

ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

RENNSLISEIGINLEIKAR EFRA JARÐHITAKERFISINS Í KRÖFLU

Ómar Sigurðsson

OS JHD 7851

Nóvember 1978



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

RENNSLISEIGINLEIKAR EFRA JARÐHITAKERFISINS Í KRÖFLU

Ómar Sigurðsson

OS JHD 7851

Nóvember 1978

Efnisyfirlit

1.	Inngangur	1
2.	Þrýstingur í borholum	2
3.1	Þrýstingshækkun í borholum	3
3.2	Skinn áhrif	3
3.3	Nýtni borholu	4
4.1	Þrýstifall í borholum	5
4.2	"Transient" aðferðir	6
4.3	"Síð-transíent" aðferðir	6
4.4	"Semi-steady" aðferðir	8
5.	Áhrif milli borhola (Interference)	8
6.	Einstakar holur	10
6.1	Hola KG-5	10
6.2	Hola KG-8	12
6.3	Hola KJ-9	13
7.	Lokaorð	15

Töflur

I	Vatnsborðsmælingar holu KG-5	16
II	Þrýstiprófun holu KG-8	17
III	Þrýstiprófun holu KJ-9	17
	Tákn og Einingar	18
	Heimildir	20

Myndaskrá

F	Heiti
16889	Krafla hola KG-5, þrýstifall eftir eldgos 8. sept. 1977
16888	Krafla hola KG-5, þrýstifall í des. 1977
16890	Krafla hola KG-5, þrýstifall eftir kvikuhlaup 7. jan. 1978
16893	Krafla hola KG-5, sept. 1977
16892	Krafla hola KG-5, des. 1977
16891	Krafla hola KG-5, jan. - mars 1978
16769	Krafla hola KG-8, log-log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingslökkun
16767	Krafla hola KG-8, log-log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingshækkun
16775	Krafla hola KG-8, Hornergraf fyrir þrýstingsmælingu
16768	Krafla hola KG-8, log-log mæligraf fyrir þrýstingshækkun
16776	Krafla hola KG-8, log-log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingshækkun (skv. McKinley)
16773	Krafla hola KJ-9, log-log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingslökkun
16772	Krafla hola KJ-9, log-log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingshækkun
16774	Krafla hola KJ-9, Hornergraf fyrir þrýstingsmælingu.
16770	Krafla hola KJ-9, log-log mæligraf fyrir þrýstingshækkun
16771	Krafla hola KJ-9, log-log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingshækkun (skv. McKinley)

1. Inngangur

Í þessu riti eru kynntar jöfnur og úrvinnsluaðferðir á þrýstimælingum eins og eru notaðar í olíuiðnaðinum. Í erlendum ritum sem fjalla um þessi mál eru notuð mismunandi einingarkerfi sem við eigum ekki að venjast. Veldur þetta nokkrum ruglingi.

Oft er notað svo kallað Darcy-einingarkerfi (Darcy-Units) en oftast eru notaðar einingar sem eru algengar innan olíuiðnaðarins (Practical Oilfield Units) en öðrum einingarkerfum bregður einnig fyrir. Hér verður reynt að nota sem mest MKS-einingar. Nokkrar stærðir er algengara að vinna með í öðrum einingarkerfum eins og t.d. seigju og vatnsleiðni og verður í þeim tilvikum gripið til Darcy-einingarkerfisins. Það sem hér er notað mætti því kalla MKS-Darcy-einingarkerfi (MKS-D).

Þrýstimælingar fyrir holur KG-8 og KJ-9 við Kröflu eru hér endurtúlk-
aðar, auk þess sem notaðar eru fleiri aðferðir við túlkun þeirra.
Þá er reynt að fá mat á k.b margfeldið með því að athuga vatnsborðs-
breytingar í holu KG-5, sem verða vegna nálægðar eldvirkni og eins
vegna áhrifa frá vinnslu nærliggjandi borhola.
Talið er að fyrir nefndar holur lýsi aðallega eiginleikum efra jarð-
hitakerfisins í Kröflu og verða því niðurstöðurnar að mestu bundnar
við það.

2. Þrýstingur í borholum

Sýnt hefur verið fram á (heimild 1) að fyrir óendanlegan vatnsleiðara sem inniheldur vökva með ákveðni samþjöppun og ef $u < 0,01$ í holufallinu $W(u)$ megi finna lausn á rennslisjöfnunni á forminu

$$P'' = P_0 + \frac{M \mu}{4\pi k b \rho} \ln \left(\frac{\phi \mu c r^2}{4 k t} \right) \quad (1)$$

eða

$$P'' = P_0 - \frac{M \mu}{4\pi k b \rho} \left[\ln \frac{k t}{\phi \mu c r^2} + 0,80907 \right] \quad (1a)$$

Í jöfnu (1a) er ekki gert ráð fyrir þrýstitapi sem getur orðið í borholuveggjunum. P'' og P_0 eru mældir á sama stað í holunni, neðan vatnsleiðara. Skýringar á táknum og einingum þeirra eru teknar saman aftan við lesmál.

Oft er þægilegt að vinna með einingarlausar stærðir. Þannig verður tímaháði hlutinn í jöfnu (1a) að

$$t_D = \frac{k t}{\phi \mu c r^2}$$

og í hentugum einingum verður hann að

$$t_D = 0,987 \times 10^{-4} \frac{k t}{\phi \mu c r^2} \quad (\text{MKS-D}) \quad (2)$$

Margföldunarliðurinn í jöfnu (1a) $\frac{M \mu}{4\pi k b \rho}$ verður í hentugum einingum að

$$806,3 \cdot \frac{M \mu}{k b \rho} \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D})$$

Með þessum breytingum verður jafna (1a) að

$$P_0 - P'' = \frac{1856,4 M \mu}{k b \rho} \left[\log \frac{0,987 \cdot 10^{-4} k t}{\phi \mu c r^2} + 0,351 \right] [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D})$$

eða

$$P_0 - P'' = \frac{1856,4 M \mu}{k b \rho} \left[\log \frac{k t}{\phi \mu c r^2} - 3,65 \right] [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (3)$$

Jafna (1) er notuð sem grunnjafna til að lýsa þeim þrýstingsbreytingum, sem verða í borholum þegar opnað er fyrir þær til vinnslu eða þeim lokað eftir vinnslu.

3.1 Þrýstingshækkun í borholum.

Sýnt hefur verið fram á (heimild 2) að borhola í óendanlegum vatnsleiðara sem hefur haft massaflæði M í nokkurn tíma t , sýnir þrýstingsbreytingu eftir að hafa verið lokað um tímann Δt samkvæmt

$$P' = P_0 - \frac{M \mu}{4\pi k b \rho} \ln \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (4)$$

Í hentugum einingum verður jafna (4) að

$$P' = P_0 - \frac{1856,4 M \mu}{k b \rho} \log \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (5)$$

Samkvæmt jöfnu (5) verður graf (Horner graf), þar sem P' er teiknað á móti logaritmanum af tímahlutfallinu $\left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right)$ bein lína.

Halli þeirrar línu yfir eina logaritmalotu er

$$\Delta P = \frac{1856,4 M \mu}{k b \rho} \quad [\text{bar/lotu}] \quad (\text{MKS-D})$$

svo

$$kb = \frac{1856,4 M \mu}{\Delta P \rho} \quad [\text{darcy-m}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (6)$$

eða

$$kb = \frac{1.832 \cdot 10^{-9} M \mu}{\Delta P \rho} \quad [\text{m}^3] \quad (\text{MKS}) \quad (6a)$$

Framlenging þessarar línu til $\frac{t + \Delta t}{\Delta t} = 1$ ($\Delta t \rightarrow \infty$) gefur þrýstinginn P^* , en fyrir einleitan og ótruflaðan vatnsleiðara er P^* jafnt upphafsþrýstingi kerfisins. Almennt er P^* nokkuð hærri en meðal þrýstingur kerfisins á áhrifasvæði borholunnar.

3.2 Skinn áhrif

Oft hefur vatnsleiðni jarðmyndana breytst næst borholunni vegna borunarinnar og frágangs á borholunni. Oftast er þetta minnkun á vatnsleiðninni t.d. vegna þess að borsyarf fer út í vatnsæðar, borhola sker vatnsleiðara aðeins að hluta, útfellingar í borholu o.m.fl. Þessara áhrifa gætir aðeins skammt út í vatnsleiðarann og hafa þau því ekki veruleg áhrif á þrýstingsástand vatnsleiðarans í nokkurri fjarlægð frá holunni. Hægt er að líta á þessi áhrif sem aukið þrýstifall ΔP_{SKINN} , sem er í réttu hlutfalli við massastreymið M . Svæðið þar sem þessara áhrifa gætir hefur verið kallað "skinn" og áhrifin "skinn áhrif". Skilgreindur hefur verið skinn stuðull (af van Everdingen) sem fasti s , sem tengir þrýstifallið ΔP_{SKINN} í "skinn" svæðinu við einingarlaust hlutfall massastreymis

$$\Delta P_{SKINN} = \left(\frac{M \mu}{2\pi kb \rho} \right) \quad (7)$$

eða

$$\Delta P_{SKINN} = 0.87 s (\Delta P) \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (7a)$$

Í vatns- eða gufuholum er auk þess oft iðustreymi, sem veldur þrýstifalli við holuna. Skrifna má þrýstifall af þess völdum sem $\Delta P_{IDU} = F (M/\rho)^n$. Stuðullinn F og veldisvísinn n er hægt að ákvarða út frá aflmælingu á holunni. Ef þetta er sett í jöfnu (1a) fæst þrýstiástand holunnar eftir vinnslutímann t

$$P'' = P_0 + \frac{M \mu}{4\pi kb \rho} \left[\ln \left(\frac{\gamma \phi \mu c r^2}{4 k t} \right) - 2 s \right] - F \left(\frac{M}{\rho} \right)^n \quad (8)$$

Til að reikna skinn stuðullinn þarf að mæla þrýsting í holunni bæði fyrir og eftir lokun. Með því að draga jöfnu (8) frá jöfnu (4) fæst

$$P' - P'' = - \frac{M \mu}{4\pi kb \rho} \left[\ln \left(\frac{\gamma \phi \mu c r^2 (t + \Delta t)}{4 k t (\Delta t)} \right) - 2s \right] + F \left(\frac{M}{\rho} \right)^n \quad (9)$$

Fyrir lítil Δt miðað við t er $\frac{t + \Delta t}{t} \approx 1$ og með því að velja t.d. $\Delta t = 1$ mín svo $P' = P'_1$ mín er hægt að umskrifa jöfnu (9) í hentugum einingum þannig

$$s = 1.151 \left[\frac{P'_1 \text{ mín} - P''}{\Delta P} - \log \left(\frac{k}{\phi \mu c r^2} \right) + 1.88 - \frac{F(M/\rho)^n}{\Delta P} \right] (\text{MKS-D}) \quad (10)$$

Ef þrýstingshækkunarkúrfan er ekki bein lína eftir 1 mín. lokun er nauðsynlegt að framlengja línulega hluta grafsins aftur á bak. Þetta er nauðsynlegt því jafna (4) gildir aðeins um línulega hluta grafsins.

Síðan má ákvarða virkan radíus borholunnar út frá

$$r_{eff} = r e^{-s} \quad [\text{m}] \quad (\text{MKS}) \quad (11)$$

Af jöfnu (11) sést að ef $s > 0$ er $r_{eff} < r$ sem gefur til kynna tregðu í aðstreymi til holunnar en ef $s < 0$ þá er $r_{eff} > r$ sem gefur til kynna greiðara aðstreymi til holunnar.

3.3 Nýtni borholu.

Oft er þægilegt að hafa einfalt tölulegt mat á ástandi borhola. Í þessum tilgangi hefur svokallað "nýtni hlutfall" (flow efficiency) verið notað. Nýtni hlutfallið er skilgreint sem hlutfallið milli raunverulegrar framleiðslugetu borholu og þeirrar framleiðslugetu ef engin skinn áhrif og ekkert iðustreymi væri til staðar ($s = 0$ og $F = 0$).

Í flestum almennum útreikningum fæst góð nálgun á nýtnihlutfallinu með jöfnunni

$$F.E. = \frac{P^* - P'' - P_{TAP}}{P^* - P''} \quad (12)$$

Réttara væri að nota meðalþrýsting kerfisins \bar{P} í stað P^* , en þar sem P^* kemur bæði fyrir í teljara og nefnara og er auk þess þökkaleg nálgun á \bar{P} skapast lítil skekkja vegna þessa.

4.1. Þrýstifall í borholum

Við úrvinnslu á þrýstifalli með tíma koma mismunandi aðferðir til greina eftir því hvaða hluta þrýstifallsferilsins er verið að athuga. Þannig er talið mögulegt að nota transient aðferðir fyrir rauntíma allt að

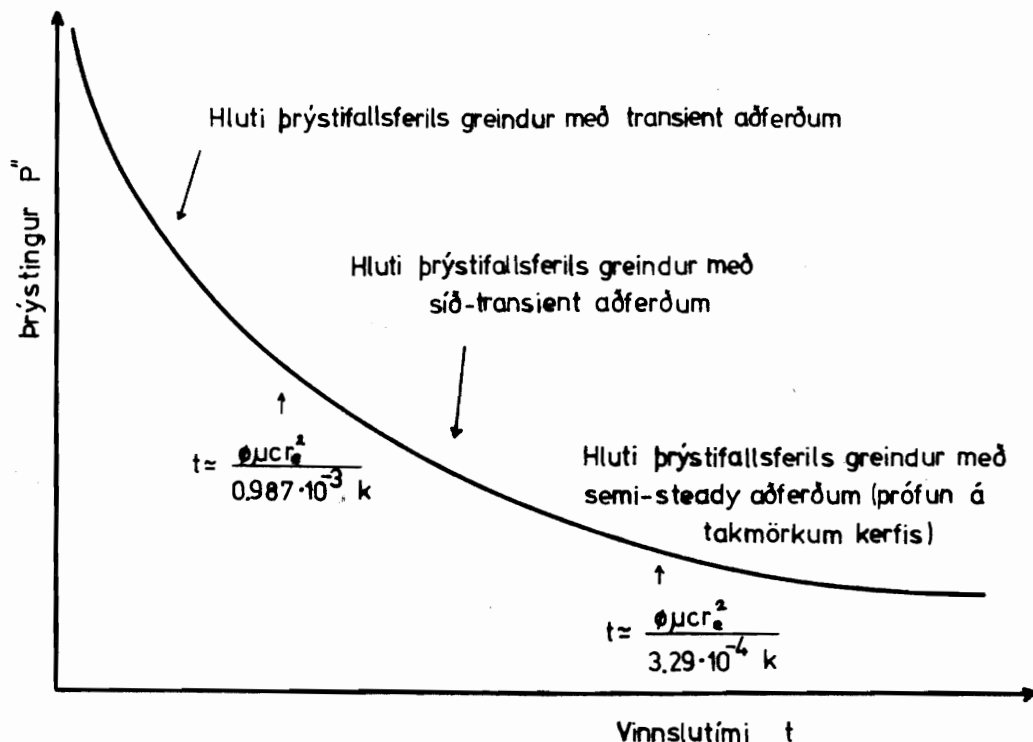
$$t = \frac{\phi \mu c r_e^2}{0,987 \cdot 10^{-3} k} \quad [\text{sek}] \quad (\text{MKS-D})$$

Eftir um það bil þrisvar sinnum lengri tíma er talið að komið sé á "semi steady" ástand eða við

$$t = \frac{\phi \mu c r_e^2}{3,29 \cdot 10^{-4} k} \quad [\text{sek}] \quad (\text{MKS-D})$$

og eru þar notaðar "semi steady" aðferðir.

Tímabilið þarna á milli er kallað "síð-transient" og eru þar notaðar samnefndar aðferðir.



4.2 "Transient aðferðir".

Þrýstingsástandi holu í óendanlegum vatnsleiðara með stöðugu streymi, er hægt að lýsa með jöfnunni

$$P'' = P_0 - \frac{806.3 M \mu}{k b \rho} \left[-Ei \left(-\frac{\phi \mu c r^2}{3.948 \cdot 10^{-4} k t} \right) + 2s \right] - F(M/\rho)^n \text{ [bar] (MKS-D)} \quad (13)$$

Þessi jafna fæst með því að bæta áhrifum skinn stuðulsins og áhrifum iðustreymis við jöfnu þrýstifalls í kjör (ideal) vatnsleiðara. Jafna (13) gildir einnig fyrir fyrsta hluta streymis úr borholu í takmörkuðum vatnsleiðara, áður en takmarkana fer að gæta. Einföldun á jöfnu (13) gefur

$$P'' = P_0 - \frac{1856.4 M \mu}{k b \rho} \left[\log \frac{k t}{\phi \mu c r^2} - 3.65 + 0.87 s \right] - F(M/\rho)^n \text{ [bar] (MKS-D)} \quad (14)$$

Samkvæmt jöfnu (14) verður graf þar sem þrýstingurinn P'' er teiknaður á móti $\log t$ bein lína með hallanum ΔP [bar/lotu].

Svo hægt er að ákvarða $k \cdot b$ skv.

$$k \cdot b = \frac{1.832 \cdot 10^{-9} M \mu}{\Delta P \rho} \text{ [m}^3\text{] (MKS)} \quad (15)$$

Skinn stuðullinn er hægt að ákvarða út frá jöfnu (14) eftir að búið er að ákvarða ΔP og $\Delta P_{IÐU}$.

Stuðullinn verður þá sbr. jöfnu (10)

$$s = 1.151 \left[\frac{P_0 - P''_1 \text{ mín}}{\Delta P} - \log \frac{k}{\phi \mu c r^2} + 1.88 - \frac{F(M/\rho)^n}{\Delta P} \right] \text{ (MKS-D)} \quad (16)$$

4.3. "Síð-transient" aðferðir

Hér er farið líkt að eins og á undan. Bætt er áhrifum skinn stuðulsins við þrýstingsástand borholu sem hefur stöðugt streymi og er takmörkuð af sívalningi. Þá er meðal þrýstingur kerfisins gefinn með

$$\bar{P} = P_0 - \frac{M t}{\pi \phi c b r_e^2 \rho} - F(M/\rho)^n$$

og

$$\hat{P} = \bar{P} - \frac{M \mu}{2\pi k b \rho} \left(\ln \frac{r_e}{r} - \frac{3}{4} + s \right) \quad (17)$$

Þrýstingurinn \hat{P} er fasti ef \bar{P} breytist lítið með tíma ($d\bar{P}/dt \approx 0$) yfir tímabilið. \hat{P} verður síðan einfaldlega P'' þegar þrýstingsbreytingin í holunni hefur náð "semi steady" ástandi.

Þrýstingsástandi borholunnar er svo lýst með jöfnunni

$$P'' - \hat{P} = 0,84 \frac{M \mu}{2\pi k b \rho} e^{-\frac{14.6819 k t}{\phi \mu c r_e^2}} \quad (18)$$

Jöfnu (18) er hægt að umskrifa í hentugum einingum, þannig

$$\log(P'' - \hat{P}) = \log\left(1354,5 \frac{M \mu}{k b \rho}\right) - \frac{6.29 \cdot 10^{-4} k t}{\phi \mu c r_e^2} \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (19)$$

Samkvæmt jöfnu (19) ætti graf þar sem $\log(P'' - \hat{P})$ er teiknaður á móti tímanum t að vera bein lína með hallanum

$$l = \frac{6.29 \cdot 10^{-4} k}{\phi \mu c r_e^2} \quad [\text{sek}^{-1}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (20)$$

og skurðpunkt við þrýstingsásinn

$$L = \frac{1354.5 M \mu}{k b \rho} \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (21)$$

Grafið af $\log(P'' - \hat{P})$ á móti t er bein lína svo framarlega að gildið á \hat{P} sé þekkt, en það er venjulega óþekkt. Því verður að prófa sig inn að ákveðnu gildi. Það \hat{P} sem gefur besta nálgun að beinni línu er valið sem hið rétta gildi. Þegar gildið á \hat{P} hefur verið ákvarðað er hægt að reikna gildið á $k \cdot b$ út frá skurðpunktinum sem

$$k \cdot b = \frac{1354,5 M \mu}{L \rho} \quad [\text{darcy-m}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (22)$$

eða

$$k \cdot b = \frac{1,337 \cdot 10^{-9} M \mu}{L \rho} \quad [\text{m}^3] \quad (\text{MKS}) \quad (22a)$$

Ef þrýstingur í vatnskerfinu er nálægt meðalþrýstingi kerfisins fyrir prófun má ákvarða gildið á $\bar{P} - \hat{P}$ skv. því sem áður hefur verið tekið fram. Þá er hægt að finna skinn stuðulinn út frá jöfnunni

$$s = 0,84 \left[\frac{\bar{P} - \hat{P}}{L} \right] - \ln \frac{r_e}{r} + \frac{3}{4} \quad (\text{MKS-D}) \quad (23)$$

og þrýstifallið yfir skinnið verður

$$\Delta P_{\text{SKINN}} = \frac{L s}{0,84} \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (24)$$

Ef gildin á $k \cdot b$ og s sem fást með þeim aðferðum sem lýst er í köflum 4.2. og 4.3. eru svipuð, er talið að holan sé nálægt miðju áhrifasvæðis síns. Ef fyrrnefnd gildi víkja nokkuð frá hvort öðru er talið að takmörk kerfisins séu skammt frá holunni. Í þessum tilvikum er stundum hægt að ákvarða lögum kerfisins og þar með rúmmál þess með hjálp þar til gerðra mätgrafa.

4.4 "Semi-steady" aðferðir.

Ef þrýstifallsprófun stendur nógu lengi yfir næst svo nefnt "semi-steady" ástand. Þá er þrýstingsástandinu við borholuna lýst með jöfnunni:

$$P_0 - P'' = \frac{M t}{\pi \phi c b r_e^2 \rho} + \frac{M \mu}{2\pi k b \rho} \left[\ln \frac{r_e}{r} - \frac{3}{4} + s \right] + F(M/\rho)^n \quad (25)$$

Þetta er reyndar prófun á takmökum kerfisins eða áhrifasvæðis holunnar. Aðeins er hægt að finna $k \cdot b$ út frá jöfnu (25) ef ΔP_{IDU} , r_e og s eru þekkt, en svo er yfirleitt ekki. Allavega ætti graf þar sem þrýstingurinn P'' er teiknaður á móti tímanum t að vera

$$\text{bein lín með hallanum } l_L = \frac{M}{\pi \phi c b r_e^2 \rho} \text{ [bar/sek] (MKS-D)} \quad (26)$$

Út frá halla þessarar línu er mögulegt að ákvarða rúmmál kerfisins samkvæmt jöfnunni:

$$V_P = \frac{M}{l_L c \rho} \text{ [m}^3\text{]} \quad (\text{MKS-D}) \quad (27)$$

5. Áhrif milli borhola (Interference)

Prófun á áhrifum eða verkun einnar borholu á aðrar getur gefið margþættar upplýsingar um eiginleika vatnskerfisins, en umfram allt upplýsingar sem ná til miklu stærri hluta kerfisins en prófanir á hverri holu fyrir sig gefa. Theis setti fyrstur manna fram stærðfræðilegan grundvöll fyrir þannig prófunum. Lýsa má þrýstingsáhrifum í lokaðri mælingarborholu (sbr. jöfnu (1)) með

$$P' = P^* - \frac{1856.4 M \mu}{k b \rho} \log \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) + \frac{806.3 M \mu}{k b \rho} \left[\sum_{j=1}^{NB} \frac{M_j \rho}{M \rho_j} \left\{ Ei \left(\frac{-\phi \mu c a_j^2}{3.948 \cdot 10^{-4} k (t_j + \Delta t_j)} \right) - Ei \left(\frac{-\phi \mu c a_j^2}{3.948 \cdot 10^{-4} k t_j} \right) \right\} \right] \text{ [bar] (MKS-D)} \quad (28)$$

Log-hluti jöfnu (28) gefur þau áhrif sem vinnsla og lokun mælingarholunnar hefur í henni sjálfri, en Ei -hlutinn gefur þrýstifallið í mælingarholunni sem stafar af vinnslu borhola 1,2,3... í fjarlægðunum a_1, a_2, a_3, \dots . Ef takmörk kerfisins eru skammt frá mælingarholunni má taka tillit til þeirra með áhrifum frá ímynduðum borholum, sem virka þá eins og Ei -hluti jöfnu (28). Ef massastreymi vinnsluholu breytist að einhverju ráði meðan á prófunni stendur, er réttara að nota runu af Ei -föllum í jöfnu (28) til að lýsa vinnslu holunnar.

Út frá jöfnu (28) er hægt að ákvarða hlutfallið $\frac{\phi \mu c}{k}$. Þarf þá að prófa sig inn að ákveðnu gildi sem gefur bestu nálgun milli mældra og reiknaðra gilda fyrir þrýstifallið í mælingarholunni en það gildi lýsir jafnframt best áhrifum viðkomandi stærða milli viðkomandi borhola.

Ef þrýstingshækkun kemur fram í mælingarholunni eftir lokun hennar, áður en áhrifa nærliggjandi vinnsluhola gætir, má teikna upp Horner-graf fyrir þessa þrýstingshækkun, eins og áður hefur verið lýst. Síðan er hægt að framlengja línulega hluta grafsins eftir að áhrifa nærliggjandi vinnsluhola er farið að gæta. Samkvæmt jöfnu (28) er mismunurinn milli framlengdra og mældra gilda jafn summu Ei-hlutans

$$e^{\delta a} \left[P^* - \frac{1856,4 M \mu}{k b \rho} \log \left(\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) \right] - P^* = \frac{-806,3 M \mu}{k b \rho} \cdot \left[\sum_{j=1}^{NB} \frac{M_j \rho}{M \rho_j} \left\{ Ei \left(\frac{-\phi \mu c a_j^2}{3,948 \cdot 10^{-4} k (t_j + \Delta t_j)} \right) - Ei \left(\frac{-\phi \mu c a_j^2}{3,948 \cdot 10^{-4} k t_j} \right) \right\} \right] \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (29)$$

Þar sem fyrstu tveir liðir vinstri hliðar jöfnu (29) standa fyrir línulegu framlenginguna og þriðji liðurinn fyrir mældan þrýsting í mælingarholunni má umskrifa jöfnu (29) í

$$P_R - P_M = \frac{-\Delta P}{2,3025} \left\{ \sum_{j=1}^{NB} \frac{M_j \rho}{M \rho_j} \left\{ Ei \left(\frac{-\phi \mu c a_j^2}{3,948 \cdot 10^{-4} k (t_j + \Delta t_j)} \right) - Ei \left(\frac{-\phi \mu c a_j^2}{3,948 \cdot 10^{-4} k t_j} \right) \right\} \right\} \quad [\text{bar}] \quad (\text{MKS-D}) \quad (30)$$

Þar sem hægri hlið jöfnu (30) lýsir þrýstifallinu í mælingarholunni vegna áhrifa frá nærliggjandi vinnsluholum.

6. Einstakar holur.

6.1 Hola KG - 5

Gerðar hafa verið vatnsborðsmælingar í þessari holu yfir nokkuð langan tíma, m.a. hafa náðst góðar mælingar á vatnsborðsbreytingum sem hafa orðið vegna eldgosa og kvikuhlaupa í námunda við Kröflu. Einnig hefur komið í ljós að vinnsla og blástur nærliggjandi borhola hefur áhrif á vatnsborðsstöðuna í holu KG - 5. Reynt hefur verið að nota þessar mælingar til að reikna út vatnsleiðni þykkt (kb), lekt (T) og geymslu-
stuðul vatnskerfisins (S).

Hefur vatnsborðslækkun í holunni verið teiknuð upp á tvennan hátt Fyrst sem þrýstifall á móti logaritmanum af tímanum (tímaferill) og svo sem logaritminn af þrýstifallinu á móti logaritmanum af tímanum (Theisgraf). Þau tímabil sem voru athuguð eru 1) vatnsborðslækkun eftir eldgos sem varð norðan Leirhnjúks 8. sept. 1977. 2) vatnsborðslækkun vegna áhrifa frá nærliggjandi vinnsluholum í des. 1977. 3) vatnsborðslækkun samfara langvarandi kvikuhlaupi norður sprungusveiminn sem hófst 7. jan 1978. Þegar um er að ræða eldgos eða kvikuhlaup er massastreymið frá vatnskerfinu við eldstöðvar eða náttúrulegar sprungur óþekkt og eins fjarlægðin til þess. Í útreikningum hefur massastreymið verið áætlað $50 \leq M \leq 150$ kg/s en neðri mörkin eru svipað magn og fæst frá holum KJ - 7 og KJ - 9 til samans við vinnslu. Í þeim tilfellum þegar um er að ræða eldgos eða kvikuhlaup er fjarlægðin tekin sem fjarlægðin frá holu KG - 5 og að eldvirknisvæðinu. Í öðrum tilvikum er notuð fjarlægðin milli viðkomandi borhola og það magn sem þær gefa frá sér. Við úrvinnslu gagna kom í ljós að mælingar féllu nokkuð dreift fyrir "tímaferlana" og fylgdu ekki alveg Theiskúrfu. Það er því ljóst að nokkur óvissa og skekkja er í ákvörðun á eiginleikum vatnskerfisins. Yfir heildina fékkst að kb-gildið fyrir KG - 5 sé á bilinu, $kb = (2.6-16.4) \cdot 10^{-12}$ m³ og að $T = 14.4-93.3$ m²/dag. Þá hefur verið reynt að reikna út geymslustuðul vatnskerfisins út frá vatnsborðsbreytingum sem voru í október og nóvember. Á þessu tímabili var verið að hleypa nærliggjandi holum upp eftir hreinsun og frekari boranir og því talið að þær séu aðaláhrifavaldarnir á vatnsborðsstöðuna í holu KG - 5. Útreikningar voru grófir og aðeins notuð fjögur mæligildi. Geymslustuðullinn fékkst á bilinu $S = (4.3-15) \cdot 10^{-6}$ með meðalgildi um $S = 1 \cdot 10^{-5}$.

M. Grant (heimild 11) hefur gert nálgun á ferli vatnsborðsbreytinganna í holu KG-5 sem urðu við eldgosið norðvestur af Kröflu 8. sept. 1977.

Jöfnu fyrir vatnsborðsferilinn fær hann sem $\Delta h = \frac{2050}{t} e^{-8/t}$

þar sem $\Delta h =$ vatnsborðsbreyting [m]

$t =$ tími [klst.]

Það að vatnsborðsferillinn beygi af í beinu hlutfalli við $1/t$ með vaxandi t telur hann ótvíræð merki um að vatnskerfið sé lokað. Ef gengið er út frá að þrýstipúlsinn, sem kom fram í holu KG-5, stafi af því að kvikan hafi hlaypt jarðhitakerfinu í suðu í næsta nágrenni við eldstöðvarnar, má áætla rúmmál þeirrar gufu sem myndaðist. Ef litið er nánar á fasann 2050 [m klst] sem stendur fyrir $\frac{F \cdot V \cdot \mu}{4\pi \cdot k \cdot b}$ og reynt út frá honum að áætla rúmmál gufunnar sem hefur komið í vatnskerfið og valdið vatnsborðsbreytingunni, fáum við með því að nota

$$F = \text{fasti} \approx 1.2 \cdot 10^{-4}$$

$$V = \text{rúmmál} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\mu = \text{seigja vökva} \approx 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ [Nsek/m}^2\text{]}$$

$$c_t = \text{sambjappanleiki kerfisins} \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ [(N/m}^2\text{)}^{-1}\text{]}$$

$$kb = \text{vatnsleiðniþykkt} \approx 10^{-12} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\rho = \text{eðlismassi vökva} \approx 852.8 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

að $V = 5.9 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ gufu. Ef þrýstingur kerfisins er 95 bar samsvarar þetta $3.07 \cdot 10^5 \text{ kg}$. Ef það fara um 400 kcal/kg í að breyta 1 kg af vatni í gufu við ríkjandi aðstæður, höfum við notað um $1.2 \cdot 10^8 \text{ kcal}$.

Ef þessi varmi er fenginn með kælingu kviku frá 1100°C í 400°C sem hefur eðlismassann $c_p = 0.3 \text{ kcal/}^\circ\text{C kg}$ og eðlismassann $\rho \approx 2.7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ fáum við það magn kviku sem hefur þurft til að mynda þessa gufu.

$$700^\circ\text{C} \cdot c_p = 1.2 \cdot 10^8 \text{ kcal svo}$$

$$X = 5.9 \cdot 10^5 \text{ kg af kviku}$$

eða $X = 217 \text{ m}^3$ af kviku.

Ef $k \cdot b$ breytist í $k \cdot b = 10^{11} \text{ m}^3$ verður $X = 2.17 \cdot 10^3 \text{ m}^3$.

Til gamans má geta þess að 8. sept 1977 gaus á um 700 m langri sprungu. Þakti hraunið um 0.85 km^2 og var að magni til um $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Um kyöldið sama dags kom gjall upp úr borholu B-4 í Bjarnarflagi. Að magni til var það um 6.5 m^3 eða 2.500 kg ($\rho \approx 390 \text{ kg/m}^3$) og þakti um $1.4 \cdot 10^4 \text{ m}^2$. Ákvörðun á X og V gæti því verið af réttri stærðargráðu.

6.2 Hola KG - 8

Þrýstingsmæling var gerð í holu KG - 8 á um 600 m dýpi í apríl 1977 (heimild 2, mynd 13). Byrjað var á að hafa holuna lokaða í um 20 mín. en þá var opnað fyrir hana og hún látin blása í 63 mín. Eftir blástur var henni lokað og var hún lokað í minnst 68 mín. Unnið hefur verið úr þessari mælingu eftir ýmsum aðferðum og með hjálp ýmissa mátgrafa. Reiknað er með að massastreymi úr holunni í blæstri sé um 20 kg/s og hiti vatnsins á 600 m dýpi sé um 210°C. Byrjað er á að teikna þrýstingsbreytinguna fyrir blástur og lokun á Theisgröf (log-log graf) og þau borin við mátgraf eftir Walton (heimild 4). Fyrir samsvörun á gröfum gildir

$$k \cdot b = \frac{1.613 \times 10^3 M\mu P_D}{\rho \Delta P} \quad [\text{darcy-m}] \quad (\text{MKS-D})$$

eða

$$k \cdot b = \frac{1.592 \times 10^{-9} M\mu P_D}{\rho \Delta P} \quad [\text{m}^3]$$

og

$$\frac{k}{\phi \mu c_t r^2} = \frac{t_D}{0.987 \cdot 10^{-4} t} \quad [\text{sek}^{-1}] \quad (\text{MSK-D})$$

Bæði gröfin leita niður frá Theiskúrfu. Þetta er talið benda til að áhrifasvæði holunnar hafi aðstreymi og er stuðullinn við kúrfuna mat á því (heimild 4). Þá voru teiknuð upp Hornergraf (lín-log graf) og log-log mæligraf fyrir þrýstingshækkunina og það borið við gröf eftir Agarwal o.fl. (heimild 7) og eftir Gringarten o. fl. (heimild 6). Samkvæmt því byrjar bein lína á Hornergrafinu við $\Delta t \approx 38$ mín eða $\frac{t + \Delta t}{\Delta t} \approx 2.6$. Þessi lína gefur

$$P^* = 50.70 \text{ bar}$$

$$\Delta P = 7.27 \text{ bar/lotu}$$

$$P'_{1 \text{ mín}} = 37.04 \text{ bar}$$

$$\text{Jafna (6a) gefur svo } k \cdot b = 0.75 \cdot 10^{-12} \quad [\text{m}^3]$$

$$\text{Með því að nota } \frac{k}{\phi \mu c_t r^2} = 192.98 \quad [\text{sek}^{-1}] \quad \text{fyrir þrýstingshækkunina (skv.}$$

Theisgrafi) og $F=0$ (F og n óþekkt) getum við reiknað skinn stuðulin skv. jöfnu (10) og þrýstifallið yfir skinnið með jöfnu (7a). Þar sem hér er reinað með $F=0$ verður s líklega eitthvað of stórt, því verður $\Delta P_{\text{SKINN}} \approx \Delta P_{\text{TAP}}$. Það er svo hægt að nota til að meta nýtni holunnar sbr. jöfnu (12)

Ef mæligildin falla á beina línu með hallanum 1 á log-log mæligrafinu fyrst eftir að borholunni hefur verið lokað, er hægt að reikna út geymslu-
stuðul fyrir borholuna út frá einhverju þeirra gilda.

Borholugeymslustuðullinn er gefinn með $C = \frac{M \Delta t}{\Delta P \rho}$ [m³/bar]

og einingarlaus er hann $C_D = \frac{C}{2\pi r^2 h\phi c_t}$ (MKS)

Við $\Delta t = 3 \text{ mín} = 180 \text{ sek}$ er $\Delta P = 9.15 \text{ bar}$ fyrir KG-8 sem gefur

$C = 0.461 \text{ [m}^3/\text{bar]}$. Með því að nota $\frac{k}{\phi \mu c_t r^2} = 192.98 \text{ [sek}^{-1}\text{]}$
fáum við $C_D = 2.40 \times 10^4$

Teiknað var upp log-log-graf fyrir þrýstingshækkunina og það borið við
mátgraf eftir McKinley (heimild 8). Fyrirliggjandi mátgröf eftir hann
gilda ekki nema $\frac{k}{\phi \mu c_t r^2} \approx 0,73 \text{ [sek}^{-1}\text{]}$ og því var ekki hægt að ákvarða
 $k \cdot b$ út frá þeim. Grafið bendir þó til að holan sé skemmd þ.e. hafi skinn
og/eða iðustreymi sem valdi þrýstifalli af stærðargráðunni $\Delta P_{\text{TAP}} \approx 10 \text{ bar}$.
Einnig bendir það til að nýtnin sé á bilinu 0,6 - 0,7. Niðurstöðurnar
fyrir holu KG - 8 eru teknar saman í töflu II.

6.3 Hola KJ - 9

Farið var líkt að fyrir holu KJ - 9 og fyrir KG - 8. Þrýstimæling var
gerð í holu KJ - 9 í feb. 1977 með þrýstimælinn í botni (~1084 m dýpi)
(heimild 2, mynd 23). Byrjað var á að hafa holuna lokaða í um 30 mín
en þá var opnað fyrir hana og hún látin blása í 47 mín. Eftir blástur
var holunni lokað og stóð hún þannig í minnst 40 mín. Reiknað er með
að massastreymið úr holunni í blæstri sé um 17,5 kg/s og í botni hol-
unnar sé vatn við hitann 210°C. Byrjað er á að teikna þrýstingsbreyt-
inguna fyrir blástur og lokun á Theisgröf (log-log graf) og þau borin
við mátgröf eftir Walton (heimild 4). Bæði gröfin sýna verulegt frávik
niður frá Theiskúrfu. Einnig falla fyrstu mæligildin töluvert frá
mátferli. Þetta gæti stafað af því að holan er víða töluvert víðari
(allt upp í 12 tommur) en raufaða fóðringin (7"). Vegna þessa er
töluvert rúm milli fóðringar og eiginlegs borholuveggjar. Þannig sýna
gröfin fyrst áhrif vegna þessa rúms en síðan benda gröfin til að áhrifa-
svæði holunnar hafi aðstreymi (heimild 4). Þá voru teiknuð upp Horner-
graf (lin-log graf) og log-log mæligraf fyrir þrýstingshækkunina og það

borið við gröf eftir Agarwal o.fl. (heimild 7) og Gringarten o.fl. (heimild 6). Samkvæmt því byrjar bein lína á Hornergrafinu við

$$\Delta t \approx 29 \text{ mín eða } \frac{t+\Delta t}{\Delta t} \approx 2,6$$

Þessi lína gefur $P^* = 85.45 \text{ bar}$

$$\Delta P = 2.04 \text{ bar/lotu}$$

$$P'_1 \text{ mín} = 82.02 \text{ bar}$$

Jafna (6a) gefur svo $k \cdot b = 2.34 \cdot 10^{-12} \text{ [m}^3 \text{]}$.

Mæligildin fyrstu 5 mín. á log-log grafinu falla á línu með hallatölunni 1/2 en það bendir almennt til að streymi næst holunni sé að einhverju leyti eftir sprungum (heimild 6). Óvíst er hvort það gildi hér vegna hins mikla rúms milli fóðringarinnar og borholuveggjarins. Hér gæti fóðringin virkað eins og sprunga á meðan það er að komast á jafnvægi á milli streymisins inn í borholurúmið utan fóðringar og inn í fóðurrörið. Samkvæmt log-log grafinu hættir þessara áhrifa að gæta eftir að 10 mín eru liðnar frá lokun holunnar og við tekur þrýstingshegðun eins og búast má við í vatnsleiðara þar sem streymið er um porur. Ef fyrri hluti log-log grafsins er borinn við gröf sem gera ráð fyrir lóðréttum sprungum næst holunni fæst

$$k \cdot b = 2.32 \cdot 10^{-12} \text{ [m}^3\text{]} \text{ og } \frac{k}{\phi \mu c_t r^2} = 22.80 \text{ [sek}^{-1}\text{]}$$

Þetta er í mjög góðu samræmi við það sem Hornergrafið gefur. Með því að nota $\frac{k}{\phi \mu c_t r^2} = 22.80 \text{ [sek}^{-1}\text{]}$ og $F=0$ (F og n óþekkt) getum við reiknað út skinnstuðulinn skv. jöfnu (10) og þrýstifallið yfir skinnið með jöfnu (7a). Eins og áður hefur verið tekið fram verður s líklega eitt-hvað of stórt, þar sem reiknað er með $F=0$ og því verður $\Delta P_{\text{SKINN}} \approx \Delta P_{\text{TAP}}$. Það getum við svo notað til að áætla nýtni holunnar sbr. jöfnu (12).

Svipað og fyrir KG - 8 er hægt að áætla borholugeymslustuðulinn t.d. við $\Delta t=2 \text{ mín} = 120 \text{ sek}$ er $\Delta P=1,77 \text{ bar}$ fyrir KJ - 9 svo $C = 1.391 \text{ [m}^3\text{/bar]}$ og einingarlaus verður hann $C_D = 2.74 \cdot 10^3$. Í reikningunum hefur verið notaður borholuradíus sem radíus innan fóðringar.

Teiknað var upp log-log graf fyrir þrýstingshækkunina og það borið við mátgröf eftir McKinley (heimild 8). Þar sem fyrirbyggjandi mátgröf eftir hann gilda aðeins ef $\frac{k}{\phi \mu c_t r^2} \approx 0,73 \text{ [sek}^{-1}\text{]}$ var ekki hægt að ákvarða $k \cdot b$ út frá þeim. Grafið bendir þó til að fyrst sé streymi til holunnar tiltölulega greitt en eftir um það bil 10 mín. frá lokun hennar fer að gæta tregðu í aðstreyminu sem bendir til skemmda eða skinns ($s>0$) og/eða

iðustreymis. Þetta styður þær hugmyndir sem áður eru komnar fram og hafa fengist með öðrum aðferðum. Vegna þessarar hegðunar er mjög erfitt að leggja mat á þrýstifallið yfir tregðusvæðið og nýtnina með aðferðum McKinleys. Líklegt er að þrýstifallið sé á bilinu $\Delta P_{TAP} = 1.4 - 4.8$ bar og nýtnin á bilinu F.E. = 0.4 - 0.8. Niðurstöður fyrir holu KJ - 9 eru teknar saman í töflu III.

7. Lokaorð

Hér eru aðeins teknar fyrir tvær þrýstimælingar og er prófunartími beggja mjög stuttur. Báðar sýna mælingarnar nokkra óreglu sem eykur á ónákvæmni í túlkun þeirra. Vegna ýmissa truflana gildir aðferð Theis ekki nema að nokkru leyti og þá með breytingum. Sama er að segja um ýmsar aðrar aðferðir. Kemur þetta t.d. fram í töflum II og III, en þar er nokkur munur milli stærða eftir því hvaða aðferðum er beitt. Það er því ekki hægt að fastákvæða viðkomandi eiginleika kerfisins út frá þessum mælingum.

Vatnsborðsmælingar í holu KG-5 ættu samkvæmt kennisetningum að lýsa áhrifum frá stærri hluta jarðhitakerfisins, en fyrr nefndar þrýstimælingar. Niðurstöður frá vatnsborðsmælingunum verða að teljast gefa besta mynd af rennslis eiginleikum efri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu. Niðurstöðurnar eru þó undir ýmsum truflandi áhrifum. Má þar nefna að nokkrar mælingarnar eru af vatnsborðsbreytingum sem verða vegna áhrifa frá eldvirkni í nágrenninu. Ekki er með vissu vitað hvernig skuli meta þessar breytingar.

Einnig er hola KG-5 tengd neðra jarðhitakerfinu við Kröflu og er áhrifaskiptingin milli efra og neðra kerfisins ekki þekkt. Því verður einnig að taka þessar niðurstöður með varúð, en fleiri og betri mælingar munu auka nákvæmni í ákvörðun viðkomandi eiginleika kerfanna.

TAFLA I

Vatnsborðsmælingar holu KG - 5

Tímaferlar

Vatnsleiðniþykkt $k \cdot b \times 10^{-12}$ [m ³]	Lekt T_{210} [m ² /dag]	Athugasemdir
2.6 - 14.3	14.4 - 81.6	vatnsborðslökkun eftir eldgos 8. sept. 77.
16.4	93.3	vatnsborðslökkun vegna vinnsluhola í des 77
3.8	21.6	vatnsborðslökkun eftir kvikuhlaup 7.jan 78.

Theisgraf

Vatnsleiðniþykkt $k \cdot b \times 10^{-12}$ [m ³]	Lekt T_{210} [m ² /dag]	Athugasemdir
3.9 - 11.9	22.5 - 67.5	vatnsborðslökkun eftir eldgos 8.sept. 77
10.8	61.4	vatnsborðslökkun vegna vinnsluhola í des 77
6.6	37.6	vatnsborðslökkun eftir kvikuhlaup 7.jan 78.

TAFLA II

Prýstiprófun holu KG-8

Vatnsleiðniþykkt $k_b \cdot 10^{-12}$ [m ³]	Lekt T_{210} [m ² /dag]	$\frac{k}{\phi \mu c_t r^2}$ [sek ⁻¹]	Geymslustuðull S	Skinn stuðull s	Skinn prýstifall ΔP_{SKINN} [bar]	Nýtnihlut- fall F.E.	Athugasemdir
0.086	0.49	46.76	$1.53 \cdot 10^{-5}$	>0			Prýstingslækkun Theisgraf
0.47	2.67	192.98	$2.03 \cdot 10^{-5}$	>0			Prýstingshækkun Theisgraf
0.75	4.27	(192.98)	$3.24 \cdot 10^{-5}$	1.33 (1.5-1.8)	8.41 ~ 10.	0.65 0.6-0.7	Hornergraf sbr. McKinley

TAFLA III

Prýstiprófun holu KJ-9

Vatnsleiðniþykkt $k_b \cdot 10^{-12}$ [m ³]	Lekt T_{210} [m ² /dag]	$\frac{k}{\phi \mu c_t r^2}$ [sek ⁻¹]	Geymslustuðull S	Skinn stuðull s	Skinn prýstifall ΔP_{SKINN} [bar]	Nýtnihlut- fall F.E.	Athugasemdir
0.073	0.41	29.55	$1.05 \cdot 10^{-5}$	>0			Prýstingslækkun Theisgraf
0.28	1.59	35.76	$6.52 \cdot 10^{-5}$	>0			Prýstingshækkun Theisgraf
2.34	13.31	(22.80)	$8.55 \cdot 10^{-4}$	2.81 (0,8-2.7)	4.98 1.4-4.8	0.32 0.4-0.8	Hornergraf sbr. McKinley

Tákn og einingar:

- P_O = upphafsþrýstingur kerfisins við ótruflaðar aðstæður [bar]
 P' = þrýstingur í lokaðri borholu [bar]
 P'' = þrýstingur í borholu við blástur (vinnslu) [bar]
 ΔP_{SKINN} = þrýstingsbreyting vegna skinns [bar]
 ΔP_{IDU} = þrýstibreyting vegna iðustreymis [bar]
 ΔP = halli beinnar línu á þrýstigráfi [bar/lotu]
eða þrýstingsbreyting [bar]
 \bar{P} = meðal þrýstingur kerfisins [bar]
 P^* = þrýstingur fenginn með framlengingu beinu línunnar á þrýstigráfi þegar tíminn stefnir á óendanlegt [bar]
 ΔP_{TAP} = þrýstitap í borholu vegna skinns og iðustreymis [bar]
 \hat{P} = P'' við nærstöðugt (semi-steady) ástand, sjá jöfnu (17) [bar]
 P_R = reiknaður þrýstingur eða þrýstingur fenginn frá framlengdum línulegum hluta þrýstingsgrafs [bar]
 P_M = mældur þrýstingur við viðkomandi aðstæður [bar]
 P_D = þrýstingur (einingarlaus)
 $P'_1 \text{ mín}$ = þrýstingur fenginn frá línulega hluta þrýstingsgrafs 1 mín eftir lokun borholunnar [bar]
 t_D = tími (einingarlaus)
 t = síðasta vinnslutímabil (blásturs-) borholu [sek]
 Δt = tími síðan borholu var lokað [sek]
 $\frac{t+\Delta t}{\Delta t}$ = tímahlutfall (einingarlaus)
 t_j = vinnslutími borholu j fyrir lokun mælingarholu [sek]
 Δt_j = vinnslutími borholu j eftir lokun mælingarholu [sek]
 M = massastreymi [kg/sek]
 M_j = massastreymi borholu j [kg/sek]
 μ = seigja vökva [centipoise] ($1 \text{ cp} = 10^{-3} \frac{\text{N sek}}{\text{m}^2} = 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{sek m}}$)
 γ = fasti Eulers ≈ 1.781 ; $\ln \gamma \approx 0.5772$
 F = fasti fyrir iðustreymi holunnar [bar/(m³/s)ⁿ]
 n = veldisvísir fyrir iðustreymi
 k = vatnsleiðni [darcy] eða [m²] (1 darcy = $0.987 \times 10^{-12} \text{ m}^2$)
 b = þykkt vatnsleiðara [m]
 $k \cdot b$ = vatnsleiðniþykkt [darcy-m] eða [m³]
 ϕ = poruhluti hlutfall (einingarlaus)

ρ = eðlismassi vökva [kg/m³]

ρ_j = eðlismassi vökva í borholu j [kg/m³]

c = samþjappanleiki vökva [rúmm. · rúmm.⁻¹ · bar⁻¹]

c_t = samþjappanleiki alls kerfisins [rúmm. · rúmm.⁻¹ · bar⁻¹]

r = radíus [m]

r_{eff} = virkur radíus borholu [m]

r_e = radíus áhrifasvæðis borholu [m]

a_j = fjarlægð mill borholu j og mælingarholu [m]

ln = náttúrulegur logaritmi

log = logaritmi með grunntöluna 10

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

s = skinnstuðull (einingarlaus)

F.E. = nýtnihlutfall (einingarlaus)

C = borholugeymslustuðull [m³/bar]

C_D = borholugeymslustuðull (einingarlaus)

NB = fjöldi borhola sem hafa áhrif á mælingarholu

l = halli línu á grafi þar sem $\log(P'' - \hat{P})$ er teiknaður á móti t , sjá jöfnu (20) [sek⁻¹]

L = skurðpunktur við þrýstingsás ($t=0$) á grafi þar sem $\log(P'' - \hat{P})$ er teiknaður á móti t , sjá jöfnu (21) [bar]

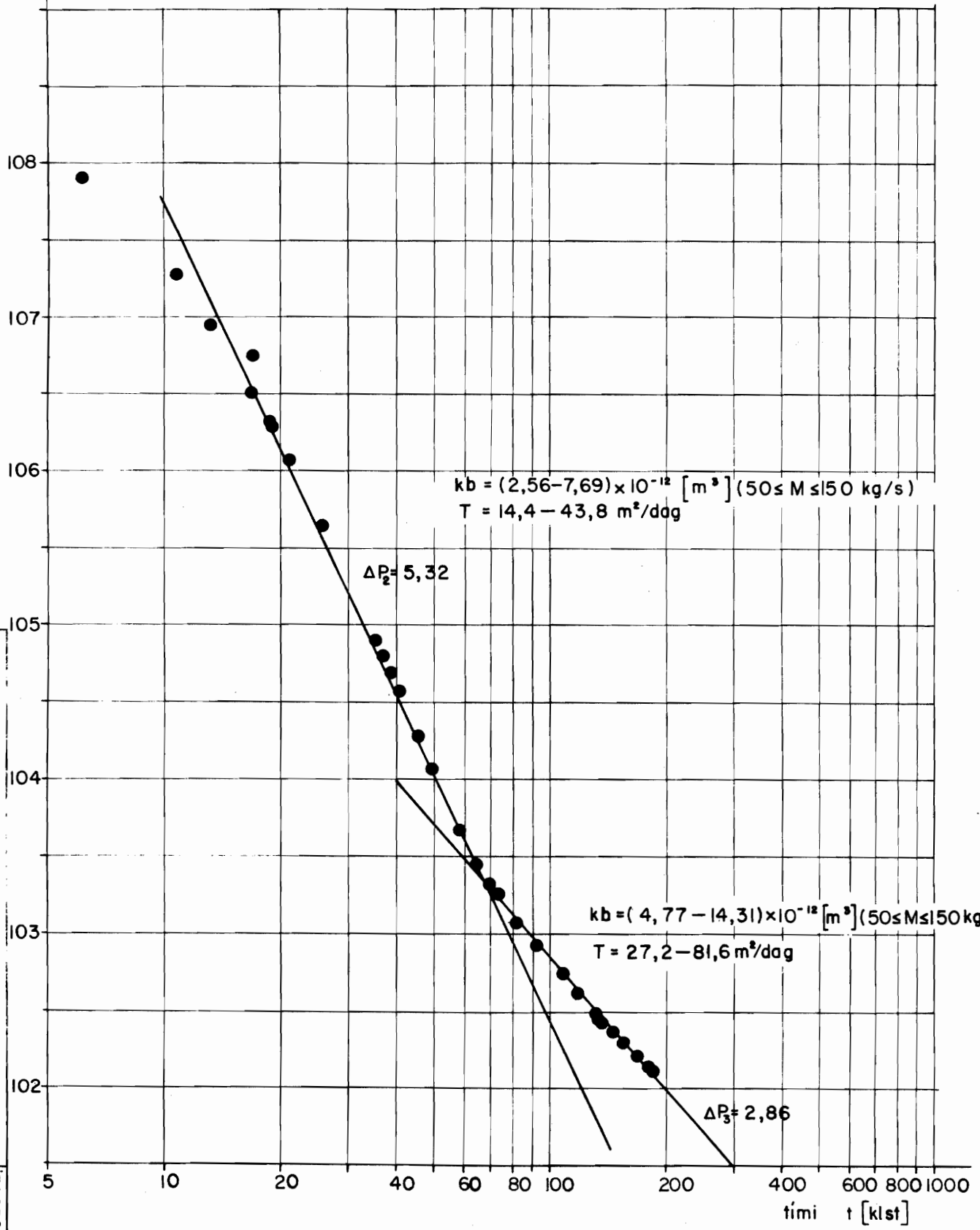
l_L = halli línu á grafi þar sem P'' er teiknaður á móti t , sjá jöfnu (26) [bar/sek]

V_p = porurúmmál kerfisins [m³]

Heimildir:

- 1) Matthews, C.S., og Russell, D.G. Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Monograph Vol. 1, Soc. Pet. Eng. AIME, 1967.
- 2) Sigurðsson, Ó og Stefánsson, V. Lekt í borholum í Kröflu. OS JHD 7727, 1977.
- 3) van Everdingen, A.F. The Skin Effect and Its Influence on the Productive Capacity of a Well. Trans. AIME. (1953) p. 171-176.
- 4) De Wiest, R.J.M. Geohydrology John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 5) Smith, J.T. og Cobb, W.M. Formation Evaluation by Transient Pressure Testing. The Log Analyst Vol. XVII No. 3, p. 16-26.1976.
- 6) Gringarten, A.C., Ramey, H.J.Jr. og Raghavan, R. Applied Pressure Analysis for Fractured Wells. J.Pet. Tech., p. 887-892; July 1975.
- 7) Agarwal, R.G., Al-Hussainy, R. og Ramey, H.J., Jr. An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow; I Analytical Treatment. Soc. Pet. Eng. J. p. 279-290. Sept. 1970.
- 8) McKinley, R.M. Wellbore Transmissibility from Afterflow Dominated Pressure Buildup Data. J. Pet. Tech., p. 863-872, júlí, 1971.
- 9) McKinley, R.M. Estimating Flow Efficiency from Afterflow Distorted Pressure Buildup Data. J. Pet. Tech., p. 696-697 júní, 1974.
- 10) Barelli, A., Manetti, G., Celati, R. og Neri, G.: Build-up and Back-Pressure Test on Italian Geothermal Wells. Proceedings Second U.N. Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, p. 1537, Lawrence Berkely Lab. Univ. of California, 1976.
- 11) Bréf til Valgarðs Stefánssonar frá Malcolm A. Grant.
- 12) Valgarður Stefánsson, munnleg heimild.
- 13) Gísli K. Halldórsson, munnleg heimild.

þrýstingur
[bar]



$kb = (2,56-7,69) \times 10^{-12} [m^3] (50 \leq M \leq 150 \text{ kg/s})$
 $T = 14,4 - 43,8 \text{ m}^2/\text{dag}$

$\Delta P_2 = 5,32$

$kb = (4,77-14,31) \times 10^{-12} [m^3] (50 \leq M \leq 150 \text{ kg/s})$
 $T = 27,2 - 81,6 \text{ m}^2/\text{dag}$

$\Delta P_3 = 2,86$

ORKUSTOFNUN

KRAFLA HOLA KG-5

þrýstifall eftir eldgos 8. sept. 1977

780502 OS/AA

T 563

Krftla

F 16889

5

10

20

40

60

80

100

200

400

600

800

1000

tími t [klst]

þrýstingur

[bar]

101

100

99

98

$\Delta P = 0,83 \text{ bar/lotu}$
 $kb = 16,44 \times 10^{-12} \text{ [m}^3\text{]} (M = 50 \text{ kg/s})$
 $T = 93,3 \text{ m}^2/\text{dag}$

$\Delta P = 0,83$

tími t [dagar]



ORKUSTOFNUN

KRAFLA HOLA KG-5

þrýstifall í des. 1977

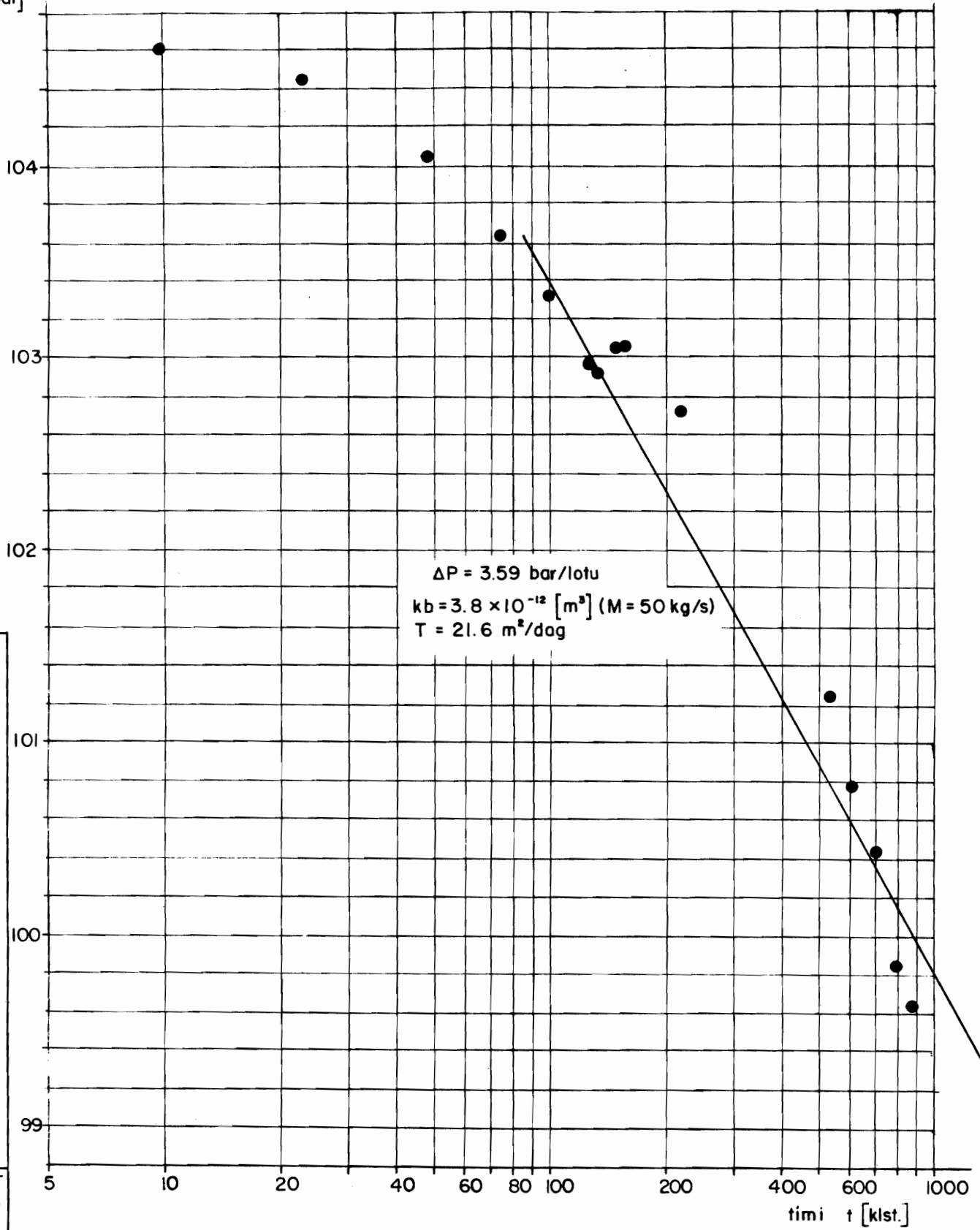
780602 ÓS/AA

T 562

Krafía

F 16888

brýstingur
[bar]



ORKUSTOFNUN

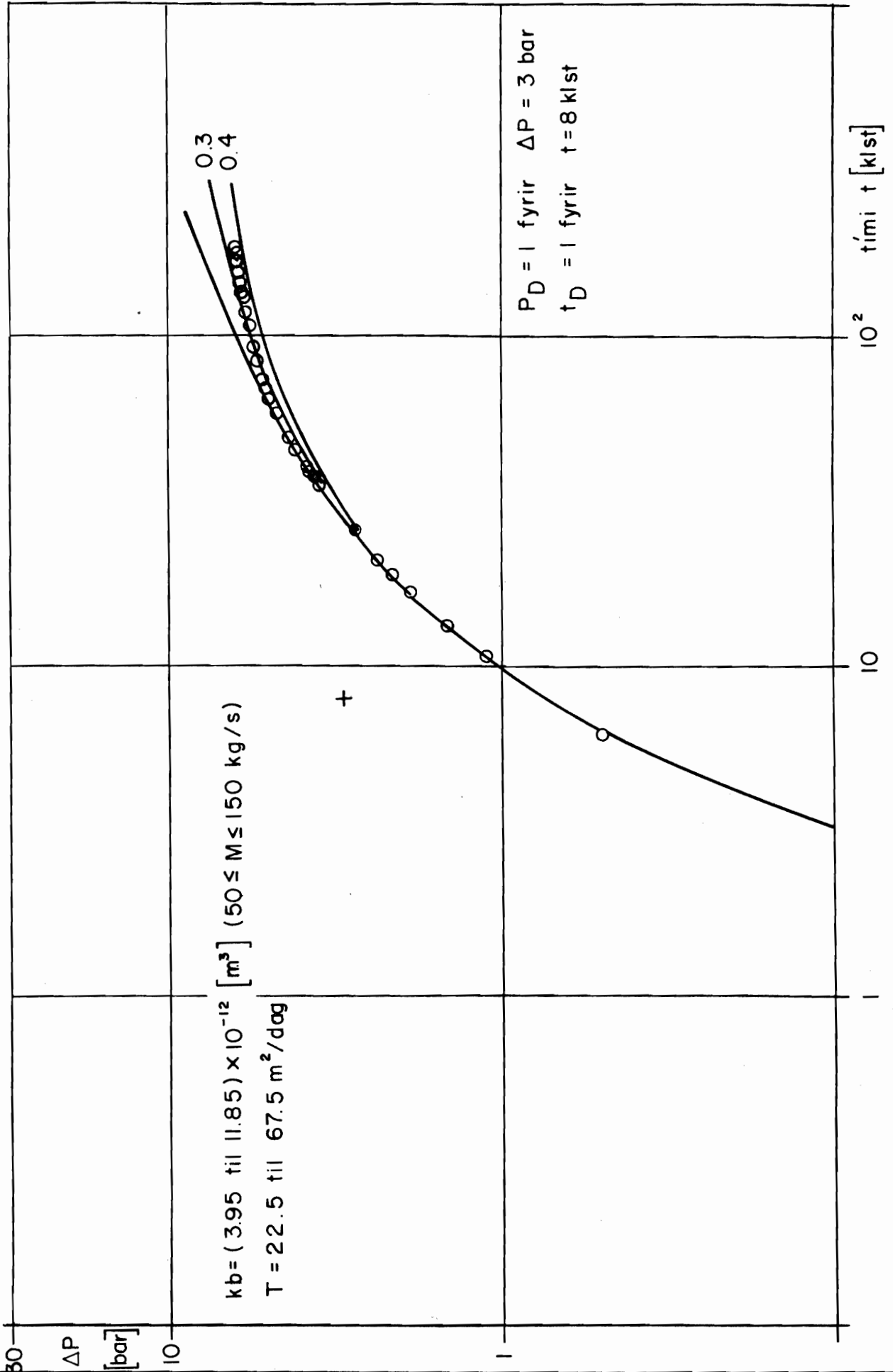
KRAFLA HOLA KG-5

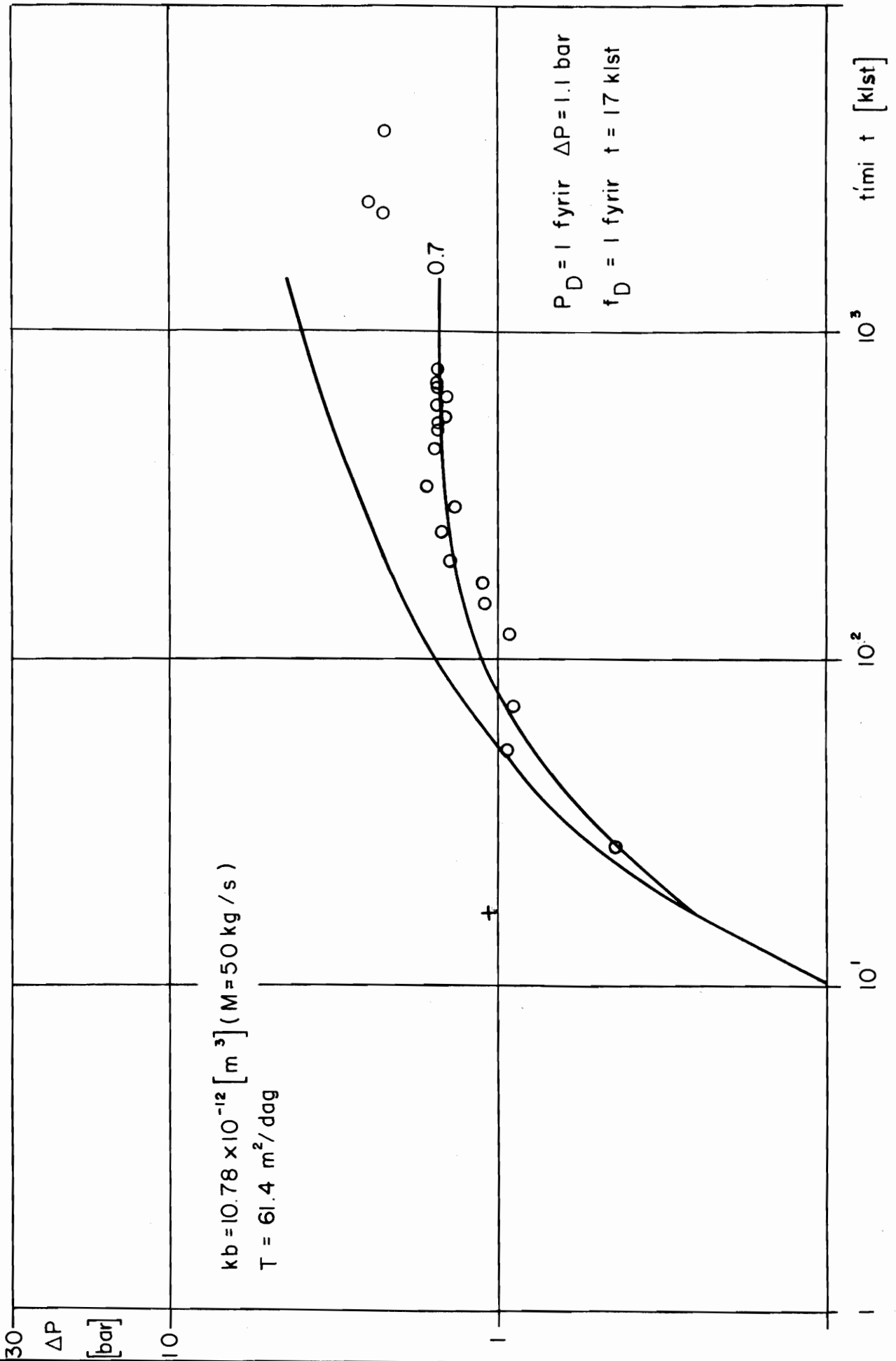
brýstifóll eftir kvikuflaup 7. jan. 1978

7805.03 OS /AÁ
T 564
Krafla
F 168890



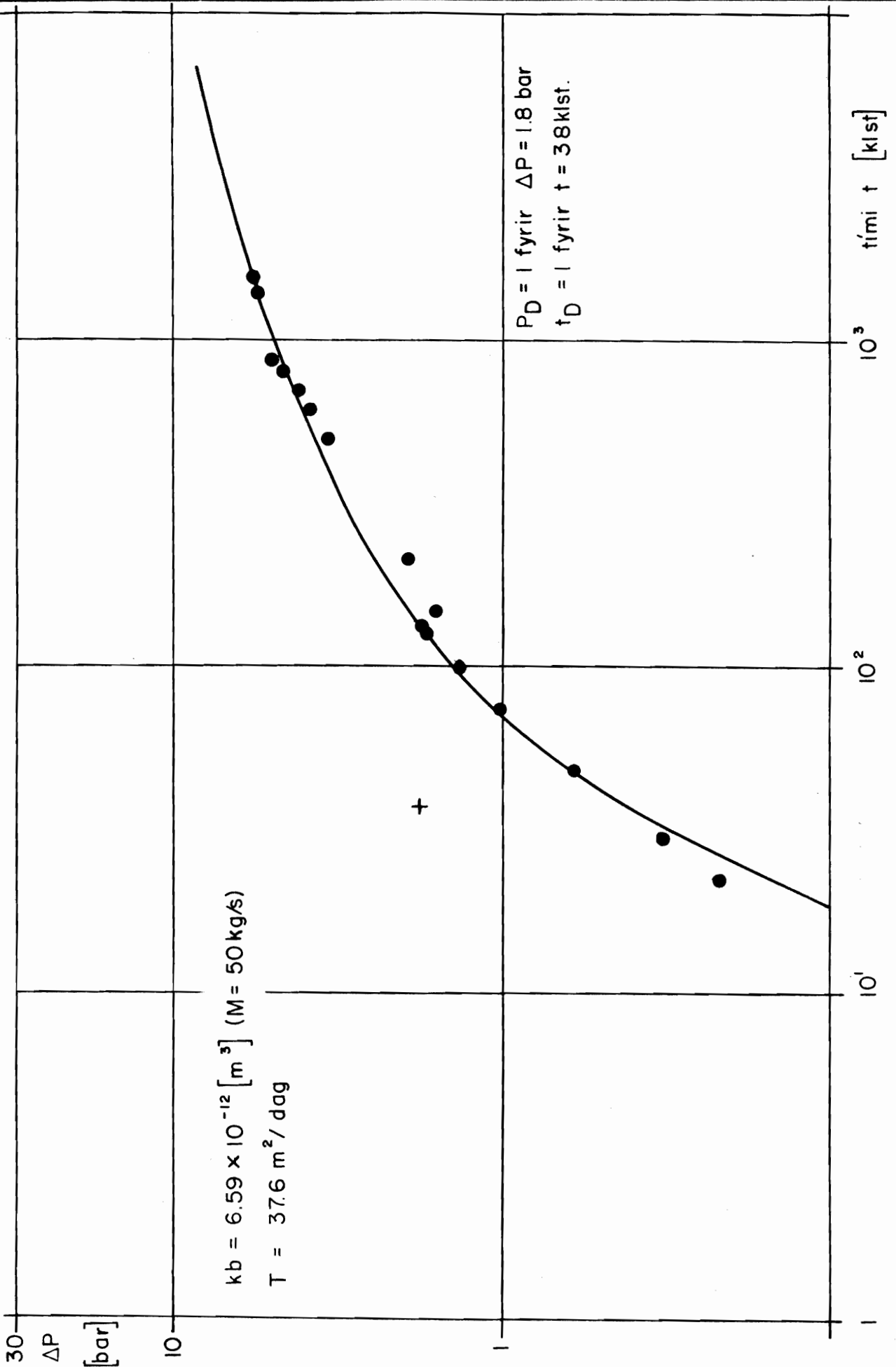
KRAFLA HOLA KG-5
sept. 1977







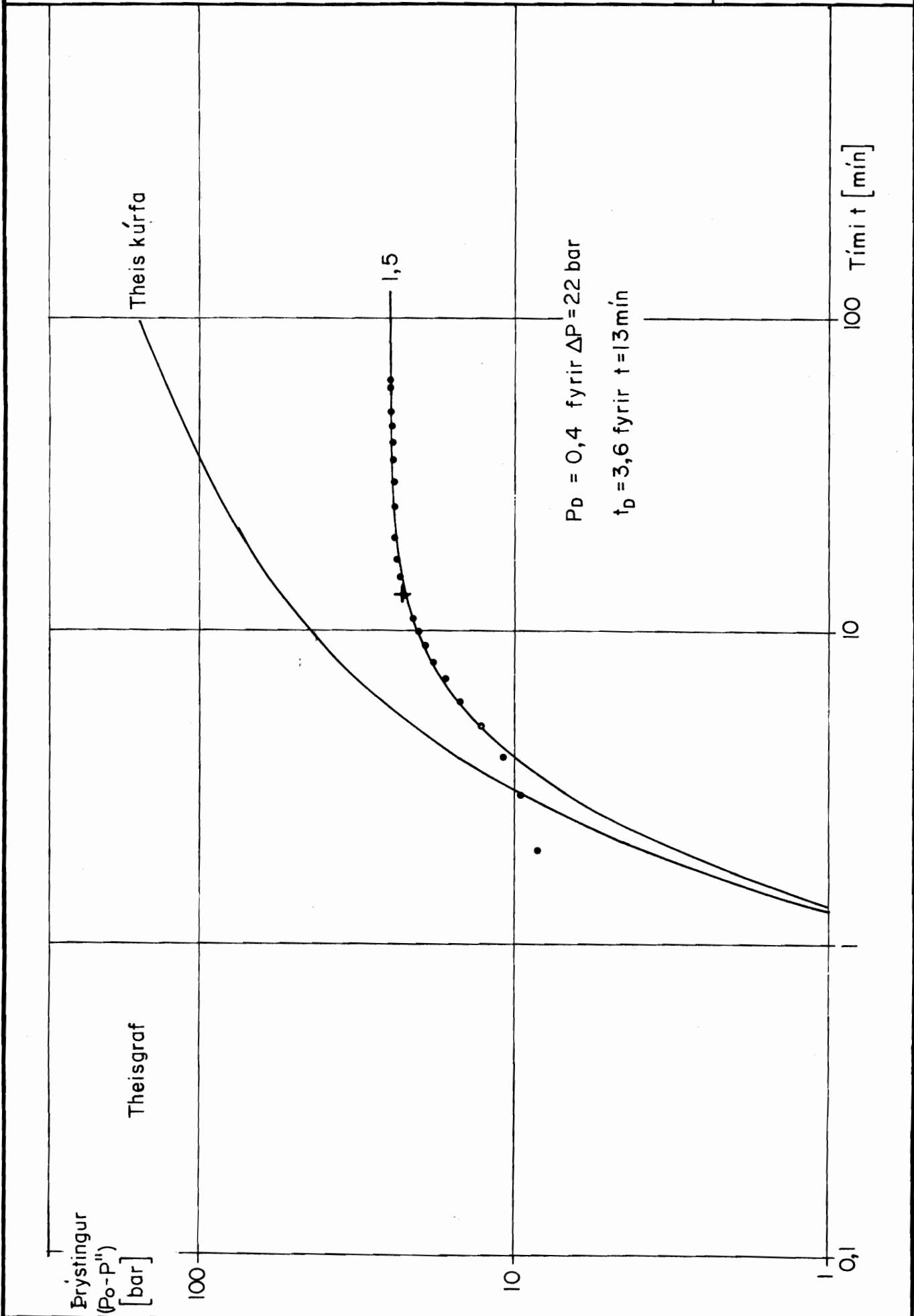
KRAFLA HOLA KG-5
jan. - mars 1978





Krafla hola KG-8

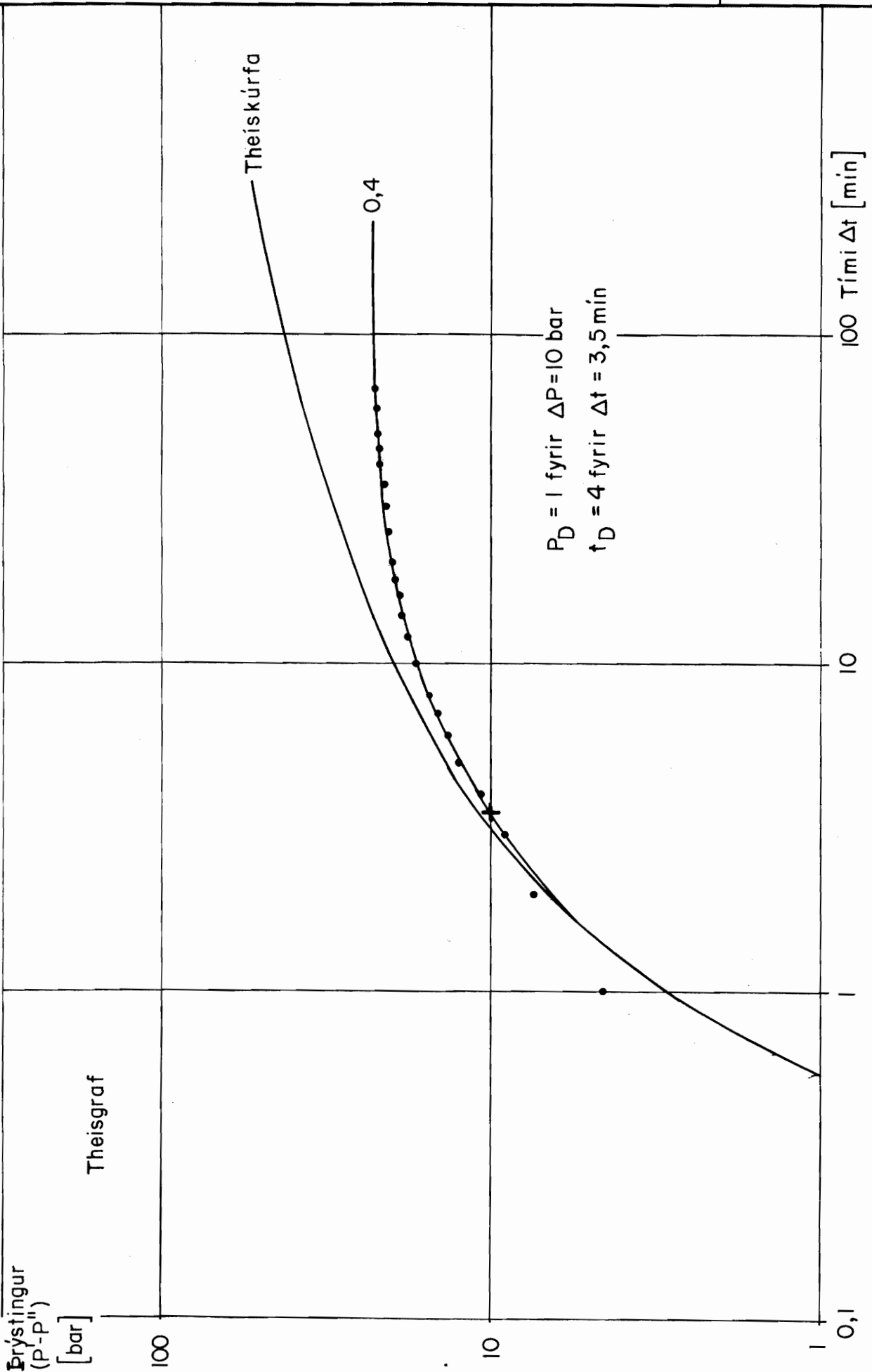
Log-Log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingslækkun

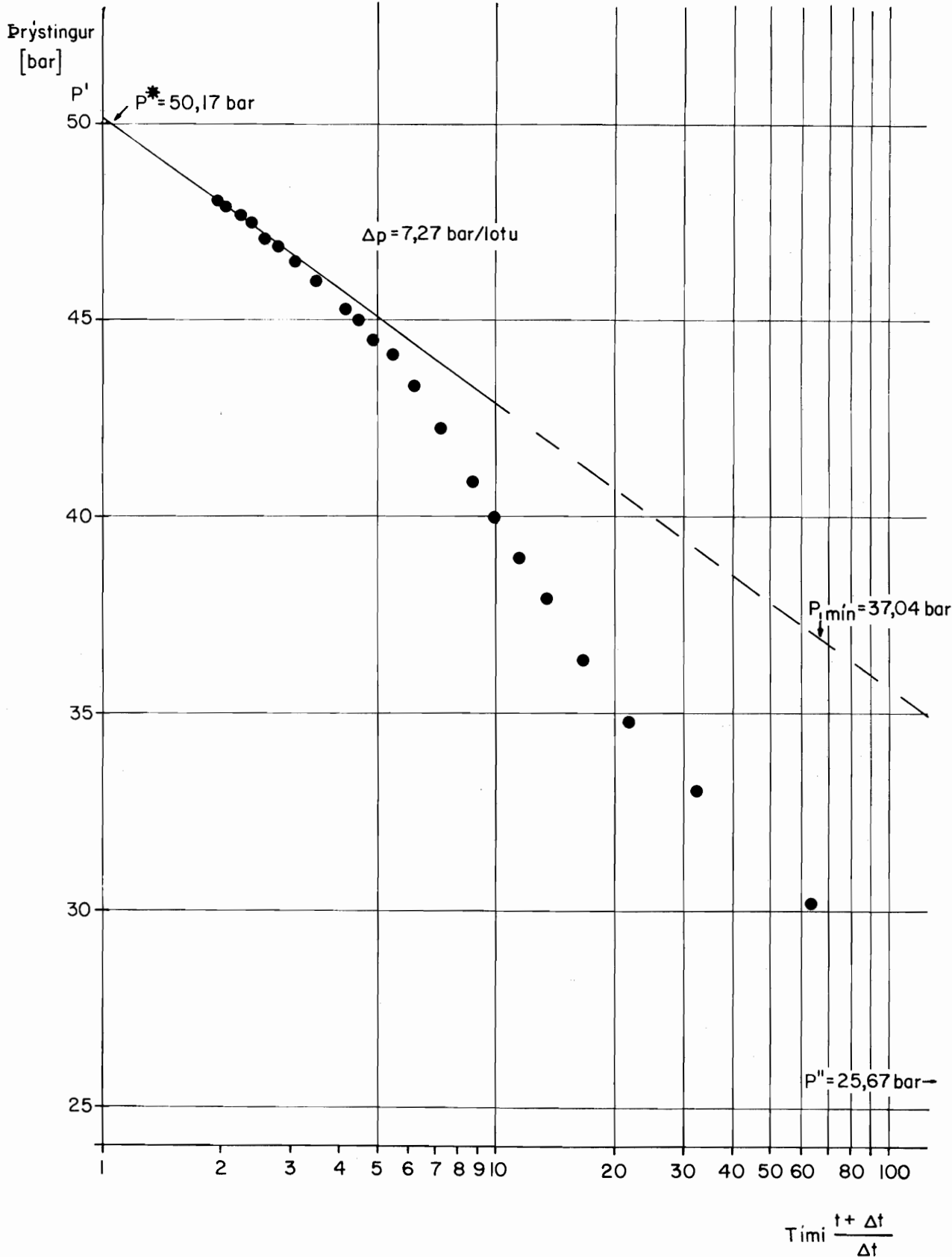




Krafla hola KG-8

Log-Log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingshækkun

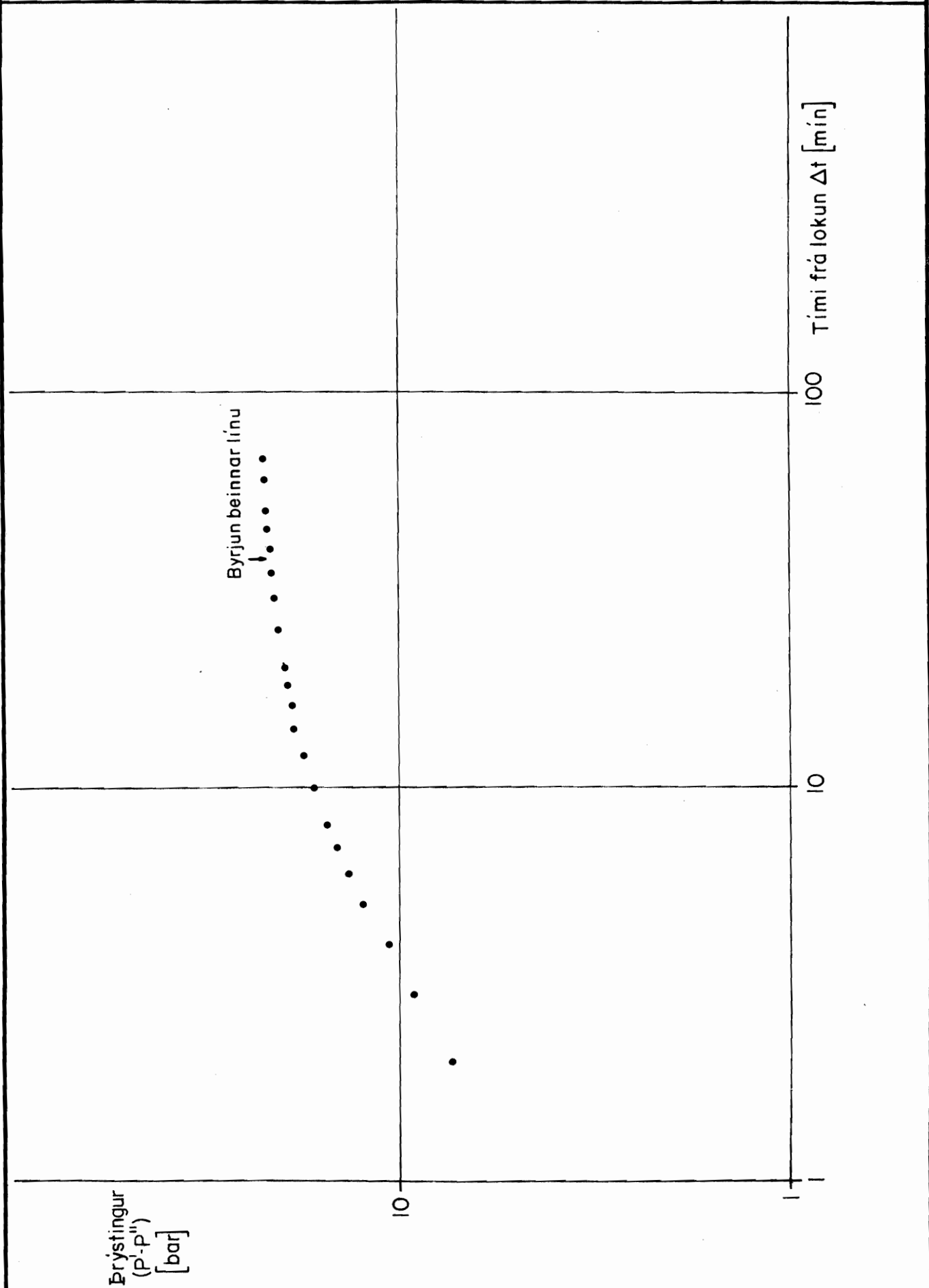






Krafla hola KG-8

Log-Log mæligraf fyrir þrýstingshókkun





ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

Krafla hola KG-8

Log-Log mæligraf og færslar fyrir þrýstingshækkun

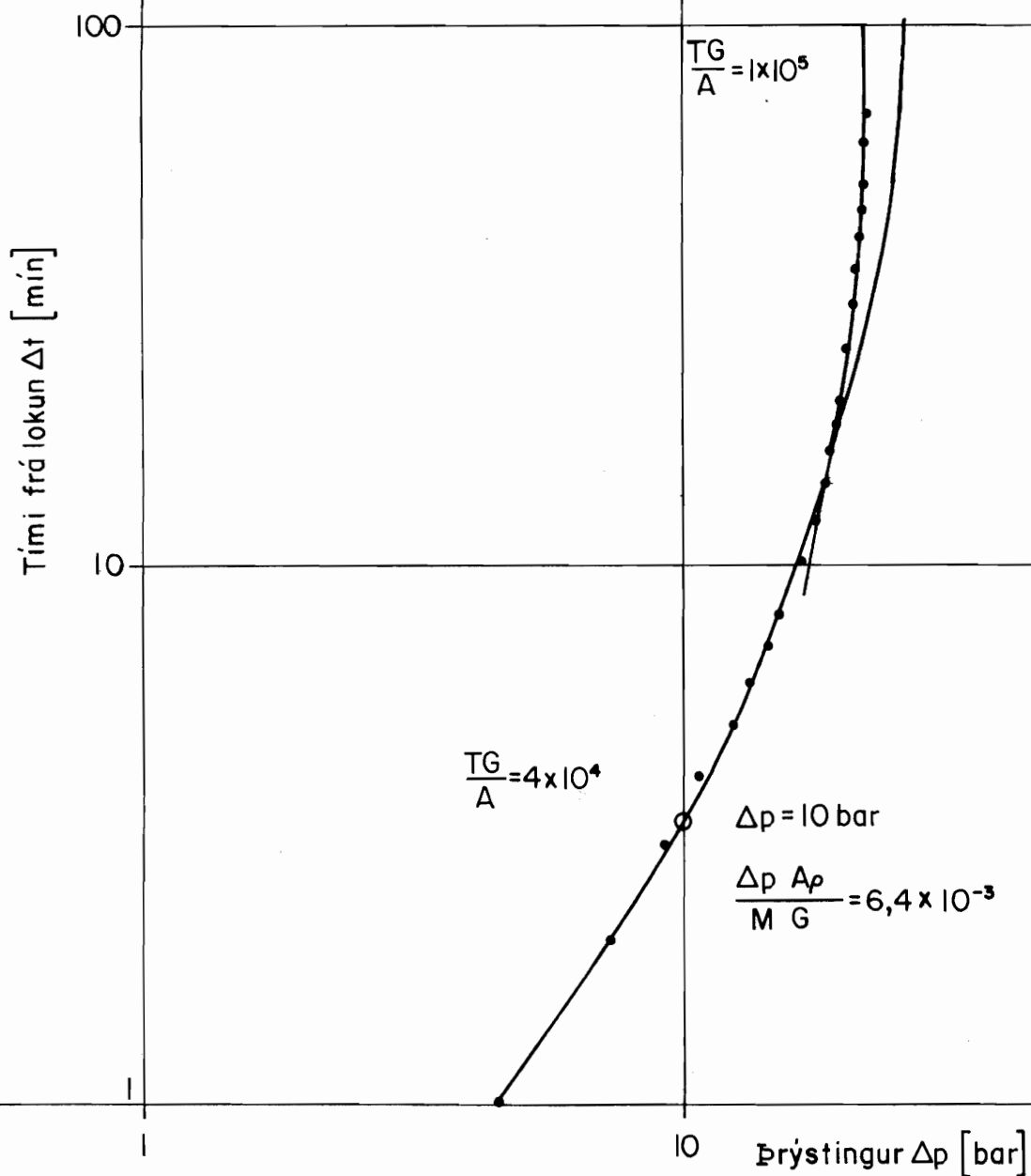
(skv. McKinley)

78-06-13 O.S./Sy.J.

T 550

Krafla

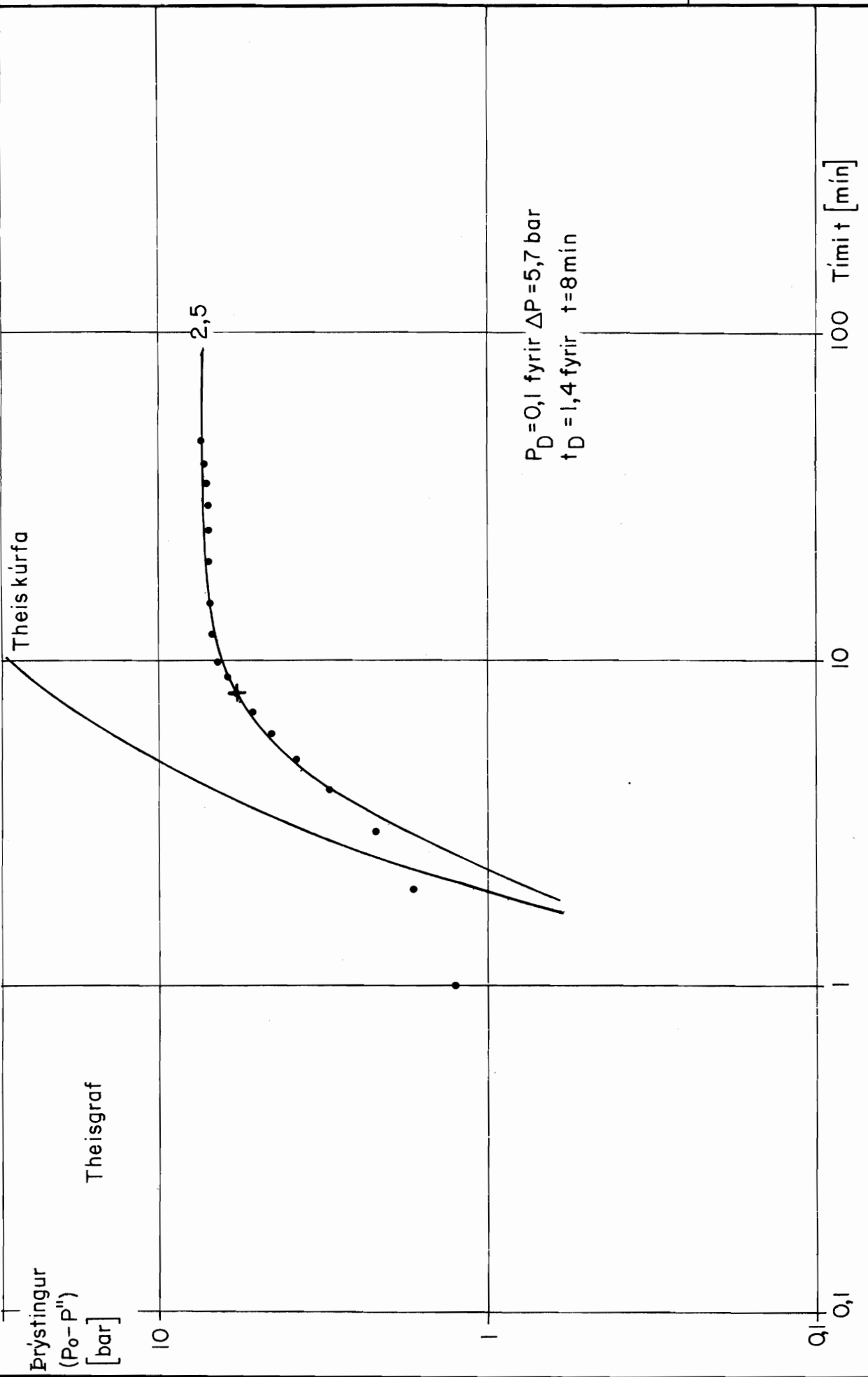
F16776





Krafla hola KJ-9

Log-Log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingslækkun





Krafla hola KJ-9

Log-Log mæligraf og færslar fyrir þrýstingshækkun

Theis kúrfa

Þrýstingur
(P'-P'')
[bar]

Theisgraf

10

1

0,1
0,1

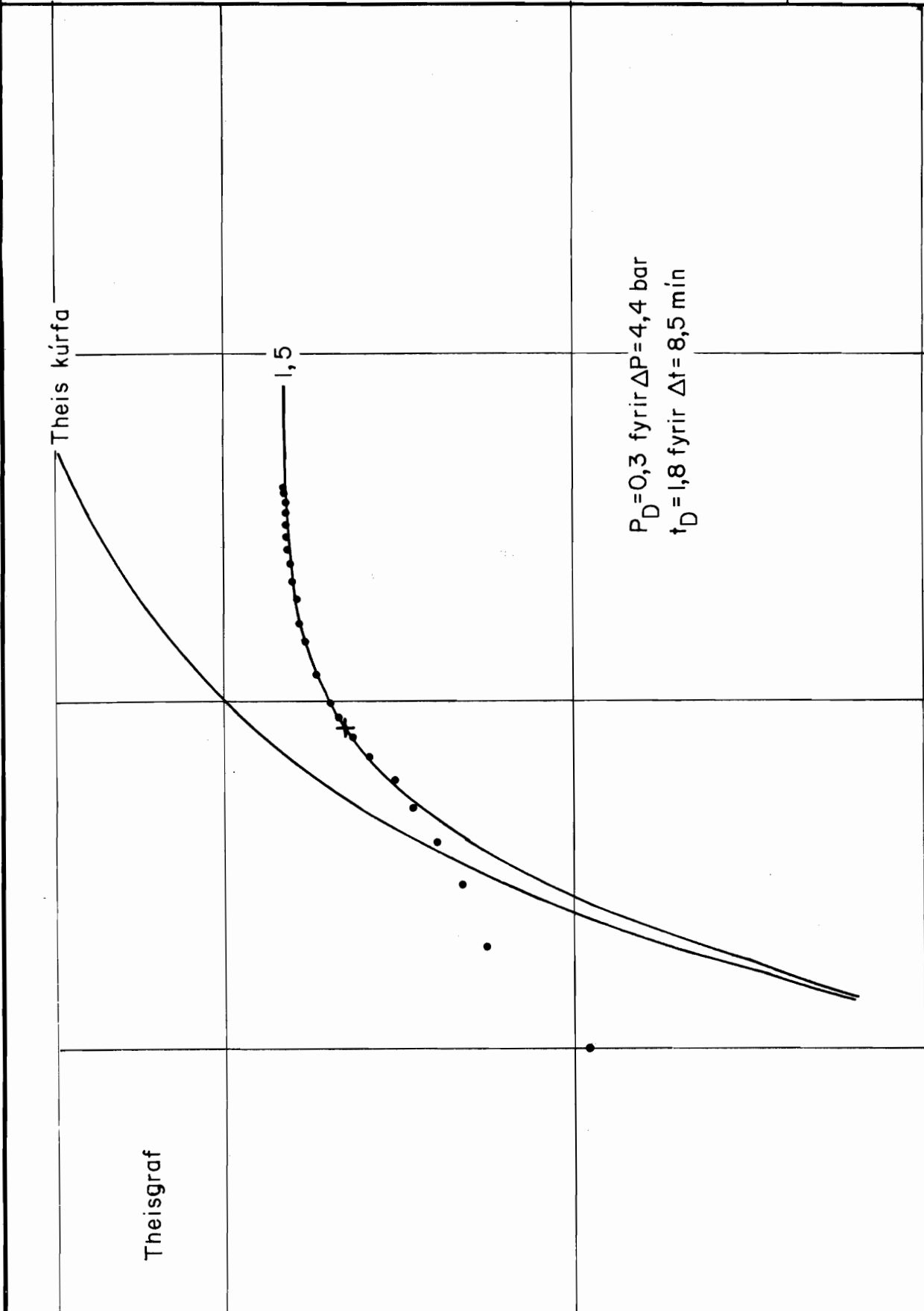
1,5

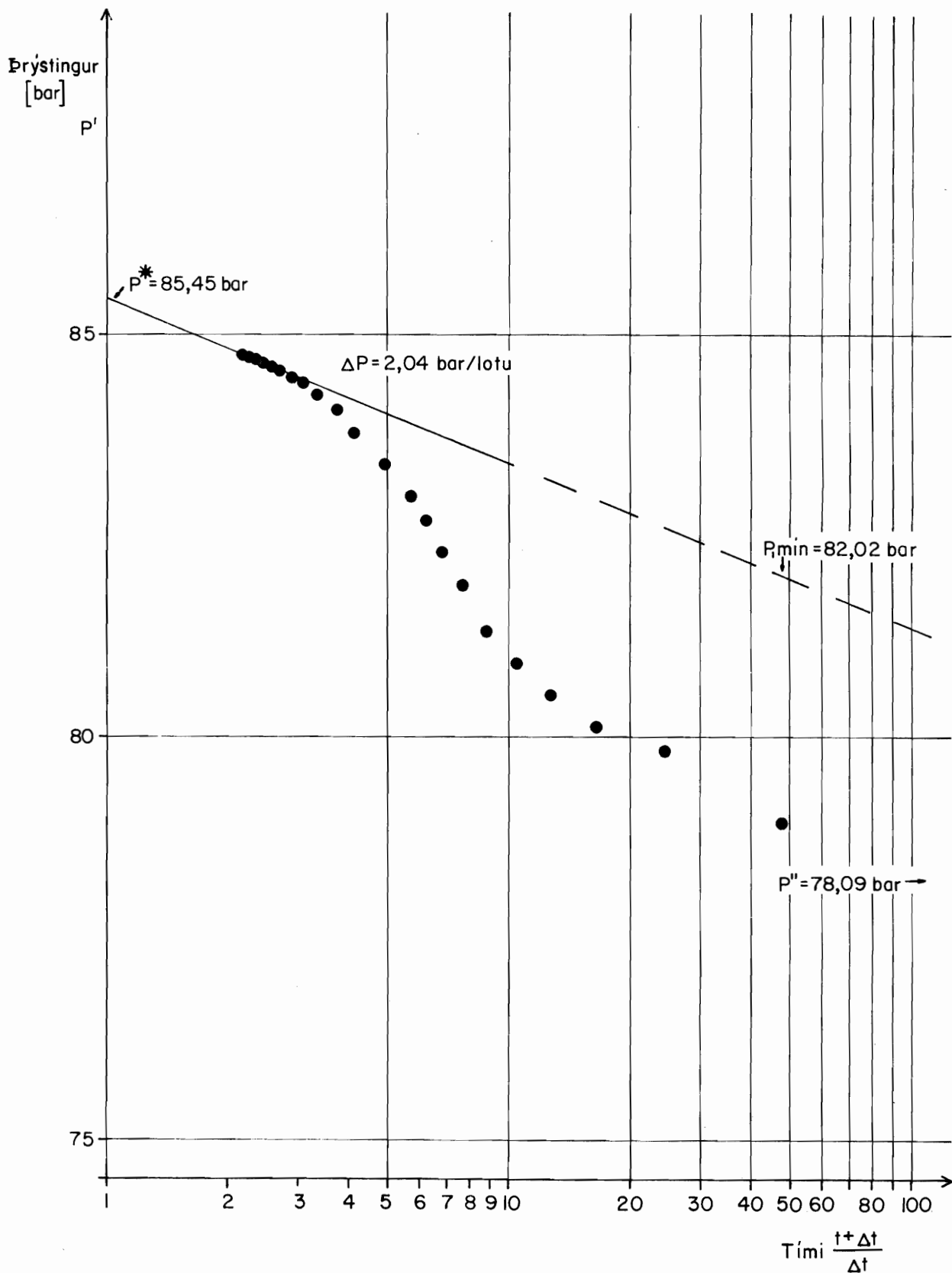
$P_D = 0,3$ fyrir $\Delta P = 4,4$ bar
 $t_D = 1,8$ fyrir $\Delta t = 8,5$ min

100
Time Δt [min]

10

1





78-06-15 OS/Sy.J.

T 548

Krafla

F 16774

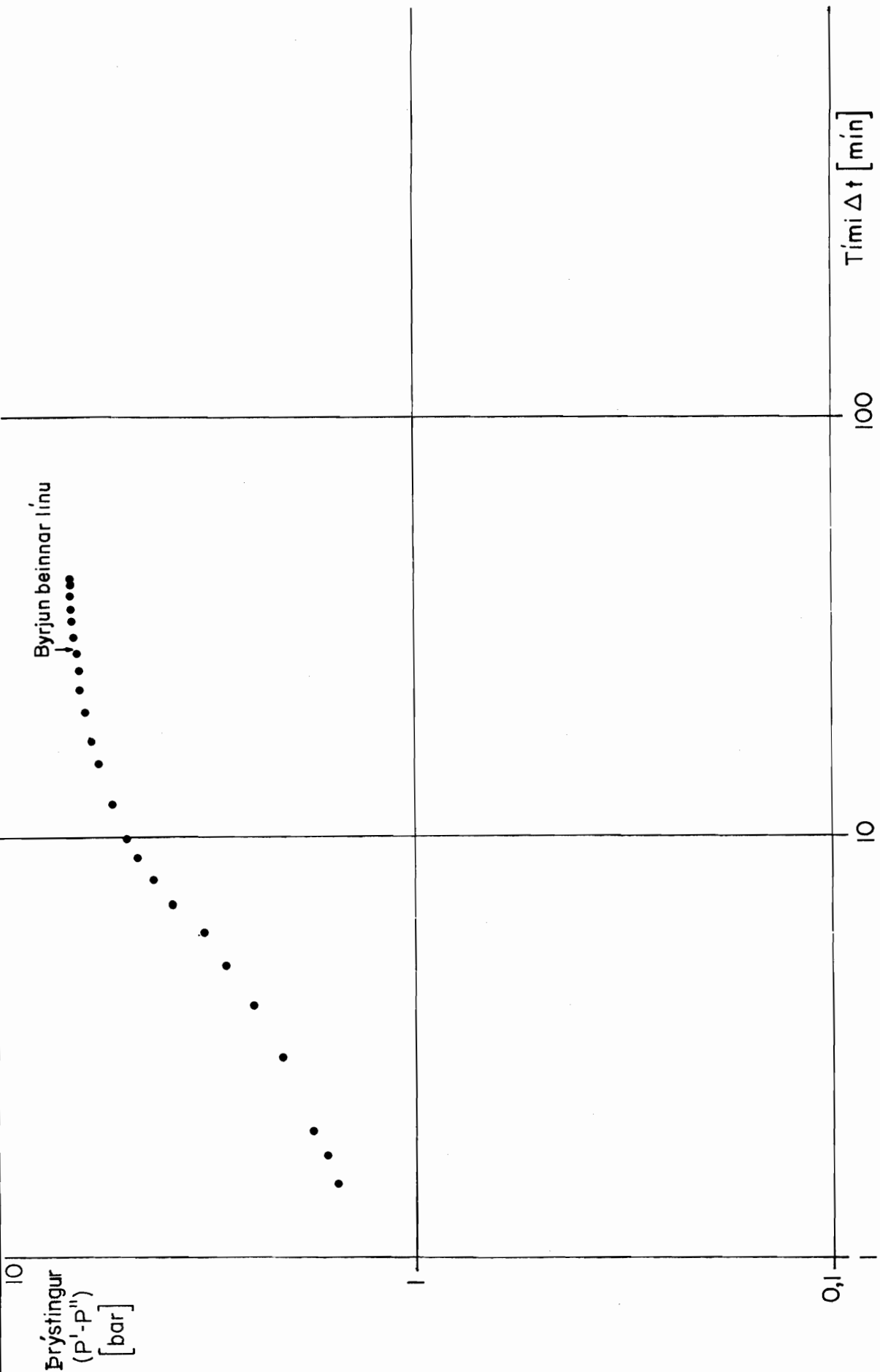
ORKUSTOFNUN
Jardhitadeild

Krafla hola KJ-9
Horner graf fyrir prýstingsmælingu



Krafla hola KJ-9

Log-Log maeligraf fyrir þrýstingshækkun





ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

Krafla hola KJ-9

Log-Log mæligraf og ferlar fyrir þrýstingshækkun
(skv. McKinley)

78-06-13 O.S./Sy.J.

T 545

Krafla

F 16771

