

SVF-32

**UNDERSÖKNING AV FLASHAVGASNING  
MED OCH UTAN ÅTERCIKULATION**

**Björn Kjellström och Bo Töcksberg**

**Studsvik, Nyköping, Juni 1977**

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

A series of experiments with flashing de-aeration has been carried out at the institute of Thermal Energytechnology of the Royal Institute of Technology in Stockholm. The results of the experiments with flashing de-aeration without recirculation of the condensate show very low contents of dissolved oxygen in the de-aerated water. The results indicate that the de-aeration process is independent of the pressure. De-aeration efficiencies over 99 percent were measured.

The continued experiments with recirculation of the condensate show a considerably deteriorated de-aeration performance together with a marked pressure dependency.

A simple theoretical model has been formulated which explains these results.

Comparisons between the experimental data and calculations with this model indicate that a conservative estimation of the oxygen content of the outgoing water can be obtained if the oxygen content of the recirculated condensate is calculated for the partial pressure of noncondensable gas equal to the total pressure in the condensor. It seems also possible to estimate a lower limit for the oxygen content of the outgoing water.

The range of oxygen content between those two limits is about a factor of 10 for the conditions investigated. Further studies of the uptake of oxygen during condensation seem necessary if a more accurate prediction is desired.

Undersökning av flashavgasning med och utan återcirkulation

KTH, TERMISK ENERGITEKNOLOGI  
STOCKHOLM

Björn Kjellström  
Bo Töcksberg

## SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

De vid KTH Termisk Energiteknologi utförda examensarbetena vid flashavgasning utan återcirkulation (1 och 2) pekar på en mycket låg syrehalt i det avgasade vattnet, samt att avgasningsprocessen över en viss flashgrad var tryckberoende. Verkningsgrader över 0.99 uppmättes.

Vid de fortsatta försöken med även återcirkulerat kondensat (3) erhöles däremot en kraftigt försämrad avgasning, samtidigt som ett tydligt tryckberoende kunde spåras.

Genom en enkel teoretisk modell kan detta resultat förklaras. Jämförelser mellan experimentdata och beräkningar med denna modell tyder på att en försiktig uppskattning av syrehalten i utgående vatten kan erhållas om syrehalten i dränage från förvärmaren beräknas med partialtrycket för okondenserbara gaser i förvärmaren satt lika med totaltrycket. Det förefaller också möjligt att uppskatta en undre gräns för syrehalten.

Skillnaden i syrehalt mellan de två metoderna är omkring en faktor 10, för de förhållanden som studerats vid experimenten. Om en noggrannare beräkningsmetod önskas torde ytterligare studier av syreupptagning vid kondensation bli nödvändiga.

## Innehållsförteckning

1. Inledning
  2. Teoretisk modell för flashavgasning med återcirkulation
  3. Försök med flashavgasning utan återcirkulation
    - 3.1 Allmänt
    - 3.2 Försöksuppställningar
    - 3.3 Flashtank
    - 3.4 Utrustning och teknik för mätning av syrehalter
    - 3.5 Försöksresultat
      - 3.5.1 Försök av Bergman
      - 3.5.2 Försök av Ogéus och Andersson
      - 3.5.3 Försök av Risshytt
  4. Försök med återcirkulation
    - 4.1 Försöksuppställning
    - 4.2 Flashtank
    - 4.3 Mätning av syrehalter
    - 4.4 Försöksresultat
    - 4.5 Jämförelse mellan beräkningar och experimentella resultat enligt Risshytt
  5. Beteckningar
  6. Referenser
- Figurer
- Bilaga I
- Detaljerad beskrivning av teoretisk modell för flashavgasning med återcirkulation
- Bilaga II
- Experimentvärden erhållna av Bergman (1), Ogéus och Andersson (2) samt Risshytt (3)

## 1. INLEDNING

För att minska risken för korrosion i en ångkraftanläggning och även förbättra livslängden hos jonbytarfiltren är en långt driven avgasning av största betydelse. I en kärnkraftanläggning av kokartyp (BWR) innehåller utgående ånga en mycket hög halt av syre p g a radiolys i reaktorhärden. Syrehalten i utgående ånga i Oskarshamn 1 är enligt mätningar 10000-15000 ppb. Liknande värden torde gälla för andra anläggningar med kokarreaktor.

Syrehalten i den ånga som avtappas från turbinen för matarvattenförvärmning är densamma. Detta leder till att kondensat som bildas i förvärmare erhåller en hög syrehalt. I Oskarshamn 1 har syrehalter i dränage uppmätts till mellan 400 och 1000 ppb.

En del av detta dränage passerar ej kondensorn, där avgasning sker, utan blandas med förvämt kondensat vid en högre trycknivå. Syrehalten i matarvattnet kommer därför att bero av syrehalten hos detta dränageflöde. En viss avgasning av dränaget sker vid den strypning, med delvis förångning (flashning), som dränaget undergår vid strömning mellan olika förvärmarssteg (se fig 1). Tillgängligt underlag för att beräkna denna avgasning är emellertid magert.

För att förbättra underlaget vid beräkningar av resulterande syrehalt i dränage vid arrangemang av detta slag, initierade Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning 1973 ett forskningsprojekt rörande flashavgasning. Det uppdrogs åt Institutionen för Ångteknik, numera Termisk Energiteknologi, vid Kungliga Tekniska Högskolan, att genomföra projektet.

Arbetet inom projektet har huvudsakligen drivits med hjälp av examensarbeten. Resultat från projektet har rapporterats i ett antal delrapporter, se Bergman (1), Ogeus-Andersson (2), Risshytt (3) samt Töcksberg (4).

Föreliggande rapport utgör en sammanfattning av projektets resultat fram till den 1 juli 1976. Avslutande mätningar kommer att genomföras under hösten 1976 och rapporteras separat.

## 2. TEORETISK MODELL FÖR FLASHAVGASNING MED ÅTER-CIRKULATION

Figur 2 visar schematiskt ett förvärmarssteg med separat flash-tank för utnyttjande av energinnehållet i dränage från efterföljande förvärmarssteg.

Genom förvärmaren strömmar matarvatten med flödet  $q_v$  och förvärms från temperaturen  $t_{v1}$  till temperaturen  $t_{v2}$ . Förvärmningen sker med hjälp av ånga som tillförs dels från avtappning i turbin (flöde  $q_a$ , entalpi  $h_a$ ) dels från flash-tank (flöde  $q_f$ , entalpi  $h_f$ ). Ångflödet från flashtanken bestäms av flödet  $q_{in}$  och entalpin  $h_{in}$  hos det vatten som tillförs flashtanken från högre förvärmarssteg samt av trycket  $p_T$  i flashtanken.

Den del av flödet  $q_{in}$  som ej övergår till ånga vid strypningen faller till botten av flashtanken och blandas där med det kondensat (dränage) som bildats i förvärmaren vid kondensation av tillförd ånga. Från förvärmaren strömmar ett mindre flöde av ånga och okondenserbara gaser genom avdraget till kondensorn.

Om stationära förhållanden antages kommer förhållandena i systemet att bestämmas av massbalanser för vatten och förekommande gaser samt av värmebalans och tryckbalans för strömningen mellan förvärmaren och flashtanken, se bilaga I.

Med hjälp av massbalanser för gas kan man visa att gashalten,  $C_{ut}$ , i utgående vatten kan beräknas ur

$$C_{ut} = \frac{x C_D^* \cdot q_D + [C_{in} (1-E) - C_T^* E] \cdot q_{in} (1-f)}{q_{in} (1-f) + q_D} \quad (1)$$

där  $C_D^*$  är jämviktskoncentrationen av gas i vatten vid det partialtryck som råder i förvärmaren,  $C_T^*$  jämviktskoncentrationen av gas i vatten efter flashning och  $C_{in}$  gaskoncentration i inkommande vatten.

E är en avgasningsverkningsgrad definierad som

$$E = \frac{C_{in} - C_T}{C_{in} - C_T^*} \quad (2)$$

f betecknar flashningsgraden, definierad som

$$f = \frac{q_F}{q_{in}} \quad (3)$$

X är en apparatkonstant (se bilaga I) med ett värde mellan noll och ett.

Övriga beteckningar framgår av fig 2.

Jämviktskoncentrationerna kan beräknas med hjälp av Henrys lag, se bilaga I.

Vid praktisk tillämpning av modellen för beräkning av resulterande syrehalt vid flashavgasning med återcirkulation kommer problem i allmänhet att uppstå vid val av värde för apparatkonstanten X och vid uppskattning av gashalten  $C_D^*$  vid jämviktsförhållanden i förvärmaren. I avsaknad av bättre beräkningsunderlag torde de metoder som diskuteras i avsnitt 4.5 kunna utnyttjas för uppskattning av en övre och en undre gräns för gashalten i utgående vatten.

### 3. FÖRSÖK MED FLASHAVGASNING UTAN ÅTERCIRKULATION

#### 3.1 Allmänt

Försök för bestämning av avgasningsverkningsgraden vid flashning utfördes i två geometrier, av Bergman (1) i en tom flash-tank och av Ogéus och Andersson (2) i en flashtank med insats för att minska risken för erosion av tankens mantelyta.

Detaljerade redogörelser för försöksanordningar och försöksresultat återfinns i utgivna delrapporter (1 och 2). En sammanfattning lämnas i det följande.

#### 3.2 Försöksuppställningar

Figur 12 visar ett flödesschema för den försöksuppställning som användes av Ogéus och Andersson (2).



Inkommande vatten, syrehaltigt dejonat, förvärms i en elektrisk förvärmare och passerar därefter en flödesmätare (kalibrerat rör, tryckdifferensmätning med Bartonceller) och en strypventil. Före strypventilen mäts tryck (precisionsmanometer), temperatur (termoelement Cr-Al) och syrehalt (talliumcell, se närmare nedan 3.4). Efter strypventilen strömmar ång-vattenblandningen in i flashtanken som beskrivs närmare i avsnitt 3.3. Från denna blåses ångan av uppåt. Vattnet leds ut i botten av flashtanken och via en ångfälla som utnyttjas för nivåhållning av vattnet i tanken. Trycket (precisionsmanometer) och temperatur (Cr-Al termoelement) mäts i ångvolymen i flashtanken. Vidare kontrolleras nivån med tryckdifferensmätning (Bartoncell). Syrehalten i det vatten som lämnar flashtanken mäts med hjälp av talliumceller.

Avståndet mellan strypventilen och flashtanken var 370 mm motsvarande 37 rördiametrar.

Den uppställning som användes av Bergman (1) var uppbyggd på liknande sätt med den skillnaden att avgasat vatten kunde recirkuleras från flashtankens utlopp till en punkt före förvärmaren med hjälp av en pump. På detta sätt möjliggjordes variation av syrehalten hos inkommande vatten på ett enkelt sätt. Avståndet från strypventilen till flashtanken var 480 mm motsvarande 24 rördiametrar.

### 3.3 Flashtank

Som nämnts tidigare utfördes proven av Bergman (1) och Ogéus och Andersson (2) med olika utformning av tankgeometrierna.

Figur 3 visar den flashtank som utnyttjades vid Bergmans försök. Tankens volym är  $0,0156 \text{ m}^3$  varav  $0,0127 \text{ m}^3$  upptogs av ånga. Tanken var ej försedd med några insatser.

Figur 4 visar den flashtank som utnyttjades av Ogéus och Andersson (2) samt vid de senare försöken (3 och 4). Tankens volym är  $0,058 \text{ m}^3$  varav  $0,0407 \text{ m}^3$  upptas av ånga vid anslutning av ångfälla till nivå 2 (som utnyttjades vid mätningarna).

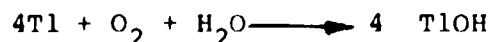
Flashtankens inre utformning fastställdes efter önskemål från STAL-LAVAL Apparat AB. För att simulera de insatser som används i fullstora flashtankar för att minska risken för erosion, försågs tanken med en insats enligt figur 5.

Den övre delen av insatsen, den s k energidödaren, finfördelar den inkommande vätskan så att kontaktytan mellan ångfas och vätskefas ökar. Därigenom kommer även den relativa hastigheten mellan faserna att öka. Båda dessa mekanismer anges av Hömig (5) leda till förbättrad diffusion av syre mellan fasgränserna. Energidödaren har vidare till uppgift att fördela den inkommande vätskan symmetriskt, så att snedkrafter och vibrationer undviks. Den nedre delen av insatsen (samlingsröret) har till uppgift att öka turbulensen hos vätskan och därigenom ytterligare öka den relativa hastigheten mellan ångfas och vätskefas.

Insatsen centreras så att inkommande vätska träffar energidödarens centrumlinje. Vattnet leds in med hjälp av ett insticksrör, i dessa försök med inre diametern 10 mm.

### 3.4 Utrustning och teknik för mätning av syrehalt i vatten

Vid samtliga försök mättes syrehalten i vatten med hjälp av talliumceller utvecklade av AB Atomenergi, samt två konduktivitetmätare. Mätprincipen bygger på syrets reaktion med tallium i närvaro av vatten enligt formeln



Den bildade talliumhydroxiden är en stark bas med en ekvivalent ledningsförmåga som i aktuella koncentrationer är cirka  $286 \text{ mho} \cdot \text{cm}^2/\text{ekv}$  vid  $25^\circ\text{C}$ . Detta motsvarar en konduktivitetsökning av 33 mikro mhos/cm (1 mhos = 1 Siemens).

Vid mätningarna kyldes provvattnet (cirka 4 l/h) till  $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$  med hjälp av en förkylare och en precisionskylare, utformad av en 4 m lång rörspiral placerad i ett tempererat vattenbad. Vattenbadets temperatur hölls konstant med hjälp av termostatstyrd doppvärmare. Provvattnet strömmade därefter genom

en jonbytarkolonn, en cell för konduktivitetmätning (mätvärde  $k_1$ ), talliumkolonnen där reaktionen mellan tallium och syre sker, ytterligare en konduktivitetcell (mätvärde  $k_2$ ) samt en katjonbytare för uppfångning av talliumjoner.

Syrehalten i vattnet, vid halter över 15 ppb, beräknas ur följande ekvation som gäller för vattentemperaturen  $25^{\circ}\text{C}$  och vid cellkonstanten 0,0085

$$C_{\text{O}_2} = \frac{(k_2 - k_1) \cdot 0,0085}{1 - 0,027(25 - t)} \cdot 10^3 \quad (5)$$

där  $k_1$  = mätvärdet före talliumkolonnen

$k_2$  = mätvärdet efter talliumkolonnen

Ekvation (5) bör ej användas för syrehalter under 15 ppb. I detta område utnyttjas istället en kalibreringskurva framtagen av AB Atomenergi.

Felet i syrehaltsmätningarna har uppskattats till  $\pm 6$  ppb i området 15-40 ppb, vilket är aktuella data för utloppet från flashtanken, medan felet i området 6000-8000 ppb uppskattats till  $\pm 50$  ppb, vilka syrehalter hänför sig till inkommande flöde till flashning, se (2).

Tidigare jämförelser mellan den här använda mätmetoden för syrehalt och den metod som rekommenderats av Ångpanneföreningen, se (5), har inte visat någon signifikant skillnad mellan metoderna, se (6).

### 3.5 Försöksresultat

#### 3.5.1 Försök av Bergman

Bergmans försök (1) utfördes med flashtanktrycket 1,43 bar (motsvarande  $110^{\circ}\text{C}$  mättnadstemperatur) och vattentemperatur före strypningen varierade mellan 115 och  $135^{\circ}\text{C}$ .

Vattenflödet till flashtanken varierades mellan 0,064 och 0,19 kg/s samt syrehalter före flashtanken mellan 2900 och 9000 ppb.

Resultaten av försöken är sammanställda i figur 6 som visar avgasningsverkningsgraden  $E$ , definierad enligt ekvation (2), för olika förångningsgrader  $q_F/q_i$ .

Erhållna värden på avgasningsverkningsgraden är tabellerade i bilaga 2.

### 3.5.2 Försök av Ogéus och Andersson (2)

Ogéus och Andersson (2) utförde mätningar för tryck i flashtanken mellan 1,43 och 12,55 bar och varierande förångningsgrader (mellan 2 och 6 %). Massflödet av vatten var konstant cirka 0,20 kg/s.

Försöksparametrar och resultat har sammanställts i tabell i bilaga 2.

Avgasningsverkningsgrader mellan 0,992 och 0,997 uppmättes.

Försöken visar att trycket i flashtanken inte har någon betydelse för flashavgasningsverkningsgraden i det aktuella tryckområdet.

### 3.5.3 Försök av Risshytt

Risshytt utförde huvudsakligen mätningar med återcirkulation av dränage, se avsnitt 4. För jämförelse med tidigare undersökningar gjordes tre försök utan återcirkulation med trycket 1,43 bar, massflödet 0,20 kg/s och ånghalter varierande mellan 2 och 6 %.

Resultaten är sammanställda i tabell i bilaga 2.

Resultaten visar avgasningsverkningsgrader över 0,99.

#### 4. FÖRSÖK MED ATEFCIRKULATION

##### 4.1 Försöksuppställning

Figur 11 visar ett flödesschema för den försöksuppställning som användes av Risshytt. Uppställningen var avsedd att simulera ett förvärmsteg med flashtank, jämför figur 2.

För att simulera förvärmaren erhöles genom förmedling av STAL-LAVAL en äldre tubvärmeväxlare som utnyttjats för andra prov. Tyvärr visade sig denna värmeväxlare läcka. Istället insattes en tubkylare av märket Bendek med effekten cirka 25 kW. Effekten visade sig otillräcklig för genomförande av prov med tillskottsånga (för simulering av avtappningsånga från turbin). Det var inte heller möjligt att utföra försök vid höga förångningsgrader och lågt tryck i flashtanken.

Till förvärmaren kopplades ledningar för ånga från flashtank, avluftning och återcirkulation av dränage från förvärmaren till flashtanken.

Flöde och temperaturändring för kylvattenflödet genom förvärmaren mättes liksom ångtemperatur, dränagetemperatur och återcirkulerande flöde till flashtanken.

Vattennivån i förvärmaren kunde följas med hjälp av tryckdifferensmätning.

I övrigt var provanläggningen utformad som vid de försök som utfördes av Ogeus och Andersson (2), se avsnitt 3.2.

##### 4.2 Flashtank

Flashtanken vid Risshytts försök var densamma som tidigare använts av Ogeus och Andersson, se avsnitt 3.3.

##### 4.3 Mätning av syrehalt

Syrehalt i vatten mättes med samma metod som tidigare använts, se avsnitt 3.4.

#### 4.4 Försöksresultat

Resultaten av Risshytts försök finns sammanfattade i fig 7-8 som visar avgasningsverkningsgraden som funktion av trycket i flashtanken. Motsvarande värden finns tabellerade i bilaga II.

I jämförelse med försöken utan återcirkulation visar resultaten en kraftig försämring av avgasningsverkningsgraden, vilket uppenbarligen beror på att det återcirkulerande vattnet innehåller syre som lösts i vattnet vid kondensationen i värmeväxlaren.

Experimentresultaten kan utnyttjas för att beräkna apparatkonstanten  $X$  för den använda värmeväxlaren men detta torde vara av ringa allmänt intresse. Resultaten kan emellertid också användas som underlag för bedömning i vilken mån en försiktig uppskattning av utgående vattens syrehalt är möjlig vid användande av olika metoder för beräkning av jämviktssyrehalten  $C_D^*$  om apparatkonstanten  $X$  sätts lika med ett.

Detta diskuteras närmare i det följande avsnittet.

#### 4.5 Jämförelser mellan beräkningar och experiment

För att undersöka i vilken mån en försiktig uppskattning av syrehalten i utgående vatten är möjlig vid användande av olika metoder för beräkning av jämviktssyrehalten  $C_D^*$  och apparatkonstanten  $X$  satt lika med ett, utnyttjades ekv (1) för att beräkna syrehalten i utgående vatten för de experiment som utförts av Risshytt (3).

Vid dessa beräkningar antogs avgasningsverkningsgraden  $E$  till 0.992 vid flashgrad 2 %, 0.995 vid flashgrad 4 % och 0.996 vid flashgrad 6 % allt baserat på mätningar av Ogeus och Andersson (2), se bilaga II. Det kan noteras att Risshytts (3) enstaka mätningar utan återcirkulation gav något högre värden.

Jämviktssyrehalten  $C_D^*$  beräknades med metoderna 1 och 3 enligt bilaga I, d v s dels med partialtrycket för okondenserbara gaser satt lika med totaltrycket, dels med partialtrycket satt lika med differensen mellan totaltrycket och mätnadstrycket vid dränagets temperatur (ca  $10^\circ\text{C}$  underkylt).

Andelen syre i den okondenserbara gasen uppskattades till ca 35 volymsprocent, vilket sammanhänger med att ingående vatten torde ha syrsatts genom kontakt med luft och att kväve löser sig sämre än syre i vatten vid atmosfäriska förhållanden, se tabell 1 i bilaga I.

Konstanten i Henrys lag beräknades för dränagets temperatur (ca  $10^\circ\text{C}$  underkylt).

De beräknade syrehalterna har jämförts med experimentresultaten i fig 9 och 10.

Av fig 9 framgår att en beräkning av jämviktssyrehalten baserad på antagandet att partialtrycket för okondenserbara gaser är lika med totaltrycket ger en överskattning av syrehalten för alla experiment utom ett. Överskattningen är i genomsnitt en faktor 2 till 3.

Av fig 10 framgår att den andra metoden i allmänhet leder till en underskattning av syrehalten. Underskattningen är i genomsnitt en faktor 1.5 till 2.

Om mer tillförlitligt beräkningsunderlag saknas och en försiktig uppskattning av utgående syrehalt eftersträvas bör man därför utnyttja den första metoden för beräkning av jämviktssyrehalten i dränaget.

Det är uppenbart att den stora osäkerheten vid beräkningar av utgående syrehalt vid flashavgasning med återcirkulation sammanhänger med syreupptagningen vid kondensation. Eventuella fortsatta undersökningar bör därför koncentreras på detta problem.

## 5. BETECKNINGAR

Flöden

$q$  = massflöde (kg/s)

Entalpi

$h$  = entalpi (kJ/kg)

Koncentrationer

$c$  = viktkoncentrationen av okondenserbar gas

$c^*$  = den koncentration som står i jämvikt med vatten vid visst totaltryck och underkylning

Index

$i$  = betraktad gas

$j$  = övriga okondenserbara gaser

$i_n$  = in till flashtanken: inkommande flöde

$u_t$  = ut ur flashtanken: med utgående dränage

$f$  = ut ur flashtanken: med flashångan

$d$  = in till flashtanken: med återcirkulatet

$a$  = från förvärmaren: med avdragna gaser (till kondensor)

$\dot{a}$  = tillskottsånga

$T$  = i flashtank

$F$  = i förvärmare

' = motsv. undre gränskurvan för vatten

'' = motsv. övre gränskurvan för vatten

$v$  = matarvatten

I övrigt anger

$p$  = tryck (bar)

$t$  = temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Beteckningarna framgår även av fig 2.



## 6. REFERENSER

- (1) Bergman, Hans  
Flashavgasning  
Examensarbete i Ångteknik, Kungl. Tekniska Högskolan  
TRITA-ÅTK-730130
- (2) Ogeus, Marianne; Andersson, Göran  
Projekt 27-Flashavgasning, delrapport 1  
Examensarbete i Ångteknik, Kungl. Tekniska Högskolan  
Tekn. Högskolan juni 1974
- (3) Risshytt, Bengt  
Projekt 27-Flashavgasning, delrapport 2  
Examensarbete i Ångteknik, Kungl. Tekniska Högskolan  
Tekn. Högskolan nov. 1975
- (4) Töcksberg, Bo  
Projekt 27-Flashavgasning, delrapport 3  
Examensarbete i Ångteknik, Kungl. Tekniska Högskolan  
Tekn. Högskolan, under utskrift
- (5) Ångpanneföreningen  
Matarvatten del 1, riktvärden och analysmetoder  
Stockholm 1967
- (6) Kjellström, Björn; Stenbäck, Olov  
Investigations of thermal de-aeration  
STU rapport 70-892/U718 a + b  
jan. 1973
- (7) Hömig, H.E  
Psykochemische Grundlagen der Speisewasserchemie  
Vulkan Verlag Dr. W. Classen, Essen (1963)
- (8) Spalding, D.B  
Convective mass transfer- An introduction  
London 1963

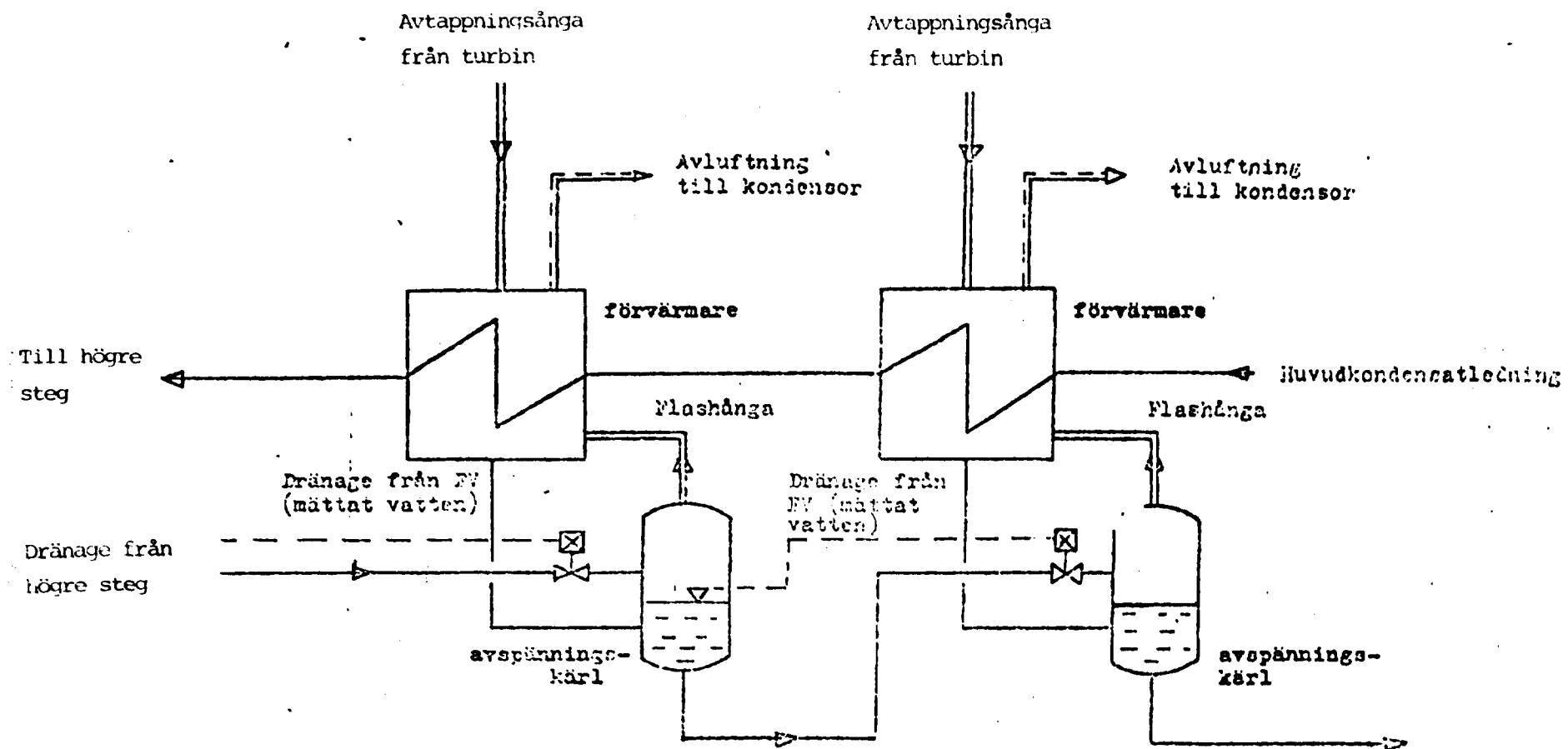
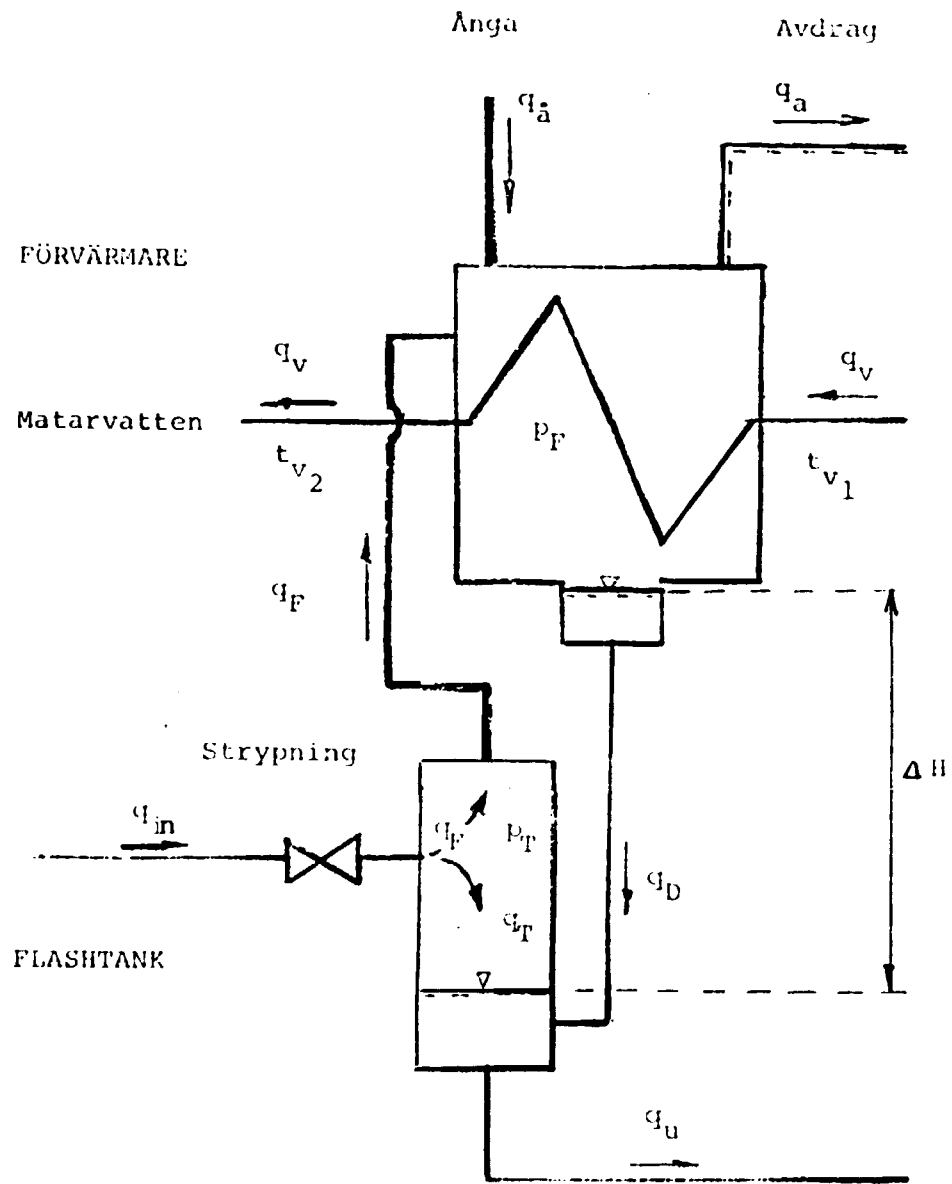
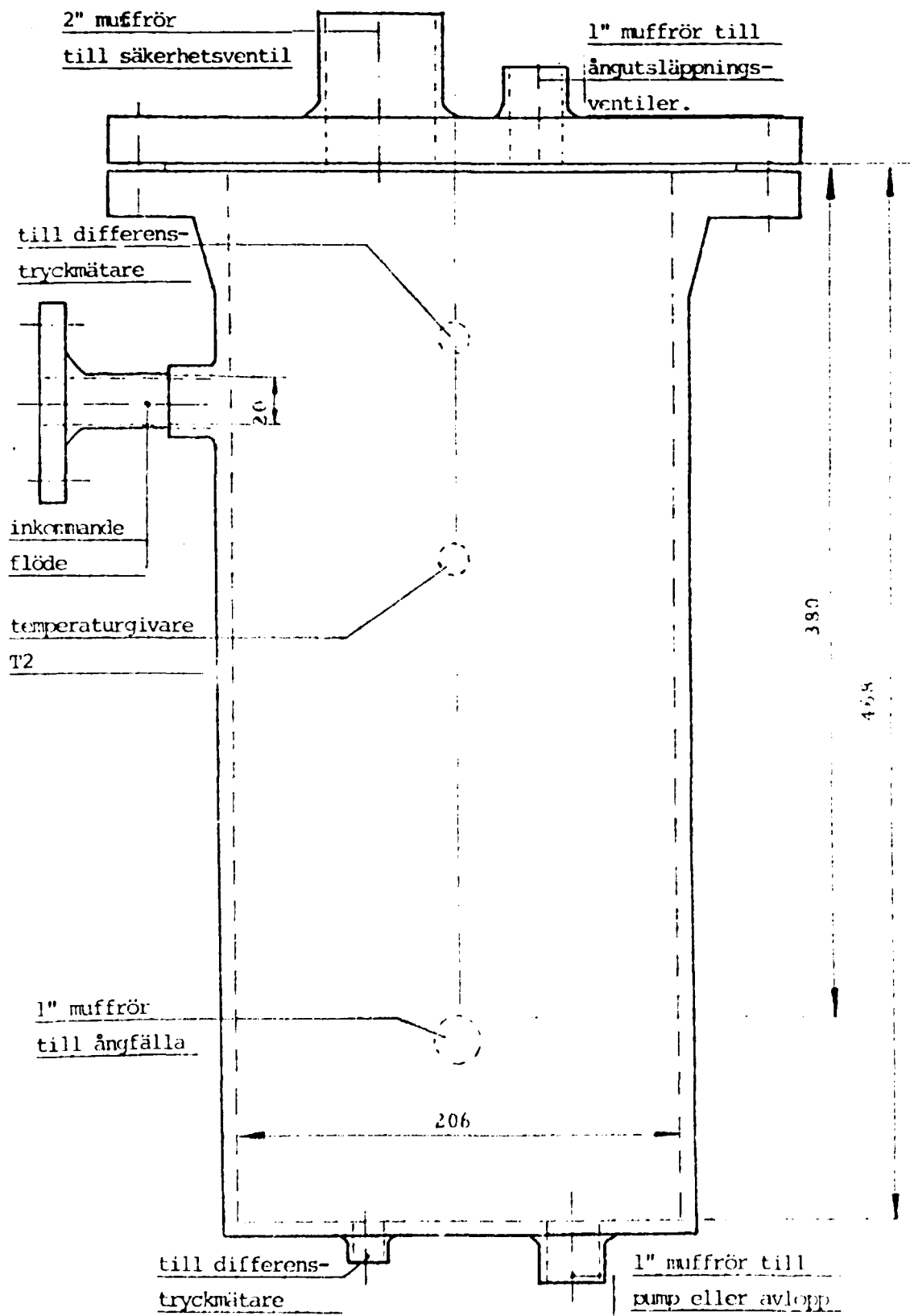


Fig. 1

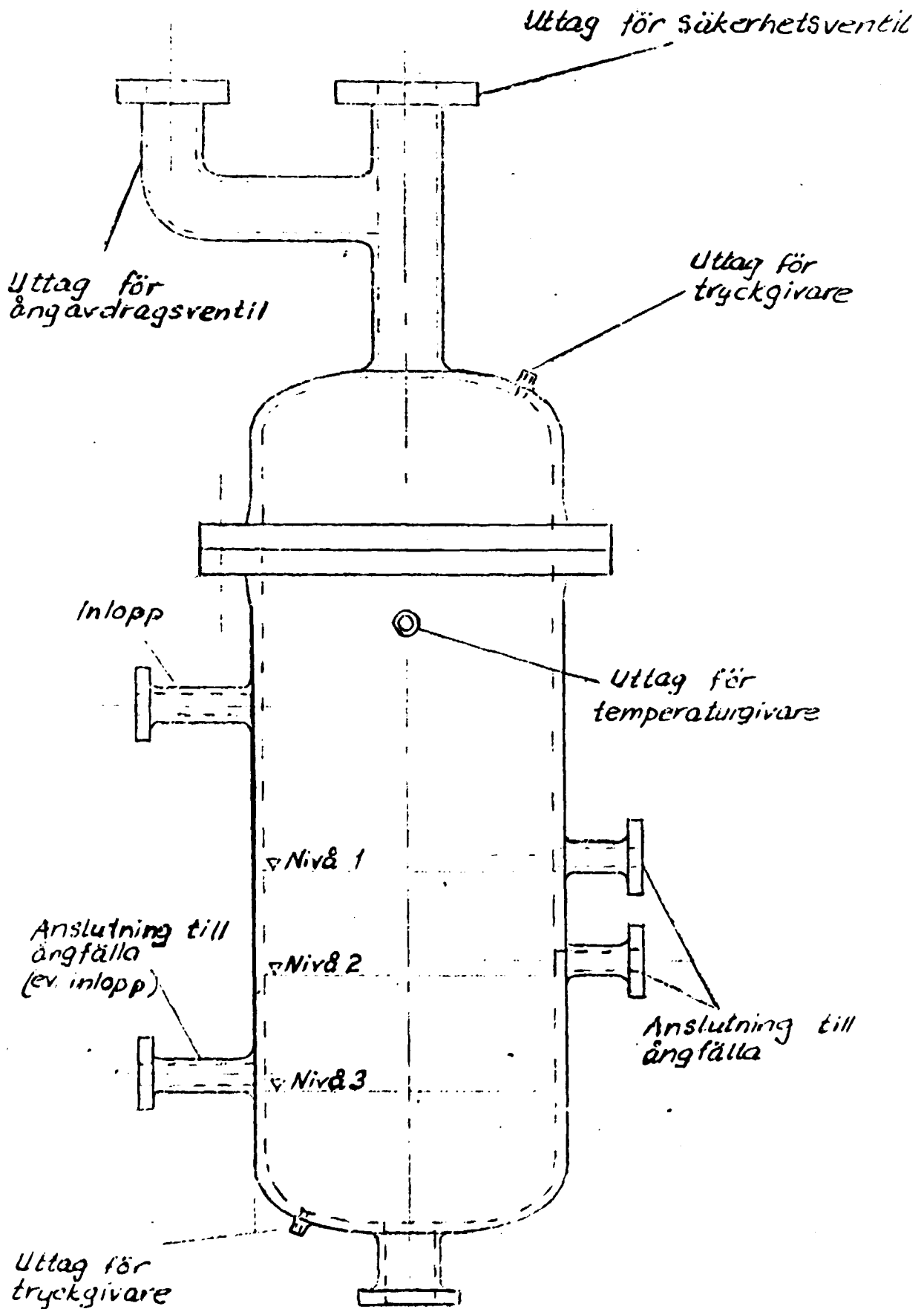
Fig.2





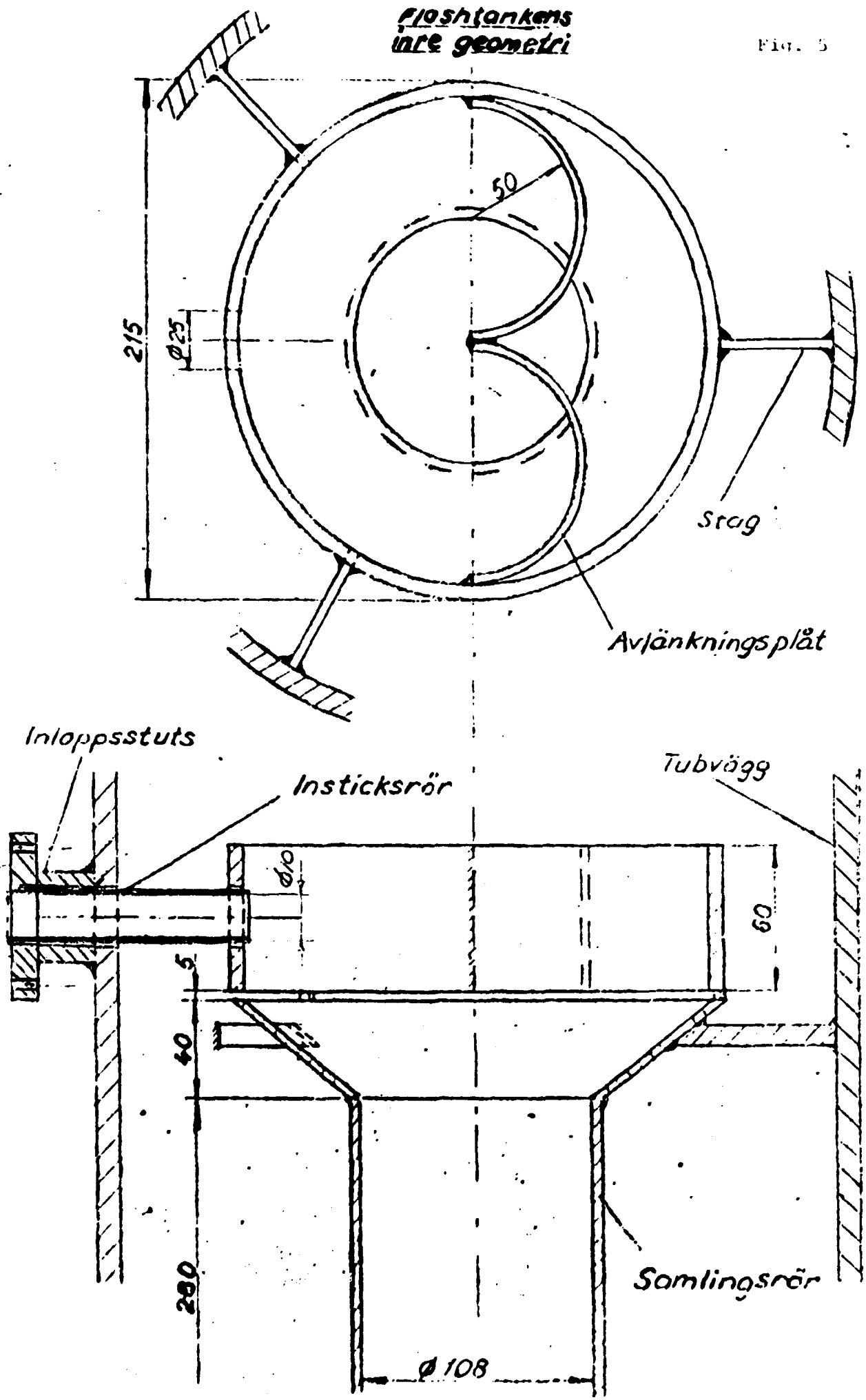
Flashtank

Fig. 4

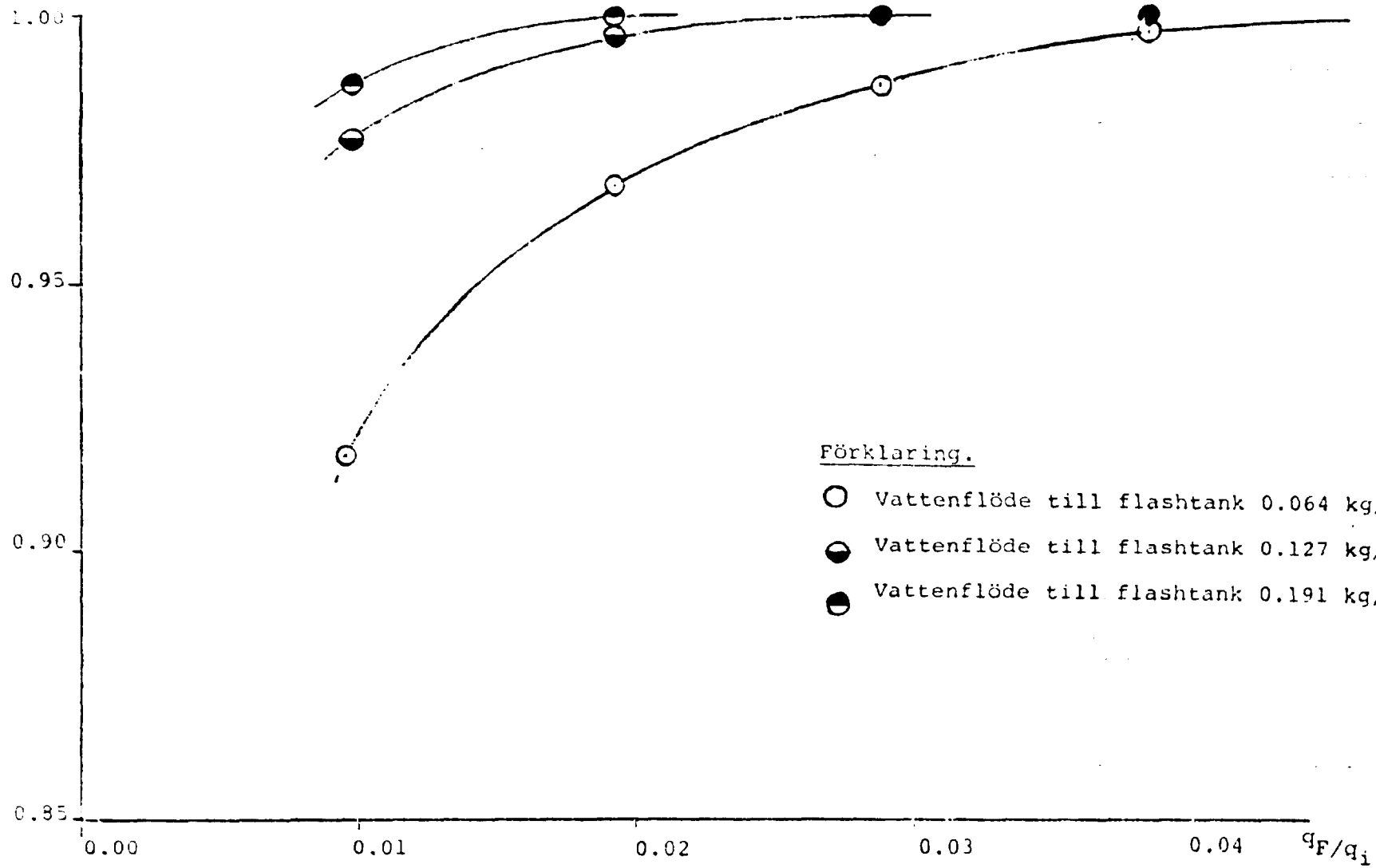


*flöshållarens  
inre geometri*

Fig. 5



E (avgasningsverkningsgrad)



Avgasningsverkningsgrad vid flashning  
Räkningar av Bergman (ref. 1)

Fig. 6

Fig.7

AVGASNINGSEFFEKTFÖRÖKNING  
VID FLASHAVGASNING MED  
ÅTERCIRKULATION AV DRÄ-  
NINGS ENL. MÄTNINGAR AV  
RISSHYTT (3).

INKOMMANDE VATTENFLÖDE = 0.10 K6/5

AVGASNINGSEFF. GRAD

FLASHGRAD

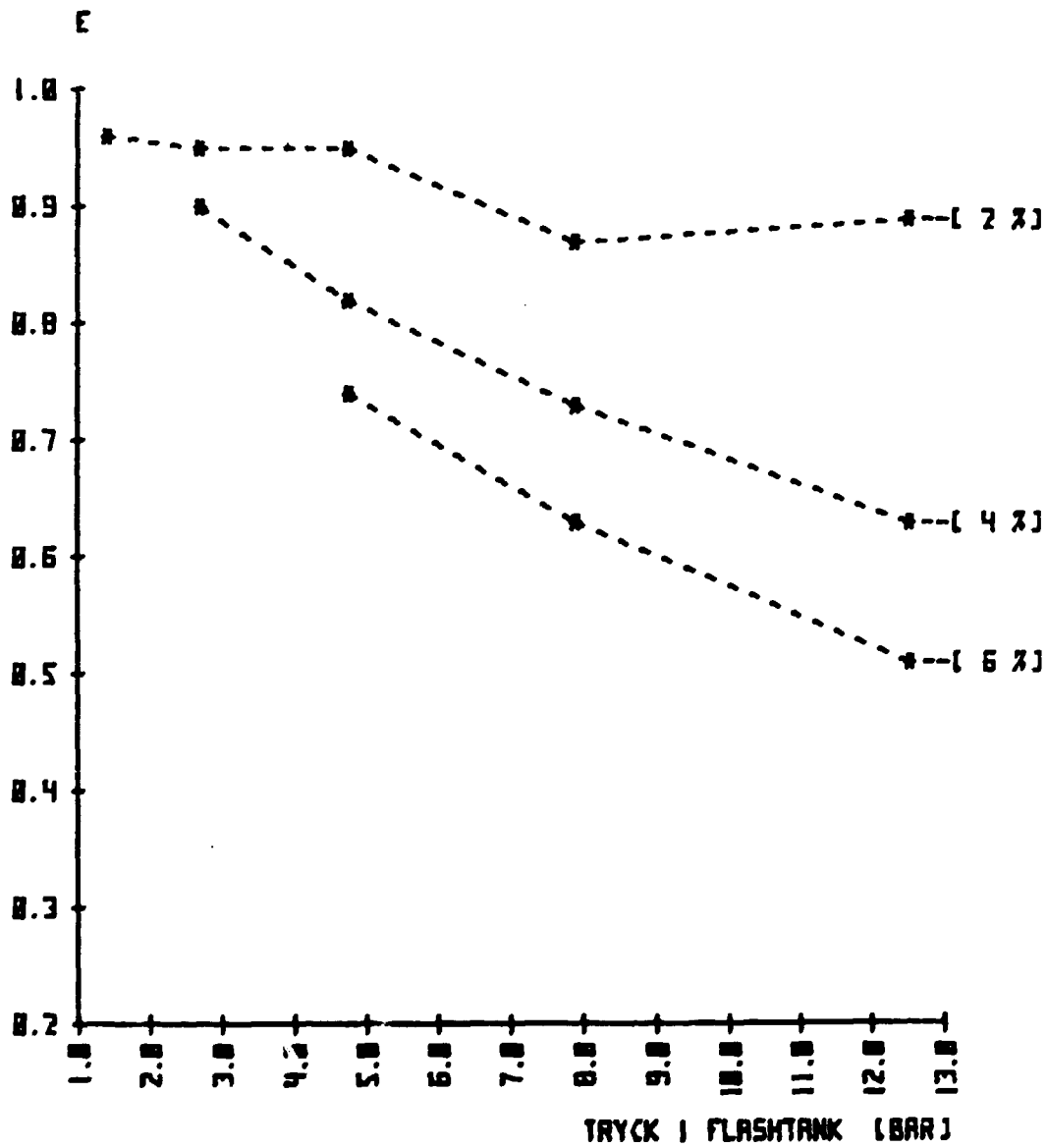
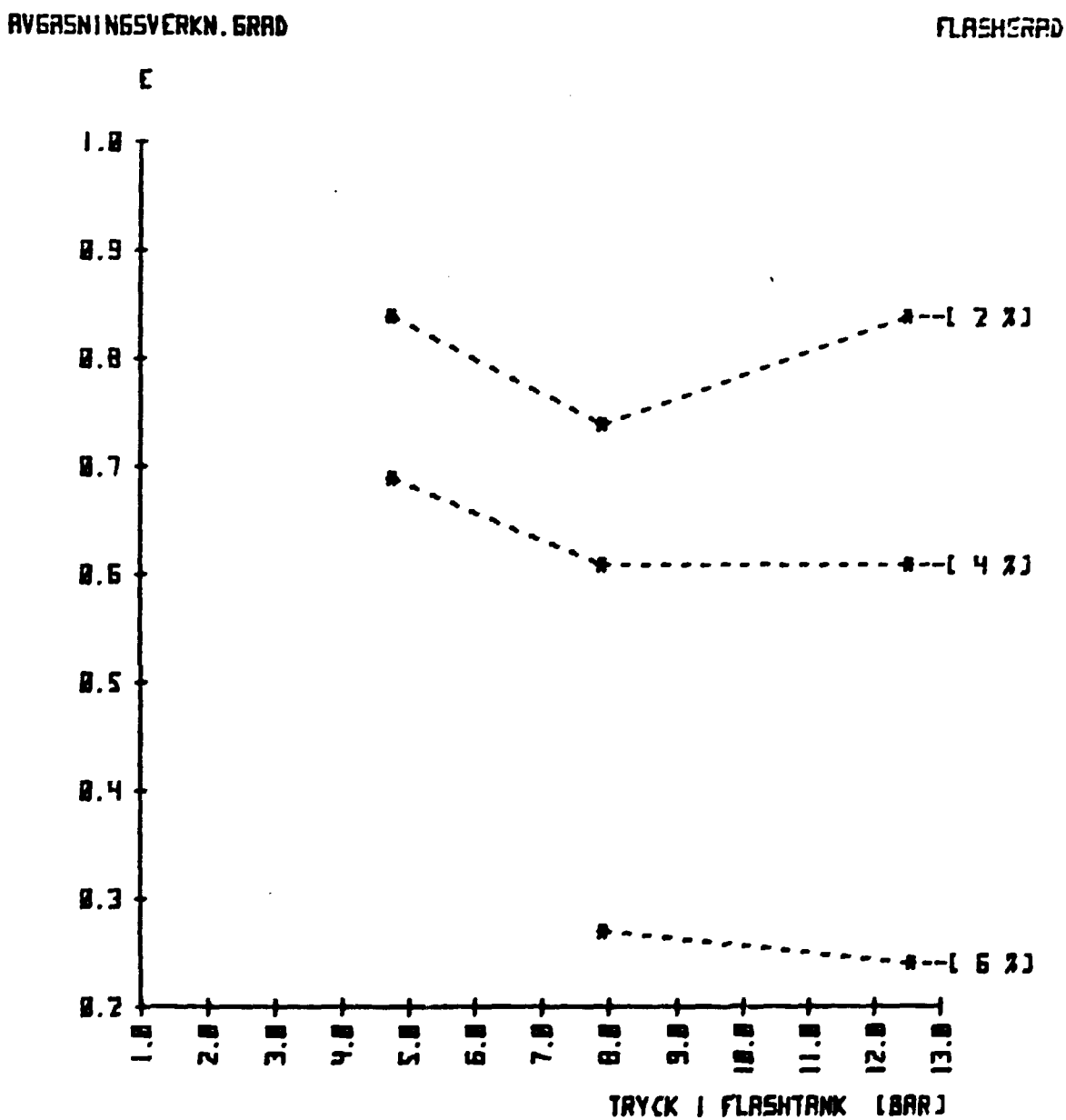




Fig.8

AVGASNINGSEFFEKTNINGSGRAD  
VID FLASHAVGASNING MED  
ÅTERCIRKULATION AV DRÄ-  
NAGE ENL. MÄTNINGAR AV  
RISSHYTT (3).

INKOMMANDE VATTENFLÖDE = 0.20 KG/S



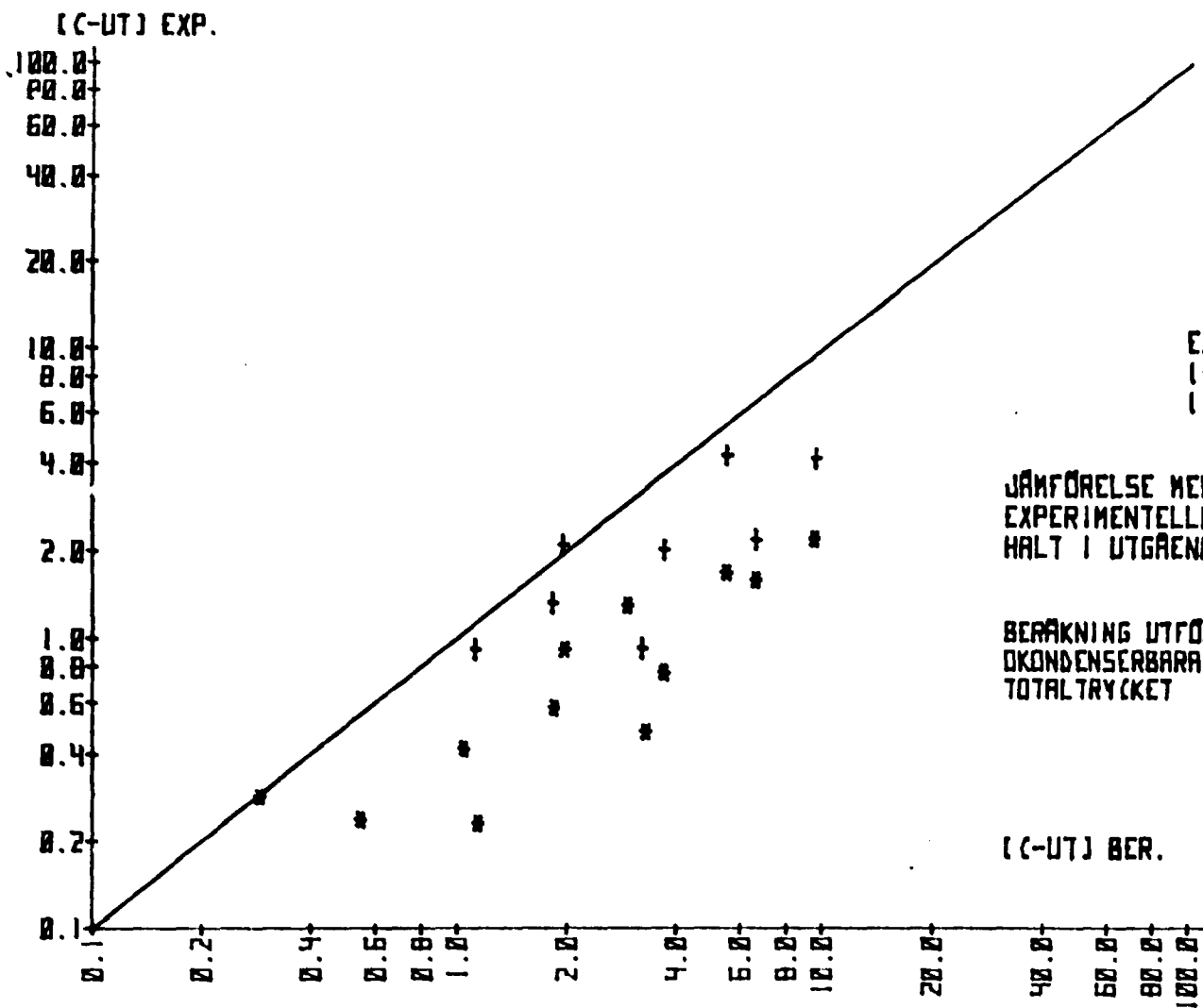


Fig. 9

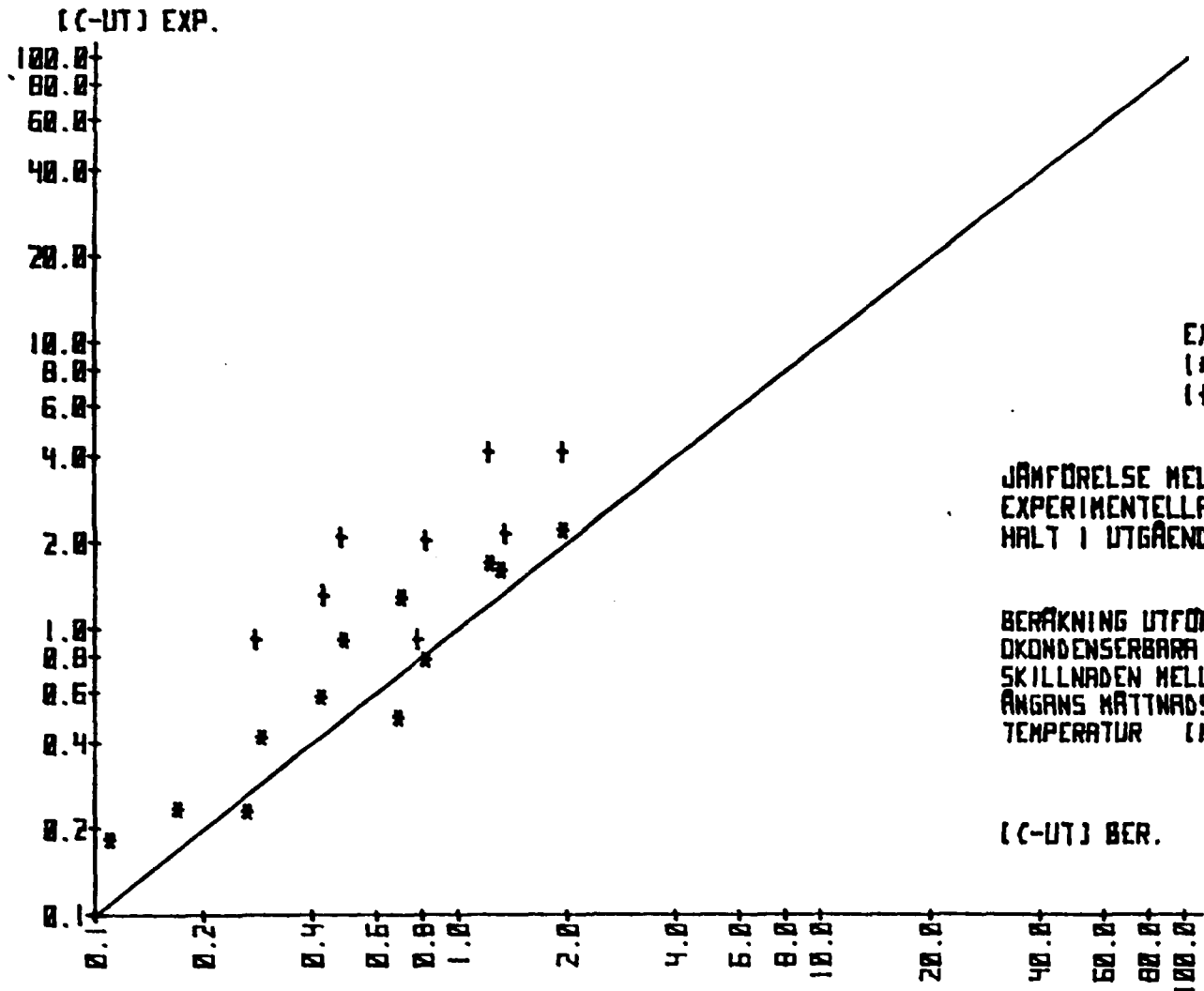
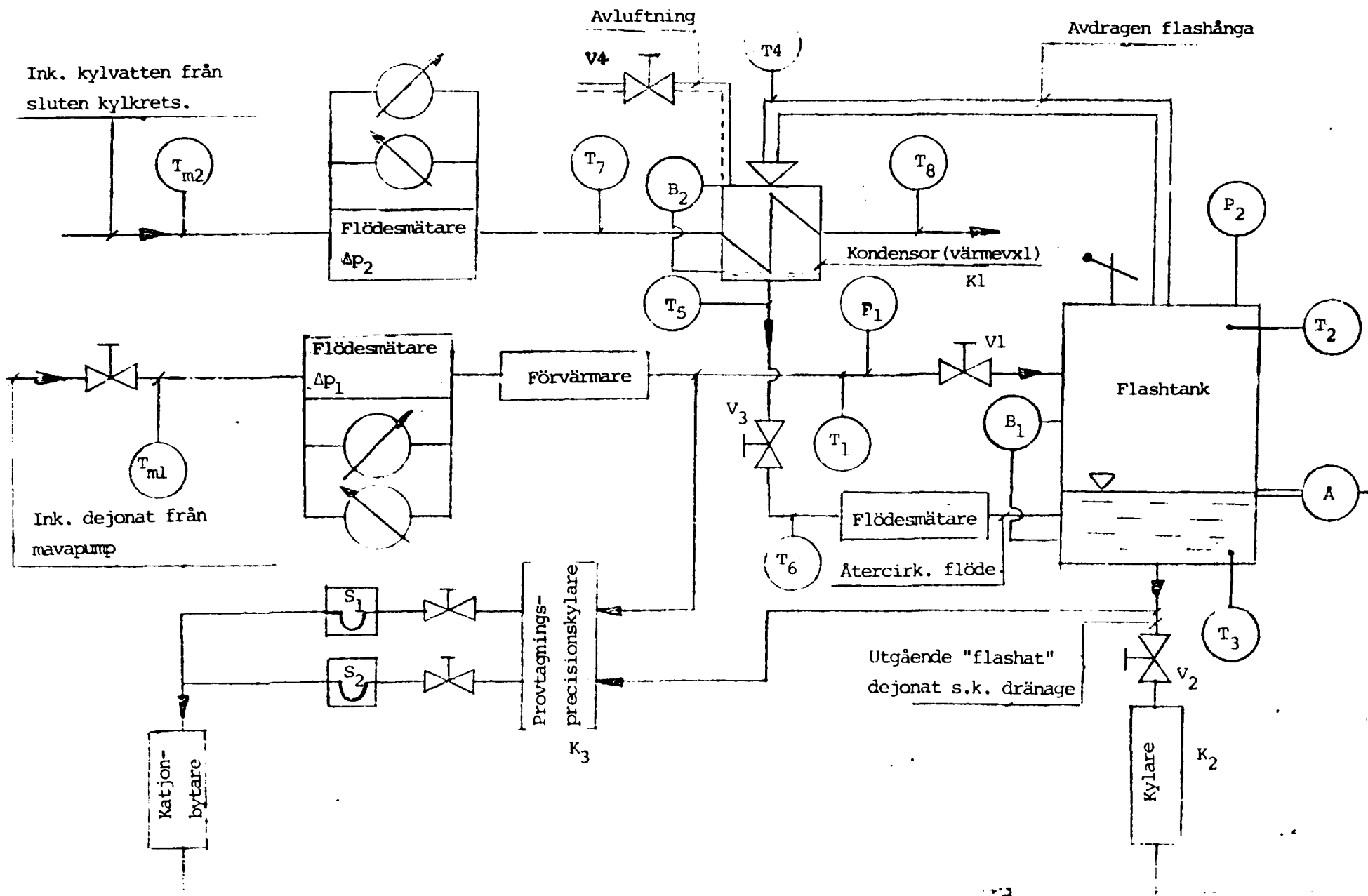
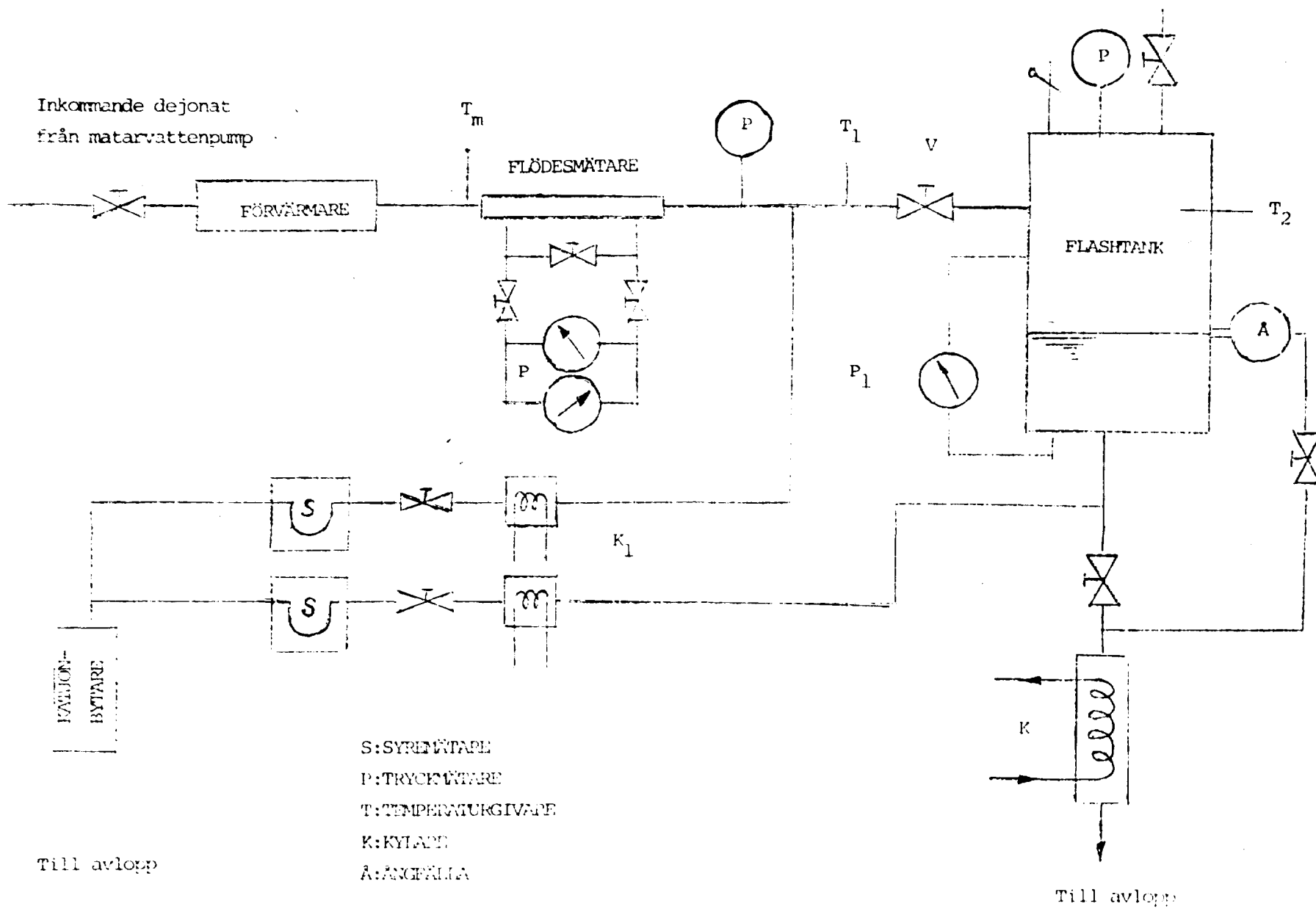


Fig. 10



Flödeschema med återcirkulation.

FIG. 11



Flödeschema utan återcirkulation, Fig. 12

## BILAGA 1

### Detaljerad beskrivning av teoretisk modell för flashavgasning med återcirkulation

#### 1. Allmänt

Figur I-l visar schematiskt ett förvärmarssteg med separat flashtank för utnyttjande av energiinnehållet i dränage från efterföljande förvärmarssteg.

Genom förvärmaren strömmar matarvatten med flödet  $q_v$  och förvärms från temperaturen  $t_{v1}$  till temperaturen  $t_{v2}$ . Förvärmningen sker med hjälp av ånga som tillförs dels från avtappning i turbin (flöde  $q_a$ , entalpi  $h_a$ ) dels från flashtank (flöde  $q_f$ , entalpi  $h_f$ ). Ångflödet från flashtanken bestäms av flödet  $q_{in}$  och entalpin  $h_{in}$  hos det vatten som tillförs flashtanken från högre förvärmarssteg samt av trycket  $p_t$  i flashtanken.

Den del av flödet  $q_{in}$  som ej övergår till ånga vid strypningen faller till botten av flashtanken och blandas där med det kondensat (dränage) som bildats i förvärmaren vid kondensation av tillförd ånga. Från förvärmaren strömmar ett mindre flöde av ånga och okondenserbara gaser genom avdraget till kondensorn.

I det följande kommer stationära förhållanden att förutsättas. Förhållandena i systemet bestäms då av massbalanser för vatten och förekommande gaser samt av värmebalans och tryckbalans för strömningen mellan förvärmaren och flashtanken, vilka närmare diskuteras i det följande.

#### 2 Massbalans för vatten

Om stationära förhållanden råder och förekommande gashalter i samtliga flöden utom i avdraget är små kan följande massbalanser för vatten uppställas:

för flashtank

$$q_u = q_{in} + q_d - q_f \quad (I-1)$$

för förvärmare

$$q_d = q_a + q_f - (1-c_a) q_a \quad (I-2)$$

där  $c_a$  är viktskoncentrationen okondenserbara gaser i flödet  $q_a$ . Övriga beteckningar framgår av fig 2.

Ekvationerna (1) och (2) ger efter addition

$$q_u = q_{in} + q_a - (1-c_a) q_a \quad (I-3)$$

### 3. Värmebalanser

Med samma förutsättningar som i föregående avsnitt kan följande värmebalanser uppställas:

För strypningen

$$q_{in} h_{in} = q_F h_F' + (q_{in} - q_F) h_T' \quad (I-4)$$

där  $h_T'$  och  $h_F'$  är respektive entalpi för vatten vid övre och undre gränskurvan.

För förvärmaren

$$q_d h_d = q_a h_a + q_f h_T' - q_v c_{p_v} (t_{v2} - t_{v1}) - q_a h_a \quad (I-5)$$

För vatten i flashtank

$$q_u h_u = (q_{in} - q_f) h_T' + q_d h_d \quad (I-6)$$

I allmänhet torde massflöde,  $q_{in}$ , och entalpi,  $h_{in}$ , för flödet till flashtanken samt trycket  $p_T$  i flashtanken vara kända. Ekv (I-4) kan då utnyttjas för att beräkna ångflödet  $q_F$

$$q_f = \frac{h_{in} - h'_t}{h''_t - h'_t} \cdot q_{in} \quad (I-7)$$

Ekvation (I-5) kan utnyttjas för beräkning av entalpin,  $h_D$ , hos utgående dränage från förvärmaren om övriga storheter i ekv (I-5) är kända.

Ekv (I-6) slutligen kan användas för beräkning av entalpin,  $h_{ut}$  hos utgående vattenflöde.

#### 4. Massbalans för okondenserbara gaser

Om  $C$  får beteckna viktskoncentrationen av okondenserbar gas och  $q$  det totala massflödet kan följande massbalanser uppställas (med indexering enligt fig I-1).

Massbalans för flashtank

$$c_{in} q_{in} = c_F q_F + c_{ut} q_{ut} - c_D q_D \quad (I-8)$$

Massbalans för förvärmare

$$c_D q_D = c_F q_F + c_a q_a - c_a q_a \quad (I-9)$$

Massbalans i flashtank

$$c_{in} q_{in} = c_F q_F + c_T q_T \quad (I-10)$$

Koncentrationerna  $c_T$  och  $c_D$  i vattnet efter flashning resp. kondensation bestäms av graden av jämvikt med syrehalten i den ånga som vattnet varit i kontakt med.

Figur I-2 visar schematisk förhållandet i skiktet gasfas-vätskefas. I detta skikt råder partial tryckjämvikt vid vätskans ångtryck, givet av vätskans temperatur. Således råder sambandet

$$p_i = p_{tot} - p_a(T) - \sum p_j \quad (I-11)$$



där  $p_i$  är den betraktade gasens partialtryck,  $p_{\text{tot}}$  är totaltrycket,  $p_a(T)$  är vätskans ångtryck (givet av dess temperatur) och  $\sum p_j$  är summan av partialtrycken för andra förekommande gaser.

Enligt t.ex. Spalding (8) kan, för låga gashalter, den gasmängd som står i löslighetsjämvikt med vatten av viss temperatur beräknas ur sambandet

$$C^* = \frac{p_i}{H_i} \cdot \frac{M_i}{M_L} \quad (\text{I-12})$$

där  $C^*$  är viktskoncentrationen okondenserbar gas löst i vattnet,  $p_i$  gasens partialtryck,  $H_i$  Henrys konstant för den aktuella vid den temperatur som råder i vattnet,  $M_i$  gasens molekylvikt och  $M_L$  vätskans molekylvikt.

Henrys konstant är tabellerad för olika temperatur och gaser i tabell 1, se (6).

Koncentrationen,  $c_T$ , av gas i vattnet efter flashningen bestäms av avgasningsverkningsgraden  $E$ , definierad som

$$E = \frac{c_{\text{in}} - c_T}{c_{\text{in}} - c_T^*} \quad (\text{I-13})$$

där  $c_T^*$  är den gashalt som står i jämvikt med gaskoncentrationen  $c_F$  i ångan.

Gaskoncentrationen i ångan sammanhänger med partialtrycket för gasen enligt

$$c_F = \frac{p_i \cdot M_i}{p_a \cdot M_a + \sum p_j \cdot M_j} \quad (\text{I-14})$$

Avgasningsverkningsgraden vid flashning har bestämts experimentellt och ekv. (I-13) kan därför användas för bestämning av koncentrationen  $c_T$ .

Gashalten  $c_D$  i kondensatet från förvärmaren antas kunna beräknas ur

$$c_D = X \cdot c_D^*$$

där  $c_D^*$  är jämviktskoncentrationen i vatten vid den temperatur som råder i kondensatet och  $X$  är en faktor som beror av kondensorgeometrin.

(Värden mellan 0 och 1 kan förekomma.)

Med hjälp av ekv (I-8), (I-10), (I-13) och (I-14) kan gashalten i

utgående vatten uttryckas som

$$c_{ut} = \frac{X c_D^* q_D + c_{in}(1-E) - c_T^* E}{q_{ut}} (q_{in} - q_F) \quad (I-16)$$

I det allmänna fallet måste  $c_D^*$  och  $c_T^*$  bestämmas med hjälp av ekv (12) och utnyttjandet av ekv (9) respektive ekv (10).

Ofta är jämviktsgashalten  $c_T^*$  försumbar och flashavgasningsverkningsgraden  $E$  nära 1,0. Vidare kan apparatkonstanten  $X$  mycket väl definieras med utgångspunkt från den ideala gashalten i avdraget dvs gashalten 1,0.

Ekv (16) kan då förenklas till

$$c_{ut} = X c_D^* \cdot \frac{q_D}{q_{ut}} \quad (I-17)$$

Vid användning av ekv (16) eller (17) för praktiska beräkningar måste apparatkonstanten  $X$  vara känd. Vidare måste jämviktsgashalten  $c_D^*$  kunna beräknas. Jämviktsgashalten  $c_D^*$  torde i allmänhet variera i förvärmarens ångrum. Ur praktisk synpunkt kan det därför vara lämpligt att beräkna  $c_D^*$  för sådana förhållanden som enkelt kan bestämmas med hjälp av globala storheter för ångrummet eller med hjälp av tillståndet i in- eller utgående flöden. Apparatkonstanten  $X$  kommer då att omfatta avvikelser från jämvikt beroende på bl a lokala variationer.

Bland flera tänkbara sätt att bestämma jämviktsgashalten  $c_D^*$  kan tre nämnas här:

1.  $c_D^*$  bestäms med partialtrycket  $p_i$  beräknat ur ekv (11) med ångans partialtryck  $p_a$  lika med noll.  
Detta innebär att även avvikelser från ideellt avdrag (enbart gas i avdraget) omfattas av apparatkonstanten  $X$ .
2.  $c_D^*$  bestäms med partialtrycket  $p_i$  beräknat ur det verkliga gasinnehållet i avdraget.  
Detta innebär att gasinnehållet i avdraget antingen måste bestämmas experimentellt eller kunna beräknas på något sätt. Apparatkonstanten  $X$  omfattar kinetiken i gasupptagningsförloppet samt lokala avvikelser i ångans gashalt.
3.  $c_D^*$  bestäms med partialtrycket  $p_i$  beräknat ur ekv (11) med ångans partialtryck  $p_a$  bestämt som mättnadstrycket för den temperatur som råder i dränaget från förvärmare.

En sådan metod baseras på antagandet att homogena förhållanden råder i förvärmaren och att underkyllningen hos dränet beror av ångtrycksminskning vid kondensationsytorna orsakad av gasfilmer vid dessa. Apparatkonstanten  $X$  omfattar bl a avvikelser mellan verkligheten och en sådan modell.

Jämförelser mellan experimentvärden och beräkningar baserade på metoderna 1 och 3 behandlas i huvudtexten, avsnitt 4.5.

## 5. TRYCKBALANSER

Betecknas det totala strömningsmotståndet i ångledningen från flashtanken till förvärmaren med  $\xi_D$  och det totala strömningsmotståndet i kondensatledningen från förvärmaren till flashtanken med  $\xi_F$  kan följande tryckbalanser uppställas som vid givet tryck  $p_F$  i förvärmaren bestämmer trycket i flashtanken  $p_T$  och nivåskillnaden  $\Delta H$  mellan vattennivåerna i förvärmaren och flashtanken.

$$p_T = p_F + \xi_F \frac{q_F^2}{2\rho_F A_F^2} \quad (I-18)$$

$$\Delta H = \frac{1}{g_{0D}} (p_T - p_F + \xi_D \frac{q_D^2}{2\rho_D A_D^2}) \quad (I-19)$$

Tabell I Henry's konstant för några vanliga  
gaser vid lösning i vatten. (bar / moldel)

| temp.<br>°C | $10^{-4} \cdot H_{H_2}$ | $10^{-4} \cdot H_{CO_2}$ | $10^{-4} \cdot H_{N_2}$ |
|-------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0           | 5.86                    | 2.53                     | 5.36                    |
| 10          | 6.41                    | 3.31                     | 6.75                    |
| 20          | 6.91                    | 4.06                     | 8.12                    |
| 30          | 7.38                    | 4.81                     | 9.36                    |
| 40          | 7.62                    | 5.41                     | 10.59                   |
| 50          | 7.73                    | 5.96                     | 11.42                   |
| 60          | 7.74                    | 6.35                     | 12.15                   |
| 70          | 7.70                    | 6.73                     | 12.57                   |
| 80          | 7.65                    | 6.96                     | 12.75                   |
| 90          | 7.50                    | 7.07                     | 12.80                   |
| 100         | 7.15                    | 7.02                     | 12.71                   |
| 110         | 6.70                    | 6.85                     | 12.01                   |
| 120         | 6.25                    | 6.60                     | 11.62                   |
| 150         | 4.90                    | 5.75                     | 10.26                   |
| 200         | 3.43                    | 4.06                     | 6.85                    |
| 250         | 2.26                    | 2.70                     | 4.28                    |

Fig. I-1

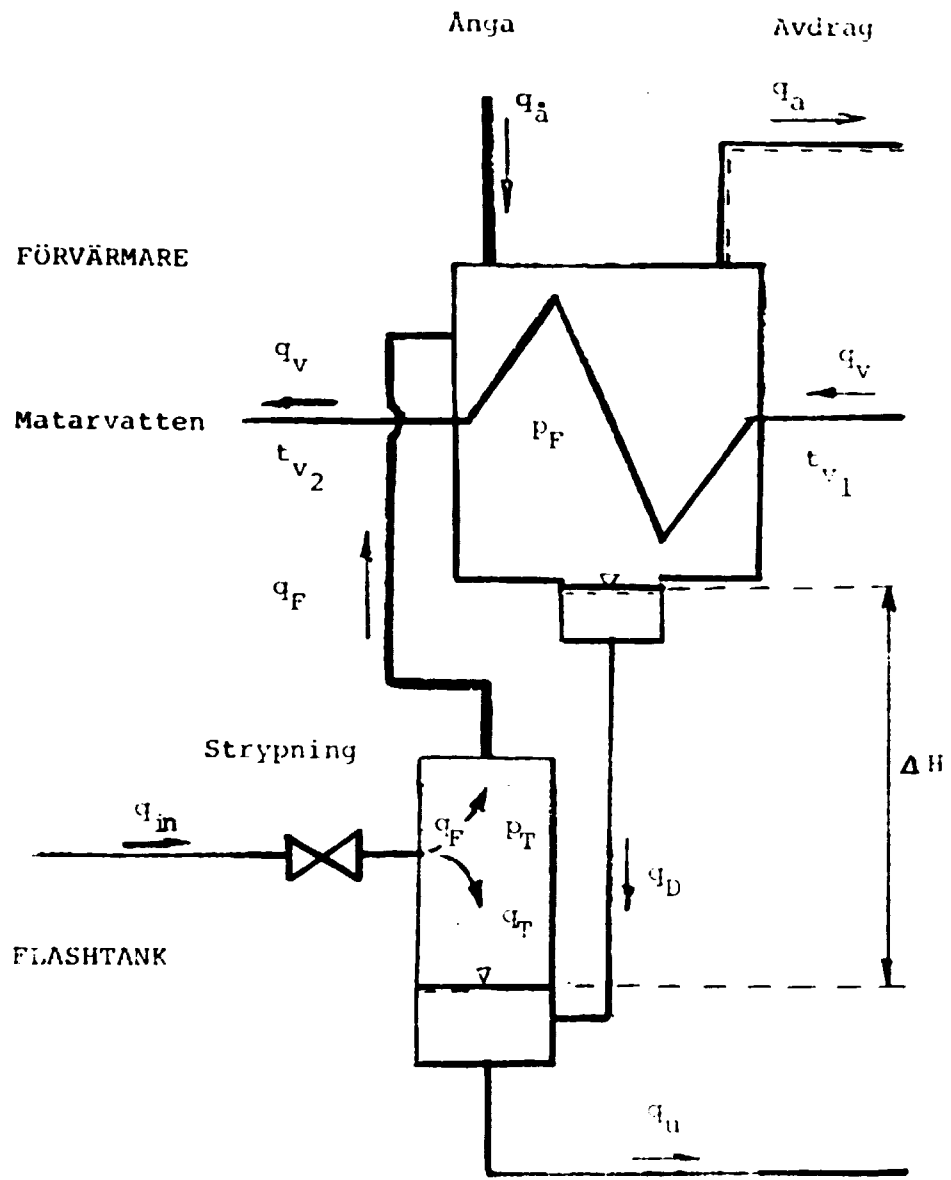
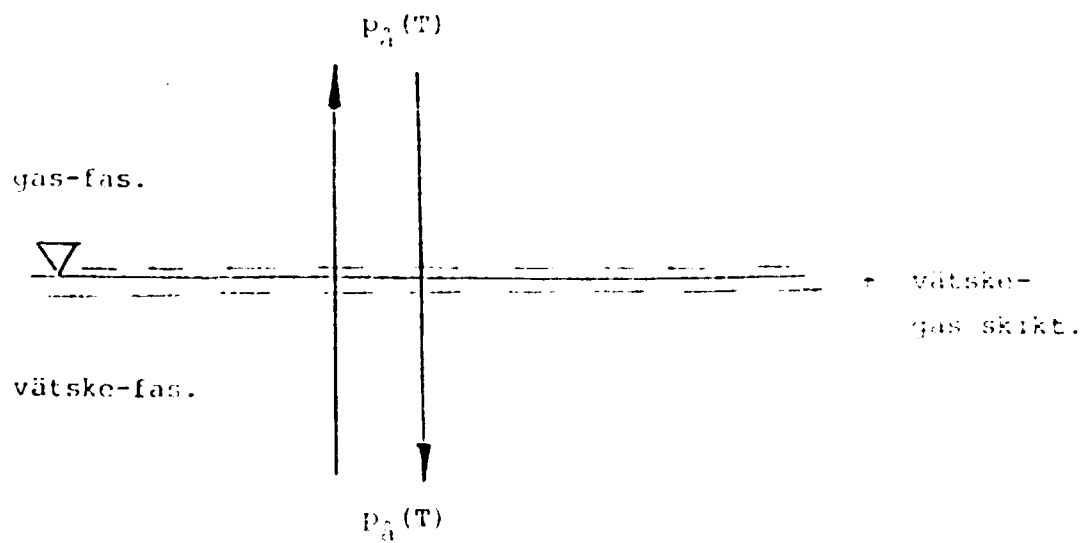


Fig I:2

$$P_T = P_a(T) + P_i$$



$P_T$  är totaltrycket.

$P_a(T)$  är vätskans ångtryck vid det av dess temperatur.

$P_i$  är den okondenserbara gasens partialtryck.

Således erhålls  $dP$  ur sambandet:

$$P_i = P_T - P_a(T)$$

## BILAGA 2

Experimentvärden erhållna av Bergman (1), Ogeus och Andersson (2) samt Risshytt (3)

Tabell II:1 Försöksresultat erhållna av Bergman (1)

| Flöde<br>kg/s | Temperatur<br>före stryp-<br>ning | Förång-<br>nings-<br>grad % | $c_{in}$<br>ppb | $c_{ut}$<br>ppb | $C^*$<br>ppb | E<br>- |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|--------------|--------|
| 0,0635        | 115                               | 0,96                        | 8950            | 750             | 18,7         | 0,918  |
|               | 120                               | 1,91                        | 9000            | 300             | 9,5          | 0,969  |
|               | 125                               | 2,86                        | 7100            | 100             | 5,0          | 0,987  |
|               | 130                               | 3,82                        | 7000            | 24              | 3,7          | 0,997  |
|               | 135                               | 4,78                        | 7100            | 8               | 3,0          | 0,999  |
| 0,127         | 115                               | 0,97                        | 7600            | 190             | 16,0         | 0,977  |
|               | 120                               | 1,91                        | 5200            | 35              | 6,5          | 0,996  |
|               | 125                               | 2,86                        | 6100            | 5               | 4,2          | 1,000  |
|               | 130                               | 3,82                        | 5700            | 0               | 3,0          | 1,001  |
| 0,191         | 115                               | 0,97                        | 6200            | 95              | 13,2         | 0,987  |
|               | 120                               | 1,91                        | 7150            | 18              | 7,5          | 0,999  |
|               | 125                               | 2,86                        | 7450            | 5               | 5,2          | 1,000  |
|               | 130                               | 3,82                        | 7100            | 2,5             | 3,7          | 1,000  |

Tabell II:2 Försök av Ogeus och Andersson (2)

Massflöde till flashtank 0,20 kg/s

| Förångningsgrad % | Temp.i flash-tank °C | Motsv.mätt-nadstryck bar | Temp/Tryck före flashvent. 1) °C/bar | Underkylning före flashvent. °C | E      |
|-------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------|
| 2                 | 110                  | 1,4327                   | 120/34,0                             | 120,0                           | 0,9921 |
|                   | 130                  | 2,7013                   | 140/34,0                             | 100,0                           | 0,9922 |
|                   | 150                  | 4,7600                   | 160/35,0                             | 82,5                            | 0,9930 |
|                   | 170                  | 7,9202                   | 180/35,0                             | 62,5                            | 0,9923 |
|                   | 190                  | 12,551                   | 200/45,5                             | 58,0                            | 0,9926 |
| 4                 | 110                  | 1,4327                   | 131/30,0                             | 103,0                           | 0,9952 |
|                   | 130                  | 2,7013                   | 150/32,0                             | 87,5                            | 0,9955 |
|                   | 150                  | 4,7600                   | 169/35,0                             | 73,5                            | 0,9956 |
|                   | 170                  | 7,9202                   | 188/35,0                             | 54,5                            | 0,9958 |
|                   | 190                  | 12,551                   | 206/45,0                             | 51,5                            | 0,9956 |
| 6                 | 110                  | 1,4327                   | 141/30,0                             | 93,0                            | 0,9962 |
|                   | 190                  | 12,551                   | 215/45,0                             | 42,5                            | 0,9965 |

1) Genom särskilda försök konstaterades att trycket före flashventilen ej är av betydelse för avgasningsverkningsgraden.

Tabell II:3 Försök av Risshytt (3) utan återcirkulation

Tryck i flashtank 1,43 bar  
Massflöde till flashtank 0,20 kg/s

| Förångningsgrad (%) | Avgasningsverkningsgrad (E) |
|---------------------|-----------------------------|
| 2                   | 0,9980                      |
| 4                   | 0,9985                      |
| 6                   | 0,9990                      |



Tabell II-4 Försök av Risshytt (3) med återcirkulation.

| Ingående<br>vattenflöde<br>(kg/s) | Tryck i<br>flashtank<br>(bar) | Flash-<br>grad.<br>$q_F/q_1$ (%) | Syrehalt<br>ingående<br>vatten (ppb) | Syrehalt<br>utgående<br>vatten (ppb) | Avgasnings-<br>verkn.grad<br>(%) |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 0,1                               | 1,43                          | 2                                | 4820                                 | 183                                  | 96                               |
|                                   | 2,70                          | 2                                | 4550                                 | 238                                  | 95                               |
|                                   | 2,70                          | 4                                | 4440                                 | 423                                  | 90                               |
|                                   | 4,76                          | 2                                | 4430                                 | 230                                  | 95                               |
|                                   | 4,76                          | 4                                | 4780                                 | 910                                  | 82                               |
|                                   | 4,76                          | 6                                | 5000                                 | 1300                                 | 74                               |
|                                   | 7,92                          | 2                                | 4350                                 | 580                                  | 87                               |
|                                   | 7,92                          | 4                                | 4350                                 | 790                                  | 73                               |
|                                   | 7,92                          | 6                                | 4600                                 | 1700                                 | 63                               |
|                                   | 12,55                         | 2                                | 4280                                 | 490                                  | 89                               |
|                                   | 12,55                         | 4                                | 4280                                 | 1610                                 | 63                               |
|                                   | 12,55                         | 6                                | 4520                                 | 2230                                 | 51                               |
| 0,2                               | 4,76                          | 2                                | 5760                                 | 920                                  | 84                               |
|                                   | 4,76                          | 4                                | 5810                                 | 2110                                 | 69                               |
|                                   | 7,92                          | 2                                | 5130                                 | 1360                                 | 74                               |
|                                   | 7,92                          | 4                                | 5300                                 | 2050                                 | 61                               |
|                                   | 7,92                          | 6                                | 5900                                 | 4300                                 | 27                               |
|                                   | 12,55                         | 2                                | 5710                                 | 930                                  | 84                               |
|                                   | 12,55                         | 4                                | 5670                                 | 2220                                 | 61                               |
|                                   | 12,55                         | 6                                | 5610                                 | 4280                                 | 24                               |