd SS. ( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{tim}$ )

$n$  = koncentrationen av SS. ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Ekvation (1) innebär att materien d.v.s. suspenderade ämnen är oförstörbara och massjämvikt, kontinuitet råder. Anta att Fick's lag (2) gäller för  $i$ . Då erhålles ekvation (3) ur (1) och (2).

$$\bar{i} = -D \cdot \nabla n \quad (2)$$

$$-D \Delta n + \frac{\partial n}{\partial t} = h \quad (3)$$

$D$  = diffusionskonstant ( $\text{m}^2/\text{tim}$ )

Genom en enkel omskrivning fås ekvation (3) på den form som den utnyttjas på

$$\frac{\partial n}{\partial t} = h + D \Delta n \quad (4)$$

Dessutom måste, naturligt nog, kontinuitetsekvationen vara uppfylld för vätskeflödet. Alltså inom ett godtyckligt begränsat område i bassängen är

$$Q_{IN} = Q_{UT} \quad (5)$$

$Q_{IN}$  = inkommande vätskeflöde ( $m^3/tim$ )

p.s.s.  $Q_{UT}$ .

Dynamiken bestäms sålunda väsentligen av massbalansekvationer av Typen (4) och (5). Innan massflödesekvationerna, modell-ekvationerna formuleras i 4,4 - 4,8 definieras ett antal variabler i 4,2 och redovisas modellapproximationer i 4,3.

#### 4.2. Indelning av sedimenteringsbassäng.

Betrakta ett rektangulärt vertikalplan av en sedimenteringsbassäng, vilken indelats i sektioner I,J, enligt fig. nedan. Denna indelning bestämmer hur termerna i massflödesekvationerna skall indiceras.

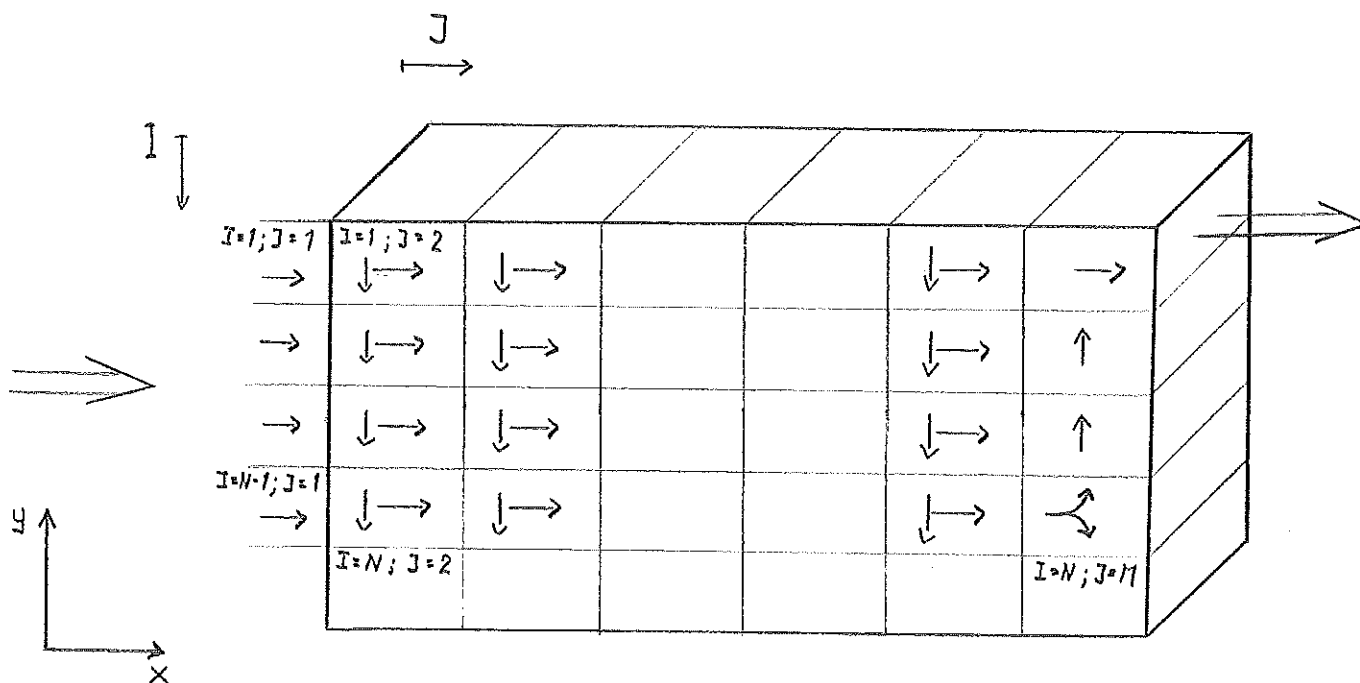


Fig. 4.1. Bassängindelning. I,J sektionsindex. Massflöden dessutom inritade.

Smutsvattnet rinner in i bassängen från vänster i inläppningszonen, och rinner ut ur bassängen genom den översta sektionen till höger, utsläppningszon.

Beteckningar har införts i

Insläppningszon  $I = 1, N - 1; J = 1.$

Slamzon  $I = N; J = 2, M.$

Utsläppningszon  $I = 1; J = M.$

Egentliga bassängen omfattar alltså  $I = 1, N; J = 2, M.$

Förhållandena i varje sektion antas konstanta, d.v.s. föroreningsgraden av suspenderade ämnen, flödes hastigheten etc.

Detta har gjorts för att på välkänt sätt komma approximera partiella differentialekvationer med rumsdifferenser. Se vidare 4.4.

En ytterligare utveckling av modellen kan göras genom att man antar att det är flera olika partikelklasser inom varje sektion. Och förhållandena för de olika partikelklasserna är konstanta. Mer om detta i 4.5.

#### 4.3. Modellapproximationer.

Nedanstående approximationer antas gälla för modellen:

— Laminärt vätskeflöde, med speciellt vätskeflödesmönster i sista kolonnen,  $J = M.$

— Vätskans (vattnets) egenskaper är konstanta, d.v.s. inget beroende av temperatur, pH etc.

— Partiklarna är tillräckligt lätta för att erhålla en hastighetskomponent, som är lika stor som vätskans (vattnets).

— Massflödesekvationen får speciellt utseende vid randen. Randvillkoren presenteras nedan.

— Partiklarnas sjunkhastighet (se fig. 3.1. eller 5.3.) är oberoende av inkoncentrationen i bassängen, och det är floccsedimentering.

— Till en början försummas diffusionstermen.

#### 4.4. Massflödesekvationen utan diffusionsterm.

Med utgångspunkt från kontinuitetsekvationen ekv. (4) där

diffusionstermen försummas, och ekv. (5) för vätskeflödet uppställes i 4.4. första steget till vår modell av primärsedimenteringsanläggningen. Senare i 4.7. införes en diffusionsterm.

Observera skillnaden mellan snarlika definitioner. Vätskeflöde har dimensionen M<sup>3</sup>/tim, och utgör som ordet säger en transport av vätska. Flödet har också dimensionen M<sup>3</sup>/tim, men är en transport av partiklar. Flödet multiplicerat med koncentrationen av suspenderade ämnen ger massflödet, dimension (mg/l) • M<sup>3</sup>/tim = g/tim.

Tillståndsvariablerna för systemet är koncentrationen av suspenderade ämnen (eng. suspended solids) i resp. sektion SS(I,J). Dess dimension är som antytts ovan mg/l. Index I,J hänför sig till fig. 4.1.

Eftersom både massjämvikt och vätskebalans skall råda samtidigt i varje sektion är ekv. (10) och (11) uppfyllda samtidigt.

$$\frac{\partial SS(I,J)}{\partial t} \cdot V(I,J) = MF(I,J)_{IN} - MF(I,J)_{UT} \quad (10)$$

$$Q(I,J)_{IN} = Q(I,J)_{UT} \quad (11)$$

$Q(I,J)_{IN}$ ,  $Q(I,J)_{UT}$  = vätskeflöde in resp. ut ur en sektion I,J. (M<sup>3</sup>/tim)

$MF_{IN}$ ,  $MF_{UT}$  = massflöde in resp. ut ur en sektion I,J. (mg/l • M<sup>3</sup>/tim)

$SS(I,J)$  = suspenderade ämneskoncentrationen i sektion I,J. (mg/l).

$V(I,J)$  = volymen av sektion I,J. (M<sup>3</sup>).

Tillsammans med vidstående figur över positiva flödesriktningar i en sektion I,J kan ekv. (10) skrivas om, och första uppställningen av massflödesekvationen erhålls.

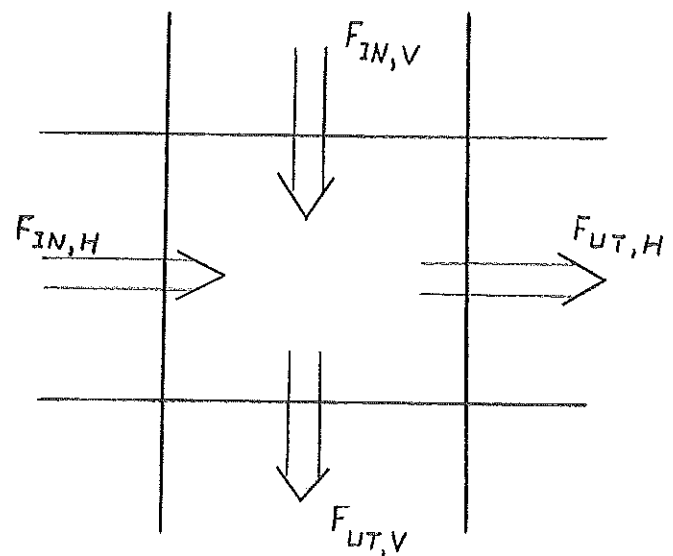


Fig. 4.2. Positiva flödesriktningar till elev. (12).

$$\frac{\partial SS(I,J)}{\partial t} \cdot V(I,J) = F_{IN}(H) \cdot SS(I,J-1) + SS(I-1,J) \cdot F_{IN}(V) - (F_{UT}(H) + F_{UT}(V)) \cdot SS(I,J) \quad (12)$$

$F_{IN}(H)$  = Horisontalflöde in i en sektion I,J. (M<sup>3</sup>/tim).

p.s.s.  $F_{IN}(V)$ ,  $F_{UT}(H)$  och  $F_{UT}(V)$ .

$SS(I,J)$  = Suspenderade ämneskoncentrationen i en sektion (mg/l)

$V(I,J)$  = Sektionsvolym (M<sup>3</sup>). Hädanefter konstant = V,  $\forall$  I,J.

Horisontalflödena  $F_{IN,H}$  och  $F_{UT,H}$  är proportionella mot vätskeflödet i bassängen, enligt approximation i 4.3.

$$F_{IN}(H) = F_{UT}(H) = Q_{IN}/N-1 = FLH \quad (13)$$

$Q_{IN}$  = vätskeflöde i bassängen. (M<sup>3</sup>/tim)

$N$  = max I. Se fig. 4.1.

$FLH$  = flöde horisontellt i en sektion.

Vertikalflödena är proportionella mot partiklarnas sjunkhastighet. Se vidare 4.5.

$$F_{IN}(V) = F_{UT}(V) = v(I,J) \cdot A(I,J) \quad (14)$$

$v(I,J)$  = partiklarnas sjunkhastighet i en sektion. (M/tim)

$A(I,J)$  = horisontell sektionsyta. (M<sup>2</sup>). Hädanefter konstant = A.

#### 4.5. Partiklarnas sjunkhastigheter.

På partiklarnas sjunkhastigheter, v, finns inte några matematiska uttryck, utan v antas bero av partiklarnas uppehållstid i bassängen enligt nedanstående fig. 4.3. Jfr. likheten med fig. 3.1.

I 3.1. har redogjorts för hur man erhåller diagram enligt fig. 3.1. Ur figur 4.3. erhålles:

Område 1:	T (0,a)	v = 0.54 M/TIM
Område 2:	T (a,b)	v = 1.20 M/TIM
Område 3:	T (b,c)	v = 1.80 M/TIM
Område 4:	T (c,∞)	v = 2.40 M/TIM

T = uppehållstid. (TIM).

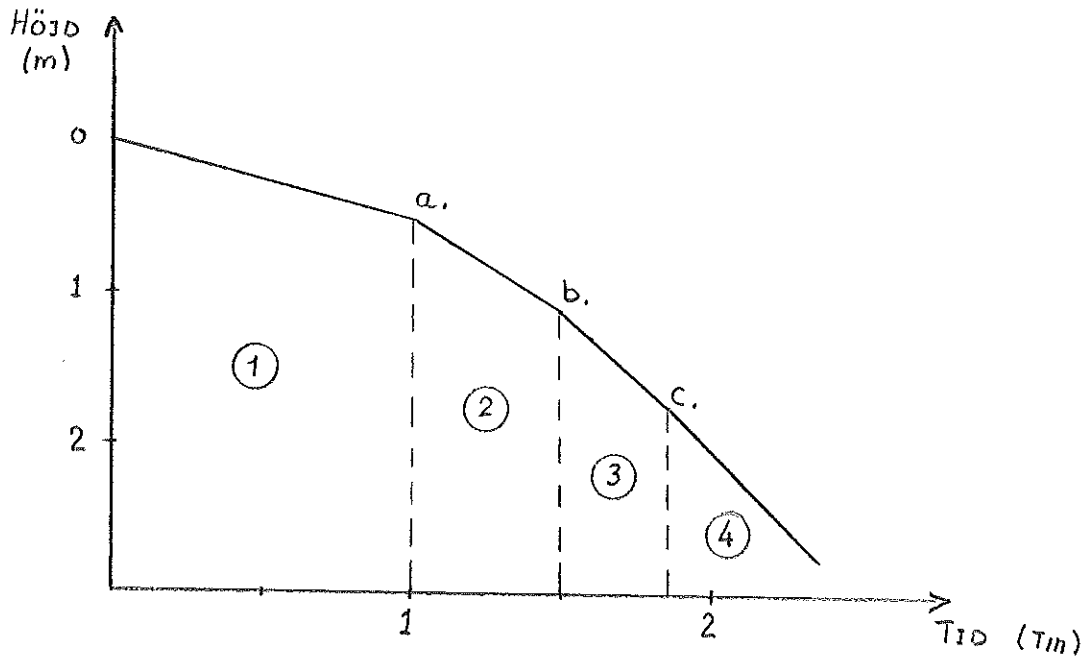


Fig. 4.3. Partiklarnas sjunkhastighet som funktion av dess uppehållstid.

Kurvorna i den ovanstående figuren utgör den 50%-iga sjunkkurvan i fig. 3.1., linjärt approximerad genom fyra punkter. Hastigheten i område 1 antas gälla en halvtimme längre än i fig. 3.1. Beroendet på antagandet att smutsvattnets oro i inloppet har en varaktighet av  $c:a$  en halvtimme. Därefter följer partiklarna sjunkkurvan i fig. 3.1. Resonemanget är medvetet grovt, men har vid simuleringar visat sig ge bättre koncentrationsfördelning i bassängen.

#### 4.6. Randvillkor.

Ekvationerna (13) och (14) är de generella flödesuttrycken vid laminärströmning men vid ränderna gäller speciella villkor.

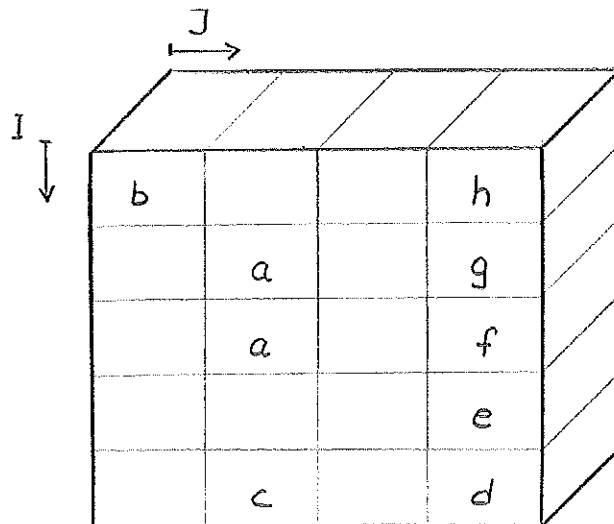


Fig. 4.4. Flödeskomponenterna i olika punkter i bassängen.

a. Inre sektionerna:  $2 \leq I \leq N-1; 2 \leq J \leq M-1$ .

Då gäller ekv. (13) och (14).

b. Sektionerna vid bassängytan:  $I = 1; 2 \leq J \leq M-1$ .

Då gäller ekv. (13) och (14) men  $F_{IN}(V) = 0$ .

c. Nästan hela slamzonen:  $J = N; 2 \leq J \leq M-1$ .

Ekv. (14) gäller men  $F_{UT}(V) = 0$ , och  $F_{UT}(H) = F_{IN}(H) = 0$ .

Då  $J = M$ , d.v.s. sista kolonnen har antagits ett speciellt flödesmönster. Jfr. artikel (11).

d.  $I = M; J = M$ .  $F_{IN}(H) = F_{UT}(H) = 0; F_{UT}(V) = 0$ .

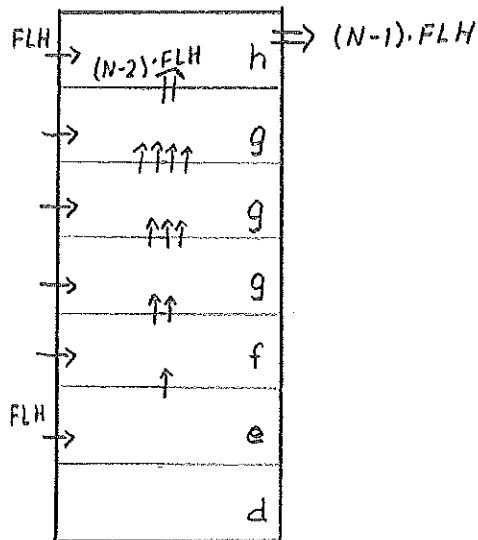
En viss procent av partikelmängden i sektionen ovanför (c), antas sedimentera,  $(1 - sk)$ , det medför att  $F_{IN}(V) = (1 - sk) \cdot FLH$ . Egentligen skall  $(1 - sk)$  hänföra sig till suspenderade ämneskoncentrationen, men det är enklare att programtekniskt låta det ingå i flödeskomponenterna.

e.  $I = N-1; J = M$ .

$$F_{IN}(H) = FLH; F_{UT}(H) = 0$$

$$F_{IN}(V) = (-sk) \cdot FLH; F_{UT}(V) = (1 - sk) \cdot FLH$$





f.  $I = N-2; J = M.$

$$F_{IN}(H) = FLH; F_{UT}(H) = 0$$

$$F_{IN}(V) = -FLH \cdot 2; F_{UT}(V) = -sk \cdot FLH.$$

g. 2  $I \leq N-3; J = M.$

$$F_{IN}(H) = FLH; F_{UT}(H) = 0$$

$$F_{IN}(V) = -FLH \cdot (N-I)$$

$$F_{UT}(V) = -FLH \cdot (N-1-I)$$

Fig. 5.5. Kolonn  $J = M.$

Vätskeflöden, storlekar och riktningar.

h.  $I = 1; J = M.$

$$F_{IN}(H) = FLH \quad F_{UT}(H) = FLH \cdot (N-1) = Q_{IN}$$

$$F_{IN}(V) = 0 \quad F_{UT}(V) = -FLH \cdot (N-2)$$

Dessa flödeskomponenter d - h gäller om  $N \geq 5.$  OM  $N < 5$  kan liknande flödeskomponenter mycket enkelt tas fram p.s.s.

Jfr. artikel (19) med författarnas sätt att behandla sista kolonnen.

Eftersom en del flödestermerna blir negativa i sista kolonnen, kommer även massflödesekvationerna att modifieras, ty flödet skall multipliceras med suspenderade ämneskoncentrationen från den sektionen som flödet kommer ifrån, för att erhålla massflödet.

Exempelvis i sektionen  $I = N-2; J = M, (f).$

$$\frac{\partial SS(I, J)}{\partial t} \cdot V = SS(I, J-1) \cdot F_{IN}(V) + SS(I, J) \cdot F_{IN}(V) -$$

$$-SS(I+1, J) \cdot F_{UT}(V)$$

P.s.s. för de andra sektionerna d, e, g, och h.

#### 4.7. Turbulent diffusion.

Det i avsnitt 4.3. antagandet om enbart laminärströmning är ej tillfyllest. Hänsyn måste tagas <sup>dels</sup> till vätskans cirkulerande rörelse i bassängen dels till den lokala omrörningen som sker. I den aktuella modellen tages endast hänsyn till den lokala omrörningen, kallad turbulent diffusion, inte minst p.g.a. den

ringa tillgången till mätdata. Orsaken härtill är att kunskap krävs om vätskans hastighet i varje punkt i bassängen, för att erhålla ett matematiskt uttryck av diffusionstermen.

Diffusionstermen ekv. (4) är endast beroende av koncentrationsdifferenserna mellan bassängens olika sektioner, samt diffusionskonstanten, vilken alltså är densamma i hela bassängen.

$$\frac{\partial SS(I,J)}{\partial t} = \frac{1}{V} \left( \sum_1^4 SS(I,J) \cdot F \right) + D \cdot \frac{\partial^2 SS(I,J)}{\partial y^2} \quad (20)$$

SS(I,J) = suspenderade ämneskonc. (mg/l).

F = flöden. (M<sup>3</sup>/tim).

D = diffusionskonstant. (M<sup>2</sup>/tim).

Diffusionen i x-led försummas, eftersom dess inverkan är mycket mindre än vätskeflödets påverkan på partiklarna. Av samma anledning är det ingen diffusion i bassängens sista kolonn.

Enligt S. Gothardsson (20) bör diffusionskonstanten ha ett värde mellan 0,5 - 7 M<sup>2</sup>/tim.

#### 4.8. Partikelklasser.

En utvidgning av modellen kan ske genom att införa flera partikelklasser. Detta är en naturlig utvidgning beroende på partiklarnas differenser i storlek, densitet, form etc.

Exempelvis kan vi ur fig. 3.1. indela partiklarna i tre klasser, vilka var för sig sedimenterar enligt 30, 50 resp. 70%-iga kurvan.

Massflödesekvationen blir då enligt nedan,

$$\frac{\partial S(I,J,K)}{\partial t} = \frac{1}{V} \left\{ S(I,J-1,K) \cdot F_{IN}(H) + S(I-1,J,K) \cdot F_{IN}(V) - S(I,J,K) \cdot (F_{UT}(H) + F_{UT}(V)) \right\} + D^1 \cdot N \cdot \frac{\partial^2 SS(I,J)}{\partial y^2} \quad (30)$$

$$N = \left| \frac{S(I,J,K)}{SS(I,J)} \right| \quad (31)$$

$$SS(I,J) = \sum_{k=1}^P S(I,J,K) \quad (32)$$

$$D = D' \cdot N \quad (33)$$

$D$  o  $D'$  = diffusionskonstant. ( $M^2/tim$ ).

$N$  = normeringskonstant.

$S(I,J,K)$  = suspenderade ämneskonc. i en sektion och en partikelklass,  $k$ . ( $mg/l$ ).

$SS(I,J)$  = lokala suspenderade ämneskonc. ( $mg/l$ ).

$P$  = totala antalet partikelklasser. Observera att diffusionen beror på lokala suspenderade ämneskoncentrationen.

Genom att införa ett antal partikelklasser ( $P$  st), blir modellen betydligt mer komplex. Antalet kopplade linjära differentialekvationer blir då  $N \cdot (M-1) \cdot P$  istället för  $N \cdot (M-1)$  stycken, och som vanligt svårt med mätdata.

Denna utvidgning av modellen hinner icke behandlas inom ramen för detta examensarbete.

#### 4.9. Slamzon.

Slamzonen i ett reningsverk blir aldrig lika hög som en sektionshöjd i vår modell. Detta beror på att slammet ej tilläts växa hur mycket som helst p.g.a. kontinuerlig slamborttagning. Modellslamzonen innehåller däremot både ett hårt slamskikt och en sedimenteringszon, vilket försvarar vårt införande av diffusion från slamzonen.

Bortförande av slam, sker i modellen genom momentan slamborttagning. Som ordet utsäger, så sker vid bestämda tidsintervall att suspenderade ämneskonc., ( $SS$ ), i understa sektionen ( $I=N$ ) sättes lika med näst understa sektionens.

Kontinuerlig slamborttagning i ett reningsverk innebär, att skovlar hela tiden vandrar i en cirkelbana i bassängen och bortför slam från botten. Se (2) sid 450.

Momentana slamborttagningen är alltså ett försök att modelltekniskt åskådliggöra den kontinuerliga slamborttagningen. Vi har i vår modell använt ett momentant slamborttagningsintervall av en timma, vilket vi anser motsvara den vanligast förekommande kontinuerliga slamborttagningen i ett reningsverk. Detta begränsar alltför kraftiga förändringar i slamborttagningsintervall p.g.a. ökad omrörning orsakad av skovlarnas större hastighet.

#### 4.10. Sammanfattning av modellekvationen.

Till utgångspunkt för massflödesekvationen ligger ekvation (4) och (5) som säger att i en sektion av bassängen måste det råda både massbalans och vätskebalans samtidigt.

Dessutom har en hel rad approximationer satts upp. Modellen behandlas med endast en partikelklass. Ekv. (20), (30), (33) ger massflödesekvationen på den form som den utnyttjas i dataprogrammet.

$$\frac{\partial S(I,J,1)}{\partial t} = \frac{1}{V} \left\{ S(I,J-1,1) \cdot F_{IN,H} + S(I-1,J,1) \cdot F_{IN,V} - S(I,J,1) \cdot (F_{UT,H} + F_{UT,V}) \right\} + D \cdot \frac{\partial^2 SS(I,J)}{\partial y^2} \quad (40)$$

$S(I,J,1)$  = suspenderade ämneskonc. av partikelklass 1 i sektion I,J. (mg/l).

$F$  = flödeskomponenter. (M<sup>3</sup>/tim).

$SS(I,J)$  = totala suspenderade ämneskonc. i sektion I,J. (mg/l)

$V$  = en sektions volym. (M<sup>3</sup>).

$D$  = diffusionskonstant. (M<sup>2</sup>/tim).

$SS(I,J)$  =  $S(I,J,1)$  eftersom endast en partikelklass.

Massflödesekvationen används ändå på formen enligt ovan, ty dataprogrammet är förberett för fler partikelklasser.

## 5. Problemlösningsmetodik.

I 5.1. redogörs för hur diffusionstermen approximeras och hur massflödesekvationen löses med och utan diffusionsterm. Schematisk flödesplan till dataprogrammet ges i 5.2. och en detaljerad lösningsgång av dataprogrammet presenteras i 5.3.

### 5.1. Lösningsmetodik.

Utan diffusionsterm har massflödesekvationen en enkel form, se ekv. (40).

$$\begin{aligned}
 S(I, J, 1, \overset{(-S(I, J, 1, T))}{TID + T}) &= \int_0^T \frac{1}{V} \left\{ S(I, J-1, 1, TID) \cdot F_{IN, H} + \right. \\
 &+ S(I-1, J, 1, TID) \cdot F_{IN, V} - S(I, J, 1, TID) \cdot (F_{UT, H} + F_{UT, V}) \left. \right\} dt = \\
 &= \int_0^T \frac{\partial S(I, J, 1, TID)}{\partial t} dt \quad (50)
 \end{aligned}$$

Den går att integrera upp enkelt direkt, eftersom alla ingående termerna är konstanta. Endast värden ifrån föregående samplingsintervall behövs, vilket medför att kopplingen mellan differentialekvationerna ej blir något problem.

Differentialekvationerna löses lämpligen kolonnvis. Ekv. (50)  $\Rightarrow$

$$S(I, J, 1, TID+T) = S(I, J, 1, TID) + \frac{\partial S(I, J, 1, TID)}{\partial t} \cdot T \quad (51)$$

$S(I, J, 1, TID)$  = suspenderade ämneskonc. i en sektion och en partikelklass vid tiden = TID (mg/l).

T = samplingsintervallet. (tim).

Övriga beteckningar enligt kap. 5.

Med diffusionsterm blir massflödesekvationen mer komplex och mer avancerade lösningsmetoder behövs för att lösa differentialekvationerna.

Diffusionstermen approximeras med differenser med avseende på rumsvariabeln y. Det ger en diffusionsterm enligt nedan,

$$D \cdot \left[ SS(I-1, J) - 2 \cdot SS(I, J) + SS(I, J) \right] / (\Delta y)^2 \quad (52)$$

$$\Delta y = BD/N \quad (53)$$

SS = total suspenderade ämneskonc. (mg/l)

y = approx av steglängden i y-led. (M)

BD = bassängdjup. (M)

N = totala antalet sektionrader.

Även diffusionstermen innehåller konstanter, men det går ändå inte att integrera upp massflödesekvationerna direkt, utan ett iterativt förfarande måste tas till. Eftersom

$$\frac{\partial S(TID)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 S(TID)}{\partial y^2}, \text{ värmeledningsekvationen,}$$

inte innehåller någon tidsförskjutning, måste man iterera för att fullständigt lösa ekvationen med avseende på både rums- och tidsvariablerna, och alltså p.s.s. för massflödesekvationen.

Se Numerisk Analys AK (4) och FK (5), kap. 10 resp. kap. 3. Ekv. (52) och (53) insatt i (40) ger den differentialekvation som skall lösas.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(I, J, 1, TID+T)}{\partial t} = & \frac{1}{V} \left\{ S(I, J-1, TID) \cdot F_{IN, H} + S(I-1, J, 1, TID) \cdot F_{IN, V} + \right. \\ & \left. + S(I, J, 1, TID) \cdot (F_{UT, H} + F_{IN, V}) \right\} + \frac{D}{(BD/N)^2} \cdot \left\{ SS^n(I-1, J, TID+T) - \right. \\ & \left. - 2 \cdot SS^n(I, J, 1, TID+T) + SS^n(I+1, J, TID+T) \right\} \quad (54) \end{aligned}$$

Beteckningar enligt ovan.

n = n:te iteration.

Ekv. (54) gäller då  $n \geq 2$ . Om  $n = 1$  utnyttjas  $SS(I, J, TID)$  i diffusionstermen, som startvärde.

Ekv. (54) löses genom att integrera den, och sedan att sätta in de nya värdena i ekvationen igen (iteration), varefter iterationen avslutas då  $\left| SS^{n+1}(I, J, TID+T) - SS^n(I, J, TID+T) \right| \leq \alpha$ .

Vid numerisk lösning av ovanstående ekv. (54) uppkommer två problem. Först måste hänsyn tas till maximala flödeshastigheten contra samplingstiden. Detta problem, uppkommer i sista kolonnen andra raden (med våra data till programmet), ty här

är genomströmningshastigheten störst för partiklarna. Under ett samplingsintervall får partiklarna ej hinna strömma genom en hel sektion, såsom de nu är uppställda. Villkoret medför att  $T \leq 0.15 \text{ TIM}$ .

Andra problemet utgör ett stabilitetsproblem som uppkommer vid iteration av differensekvationen. Enligt Numerisk Analys (6) kap. 3 måste kvoten  $\frac{D \cdot T}{(\Delta y)^2} \leq \frac{1}{2}$  i värmeledningsekvationen,

för att erhålla stabilitet. Författarna har funnit att värdet av kvoten  $\frac{D \cdot T}{(\Delta y)^2}$  bör understiga 0.25, för att erhålla en

acceptabel konvergenshastighet vid lösandet av massflödesekvationen.

### 5.2. Blockschema till dataprogrammet.

Detta är en kort förklaring till dataprogrammets funktion och uppbyggnad.

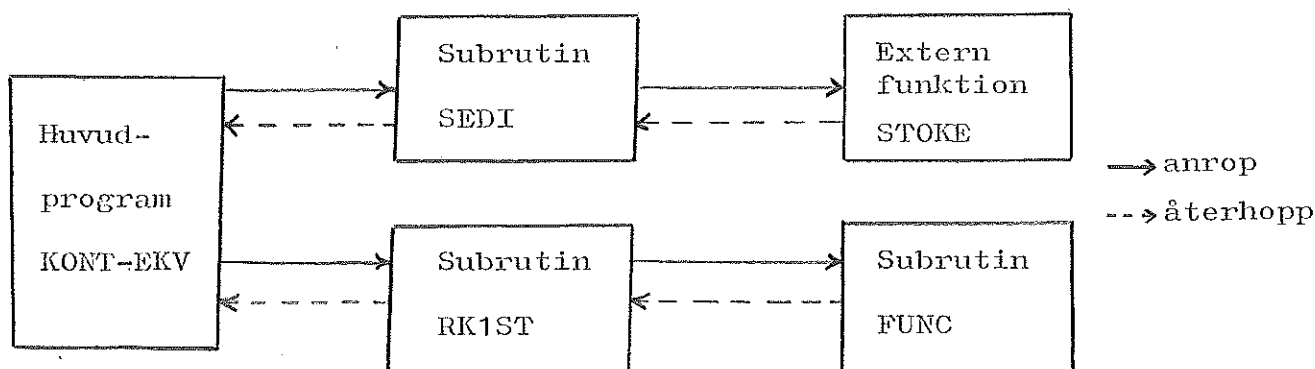


fig. 5.1. Blockschema över dataprogrammet.

I subrutin SEDI sker beräkning av flödeskomponenterna till storlek och riktning enl. ekv. (43) och (14). För uträkning av de vertikala flödeskomponenterna anropas den externa funktionen, STOKE vars värde erhållits ur fig. 4.3.

Subrutinen FUNC innehåller uttryckena på massflödesekvationerna (40). Dessa tillsammans med de från SEDI kända flödena och från huvudprogrammet, KONT-EKV, bekanta suspenderade ämneskonc.

användes för att i subrutinen FUNC beräkna massflödesekvationens värde. Detta värde hämtas av RK1ST för beräkning av ekvationens värde vid nästkommande samplingstid. Huvudprogrammet KONT-EKV utgör den samordnade länken och sköter inläsning, undanlagning, utskrift etc.

### 5.3. Lösningssgång i dataprogrammet.

I detta avsnitt beskrivs punktvis hur dataprogrammet är uppbyggt och hur detta skall lösas. Se även programhuvudet till KONT-EKV.

#### Inläsningsdel.

- I inläsningsdelen (a:2) löses de variabler in som finns speciellt markerade i programhuvudet (a:1). Inlästa värden skrives genast ut.

#### Beräkningsdel.

- I beräkningsdelen beräknas först sektionens flödet, FLH, sektionens yta, volym. Tiden = 0.
- L är en räknare som avgör hur många bassängutskrifter som skall skrivas ut på varje sida. Om  $N > 8$  endast 2 st/utskriftssidor, annars 3 st.
- MI - variabeln ger variabelutskrift, ritar upp bassängprofilen.
- TS bestämmer när slamborttagningen sker.
- PLOTT = TID ger utskrift MPLOTT avgör utskriftsintervall.
- Satserna 21 och 22. Uppstarten av programmet sker genom att alla SS-konc. sätts lika med S0. Dessutom  $SNY = S$  så att iteration är möjlig, eftersom det behövs jämförelsevärden vid iteration.

#### Stora looperna; 23 - 39

- Nya SS-koncentrationerna beräknas  $S(TID+T)$ . Genom anrop av SEDI erhålles flödeskomponenterna, som RK1ST använder vid uppintegrationen av massflödesekvationen.
- Totala SS-konc. adderas upp, eftersom den användes vid iteration av diffusionen.
- Härfter itereras värdens på SS-koncentrationerna för en hel kolonn, tills dess att två på varandra följande värden uppfyller iterationstesten ITEST.



- Om alla bassängens värden accepteras av ITEST, läggs SNY→S.

#### Utskrift.

- Om utskrift önskas som multipel av samplingsintervallet, kommer vi till sats 50. Här testas först om utskrift skall ske vid just denna tidpunkt, i så fall hoppa till sats 240, och återkopp sker till sats 60 där ny utskriftstid (PLOT) bestämmas.
- Här efter testas i sats 70 om slamborttagning skall ske.
- I sats 71 - 90 utföres slamborttagning och den nya slamborttagningstiden TS, beräknas.
- Hoppa till sats 200.
- Till sats 150 kommer vi om utskrift önskas före, efter och mellan den momentana slamborttagningen.
- Om TS1 = TID sker utskrift, dvs. hoppa till sats 240.
- Är TS = TID sker slamborttagning i satserna 161 - 170.
- Sats 200 testas om den maximala simuleringstiden överskridits.
- Sista delen av programmet upptar satserna som bestämmer utseendet av utskriften. Är M, dvs. antalet kolonner större än 13, komprimeras utskriftsrutorna m.a.p. bredden för att kunna beredas plats.

#### SEDI.

- I SEDI bestämmas flödeskomponenterna genom att tester utföres på I- och J- värdena, detaljer se kap. 4.

#### FUNC.

- FUNC bestämmer utseendet på differentialekvationen, varvid behövliga tester utföres på flödestecknet.

#### STOKE.

- STOKE beräknar vertikala sjunkhastigheten. Se fig. 4.3.

## 6. Simuleringar.

I kap. 6.1. bestäms modellens slutgiltiga form och de ingående parametrarnas värden. Simuleringar gjorda på öppna och slutna systemet redovisas i kap. 6.2. resp. 6.3.

En enkel processidentifiering görs i kap. 6.4. också. I detta kap. 6 kallas suspenderade ämneskoncentration för *susphalt, eller SS-konc.*

### 6.1. Parameterbestämningar.

Som vägledning för variabelbestämningar ligger uppgifter i referenser om utgående "susphalten" relativt ingående, artikel (17) med sifferuppgifter om suspenderade ämneskoncentrationen i en hel bassäng samt intuition.

Från början bestämdes i representativa värden på en del parametrar, såsom

bassänglängd, BL = 70 m

bassängdjup, BD = 4 m

bassängbredd, BB = 6m

ingående susphalt, SO = 300 mg/l, samt

ingående flöde QIN = 300 m<sup>3</sup>/TIM.

Alla dessa värden medför en uppehållstid omkring 4,5, tim. Parametern SK sättes till 0.50.

En del körningar gjordes för att erhålla en bra bassängsindelning. N bestämdes till 6 och M till 9.

Nästa steg bestod i att se hur diffusionskonstanten påverkar modellen. Med utgångspunkt ifrån test 1,2,3 och 4 (Appendix C) valdes diffusionskonstanten till, D = 3.60 m<sup>2</sup>/TIM.

Dessutom om D vore 0.0 skulle det inte vara meningsfullt att styra utgående susphalten med slamborttagning.

I och med valet av D har vi också valt samplingstiden till högst T = 0,025 tim, eftersom kvoten  $D \cdot T / (\Delta y)^2$  bör vara mindre än 0,25, enligt överläggningarna i kap. 4, 5. Det enda som återstår att bestämma är ett värde på slamborttagningsintervall. Ur test 5, 6 och 7 (Se Appendix C) samt resonemanget i kap. 4.9. valdes slamborttagningsintervallet till en gång per timme.

Modellen är alltså känslig för både valet av diffusionskonstant och slamborttagningsintervall.

simulering	störning	figur över			
		utgående SS-konc.	nivåkurvor	utskrifter	
10	steg	-QIN	B:1	B:2	C:3
11		-SO(1)	B:3	B:4	C:4
12		QIN - SO(1)	B:3	-	C:5
13	puls	-QIN	B:6	B:7	C:6
14		-SO(1)	B:8	B:9	C:7
15	sinus	-QIN	B:10	B:11	C:8
16		-SO(1)	B:12	B:13	C:9
17		QIN -SO(1)	B:14	-	C:10

fig. 6.2. Simuleringar, figurer och diagram. B,C hänvisning till Appendix B och C.

### 6.2.1. Stegstörning.

Ur simulering 10, fig. B:1, syns att utgående "susphalten" ökar direkt, eller nästan, mot stegstörningen i inflödet. Stegstörning i QIN, innebär minskad uppehållstid.

Systemet m.a.p. inflödet verkar ganska trögt, med en stigtid  $T_Q \approx 1.5$  tim. Det förefaller att vara ett 1:a eller 2:a ordningens system. De streckade linjerna visar stegets inverkan på "susphalten" i femte bassängkolonnen. Svängningarna i dessa stegsvar beror på slamborttagning. Dessa svängningar syns ej, eller endast obetydligt, i de två översta sektionerna. I fig. B:2 konstateras att framför allt de översta nivålinjerna lyfts upp.

Stegstörning i inkommande "susphalt", simulering 11, B:3, B:4, ger en något annorlunda bild av systemet m.a.p. SO(1). Systemet har en tidsfördröjning  $T_P \approx 3.0$  tim och en stigtid  $T_{SO} = 2.5$  tim, dvs. något trögare än vid ändring av QIN.

Även här verkar ett 1:a eller 2:a ordningssystem att fungera men med tidsfördröjning också. Angående de streckade linjerna, se simulering 10. Eftersom det blir svängningar i susphalten för de inre och undre sektionerna p.g.a. slamborttagning i bassängen, kommer inte några styrningar att göras därifrån. Nivåkurvorna, B:4, lyfts upp betydligt, och stora koncentrationer i bassängens understa sektioner erhålles.

Stegstörning med  $SO(1)$  verkar att påverka utgående susphalten mer än QIN.

Vid simulering 12, fig. B:5, har pålagts både en stegstörning i  $SO(1)$  och QIN samtidigt. I jämförelse med föregående två simuleringar syns att det har helt annat stegsvar och alltså inte är linjärt. Superpositionsprincipen gäller ej.

### 6.2.2. Pulsstörning.

Simulering 13, fig. B:6 och B:7, ger ett snabbt svar då en puls av QIN pålägges.

Positiva flanken på pulsen verkar att ge ett impulssvar från ett system av 2:a ordningen, medan modellen uppfattar negativa flanken som ett negativt steg med avklingningstid  $\approx$  stigtid. Där förefaller det alltså acceptabelt med en 1:a ordningens överföringsfunktion. Nivåkurvan, B:7, visar att pulsen slår igenom kraftigt på susphalten i bassängen.

Simulering 14, fig. B:8 och B:9. Här har vi ett mycket mjukare pulssvar än i simulering 13. Diskussionen om positiva, negativa flanken, avklingningstid och överföringsfunktion, se ovan simulering 13. I fig. B:9 ser vi att modellen inte är lika känslig för pulser i ingående susphalt,  $SO(1)$ , som i ingående vätskeflöde, QIN.

### 6.2.3. Sinusstörning.

Dygnsvariationerna av QIN,  $SO(1)$  och  $SS(1,M)$  kan approximeras till tre sinuskurvor, se fig. 2.1. Därför pålägges QIN och  $SO(1)$  som sinusstörningar.

I simulering 15, fig. B:10 och B:11, ses att utgående susphalten minskar direkt, alltså ingen tidsfördröjning. Maximum och minimum i  $SO(1)$  inträffar efter c:a 3 tim (motsv.  $\frac{\pi}{4}$  fasförskjutning) resp. 5 tim (motsv.  $0.4 \cdot \pi$ ) efter max och min i QIN. Med hänsyn till den i simulering 10 angivna stigtiden är fasförskjutningen för stor. Den beräknas till omkring  $\pi/8$  (motsv. 1,5 tim) om 1:a ordningens system enligt ekv. (45) antas gälla. Nivåkurvorna, fig. B:11, uppvisar stor följsamhet i hela bassängen mot sinusstörningar.

Svaret till sinusstörningen:  $S0(1)$ , simulering 16, fig. B:13 ger en liknande bild som vid stegsvarssimuleringen. Jfr. simulering 10 och 11.

Det är dels tidsfördröjning dels verkar systemet m.a.p.  $S0(1)$  trögare än systemet m.a.p. QIN. Maximum och minimum i  $SS(1,M)$  inträffar c:a 7 tim (motsv.  $0.6 \cdot T$ ) efter max och min i  $S0(1)$ . Stigtiden och tidsförskjutningen, som är angiven i simulering 11, borde ge en tidsförskjutning på knappt 5,5 tim (motsv.  $0.5 \cdot T$ ). Liksom i simulering 15 har vi en större fasförskjutning än modellen i kap. 5.2.4. ger i nivåkurvornas utseende, fig. B:13, har stor likhet med de i simulering 15.

I simulering 17, fig. B:14, pålägges sinusstörningar i både ingående vätskeflöde och ingående susphalt samtidigt. Framför allt storleken av QIN avgör tidsförskjutningen i sinussvaret, se fig. B:14. Liksom i simulering 12 kan vi dra slutsatsen att systemet inte är linjärt.

### 6.3. Reglering av utgående suspenderade ämneskonc. med slamborttagning.

Liknande simuleringar som gjorts på öppna systemet, göres nu på det återkopplade slutna systemet, i avsikt att förbättra utgående konc. då systemet påföres störningar. Den enda möjligheten som står till buds, är att reglera slamborttagningsintervallet, inom vissa gränser. Se diskussionen i 4.4.

Reglering utföres m.a.p. utgående SS-konc. samt inkommande vätskeflöde och SS-konc. Några regleringar grundade på slamzonen eller inre sektioner i bassängen har ej gjorts p.g.a. svårigheter att finna en lämplig mätvariabel, eftersom slamborttagningen ger upphov till svängningar. Se fig. B:1 och B:3.

#### 6.3.1. Stegstörning.

I simulering 18, fig. B:16 pålägges samma stegförning som i simulering 10. Samtidigt med att störningen pålägges, minskar slamborttagningsintervallet från en hel till en halv timme, dvs. inkommande flöde reglerar systemet, P-reglering.

Minskningen i utgående susphalt uppgår till 25%.

Simulering 19, fig. B:17. Reglering utföres på utgående susphalten. Om  $SS(1,M) > 110$  mg/l minskar vi slamborttagnings-

intervallet till 1 ggr i halvtimmen. Med reglering fås 50% minskning av stegstörningens påverkan av utgående susphalt. Effektivast med ökad slamborttagning då vi har stegstörning i ingående susphalt.

### 6.3.2. Pulsstörning.

I simulering 20, fig. B:18, kan pulsen i QIN starta regleringen, dvs. öka slamborttagningen. Sedan "finregleras" med utkoncentrationen, SS(1,M). Här existerar en form av framkoppling och återkoppling. Från simulering 20 ses att det inte är möjligt att få bort topparna på utgående susphalten genom ökad slamborttagning medan däremot totala mängden smuts minskas i utloppet. Det är ju klart eftersom det dröjer ett tag innan den ökade slamborttagningen märks på utloppet. Men den tiden <sup>är</sup> större än stigtiden för pulsen.

Däremot i simulering 21, fig. B:19 reglerar vi endast på SS(1,M) eftersom det finns en tidsfördröjning i systemet, vars beroende av QIN inte är helt känt.

Eftersom pulssvaret här är mer flackt än i simulering 20, hinner den ökade slamborttagningen slå igenom ordentligt och uppnår dels mindre totalmängd smuts i utloppet dels mindre susphalt. Även här verkar det alltså effektivare med ökad slamborttagning än i föregående simulering. Möjligheten att ha framkoppling finns även här men då måste man bättre känna till tidsfördröjningen.

### 6.3.3. Sinusstörning.

I simulering 22, fig. B:20, har det pålagt sinusstörningar i både SO(1) och QIN samtidigt, och regleringen består även nu i att minska slamborttagningsintervallet.

Här också är slamborttagningen en reglermöjlighet.

## 6.4. Insignal - utsignal samband.

Anta att modellen är linjär av 1:a ordningen, och superpositionsprincipen gäller enligt

$$Y_{su}(s) = G_Q(s) U_Q(s) + G_{SO}(s) U_{SO}(s) \quad (40)$$

där:

$G_Q$  = systemets överföringsfunktion för ingående vätskeflödet, QIN.

$G_{SO}$  = systemets överföringsfunktion för ingående "susphalt", SO(1).

$U_Q$  = ingående vätskeflöde, QIN.

$U_{SO}$  = ingående "susphalt", SO(1).

$Y_{SU}$  = utgående "susphalt", SS(1,M).

Från simulering 10 ( $U_{SS} = 0$ ) och simulering 11 ( $U_Q = 0$ ) görs en identifikation av överföringsfunktionerna, där

$$G_Q(s) = k_Q \cdot \frac{1}{sT_Q+1} \quad (41)$$

$$(41) \Rightarrow h_Q(t) = \frac{U_Q}{Q} (1 - e^{-t/T_Q}) \quad (42)$$

$$G_{SO}(s) = k_{SO} \frac{e^{-s \cdot T_F}}{s \cdot T_{SO} + 1} \quad (43)$$

$$(43) \Rightarrow h_{SO}(t) = k_{SO} (1 - e^{-(t-T_F)/T_{SO}}) \quad (44)$$

Identifiering ger  $j$

$T_Q$	= 1,5 tim
$T_{SO}$	= 2,5 tim
$T_F$	= 3,0 - 2,5 tim
$k_Q$	= 0,2 (mg/l) tim/m <sup>3</sup>
$k_{SO}$	= 0,4

Vid nollnivån gäller; QIN = 300 m<sup>3</sup>/tim  
 SO(1) = 300 mg/l  
 SS(1,M) = 10<sup>4</sup> mg/l

Med insatta värden blir (40),

$$Y_{SU} = \frac{0.2}{s \cdot 1,5 + 1} \cdot U_Q + \frac{0.4 \cdot e^{-3,0 \cdot s}}{s \cdot 2,5 + 1} \cdot U_{SO} \quad (45)$$

En jämförelse med simuleringarna 10-12, 13-14 och 15-17, ger att,

- a) behövs minst 2:a ordningens system.
- b) superpositionsprincipen gäller ej, dvs. ej linjära system.

## 7. Summeringar.

I denna rapport har uppställts en matematisk modell, som beskriver det dynamiska beteendet av suspenderade ämneskoncentrationen som funktion av både tid och rum. Målsättningen har varit att med denna dynamiska modell tillsammans med valda parametrar ge en representativ beskrivning av en rektangulär primärsedimenteringsanläggning. Parametrarna är tagna ur litteraturen och anpassade så att en realistisk suspenderad ämneskoncentrationsprofil i bassängen erhålls, vid stationaritet.

### 7.1. Slutsatser.

Simuleringar på det öppna systemet har gjorts med pålagda puls, steg och sinusstörningar i inkommande flöde och inkommande suspenderade ämneskoncentration, för att analysera modellen.

Analysen gav att;

- Systemet är ej linjärt, superpositionsprincipen gäller ej.
- Som svar på störningar i ingående suspenderade ämneskoncentrationen <sup>utgående susp. ämneskonc.)</sup> beskrives som en tidsfördröjning av storleksordning 3 tim och ett andra ordningens system med en stor tidskonstant på drygt 2 tim.
- Som svar på störningar i ingående vätskeflöde kan utgående suspenderade ämneskoncentrationen beskrivas som ett andra ordningens system med en tidskonstant på drygt 2 tim.
- Tidskonstanter och förstärkning varierar med störningens amplitud och form.

Författarnas slutsats blir att den matematiska modellen fungerar tillfredställande, men vidarutveckling av modellen behövs genom att:

- Införa fler partikelklasser, dvs. differentiera partiklarnas sjunkhastigheter.
- Ge diffusionskonstanten ett bättre verifierat värde, t.o.m. göra den rumsberoende.
- Bättre beskriva momentan slamborttagning och slamzonen.
- Skaffa realistiska mätvärden.



Regleringar har gjorts på systemet med avsikt att minska störningarnas inverkan på utgående suspenderade ämneskoncentrationen. Reglering sker genom ändring av slamborttagningsintervallet.

Syntesen gav att:

- Reglering effektivast då störningar i inkommande suspenderade ämneskoncentrationen.
- Svårt eliminera störningar i inkommande vätskeflöde.
- Både fram- och återkoppling kan behövas vid reglering av primärsedimenteringsbassäng, exempelvis mät inkommande suspenderade ämneskoncentrationen och/eller inkommande vätskeflöde och utgående suspenderade ämneskoncentrationen.

En annan reglermöjlighet vore att tillsätta kemikalier i primärsedimenteringsbassängen för att därigenom öka flockningsgraden hos partiklarna dvs. öka sjunkhastigheten. Detta innebär att utgående vattnet blir mindre förorenat med suspenderade ämnen. Just för vätskeflödesvariationer verkar denna reglermöjlighet speciellt förhoppningsfull.

## 7.2. Modellutvidgningar och råd.

Förutom de i 7.1. omnämnda modellutvidgningarna av det öppna systemet finns det en mängd olika saker att vidarestudera;

- Göra en modell för hur kemikalietillsättning i primärsedimenteringsbassängen inverkar på partiklarnas sjunkhastighet.
- Bättre systemidentifieringar av primärsedimenteringen för att därigenom kunna verifiera modellen och pröva bättre regleralgoritmer på dator.
- Nya effektivare regleralgoritmer, genom att pröva andra återkopplingar.

Sist men inte minst vill författarna ännu en gång poängtera det viktiga i att skaffa fram mer och bättre mätdata för att bättre kunna förstå primärsedimenteringsprocessen och därigenom konstatera en mera realistisk modell.

## Referenser.

Böcker: (om reningsverk)

1. Eckenfelder, W.W. Jr (1966) Industrial Water Pollution Control, McGraw-Hill, 1966.
2. Metcalf-Eddy Inc. (1972) Wastewater Engineering, McGraw-Hill.
3. Olsson, G. m.fl. (1972) Control Problems in Wastewater Treatment Plants.

Böcker: (matematiska)

4. Bengtsson, B.E. Ekman, T. (1970) Numerisk Analys allmän kurs, LTH.
5. Numerisk Analys fortsättningskurs, LTH.
6. Nagel, B. (1966) Partiella Differentialekvationer.

Artiklar:

11. Argaman, Y. Kaufman, W.J. (1970) Turbulence and Flocculation. Journal of the Sanitary Engineering Division. ASCE.
12. Bryant, J.O. Jr. Wilcox, L.C. (1972) Real - time Simulation of the Conventional Activated Sludge Process. Paper Joint Automatic Control Conf. P 701 - 716.
13. Bryant, O.B. Jr., Wilcox, L.C., Andrews, J.F. (ej publ.) Wastewater Treatment Plants. Technical Report, Clemson Univ. Clemson, South Carolina.

14. Degrémont, D (1973), Bailey Bros, England.  
Water Treatment Handbook.
15. Dobbins, W.E, Effect of Turbulence zon. Sedimentation  
American society of civil engineers.
16. Hultman, B, (1972) Gravitationsförtjockning. 8:e nordiska  
symposiet om vattenforskning.
17. March, R.P; Haurlin, M.J. (1966) An investigation into  
the Performance of a Full-scale Sedimentation Tank.
18. McLaughlin, R.T. Jr. (1959) The Settling Properties of  
suspensions. Journal of the Hydraulics Division. American  
Soc. of Civil Engineers.
19. Schainker, R.B; Wells, C.H. (1970) Dynamic Modeling and  
Control of Suspended Solids in Clarifiers.  
Paper Joint Automatic Control Conf.P 192-200.
20. Gothardsson, S. LTH institutionen för Vattenbyggnad.  
Personlig korrespondens.

PRIMÄR SEDIMENTERING.  
 FÖRFATTARE ROLAND LARSSON OCH GÖRAN SCHRÖDER.  
 EXAMENSARBETE VÄREN OCH SOMMAREN 1974.

PROGRAM FÖR BERÄKNING AV SUSPENDED SOLIDS KONCENTRATIONEN (SS)  
 I PRIMÄR SEDIMENTERINGS BASSÄNG, MED DYNAMISK MODELL, ENLIGT KAP. 5  
 MASSFLÖDESEKVATIONEN I KAP. 5.  
 DIFF. EKVATION LÖSES MED RUNGE-KUTTA ETT-STEGS METOD (RK1ST).

NÖDVÄNDIGA SUBROUTINER  
 RK1ST (FRÅN PROGRAMBIBLIOTEKET)  
 SEDI  
 FUNC.

NÖDVÄNDIG EXTERN FUNKTION  
 STOKE.

RK1ST INTEGRERAR UPP DIFFERANSEKVATIONEN SOM LIGGER I FUNC.  
 SEDI RÄKNAR UT FLÖDESKOMPONENTERNA I DIFFERANSEKVATIONERNA.  
 KONT-EKV. LÄSER IN PARAMETRAR, BERÄKNAR SS-VÄRDEN, SKRIVER UT ETC.

BETECKNINGAR.

-----

\*           -DETTA TECKEN MEDFÖR ATT VARIABELN SKALL INLÄSAS.

S(I,J,K)        -SS I SEKTION I, J AV PARTIKELKLASS K, VID TID, (MG/L).  
 SO(K)           \*-SS I INSLÄPPNINGSZONEN AV PARTIKELKLASS K.  
 SS(I,J)         -TOTAL SS I EN SEKTION I, J, D.V.S SUMMERAT ÖVER ALLA PART.KL.  
 SNY            -S(TID+T), D.V.S NYA VÄRDEN SOM FAS EFTER EN ITERATION.  
 SOLD(I,J,K)    -S(TID+T), GAMLA SS-VÄRDEN LAGGS UNDAN VID ITERATION.

TID             -AKTUELL TID, (TIM).  
 T               \*-SAMPLINGSINTERVALL.  
 TIDMAX         \*-PROGRAMMET AVBRYTES NÄR TID=TIDMAX.

N,M             \*-MAX I, J BASSÄNG SEKTIONS INDELNING.  
 P               \*-ANTAL PARTIKELKLASSER.  
 VI HAR ANTAGIT ATT N=10, M=15, P=5 MAXIMALT, SE DEKLARATIONERNA.

QIN             \*-INFLÖDE, (M<sup>3</sup>/TIM).  
 BL, BB, BD     \*-SEDIMENTERINGSBASSÄNGENS LÄNGD, BREDD, DJUP.  
 A, V            -EN SEKTIONS HORIZONTELLA YTA RESP. VOLYM.  
 FLH             -HORIZONTELLT VÄTSKEFLÖDE, (M<sup>3</sup>/TIM).  
 SK              \*-PROCENT PARTIKLAR SOM INTE SEDIMENTERAR I SEKTION N-1, M.

TS              -SLAMBORTTAGNING VID TID=TS.  
 NINT            \*-MULTIPEL AV SAMPLINGSINTERVALLET.  
 TSI             -GER UTSKRIFT EN GÅNG MELLAN VARJE MOMENTAN SLAMBORTTAGNING.

MPLOTT=0       \*-MEDFÖR UTSKRIFT FÖRE, EFTER OCH MELLAN SLAMBORTTAGNING.  
 MPLOTT>0      \*-MEDFÖR UTSKRIFT SOM MULTIPEL AV SAMPLINGS INTERVALLET T.

HOPP            -AVGÖR ÅTERHOPPSADRESS, SE SLUTET AV PROGRAMMET.  
 L               -RÄKNARE, SIDFRAMMATARE.

ITER            -ITERATIONSRAKNARE.  
 ITEST           -TESTVARIABEL I ITERATIONEN.

D(K)            \*-TURBULENT DIFFUSIONS KONSTANT I FUNC, (M<sup>2</sup>/TIM).  
 STEP            -DIFFUSIONSTERMENS STEGLÄNGD, ANVÄNDES I FUNC.  
 DT              -DETENTION TIME, UPPEHÅLLSTID, ANVÄNDES I STOKE.

-----

KONT - EKV.

a: 2

```

DIMENSION SINF(5),SE(5),SNY(10,15,5),SOLD(10,15,5)
INIEGER E,P,SIN,SS,SO,HOPP,SNY,SOLD,R
REAL FLOW
COMMON /AREA1/I,J,K,N,M,P,SIN(5),S(10,15,5),D(5),STEP,T
COMMON /AREA2/ FLOW(4,5),SS(10,15),SO(5)
DATA SORT1/6HM3/TIM/,SORT2/4HMG/L/,SORT3/6HM2/TIM/
DATA T1/6H-----/,T2/3H---/,T3/3H--I/,T4/1H-/,T5/1H1/
EXTERNAL FUNC

```

C  
C  
C  
C  
C

INLXSNINGSDEL.

-----

```

READ(5,5) MPLOTT
5 FORMAT ( )
READ (5,6) TIDMAX
6 FORMAT ( )
READ (5,7) N,M,P,T
7 FORMAT (2I2,I1,F5.3)
READ(5,8) (D(K),K=1,P)
8 FORMAT ( )
READ (5,11) QIN,SK,BL,BB,BD
11 FORMAT (F5.0,1X,F4.2,3(1X,F4.1))
READ (5,12) (SO(K), K=1,P)
12 FORMAT (5I4)
READ(5,13) NINT
13 FORMAT ( )
PRINT 14,N,M,P,QIN,SORT1,SK,BL,BB,BD,T
14 FORMAT (1H0,9X,2HN=,I3/10X,2HM=,I3,/10X,2HP=,I3,/
*10X,4HQIN=,F5.0,1XA6/10X,3H5K=,F5.2/
*10X,3HBL=,F5.1,2H M/10X,3HBB=,F5.1,2H M/10X,3HBD=,F5.1,2H M/
*10X,2HT=,F6.3,4H TIM)
DO 16 K=1,P
PRINT 15,D(K),SORT3
15 FORMAT (10X,5HD(K)=,(F4.2,1X,A6))
16 PRINT 17,SO(K),SORT2
17 FORMAT (10X,6HSO(K)=,(I4,1X,A4))
PRINT 18,NINT
18 FORMAT (10X,5HNINT=,I3)
PRINT 19,MPLOTT
19 FORMAT (10X,7HMPLOTT=,I3)
PRINT 20,TIDMAX
20 FORMAT (10X,7HTIDMAX=,F5.1,4H TIM)

```

C  
C  
C  
C  
C

BERXKNINGSDEL.

-----

```

FLH=QIN/(N-1)
TID=0
A=BL*BB/(M-1)
V=A*BD/N
STEP=BD/N
L=5
IF (N.GE.8) L=2
LA=L
MI=M-1
TS=NINT*T
TS1=TS
PLOTT=MPLOTT*T+9.50
DO 21 I=1,N
DO 21 J=2,M
DO 21 K=1,P
21 S(I,J,K)=SO(K)

```

```

DO 22 I=1,N
DO 22 J=2,M
SS(I,J)=0
DO 22 K=1,P
SNY(I,J,K)=S(I,J,K)
22 SS(I,J)=SS(I,J)+S(I,J,K)
HOPP=4
GO TO 240

```

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

HÄR BÖRJAR STORA LOOPEN.

HÄR LAGGS STÖRNINGARNA IN I PROGRAMMET, VID SIMULERINGARNA.

```

23 TID=TID+T
DO 38 J=2,M
DT=(J-1+0.5)*V/FLH
ITER=0
DO 30 I=1,N
DO 25 K=1,P
CALL SEDI (FLH,A,V,SK,DT)
SIN(K)=S(I,J,K)
SINF(K)=FLOAT(SIN(K))
25 CONTINUE
CALL RK1ST (TID,SINF,T,SE,P,FUNC)
SS(I,J)=0
DO 27 K=1,P
SOLD(I,J,K)=SNY(I,J,K)
SNY(I,J,K)=SE(K)
SS(I,J)=SS(I,J)+SNY(I,J,K)
27 CONTINUE
30 CONTINUE

```

C  
C  
C  
C

INGEN DIFF-TERM DA J=M, ALLTSA ITERATION ONÖDIG.  
UCH DA D=0.0.

```

IF (J.EQ.M) GO TO 38
IF (D(1).LE.1.0E-6) GO TO 38

```

C  
C  
C

ITERATION KOLONNVIS, OCH ITERATIONSTESTER.

```

31 ITER=ITER+1
IF (ITER.LE.9) GO TO 33
PRINT 32,TID,I,J
32 FORMAT (10X,4HTID=,F5.2,10X,33HANTAL ITERATIONER AR STÖRRE AN 10,
*5X,2HI=,I2,5X,2HJ=,I2)
GO TO 38
33 DO 34 I=1,N
DO 34 K=1,P
R=SOLD(I,J,K)-SNY(I,J,K)
ITEST=IABS(R)
IF (ITEST.GT.2) GO TO 35
IF (I.EQ.N) GO TO 38
34 CONTINUE
35 DO 37 I=1,N
DO 36 K=1,P
CALL SEDI (FLH,A,V,SK,DT)
SIN(K)=S(I,J,K)
36 SINF(K)=FLOAT(SIN(K))
CALL RK1ST(TID,SINF,T,SE,P,FUNC)
SS(I,J)=0
DO 37 K=1,P
SOLD(I,J,K)=SNY(I,J,K)
SNY(I,J,K)=SE(K)
SS(I,J)=SS(I,J)+SNY(I,J,K)

```

57 CONTINUE  
GO TO 31  
58 CONTINUE

HÄR SLUTAR STORA LOOPEN

DE ACCEPTERADE VARDENA SNY LAGGS I S.

DO 39 I=1,N  
DO 39 J=2,M  
DO 39 K=1,P  
39 S(I,J,K)=SNY(I,J,K)

UTSKRIFTSDEL.  
-----

OM MPLOTT=0, MEDFÖR UTSKRIFT FÖRE, EFTER OCH MELLAN SLAMBORTTAGNING  
OM MPLOTT>0, MEDFÖR UTSKRIFT SOM MULTIPEL AV SLAMINTERVALL

40 IF (MPLOTT-1) 150,50,50

UTSKRIFT SOM MULTIPEL AV SAMPLINGSINTERVALL

50 IF (PLOTT-TID.GT.0.5E-03) GO TO 70

HOPP=1  
GO TO 240

60 PLOTT=MPLOTT\*T+PLOTT  
70 IF (TS-TID.GT.0.5E-03) GO TO 200

SLAMBORTTAGNING

DO 80 J=2,M  
SS(N,J)=SS(N-1,J)  
DO 80 K=1,P  
80 S(N,J,K)=S(N-1,J,K)  
PRINT 90  
90 FORMAT (23X,25HMOMENTAN SLAMBORTTAGNING.)  
TS=TS+NINT\*T  
GO TO 200

UTSKRIFT FÖRE, EFTER OCH MELLAN DEN MOMENTANA SLAMBORTTAGNINGEN

150 IF (TS1-TID.GT.0.5E-03) GO TO 200  
TS1=TS1+NINT\*T\*0.5  
HOPP=2  
GO TO 240

160 IF (TS-TID.GT.0.5E-03) GO TO 200

SLAMBORTTAGNING

DO 170 J=2,M  
SS(N,J)=SS(N-1,J)  
DO 170 K=1,P  
170 S(N,J,K)=S(N-1,J,K)  
TS=TS+NINT\*T  
HOPP=3

```
GO TO 240
C
C
200 IF(TID.GT.TIDMAX) GO TO 420
GO TO 23
C
240 IF(M.GE.13) GO TO 340
C
C
C
UTSKRIFT OM M MINDRE AN 13
IF (L/LA*LA.NE.L) GO TO 252
PRINT 250
250 FORMAT (1H1)
252 IF (HOPP.NE.3) GO TO 260
PRINT 255
255 FORMAT (23X,25HMOMENTAN SLAMBORTTAGNING.)
260 PRINT 265
265 FORMAT(1H0//)
PRINT 270,TID,(T1,T2,E=1,MI)
270 FORMAT(10X,2HT=,F5.2,1X,3HTIM,2X,15(A6,A3))
DO 300 I=1,N
280 PRINT 290,(SS(I,J),J=2,M)
290 FORMAT (23X,1HI,15(I6,2X,1HI))
300 PRINT 310,(T1,T3,E=1,MI)
310 FORMAT (23X,1HI,15(A6,A3))
L=L+1
GO TO (60,160,200,23),HOPP
C
C
C
UTSKRIFT OM M STÖRRE AN 13
340 IF (L/LA*LA.NE.L) GO TO 352
PRINT 350
350 FORMAT (1H1)
352 IF (HOPP.NE.3) GO TO 360
PRINT 355
355 FORMAT (23X,25HMOMENTAN SLAMBORTTAGNING.)
360 PRINT 365
365 FORMAT (1H0//)
PRINT 370,TID,(T1,T4,E=1,MI)
370 FORMAT(10X,2HT=,F5.2,1X,3HTIM,2X,15(A6,A1))
DO 400 I=1,N
380 PRINT 390,(SS(I,J),J=2,M)
390 FORMAT (23X,1HI,15(I5,1X,1HI))
400 PRINT 410,(T1,T5,E=1,MI)
410 FORMAT (23X,1HI,15(A6,A1))
L=L+1
GO TO (60,160,200,23),HOPP
420 STOP
END
```



SUB-1 ; SEDI

SUBROUTINE SEDI (FLH,A,V,SK,DT)

-----

SUBROUTIN FÖR BERÄKNING AV MASSFLÖDEN FÖR VARJE SEKTION OCH  
 VARJE PARTIKELKLASS, ENLIGT MASSFLÖDESEKVATIONEN I KAP. 5.  
 SEDI ANROPAR EXTERNA FUNKTIONEN STOKE, SOM BERÄKNAR VERTIKALA PART.HAST.  
 VIN, VUT-VERTIKAL PARTIKEL HASTIGHET, (M/TIM).  
 FHIN, FHUT-FLÖDE HORIZONTELLT IN OCH UT UR EN SEKTION, (M<sup>3</sup>/TIM).

-----

INTEGER P,SIN,S,SS,S0  
 COMMON /AREA1/I,J,K,N,M,P,SIN(5),S(10,15,5),D(5),STEP,T  
 COMMON /AREA2/ FLOW(4,5),SS(10,15),S0(5)

FHIN=FLH

FHUT=FLH

G=A/V

IF (J.EQ.M) GO TO 55

IF (I.EQ.1.AND.J.EQ.2) GO TO 40

IF (I.LT.N.AND.J.EQ.2) GO TO 50

IF (I.EQ.1) GO TO 20

IF (I.EQ.N) GO TO 30

10 VIN=STOKE (DT)

VUT=STOKE (DT)

GO TO 130

20 VIN=0

VUT=STOKE (DT)

GO TO 130

30 VUT=0

VIN=STOKE (DT)

FHUT=0

FHIN=0

GO TO 130

40 VIN=0

VUT=STOKE (DT)

S(1,J-1,K)=S0(K)

GO TO 130

50 VIN=STOKE (DT)

VUT=STOKE (DT)

S(1,J-1,K)=S0(K)

GO TO 130

C  
C  
C

SPECIELLT FLÖDESMÖNSTER FÖR J=M,UTSLÄPPNINGSZON.

```
55 IF(I.EQ.N) GO TO 60
   IF (I.EQ.1) GO TO 100
   IF (I.EQ.N-1) GO TO 70
   IF (I.EQ.N-2) GO TO 80
   GO TO 90
```

C  
C  
C  
C  
C

SK HANFÖR SIG EJ TILL FLÖDET UTAN TILL SS.MEN FUNC ALLMÄNT SKRIVEN  
DARFÖR MULT.FLÖDET MED SK.  
VIN,VUT-BEROR AV VÄTSKEFLÖDET DA J=M.

```
60 VIN=(1.-SK)*FLH/A
   VUT=0
   FHIN=0
   FHUT=0
   GO TO 130
70 VIN=-(SK*FLH)/A
   VUT=(1.-SK)*FLH/A
   FHUT=0
   GO TO 130
80 VIN=-(2*FLH)/A
   VUT=-(SK*FLH)/A
   FHUT=0
   GO TO 130
90 VIN=-(FLH*(N-1))/A
   VUT=-(FLH*(N-1-I))/A
   FHUT=0
   GO TO 130
100 VIN=0
   FHUT=FLH*(N-1)
   VUT=-(FLH*(N-2))/A
   IF (N.GT.3) GO TO 130
   IF (N.EQ.2) GO TO 110
   VUT=VUT*SK
   GO TO 130
110 FHUT=VUT*SK
   VUT=-(FLH/A)*(1.-SK)
   GO TO 130
```

C  
C  
C

FLÖDES KOMPONENTERNA I HUVUDEKVATIONEN.

```
130 FLOW(1,K)=FHIN/V
     FLOW(2,K)=FHUT/V
     FLOW(3,K)=VIN*G
     FLOW(4,K)=VUT*G
     RETURN
     END
```

FUNK-1; STOKE.

FUNCTION STOKE(DT)

-----  
STOKE ANROPAS IFRAN SUBROUTINEN SEDI.  
STOKE RÄKNAR UT PARTIKELHAST. VERTIKALT ENLIGT DIAGRAM, SE TEXT.  
I VILKEN SJUNKHASTIGHETEN ÄR EN FUNKTION AV UPPEHÅLLSTIDEN.

DT-DETENTION TIME, UPPEHÅLLSTID.  
-----

IF (DT.GT.1.85) GO TO 40  
IF (DT.GT.1.5) GO TO 30  
IF (DT.GT.1.0) GO TO 20

HAST.I OMRÅDE 1, ENLIGT DIAGRAM.

STOKE=0.54  
GO TO 50

HAST.I OMRÅDE 2, ENLIGT DIAGRAM.

20 STOKE=0.86  
GO TO 50

HAST.I OMRÅDE 3, ENLIGT DIAGRAM.

30 STOKE=1.80  
GO TO 50

HAST.I OMRÅDE 4, ENLIGT DIAGRAM.

40 STOKE=2.40  
50 RETURN  
END

## SUBROUTINE FUNC

-----  
 SUBROUTIN FÖR UPPSTÄLLNING AV DIFF.EKV. (MASSFLÖDESEKV.) MED  
 PARAMETRAR IFRAN SEDI.  
 ANROPAS IFRAN RK1ST.

D(K)-TURBULENT DIFFUSIONS KONSTANT.  
 STEP-DIFFUSIONSTERMENS DIFFERANSSTEGLÄNGD.  
 DIFFUSION FRÅN SLAMSKIKTET.  
 -----

INTEGER P,SIN,S,SS,S0  
 DIMENSION W(10),Z(10)  
 COMMON /AREA1/I,J,K,N,M,P,SIN(5),S(10,15,5),D(5),STEP,T  
 COMMON /AREA2/ FLOW(4,5),SS(10,15),S0(5)  
 COMMON /FUNCT/ TE,W,Z

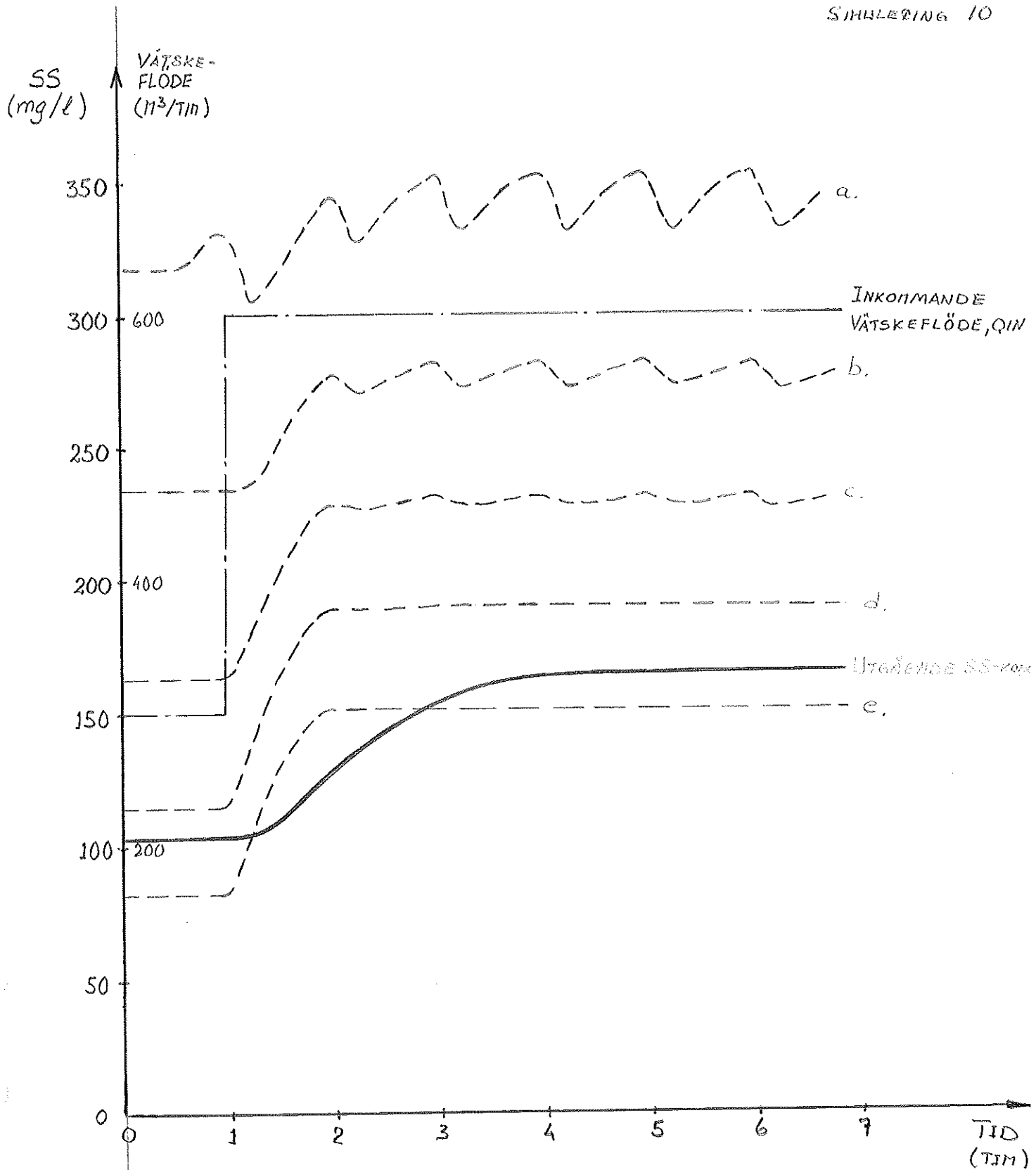
TEST FÖR ATT AVGÖRA OM I=1,N J=2,M-1 ELLER I=N J=M.  
 IF (FLOW(3,1).GE.0.AND.FLOW(4,1).GE.0) GO TO 10

TEST FÖR ATT AVGÖRA OM I=N-1 J=M.  
 IF (FLOW(3,1).LT.0.AND.FLOW(4,1).GE.0) GO TO 20

TEST FÖR ATT AVGÖRA OM I=1 J=M.  
 IF (FLOW(3,1).GE.0.AND.FLOW(4,1).LT.0) GO TO 30

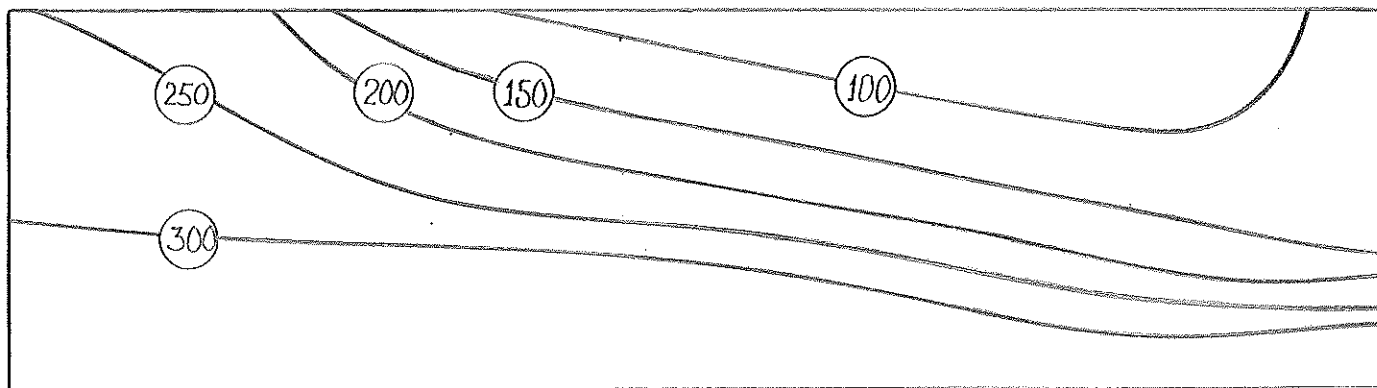
-----  
 OM 1<I<N-1 J=M GALLER DENNA EKVATION.

DO 5 L=1,P  
 5 Z(L) =S(I,J-1,L)\*FLOW(1,L)+FLOW(3,L)\*SIN(L)-  
 \*SIN(L)\*FLOW(2,L)-S(I+1,J,L)\*FLOW(4,L)  
 GO TO 40  
 10 CONTINUE  
 IF (I.EQ.1) GO TO 14  
 IF (I.EQ.N) GO TO 18  
 DO 12 L=1,P  
 DIFF=D(L)\*(SS(I-1,J)-2\*SS(I,J)+SS(I+1,J))/(STEP\*\*2)  
 12 Z(L) =S(I,J-1,L)\*FLOW(1,L)+S(I-1,J,L)\*FLOW(3,L)-SIN(L)\*  
 \*(FLOW(2,L)+FLOW(4,L))+DIFF  
 GO TO 40  
 14 DO 16 L=1,P  
 DIFF=D(L)\*(SS(I+1,J)-SS(I,J))/(STEP\*\*2)  
 16 Z(L) =S(I,J-1,L)\*FLOW(1,L)+S(I-1,J,L)\*FLOW(3,L)-SIN(L)\*  
 \*(FLOW(2,L)+FLOW(4,L))+DIFF  
 GO TO 40  
 18 IF (J.EQ.M) GO TO 30  
 DO 19 L=1,P  
 DIFF=D(L)\*(SS(I-1,J)-SS(I,J))/(STEP\*\*2)  
 19 Z(L) =S(I,J-1,L)\*FLOW(1,L)+S(I-1,J,L)\*FLOW(3,L)-SIN(L)\*  
 \*(FLOW(2,L)+FLOW(4,L))+DIFF  
 GO TO 40  
 20 DO 21 L=1,P  
 21 Z(L)=S(I,J-1,L)\*FLOW(1,L)+SIN(L)\*(FLOW(3,L)-FLOW(2,L)-FLOW(4,L))  
 GO TO 40  
 30 DO 31 L=1,P  
 31 Z(L)=S(I,J-1,L)\*FLOW(1,L)+S(I-1,J,L)\*FLOW(3,L)-SIN(L)\*  
 \*FLOW(2,L)-FLOW(4,L)\*S(I+1,J,L)  
 40 RETURN  
 END

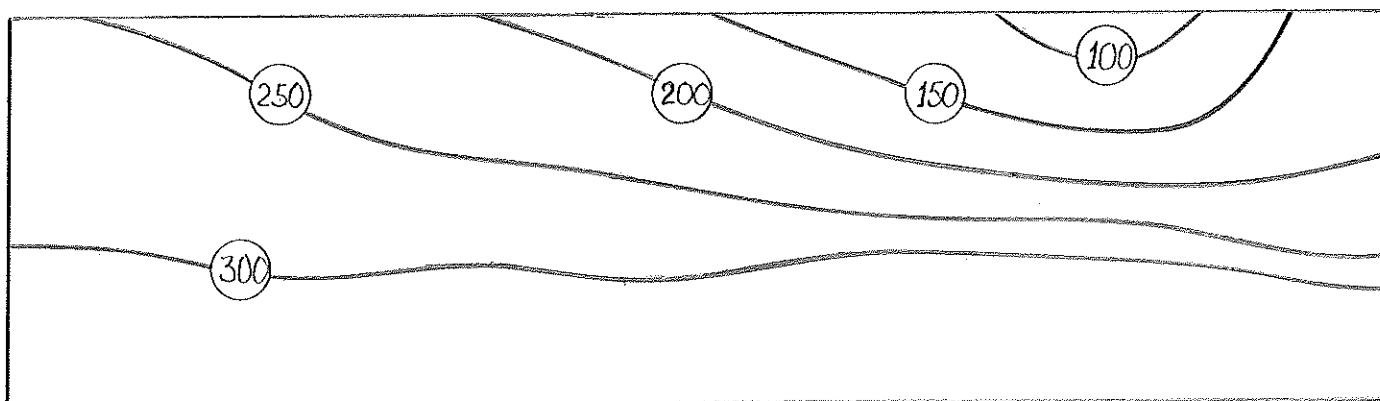


**Fig. B:1** STEGSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ .  
 INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.  
 DE STRUCKADE LINJERNA LYGÖR SS-KONC. I FEMME BASSÅNG-  
 KOLONNEN, DÄR a. ÄR NÄST LÅGERSSTA OCH e. ÖVERSTA RÅDEN.

Fig. B:2 NIVÅKURVOR FÖR STEGSTÖENING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ ,  
300-600 M<sup>3</sup>/TIM. INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.



$T = 1.0 \text{ TIM}$



$T = 6.0 \text{ TIM}$

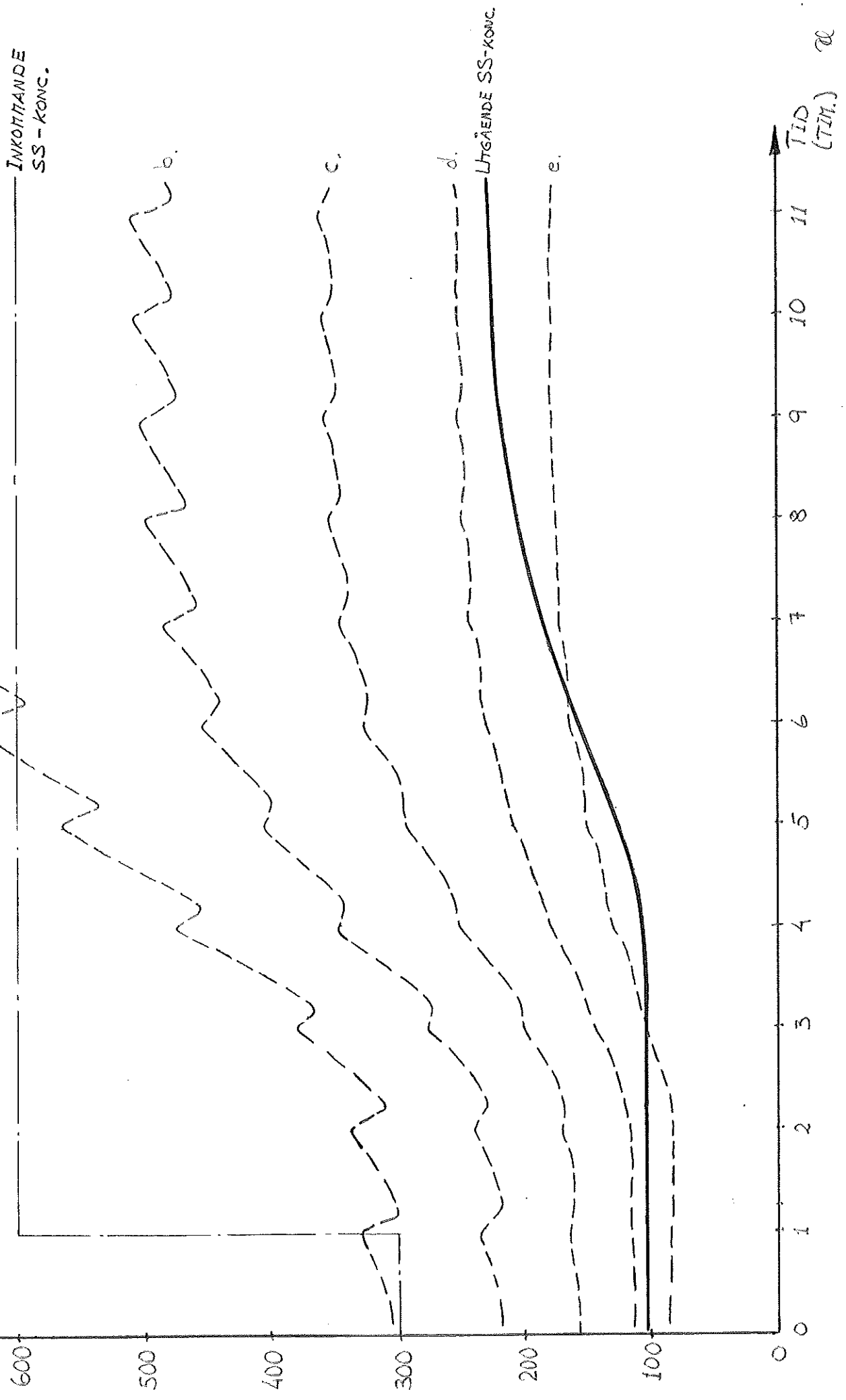
FIG. B.3 STEGSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC. SO(11). VÄTSKEFLÖDET

Q IN ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TIM. DE STRECKADE LINJERNA LITGÖR

SS-KONC. I FEMTE BASÅNGKOLONNEN, DÄR G. ÄR NÄST

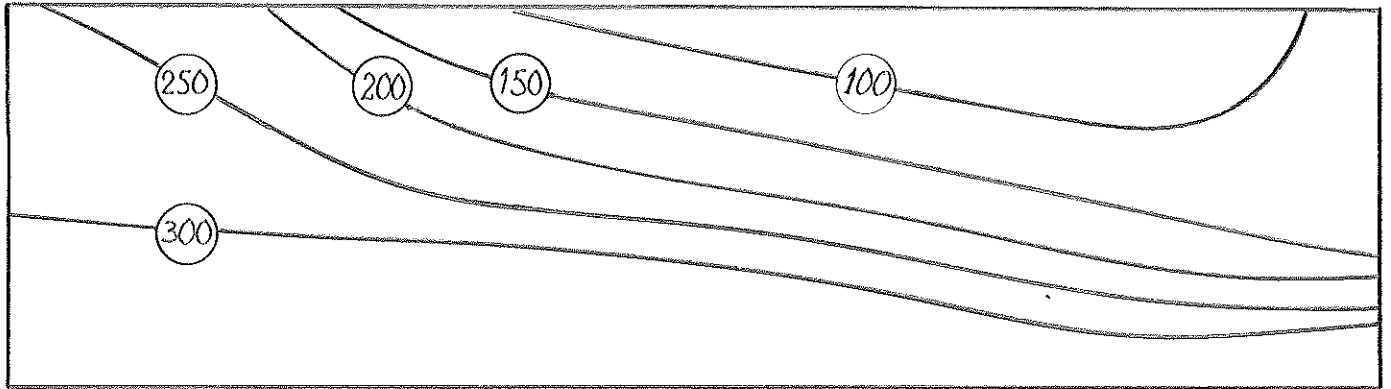
UNDERSTA OCH E. ÖVERSTA RADEN.

SS (mg/l)

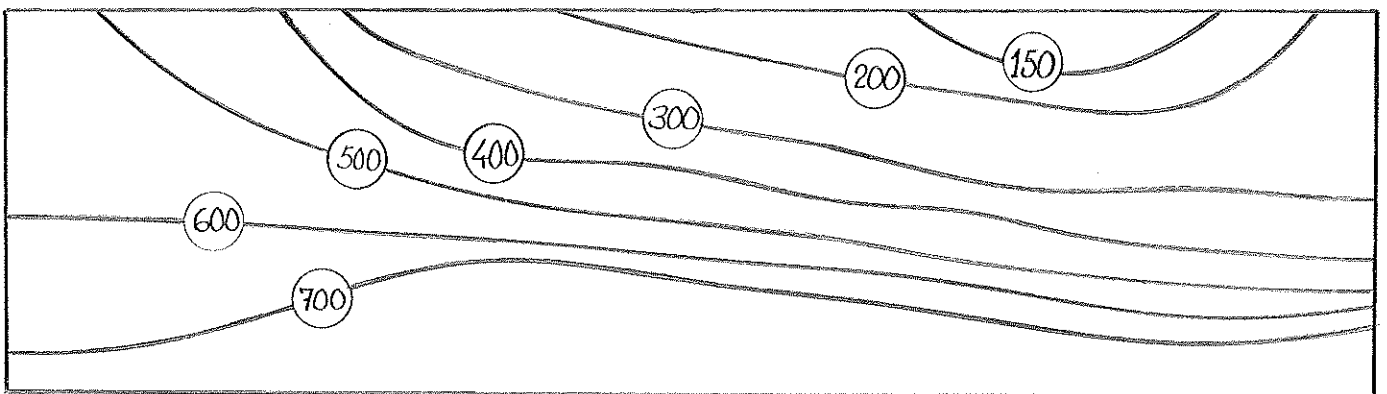


TID (MIN.)

FIG. B:4 NIVÅKURVER FÖR STEGSTÖRNING PÅ INKOMMANDIET SS-KONC., SÖ(1), 300-600 M<sup>2</sup>/L.  
VÄTSKEFLÖDET Q<sub>IN</sub> ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TIM.



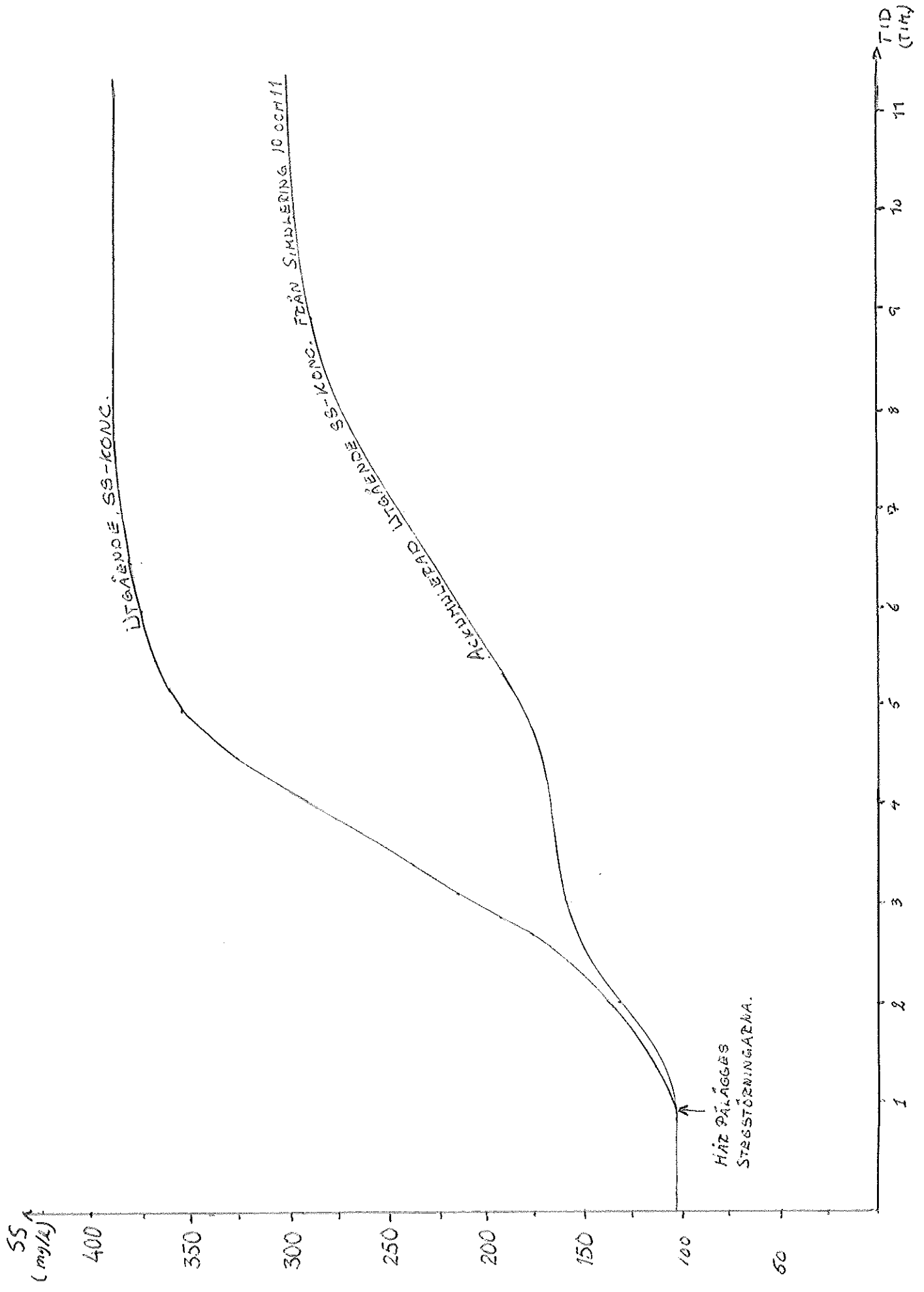
$T = 1.0 \text{ TIM}$



$T = 11.0 \text{ TIM}$



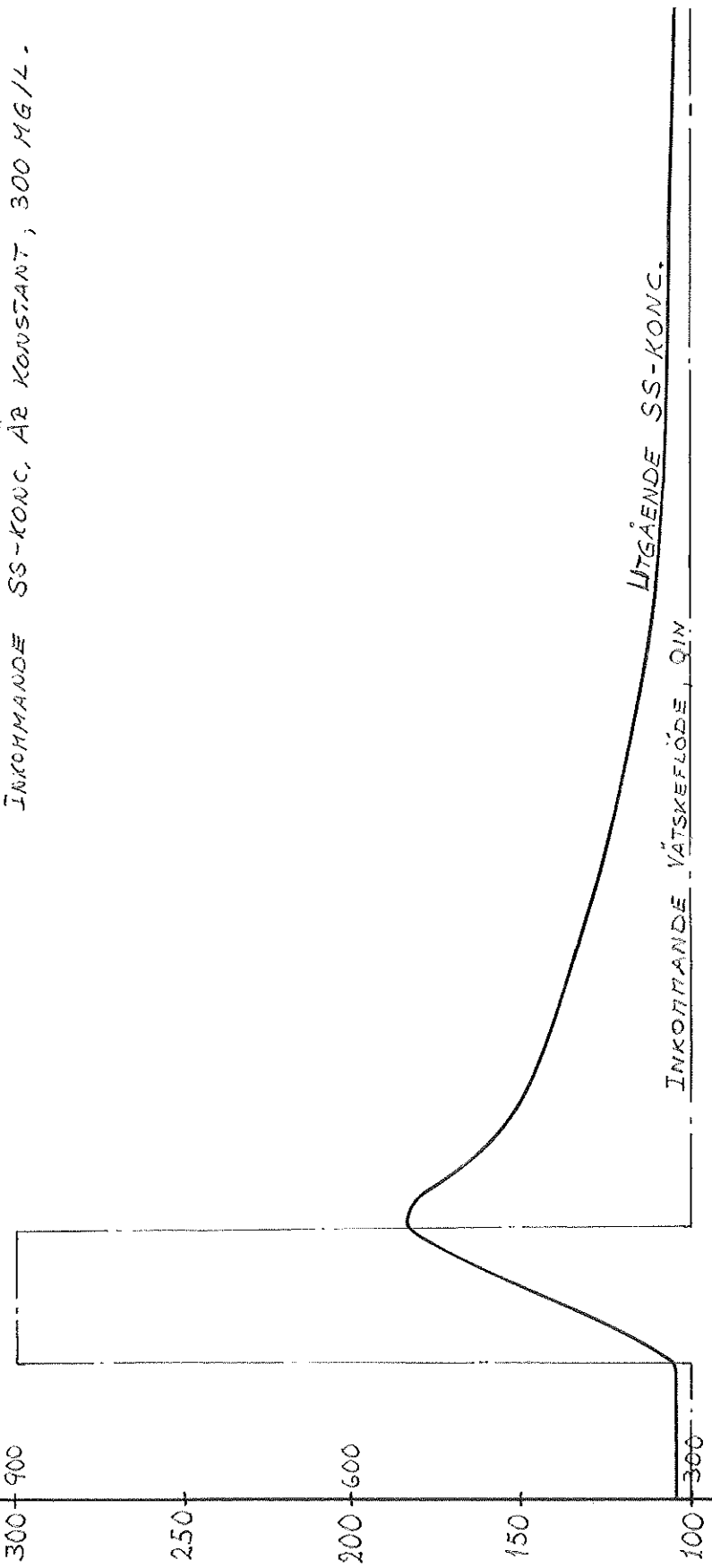
FIG. B:5 STEGSTÖRNING I QIN, 300-600 M<sup>3</sup>/TIM, OCH I SO(1), 300-600 MG/L.



SS  
(mg/l)

FLÖDE  
(m<sup>3</sup>/TIM)

FIG. B:6 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, Q<sub>IN</sub>.  
INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.



TID  
(TIM)

11

10

9

8

7

6

5

4

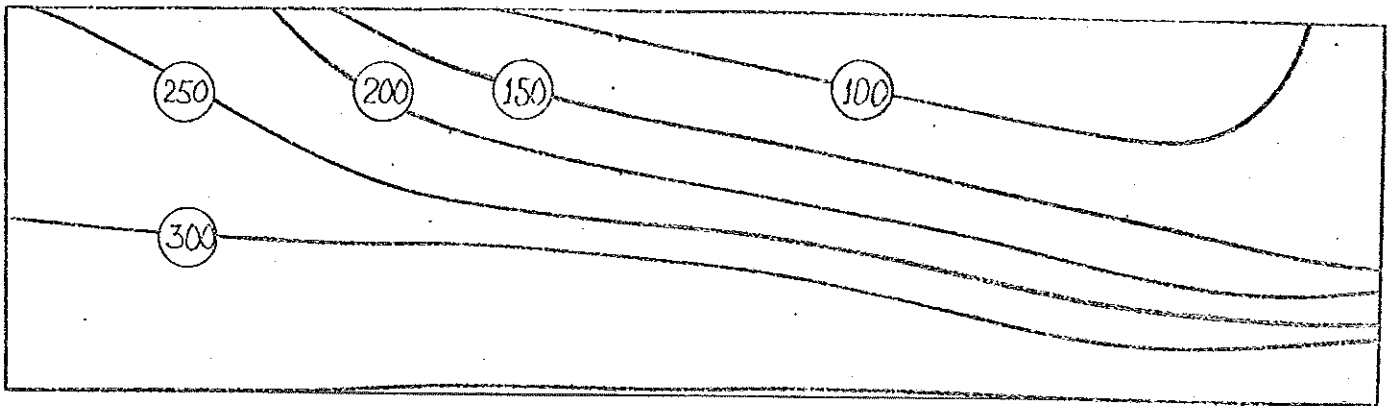
3

2

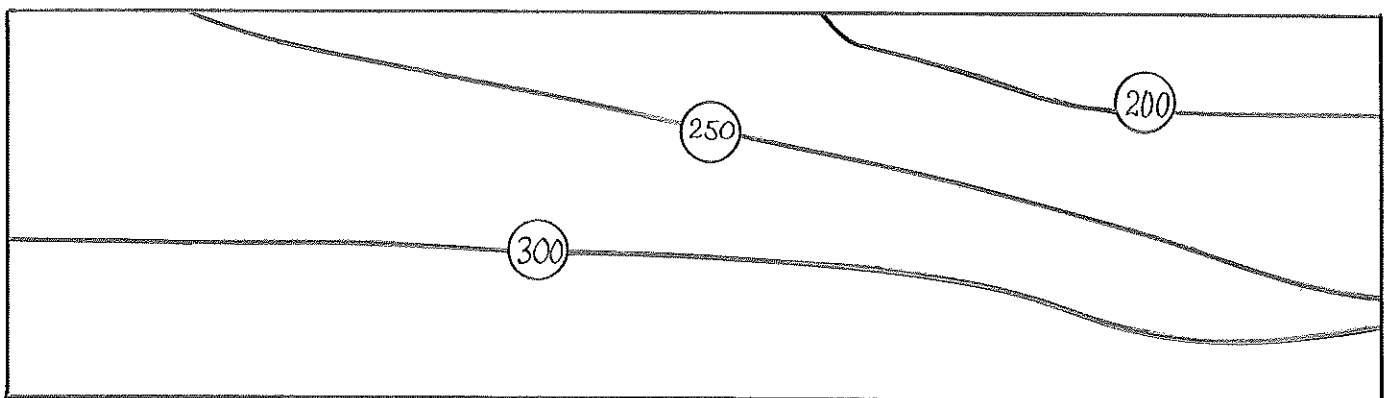
1

0

FIG. 8:7 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ .  
INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.  
NIVÅKURVOR.



$T = 1.0 \text{ TIM}$



$T = 2.0 \text{ TIM}$

SS  
(mg/l)

SO(t)

300

250

200

150

100

50

0



FIG. B:8 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC., SO(t).  
INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TID.

UTGÅENDE SS-KONCENTRATION

INKOMMANDE SS-KONCENTRATION, SO(t)

TID  
(MIN)

12

11

10

9

8

7

6

5

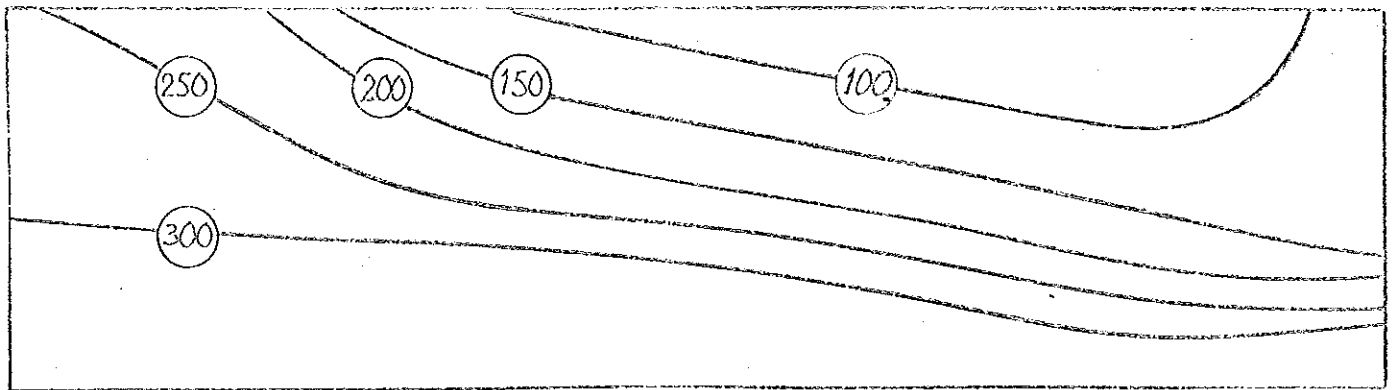
4

3

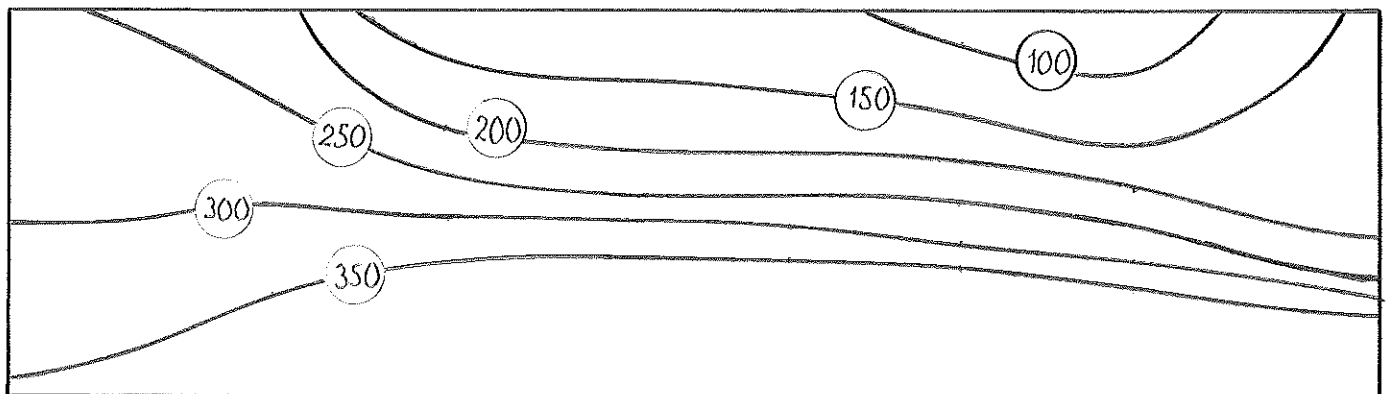
2

1

FIG. B:9 NIVÅKURVOR FÖR PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC., SO(1),  
INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TIM.



$T = 1.0 \text{ TIM}$



$T = 7.0 \text{ TIM}$

SS  
(mg/l)

Fig. B110

SINUSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, QIN.  
INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.

150 → 600

125

100 → 400

75

50 → 200

25

0

INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, QIN

UTGÅENDE SS-KONC.

TID  
(TIM)

26

24

22

20

18

16

14

12

10

8

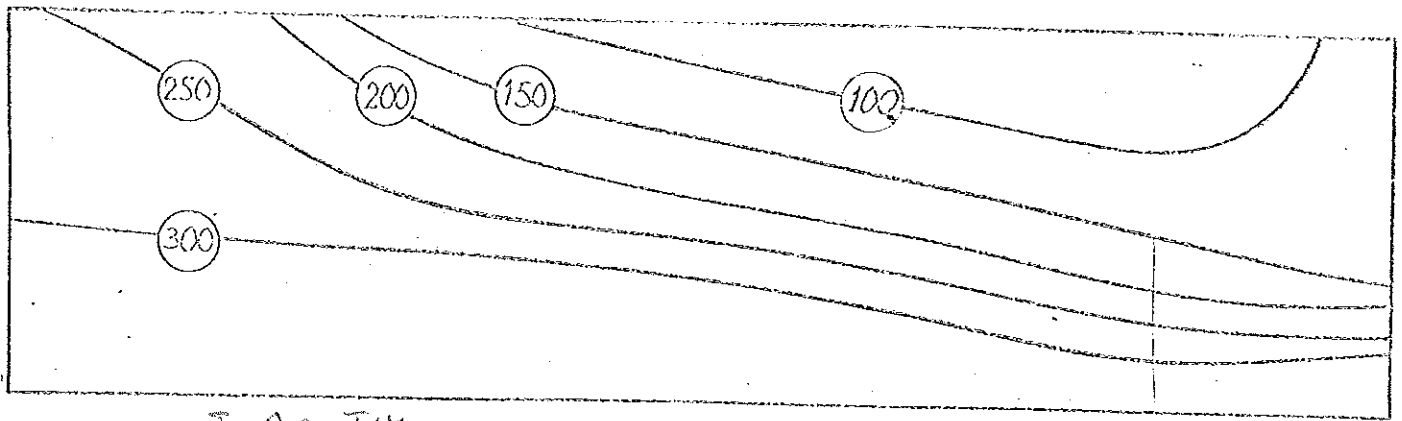
6

4

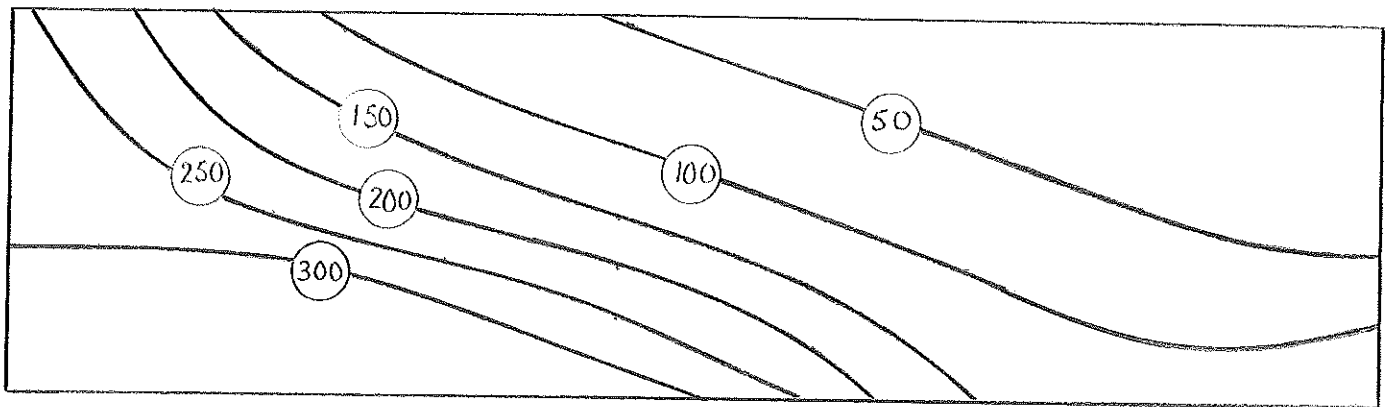
2

0

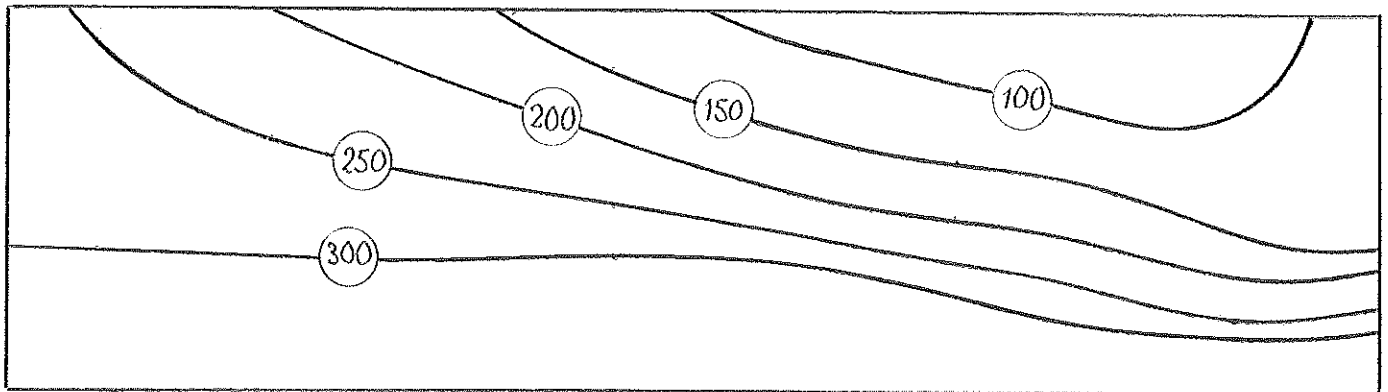
FIG. B:11 NIVÅKURVOR FÖR SINUSSTÖTNINGAR PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, Q<sub>IN</sub>.  
INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.



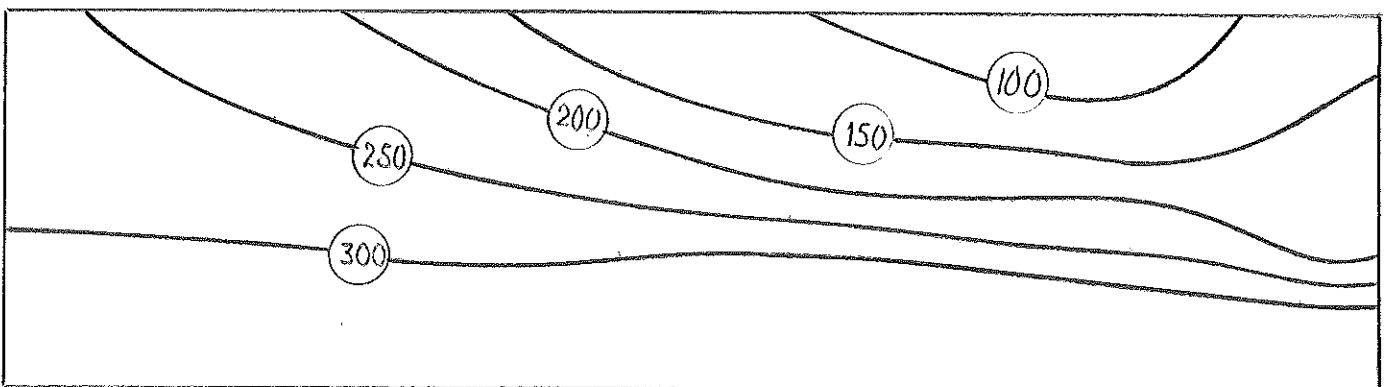
$T = 0.0$  TIM



$T = 10.0$  TIM



$T = 16.0$  TIM



$T = 21.0$  TIM

FIG. B:12 SIMUSSTÖRNINGAR PÅ INKOMMANDE SS-KONC., SO(1).  
INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, QIN, ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TIM.

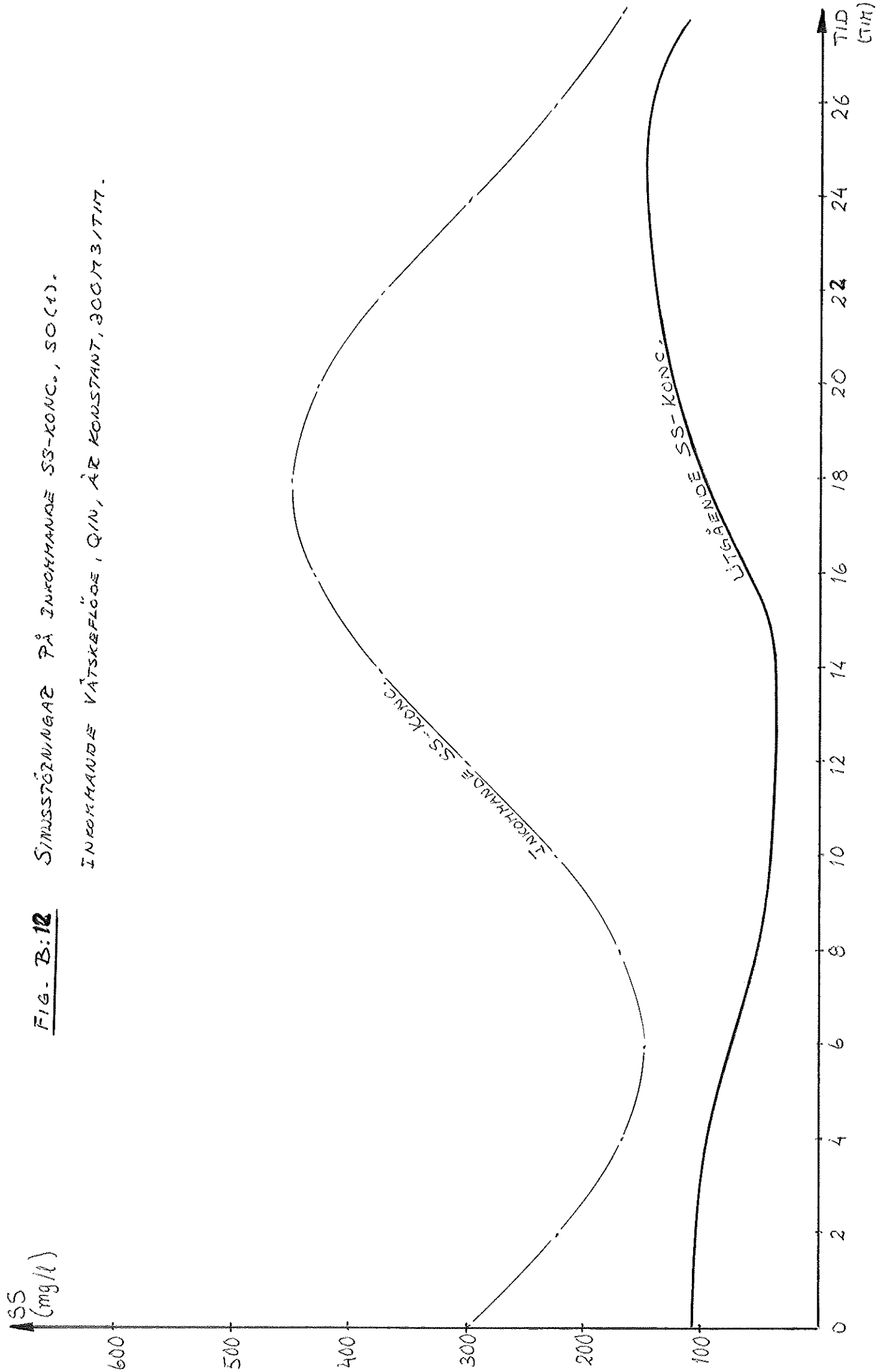
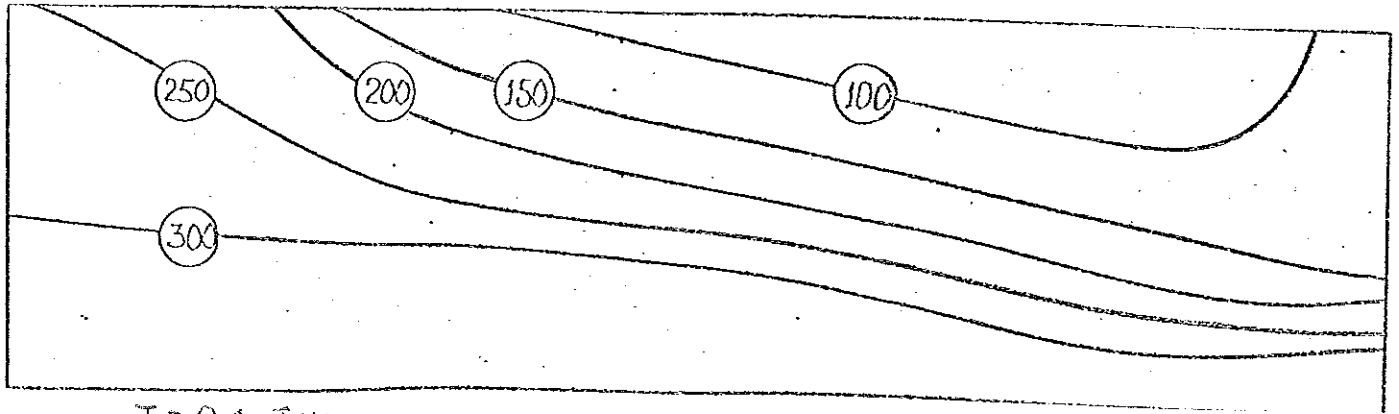
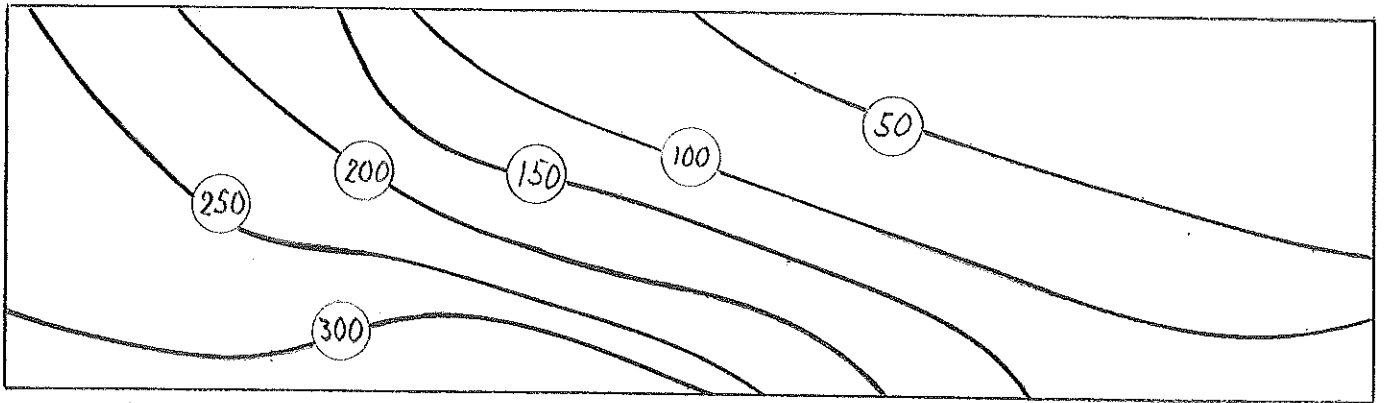




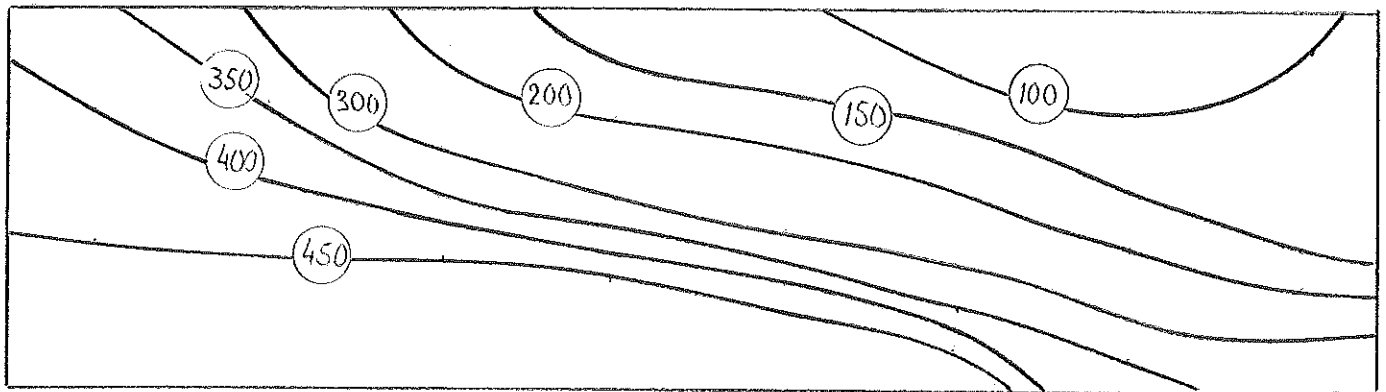
FIG. B/13 NIVÅKURVOR FÖR SINDSSTÖRNING PÅ INKOHMANDE SS-KONC., 30(1),  
 INKOHMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ , ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TIM.



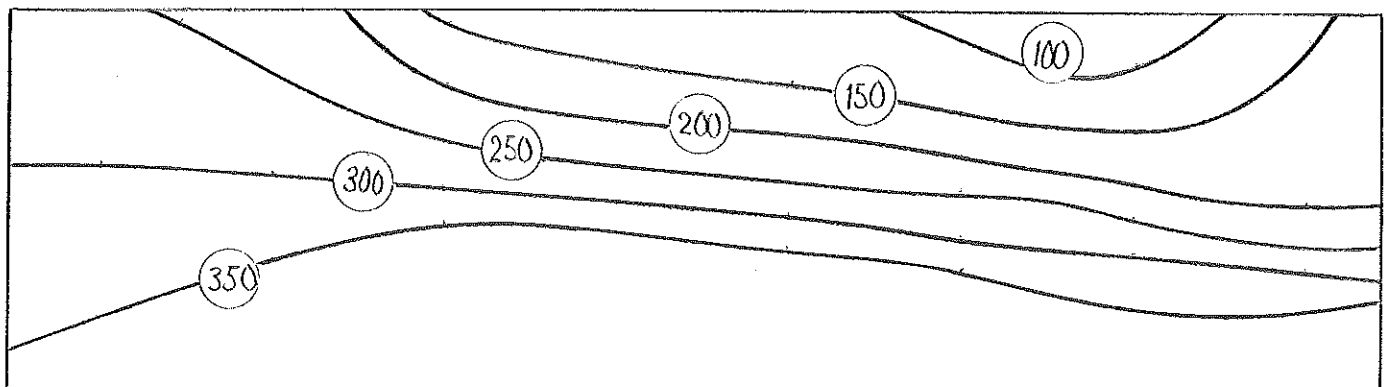
$T = 0.0$  TIM



$T = 12.0$  TIM



$T = 18.0$  TIM



$T = 24.0$  TIM

SS (mg/l)

- LITGÅENDE SS-KONC. FÖR,  
 a. SINDSSTÖRNING PÅ BÅDE INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, Q<sub>IN</sub>,  
 OCH INKOMMANDE SS-KONC., S<sub>O(1)</sub>.  
 b. SINDSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, Q<sub>IN</sub>.  
 c. SINDSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC., S<sub>O(1)</sub>.

FIG. B:14

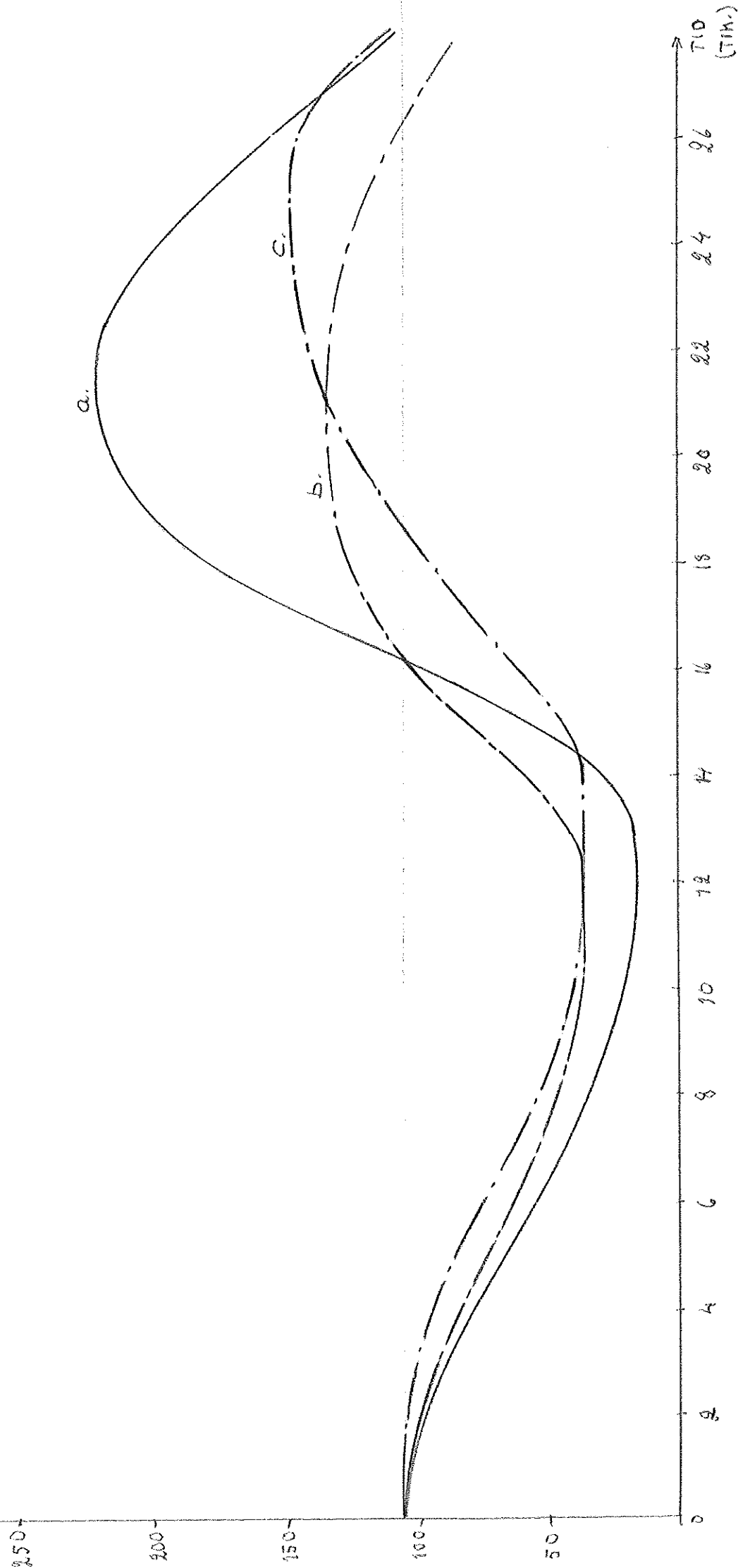


FIG. B:16 STEGSTÖRNING PÅ QIN, MED OCH UTAN REGLERING

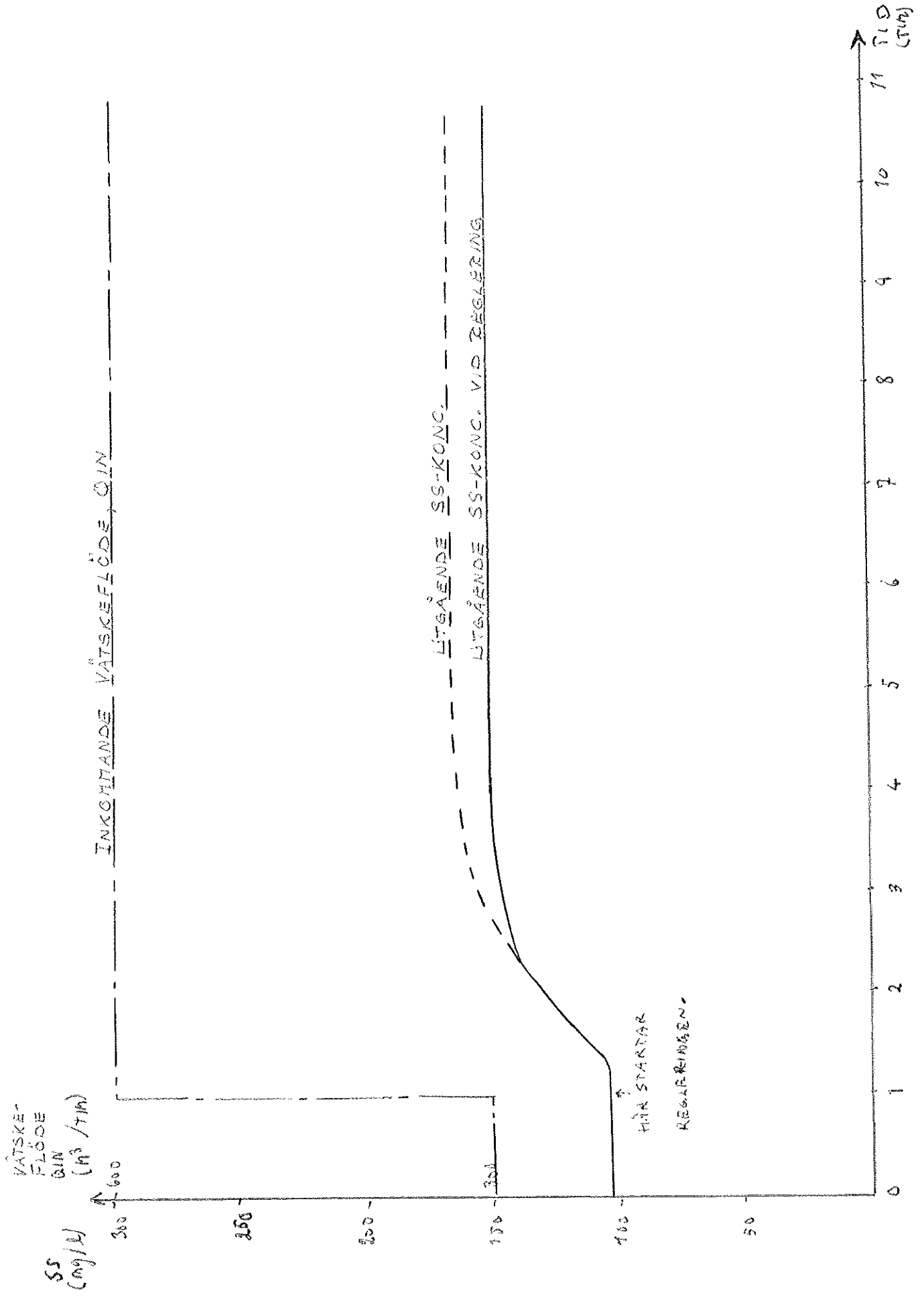


Fig. 6:17 STEGSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC. SOCT), MED OCH UTAN RÄGLERING.

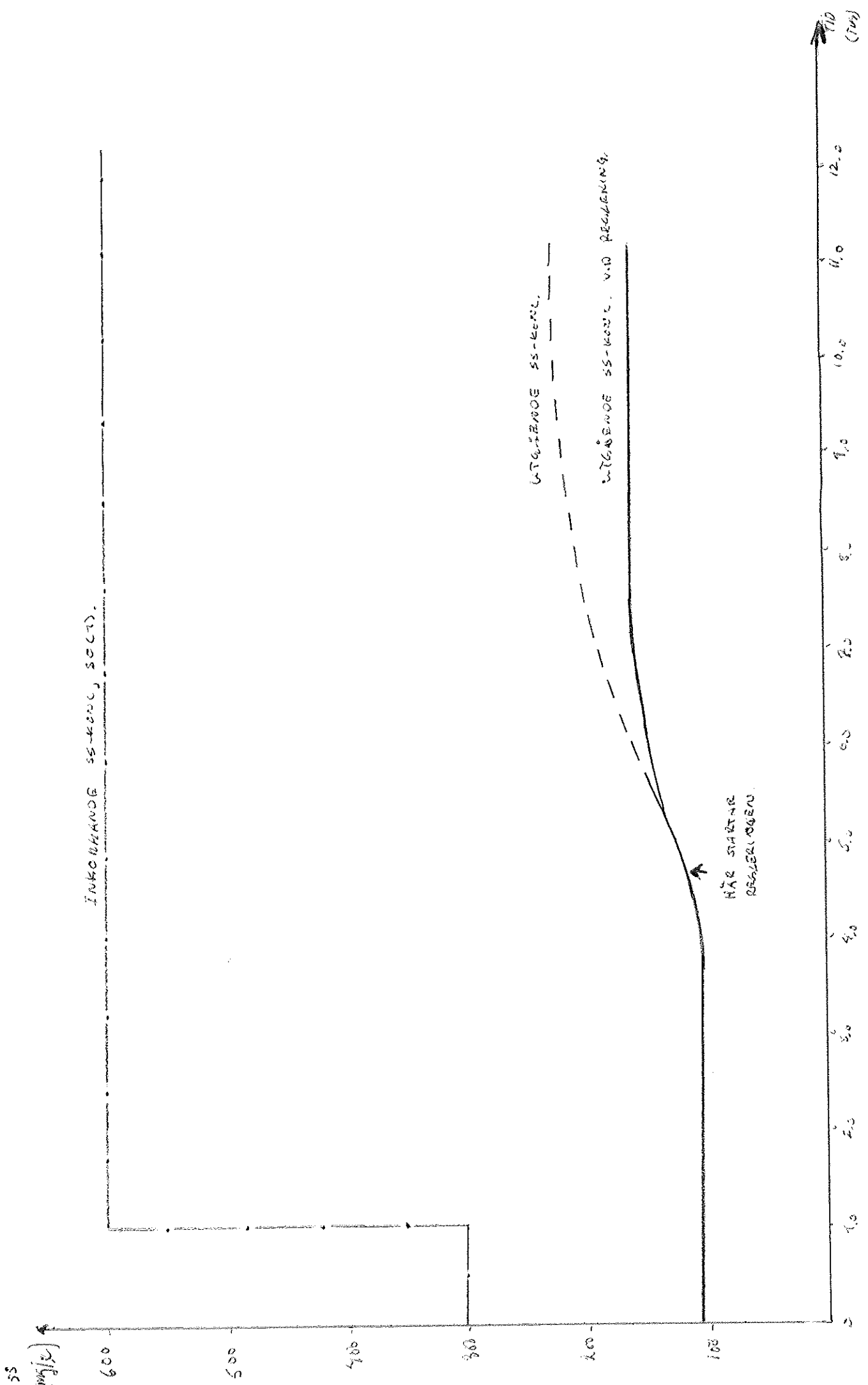


FIG. 3:18 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, Q<sub>IN</sub>, MED OCH UTAN REGLERING

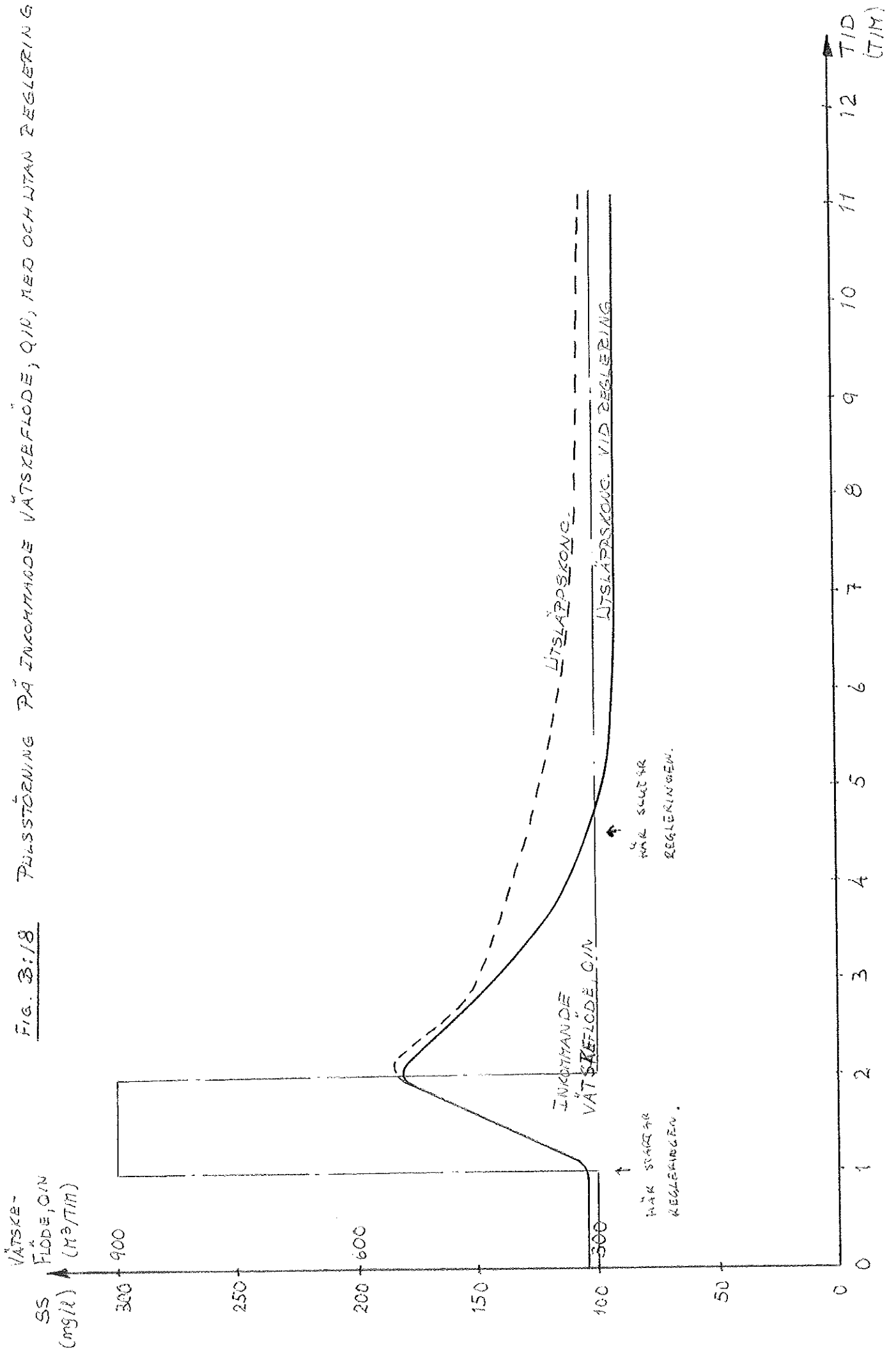


FIG. B:19 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC., MED OCH UTAN REGLERING

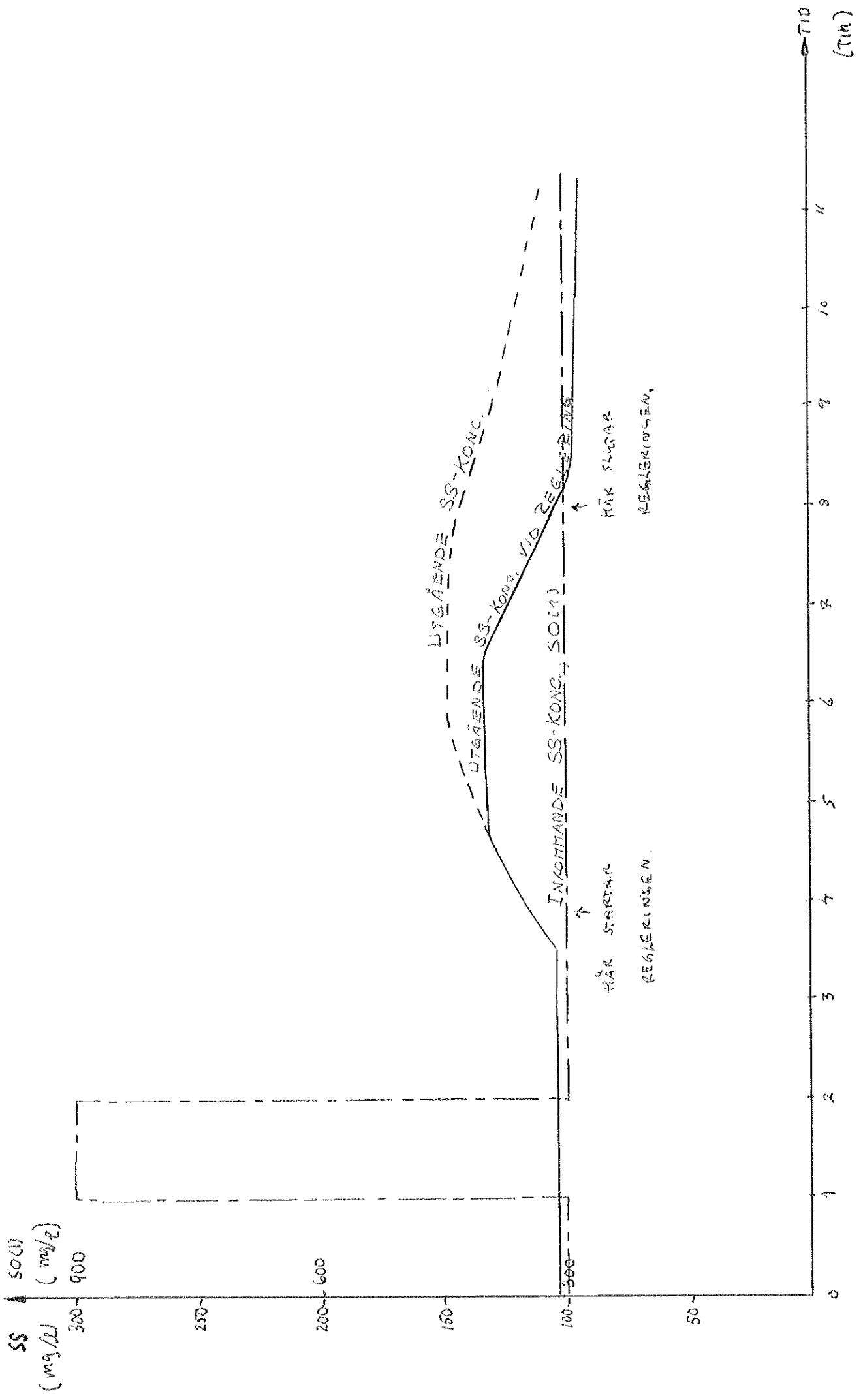


FIG B:20

SIMULERING PÅ BÅDE GÅN OCH SEKT, MED  
OCH UTAN REGLERING.

- a. UTGÅENDE SS-KONC. UTAN REGLERING
- b. " " " " MED " " "

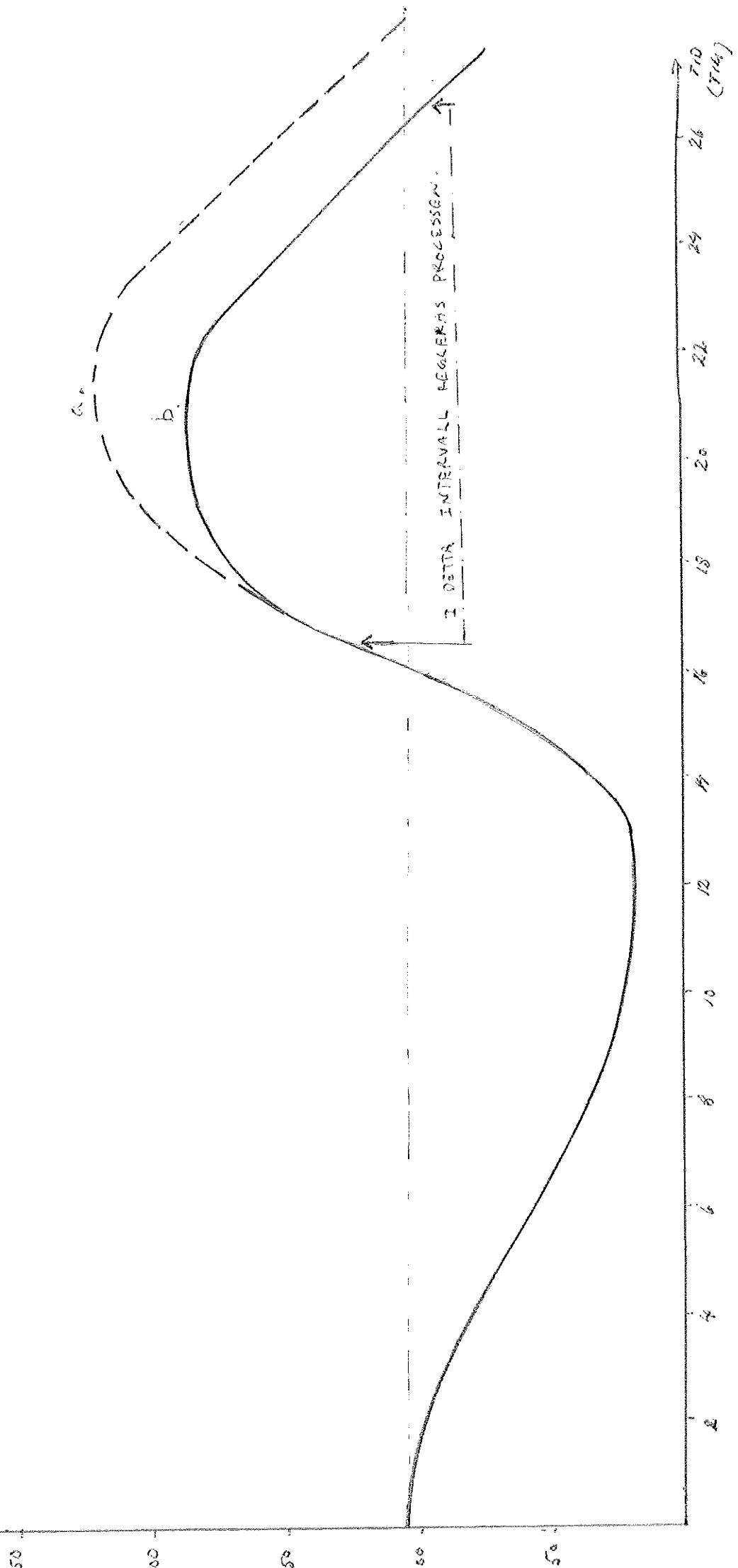


FIG. C:1. BASSÅNGKONG. FÖR PÅVISANDE AV DIFFUSIONSKONSTANTENS,  $D$ ,  
INVERKAN PÅ SUSPENDERADE ÅMNSKONG.

203	115	37	11	3	0	0	4
268	202	90	36	13	4	1	6
289	251	141	69	31	12	4	8
296	276	184	106	55	25	10	10
298	288	217	141	82	43	20	20
538	648	977	621	362	163	60	20

$D=0.0$

244	193	100	62	43	32	24	64
268	229	145	99	72	54	41	74
285	261	197	152	118	89	68	86
301	299	277	238	194	151	116	96
328	355	422	388	323	254	198	174
379	446	722	662	547	428	336	295

$D=2.0$

255	215	131	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	83	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	135
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

$D=3.60$

262	250	162	137	118	103	89	113
272	245	192	166	143	125	108	120
280	260	226	201	174	152	131	125
287	275	266	244	212	184	158	123
296	292	317	295	258	223	191	185
308	313	385	358	313	270	231	342

$D=7.20$



FIG. C:2 BASSÅNGKONC. FÖR PÅVISANDE AV MÖHENTANA SLAMBORTTAGNINGS-  
 INTERVALLETS INVERKAN PÅ SUSPENDERADE ÅNNEBKONC.

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	83	I	116
284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381

1 ggr / tim

255	I	212	I	126	I	93	I	73	I	59	I	47	I	74
271	I	237	I	168	I	132	I	106	I	87	I	70	I	86
283	I	261	I	218	I	184	I	153	I	127	I	103	I	100
296	I	289	I	285	I	256	I	219	I	184	I	149	I	110
314	I	324	I	386	I	359	I	312	I	263	I	212	I	188
341	I	371	I	549	I	510	I	442	I	371	I	298	I	303

2 ggr / tim

254	I	209	I	122	I	83	I	60	I	43	I	32	I	51
270	I	234	I	158	I	112	I	82	I	60	I	44	I	56
282	I	256	I	195	I	146	I	109	I	80	I	59	I	61
293	I	278	I	239	I	190	I	145	I	106	I	78	I	62
308	I	305	I	302	I	247	I	191	I	141	I	102	I	98
330	I	342	I	403	I	329	I	255	I	187	I	135	I	120

4 ggr / tim

FIG. C:3 STEGSTÖRNING PÅ INKÖRHANDE VÄTSKEFLÖDE, Q<sub>IN</sub>, 300-600 M<sup>3</sup>/TIM.  
 INKÖRHANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.

255	215	131	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	85	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	155
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

T = 1.0 TIM

262	239	211	193	152	116	95	155
277	258	237	221	190	157	134	173
288	275	262	250	231	206	184	190
299	293	289	282	281	272	251	199
314	314	323	319	352	367	347	324
341	341	370	365	464	518	486	741

T = 3.0 TIM

262	239	211	193	152	117	98	165
277	258	237	221	190	158	137	183
288	275	262	250	231	208	190	202
299	293	289	282	281	275	263	214
314	314	323	319	352	374	367	353
341	341	370	365	465	532	521	917

T = 4.0 TIM

FIG. C:4 STRÅSTÖRNING PÅ INKOMPLANDER SS-KONC., 50(1), 300-600 MG/L.

VÄTSKEFLÖDET, QIN ÄR KONSTANT, 300 L<sup>3</sup>/TIM.

255	215	151	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	83	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	135
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

T = 1.0 TIM

507	427	265	202	162	130	101	157
542	484	354	283	230	185	144	177
573	541	460	389	323	260	203	197
606	606	598	537	453	366	286	208
648	685	807	748	633	512	400	339
708	789	1145	1053	887	712	556	528

T = 6.0 TIM

507	430	269	210	177	152	132	229
542	486	358	294	253	220	190	260
573	544	465	409	360	315	273	291
606	609	609	565	508	448	390	312
648	689	824	792	717	637	555	515
708	794	1173	1124	1016	902	785	902

T = 20.0 TIM

FIG. C15 STRØGSTØPNING I QIN, 300-600 M<sup>3</sup>/TIM, OCH I SOLID, 300-600 MG/L.

255	215	131	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	83	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	135
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

$T = 1.0 \text{ TIM}$

534	496	439	391	293	208	155	211
564	535	489	442	557	273	210	234
586	569	536	491	423	345	277	254
609	604	586	543	497	434	362	261
643	646	646	602	596	561	479	409
703	702	729	671	754	760	644	805

$T = 3.0 \text{ TIM}$

534	498	448	419	337	262	221	354
564	537	503	478	418	352	306	393
586	573	556	540	506	460	417	430
609	610	615	611	614	601	566	448
643	656	690	694	765	810	780	728
703	717	795	798	1005	1144	1095	1698

$T = 5.0 \text{ TIM}$

534	498	448	420	339	267	228	385
564	537	503	479	421	358	319	427
586	573	556	542	510	470	437	467
609	610	615	613	621	617	598	489
643	656	690	698	776	837	831	799
703	717	795	804	1025	1190	1179	2088

$T = 7.0 \text{ TIM}$

FIG. C:6 PULSBÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ ,  
 INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 300 MG/L.

I	255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104	I
I	271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	83	I	116	I
I	284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128	I
I	297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135	I
I	315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220	I
I	342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381	I

$T = 1.0 \text{ TIM}$

I	271	I	252	I	235	I	216	I	183	I	155	I	129	I	143	I
I	284	I	270	I	255	I	236	I	208	I	179	I	151	I	152	I
I	292	I	284	I	275	I	259	I	235	I	207	I	179	I	158	I
I	300	I	298	I	296	I	286	I	267	I	241	I	211	I	156	I
I	313	I	317	I	322	I	316	I	305	I	278	I	244	I	232	I
I	340	I	344	I	354	I	348	I	348	I	314	I	272	I	500	I

$T = 1.50 \text{ TIM}$

I	271	I	252	I	239	I	229	I	210	I	194	I	175	I	184	I
I	284	I	270	I	259	I	250	I	236	I	221	I	200	I	190	I
I	292	I	284	I	277	I	271	I	261	I	248	I	225	I	193	I
I	300	I	298	I	297	I	293	I	289	I	277	I	253	I	185	I
I	313	I	317	I	322	I	319	I	322	I	311	I	283	I	267	I
I	340	I	344	I	354	I	348	I	368	I	350	I	312	I	808	I

$T = 2.0 \text{ TIM}$

I	255	I	215	I	132	I	102	I	87	I	79	I	74	I	138	I
I	272	I	241	I	174	I	141	I	124	I	113	I	106	I	155	I
I	285	I	266	I	225	I	195	I	175	I	161	I	151	I	172	I
I	298	I	293	I	293	I	272	I	249	I	230	I	215	I	183	I
I	316	I	328	I	396	I	383	I	356	I	329	I	307	I	305	I
I	343	I	376	I	564	I	545	I	509	I	470	I	439	I	547	I

$T = 4.0 \text{ TIM}$

FIG. C:7 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC., SOC13.

INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE ÄR KONSTANT, 300 M<sup>3</sup>/TIM.

255	215	131	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	83	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	135
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

 $T = 1.0 \text{ TIM}$ 

261	231	158	137	126	106	85	138
279	261	212	194	180	152	122	157
295	294	280	273	257	219	177	177
313	332	376	386	365	313	250	189
336	380	521	552	521	443	353	306
369	444	756	798	745	624	493	473

 $T = 5.0 \text{ TIM}$ 

256	218	138	112	101	93	84	147
273	246	183	157	144	133	121	167
287	273	236	217	204	190	173	188
300	302	309	301	288	271	248	203
317	337	420	425	411	388	356	334
344	386	602	609	589	556	510	618

 $T = 7.0 \text{ TIM}$ 

255	215	133	102	87	78	70	131
272	241	175	142	124	111	100	147
285	266	225	197	175	158	143	163
298	293	294	274	249	226	204	174
316	328	398	385	355	324	292	290
343	376	567	548	506	464	417	558

 $T = 9.0 \text{ TIM}$

FIG. C:8 SINDSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, QIN,  
 INKOMMANDE SS-KONC. ÄR KONSTANT, 50(1), 300 MG/L.

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104	I
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	85	I	116	I
284	I	265	I	225	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128	I
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135	I
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220	I
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381	I

$T = 1.0 \text{ TIM}$

216	I	115	I	77	I	54	I	40	I	29	I	22	I	38	I
242	I	156	I	110	I	79	I	57	I	41	I	31	I	43	I
267	I	205	I	155	I	115	I	83	I	59	I	43	I	47	I
294	I	271	I	217	I	165	I	120	I	85	I	59	I	49	I
328	I	367	I	303	I	233	I	171	I	121	I	82	I	81	I
376	I	521	I	426	I	328	I	240	I	170	I	114	I	131	I

$T = 10.0 \text{ TIM}$

255	I	220	I	188	I	132	I	105	I	90	I	76	I	132	I
271	I	245	I	222	I	174	I	144	I	126	I	109	I	150	I
284	I	268	I	252	I	221	I	196	I	176	I	156	I	168	I
297	I	294	I	284	I	283	I	268	I	248	I	224	I	178	I
314	I	328	I	325	I	376	I	372	I	350	I	319	I	301	I
341	I	376	I	388	I	533	I	520	I	497	I	452	I	631	I

$T = 16.0 \text{ TIM}$

253	I	212	I	189	I	138	I	100	I	78	I	62	I	100	I
269	I	238	I	217	I	176	I	137	I	111	I	90	I	114	I
282	I	263	I	248	I	222	I	186	I	156	I	128	I	128	I
295	I	290	I	283	I	282	I	253	I	217	I	180	I	136	I
312	I	324	I	324	I	367	I	349	I	304	I	252	I	220	I
339	I	371	I	375	I	494	I	489	I	423	I	348	I	400	I

$T = 26.0 \text{ TIM}$

FIG. C: 9 SINUSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC., SO(1).

INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ , ÄR KONSTANT,  $300 \text{ M}^3/\text{TIM}$ .

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	83	I	116
284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381

 $T = 0.0 \text{ TIM}$ 

236	I	181	I	99	I	63	I	42	I	28	I	22	I	38
252	I	203	I	130	I	89	I	61	I	42	I	31	I	42
264	I	224	I	166	I	122	I	88	I	62	I	44	I	46
274	I	245	I	210	I	165	I	124	I	89	I	63	I	48
287	I	270	I	277	I	226	I	173	I	126	I	90	I	77
307	I	304	I	384	I	311	I	240	I	174	I	125	I	123

 $T = 12.0 \text{ TIM}$ 

374	I	311	I	189	I	138	I	108	I	84	I	63	I	96
400	I	352	I	251	I	193	I	154	I	121	I	91	I	110
423	I	393	I	324	I	266	I	217	I	172	I	130	I	125
447	I	438	I	419	I	366	I	302	I	242	I	184	I	135
477	I	493	I	563	I	506	I	423	I	340	I	258	I	218
520	I	565	I	795	I	711	I	592	I	475	I	356	I	345

 $T = 18.0 \text{ TIM}$ 

265	I	235	I	155	I	129	I	114	I	102	I	87	I	148
283	I	265	I	207	I	181	I	163	I	145	I	125	I	169
299	I	297	I	271	I	251	I	230	I	207	I	181	I	190
317	I	334	I	358	I	350	I	327	I	296	I	259	I	205
341	I	380	I	491	I	496	I	467	I	423	I	370	I	346
377	I	442	I	706	I	712	I	668	I	602	I	526	I	623

 $T = 24.0 \text{ TIM}$



FIG. C110 SINDSSTÖPNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE,  $Q_{IN}$ , OCH  
PÅ INKOMMANDE SS-KONC.,  $SO(1)$ .

255	215	131	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	83	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	135
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

$T=0.0 \text{ TIM}$

227	155	81	48	26	13	10	18
243	177	107	66	38	20	14	20
256	203	138	89	54	29	20	22
269	235	179	119	74	42	28	23
284	274	237	161	101	59	38	38
304	323	325	216	136	79	52	45

$T=12.0 \text{ TIM}$

368	308	269	185	126	95	71	97
391	345	306	233	172	131	100	109
409	378	345	290	230	181	138	123
427	413	388	362	306	247	191	132
450	458	439	462	415	339	261	211
487	522	500	615	572	463	355	309

$T=16.0 \text{ TIM}$

333	295	225	171	148	134	123	223
355	332	282	234	208	191	175	250
373	369	345	313	289	270	250	276
393	410	423	421	405	383	356	291
420	463	535	580	572	545	508	488
462	536	708	829	817	778	725	1014

$T=22.0 \text{ TIM}$

Fig. C:11 STEGSTÖRNING PÅ QIN, MED REGLERING.

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	83	I	116
284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381

 $T = 1.0 \text{ TIM}$ 

262	I	239	I	211	I	193	I	151	I	114	I	92	I	146
277	I	258	I	237	I	221	I	188	I	153	I	128	I	162
288	I	275	I	261	I	249	I	227	I	199	I	174	I	177
299	I	293	I	287	I	279	I	272	I	258	I	234	I	185
314	I	314	I	320	I	315	I	335	I	342	I	317	I	296
341	I	341	I	365	I	360	I	434	I	475	I	437	I	526

 $T = 3.0 \text{ TIM}$ 

262	I	239	I	211	I	193	I	151	I	115	I	94	I	151
277	I	258	I	237	I	221	I	188	I	154	I	130	I	167
288	I	275	I	261	I	248	I	225	I	199	I	176	I	182
299	I	293	I	287	I	278	I	270	I	258	I	237	I	189
314	I	314	I	319	I	314	I	332	I	342	I	323	I	306
341	I	341	I	364	I	357	I	429	I	475	I	448	I	554

 $T = 6.0 \text{ TIM}$

FIG. 4.12 STEGSTÖRNING PÅ INKOMMANDR 55-KONC, MED REGLERING.

255	215	131	100	82	69	58	104
271	241	173	139	116	98	85	116
284	265	223	191	164	141	119	128
297	292	290	265	233	201	171	135
315	327	392	371	330	287	244	220
342	375	557	527	468	406	345	381

T=1,0 T<sub>1H</sub>

507	427	263	195	153	120	93	146
542	482	346	270	216	172	132	166
572	535	443	367	301	241	187	185
604	594	567	496	415	334	259	196
643	665	749	679	573	462	359	316
701	760	1046	948	797	639	495	420

T=6,0 T<sub>1H</sub>

507	427	261	193	153	123	98	162
542	482	344	266	214	175	141	183
572	535	438	362	298	246	199	204
604	593	560	488	411	341	277	217
643	664	738	667	568	473	385	358
701	758	1028	928	790	657	535	498

T=11,0 T<sub>1H</sub>

FIG. C:13 PULSSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, MED REGLERING

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	83	I	116
284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381

T=1.0 TIM

271	I	252	I	235	I	216	I	183	I	155	I	129	I	143
284	I	270	I	255	I	236	I	208	I	179	I	151	I	152
292	I	284	I	275	I	259	I	235	I	207	I	179	I	158
300	I	298	I	296	I	286	I	267	I	241	I	211	I	156
313	I	317	I	322	I	316	I	305	I	278	I	244	I	232
340	I	344	I	354	I	348	I	348	I	314	I	272	I	500

T=1.5 TIM

271	I	252	I	239	I	228	I	208	I	191	I	173	I	182
284	I	270	I	258	I	248	I	233	I	216	I	197	I	188
292	I	284	I	276	I	268	I	257	I	241	I	221	I	190
300	I	298	I	294	I	288	I	283	I	268	I	247	I	181
313	I	317	I	316	I	311	I	313	I	299	I	275	I	259
340	I	344	I	343	I	338	I	355	I	334	I	303	I	535

T=2.0 TIM

255	I	214	I	130	I	96	I	79	I	68	I	61	I	113
271	I	240	I	170	I	133	I	111	I	97	I	87	I	127
284	I	264	I	215	I	179	I	153	I	136	I	123	I	140
297	I	290	I	273	I	242	I	212	I	190	I	173	I	149
315	I	324	I	361	I	331	I	296	I	268	I	245	I	251
342	I	369	I	502	I	462	I	417	I	380	I	349	I	373

T=4.0 TIM

FIG. C:14 PULSSTØRNING PÅ INKOMMANDE SS-KONC. MED PÆGLERING

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	83	I	116
284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381

 $T = 1.0 \text{ TIM}$ 

259	I	228	I	154	I	133	I	120	I	105	I	82	I	131
277	I	259	I	207	I	188	I	172	I	150	I	118	I	149
292	I	290	I	271	I	262	I	243	I	211	I	169	I	168
307	I	326	I	358	I	365	I	344	I	296	I	237	I	179
326	I	370	I	490	I	516	I	484	I	416	I	329	I	291
354	I	430	I	706	I	741	I	685	I	581	I	454	I	384

 $T = 5.0 \text{ TIM}$ 

255	I	215	I	131	I	100	I	84	I	74	I	66	I	123
271	I	241	I	172	I	139	I	118	I	105	I	94	I	137
284	I	265	I	217	I	187	I	165	I	148	I	134	I	152
297	I	291	I	278	I	254	I	229	I	209	I	189	I	162
315	I	325	I	369	I	349	I	322	I	296	I	268	I	270
342	I	371	I	517	I	490	I	456	I	420	I	380	I	399

 $T = 7.0 \text{ TIM}$ 

255	I	212	I	128	I	94	I	76	I	63	I	53	I	96
271	I	237	I	169	I	131	I	107	I	89	I	75	I	107
284	I	262	I	218	I	181	I	151	I	127	I	108	I	118
297	I	290	I	283	I	250	I	214	I	181	I	155	I	125
315	I	325	I	380	I	347	I	301	I	258	I	221	I	207
342	I	372	I	540	I	490	I	426	I	364	I	313	I	386

 $T = 9.0 \text{ TIM}$

Fig 4:15 SAMSTÖRNING PÅ INKOMMANDE VÄTSKEFLÖDE, OIN, OCH PÅ INKOMMANDE SS-KONC, (OX1); MED REGLERING.

255	I	215	I	131	I	100	I	82	I	69	I	58	I	104
271	I	241	I	173	I	139	I	116	I	98	I	85	I	116
284	I	265	I	223	I	191	I	164	I	141	I	119	I	128
297	I	292	I	290	I	265	I	233	I	201	I	171	I	135
315	I	327	I	392	I	371	I	330	I	287	I	244	I	220
342	I	375	I	557	I	527	I	468	I	406	I	345	I	381

T = 0.0 TIM

227	I	155	I	81	I	48	I	26	I	13	I	10	I	18
243	I	177	I	107	I	66	I	38	I	20	I	14	I	20
256	I	203	I	138	I	89	I	54	I	29	I	20	I	22
269	I	235	I	179	I	119	I	74	I	42	I	28	I	23
284	I	274	I	237	I	161	I	101	I	59	I	38	I	38
304	I	323	I	325	I	216	I	136	I	79	I	52	I	45

T = 12.0 TIM

368	I	308	I	269	I	185	I	126	I	95	I	71	I	97
391	I	345	I	306	I	233	I	172	I	131	I	100	I	109
409	I	378	I	345	I	290	I	230	I	181	I	138	I	123
427	I	413	I	388	I	362	I	306	I	247	I	191	I	132
450	I	458	I	439	I	462	I	415	I	339	I	261	I	211
487	I	522	I	500	I	615	I	572	I	463	I	353	I	309

T = 16.0 TIM

332	I	290	I	218	I	161	I	134	I	118	I	104	I	184
353	I	326	I	271	I	219	I	188	I	166	I	146	I	205
371	I	361	I	330	I	289	I	257	I	230	I	205	I	225
390	I	399	I	400	I	382	I	352	I	319	I	286	I	236
415	I	446	I	498	I	514	I	486	I	445	I	399	I	382
455	I	513	I	649	I	721	I	681	I	623	I	559	I	590

T = 22.0 TIM