



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**TVÍFASA RENNSLI VIÐ NÝTINGU JARÐHITA**  
**Fundur að Hótel Esju 8. desember 1978**

Höfundar: **Horst J Richter**  
**Gísli Karel Halldórsson**  
**Þorbjörn Karlsson**  
**Valgarður Stefánsson**  
**Valdimar K. Jónsson**

Ritstjóri: **Jón Steinar Guðmundsson**

Dartmouth College

Orkustofnun

Háskóli Íslands

Orkustofnun

Háskóli Íslands

Orkustofnun

**OS79046/JHD22**

Reykjavík, nóvember 1979

**TVÍFASA RENNSLI VIÐ NÝTINGU JARÐHITA**  
**Fundur að Hótel Esju 8. desember 1978**

Höfundar: **Horst J Richter**  
**Gísli Karel Halldórsson**  
**Þorbjörn Karlsson**  
**Valgarður Stefánsson**  
**Valdimar K. Jónsson**  
Ritstjóri: **Jón Steinar Guðmundsson**

**Dartmouth College**  
**Orkustofnun**  
**Háskóli Íslands**  
**Orkustofnun**  
**Háskóli Íslands**  
**Orkustofnun**

**OS79046/JHD22**

**Reykjavík, nóvember 1979**

## FORMÁLI

Við aukna nýtingu háhitasvæða á Íslandi skapast fleiri og fleiri aðstæður, þar sem vatn og gufa streyma saman í bergi, borholum/rörum og tækjum. Verkfræðingar og aðrir, sem starfa við nýtingu jarðvarma, þurfa því í ríkara mæli að fást við verkefni, sem krefjast þekkingar á tvífasa rennsli. Af þessum ástæðum þótti Orkustofnun tímabært að efna til fundar um "Tvífasa rennsli við nýtingu jarðhita".

Á fundinum voru flutt 5 erindi; eitt frá Dartmouth College í New Hampshire í Bandaríkjunum, tvö frá Háskóla Íslands og tvö frá Orkustofnun. Umræður voru á eftir erindunum. Þátttakendur voru um 40 frá verkfræðistofum, rannsóknastofnunum og nýtingarfyrirtækjum jarðhita.

Í meðfylgjandi riti eru erindin á ráðstefnunni birt í þeirri röð, sem þau voru flutt, ásamt umræðum um þau öll í sérkafla. Aftast er skrá yfir þátttakendur.

Jón Steinar Guðmundsson

EFNISYFIRLIT

FORMÁLI

- 1 TWO-PHASE FLOW MODEL  
Horst J. Richter
- 2 AFLFERLAR OG TVEGGJA FASA RENNSLI Í BORHOLUM  
Gísli Karel Halldórsson
- 3 TVÍFASA RENNSLI Í BORHOLUM  
Þorbjörn Karlsson
- 4 JARÐHITAKERFIÐ VIÐ KRÖFLU  
Valgarður Stefánsson
- 5 VARMA- OG MASSASTREYMI Í BERGI  
Valdimar K. Jónsson

UMRÆÐUR

DÁTTTAKENDUR

# TWO-PHASE FLOW MODEL

Horst J. Richter

## CONTENTS

	Page
1 SUMMARY .....	1
2 PREVIOUS WORK .....	3
3 THIS WORK .....	7
4 COMPARISON .....	12
5 CONCLUSIONS .....	16
REFERENCES .....	17



## TWO-PHASE FLOW MODEL

by

Horst J. Richter\*

## 1. SUMMARY

In geothermal boreholes, in many cases, a steam-water mixture is exiting. The properties of this steam-water mixture are dependent upon the pressure drop in the borehole and the exit valves. In many boreholes choking occurs at the exit - which is the maximum mass flux due to acceleration of the fluids to some kind of critical velocity.

The evaluation of a unique critical velocity for a two-phase flow mixture is not possible since both phases can have different velocities. Thus the maximum or critical mass flux will depend upon the upstream conditions and the history of the two-phase flow mixture from the onset of flashing<sup>†</sup> to the exit. Many models for the critical mass flux have been developed in the literature<sup>2</sup>, several of them neglecting effects of upstream conditions.

This two-phase flow model considers velocity differences between the two-phases as well as eventual temperature differences during flashing, since, in very rapid depressurization the condensation or evaporation rate might be different from that required by thermal equilibrium.

In this model conservation equations for mass and momentum are written for each phase, requiring the knowledge of the interaction terms (mass, heat,

---

\* This work is sponsored by EPRI, see<sup>1</sup>

† The term flashing is usually used to describe vapor formation due to pressure change in an adiabatic system, while boiling is evaporation due to heat addition.

and momentum transfer) between the two phases. It is assumed that the evaporation or condensation rate is limited by heat transfer between the phases while the momentum transfer is a function of the different flow regimes. In bubble flow the momentum transfer is due to the drag force and the apparent mass force. The momentum transfer in other flow regimes is formulated with an interfacial friction factor. This model requires empirical assumptions about bubble concentration and size at onset of flashing and will calculate pressure drop, velocities and temperatures of the phases as well as mass transfer rates for given total mass flow rates in pipes or similar geometries.

Comparison with experiments of several authors show good agreement.



## 2. PREVIOUS WORK

Several different attempts have been made by different researchers to solve two-phase flows, especially the critical two-phase flow problem.<sup>1-4</sup>

The simplest approach is to treat the two-phases as a pseudo-single phase flow, where vapor and liquid are in thermal equilibrium everywhere in the conduit. This so-called homogeneous model seems to under-predict most experimental results considerably, except for large qualities, see Figure 1.

Originally the main reason for these deviations was thought to be due to different velocities of the two-phases. Looking at some of the different flow regimes which might occur in two-phase flow it seems likely that the two-phases have different velocities, see Figure 2. The slip flow models introduced by some authors<sup>3-5</sup> allowed for different velocities of the phases but retained the assumption of thermodynamic equilibrium between the two-phases.

If we assume i.e. that only inertia effects are dominant in the two-phases and that we start at relative low velocities we would write the momentum equations for the two-phases in the following way:

$$- \frac{dp}{dz} = \rho_1 v_1 \frac{dv_1}{dz} \quad (1)$$

and

$$- \frac{dp}{dz} = \rho_2 v_2 \frac{dv_2}{dz} \quad (2)$$

If density changes are small we would get a velocity ratio between the two phases of

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

This is the model introduced by Fauske<sup>3</sup>.

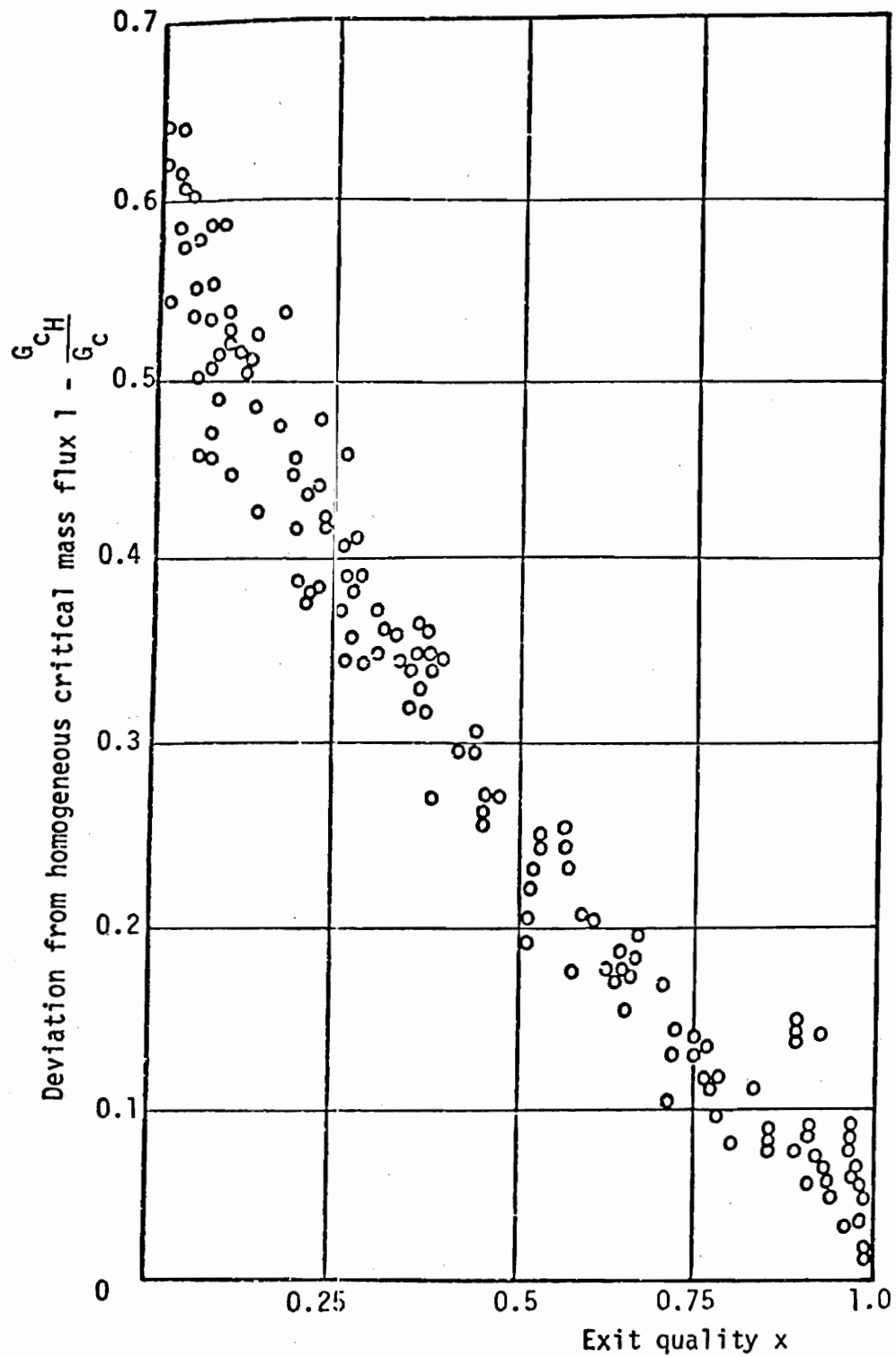


Figure 1 Deviation of critical mass flux from homogeneous critical mass flux. Isbin<sup>13</sup>

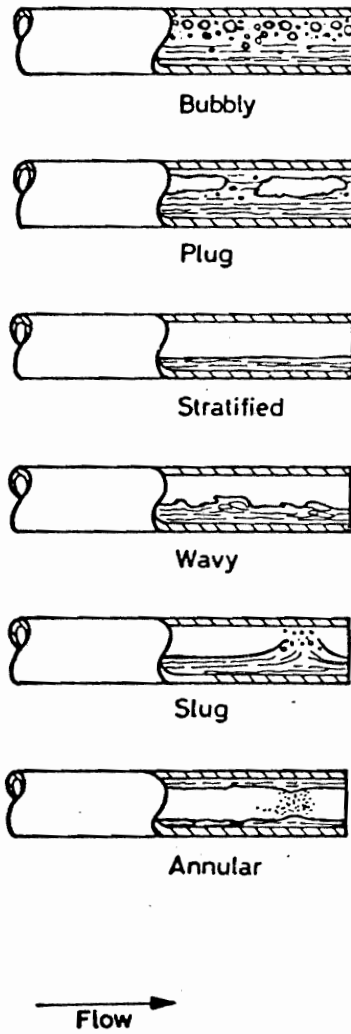


Figure 2. Different Flow Regimes in Horizontal Two-Phase Flow

Moody<sup>4</sup> developed a velocity ratio of

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{1/3} \quad (4)$$

by introducing the energy equation and making certain assumptions about the thermodynamic path of the two-phase flow mixture.

These models were successful for some experiments but in general they predict much higher velocity ratios than those observed in experiments. In general, the velocity ratio should be a function of the flow regime, but the ones evaluated by Fauske and Moody are only functions of the thermodynamic properties of vapor and liquid.

Another approach to predict the critical flow of two-phase flow was to assume that discrepancies between experiments and homogeneous flow model predictions were due to a lack of thermodynamic equilibrium between the phases. Since the deviations to the homogeneous flow were largest at small qualities - probably in bubbly flow - the work concentrated on this particular flow regime. By some authors<sup>6-8</sup> evaporation rates were limited while flashing occurred by transient conduction. Edwards<sup>6</sup> introduced in addition an arbitrary time delay before bubble nucleation starts to match the data. Ardron<sup>7</sup> assumed an incipient superheat before boiling could start.

### 3. THIS WORK

In a complicated flow like critical two-phase flow, where heat, mass and momentum transfer occur between the phases one cannot expect to overcome all empiricism, but we believed that improvements are possible.

In the two-phase model we developed we were trying to set up conservation equations which were able to describe the flow behavior of flashing two-phase flow as close to reality as we were able.

This so-called separated flow model included the following assumptions in order to get a more realistic picture of the flashing two-phase flow in the total length of the conduit:

- a) Liquid and vapor can have different velocities
- b) Heat transfer from one phase to the other is due to conduction and convection.
- c) Evaporation or condensation is limited by heat transfer between phases.
- d) Friction pressure drop is included - this is especially important for flow through long pipes.

The liquid phase will have the subscript "1" and the vapor phase "2".

The conservation equations of mass and momentum are written separately for a finite length of conduit.

In Figure 3 the phases are plotted completely separated to allow a simple evaluation of the conservation equations

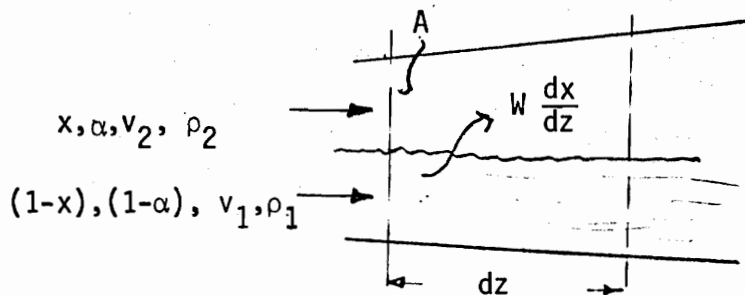


Figure 3

For steady flow for a conduit length  $dz$  the conservation equations for mass are for the liquid:

$$(1-x)W = \rho_1 v_1 (1-\alpha)A \quad (5)$$

$$-\frac{1}{1-x} \frac{dx}{dz} = \frac{1}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{dz} + \frac{1}{v_1} \frac{dv_1}{dz}$$

$$-\frac{1}{1-\alpha} \frac{d\alpha}{dz} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \quad (6)$$

and for the vapor:

$$xW = \rho_2 v_2 \alpha A \quad (7)$$

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dz} = \frac{1}{\rho_2} \frac{d\rho_2}{dz} + \frac{1}{v_2} \frac{dv_2}{dz}$$

$$+ \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dz} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \quad (8)$$

where  $A$  is the total cross section,  $\alpha$  the void fraction,  $x$  the quality,  $\rho$  the densities,  $v$  the velocities and  $W$  the total mass flow rate. The void fraction is the ratio of the volume occupied by the vapor to the total volume.

The momentum conservation equations are for the liquid

$$\rho_1 v_1 (1-\alpha) \frac{dA}{dz} = - \frac{dp}{dz} (1-\alpha) A + F_{12} A - F_{w1} A$$

$$- (1-x)(v_2 - v_1) W \frac{dx}{dz} \quad (9)$$

and for the vapor

$$\rho_2 v_2 \alpha \frac{dA}{dz} = - \frac{dp}{dz} \alpha A - F_{12} A - F_{w2} A - x(v_2 - v_1) W \frac{dx}{dz} \quad (10)$$

The terms  $F_{w_1}$  and  $F_{w_2}$  are forces per unit volume  $Adz$  between the walls of the conduit and the phases.

In most flow regimes the vapor has no contact with the wall, thus  $F_{w_2} \approx 0$  and  $F_{w_1}$  is the friction pressure drop

$$F_{w_1} = \phi_{fo}^2 \left( \frac{dp}{dz} \right)_{F_{fo}} \quad (11)$$

according to Martinelli-Nelson<sup>9</sup>.  $\phi_{fo}^2$  is an empirical two-phase flow multiplier and  $(dp/dz)_{F_{fo}}$  is the friction pressure drop assuming the total flow rate is liquid.

The last term in the two momentum equations evaluates the momentum change due to evaporation or condensation. The coefficient  $\eta$  is the fraction of this force charged to the vapor. It has been shown by Wallis<sup>10</sup> that for reversible flow this coefficient  $\eta$  should be  $\eta = 0.5$ .

The term  $F_{12}$  in the momentum equations is the interfacial force per unit volume which can be eliminated by adding the two momentum equations. But in order to calculate the different velocities of the two-phases the interfacial force  $F_{12}$  has to be known.

In bubbly flow regime the interfacial force contains mainly the drag force and the apparent mass force

$$F_{12} = \frac{3}{4} (C_D)_{\alpha} \alpha(1-\alpha)^3 \rho_1 (v_2 - v_1) |v_2 - v_1| + C \rho_1 v_2 \frac{d}{dz} (v_2 - v_1) \quad (12)$$

where  $C = 0.5$  for spherical bubbles and the drag coefficient can be expressed as a function of the Reynolds number of the bubble  $Re_b$  and the void fraction, see Wallis<sup>10</sup>.

In annular flow for a void fraction of approximately  $\alpha \geq 0.8$  the interfacial force can be described with a friction factor

$$C_{fi} = 0.005 (1 + 75(1-\alpha)) \quad (13)$$

and then  $F_{12}$  becomes

$$F_{12} = \frac{2C_{fi}}{D} \sqrt{\alpha} \rho_2 (v_2 - v_1)^2 \quad (14)$$

with  $D$  the hydraulic diameter of the conduit.

The bubble flow regime ceases at a void fraction of about  $\alpha = 0.3$ . The flow regime between bubble and annular flow regime is sometimes called churn-turbulent flow regime, where agglomeration of bubbles occurs, slugs etc.

Up to now no description of the interfacial force is available, thus we interpolated between annular flow and bubble flow an interfacial friction factor according to eq.(14) linearly, which can only be justified by comparison of predictions with experimental results.

Finally the conservation equation of energy for both phases together is:

$$\begin{aligned} \phi \pi D = & \frac{dx}{dz} W \left\{ h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) \right\} \\ & + xW \left\{ \frac{dh_2}{dz} + v_2 \frac{dv_2}{dz} \right\} \\ & + (1-x)W \left\{ \frac{dh_1}{dz} + v_1 \frac{dv_1}{dz} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

where  $h$  are the enthalpies and  $\phi$  is a heat flux through the walls of the pipe or conduit. The energy equation has to be accomplished by a heat transfer equation. If we assume that the evaporation rate is limited by heat transfer



then we get for the bubble flow regime

$$\frac{6h^1}{d} (T_1 - T_2) \alpha A = W \frac{dx}{dz} h_{12} + xW \frac{dh_2}{dz} \quad (16)$$

The left hand side represents the heat transfer rate to the bubbles of diameter  $d$  by conduction and convection due to the temperature difference between liquid and vapor, where the heat transfer coefficient is

$$h^1 = \frac{k_1}{d} (2 + 0.15 Re_b^{0.5}) \quad (17)$$

where  $k_1$  the thermal conductivity, of the liquid  $Re_b$  the Reynolds number of the bubble and  $d$  the bubble diameter.

For the churn-turbulent flow regime the heat transfer coefficient was evaluated as a function of the interfacial friction factor, it is a correlation of the Colburn type.

$$\frac{h^1}{Cp_2 \rho_2 (v_2 - v_1)} Pr_2^{2/3} = \frac{C_{fi}}{2} \quad (18)$$

These are now enough equations to solve for the pressure drop, velocity and temperature changes as well as for the evaporation or condensation rate throughout the flow channel, if upstream conditions and geometry are given. The critical flow, which we were especially interested in, will occur at that particular flow rate at which the pressure gradient at the exit of the conduit becomes  $dp/dz \rightarrow -\infty$ .

#### 4. COMPARISONS

Comparisons with experimental results of critical two-phase flows of water-steam mixtures in adiabatic flows in pipes and nozzles show good agreement for the predictions of pressure drop as well as mass fluxes, some examples are shown in Figures 4 to 6.

In all cases the upstream conditions were either saturated or subcooled water. At onset of flashing it was assumed that  $N = 10^{11} \text{ 1/m}^3$  nucleation sites were available and that the initial bubble diameter was  $d_i = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ . These assumptions seemed to give best agreement with the experiments.

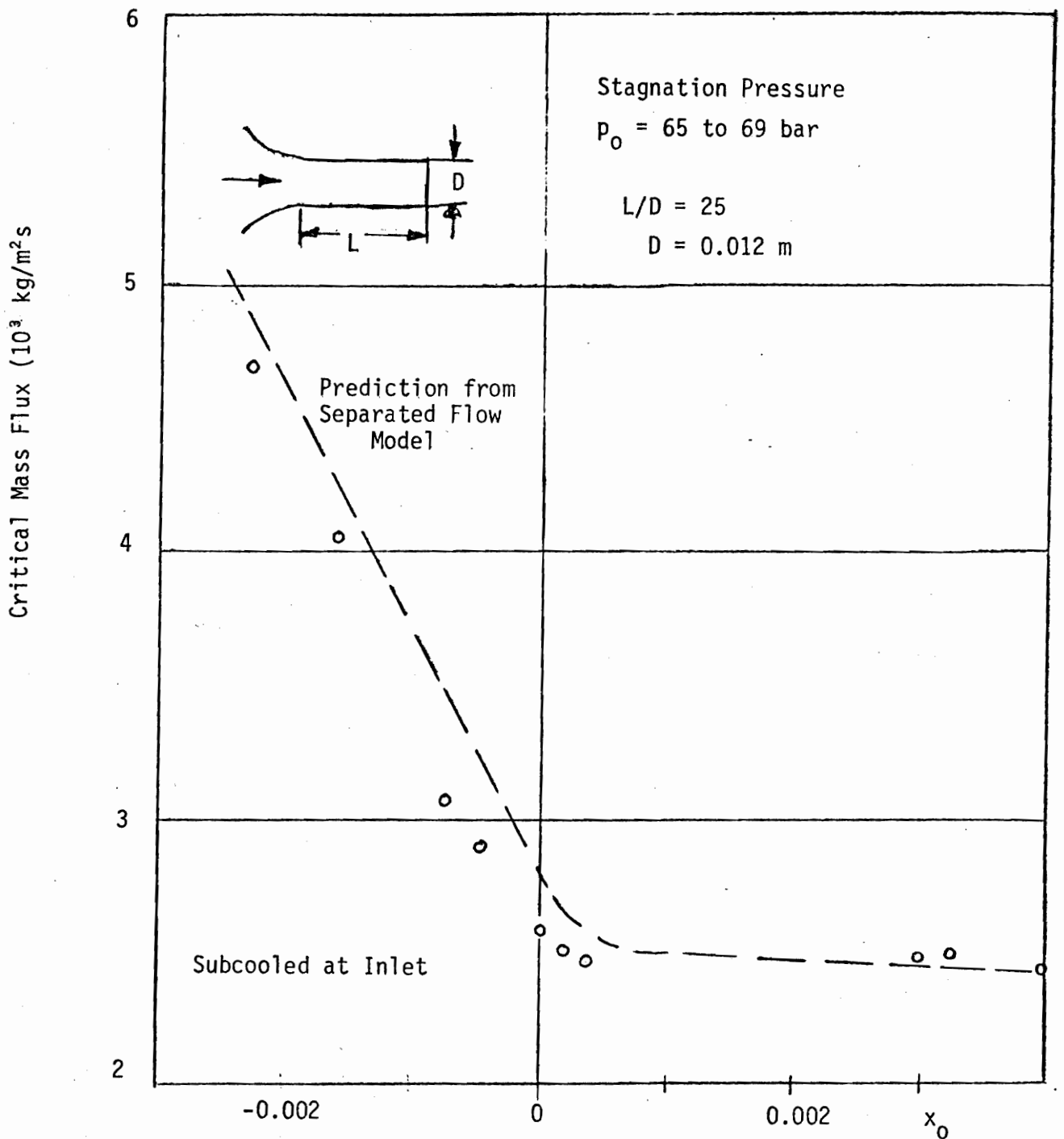


Figure 4 Critical Mass Flux Comparison of Separated Flow Model and Experiments from<sup>11</sup> vs. Stagnation Quality. (the stagnation quality is defined with the specific volume  $x_0 = \frac{v_0 - v_1}{v_2 - v_1}$ )

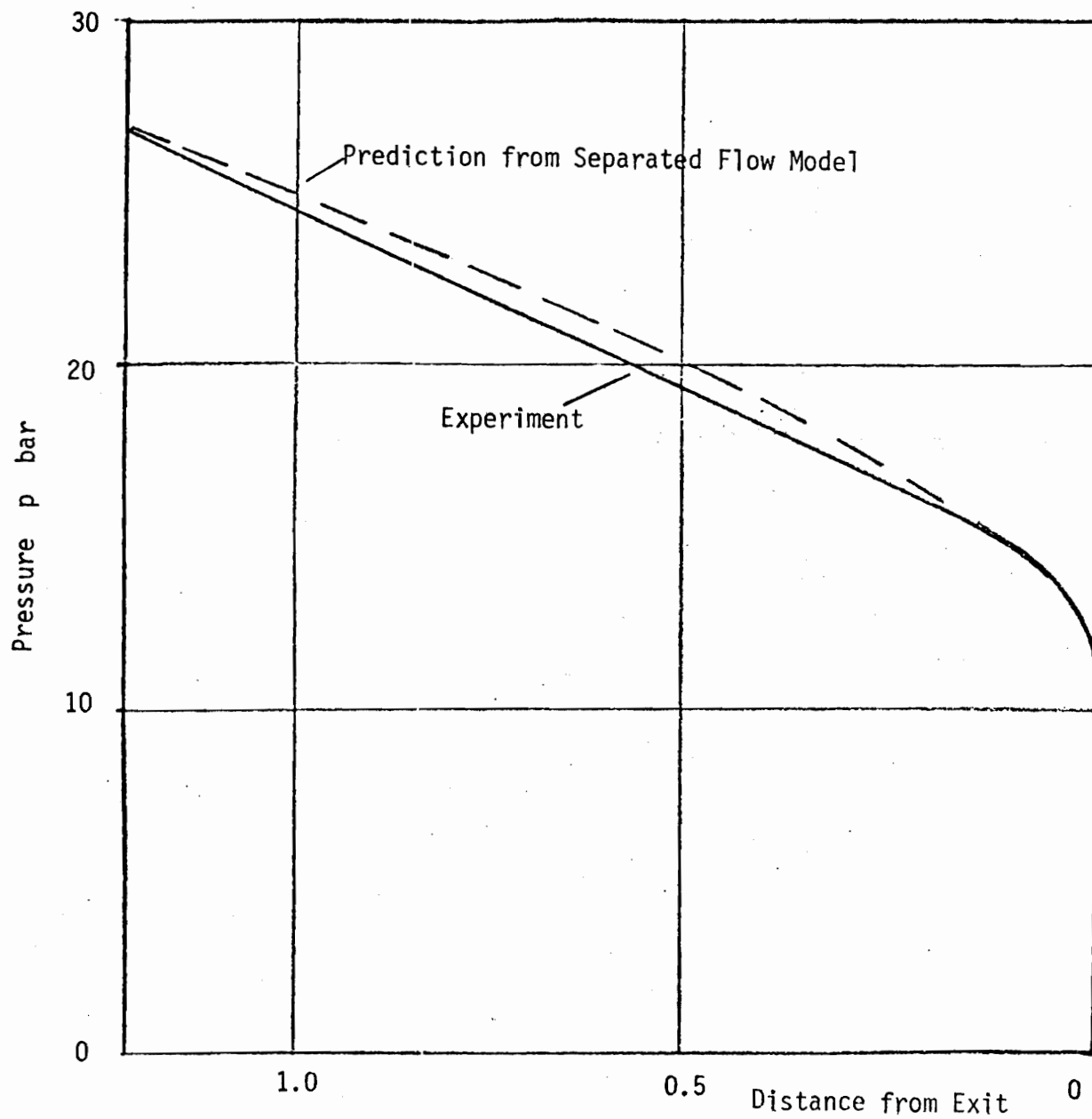


Figure 5 Pressure Drop and Choking in a Pipe calculated by the Separated Flow Model in Comparison with Experiments<sup>3</sup>.

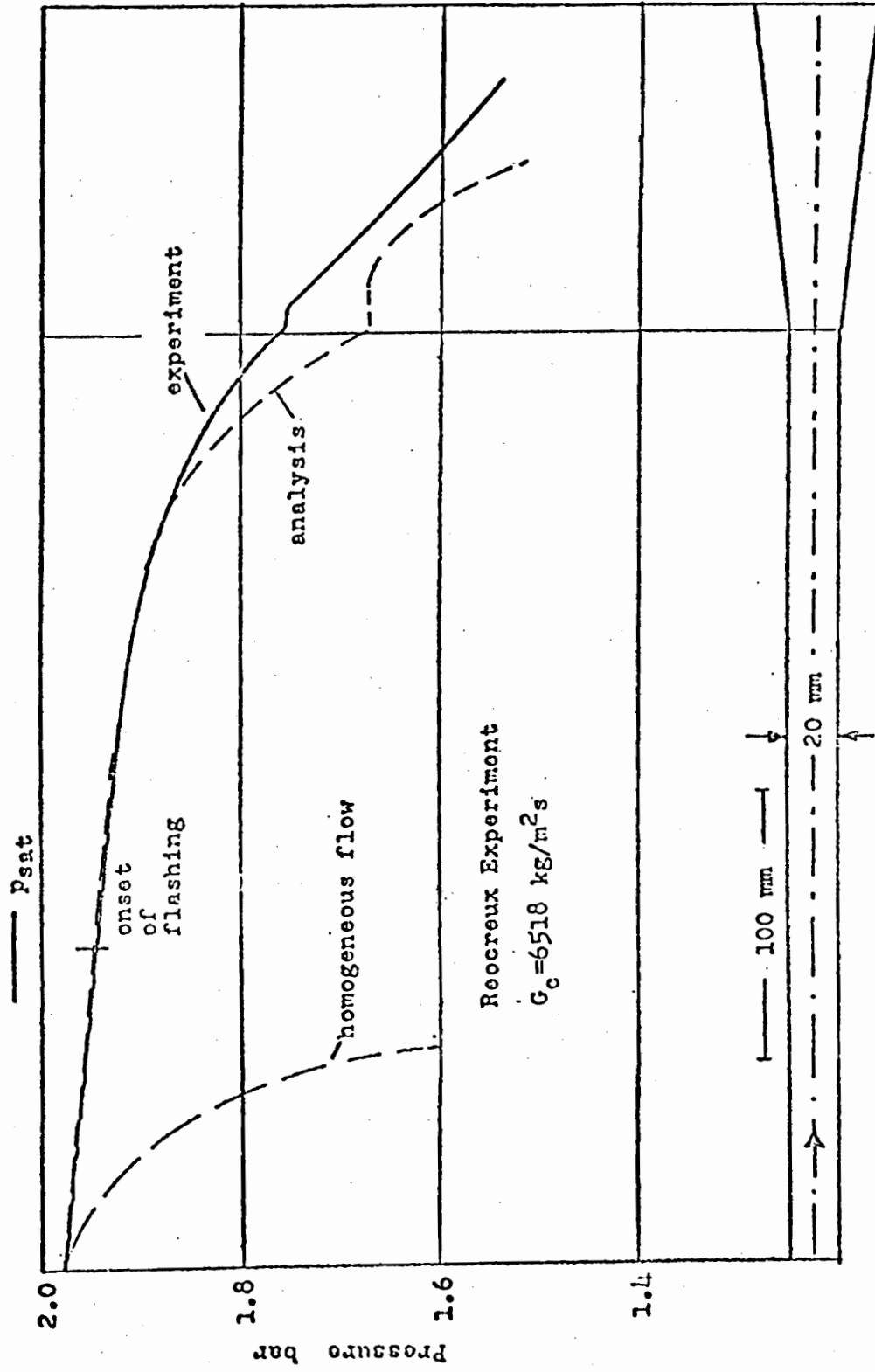


Figure 6 Comparison of Pressure Drop Calculated in the Separated Flow Model and experimental Result from Reocreux<sup>12</sup> for a Mass Flux of  $G_c = 6518 \text{ kg/m}^2\text{s}$

## 5. CONCLUSIONS

This separated flow model was developed particularly to predict critical flow rates in different flow geometries for given upstream conditions. This model is not free of empiricism but comparisons with experimental results show good agreement. The set of conservation equations are formulated in such general way that they can be used for calculation of two-phase flows in geothermal boreholes or other applications as well.

## REFERENCES

1. Wallis, G.B., H.J.Richter, and J.T.Kuo: The Separated Flow Model of Two-Phase Flow. EPRI Report NP-275, December 1976
2. Jones, O.C., Jr. and P. Saha" Non-Equilibrium Aspects of Water Reactor Safety, 1978
3. Fauske, H.: Contribution to the Theory of Two-Phase, One-Component Critical Flow. ANL-6633 1962
4. Moody, F.J.: Maximum Flow Rate of a Single-Component Two-Phase Mixture. J. of Heat Transfer, Trans. ASME Ser.C, 87, 1965, pp 134-142
5. Levy, S." Prediction of Two-Phase Critical Flow Rate. J. of Heat Transfer, ASME, Ser.C. 87 1965, pp 53-58
6. Edwards, A.R.: Conduction Controlled Flashing of a Fluid, and the Prediction of Critical Flow Rates in a One Dimensional System. United Kingdom Atomic Energy Authority Report AHSB(s) R 147, 1968
7. Ardron, K.H.: A One-Dimensional Two-Fluid Model for the Critical Flow of Initially Saturated or Subcooled Liquids in a Pipe. Central Electricity Generating Board, Research Division, Berkeley Nuclear Laboratories.
8. Forster, H.K., N. Zuber: Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Liquid. J. Appl. Physics, 25, 1954, pp 474-478
9. Martinelli, R.C. and D.B. Nelson: Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water. Trans. ASME, 70, 1965, p.695.
10. Wallis, G.B.: One-Dimensional Two-Phase Flow. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., 1969
11. Sozzi, G.L. and W.A.Sutherland: Critical Flow of Saturated and Subcooled Water at High Pressure. GE Report NEDO-13418, July 1975
12. Reocreux, M.: Contribution a L'etude des Debits Criticques en Ecoulement Diaphasique Eau-Vapeur. Ph.D. Thesis, University of Grenoble 1975 (translated as NUREG-tr-002, Vol.1 to 3)
13. Isbin, H.S. et al." Two-Phase Steam-Water Critical Flow. AIChE J. 3, 1957, pp 361-365



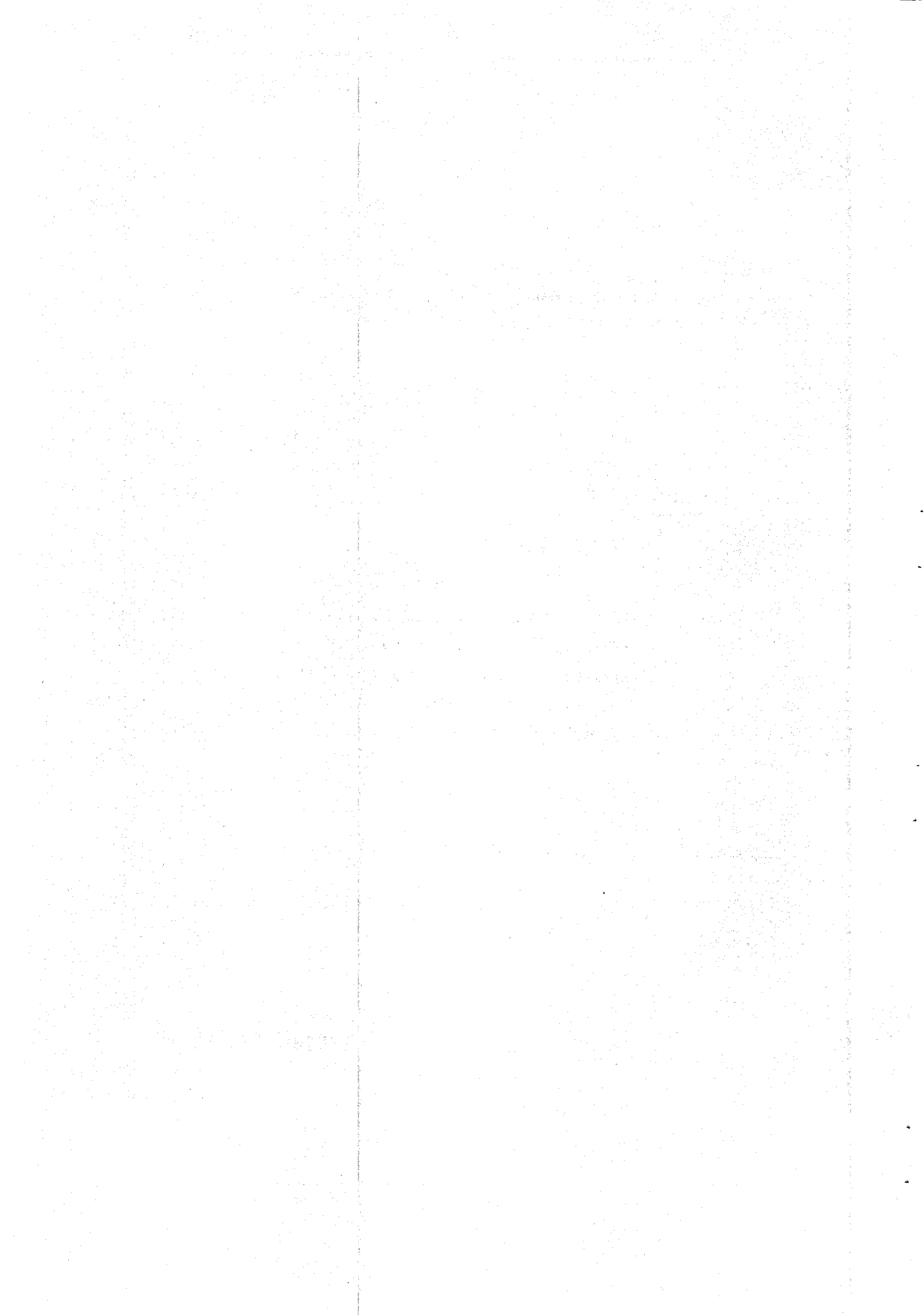


# AFLFERLAR OF TVEGGJA FASA RENNSLI Í BORHOLUM

Gísli Karel Halldórsson

## EFNISYFIRLIT

1	INNGANGUR .....	1
2	REIKNINGAR Á PRÝSTIBREYTINGUM FRÁ VATNSLEIÐSLU AÐ HOLUTOPPI.	2
	2.1 Drýstilakkun frá vatnsæðum inn í borholuna.....	2
	2.2 Drýstilakkun í borholunni upp að suðuborði.....	3
	2.3 Drýstibreyting ofan suðuborðs.....	4
	2.4 Reikniaðferð með tölvu.....	6
3	NIDURSTÖÐUR.....	8
	TILVITNANIR.....	10
	MYNDIR.....	13



## 1 INNGAGNUR

Í þessu erindi verður fjallað um rennsli í borholum. Rætt verður um hvernig þrýstingur breytist frá vatnsleiðara að holutoppi. Reynt verður að stilla upp líkani sem skýrir hvernig þrýstingur á holutoppi er háður rennslinu úr holunni.

Sé þrýstingur í jarðhitageyminum yfir suðumarki vatnsins streymir eingöngu vatn inn í borholur. Ef suðuprýstingur vatnsins er hærri en þrýstingur í vatnsleiðara streymir inn í borholuna blanda af gufu og vatni. Ég mun taka fyrir það tilfelli að hreint vatn streymi inn í holu og fari að sjóða á leið upp hana. Upp úr holunni kemur þá blanda af gufu og vatni.

Þegar þrýstibreytingar frá vatnsleiðaranum að holutoppi eru reiknaðar má skipta þeim upp í nokkra þætti:

### A. Þrýstingur í vatnsleiðara

Þrýstingur í vatnsleiðara, PAA, er háður þrýstifalli sem verður þegar vatnið streymir um vatnsæðar bergsins. Við stöðugt rennsli úr holunni lækkar þrýstingurinn með tíma.

### B. Þrýstingur í borholunni við vatnsleiðara

Þrýstifall getur verið frá vatnsleiðaranum inn í borholuna vegna iðustreymis.

### C. Suðuprýstingur

Gert er ráð fyrir að eingöngu vatn komi inn í holuna. Þegar það streymir upp lækkar þrýstingur og að því kemur að þrýstingur í holunni er jafn og suðuprýstingur vatnsins. Þessi staður kallast suðuborð. Þrýstibreyting frá þeim þrýstingi sem er við vatnsleiðara að suðuprýstingi, er vegna þunga vatnsúlunnar og viðnáms vatnsins við holuveggina.

#### D. Þrýstingur á holutoppi

Við suðuborð fer vatnið að sjóða og gufa myndast. Eftir því sem þrýstingur lækkar ofar í holunni myndast meiri gufa. Þrýstibreytingar sem verða frá suðuborði: að holutoppi stafa af þunga vatns- og gufu-blöndunar, þ.e. vegna v.ðnáms vatns og gufu við holuveggina og skrið-þungabreytinga.

Nokkur óvissa er í þeim reikningum sem gerðir eru á þrýstibreytingum í tveggja fasa rennsli.

Gerðar hafa verið mælingar á þrýstifalli í tveggja fasa streymi, einnig hefur verið mælt hlutfall milli hraða gufunnar og vatnsins í streyminu. Mælingar þessar hafa verið gerðar í sambandi við nýtingu jarðhita, en einnig og ekki síður í sambandi við kælibúnað í kjarnorkuverum.

Út frá mælingunum hafa verið settar fram ýmsar líkingar um samband þrýstifalls í tveggja fasa streymi við massaþurrstig gufunnar, þrýsting og fleiri stærðir. Einnig hafa verið settar fram líkingar sem sýna hvernig hraðahlutfall vatns og gufu er háð öðrum stærðum.

Hér á eftir mun ég sýna nokkrar af þeim líkingum, sem settar hafa verið fram, og sýna dæmi um hvernig mismunandi forsendur og reikniaðferðir falla að mældum stærðum í blásandi borholu, svo sem þrýstingi, hitastigi og aflferlum.

#### 2 REIKNINGAR Á ÞRÝSTIBREYTINGUM FRÁ VATNSLEIÐARA AÐ HOLUTOPPI

Mynd 1 sýnir snið af borholu. Þrýstingur á holutoppi er reiknaður út frá þrýstingi í vatnsleiðaranum, PAA, og þrýstifalli sem er upp holuna.

##### 2.1 Þrýstilækkun frá vatnsæðum inn í holuna

Frá vatnsleiðaranum inn í holuna getur verið þrýstifall vagna iðustreymis. Þrýstifallið er í réttu hlutfalli við rennslið,  $W$ , úr holunni í öðru veldi.

$$\Delta P_{\text{iðustreymi}} = C \cdot W^2 \quad (1)$$

Stuðullinn C er háður leiðni bergsins næst holunni. Hann er því breytilegur eftir jarðhitasvæðum og borholum. Stuðullinn C má ákvarða þannig, að þrýstimæli er rennt niður á botn holunnar, og þrýstingur þar mældur fyrir mismunandi rennsli úr holunni.

## 2.2 Þrýstilækkun í holunni upp að suðuborði

Þrýstistigull í vatnsfasanum upp að suðuborði er vegna þyngdar vatnsins og vegna viðnáms.

$$\frac{dp}{dz} = \underbrace{-\rho \cdot g \cdot \sin\theta}_{\text{þungi}} - \underbrace{\frac{f}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}}_{\text{viðnám}} \quad (2)$$

$\rho$  = eðlisþungi vatnsins

$g$  = þyngdarhröðun

$\theta$  = halli holunnar

$D$  = þvermál holunnar

$V$  = hraði vatnsins

$f$  = viðnámsstuðull

Í þessari líkingu eru allar stærðir þekktar nema viðnámsstuðullinn,  $f$ . Nota má Moody-línurit (mynd 2) til að ákvarða viðnámsstuðulinn sem fall af Reynolds tölunni,  $R$ , og hrjúfleika pípunnar. Í blásandi borholum er Reynolds talan það há að viðnámsstuðullinn er lítið háður  $R$ , en er eftir sem áður háður hrjúfleika pípunnar. Í borholum eru raufar sem auka hrjúfleikann, einnig getur verið þunnt útfellingalag á holuveggjunum sem eykur hrjúfleika pípunnar. Hrjúfleikinn er því venjulega ekki þekktur, og því einungis hægt að nota Moody línurit til þess að finna lágmarksgildi á viðnámsstuðlinum  $f$ .

Á mynd 3 má sjá hvernig suðuborð er reiknað út.

### 2.3 Þrýstibreyting cfan suðuborðs

Fyrir ofan suðuborð er streymi vatns og gufu. Þrýstistigull í blöndunni finnst sem summa af þrýstistigli vegna þunga vatns og gufu  $(\frac{dp}{dz})_z$ , skriðþungabreytinga  $(\frac{dp}{dz})_a$ , og viðnáms vatns og gufu við holu-vegg  $(\frac{dp}{dz})_F$ , sjá mynd 4.

2.3.1 Þrýstistigull vegna þunga vatns og gufu er háður eðlisþunga þeirra, halla holunnar og glufuhlutfallinu. Glufuhlutfall  $\alpha$  (void fraction) er skilgreint sem hlutfallið milli flatarmáls gufu í ákveðnu þversniði og heildarflatarmáls þversniðsins,

$$\alpha = A_g/A$$

Þrýstistigull vegna þunga er reiknaður þannig:

$$-(\frac{dp}{dz})_z = g \sin\theta (\alpha \cdot \rho_g + (1-\alpha) \cdot \rho_f) \quad (3)$$

þar sem  $g$  er þyngdarhröðunin,  $\theta$  er halli holunnar,  $\rho_g$  og  $\rho_f$  eru eðlisþungi gufu og vatns, og  $\alpha$  er glufuhlutfall eins og áður er sagt. Þessar stærðir eru þekktar nema glufuhlutfallið  $\alpha$ . Það er háð hraðahlutfalli (slip) gufu og vatns.

Hraðahlutfall  $S = \frac{\text{Hraði gufunnar}}{\text{Hraði vatnsins}}$

Sambandið milli glufuhlutfallsins og hraðahlutfalls er þannig:

$$\alpha = \frac{\rho_f \cdot X}{(1-X) \rho_g \cdot S + X \cdot \rho_f} \quad (4)$$

þar sem  $X$  er massaþurrstig gufunnar í rennslinu.

Út frá fræðilegum athugunum og mælingum, sem gerðar hafa verið á glufuhlutfallinu, hafa verið settar fram margar aðferðir til að reikna glufuhlutfallið  $\alpha$ . Elstu heimildirnar eru frá Martinelli og Nelson (1948). Þeir settu fram línurit sem á að sýna hvernig glufuhlutfallið er háð þrýstingi og massaþurrstigi gufunnar  $X$ .

Á mynd 7 er samantekt á nokkrum aðferðum til að reikna glufuhlutfallið  $\alpha$ . Eftir að þetta hlutfall hefur verið reiknað með einni aðferðinni má reikna út þrýstistigul vegna þunga vatns og gufu.

2.3.2 Reiknað er með að þrýstistigull vegna skriðþungabreytinga sé háður massahraðanum  $G$ , massapurrtigi gufu í rennslinu  $X$ , glufuhlutfallinu  $\alpha$ , og eðlisþunga vatns og gufu,  $\rho_f$  og  $\rho_g$ .

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_a = G^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{X^2}{\alpha \cdot g} + \frac{(1-X)^2}{(1-\alpha) \cdot f} \right) \quad (5)$$

þar sem  $G$  er massahraðinn, skilgreint þannig

$$G = \frac{W}{A} = \frac{\text{Massarennslí (kg/s)}}{\text{Flatarmál (m}^2\text{)}}$$

Massapurrtig gufu,  $X$ , er skilgreint sem hlutfallið milli gufumassa og heildarmassa vatns og gufu sem streyma í gegnum ákveðið þversnið á gefnum tíma.

$$X = \frac{W_g}{W} = \frac{\text{Massarennslí gufu}}{\text{Heildarrennslí}}$$

Massapurrtig er reiknað út frá orkujöfnunni:

$$E = X \cdot h_g + (1-X) \cdot h_f + z \cdot g + 1/2 \cdot X \cdot U_g^2 + 1/2 (1-X) \cdot U_f^2 \quad (6)$$

þar sem  $E$  er heildarorkan á massaeiningu. Ef ekkert varmatap er frá holunni er  $E$  fasti. Sé hinsvegar varmatap frá holunni er  $E$  stærð sem fer minnkandi eftir því sem ofar kemur í holuna. Í þeim reikningum, sem hér eru sýndir, er gert ráð fyrir að orka á massaeiningu sé konstant. Þessi nálgun hefur litla skekkju í för með sér. Liðurinn  $X \cdot h_g$  er varmainnihald gufunnar í hverri massaeiningu í rennslinu  $(1-X) \cdot h_f$  er varmainnihald vatnsins,  $z \cdot g$  er staðarorkan,  $1/2 \cdot X \cdot U_g^2$  er hreyfiorka gufunnar og  $1/2 (1-X) \cdot U_f^2$  er hreyfiorka vatnsins í hverri massaeiningu í rennslinu.

Nú höfum við líkingar til að reikna allar stærðir í jöfnu 5, og getum því reiknað út þrýstistigul vegna skriðþungabreytinga.

2.3.3 Gerðar hafa verið athuganir á hvað þrýstifall vegna viðnáms vatns og gufu við holuveggina sé mikið meira en það þrýstifall sem verður ef allt rennslið rennur sem vatn. Hlutfallið hér á milli er kallað  $\phi_{LO}^2$

$$\phi_{LO}^2 = \frac{\frac{dp}{dz}}{\frac{dp}{dz}} \quad F: \text{ Tveggja fasa rennsli}$$

$$\phi_{LO}^2 = \frac{\frac{dp}{dz}}{\frac{dp}{dz}} \quad F: \text{ Vatnsrennsli}$$

Nefnarann má skrifa sem  $\frac{-f \cdot G^2}{2 \cdot D \cdot \rho_f}$

Setjum það inn í jöfnuna og skulum einangra þrýstifall sem verður vegna viðnáms vatns og gufu við holuveggina.

$$-\frac{dp}{dz}_F = \phi_{LO}^2 \cdot \frac{f \cdot G^2}{2 \cdot D \cdot \rho_f} \quad (7)$$

Martinelli og Nelson innleiddu margföldunarstuðulinn  $\phi_{LO}^2$  1948. Þeir teiknuðu hann upp sem fall af massapurrstigi gufu X og þrýstingi. Mynd 5 sýnir línurit þeirra. Síðan hafa verið gerðar margar mælingar á þrýstifalli í tveggja fasa streymi. Úr niðurstöðum þessara mælinga hefur síðan verið unnið á tölfræðilegan hátt, og ýmsar jöfnur settar fram sem sýna hvernig stuðullinn  $\phi_{LO}^2$  er háður öðrum stærðum. Á mynd 6 er samantekt á ýmsum aðferðum sem settar hafa verið fram til að reikna  $\phi_{LO}^2$ , ásamt höfundum þessara líkinga. Í jöfnu 7 er einnig viðnámsstuðullinn f, sem talað hefur verið um áður. Hann er háður Reynolds-tölunni R og hrjúfleika pípunnar. Aðrar breytistærðir í jöfnu 7 eru massahraðinn G, þvermálið D og eðlisþungi vatnsins  $\rho_f$ . Með því að velja líkingu til að reikna  $\phi_{LO}^2$  og ákvarða viðnámsstuðulinn f má reikna þrýstifallið sem verður vegna viðnáms vatns og gufu við holuveggina.

#### 2.4 Reikniaðferð með tölvu

Ofan suðuborðs er borholunni deilt upp í mörg snið. Í hverju sniði er reiknaður þrýstingur, massapurrstig gufu, varmainnhald, glufuhlutfall, eðlisþungi vatns og gufu, hraði vatns og gufu og þrýstistigull.



Ítrekað er milli þessara stærða. Þegar nægjanleg nákvæmni er fengin er þrýstingur reiknaður í næsta sniði fyrir ofan.

Flæðiritið á mynd 8 sýnir hvernig þrýstingur er reiknaður í hverju sniði. Reiknað er upp holuna og fenginn þrýstingur á holutoppi fyrir ákveðið rennsli. Reikningarnir eru síðan endurteknir fyrir annað rennsli. Á þann hátt má fá reiknaðan aflferil holunnar.

Þegar velja á líkan til að ákvarða  $\alpha$  og  $\Phi^2$  má meta hvaða líkan er best með því að bera saman reiknaða aflferla og mælda.

#### 2.5 Samanburður á niðurstöðum reikninga og mælinga

Á mynd 9 eru sýndar mælingar í holu KG-8 í Kröflu. Þar sést hvernig mældur þrýstingur á holutoppi breytist með rennsli úr holunni. Á teikningunni eru einnig tveir reiknaðir aflferlar, sem gilda þegar aðferð Beckers er notuð til að reikna margfaldarann  $\Phi_{LO}^2$ , og Moody-model ( $S = (\rho_f/\rho_g)^{1/3}$ ) er notað til að reikna hraðahlutfall vatns og gufu. Gott samræmi er milli mælinga og reikninga.

Mynd 10 sýnir mælingar sem gerðar voru í holu 9 í blæstri í febrúar '77. Holan blés 18 kg/s. Hita- og þrýstimælt var niður eftir holunni í blæstri. Suðuborð var í 300 m, og þar var hitinn 195°C.

Sýndur er reiknaður hiti og þrýstingur, þegar mismunandi aðferðir eru notaðar til að ákvarða stuðulinn  $\Phi^2$  og hraðahlutfallið S.

Við reikninga á punktum merktum 4 A er aðferð Beckers notuð til að reikna stuðulinn  $\Phi^2$  en Moody-model er notað til að ákvarða hraðahlutfallið S.

Við reikninga á punktum merktum 5.x er aðferð Beckers notuð til að reikna stuðulinn  $\Phi^2$ , en aðferð þeirra Armand, Treacher og Kowalczewski til að reikna glufuhlutfallið  $\alpha$ .

Við reikninga á punktum merktum 6. + er formúla Beckers notuð til að reikna margfaldarann  $\Phi^2$ , og gert ráð fyrir að vatn og gufa fari með sama hraða. Hraðahlutfallið eða "slip" er jafnt og 1. Mikið ósamræmi er milli reikninga og mælinga þegar gert er ráð fyrir sama hraða á gufu og vatni.

Með þessum samanburði og öðrum sem gerðir hafa verið má fullyrða að vatn og gufa fara ekki með sama hraða.

Mynd 11 sýnir aflmælingu á holu 4 í Svartsengi. Einnig er þar reiknaður aflferill samkvæmt aðferð Chisholms til að reikna margfaldarann  $\Phi^2$  og aðferð Bankoffs til að reikna glufuhlutfallið  $\alpha$ . Góð samsvörun er milli mældra stærða og reiknaðra. Þegar svæðið er tekið í vinnslu lækkar þrýstingurinn í jarðhitakerfinu. Gert hefur verið líkan af svæðinu, og reiknað fram hvernig þrýstingur í vatnsleiðara muni lækka með tíma við vinnsluna. Á mynd 11 (F 17986) er sýnt hvernig reiknaðir aflferlar breytast með lakkandi þrýstingi í vatnsleiðara og með tíma.

### 3 NIÐURSTÖÐUR

Með því líkani sem hér hefur verið kynnt má sjá hvernig aflferlar breytast þegar þrýstingur í vatnsleiðara lækkar, þegar útfellingar valda þrengingum í borholu og þegar holuvídd er breytt.

Hönnuð hefur verið víðari hola fyrir jarðhitasvæðið í Svartsengi en þær holur sem þar hafa verið boraðar til þessa. Reiknað hefur verið út hvað rennslið úr víðri holu verði mikið meira en úr þeim holum sem eru í notkun. Líkanreikningarnir benda til að afköst muni aukast mjög verulega með aukningu á þvermáli holanna. Kostnaðarauki við að bora víðari holu er þekktur og má því velja holuvídd með tilliti til kostnaðar og afkasta.

Líkan það sem hér hefur verið kynnt þarf að þróa frekar. Einungis fyrstu skrefin hafa verið stigin. Með frekari vinnu við þetta líkan af tveggja fasa rennsli í borholum og samanburði á mælingum og reikningum ætti að vera hægt að treysta undirstöður líkansins svo hægt sé að nota það við hönnun mannvirkja.

TILVITNANIR

- Becker, K.M., Hernborg, G. & Bode, M. 1962: An experimental study of pressure gradients for flow of boiling water in a vertical round duct (Part 1.2.3.4)., Stockholm, Aktiebolaget, Atomenergy.
- Butterworth, D. & Herwitz, G.F. 1977: Two-phase flow and heat transfer. Oxford University Press, 514 s.
- Chisholm, D. & Sutherland, L.A. 1970: Prediction of pressure gradients in pipeline system during two-phase flow. Proc. Instn. Mech. Engrs. 1969-70. 184, 24-32.
- Chisholm, D. 1973: Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels. Int. J. Heat. Mass Transf., 16, 347-358.
- Collier, John G. 1972: Convective boiling and condensation. McGraw-Hill, 421 s.
- Duckler, A.E., Wicks, M. & Cleveland, R.G. 1964: Frictional pressure drop for two-phase flow, A.I. Ch. E. Journal, 10, 38-51.
- Gísli Karel Halldórsson 1978: Pressure drop in blowing geothermal wells, Orkustofnun, OS-JHD-7837, (70)s.
- Levy, S. 1960: Steam slip-theoretical prediction from momentum model. Journal of Heat Transfer, 82, 113-124.
- Lockhart, R.W. & Martinelli, P.C. 1949: Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. Chem. Eng. Prog., 45, 39-48.
- Martinelli, P.C. & Nelson, D.B. 1948: Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water. Trans. A.S.M.E., 70, 695-702.

Orkiszewski, J. 1967: Predicting two-phase pressure drops in vertical pipe. J. Petrol. Tech., 19, 829-838.

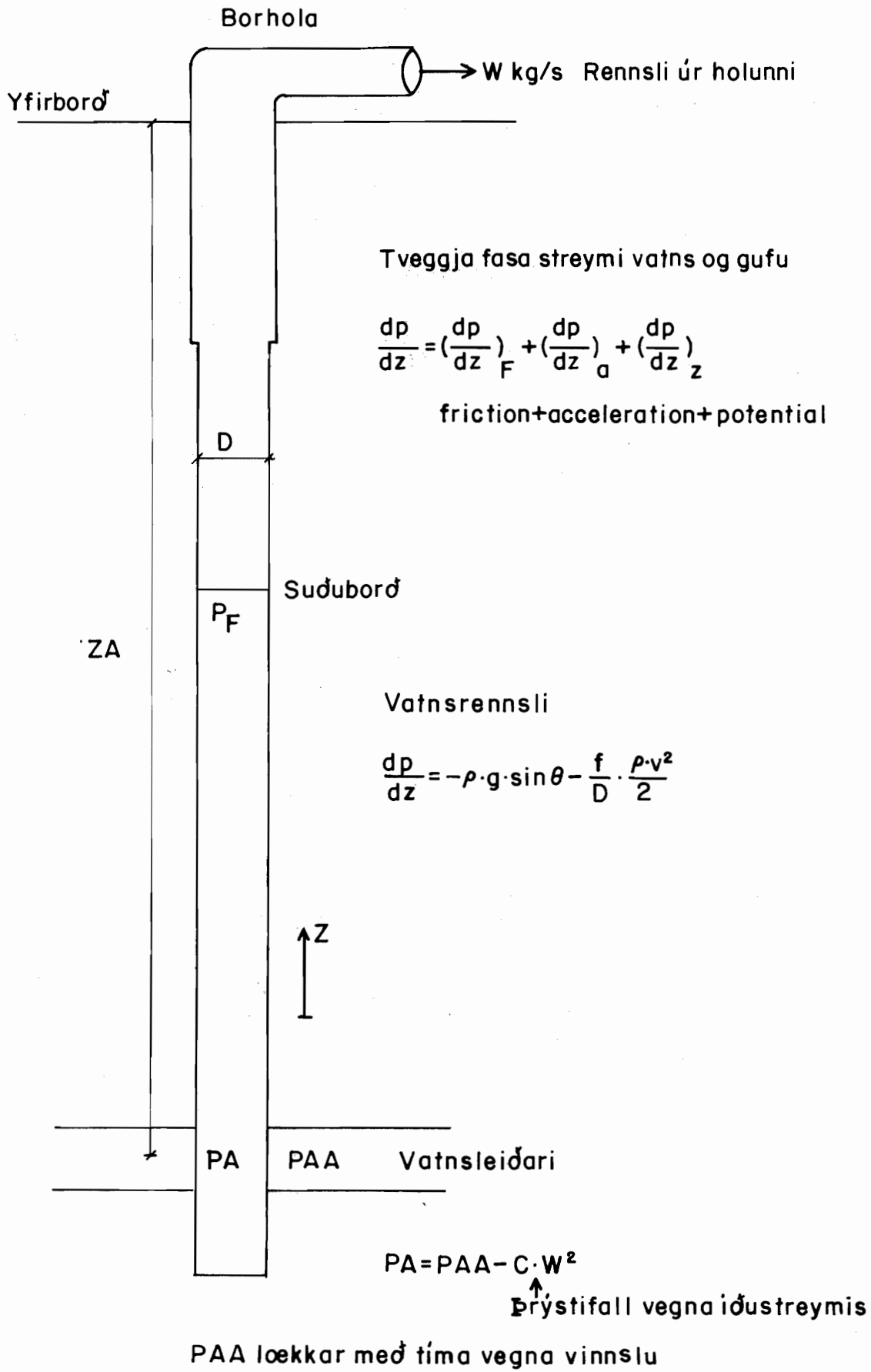
Wallis, Graham B. 1969: One-Dimensional Two-Phase Flow. McGraw-Hill.

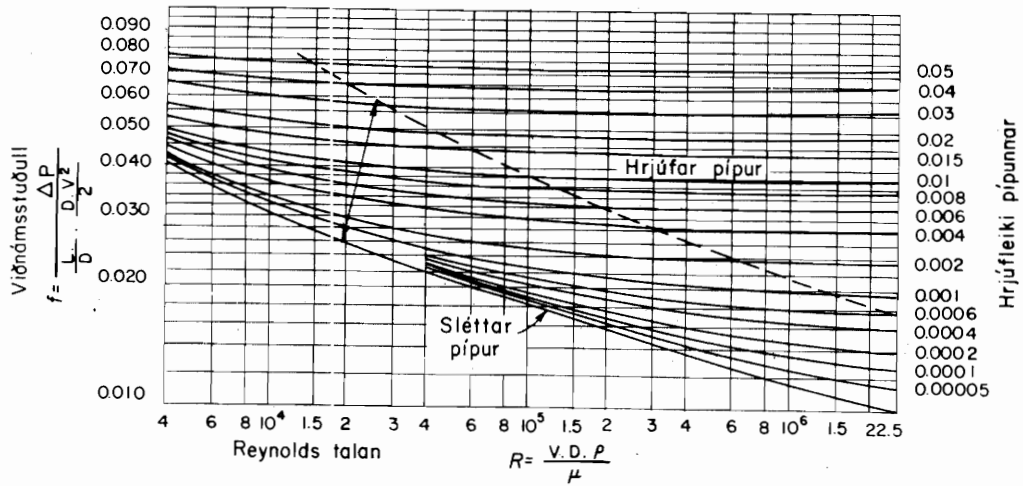


MYNDIR









F-18031

ORKSTOFNUN GKH/EK  
79.01.29  
Svartsengi  
F-18032

**Blásandi borhola**

Reikna út suðuborð

$$P_F = P_A + \left( \frac{dp}{dz} \right) \cdot DZ$$

$$\frac{dp}{dz} = \rho \cdot g \cdot \sin \Theta - \frac{f}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

$$P_F = P_A - \left( \rho \cdot g \cdot \sin \Theta + \frac{f}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \right) \cdot DZ$$

$$DZ = \frac{P_A - P_F}{\rho \cdot g \cdot \sin \Theta + \frac{f}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}}$$

$$Z_F = Z_A - DZ$$

Prýstifall í tveggja fasa  
streymi ofan suðuborðs

MYND 4

$$\frac{dp}{dz} = \left( \frac{dp}{dz} \right)_z + \left( \frac{dp}{dz} \right)_a + \left( \frac{dp}{dz} \right)_F$$

pungi + hröðun + viðnám

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_z = -g \cdot \sin\Theta ( \alpha \cdot \rho_g + (1-\alpha) \cdot \rho_f )$$

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_a = -G^2 \cdot \frac{d}{dz} \left( \frac{X^2}{\alpha \cdot \rho_g} + \frac{(1-X)^2}{(1-\alpha) \cdot \rho_f} \right)$$

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_F = \Phi^2 \cdot \left( \frac{dp}{dz} \right)_{F,LO} = -\Phi_{LO} \cdot \frac{f \cdot G^2}{2 \cdot D \cdot \rho_f}$$

$\rho_g$  : Eðlisþungi gufunnar

$\rho_f$  : ———"——— vatnsins

$\Theta$  : Halli holunnar

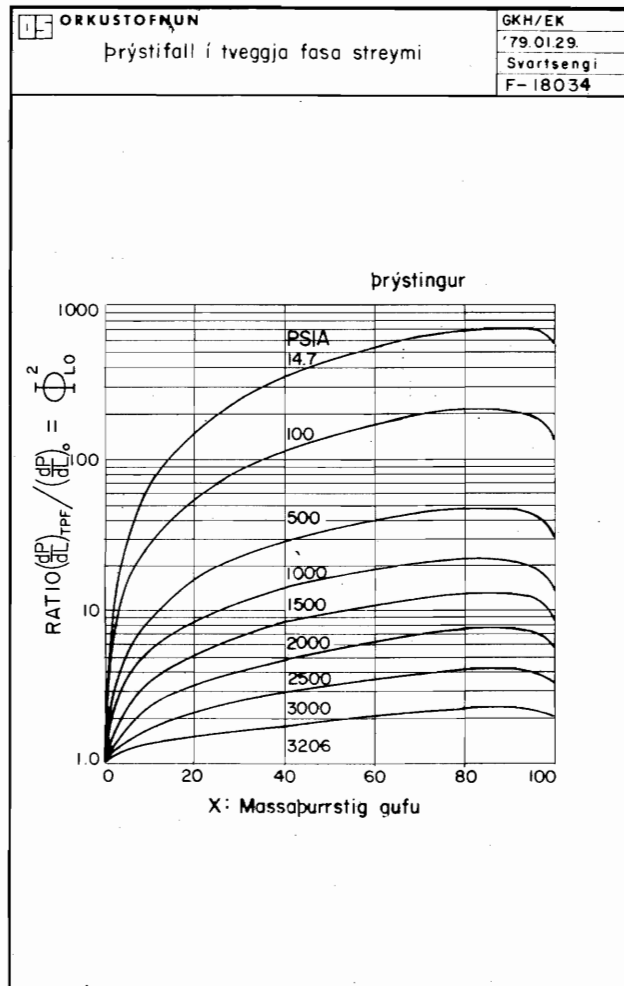
$\alpha$  : Glufuhlutfall =  $\frac{\text{flatarmál gufunnar í þversniðinu}}{\text{heildar flatarmáli rörs}}$

$G$  : Massahraði =  $\frac{W}{A} = \frac{\text{massarensli (Kg/s)}}{\text{flatarmáli (m}^2\text{)}}$

$X$  : Massahluti gufu

$\Phi_{LO}^2$  : Margföldunarstuðull, sem er ákvarðaður emperískt.

GKH/EK 79.1.29 Svartse. F-18033



MYND 5

Nokkrar formúlur til að ákveða margföldungr-  
studulinn

Formúla	Tilvitnun
$\Phi_{LO}^2 = \left[ 1 + X \left( \frac{v \cdot f_a}{v \cdot f} \right) \left( 1 + X \left( \frac{\mu \cdot f_a}{\mu \cdot f} \right) \right) \right]^{-n}$	Homogen model
$\Phi_{LO}^2, \Phi_L^2$ og $\Phi_G^2$	Martinielli og Nelson
	Lesid af linuriti
$\Phi_{LO}^2$	Lesid af linuriti
$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X} \cdot X^2 = \left( \frac{dPF}{dz} \right)_L / \left( \frac{dPF}{dz} \right)_G$	Baroczy
$-\left( \frac{dP}{dz} \right)_F = \frac{0,43}{D^{1,2}} \left( \frac{\sigma}{73} \right)^{0,04} \left( \frac{\mu \cdot f}{0,016} \right)^{0,04} \left( \frac{G}{P_H} \right)^{2,075}$	D.Chisholm
$-\left( \frac{dP}{dz} \right)_F = \frac{f \cdot G^2}{2 \cdot D} \cdot a(z) \cdot \frac{(1-\beta)^2 + \rho_g \cdot \beta^2}{(\mu \cdot (1-\beta) + \rho_g \cdot \beta)^2}$	Casagrande (c.g.s. units)
	A.E.Dukler
$\Phi_{LO}^2 = 1 + 2547 \cdot \left( \frac{X}{P} \right)^{0,96}$	K.M.Becker
$\Phi_{LO}^2 = \frac{(1-X)^{1,75}}{(1-a)^2}$	Levy
$\Phi_{LO}^2 = \left[ 1 - a \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \right]^{3/4} \cdot \left[ 1 - X \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho_g} \right) \right]^{3/4}$	Bankoff
$\Phi_L^2 = \frac{A}{(1-a)^n}$ A=1,09 n=1,2 ef a ≤ 0,5 A=0,48 og n=1,9+1,51·10 <sup>-3</sup> ·p ef a > 0,5	Armand og Treshcer

Glufuhlutfalli:  $a = \frac{Ag}{A}$   
 hradi gufunnar  
 Hradahlutfalli: S = hradi vatnsins  
 $S = (A \cdot \rho_g)^{1/3}$  Moody - model

Nokkrar líkingar til að reikna glufuhlutfallio a

Líking	Tilvitnun
$a = f(P, X)$	Martinielli og Nelson
$a = \frac{0,71 + 0,00145 \cdot P}{1 + \frac{1-X}{X} \cdot \rho_g / \rho_f}$	Bankoff
$a = \frac{0,833 + 0,05 \cdot \log P}{1 + \frac{1-X}{X} \cdot \rho_g / \rho_f}$	Armand og Treshcher
$X = \frac{a(1-2a) + a \left[ (1-2a)^2 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{\rho_f}{\rho_g} \cdot (1-a)^2 + a(1-2a) \right]^{0,5}}{2 \cdot \rho_f / \rho_g \cdot (1-a)^2 + a(1-2a)}$	Levy
$a = \beta - 0,71 \cdot \beta \cdot (1-\beta)^{0,5} \cdot (1-P/P_{crit}) \cdot \left( \frac{V}{g \cdot d} \right)^{0,045}$	Kowalczewski
$a = 1 - \left( 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right)^{1/2} / R$	D.Chisholm og L.A.Sutherland
$C = \frac{1}{1} + 0,5; R = 1,8 - \frac{2,5 \cdot 10^{-5}}{1 + (X+0,06)}$	
$a = \left( 1 + \frac{1-X}{X} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-1} \cdot \left[ 1,13 + \frac{0,435 \cdot \sqrt{g \cdot d}}{V} \left( \frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_f} \right)^{1/2} \right]^{-1}$	
$a = \frac{-1 - X \cdot Y + X \cdot Y^{1/3} + \left[ (1+X \cdot Y - X \cdot Y^{1/3})^2 + 4 \cdot (Y^{1/3} - 1) \cdot X \cdot Y \right]^{1/2}}{2 \cdot (Y^{1/3} - 1)}$	N.Zuber et al.

$Y = 0,21 \cdot (P \cdot \rho_f / \rho_g) \cdot G^{0,886}$

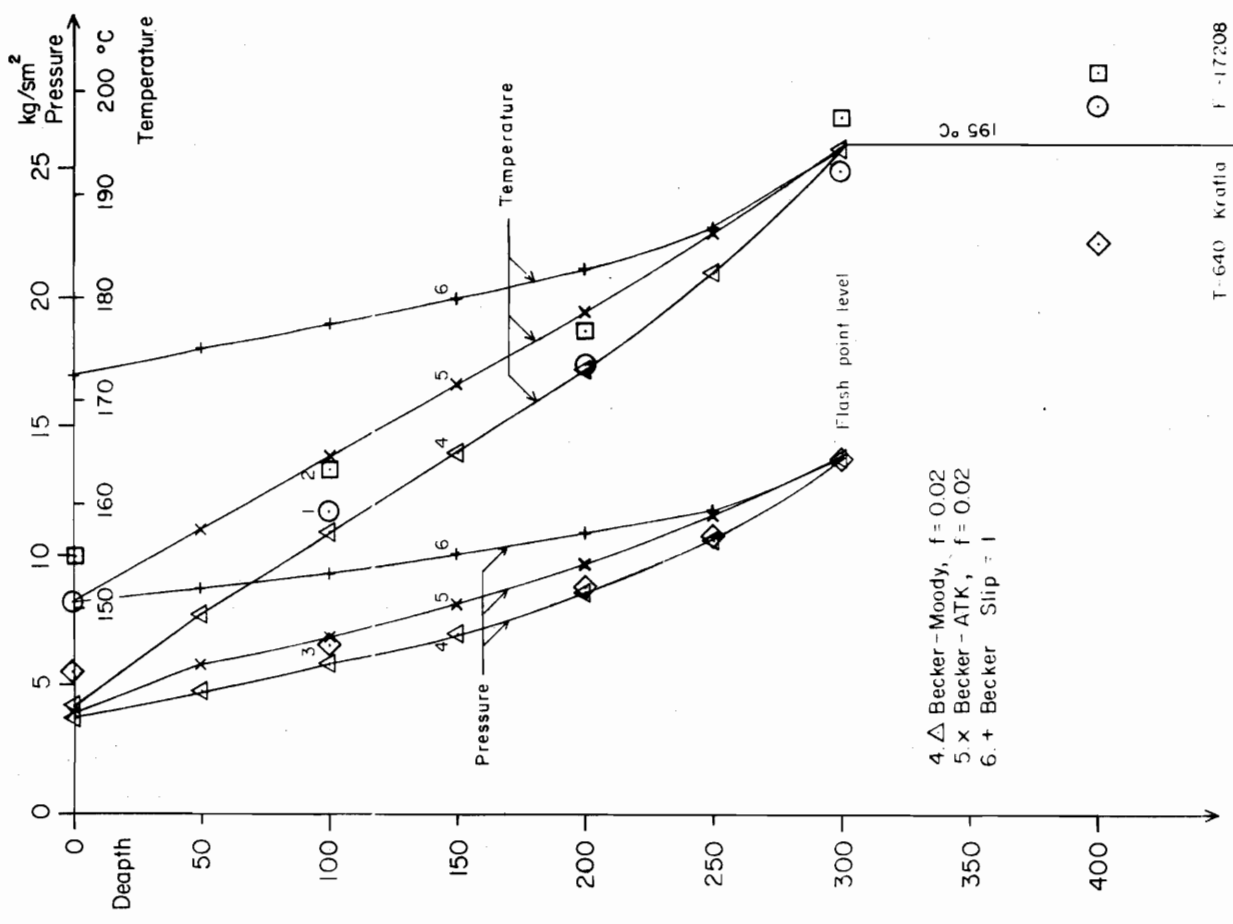
Flæðirit yfir reikniforrit, til að reikna þrýstifalli í tveggja fasa streymi

1.	$P_{\text{nýtt snið}} = P_{\text{gamalt}} + \Delta P_{\text{gamalt}}$	Fyrsta ágískaða gildið á P í nýju sniði
2.	$\rho_g, \rho_f, h_f, h_g, h_f, \leftarrow P_{\text{nýtt snið}}$	Eðlisþyngd vatns og gufu, og varmáinnihald vatns og gufu er fengið úr gufutöflum
3.	$X = \frac{E - h_f - z \cdot g - \frac{1}{2}(u_f^{\text{gamalt}})^2}{h_g - h_f + \frac{1}{2}(u_g^{\text{gamalt}})^2 - \frac{1}{2}(u_f^{\text{gamalt}})^2}$	Fyrsta nálgunargildi á massaburrstigi gufunnar X.
4.	$a = f(X, \rho_f, \dots, \rho_g, \rho_f)$	Nota reynslu formúlu til að reikna glufuhlutfallið $a$
5.	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_z = g \cdot \sin \theta (a \cdot \rho_g + (1-a) \rho_f)$	Þrýstistigull vegna þunga vatns og gufu
6.	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_0 = -\frac{G^2}{\Delta z} \left\{ \frac{X^2}{a \cdot \rho_g} + \frac{(1-X)^2}{(1-a) \cdot \rho_f} \right\} - \frac{X^2_{\text{gamalt}}}{a_{\text{gamalt}} \cdot \rho_{g_{\text{gamalt}}} - \frac{(1-X_{\text{gamalt}})^2}{(1-a_{\text{gamalt}}) \cdot \rho_{f_{\text{gamalt}}}}$	Þrýstistigull vegna skriðþungabreytinga á milli sniða.
7.	$u_g = \frac{X \cdot G}{a \cdot \rho_g}$	Hraði gufunnar
8.	$u_f = \frac{(1-X) \cdot G}{(1-a) \cdot \rho_f}$	Hraði vatnsins

9.	$\Phi_{L0}^2 = f(P, X, \dots, a)$	Notað reynsluformúla til að reikna margföldunarstuðulinn $\Phi^2$
10.	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = + \Phi_{L0}^2 \cdot \frac{f \cdot G^2}{2 \cdot D \cdot \rho}$	Þrýstistigull vegna viðnæms vatns og gufu
11.	$\Delta P = \left[ \left(\frac{dp}{dz}\right)_z + \left(\frac{dp}{dz}\right)_0 + \left(\frac{dp}{dz}\right)_F \right] \cdot \Delta z$	Reiknuð þrýstibreyting milli sniða
12.	Spurning: Er $\frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{síðasta gildi}})}{\Delta P} < \epsilon ?$ Svar: Nei $\rightarrow$ Fara til 13 Svar: Já $\rightarrow$ Fara til 17	Ef ekki er fengið "rétt", gildi á P, skal halda áfram ítrekunarreikningum.
13.	$P = P_{\text{síðasta snið}} + \Delta P$	Endurreikna þrýsting í sniðinu
14.	$\rho_f, \rho_g, h_g, h_f, \leftarrow P$	Fá eðlisþunga og varmáinnihald úr gufutöflum.
15.	$X = \frac{E - h_f - z \cdot g - \frac{1}{2}(u_f)^2}{h_g - h_f + \frac{1}{2}(u_g)^2 - \frac{1}{2}(u_f)^2}$	Endurreikna Massaburrstigi
16.	Fara til 4	Endurtaka ítrekunarreikninga
17.	$P = P_{\text{síðasta snið}} + \Delta P$	Þrýstingur í sniðinu
18.	Fara upp um $\Delta z$ í holunni, og reikna þrýsting í nýju sniði	Taka næsta snið.

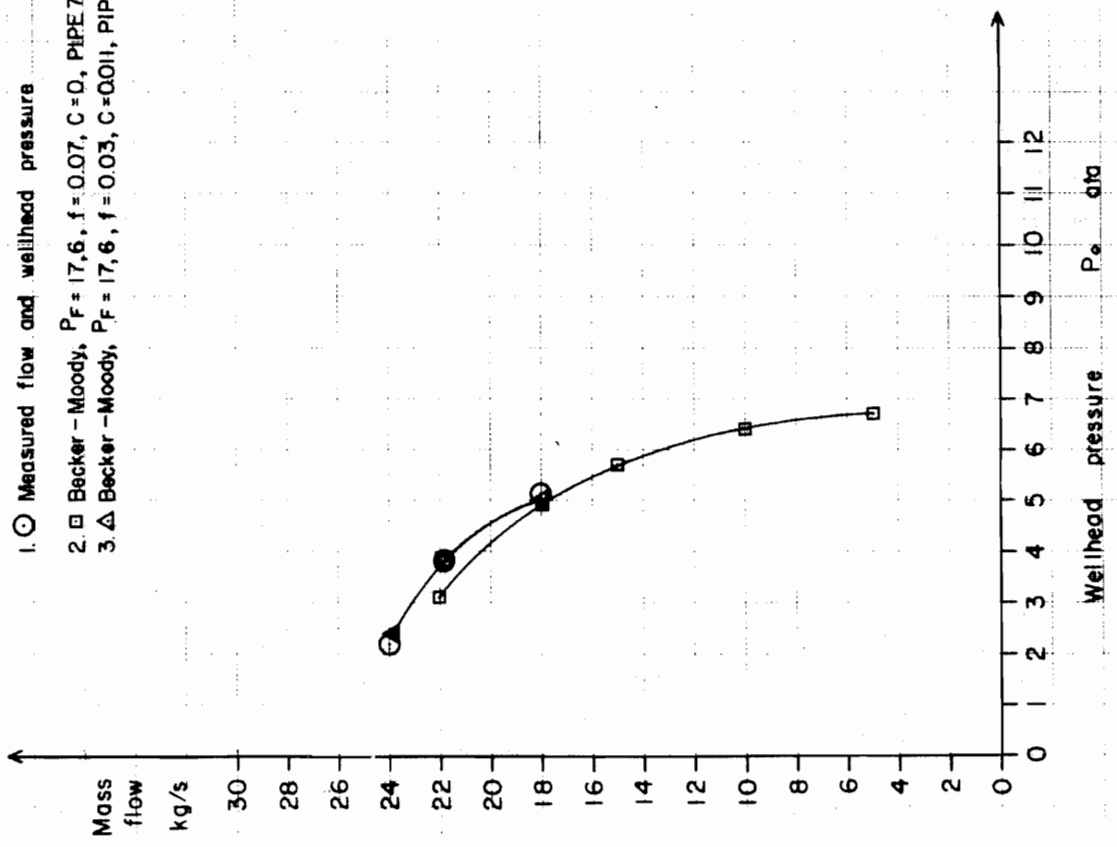
Well KJ-9.1 blowing 18 kg/s

- 1. ○ Temperature measurement 77-02-10
- 2. □ Temperature measurement 77-02-12
- 3. ◇ Pressure measurement 77.02.11



Well KG-8 Krafia

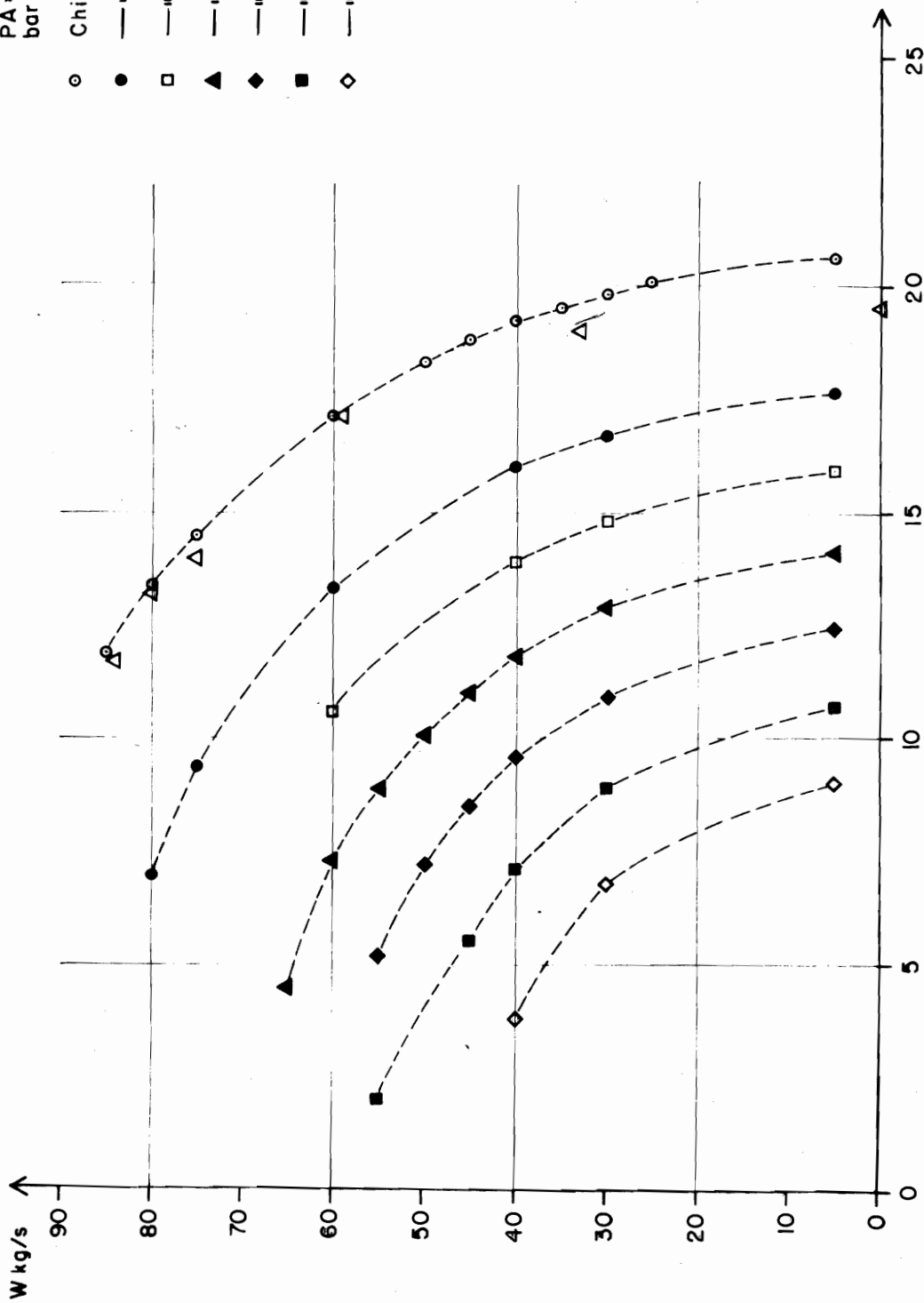
- 1. ○ Measured flow and wellhead pressure
- 2. □ Becker-Moody,  $P_F = 17,6, f = 0.07, C = 0, PIPE7$
- 3. △ Becker-Moody,  $P_F = 17,6, f = 0.03, C = 0.011, PIPE7$



△ Mælingar  $P_F = 36$  ;  $T = 244^\circ\text{C}$

PA=88, ZA=1024 m, 350-1650:17,3 sm  
bar

- ChiBan,  $f = 0,035$ , PA = 88 bar
- " " " " PA = 80 " "
- " " " " PA = 75 " "
- ▲ " " " " PA = 70 " "
- ◆ " " " " PA = 65 " "
- " " " " PA = 60 " "
- ◇ " " " " PA = 55 " "



MYND 11

Holutoppþrýstingur  $P_0$  bar absolut

ORKUSTOFNUN  
Jardhitadeild

Svartsengi, Hóla 4

GKH/SyJ

79-01-15

Svarlise

F 17986





# TVÍFASA RENNSLI Í BORHOLUM

Dorbjörn Karlsson

## EFNISYFIRLIT

	Bls.
1 INNGANGUR .....	1
2 REIKNIFORSENDUR .....	1
3 TVÍFASA RENNSLI .....	2
3.1 Varðveisla massans í tvífasa rennsli .....	2
3.2 Skriðþungajafnan .....	3
3.3 Orkujafnan .....	4
3.4 Varmatöþ úr borholum .....	5
3.5 Útreikningar tvífasa rennslis .....	5
4 NIÐURSTÖÐUR TÖLULEGRA REIKNINGA .....	6
HEIMILDARIT .....	10



# TVÍFASA RENNSLI Í BORHOLUM

eftir

Þorbjörn Karlsson

## 1. Inngangur

Í þessu erindi verður leitast við að kanna eðli tvífasa rennslis upp eftir borholu á háhitasvæði. Borholuvökvinn er þá í formi yfirhitaðs vatns úti í jarðlögnum, en vegna þrýstingslækkunar, þegar vökvinn streymir upp eftir holunni, breytist hann að hluta í gufu, og eykst gufuhlutfallið eftir því, sem ofar dregur í holuna. Rennslið verður því tvífasa, þ. e. vatn og gufa, fyrir ofan það dýpi, sem suða hefst á.

Þær niðurstöður, sem skýrt er frá í erindinu, voru unnar af stúdent í vélaverkfræði við Háskóla Íslands, Páli Valdimarsyni, í lokaverkefni vorið 1978 (heimildarit 1). Verkefnið var unnið undir umsjón tveggja kennara í vélalínu, Geirs A. Gunnlaugssonar, prófessors, og flytjanda þessa erindis. Þær aðferðir, sem beitt var við tölulega útreikninga, byggðust að miklu leyti á heimildariti 2, og vísast til þessara tveggja rita til nánari skýringa, þar sem hér verður aðeins unnt að stikla á stóru í framsetningu efnisins.

## 2. Reikniforsendur

Útreikningar á tvífasa rennsli upp úr borholum á háhitasvæðum eru byggðir á eftirfarandi forsendum:

- 2.1. Stöðugt rennsli. Reiknað er með því, að rennslið sé komið í jafnvægi, þannig að breytingar verða ekki með tíma.
- 2.2. Innstreymi í holu verður aðeins á einum stað, þ. e. á holubotni. Auðvelt er síðan að taka fyrir það tilfelli, að innstreymi sé á fleiri stöðum í holuna, en það verður ekki tekið fyrir hér.
- 2.3. Tvífasa rennsli er í varmafræðilegu jafnvægi. Í mjög hröðu streymi er ekki víst, að þetta skilyrði sé uppfyllt, en þar sem mikil óvissa ríkir í þessu efni, virðist ekki annar kostur fyrir hendi en að reikna með jafnvægi á milli fasanna.

- 2.4. Hiti jarðlaganna í kringum borholuna er fall af dýpinu, og er reiknað með því, að það sé þekkt. Einnig er gert ráð fyrir því, að samband á milli þrýstings á holudýpi og rennslis inn í holuna sé þekkt.
- 2.5. Holufóðring er misvið. Í efri hluta holunnar er vinnslufóðring, sem er víðari en leiðarinn, sem er hengdur neðan í vinnslufóðringuna og nær til botns. Vinnslufóðringin er steyppt föst en leiðarinn ekki.
- 2.6. Svæðið er vott svæði, þ. e. inn í holuna streymir vatn undir suðumarki eða við suðu. Í þessu erindi er gert ráð fyrir því, að vatnið á holudýpi sé við suðu, og inn í holuna streymir því vatn, sem þegar er farið að sjóða.

### 3. Tvífasa rennsli

Rennsli upp eftir holunni verður tvífasa, þar sem gert er ráð fyrir því, að hiti jarðlaganna á holudýpi sé við suðumark. Verður þá að framkvæma alla útreikninga í smáskrefum og með ítrun. Skilyrði á holubotni eru þekkt, og eru síðan notuð ákveðin hitabil,  $\Delta T$ , og reiknað út, hve langt þarf að fíkra sig upp eftir holunni,  $\Delta z$ , ásamt því, að aðrar breytingar rennslisskilyrða eru reiknaðar út, þegar hitinn lækkar úr  $T$  í  $T - \Delta T$ .

Þær jöfnur, sem notaðar eru við útreikninga á tvífasa rennsli eru eftirfarandi:

- a) Varðveisla massans í tvífasa rennsli.
- b) Skriðþungaafnan.
- c) Orkuafnan.

Þessum jöfnum verður nú gerð nokkur skil í því, sem hér fer á eftir.

#### 3.1. Varðveisla massans í tvífasa rennsli

Gert er ráð fyrir því, að massastreymið upp eftir holunni haldist óbreytt, þ. e. að hvorki opnast nýjar æðar á leiðinni upp né að streymið leiti út úr holunni á leiðinni.

Þá fæst

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_f :: x\dot{m} + (1-x)\dot{m} = \rho_g A_g V_g + \rho_f A_f V_f \quad (1)$$

þar sem  $g$  á við gufufasann og  $f$  við vatnsfasann,  $\rho$  er eðlis-  
massinn og  $x$  er svokallað massapurristig gufunnar, þ. e.  
hlutfallið á milli gufumassa og heildarmassa beggja fasa  
gufu/vatnsblöndunnar, sem streymir í gegnum ákveðið þver-  
snið á gefnum tíma.

Skilgreindur er svokallaður massahraði

$$\begin{aligned} G = \dot{m}/A &= \alpha \rho_g V_g + (1-\alpha) \rho_f V_f = \rho_g V_g \alpha/x \\ &= \rho_f V_f (1-\alpha)/(1-x), \end{aligned} \quad (2)$$

þar sem  $\alpha$  er glufuhlutfallið skilgreint sem hlutfallið á  
milli rúmmáls gufu og heildarrúmmáls tvífasa blöndu, sem  
streymir í gegnum ákveðið þversnið á gefnum tíma. Í báðum  
framangreindum jöfnum er  $V$  hraði viðkomandi fasa.

### 3.2. Skriðþungajafnan

Skriðþungajöfnuna má skrifa á forminu

$$-\frac{dp}{dz} = \rho_m g + \frac{1}{A} x \frac{d}{dz} (\dot{m}_g V_g + \dot{m}_f V_f) - \left(\frac{dp}{dz}\right)_F, \quad (3)$$

þar sem fyrsti liðurinn á hægri hlið táknar hydróstatískt  
þrýstifall með meðaleðlismassann

$$\rho_m = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_f. \quad (4)$$

Annar liðurinn á hægri hlið er breyting á skriðþunga, sem  
umrita má á forminu

$$\frac{1}{A} x \frac{d}{dz} (\dot{m}_g V_g + \dot{m}_f V_f) = \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{x^2 v_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2}{1-\alpha} v_f \right), \quad (5)$$

þar sem massastreymið  $\dot{m}$  og þversniðsflatarmálið  $A$  eru fastar  
og  $v_g$  og  $v_f$  eru eðlisrúmmál gufufasans og vatnsfasans.

Nauðsynlegt er að þekkja sambandið á milli  $\alpha$  og  $x$  og er það  
fundið með jöfnunni

$$\alpha = x \rho_f / \{ (1-x) \rho_g S + x \rho_f \}, \quad (6)$$

sem auðvelt er að leiða út (t. d. frá jöfnu 2 að ofan).

Stærðin  $S$  táknar "slipp"stuðulinn, sem er hlutfallið á milli  
hraða gufufasa og vatnsfasa og er hann áætlaður með jöfnu,  
sem kennd er við Moody (heimildarit 3):

$$S = V_g/V_f = (\rho_f/\rho_g)^{1/3}. \quad (7)$$

Þriðji liður hægri hliðar jöfnu (3) er þrýstifall vegna viðnáms við vegg holunnar. Ýmsar aðferðir hafa þróast til að meta þetta þrýstifall, en hér var notuð aðferð kennd við Martinelli og Nelson (heimildarit 4), þar sem viðnámsþrýstifallið er fundið með jöfnunni

$$(dp/dz)_F = \Phi_{f_0}^2 (dp/dz)_{f_0}, \quad (8)$$

þar sem  $\Phi_{f_0}$  er svokallaður viðnámsmargfeldari og  $(dp/dz)_{f_0}$  er viðnámsþrýstistigull, sem mundi skapast, ef allur massinn  $\dot{m}$  rynni sem fljótandi vökvi í pípunni. Martinelli og Nelson birtu línurit, sem sýnir sambandið á milli  $\Phi_{f_0}$  og massaþurrstigsins  $x$ , en í þeim útreikningum, sem hér er fjallað um, var þetta samband nálgað með eftirfarandi jöfnu:

$$\Phi_{f_0}^2 = \exp\{F(p) \cdot G(x)\}, \quad (9)$$

$$F(p) = \begin{cases} 1,257 - 1,054(p/p_c)^{0,261} & \text{ef } p/p_c < 0,5 \\ 0,621(1 - p/p_c)^{0,715} & \text{ef } p/p_c \geq 0,5 \end{cases} \quad (10)$$

$$G(x) = \begin{cases} 3x^{0,2} & \text{ef } x < 0,8 \\ 2,869\{1 - 1,154(x - 0,8)^2\} & \text{ef } x \geq 0,8 \end{cases} \quad (11)$$

Stærðin  $p_c$  er hætinn þrýstingur fyrir vatnsgufu = 220,9 bar.

### 3.3. Orkujafnan

Orkujafnan byggist á því, að sú orka, sem streymir inn í borholubút að lengd  $\Delta z$ , er í jafnvægi við þá orku, sem streymir út. Fæst þá

$$\Delta\{xh_g + (1-x)h_f + (xV_g^2 + (1-x)V_f^2)/2\} + \Delta z\{g + (q_1 - q_f)/\dot{m}\} = 0 \quad (12),$$

þar sem  $\Delta()$  táknar breytingu á stærðinni  $()$  yfir lengd holubútsins  $\Delta z$ ,  $g$  er þyngdarhröðunin,  $h$  er enþalpía á massaeiningu,  $q_1$  er varmatap út frá holu til umlykjandi jarðlaga á lengdareiningu holunnar og  $q_f$  er varmajafngildi viðnámsþrýstis taps á lengdareiningu borholunnar. Þessi síðastnefnda stærð er gefin með jöfnunni

$$q_f = - (dp/dz)_F / \rho_m. \quad (13)$$

Jöfnu (12) má umrita á forminu

$$\Delta h = -\Delta\{xV_g^2 + (1-x)V_f^2\}/2 - \{g + (q_1 + (dp/dz)_F/\rho_m)/\dot{m}\} \Delta z \quad (14)$$

Eina stærðin í þessari jöfnu, sem enn hefur ekki verið gerð skil, er varmatapið út um holuveggina á lengdareiningu,  $q_1$ . Um þetta verður fjallað í næstu grein hér á eftir.

### 3.4. Varmatöp úr borholu

Gert er ráð fyrir því, að viðnám gegn varmaflutningi frá borholublöndunni út í leiðara og fóðurpípu sé óverulegt. Því er það varmaleiðni jarðlaganna, sem ræður varmaflutningi frá holunni. Þar sem ástandið er samhverft um ás holunnar, er hitinn í jarðlögum á hverjum tíma óháður stefnuhorni, og fæst þá hlutfleiðujafnan fyrir hitadreifinguna umhverfis holuna, skrifuð í pólarnitum

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (15)$$

þar sem  $r$  = radíal fjarlægð frá ás borholu.

$z$  = fjarlægð í ásstefnu borholu.

$\alpha$  = varmaútbreiðslustuðull.

$t$  = tími.

Jafna (15) er leyst með aðferð endanlegra mismuna og verður þá varmaflutningur úr borholunni á endanlegu mismunaformi

$$q_{1i} = k\pi(d + \Delta r)(T_{1,i}^P - T_{2,i}^P)/\Delta r, \quad (16)$$

þar sem  $q_{1i}$  = varmaflutningur á lengdareiningu borholu á bilinu frá  $z = i\Delta z$  til  $(i+1)\Delta z$ .

$\Delta z$  = skreflengd í ásstefnu holunnar.

$\Delta r$  = skreflengd í radíalstefnu út frá holuás.

$k$  = varmaleiðnistuðull jarðlaga.

$d$  = þvermál borholunnar.

$T_{1,i}^P$  = hiti í borholunni á því dýpi, sem svarar til  $i$ .

$T_{2,i}^P$  = hiti jarðlaga á sama dýpi í fjarlægð  $\Delta r$  frá holuvegg reiknaður eftir  $p$  tímaskref  $\Delta t$ .

### 3.5. Útreikningar tvífasa rennslis

Útreikningar á tvífasa rennsli eru framkvæmdir þannig, að

farið er upp eftir holunni í skrefum, þar sem hitinn lækkar um ákveðið hitabil,  $\Delta T$  og aðrar breytistærðir eru síðan reiknaðar út frá því. Út frá hitanum má strax finna þrýstifallið, þar sem ákveðið samband er á milli suðuprýstings og suðuhita. Heildarþrýstifallið er þá

$$\Delta p = p(T + \Delta T) - p(T). \quad (17)$$

Nú verður að nálgast lausnina með ítrun, þar sem allar stærðir eru þekktar við hitann  $T + \Delta T$  í hæðinni  $z$  frá holubotni. Þurrstig gufunnar  $x(T)$  er fyrst áætlað þannig, að reiknað er með ísenþalpiskri breytingu:

$$x(T) = \{h(T + \Delta T) - h_f(T)\} / \{h_g(T) - h_f(T)\} \quad (18)$$

Eftir þetta er auðvelt að finna glufuhlutfallið  $\alpha(T)$ , viðnámsmargfaldarann  $\phi_{f0}^2$  og fasahraðana  $V_g$  og  $V_f$ , og síðan er lengd holubútsins  $\Delta z$  auðreiknuð. Varmatöp um holuveggi eru ekki reiknuð í fyrstu umferð, þar sem til þess þarf hitadreifing í allri holunni að vera þekkt. Stærðin  $q_1$  í jöfnu (14) er því sett = 0, og má þá reikna  $\Delta h$ . Enþalpián í hinum nýja punkti er þá fundin og má þá reikna nýtt gildi á  $x(T)$ :

$$x(T) = \{h(T + \Delta T) + \Delta h - h_f\} / \{h_g - h_f\}. \quad (19)$$

Þetta nýja gildi á  $x(T)$  er nú borið saman við það gildi, sem áður var fundið, og reikningarnir síðan endurteknir, þar til nægilegri nákvæmni er náð.

Þegar hitadreifingin í allri holunni er fundin, má nota hana til að reikna varmaleiðslu frá holunni út í berglögin í kring eins og áður var lýst. Með því varmatapi frá holunni, sem þannig er reiknað, er á ný fundin hitadreifingin í holunni, og þessir reikningar síðan endurteknir þar til jafnvægi er náð.

#### 4. Niðurstöður tölulegra reikninga

Við tölulega útreikninga var tekið mið af borholum við Kröflu og eftirfarandi víddir fóðringa og holudýptir notaðar:

Hluti borholu	Nafnmál	Innanmál	Dýpi neðri enda
	"	$d_i$ , mm	m
Vinnslufóðring	9-5/8	223	1000
Leiðari	7-1/2	175	2000



Til útreikninga á varmatapi frá borholunni voru notaðir þrjú mismunandi hitastiglar í jarðlögum. Þessir hitastiglar voru sem hér segir:

Hitastigull nr.	Lýsing
1	Suðumarksferill alla leið frá yfirborði til botns. Hiti á holudýpi, 2000m er $T_0 = 340,4^\circ\text{C}$ .
2	Línulega vaxandi hiti frá $5^\circ\text{C}$ á yfirborði upp í suðumark, $352,6^\circ\text{C}$ , á holudýpi, 2000m.
3	Línulega vaxandi hiti frá $20^\circ\text{C}$ á yfirborði upp í $55^\circ\text{C}$ á 700 m dýpi. Þaðan er suðumarksferill niður til botns. Hiti við holudýpi $345,6^\circ\text{C}$ .

Reiknað var með því, að innstreymi í holuna á botni fylgdi jöfnu á forminu

$$p_1 = p_0 - B(t)\dot{m} - C\dot{m}^2 \quad (20)$$

þar sem  $p_1$  = þrýstingur á holubotni.

$p_0$  = þrýstingur á holudýpi í ótrufluðu svæðinu.

$\dot{m}$  = massastreymi inn í holu.

$B(t)$  = stuðull, sem fer vaxandi með tíma  $t$ . Þessi stuðull lýsir því þrýstifalli, sem verður í vökvarennslinu um vatnsæðar bergsins. Þar sem grunnvatnsborð umhverfis holuna lækkar með tímanum, er þetta þrýstifall stöðugt vaxandi.

$C$  = rennslisstuðull, sem lýsir því þrýstifalli, sem verður við innstreymi vökvans inn í holuna.

Tölugildi þessara stuðla, sem notuð voru í útreikningunum, miðuðust við það, að um það bil 10.000 klst væru liðnar frá opnun holu, og voru gildin þessi:

$$B(t) = 10.000 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{s})$$

$$C = 1000 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{s})^2$$

Við útreikningana þarf að miða við ákveðið massastreymi inn í og upp eftir borholunni. Voru hér notuð tvö mismunandi gildi:

$$(a) \dot{m} = 20 \text{ kg}/\text{s} \quad (b) \dot{m} = 50 \text{ kg}/\text{s}$$

Við mat á þrýstifalli vegna viðnáms vökva við holuveggi var notaður viðnámsstuðullinn

$$f = 0,015,$$

sem svarar til fullþróaðs túrbúlent rennslis í venjulegum stálpípum.

Varmatapsreikningar frá borholu út í jarðlög miðuðust við eftirfarandi eiginleika bergsins:

$$\begin{aligned} \text{Varmaleiðni:} & \quad k = 1,716 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \\ \text{Varmadreifistuðull:} & \quad \alpha = 8,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

Útreikningar með aðferðum endanlegra mismuna voru framkvæmdir með eftirfarandi skrefastærðum:

$$\begin{aligned} \text{a) Rennsli upp eftir holu:} & \quad \Delta T = 2^\circ\text{C} \\ \text{b) Varmaleiðsla út í berg:} & \quad \Delta z = 100 \text{ m} \\ & \quad \Delta r = 5,0 \text{ m} \\ & \quad \Delta t = 50 \text{ klst.} \end{aligned}$$

Niðurstöður útreikninganna eru sýndar á línuritum í heimildarriti 1, en vegna takmarkaðs rúms hér, verða aðeins tilfærðar niðurstöður á holubotni og á holutoppi. Þessar niðurstöður eru dregnar saman í töflu I á næstu síðu.

Það sem athygli vekur, þegar niðurstöðurnar í töflu I eru skoðaðar, er það, hve lítil áhrif varmataps frá holunni út í bergið raunverulega eru. Eins og við er að búast minnka þessi áhrif með vaxandi massastreymi upp úr holunni, en jafnvel með aðeins 20 kg/s heildarmassastreymi eru þessi áhrif sennilega innan þeirrar nákvæmni, sem hægt er að búast við með útreikningum á tvífasa rennsli í dag.

Önnur áhrif varmataps frá borholunni eru upphitun jarðlaganna í kringum holuna. Þessi hitaaukning veldur hitaþenslu í berginu, sem aftur getur valdið tognun fóðurpípunnar, þar sem hún er steipt föst. Ætlunin með þessu verkefni var að kanna þessi áhrif á fóðurpípuna, en á þeim fimm vikum, sem stúdentum eru ætlaðar í sín lokaverkefni, vannst ekki tími til að kanna hitaþenslu bergsins eða áraun af hennar völdum á fóðurpípuna. Væntanlega munu þessar athuganir verða gerðar síðar.

Með reikniforriti því, sem hér hefur verið lýst, hafa ekki verið gerðar neinar tilraunir til að bera saman reiknaðar niðurstöður og mælingar í borholum. En með slíku reiknilíkani sem þessu á að vera unnt að meta með útreikningum áhrif mismunandi vídda fóðurpípa á rennsli upp úr borholum og fá

Tafla I. Niðurstöður útreikninga á tvífasa rennsli upp úr borholu á háhitasvæð með varmatapi út í umlykjandi jarðlög og án varmataps.

	Hita- stigull nr.	Massa- streymi m, kg/s	Hiti T °C	Þrýstingur P bar	Enþalþía h kJ/kg	Gufuhlutfall x %
Á holubotni	1a	20	337,1	140,6	1597,1	2,2
	1b	50	322,6	116,6	1597,1	9,9
	2a	20	349,7	164,5	1692,4	2,7
	2b	50	337,0	140,5	1692,4	11,2
	3a	20	342,5	150,4	1635,8	2,4
	3b	50	328,8	126,4	1635,8	10,3
Við holutópp án varmataps	1a	20	286,1	70,2	1597,1	21,9
	1b	50	276,0	60,3	1597,1	24,3
	2a	20	304,5	91,4	1692,4	23,6
	2b	50	295,0	79,9	1692,4	26,1
	3a	20	294,0	78,8	1635,8	22,4
	3b	50	284,1	68,2	1635,8	24,9
Við holutópp með varmatapi	1a	20	286,0	70,1	1583,1	21,0
	1b	50	276,0	60,3	1597,1	24,3
	2a	20	300,7	86,7	1602,4	18,2
	2b	50	294,8	79,7	1677,4	25,1
	3a	20	292,5	77,1	1595,8	20,1
	3b	50	284,0	68,1	1631,8	24,7

þannig aðferð til að hanna hagkvæmustu holuvídd. Þær fóður-  
pípustærðir, sem hér var reiknað með, eru þær sömu og notaðar  
hafa verið frá upphafi borana á háhitasvæðum hér á landi, og  
þær virðast einnig vera þær sömu og víðast annars staðar eru  
notaðar. Ekki er vitað til þess, að slíkar hagkvæmiathug-  
anir á holuvíddum hafi verið gerðar, og er hér um að ræða  
athyglisvert verkefni, sem gefa ætti nánari gaum.

#### Heimildarit

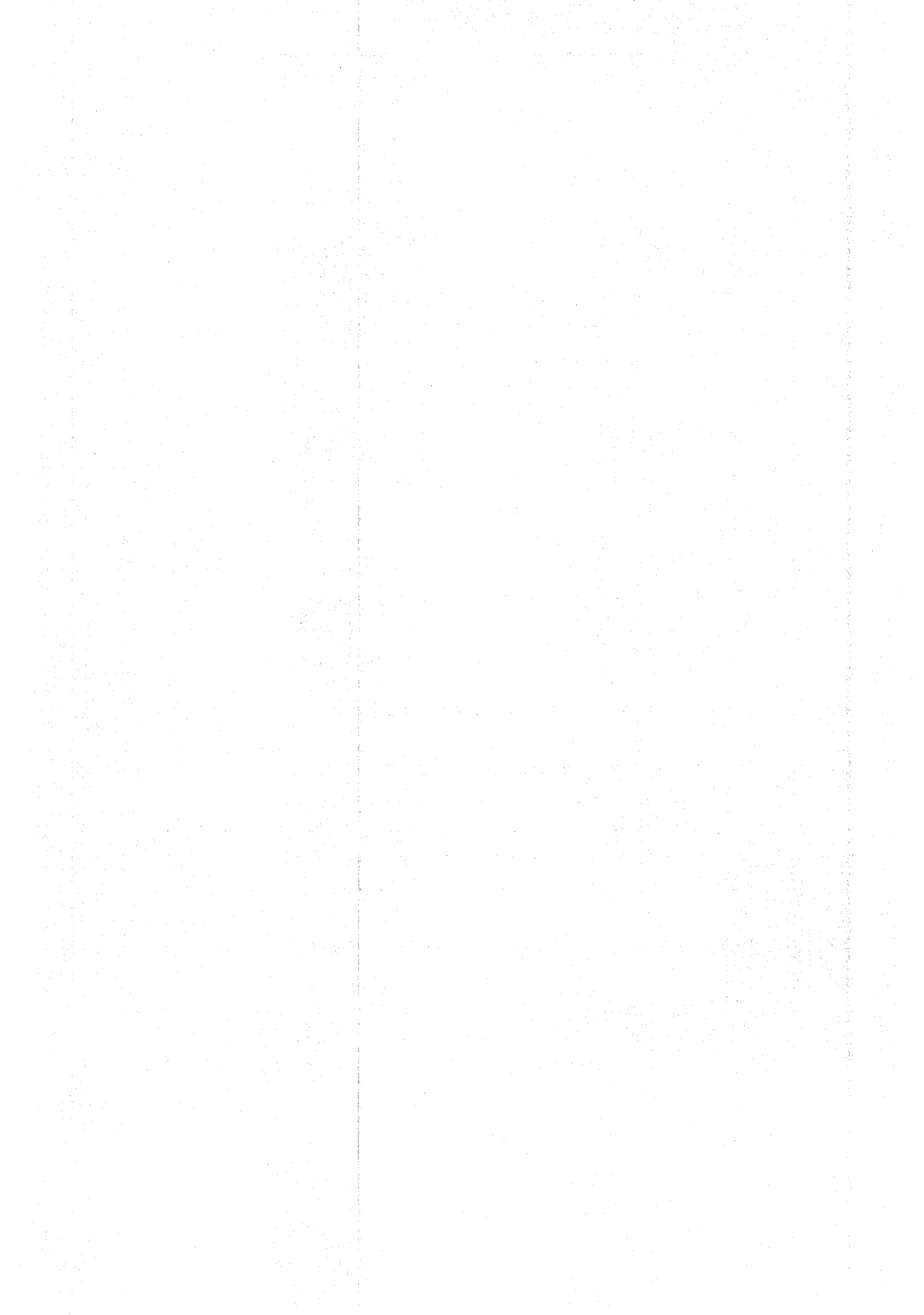
1. Páll Valdimarsson: Varmaflutningur og hitastigsdreifing  
í háhitaborholum. Lokaverkefni í vélaverkfræði vorið  
1978. Háskóli Íslands, júní 1978.
2. Þorbjörn Karlsson: Tvífasa rennsli í borholum á háhita-  
svæðum. Verkfræðistofnun háskólans, desember 1978.
3. Kütükcüoglu, Ahmet: Strömungsform, Dampfvolumenanteil  
und Druckabfall bei Zweiphasenströmung von Wasser-Wasser-  
dampf in Rohren. Fortschritt Berichte VDI-Z. Reihe 7,  
Nr. 18. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, maí 1969. 158 bls.
4. Martinelli, R. C., og D. B. Nelson: Prediction of  
pressure drop during forced circulation boiling of water.  
Trans. ASME 70, ágúst 1948. Bls. 695 - 702.

## JARÐHITAKERFIÐ VIÐ KRÓFLU

Valgarður Stefánsson

### EFNISYFIRLIT

1	INNGANGUR .....	1
2	TVÖ JARÐHITAKERFI .....	1
3	AÐFERÐIR VIÐ GERÐ LÍKANS AF JARÐHITAKERFINU .....	2
4	EINSTAKIR EIGINLEIKAR JARÐHITAKERFISINS .....	3
	4.1 Hiti og þrýstingur .....	3
	4.2 Aflferlar .....	4
	4.3 Þrýstingsbreytingar við kvikuhlaup .....	4
	4.4 Efnainnihald borholuvökva .....	4
5	SUÐA Í BERGI .....	6
6	UMRÆÐA .....	7
	MYNDIR .....	9



## 1 INNGANGUR

---

Sú mynd sem nú liggur fyrir af Kröflusvæðinu er margslungin, og hafa menn fundið þar hluti sem áður voru óþekktir á jarðhitasvæðum íslenskum. Einn af eiginleikum Kröflusvæðisins er að þar er hluti af jarðhitakerfinu í suðu, þ.e.a.s. í berginu er blanda af vatni og gufu. Þessar aðstæður voru áður óþekktar héraendis og er það ástæðan fyrir því að jarðhitakerfið við Kröflu er tekið hér til umræðu á þessum fundi um tvífasa rennsli við nýtingu jarðhita.

Ég mun hér stuttlega lýsa jarðhitakerfinu við Kröflu og leggja megináherslu á þann hluta kerfisins sem er í suðu. Sú mynd sem hér verður lögð fram er árangur samstarfs margra aðila og má þar telja m.a.: Benedikt Steingrímsson, Gest Gíslason, Gísli Karel Halldórsson, Halldór Ármannsson, Hrefnu Kristmannsdóttur, Jón Steinar Guðmundsson, Ómar Sigurðsson, Stefán Arnórsson, Sveinbjörn Björnsson og Trausta Hauksson.

## 2 TVÖ JARÐHITAKERFI

---

Í grófum dráttum er jarðhitakerfið í Kröflu á þann veg að þar eru tvö tiltölulega afmörkuð kerfi, annað grunnt en hitt dýpra. Þessi tvö kerfi tengjast í afmarkaðri uppstreymisrás nálægt Hveragili. Á mynd 1 er sýnd afstaða borhola á svæðinu, en mynd 2 sýnir þverskurð gegnum borsvæðið frá Holu KG-8 til KW-1. Eins og fram kemur á þeirri mynd er neðra kerfið mjög heitt og sjóðandi, en efra kerfið um 210°C heitt vatnskerfi, sem að vissum hluta a.m.k. er afrennsli neðra kerfisins. Ég mun hér að mestu leyti ræða um neðra kerfið þar sem tveggja fasa streymi er þar í berginu. Hins vegar er efra kerfið tiltölulega betur þekkt en neðra kerfið, en þar sem eiginleikar efra kerfisins eru mjög áþekkir öðrum vatnskerfum (water dominated) er það ekki eins áhugavert á þessum umræðugrundvelli.

### 3 AÐFERÐIR VIÐ GERÐ LÍKANS AF JARÐHITAKERFINU

---

Til þess að fá sem heillegasta mynd af jarðhitakerfinu hefur verið reynt að taka mið af sem flestum rannsóknaraðferðum og athugunum. Eftirfarandi atriði hafa verið höfð til hliðsjónar við gerð líkans af jarðhitakerfinu:

- Geometría
- Mældur hiti í upphitun
- Mældur hiti í blæstri
- Mældur þrýstingur í upphitun
- Mældur þrýstingur í blæstri
- Mælt varmáinnihald borholuvökva
- Mælt massastreymi úr borholum
- Lekt í köldum borholum
- Niðurdráttur í blásandi borholum
- Heildarniðurdráttur á svæðinu.
- Þrýstingsbreytingar í jarðhitakerfinu við kvikuhlaup
- Efnainnihald í borholuvökva svo sem:
  - CO<sub>2</sub>
  - H<sub>2</sub>S
  - H<sub>2</sub>
  - Hg
  - <sup>222</sup>Rn
- SiO<sub>2</sub> - kísilhiti
- Na-K-Ca - alkalíhiti
- Útfellingar í borholum
- Isótópar - deuterium
- Steindir í bergi
- Jarðfræðileg uppbygging svæðisins

Öll ofantalin atriði styðja fyrirliggjandi líkan af svæðinu.

Nokkur ofantaldra atriða verða tekin til nánari umfjöllunar í næsta kafla.



#### 4 EINSTAKIR EIGINLEIKAR JARÐHITAKERFISINS

---

##### 4.1 Hiti og þrýstingur

Ákvörðun á hitastigi og þrýstingi í jarðhitakerfi er ekki alltaf auðveld eins og eftirfarandi dæmi sýna.

Á mynd 3 eru sýndar nokkrar hitamælingar úr holu KW-1. Strax fyrir blástur er hitastig nokkuð jafnt á bilinu 200-800 m, en hækkar svo ört niður holuna. Þessi mæling sýnir hitastig, sem er nokkru lægra en ótruflaður berghiti. Mæling gerð strax eftir að holan hafði blásið í tvo sólarhringa sýnir mun lægra hitastig í botni en mældist í upphitun. Stafar þetta af því að holan sýður sig í botn; innstreymishitastig vökvans í blæstri hefur verið um 160°C og þrýstingur í blæstri í botni holunnar rúm 6 bar. Þegar holan fær síðan að jafna sig eykst hitastig örast við æðina á 1100 m dýpi og nær suðumarkshita innan mánaðar. Þar sem þessi æð á 1100 m dýpi er í suðu myndast einvið "konvektion" í holunni, og mælt hitastig í henni er mjög nálægt suðumarksferli. Niðurstöður hitamælinga í holunni eru því þær, að á 1100 m dýpi er 300°C heit æð sem er í suðu. Um hitastig jarðhitakerfisins annars staðar í holunni er lítið hægt að fullyrða.

Mælt hitastig í borholu er yfirleitt lágmarkshitastig jarðhitakerfisins, en hámarkshitastig er suðuhitastig miðað við ráðandi þrýsting í borholu. Ef þetta fer saman eins og í neðsta hluta mælinga, sem gerðar voru í upphitun hola KJ-6 og KJ-7 (sjá mynd 4), má álíta að mælt hitastig í borholu sé marktækt fyrir hitastig í jarðhitakerfi.

Millirennslí í borholum veldur því að mælingar í borholum gefa villandi mynd af hitastigi og þrýstingi í jarðhitakerfi. Hola KJ-11 (mynd 5) er gott dæmi um þetta. Þegar holan er lokuð streymir vatn frá 1100 m dýpi niður í botn hennar. Mælt hitastig neðan 1100 m dýpis er því mjög nálægt hitastigi í innstreymisæðar á 1100 m dýpi. Við þannig skilyrði sýnir mældur þrýstingur hærri þrýsting neðarlega í holunni en þann sem er í jarðhitakerfinu. Með því að fullopna holuna var hægt að fá botnæðar hennar til að taka þátt í blæstri, og við slík skilyrði var hægt að mæla að hitastig botnæða er herra en 300°C.

Með kerfisbundinni athugun á öllum hita- og þrýstimælingum úr borholum í Kröflu kemur í ljós, að bæði hiti og þrýstingur fylgja mettnarferlum neðan við 1000 m dýpi. Samandregnar niðurstöður úr öllum holum eru sýndar á mynd 6. Þar sést að óvissumörkin í hitastigi eru mun meiri en í ákvörðun á þrýstingi.

#### 4.2 Aflferlar

Svo sem fram kom í erind. Gísla Karels Halldórssonar hér á undan eru aflferlar gufuhola, sem hafa innstreymi í hreinum vatnsfasa, bognir ferlar þar sem holutoppsþrýstingur hefur mikil áhrif á massastreymi úr holum.

Í borholum sem hafa tveggja fasa innstreymi hefur holutoppsþrýstingur lítil áhrif á massastreymi úr holunum. Þetta sést glögggt á mynd 7. Hola KW-2 er dæmigerð vatnshola, en hola KJ-6 er að mestu leyti neðra kerfis hola og massastreymið úr henni er mjög lítið háð holutoppsþrýstingi. Stafar það af því að þrýstifall í holunni sjálfri er lítið en þrýstifall frá jarðhitageymi að holu mikið. Þennan mun aflferla má einnig sjá í holu KJ-11. Þar koma fram tvær gerðir aflferla, annar fyrir efra kerfið (vatnskerfið) en hinn ferillinn gildir þegar neðra kerfið tekur þátt í blæstrinum.

#### 4.3 Þrýstingsbreytingar við kvikuhlaup

Við kvikuhlaup á Kröflusvæðinu hafa komið fram þrýstipúlsar í jarðhita-kerfinu eins og mynd 8 sýnir. Þessar þrýstingsbreytingar koma fram í efra kerfinu, sem er hreint vatnskerfi, en hafa ekki verið mælanlegar í neðra kerfinu. Þetta er túlkað á þann veg að þrýstipúlsinn dempist svo fljótt í tveggja fasa kerfinu að hann komi ekki fram í borholum. Í vatnskerfinu berst þrýstibreytingin hins vegar miklu lengri vegalengd. Auk ofangreindra upplýsinga hefur verið hægt að nota þrýstingsbreytinguna til þess að ákvarða vatnsleiðni efra kerfisins.

#### 4.4 Efnainnihald borholuvökva

Þar sem innstreymi í holur er einungis úr efra kerfinu er gott samræmi milli kísilhita og mældrar "entalpíu". Hins vegar er samræmið ekki gott

þar sem innstreymi í holur er aðallega úr neðra kerfinu. Er ekki við öðru að búast því kísilhitamælir gerir ráð fyrir að upphaflega sé allur vökvinn í vatnsfasa.

Við jarðefnalegar rannsóknir á neðra kerfinu hefur komið í ljós að gastegundir í borholuvökvanum hafa gefið einna mikilsverðastar upplýsingar um gerð jarðhitakerfisins.

Í Kröflu eru einnig þannig aðstæður að gastegundir frá kviku hafa áhrif á efnasamsetningu jarðhitavökvans. Kerfisbundin athugun á magni gastegunda í borholum gefur það rennslislíkan sem sýnt er á mynd 10. Kvikugös ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) koma inn í kerfið nálægt botni holu KG-10. Gastegundirnar og gufan streyma upp á við og til SA en við Hveragil er náttúrulegt uppstreymi neðra kerfisins eins og áður segir. Kerfið er að vísu nokkru flóknara en þetta. Í tveim holum er borholuvökvinn að miklu leyti soðið vatn.

Þó meginhluti gassins í neðra kerfinu sé  $\text{CO}_2$  fylgja aðrar gastegundir svo sem  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ , Hg og Rn þessum sömu streymisleiðum. Mjög athyglisvert er að líta á radon í þessu sambandi.  $^{222}\text{Rn}$  er geislavirkt efni með helmingunartímann 3,8 dagar. Með því að gera ráð fyrir að radon í borholuvökva komi inn í jarðhitakerfið með öðrum gastegundum má reikna út aldur borholuvökva í mismunandi holum miðað við aldur vökvans í holu KG-10, og út frá því má áætla streymishraða í jarðhitakerfinu. Sé þetta gert verður aldurinn á vatninu miðað við holu KG-10 eftirfarandi:

Hola	KG-10	0	dagar		
"	KJ-7	1,9	"		
"	KJ-6	5,4	"		
"	KJ-9	9,9	"	soðið vatn	
"	KJ-11	11,2	"	"	"

Í sumum borholanna í Kröflu hefur orðið vart við alvarlegar útfellingar í neðra kerfinu. Þessar útfellingar hafa verið athugaðar í holum KJ-7 og KG-10. Útfellingarnar eru blanda af járn-, kísil- og brennisteins-samböndum. Álitið er að kvikugös ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$  og  $\text{CO}_2$ ) stuðli að myndun þessara útfellinga. Við þessar aðstæður getur tiltölulega mikið magn af járn-samböndum verið í upplausn. Við innstreymi í holu verður vökvinn yfirmettaður af þessum efnasamböndum og getur því fallið út í holunni.

Útfellingarnar í KG-10 og KJ-7 eru þannig taldar vera afleiðingar af innstreymi kvikugasa. Útfellingahraði hefur reynst mestur í holu KG-10.

Það styður þessa túlkun að samfara því sem mikil  $\text{CO}_2$  aukning varð í holu KG-3 óx styrkur  $\text{SO}_4^{2-}$  í KG-4 úr 180 ppm í 2200 ppm og pH datt niður í 1,8.

## 5 SUÐA Í BERGI

Hér að framan hefur sumum vinnslueiginleikum Kröflusvæðisins verið lýst. Sá eiginleiki að neðra kerfið er í suðu gerir viðbrögð svæðisins við nýtingu önnur en viðbrögð vatnskerfis (water dominated). Skal nú nokkuð vikið að því.

Á mynd 10, hægra megin, er að finna tölur um meðalhitastig og meðalþrýsting í neðra kerfinu sem áætlað er að séu marktækar fyrir ótruflað ástand svæðisins.

Lengst til hægri er útreiknað rúmmálshlutfall gufu í berginu S" . Þetta rúmmálshlutfall virðist vera á bilinu 0,1-0,2. Á mynd 11 hefur verið teiknað líklegt ástand neðra kerfisins í Kröflu miðað við mældan hita og þrýsting, blásturssögu holanna og efnafræði borholuvökvans. Við nýtingu á neðra jarðnitakerfinu í Kröflu, þar sem bæði vatn og gufa eru í berginu, kemur hlutfallsleg leiðni fasanna til með að hafa afdrifariík áhrif. Leiðni gufu er meiri en leiðni vatns og við visst rúmmálshlutfall milli fasanna verður vatnið "stagnant" en aðeins gufan heldur áfram. Þegar vatnið sem eftir er gufar upp fer vökvinn að draga varma úr berginu. Vinnslueiginleikar borhola sem draga vökva eingöngu úr neðra tveggja fasa kerfinu eru þeir að vatnsmagnið minnkar með tíma og "entalpían" eykst. Holurnar þróast yfir í að verða hreinar gufuholur. Þegar að því kemur að allt vatn er gufað upp í nágrenni holunnar getur holan framleitt yfirhitaða gufu.

Ein hola, KG-12, hefur fylgt þessari þróun í smáatriðum. Aðrar holur, KJ-6 og KJ-7, hafa sýnt suma eiginleika þessarar þróunar en hafa alltaf skilað einhverju af massastreyminu í vatnsfasa. Stafar það e.t.v. af því að efra kerfið er ekki fyllilega lokað af í þessum holum. Almennt má þó búast við að holur, sem vinna vökva úr neðra kerfinu, muni haga sér svipað og hola KG-12.

## 6 UMRÆÐA

Hér hefur verið lýst nokkrum eiginleikum jarðhitasvæðisins við Kröflu og reynt að skýra þá mynd sem talin er lýsa þessum eiginleikum. Kröflusvæðið er fyrsta háhitasvæði á Íslandi, sem ekki er hreint vatnskerfi (water dominated). Sambærileg jarðhitasvæði erlend eru mjög fá. Við rannsókn jarðhitans hefur því verið nauðsynlegt að þróa rannsóknaraðferðir sem henta gerð svæðisins. Virk eldvirkni á svæðinu samfara rannsókn hefur ekki gert málið einfaldara.

Á hinn bóginn eru niðurstöður rannsókna á þann veg að Kröflusvæðið er nú líklega best þekkta háhitasvæði landsins.

Vinnslueiginleikar svæðisins eru bæði efnafræðilega og varmafræðilega frábrugðnir eiginleikum vatnssvæða. Þessi munur er að sumu leyti hagstæður frá nýtingarsjónarmiði, en að öðru leyti óhagstæður.

Aðalatriðið við nýtingu er hins vegar það, að menn geri sér grein fyrir hvernig innri gerð jarðhitakerfisins er og hvers megi vanta af kerfinu við nýtingu.



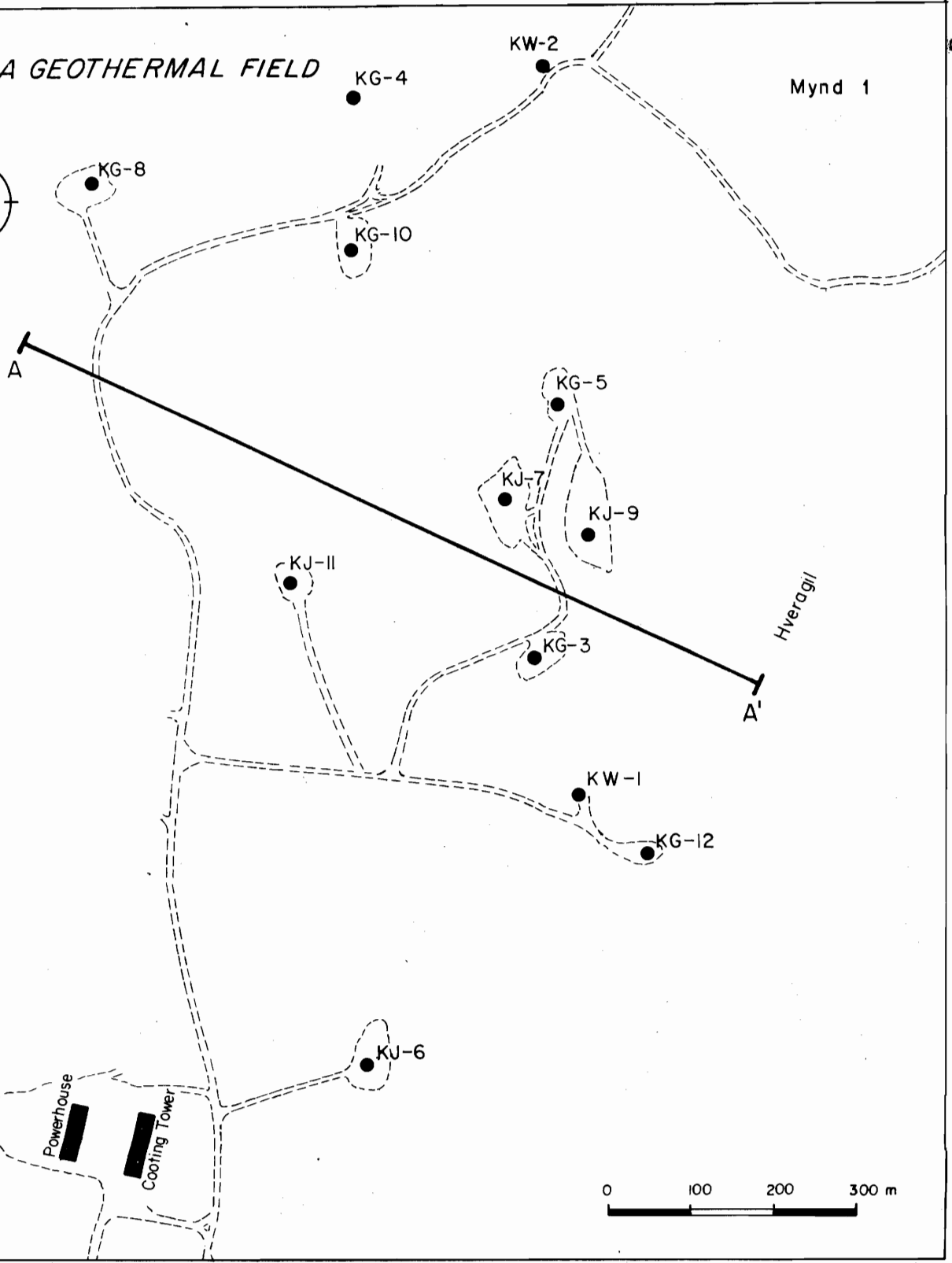
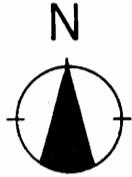
MYNDIR





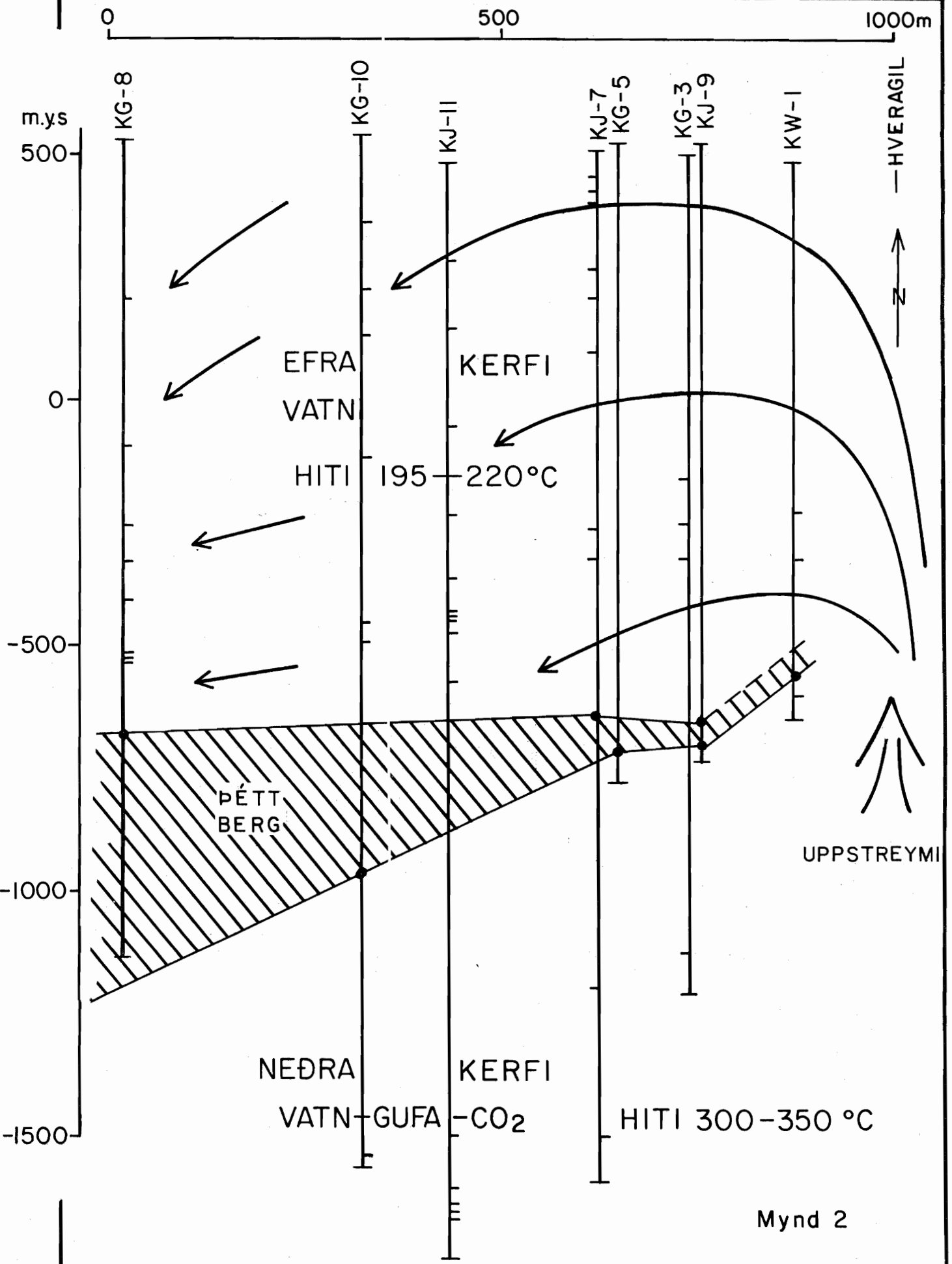
KRAFLA GEOTHERMAL FIELD

Mynd 1





Einfölduð mynd af Kröflusvæðinu

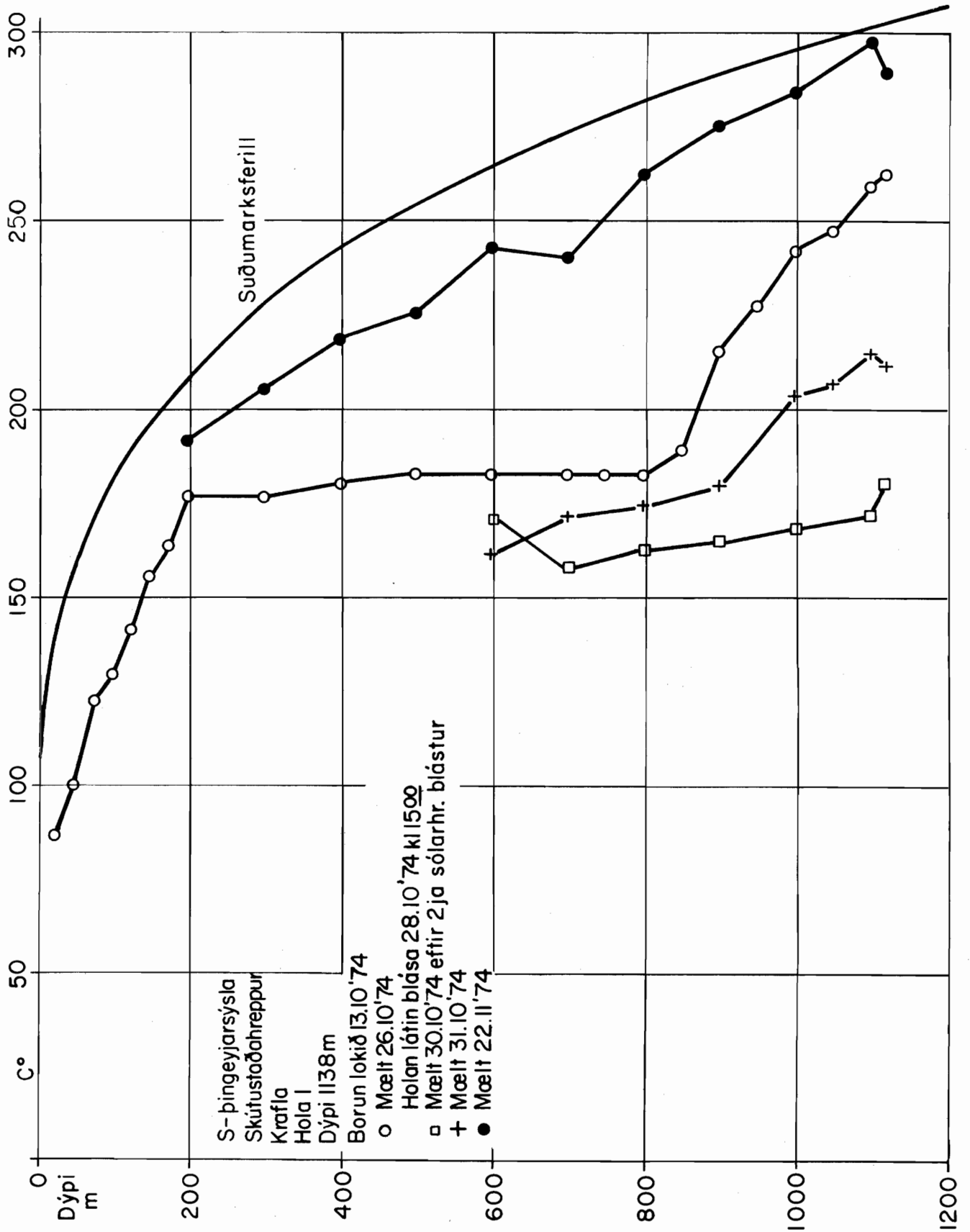


Mynd 2



# Hitamælingar í borholu I í Kröflu

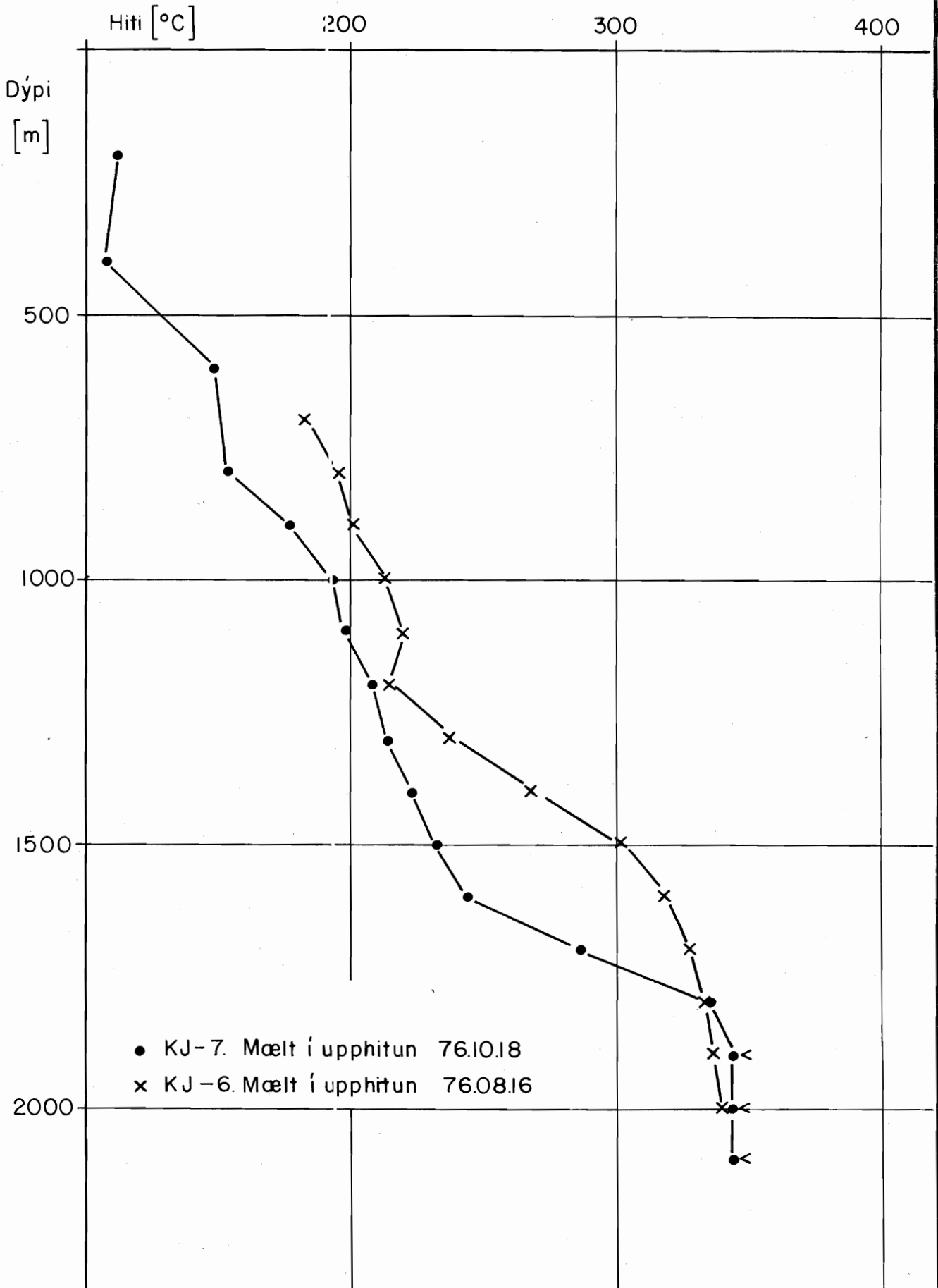
Mynd 3

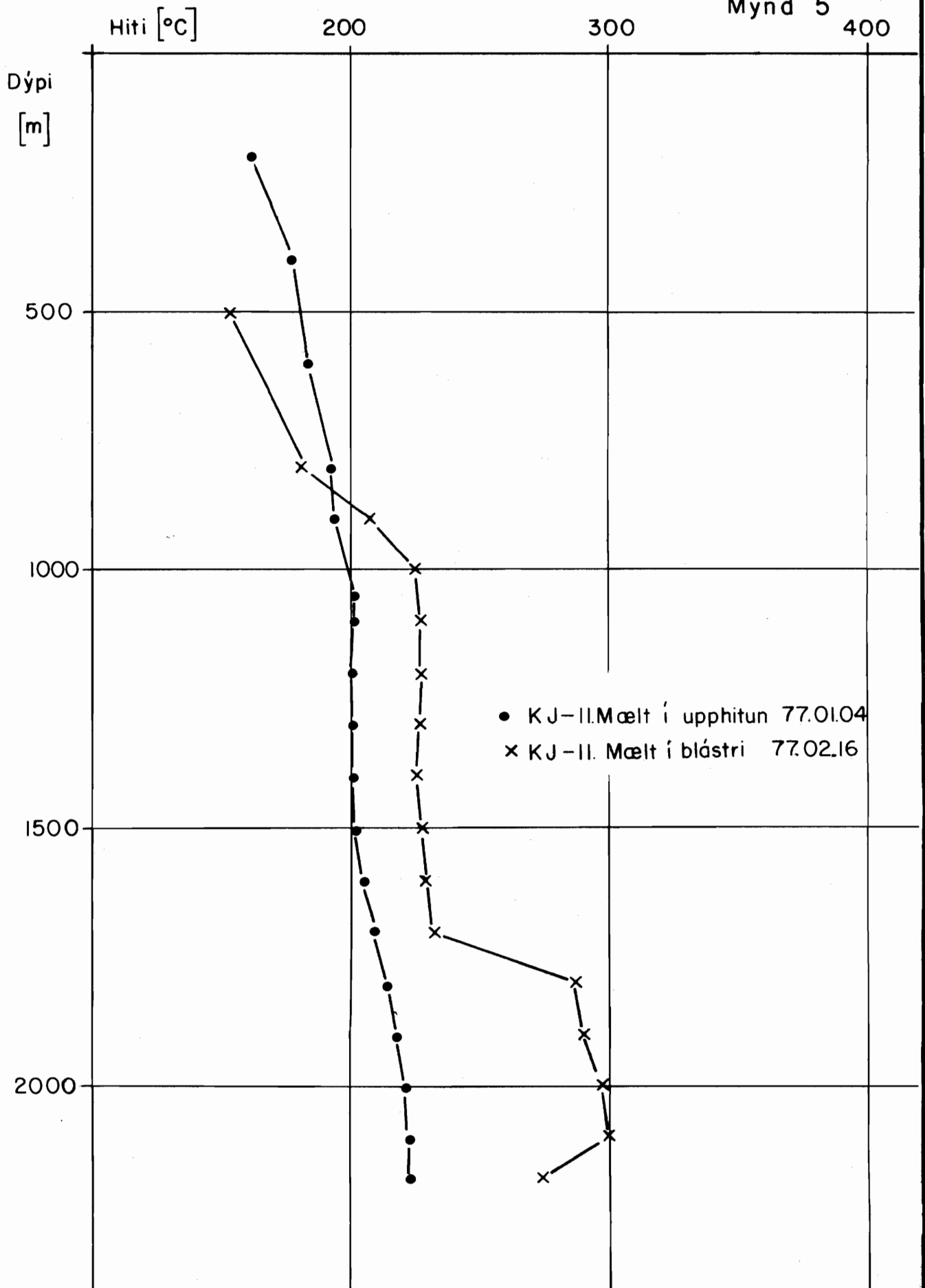




Hitaferlar KJ-6 og KJ-7

Mynd 4

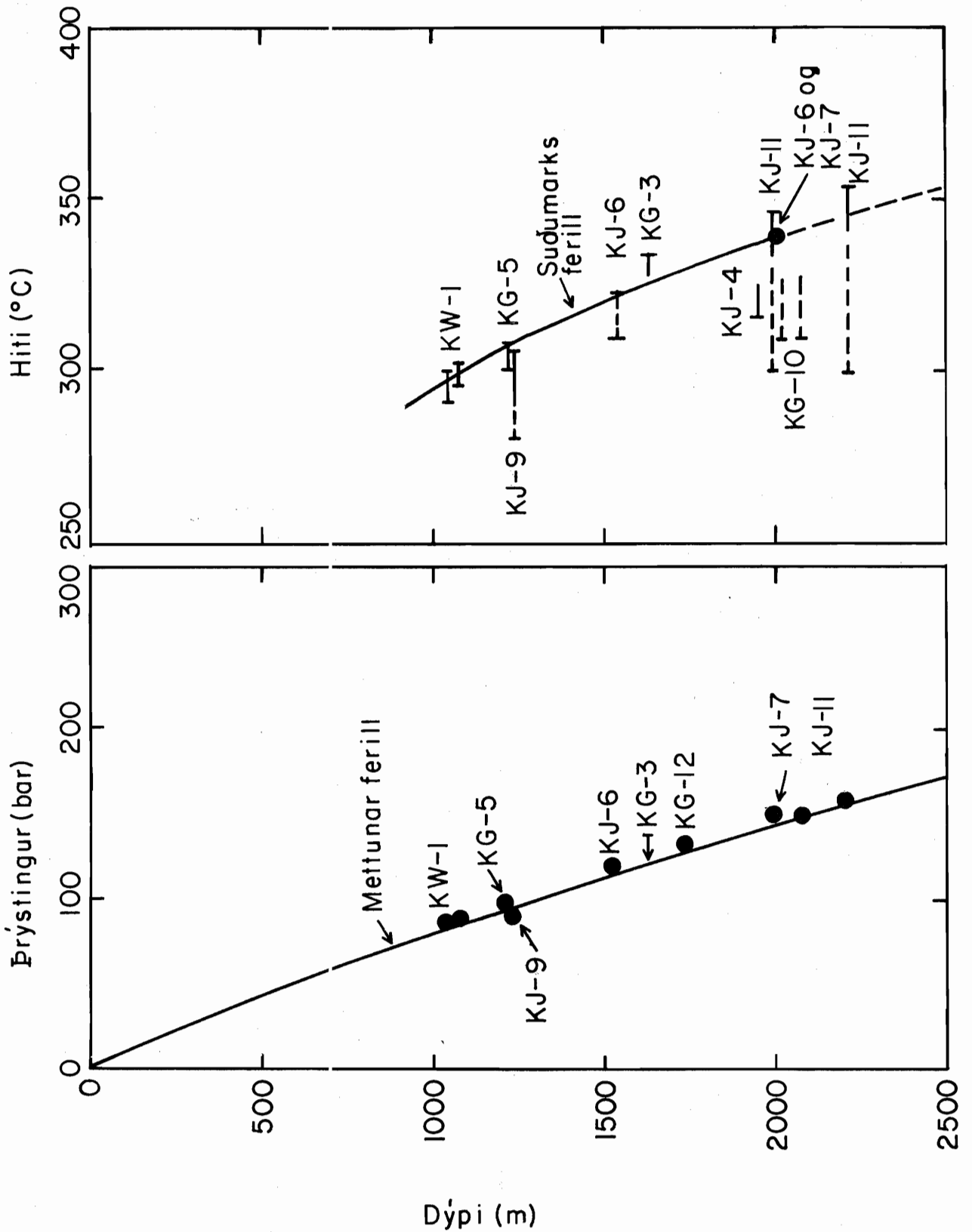






Hiti og þrýstingur borholum í Kröflu

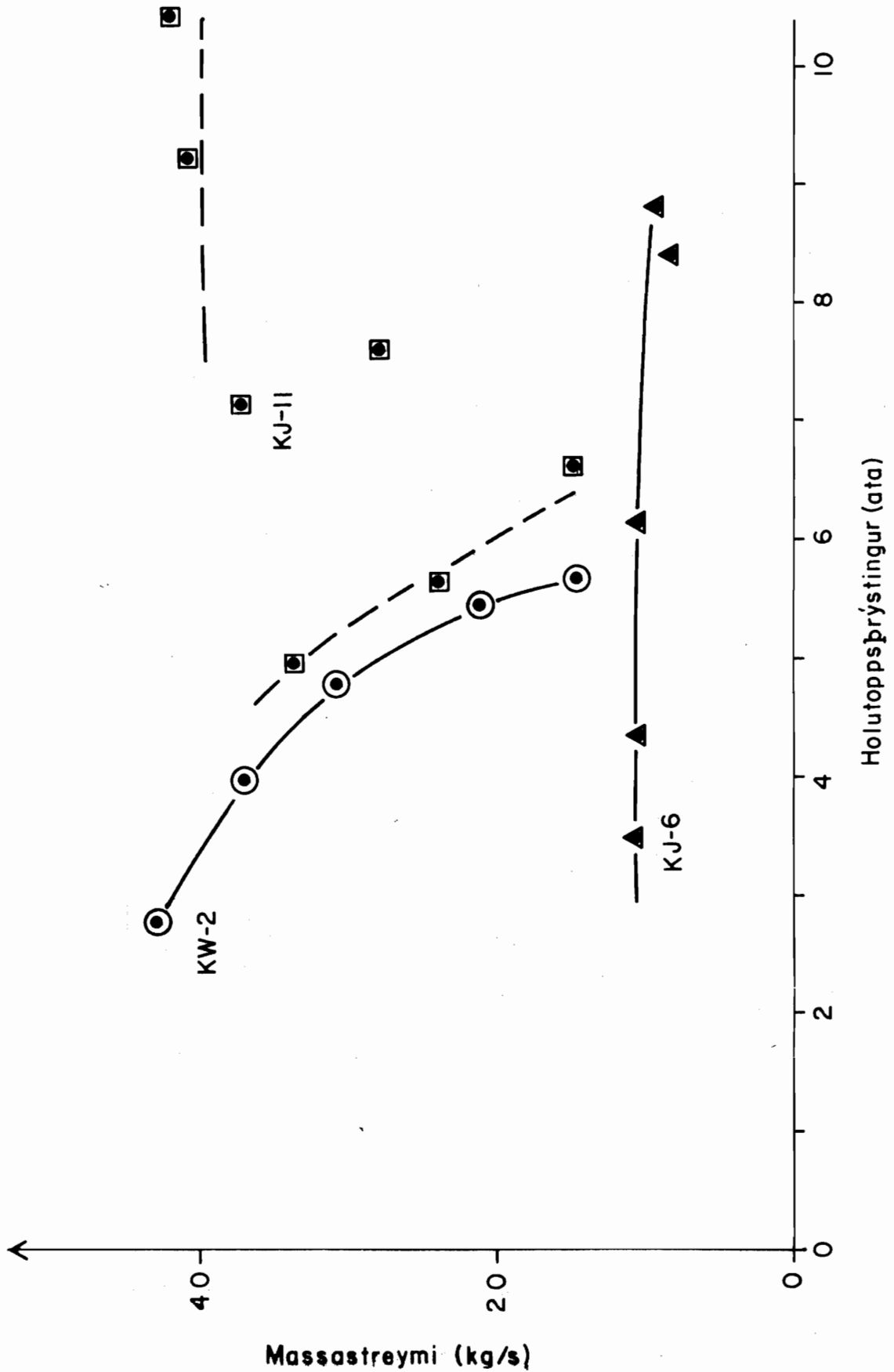
Mynd 6





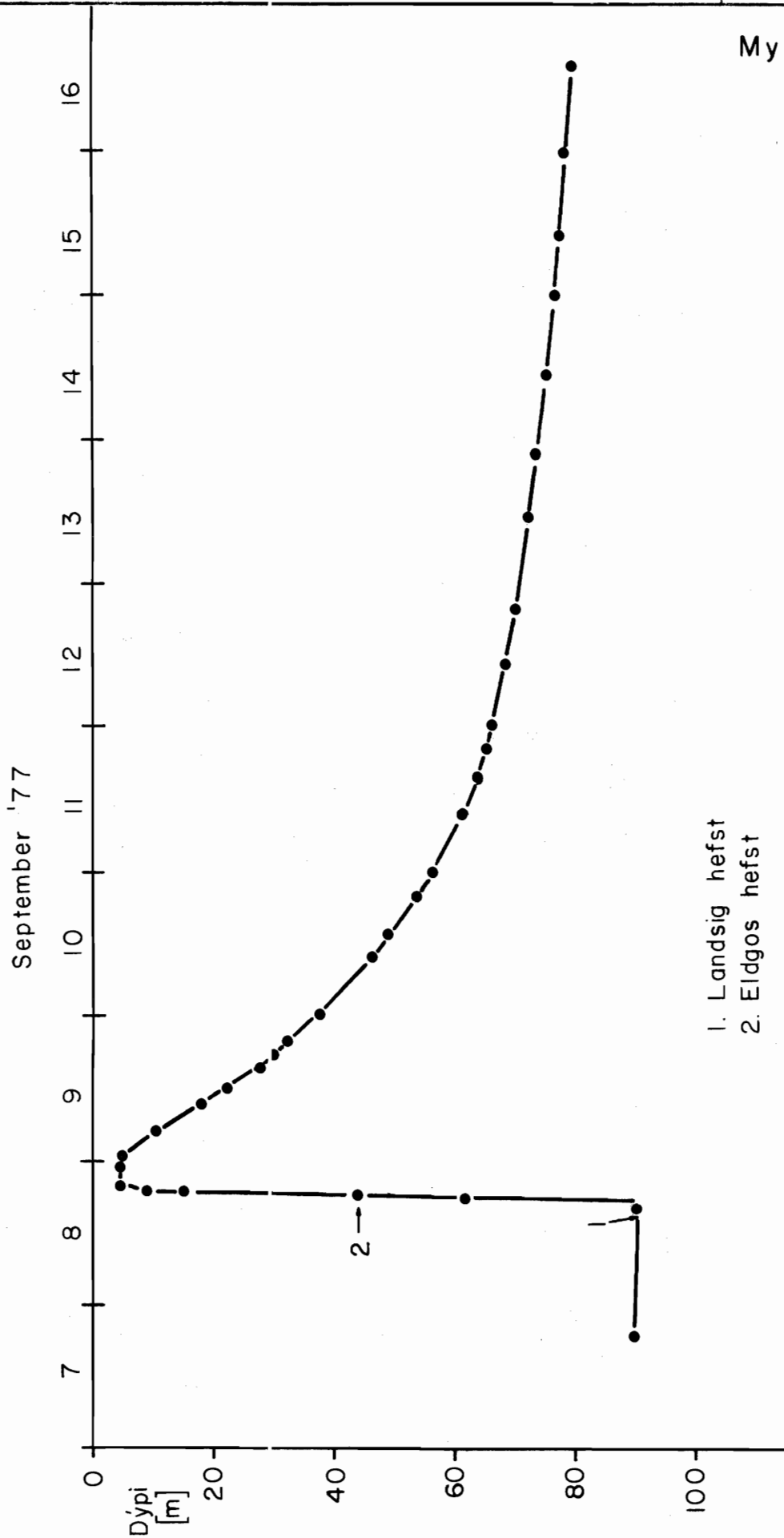
Tegundir aflferla

Mynd 7





Mynd 8

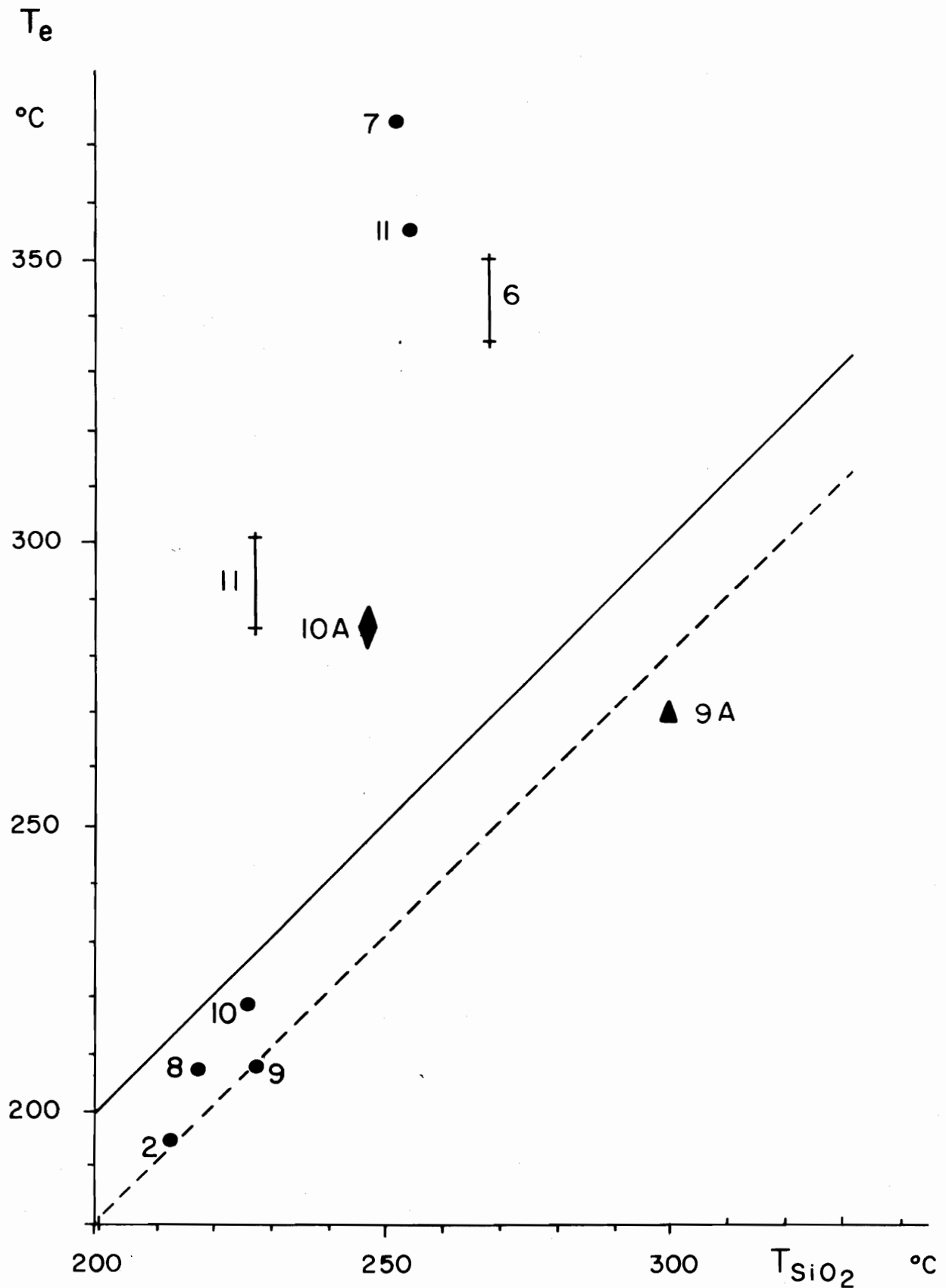






# Samband kísilhita og entalpiuhita

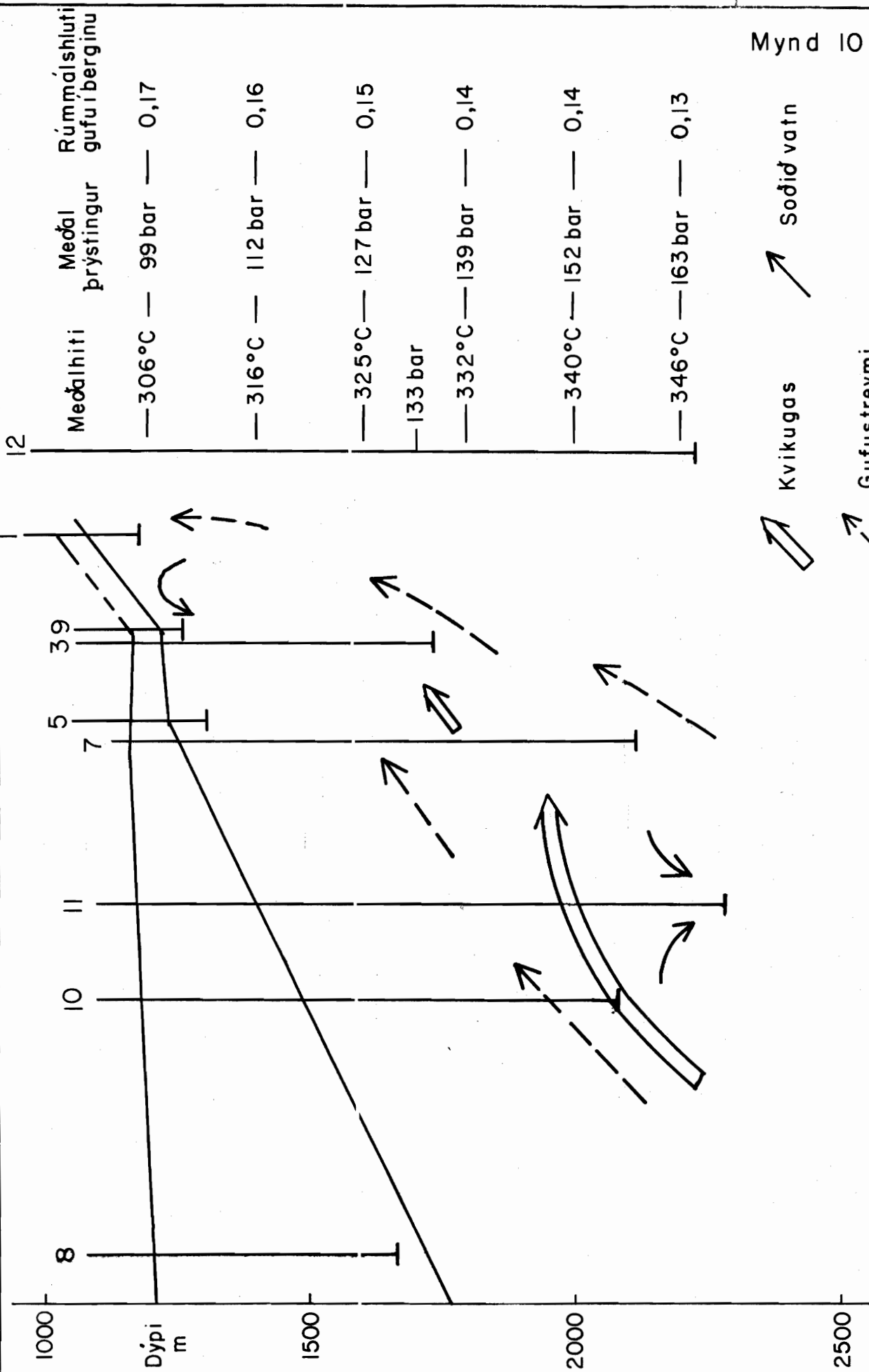
Mynd 9





Nedra kerfið í Kröflu

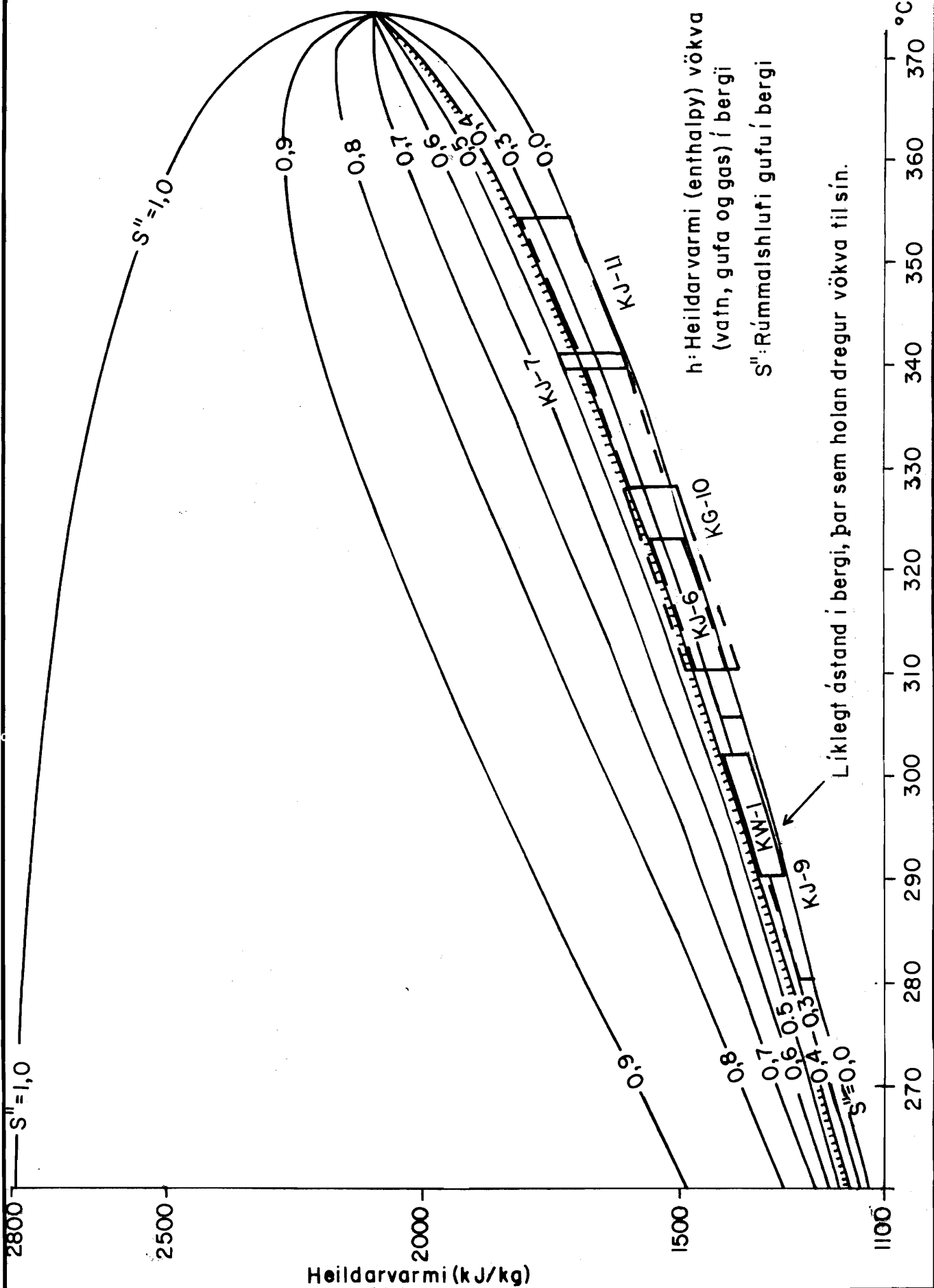
Mynd 10





Líklegt ástand neðra kerfis á Kröflusvæði

Mynd II





VARMA- OG MASSASTREYMI Í BERGI

Valdimar K. Jónsson

EFNISYFIRLIT

	Bls.
1 INNGANGUR .....	1
2 LÝSING Á REIKNILÍKANI .....	1
3 LÍKANAGERÐ .....	5
4 TVEGGJA KERFA JARÐHITASVÆÐI .....	5
TÁKN .....	8
HEIMILDIR .....	8
MYNDIR .....	9



Varma og massastreymi í bergi.

### 1. Inngangur.

Við Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) í Kaliforníu hefur á undanförunum árum verið staðið að því að byggja upp tölvulíkan til þess að reikna út grunnvatnskerfi háhitasvæða. Líkan þetta getur tekið fyrir hvort sem um er að ræða ein- eða tvífasa streymi í ein-, tví- eða þrívíðu rúmi og getur spáð fyrir hegðun jarðhitasvæða við vinnslu. Undirritaður dvaldi við LBL í sjö mánuði á s.l. ári og vann með nokkrum aðilum þar í að prófa þetta reiknilíkan á tvífasa streymi og beitti því síðan á líkan sem átti að líkjast hluta af Kröflusvæði sem hefur verið sett fram af Orkustofnun. (1)

Tvö líkön hafa verið útreiknuð, og sýnir annað hvernig tvífasa streymi hagar sér í kringum borholu þegar hún er tekin í notkun og í hinu líkaninu er borin saman hegðun líkans yfir langt árabíl undir vinnslu sem hefur tvöfalt kerfi eins og hefur sýnt sig við Kröflu. Niðurstöður sýna hegðun kerfanna.

### 2. Lýsing á reiknilíkani.

Þær jöfnur sem gilda fyrir grunnvatns streymi heitra linda eru samfellujafnar og orkujafnar ásamt straumjöfnum sem kenndar eru við Darcy.

Samfellujafnan er gefin á eftirfarandi hátt

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_f) + \nabla \cdot (\rho_f \bar{V}_f) = \dot{m}_s''' \quad (1)$$

og orkujafnan

$$\frac{\partial}{\partial t} (1-\phi) E_r \rho_r + \phi_f E_f \rho_f + \nabla \cdot (\rho_f E_f \bar{V}_f) = \nabla \cdot (k_m \nabla T) + \dot{Q}''' - P \nabla \cdot \bar{V}_f \quad (2)$$

þar sem

$$\rho_f = S\rho_v + (1-S)\rho_l \quad (3)$$

$$\rho_f E_f = S\rho_v E_v + (1-S)\rho_l E_l \quad (4)$$

Í tvífasa streymi er Darcy jafnan látin gilda fyrir hvern fasann fyrir sig eins og hann væri einn en leiðrétting fyrir hinn fasann kemur inn í margföldunarstuðul sem er hlutfall lekt þess fasa.

Darcy hraði verður þá fyrir gufuna

$$\bar{V}_v = -\frac{R_v k}{\mu_v} (\nabla \bar{p} - \rho_v \bar{g}) = -M_v (\nabla \bar{p} - \rho_v \bar{g}) \quad (5)$$

fyrir vatnið

$$\bar{V}_l = -\frac{R_l k}{\mu_l} (\nabla \bar{p} - \rho_l \bar{g}) = -M_l (\nabla \bar{p} - \rho_l \bar{g}) \quad (6)$$

Massaflæði hvers fasa fyrir sig fæst með því að margfalda hraðana með hlutfallslegri eðlisþyngd sem gefur fyrir gufuna

$$\bar{F}_v = \rho_v \bar{V}_v = -\frac{\rho_v R_v k}{\mu_v} (\nabla \bar{p} - \rho_v \bar{g}) = -\rho_v M_v (\nabla \bar{p} - \rho_v \bar{g}) \quad (7)$$

og fyrir vatnið

$$\bar{F}_l = \rho_l \bar{V}_l = -\frac{\rho_l R_l k}{\mu_l} (\nabla \bar{p} - \rho_l \bar{g}) = -\rho_l M_l (\nabla \bar{p} - \rho_l \bar{g}) \quad (8)$$

Þessar fjórar síðustu jöfnur eru nú settar í samfellujöfnuna og orkujöfnuna og þar tegraðar yfir þau element sem fyrir valinu verða.



Hægt er að velja net sem lagt er yfir það svæði sem á að tegra í reglulegu eða óreglulegu formi. Til er forrit sem í raun reiknar út netið út frá miðpunktum sem eru uppgefnir með staðsetningu. Forritið reiknar þá út flatarmál allra snertiflata, fjarlægð milli miðpunkts og flata og rúmmál hvers elements. Þetta er gert í eitt skipti fyrir öll áður en útreikningar á líkaninu byrja. (Sjá mynd 1.)

Samfellujafnan og orkujafnan eru nú tegraðar yfir ákveðið rúmmál og fæst þá:

$$V \left\{ \frac{d}{dt} (\phi \rho_f) \right\} = \sum_n (\bar{F}_v + \bar{F}_l) A_{n,m} + \dot{m}_s''' V \quad (9)$$

og

$$\begin{aligned} \frac{d(V \rho_f E_f)}{dt} + V \rho_r \frac{dE_r}{dt} &= \sum_n (\bar{F}_v H_v + \bar{F}_l H_l - (\bar{F}_v + \bar{F}_l) H_m) A_{n,m} \\ + \sum_n \frac{A_{n,m}}{D_{n,m}} K_{n,m} (T_n - T_m) + \dot{m}_s''' (H_s - H_m) V + \dot{Q}''' V \end{aligned} \quad (10)$$

Ef leysa á þessar jöfnur í óþekktu stærðunum  $\rho_f$  og  $E_f$  þá verður að búa til töflu yfir aðrar breytistærðir sem fall af þessum tveim. Hægt er að rita innri orku bergsins t.d.  $E_r = f(E_f, \rho_f)$  og fæst þá við diffrun

$$\frac{dE_r}{dt} = \left\{ \left( \frac{\partial E_r}{\partial E_f} \right)_{\rho_f} + \left( \frac{\partial E_r}{\partial \rho_f} \right)_{E_f} \cdot \frac{\partial \rho_f}{\partial E_f} \right\} \frac{dE_f}{dt} \quad (11)$$

og samsvarandi fyrir  $T$  og  $H_f$ .

Þessar jöfnur eru ritaðar í nálgunarformi með tilliti til tímans og mynda þær tvinnað jöfnuhneppi sem leyst er samtímis. Nú kemur í ljós að tímafasti samfellujöfnu er vanalega miklu minni en tímafasti orkujöfnu, þ.e. svörun streymisins við röskun tekur fyrir við en svörun varmans. Það er því hægt að taka stærri tímaskref fyrir orkujöfnu heldur en fyrir samfellujöfnu.

lekt

Hlutfalls/vatns og gufu hefur verið fengið með mælingu á líkani við Stanford háskóla ( 2 ) og einnig hefur verið stuðst við niðurstöður frá olíuiðnaði út frá hlutfallsstreymi gass og olíu í borholur.

Jafna Coreys gefur:

hlutfall lekt vatns

$$R_l = \left( \frac{1 - S - S_{wi} - S_{ge}}{1 - S_{wi} - S_{ge}} \right)^4 \quad \text{ef } S < 1 - S_{wi} - S_{ge}$$

$$R_l = 0 \quad \text{ef } S \geq 1 - S_{wi} - S_{ge}$$
(12)

hlutfall gufu

$$R_v = \frac{S^4}{(1 - S_{wi} - S_{ge})^4} \quad \text{ef } S < 1 - S_{wi} - S_{ge}$$

$$R_v = 1 \quad \text{ef } S \geq 1 - S_{wi} - S_{ge}$$

þar sem

$S_{ge}$  er kritísk gufumettun, hlutfallsþorurúmmál

$S_{wi}$  er bundin vatnsmettun, hlutfallsþorurúmmál

Mynd 2 sýnir breytinguna á hlutfallslekt vatns og gufu fyrir mismunandi gildi á  $S_{wi} + S_{ge}$ . Mælingar á hlutfallinu hafa nýlega verið gerðar við Stanford háskóla (2) sem benda til að  $S_{wi} + S_{ge}$  geti haft herra gildi en hingað til hefur verið notað. Áhrif mismunandi gilda á  $S_{wi} + S_{ge}$  er tekin til athugunar í líkanagerðinni.

### 3. Líkanagerð.

Fyrst er tekin fyrir hegðun jarðhita líkans í kring um borholu og athugað hvernig suða í bergi nær borholu breyddist út við fasta vinnslu á borholunni.

Tekið var fyrir föst lagþykkt, 100 m þykk. ( $10^{-14} \text{ m}^2$ ),

Lekt bergsins var tekið sem fasti 10 millidarcy/ gleypni 0.1, eðlismassi bergs  $2650 \text{ kg/m}^3$  og eðlisvarmi bergsins  $950 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ . Stöðugt massastreymi er inn í holuna yfir þessa 100 m lengd og er jafnt og  $16 \text{ kg/s}$ . Upphaflega er þrýstingur 140 bar og hitastig  $332^\circ\text{C}$  allsstaðar. Þetta er svipað ástand og ríkir í 1900 m dýpt á Kröflusvæðinu.

Áhrif hlutfallsleka vatns og gufu er tekin til athugunar og þau þrjú tilfelli sem athuguð eru eru sýnd á mynd 2. Mynd 4 sýnir líkanið sem notað er við útreikningana.

Niðurstöður útreikninga eru sýndar á mynd 4 og 5. Á mynd 3 er sýnt niðurdráttin í kringum borholuna eftir 46,7 daga og 158 daga vinnslu. Hinar þrjár mismunandi línur eftir 46.7 daga sýna hin mismunandi tilfelli og er ekki stór munur á milli mismunandi hlutfallsleka vatns og gufu. Kemur í ljós að eftir 46.7 daga vinnslu er hrein gufa í um 15 m radius kringum holuna og suðan á sér stað þaðan og út í 100 m radius frá borholu. Eftir 158 daga eru samsvarandi tölur orðnar 20 m og rúmlega 200 m.

### 4. Tveggja kerfa jarðhitasvæði.

Tvífasa streymislíkan var gert á vinnslu frá tveggja kerfa jarðhitasvæði til þess að fá fram hegðun þeirra og hvernig kerfin hefðu áhrif hvort annað. Mynd 6 sýnir líkanið sem er  $10^\circ$  geiri sem skorin er úr jarðhitasvæðinu. 16 láréttar

sneiðar eru teknar, hver 125 m þykk og hver sneið er skorin í 11 hólf, sem gefur samtals 176 element sem tekin eru til athugunar. Fjögur lög á dýpinu 1000-1500 metrar eru gerð svo til ógegndræp (lekt stuðull 0.01 md) milli kerfanna nema rétt í horni geirans. 20 kg/s fast massastreymi er tekið úr níunda hólfi í fjórða lagi (efra kerfi) og 10 kg/s massastreymi úr hverjum þremur hólfum úr neðra kerfi beint fyrir neðan það efra. Samtals er þetta 50 kg/s sem á að líkja eftir rennslu úr einni borholu. Innstreymi inn í geirann í neðsta lagi er 30 kg/s og innstreymi í efra lag er 20 kg/s inn í stærsta element í fjórða lagi og er það tekið jafn dreift út aftur frá efsta lagi í líkaninu.

Tafla 1 gefur eðliseinkunn hinna þriggja laga efra kerfis, neðra kerfis og millilags

Tafla 1

	Eðlismassi kg/m <sup>3</sup>	Gleipni	Lekt m <sup>2</sup>	Varmaleiðni: W/m°C	eðlisvarmi J/kg°C
Efra kerfi	2650	0.1	$3 \cdot 10^{-14}$	2.9	950
Neðra kerfi	2650	0.1	$1 \cdot 10^{-14}$	2.9	950
Millilag	2650	0.1	$1 \cdot 10^{-17}$	2.9	950

Upphafsstand kerfisins er gefið með þeirri þrýstni og hitastigsdreifingu sem sýnd er á mynd 7. Konstant hitastigsrandskilyrðinu er náð í toppi og botni kerfisins með því að láta eðlisvarma þessara laga hafa ímyndaðan háan eðlisvarma ( $10^6$  J/kg°C). Lóðréttu jarðveggir kerfisins eru teknir sem ógegndræpir og adibatiskir (ekkert varmastreymi). Innstreymi og útstreymi sem lýst var að ofan er afgreitt sem massa svelgur eða lind.

Tölvulíkanið reiknaði út hegðun þessa kerfis fyrir 33.3 ára vinnslu. Á mynd 8 er sýnt þrýstiminnkun og gufumyndun í miðvinnslu elementu neðra kerfis sem fall af tíma. Þrýstingur fellur hægt til að byrja með á meðan gufuhlutfallið er lítið en fer vaxandi og nær beinni línu á hálf logaritmisku línuriti eftir 2 ára vinnslu. Á meðan hefur rúmmáls hlutfall gufunnar náð svo til föstu hlutfalli um 25% miðað við rúmmál. Talsverð sveifla er bæði í þrýstifalli og gufuhlutfalli um meðal línu og má ef til vill vera vegna smávegis óstöðugleika í tölvulíkaninu.

Mynd 9 sýnir samsvarandi hitastig og enþalpiu streymisins út úr sama elementu. Hitastig fellur um 16°C yfir 33 ára vinnslu. Meðan enþalpia byrjar með því að stíga í meðan gufuhlutfall stígur en fellur svo er gufan hefur náð föstu rúmmálshlutfalli.

Myndir 10-14 sýna hvernig gufuhlutfallið í berginu eykst með tíma hver mynd sýnir dreifinguna við ákveðinn tíma frá því vinnsla hófst. Kemur fram að gufumyndun á sér stað á tveimur stöðum. Í fyrsta lagi í kringum vinnslusvæði neðra kerfisins og í öðru lagi á skilunum milli kerfanna þar sem þau koma saman. Þessi tvö gufusvæði ná saman er tíminn líður fram og í lokin eftir um 33 ár er gufumyndun orðin svo til dreifð yfir allt neðra kerfi með stærstu gufumyndun efst á neðra kerfinu rétt neðan við millilagið.

Þessar tvær líkanagerðir sem ræddar hafa verið er hægt að draga fram ýmsa athyglisverða hegðun á vinnslu jarðhitasvæðis sem er nærri eða jafnvel í suðu er vinnsla á svæðinu byrjar. Mikill áhugi er fyrir því að halda þessum athugunum áfram og gera líkan af heildar kerfinu og athuga vinnslu eiginleika þess fyrir 60 MW vinnslu yfir lengri tíma. Stefnt er að því að þessi athugun verði gerð á þessu ári, en sá hængur er á að sá tölvukostur sem bestur er til hér á landi ræður ekki við viðfangsefnið vegna þess hvað verkið er umfangsmikið bæði miðað við tölvuvinnslu, tíma og geymslustarðar sem líkanið krefst.

Tákn

A = þverskurðarflatarmál,  $m^2$

E = innri orka, kJ

F = massaflæði,  $kg/m^2-s$

g = þyngdarkraftshröðun,  $9.81 m/s^2$

H = enþalpia, kJ/kg

$k_m$  = meðalvarmaleiðni vökva og bergs,  $\frac{kW}{m^{\circ}C}$

k = lekt,  $m^2$  (  $1 md \approx 10^{-14} m^2$  )

$\dot{m}'''$  = massamyndun,  $kg/m^3-s$

M = Darcy hreyfileiki vökva ( $M = \frac{Rk}{\mu}$ , kg-m/s)

$\dot{Q}'''$  = varmamyndun  $kJ/m^3-s$

P = þrýstingur  $kN/m^2$  (=1 bar =  $10^3 kN/m^2$ )

R = hlutfallslekt

s = hlutfallslegt gufurúmmál

T = hitastig,  $^{\circ}C$

V = Darcy hraði, m/s

$\phi$  = gleypni bergs

$\rho$  = eðlisþyngd,  $kg/m^3$

$\mu$  = seigja, kg/m-s

Undirtákn

f = heildarvökvi (bæði vatn og gufa) (fluid)

l = fljótandi vökvi, vatn (liquid)

v = loftkenndur vökvi, gufa (vapor)

r = berg (rock)

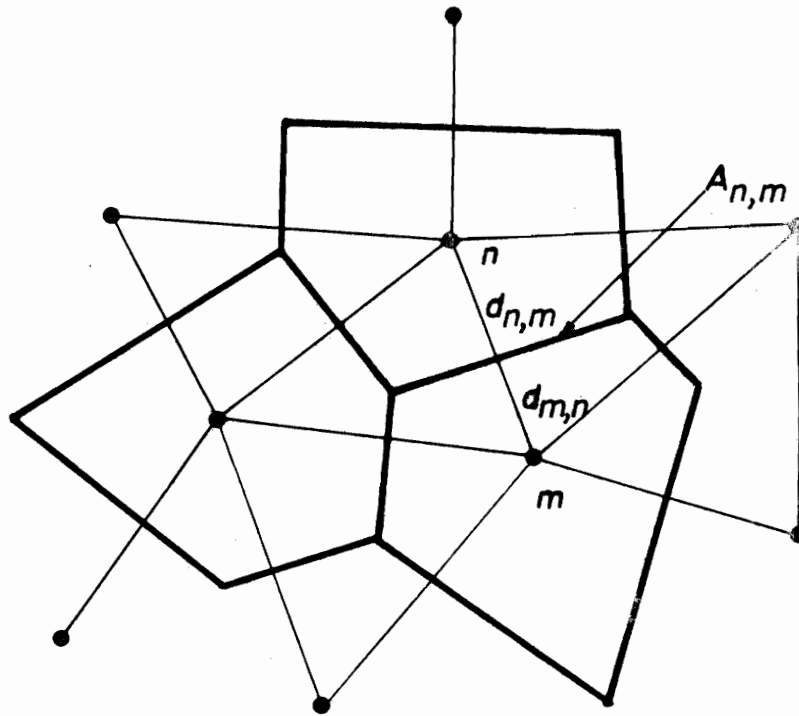
Heimildir

1. Borholubríf no. 7, Orkustofnun, 1977
2. Chen, H.K., Council, J.R. and Ramey, N.J., "Experimental Steam-Water Relative Permeability Curves", Geothermal Resources Council, Transactions, Vol 2, 103-104, 1978.

MYNDIR



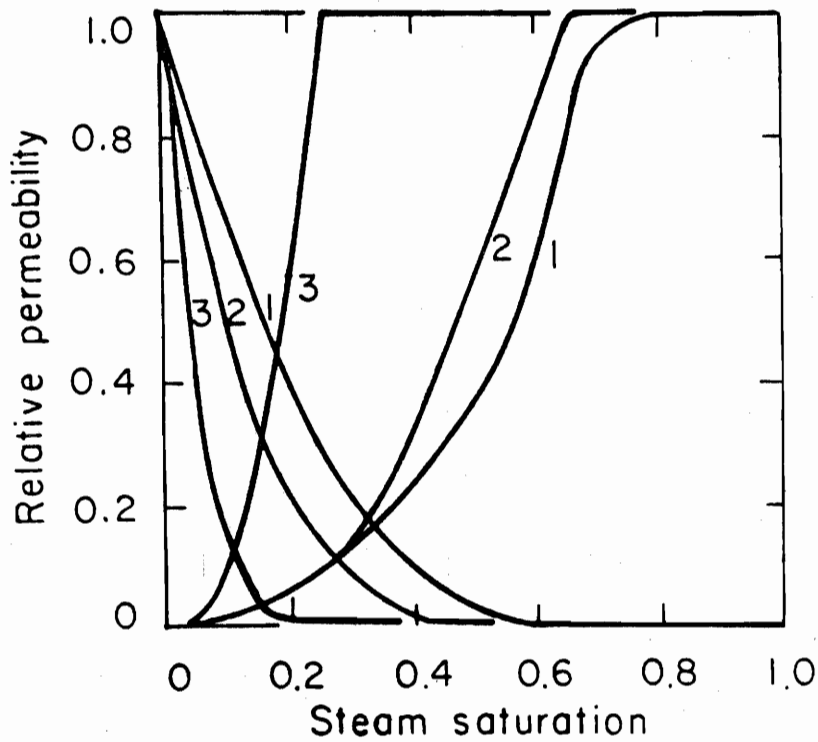




$D_{n,m} = d_{n,m} + d_{m,n}$  - fjarlægð milli hnútapunkta  
 $A_{n,m}$  - þverskurðarflatarmál milli hnútapunkta

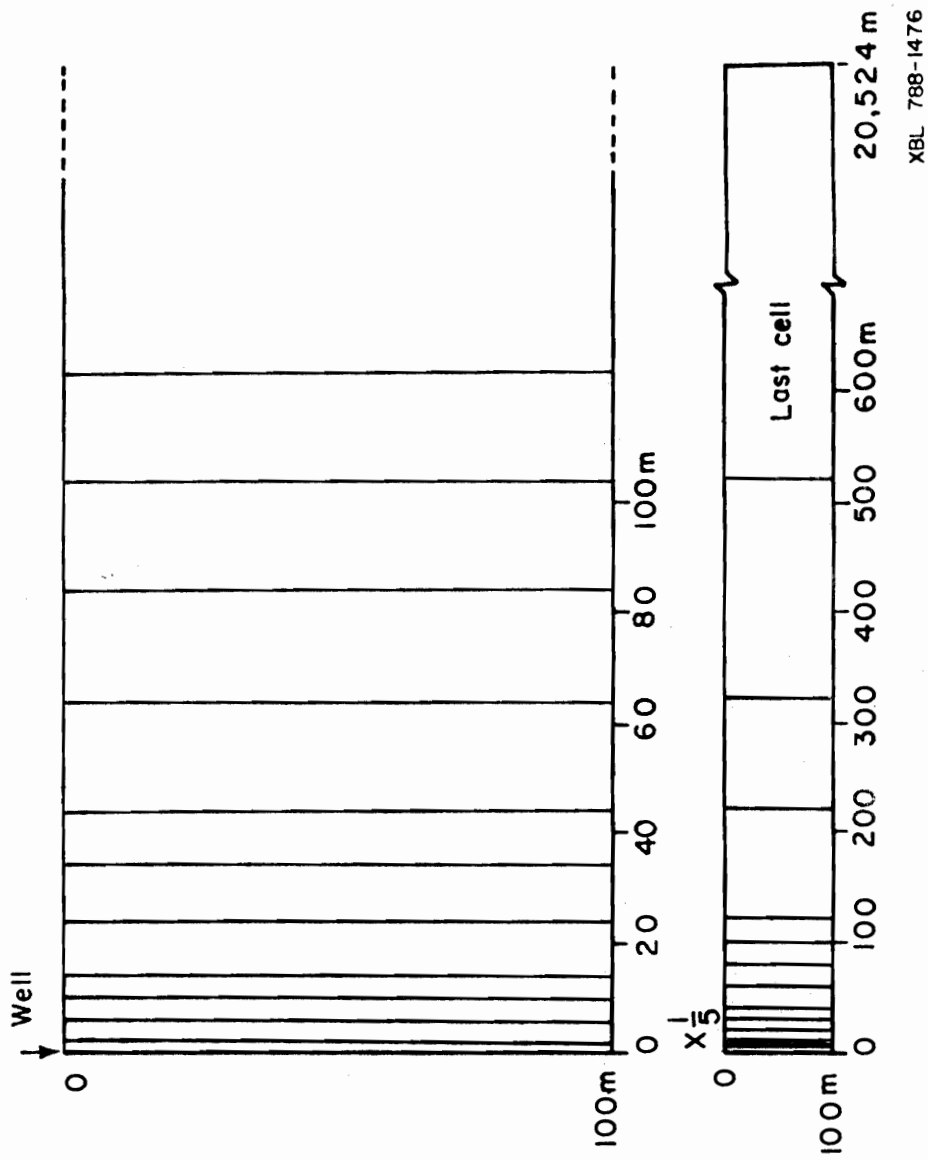
Mynd 1 Óreglulegt net, útreiknað af tölvuforriti út frá staðsetningu miðpunkta.

- 1 Relative permeability (Chen, H.K., 1976,1978)
- 2 Corey's equation with  $S_{wi} + S_{gc} = 0.35$
- 3 Corey's equation with  $S_{wi} + S_{gc} = 0.75$



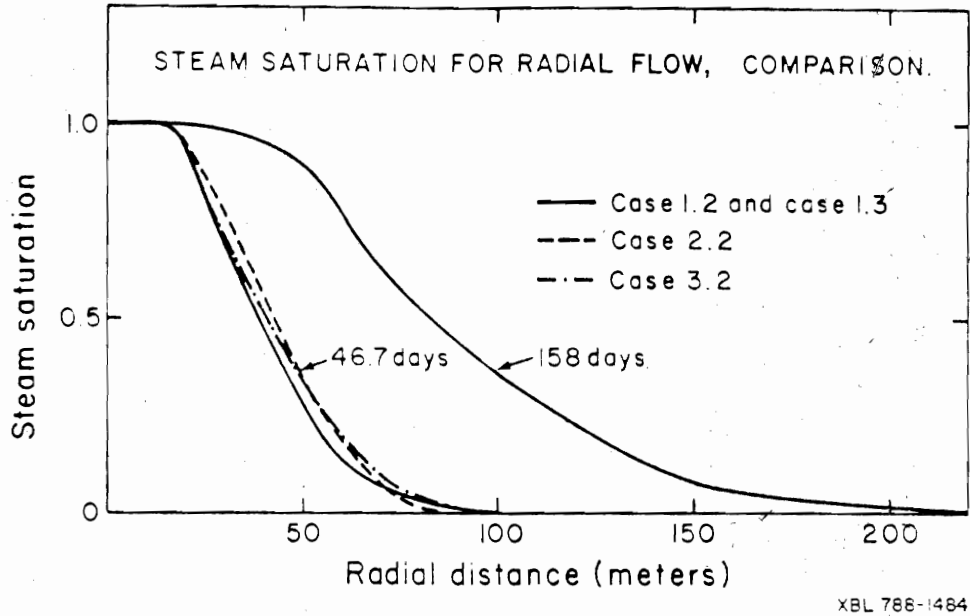
XBL 788-1473

Mynd 2 Hlutfallslegar lektarlínur fyrir þau þrjú tilfelli, sem athuguð voru.

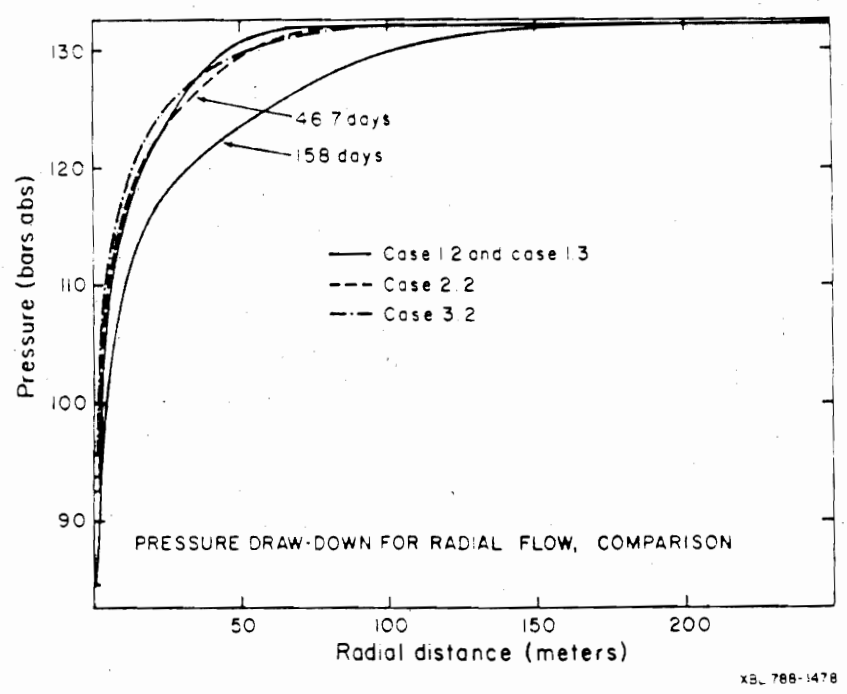


XBL 788-1476

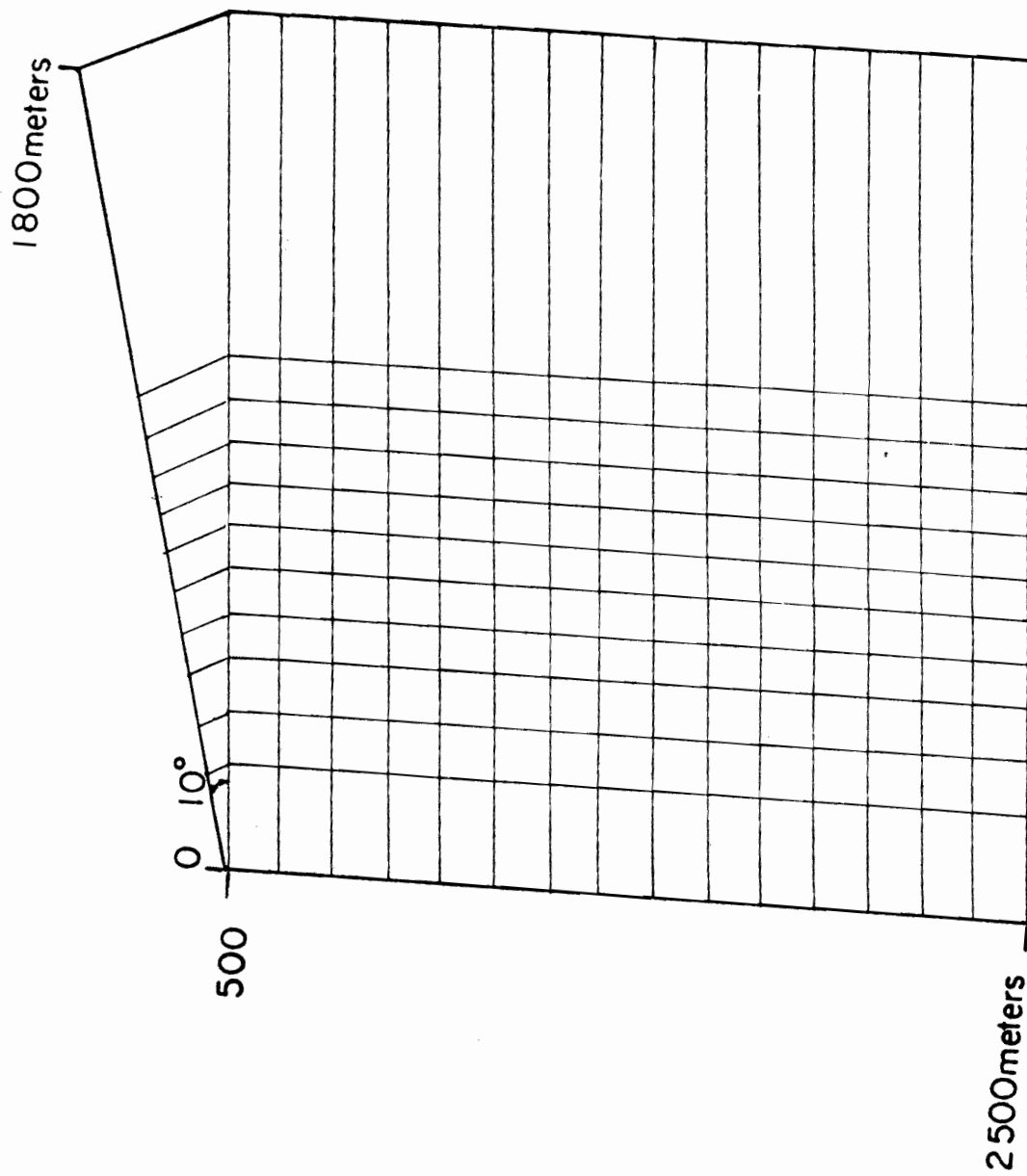
Mynd 3 Net fyrir radial rennslifteirlikingu.



Mynd 5 Gufumettun við radial rennsli, samanburður.

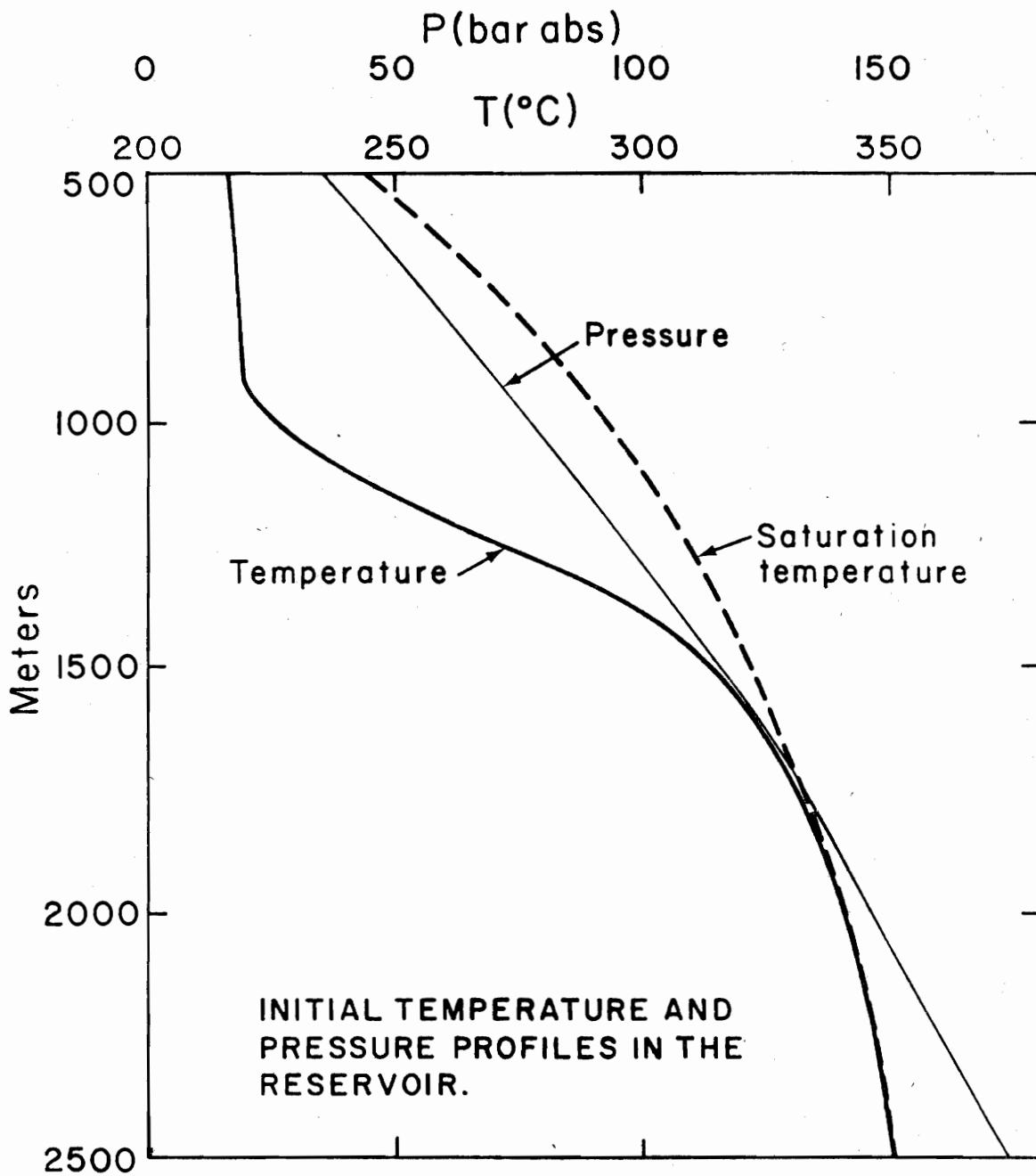


Mynd 4 Niðurdráttur fyrir radial rennsli, samanburður.



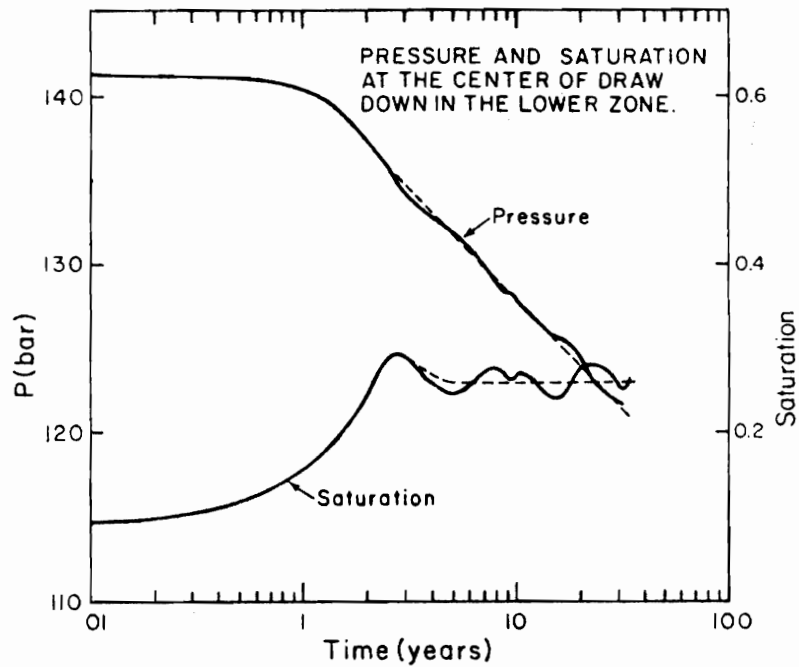
XBL 788-1477

Mynd 6 Net fyrir tveggja kerfa eftirlíkingu.



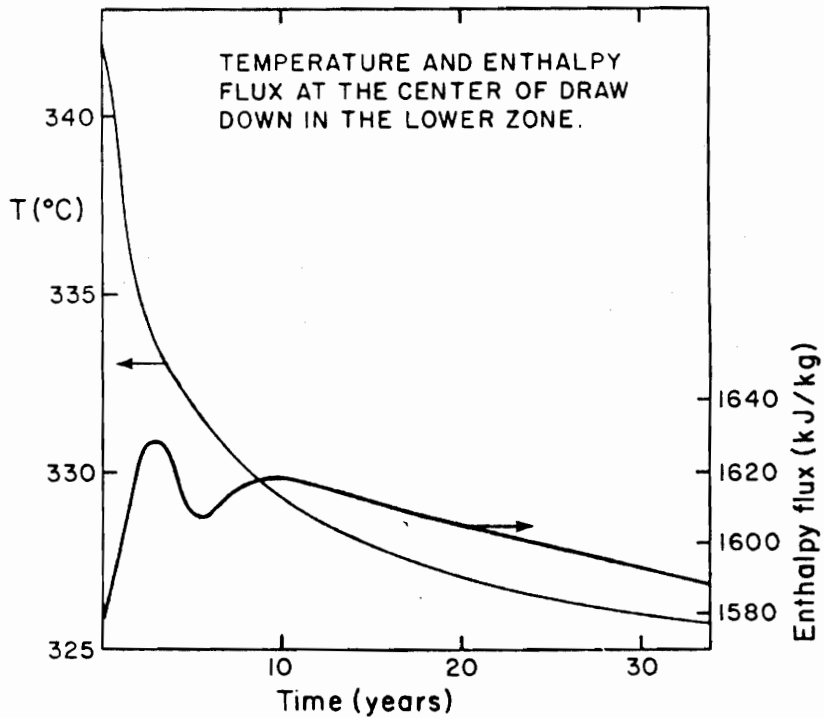
XBL 788-1483

Mynd 7 Upphafshitastig og -þrýstilínur notaðar í eftirlíkingar líkönunum.



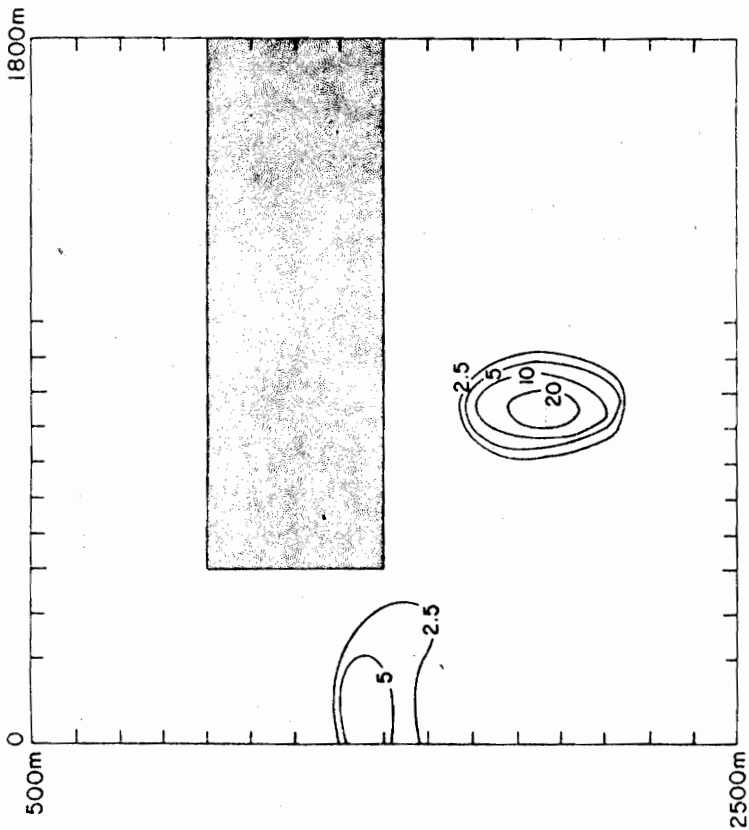
XBL 788-1482

Mynd 8 Þrýstingur og metnun við miðju niðurdráttar í neðra kerfinu.



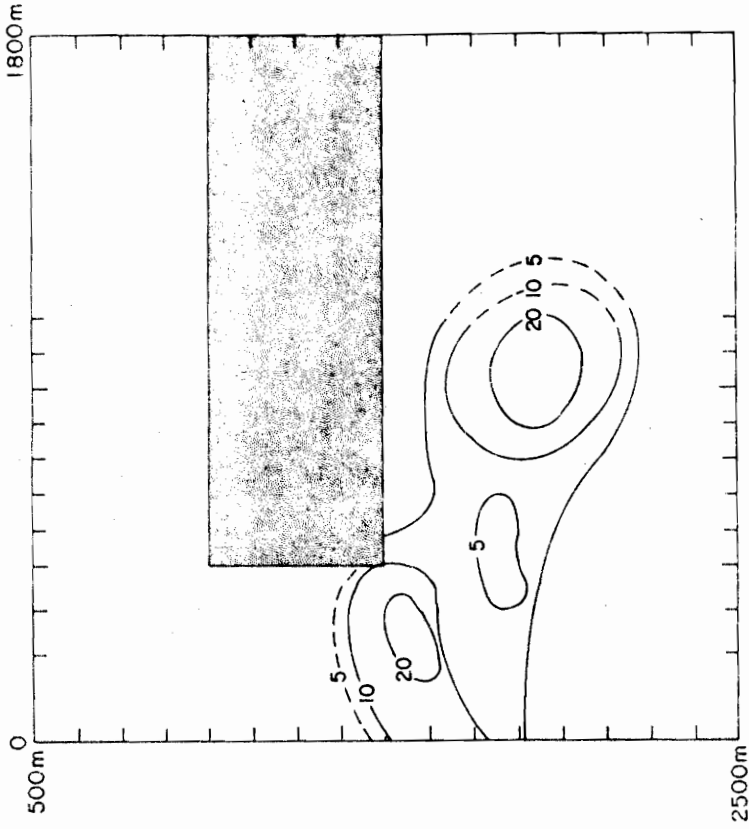
XBL 788-1481

Mynd 9 Hitastig og varmainnihaldsstreymi við miðju niðurdráttar í neðra kerfinu.



XBL 788-1486

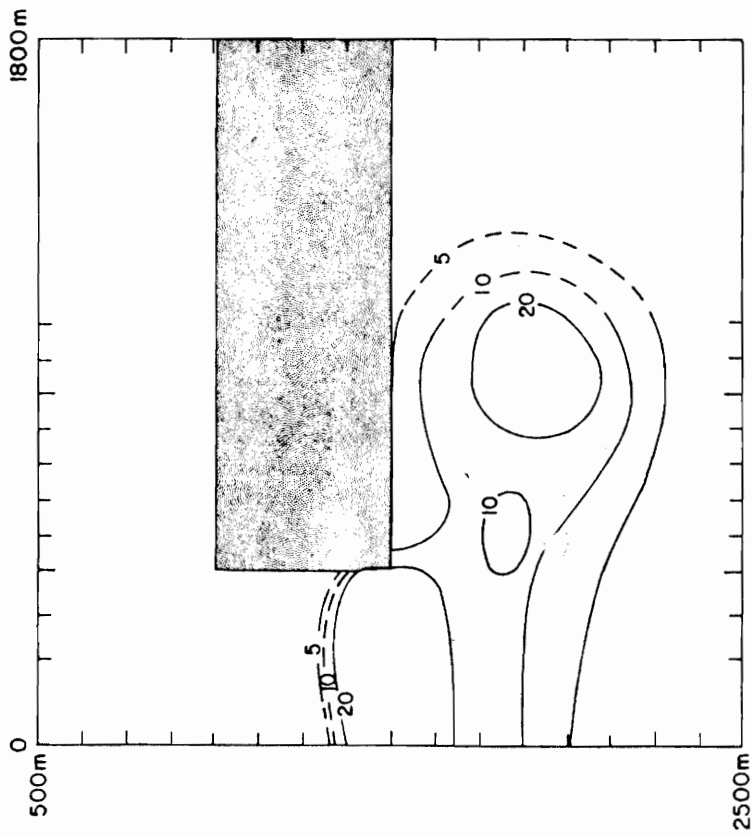
Mynd 10 Gufumettun (prósentvís) eftir 2 1/4 ára stöðuga framleiðslu við  $m = 50$  kg/s.



XBL 788-1488

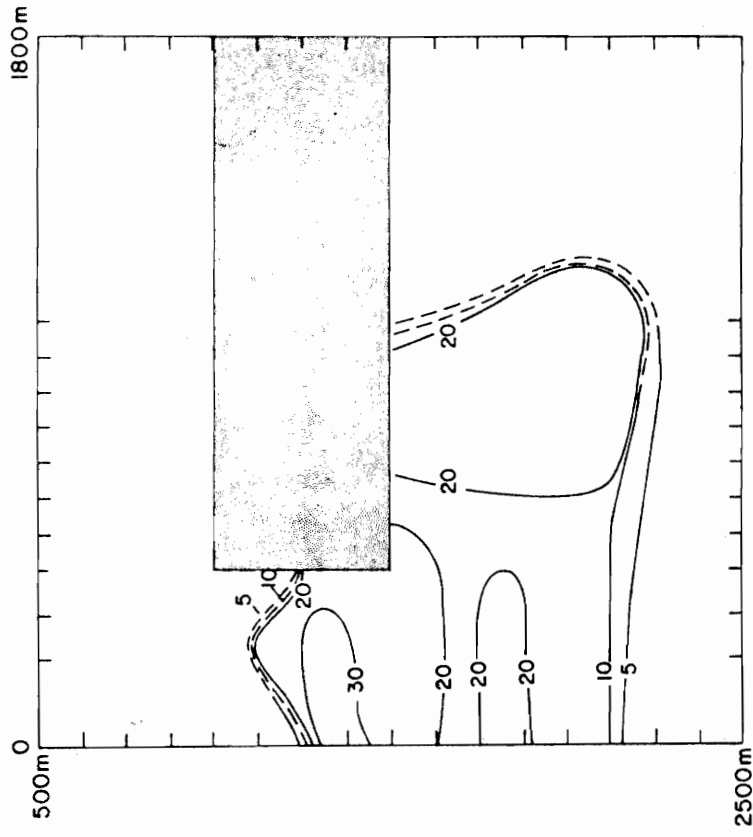
Mynd 11 Gufumettun (prósentvís) eftir 7 1/2 ára stöðuga framleiðslu við  $m = 50$  kg/s.





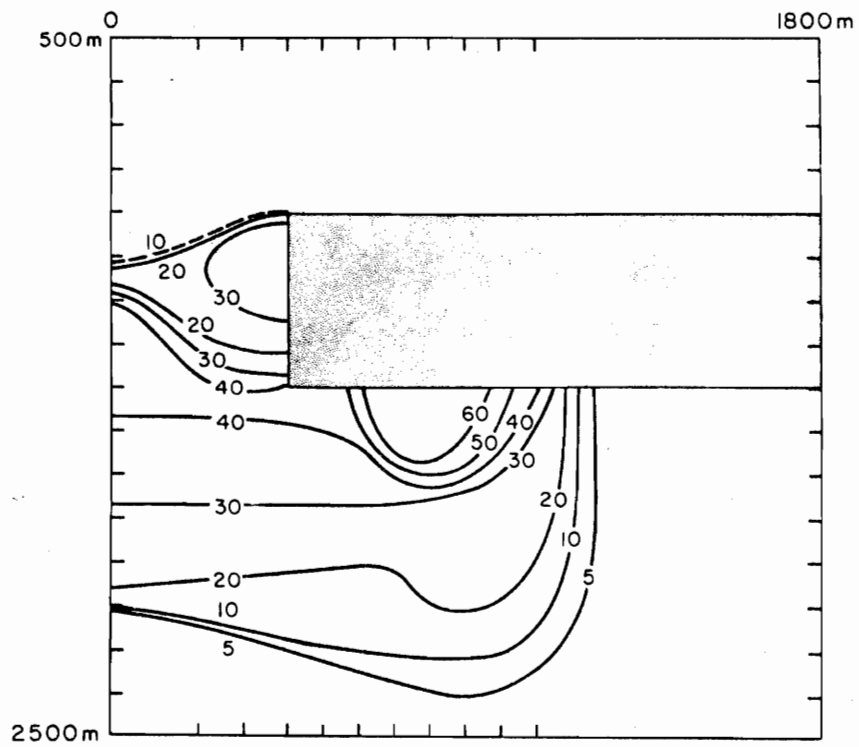
XBL 788-1485

Mynd 12 Gufumettun (prósentvís) eftir 11 3/4 ára stöðuga framleiðslu við  $m = 50 \text{ kg/s}$ .



XBL 788-1487

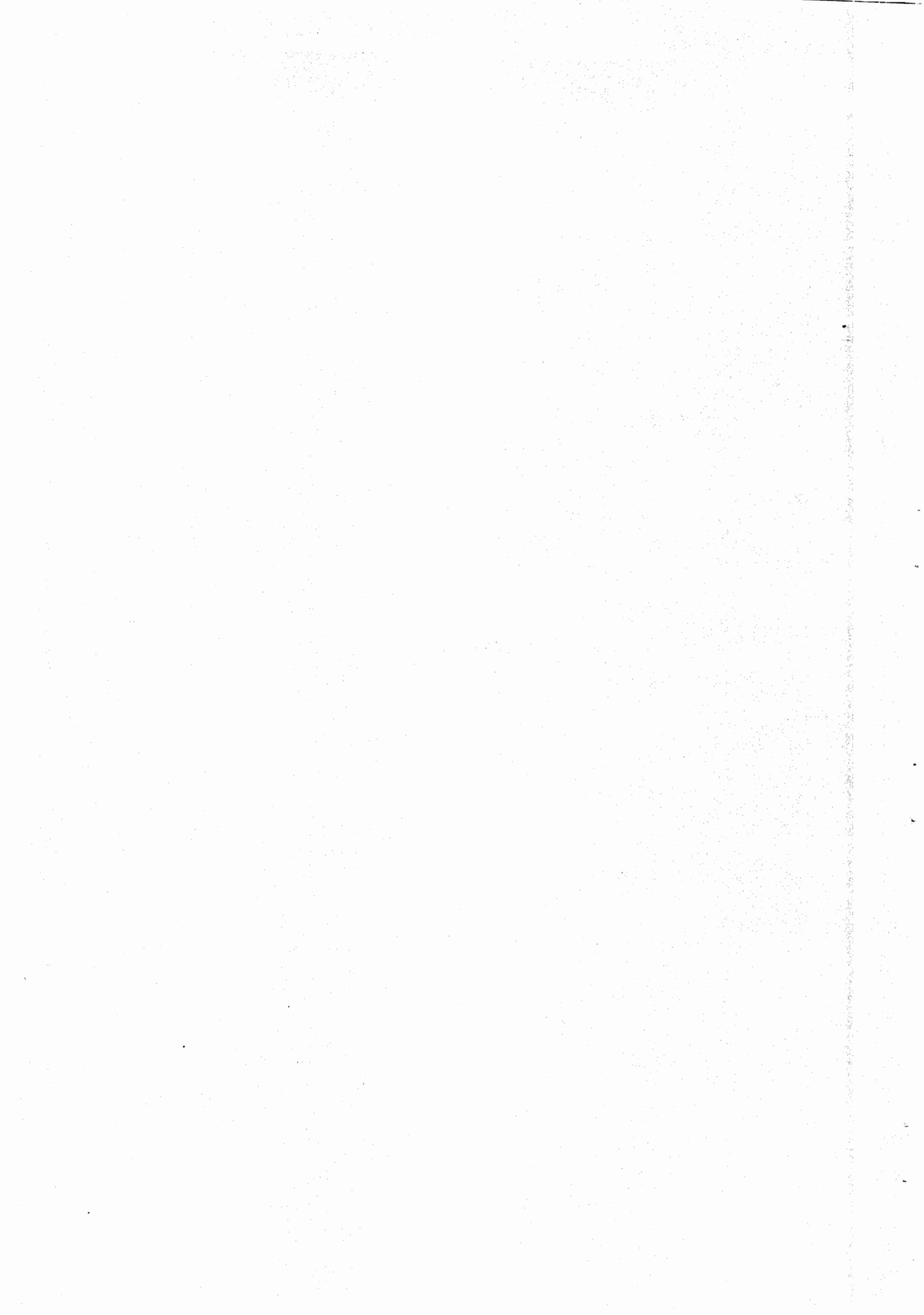
Mynd 13 Gufumettun (prósentvís) eftir 20 ára stöðuga framleiðslu við  $m = 50 \text{ kg/s}$ .



XBL 788-1480

Mynd 14 Gufumettun (prósentvís) eftir 33 1/3 ára stöðuga framleiðslu við  $m = 50 \text{ kg/s}$ .

UMRÉDUR



TWO-PHASE FLOW MODEL: HJR

SB: You have dealt in great detail with the problems you have in the low quality region. In our geothermal work we are dealing with higher quality normally and the problems there are perhaps less difficult. There has been the trend for practicing engineers when they see all these theoretical equations to shy away and start inventing their own empirical correlations.

HJR: But in the high quality regions you should not have that many difficulties because then you can probably with rather good approximation use the homogeneous flow model and you might be off by only 30% which is in many cases, at least in two-phase flow, a sufficient accuracy.

SB: It seems that for most of these empirical correlations people are using data from 20 years back. Is there much progress being made in this area.

HJR: That is why we originally started this work I was describing all the correlations were developed around 1962-1965 and since then little has been done. Many of these models were not very appropriate, so we wanted to understand from a physical basis a little better what is really going on rather than just doing new experiments and then introducing a magic figure into the homogeneous model and say "This is now the answer". For instance, if we look at the James model, he just has the pressure to the power 1.12 and you ask then "Where does that come from?". The answer is "It just fits the data", which is not satisfying.

OB: Does this model apply to vertical pipes?.

HJR: Yes, we have done some predictions recently in a vertical pipe, which is probably a similar geometry to what you have in a geothermal borehole. We had a geometry like that. The pipe diameter

was 750 mm with a vertical downward flow. In this case you might have difficulties at low quality. If the flow rate is very small the bubbles may be stagnant. In high mass flow rates we were able to predict the mass flow rate within about 5%.

OB: What about the gravity term, was it very small?

HJR: The gravity term in these cases was small because the total pressure drops were about 50 bar to environment, in an approximately 10 m long pipe.

OB: So, which term is more important, the gravity term or the inertia term?

HJR: The inertia term in the cases we studied; the gravity term is important in geothermal boreholes.

OB: What about surface tension?

HJR: Surface tension is only important when you start from saturated water with small bubbles. For a small bubble, e.g. if you have a micron bubble, the pressure difference between the inside and the outside is about one bar due to surface tension. So you have to superheat your water in order to get evaporation due to this pressure difference.

SPK: I would like your explanation to what may be a silly question. You are using two momentum equations, and taking into account the interfacial forces between the phases. Why do you do this instead of using just one equation and using the two-phase flow multiplier.

HJR: The two-phase flow multiplier gives me only the friction factor and thus the friction pressure drop.

SPK: Yes, but the interfacial force cancels out if you add momentum equations together.

HJR: I use the two momentum equations because I want to calculate the velocities of both phases. I cannot do that if I have only one momentum equation. If the bubble moves relative to the liquid it is due to an accelerating force which is just the interfacial force. Therefore I have to write these two momentum equations.

SPK: Do you mean that if you use only one momentum equation, you have gone back to the homogeneous model?

HJR: Yes. I can only get an integrated value for the main flux. That is the main reason for the whole approach. We have to know the interfacial forces to calculate the different velocities and we have to know the heat transfer between the two phases in order to calculate the evaporation rate.

OB: The transition from bubble flow to churn-turbulent flow, is that automatic in your program?

HJR: Yes. It is very simple. As soon as the void fraction exceeds 0.3, we say GO TO the churn-turbulent flow regime and take everything with you what you know.

OB: Is it good enough and why did you pick 0.3?

HJR: It obviously is good enough. We picked 0.3 from experience. The void fraction is normally 0.25-0.3 when bubble flow ceases depending on the situation.

JM: Is your model based on adiabatic flow, is there any heat flux through the pipe wall?

HJR: There is no heat flux through the wall. There is no problem to change that as long as you know the heat flux.

AFLFERLAR OG TVEGGJA FASA RENNSLI Í BORHOLUM: GKH

TVÍFASA RENNSLI Í BORHOLUM: ÞK

VJK: Þessir stuðlar, C og f, sem þú valdir, voru þeir valdir með það í huga, að niðurstöðurnar yrðu sem bestar.

GKH: Já, stuðullinn C er háður holu og jarðhitasvæði en f er valið.

VKJ: Sem sagt, þú festir þessa tvo stuðla til þess að réttar niðurstöður kæmu út.

GKH: Já.

VKJ: En þú finnur ekki þessa stuðla með einhverjum mælingum og reynir svo að bera þær saman við aðrar mælingar. Þú ert að ákvarða stuðla, svo berðu það saman við sömu mælingarnar. Það er náttúrulega von að það komi vel út.

GKH: Viltu útskýra þetta.

VKJ: Þú ert að festa þarna eitthvað og ert svo hissa á því að þú getir ekki farið með beina línu þar á milli.

GKH: Aflferill er samsettur af mörgum punktum. Reiknaður aflferill getur ekki litið út hvernig sem er með því einu að breyta viðnámsstuðlinum f og iðustreymisstuðlinum C. Ef þú hefur rangt mól getur þú ekki fittað það að mældum aflferli, sama hvernig þú breytir stuðlinum f og C. Stuðullinn C getum við ákvarðað með mælingum á holunni.

SPK: Stundum ert þú, Gísli, með bæði aflferil og þrýstiferil í blásandi holu sem þú getur þá borið saman við.

GKH: Jú, jú.

VKJ: En getur þú svo ekki farið frá einni holu yfir á aðra og notað sömu stuðla?



GKH: Nei, nei. Stuðullinn C er breytilegur eftir holum. Stuðullinn C er hægt að ákvarða í einni ákveðinni holu með þrýstimælingum í botni, síðan er holunni hleypt í gos. Þá finnur þú hvernig botnþrýstingurinn breytist eftir því hvað rennur mikið úr holunni.

VKJ: Þú ert með tvo parametra, friction stuðul, sem þú gefur konstant gildi og tiltölulega hátt og stundum ansi lágt, það fer eftir því hvaða holu þú ert að máta, svo ég get ekki séð tilgang líkansins. Yfirleitt eiga líkön að vera þannig uppbyggð að þau eiga að geta spáð fyrirfram, en þetta líkan getur það ekki.

GKH: Við getum ákvarðað lágmarks  $f$ -gildið út frá Reynolds-tölunni, eða hrjúfleika pípunnar, það er ekkert mál að setja það inn. En iðustreymisstuðullinn C verðum við að finna með mælingum í holunni sjálfri. En frictions-faktorinn  $f$ , er hægt að ákvarða úr frá dýagrómum eða empirískum formúlum.

VKJ: Gerir þú það?

GKH: Nei, ég gerði það ekki í fyrstu tilraun. Enda er þetta í þróun og því eðlilegt framhald að ákvarða  $f$  úr frá Reynolds-tölunni.

VKJ: Var það ekki gert í neinu af þessum tilfellum?

GKH: Nei, það var ekki gert, það var neglt fast.

VKJ: Óháð streyminu?

GKH: Svo var það borið saman við Moody-díagramið?

VKJ: Hvernig kom það út?

GKH: Það var inn á Moody-díagraminu.

JE: Það var eitt, Gísli, sem ég veit að þú gerðir, en talaðir ekki um. Þú athugaðir áhrif þrenginga á streymið og barst það lítillega saman við það að breyta friktions-faktorinum. Vildir þú ekki

segja okkur í stuttu máli frá því hvernig það að reikna með þrengingum í holu bar saman við þær breytingar.

GKH: Með því að breyta þvermáli holunnar á einhverjum stað eða gera ráð fyrir t.d. útfellingum á ákveðnum stað, það hefur miklu kröftugri áhrif en nokkurn tíma friktions faktorinn. Ef þú reiknar út aflferil fyrir ákveðna holu, t.d. holu 2 í Kröflu, þá verður aflferillinn svona. Ef ég geri ráð fyrir að það sé þrenging, t.d. á 700 m dýpi, að það sé útfelling þar og þvermálið minnki all verulega, þá verður reiknaður aflferill allt annar. Þá fáum við feril sem liggur langt fyrir neðan, hann byrjar svona upp og beygir síðan all snögglega af og verður flatur.

JE: Er þá ekki hægt að segja í framhaldi af þessu, að litlar þrengingar í holu geta haft svipuð áhrif og breytingar á  $f'$ inu?

GKH: Dítiameterinn í holunni er miklu meiri áhrifavaldur á þrýstifallið. Þrýstifallið er háð dítiameterinum í 5. veldi. En friktions faktorinn kemur línulega inn í þrýstifallið, þannig að þetta er alveg gjörólíkt.

JE: Ég veit ekki hvort við skiljum hvorn annan. Ég meinti litlar þrengingar á stuttum kafla.

GKH: Það skiptir ekki máli hvort það er stuttur kafla eða langur, þrýstifallið er línulegt með lengingunni en í 5. veldi við dítiameterinn á þessum kafla.

JE: En ef þú ert með litla þrengingu á stuttum kafla, er þægilegt að greina það frá breytingum á friktions faktor?

GKH: Þarna er tvennt. Hvort það er þrengingin sjálf, vegna þess að dítiameterinn minnkar, en svolftil útfelling á ákveðnum stað, hún veldur því að hrjúflekinn, sem slíkur, vex og þá vex  $f'$ íð.

JE: Verður þá ekki erfitt að ákveða friktions faktorinn út frá einhverjum Reynolds-tölum.

GKH: Við getum ekki notað díagram ef einhverjar útfellingar eiga sér stað í pípunni.

IJ: Kemur ekki eitt enn til þess að brengla myndina, það er þegar við höfum raufaða leiðara frá upphafi til enda, kemur það ekki út sem miklu hrjúfari pípa í viðnámsútreikningum.

GKH: Ef við skoðum hvenig friktions faktorinn  $f$  er ákveðinn út frá Reynolds-tölunni, þá sjáum við að í hrjúfum borholum er hann óháður Reynolds-tölunni en beint háður hrjúfleikanum.

JM: Hefur það verið kannað hvernig væri hægt að umhanna eða breyta borholum með þessu verkfæri, til þess að fá sem mest upp úr þeim fyrir sem minnsta peninga. T.d. fleiri fóðrunardíametra eða breytta hönnun á holutopp og annað þess háttar.

GKH: Það er einmitt eðlilegt framhald af þessu. Þetta er bara byrjunin. Það á eftir að þróa þessi módel og það er síðan eðlilegt framhald að nota þetta í hönnun.

JM: Er nokkur einn liður öðrum sterkari þarna, þannig að það þyrfti kannski litlar breytingar einhvers staðar til að holurnar gætu gefið verulega meira.

GKH: Það er t.d. holutoppurinn sem hefur 90 gráðu horn. Það er trúlega mikið þrýstifall í beygjunni. Með því að hafa aflíðandi beygju þar, þá mundu afköst holunnar eflaust aukast.

JM: Hafið þið reynt að mæla þetta þrýstifall?

GKH: Holutoppurinn er alls ekki með í programinu. Það yrði hins vegar hliðstæð stúdía.

DK: Eitt sem vakti fyrir mér, þegar ég byrjaði á þessu, var að meta þessi áhrif, hvað gerðist ef við förum í víðari pípur. Það er hægt að áætla kostnaðarauka við borun víðari holu, þar með kostnaðarauka vegna víðari fóðringar. Hvað gefur svo holan miklu meira? Það ætti að liggja beint við að nota svona líkan til þess að reyna að meta þetta.

JARÐHITAKERFIÐ VIÐ KRÖFLU: VS

VARMA- OG MASSASTREYMI Í BERGI: VKJ

SB: Ég ætla nú að víkja að erindi Valdimars og óska honum til hamingju með þessar skemmtilegu niðurstöður. Svona líkan er náttúrulega stórkostlegt hjálpartaki. Það væri æskilegt að Valdimar færi að koma því smám saman heim, þegar hann fer næst vestur.

VKJ: Við þurfum að fá stærri tölvu.

SB: Því hlýtur að mega bjarga einhvern veginn. Það hefur ekki verið mikill tími til að skoða niðurstöðurnar eða ræða þær, en ég vildi fyrst nefna seinni líkanreikningana, sem ná til lengri tíma. Þeir eru, ég verð að segja, mjög líklegir miðað við það, sem menn mundu halda almennt um svæðið. Nú er það þannig, að svona líkön eru aldrei betri en þau gögn, sem menn geta sett inn og þess vegna höfum við vissa tilfinningu fyrir því, hvað ætti að koma út. Þessir líkanreikningar fyrir langan tíma sýna mjög sennilega niðurstöðu. Tillaga til endurbóta væri þó, að byrja með aðeins aðrar byrjunarforsendur. Þú byrjar með því að gera ráð fyrir að í neðra kerfinu sé allt á suðumarksferli, en þar sé engin gufa. Ég held, hinsvegar, að það sé enginn vafi, að suðumarksferill er ekki til í bergi, nema að suða sé byrjuð. Hann verður til neðan frá, en ekki ofan frá. Hann verður til þannig, að vatnið sem streymir upp, fer í suðu og þá myndast gufa. Hún stígur upp og framkallar suðu ofar. Þannig kemst jafnvægi á. Suðumarksferill er ekkert annað en vitnisburður um það, að suða og uppstreymi eru í svæðinu. Þess vegna væri fróðlegt að reikna dæmið aftur og gera ráð fyrir því að vatnsstraumur komi að neðan, ekki enn í suðu. Líkanreikningurinn héldi svo áfram þangað til þú ert búinn að fá fram suðumarksferilinn, og gufuprósentur á mismunandi dýpi. Í töflunni sem Valgaður var með, hefur verið áætlað, hver þessi gufuprósentu ætti að vera. Hún verður ekki há, vegna þess að gufan fer á undan vatninu upp. En það er búist við að hún liggi á milli 10 og 20 prósent, þ.e. rúm-málshluti gufunnar áður en vinnsla úr svæðinu byrjar. Við sáum einmitt hvað gerist þegar þú ferð að taka úr borholunni. Þá kemur

strax fram suða í uppstreymisrásinni. Þessi suða held ég að sé nefnilega fyrir hendi af náttúrulegum ástæðum, áður en að vinnslan byrjar, eins og ýmislegt bendir til í rannsókn Kröflusvæðisins. Vinnslan mundi væntanlega herða á þessari suðu. Hversu hratt suðan gengur þá fyrir sig, er erfitt að meta.

Um hitt líkanið, má segja það gagnstæða. Það er augljóst, að það stenst ekki. Við skulum bara taka sem dæmi, erindin sem voru flutt hérna áðan. Þar var verið að tala um þrýstifall upp eftir borholum. Við vitum að það er lítið þrýstifall upp eftir holunni, þegar við erum með hreina gufu í henni. Ef streymi inn í borholur hér væri orðið yfirhitið gufa eftir 200 klst við 100 bör ættu þessar holur að sýna okkur 90 bör á toppi, sem þær gera ekki. Við vitum, hins vegar, að á svona svæði með suðu í bergi fáum við um langan tíma vatn og gufu. Mér sýnist munurinn á náttúrunni og líkaninu vera sá, að það tekur langtum lengri tíma að framkalla þessa gufu-prósentu, hver svo sem ástæðan er. Mér sýnist t.d. að ferlarnir, sem þú ert með, líkist grunsamlega mikið ferlunum sem prófessor Richter var með, frjálst útstreymi út í lofttóm. Þá er spurningin, tekur prógrammið tillit til þess þrýstings, sem er í holunni, eða er þetta spurning um eðlisparametra? Ég er ekki viss um að það sé hægt að ná þetta miklum mun á náttúrunni og líkaninu með því að breyta smávægilegu í eðlisparametrum. Frekar að þetta standi á einhvern hátt í sambandi við líkingarnar, eða jafnvel bara skekkju í einhverjum parameter. Í blæstri sýna þessar holur svona 10 bör, en þær eru samt ekki með neina yfirhitaða gufu. Þær eru með svona 50-60% gufu. Um þetta höfum við dæmi frá Kröflu, ítalskar holur og afrískar holur.

VKJ: Hvað er gufuhlutfallið í holu 12?

VS: Það er 100%.

SB: Jú, það er til ein hola núna, við vitum hins vegar ekki hvaða byrjunaraðstæður hún byrjar við, en ef þú tekur allar hinar, sem hafa blásið lengi, þá eru þær ekki með 100% gufu.

VKJ: Ég vildi gjarnan svara þessu. Þetta er líka eina holan sem er fóðruð svona langt niður. Allar hinar hafa tækifæri til þess að leka inn kaldari vatni ofar.

SB: Við skulum ekki binda það við Kröflu.

VKJ: Fyrstu tvö atriðin. Ég prófaði byrjunarskilyrði sem var kannski 5% rúmmál gufu, til að byrja með, og líka undirkælt, og þetta hefur voðalega lítið að segja. Eins og kom fram þá var þetta tiltölulega fljótt komið upp í 0,5%, svo þegar við lítum á 30 ár, þá er þetta alveg hverfandi hvað þú byrjar með. Ég held að þessi svörun eftir árið, þá skiptir engu máli hvort þú ert með undirkælt, lítið eitt, eða með gufu, að einhverju marki. Það ætti að gefa eiginlega sama svar skv. þessu líkani sem notað er. Svo er það hitt, með þrýstifallið, að ég hefði kannski átt að segja það, að þetta er ekki þrýstifallið yfir í borholuna sjálfa, heldur að fyrstu sellunni utan um holuna. Þá á eftir að taka þrýstifallið frá fyrstu sellunni og yfir í borholuna, sem er lang lang mest.

SB: En í fyrstu sellu ert þú strax kominn með yfirhitaða gufu, þá hitnar gufan ekki mikið eftir það.

VKJ: Já, en þrengingin er orðin svo mikil. Ég á eftir að fara frá hálfum meter niður í núll. Á mjög þröngu flatarmáli þá getur þrýstingurinn verið annað eins í restina. Þó svo við séum komnir í fyrstu sellunni í berginu niður í 90 bar, frá 140 í 50, þá getum við verið komnir þaðan og niður í 10 bar. En þetta líkan getur ekki reiknað það þrýstifall í borholum. Það sem þarf að gera er að tengja tvö líkön saman. Það þarf að tengja uppstreymi í borholu, eins og sýnt var t.d. í fyrri erindunum, og þetta líkan, með einhverjum drifkrafti, frá fyrstu sellunni og yfir í borholuna. Það er þá fyrst að við getum farið að stýra með þrýstingnum á holutoppnum. En það má líka bæta við. Hvað er þrýstingurinn ef maður lokar skyndilega fyrir holuna? Það mundi vera sá þrýstingur sem er niðri. Hvað er t.d. lokunarþrýstingurinn á 12?

BS: Úr holu 12 í Kröflu kemur nokkurn veginn þurr gufa. Rennsli er 1 ml af vatni á móti 10 kg af gufu á sekúndu, og þrýstingur á topp er 7 bör, þrýstingur á 1700 m, þar sem meginæðin er ca. 7-8 bör. Ef holunni er lokað býst ég við að þrýstingur fari í 60-100 bör á toppi.

VKJ: Það er það sem er í fyrstu sellunni.

BS: Það gæti verið það.

JE: Það er eitt sem mig langar að spyrja um. Það eru þessar Darcy-líkingar ...

VKJ: Ég veit alveg hvað þú ætlar að spyrja um.

JE: Svaraður því þá.

VKJ: Ég hef nú alltaf sagt það, Jónas, að þú værir furðulegur kvistur. Spurningin hans Jónasar er þessi: Why should we in the Darcy equation multiply the vapor equation by  $\rho$ -vapor and by  $\rho$ -liquid but not with  $\rho$ -fluid or a coefficient which would give a density which lies somewhere between those two. Er það ekki spurningin?

SPK: Where is the shear force between the two phases?

VKJ: In flow in porous medium, the velocity is so low that the shear force between them will be of very little influence. But I think, actually, that this here is may be not the exact form.

JE: Professor Richter, have you thought about that in these equations everywhere where you have a delta-p or a pressure gradient, lower than  $\rho$  liquid times g, then the only possible solution is that the liquid and gas phases are flowing in oppsite directions.

HJR: Yes, if I understand your question correctly, that is how it should be if we neglect interfacial forces.

JE: Then tell me something: How does an ordinary coffee percolator work? You have modelled an ordinary coffee percolator out of existence.

HJR: What you do here is to write two separate equations. Let's add these two equations together. What you get in here is  $\rho$ -vapor minus  $\rho$ -liquid times  $g$  which is gravity force, which gives you the driving force.

JE: But if you have the equations separated in the percolator tube, then the water is flowing down and the steam is flowing up.

HJR: Then you need an interfacial force in there. In permeable rocks I think some other forces, like adhesion forces and capillary forces come into play, which we don't include normally.

JE: But why don't you have it in permeable rock if you have it in a percolator?

HJR: In the coffee percolator you have a pipe but not a porous material.

VKJ: Jónas, if you have a porous plug in your percolator, you would not get the percolation, you would never get your coffee.

JE: We have observed in many geothermal fields that we are getting liquid to the surface with vapor at a pressure gradient that is lower than the pressure gradient for water alone.

HJR: Let's look at a wall with liquid running down and gas flowing up. You can see that at certain gas velocity you get this liquid up.

VKJ: Which means you must have a fractured rock, but not a porous medium.

JE: I would very much like to see some equations for this that are based just on this principle.



HJR: I think you can find those equations in the chemical engineering literature.

GKH: Er fjarlægð suðufronts frá borholu og fjarlægð gufufronts, er það óháð relative permeability.

VKJ: Jú, innan nákvæmismarka. Þetta kom mér á óvart, en svo fór maður að velta þessu betur fyrir sér og hvað er það sem færir þessa fronta. Þetta er orðin hrein gufa á einum stað, svo relative permeability er 1 fyrir gufunar 0 og vatnsins 1, þannig að þetta er óháð þeirri dreifingu sem þú hefur þar á milli. Frontarnir færast eftir raun-permeability bergsins.

SB: Hvað sagðir þú að hefði verið rennsli inn í holuna.

VKJ: 16 kg/s.

SB: Á það að vera yfirhitið gufa.

VKJ: Já.

SB: Það er orðin ansi kröftug hola, 50 tonn á klst. Hvaða samband er á milli rennslis og þrýstifalls seinustu metranna inn að holunni. Er þrýstifallið í réttu hlutfalli við rennslið? Ert þú ekki með allt of sterka holu, því holan þín er 3-10 sinnum aflmeiri en venjulegar gufuholur.

VKJ: Ég er ekki endilega með einhverja holu. Ég bara dreg þennan massa úr svæðinu. Þetta er flutningsgeta bergsins með þeim gildum á parametrum sem ég gef mér.

VS: Mig langar að benda á atriði í reikningunum sem e.t.v. gæti gefið skýringar á hvers vegna sumar niðurstöðurnar virðast vera svo fjarri raunveruleikanum. Þú ert með Darcy hraða á massaflutningnum og tekur síðan kritíska hraðann inn í relative permeabilitetið. Það

er spurning hvort þetta er leyfilegt, hvort kritíska flæðið hefur ekki meiri áhrif á massastreymið en kemur fram í þessari aðferð.

VKJ: Já, ér er alveg sammála því, það er spurning hvort Darcy jöfnurnar gildi næst holunni.

## ÞÁTTTAKENDUR

Albert Albertsson	Hitaveita Suðurnesja.
Árni Gunnarsson	Hitaveita Reykjavíkur.
Benedikt S. Steingrímsson	Orkustofnun
Claus Ballzus	Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns.
Geir Þórólfsson	"
Gestur Gíslason	Orkustofnun.
Gísli Karel Halldórsson	"
Guðmundur Karl Guðjónsson	Verkfræðistofa Guðmundar G. Þórarinssonar.
Guðmundur G. Þórarinsson	"
Gunnar Kristinsson	Hitaveita Reykjavíkur.
Hafsteinn Blandon	Verkfræðistofan Kvasir h/f.
Haukur Jóhannesson	Orkustofnun.
Horst J. Richter	Dartmouth College, Hannover, N.H., U.S.A.
Hrefna Kristmannsdóttir	Orkustofnun.
Hreinn Frímansson	Vermir h/f.
Ingólfur Hrólffsson	Verkfræðistofa Suðurlands.
Ingvar Birgir Friðleifsson	Orkustofnun.
Ísleifur Jónsson	Jarðboranir ríkisins.
Jóhannes Zoëga	Hitaveita Reykjavíkur.
Jón Steinar Guðmundsson	Orkustofnun.
Jónas Eliásson	Háskóli Íslands.
Jónas Matthíasson	Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns.
Karl Ragnars	Orkustofnun.
Kristín Vala Ragnarsdóttir	Jarðfræðinemi.
Laufey Hannesdóttir	Orkustofnun.
Margrét Kjartansdóttir	"
Matthías Matthíasson	Vermir h/f.
Oddur Björnsson	Fjarhitun h/f.
Ómar Sigurðsson	Orkustofnun.
Ragna Karlsdóttir	"
Sigurður Sigfússon	Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen.
Snorri Páll Kjaran	Straumfræðistöð Orkustofnunar.
Stefán Arnórsson	Háskóli Íslands.
Sveinbjörn Björnsson	"
Sverrir Þórhallsson	Orkustofnun.
Sæþór L. Jónsson	"
Trausti Hauksson	"
Valdimar K. Jónsson	Háskóli Íslands.
Valgarður Stefánsson	Orkustofnun.
Þorbjörn Karlsson	Háskóli Íslands.