



ORKUSTOFNUN  
JARÐHITADEILD

# LEKT Í BORHOLUM Í KRÖFLU

Ómar Sigurðsson  
Valgarður Stefánsson

OS JHD 7727

JÚNÍ 1977

# LEKT Í BORHOLUM Í KRÖFLU

Ómar Sigurðsson  
Valgarður Stefánsson

OS JHD 7727

JÚNÍ 1977

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR

2. AÐFERDIR

2.1. Timaferlar

2.2 Aðferð Jacobs

2.3 Prýstingsmælingar

2.4 Vatnsleiðnigeta bergs

2.5 Úrvinnsla þrýstimælinga í oliuiðnaði

3. EINSTAKAR HOLUR

3.1 Hola KJ-6

3.2 Hola KJ-7

3.3 Hola KG-8

3.4 Hola KJ-9

3.5 Hola KG-10

3.6 Hola KJ-11

4. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

5. UMRÆDA

HEIMILDIR

TÖFLUR

- I. Lektarstuðull fenginn frá þrepidælingum - Tímaferils aðferð.
- II. Lektarstuðull fenginn frá þrepidælingum - Aðferð Jacobs.
- III. Lektarstuðull fenginn frá þrýstingælingum.
- IV. Lektarstuðull T210 ákvarðaður með mismunandi aðferðum.
- V. Rennsliseiginleikar KG-8 og KJ-9.
- VI. Rennsli úr gufuholum.
- VII. Vatnsleiðnigeta nokkurra jarðhitasvæða.

MYNDASKRÁ

Mynd	F	Heiti
1	14744	Krafla hola KJ-6 Þrepidæling gerð 760803
2	14745	Krafla hola KJ-6 Þrepidæling - vatnsborðslækkun
3	15639	Þrepidæling, hola KJ-6 vatnsborðshækkun
4	15627	Þrepidæling, hola KJ-6 Aðferð Jakobs
5	15565	Krafla hola KJ-7 Þrepidæling gerð 760907
6	15570	Krafla, hola KJ-7 Þrepidæling - vatnsborðslækkun
7	15571	Krafla hola KJ-7 Þrepidæling - vatnsborðshækkun
8	15628	Þrepidæling, hola KJ-7 Aðferð Jakobs
9	15566	Krafla hola KG-8 Þrepidæling
10	15572	Krafla hola KG-8 Þrepidæling - vatnsborðslækkun
11	15573	Krafla hola KG-8 Þrepidæling - vatnsborðshækkun
12	15629	Þrepidæling hola KG-8 Aðferð Jakobs

13	15703	þrýstímæling, hola KG-8
14	15704	Krafla hola KG-8
		þrýstingsmæling
15	15707	Krafla hola KG-8
		Horner línurit
16	15641	Krafla hola KJ-9
		þrepadæling gerð 761213
17	15637	þrepadæling hola KJ-9
		Vatnsborðslækkun
18	15638	þrepadæling hola KJ-9
		Vatnsborðslækkun
19	15635	þrepadæling hola KJ-9
		Vatnsborðshækun
20	15636	þrepadæling hola KJ-9
		Vatnsborðshækun
21	15631	þrepadæling hola KJ-9
		Aðferð Jakobs
22	15630	þrepadæling hola KJ-9
		Aðferð Jakobs
23	15702	þrýstímæling hola KJ-9
24	15705	Krafla, hola KJ-9
		þrýstímæling
25	15706	Krafla, hola KJ-9
		Horner línurit
26	15564	Krafla, hola KG-10
		þrepadæling gerð 761116
27	15574	Krafla, hola KG-10
		þrepadæling - vatnsborðslækkun

28	15575	Krafla, hola KG-10 Þrepadæling - vatnsborðshækkun
29	15632	Þrepadæling, hola KG-10 Aðferð Jakobs
30	15640	Krafla, hola KJ-11 Þrepadæling gerð 761120
31	15634	Þrepadæling, hola KJ-11 Vatnsborðslækkun
32	15633	Þrepadæling, hola KJ-11 Vatnsborðshækkun
33	15802	Samband heildarrennslis og lektar í borholum í Kröflu
34	15361	Krafla, hola KJ-9 Mælingar í blásandi holu
35	15801	Samband suðuprýstings á innstreymis- vatni og mesta massaſtreymis úr gufuholum.



## 1. INNGANGUR

Vitneskja um eiginleika jarðhitasvæða skiptir meginmáli við nýtingu jarðvarma. Koma þar til bæði eiginleikar bergsins, eiginleikar jarðhitavökvans og hvernig jarðhitakerfin eru uppbryggð. Ef hægt er að fá vitneskju um þessi atriði er ekki einungis hægt að gera sér grein fyrir hvernig jarðhitavökvinn verður nýttur á hagkvæman hátt, heldur er einnig hægt að segja eitthvað um hvernig jarðhitakerfið bregðist við nýtingu, og jafnvel hve mikla og hversu langvarandi nýtingu hægt er að hafa á hverju jarðhitasvæði.

Um langt árabil hefur verið fylgst með jarðhitasvæðunum í Reykjavík og Mosfellssveit í þessum tilgangi. Dæluprófanir hafa verið notaðar með góðum árangri til þess að meta vatnsgæfni einstakra borhola, en einnig til að kanna eiginleika jarðhitakerfanna. Hins vegar hefur þessum aðferðum ennþá lítið verið beitt á íslenskum háhitasvæðum. Þó hefur þessum aðferðum verið beitt í holu 5 á Nesjavöllum, og rannsókn er nú í gangi á Svartsengissvæðinu.

Við dæluprófanir á jarðhitaholum er yfirleitt byggt á reynslu frá grunnvatnsrannsóknum og þeim aðferðum sem notaðar eru við vinnslu olíu. Fyrirfram er ekki vitað að hve miklu leyti hægt er að nota þessar aðferðir við rannsóknir á íslenskum háhitasvæðum. Sumar forsendur vanalegra grunnvatnsreikninga gilda ekki á háhitasvæðum, auk þess sem lóðrétt streymi (convection) er líklega algengt á háhitasvæðum. Til þess að athuga að hve miklu leyti hægt væri að nota dæluprófanir við mat á rennslideiginleikum í Kröflu, var ákveðið að þrepadæla allar borholur, sem boraðar voru þar á árinu 1976. Alls voru boraðar sex holur á árinu, og voru þær

þrepidældar í lok borunar. Fyrri hluta árs 1977 var einnig mæld þrýstingshækkun í tveim holum, þegar lokað var fyrir holurnar eftir nokkurra mánaða blástur.

Í þessari skýrslu er greint frá niðurstöðum þessara athuganna. Lekt allra holanna er ákvörðuð á mismunandi hátt, og samræmi milli aðferða athugað.

Niðurstöðurnar eru bundnar við einstakar holur, þar sem áhrif milli hola hafa enn ekki verið mæld. Svæðiseiginleikar jarðhitakerfanna í Kröflu verða því varla ákvarðaðir með fyrirliggjandi gögnum.

## 2. ADFERÐIR

### 2.1. Tímaferlar.

Östöðugt vatnsrennsli í sambjappanlegum lokuðum (confined) vatnsleiðara, þ.e. afmörkuðum að ofan og neðan, og af jafnri þykkt (b) hefur verið nálgæð með hlutafleiðujöfnunni

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{S}{Kb} \frac{\delta h}{\delta t} \quad (1)$$

þar sem  $h$  = þrýstings hæð (piezometric head)

$x, y, z$  = ásar í hnitarkefni

$S$  = geymslustuðull vatnsleiðara (coefficient of storage)

$K$  = vatnsleiðnistuðull (coefficient of permeability)

$b$  = þykkt vatnsleiðara

$t$  = tími

Skilyrði fyrir því að jafna (1) gildi er að vatnsleiðarinn sé elastiskur og að eðlismassi vatnsins sé fasti innan vatnsleiðarans.

Borhola, sem sker vatnsleiðara og dælt er úr, er talin hafa hringлага áhrifasvæði. Um holuna gildir því jafna (1) sem skrifa má í planpólarhnitum sem

$$\frac{\delta^2 h}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta h}{\delta r} = \frac{S}{Kb} \frac{\delta h}{\delta t} \quad (2)$$

Við dælingu úr borholu myndast niðurdráttarkeila umhverfis hana, keila sem vex með tímanum. Með því að gera ráð fyrir, að borhola dragi til sín jafnt rennsli úr vatnsleiðara,

að  $h = h_0$  áður en dæling hefst og að  $h$  stefni á  $h_0$ , þegar r stefnir á óendanlegt eftir að dæling hefst, fann Theis lausn á jöfnu (2) sem

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (\text{jafna Theis}) \quad (3)$$

þar sem  $h_0$  = vatnsborð (þrýstingshæð) fyrir dælingu

$h$  = vatnsborð (þrýstingshæð) við tímann t eftir að  
dæling hófst

$Q$  = vatnsrennsli úr borholu

$r$  = fjarlægð frá borholu

$T$  =  $K_b$  = lektarstuðull (coefficient of transmissi-  
bility)

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Skilyrði fyrir því að jafna (3) gildi eru:

1. Vatnsleiðarinn sé einleitur (homogeneous) og án frávika (isotropic) þ.e. sé óbreyttur í hegðun, vatnsleiðni og hafi jafna hitadreifingu í bæði láréttu og lóðréttu stefnu.
2. Vatnsleiðarinn hafi ótakmarkaða láréttu útbreiðslu.
3. Vatnsleiðarinn hafi jafna þykkt.
4. Vatnsleiðarinn taki ekki við rennsli frá vatnsuppsprettu.
5. Borholan skeri og taki til sín vatn frá allri þykkt vatnsleiðarans.
6. Þvermál borholunnar sé óendanlega lítið.
7. Vatn tekið frá vatnskerfinu renni undir eins brott vegna lækkunar í þrýstingshæð.

Lausn á tegrinu  $\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = W(u)$  (holufall) má nálgaa með röðinni  $[-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} \dots]$

Fyrir lítil gildi á  $u$  ( $u < 0,01$ ) er skekkjan minni en 1% með því að nota jöfnu (4).

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} \left[ -0,5772 - \ln \frac{r^2 s}{4Tt} \right] \quad (4)$$

sem einnig má skrifa sem

$$h_o - h = \frac{2.303 Q}{4 \pi T} \log_{10} \frac{2.25 T t}{r^2 s} \quad (5)$$

Til að finna lektarstuðulinn T er notuð einfölduð myndræn lausn á jöfnu (5), en samkvæmt henni fæst bein lína á grafi, þar sem vatnsborðslækkun (niðurdráttur) eða vatnsborðshækkun ( $s - s' = recovery$ ) er teiknuð á móti logaritmanum af tímanum fyrir jafnt rennsli. Hallatala þeirrar línu yfir eina logaritmalotu (cycle) er

$$\Delta h = \frac{2.303 Q}{4 \pi T} \text{ svo } T = \frac{2.303 Q}{4\pi \Delta h} \quad (6)$$

í hentugum einingum yrði jafna (6)

$$T = 1.832 \times 10^{-4} \frac{Q}{\Delta h} \quad (7)$$

þar sem  $T =$  lektarstuðull í  $\text{m}^2/\text{sek}$

$Q =$  vatnsrennsli í  $1/\text{sek}$  ( $\text{dm}^3/\text{sek}$ )

$\Delta h =$  Vatnsborðsbreyting í m yfir eina logaritma lotu.

## 2.2. Aðferð Jacobs

Árið 1947 lýsti C.E. Jacob úrvinnsluaðferð fyrir endurtekinn þreppa-niðurdrátt. Í raun er aðferðin ákvörðun á eiginniðurdrætti (specific drawdown) þ.e. hlutfall vatnsborðslækkunar og vatnsrennslis ( $\frac{h_0 - h}{Q}$ ) við minnst 3-4 dæluprep, sem standa í stuttan tíma. Aukning í eiginniðurdrætti fyrir aukið vatnsrennslí er meðal annars talin stafa af iðustreymi í borholunni og næsta nágrenni hennar þ.e. við raufar borholufóðringa og rétt út fyrir borholuveggina, en utar er vatnsleiðarinn talinn hafa lagstreymi. C.E. Jacob tók því jöfnu (4), sem er nálgun á jöfnu Theis, og bætti við hana leiðréttigarlið fyrir tap, er verður í borholunni og fékk

$$h_0 - h = \frac{Q}{4 \pi T} \ln \frac{2.25 Tt}{r^2 S} + CQ^n \quad (8)$$

Einfalda má jöfnu (8) í skrift með því að setja inn í hana

$$B = \frac{1}{4 \pi T} \ln \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \quad (9)$$

þá fæst

$$h_0 - h = BQ + CQ^n \quad \text{eða} \quad H = BQ + CQ^n \quad (10)$$

þar sem  $B =$  línulegur stuðull fyrir tap í vatnsleiðara

$C =$  stuðull fyrir tap í borholunni t.d vegna

iðustreymis o.fl.

$r =$  radius borholu

$n =$  veldisvísir

$Q =$  vatnsrennslí

$H =$  vatnsborðsbreyting

C.E. Jacob giskaði án = 2 og notaði myndræna lausn á jöfnu (10).

Seinni athuganir hafa sýnt að veldið n getur vikið verulega frá 2 eða því sem Jacob áætlaði. Hér er aðferð Jacobs beitt þannig að í stað þess að nota vatnsborðslækkun eða niðurdrátt er notuð vatnsborðshækkun.

Þegar dælt er í holuna fæst vatnsborðshækkun sem er nánast spegilmynd vatnsborðslækkunar við dælingu úr holunni. Ádæling gefur því:

$$\frac{H}{Q} = B + CQ \quad (11)$$

þar sem  $H$  = vatnsborðsbreyting (hækkun).

Samkvæmt jöfnu (11) fæst bein lína á grafi, þar sem eiginvatnsborðshækkun ( $\frac{H}{Q}$ ) er teiknuð á móti vatnsrennsli ( $Q$ ). Stuðullinn  $B$  fæst þá sem skurðpunktur við  $\frac{H}{Q}$  - ásinn. Þegar  $B$  hefur verið fundið með þessari myndrænu lausn á jöfnu (11) er hægt að finna lektarstuðulinn  $T$  út frá jöfnu (9)

í hentugum einingum verður jafna (9)

$$B = \frac{6,87}{T} \ln \frac{15.62 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot t}{r^2 S} \quad (12)$$

þar sem  $B$  = línulegur stuðull fyrir tap í vatnsleiðara í  $\frac{m}{(l/s)}$

$T$  = lektarstuðull í  $m^2/dag$

$S$  = geymslустуðull vatnsleiðara, einingalaus

$t$  = tími frá byrjun hverrar dælingar í mín

$r$  = radius borholu í m

Ef  $r \approx 0,11$  m (4,5 in) er  $r^2 = 0,0131 m^2$  og jafna (12) verður

$$B = \frac{6,87}{T} \ln \frac{0,1192 T t}{S} \quad eða$$

$$B = \frac{15,82}{T} \log_{10} \frac{0,1192 T t}{S}$$

### 2.3. Þrýstingsmælingar.

Við úrvinnslu á þrýstingsmælingum, sem mæla þrýstingslækkun eða hækjun, sem fall af tíma, er hægt að fara líkt að og í kafla 2.1. Hér verður notuð umskrift á jöfnu (3) (jöfnu Theis) sem Sveinbjörn Björnsson (4) hefur gert fyrir þrýstingsbreytingu. Þrýstingsbreytingu má skrifa sem fall af hæðarbreytingu fyrir vatnssúlu þannig

$$\begin{aligned} P_o - P &= g\rho(h_o - h) \text{ eða} \\ h_o - h &= \frac{P_o - P}{g\rho} \end{aligned} \quad (13)$$

þar sem  $h_o$  = vatnsborð fyrir dælingu

$h$  = vatnsborð við tímann  $t$  eftir að dæling hófst

$P_o$  = upphaflegur þrýstingur ótruflaðs vatnskerfis

$P$  = þrýstingur vatnskerfis á sama stað og  $P_o$  en við

tímann  $t$  eftir að dæling (blástur, vinnsla) hófst

$g$  = þyngdarhröðun

$\rho$  = eðlismassi vökva

Setjum jöfnu (13) inn í jöfnu (3) og fáum

$$P_o - P = \frac{g \rho Q}{4 \pi T} \cdot W(u) \quad (14)$$

Jöfnu (14) má svo einfalda í

$$P_o - P = \frac{g M}{4 \pi T} W(u) \quad (15)$$

þar sem  $M = \rho \cdot Q$  = massastreymi

$T$  = lektarstuðull

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = holufallið$$

annað er eins og áður.

Forsendur fyrir því að jafna (15) gildi eru þær sömu og fyrir jöfnu (3) enda í raun sama jafnan.

Sé dælingu úr borholu hætt, fæst niðurdráttarleif (residual drawdown) samkvæmt

$$P_o - P' = \frac{g M}{4\pi T} (W(u) - W(u')) \quad (16)$$

þar sem  $P'$  = þrýstingur vatnskerfis mældur á sama stað og  $P_o$

við tímann  $t$  eftir að dæling hófst, en við tímann  $t'$  eftir að dælingu lauk.

$W(u')$  = holufall við sömu tíma og  $P'$  er mælt við.

Á svipaðan hátt og gert hefur verið hér að framan, má einnig umskrifa jöfnu (10) í

$$P_o - P = BM + CM^n \quad (17)$$

þar sem um er að ræða sambærilega stuðla og áður hafa verið skilgreindir.

Reynslan hefur sýnt að stuðullinn  $C$  breytist óverulega með tímanum. Það má því einangra liðinn  $CM^n$  frá jöfnunni. Það er gert þannig að þrýstingslækkun eða þrýstifall er mælt fyrir sama massastreymi ( $M$ ) úr holunni við tvo eða fleiri mismunandi tíma. Til dæmis ef

$$P_o - P_1 = \frac{g M}{4\pi T} W(u_1) + CM^n \text{ er dregin frá}$$

$$P_o - P_2 = \frac{g M}{4\pi T} W(u_2) + CM^n \text{ fæst jafna fyrir}$$

þrýstifallsmismun sem

$$P_1 - P_2 = \frac{g M}{4\pi T} (W(u_2) - W(u_1)) \quad (18)$$

Fyrir lítil gildi á  $u$  ( $u \ll 0.01$ ) er eins og áður hægt að einfalda tegrið (holufallið) í  $W(u) = -0.5772 - \ln u = 2.3 \log_{10} \left( \frac{0.561}{u} \right)$  og  $W(u) - W(u') = \ln \frac{u'}{u} = \ln \frac{t}{t'} = 2.3 \log_{10} \frac{t}{t'}$ .

Fyrir mælingar gerðar í sjálfri vinnsluholunni er r það lítið, að  $u$  verður nógu lítið.

Í hentugum einingum einfaldast fyrrnefndar jöfnur;

$$\text{jafna (15)} \frac{P_o - P}{T} = \frac{1.54 M}{r^2 S} \log_{10} \left( \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \right) \quad (19)$$

$$\text{jafna (16)} \frac{P_o - P'}{T} = \frac{1.54 M}{r^2 S} \log_{10} \left( \frac{t}{t'} \right) \quad (20)$$

$$\text{og jafna (18)} \frac{P_1 - P_2}{T} = \frac{1.54 M}{r^2 S} \log_{10} \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (21)$$

þar sem  $P_o - P$  = þrýstingsbreyting í bar (1 bar ~ 1.0194 kg/cm<sup>2</sup>)

M = massastreymi í kg/sek

T = lektarstuðull í m<sup>2</sup>/dag

r = radius borholu í m

S = geymslustuðull vatnskerfis - einingarlaus

t = tími frá því dæling hófst í mín

t' = tími síðan dælingu lauk í mín

Til að finna lektarstuðulinn T eru notaðar myndrænar lausnir á jöfnum (19), (20) og (21) en samkvæmt þeim fást beinar línur á gröfum, þar sem þrýstingslækkun eða þrýstingshækkun (pressure build-up) er teiknuð á móti logaritmanum af tímanum (t) eða tímahlutfallinu (t/t').

Hallatala þeirra línu yfir eina logaritma lotu yrði

$$\Delta P = \frac{1.54 M}{T} \quad \text{svo } T = \frac{1.54 M}{\Delta P} \quad (22)$$

þar sem  $\Delta P$  = þrýstingsbreyting yfir eina logaritma lotu í bar,

#### 2.4. Vatnsleiðnigeta bergs k (specific permeability)

Lektarstuðullinn ( $T = K_b$ ) er margfeldi vatnsleiðni og þykktar vatnsleiðara. Lektarstuðullinn breytist því með þykkt vatnsleiðarans og er auk þess háður hitastigi og eiginleikum bergsins. Vatnsleiðni hefur verið lýst með sambandinu

$$K = \frac{C d^2 \gamma}{\mu} \quad (23)$$

þar sem  $K$  = vatnsleiðnistiðull

$\mu$  = seigja vökv (dynamic viscosity)

$\gamma = \rho \cdot g$  = eðlisþungi

$\rho$  = eðlismassi

$g$  = þyngdarhröðun

$d$  = meðalþvermál pora

$C$  = fasti háður öðrum eiginleikum, en hafa verið upptaldir s.s.  
poruhlutfalli, pökkun, stærðkorna, dreifingu og lögur.

þar sem margfeldið  $C \cdot d^2$  er eingöngu háð eiginleikum bergsins er það  
skilgreint, sem vatnsleinigeta þess, þ.e.

$$k = C d^2 \quad (24)$$

Með því að umskrifa jöfnu lektarstuðulsins fyrir vatnsleiðnigetu fæst

$$k = \frac{T \mu}{b \gamma} \quad (25)$$

Eftir að lektarstuðullinn hefur verið ákvarðaður má segja að einu  
óþekktu stærðirnar í jöfnu (25) séu vatnsleiðnigetan ( $k$ ) og þykkt  
vatnsleiðarans ( $b$ ). Því hefur oft verið valin sú leið að nota  
margfeldi þessarra stærða ( $k \cdot b$ ) til að fá samanburð á niðurstöðum  
frá mismunandi úrlausnaraðferðum og við aðrar borholur. Þá höfum við að

$$k b = \frac{T \mu}{\rho g} = \frac{T v}{g} \quad (26)$$

þar sem  $k b$  = vatnsleiðnigetuþykkt

$T$  = lektarstuðull

$\mu$  = seigja vökv (dynamic viscosity)

$v = \mu/\rho$  = seigja vökv (kinematic viscosity)

$\rho$  = eðlismassi vökv

$g$  = þyngdarhröðun

í hentugum einingum verður jafna (26) að

$$k_b = 1.18 \cdot 10^{-9} \frac{T \mu}{\rho} = 1.18 \cdot 10^{-6} T v \quad (27)$$

þar sem  $k_b$  = vatnsleiðnigetubykkt í  $m^3$

$T$  = lektarstuðull í  $m^2/dag$

$\mu$  = seigja vökva (dynamic viscosity) í centipoise

$v$  = seigja vökva (kinematic viscosity) í  $m^2/sek$

$\rho$  = eðlismassi vökva í  $kg/m^3$

Með ítarlegum rannsóknunum má oft finna þykkt vatnsleiðarans og er þá hægt að ákvarða virka- eða heildarvatnsleiðnigetu vatnskerfisins ( $k_{eff}$ ). Jafna (25) verður þá

$$k_{eff} = \frac{T \mu}{b \gamma} = \frac{T \mu}{b \rho g} = \frac{T v}{b g} \quad (28)$$

þar sem  $k_{eff}$  = virk- eða heildarvatnsleiðnigeta

$b$  = þykkt vatnsleiðara

en annað sama og áður. Algengt er að þykkt vatnsleiðarans sé illa þekkt, en menn sækjast samt eftir mati á heildarvatnsleiðnigetu bergsins.

Fyrir jarðhitasvæði hefur þetta verið leyst með því að reikna með öllu dýpi borholunnar neðan steyptra fóðringa ( $D$ ), sem þykkt vatnsleiðarans.

Stærðin  $D$  er stærri en raunveruleg þykkt vatnsleiðarans ( $D \geq b$ ), því fæst með þessu móti lágmarks mat á heildarvatnsleiðnigetu bergsins.

Þannig verður jafna (28) í hentugum einingum

$$k_{eff} = 1.196 \cdot 10^3 \frac{T \mu}{D} = 1.196 \cdot 10^6 \frac{T v}{D} \quad (29)$$

þar sem  $k_{eff}$  = heildarvatnsleiðnigeta í darcy (1 darcy =  $0.987 \cdot 10^{-12} m^2$ )

$D$  = dýpi borholu neðan steyptra fóðringa í m  
annað eins og áður.

### 2.5. Úrvinnsla þrýstinga í olíuiðnaði.

Þeim úrvinnsluaðferðum, sem beitt er í olíuiðnaði á borholugögn, svipar í mörku til þeirra aðferða sem beitt er í grunnvatnsfræðum, enda þær jöfnur sem liggja til grundvallar útreikningum sambærilegar. Í olíuiðnaði er algengast að nota mælingar á þrýstingshækkun (pressure build-up) í borholu til túlkunar.

Ef við tökum jöfnu (16)  $P_o - P' = \frac{g M}{4\pi T} (W(u) - W(u'))$  sem er fyrir niðurdrátt (þrýstingsfall) í borholu með ósamfellda dælingu og setjum inn nálgunina fyrir holufallið  $W(u)$  hōfum við jöfnuna

$$P_o - P' = \frac{2.3 g M}{4 \pi T} \log_{10} \left( \frac{t^*}{t} \right) \quad (30)$$

Við þrýstingshækkun samsvarar

$P_o$  = upphafsprýstingur vatnskerfis við ótruflaðar aðstæður

$P'$  = þrýstingur í borholu eftir að henni hefur verið lokað eftir vinnslu, blástur

$\Delta t$  = tími síðan borholu var lokað

$t^*$  = síðasta vinnslutímabil borholu

$\frac{t^*}{t} \sim \frac{t^* + \Delta t}{\Delta t}$  = því við þrýstingshækkun er  $P'$  mælt við tímann

$t'$  ( $=\Delta t$ ) eftir að vinnsla hættir og tímann

$t$  ( $=t^* + \Delta t$ ) eftir að vinnsla hófst.

Ef við skrifum jöfnu (30) með þessum breytingum hōfum við

$$P_o - P' = \frac{2.3 g M}{4 \pi T} \log_{10} \left( \frac{t^* + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (31)$$

Ef haldið er áfram með umskriftina hōfum við frá jöfnu (25)

$$\text{að } T = \frac{k b \gamma}{\mu} \text{ en } \gamma = \rho g \text{ svo } T = \frac{k b \rho g}{\mu} \quad (32)$$

Setjum þetta inn í jöfnu (31) og fáum

$$P_o - P' = \frac{2.3 M \mu}{4 \pi k b \rho} \log_{10} \left( \frac{t^* + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (33)$$

þar sem  $P_o - P'$  = þrýstingsbreyting

M = massastreymi

$\mu$  = seigja vökva (dynamic viscosity)

k = vatnsleiðnigeta

b = þykkt vatnsleiðara

$\rho$  = eðlismassi vökva (við hitastig kerfisins)

$\Delta t$  = tími síðan borholu var lokað (klst)

$t^*$  = síðasta vinnslutímabil (blásturs-) borholu (klst)

Forsendur fyrir því að jafna (33) gildi eru eins og áður þær sömu og fyrir jöfnu (3), enda má segja að um sömu jöfnu sé að ræða. Fundin er einfölduð myndræn lausn á jöfnu (33) með grafi, þar sem þrýstingurinn ( $P'$ ) er teiknaður á móti logaritmanum af tímahlutfallinu  $(\frac{t^* + \Delta t}{\Delta t})$ .

Samkvæmt jöfnu (33) gefur graf þannig teiknað beina línu. Hallatala þeirrar línu yrði yfir eina logaritma lotu

$$\Delta P = \frac{2.3 M \mu}{4 \pi k b \rho} \quad (34)$$

Til að fá samanburð við aðrar aðferðir finnum við vatnsleiðnigetuþykktina ( $k b$ ). Þá verður jafna (34) að

$$k b = \frac{2.3 M \mu}{4 \pi \Delta p} \quad (35)$$

eða  $k b = \frac{2.3 M v}{4 \pi \Delta p}$  (36)

í hentugum einingum verður jafna (36)

$$k b = 1.832 \times 10^{-6} \frac{M v}{\Delta p} \quad (37)$$

þar sem  $k b$  = vatnsleiðnigetubykkt í  $m^3$

M = massastreymi í kg/sek

$\nu$  = seigja vökva (kinematic viscosity) í  $m^2/sek$

$\Delta p$  = þrýstingsbreyting yfir eina logaritmalotu í bar  
(1 bar  $\sim 1.0194 \text{ kg/cm}^2$ )

Graf, þar sem þrýstingurinn ( $P'$ ) er teiknaður á móti tímahlutfallinu ( $\frac{t*+\Delta t}{\Delta t}$ ) svo kallað Horner línurit (17), getur haft möguleika á fleiri en einni beinni línu, vegna ýmissa áhrifavalda sem koma misvel fram á því. Til dæmis gætir í byrjun línuritsins oft áhrifa frá holunni og næsta nágrennis hennar. Þá kemur sá hluti ferilsins, þar sem unnt er að fá upplýsingar um vatnskerfið (hin rétta beina lína) og að lokum getur verið hluti, sem er háður stærð vatnsleiðara og jafn vel innstreymi í vatnskerfið. Til að ákvarða hvar rétta lína vatnsleiðarans byrjar fyrir línurit sem sýnir samspil fyrrnefndra þátta, er gert annað graf, þar sem logaritminn af þrýstingshækjuninni ( $P' - P''$ ) er teiknaður á móti logaritmanum af tímanum ( $\Delta t$ ), þar sem

$p''$  = þrýstingur í borholu við blástur rétt fyrir lokun

$p'$  = þrýstingur í borholu eftir lokun

$\Delta t$  = tími síðan borholu var lokað í klst.

Ferill þessa grafs er síðan borinn saman viðmátferil (t.d. eftir R.G. Agarwal, R. Al-Hussainy og H.J. Ramey jr.) (18) og lesið út úr því tíminn ( $\Delta t$ ), þar sem rétta línan byrjar. Í olíuiðnaðinum hafa einnig verið þróaðar aðferðir til að fá upplýsingar út úr fyrri og seinni hluta Horner-línuritsins, en þeirra verður ekki getið hér.

### 3 EINSTAKAR HOLUR

#### 3.1 Hola KJ-6

Á mynd 1 (F 14744) eru sýndar vatnsborðsbreytingar fyrir þrepadælingu í holu KJ-6. Eins og þar sést hafði um 32 l/s verið dælt á holuna áður en eiginleg þrepadæling hófst. Dælt var í tveim þrepum 25,5 l/s og 20,0 l/s. Fyrir þessa þrepadælingu eru mælingar á vatnsborðslækkun frekar góðar til túlkunar, en mælingar á vatnsborðshækkun nokkuð lakari. Út frá "tímaferils aðferðinni" fæst lektarstuðullinn fyrir vatnsborðslækkun mynd 2 (F 14745) á bilinu  $T = 7,9 - 9,9 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $9 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrir vatnsborðshækkun mynd 3 (F 15639) er hann á bilinu  $T = 12 - 24 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Þar sem hér eru aðeins tvö þrep fyrir hendi er mjög erfitt að meta lektarstuðulinn, sem fall af línulegum stuðli vatnsleiðara (aðferð Jacobs). Eins og mynd 4 (F 15627) sýnir má áætla að lektarstuðullinn sé samkvæmt "aðferð Jacobs" á bilinu  $T(B) = 32 - 36 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $34 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Ofangreindar niðurstöður verður síðan að leiðréttu frá hitastigi dæluvatnsins í það hitastig sem er talið ríkjandi í vatnsleiðaranum. Eins og sjá má í 2.4 er lekt háð hitastigi og eðlismassa vökvans.

### 3.2 Hola KJ-7

Á mynd 5 (F 15565) eru sýndar vatnsborðsbreytingar fyrir þrepidælingu í holu KJ-7. Dælt var í fimm þrepum 60,0 l/s, 60,0 l/s, 45,0 l/s, 31,7 l/s og 20,0 l/s. Nokkur truflun varð á mælingum sérstaklega við fyrsta þrep, þar sem vatnsborðsmælir vildi festast. Þá urðu einnig bilanir í teljara, þegar verið var að mæla vatnsborðslækkun eftir annað og þriðja þrep. Út frá "tímaferils aðferðinni" fæst lektarstuðullinn fyrir vatnsborðslækkun mynd 6 (F 15570) á bilinu  $T = 13 - 23 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $17 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrir vatnsborðshækkun mynd 7 (F 15571) fæst  $T = 11 - 25 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $19 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Lektarstuðull fenginn með "aðferð Jacobs" sbr. mynd 8 (F 15628) verður á bilinu  $T(B) = 63 - 83 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $72 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Fyrrnefndar niðurstöður verður svo að leiðréttá frá hitastigi dæluvatns í hitastig vatnsleiðara.

### 3.3 Hola KG-8

Á mynd 9 (F 15566) eru sýndar vatnsborðsbreytingar fyrir þrepidælingu í holu KG-8. Dælt var í sex þrepum 20,0 l/s, 16,0 l/s, 16,6 l/s, 10,0 l/s, 24,0 l/s og 43,0 l/s. Nokkrar truflanir urðu á mælingum þar sem vatnsborðsmælir vildi festast, bilun varð í teljara og dæluafkost voru óstöðug. "Tímaferils aðferðin" gefur lektarstuðulinn fyrir vatnsborðslækkun sbr. mynd 10 (F 15572) á bilinu  $T = 5,3 - 16 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $10 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrir vatnsborðshækkun gefur hún stuðulinn á bilinu  $T = 4,7 - 12,6 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $8 \text{ m}^2/\text{dag}$ , sbr. mynd 11 (F 15573).

Ákvörðun á lektarstuólinum með "aðferð Jacobs", sjá mynd 12 (F 15629), gefur hann á bilinu  $T(B) = 37 - 38 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi  $37,5 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Á mynd 12 sést einnig að mælingar á  $16,6 \text{ l/s}$  þepinu eru verulega truflaðar. Einnig eru einhverjar truflanir í  $43,0 \text{ l/s}$  þepinu.

Leiðréttar verður ofangreindar niðurstöður frá hitastigi dæluvatns yfir í hitastig vatnsleiðara.

Fyrir þessa holu hafa einnig verið gerðar þrýstimælingar, bæði í blásandi og lokaðri holu, sjá mynd 13 (F 15703). Lektarstuóull fenginn út frá þrýstingsbreytingu yfir nokkurn tíma, mynd 14 (F 15704), verður fyrir þrýstifall  $T = 10 \text{ m}^2/\text{dag}$ , en þrýstingshækkun  $T = 7,3 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Úrvinnsla þrýstimælinga sambærileg þeim sem notaðar eru í olíuiðnaði gefa lektarstuóulinn fyrir þrýstingshækkun sem  $T=4.5 \text{ m}^2/\text{dag}$ , sjá mynd 15 (F 15707).

### 3.4 Hola KJ-9

Á mynd 16 (F 15641) eru sýndar vatnsborðsbreytingar fyrir þepadælingu í holu KJ-9. Dælt var í tíu þrepum  $30,0 \text{ l/s}$ ,  $61,0 \text{ l/s}$ ,  $60,0 \text{ l/s}$ ,  $60,0 \text{ l/s}$ ,  $35,0 \text{ l/s}$ ,  $60,0 \text{ l/s}$ ,  $59,0 \text{ l/s}$ ,  $60,8 \text{ l/s}$ ,  $42,0 \text{ l/s}$  og  $21,0 \text{ l/s}$ .

Verulegar truflanir voru á þessum mælingum bæði frá mælitækjum og vatnskerfum holunnar. Þegar dælt var í holuna kringum  $60 \text{ l/s}$  rann upp úr holunni. Var þá mæld þrýstingsbreyting og henni síðan snúið yfir í jafngildi vatnssúlu. Vegna þessara og annarra truflanna er töluverð dreifing á gildum lektarstuóulsins sem eru ákvörðuð með "tímaferils aðferðinni". Fyrir vatnsborðslækkun myndir 17 og 18 (F 15637 og F 15638)

verður því lektarstuðullinn á bilinu  $T = 7 - 136 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $47 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrir vatnsborðshækun, myndir 19 og 20 (F 15635 og F 15636) verður stuðullinn á bilinu  $T = 5,6 - 50,4 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $21 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Erfitt er að leggja mat á lektarstuðulinn fyrir þessa aðferð, þar sem tímakúrfurnar eru flestar mjög aflagaðar og víkja mjög frá flestum almennum kennisetningum. Þó er líklegt að lektarstuðullinn skv. þessari aðferð sé eitthvað nálægt  $25 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Þegar "aðferð Jacobs" er notuð sjá myndir 21 og 22 (F 15631 og 15630) kemur í ljós verulegur munur milli vatnsborðsmælinga mælda á venjulegan hátt og þeirra, er voru mældar með þrýstimæli. "Aðferð Jacobs" gefur lektarstuðulinn fyrir vatnsborð mælt með þrýstimæli nálægt  $T \approx 735 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Þetta gildi má telja frekar óáreiðanlegt. Fyrir vatnsborð mælt á venjulegan hátt fæst lektarstuðullinn á bilinu  $T = 58 - 67 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $63 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrrnefndar niðurstöður þarf svo að leiðréttu frá hitastigi dæluvatns yfir í hitastig vatnsleiðara.

Einnig hafa verið gerðar þrýstimælingar bæði í blásandi og lokaðri holu, mynd 23 (F 15702). Lektarstuðullinn fenginn út frá þrýstingsbreytingu yfir nokkurn tíma, sjá mynd 24 (F 15705) verður fyrir þrýstingfall  $T = 20,0 \text{ m}^2/\text{dag}$ , en þrýstingshækun  $T = 15 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Úrvinnsla þrýstimælinga sambærileg þeim sem notaðar eru í olíuiðnaði gefa lektarstuðulinn fyrir þrýstingshækun sem  $T=16.3 \text{ m}^2/\text{dag}$ , sjá mynd 25 (F 15706).

### 3.5 Hola KG-10

A mynd 26 (F 15564) eru sýndar vatnsborðsbreytingar fyrir þrepadælingu

í holu KG-10. Dælt var í fjórum þrepum 25,0 l/s, 35,5 l/s, 46,1 l/s og 35,5 l/s. Áður en hin eiginlega þrepadæling hófst var dælt í holuna um 47 l/s, en ekki var hægt að dæla meiru vegna vatnsskorts. Um 10 mín eftir að þessari dælingu lauk var vatnsborð í 225 m. Fyrsta þrepip Í þrepadælingunni hófst kl. 6.45 og stóð í um það bil klukkutíma. Var þá dælt um 15 l/s í holuna, en vatnsborðið náði aldrei upp að stangarenda í 190 m, tapaðist því þessi mæling. Ekki var hægt að dæla meira vatnsmagni utan með stöngum, vegna lélegs útbúnaðar og var því í síðari fjórum þrepum dælt innan í stöngum.

Út frá "tímaferils aðferðinni" fæst lektarstuðullinn fyrir vatnsborðslækkun, mynd 27 (F 15574) á bilinu  $T = 16 - 39 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $24 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrir vatnsborðshækkun, mynd 28 (F 15575) verður stuðullinn á bilinu  $T = 14 - 32 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $22 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Ákvörðun á lektarstuðlinum með "aðferð Jacobs", sjá mynd 29 (F 15632) gefur lektarstuðul á bilinu  $T(B) = 53-83 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $67 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Ofangreindar niðurstöður ber svo að leiðréttu frá hitastigi dæluvatnsins yfir í hitastig vatnsleiðara.

### 3.6 Hola KJ-11

A mynd 30 (F 15640) eru sýndar vatnsborðsbreytingar fyrir þrepadælingar í holu KJ-11. Þar kemur fram að dælt hafði verið á holuna um 16,7 l/s, áður en eiginleg þrepadæling hófst. Þrepadælingin sjálf saman stendur svo af sjö þrepum 23,7 l/s, 47,5 l/s, sem er breytt í 59,3 l/s, 60,4 l/s,

61,1 l/s, 40,4 l/s, 20,4 l/s og 30,1 l/s.

Nokkrar truflanir voru á þessum mælingum, einkum vegna óstöðugleika í dæluafkóstum og eins vildi vatnsborðsmælir festast. Þá eru truflanir vegna samspila vatnskerfa í holunni.

Með "tímaferils aðferðinni" er lektarstuðullinn ákvarðaður fyrir vatnsborðslækkun, sjá mynd 31 (F 15634) á bilinu  $T = 7 - 13 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $9 \text{ m}^2/\text{dag}$ . Fyrir vatnsborðshækkun, mynd 32 (F 15633) er stuðullinn ákvarðaður á bilinu  $T = 14 - 32 \text{ m}^2/\text{dag}$  með meðalgildi um  $20 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Mjög er erfitt að leggja mat á niðurstöður þessarar aðferðar, þar sem samspli vatnskerfa holunnar hefur það mikil áhrif á vatnsborðsbreytingar í henni að einungis er hægt að nota þrjú til fjögur þrep til túlkunar með tímaferils aðferðinni. Sennilegt mat er að lektarstuðullinn sky. þessari aðferð sé um það bil  $19 \text{ m}^2/\text{dag}$ .

Þessar niðurstöður þarf svo að leiðréttu frá hitastigi dæluvatns yfir í hitastig vatnsleiðara.

#### 4 SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

Við þepadælingarnar voru holurnar keldar. Hitastig dæluvatnsins í þepadælingunum var í flestum tilvikum á bilinu  $16-18^\circ\text{C}$  og er meðaltalið  $17^\circ\text{C}$  notað fyrir útreikninga.

Til samanburðar er alls staðar reiknað með að hitastig í vatnsleiðara

sé 210°C, sem er hitastig efra vatnskerfis í Kröflu. Holur KG-8 og KJ-9 taka vatn úr þessu kerfi, en KG-10 og KJ-11 taka vatn bæði úr þessu 210°C heita kerfi og öðru 320°C heitu kerfi sem liggur dýpra.

Innstreymi í holur KJ-6 og KJ-7 er talið vera að meginhluta úr heitara kerfinu.

Við útreikninga sem settir eru upp í eftirfarandi töflum eru notuð meðalgildi fyrir lektarstuðulinn.

TAFLA I

Lektarstuðull fenginn, frá þrepadælingum

Höla	bil [ $\text{m}^2/\text{dag}$ ]	$T$ meðalgiðt [ $\text{m}^2/\text{dag}$ ]	$T_{20}$ [ $\text{m}^2/\text{dag}$ ]	vatn 20 °C [ $\text{m}^2/\text{dag}$ ]	vatn 210 °C [ $\text{m}^2/\text{dag}$ ]	Dýpi neðan fóðringar [m]	D [m]	Heildarvatnsleiðni- geta $k_{\text{eff}}$ [millidarcy]	$k_b \cdot 10^{-12}$ [ $\text{m}^3$ ]	Vatnsleiðniqetu- þykkt
KJ-6	7.9 - 9.9	9	9.6	64.3	1413	8.27				11.53
KJ-7	12.6 - 23.0	17	18.1	121.3	1336	16.5				21.76
KG-8	5.3 - 16.4	10	10.6	71.0	1111	11.6				12.74
KJ-9	6.9 - 135.7	47 (25)	50.0	335.0	816	74.6				60.10
KG-10	15.7 - 38.8	24	25.5	171.9	1265	24.7				30.84
KJ-11	6.9 - 13.1	9	9.6	64.3	1418	8.24				11.53
 "Tímaferils aðferð" - vatnsborðshækkun										
KJ-6	12.0 - 25.3	19 (10)	20.2	135.3	1413	17.4				24.28
KJ-7	11.1 - 25.3	19	20.2	135.3	1336	18.4				24.28
KG-8	4.7 - 12.6	8	8.5	57.0	1111	9.3				10.23
KJ-9	5.6 - 50.4	21	22.3	149.4	816	33.3				26.80
KG-10	14.4 - 31.8	22	23.4	156.8	1265	22.5				28.13
KJ-11	13.6 - 31.7	20	21.3	142.7	1418	18.3				25.60

TAFLA II

Lektarstuðull fenginn frá þrepaðælum

Hola	"Aðferð Jacobs" - eiginvatnsbordshækku		Vatn 20 °C	Dýpi neðan fóðringar	Heildarvatnsleiðni- þykkt	Vatnsleiðniþetu- þykkt	
	T (B)	meðalgildi [ $m^2/dag$ ]	T <sub>20</sub> [ $m^2/dag$ ]	T <sub>210</sub> [ $m^2/dag$ ]	D [m]	k <sub>eff</sub> [millidarcy]	k b · 10 <sup>-12</sup> [m <sup>3</sup> ]
KJ-6	32.4 - 36.6	34.5	36.7	245.9	1413	31.6	44.11
KJ-7	63.2 - 83.6	72	76.6	513.2	1336	69.8	92.06
KG-8	36.6 - 37.9	37.5	39.9	267.3	1111	43.7	47.95
KJ-9	58.4 - 67.2 (735)	63	67.0	448.9	816	100.0	80.53
KG-10	53.1 - 83.0	67	71.3	477.7	1265	68.6	85.69
KG-11	-	-	-	-	1418	-	-

TAFLA III

Lektarstuðull fenginn frá þrýstingsmælingum

Þrýstingslækkun (sbr. 2.3)

Hola	Vatn 210 °C $T_{210}$ [m <sup>2</sup> /dag]	Dýpi neðan fóðringar D [m]	Heildarvatnsleiðni- geta $k_{eff}$ [millidarcy]	Vatnsleiðnigetu- þykkt $k_b \cdot 10^{-12}$ [m <sup>3</sup> ]
KG-8	10.1	1111	1.65	1.81
KJ-9	20.0	816	4.45	3.59

Þrýstingshækkun (sbr. 2.3)

Hola	Vatn 21 °C $T_{210}$ [m <sup>2</sup> /dag]	Dýpi neðan fóðringar D [m]	Heildarvatnsleiðni- geta $k_{eff}$ [millidarcy]	Vatnsleiðnigetu- þykkt $k_b \cdot 10^{-12}$ [m <sup>3</sup> ]
KG-8	7.3	1111	1.19	1.31
KJ-9	14.8	816	3.30	2.65

Þrýstingshækkun (sbr. 2.5)

Hola	Vatn 210 °C $T_{210}$ [m <sup>2</sup> /dag]	Dýpi neðan fóðringar D [m]	Heildarvatnsleiðni- geta $k_{eff}$ [millidarcy]	Vatnsleiðnigetu- þykkt $k_b \cdot 10^{-12}$ [m <sup>3</sup> ]
KG-8	4.5	1111	0.74	0.81
KJ-9	16.3	816	3.63	2.92

Við samanburð á þeim niðurstöðum sem hér hafa komið fram ber að benda á eftirfarandi:

1. Samræmi milli aðferða við ákvörðun á lekt borholu er ekki góð.
2. Samræmi er ekki gott milli lektarákvarðana í kaldri holu og í heitari holu.

Sést þetta vel í eftirfarandi töflu:

TAFLA IV.

	$T_{210}$ ( $m^2/dag$ )		
Hola	Tímaferill köld hola	Jacob köld hola	Tímaferill heit hola
KJ-6	64 - 135	246	
KJ-7	121 - 135	513	
KG-8	57 - 71	267	4 - 10
KJ-9	150 - 335	449	14 - 20
KG-10	157 - 172	478	
KJ-11	64 - 143		

Aðferð Jacobs gefur 2 - 4 sinnum hærri lektarstuðul en tímaferils aðferðin. Sömu mæliniðurstöður liggja til grundvallar við útreikningana. Liggur því beinast við að álykta að munurinn felist í aðferðum, eða forsendum aðferðanna frekar en að mismunin eigi að rekja til mælinganna. Skýring á þessum mismun er líklega sú að í aðferð Jacobs er tekið tillit til iðustreymis í holunni, en það er ekki gert með tímaferils aðferðinni. Þá má einnig benda á, að aðferðin með tímaferla byggir á mjög snöggum (transient) breytingum á rennsli holu meðan

aðferð Jacobs byggir á að meira jafnvægi sé í holu (semistatinert ástand), þó ekki sé hægt að segja að holan sé í jafnvægi.

Þegar lektarstuðull er ákvarðaður í heitri holu er í reynd notuð tímaferils aðferðin. Mæld gildi í tveim 210°C heitum holum eru þó 5 - 10 sinnum lægri en tilsvarandi gildi umreiknuð í 210°C hita en mæld í köldum holum gefa. Þar sem um er að ræða "sömu" aðferð er þessi munur illskýranlegur nema með því að lekt holunnar hafi minnkað við upphitun bergsins kringum holuna.

Ef gert er ráð fyrir að streymi jarðhitavatnsins sé bundið við sprungur í berGINU gæti þessi möguleiki verið sennilegur. Við borun er bergið kælt og dregst þá saman. Þessi samdráttur bergsins kemur líklega fyrst og fremst fram sem víkkun á sprungum nálægt holunni. Við upphitun þrengjast sprungur hins vegar aftur og lektin minnkar. Sú staðreynd að lekt í holum KG-8 og KJ-9 er minni í heitum holum en í köldum bendir til að streymi jarðhitavatns í efra kerfinu í Kröflu sé fyrst og fremst eftir sprungum. Þessi niðurstaða samrýmist ekki forsendum jöfnu Theis en allir útreikningar í skýrslu þessari eru að meira eða minna leyti byggðir á jöfnu Theis. Athuganir hafa þó sýnt að jöfnu Theis má nota innan vissra marka á streymi eftir sprungum.

##### 5. UMRÆÐA

Í inngangi var minnst á það markmið að kanna notagildi grunnvatns-aðferða til ákvörðuna á rennsliseiginleikum háhitasvæða. Fyrirliggjandi athugun bendir til að ýmis vandamál, mælitæknileg og aðferðaleg, séu flóknari en gert var ráð fyrir í upphafi. Hér að

framan hefur verið minnst á að innri gerð jarðhitakerfis í Kröflu sé líklega sprungukerfi en ekki einleitur (hómógen) og frávikalaus (isotropik) vatnsleiðari eins og fræðilegir útreikningar gera ráð fyrir. Af þessum ástæðum virðist brýnna að athuga nánar frumeiginleika jarðhitakerfa háhitasvæða frekar en að leggja út í umfangsmikla reikninga með óþekktum forsendum.

Við úrvinnslu mæligagna hafa komið í ljós ýmsir gallar á frankvæmd mælinga. Úrbætur í þeim efnum gætu verið eftirfarandi:

- a) Eskilegt er að hafa jafna dreifingu á magni sem dælt er á holu, þ.e. hafa minnst um 5 l/s mun á milli þrepa og að þrepin dreifist nokkuð jafnt á bilið 0 - 70 l/s.
- b) Fjöldi vel mældra þrepa ætti ekki að vera færri en 4. Gott væri að fjöldi þeirra væri 6 - 8 eða fleiri.
- c) Eskilegt er að hvert þrep standi eigi skemur en 30 mín. Best væri þó, að það stæði það lengi, að það væri farið að nálgast stöðugt vatnsborð.
- d) Nauðsynlegt er að vatnsborðsstaðan sé vel mæld, og að hún sé farin að stefna á stöðugt gildi áður en dæling fyrir næsta þrep hefst.
- e) Ef dælt hefur verið áholuna áður en þrepadæling hefst er æskilegt að mæla vatnsborðslækkunina eftir þessa dælingu einnig.

Reynt hefur verið að bera saman lekt holanna og afköst. Á mynd 33 (F 15802) er sýnt samband heildarrennslis og lektar holanna. Svo sem sjá má virðist vera lítið samband á milli þessara stærða. Mjög mikill munur er á gerð holanna. Þannig eru holur KJ-6 og KJ-7 með

lágt massastreymi en hátt gufuhlutfall. í þessum holum er talin vera suða í bergi. í holu KJ-11 eru tvö virk kerfi, annað 210 °C heitt hreint vatnskerfi ofan við 1100 m dýpi, hitt kerfið yfir 300 °C heitt neðar. Holur KG-8 og KJ-9 eru hins vegar hreinar vatnsholur, þiggja báðar 210 °C heitt vatn ofan við 1100 - 1200 m dýpi. Athyglisvert er að bera saman þessar tvar holur:

TAFLA V.

Rennsliseiginleikar KG-8 og KJ-9	KG-8	KJ-9
Max heildarstreymi, kg/s	20	20
Innstreymishiti, °C	210	210
Lekt við 20 °C, m <sup>2</sup> /dag	9	25
Niðurdráttur (þrýstifall)		
í blæstri, Δp ata	25	7

í þessari töflu sést að þó lektarstuðull KG-8 sé allt að þrisvar sinnum lægri en lektarstuðull KJ-9 eru heildarafkost holanna þau sömu. Skýring á þessu fæst þegar litioð er á niðurdrátt í holunum við blástur. Þrýstifall er um þrisvar sinnum meira í holu KG-8 en í KJ-9.

Freistandi er að draga þá ályktun út frá þessum staðreyndum að massastreymi blásandi gufuhola, sem taka inn vatn í hreinum vatnsfasa, stjórnist fyrst og fremst af hitastigi á innstreymisvatninu, eða réttara af suðuprýstingi á innstreymisvökva. Þegar slikri holu er hléypt í blástur byrjar holan að sjóða sig niður, og þegar massastreymi inn í holuna er jafnt og sá massi sem kemur upp, næst jafnvægi. Þetta jafnvægi næst á mismunandi dýpi, sem er háð því hversu auðveldlega rennur inn í holuna. Þannig þarf um þrisvar sinnum meiri niðurdrátt í KG-8 en í KJ-9 til þess að massastreymið sé það sama.

Til þess að þessi einfalda mynd standist verða eftirfarandi skilyrði að vera fyrir hendi:

A - Innstreymi í holu í hreinum vatnsfasa,

B - Vatn sjóði í fóðurröri en ekki út í vatnsgeyminn,

C - Suða byrji í holunni í ca 50 - 100 m neðan við holutopp.

Skýring á skilyrði C fæst með því að skoða þrýstingmælingu af holu KJ-9 í blæstri sjá mynd 34 (F 15361). Efst í holunni er blanda af gufu og vatni, en neðan við 300 - 400 m dýpi er komið í hreinan vatnsfasa, og þar eykst þrýstingur línulega með dýpi. Efst í tveggja fasa streyminu breytist þrýstingur tiltölulega lítið á lengdareiningu, svo áætla má að rennsli úr holunni breytist lítið þó holutoppur væri 100 - 200 m ofar miðað við vatnskerfið.

Til þess að athuga hvort þessi hugmynd um að hitastig jarðhitavökva stjórni afli gufuholu var athugað afl í gufuholum á öðrum jarðhitasvæðum. Eftirfarandi aflmælingar liggja fyrir:

TAFLA VI.

Rennsli úr gufuholum.

Hola	M <sub>max</sub> (kg/s)	t <sub>max</sub> (°C)	P (suða) (bar)	Heimild
Reykjanes	8	72	280	6)
	2	30	225	6)
	4	18	250	6)
Svartsengi	4	85	240	7)
	3	75	230	7)
Nesjavellir	2	55	200	7)
	5	45	260	8)
Námafjall	10	70	290	9)
Krafla	8	20	210	10)
	9	20	210	11)

Holum í Hveragerði hefur viljandi verið sleppt, vegna þess að ótruflað vatnsborð er þar talið vera ofan við holutopp.

Ef mesta massastreymi (fyrir  $p_0 \rightarrow 0$ ) er teiknað upp á móti suðuprýstingi á innstreymisvatni fæst visst samband milli þessara stærða, sjá mynd 35 (F 15801). Holur í Svartsengi skera sig þó úr fjöldanum. Á þessu stigi er ekki vitað hvort holur í Svartsengi eru mjög frábrugðnar öðrum holum eða hvort mælitækni getur valdið þessu fráviki. Það er eftirtektarvert, að þó holur í Svartsengi séu frábrugðnar, er um innbyrðis samræmi að ræða í þessum þrem holum.

Afl holu 4 á Reykjanesi er lægra en búast mætti við frá botnhita. Svo sem getið er í 6) var áætlað að visst niðurrennslí væri í þessari holu þegar aflmæling var gerð.

Rétt er að fara nokkrum orðum um þessa hugmynd, þar sem hugmyndin er mjög einföld, en við vitum ekki til að hún hafi verið sett fram á pennan hátt áður. Í fyrsta lagi er gert ráð fyrir að rennslismótstaða í borholunni sé mun meiri, þar sem tveggja fasa streymi er í holunni, en þar sem einungis vatnsfasi er í holu. Í öðru lagi er gert ráð fyrir að í fyrstu nálgun sé massastreymi í tveggja fasa streymi í beinu hlutfalli við það prýstifall sem verður á þeim kafla holunnar, þar sem tveggja fasa streymi er. Í fyrstu nálgun er því gert ráð fyrir beinu sambandi milli massastreymis úr holu og suðuprýstings á innstreymisvatni.

Að massastreymi í tveggja fasa flæði er í fyrstu nálgun í beinu hlutfalli við prýstifall má til dæmis sjá af eftirfarandi.

Fyrir flæði í jafnvíðum pípum gildir hreyfingarjafna

$$vd\mu + \left(\frac{W}{A}\right)^2 \frac{v \, dv}{g} + \left(\frac{W}{A}\right)^2 \frac{4 \, f}{2 \, D \, g} \, v^2 \, dL = 0 \quad (38)$$

ásamt samfellujöfnu

$$W = \frac{V \cdot A}{v} \quad (39)$$

þar sem

$$p = \text{prýstingur}$$

v = eðlisrúmmál

V = hraði

W = massaflæði

A = þverskurðarflatarmál

L = lengd pípu

D = þvermál pípu

g = þyngðarhröðun

f = núningsstuðull

Með því að deila í gegn með  $v^2$  og tegra fæst

$$p_o \int_{p_o}^p \frac{dp}{v} + \left(\frac{W}{A}\right)^2 \frac{1}{g} \ln \frac{v}{v_o} + \left(\frac{W}{A}\right) \frac{2fL}{gD} = 0 \quad (40)$$

eða

$$\left(\frac{W}{A}\right)^2 = g \frac{\int_{p_o}^p \frac{dp}{v} - \frac{dp}{v}}{\ln \frac{v}{v_o} + \frac{2fL}{D}} \quad (41)$$

Hægt er að reikna  $\int_{p_o}^p \frac{dp}{v}$

tölulega, en innan 10% skekkjumarka má setja

$$p = \frac{\text{konst}}{v}$$

ef  $1 < p < 120$  ata og flæðið er blanda af vatni og vatnsgufu.

Innan þessara skekkjumarka má tegra jöfnu (41) og fæst þá

$$\left(\frac{W}{A}\right)^2 = \text{konst. } (p^2 - p_o^2) \frac{g}{\ln \frac{p_o}{p} + \frac{2fL}{D}} \quad (42)$$

Ef  $p \gg p_o$  fæst

$$W = \text{konst. } p \cdot A \sqrt{\frac{g}{\ln \frac{p_o}{p} + \frac{2fL}{D}}} \quad (43)$$

sem gerir það trúlegt að massastreymi sé í beinu hlutfalli við suðuprýsting á innstreymisvatni.

Mynd 35 (F15801) bendir til að efra vatnskerfið í Kröflu sé samþærilegt við Reykjanes, Nesjavelli og Námafjall. Lítið massastreymi úr þessu kerfi er sein afleiðing af lágu hitastigi ( $210^{\circ}\text{C}$ ) á innstreymisvatni í holurnar.

Þó fyrirliggjandi gögn séu af of skornum skammti til þess að draga ályktanir um svæðiseiginleika Kröflusvæðisins er ástæða að athuga hvaða stærðargráða gæti verið á vatnsleiðnigetu Kröflusvæðisins. Í töflu VII eru sýndar mjög grófar tölur um nokkur jarðhitasvæði. Varlega verður að fara í samanburð milli svæða, nema tekið sé tillit til hvaða mæliaðferðir eru notaðar á hverju svæði.

Vatnsleiðnigeta mæld í heitum holum í Kröflu er 1-4 millidarcy, sem er lægra gildi en almennt er í vinnsluholum. Ef gengið er út frá vatnsleiðnigetu sem mæld er í köldum holum í Kröflu eru gildin sem fást 10-100 millidarcy. Þessi stærðargráða á vatnsleiðnigetu er almenn í vinnsluholum á erlendum jarðhitasvæðum. Vatnsleiðnigeta lághitasvæðanna í Reykjavík og Mosfellssveit er einni til tveim stærðargráðum meiri.

TAFLA VII

VATNSLEIÐNIGETA NOKKURRA JARDHITASVĒÐA.

	Heildarvatnsleiðni- geta $k_{eff}$ millidarcy	Vatnsleiðni- getupykkt $k \cdot b \cdot 10^{-12}$ (m <sup>3</sup> )
Krafla	1 - 100	1 - 80
italia 12)		
(Laderello, Travale Mt. Amiate)		1 - 200
Díkaria 4)	19	
Broadlands 13)	1 - 100	
Wairakei 14)	10 - 100	
Raft River 15)		1 - 3
The Geysers 16)		
(ein hola)		7
Laugarnes 5)	120 (4100)	132
Elliðaár 5)	94 (6200)	103
Reykir 5)	476 (13700)	809
Svartsengi 19)	1000	

Fyrirleggjandi skýrslu ber að líta á sem frumtilraun, til að lýsa vatnafræðilegum eiginleikum jarðhitasvæðisins við Kröflu. Augljóst er að frekari aðgerða er þörf á þessu sviði.

Þau aðtriði, sem einkum koma til greina, í framtíðinni eru:

- A) Nánari athugun á holueiginleikum til þess að ákvarða gerð jarðhitakerfanna (prungur eða einleitur vatnsleiðari).
- B) Langtíma athugun á niðurdrætti við vinnslu.
- C) Mælingar á þrýstibreytingu milli hola við breytingar á rennsli.

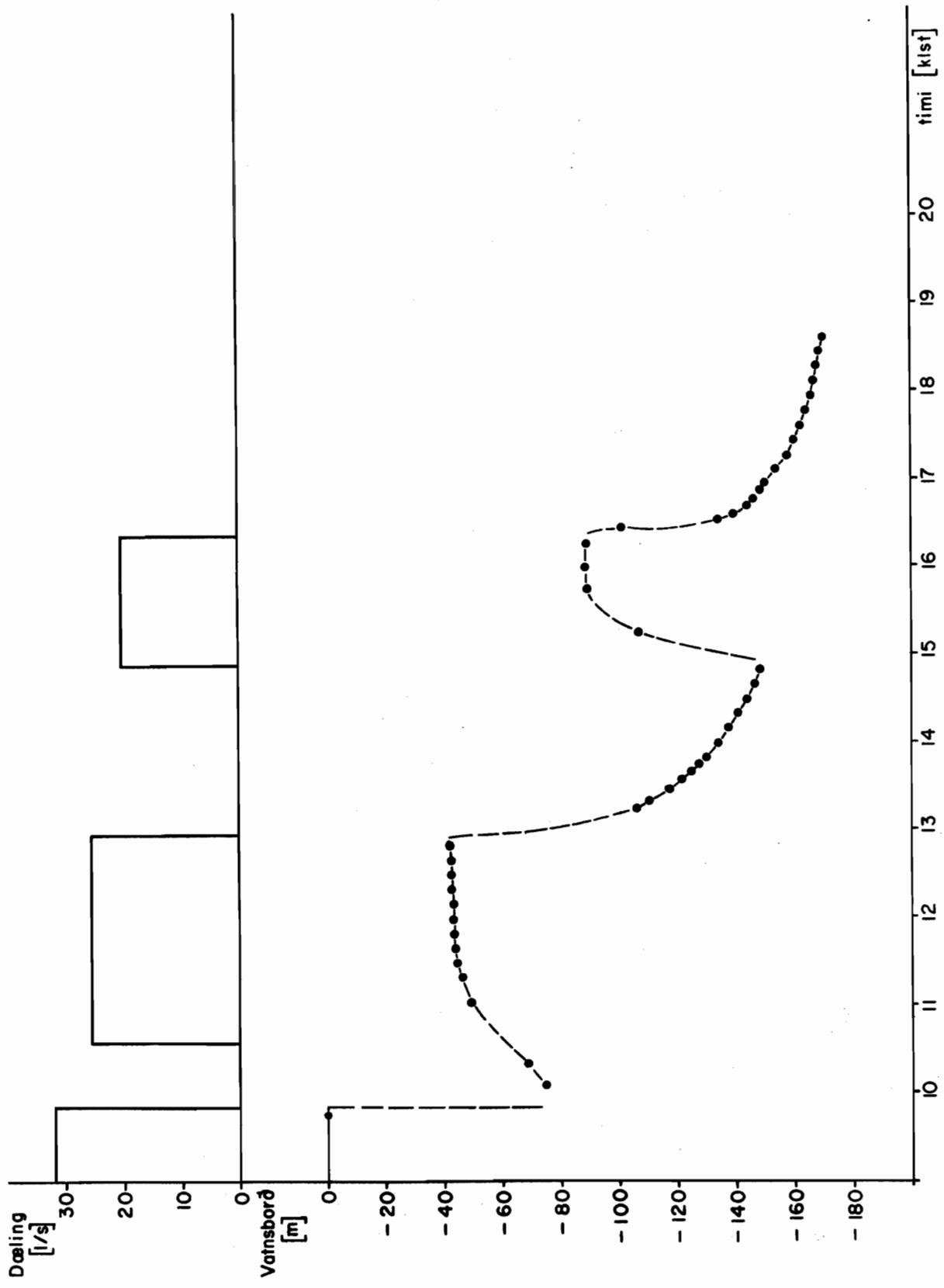
ÞAKKIR

Þeir Sveinbjörn Björnsson og Snorri Páll Kjaran hafa lesið skýrslu þessa í handriti og bent á margt til bóta. Við þökkum þeim veitta aðstoð.

Heimildir:

- 1) Todd, D.K. *Ground Water Hydrology*, John Wiley & Sons, Inc.  
New York og London, 1959.
- 2) Smith, J.T. og Cobb, W.M. *Formation Evaluation by Transient Pressure Testing*, The Log Analyst vol. XVII no 3, p. 16-26, 1976.
- 3) Ramey, H.J. jr, *Pressure Transient Analysis for Geothermal Wells*, Proceedings, Second U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Lawrence Berkely Lab. Univ. of California, 1976.
- 4) Feasibility Report for the Olkaria Geothermal Project. Des. 1976, SVECO, VIRKIR, United Nations-Government of Kenya.
- 5) Þorsteinsson P, *The Redevelopment of the Reykir Hydrothermal System in S.W. Iceland*, Proceedings Second U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, p. 2173, Lawrence Berkely Lab. Univ. of California, 1976.
- 6) Reykjanes, Heildarskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðisins. Ritstjórn Sveinbjörn Björnsson, Orkustofnun. JHD, Febrúar, 1971.
- 7) Stefán Arnórsson o.fl. *Rannsókn á jarðhitasvæðinu í Svartsengi*, Orkustofnun JHD 7541, Júní, 1975.
- 8) Jens Tómasson o.fl. *Nesjavellir hola 5*. Orkustofnun JHD 7423, Okt., 1974.
- 9) Gestur Gíslason, munnleg heimild.
- 10) Holubréf Nr. 4, 77-03-21.
- 11) Holubréf Nr. 3, 77-03-04.

- 12) Barelli, A et. al. Build-Up and Back-Pressure Tests 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,
- 13) Donaldsson, I.G., The Simulation of Geothermal System with a Simple Convection Model, Geothermics, Spec. Issue 2, Vol 2, p. 649, 1970.
- 14) Mercer, J.W. Pinder, G.F., Donaldsson, I.G., A Galerkin finite element analysis of the hydrothermal system at Wairakei, New Zealand J. Geoph. Res. vol 80 p. 2608, 1975.
- 15) Kunze, J.F., Miller, L.G., Stoker, R.C., The Raft River Wells and Reservoir Performance, Transactions, Geothermal: State of the Art, San Diego, p. 177, Geothermal Resources Council May, 1977.
- 16) Ramey, Jr. H.J., Gringarten, A.C., Effect of High-Volume Vertical Fractures on Geothermal Steam Well Behavior, Proceedings, Second U.N. Symp. on the Development and the Use of Geothermal Resources, San Francisco, p. 1759, Lawrence Berkely Lab. Univ. of California, 1976.
- 17) Horner, D.R., Pressure Build-Up in Wells, Proc. Third World Pet. Congress, p. 503-520, Leiden, 1951.
- 18) Agarwal, R.G., Al-Ussainy, R. and 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, 1970.
- 19) Jónas Elfasson, Sigurður St. Arnalds, Snorri Páll Kjaran: Svartsengi, Straumfræðileg rannsókn á jarðhitasvæði, OS ROD 7718, OS SFS 7702, ágúst 1977.



ORKUSTOFNUN

Krafla hola KJ-6

Brepadæling gerð '76.08.03

'76.10.20 VSAA Tnr. 206

J-Krafla

Fnr. 14744



ORKUSTOFNUN

Krafla hola KJ-6  
Þrepadæling

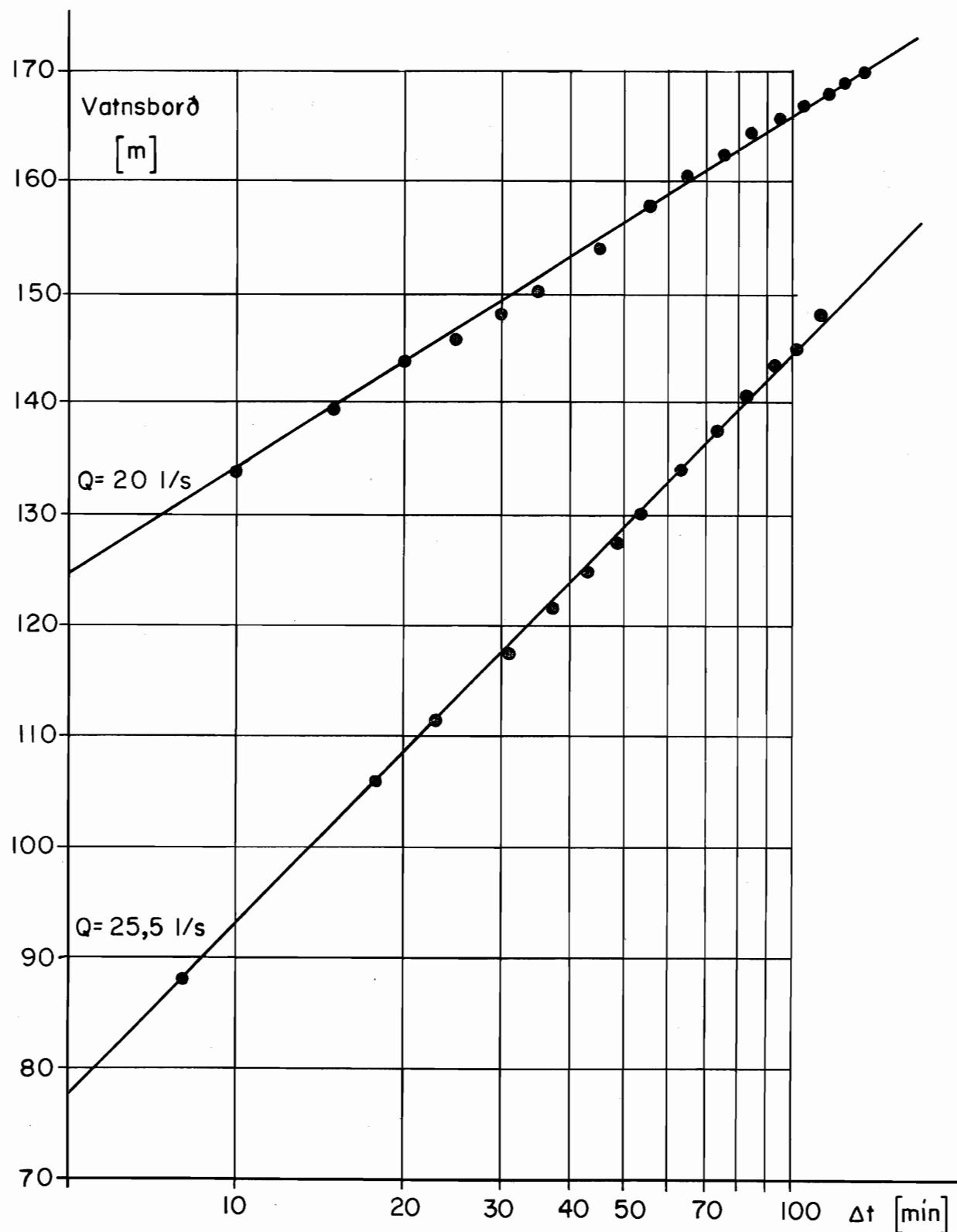
'76.10.19 VS / AA'

Tnr. 207

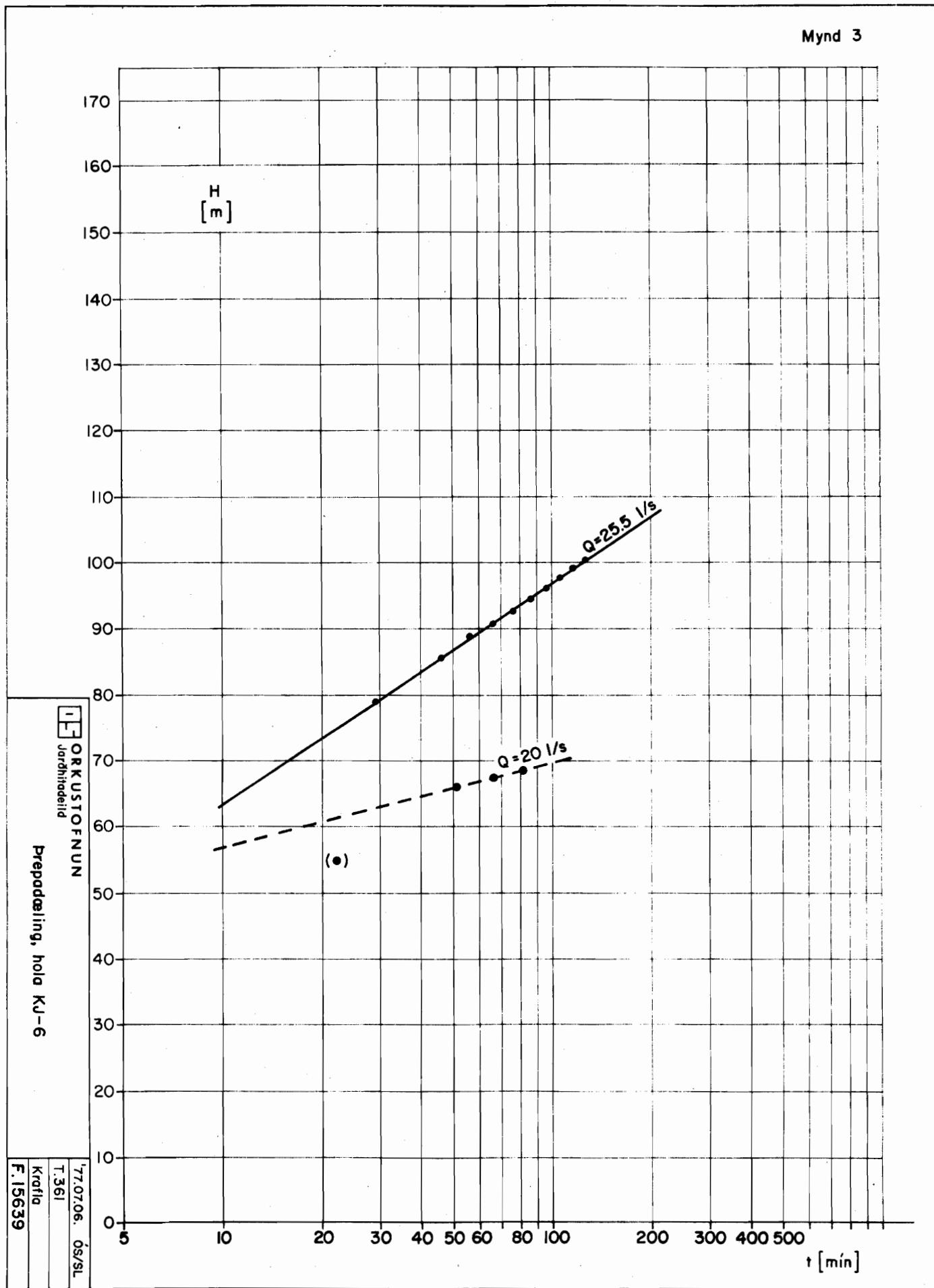
J-Krafla

Fnr. 14745

Mynd 2



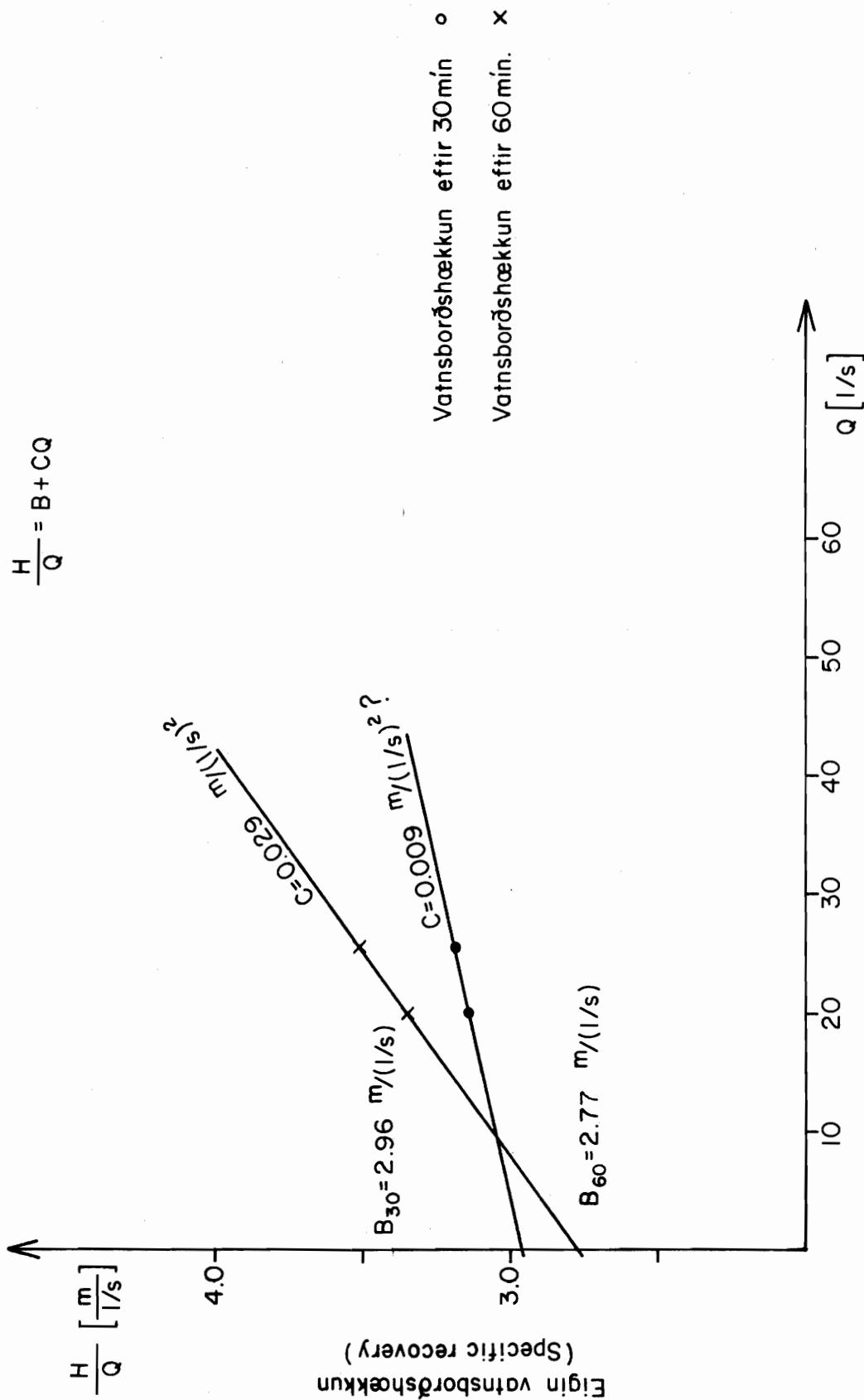
Mynd 3





Mynd 4

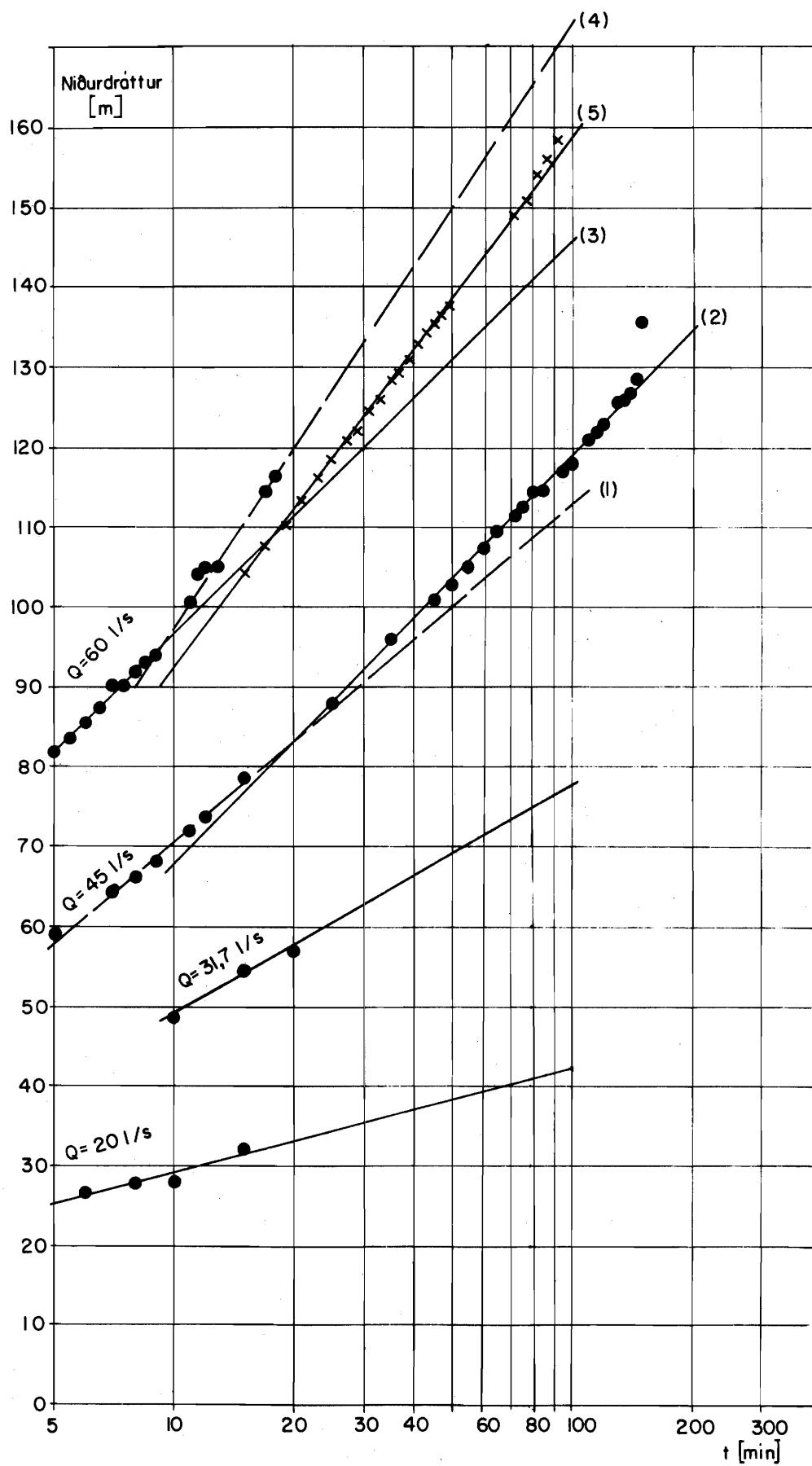
Aðferð Jakobs



Mynd 5

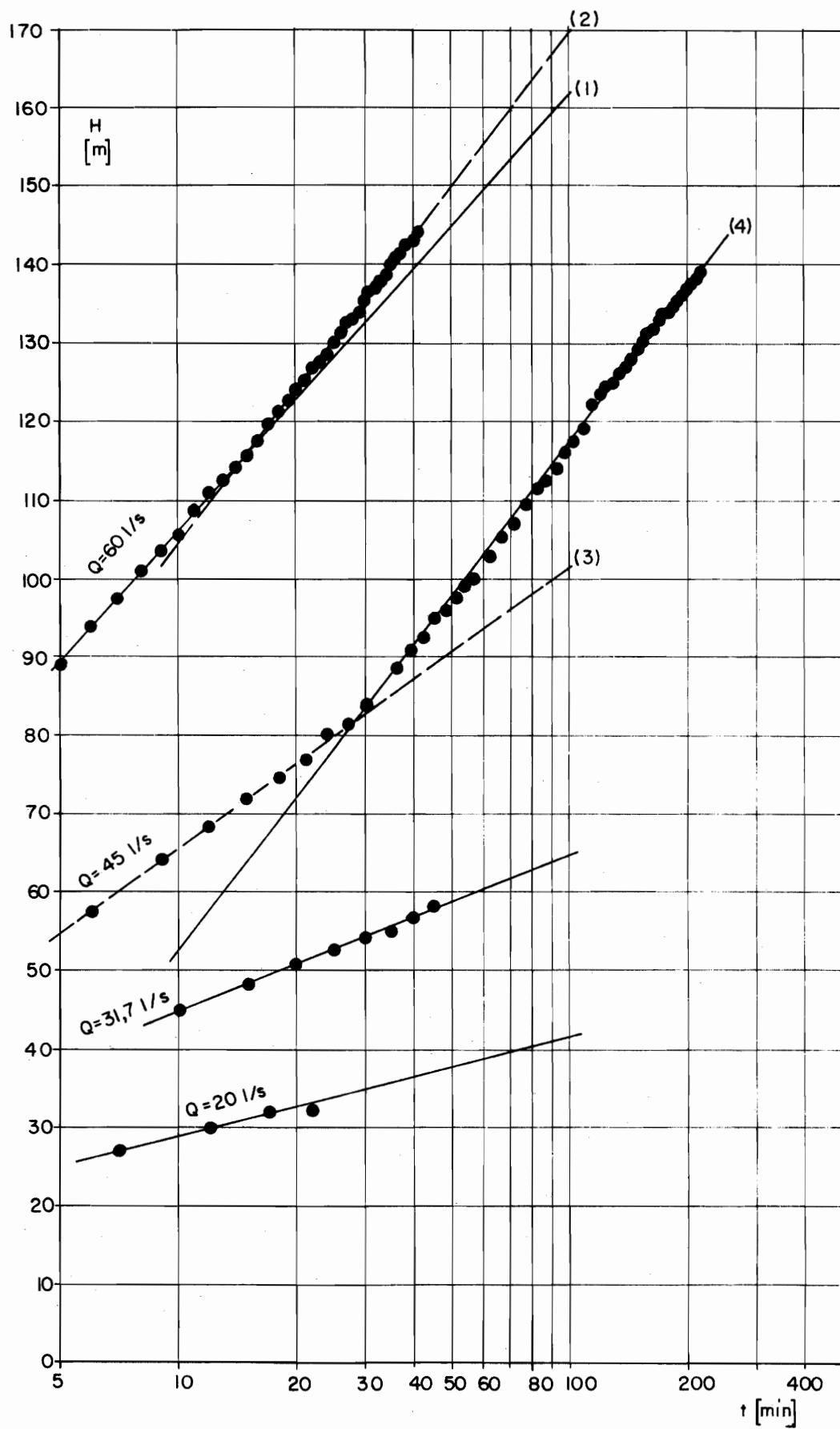


Mynd 6



**ORKUSTOFTNUN**  
 Krafta hola Ku-7  
 þróðægling  
 77.04.26 0.5/AA  
 T 343  
 Krafta  
 F 15570

Mynd 7



ORKUSTOFNUN

Krafra hola KJ-7  
præpadæling

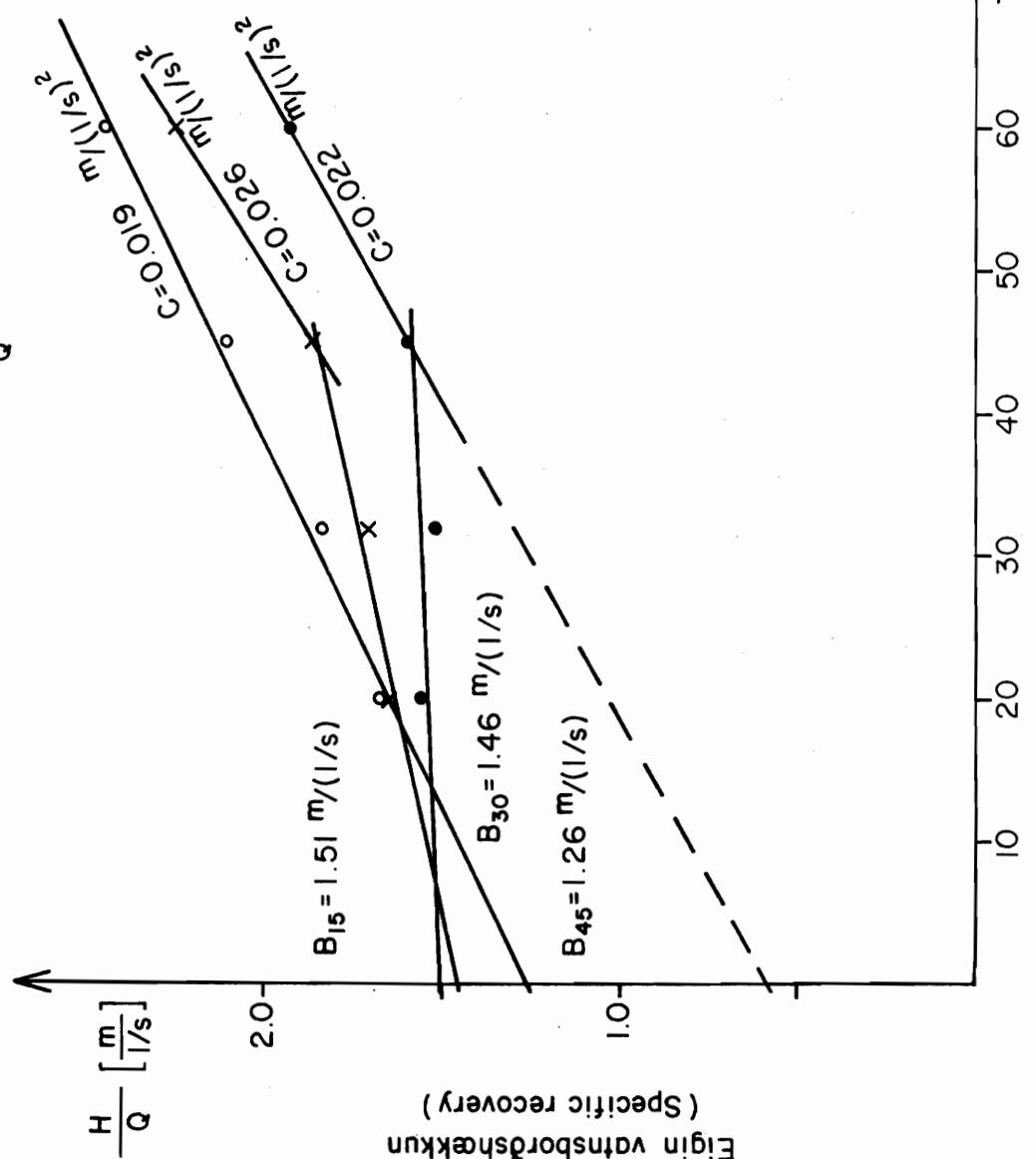
'77.04.26 OS/AA  
T344  
Krafra  
F15571

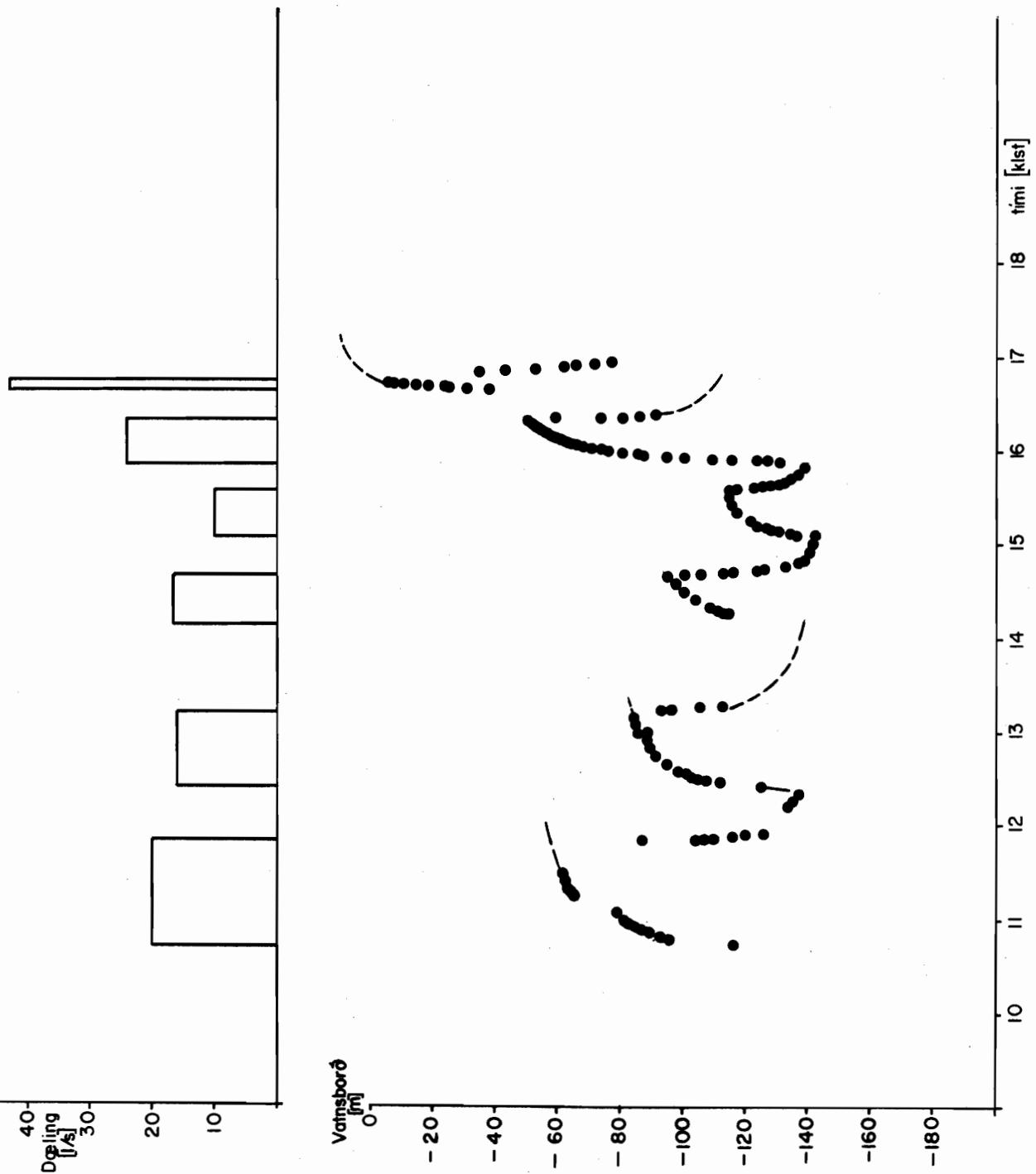


Mynd 8

Aðferð Jakobs

$$\frac{H}{Q} = B + CQ$$

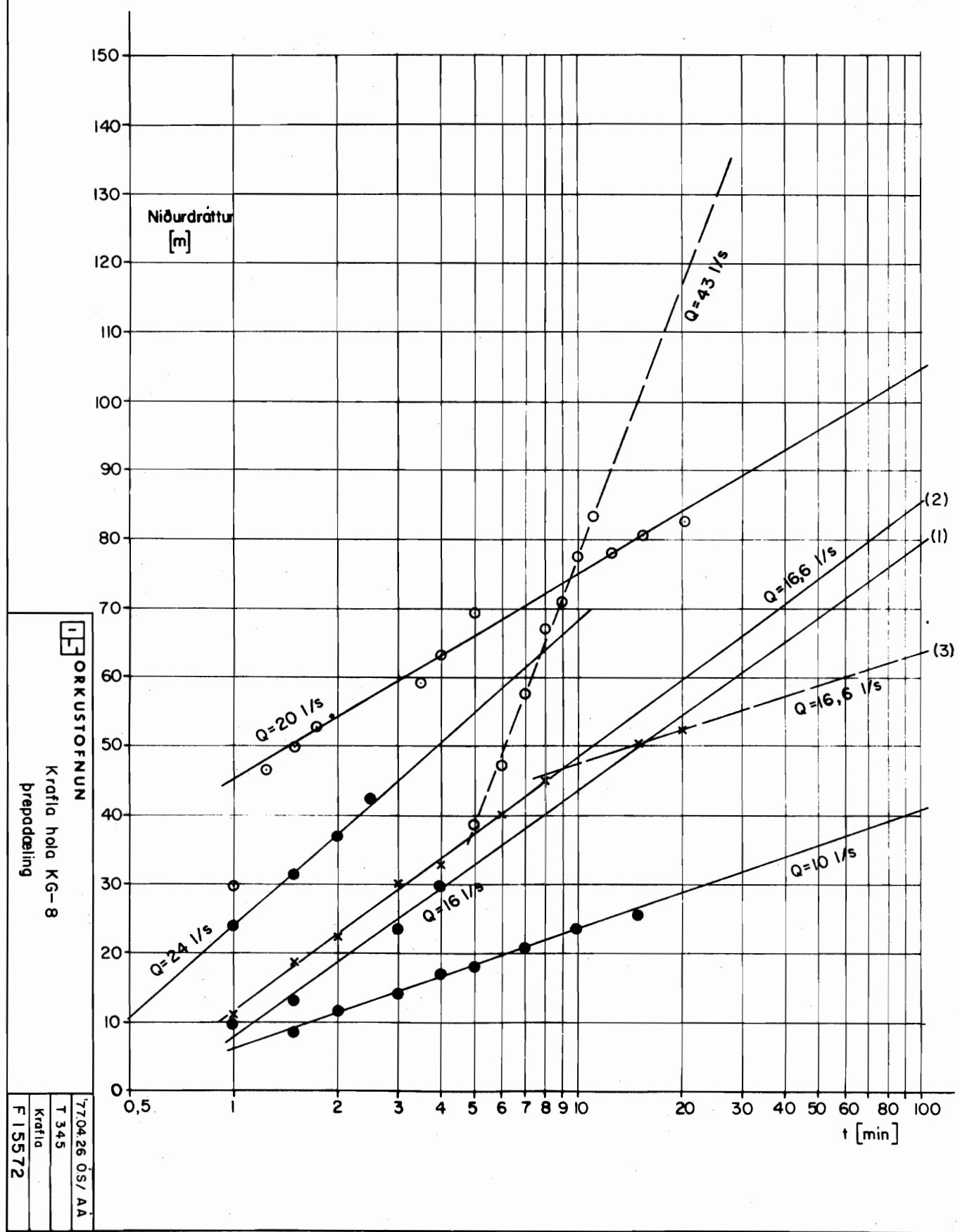




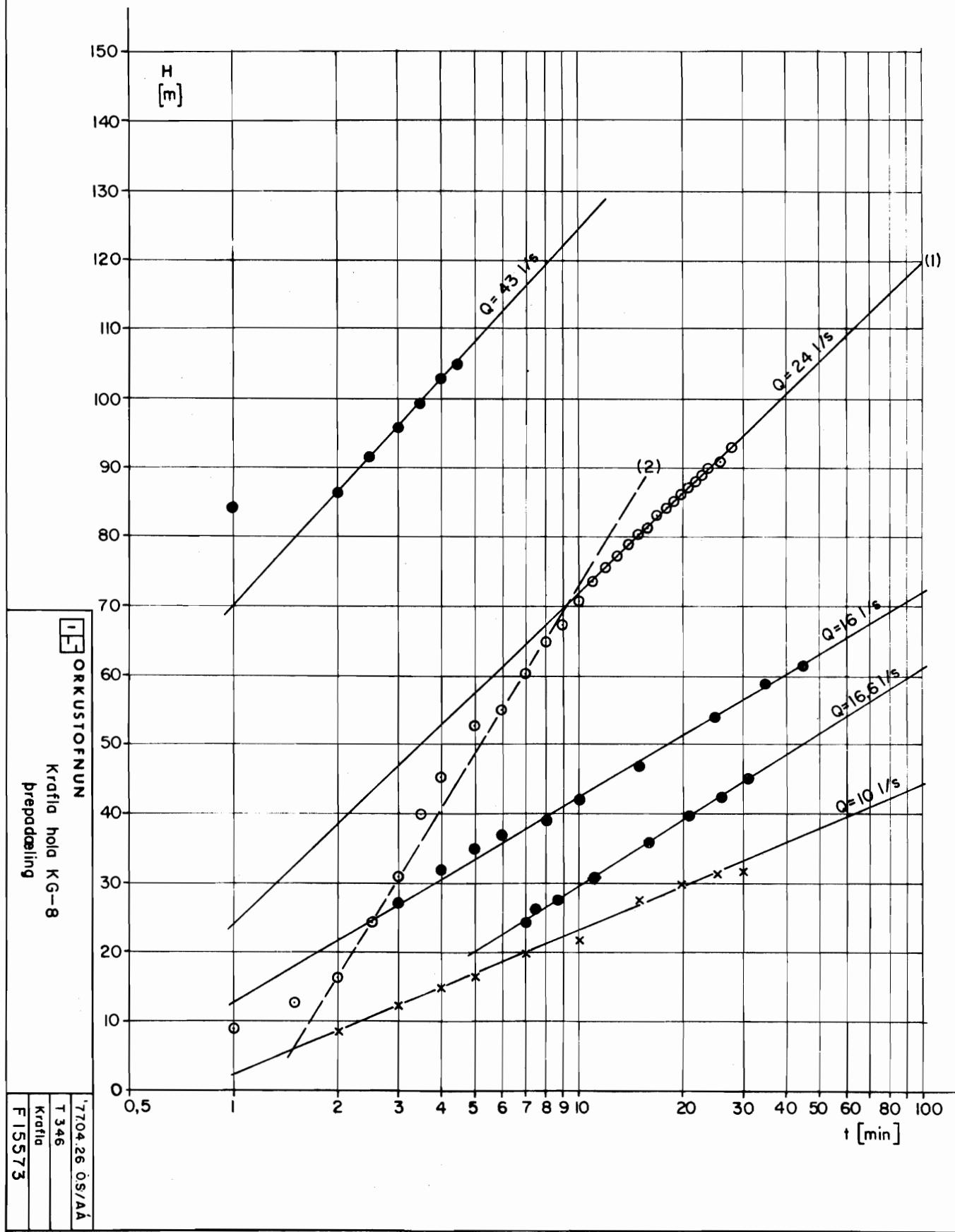
ORKUSTOFNUN

Krafla hola KG-8  
þepadæling770425 VS/AA T 342  
Krafla F 15566

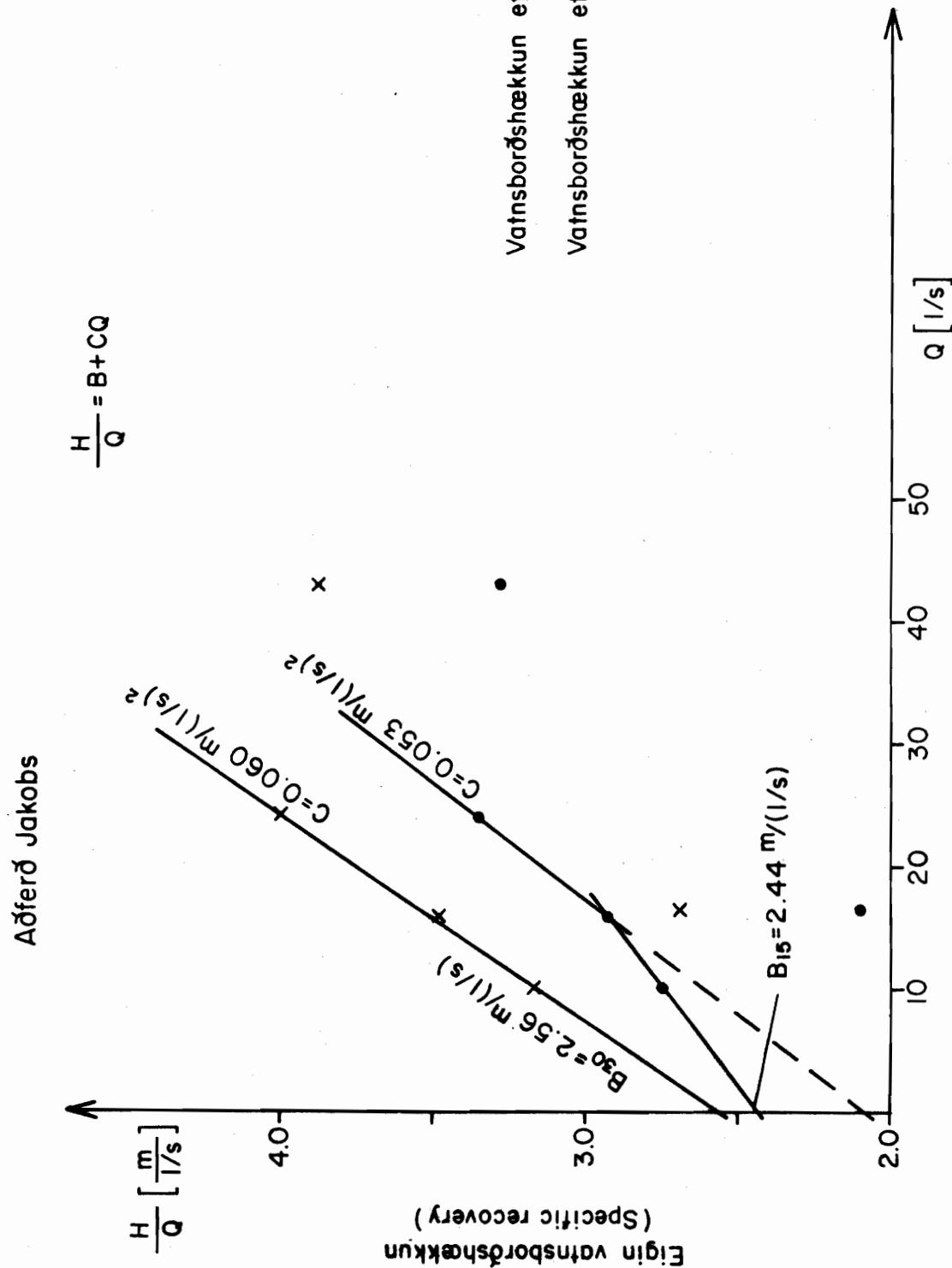
Mynd 10



Mynd II



## Mynd 12



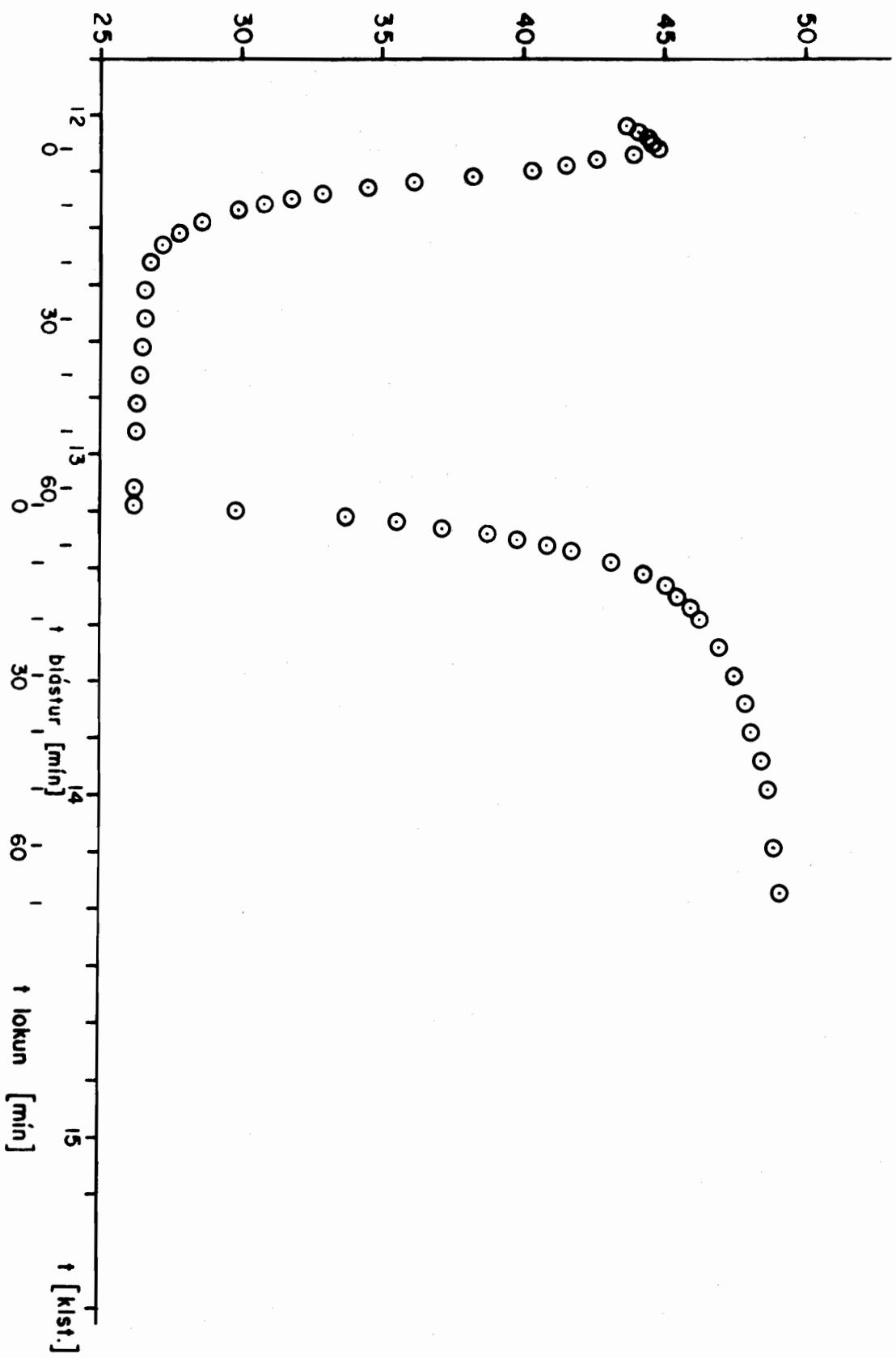


ORKUSTOFNUN  
Jordhitaðeild

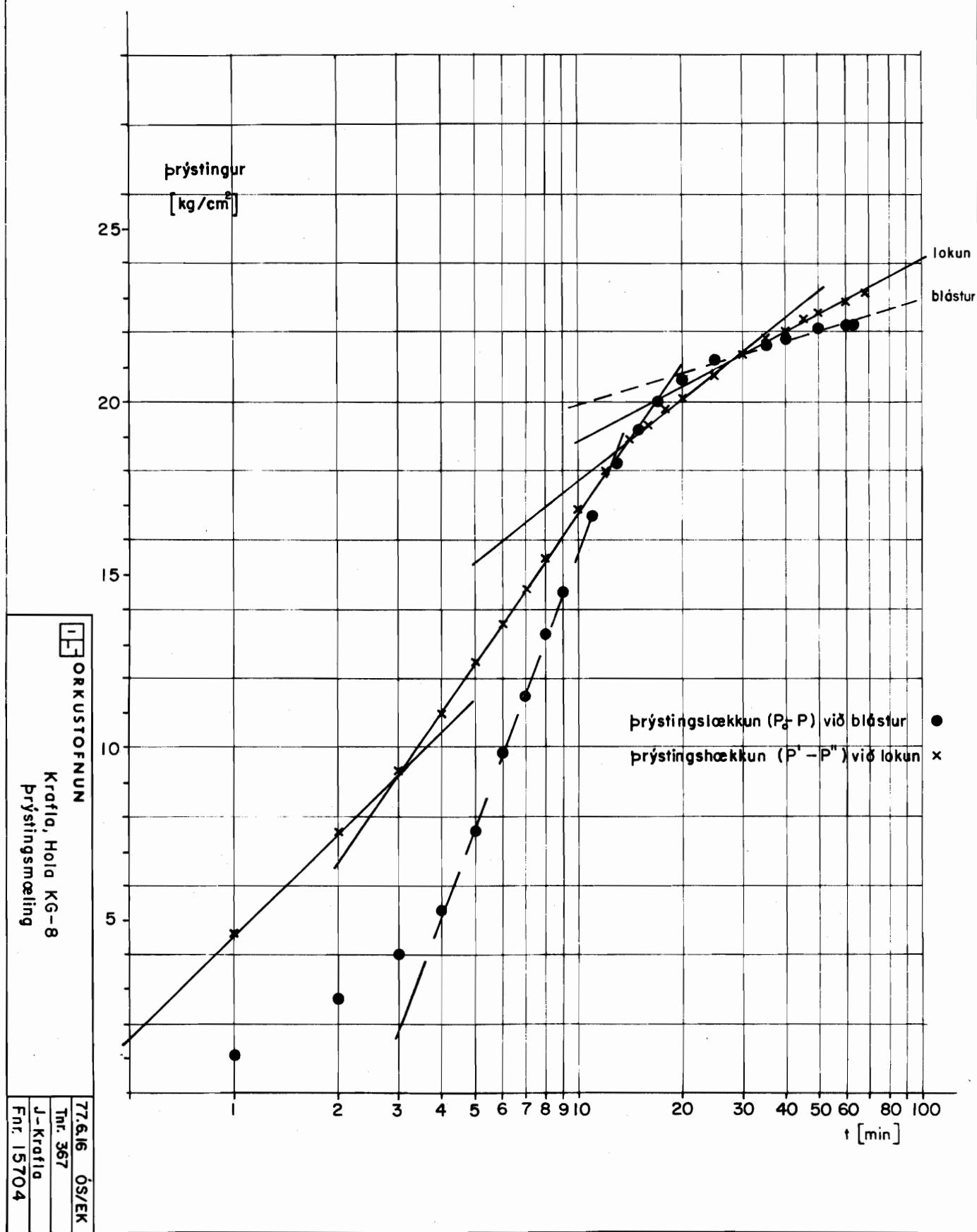
þrýstimaðing, hola KG-8

'77 06.09 ÓS/SL  
T 366  
Krafla  
F. 15703

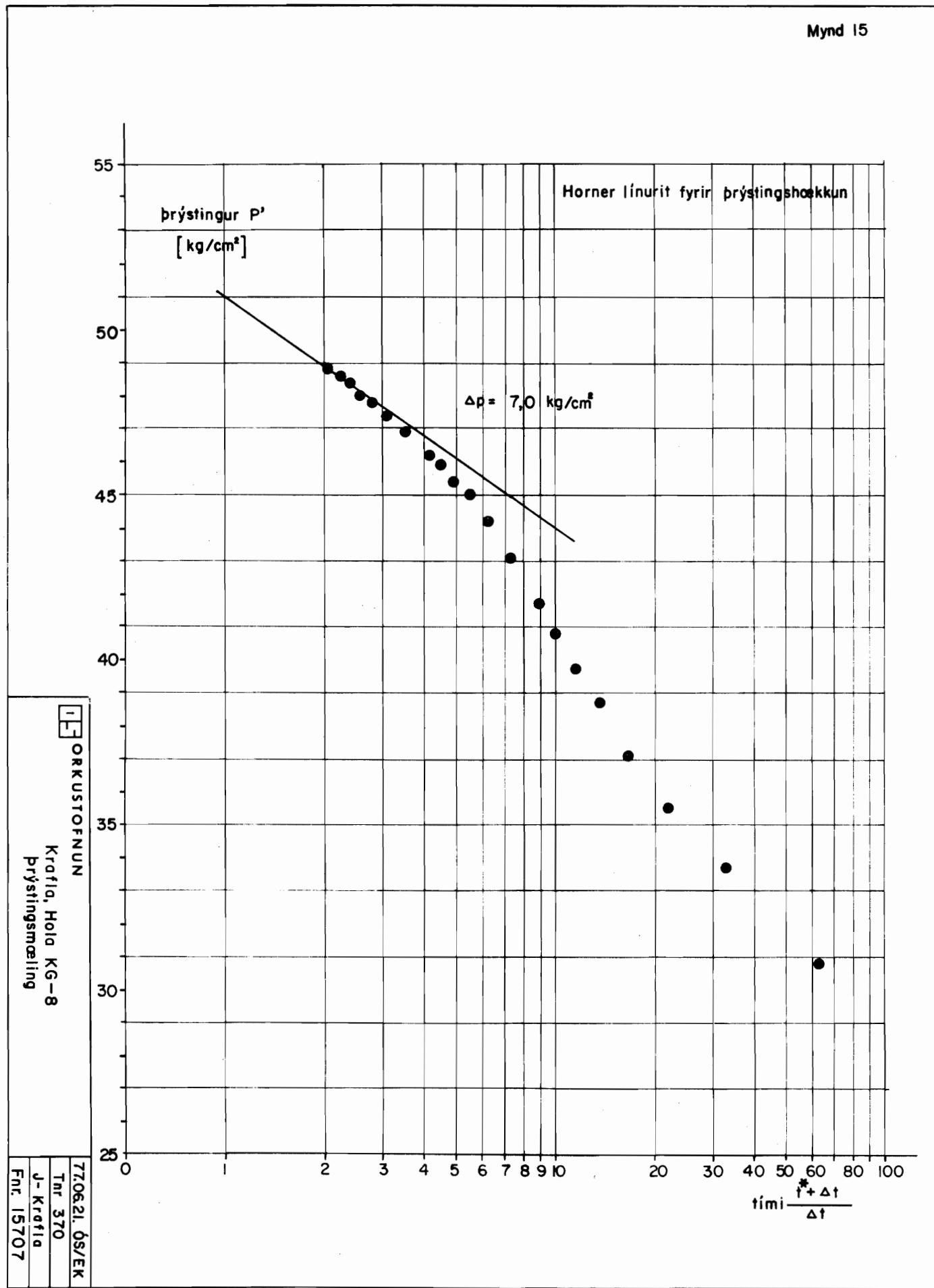
þrýstingur [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ] Mynd 13

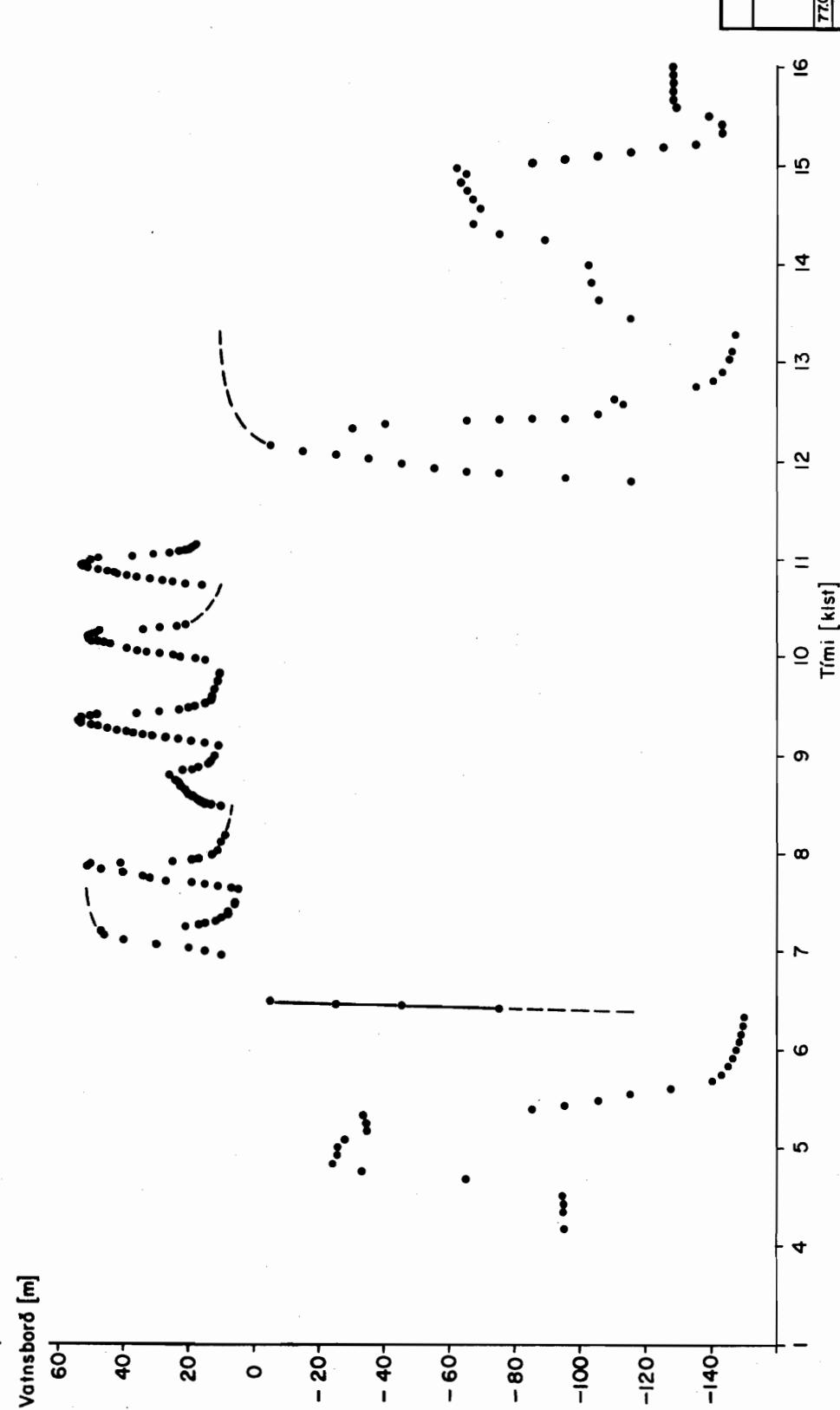
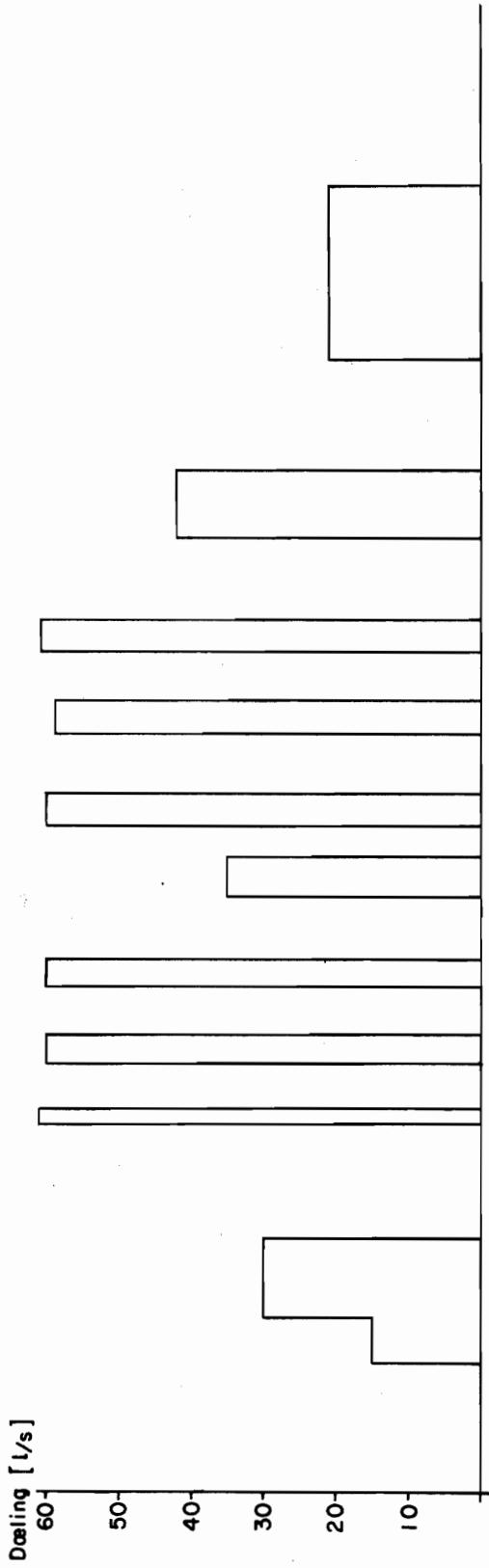


Mynd 14



Mynd 15





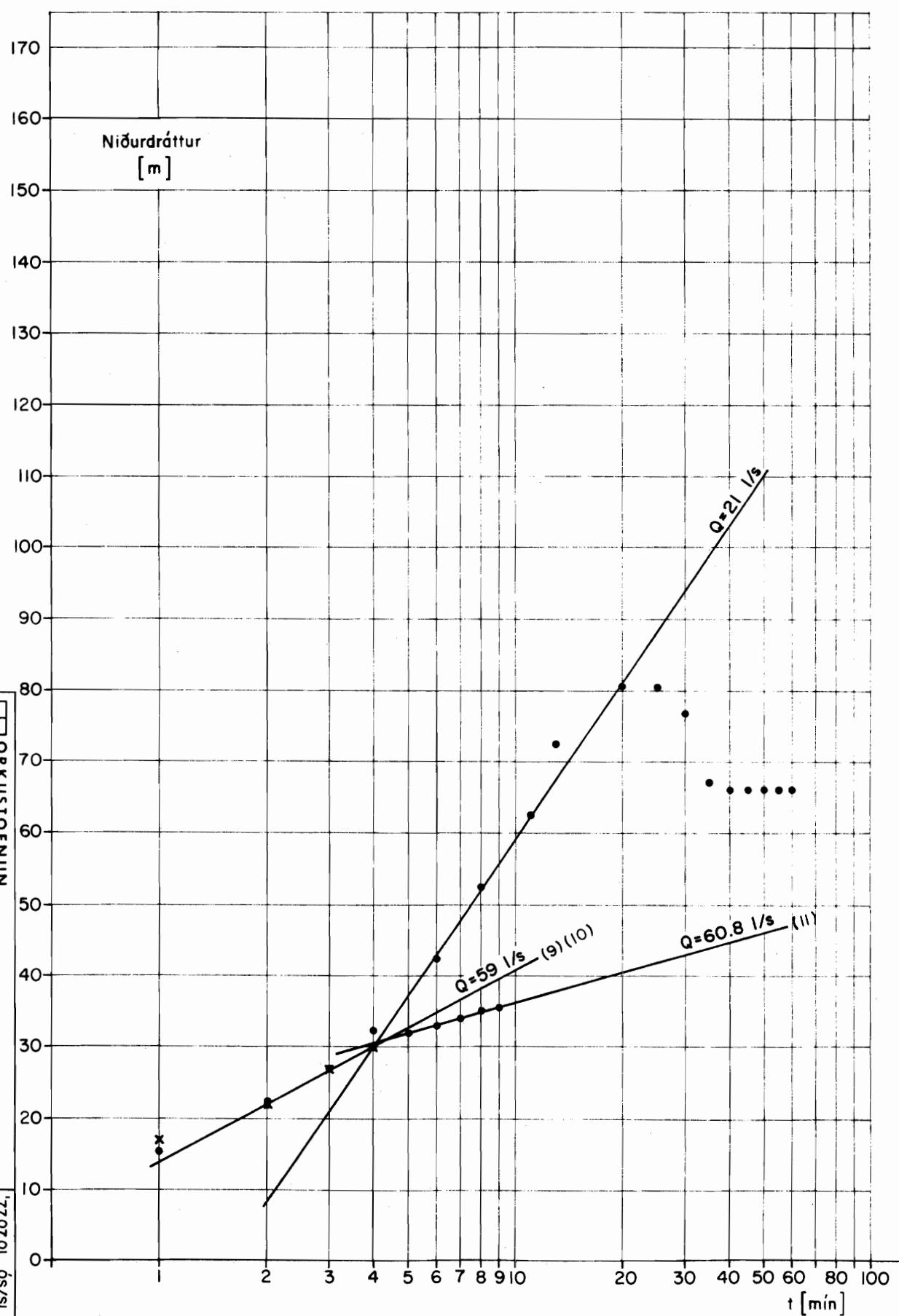
**ORKUSTOFNUN**  
Krafla, Hola KJ-9  
þrepadeilding getöf' 76.12.13.  
770622.ÖSEIN Trn. 363 Fnr. 15641  
J-Krafla

Mynd 17

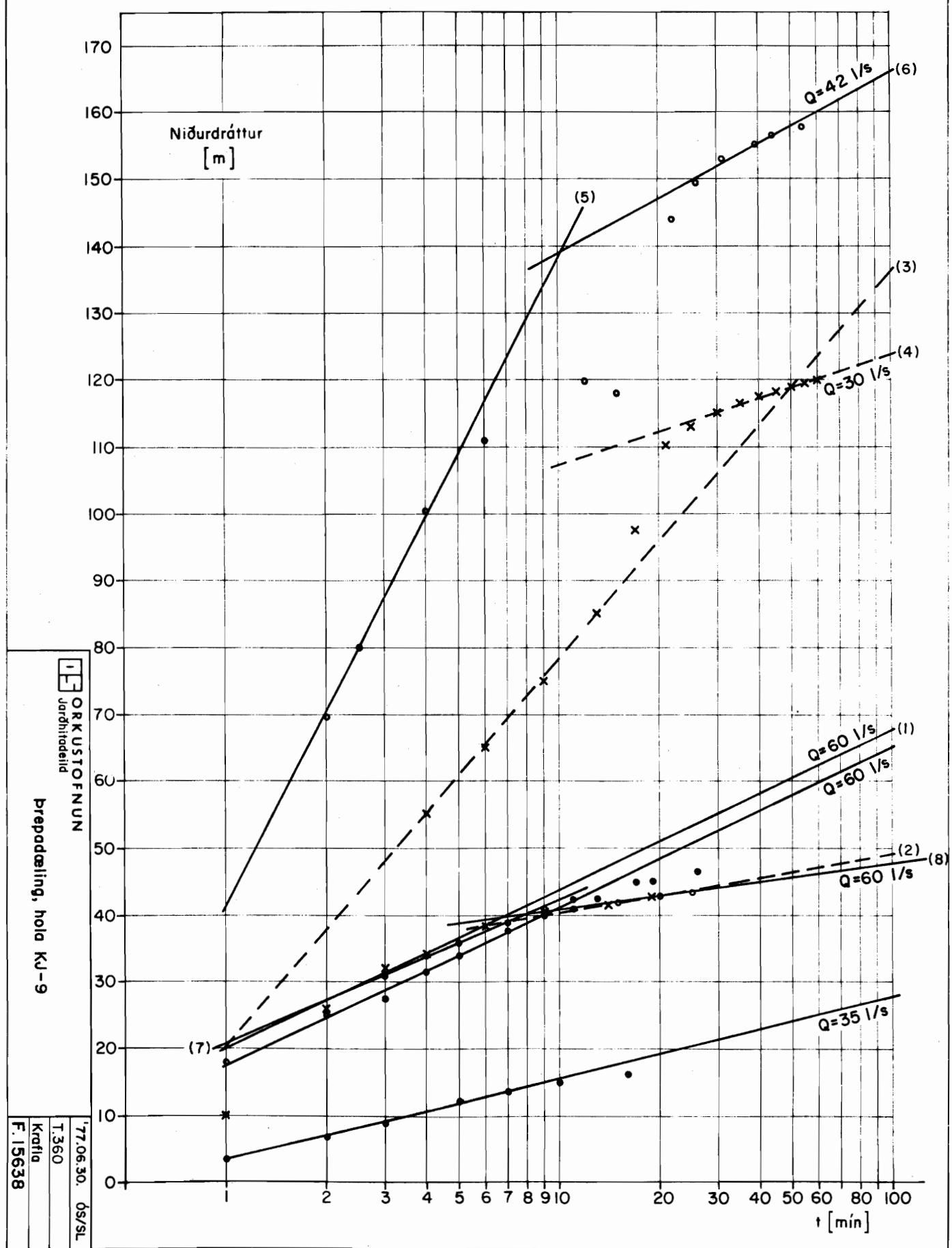
ORKUSTOÐNUN  
Jafðhæðið

Prepadæling, hola KJ-9

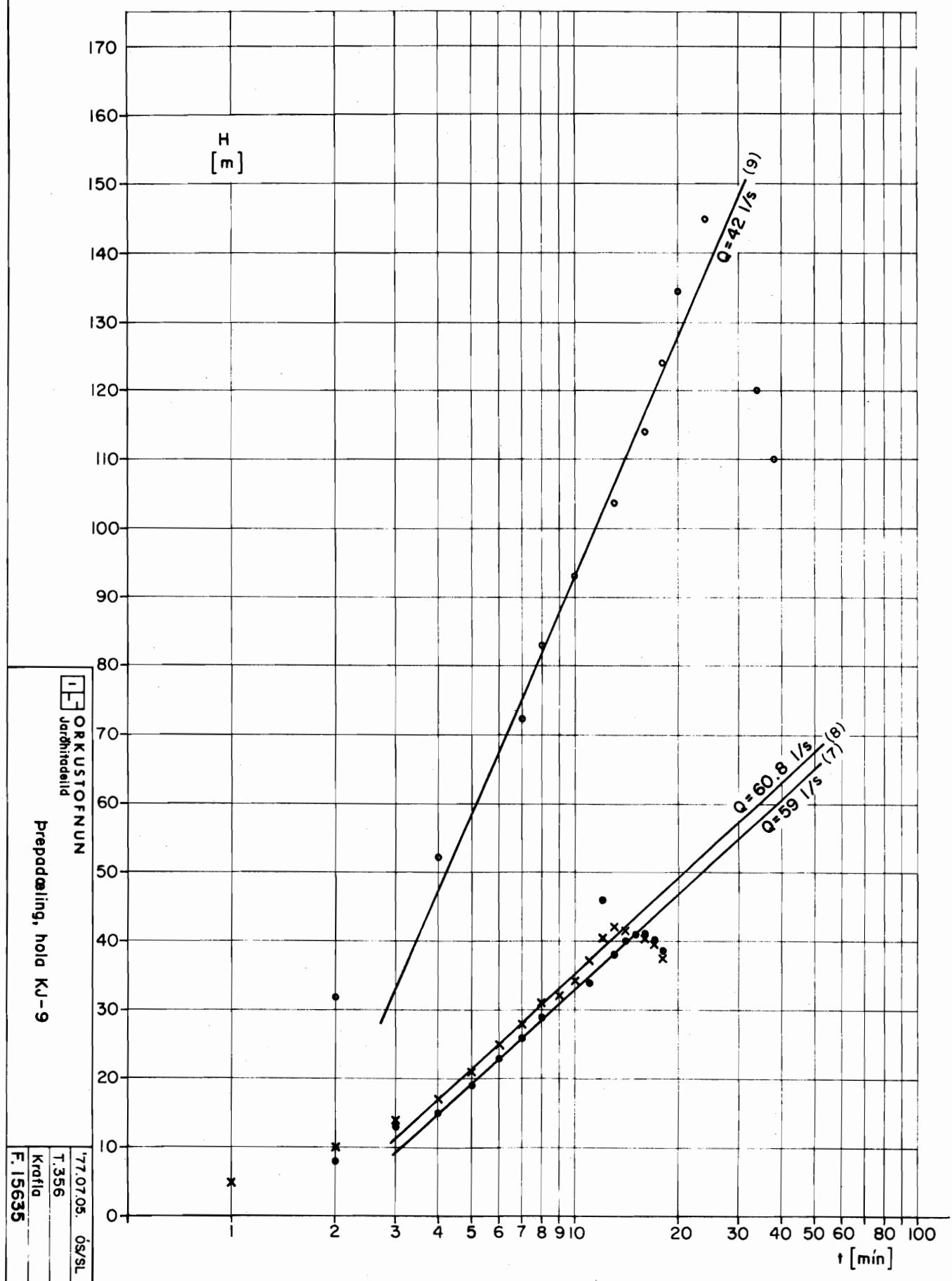
'77.07.01. ÓS/SL  
T.359  
Kraflo  
F.15637



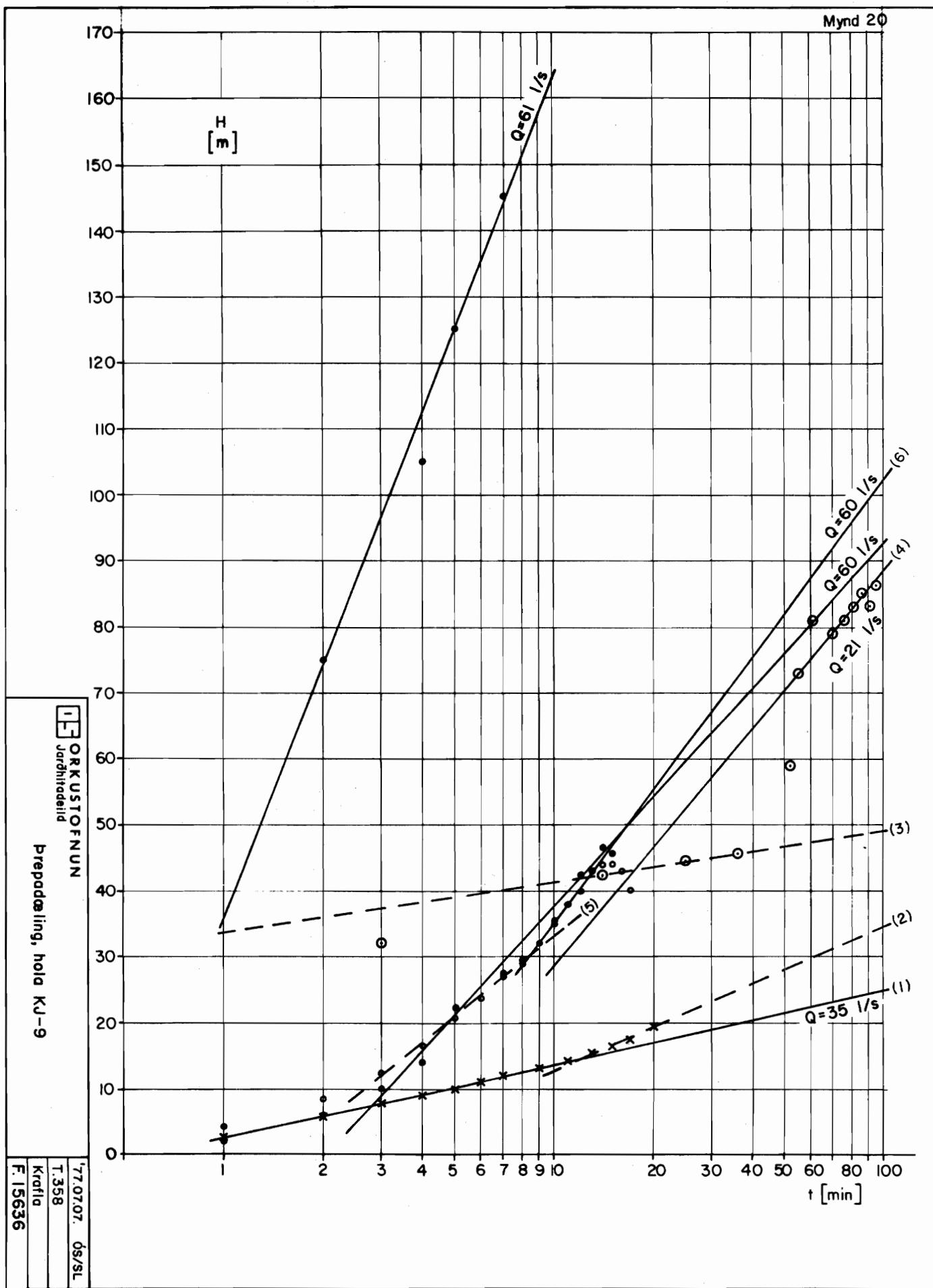
Mynd 18



Mynd 19



Mynd 20

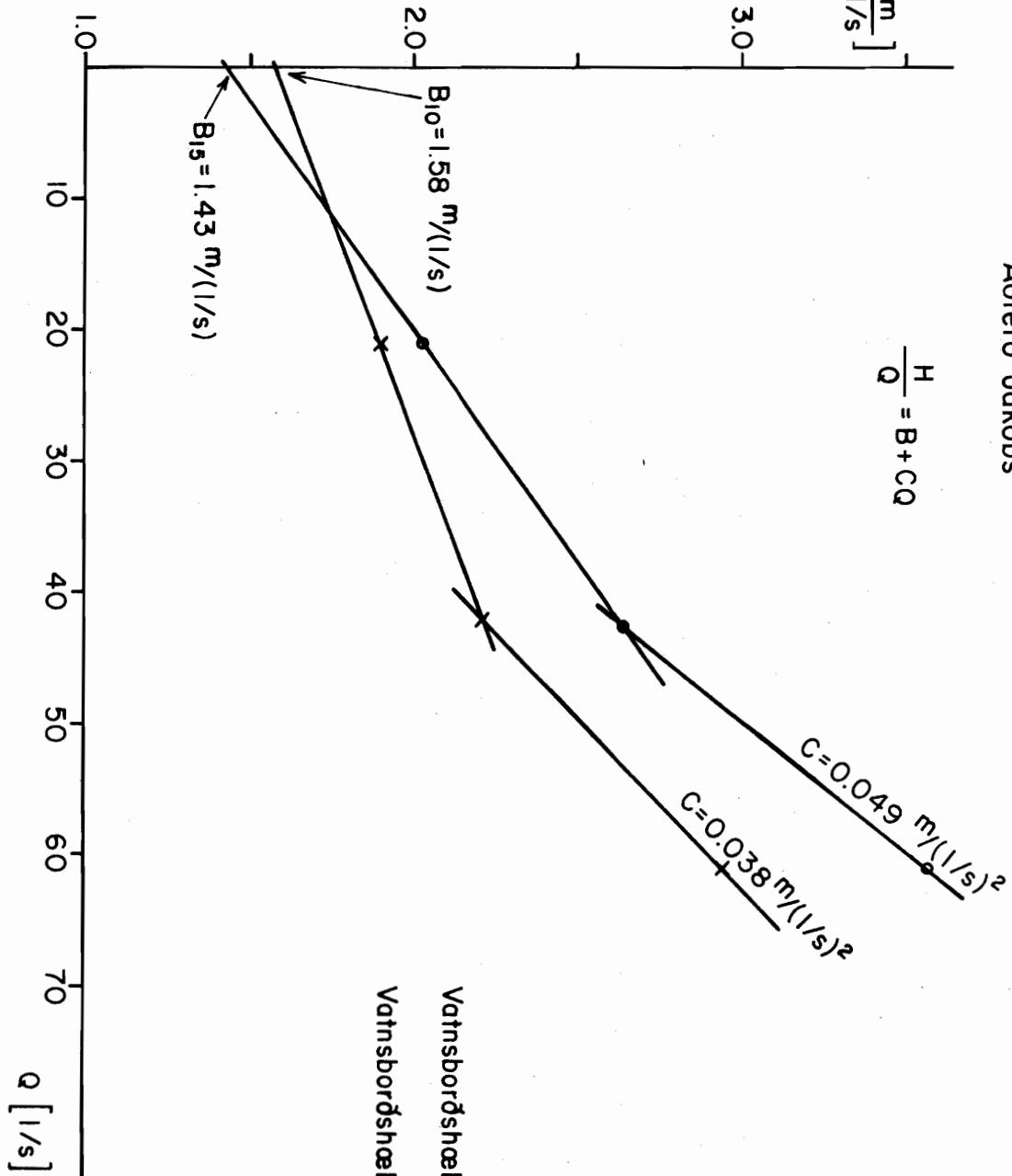




þrepadæling, hola KJ-9

Mynd 21

Eigin vatnsborðshækken  
(Specific recovery)



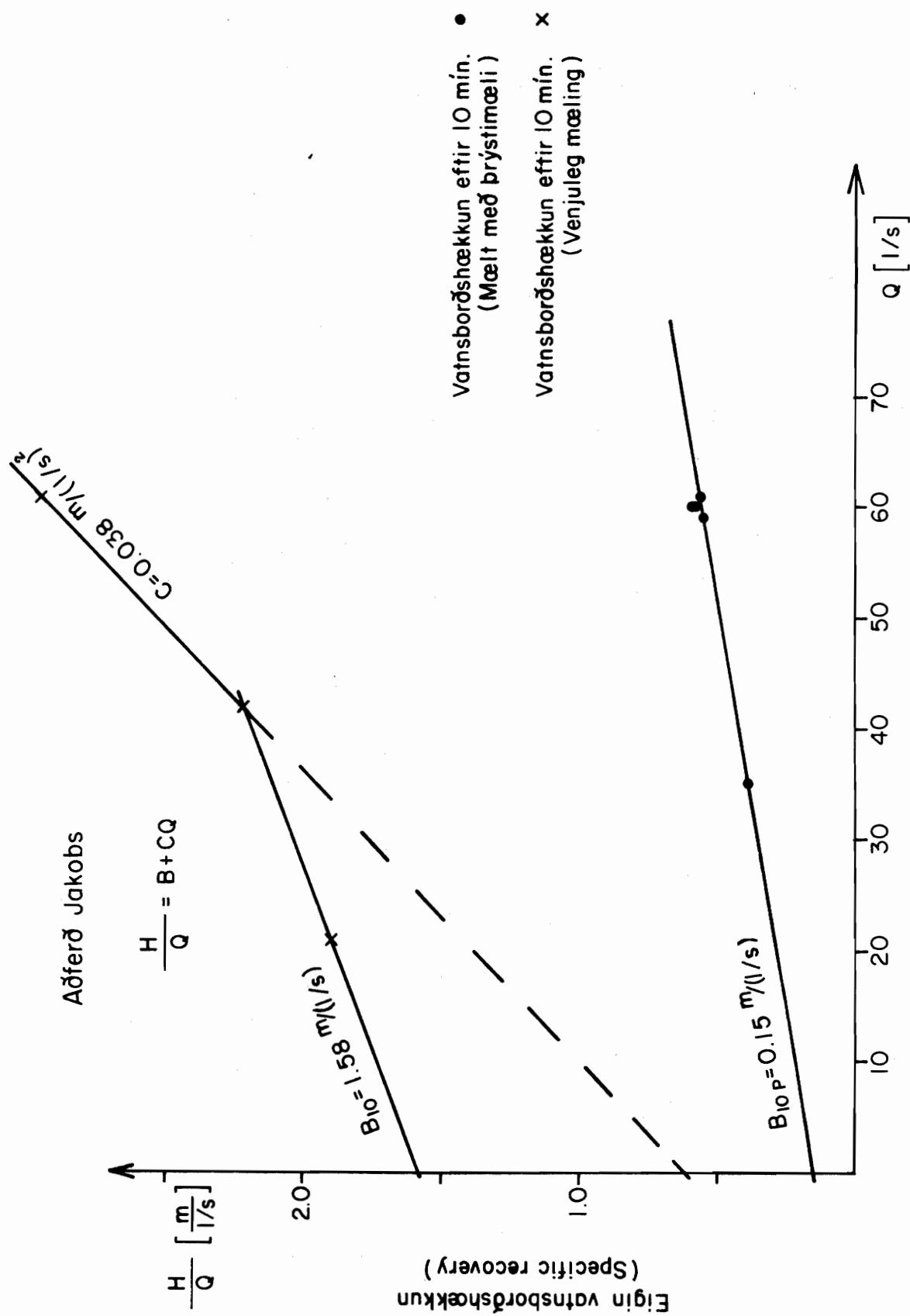
Aðferð Jakobs



Þrepidæling, hola KJ-9

'77.06.13. ÓS/SL  
T.352  
Krafla  
F. 15630

Mynd 22





ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

77.06.09 ÓS/SL

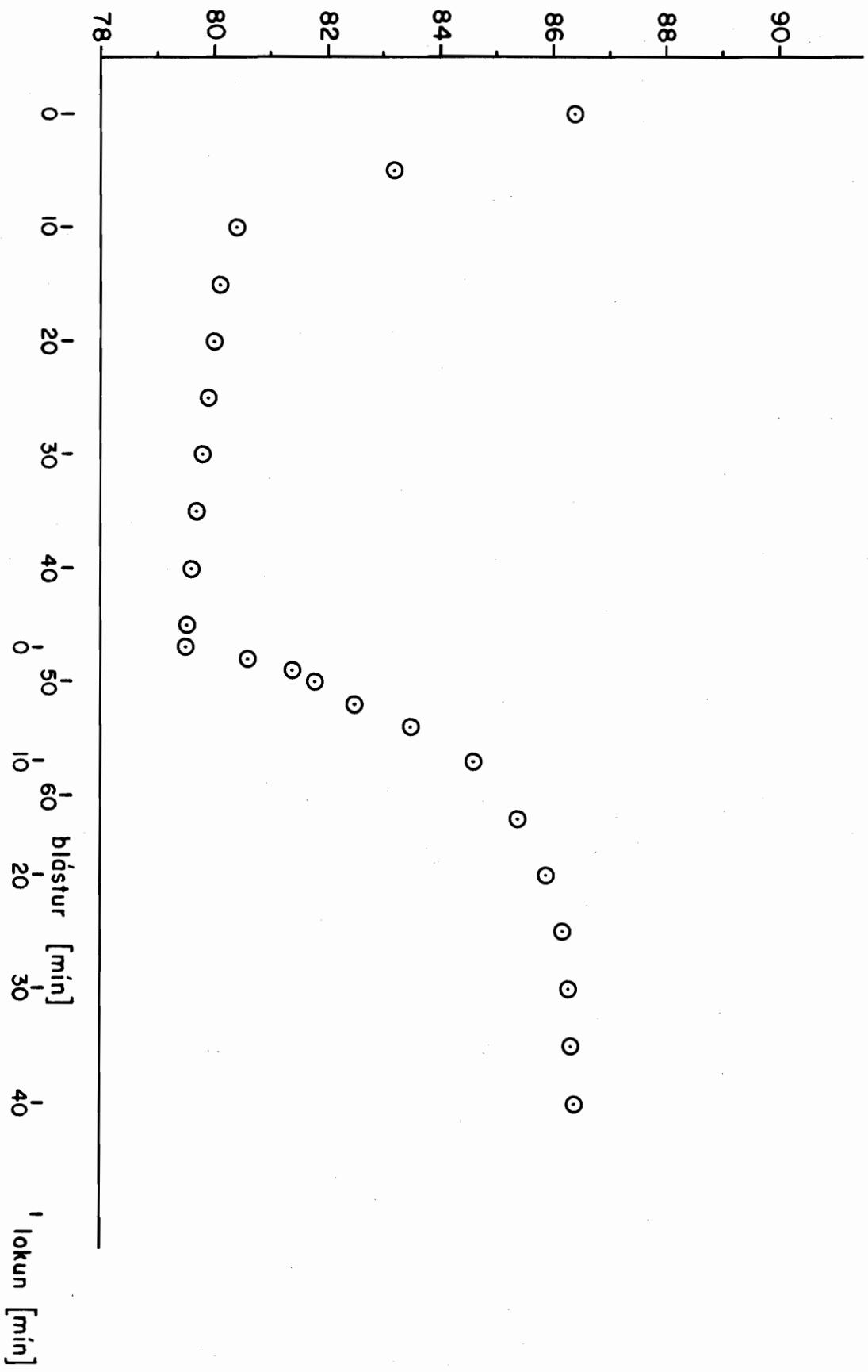
T. 365

Krafla

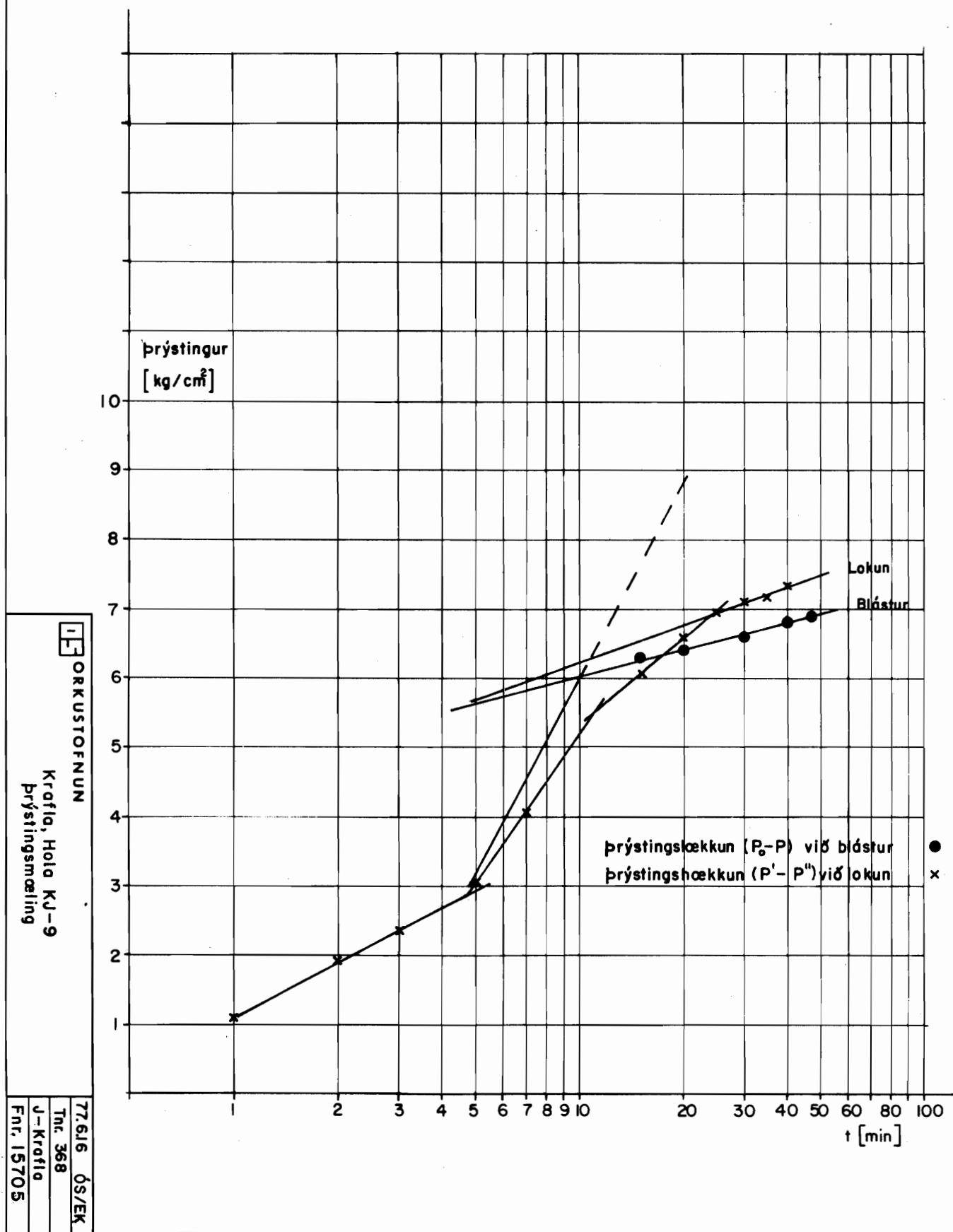
F. 15702

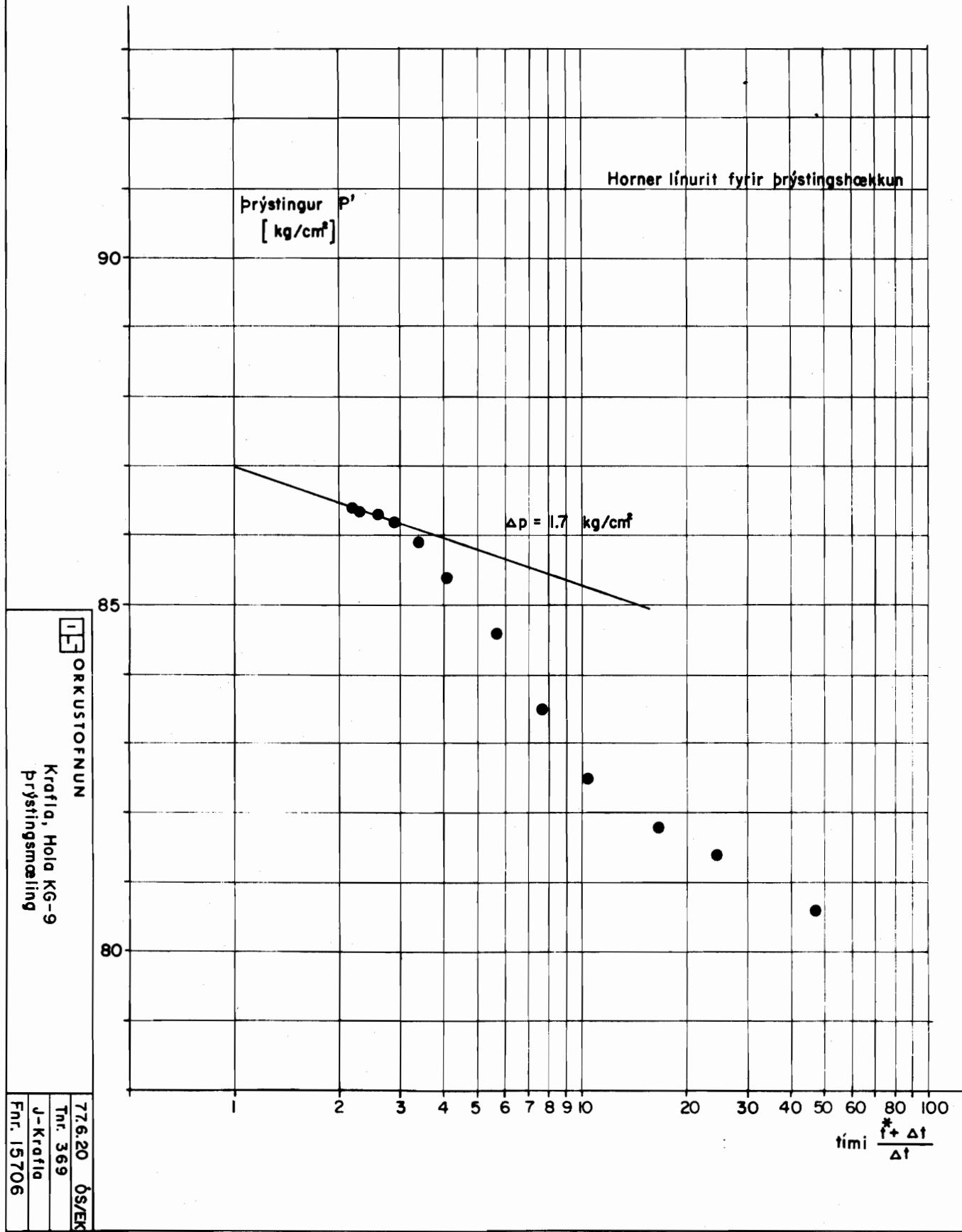
þrýstimæling, hola KJ-9

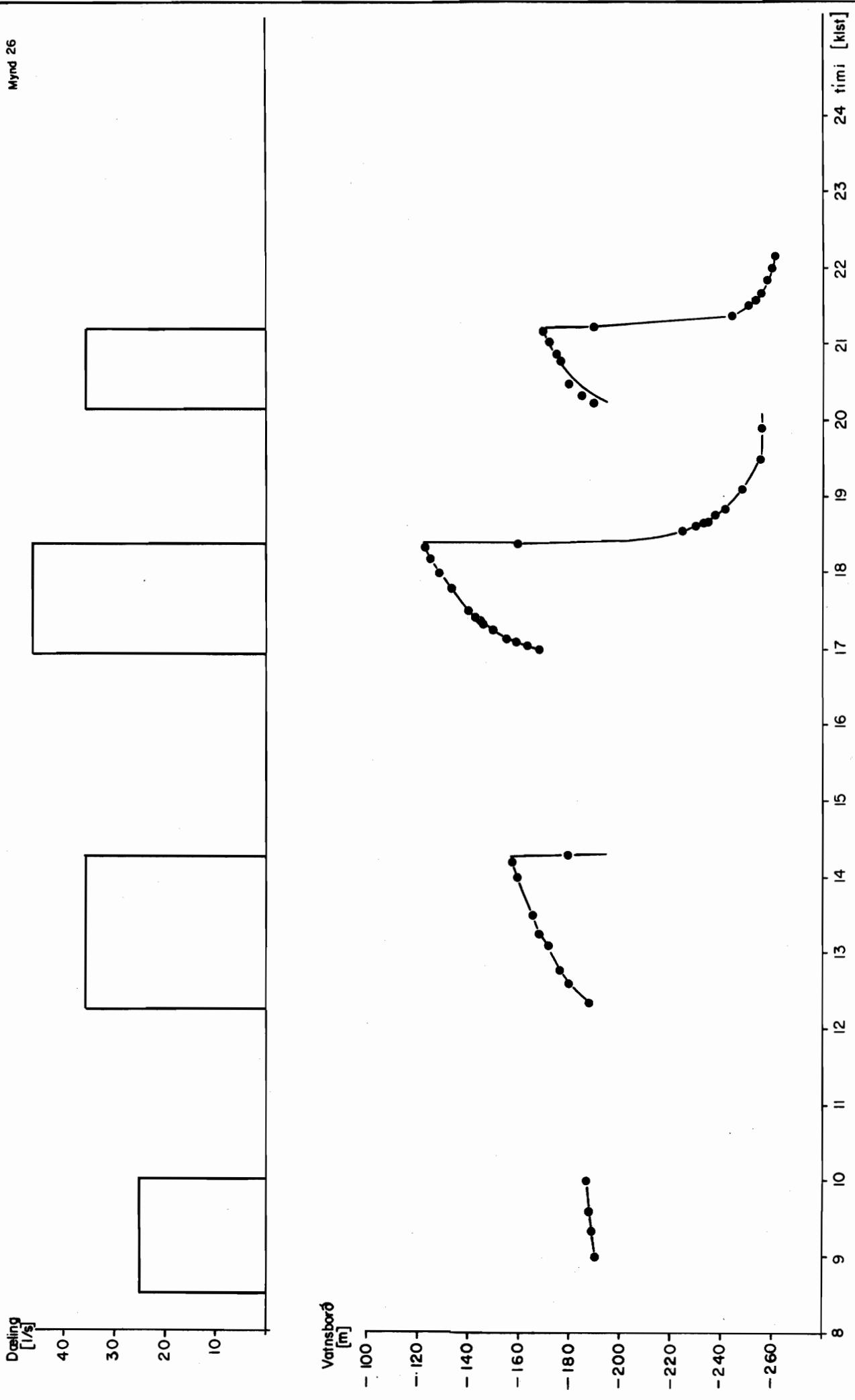
þrýstingur [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ] Mynd 23



Mynd 24







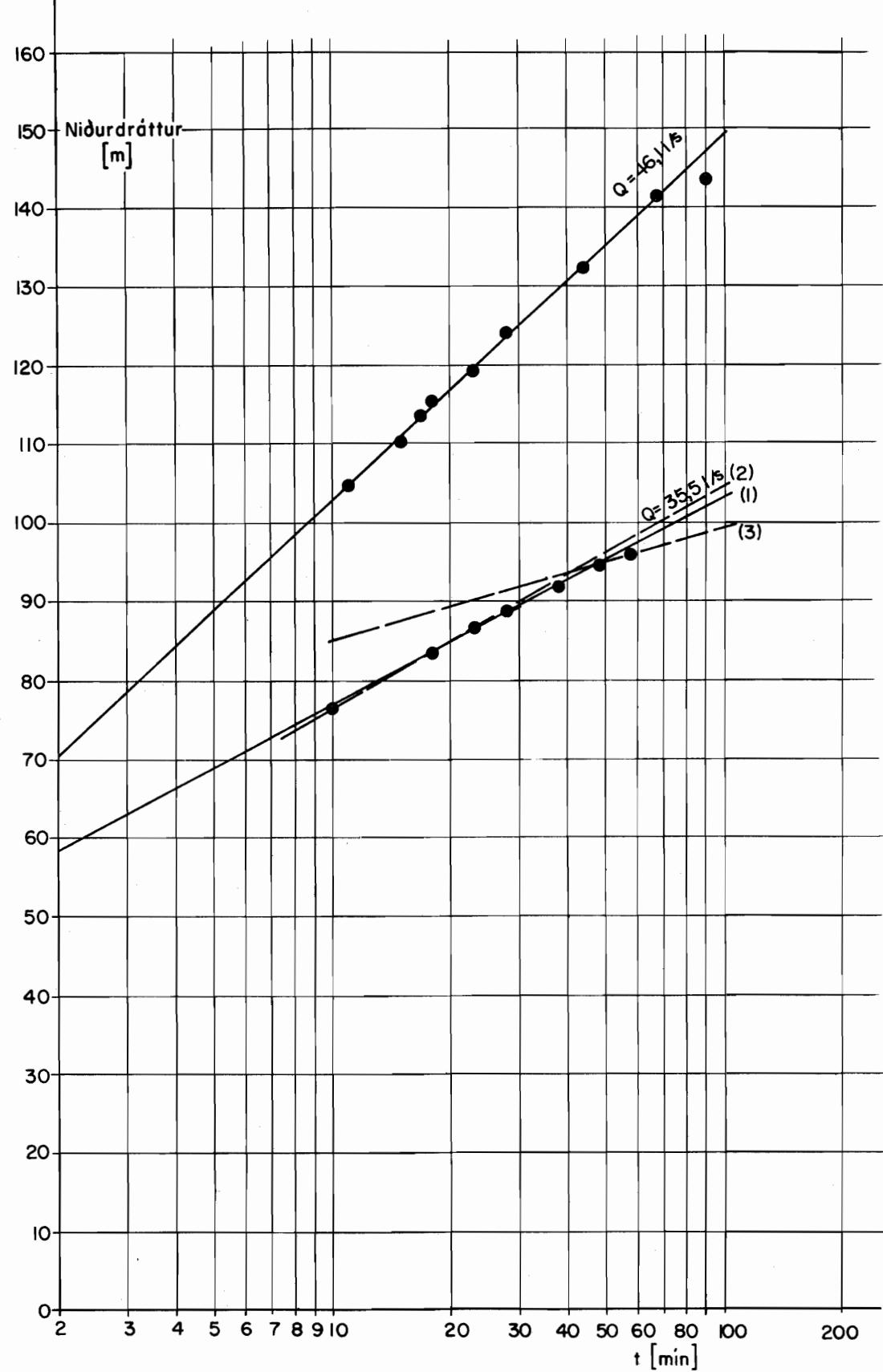
ORKUSTOFNUN

Krafla hola KG-10  
þrepadræling gerð '76.11.16

177.04.22 vs/AA T 340

F 15564

Mynd 27



ÍF

ORKUSTOFTNUN

Krafla hola KG-10  
þróunarleið

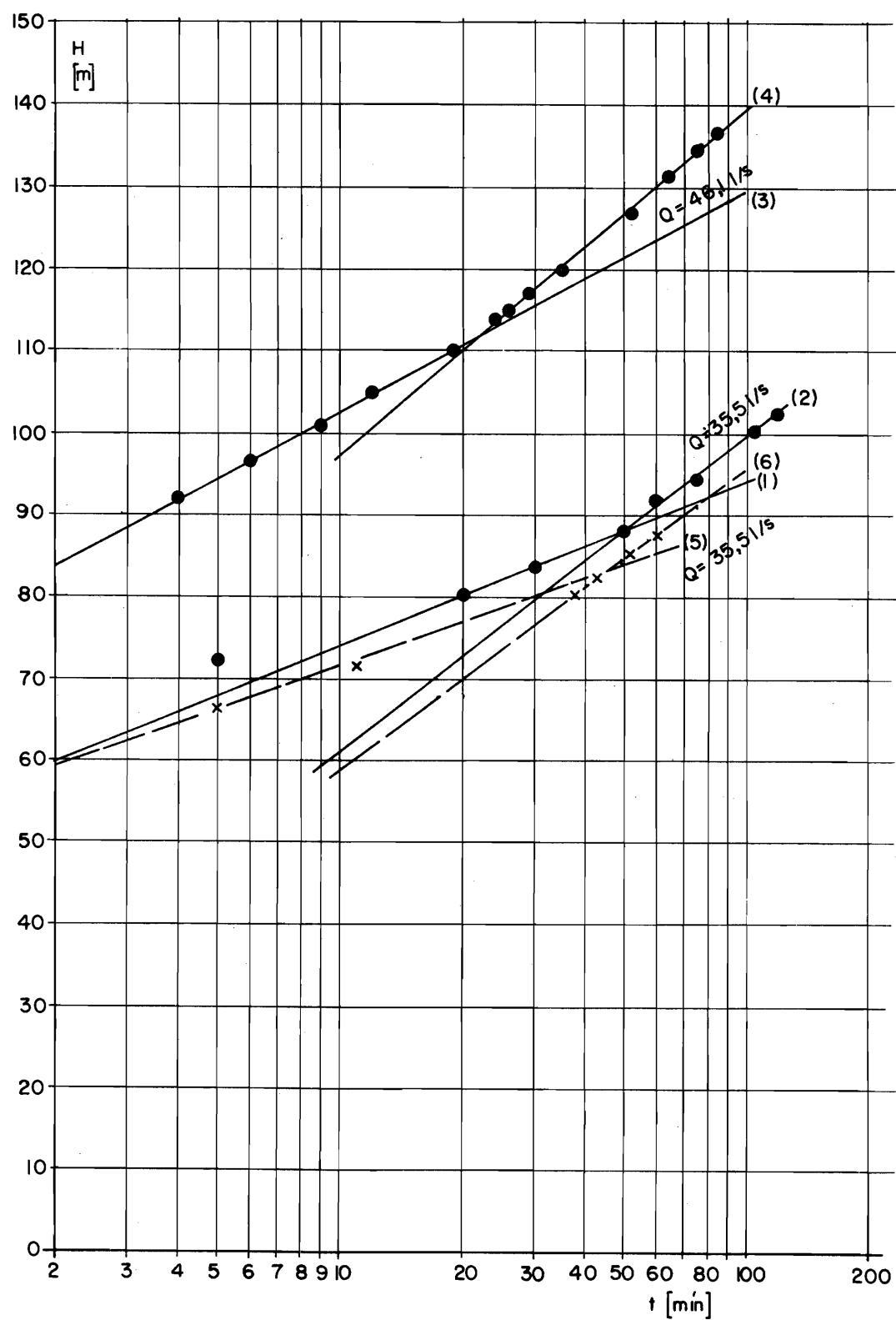
17704.25 OS/AÁ

T 347

Kraflo

F15574

Mynd 28



ORKUSTOFNUN

Krafla hola  
KG-10  
þrepadæling

'77.04.25 OS/AÁ  
T 348  
Krafila  
F 15575

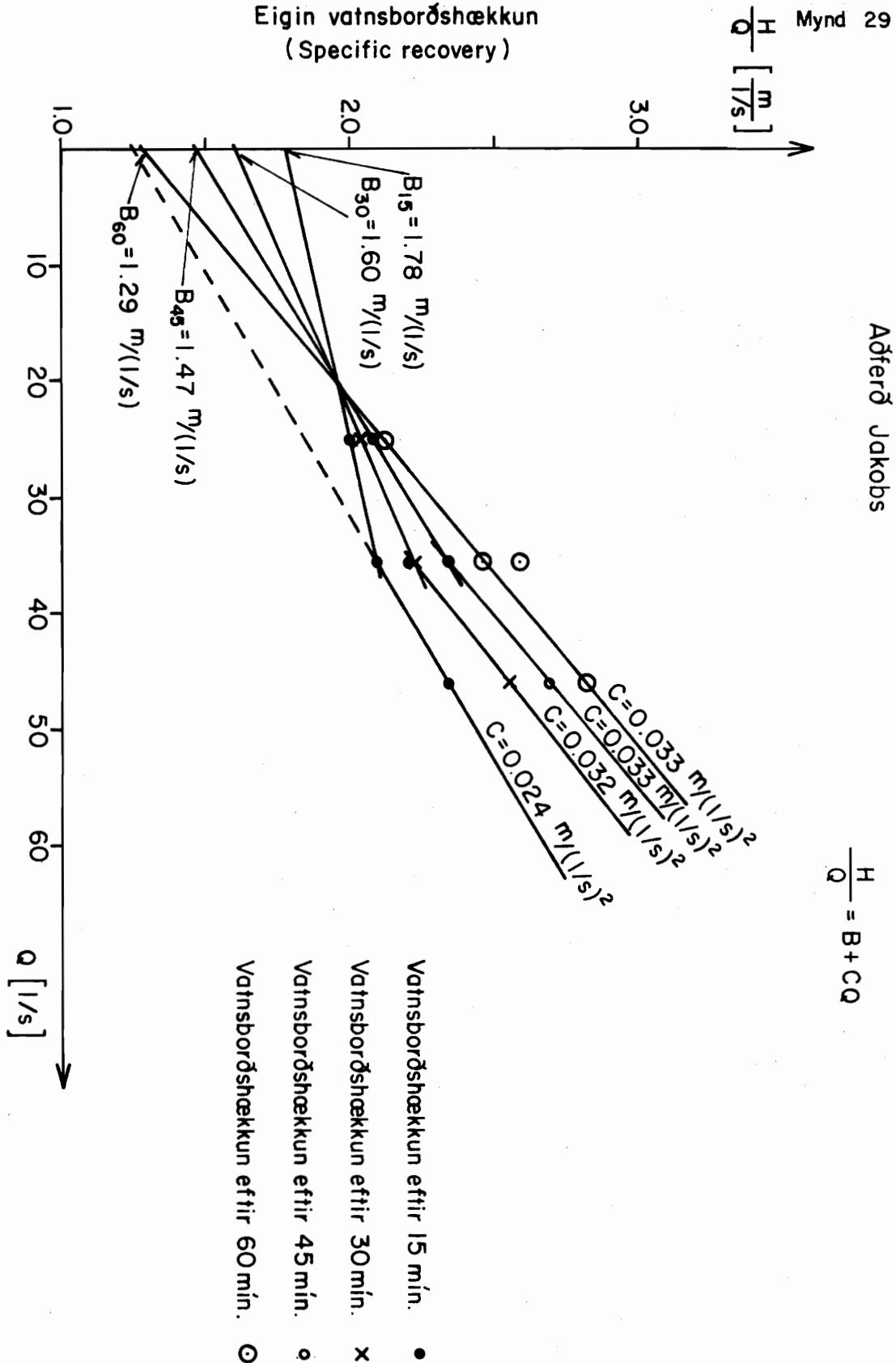


Mynd 29

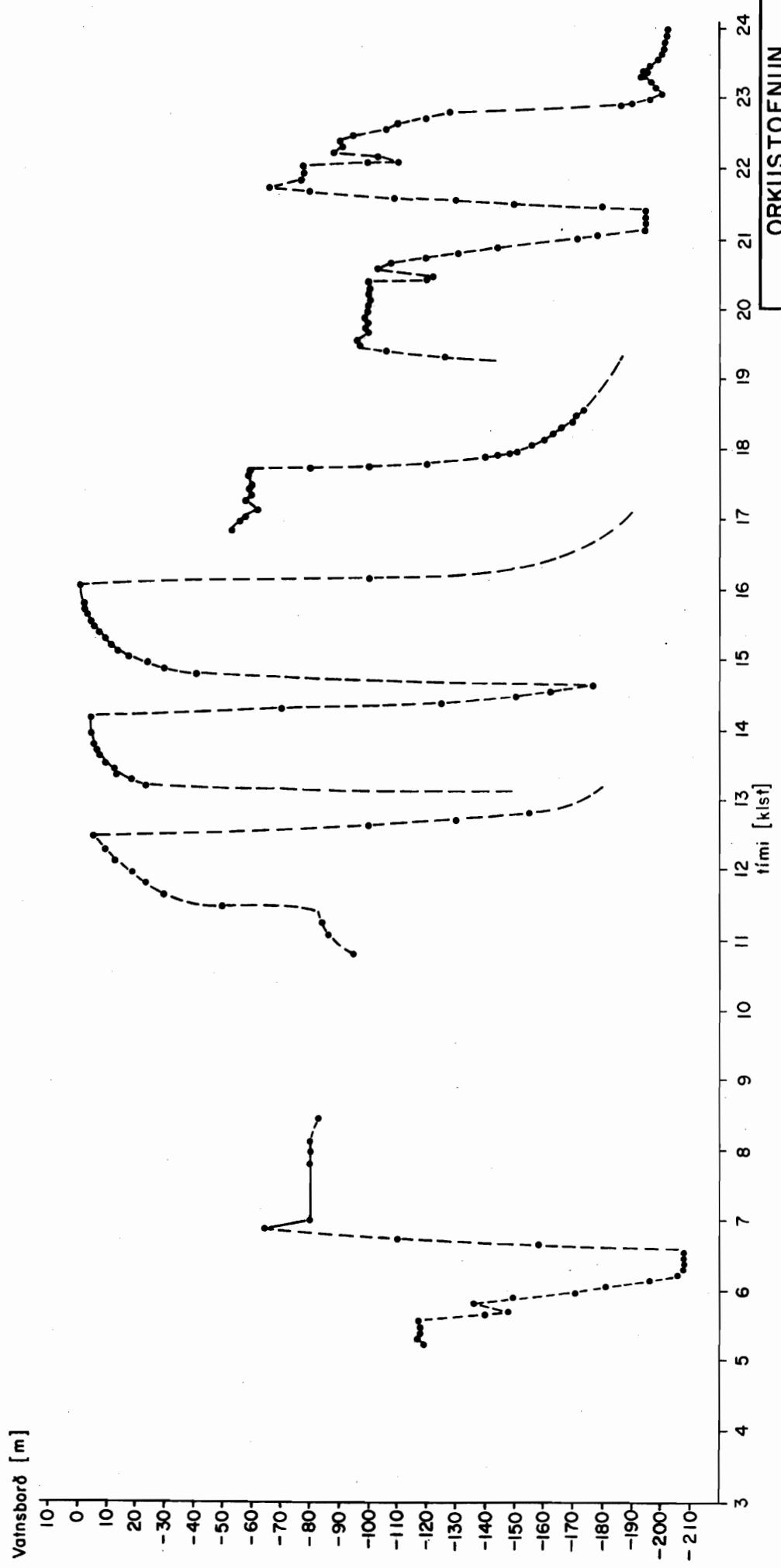
Aðferð Jakobs

$$\frac{H}{Q} = B + CQ$$

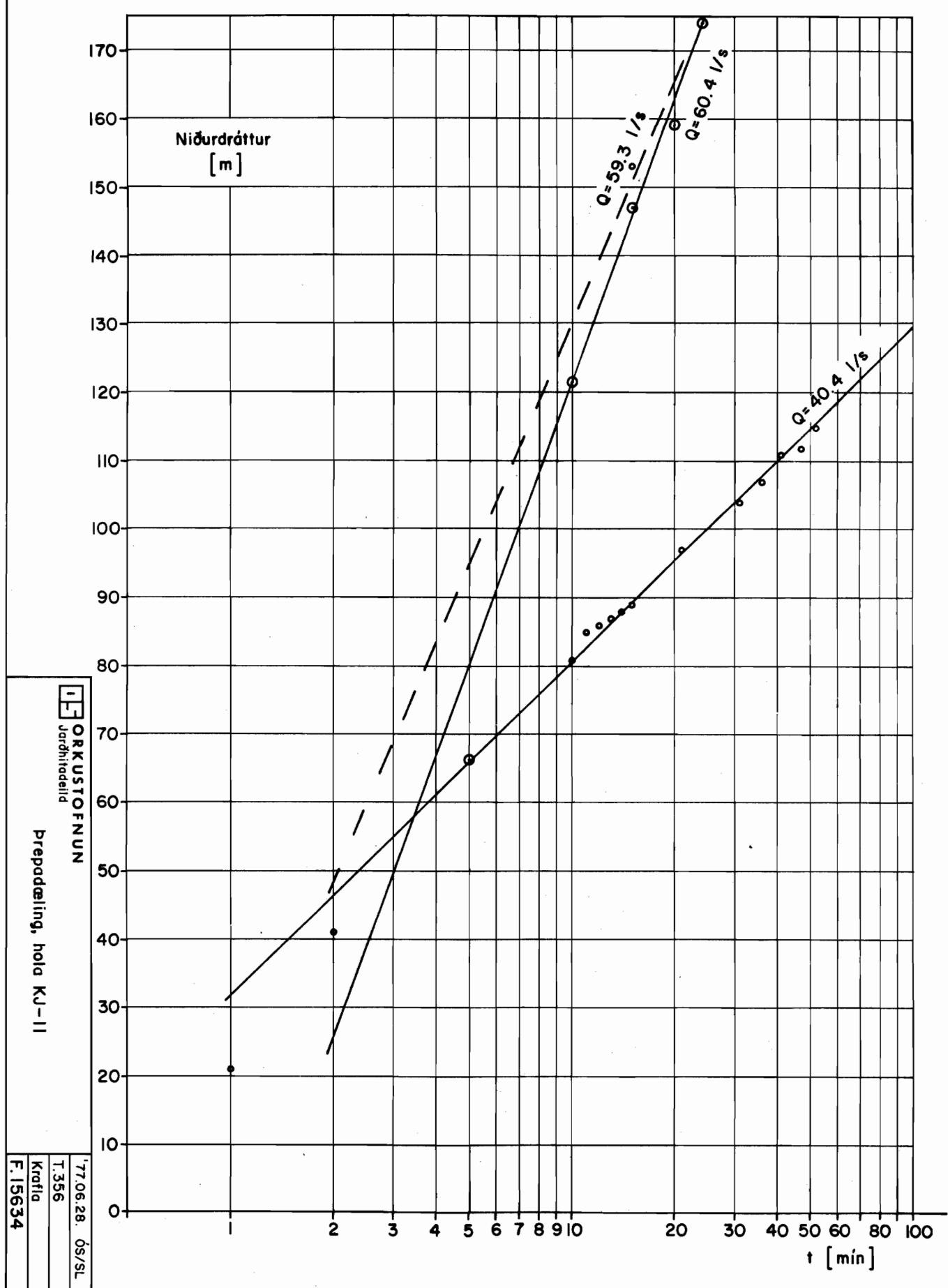
Eigin vatnsborðshækken  
(Specific recovery)



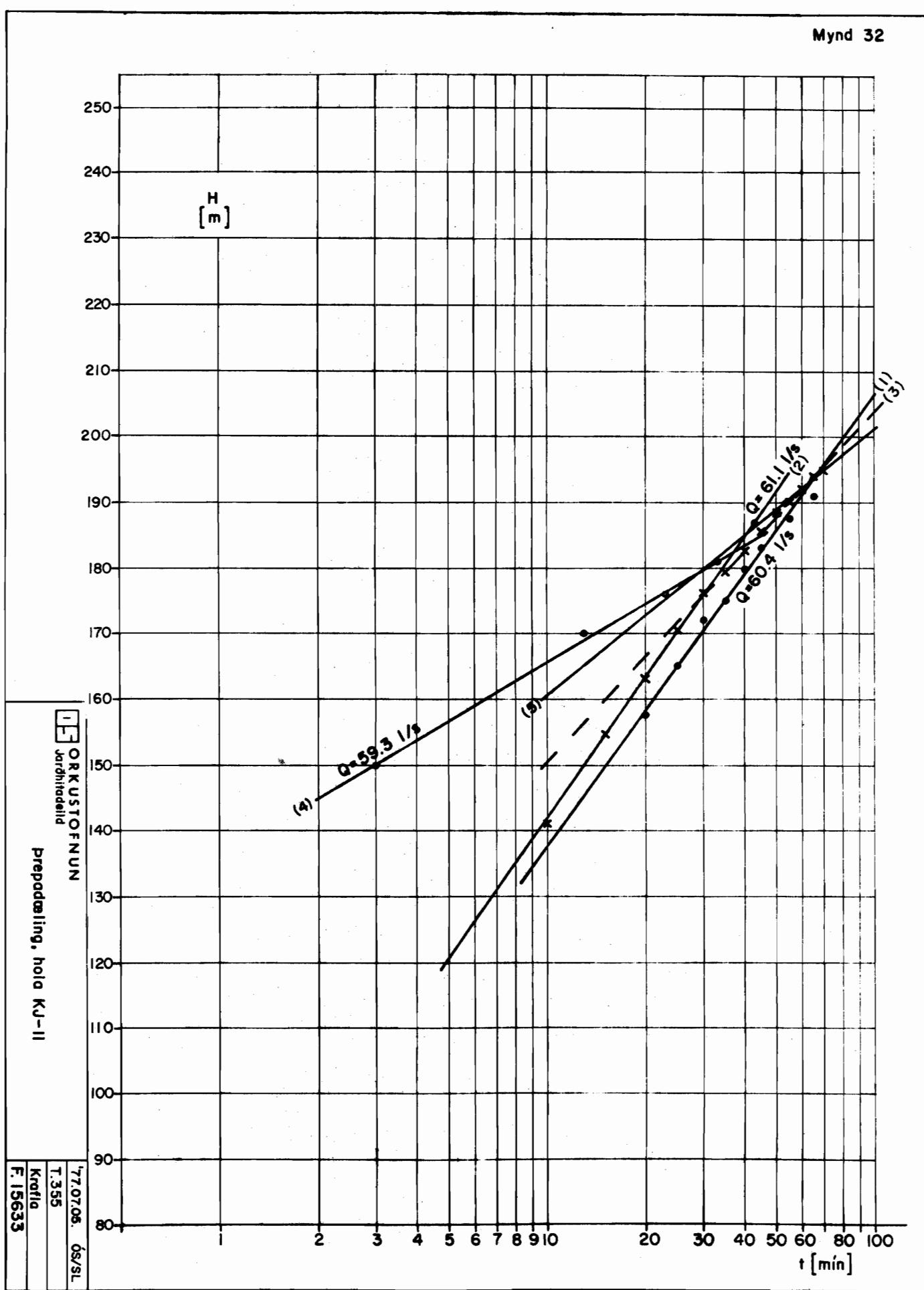
Mynd 30



Mynd 31



Mynd 32



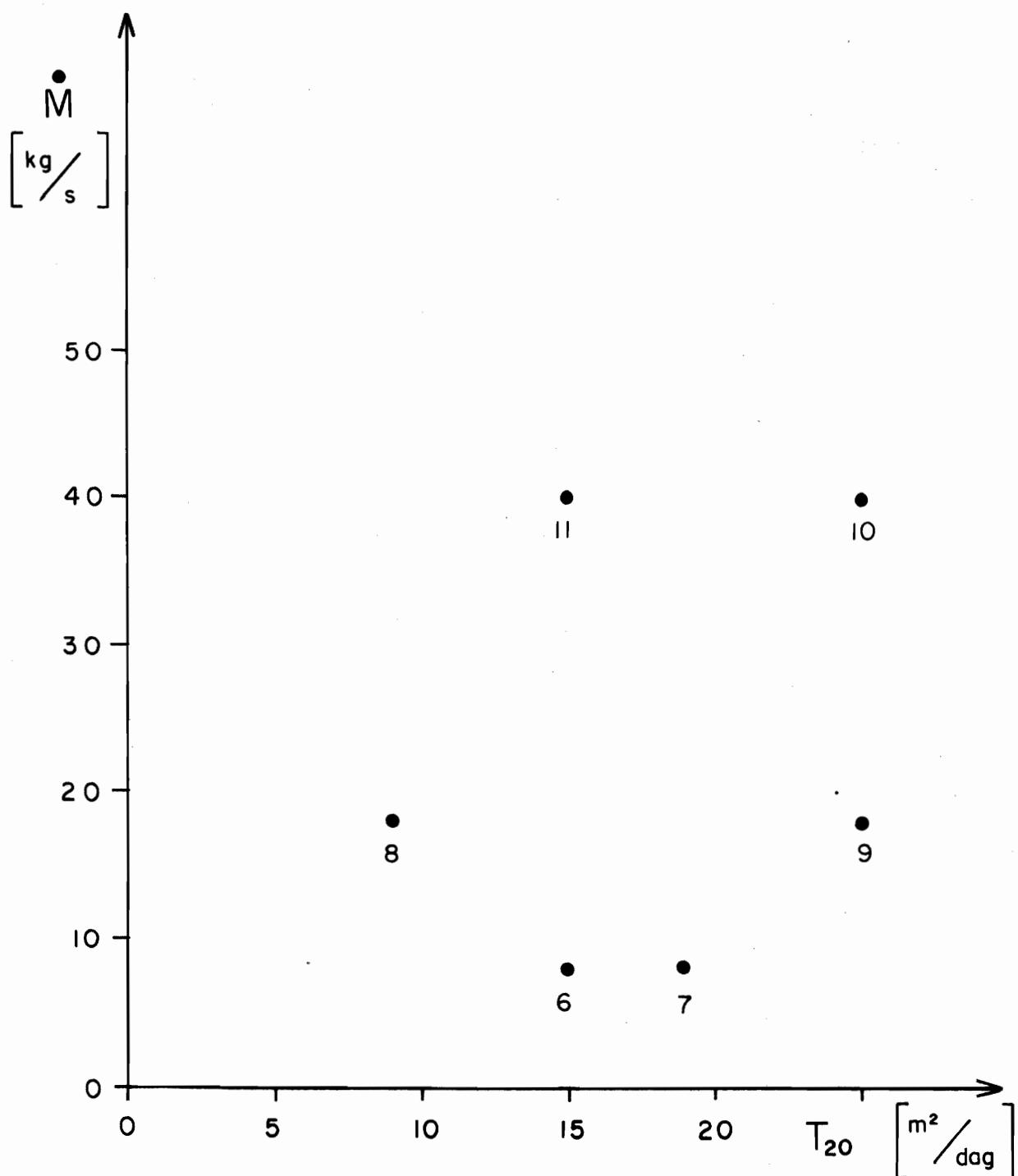


ORKUSTOFNUN  
Járhítadeild

Samband heildarrennslis og  
lektar í borholum í Kröflu

20.06.77 VS/AVill  
T. 400  
Krafla  
F-15802

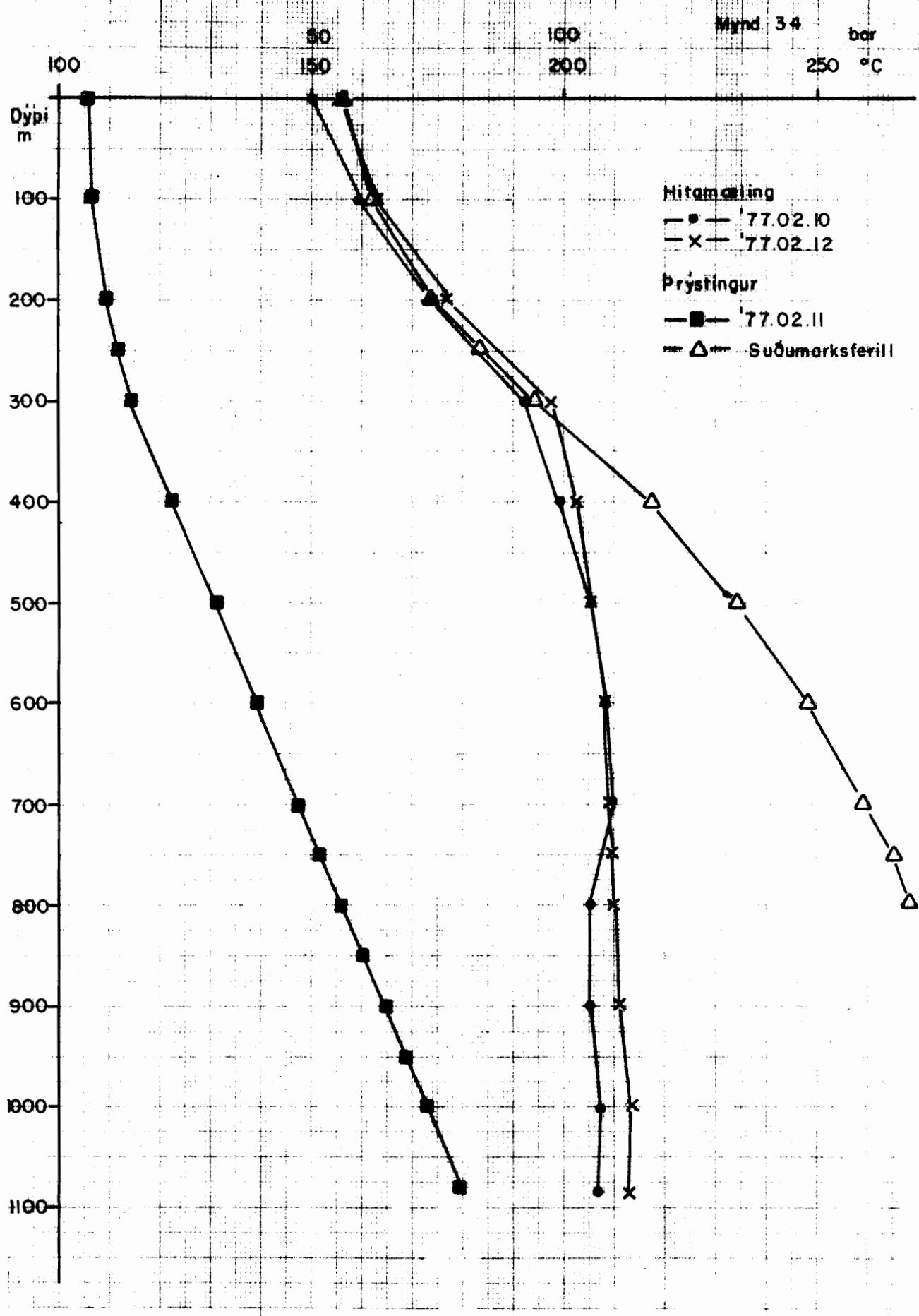
Mynd 33



KRAFLA HOLA KJ-9  
Mælingar í blásandi holu

'77.03.04 VS/AÁ  
T 1905 T 325  
Hitam. Krafla  
F 15361

Mynd 34 bar  
250 °C





Samband suðubrýstings á innstreymisvatni  
og mesta massastreymis úr gufuholum

Mynd 35

