

RAFORKUMÁLASTJÓRI

hillu  
3

ORKUSTOFNUN  
MÁLASAFN  
540

VINNSLA YFIRHITAÐS VATNS ÚR BORHOLUM

eftir

Þorbjörn Karlsson

---

Jarðboranir ríkisins  
ágúst, 1956

## VINNSLA YFIRHITAÐS VATNS ÚR BORHOLUM

Sú hugmynd hefur komið fram, að athuga beri, hvort ekki sé unnt að dæla yfirhituðu vatni upp úr borholum í stað þess að láta vatnið gufa upp og koma upp úr borholunum sem gufa blandin vatni. Reynist þessi leið fær, verður hiti vatnsins hærri en hiti gufunnar og varminn nýtist þannig betur.

Til þess að unnt sé að dæla vatni upp úr borholu þarf sama magn að streyma inn í holuna í botni frá jarðlögunum í kring. En ef vatn á að streyma inn í holuna í botni, þarf að lækka í henni þrýstinginn, þannig að þrýstingsmismunur myndist á milli holubotnsins og jarðlaganna í kring. Þessi þrýstingslækkun kemur fram í því, að vatnsborð holunnar lækkar úr  $h_1$  metrum niður í  $h_2$  metra, talið frá holubotni (sjá 1. mynd).

Gerum ráð fyrir borholu, 400 metra djúpri, sem gefur 30 tonn/klst af gufu. Botnhitinn sé  $245^{\circ}\text{C}$ . Gufuhlutfallið er þá  $x = 0.27$  og heildarvatnsmagn því  $30.000 / (0.27 \times 3.600) = 31$  l/sek. Nú er augljóst af því, sem hér að ofan er sagt, að lækkun vatnsborðsins úr  $h_1$  metrum (400<sup>m</sup>) niður í  $h_2$  metra (ca. 50-100 m) veldur því, að botnhiti holunnar verður langt fyrir ofan suðuhita á  $h_2$  metra dýpi ( $150-175^{\circ}\text{C}$  á 50-100 m). Vatnið mundi þá sjóða á botni holunnar og dælan yrði því algerlega óvirk.

Frá fræðilegu sjónarmiði, a.m.k., væri hugsanlegt, að blanda mætti hið heita botnvatn holunnar með kaldara vatni frá yfirborði og lækka með því botnhitann niður fyrir suðumark. Gert er ráð fyrir sömu holu og hér að framan. Vatnsmagnið, sem inn í hana streymir,  $q_0$ , sé 30 l/sek fyrir  $h = 100$  metra ( $h =$  vatnsdýpið í holunni), og ennfremur, að  $q_0$  breytist línulega með vatnshæðinni í holunni, þ.e.  $q_0 = 0,1 \cdot (400-h)$ , l/sek. Vatnsmagnið, sem blandað er við botnvatnið, sé  $q_1$  l/sek og hiti þess við botninn  $T_1^{\circ}\text{C}$ . Út frá þessu má nú finna, hve miklu vatni þarf að dæla niður í holuna til að lækka hitann í botni holunnar undur suðumark. Blöndunarhitinn,  $T_b$ , verður þá:

$$T_b = \frac{q_0 T_0 + q_1 T_1}{q_0 + q_1} \quad (1)$$

Þar sem  $T_0$  er botnhiti í holunni ( $245^\circ\text{C}$ ). Hitinn  $T_1$  er hiti blöndunarvatnsins, er það kemur niður á botn bolunnar, en þá hefur það verið leitt langa leið í gegnum mikið heitara vatn. Þarf því að áætla, hve mikið blöndunarvatnið hitnar á þeirri leið. Gert er ráð fyrir, að vatnið sé leitt niður í holuna í pípu og að hitaleiðslan  $Q$ , milli pípunnar og umhverfisins sé

$$Q = k(gz - T), \quad (2)$$

þar sem  $k$  er hitaleiðslustuðull,  $T$  hiti vatnsins í pípunni og  $gz$  hitinn umhverfis pípunna, þ.e.,  $g$  er hitastigullinn. Dýpt vatnsins í holunni sé  $h$  metrar og niður um pípunna streymi  $q_1$  l/sek af vatni. Hiti þess vatns sé  $T_d$  á yfirborði og breytist ekki, fyrr en það fer að streyma í gegnum vatnið í holunni, þ.e. fyrir  $z = D-h$ , þar sem  $D$  er holudýptin. Eðlisvarmi vatnsins er  $c$ . Þá fæst eftirfarandi differential-jafna fyrir hita vatnsins í pípunni (sjá 2. mynd)

$$c \cdot q_1 \cdot dT = k(gz - T) dz, \quad D-h \leq z \leq D, \quad (3)$$

og randskilyrðið er  $T = T_d$  fyrir  $z = D-h$ . Lausn á (3) er:

$$T = \left( T_d - g(D-h) + g \frac{c q_1}{k} \right) e^{-\frac{k}{c q_1} (z-D+h)} + g \left( z - \frac{c q_1}{k} \right), \quad (4)$$

og hitinn á botni,  $T_1$ , fæst með því að setja  $z = D$ :

$$T_1 = \left( T_d + gh \right) e^{-\frac{kh}{c q_1}} + g \left( D - \frac{c q_1}{k} \right) \left( 1 - e^{-\frac{kh}{c q_1}} \right). \quad (5)$$

Nú er jafna (1) leyst með tilliti til  $T_1$  og sett jafnt <sup>(5)</sup> og fæst þá:

$$T_b - \frac{q_0}{q_1} (T_b - T_b) = \left( T_d + gh \right) e^{-\frac{kh}{c q_1}} + g \left( D - \frac{c q_1}{k} \right) \left( 1 - e^{-\frac{kh}{c q_1}} \right). \quad (6)$$

Blöndunarhitinn,  $T_b$ , er háður vatnsdýpinu í holunni,  $h$ . Hann þarf að vera nokkrum gráðum undir suðuhita til að fyrirbyggja kavitationshættu í dælunni. Í handbókum um þessi efni (t.d. Marks Handbook, bls. 1855) er skilgreindur svokallaður sogeðlissnúningshraði (suction specific speed):

$$S = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H_{sv}^{3/4}}, \quad (7)$$

þar sem  $N$  er snúningshraði dælu (rpm),  $Q$  vatnsmagn (gpm) og  $H_{sv}$  þrýstingur við soghlið dælu yfir gufuþrýstingi þess vökva, sem dælt er (ft  $H_2O$ ). Fyrir slíkar dælur, sem hér um ræðir, þarf  $S \leq 5.500 - 7.500$ . Ef gert er ráð fyrir  $N = 1500$  sn/mín og  $S = 6000$ , fæst:

$$\frac{\sqrt{Q}}{H_{sv}^{3/4}} = 4. \quad (8)$$

Jafna (8) á þá að gefa blöndunarhitann  $T_b$ , sem funktion af  $h$ , ef  $Q = q_0 + q_1$  er þekkt. Blöndunarvatnsmagnio  $q_1$  er hins vegar háð blöndunarhitnum  $T_b$ , og þarf því að leysa jöfnur (6) og (8) samtímis.

Jafna (6) er nú leyst þannig, að  $T_b$  er sett jafnt suðuhita á botni holunnar. Eftirfarandi tölur eru notaðar:

$$T_d = 20^\circ\text{C}$$

$$D = 400 \text{ m}$$

$$C = 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$q_0 = 0,1 \cdot (400 - h) \text{ l/sek}$$

$$g = Ts/D, \text{ þar sem } Ts \text{ er suðuhiti á botni holunnar}$$

$$T_0 = 243^\circ\text{C}$$

Hitastuðullinn  $k$  er nokkru erfiðari viðfangs, þar sem hann er háður stærð pípunnar, sem vatnið er leitt eftir.

Pípuþvermálið fer hins vegar eftir því, hve mikið vatn er leitt niður í holuna og verður því að áætla pípustærðir.

Þetta er gert í töflu I, og er í þeirri töflu enn fremur reiknuð út stærðin  $Q = q/\pi d_i$  (kg/klst.m), þar sem  $q$  er vatnsmagnio í kg/klst. og  $d_i$  er innanþvermál pípunnar í metrum. Í McAdams' "Heat Transmission", 96 mynd, bls. 204, er gefnir hitaleiðslustuðolar fyrir lóóréttar pípur, þar sem vatn er í pípunum en gufa utan þeirra. Sést þar, að hitaleiðslustuðullinn hækkar með hækkandi  $Q$ , en virðist nálgast fast gildi fyrir stór  $Q$ .

Verður hér notað konstanst gildi fyrir hitaleiðslustuðullinn  $U_i$  (kcal/klst  $\text{m}^2$   $^\circ\text{C}$ , miðað við innanmál) og notað  $U_i = 800 \text{ Btu/hr. sqft. } ^\circ\text{F} \approx 4.000 \text{ kcal/klst. m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Hitaleiðslustuðullinn fyrir hverja lengdareiningu af pípu verður þá  $k = U_i \cdot \pi \cdot d_i$  kcal/klst.m. $^\circ\text{C}$ , og er hann sýndur í aftasta dálki töflunnar. Á 3. mynd er teiknað upp línurit af  $k$  sem funktion af  $q$  og sést þar, að við getum með góðri nálgun skrifað:  $k = 400 \cdot q^{0,36}$  kcal/klst m. $^\circ\text{C}$ . ( $q$  í l/sek).

TAFLA I

Áætlun á hitaleiðslustuðli, k. Reiknað er með konstant hitaleiðslustuðli pr. fermetra pípu,  $U_i = 4.000 \text{ kcal/klst. m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  og konstant viðnámi í pípu,  $f = 1.000 \text{ milinches/foot}$ .

$q$ l/sek	$d$	$d_i$ m	$Q$ kg/klst.m	$k$ kcal/klst.m. $^\circ\text{C}$ .
0,08	3/8 "	0,0394	9.150	158
0,15	1/2 "	0,0497	10.440	199
0,35	3/4 "	0,0660	19.100	264
0,7	1 "	0,0836	30.000	335
1,4	1 1/4"	0,110	46.000	440
2,2	1 1/2"	0,128	62.000	512
4,4	2 "	0,165	96.000	660
7,0	2 1/2"	0,198	127.000	790
13,0	3 "	0,245	191.000	980
19,0	3 1/2"	0,283	240.000	1.130
27,0	4 "	0,322	296.000	1.290
50	5 "	0,403	446.000	1.610
85	6 "	0,484	630.000	1.930
180	8 "	0,64	1.100.000	2.560
350	10 "	0,80	1.580.000	3.200

Ofan nefndar tölur eru nú settar inn í jöfnu (6) og eru niðurstöður þeirra reikninga sýndar á 4. mynd.

Eins og áður er tekið fram er af tæknilegum ástæðum ekki framkvæmanlegt að dæla vatni við suðumark upp úr holunni vegna kavitationsmyndunar í dælunni. Verður því að lækka hitann í holunni nokkuð undir suðumark, þ.e. leiða þarf nokkuð meira magn af vatni niður í holuna en sýnt er á 4. mynd. Hve mikið vatn þarf til viðbótar má nú áætla út frá jöfnu (8) og verður þá notað  $Q = q_0 + q_1$  samkvæmt 4. mynd. Má þá finna blöndunarhitann í gufutöflum og eru þessi leiðréttu gildi sýnd á 5. mynd.

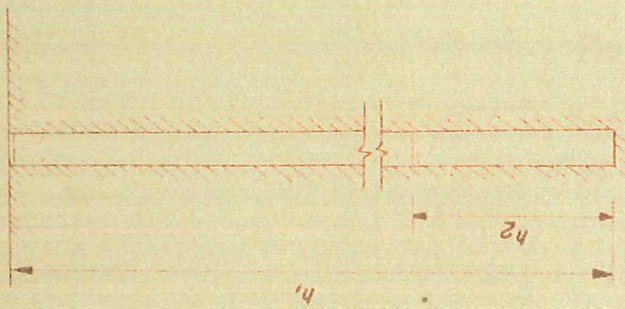
Ofangreindir reikningar sýna, að frá fræðilegu sjónarmiði ætti að vera unnt að dæla yfirhituðu vatni upp úr borholum, með

Því að leiða kalt vatn niður í holubotninn til að hindra suðu vatnsins þar. Frá tæknilegu sjónarmiði eru þó ýmis atriði í þessu sambandi, sem þarfnast nánari athugana, og skal hér aðeins dregið á fátt eitt.

Leggja þarf tvöfalda leiðslu af pípum niður í holuna, aðra fyrir vatn það, sem leitt er niður, og hina upp frá dælunni. Þetta gæti orðið ýmsum vandkvæðum bundið, ef holan er þröng, en ætti þó ekki að vera frágangssök.

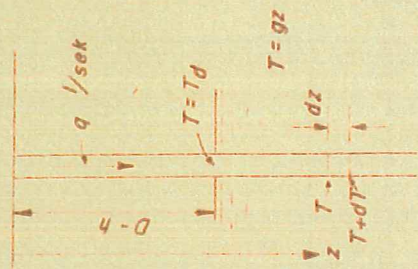
Vatn til að leiða niður í holurnar er ekki alltaf fyrir hendi á gufusvæðum. Við hagnýtingu jarðhitans til verksmiðju- reksturs verður þó að reikna með einhverri kælivatnspörf, þannig að sá vandi ætti í flestum tilfellum að vera fyrirfram leystur.

Gera verður ráð fyrir, að dælan sé knúin af rafmótor, sem sé tengdur beint við dæluna niðri í holunni. Skapast þannig vandamál í sambandi við einangrun og annan frágang mótorsins vegna hins háa hita, sem niðri í holunni ríkir. Einnig hefur hitinn ýmsan vanda í för með sér í sambandi við smurning dælunnar, legur og annað. Ekki skal þó lagður á það dómur hér, hvort þessi vandamál reynist óviðráðanleg, en þau þarf að athuga sérstaklega.



1. mynd

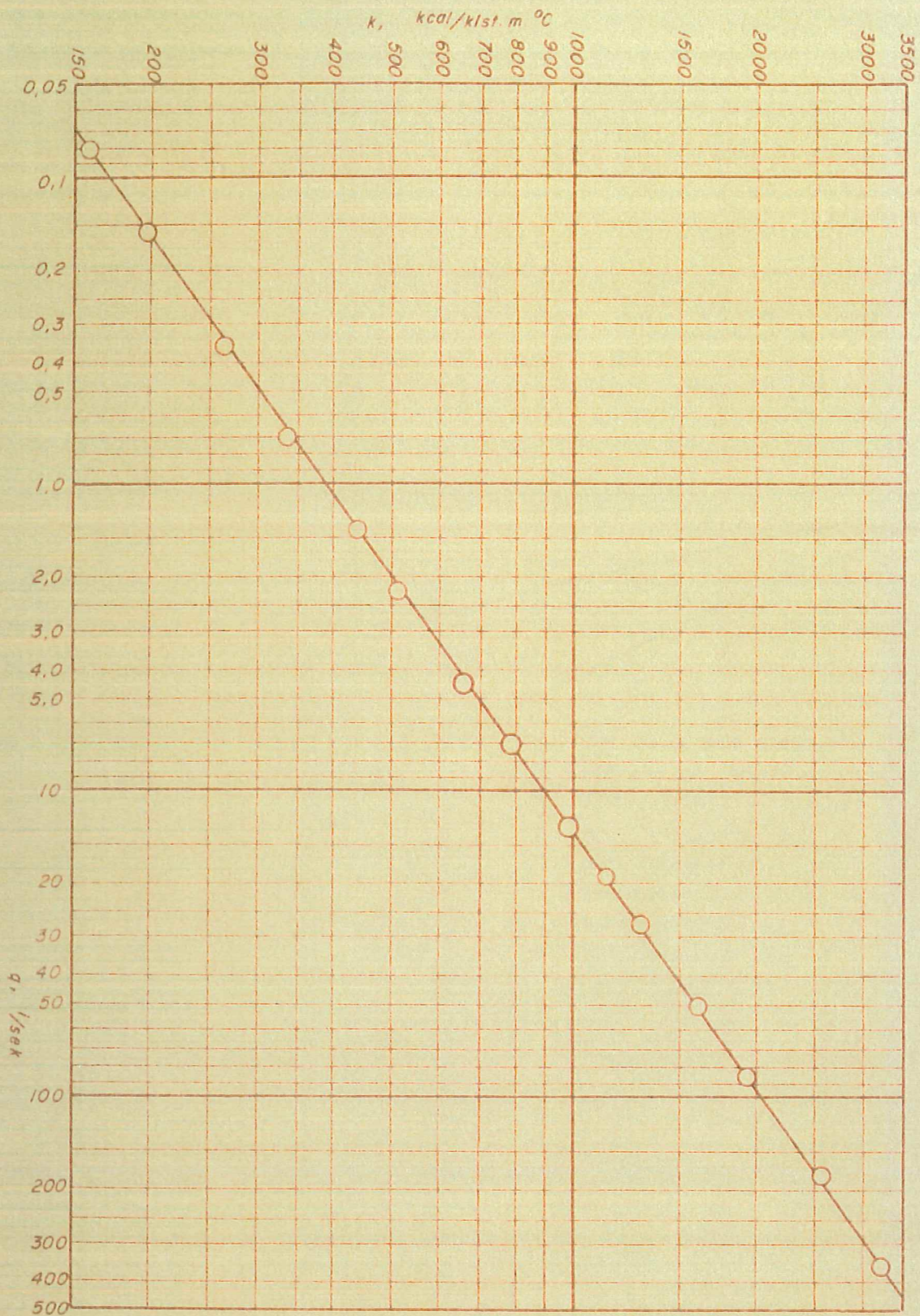
Borhola



2. mynd

Hitaleiðsla í gegnum lóðrétt

rör í borholu

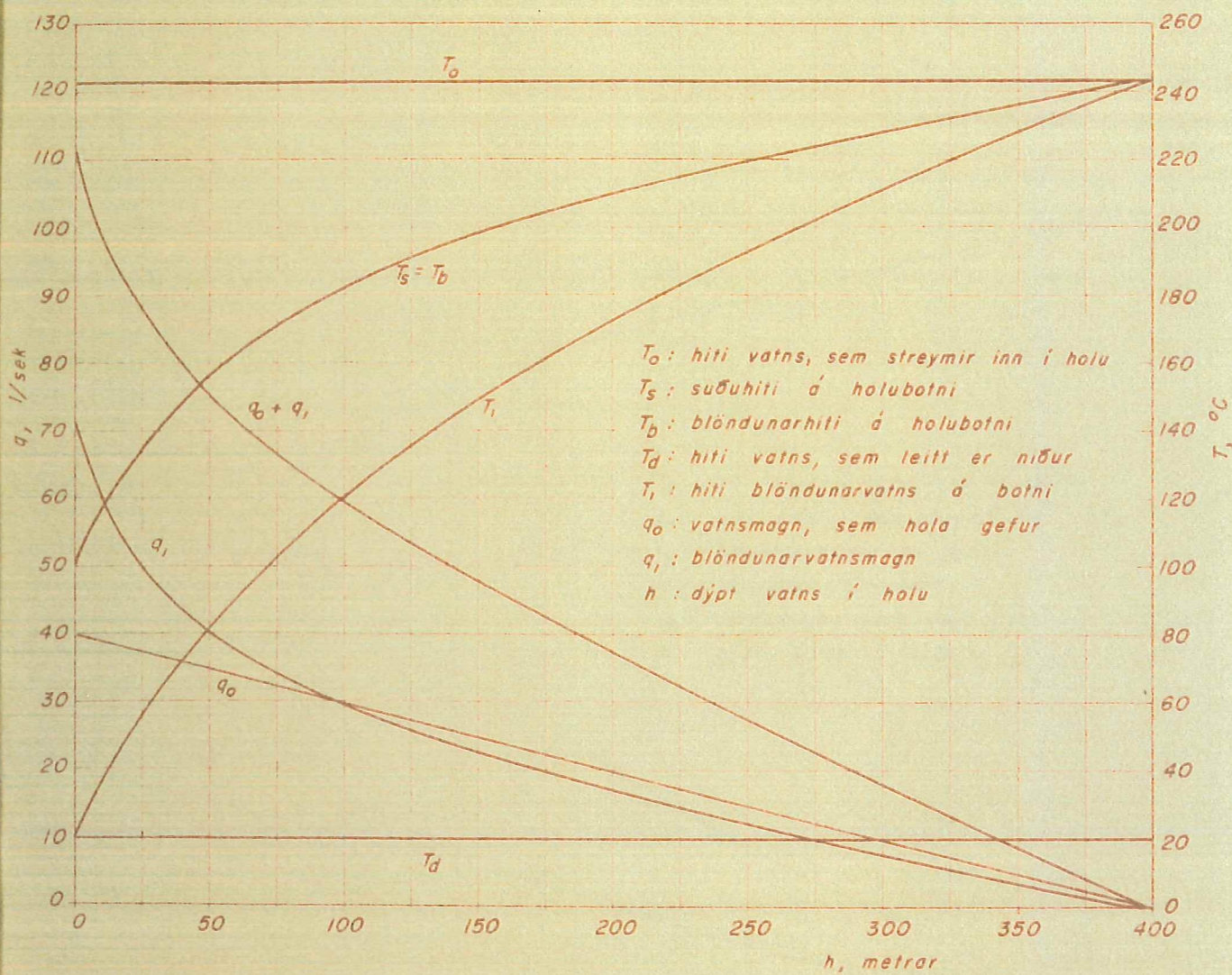


3. mynd

Samband milli hitaleiðslustuðuls,  $k$  og vatnsmagns,  $g$ , í lóðréttum pípum. Míðað er við viðnám í pípum 84 mm/m og hitaleiðslustuðul  $U_j = 4000 \text{ kcal/klst m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

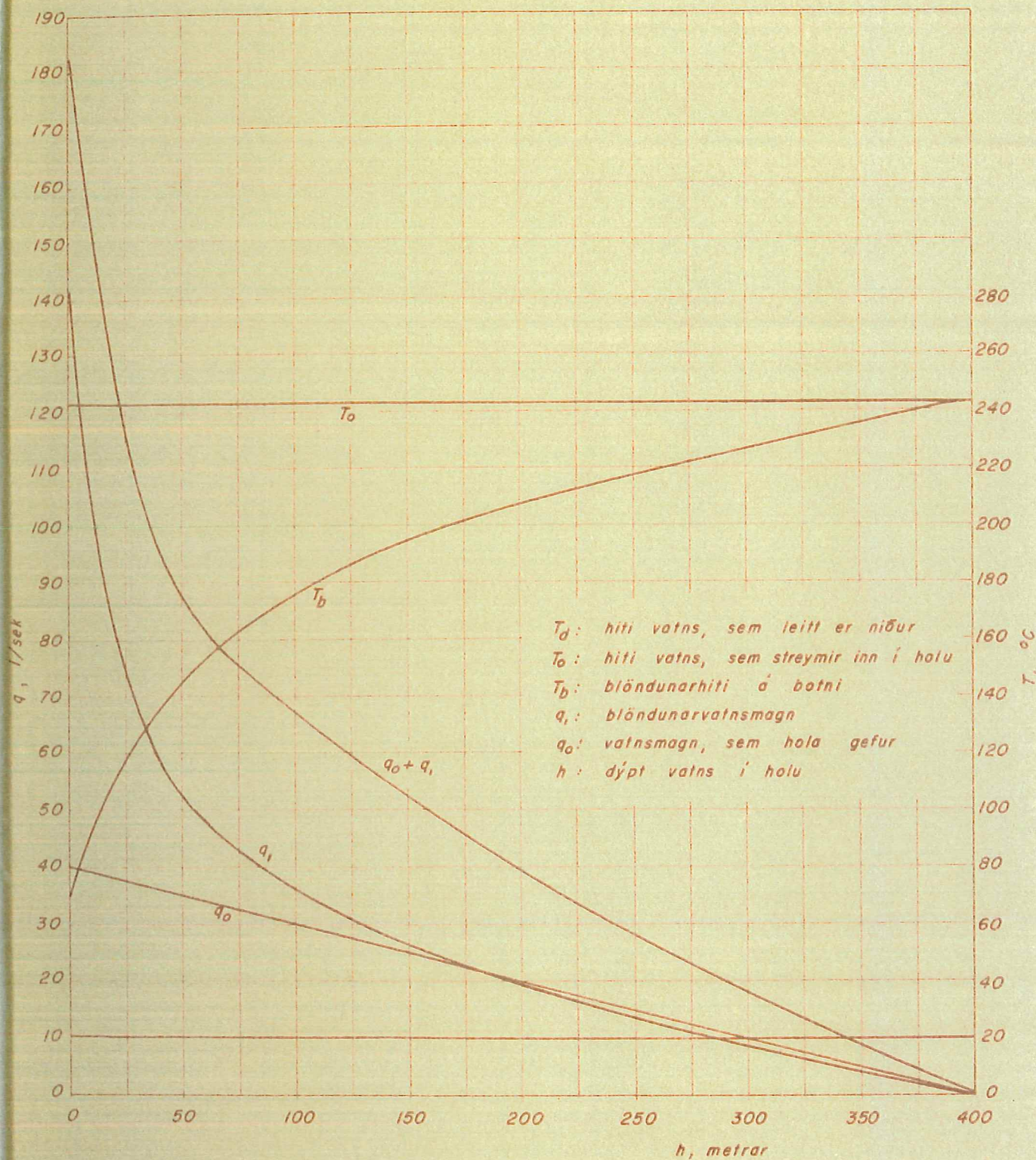


Vatnsmagn, sem leiða þarf niður í holu miðað við blöndunar-  
hita jafnan suðuhita á botni. Dýpt holu 400 m. Hiti  
vatns, sem hola gefur á botni  $243^{\circ}\text{C}$ .



4. mynd

Vatnsmagn, sem leiða þarf niður í holu og blöndunarhiti á botni, leiðrétt vegna kavitationsmyndunar. Dýpt holu 400 m. Hiti vatns, sem hola gefur á botni 243°C.



5. mynd.