

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5295)/1-44/(1983)

SIMULERING AV DYNAMIKEN I EN KOKARREAKTOR

ULF RASMUSSEN

INSTITUTIONEN FÖR REGLERTEKNIK
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

APRIL 1983

LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL Box 725 S 220 07 Lund 7 Sweden		Document name Report	
		Date of issue April 1983	
		Document number CODEN:LUTFD2/(TFRT-5295)/1-44/(1983)	
Author(s) Ulf Rasmusson		Supervisor Sten Bergman	
		Sponsoring organization	
Title and subtitle (Simulering av dynamiken i en kokarreaktor.) Simulation of Boiling Water Reactor dynamics.			
Abstract <p>This master thesis describes a mathematical model of a boiling water reactor and address the dynamic behaviour of the neutron kinetics, boiling dynamics and pressure stability.</p> <p>The simulations have been done using the SIMNON-program.</p> <p>The meaning were that the result from this work possibly would be adjust to supervision methods suitable for application in computer systems.</p> <p>This master thesis in automatic control has been done at the Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology. The initiative to the work came from Sydkraft AB. At the realization of the work, civ.ing. Sten Bergman, Sydkraft AB has been the instructor.</p>			
Key words			
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information			
ISSN and key title			ISBN
Language Swedish	Number of pages 44	Recipient's notes	
Security classification			

DOKUMENTOATBLAD RT 3/81

Distribution: The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 lubbis lund.

Abstract

This master thesis describes a mathematical model of a boiling water reactor and address the dynamic behaviour of the neutron kinetics, boiling dynamics and pressure stability.

The simulations have been done using the SIMNON-program.

The meaning were that the result from this work possibly would be adjust to supervision methods suitable for application in computer systems.

This master thesis in automatic control has been done at the Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology. The initiative to the work came from Sydkraft AB. At the realization of the work, civ.ing. Sten Bergman, Sydkraft AB has been the instructor.

Simulering av dynamiken
i en kokarreaktor.

Ulf Rasmusson

Institutionen för Reglerteknik
Tekniska Högskolan i Lund

April 1983

Simulering av dynamiken i en kokarreaktor.

Innehållsförteckning

1. Inledning	sid 2
2. Beskrivning av en BWR-anläggning	sid 3
3. SIMNON	sid 8
4. Modellbeskrivningar	sid 9
5. Simuleringsstudier	sid 17
6. Sammanfattning	sid 41
7. Referenser	sid 42

1. INLEDNING

Syftet med detta examensarbete var att behandla en olinjär matematisk modell av en kokarreaktor (BWR), med avseende på reaktorhårdens tryckstabilitet. Förutom en matematisk teoretisk modellanalys har identifiering på experimentella data och jämförelser mot modelldata gjorts.

Simuleringarna har gjorts med SIMNON-programmet (se kap 3).

Meningen var att resultatet från detta arbete eventuellt skulle anpassas till övervakningsmetoder lämpade för implementering i datorsystem.

Detta examensarbete i reglerteknik har utförts vid Institutionen för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola. Initiativet till uppgiften kom från Sydkraft AB, Civ.ing. Eten Bergman. Sydkraft AB har varit handledare.

2. BESKRIVNING AV EN BWR-ANLÄGGNING

Funktionen hos en kärnkraftstation med kokarreaktor, som ofta benäms BWR (Boiling Water Reactor), beskrivs här kortfattat med betoning på de ur regleringsynpunkt viktigaste egenskaperna. Figuren på nästa sida visar huvuddragen i konstruktionen för en typisk ASEA-ATOM/STAL-LAVAL reaktoranläggning. De tekniska data som anges nedan i texten är de som gäller för Barsebäcksverket, vilket har en maximal uteffekt på 570 MW elektrisk nettoeffekt, svarande mot 1700 MW termisk effekt.

2.1 Reaktorns inre delar

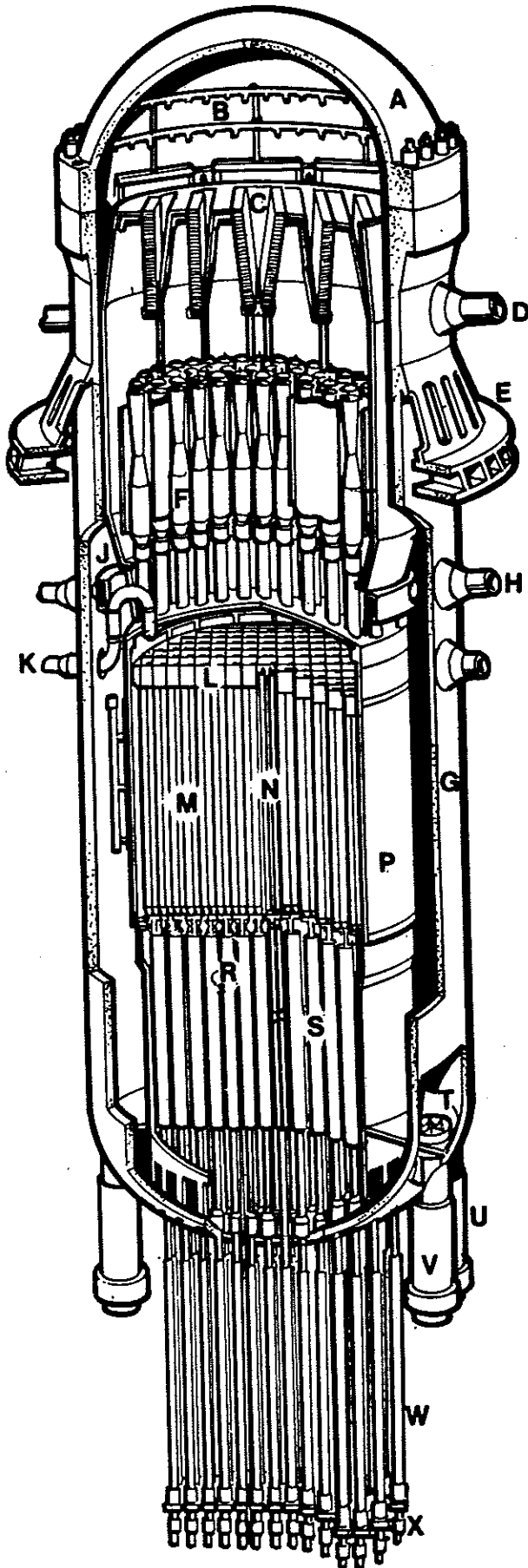
Reaktortanken, som är gjord av kolstål och invändigt är överdragen med rostfritt stål, har en diameter av 5.2 m och en höjd av 20 m. Tankens totala vikt är ca 550 ton.

Härden står uppställd på styrstavsledrören och dessa vilar i sin tur på reaktortankens botten. Upptill stöds härden i sidled av härdgallret, som bärs av moderatortanken. Denna tank omger härden på sidorna, och dess lock täcker härden. Tanken bär också ångseparatorer, fuktavskiljare och fördelare för matarvatten.

När reaktorn är i drift strömmar vatten upp genom härden. Denna strömning åstadkommes framför allt av huvudcirkulationspumparna, men även kokprocessen i härden ger ett avsevärt bidrag. Drifttrycket i primärkretsen har valts till 70 bar, vilket motsvarar en temperatur av 286 grader för vattnet. Reaktortanken är under drift fylld med vatten till en nivå som ligger ett par meter över reaktorhårdens topp. Regleringen av vattennivån ombesörjes av matarvattensystemet.

Ångan skiljs från vatten i ångseparatorerna och fuktavskiljarna. Den lämnar reaktortanken genom ångledningarna, medan vattnet rinner tillbaka ned i fallspalten mellan moderatortanken och reaktortanken. I botten av denna spalt ansluter cirkulationssystemet. Detta system pumpar vatten från fallspalten upp genom härden m.h.a. huvudcirkulationspumpar. Huvudcirkulationssystemet kan pumpa totalt 7000 kg/s genom reaktorhärden vid full effekt.

BWR 75 – KOKARREAKTOR



Förklaring

- A Reaktorkärlets lock
- B Spraysystem för lockkyllning
- C Ångtork
- D Ångutlopp
- E Stödfäns för reaktorn
- F Ångseparator
- G Reaktortank
- H Matarvatteninlopp
- J Matarvattenring
- K Hårdsprinkellinlopp
- L Hårdgaller
- M Bränsleelement
- N Kontrollstavar
- P Moderatortank
- R Hårdinstrumentering
- S Styrstavsledrör
- T Pumppropeller
- U Huvudcirkulationspump
- V Pumpmotorhus
- W Styrstavshus
- X Styrstavsmotor

2.2 Turbinanläggningen

Ånga leds från reaktorn till turbinen via ångledningar. Turbinen består av fyra delar, en högtrycksturbin och tre lågtrycksturbiner.

Mättad ånga, som kommer från reaktorn med 62 bars tryck och 277 graders temperatur, leds till högtrycksturbinen och sedan, efter avfuktning och överhettning i mellanöverhettaren leds ångan vidare till de tre lågtrycksturbinerna och därifrån ned till kondensorn där ångan kondenseras.

Turbinkondensorn är en värmeväxlare, där avloppsången från turbinen kyla med vatten. Kylvattnet strömmar i rör, och på utsidan av dessa rör kondenseras ångan till vatten. Detta vatten rinner ned i kondensorns botten.

Från kondensorn pumpas vattnet åter till reaktorn via kondensatpumparna och matarvattenpumparna. I matarvattenstråket passerar vattnet ett antal värmeväxlare. Det förvärms där av ånga. Vattnet får en sluttemperatur, som är cirka 180 grader, innan det återförs in i reaktorn. Förvärmningen sker delvis av det skälet att man inte vill ha in kallt vatten i reaktorn. Dessutom förbättrar det anläggningens verkningsgrad.

Kylflödet genom turbinanläggningens kondensor är ca 20 m³/s. Vattnets temperatur höjs med ca 10 grader, när det passerar kondensorn. Den värmeeffekt som turbinkondensorns kylvatten får ta hand om utgör ungefär två tredjedelar av den effekt som utvecklas i reaktorn. Den elektriska effekt som turbingeneratoren lämnar till kraftnätet utgör alltså bara en tredjedel av reaktorns effekt.

2.3 Reaktorhärden och styrstavarna

Reaktorhärden består av 111 st härdmoduler, vilka består av fyra bränslepatroner och en styrstav. Bränslepatronerna, som är cirka 3.5 m långa, består av 63 st bränslestavar monterade i en bränslebox.

I reaktortankens botten är rör insvetsade i vilka drivdonen för reaktorns styrstavar är monterade. Styrstavarna är korsformiga stålplattor, som innehåller neutronabsorberande borkarbid. De löper i spalterna mellan bränslepatronerna och kan föras helt in eller helt ut ur härden.

2.4 Reaktordynamik och effektregering

När reaktorn är i drift klyvs kärnor av uranisotopen U-235 överallt i bränslet. Det utvecklas därvid värme, som upphettar bränslet, och det utsänds neutroner och olika slag av annan strålning. Värmen leds ut genom bränslet och kapselrören och ut i det vatten som omger bränslestavarna.

Den energi som frigöres i reaktorhärden bortföres av vatten som av huvudcirkulationspumparna drivs genom härden. I kokarreaktorn har underkylningen och kylflödet valts så att vattnet snabbt når kokning. Vid utloppet av kylkanalerna utgöres ångvattenblandningen till cirka 15 procent av ånga medan de övriga 85 procent är vatten av mättnadstemperatur.

Detta underkyls genom inblandning av kallt matarvatten och förs åter av huvudcirkulationspumparna till härden. Förekomsten av ånga i härdens kylkanaler benämnes 'void' och är av den största betydelsen för regleringen av en kokarreaktor. Vid högeffektdrift är medelvoidhalten, dvs den relativa volymandelen void i kylkanalerna, cirka 40 procent.

Reaktor- och därmed även generatoreffekten kan ändras relativt snabbt inom området 65-100 procent med hjälp av varvtalsstyrning av huvudcirkulationspumparna. Reaktoreffekten ändras också långsamt beroende på att bränslet bränns ut, samt via t.ex. Xenon förgiftning. För att motverka denna ändring måste man succesivt dra ut styrstavarna. Vid långsiktiga och/eller stora effektvariationer använder man även styrstavarna.

2.5 Tryckreglering

Tryckregulatorn består väsentligen av en PI-funktion (Proportionell- och Integrerande) följt av ett andra ordningens lågpasfilter, vars uppgift är att minska risken för återkopplade störningar via ångledningarnas resonansfrekvens.

Man har även ett framkopplingsfilter för att möjliggöra för turbinventilen att vid större transienta effektändringar i härden snabbt anpassa ångflödet till ångproduktionen, och därigenom undvika mindre önskvärda trycktransienter i primärkretsen.

2.6 Inverkan av ändring i huvudcirkulationsflödet

En ökning av huvudcirkulationsflödet minskar först ånghalten i härden varvid reaktivitet och effekt ökar, och därmed även voiden. Jämvikt erhålles då void och bränsletemperatur reaktivitetsmässigt balanserar varandra.

2.7 Inverkan av tryckändring

Om trycket i reaktorn av någon anledning skulle börja stiga men ånguttaget förblir oförändrat blir följden att ångvolymen i härden minskar (voidminskning). Detta höjer effekten, ångproduktionen och därmed även trycket ytterligare. Reaktorn är i denna mening ej självreglerande, varför trycket ovillkorligen måste regleras. I praktiken sker detta via ånguttaget dvs reaktortrycket hålls konstant mha turbinventilen. På så sätt blir turbinen slav till reaktorn.

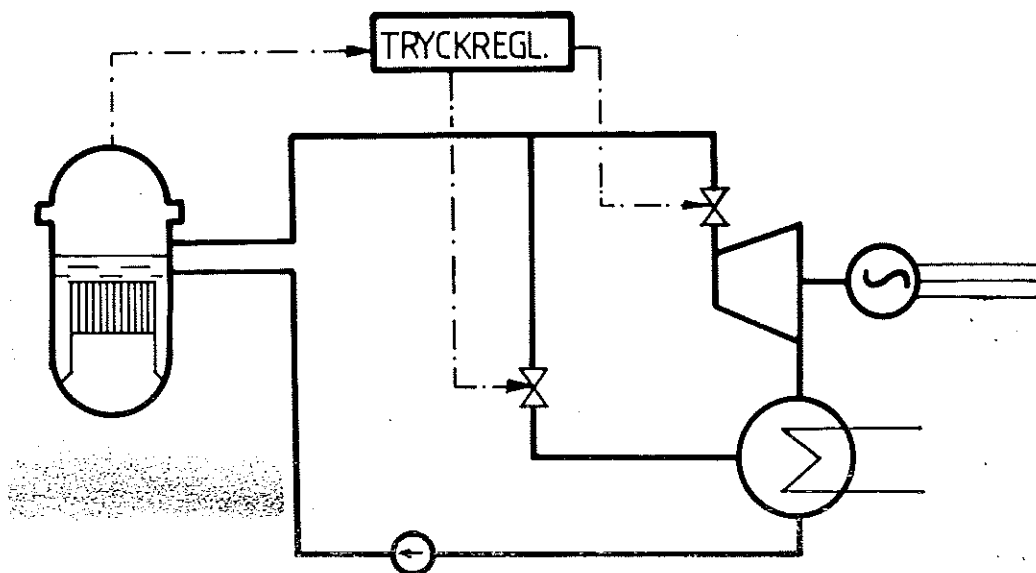


Fig. Reaktor, ångledning, turbin och tryckreglering.

3 SIMNON

SIMNON är ett kommandostyrt, interaktivt program för simulering av ordinära olinjära differential och differens ekvationer. Programmet har utvecklats vid institutionen för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.

SIMNON har sedan 1974 använts för forskning, utbildning och lösning av industriella regler- och simulerings-problem. Interaktiviteten möjliggör simuleringsstudier på kort tid. SIMNON har ett enkelt modellspråk och en omfattande felkontroll.

Användaren kommunicerar med programmet genom att använda kommandon. Det finns t.ex. kommandon för att ändra modellens parametrar, utföra simuleringar, plotta resultatet från simuleringen och för att modifiera modellen. Användaren kan också skapa egna högnivå kommandon genom att använda macros.

Systemet som skall simuleras kan oftast delas upp i naturliga undersystem, vilka kan programmeras separat. Undersystemen kopplas sedan ihop. Detta gör det t.ex. möjligt att ha ett bibliotek med processer. Vidare så är det mycket enkelt att ändra strukturen på en process.

När man simulerar en datorstyrd process är det naturligt att beskriva den fysikaliska processen med vanliga differentialekvationer och datorn med sin kontroll algoritm med differensekvationer. Pga detta tillåter SIMNON undersystem med både kontinuerlig och diskret tid.

4 MODELLBESKRIVNINGAR

Översikt

- 4.1 Neutron-kinetik
 - 4.1.1 CORE
 - 4.1.2 CORES

- 4.2 Ång-bildning
 - 4.2.1 BOIL
 - 4.2.2 STATIC
 - 4.2.3 B03
 - 4.2.4 B04

- 4.3 Ångledningar
 - 4.3.1 STEAM
 - 4.3.2 STEAM2
 - 4.3.3 STEAM2F
 - 4.3.4 STEAM2LA
 - 4.3.5 STEAM2LB
 - 4.3.6 STEAM2M

- 4.4 Hydraulservo för reglerventiler
 - 4.4.1 EHW

- 4.5 Tryckregulator
 - 4.5.1 PCON
 - 4.5.2 PCON2

- 4.6 Dömen
 - 4.6.1 DOME

- 4.7 Brusfilter
 - 4.7.1 SYSEX

4.1 Neutron-kinetik

4.1.1 CORE

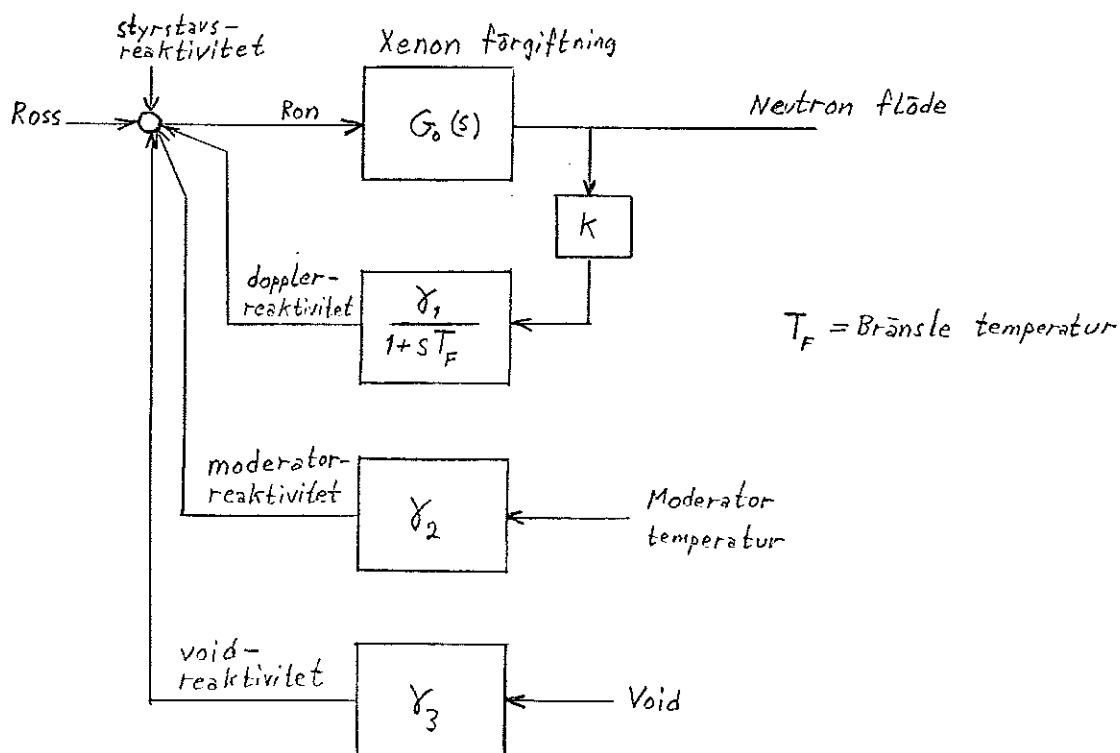
Beskriver neutronkinetiken i en BWR som en punktmodell med en medelgrupp av föregångare. Reaktivitets återkopplingen beräknas med hjälp av bränsle temperaturen, voiden och Xenon förgiftningen.

Version 2 har en brusingång, så att man kan störa R_{on} .

4.1.2 CORES

I några simuleringar blev CPU-tiden ganska lång. Eftersom tillstånden i denna modell är av ganska varierande storleksordning, skalades ekvationerna så att alla tillstånd blev approximativt 1. Detta minskade dock inte beräkningstiden nämvärt.

Blockschema:



4.2 Ångbildning

4.2.1 BOIL

Beskriver termohydrauliken, Ångbildningen, i en kokarreaktor. Det är en förenklad punktmodell som använder sig av dynamiken för ångkvaliteten och domens tryck. Förutsättningarna för modellen är: i) En linjär ångkvalitetsfördelning längs den kokande sektionen. ii) En linjär void-ångkvalite funktion. iii) En perfekt matarvatten kontroll.

Version 2 har en brusingång, där brusstörningen leds igenom ett fördröjningsfilter.

4.2.2 STATIC

Statiska ekvationer för tryckfallet över en box och en spalt som är parallellkopplade. Version 1 har konstant ångkvalitet, medan version 2 och 3 beräknar ett värde för denna.

4.2.3 BO3

Beskriver Ångbildningen i två parallella boxar. Modellen har en brusingång för störning av cirkulationspumpens varvtal.

Version 2 har två oberoende brusingångar. En för störning av huvudcirkulationspumpens varvtal och en för effektfördelningen mellan boxarna.

4.2.4 BO4 Beskriver Ångbildningen i två boxar och en spalt. Modellen har två oberoende brusingångar (se BO3 vers.2). I version 2 finns en tidsfördröjning för ångkvaliten. Version 3 har en utgång för medelvärdet av voiden.

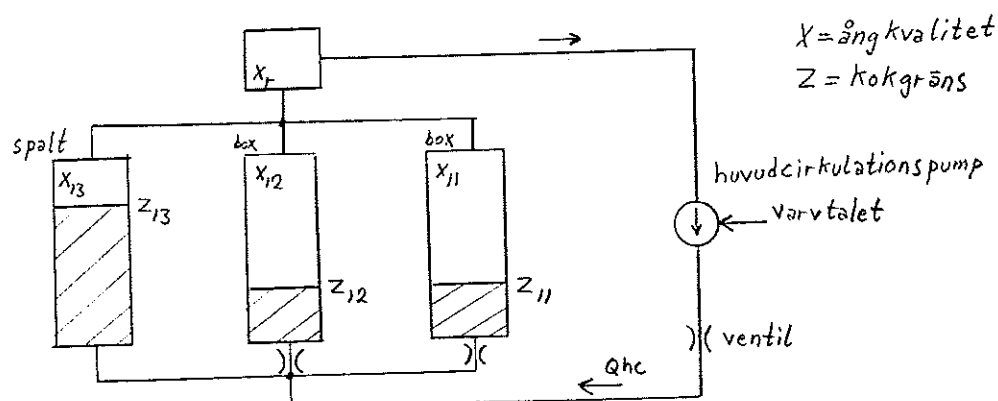
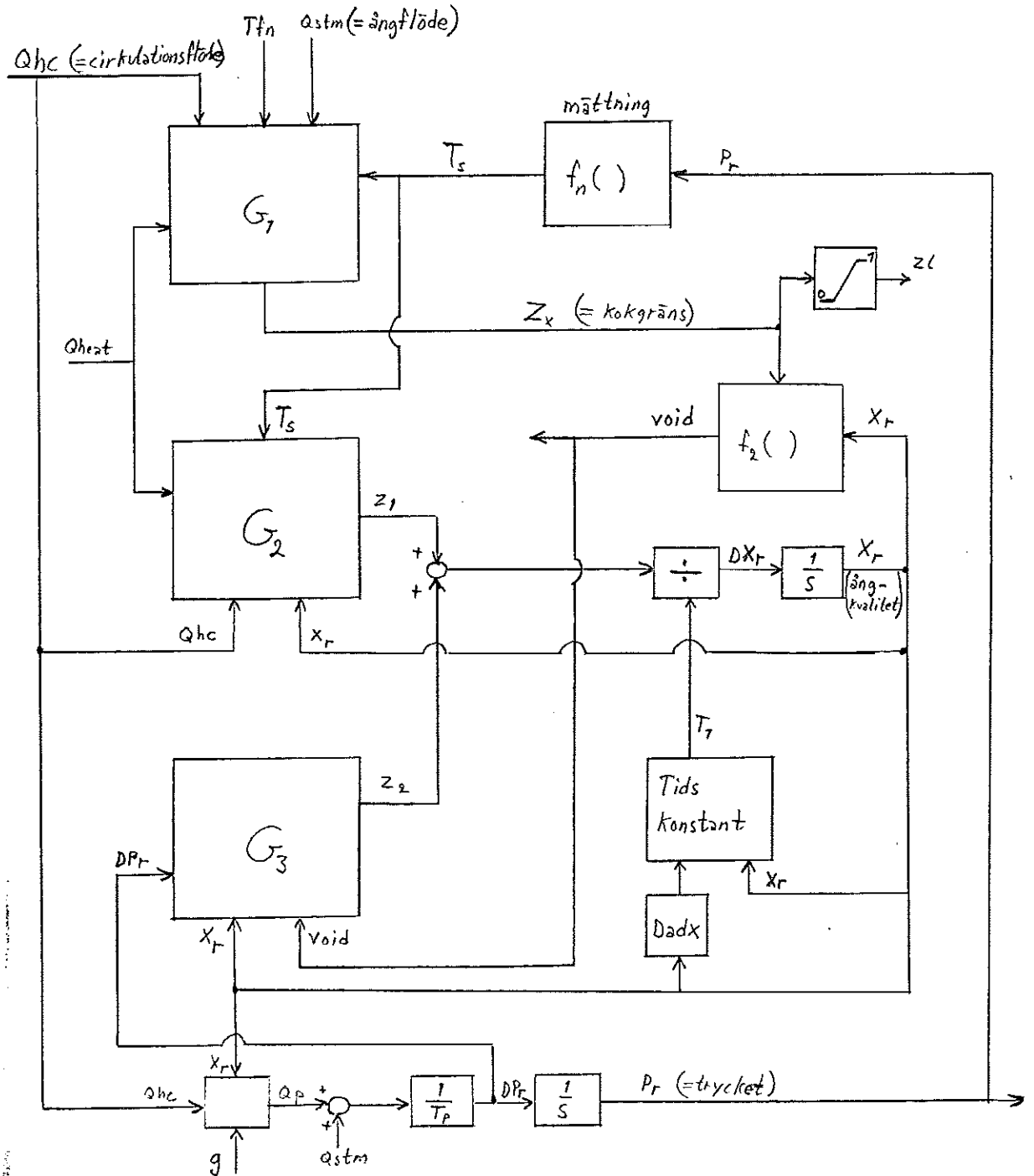


Fig. Två boxar och en spalt

Blockschema för BOIL:



4.3 Ångledningingar

4.3.1 STEAM

En förenklad olinjär, 5-nods, Ångledningsmodell. Ångflödet och trycket beräknas i varje nod.

4.3.2 STEAM2

En olinjär, 6-nods, Ångledningsmodell som beskriver Ångflödet genom ett rör. Modellen förutsätter ett linjärt tryckfall genom högtrycksventilen. Som referens har användts: IFAC Tutorials, Principles of model building and identification av Fasol och Jorgl.

De följande modellerna är vidareutvecklingar av STEAM2-modellen.

4.3.3 STEAM2F

Fördröjd flashing. Tryckderivatan fördröjs tiden Tau.

4.3.4 STEAM2LA

Lambda är en linjär funktion av flödesderivatan.

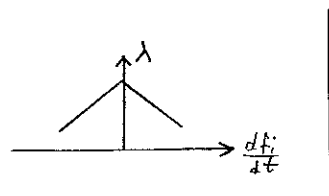


Fig. Lambda sfa flödesderivatan.

4.3.5 STEAM2LB

Lambda är en kvadratisk funktion av flödesderivatan.

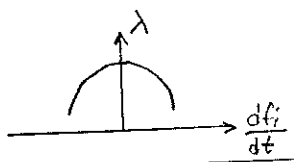


Fig. Lambda sfa flödesderivatan.

4.3.6 STEAM2M

Olinjär tryckdämpning. Små värden på tryckderivatan har liten dämpning.

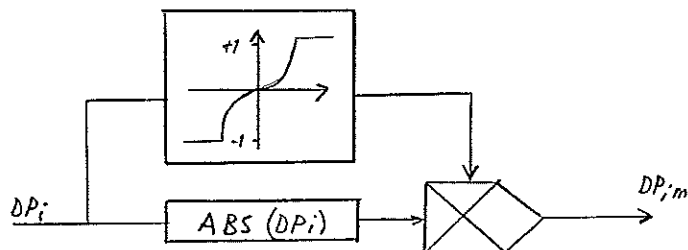
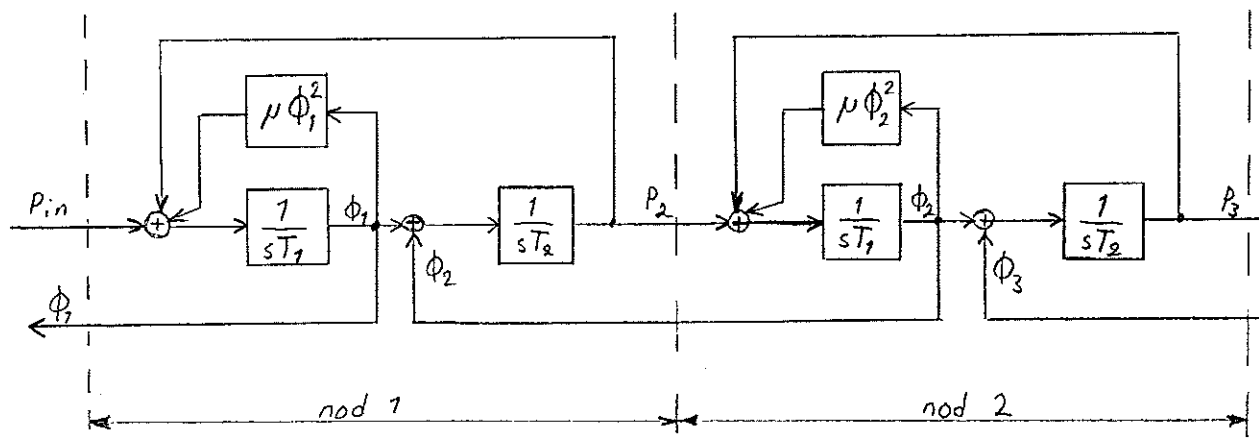


Fig. Olinjär tryckdämpning.

Blockschema för ångledningsmodellerna:

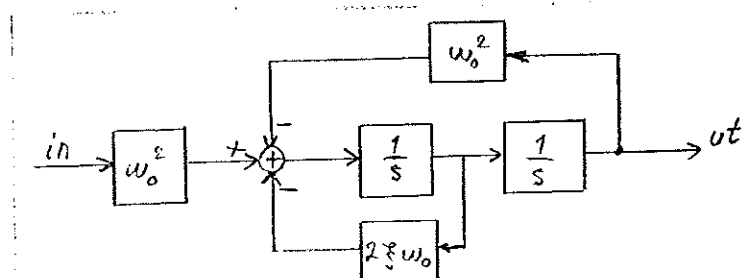


4.4 Hydraulservo för reglerventiler

4.4.1 EHW

En förenklad modell som representerar överföringsfunktionen mellan den elektrodynamiska ventilen och dynamiken för det hydrauliska kontrollsystemet.

Blockschema:



4.5 Tryckregulator

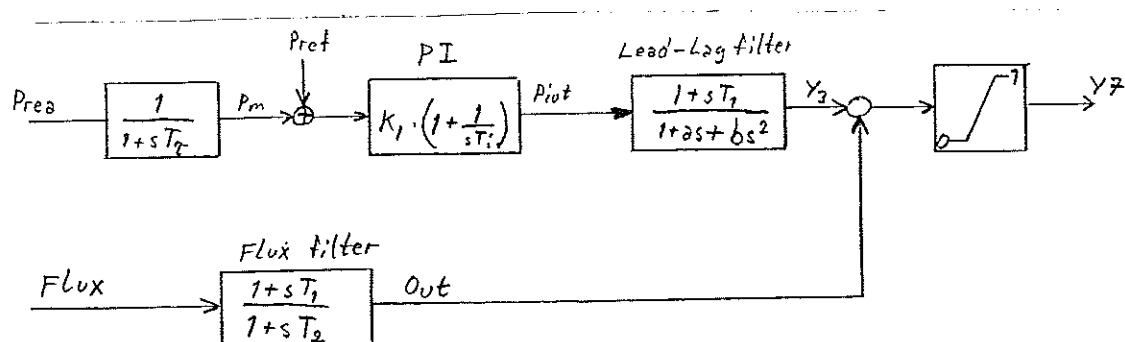
4.5.1 PCON

En förenklad modell av tryckregulatorn i Barsebäck. Regulatorn har en PI-funktion och innehåller ett flux-filter.

4.5.2 PCON2

En förbättrad modell av tryck kontroll systemet i Barsebäck.

Blockschema för PCON2:



4.6 Domen

4.6.1 DOME

En förenklad modell av reaktordomen för testning av tryck kontroll systemet.

4.7 Filter

4.7.1 SYSEX

En modell för filtrering av brus.

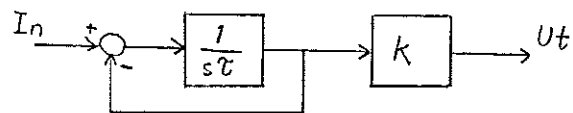


Fig. SYSEX

5 SIMULERINGSSTUDIER

5.1 Översikt

- 1 Test av de enskilda modellerna vid stationärt tillstånd.
 - 1.1 CORE och CORES
 - 1.2 BOIL
 - 1.3 STEAM och STEAM2

- 2 Sammankoppling av modellerna för dom, ångledning, hydraulik och regulator. Stationärt vid driftpunkten $\dot{Q}_{\text{prod}}=850$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$.
 - 2.1 Stegstörningar av trycket vid $\dot{Q}_{\text{prod}}=175$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$
 - 2.1.1 STEAM utbytt mot STEAM2
 - 2.2 Stegstörningar av ångproduktionen vid $\dot{Q}_{\text{prod}}=850$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$
 - 2.2.1 STEAM utbytt mot STEAM2.
 - 2.3 Rampstörningar av ångproduktionen vid $\dot{Q}_{\text{prod}}=850$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$
 - 2.3.1 STEAM utbytt mot STEAM2
 - 2.4 Brusstörningar av ångproduktionen vid $\dot{Q}_{\text{prod}}=850$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$
 - 2.4.1 STEAM utbytt mot STEAM2

- 3 Sammankoppling av ångbildning, ångledning, hydraulik och regulator. Stationärt vid $\text{Circflow}=5500$ kg/s, $\dot{Q}_{\text{prod}}=847$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$.
 - 3.1 Stegstörning av Circflow
 - 3.2 Rampstörning av Circflow

- 4 Sammankoppling av neutron-kinetik, ångbildning, ångledning, hydraulik och regulator. Stationärt vid $\text{Circflow}=5500$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$.
 - 5 Reaktorns driftdiagram. Effekt sfa huvudcirkulationsflödet. Sammankoppling av neutron-kinetik, ångbildning, ångledning, hydraulik och regulator.
 - 5.1 Stationärt vid $\text{Circflow}=5500$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$
 - 5.1.1 Brusstörning av ångbildningen
 - 5.2 Stationärt vid $\text{Circflow}=4500$ kg/s och $\text{Flux}=1.0$
 - 5.2.1 Brusstörning av ångbildningen
 - 5.3 Stationärt vid $\text{Circflow}=3500$ kg/s och $\text{Flux}=0.85$
 - 5.3.1 Brusstörning av ångbildningen

- 6 Studium av parametrarna förstärkning och integrations-
tid i tryckregulatorn. För simuleringarna har systemet
dom, ångledning, servo och regulator använts.
Brusstörning av ångproduktionen
- 6.1 STEAM2 utbytt mot STEAM

- 7 Jämförelser av de olika ångledningsmodellerna.
- 7.1 Sammankoppling av dom, ångledning, servo och
regulator vid driftpunkten $Q_{\text{prod}}=850$ kg/s och
Flux=1.0. Stegstörning av trycket.
- 7.2 Sammankoppling av neutron-kinetik, ångbildning,
ångledning, servo och regulator vid driftpunkten
Circflow=5500 kg/s och Flux=1.0. Brusstörning av
Circflow. Bodediagram för trycket har studerats
mha IDPAC.
- 7.3 Specialstudier av modellen med fördröjd flashing
(STEAM2F). Simuleringar i SIMNON följt av
spektrumanalys i IDPAC.
- 7.3.1 Brusstörning av trycket.
- 7.3.2 Brusstörning av ventilläget.

- 8 Simuleringar med reaktorn vid driftpunkten
Circflow=5500 kg/s och Flux=1.0
- 8.1 Stegstörning av Circflow
- 8.2 Variation av några olika parametrar i modellen för
neutron-kinetik
- 8.3 Brusstörning av tryckregulatorn

- 9 Studier av modellen för servot (EHW), mha systemet
neutron-kinetik, ångbildning, ångledning, servo
och regulator vid driftpunkten Circflow=5500 kg/s
och Flux=1.0. Variation av dämpnings- och
vinkelfrekvens parametrarna. Störning av trycket.

- 10 Simulering av dynamiken i bränslestavar och
ångbildning med systemet neutron-kinetik,
ångbildning och brusfilter.
- 10.1 Brusstörning av Circflow
- 10.2 Pulsstörning av Circflow

- 11 Simulering av dynamiken i bränslestavar och
ångbildning med systemet neutron-kinetik och
ångbildning. Simulering i SIMNON. Överförings-
funktioner från Q_{hcc} till X_r , Flux och Void
är framtagna mha IDPAC.
- 11.1 Vid driftpunkten Circflow=5500 kg/s och Flux=1.0
- 11.2 Vid driftpunkten Circflow=3500 kg/s och Flux=0.85

- 12 Statiska simuleringar för den statiska Ångbildningsmodellen (STATIC)
 - 12.1 Tryckfallet över spalt och box för olika driftpunkter
 - 12.2 Tryckfallet vid olika effekter
 - 12.3 Tryckfallet med regulatorförstärkningen som parameter
 - 12.4 Tryckfallet med matarvattentemperaturen som parameter

- 13 Simuleringar med en Ångbildningsmodell med två boxar (B03)
 - 13.1 Stegstörningar på varvtalet till cirkulationspumpen
 - 13.2 Stegstörning av effektfördelningen till boxarna
 - 13.3 Brusstörning av varvtalet och effektfördelningen

- 14 Simuleringar med en Ångbildningsmodell med två boxar och en spalt (B04)
 - 14.1 Stegstörning av effekten till box2
 - 14.2 Brusstörning av effekten till box1
 - 14.3 Ångproduktion, kokgräns, Ångkvalite och void sfa effekten
 - 14.4 Ångproduktion sfa varvtalet på cirkulationspumpen

- 15 Sammankoppling av neutron-kinetik och Ångbildningsmodellen med två boxar och en spalt (CORE och B04)
 - 15.1 Brusstörning på cirkulationspumpens varvtal

- 16 Brusstörning av modellen för neutron-kinetik
 - 16.1 Δ Flux sfa Δ Ron

5.2 Resultat

De i översikten nämnda simuleringarna som varit mest centrala för mitt examensarbete, kommer nedan att beskrivas något mera ingående.

5.2.1 Simuleringsstudie 2

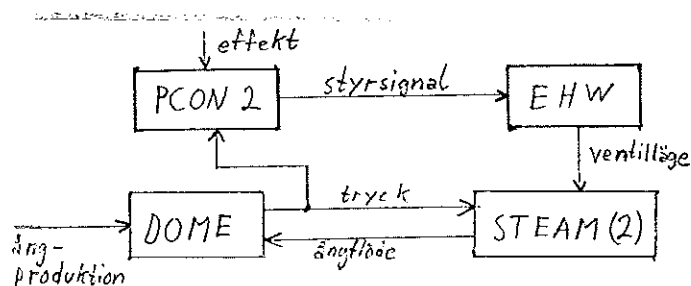
Jämförelse av STEAM och STEAM2

Syftet med denna inledande simuleringsstudie var att studera hur vissa systemparametrar (tryck, ångflöde och ventilläge) uppförde sig vid störningar (steg, ramp och brus) av systemets dynamik. De parametrar som störningarna adderades till var trycket och ångproduktionen.

För att jämföra ångledningmodellerna (STEAM och STEAM2) simulerades först en störning på systemet med STEAM modellen; därefter byttes STEAM ut mot STEAM2 och samma störning upprepades.

De modeller som kopplades samman var DOME, STEAM(2), EHW och PCON2. Sammankopplingen som gjordes med Connecting System PCT framgår av nedan givna blockschema.

Fig. Blockschema.



För att exemplifiera hur ett Connecting System i SIMNON är strukturerat ges nedan koden för Connecting System PCT.

CONNECTING SYSTEM PCT

Description: Connecting of steamline, dome, pressure control and ehw servo.

```

P1[pcon2]=Prea[dome]
Flx[pcon2]=Flew
In[ehw]=Y7[pcon2]+Dist
Ht1[steam]=Ut[ehw]
Po[steam]=Prea[dome]
Qprod[dome]=Qst
Qout[dome]=Fiout[steam]
  
```



```
Parameters:
Flew:1.0      Flux level      [pu]
Qst:250      Steam production [kg/s]
Dist:0.0
END
```

Av koden framgår även hur man kan addera en störning (Dist). För att underlätta simuleringarna har alla initialvärden till samtliga modeller lagrats i ett macro. Ett annat macro innehåller de kommandon som krävs för att initiera en simulering.

Det ovan beskrivna sättet att arbeta vid simuleringar, dvs koppla samman erforderliga modeller mha ett Connecting System, lagra initialvärden i ett macro och kommando i ett annat macro, har genomgående användts.

Nedan visas exempel på plottar från simuleringarna. Den simulerade tiden är 30 sek.

82.08.29 - 15:10:55 nr: 1
hcopy 0.8 *prea,flout och htl, stegstörning av trycket vid T=5.

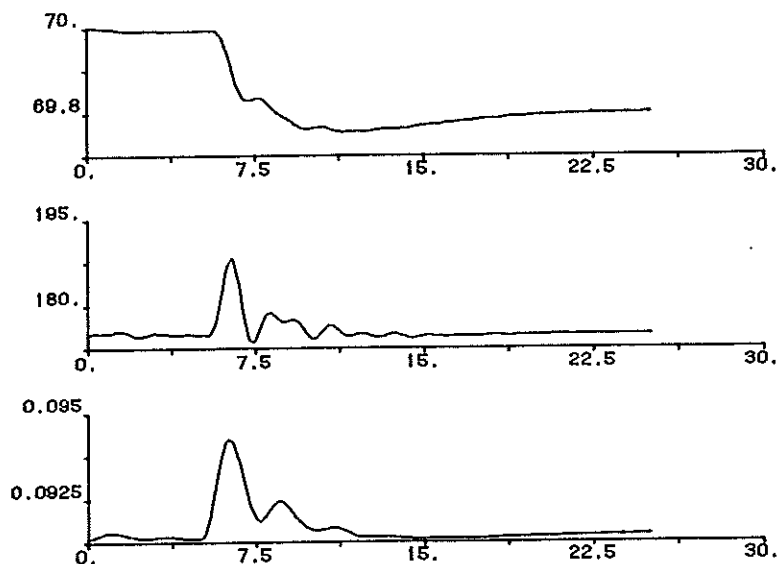


Fig. Simulering vid driftpunkten $\dot{Q}_{\text{prod}}=175$ kg/s och Flux=0.20. Stegstörning av trycket med 0.2 bar. De plottade parametrarna är trycket, ångflödet och ventilläget.

82.07.06 - 16:24:29 nr: 1
hcopy 0.8 *prea,flout och htl. Stegstörning av trycket.

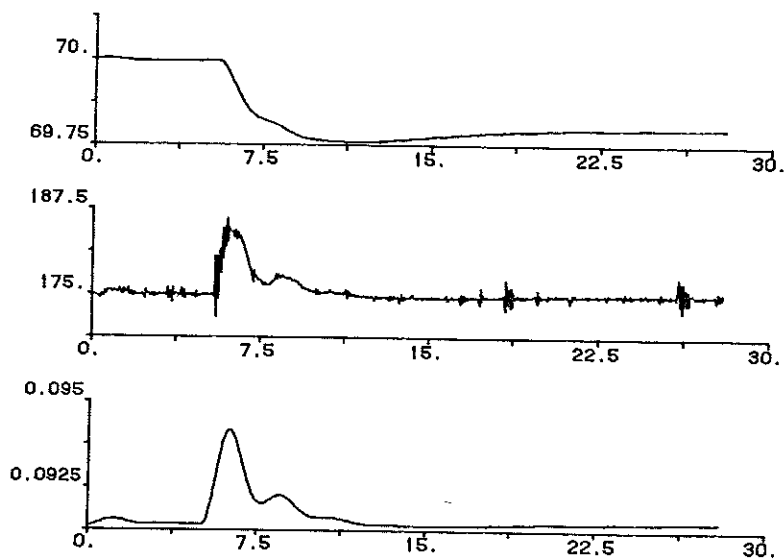


Fig. Samma simulering som i föregående figur. STEAM utbytt mot STEAM2.

82.07.07 - 12:10:24 nr: 1
hcopy 0.8 *prea,fiout och htl.Stegstörning av ångproduktionen (5X).

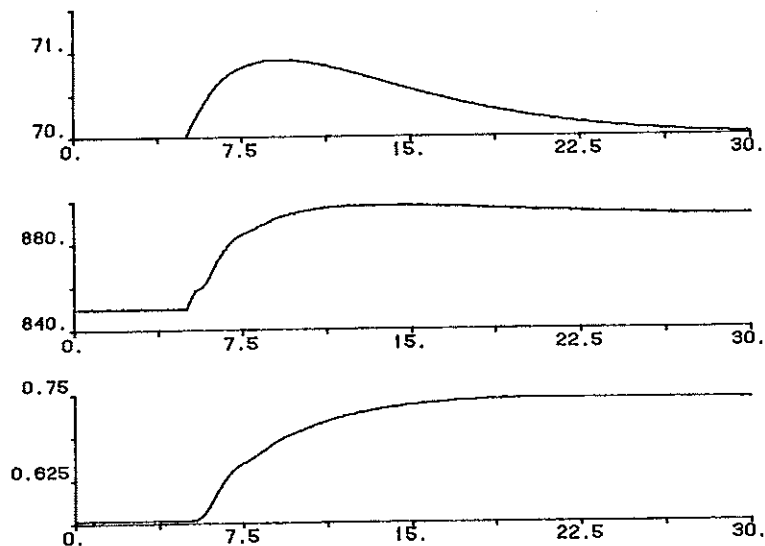


Fig. Simulering vid driftpunkten $Q_{\text{prod}}=850$ kg/s och Flux=1.0 med ångledningsmodellen STEAM2. Stegstörning med 5% av ångproduktionen.

82.08.29 - 20:23:25 nr: 1
hcopy 0.8 *prea,fiout och htl.Brusstörning av ångproduktionen ($\Sigma=10$)

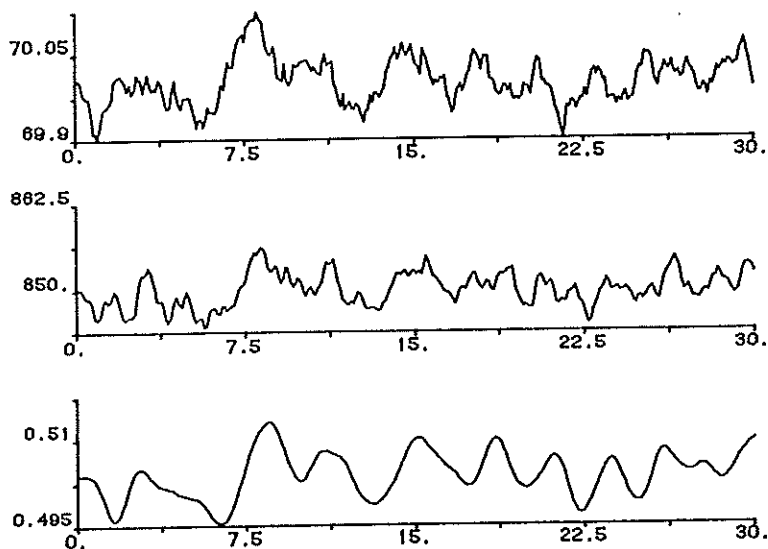


Fig. Simulering vid driftpunkten $Q_{\text{prod}}=850$ kg/s och Flux=1.0 med ångledningsmodellen STEAM. Brusstörning av ångproduktionen med amplituden 7 kg/s.

82.07.07 - 13:12:04 nr: 1
hcopy 0.8 'prea,fiout och htl.Brusstörning av ångproduktionen. (sigwa=10)

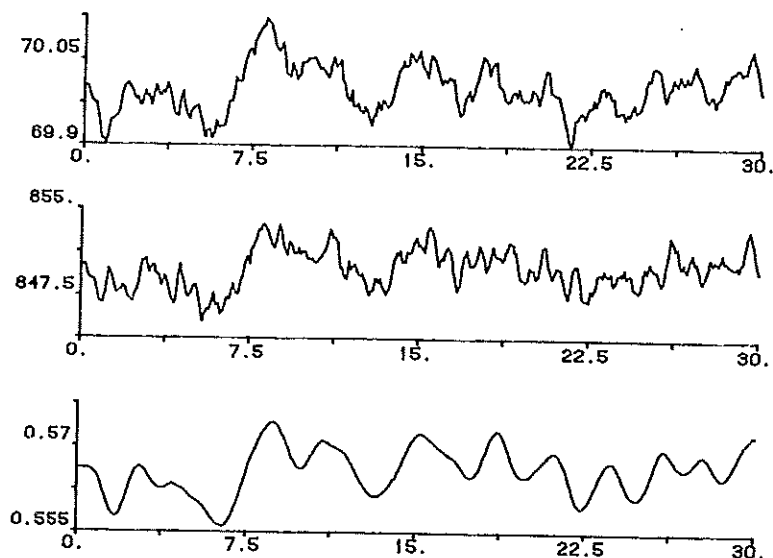


Fig. Samma simulering som i föregående figur.
STEAM utbytt mot STEAM2.

När man sedan jämförde dessa plottar med mätningar på reaktorn såg man att modellerna uppförde sig ganska likt verkligheten. Ångledningsmodellen STEAM2 visade sig vara den lämpligaste att använda i fortsättningen.

5.2.2 Simuleringsstudie 6

Tryckregulatorn

Syftet var att undersöka hur känsligt systemets stabilitet var mot en ändring av regulatorparametrarna. I Barsebäcksverket använder man en PI-regulator, vilket betyder att dess parametrar är förstärkning och integrationstid. Av undersökningen skulle även framgå huruvida den inställning som används är den mest optimala.

De modeller som sammankopplades var DOME, STEAM2, EHW och PCON2. Detta gjordes på samma sätt som i blockschemat i 5.2.1.

Vid simuleringarna stördes ångproduktionen vid full effekt av brus. Sedan uppmättes avvikelser från börvärde och max variation. Nedan ges en sammanställning av mätresultatet. Den parameterinställning som används i dag är förstärkning $k_I=0.85$ och integrationstid $T_i=5.0$ sek.

k1	Ti	1	2	3	4
0.05	5.0	0.14	0.07	3.4	0.72*E-3
0.10	5.0	0.15	0.092	3.8	1.70*E-3
0.85	5.0	0.14	0.075	5.4	11.0*E-3
1.50	5.0	0.18	0.096	10.8	25.0*E-3
0.85	3.0	0.15	0.104	6.6	15.0*E-3
0.85	7.0	0.11	0.066	5.5	9.5*E-3
0.10	3.0	0.11	0.080	4.3	2.0*E-3
0.10	7.0	0.14	0.088	3.8	1.6*E-3
1.5	3.0	0.11	0.066	8.5	22.0*E-3
1.5	7.0	0.12	0.072	7.5	19.0*E-3

- 1: Tryck, max variation topp till topp
 2: Tryck, max avvikelse från tryckbörvärde (70 bar)
 3: Ångflöde, max variation topp till topp
 4: Ventilläge, max variation topp till topp

Den gjorda undersökningen är inte tillräcklig för att avgöra huruvida parameterinställningen är optimal. Man bör t.ex även undersöka hur snabba variationerna är dvs de uppmätta parametrarnas derivata. Nedan visas en plottning av parametrarna tryck, ångproduktion och ventilläge för $k1=0.85$ och $Ti=5.0$.

82.07.14 - 10:55:26 nr: 2
hcopy 0.8 *K1=0.85 och T1=5.0. Verkligt driftläge..

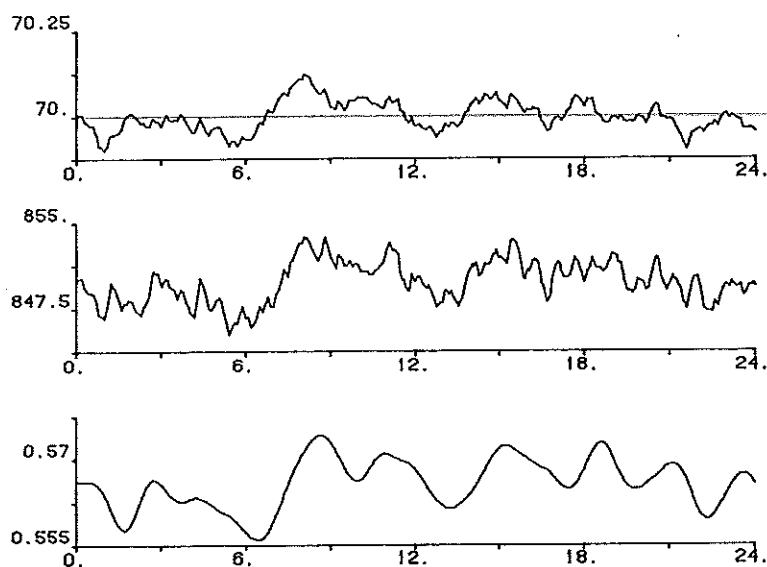


Fig. Parametervariationer vid brusstörning av Ångproduktionen.

5.2.3 Simuleringsstudie 7

Jämförelser av de olika Ångledningsmodellerna.

En av de större delarna av arbetet har varit att förbättra och vidareutveckla Ångledningsmodellen STEAM2. De olika förslag som togs fram var STEAM2F (fördröjd flashing), STEAM2LA(B) (lambda beror av flödesderivatan) och STEAM2M (olinjär tryckdämpning). Dessa beskrivs i avsnitt 4.3 Ångledningar.

För att kunna jämföra de olika modellerna kopplades systemet DOME, STEAM2, EHW och PCON2 ihop (se blocschema i 5.2.1). Simuleringarna gjordes vid full effekt. En störning adderades till styrsignalen från regulatorn, och parametrarna tryck och Ångproduktion studerades.

Tyvärr blev skillnaden mellan de olika modellerna mycket liten. Detta kan bero på att trycket i domen studerades. Domens stora volym kan ha utjämnat variationerna mellan de olika modellerna. Det hade kanske varit bättre att studera trycket i en nod i respektive Ångledningsmodell.

Nedan ses en simulering med modellen med fördröjd flashing. De plottade parametrarna är tryck och Ångproduktion.

82.07.18 - 16:04:36 nr: 4
 hoopy 0.8 *Delayed flashing. Prea and Flout. Tau=2.0 (Dist=0.0070)

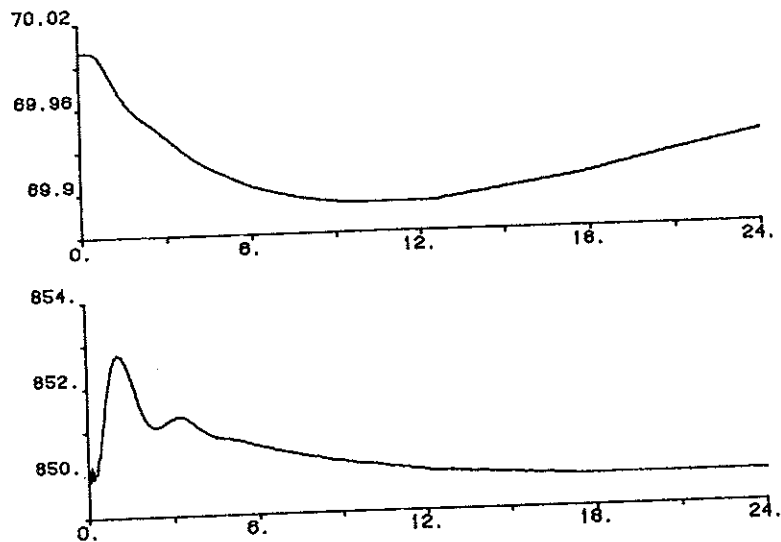


Fig. Simulering med STEAM2F

I nästa jämförelse av de olika modellerna kopplades systemet CORE, BOIL, STEAM_, EHW och PCON2 ihop.

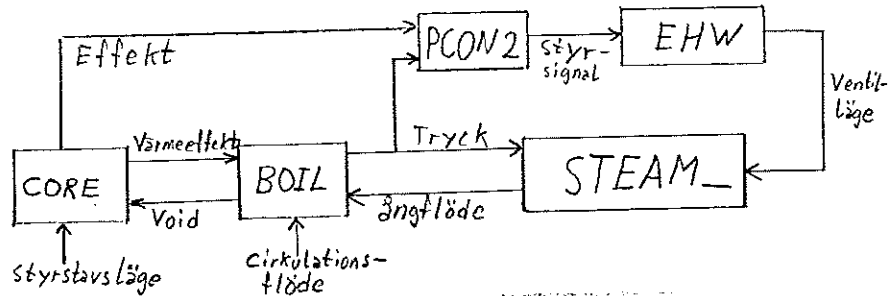


Fig. Blockschema

Simuleringarna gjordes vid full effekt och med cirkulationsflödet=5500 kg/s. Vitt brus lades på cirkulationsflödet och processen simulerades i 120 sek. Därefter togs Bodediagram för trycket fram mha IDPAC-programmet. Nedan visas exempel på plottar från modellen STEAM2M (olinjär tryckdämpning).

82.08.04 - 17:03:36 nr: 2
hcopy 0.8 *Flux och Qhc, Steam2M k=1.0E-5

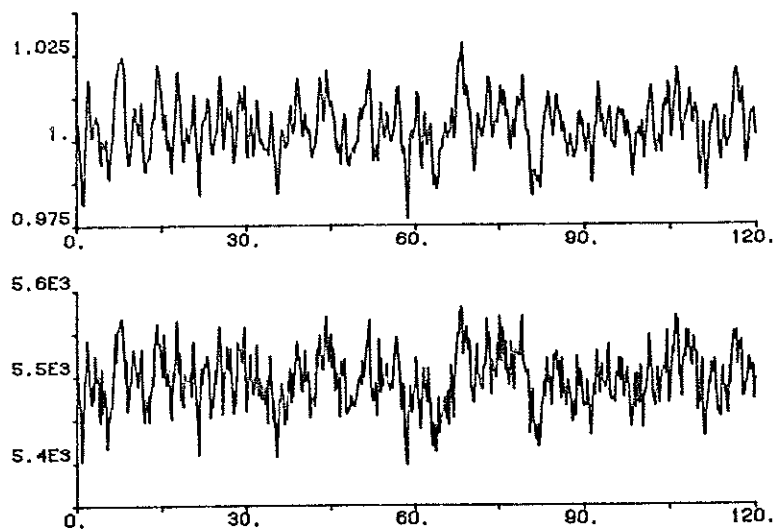


Fig. Simulering av effekt och cirkulationsflöde

82.08.04 - 17:01:41 nr: 1
hcopy 0.8 *Pr, Flout och Void. Steam2M k=1.0E-5

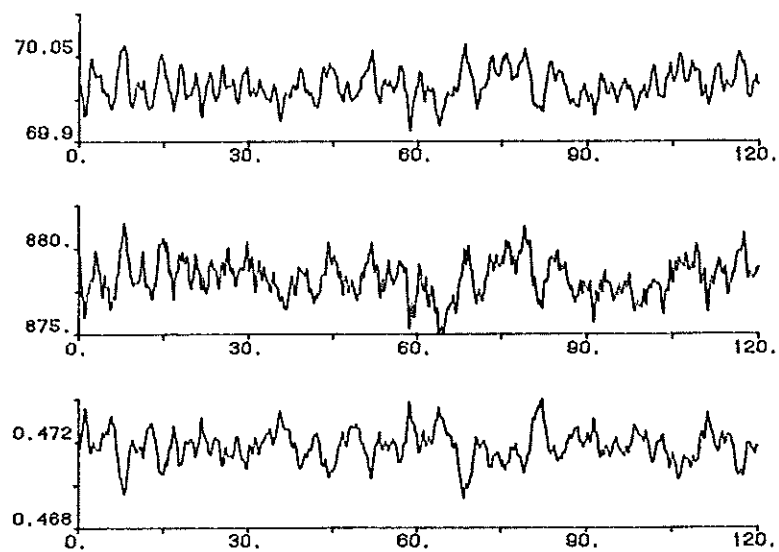


Fig. Simulering av tryck, ångproduktion och void.

bode os1
82.08.04 - 17:08:53 Steam 2M, $k=1.0 E-5$

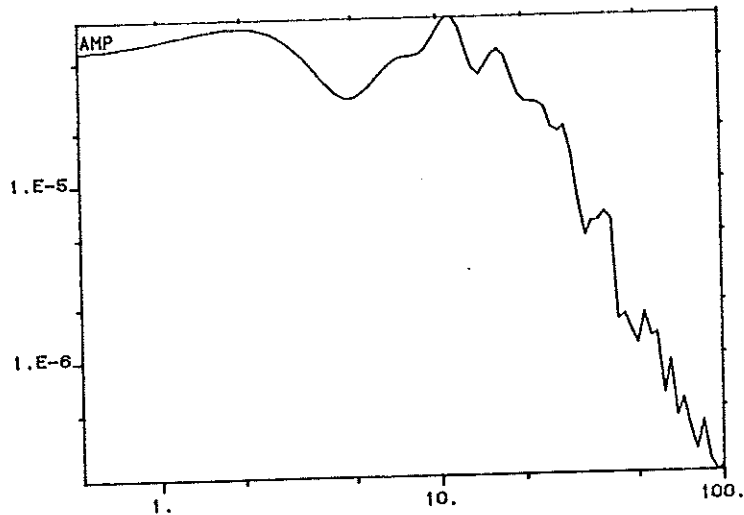


Fig. Autospektrum för domtrycket

Till sist gjordes specialstudier på STEAM2F. För att man verkligen skulle få fram ett tydligt resultat, kördes modellen ensam med konstanta insignaler. Brusstörning lades på tryck resp ventilläget vid full effekt.

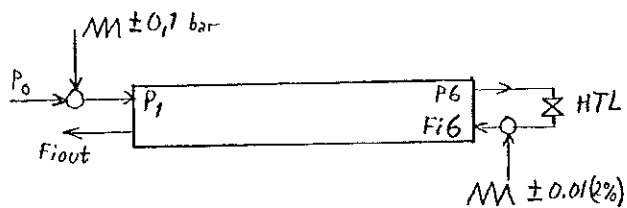


Fig. Uppkoppling av STEAM2F

Tre olika tidsfördröjningar simulerades: 0.1, 1.0 och 10 sek. Mha IDPAC gjordes även en spektrumanalys för trycket i första och sista noden dvs P1 och P6. Nedan visas ett exempel där ventilläget är stört med brus.

82.08.08 - 11:48:20 nr: 4
hcopy 0.8 *Brusstörning av trycket. P1 och P6. Tau=1.0

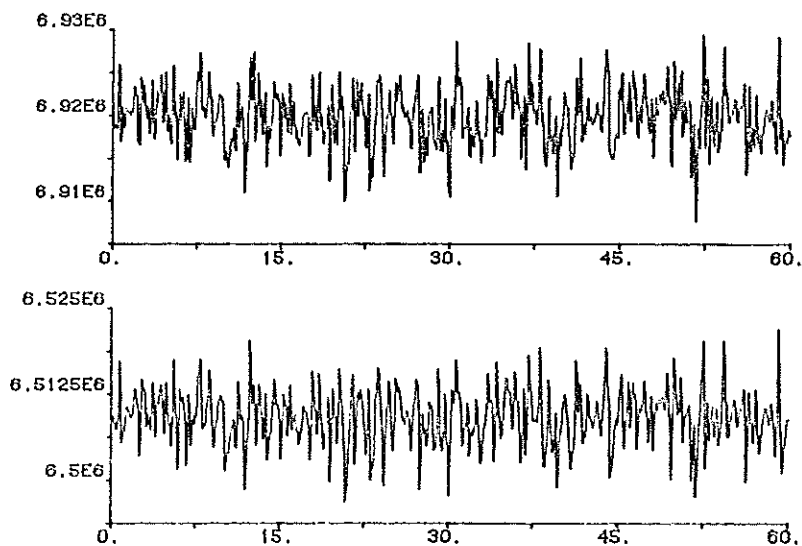


Fig. Simulering av trycken P1 och P6.
Tidsfördröjningen är 1.0 sek.

82.08.08 - 11:50:51 nr: 5
hcopy 0.8 *Brusstörning av trycket. Fiout och Fi6. Tau=1.0

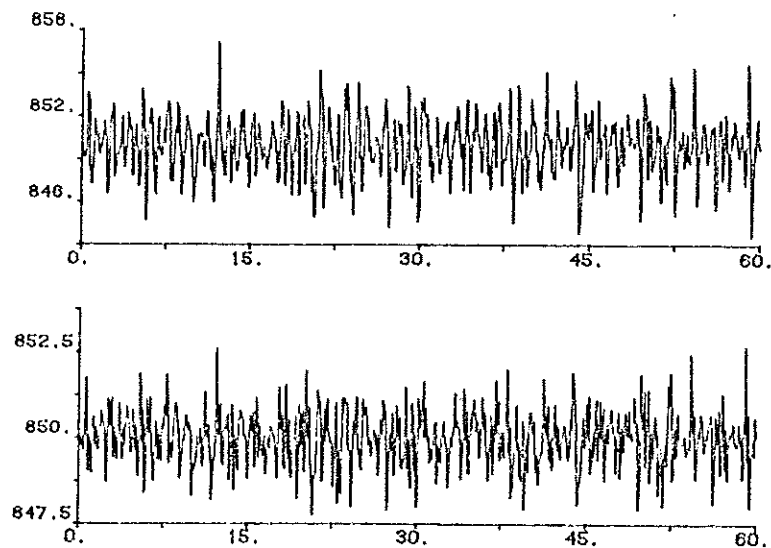


Fig. Simulering av ut- och ingångsflödena Fiout och Fi6.

bode spec3 spec4
82.08.10 - 10:03:10

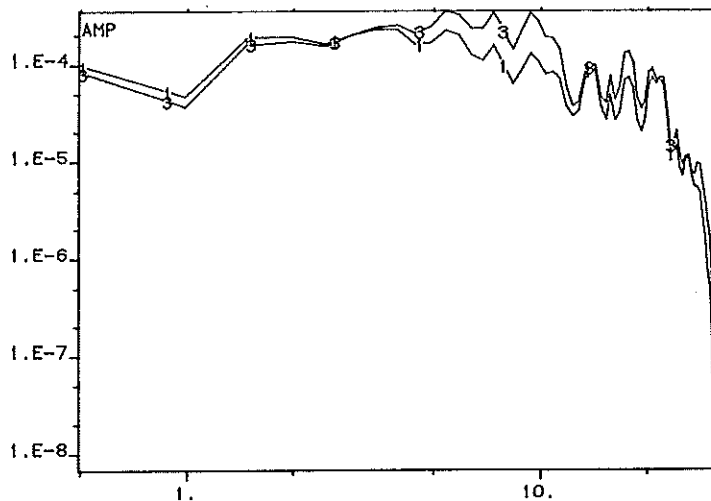


Fig. Spektrumanalys av P1 och P6.

5.2.4 Simuleringsstudie II

Överföringsfunktioner

Om man lägger en brusstörning på cirkulationsflödet och sedan studerar ett antal olika parametrar, ser man att de olika parametrarnas brus är av olika karaktär. Dvs de har olika spektralfördelningar.

För att studera detta närmare gjordes en sammankoppling av systemen BOIL och CORE enligt nedan.

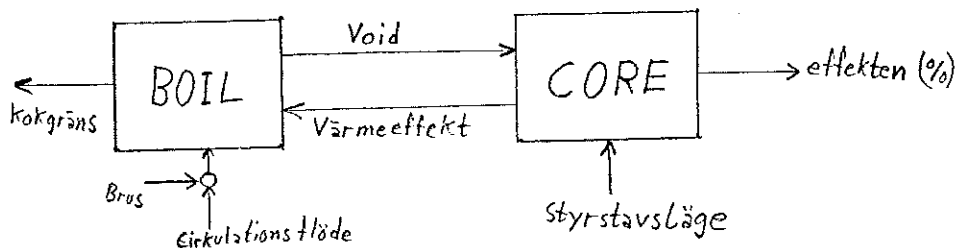


Fig. Blockschema

Nedan visas hur det ser ut när systemet störs med brus som har amplituden 50 kg/s. Systemets driftläge är 100% effekt

och cirkulationsflödet är 5500 kg/s.

Driftpunkten: 5500 kg/s ; 1.0
 82.08.11 - 10:36:06 nr: 1
 hcopy 0.8 *Brusstörning av circflow. Flux, Void och Qheat.

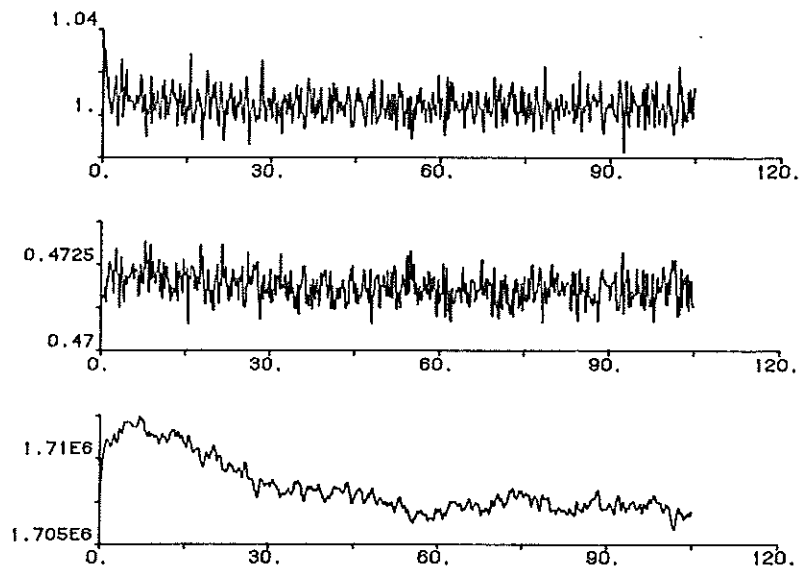


Fig. Effekt, void och termisk effekt.

Driftpunkten 5500 kg/s ; 1.0
 82.08.11 - 10:38:44 nr: 2
 hcopy 0.8 *Brusstörning av circflow. Qhco, Xr och Zl.

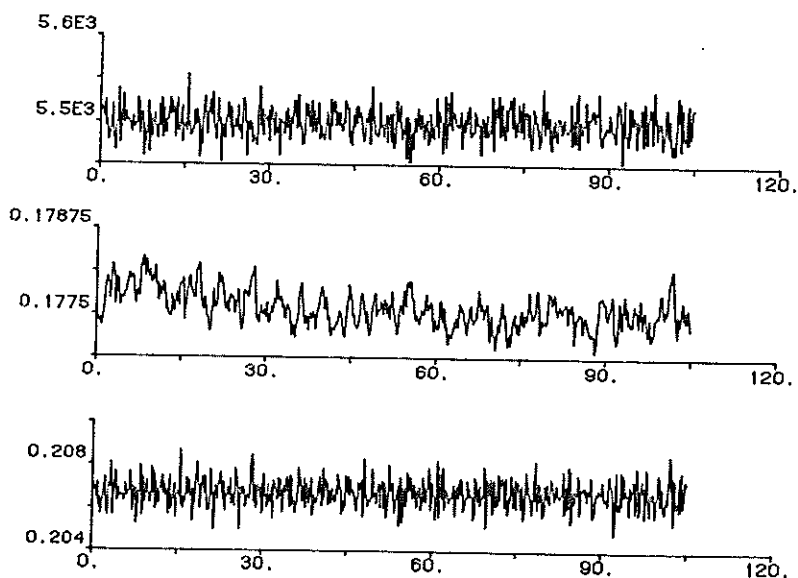


Fig. Cirkulationsflöde, Ångkvalitet och kokgräns

För att studera hur de olika parameterarna beror av cirkulationsflödet, har programpaketet IDPAC användts. Överföringsfunktioner från cirkulationsflöde till effekt, void resp ångkvalite har analyserats.

BODE transf2
82.08.11 - 11:29:36

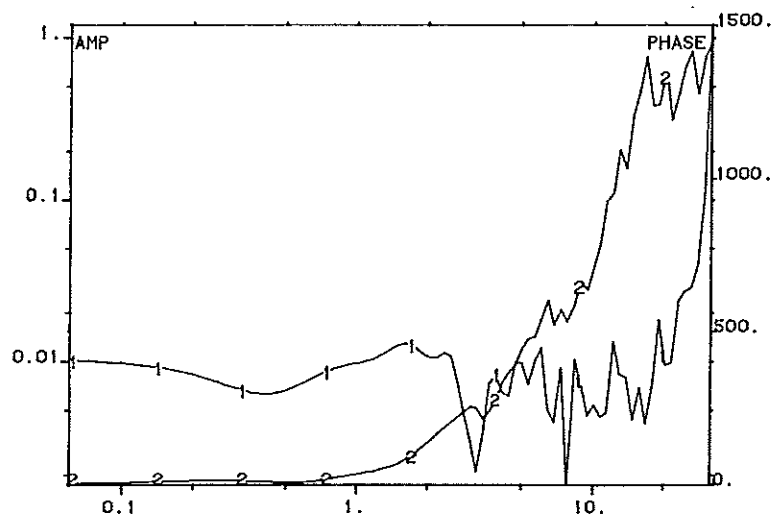


Fig. Överföringsfunktion från cirkulationsflöde till effekt

BODE transf3
82.08.11 - 11:35:47

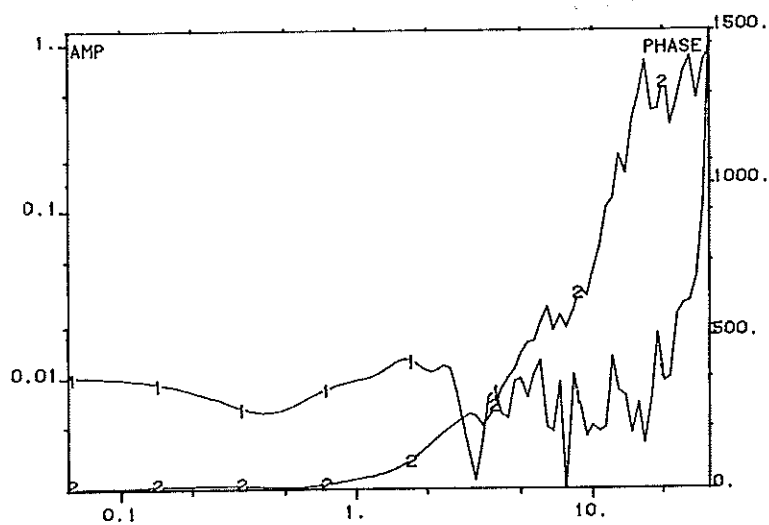


Fig. Överföringsfunktion från cirkulationsflöde till void

BODE transf1
82.08.11 - 11:25:21

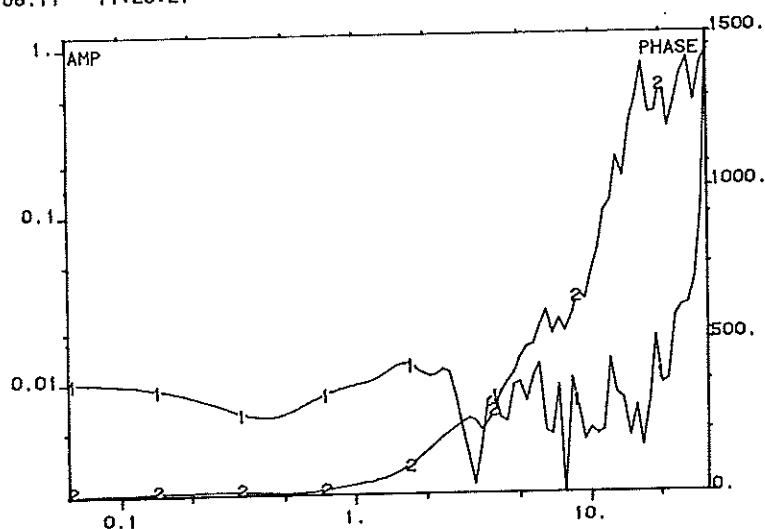


Fig. Överföringsfunktion från cirkulationsflöde till ångkvalite

5.2.5 Simuleringsstudier 12-15

Framtagning av en ångbildningsmodell med två boxar och en spalt

Denna avslutande simuleringsstudie syftade till att ta fram en ny ångbildningsmodell. Modellen skulle vara baserad på två boxar och en spalt, enligt principskiss nedan.

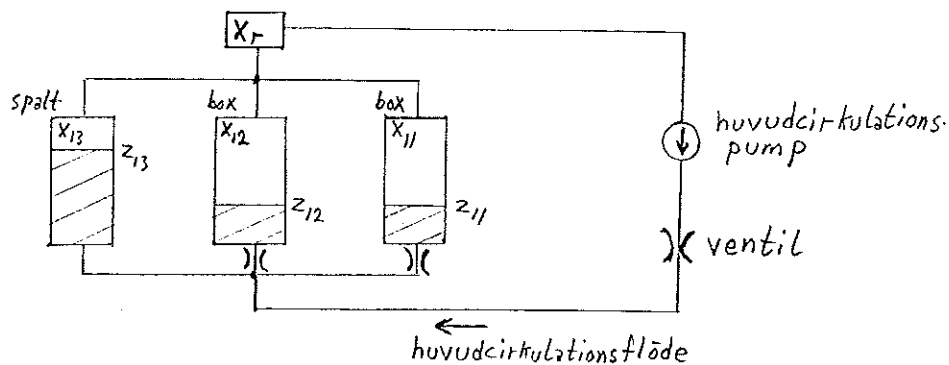


Fig. Principskiss

Beteckningarna X står för ångkvalitet och Z står för

kokgräns. Tryckfallet över en box består av tre delar: tryckfallet över inloppsstrykning, två fas flödes friktion och gravitationstryckfall. I simuleringsstudien 12 gällde det att studera sambandet mellan tryckfallen över spalten och boxen och beroendet av cirkulationsflödet. Andra samband som undersöktes var hur tryckfallet berodde av t.ex effekten, regulatorförstärkningen och matarvattentemperaturen.

92.08.17 - 15:10:16 nr: 1
hcopy 0.8 *Tryckfallet vid olika effekter.

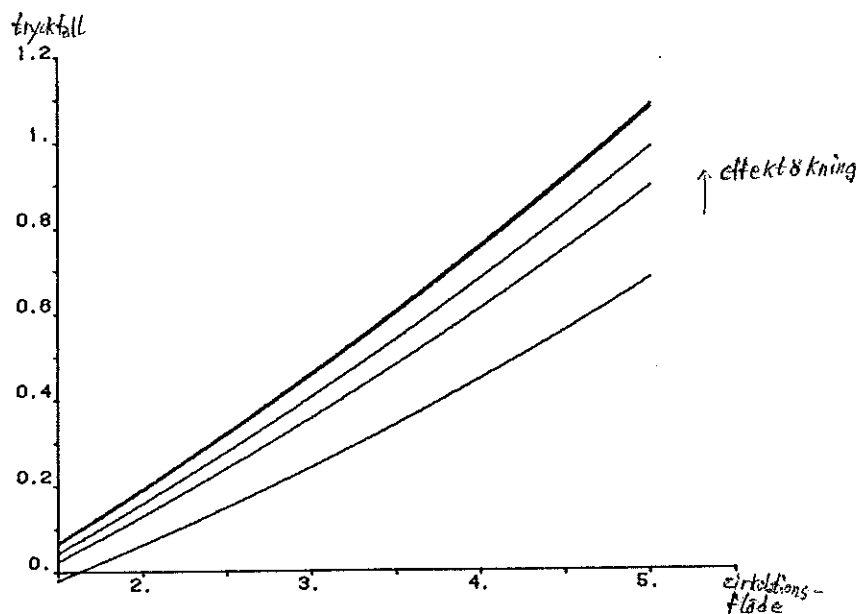


Fig. Tryckfallet vid olika effekter

82.08.17 - 15:25:00 nr: 1
hcopy 0.8 * Tryckfallet med Tfw som parameter. $120 < T_{fw} < 180$

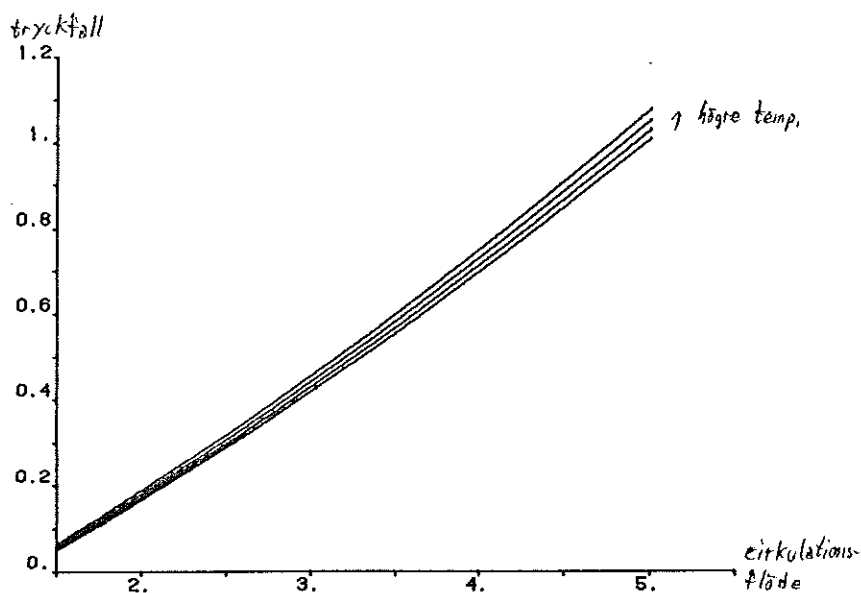


Fig. Tryckfallet vid olika matarvattentemperaturer.

Den första modellen innehöll två boxar. Syftet med denna modell var främst att se hur de två boxarna samverkade vid olika typer av störningar. De olika störningar som simulerades var: steg- och brusstörning av varvtalet på huvudcirkulationspumpen och samtidig brusstörning av både pumpvarvtal och effektfördelningen mellan boxarna.

82.08.24 - 14:33:55 nr: 3
hcopy 0.8 *Stegstörning (+25) av varvtalet. Qhc och Flp.

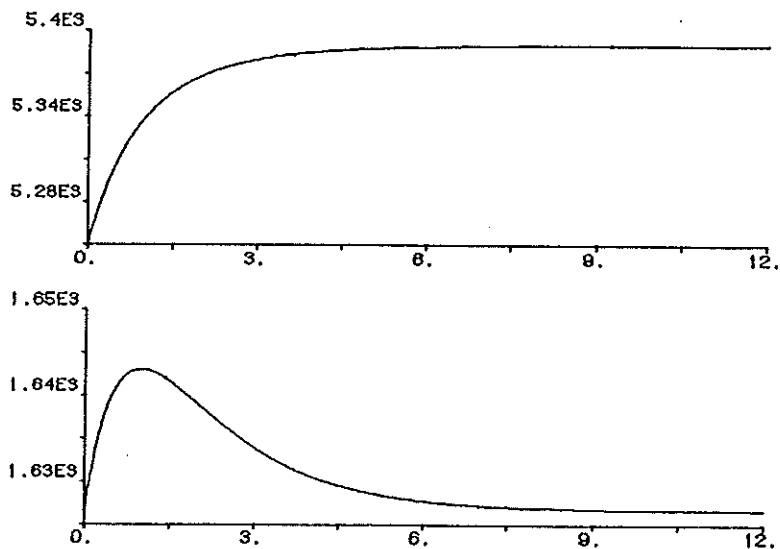


Fig. Stegstörning av varvtalet. Cirkulationsflöde och Ångproduktion

82.08.24 - 14:35:31 nr: 4
hcopy 0.8 *Stegstörning (+25) av varvtalet. XII och Vox1.

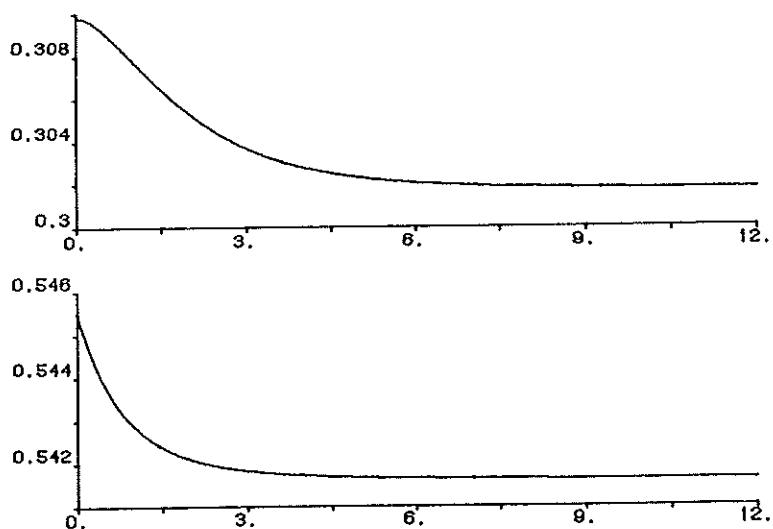


Fig. Stegstörning av varvtalet. Ångkvalite och void i en av boxarna

82.08.24 - 16:19:24 nr: 1
hcopy 0.8 *Brusst. av varvtal och effektförd.

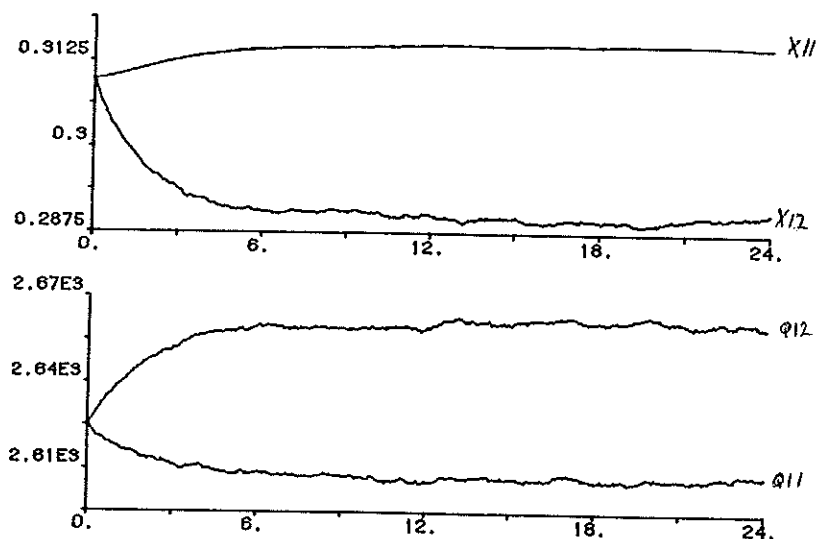


Fig. Brusstörning av både varvtal och effektfördelning.
Ångkvalite (X) och Ångflöde (Q)

82.08.24 - 16:26:48 nr: 2
hcopy 0.8 *Brusst. av varvtal och effektförd.

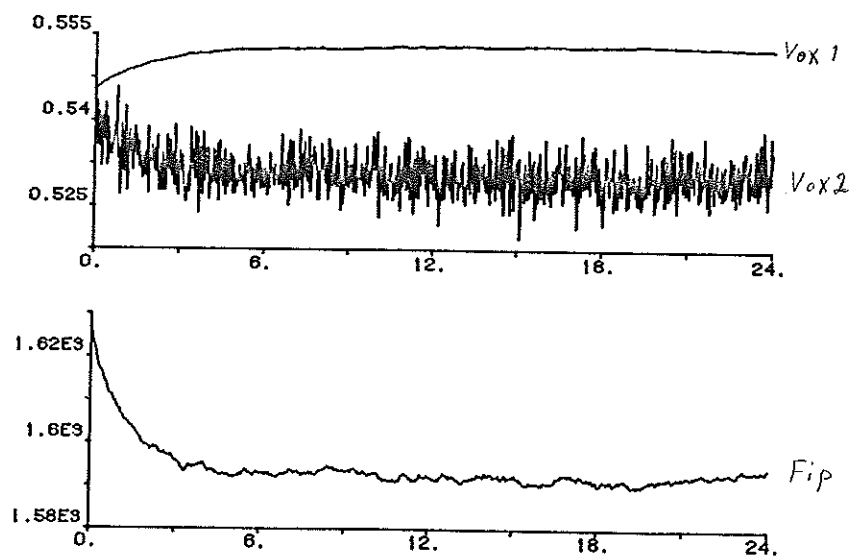


Fig. Brusstörning av både varvtal och effektfördelning.
Void (vox) och Ångproduktion (fip)

Med utgångspunkt från den enklare modellen kunde nu en ny modell, (B04), som innehöll två boxar och en spalt skrivas. För att kontrollera denna modells uppförande gjordes vissa tester som t.ex stegstörning och brusstörning av effekten till den ena boxen.

Slutligen kopplades Ångbildningsmodellen (B04) samman med modellen för neutronkinetik (CORE). Här nedan visas hur detta systems parametrar uppför sig när huvudcirkulationspumpens varvtal störs med brus.

82.09.03 - 17:02:04 nr: 3
hcopy 0.8 *Brus (10) pa varvtalet. Vox1, Vox3 och Flux.

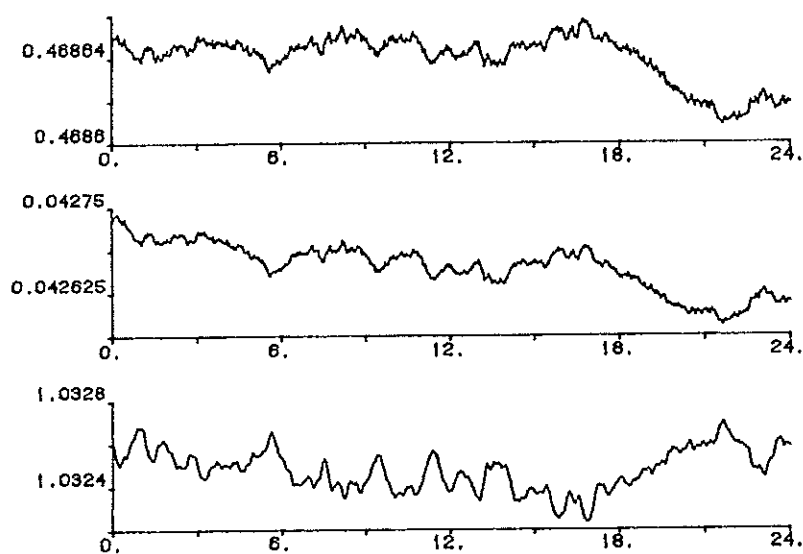


Fig. Voiden i box resp spalt och effekten.

82.09.03 - 16:55:17 nr: 1
hcopy 0.8 "Brus pa varvtalet. Q11, Q13 och Qha.

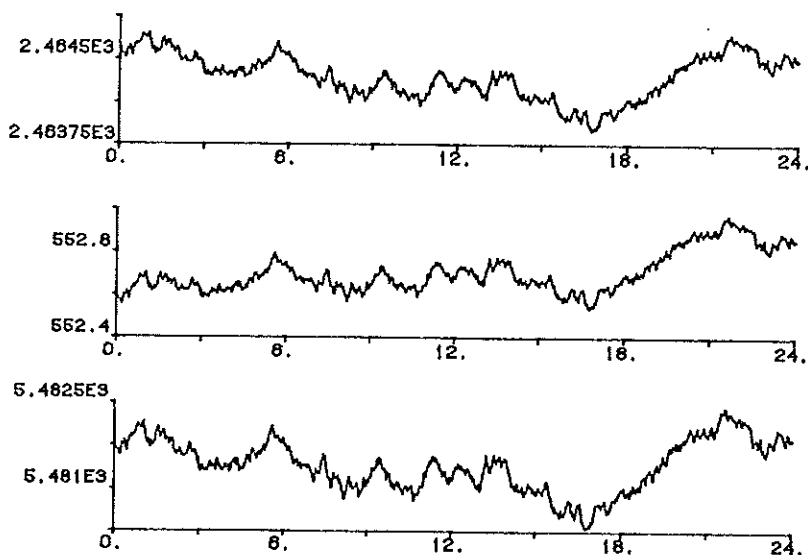


Fig. Ångflödet i box resp spalt och cirkulationsflödet.

82.09.03 - 16:59:49 nr: 2
hcopy 0.8 "Brus (10) pa varvtalet. X11, X13 och Fip.

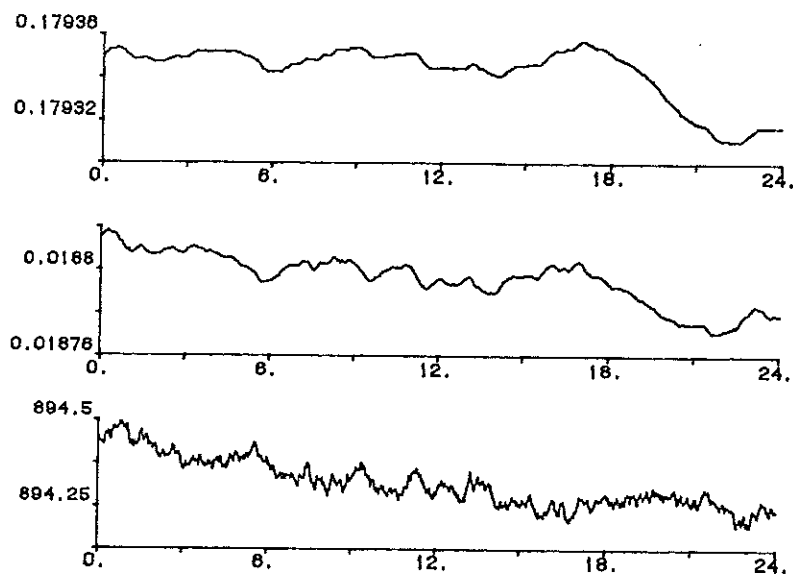


Fig. Ångkvalitet i box resp spalt och total ångproduktion.

6 SAMMANFATTNING

Examensarbetet har behandlat matematiska modeller av en kokarreaktor. Främst har olika modeller för ångbildning och ångledning studerats.

Arbetet, som krävde mycket datorkraft, har utförts på institutionens VAX dator. Det kan nämnas att den totala tiden vid terminal har varit drygt 250 timmar. Därav var cirka en femtedel, dvs 50 timmar, CPU tid.

Det är min förhoppning att detta arbete skall komma till nytta vid eventuella framtida simulatorer vid kärnkraftverk.

7 REFERENSER

K.J. Aström: Reglerteori

H. Elmqvist: SIMNON

K.H. Fasol and H.P. Jörgl: IFAC Tutorials, System Identification.
Principles of Model Building
and Identification