

SVARTSENGI

STRAUMFRÆÐILEG RANNSÓKN
Á JARÐHITASVÆÐI

ORKUSTOFNUN STRAUMFRÆÐISTÖÐ
NEA HYDRAULIC LABORATORY
REYKJAVIK ICELAND

HITAVEITA SUÐURNESJA

SVARTSENGI

STRAUMFRÆÐILEG RANNSÓKN
Á JARÐHITASVÆÐI

Jónas Elíasson
Sigurður St. Arnalds
Snorri Páll Kjaran

OS ROD 7718
OS SFS 7702

Ágúst 1977

EFNISYFIRLIT

FORMÁLI OG ÁGRIP

1.	JARÐFRÆÐILEGT OG VATNAFRÆÐILEGT YFIRLIT	1
2.	MÆLINGAR OG ÚRVINNSLA	5
2.1	Rafleiðnimælingar.	5
2.2	Efnainnihald	7
2.3	Hita og þrýstingsmælingar	9
2.4	Afl vinnsluhola	13
2.5	Vatnsborósmælingar	15
2.6	Þrýstilækkun við vinnslu	18
3.	VINNSLUGETA JARÐHITASVÆÐIS.	20
4.	AFFALLSVATN.	29
5.	NIÐURSTÖÐUR OG ÁLYKTANIR.	33
6.	HEIMILDASKRÁ	35

FORMÁLI OG ÁGRIP.

Fyrir um það bil ári fól Jarðhitadeild Orkustofnunar Straumfræðistöðinni (Sfs) að kanna ýmiss atriði varðandi jarðhitasvæðið í Svartsengi. Helztu atriði voru þessi:

- 1) Aðstoða við mælingar á vinnsluholum og vinna úr þeim gögnum.
- 2) Kanna möguleika á útreikningum á vinnslugetu svæðis og þrýstilækkun við vinnslu.
- 3) Athuga afdrif affallsvatns frá svæðinu.

Borholumælingar hafa verið framkvæmdar af Jarðhitadeild Orkustofnunar. Auk fastra starfsmanna Straumfræðistöðvar hefur Sigurður St. Arnalds, Verkfræðistofunni Hönnun h.f. unnið að þessari rannsókn jarðhitasvæðisins.

Rannsóknin var hafin með því að hita- og þrýstimælingar á ótrufluðu ástandi jarðhitasvæðisins voru gerðar að beiðni Sfs. Hita og þrýstimælingar hafa verið gerðar af og til síðan, jafnframt hafa verið framkvæmdar vatnsborðsmælingar í hólum H-5. Jafnframt hafa holur H-4 og H-5 verið dæluprófaðar með köldu vatni. Vegna mikillar leiðni jarðhitasvæðisins og erfiðleika við túlkun mælinga, er köldu vatni er dælt á svo heita vatnsleiðara, sem hér um ræðir, gáfu dæluprófanir engar marktækar niðurstöður.

Úrvinnslu annarra gagna hefur verið hagað þannig, að gert hefur verið líkan af jarðhitasvæðinu, sem innifelur hita og þrýstiástand þess og ennfremur efna- og rennslisjafnvægi. Líkan þetta hefur síðan verið sett í samhengi við almennar jarðfræði- og vatnafræðiupplýsingar í því magni sem þær liggja fyrir. Líkanið sýnir sig að skýra ágætlega öll þau atriði sem fram að þessu hafa fundist á svæðinu, en er þó mjög einfalt að uppbyggingu. Gert er ráð fyrir að jarðhitavökvinn sé að $1/3$ gegnum rennslis og að $2/3$ hringrás. Með þrýstimælingum hefur fundist, að þrýstingur á jarðhitasvæðinu lækkar við vinnslu á þann hátt að áhrifa þess mun líklega gæta verulega á vinnsluna í framtíðinni. Rannsóknunum á þessu atriði er þó ekki lokið en mun verða haldið áfram. Leggja skal áherzlu á að senni-

lega mun þrýstilækkun svæðis við vinnslu verða það, sem takmarkar afl orkuvers í Svartsengi og er því brýnt að kanna þennan þátt nánar.

Við lausn þessa verkefnis hefur verið beitt ýmsum aðferðum, sem hafa ekki verið notaðar áður og því ekki náð að sanna gildi sitt. Ber að hafa þetta í huga við mat á niðurstöðum.

1. JARÐFRÆÐILEGT OG VATNAFRÆÐILEGT YFIRLIT

Við mat á jarðfræðilegum aðstæðum hefur verið stuðst við skýrslu /1/ eftir Stefán Arnórsson o.fl., og /2/ eftir Valgarð Stefánsson o.fl. Ennfremur er byggt á útskýringum jarðfræðinganna Freysteins Sigurðssonar og Ingvar B. Friðleifssonar að hluta.

Jarðhitasvæðið við Svartsengi er á hraunsléttu milli Þorbjarnarfells og Sýlingarfells, en samkvæmt jarðfræðikorti í /1/ eru fjöll þessi úr móbergi, mest bólstrabergi. Sprungusveimur liggur í gegnum Þorbjörn og virðist halda áfram gegnum jarðhitasvæðið og eru gígar síðan eftir ísöld á honum. Töluverð jarðhitamerki eru í fjöllumunum. Á hraunsléttunni er jarðhiti á litlum bletti á yfirborði og eru holur H-2 og H-3 boraðar þar. Nokkuð hundruð metrum suðvestur eru svo holur H-4 og H-5. Sjá mynd 1.0.

Í /1/ eru holur þessar svarfgræindar í fjóra flokka: Basalt, basalt-ríka breksíu, móbergsríka breksíu og móbergstúff. Greining þessi virðist byggjast á vaxandi glerinnihaldi svarfsins. Samkvæmt henni finnast heilleg hraun (basalt) niður á rúmlega 300 metra dýpi en vart eftir það. Túff finnast vart fyrir neðan 500 metra svo þar fyrir neðan er aðallega breksía, með mismunandi miklu glerinnihaldi. Enginn tilraun hefur verið gerð til að meta vatnsleiðni þessara jarðlaga svo séð verði í /1/, en gískað á að vatnsæðarnar séu að mestu bundnar við sprungur.

Þar sem móberg er á yfirborði er það venjulega með þeim einkennum að bólstraberg er mjög lekt, en túff aftur á móti tiltölulega þétt. Ef gert er ráð fyrir að jarðlögin fyrir neðan 500 metra innihaldi að miklu leyti bólstraberg eða bólstrabergsríkar myndanir, leiðir af því að jarðhitarennsli er að einhverju leyti uppávið takmarkað af túfflögum með minni vatnsleiðni.

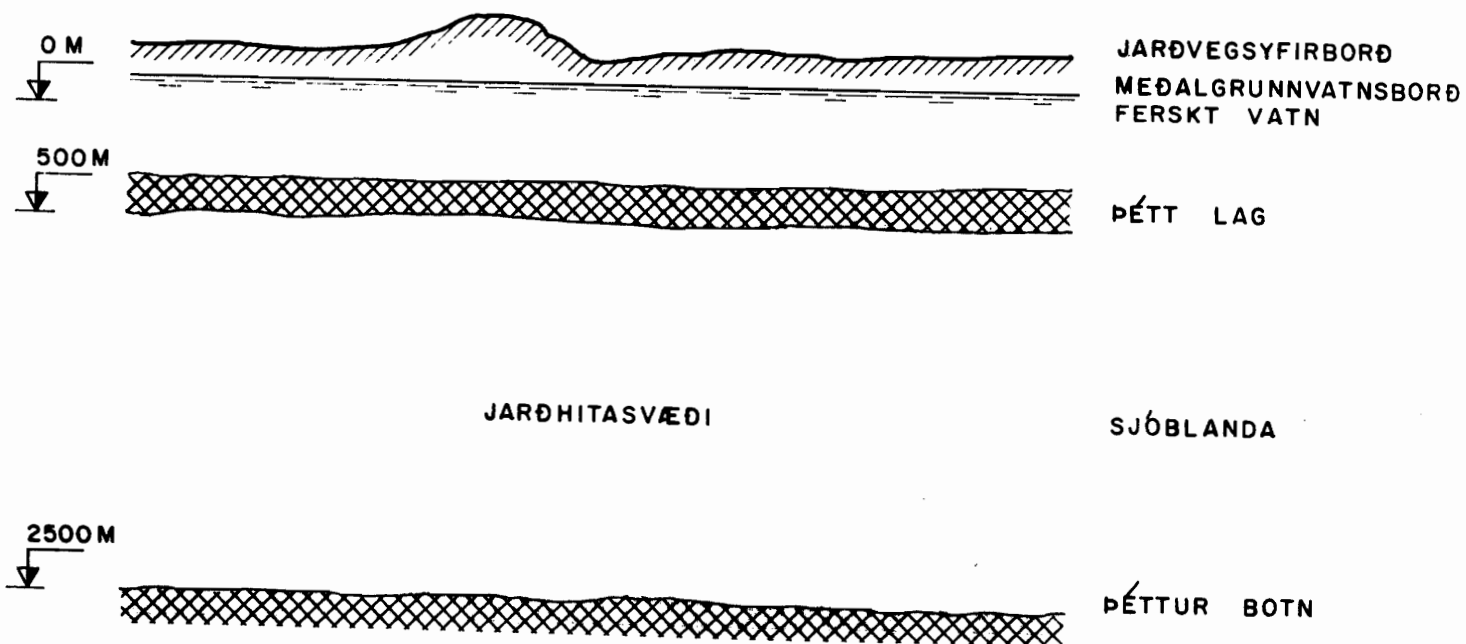
Öll þessi jarðmyndun er frá kvarter, en utan við hana mun vera miklu þéttara berg, sem hindrar, að sjórinn eigi greiðan aðgang að jarðhitasvæðinu í Svartsengi og e.t.v. Eldvarpa- og Reykjanessvæðunum líka. Ytri mörk

jarðhitasvæðisins munu hins vegar vera mikið nær og stafar það semni-
lega af sjálfþéttingu (self-sealing) jarðhitasvæðisins. Athuganir,
sem lýst verður hér á eftir, benda til að sjálft hitasvæðið sé vart
meira en rúmir tveir kílómetrar í þvermál, en þær athuganir hafa ekki
ennþá leitt í ljós hvar þau mörk eru.

Athuganir sem lýst er hér á eftir benda til að vatnsleiðni jarðhitasvæð-
isins sé $k \sim 10^{-5}$ m/sek sem er svipað of fínn sandur, lítið samþjappaður.
Vatnsleiðni bólstrabergs og basalts á yfirborði er allt að 1000 sinnum
meiri, en getur munurinn stafað af mikilli samþjöppun bergsins neðan við
500 metra dýpi. Sprungur þurfa ekki að hafa aðra þýðingu fyrir vatns-
leiðnina en þá að auka virkt þvermál þeirra hola sem lenda í þeim.

Ofan við 500 metra er rennslið uppávið takmarkað sem áður segir, en
þar eru greinilegir láréttir vatnsleiðarar, og koma þeir fram í holum
H-2 og H-3. Vatnið er alls staðar sjóblandað (um það bil 2/3 er sjór)
nema efst í hraunlögnum er þunnt lag af fersku vatni sem flýtur ofaná.

Að þessu athuguðu, er gert ráð fyrir, að jarðhitasvæðið líti úr eins og
mynd 1.1 sýnir. Þétti botninn kemur ekki fram í borunum, en hann er
lagður í yfirborði lags 3 á 2.5 km dýpi, samanber ritgerð Guðmundar
Pálmasonar /3/ og mynd 1.2 sem tekin er úr þeirri ritgerð.



MYND 1.1 SNIÐ Í JARÐHITASVÆÐI

Einkennandi fyrir vatnafræði Reykjanesskaga er að yfirborðsafrennsli er nær ekkert, samaber mynd 1.5 sem er tekin úr Íslensk Vötn eftir Sigurjón Rist /4/. Mynd 1.4 sýnir mismun úrkomu og uppgufunar, en hún er tekin úr ritgerð eftir Markús Einarsson veðurfræðing /5/. Líklegasta írennslis-svæðið (þ.e. niðurrennsli á rigningarvatni til dýpri jarðlaga) er svo sýnt innrammað á mynd 1.4.

Mynd 1.3 er tekin úr ritgerð Braga Árnasonar og sýnir hún tvívætnisinnihald úrkomu /6/. Ætla má samkvæmt mynd 1.3, að tvívætnisinnihald írennslisins sé um -56, en í /6/ er hinsvegar uppgæfið að tvívætnisinnihald jarðhitavökvans sé -24, sem svarar til að hann sé 57% sjór. Ef tvívætnisinnihald staðarúrkomu (-52) er notað fæst 54% sjór. Báðar þessar tölur eru lægri en efnagreiningar sýna (63%). Mismunurinn gæti verið til kominn vegna eimingar og víst er að slík áhrif hljóta að vera til staðar á jarðhitasvæðum þar sem gufumyndun er stöðug. Að þessu athuguðu verður að gera ráð fyrir, að jarðhitasvæðið einkennist af eftirtöldum þrem þáttum: Innrennsli, hringrás, frárennsli. Síðar verður sýnt hvernig hægt er að nota þessar forsendur til að áætla afköst svæðisins.

Ekki verður annað séð en önnur jarðhitasvæði á Reykjanesskaga séu með svipaða eiginleika, að minnsta kosti er svo um Reykjanes. Fæst þá eftirfarandi vatnafræðileg mynd af djúprennsli á Reykjanesskaga (mynd 1.6).

Fjöllin eru niðurrennslisvæði þar sem vatn getur leitað djúpt í jörð niður. Frá þessu írennslissvæði liggur grunnvatnsstraumur út eftir skaganum, í því magni sem vatnsgengd jarðlaganna gefur tilefni til. Á móti þessum grunnvatnsstraumi kemur svo saltvatnsinnrás frá sjónum, sem hefur greiðastan aðgang eftir hraunlögum frá nútíma, en ekki jafn greiðan aðgang að kvarteru mynduninni vegna þéttara bergs beggja vegna við og þéttari túfflaga ofaná og í mynduninni. Þar sem mikil upphitun er myndast háhitasvæði með konvektionshringrás og selta vatnsins eykst vegna eimingar.

Ekki er unnt að greina uppruna hitans á jarðhitasvæðunum eða afl upphitunarinnar. Ferskvatnsstraumurinn, sem áður er getið, blandast sjó og verður hér eftir reiknað með, að innrennsli jarðhitasvæðisins í Svartsengi sé 57% sjór. Frárennslið verður heldur saltara en innrennslið og töluvert ofar í jarðlögum. Því verður að ætla að frárennslisstraumur liggi frá Svartsengi suður og vestur frá jarðhitasvæðinu, á 500 metra dýpi og eitthvað þar fyrir ofan. Vinnsla mun eitthvað draga úr þessum frárennslisstraum og skapan nýjan nær yfirborði. Verður nánar fjallað um þetta síðar.

Til að skýra straumfræðilegt samhengi rennslisins út eftir Reykjanesi er mynd 1.7 teiknuð, en hún er hugsað snið gegnum Svartsengi og Reykjanesstá. Á myndinni er 140 metra hæð yfirsjó (hæð Kleifarvatns) tekin sem einkennandi fyrir þrýsting á niðurstreymi ferskvatns, eðlisþungi 1000 kg/m^3 . Slíkir niðurstreymisstaðir hafa fundist, t.d. Kaldársel. Einhver hluti vatnsins streymir á miklu dýpi út eftir Reykjanesskaga, en meðal hita- og þrýstiástand á skaganum er talið samsvara hitastigul 120°C/km . Þessi ferskvatnsstraumur blandast köldum jarðsjó frá efri jarðlögum, en niðurrennsli hans er að nokkru leyti hindrað af þéttum túfflögum á víð og dreif. Í punkti B er blöndunin orðin 60% sjór sem samsvarar því að meðalstraumhraði hafi aukist 2,5 sinnum. Hita og þrýstiástand í B er talið samsvara meðalprófíl. Á straumleiðinni þarf að ríkja straumfræðilegt jafnvægi og fæst það best með því að gera ráð fyrir vatnsleiðni jarðlaga sem samsvarar $k = 0,2 - 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/sek}$ og straumpunga $20 \text{ kg/km}^2/\text{sek}$. Stærðir þessar eru í samræmi við niðurstöðu rannsókna á jarðhitasvæðinu sjálfu eins og síðar verður sýnt.

K-77 400
K-77 400
K-77 400
K-77 400
K-77 400
K-77 400



HÆBARKÓTAR Á HEITAVATNSHOLUR

NAFN	GÓLFHÆÐ	VEGGHÆÐ
H-2	29.699	31.854
H-3	29.899	32.719
H-4	21.732	24.369
H-5	23.210	25.710

Mynd 1,0
1:2000

ORKUSTOFNUN
Straumfræðistöð

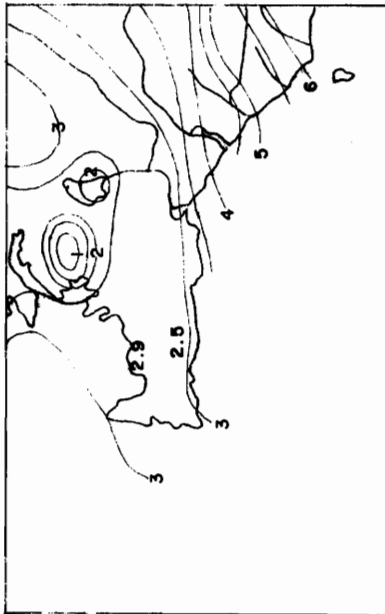
HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI
Staðsetning heitavathola í Svartsengi

77.08.17 SPK/AM/III
T 219
Svartsengi
F 16054



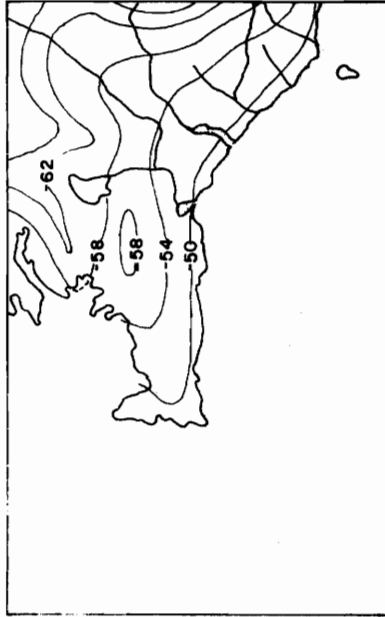
MYND 1.2

DÝPI 'A LAG 3,
KM UNDIR SJÁVARMÁLI



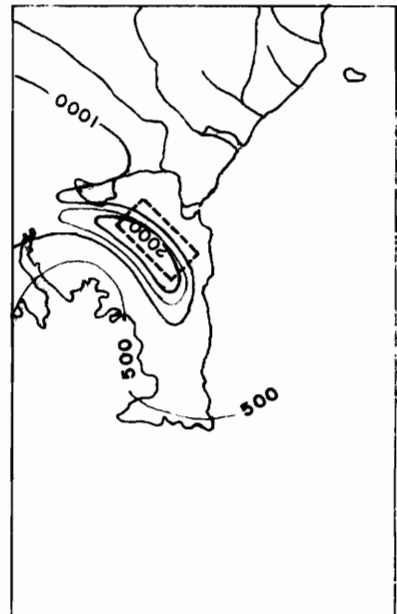
MYND 1.3

TVÍVETNISINNIHALD
ÚRKOMU



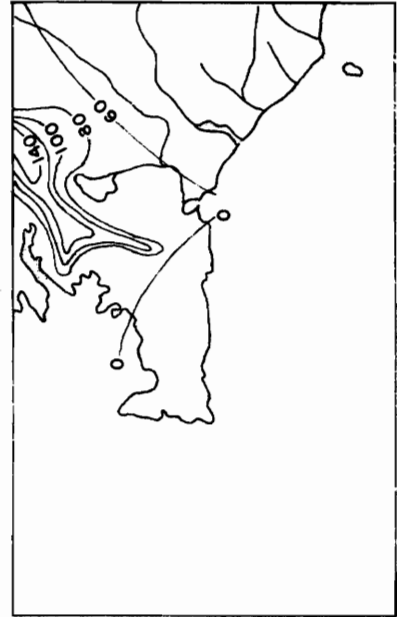
MYND 1.4

ÁRLEGT VATNSJAFNVÆGI MM
(ÚRKOMA - UPPGUFUN)



MYND 1.5

AFRENNISLISKORT
L/S/KM²











ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆÐISTÖÐ

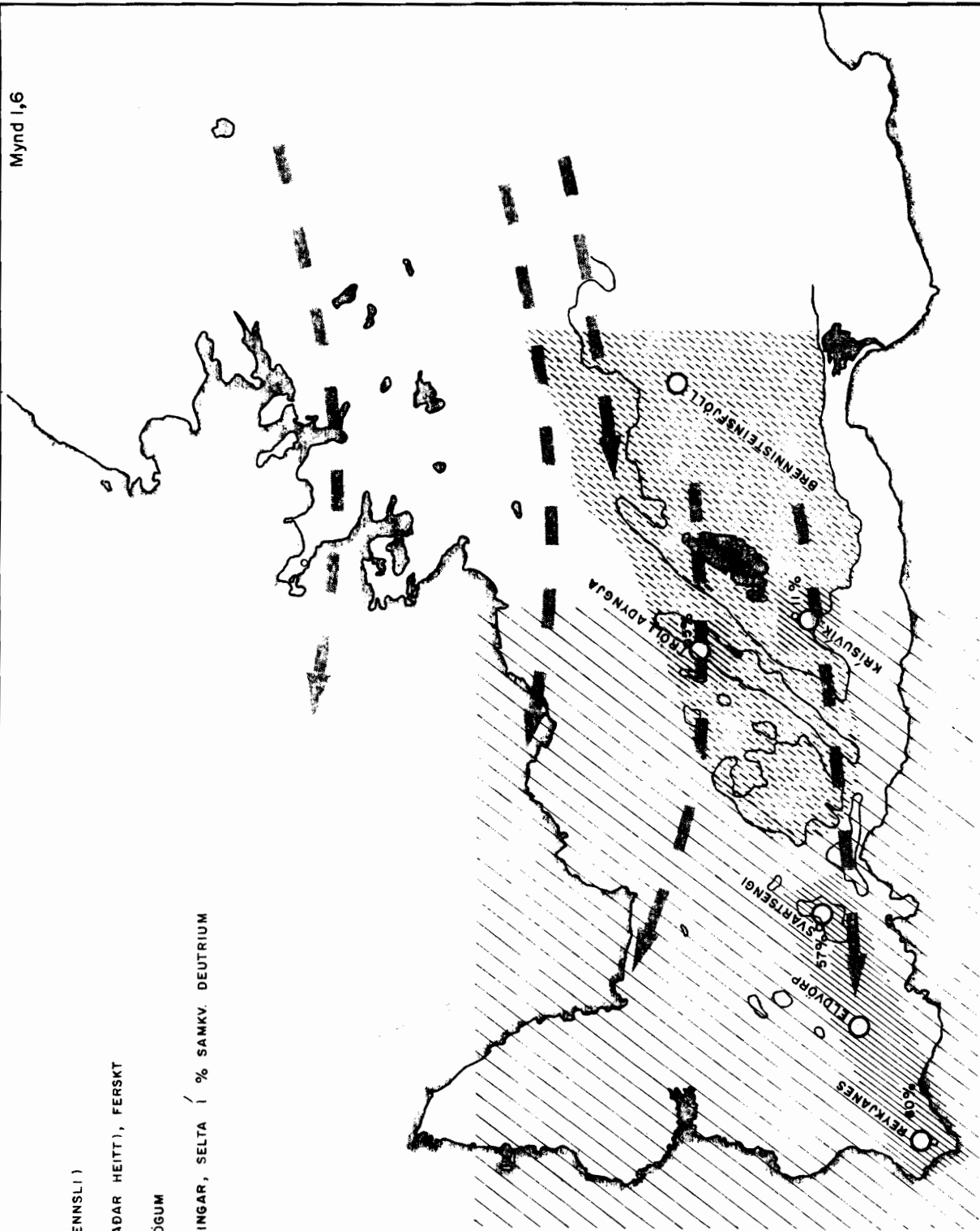
HITAVEITA SUÐURNESJA - SVARTSENGI
REYKJANES - YFIRLIT YFIR LÍKLEGA DJÚPVATNAFRÆÐI.

Júní '77 S.P.K./Kaðo
T-215
Svartse.
F 16050

Mynd 1,6

SKÝRINGAR :

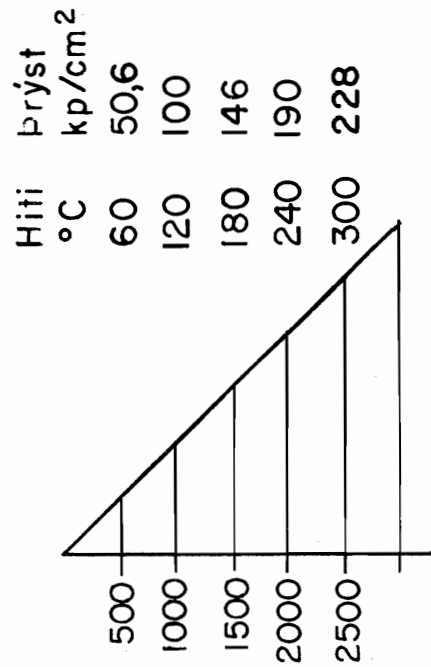
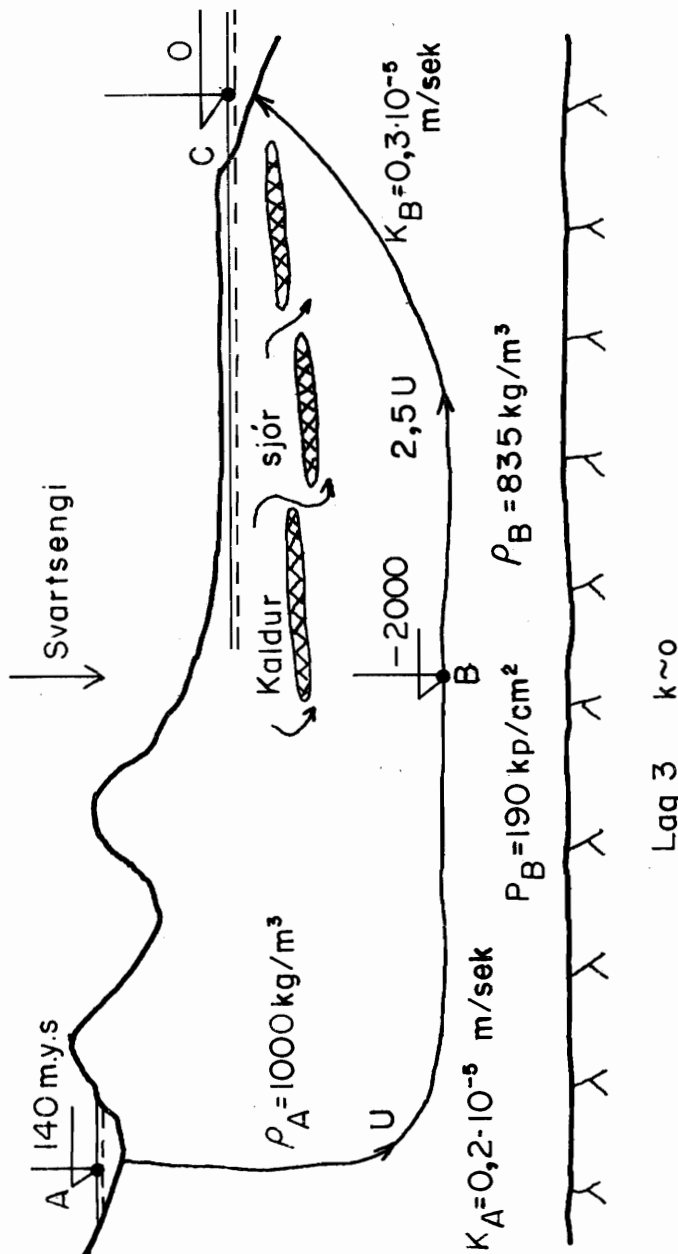
-  ÍRENNSLISSVÆÐI (NIDURRENNSLI)
-  DJÚPRENNSLI (EKKI ALLTADAR HEIT), FERSKT
-  SALTVA TNSTUNGA Í DJÚPLÖGUM
-  AUKIN SELTA VEGNA EIMINGAR, SELTA Í % SAMKV. DEUTRIUM
-  HÁHITI
-  MÓBERGSFJÖLL





HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI
Rennsli út eftir Reykjaneskaga

Mynd 1,7



Jafnvægisprófill
Reykjaneskaga

$L_{AB} = 25 \text{ km}$
 $L_{BC} = 15 \text{ km}$
 $U = 20 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s/m}^2$

2. MÆLINGAR OG ÚRVINNSLA

2.1 Rafleiðnimælingar

Rafleiðnimælingum er lýst í / 1/ og / 2/. Með túlkun á rafleiðnimælingum þessum, hefur verið reynt að finna mörk jarðhitans í Svartsengi og einnig hafa niðurstöður túlkunarinnar verið notaðar til viðmiðunar við holustaðsetningu. Er þá mest farið eftir svokölluðu djúpviðnámi en það er eðlisviðnám bergsins á mesta dýpi sem mælingin nær til. Mun vera álitíð að "heitur jarðsjór" hafi eðlisviðnám 1-5 ohmmetrar en "kaldur jarðsjór" eðlisviðnám 10-15 ohmmetrar.

Fyrstu rafleiðnimælingar voru framkvæmdar með riðstraumstækjum sumarið 1969, en gáfu ekki marktæka niðurstöðu. Um haustið var mælt með jafnstraumstækjum og fannst þá lágt viðnám sem benti á heitan jarðsjó. Þetta var svo nánar kannað með viðnámsmælingum sumarið 1971. Lágt viðnám fannst sunnan og norðan við Þorbjörn og var bent á borstaði í samræmi við þessa niðurstöðu. Af náttúruverndarástæðum var þó ekki borað í lægsta viðnámslagið, sem er rétt undir norðurhliðum Þorbjarnar heldur dálítið þar fyrir norðan (mynd 2.1), nánar tiltekið á þeim stað þar sem jarðhita verður vart á yfirborði. Boraðar voru holur H2 og H3, 240 og 400 metra djúpar og reyndist heitur jarðsjór í báðum.

1973 og 1974 voru síðan gerðar alls 40 viðnámsmælingar og eðlisviðnám á 300 metra dýpi reiknað á grundvelli þeirra (mynd 2.2). Viðnámsmörk virðast nokkuð glögg til austurs, en óglögg í aðrar áttir. Með hliðsjón af þessum mælingum voru holur H4 og H5 staðsettar innan 5 ohmmetra línunnar og þær síðan boraðar sumarið 1974. Athuganir á þeim benda til að heitur jarðsjór sé neðan við 300 metra dýpi (innrennsli er á ca 1000 metrum og þar fyrir neðan) en kalt þar fyrir ofan, (undir 50 gráðum). Báðar eru þessar holur óvenjulega vatnsgæfar af háhitaholum að vera.

Sumarið 1975 var viðnámsmælt við Eldvörp, en úrvinnslan látinn ná til gömlu mælinganna í Svartsengi, (/ 2/). Staðsetning mælinganna er sýnd á mynd 2.3. Á myndun 2.4 - 2.6 er sýnd úrvinnslan og gefur hún til kynna að eðlisviðnámið fari vaxandi með dýpi, á því svæði þar sem holur H4 og H5 eru. Nánar sést þetta á mynd 2.7, en samkvæmt henni nær lágviðnám aðeins niður í 200 metra (mælipunktur G-7 er rétt við holurnar) en viðnám þar fyrir neðan er hærra en ætlað hefur verið að heitur jarðsjór gefi. Dálitlu sunnar (punktur G-3 á mynd 2.3 og 2.5) virðist þetta hins vegar öfugt, hátt viðnám ofaná, en lágt niðri, á því svæði eru hins vegar engar boranir, sem hægt er að bera þessar túlkanir saman við.

Myndir 2.1 - 2.8 eru teknar úr / 1/ og / 2/ svo til óbreyttar. Þess skal að lokum getið að samkvæmt þessari túlkun, eru holur H4 og H5 staðsettar utan við hið eiginlega jarðhitasvæði. Ennfremur verður ekki séð að viðnámsmælingarnar gefi áreiðanlegar upplýsingar um mörk jarðhitasvæðisins, né eðlisviðnám þess bergs sem vatnið kemur úr. Til þess eru viðnámsmælingarnar of grunnar og túlkunin ótrygg.

2.2 Efnainnihald

Upplýsingar um efnainnihald jarðhitavökvans er að finna í / 1/. Allmörg efnasýni hafa verið tekin síðan, en úr þeim hefur ekki verið unnið svo nauðsynlegt verður að bera saman nýju niðurstöðurnar og þær, sem hér eru notaðar jafnskjótt og tækifæri gefst.

Eins og þegar hefur komið fram er jarðhitavökvinn sjóblanda og er blöndunarhlutfallið nálægt 2/3 hlutar sjór. Þar sem eðlisþungi jarðhitavökvans skiptir verulegu máli fyrir hegðun jarðhitasvæðisins hefur verið unnið úr öllum efnagreiningum með tilliti til eðlisþungans. Niðurstöðurnar eru í töflu 2.2.1 og er þar reiknað út blöndunarhlutfall sjávar í jarðhitavökvanum. Til þessa hefur klórmagn sýnanna verið notað og er miðað við að klórinnihald 19000 ppm sé hreinn sjór. Klórinnihald einstakra sýna fæst með því að margfalda viðkomandi tölur í töflu 2.2.1 með 19000.

Meðalsjóblandun í grunnu holunum (H-2 og H-3) sýnir sig að vera 0.66 (66%), en 0.63 í þeim dýpri. Þessi mismunur gæti stafað af eimingu, þ.e. jarðhitavökvinn streymir upp, einhver gufa soðnar úr vökvanum og sleppur út, þegar nægilega hátt er komið og afgangurinn streymir burtu og niður aftur. Þetta þarf hinsvegar ekki að vera, því að mismunurinn á tölunum er það lítill, að hann er ekki meiri en staðalfrávik mælinga í einni og sömu holu. Staðalfrávikid sem slíkt er eðlilegt, þar sem ekki er við því að búast að konvektionsstraumur á háhitasvæðum sé fyllilega stöðugur (sjá / 7/). Til að átta sig fyllilega á innri vatnafræði jarðhitasvæðisins þarf því að fylgjast vel með öllum breytingum á efnainnihaldi í einstökum holum.

Samkvæmt þessari túlkun er eðlismassi uppstreymisins líka ákvarðanlegur. Eðlismassi vatns er 812 kg/m^3 við þrýsting 50 bar og 242°C (áætlaður meðalhiti uppstreymisins sjá 2.3) 63% sjóblanda er 1.0164 sinnum þyngrri en það. Því fæst:

$$\rho = 1.0164 \cdot 812 = 825 \text{ kg/m}^3$$

TAFLA 2.2.1

Klórماغn í borholum í Svartsengi. Styrkur er í hlutföllum af hreinum sjó.

Dagsetning	Hola 2	Hola 3	Hola 4	Hola 5
73-04-26	0,65	0,67	-	-
73-04-27	0,67	0,68	-	-
73-11-05	-	0,70	-	-
74-01-06	-	0,63	-	-
74-02-06	-	0,64	-	-
74-02-14	-	0,65	-	-
74-03-14	-	0,66	-	-
74-04-03	-	0,65	-	-
74-07-08	-	0,62	0,61	-
74-07-09	-	-	0,61	-
74-07-10	-	-	0,64	-
74-07-12	-	-	0,64	-
74-07-16	-	-	0,65	0,60
74-07-22	-	0,66	0,66	-
74-07-25	-	-	0,61	-
Meðaltal	0,66	0,66	0,63	0,60
Staðalfrávik	-	0,06	0,05	-
Staðalfrávik meðaltals	-	0,02	0,02	-

2.3 Hita og þrýstimælingar

Veigamestu upplýsingarnar um jarðhitasvæði fást með hita og þrýstimælingum. Öll vatnsskifti á svæðinu hafa áhrif á hita- og þrýstiástand þess, þar með talin vinnsla.

Hita og þrýsting er eingöngu hægt að mæla í borholum. Í borholum ríkir jafnvægi milli þrýstings, eðlisþyngdar vökvans, dýpis og straumhraða ef einhver er. Ennfremur ríkir jafnvægi milli hitastigs, upphitunar á holuveggjum (eða kælingar) og straummagns. Allar holurnar eru fóðraðar og vatnið í þeim ekki í sambandi við bergið umhverfis, nema þar sem raufar eru í fóðringunni. Af þessum orsökum er ekki hægt að ganga út frá því gefnu að hita- og þrýstiástand mælt í holu sé það sama og hita- og þrýstiástand bergs á viðkomandi dýpi.

Fræðilega séð verður hitastraumur í borholu, ef hitamunur efst og neðst er nokkrir tugir gráða. Búast má því við, að slíkir straumar séu til staðar í öllum borholum í einhverjum mæli. Þessir straumar eru venjulega ekki stöðugir, en drifkraftur þeirra er í öllum tilfellum upphitun neðan frá og kæling ofan frá. Algengasti munur á hitastigi holu og bergs mun því vera að bergið sé heitara en vatnið í holunni neðst, en kaldara efst.

Á þeim stöðum þar sem holuvatnið er í snertingu við æðar ríkir rennslisjafnvægi. Vegna línulegs sambands þrýstibreytinga og straumhraða í berginu þegar straumhraði er lítill, þýðir þetta að þegar ekkert rennur inn í holuna, er meðalþrýstingur á vatnsæðunum sá sami og í holunni. Í því ástandi er ennfremur jafnvægi milli þrýstings á hverju dýpi og þyngd þeirrar vökvásúlu sem ofan á liggur, burtséð frá hugsanlegu þrýstitapi í rennsli milli æða.

Í upphafi þessarar rannsóknar var beðið um hita og þrýstimælingu í öllum holum, og var hún framkvæmd áður en vinnsla hófst. Til þessarar mælingar verður hér eftir vitnað sem hins "ótruflaða ástands". Hugtak sem hefur

dálítið loðna merkingu, því að á flestum jarðhitasvæðum er hita og þrýsti-
ástand væntanlega ekki stöðugt heldur lítillega flöktandi. Gefur þá
auga leið að þegar verið er að túlka breytingar á hita og þrýstiástandi
frá hinu ótruflaða ástandi getur flökkið blandast saman við.

Gerð verður nú grein fyrir hita og þrýstimælingum í ljósi ofanritaðs.
Hita og þrýstingsferlar eru sýndir á myndum 2.9 - 2.13.

Hiti í holu H-1 er tiltölullega jafn, um 40°C niður á botn. Holan er heldur
heitari efst, og þar er hún enn fremur mjög sölt (um 80% sjór), rétt
þar fyrir neðan er hún heldur kaldari en um 50 stig í botninn (250 metra
dýpi). Einhver kæling er sýnileg á 50 metra dýpi, en þrátt fyrir það
er hitinn hærri sem svarar til áðurgreinds jafnvægisástands (mynd 1.7),
en það verður að telja eðlilegt vegna nágrennis við jarðhitasvæðið.
Þrýstingurinn er mjög jafn, núll í sjávarborði en svarar að öðru leiti
til eðlisþyngdar 1015 kg/m³ sem er heldur herra en reikningslegt gildi
(40 stiga 60% sjóblanda hefur eðlisþyngd 1008 kg/m³)

Hola H-2 (240 metra djúp) sýður næstum niður í botn, og stendur undir
þrýstingi. Vatnshalli á þrýstilínu finnst aðeins neðst í holunni.
Þrýstingur þar er 16.8 kg/cm² og vatnshalli svarandi til þrýstinúllpunkts
5 metra undir sjó. Eðlisþyngdin reiknast of lítil miðað við efnainnihald
og hita, enda aðeins um tvo punkta að ræða og holan auk þess á suðu.
Botnhitinn er 198 stig. Töluvert gufu uppstreymi er umhverfis þessa
holu og holu H-3.

Hola H-3 er einnig í suðu niður á botn, botnhitinn er um 225 stig. Þrýst-
ingur á 360 metra dýpi er 30.3 kp/cm², áætlaður þrýstihalli svarar til
núllpunkts á 20 metra dýpi sem gefur eðlisþyngd 891 kg/m³, sem er aðeins
meira en reikningslegt gildi (881). Hola þessi hefur nú verið tekin
í notkun. Hún var þrýstimæld áður og sýndi þrýstingur sig að hafa lækkað
um 0.4 kp/cm² (4 metra vatnssúlu). Svaraði þetta vel til þeirrar vatns-
borðslækkunar sem mælt hafði í holu H-5 á sama tíma, og er til komin
vegna vinnslu úr holu H-4.

Hola H-4 hefur mest verið notuð til vinnslu. Holan er með steyptri fódoringu niður á 350 metra, en laus fódoring eftir það, götuð fyrir neðan 1000 metra. Hitamælingar á tímabilinu þegar holan var að hitna eftir borun sýna innrennsli milli 1000 og 1200 metra og þar mun sterkasta æðin vera, en einnig eru æðar neðar. Holan er 50-70 stig efst, en 240 stig neðan við 600 metra. Hitaferillinn bendir til töluverðar kælingar fyrir ofan 200 metra svo ótruflað hitaástand þar gæti verið svipað og í H-1.

Þrýstingur mælist mjög jafnbreytilegur í steypstu fódoringunni og neðan við hana. Þessi þrýstingsbreyting er hins vegar um 3% hærri en reikningsleg eðlisþyngd, munurinn er heldur minni í steypstu fódoringunni, en heldur meiri þar fyrir neðan.

Reynslan úr hinum holunum bendir til að þrýstimælingin geti mælt eðlisþyngd innan $\pm 1\%$ við þau skilyrði sem ríkja í H-4. Hinn mældi munur er of mikill til að hann sé skýranlegur með rennsli milli æða.

Hvað varðar þrýstiástand í berginu, þá er það eðlilegt að köld hola (rétt eftir borun) sé með hærri þrýsting á botni en lægri efst en bergið, þannig að rennslið sé inní holuna efst en út úr henni neðst. Þegar holan hitnar hækkar vatnsborðið og þrýstihallinn minnkar vegna minnkandi eðlisþyngdar við upphitunina. Fullheit verður því holan með minni þrýstihalla en svarar til bergsins, svo framarlega sem holan stendur á uppstreymissvæði og mismunurinn á þrýstihallanum í berginu og þrýstihallanum í holunni er þrýstitapið í uppstreyminu. Því hefur þessi munur á mældri og reiknaðri eðlisþyngd verið skýrður á eftirfarandi hátt.

Holan stendur á uppstreymissvæði. Mjög hægur uppstraumur af 240 stiga vatni er í holunni, og innstraumurinn ber með sér uppleyst efni og eitt-hvað af smákornum. Eitthvað af kornunum helst svífandi í holunni vegna uppstreymis og innri konvektionsstrauma. Vatnið í holunni smáþyngist og rennslið milli æða stöðvast að mestu við það að holan tekur á sig þrýstiástand bergsins. Því hefur sú ályktun verið dregin að þrýstingur í berginu umhverfis H-4 sé sá sami og í holunni neðan við steypstu fódoringuna. Hin mældi eðlisþyngd er 855 kg/m^3 neðan við 600 metra, þar af er ályktað að þrýstifall í uppstreyminu sé 85.5 kp/cm^2 á km.

Holan var þrýstimæld í blæstri 21.4 1977. Þrýstingur á 600 metra dýpi hafði þá lækkað um 2 kp/cm^2 . Ekki hefur fyllilega komið í ljós ennþá að hvað miklu leyti hér er um þrýstilækkun á svæðinu að ræða, og að hve miklu leyti rennslistap í holunni.

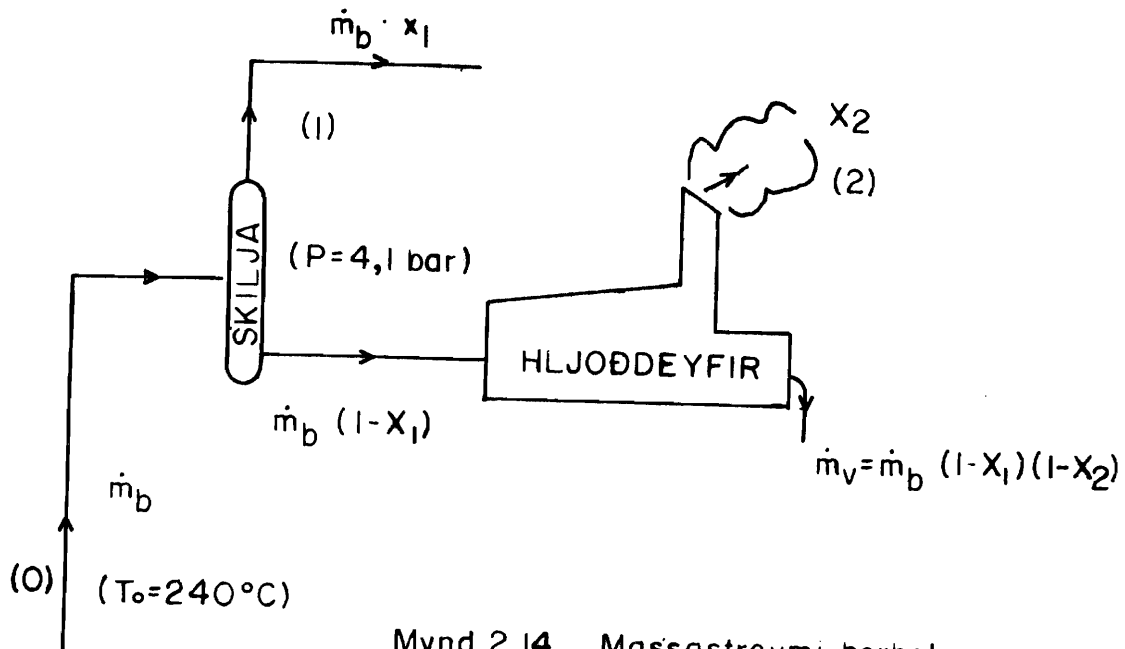
Í holu H-5 er hita og þrýstiástand sem því næst eins og í H-4. Eðlisþyngd er sem því næst sú sama, en þrýstingur efst heldur meiri en í holu H-4 en heldur minni neðst. Munurinn er þó vart mæktækur.

H-5 var hitamæld 19.4 1977 og hafði þá hitnað um 5 stig. Orsakir þess hefur ekki tekist að finna. Vaknaði þá grunur um að þrýstiástandið hefði breytt sér og var þrýstimælt aftur 28.6 sl. og kom þá í ljós að þrýstingur á 1000 metra dýpi hafði lækkað um 2.2 kp/cm^2 .

Þessar síðasttöldu mælingar og e.t.v. einhverjar fleiri þarf að athuga betur með tilliti til þrýstilækkunar við vinnslu. Vegna þess að telja má líklegt að sú þrýstilækkun verði takmarkandi á afl orkuvers.

2.4 Afl vinnsluhola

Massastreymi holu H-4 í Svartsengi hefur verið mælt með V-yfirfalli. Mynd 2.14 sýnir í grófum dráttum útreikning á massastreymi.



Mynd 2.14 Massastreymi borholu

\dot{m}_b er massastreymi borholu, og \dot{m}_v er mælt massastreymi í V-yfirfalli. X_1 og X_2 eru gufuhlutföll í suðu 1 og 2. Hitastig borholu er 240°C og skiljubrýstingur er 4,1 bar abs. Ef h táknar enthalpíu og r uppgufunarmátt er ráð fyrir ísenthalpísku rennsli

$$\begin{aligned}
 (1-x_1) &= 1 - \frac{h_0-h_1}{r_1} = 1 - \frac{247,7 - 144,5}{509,5} \\
 &= 1 - 0,20255 = 0,7974 \qquad (2.4.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1-x_2) &= 1 - \frac{h_1-h_2}{r_2} = 1 - \frac{144,4 - 99,12}{539,4} \\
 &= 1 - 0,0841 = 0,9158 \qquad (2.4.2)
 \end{aligned}$$

p.e.a.s.

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_v}{0,9158 \cdot 0,7974} = \frac{\dot{m}_v}{0,73025} \quad (2.4.3)$$

Ef suða á sér ekki stað í skilju heldur er öllu rennsli hleypt í hljóðdeyfi fæst:

$$\begin{aligned} \dot{m}_v &= \dot{m}_b (1-x) = \dot{m}_r \left(1 - \frac{h_o - h_2}{r_2}\right) \\ &= \dot{m}_b \left(1 - \frac{247,7 - 99,12}{539,4}\right) = \dot{m}_b \cdot 0,7245 \end{aligned} \quad (2.4.4)$$

p.e.a.s.

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_v}{0,7245} \quad (2.4.5)$$

Sést af þessu að litlu munar hvort tilfellið er. Við höfum því notað fyrir massastreymið:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_v}{0,73} \quad (2.4.6)$$

Mynd 2.15 sýnir massastreymi borholu H-4 sem fall að hæð yfirfalls. Samtímis mælingu á massastreymi var mældur holutoppsþrýstingur. Mynd 2.16 sýnir samband holutoppsþrýstings og massastreymis. Á sömu mynd eru sýndir vinnsluferlar holu H-2, H-3, og H-4 sem birtir eru í skýrslu jarðhitadeildar frá 1975 /1/. Þær mælingar byggjast á kritisku rennsli, sjá /8/. Eins og sjá má virðist afl holu H-4 hafa dalað verulega. Það getur ekki stafað af þrýstilækkun í vatnsgeymi, sem er aðeins um 2 kp/cm^2 og verður því að leita annarra skýringa. Í holu H-4 hefur myndast kalktappi vegna kalkútfellinga og veldur hann meiri þrýstilækkun en áður og er því sennilega skýringin á aflminnkun holu H-4. Rétt væri því að aflmæla holu H-4 aftur með því að mæla bæði massastreymi og kritiskan þrýsting eftir að holan hefur verið boruð út og kalktappinn fjarlægður. Mynd 2.17 sýnir hvernig holutoppsþrýstingur fellur eftir því sem kalktappinn stækkar og veldur meiri þrýstifalli en áður.

2.5 Vatnsborðsmælingar

Hinn 14.10.1976 var komið fyrir síritandi vatnsborðsmæli á holu H-5. Þegar vinnsla hófst í holu H-4 í 240 m fjarlægð kom fljótt í ljós að niðurdráttur í H-5 fylgdi venjulegum reglum grunnvatnsfræðinnar. Vatnsborðsstaðan reyndist næm fyrir loftþyngdarbreytingum, sem bendir á lokaðan vatnsleiðara. Er fylgnin fundin $BE = 0,75$ (barometric efficiency).

Á mynd 2.18 er niðurdrátturinn sýndur fyrstu 175 dagana, eða fram í miðjan apríl. Vinnsla er óregluleg fyrst, en síðan stöðug burtséð frá, að vinnslan var tvisvar hækkuð til prófunar, eins og fram kemur á myndinni.

Niðurdráttur í prófunum er sýndur sérstaklega á mynd 2.19.

Á mynd 2.20 er sýnd úrvinnsla á þessum prófunum. Kemur fram að leiðni (transmissivity) og geymslustuðull er

$$T = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sek} \qquad S = 1,2 \cdot 10^{-2}$$

miðað við 2000 m djúpann vatnsleiðara gefur T

$$k = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/sek} \quad \underline{\sim} 1 \text{ darcy}$$

sem er 2-3 sinnum hærra en það sem áætlað var fyrir innrennslið.

Hér er greinilega um mikla vatnsleiðni að ræða. Transmissivity umreiknað í ef til vill þekktari einingar gefur $T = 1037 \text{ m}^2/\text{dag}$. Leiðnin í jarðhitageyminum í Svartsengi er einnig meiri en þekkt á flestum öðrum jarðhitasvæðum, sjá töflu (2.5.1)

Vatnsborðsmælingin og prófanirnar sýna að holurnar eru staðsettar á mjög vel leiðandi jarðhitasvæði. Áframhaldandi úrvinnsla með aðferð Theis hefur sýnt að "þéttar" randir eru skammt undan, en nánari ákvörðun er erfið þar sem hér er aðeins um einn sírita að ræða. Úrvinnslan benti þó ótvírætt á rennu sem væri um 2 km á breidd, lokuð a.m.k. í annan endann eða báða. Samkvæmt almennri reynslu, má búast við, að þetta þýði, að jarðhitasvæðið sé í lokaðri bergmyndun umlukt af þéttara bergi.

Geymslustuðull var eins og fyrr greinir $S = 0,012$. Hann má einnig reikna út frá loftþyngdarsvöruninni (barometer efficiency) eftir jöfnunni

$$S_{BE} = \frac{n \gamma D}{K \cdot BE} \quad (2.5.1)$$

þar sem n er porositet, γ er margfeldi af eðlismassa og þyngdarhröðun, D er þykkt vatnsleiðara, K er fjaðurstuðull vatns og BE er loftþyngdarsvörunin. Ef sett er inn $n = 0,10$, $\gamma = 9,81 \times 825 \text{ kg/s}^2 \text{ m}^2$
 $D = 2000 \text{ m}$, $K = 0,9 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ og $BE = 0,75$.

$$S_{BE} = \frac{0,10 \cdot 9,81 \cdot 825 \cdot 2000}{0,9 \cdot 10^9 \cdot 0,75} = 2,4 \cdot 10^{-3}$$

Geymslustuðullinn er því fimm sinnum minni reiknaður út frá loftþyngdarsvörun. Nokkur óvissa er með porositet en varla fimmföld. Loftþyngdaráhrifin ná yfir mjög stórt svæði en ákvörðunin á geymslustuðlinum út frá þrýstibreytingum í holu H-4 er staðbundin. Líklegt má því teljast, að geymslustuðullinn reiknaður út frá loftþyngd sé einkennandi fyrir stærra svæði, en hinn sé staðbundið gildi á sjálfu jarðhitasvæðinu.

Síðan í apríl hafa vatnsborðsmælingar truflast nokkuð. 16.05.1977 kom jarðskjálfti sem olli nokkrum vatnsborðsbreytingum sem ef til vill jafna sig aftur. Í byrjun júní var vinnslunni skipt yfir á holu H-3 og H-4 stöðvuð. Ennfremur hafa nýlegar þrýstimælingar leitt í ljós að þrýstilækkun í H-5 er meiri en vatnsborðsmælingin gefur tilefni til. Skapar þetta nokkra óvissu um langtíma þróun á svæðinu og verður fjallað um það sérstaklega.

Að lokum skal tekið fram að fyrst framanaf mældust sérkennilegar u.þ.b. 60 cm vatnsborðssveiflur í H-5. Þessar sveiflur dóu út að þremur mánuðum liðnum. Jafnframt hefur komið fram að holan hefur hitnað á athugunartímabilinu. Áreiðanlegar skýringar á þessu atriði eru ekki fundnar.

TAFLA 2.5.1

Permeabilitetsstuðull í mismunandi jarðhitageymum.

Jarðhitageymir	Permeabilitetsstuðull	Ath
	$\frac{m^2}{m}$ millidarcy	
Broadlands	$1 \cdot 10^{-15}$ 1	meðal lóðrétt leiðni
	$1 \cdot 10^{-13}$ 100	miðsvæðis
Lardarello	$1 \cdot 10^{-14}$ 10	"
Olkaria	$1,3 \cdot 10^{-14}$ 13	lóðrétt leiðni
	$1,9 \cdot 10^{-14}$ 19	lárétt leiðni
Wairakei	$1 \cdot 10^{-14}$ 10	lóðrétt leiðni
	$1 \cdot 10^{-13}$ 100	lárétt leiðni
Svartsengi	10^{-12} 1000	lárétt leiðni

Hluti töflunnar er tekinn úr /9/.

2.6 Þrýstilækkun með vinnslu

Við vinnslu verður þrýstilækkun á jarðhitasvæðum sem í aðalatriðum virkar þannig að suðan færist neðar í holunum. Ef suðan nær niður á vatnsæðar tregast innrennsli í holurnar mjög vegna þess að bergið leiðir ekki vatns-gufublöndu jafnvel og hreint vatn. Auk þess myndast að öllum líkindum útfellingar í æðunum sem þetta þær smám saman.

Það erfiðasta í rannsókn háhitasvæða, en jafnframt eitt það mikilvægasta er jafnan að spá fyrir um þrýstilækkun með vinnslu. Til þess þarf allgott vatnafræðilegt líkan af svæðinu. Í upphafi var tekist á við þetta verkefni á grundvelli vatnsborðsmælinga og tókst að finna aðferð til að endurskapa niðurdráttarferil H-5 allnákvæmlega með útreikningum.

Stærsti óvissuliðurinn í þessháttar reikningum eru ytri mörk jarðhitasvæðisins, þ.e. þéttar eða illa leiðandi jarðmyndanir umhverfis svæðið. Þar sem slík mörk eru nálægt vinnsluholum takmarkast aðrennsli til þeirra og jarðhitasvæðisins alls. Sú þrýstilækkun, sem jarðhitinn sjálfur skapar í uppstreymisstróknum vegna hitunar upp fyrir jafnvægisástand (sjá mynd 4.2), getur líka virkað takmarkandi á innrennsli, en sá þáttur hefur ekki verið fræðilega rannsakaður. Þetta má hinsvegar hugsa sér á þann einfalda hátt, að ef innrennsli til svæðisins er 200 kg/sek í dag og umrædd þrýstilækkun 16 kp/cm², þá kosti það aðra eins þrýstilækkun að tvöfalda innrennslið. Einföld líkangerð af þessu tagi gefur oft nothæfar niðurstöður, en er óframkvæmanleg svo mark sé á takandi nema á grundvelli mælinga.

Af þrýstimælingum sem lýst er í kafla 2.3 má ráða, að þrýstingur á svæðinu hefur lækkað um u.þ.b. 2 kp/cm² við 30 kg/sek vinnslu í um 200 daga. Þetta er mikil lækking fyrir vinnslu sem ekki er nema brot af því sem koma skal. Öll línuleg framlenging á þessari tölumíða við t.d. 25 ára vinnslu og raunhæfar vinnslutölur er út í bláinn.

Venjuleg hegðun grunnvatnssvæða er sú, að þrýstingur lækkar hratt í byrjun vinnslunnar en síðan hægar og stöðvast jafnvel alveg vegna þess að svæðið dregur til sín vatn (leki). Núverandi niðurstöður benda hins vegar ekki til neins annars en tæmingar á svæði sem er 4-6 km² að flatarmáli. Þessa niðurstöðu verður að túlka á þann hátt, að aukið innrennsli til jarðhitasvæðisins sé enn ekki farið að sýna sig í þrýstimælingum.

Frá úrvinnslu á þrýstimælingum og vatnsborðsmælingum liggja þegar fyrir ýmis líkön, sem virðast gefa raunhæfa mynd af þrýstibreytingum á svæðinu, og gætu orðið nothæf til að reikna þrýstibreytingar vegna væntanlegrar vinnslu. Forsenda þess að þetta takist er sú, að takast megi að lesa breytingar á þrýstiástandi í djúplögum úr þeim vatnsborðsmælingum sem farið hafa fram. Orsakir til að þetta hefur ekki tekist ennþá eru eftirfarandi:

Þrýstitruflun sem varð á svæðinu vegna jarðskjálfta og ef til vill hefur ekki jafnað sig ennþá.

Hitastigshækkun í H-5 sem orsakaði að þrýstilækkun kom ekki fram í vatnsborðsbreytingu (breytt eðlisþyngd vatnssúlu).

Vinnsla var færð frá H-4 í H-3 og tilheyrandi vatnsborðsbreytingar í H-5 hafa ekki jafnað sig ennþá.

Áfram verður unnið að þessum atriðum og niðurstöður birtar jafnskjótt og kostur er. Lögð er áhersla á mikilvægi þessara athugana í ljósi þess, að þrýstilækkun svæðis við vinnslu virðist vera takmarkandi á afl orkuvers.

Athugun sú á þrýstilækkun svæðisins, sem að framan er lýst, er gerð við 30 kg/s vinnslu úr holu H-4. Telja má, að mun áreiðanlegri niðurstöður um þrýstilækkun á svæðinu og afl orkuvers fengjust, ef tilraun væri gerð með verulega meiri vinnslu úr djúpholum.

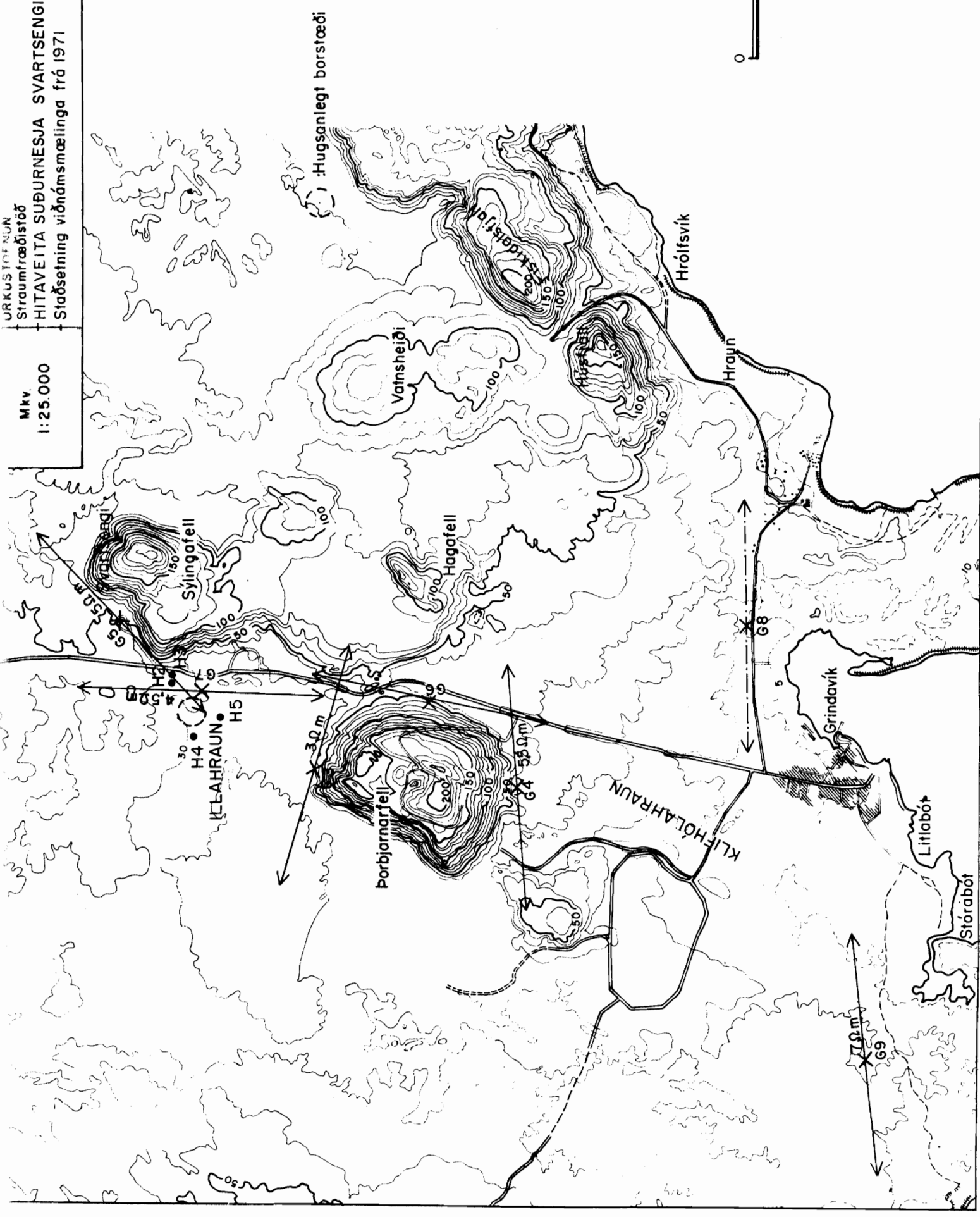
Að lokum er einning vert að vekja athygli á, að sú þrýstilækkun, sem verður við vinnslu, getur valdið töluverðu landsigi, því að hér er um miklar þrýstibreytingar að ræða.

15.7.69 J.J./Gy80
Tnr. 8 Tnr 764
J-Grindavík J-Viðn.
Fnr. 10256

URKUSTOFNUN
Straumfræðistöð
HITAVEITA SUBURNESJA SVARTSENGI
Staðsetning viðnámsmælinga frá 1971

Mkv.
1:25.000

Mynd 2.1

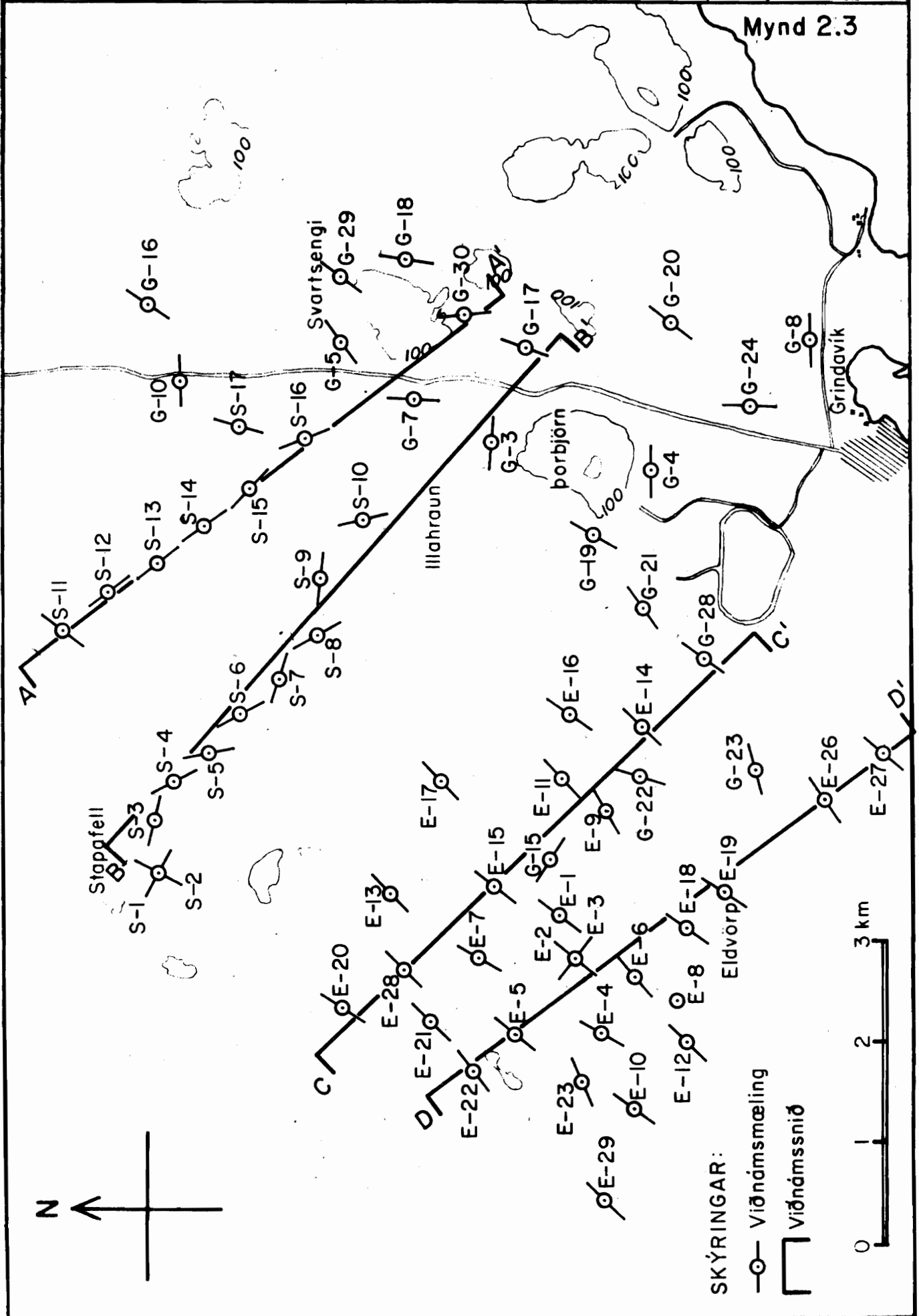


Hugsanlegt borstaði

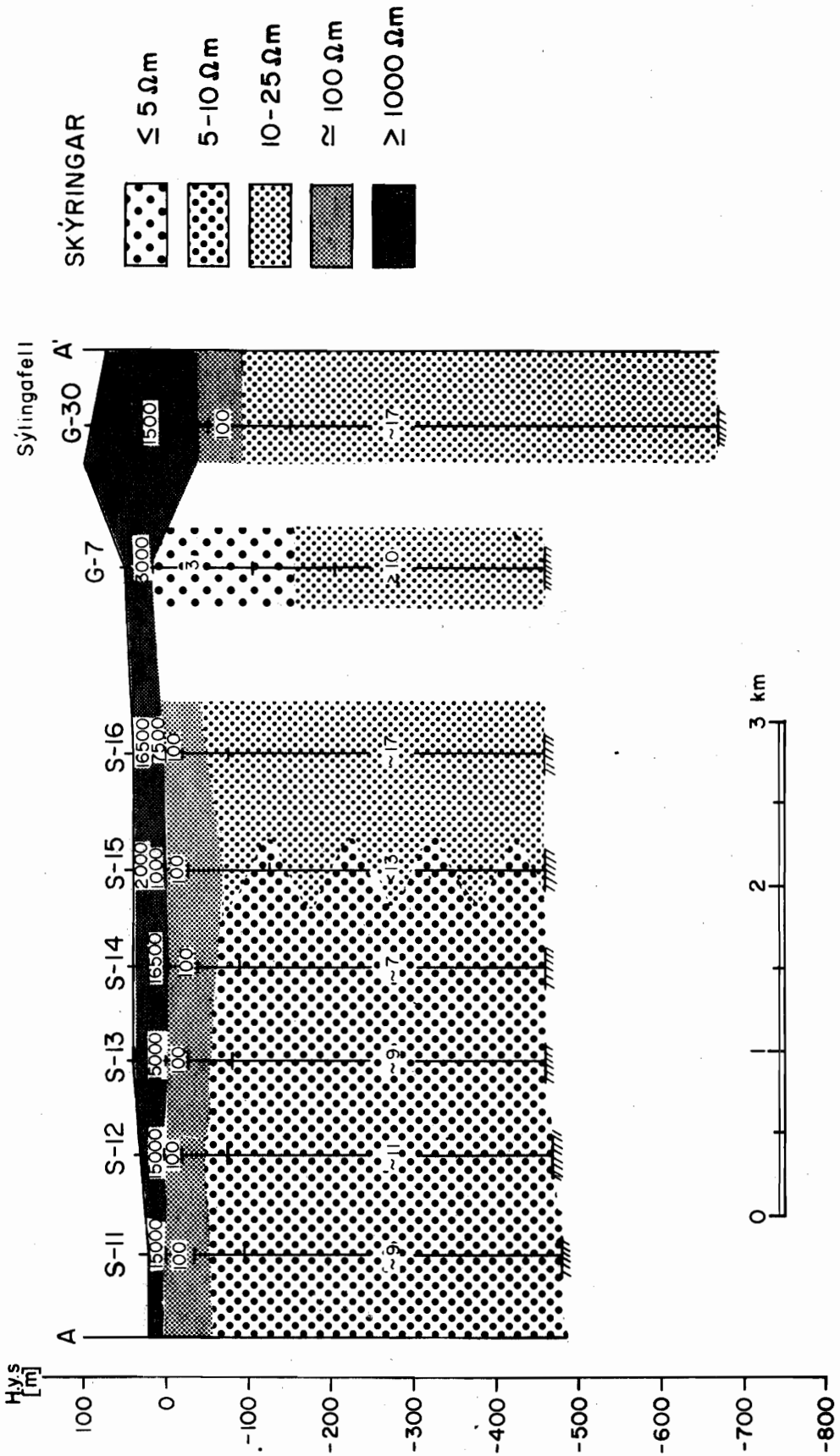


HITAVEITA SUÐURNESJA-SVARTSENGI
Staðsetning viðnámsmælinga og lega viðnámsniða

Mynd 2.3



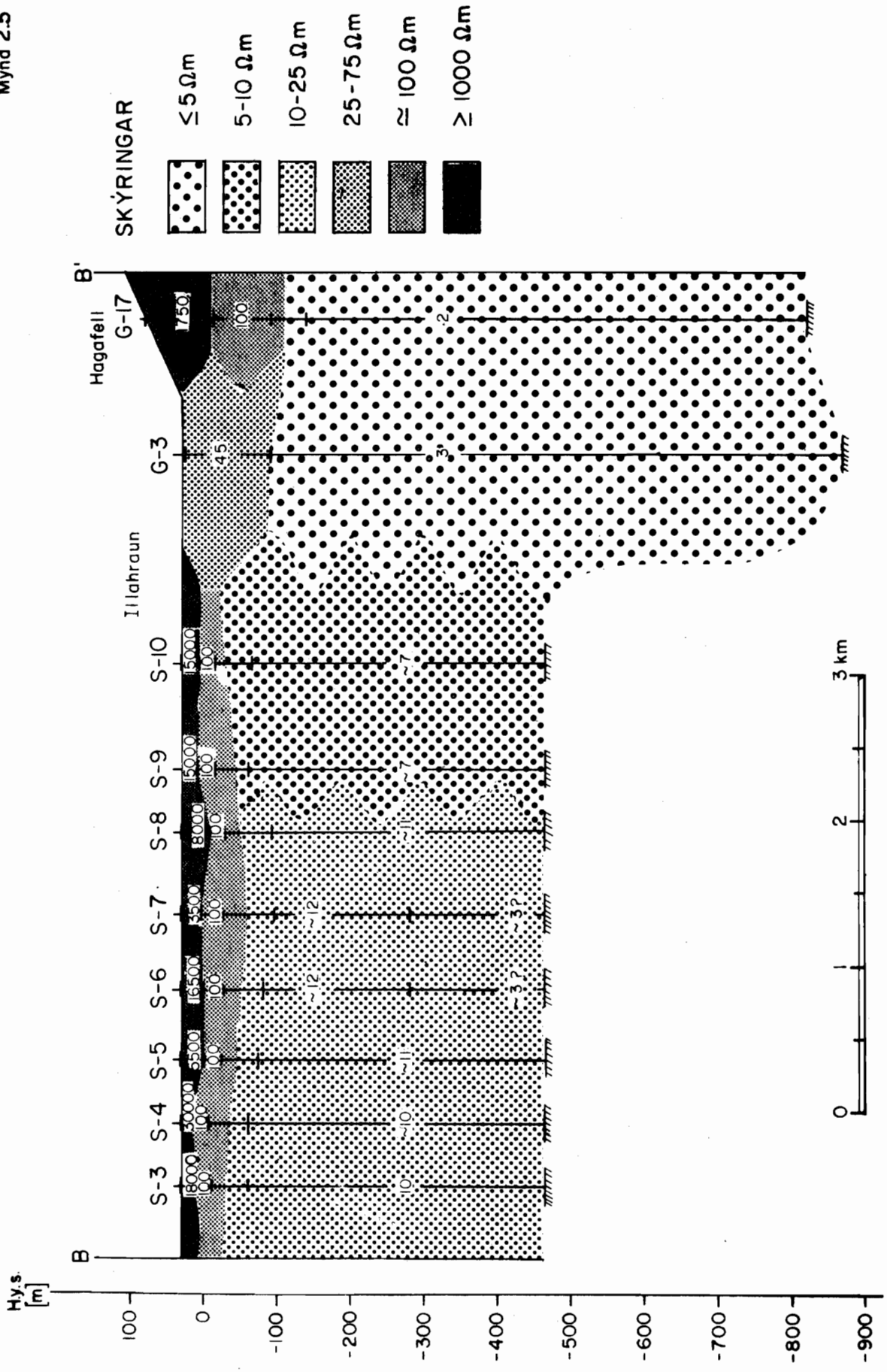
Mynd 2.4



ORKUSTOFNUN
 Straumfræðistöð
 HITAVEITA SUÐURNESJA-SVARTSENGI
 Viðnámssnið B-B'

'760512 L.S.G./S.V.
 Tnr. 79 Tnr. 1603
 J.-Svarise, J.-Viðh
 Fnr. 14169

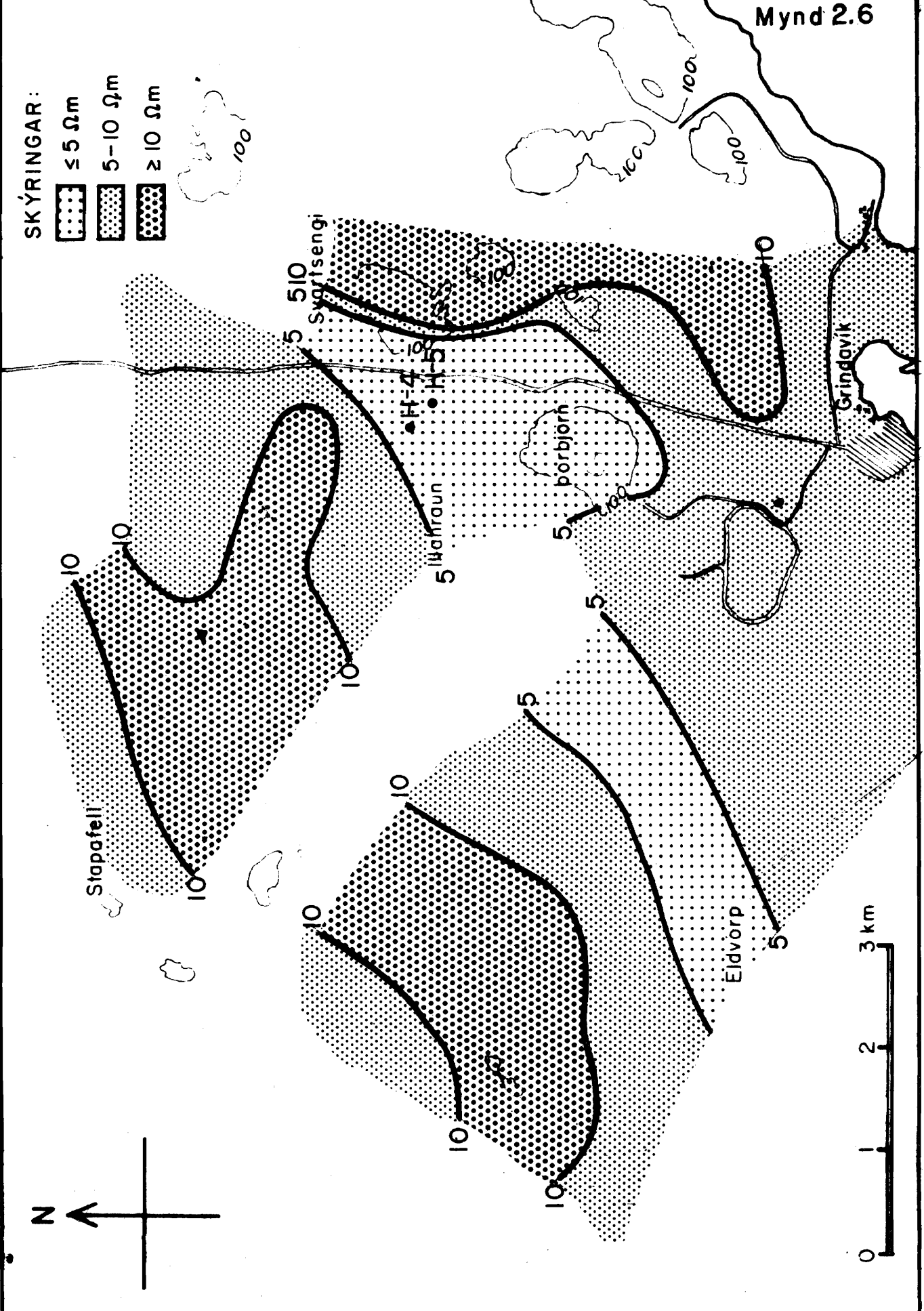
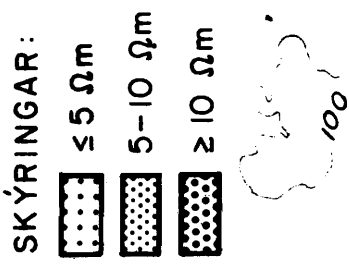
Mynd 2.5





HITAVEITA SUÐURNESJA- SVARTSENGI
Eðlisviðnám í Ω m á 200 m dýpi

Mynd 2.6





ORKUSTOFNUN
 Straumfræðistöð

HITAVEITA SUÐURNESJA-SVARTSENGI

Eðlisviðnám í Ω m á 500 m dýpi

'76.04.30. L.S.G/H.O




Tnr. 1598 Tnr. 74

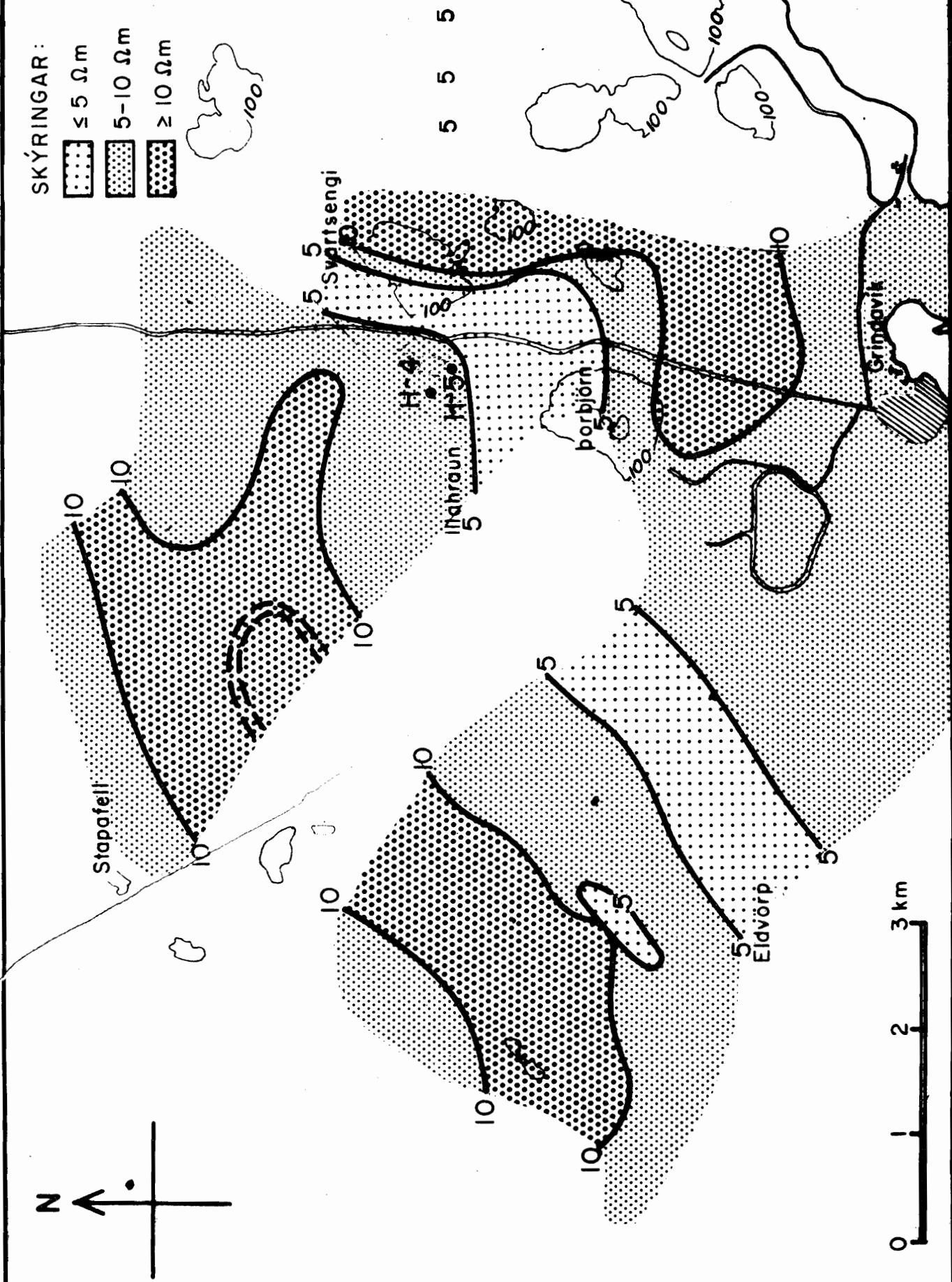
J-Viðnám.J-Svartse.

Fnr. 14137

Mynd 2.7

SKÝRINGAR:

-  $\leq 5 \Omega$ m
-  5-10 Ω m
-  $\geq 10 \Omega$ m





ORKUSTOFNUN
Straumfræðistöð

HITAVEITA SUÐURNESJA - SVARTSENGI

Eðlisviðnám í Ω m á 750 m dýpi

'76.0503. LSG/H.0

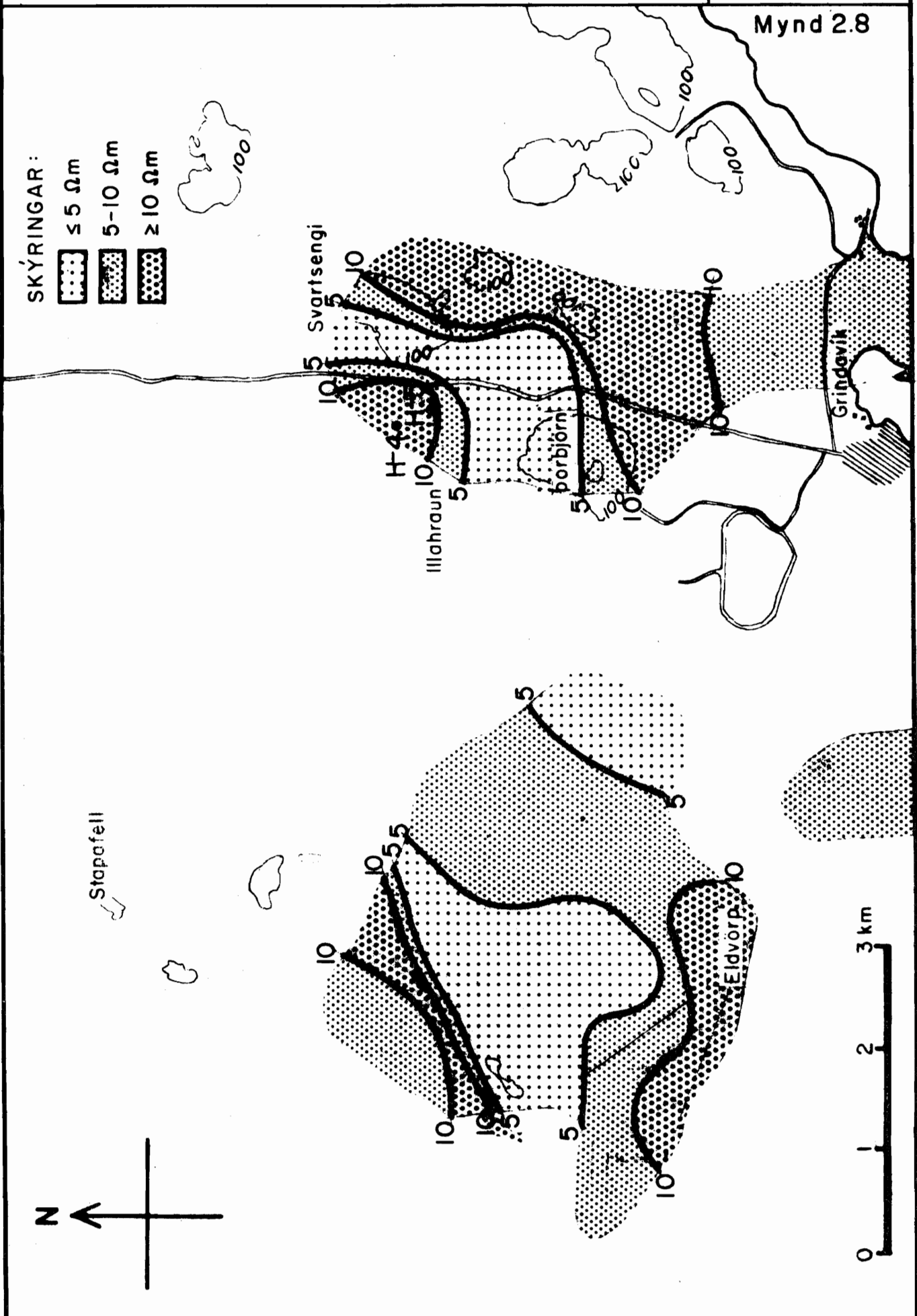
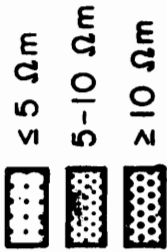
Tnr. 1599 Tnr. 75

J-Viðnám J-Svartse

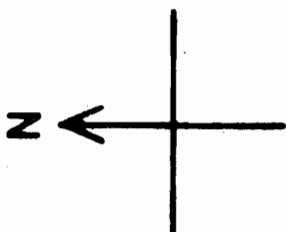
Fnr. 14138

Mynd 2.8

SKÝRINGAR:



Stapafell





ORKUSTOFNUN
Straumfræðistöð

77-07-18 S.P.K./Sy.J.

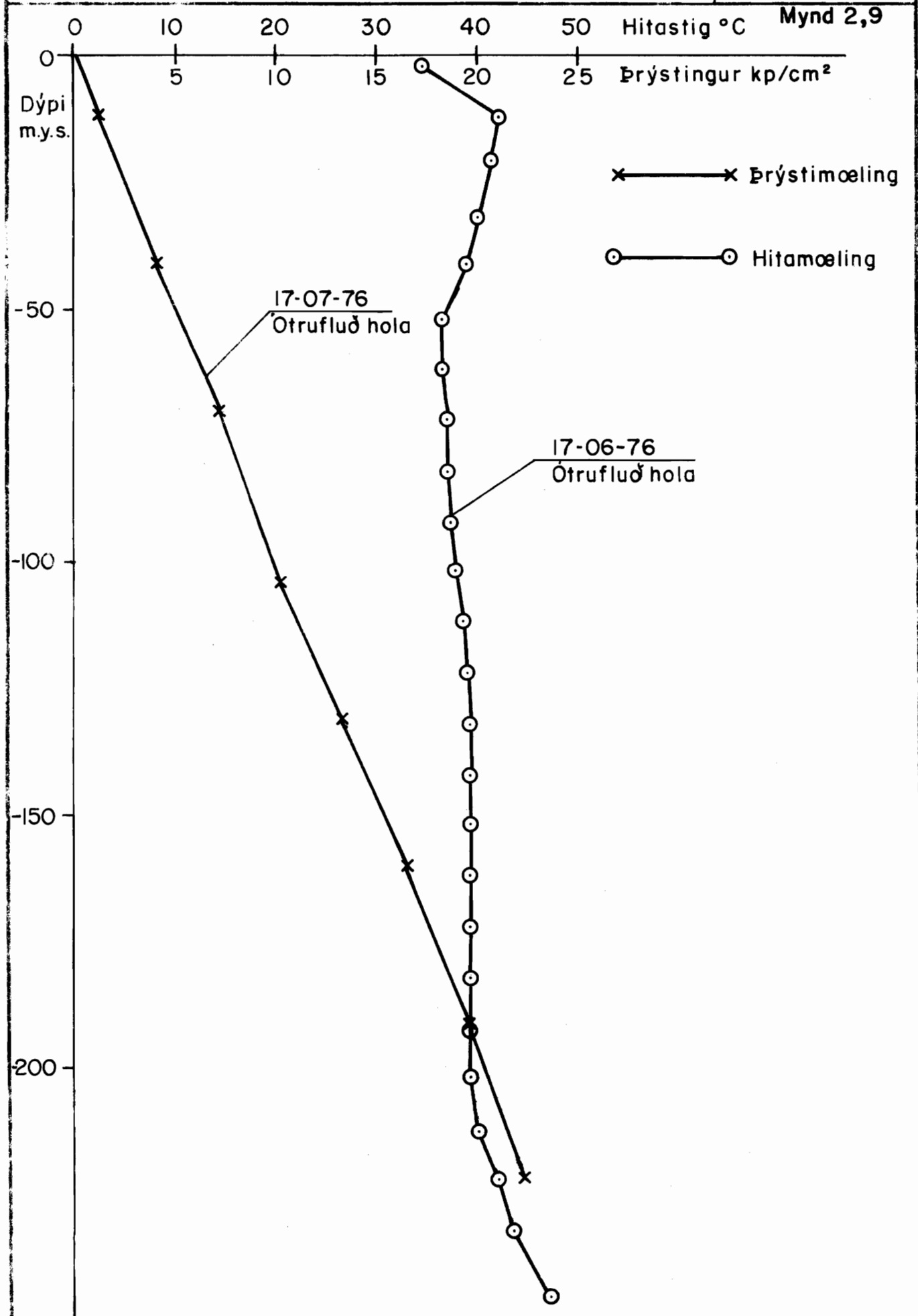
T-192 T-1996

HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI

Svartse. Hitam

Hitastig og Þrýstingur holu H-1

F.15928

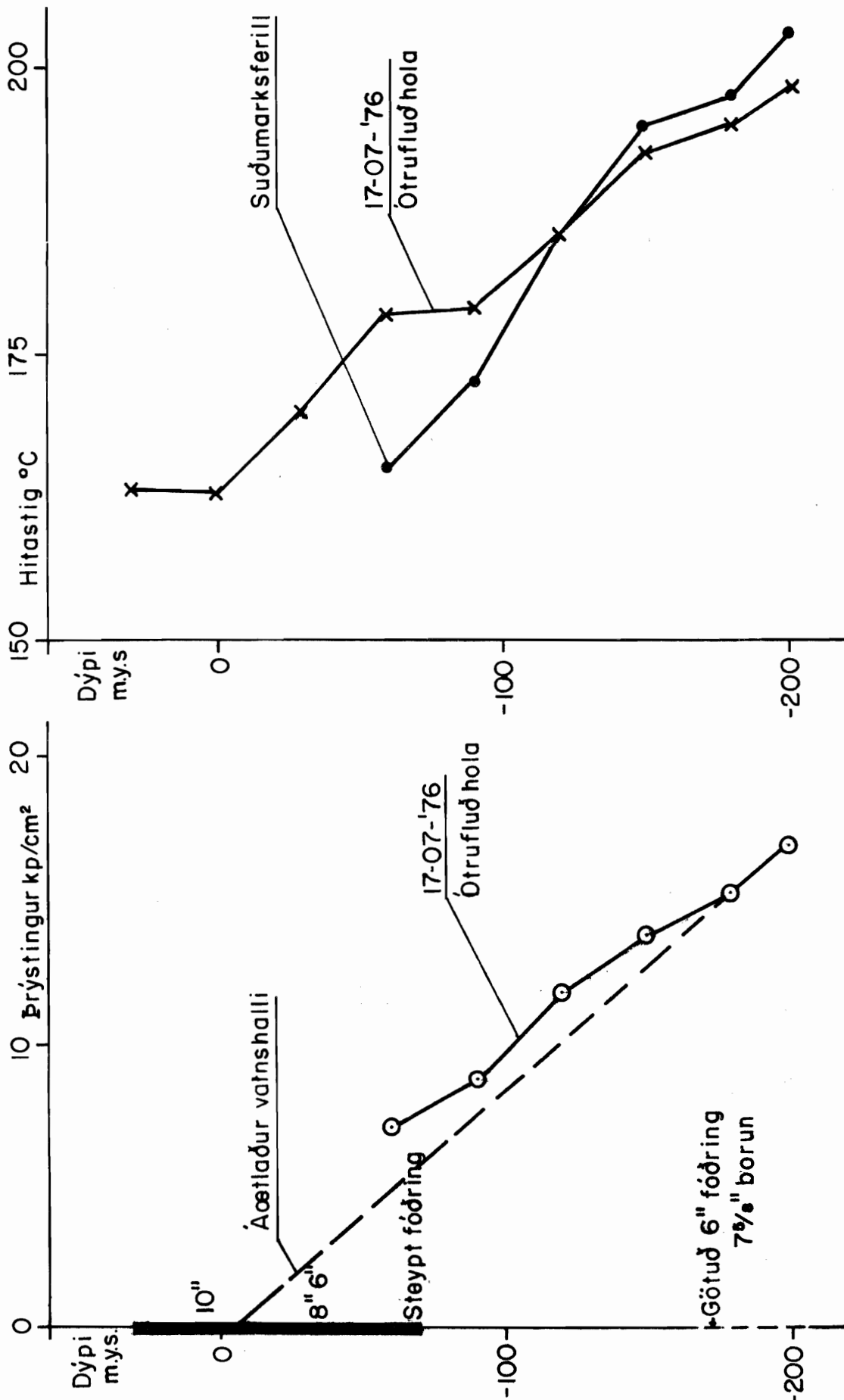




HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI

Hitastig og Þrýstingur holu H-2

Mynd 2.10

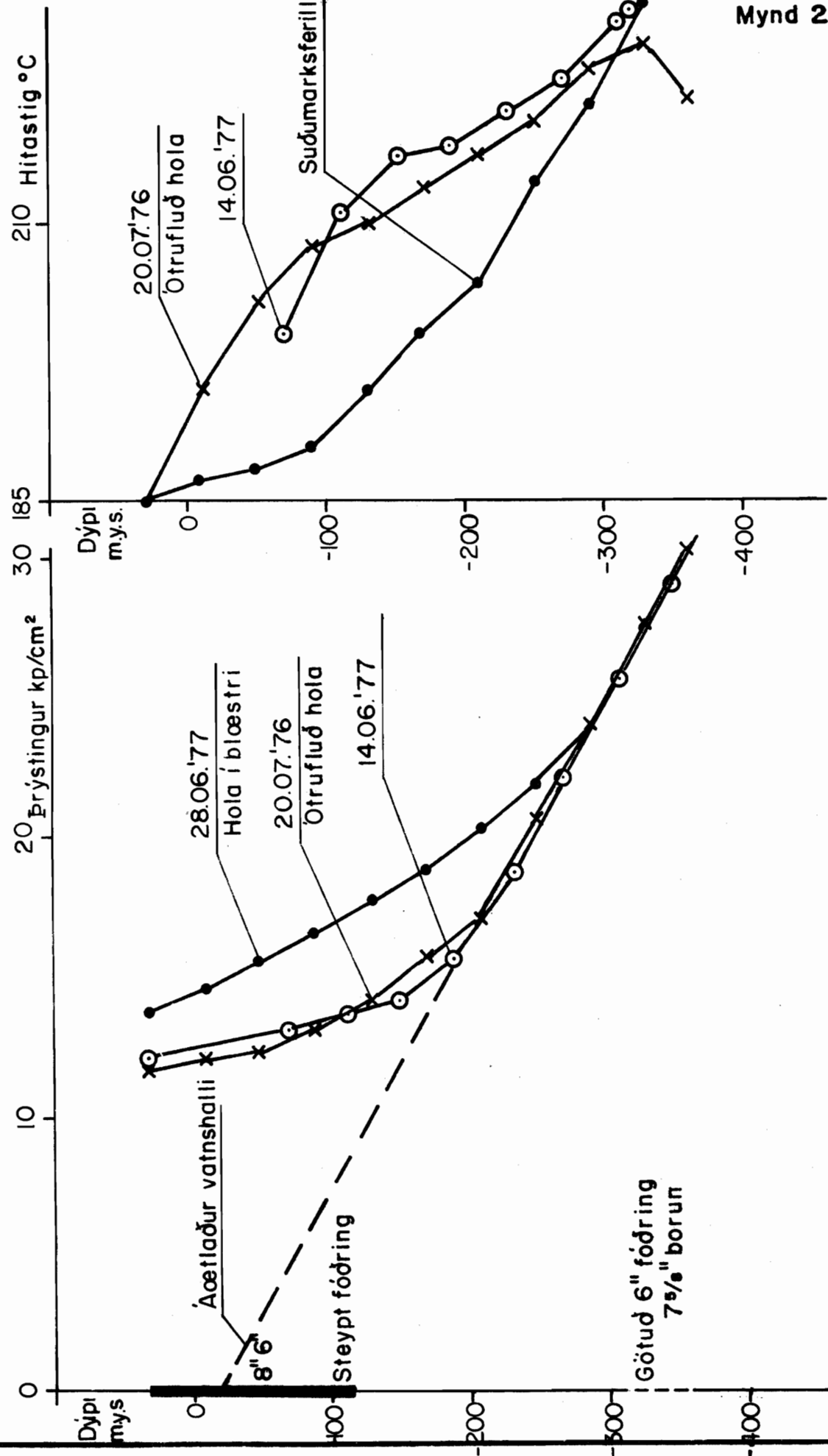




HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI

Hitastig og Þrýstingur holu H-3

Mynd 2,11



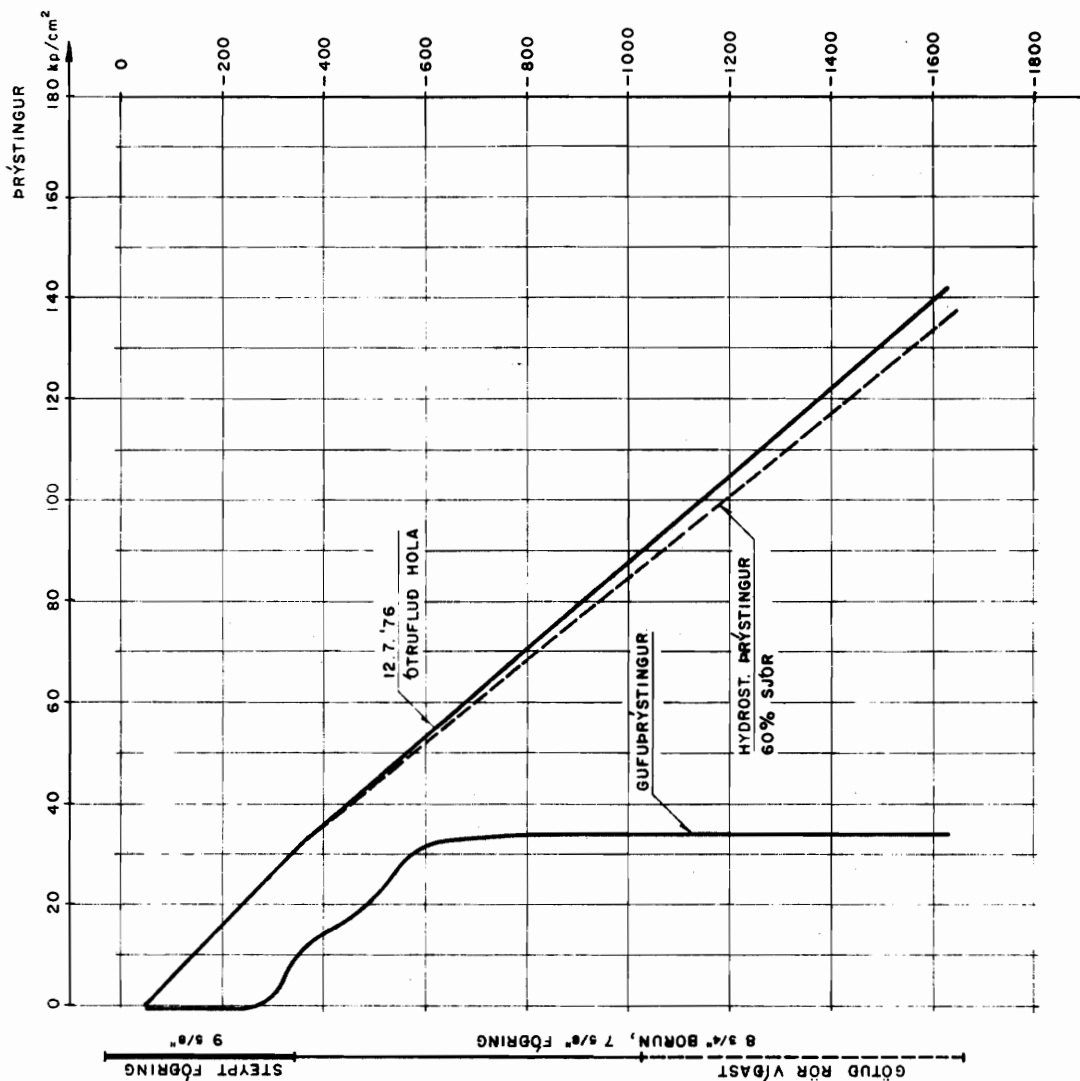
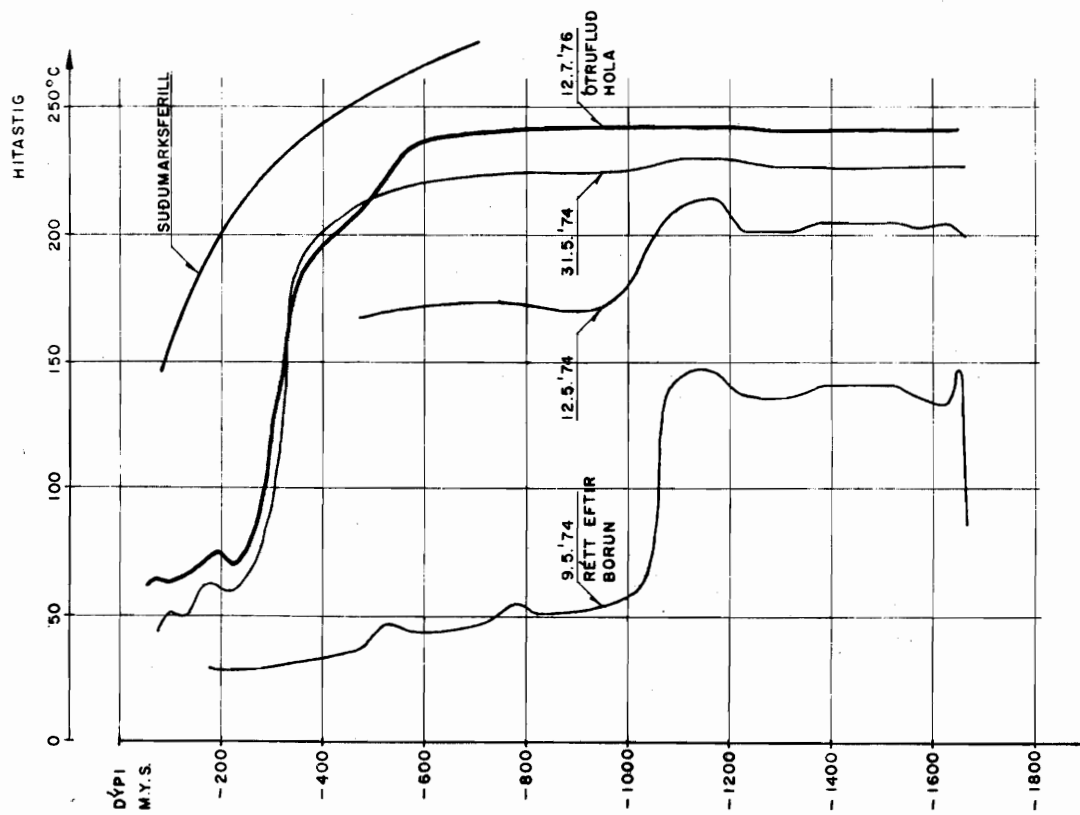


ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆÐISTÓÐ

HITAVEITA SUDURNESJA - SVARTSENGI
HITASTIG OG PRÝSTINGUR HOLU H-4

Mai 77 SSIA/Köþó
T-2 16
Svarise
F. 16051

Mynd 2,12



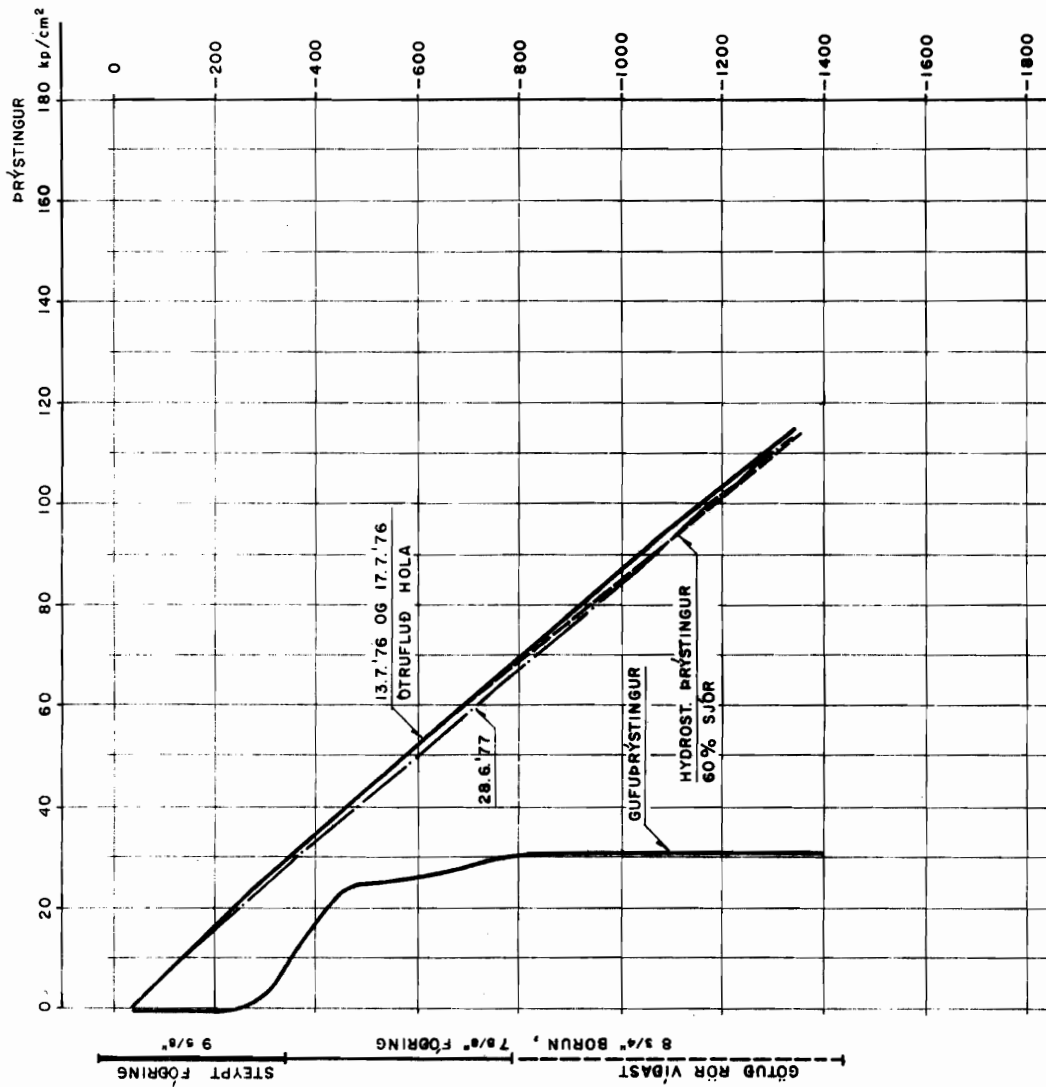
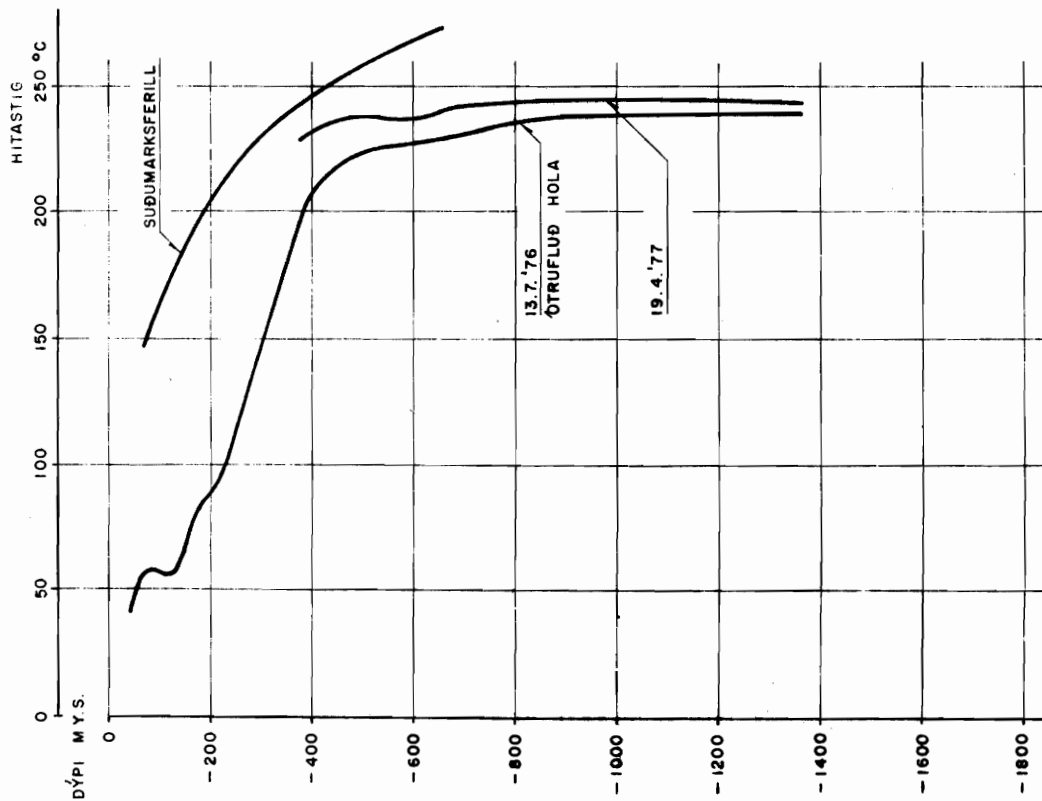


ORKUSTOFNUN
STRAUMFREDISTÖÐ

HITAVEITA SUDURNESJA - SVARTSENGI
HITASTIG OG PRÝSTINGUR HOLU H-5

Mai 77 S.St.A./Köþó
T-217
Svarfse
F 16052

Mynd 2,13





ORKUSTOFNUN
Straumfræðistöð

77-07-01 SPK/SyJ

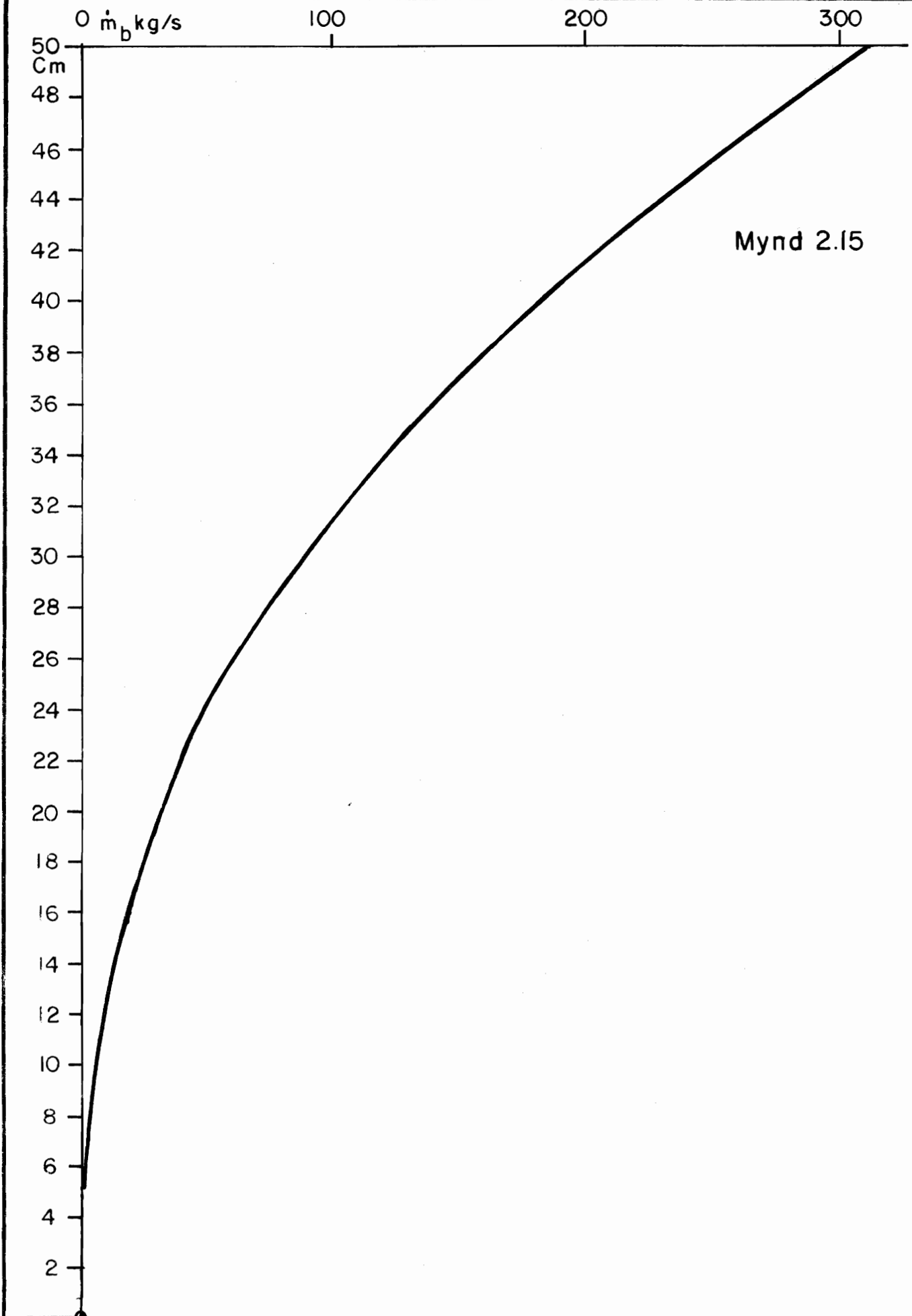
T-177

HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI

Svartse.

Massastreymi holu 4, mælt með V-yfirfalli

F.15830





ORKUSTOFNUN
Straumfræðistöð

HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI
Vinnsluferlar borhola H-2, H-3 og H-4

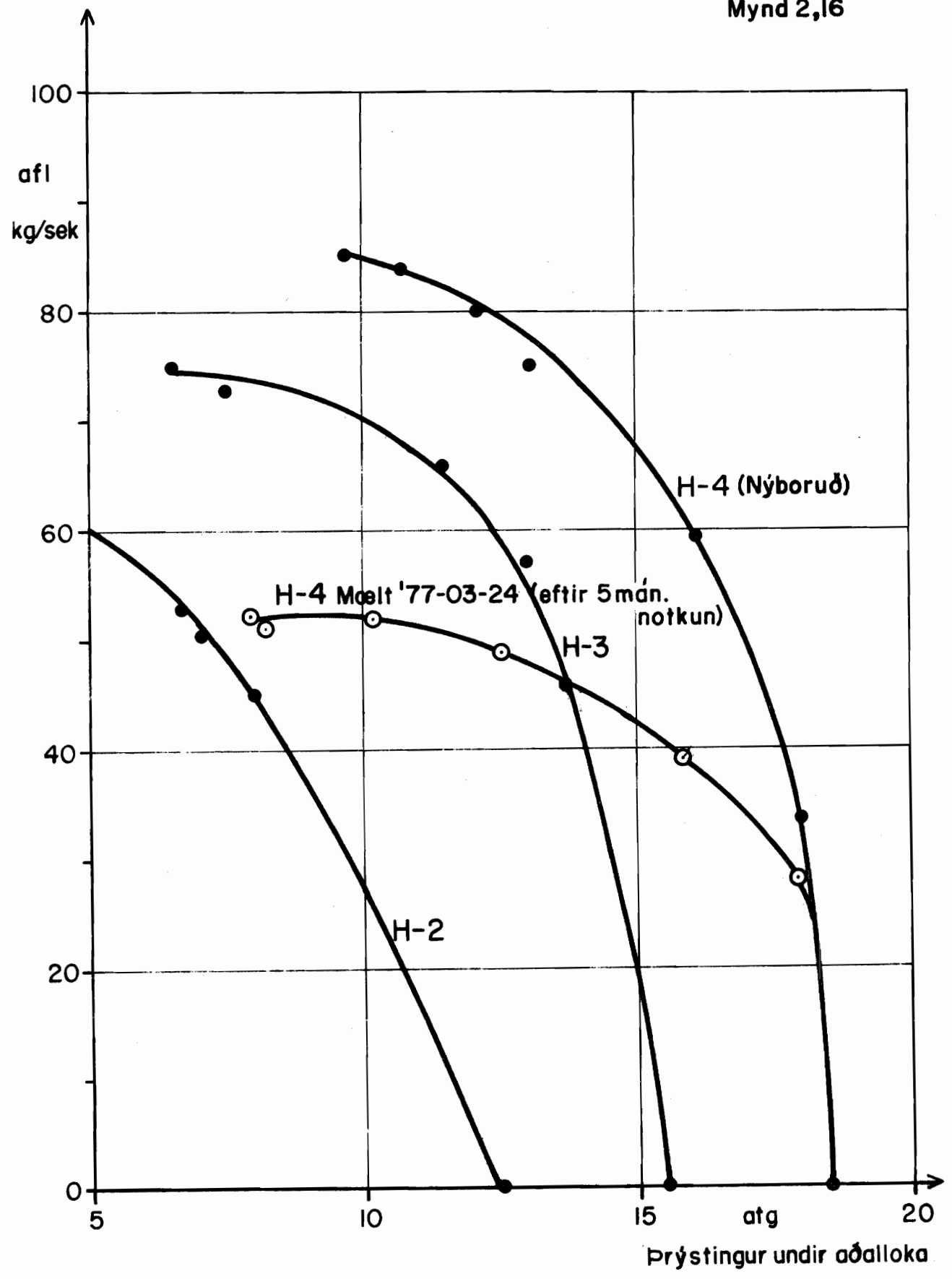
25.6 '75 S.A/HO

Tnr.195 Tnr.1999

J-Svartse.J-Hitam.

Fnr.15931

Mynd 2,16





ORKUSTOFNUN
Straumfræðistöð

77-07-29 /Sy.J

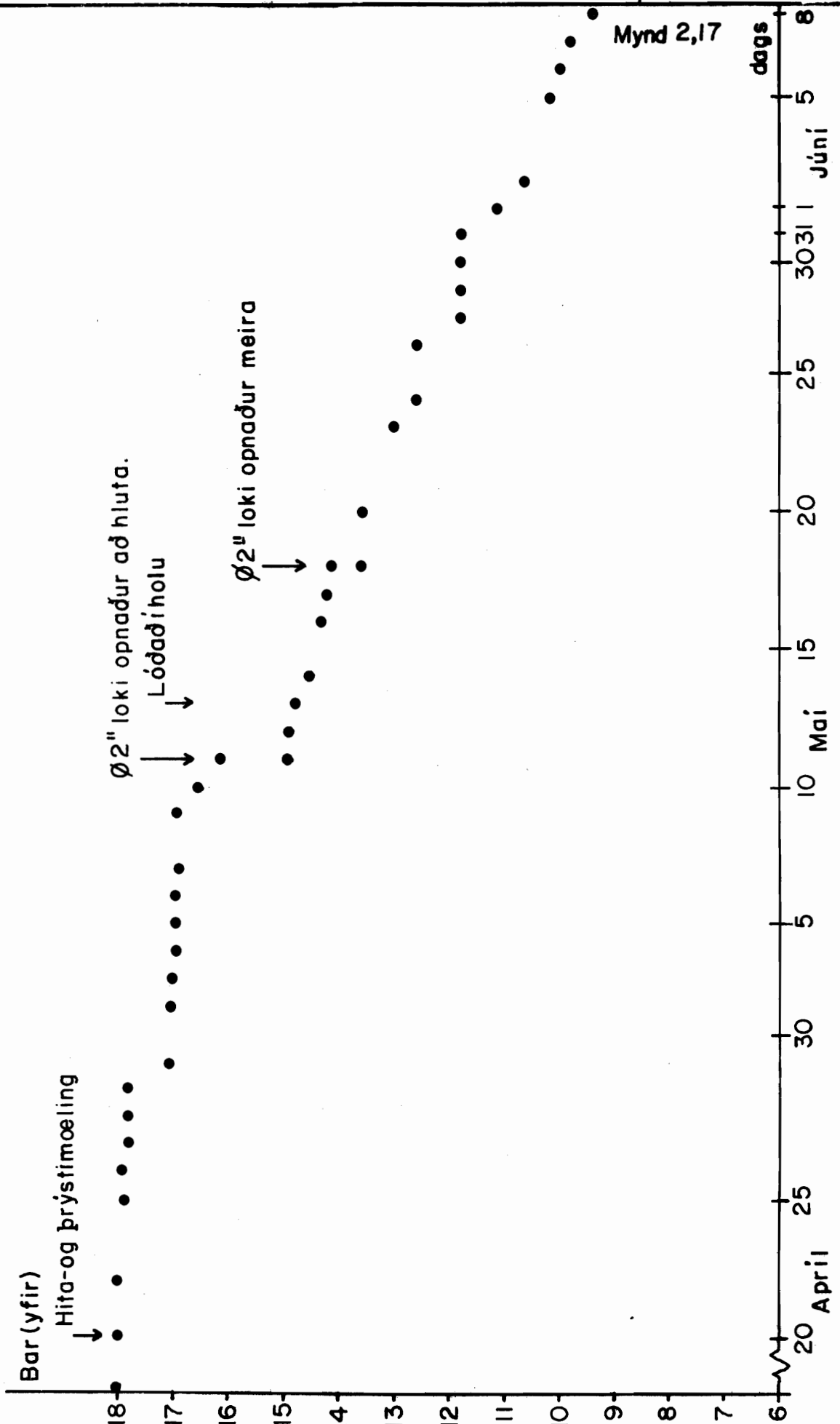
T-196

Svartse.

F.15932

HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI

Hola 4. Holutoppsþrýstingur

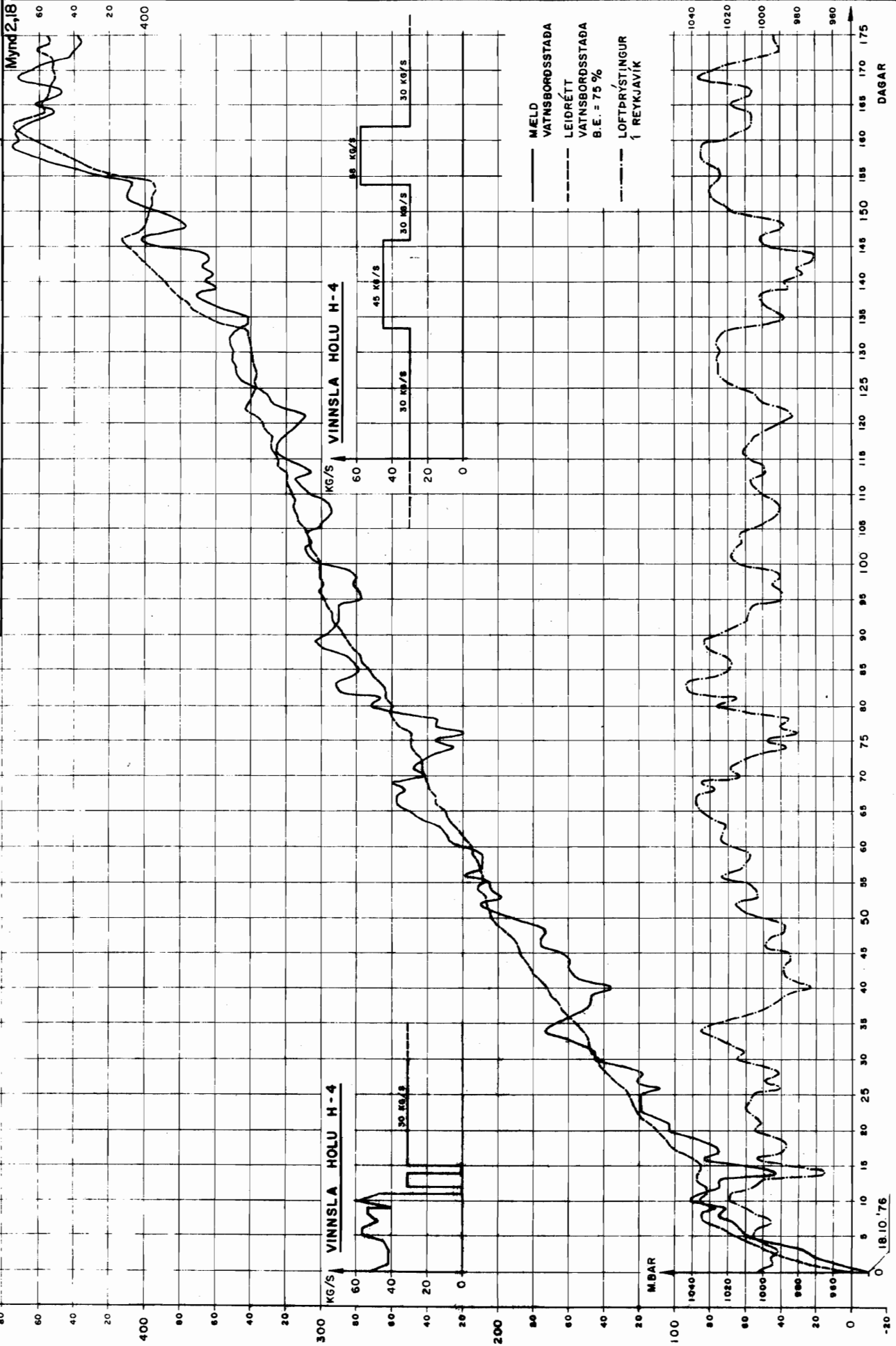




ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆÐISTOD
HITAVEITA SUÐURNESJA - SVARTSENGI
NIÐURDRÁTTUR HOLU H-5

Mars '77 S.St.A./KaPo
T-218
Svartse.
F 16053

NIÐURDRÁTTUR
CM

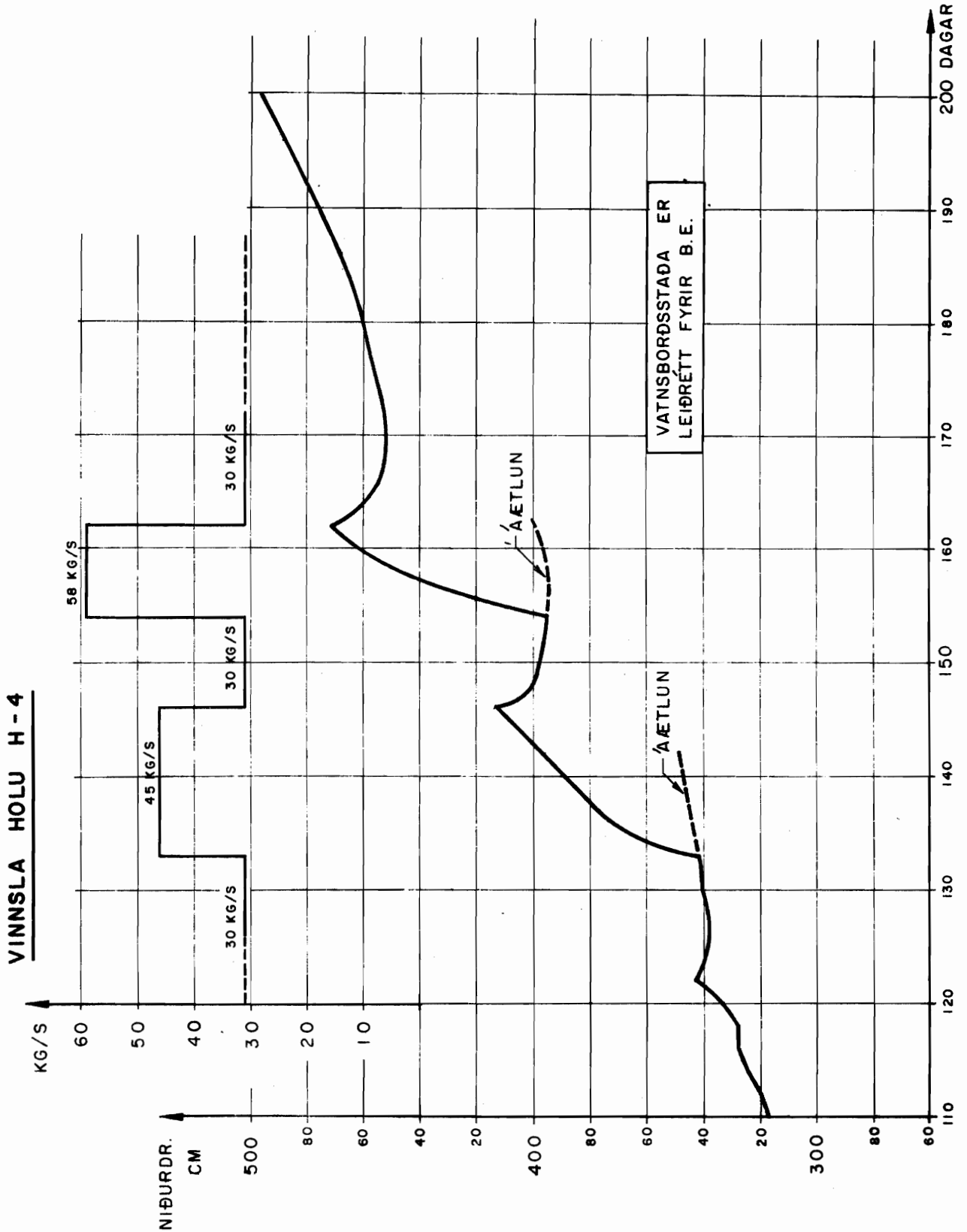


18.10.76

DAGAR



MYND 2.19





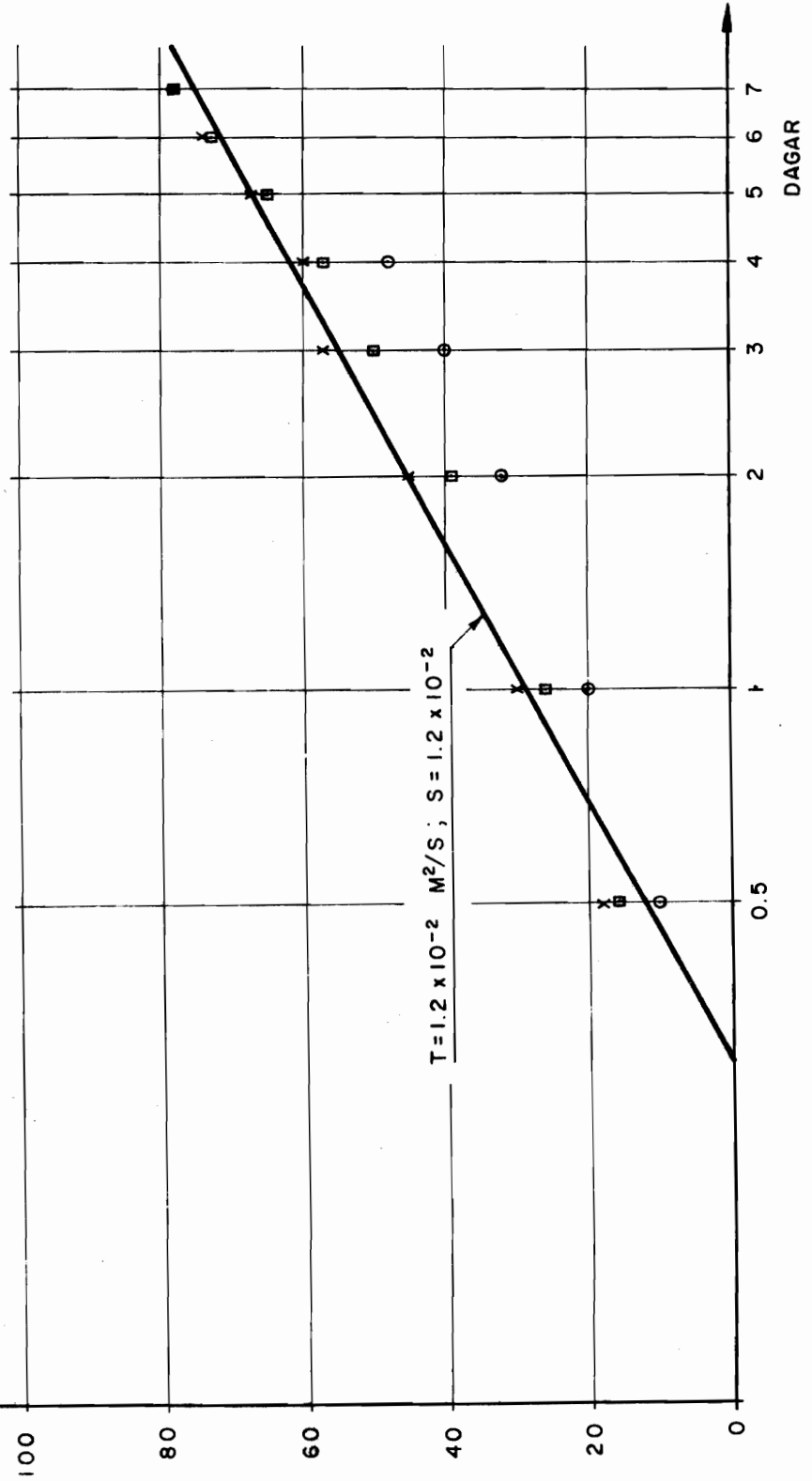
HITAVEITA SUDURNESJA - SVARTSENGI
ÁKVÖRÐUN LEIÐNI MEÐ RENNSLISBREYTINGUM

MYND 2.20

○ UPPHAF VINNSLU Í OKT. '77 (RENNSLI BREYTIŁEĞT)
x 15 KG/S RENNSLISÁUKNING FRÁ 1. MARS '77
■ 28 KG/S " " 22. MARS '77

MÆLINIÐURSTÖÐUR UMREIKNADAR
TIL RENNSLIS 30 KG/S

NIÐURDRÁTTUR
CM



3. VINNSLUGETA JARÐHITASVÆÐISINS

Vinnslugeta jarðhitasvæðis er í sjálfu sér skilgreiningaratriði, en hiti svæðisins, og þó miklu fremur það vatnsmagn, sem hægt er að ná upp úr holunum, setja henni eðlileg mörk.

Í fyrsta kafla þessarar skýrslu eru sett fram frumdrög að vatnafræðilíkani fyrir jarðhitasvæðið og verða eftirfarandi áætlanir á vinnslugetu byggðar á því. Nánari mynd af þessu líkani er sýnd á mynd 3.1 Ca. 240 stiga heitt vatn streymir upp af 2.5 km dýpi, kólnar og streymir niður aftur að hluta. Auk þessa er innrennsli í heitu greinina og frárennsli frá köldu greininni. Vatns- og varmajafnvægi verður þá í aðalatriðum eins og mynd 3.2. sýnir. Athuga ber að mynd 3.2 á ekki að sýna þverskurð í svæðið, uppstreymi tákna allt vatn sem streymir upp, niðurstreymi allt vatn sem streymir niður, hitastigin eru áætlaður meðalhiti o.s.frv. Raunveruleg hegðun slíkra konvektionsstrauma er mjög flókin, sjá nánar ritgerð Jónasar Elíassonar /7/.

Sjá má, að eftirfarandi samfellulíkingar verða að gilda fyrir massa- og varmastrauminn:

Neðra massasamfelli

$$\dot{m}_{ku} = \dot{m}_{kn} + \dot{m}_l \quad (3.1)$$

Efra massasamfelli

$$\dot{m}_{ku} = \dot{m}_u + \dot{m}_g + \dot{m}_{kn} \quad (3.2)$$

Selta vatnsins gefur:

Neðra klórsamfelli

$$\beta \dot{m}_{ku} = \gamma \dot{m}_{kn} + \alpha \dot{m}_l \quad (3.3)$$

Efra klórsamfelli

$$\beta \dot{m}_{ku} = \gamma \dot{m}_u + \gamma \dot{m}_{kn} \quad (3.4)$$

Neðra varmajafnvægi

$$T_{ku} \dot{m}_{ku} = T_i \dot{m}_i + T_{kn} \dot{m}_{kn} \quad (3.5)$$

Efra varmajafnvægi

$$H_{ku} \dot{m}_{ku} = H'_{kn} \dot{m}_{kn} + H'_{kn} \dot{m}_u + H_g \dot{m}_g \quad (3.6)$$

Líking 3.1 og 3.2 gefa:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_u + \dot{m}_g \quad (3.7)$$

Líkingarnar hér á framan má laga til og leysa með tilliti til \dot{m}_i og þá fæst.

$$\dot{m}_{ku} = \frac{\gamma - \alpha}{\gamma - \beta} \dot{m}_i \quad (3.8)$$

$$\dot{m}_{kn} = \frac{\beta - \alpha}{\gamma - \beta} \dot{m}_i \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_u = \frac{\alpha}{\gamma} \dot{m}_i \quad (3.10)$$

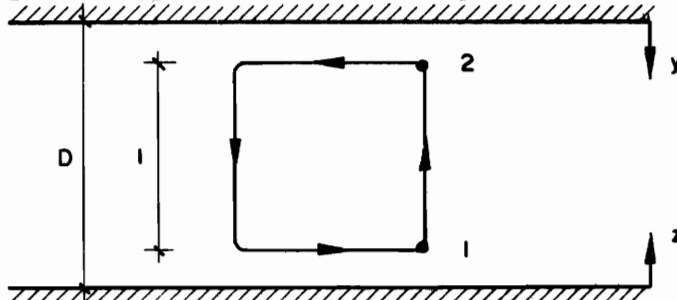
$$\dot{m}_g = \frac{\gamma - \alpha}{\gamma} \dot{m}_i \quad (3.11)$$

$$\frac{\gamma}{\beta} H_{ku} = H'_{kn} + \frac{\gamma - \beta}{\beta} H_g \quad (3.12)$$

$$T_i = \frac{\gamma - \alpha}{\gamma - \beta} T_{ku} - \frac{\beta - \alpha}{\gamma - \beta} T_{kn} \quad (3.13)$$

Við höfum fjórar jöfnur til að ákvarða sjálft massastreymið, en fimm óþekktar stærðir. Eina jöfnu verður því að fá til viðbótar. Samkvæmt fyrsta kafla gefa tvívetnismælingar gildið á α , $\alpha = 57\%$, og β fæst úr seltumælingum $\beta = 63\%$ en γ þekkjum við ekki. Búast má við, að γ sé mjög litlu stærra en β , svo að ekki er við því að búast að ákvarða megi seltuhlutfallið γ með beinum mælingum. Að vísu má

búast við, að eimingin hafi átt sér stað í holum 2 og 3, sem eru grunnar, en mælingar á seltu í þeim gefur ekki neitt marktækt frábrugðið mælingum í djúpri holunum 4 og 5. Ákvörðun á γ verður því að fást með óbeinum aðferðum. Ef tækist að ákvarða hitastigið á niðurfallsgreininni myndi líking 3.12 gefa okkur γ , þar sem hitastig á uppstreymisgreininni er þekkt 240°C. Mælingar á hitastigi á niðurfallsgreininni eru útilokaðar, þar sem hér er um meira eða minna fræðilegt hugtak að ræða en reiknislega er ef til vill hægt að ákvarða það eins og sést hér á eftir. Líking 3.13 gefur síðan hitastigið á vatninu frá írennslissvæðinu. Bragi Árnason hefur með ísótópahitamæli ákvarðað slíkt hitastig, sjá /10/. Er því hægt með líkingu 3.13 að sjá hversu vel líkaninu og ísótópahitamæli Braga ber saman. Við skulum nú líta á straumfræðilegt líkan af konvektionscellunni. Mynd 3.3 sýnir snið í einhverja straumleið jarðhitageymisins.



Mynd 3.3 Lóðrétt snið í konvektionscellu.

Samkv. kraftajafnvægi eða Darcy's lögmáli höfum við:

$$\frac{g}{k} u_i + g_i \rho + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad (3.14)$$

- u_i : massastreymisvektor, $i = 1, 2, 3$, kg/s/m^2
- k : leiðnistuðull m/s
- g_i : þyngdarhröðunarvektor, $(0, 0, g)$, m/s^2
- ρ : eðlismassi kg/m^3
- p : þrýstingur N/m^2
- x_i : hnitir, $i = 1, 2, 3$ m

Ef við heildum nú 3.14 milli punkta 1 og 2 á mynd 3.3 fæst:

$$\int_1^2 \frac{g}{k} u \, dz + \int_1^2 g \cdot \rho \, dz + \int_1^2 \frac{\partial p}{\partial z} \, dz = 0$$

Ef meðalmassastreymið milli 1 og 2 er táknað með \bar{u} fäst.

$$\begin{aligned} & \frac{g}{k} \bar{u} (y_1 - y_2) + (P_2 - P_1) - \int_{y_1}^{y_2} \rho g dy \\ & = \frac{g}{k} \bar{u} (y_1 - y_2) + (P_2 - P_1) + \int_0^{y_1} \rho g dy - \int_0^{y_2} \rho g dy = 0 \end{aligned}$$

Við skilgreinum.

$$\phi(y) = \int_0^y \rho g dy \quad (3.15)$$

Við setjum þetta inn í jöfnuna á undan og fáum.

$$\frac{g}{k} \bar{u} (y_1 - y_2) + (P_2 - P_1) + (\phi_1 - \phi_2) = 0 \quad (3.16)$$

p.e.a.s.

$$\frac{g}{k} \bar{u} \cdot y + \phi - P = \text{konstant} = 0 \quad (3.17)$$

Ef við gerum þá nálgun, að hitastigið sé konstant í uppstreymisgreininni milli punkta 1 og 2, sem virðist ekki vera svo fjarri lagi samkvæmt hitamælingum, sjá myndir 2.12 og 2.13 þá er eðlismassinn líka konstant. Jafna 3.15 gefur þá

$$\phi = \rho g y$$

sem innsett í 3.16 gefur.

$$\begin{aligned} \bar{u} & = k \left(-\rho + \frac{1}{g} \frac{P_1 - P_2}{Y_1 - Y_2} \right) \\ & = k \left(-\rho + \frac{1}{g} \frac{\Delta P}{l} \right) \end{aligned}$$

Ef við mælum þrýsting í kp/cm^2 og l í km fäst.

$$\bar{u} = k \left(-\rho + \frac{10\Delta p}{l} \right) \cdot 10^6 \quad (3.18)$$

\bar{u} : massastrymi í kg/s/km^2 .

k : leiðnistuðull í m/s.

ρ : eðlismassi í kg/m^3 .

Δp : þrýstimunur í kp/cm^2 .

l : lengd í km.

Leiðnistuðullinn, k , fäst úr kafla 2.5, en það gildi er sennilega nær láréttri leiðni en lóðréttri. Samkvæmt kafla 2.2 er meðal eðlismassinn reiknaður 825 kg/m^3 . Þrýstigradientinn, $\Delta p/l$, er ákvarðaður

í kafla 2.3 85.5 kp/cm^2 . Massastreymið verður því samkvæmt jöfnu 3.18

$$\bar{u} = 5 \cdot 10^{-6} (-825 + 10 \cdot 85.5) \cdot 10^6 \approx 150 \text{ kg/s/km}^2.$$

Samkvæmt því sem fram hefur komið virðist svæðið mjög takmarkað af þéttum vöndum. Hér á eftir er reiknað með að 4 km^2 , sem mat á stærð uppstreymissvæðis, sé frekar svartsýnismat. Við fáum því að massastreymið upp er:

$$m_{ku} = A \cdot \bar{u} = 4 \cdot 150 = 600 \text{ kg/s}$$

þar sem A er flatarmál uppstreymisins í km^2 .

Ef við heildum jöfnu 3.14 nú allan hringinn í konvektionscellunni fæst:

$$\oint \frac{g}{k} u_1 ds + \oint g_1 \rho ds + \oint \frac{\partial p}{\partial x_1} ds = 0 \quad (3.19)$$

Fyrsti liðurinn er orkutapið í rennslinu, ef við gerum nú ráð fyrir, að mesti hluti orkutapsins fari fram í uppstreymisgreininni og skrifum:

$$(1 - \epsilon) \cdot (\text{Heildarorkutap}) = (\text{Orkutap í uppstreymisgrein}) \quad (3.20)$$

þar sem ϵ er þá einhver lítil tala. Við fáum þá:

$$\frac{g}{k} \bar{u} \frac{(y_1 - y_2)}{(1 - \epsilon)} - \int_0^{y_1} \Delta \rho g dy + \int_0^{y_2} g \Delta \rho dy = 0$$

þar sem $\Delta \rho$ er mismunur á eðlismassa vökvans í uppstreymis- og niðurstreymisgreininni í sömu hæð. Við skilgreinum

$$\Delta \phi(y) = \int_0^y g \Delta \rho dy \quad (3.21)$$

þá fæst:

$$\frac{g}{k} \bar{u} y - (1 - \epsilon) \Delta \phi = 0 \quad (3.22)$$

Við skrifum nú 3.21

$$\Delta \phi(y) = \Delta \bar{\rho} gy \quad (3.23)$$

Þar sem $\bar{\Delta\rho}$ er mismunurinn á meðal eðlismassa í uppstreymis- og niðurstreymisgrein. Við fáum þá:

$$\bar{u} = k (1-\epsilon) \bar{\Delta\rho} \tag{3.24}$$

eða leyst með tilliti til $\bar{\Delta\rho}$

$$\bar{\Delta\rho} = \frac{\bar{u}}{k(1-\epsilon)} \tag{3.25}$$

Sé nú gert ráð fyrir $\gamma = 0.66$ og $\beta = 0.63$ til samræmis við töflu 2.2.1 má reikna H'_{KN} í líkingu 3.12 þar eð:

$$H_g = H'_{KN} + r$$

með $H_{ku} = 247.7$ kcal/kg (240°C) verður niðurstaðan með $\alpha = 0.57$

$$H'_{KN} = 228$$
 kcal/kg

sem svarar til

$$T'_{KN} \approx 225^\circ\text{C}$$

Þetta hitastig er þá meðalhitastig í suðunni og svarar það til botnhitans í holu H-3. Hitinn eftir að suða hefur átt sér stað verður þá:

$$T'_{KN} \approx 210^\circ\text{C}$$

vegna

$$T'_{KN} \approx \frac{1}{2} (T_{KN} + T_{ku})$$

sem svarar mjög náið til botnhita í holu H-2. En gufuuppstreymi er umhverfis H-2 og H-3 eins og áður segir.

T_{KN} gefur eðlismassann í niðurstreymisgreininni

$$\rho_N = 865$$
 kg/m³

þá fæst

$$\Delta\rho = 865 - 825 = 40$$
 kg/m³

og jafna 3.25 gefur þá $\epsilon = 0.25$ sem þýðir þá að 25% af heildarorku-tapinu á sér stað í niðurstraumnum en 75% í uppstraumnum. Þetta er mjög sennilegt miðað að niðurstreymið eigi sér stað á stærra svæði en uppstreymið.

Nú má leysa jöfnur 3.8 - 3.13 og finna:

Innrennsli
 $\dot{m}_i = 200 \text{ kg/sek}$

Niðurrennsli
 $\dot{m}_{kN} = 400 \text{ kg/sek}$

Affallsvatn
 $\dot{m}_u = 173 \text{ kg/sek}$

Gufuuppstreymi
 $\dot{m}_g = 27 \text{ kg/sek}$

Innstreymishiti:

$$T_i = 300^\circ\text{C}$$

Þessi innstreymishiti er hærri en mynd 1.7 gerir ráð fyrir, til samræmis við, að konvektion innan jarðhitasvæðisins sé viðhaldið af lokal upphitun uppfyrir jafnvægisástand. Hugsanlegt er að þessi upphitun eigi sér stað í neðra vatnskerfi, sem ekki hefur fundist í borunum.

Hið reiknaða innrennsli \dot{m}_i , svarar til að ferskvatnsinnstreymið á jarðhitasvæðið sé

$$q = \dot{m}_i (1-\alpha) = 86 \text{ kg/sek}$$

Við höfum gert ráð fyrir $A = 4 \text{ km}^2$ en það svarar til þvermáls $D_A = 2.25 \text{ km}$, ef svæðið er A hringlaga. Miðað við streymismagn $20 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ (sjá kafla 1 mynd 1.7) og dýptina á jarðhitasvæðinu $D = 2 \text{ km}$ fæst

$$q = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 2250 = 90 \text{ kg/sek.}$$

sem stemmir nægilega vel við $q = 86 \text{ kg/sek}$.

Nú má áætla vinnslugetu svæðis frá áður fundnum tölum.

Eðlilegt varmatap svæðis er:

$$Q = \dot{m}_{ku} H_{ku} - \dot{m}_{kn} H_{kn} = 62900 \text{ kcal/sek} = 263 \text{ MW} \quad (3.26)$$

Þessa orku má taka án þess að trufla eðlilega starfsemi jarðhitasvæðisins, sé það gert með svokallaðri "dípól" aðferð, þ.e. taka upp

heitt vatn og setja kalt vatn niður. Með því að hugsa sér niðurstrauminn 40°C þarf að taka upp og dæla niður $\dot{m} = 280 \text{ kg/sek}$.

Stærsta óvissan í þessu mati er leiðnin í líkingu 3.18 ($k = 0.5 \cdot 10^{-5}$) og hlutfallið milli lóðréttrar og láréttrar leiðni ($a = 1.0$). Mynd 3.4 skýrir sambandið á milli k , a og \dot{m} . Ljóst er að rangt mat á a breytir \dot{m} mikið. Ef miðað er við að svartstýnt mat á a sé $a = 0.5$ fæst $\dot{m} = 140 \text{ kg/sek}$ eða:

Varmatap jarðhitasvæðis: 130 MW

Venjuleg vinnsluaðferð er ekki "dípól" aðferðin heldur hin svokallaða "mining" aðferð, en þá er vatni dælt burtu án þess að skila nokkru í staðinn. Með þeirri aðferð er gengið á varmaforðann og fæst þá meira afl, en afl hola dvínar stöðugt. Venjulega er þó hitaforði jarðhitasvæða það stór að óhagræðið af þessum sökum ræður ekki úrslitum, því með þessari aðferð er ætlað að taka megi allt að tíuföldu náttúrlegu varmastreymi.

Varmavinnslugetan hefur verið áætluð eftir tveim aðferðum Gunnars Böðvarssonar, /11/, /12/, /13/ og /14/. Önnur er svonefnda "Intergranular flow model" (mynd 3.5) hin gerir ráð fyrir sprungustreymi (mynd 3.6). Niðurstaðan er nokkuð samhljóða

Varmavinnslugeta: 550 MW

eða um 4 sinnum meiri en áður fékkst.

Gallinn við þessa áætlun er sá, að hún innifelur svo kallaðan "recovery factor" eða vinnslustuðul, sem hér er áætlaður 0.1 án þess að staðreyndir frá Svartsengi sjálfu séu þar á bak við. Það sem vinnslustuðullinn í raun innifelur, er hve vel gengur að ná vatni upp úr svæðinu, með þeirri vinnslutækni sem viðhöfð er.

Tvennt aðallega virkar hér takmarkandi. Í fyrsta lagi vatnsleiðni svæðisins, en hún skammtar rennslið inn í holurnar og hins vegar aðrennsli vatns til svæðisins í stað þess sem upp er tekið. Báðir þessir þættir verða að vera í góðu lagi á jafn litlu svæði og hér um ræðir. Annars kemur að því að borvökvinn sýður úti vatnsæðarnar og holuafköst minnka mjög verulega.

Rannsóknir hafa þegar leitt í ljós, að vatnsleiðni innan svæðisins er með því besta, sem gerist á jarðhitasvæðum. Veruleg óvissa ríkir aftur á móti um aðrennslið. Í rannsóknnum hefur ekkert það komið í ljós, sem bendir til annars en að svæðið tæmist í takt við vinnsluna svo þrýstingur lækki á svæðinu um 10 kp/cm^2 fyrir hverja 4.8 GJ vatns sem upp eru teknir. Þessi þrýstilækkun mun óhjákvæmi-lega skapa aðrennsli til svæðisins, og mun aðrennslið gera vart við sig á þann hátt, að þrýstingur hættir að lækka jafnhrott með vinnslu og gerst hefur. Ástæða er því til að fylgja fast eftir rannsóknnum á þrýstiástandi svæðisins. Ekki er sérstök ástæða til frekari rannsóknna á vatnsleiðni innan svæðisins umfram sjálfsagðar þrýstiprófanir á nýjum vinnsluholum.

Til að standa undir 130-550 MW vinnslu þarf aðrennsli 150-600 l/sek. Engin líkindi eru á að innrennsli í djúplögum aukist verulega, þar sem það er undir miklum þrýstingi fyrir. Aukið aðrennsli verður þá að koma frá efri jarðlögum, og líklegasta þróunin er minnkun á magni affallsvatns en það er 173-200 l/sek eftir því hvað mikið dregur úr gufuuppstreymi. Þetta vatnsmagn er hinsvegar reiknað út frá sama líkani og náttúrulega varmastreymið og því sömu óvissu háð og þegar er lýst.

Að lokum skal þess getið, að raunveruleg orkuvinnsla í varmorkuveri er háð nýtingu í varmaorkuveri, eins og rakið er í skýrslum verkfræðiráðunanna /15/. Í töflu 3.1 er reiknað heildarvarmaafli orkuvers, miðað við orkumarkað með 3500 stunda nýtingartíma, og helstu nýtnitölur sem notaðar hafa verið.

<u>Vinnslugeta</u>	<u>Nýtni í orkuveri, kg/sek/MW</u>			
<u>svæðis, MW</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>10</u>
130	188	125	75	37
550	795	529	317	156

Tafla 3.1 Afl Orkuvers, MW

Matið á vinnslugetunni, og þar með afltöflurnar í töflu 3.1, er þeirri óvissu háð, sem áður greinir.

Nýtni 2-3 kg/sek/MW, er einkennandi fyrir hitaveitu, 5-10 kg/sek/MW er einkennandi fyrir yfirgnæfandi raforkuvinnslu.

Að lokum skal enn ítrekað, að svo virðist að vinnslugeta svæðis verði ekki takmarkandi á afl orkuvers, heldur þrýstilækkun svæðis með vinnslu.



ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆDISTÖÐ

HITAVEITA SUÐURNESJA - SVARTSENGI
VARMASTREYMI JARÐHITASVÆÐIS

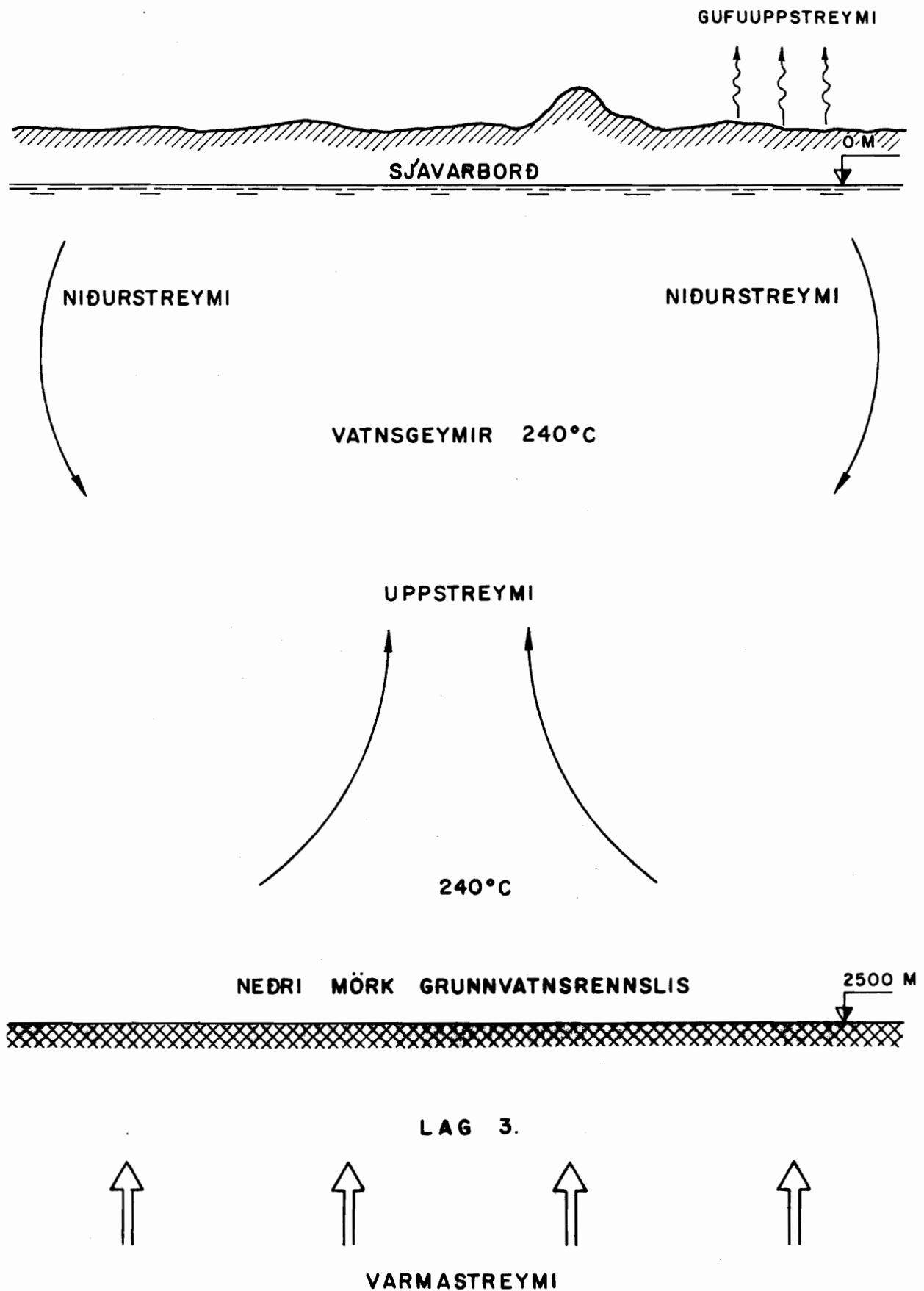
Júni '77 SPK/KaBo

T 210

Svartse.

F16045

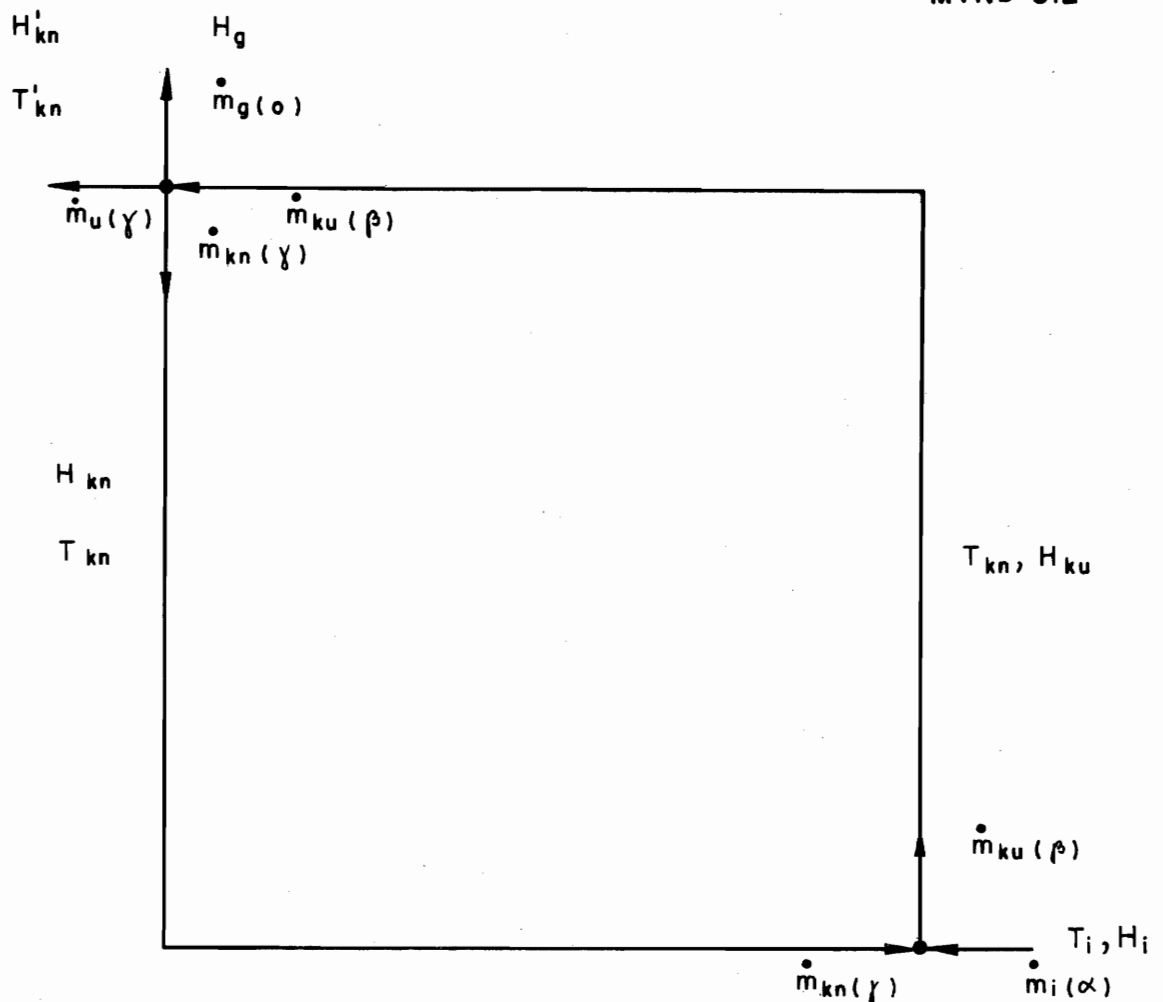
MYND 3.1





HITAVEITA SUÐURNESJA - SVARTSENGI
LÍKAN AF JARÐHITASVÆÐI

MYND 3.2



- \dot{m}_{ku} : MASSASTREYMI UPP Í KONVEKTIONSCELLU
- \dot{m}_{kn} : " NIÐUR Í KONVEKTIONSCELLU
- \dot{m}_i : " FRÁ ÍRENNSLISSVÆÐI
- \dot{m}_g : " GUFU
- \dot{m}_u : " EÐLILEGS AFFALLSVATNS
- α, β, γ : SELTUHLUTFALL MASSASTRAUMA MIÐAÐ VIÐ HREINAN SJÓ
- T_{ku} : HITASTIG Í UPPSTREYMISGREIN
- T_{kn} : " Í NIÐURSTREYMISGREIN
- T_i : " Á ÍRENNSLISVATNI
- T'_{kn} : " ÞEGAR UPPGUFUN HEFUR ÁTT SÉR STAÐ
- H_{ku} : ENTHALPIA Í UPPSTREYMISGREIN
- H_{kn} : " Í NIÐURSTREYMISGREIN
- H_i : " Á ÍRENNSLISVATNI
- H'_{kn} : " VATNS ÞEGAR UPPGUFUN HEFUR ÁTT SÉR STAÐ
- H_g : " GUFUSTREYMI



ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆDISTÖÐ

Júni '77. SPK/KaBo

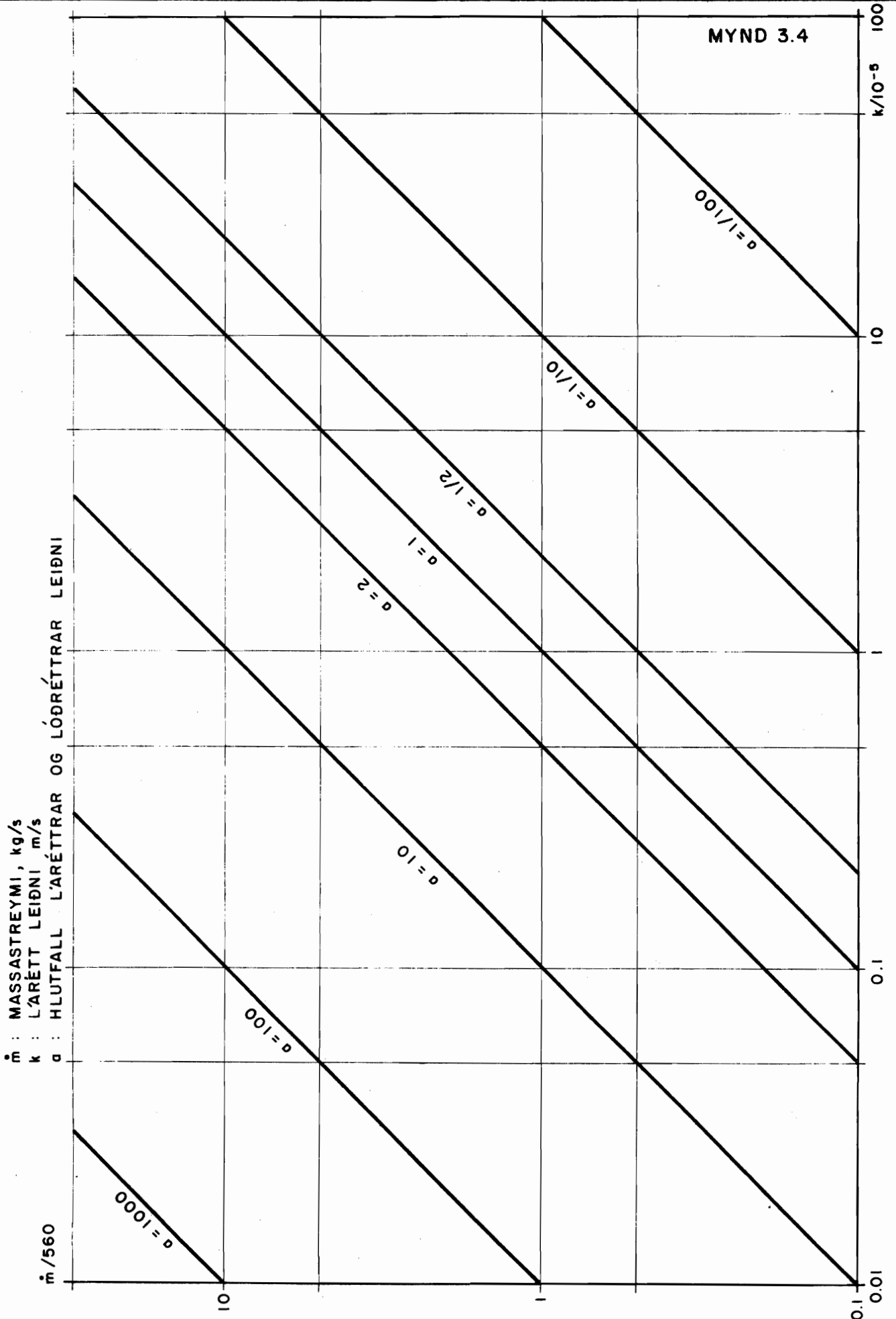
T 208

HITAVEITA SUDURNESJA - SVARTSENGI

Svartse.

VINNSLUGETA JARÐHITASVÆÐIS, NÁTTÚRULEGT VARMASTREYMI.

F 16043





HITAVEITA SUDURNESJA - SVARTSENGI
VINNSLUGETA JARÐHITASVÆÐIS - NÁMUVINNSLA -
'INTERGRANULAR FLOW MODEL'

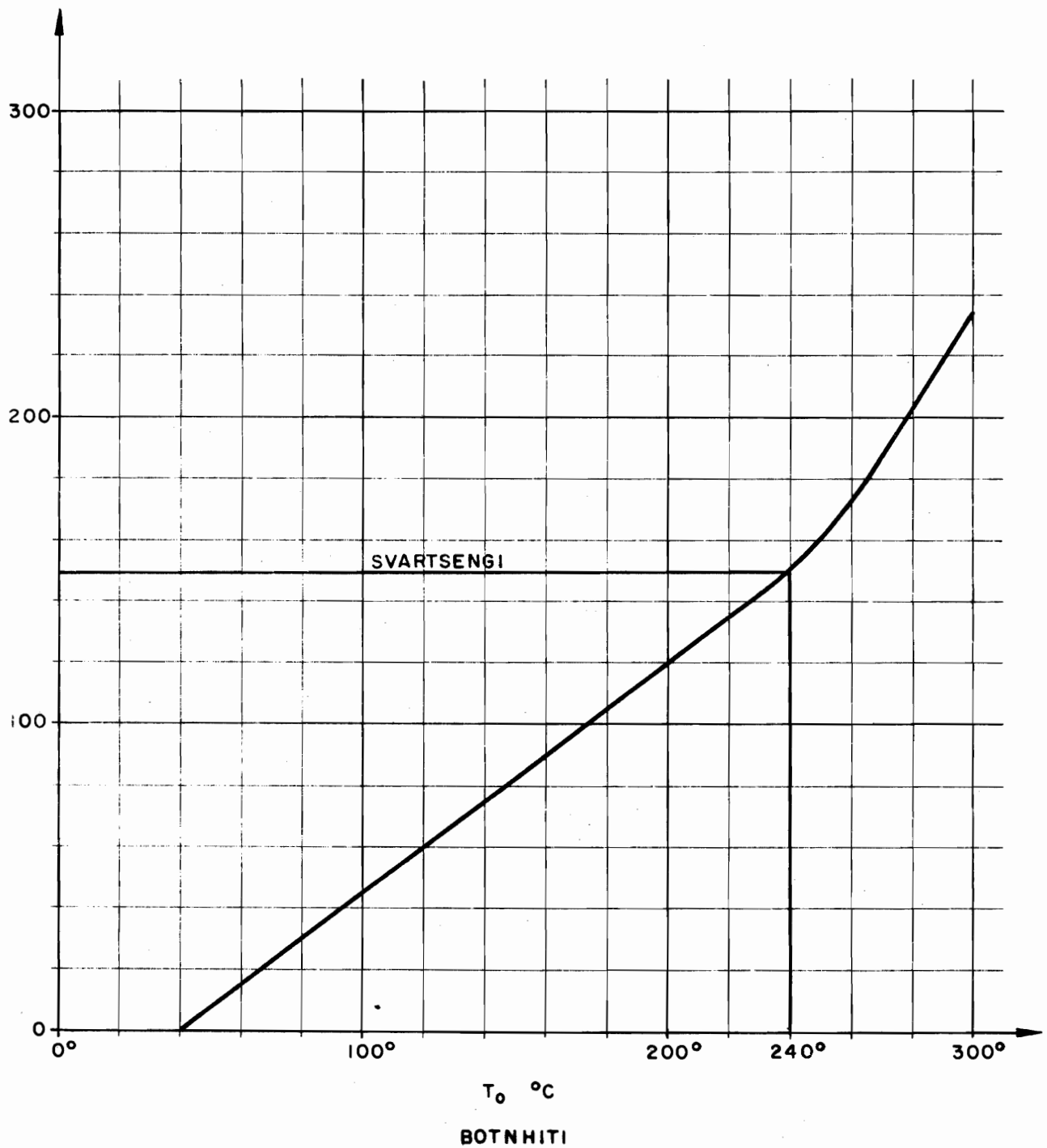
MYND 3.5

FLATARMÁL JARÐHITASVÆÐIS: 4 KM²

PYKKT " 2 KM

UMHVERFISHITASTIG 40°C

ORKA
kWh/m³





ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆÐISTÖÐ

HITAVEITA SUDURNESJA - SVARTSENGI

VINNSLUGETA JARÐHITASVÆÐIS - NÁMUVINNSLA - SPRUNGUSTREYMI

Júni '77 SPK/KaÐo

T 206

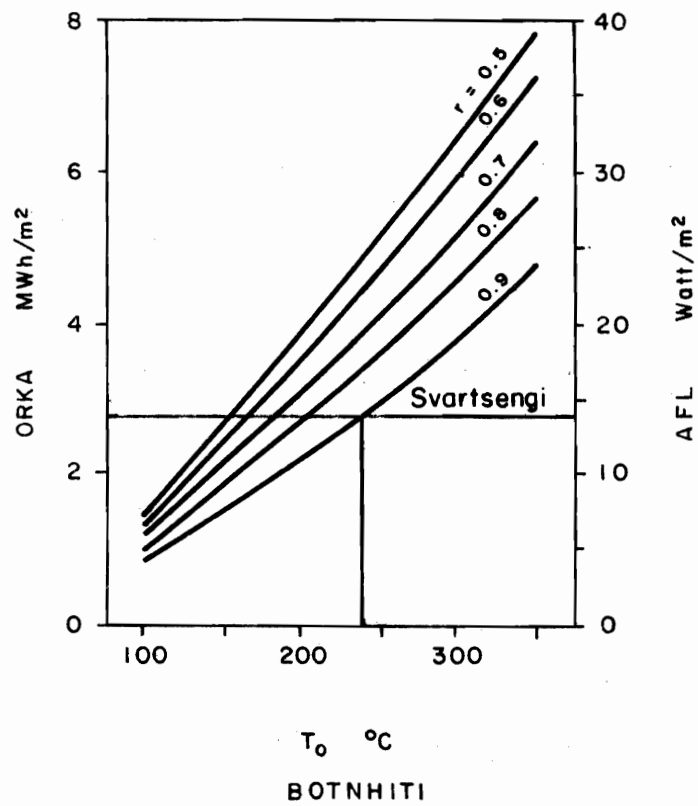
Svartse.

F1604I

MYND 3.6

VINNSLUTÍMI 25 ÁR
UMHVERFISHITASTIG 40°C

r : HLUTFALL LOKAHITA OG
UPPHAFSHITA Á JARÐHITA-
SVÆÐI.



4. AFFALLSVATN

Sem áður segir er eðlilegt affallsvatn þannig til komið, að innrennslið sleppur burt sem gufa og 210°C heitt vatn, á 300-500 m dýpi, en þar er jarðvegur þéttari (með minni lóðréttu leiðni) en neðar í jarðhitasvæðinu.

Töluverð óvissa ríkir um lóðréttu leiðnina og því er eftirfarandi athugun tekin með.

Konvektion á jarðhitasvæðum byggir á að svokölluð Rayleigh tala sé stór

$$Ra = \frac{C_w \cdot \Delta\rho \cdot k \cdot D}{\gamma} > 4\pi^2 \approx 40$$

hér er:

$$C_w = \text{eðlisvarmi vatns cal/kg/}^\circ\text{C}$$

$$\gamma = \text{varmleiðni jarðar} \sim 0,45 \text{ cal/m, }^\circ\text{C, sek}$$

$\Delta\rho$ er mesti eðlisþyngdarmunur í heitu og köldu greininni, miðað við að upphitun og kæling fari fram með snertinu við heitan og kaldan flöt. Miðað við upphitunarhitastig 300°C er $\Delta\rho = 280 \text{ kg/m}^3$ í mesta lagi. D er þykkt jarðhitageymis 2000 m.

Uppstreymissvæðið er áætlað 4 km² sem áður segir og orkutapið í uppstreyminu 75% af heildinni. Ef niðurstreymið á sér það að auki stað í bergi með um 3 sinnum lægri vatnsleiðni þá er niðurrennsliðssvæðið

$$A_n = A_u \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{0,75}{0,25} \cdot 3 = 6 A_u$$

þ.e. niðurstreymis flatarmál alls 28 km², sem gefur varmastraum miðað við enga konvektion:

$$0,45 \cdot 0,120 \cdot 28 \cdot 10^6 =$$

$$1,512 \cdot 10^6 \text{ cal/sek} = 1512 \text{ kcal/sek}$$

Nú fast Nusselttala jarðhitasvæðisins:

$$Nu = \frac{62900}{1512} \approx 42$$

Þetta er nokkuð há Nusselttala: sem von er því svæðið er mjög lekt. Ef reiknað er með að Nu sé í hámarki fæst af mynd 4.1 (Jónas Eliasson /7/), að líklegt flókt hennar er $9 \leq Nu \leq 42$ með tíma-skala

$$\begin{aligned} \tau &\approx 0,2 \frac{C_w \rho D^2}{\lambda} \\ &= 0,2 \frac{1000 \cdot 825 \cdot 4 \cdot 10^6}{0,45} \quad 1,5 \cdot 10^{12} \text{ sek} \\ &\approx 50.000 \text{ ár.} \end{aligned}$$

Ekki er við því að búast, að Nu breytist í náinni framtíð, nema ef vera skyldi vegna vinnslu.

Þessi mörk á Nu gefa lármarks Rayleigh - tölu:

$$Ra = 2000$$

sem gefur mat á k, sem hér er einkennandi fyrir lóðréttu leiðni

$$k = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

sem er töluvert lægra en áður var áætlað, miðmörkin gefa

$$Ra = 7000 \Rightarrow k = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ m/sek}$$

sem er sama og lárretta leiðnin. Ekki verður því sagt, að hér sé um ósamræmi að ræða.

Á mynd 4.2 er þrýstiástand jarðhitasvæðisins borið saman við jafnvægisþrýstiferilinn (mynd 1.7). Kemur í ljós undirþrýstingur á jarðhitasvæðinu vegna upphitunar sem nemur 16 kp/cm^2 . Ennfremur kemur í ljós svæði þar sem þrýstihækkun er minni en svarar til kyrrstæðs vatns (hydrostatisk þrýstihækkun). Á þessu bili er ályktað, að suðan sem kemur fram í holum H-2 og H-3 eigi sér stað. Í kringum þessar holur mun suðan hafa sér eins og punkteraða línan á mynd 4.2, en annarsstaðar, þar sem gufa ekki sést á yfirborðinu er ætlað að þrýstiástandið sé eins og mynd 4.3 sýnir.

Samkvæmt mynd 4.3 byrjar að sjóða á 480 m dýpi ($p = 34 \text{ kp/cm}^2$) og suðan hættir í 200 m ($p = 20 \text{ kp/cm}^2$) en það svarar til suðu $240\text{--}212^\circ\text{C}$ samkvæmt gufutöflum. Þar fyrir ofan verður þá að vera kaldur straumur sem þéttir gufuna og ber hitann burtu.

Meðalástand vatnsins á þessari leið svarar til vatns-gufublöndu, $\rho = 240 \text{ kg/m}^3$, rúmmálshlutfall gufu 72%. Samkvæmt mynd 4.3 er drifkraftur upp, $\Delta p = 6.8 \text{ kp/cm}^2$ en það svarar til $\Delta p/l = 24.3 \text{ kp/cm}^2/\text{km}$.

Samkvæmt mynd 4.4 er leiðni fyrir vatn orðin mjög lítil. Því mun gufan óhjákvæmilega skiljast frá vatninu og það leita niður á jarðhitasvæðið aftur. Samkvæmt útreikningum í kafla 3 fara 400 kg/sek niður til jarðhitasvæðis en um 200 kg/sek affallsvatn á þéttivatn frá gufu halda áfram til yfirborðs sem affallsvatnsstraumur, samkvæmt framanskráðu er þessi straumur á um 200 m dýpi, og upp eftir.

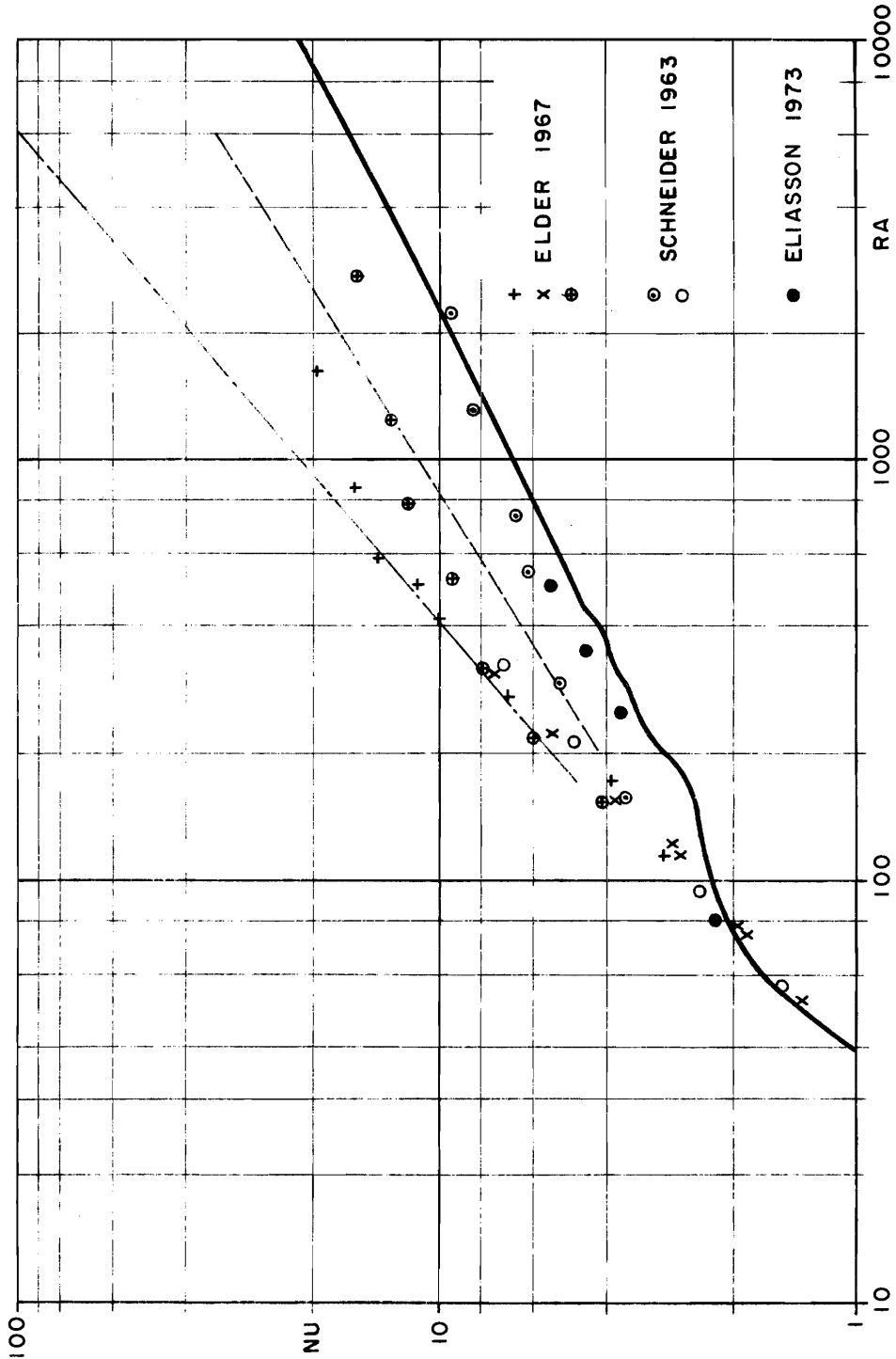
Til að bera burtu hitann (62900 kcal/sek) þarf straum $2.5 \text{ m}^3/\text{sek}$ miðað við upphitun um 25 stig, en það er hitastig H-1 umfram jafnvægisferil. Ljóst er að 200 kg/sek blandast inn í slíkann straum án erfiðleika. Þar sem um lítið annað en ferskvatnsstraum er að ræða mun affallsvatnsstraumurinn valda sjómengun sem er um 5% að meðaltali. Sökum þess að mengunin kemur neðanfrá verður sjómengun í efri grunnvatnslögum væntanlega lítil af þessum sökum, en einhverrar slíkrar mengunar hefur þó orðið vart í vatnsbólum suður og suðvestur af svæðinu, og gæti þar verið komið affallsvatn frá Svartsengi og Eldvörpum, virðast viðnámsmælingara.m.k. benda til þess.

Við vinnsluna verður sú breyting hér á, að vatn er tekið upp á yfirborði, kælt þar og sleppt. Við það mun væntanlega draga eitthvað úr þeim affallsvatnsstraum sem hér segir frá. Hinsvegar mun hliðstætt magn bætast við á yfirborði. Samkvæmt útreikningum verður þetta vatn um 80% sjómengað og mun því leita eitthvað niður í jarðlögin. Heildarbreytingin er því sú, að einhver hluti saltvatns sem áður leitaði inn í grunnvatnið neðan frá og upp leitar nú ofan frá og niður, en jafnvægisstaða er í báðum tilfellum svipuð. Þetta mun því óhjákvæmilega leiða til eitthvað aukinnar saltmengunar í efri grunnvatnslögum. Hægt verður að fylgjast með þessu með því að bora grunnar eftirlitsholur á völdum stöðum, og efnagreina vatn í vatnsbólum reglulega. Vonast er til, að með nánari rannsóknum á blöndunarlagi á Reykjanesskaga, og nánari reikningum með kaldavatnslíkani sjá /16/, megi fá einhverja vitneskju um þetta atriði, en hvor tveggja er liður í kaldavatnsrannsóknum.

Að lokum skal þess getið, að varminn í affallsvatninu mun að verulegu leyti tapast við uppgufun, magn hennar verður um 105 kg/sek. Ef reiknað er með að áður útreiknað gufumagn (27 kg/sek) sleppi út umhverfis holur H-2 og H-3 verða 80 kg/sek eftir sem bætast við eðlilega uppgufun, sem samkvæmt Markúsi Einarssyni /5/, er um 400 mm á ári. Sé reiknað með að uppgufunin eigi sér stað á áðurfengnum 28 km^2 þá er um 118 mm að ræða þannig að heildaruppgufun verður 518 mm á ári, en svo lítil aukning mun varla sjást. Þrátt fyrir þetta sést gufuuppstreymi úr hraununum suðvestur af Svartsengi í góðu veðri, en Eldvörpin eiga væntanlega sinn þátt í því.



MYND 4.1

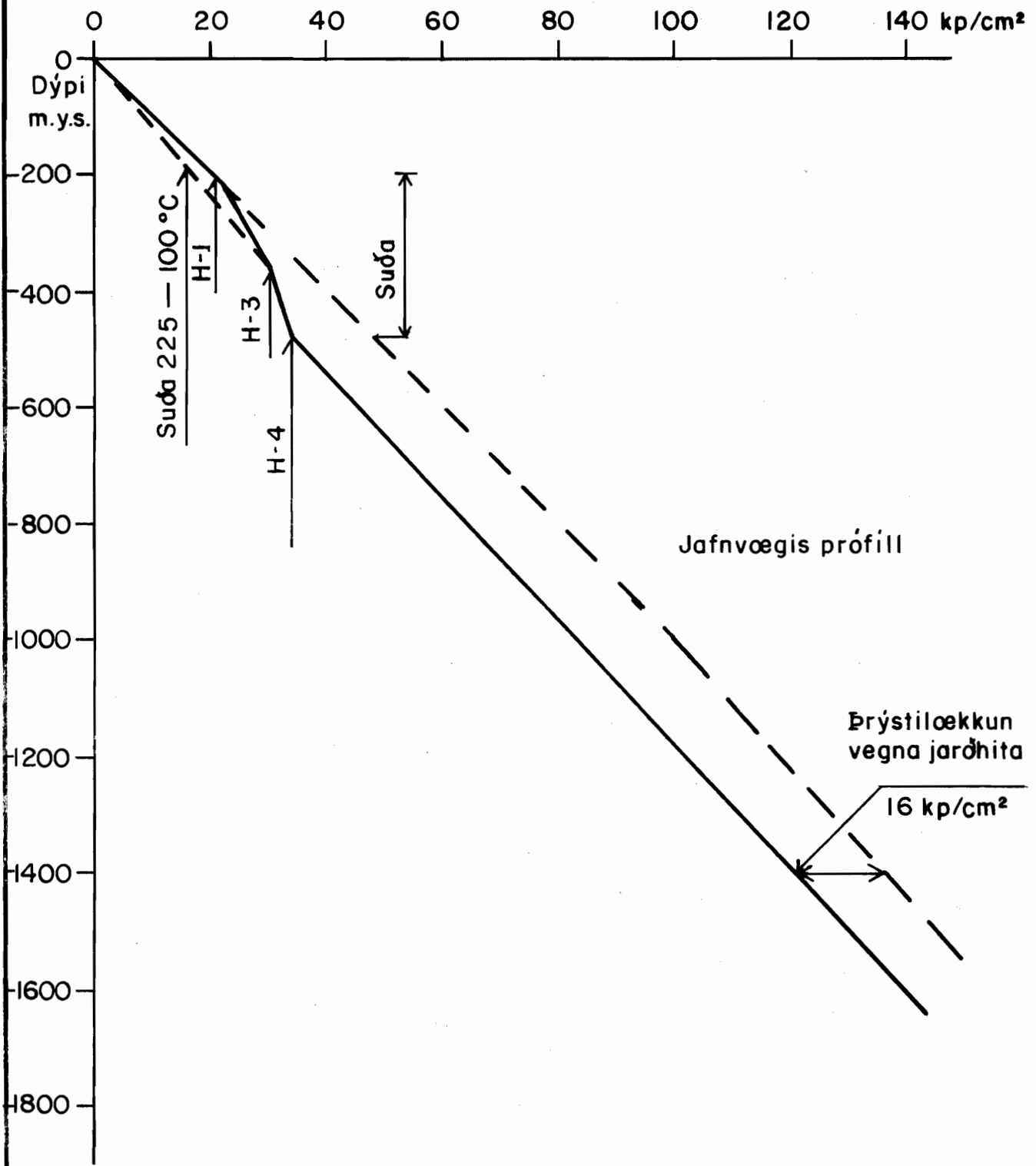




HITAVEITA SUÐURNESJA, SVARTSENGI

Þrýstiástand jarðhitasvæðis

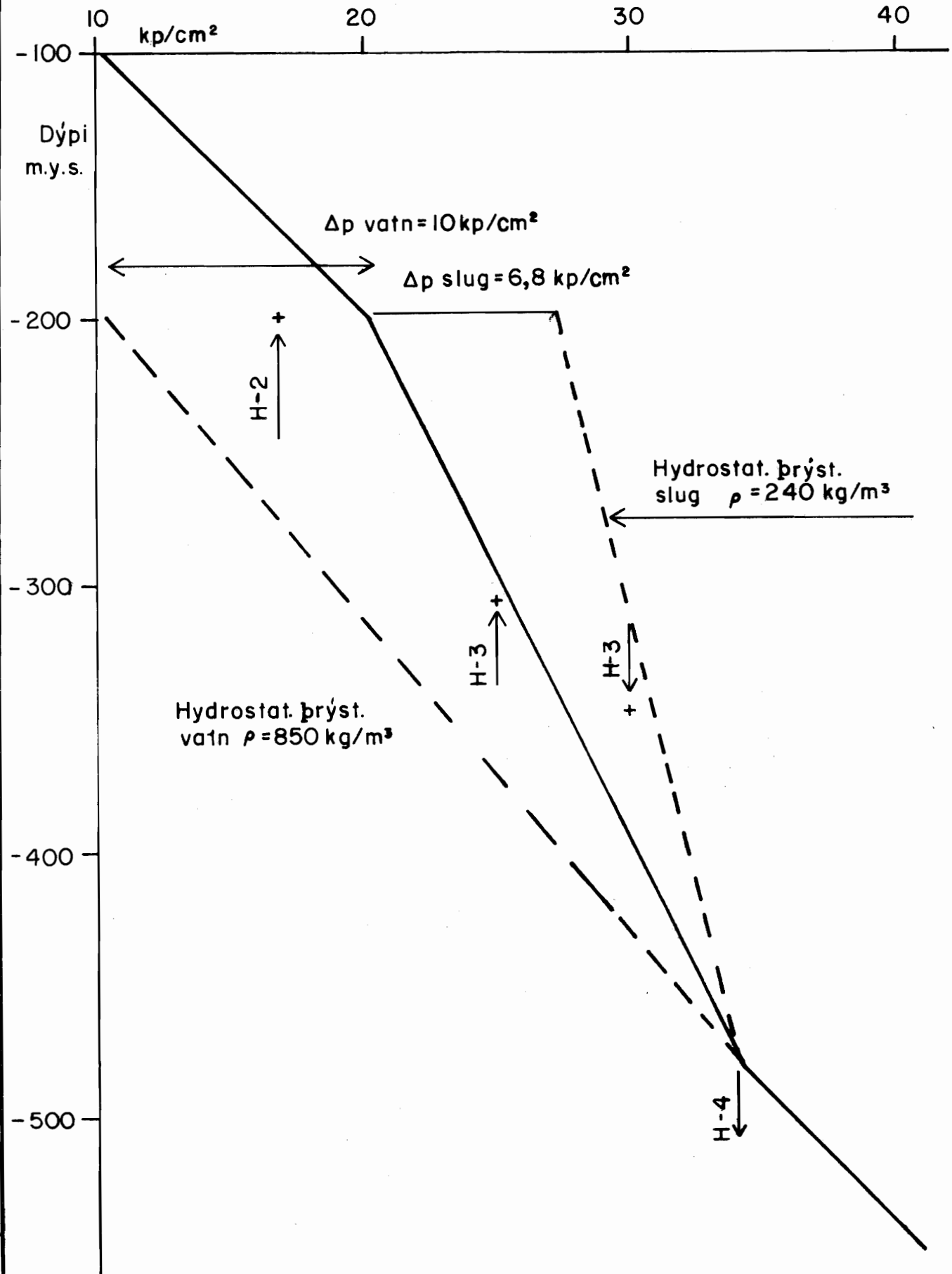
Mynd 4,2





HITAVEITA SUDURNESJA, SVARTSENGI
Þrýstiástand á sudusvoði

Mynd 4,3





ORKUSTOFNUN
STRAUMFRÆÐISTÖÐ

HITAVEITA SÚÐURNESJA - SVARTSENGI
HLUTFALLSLEG LEIÐNI VATNS OG GUFU FYRIR
TVEGGJA FASA STREYMI.

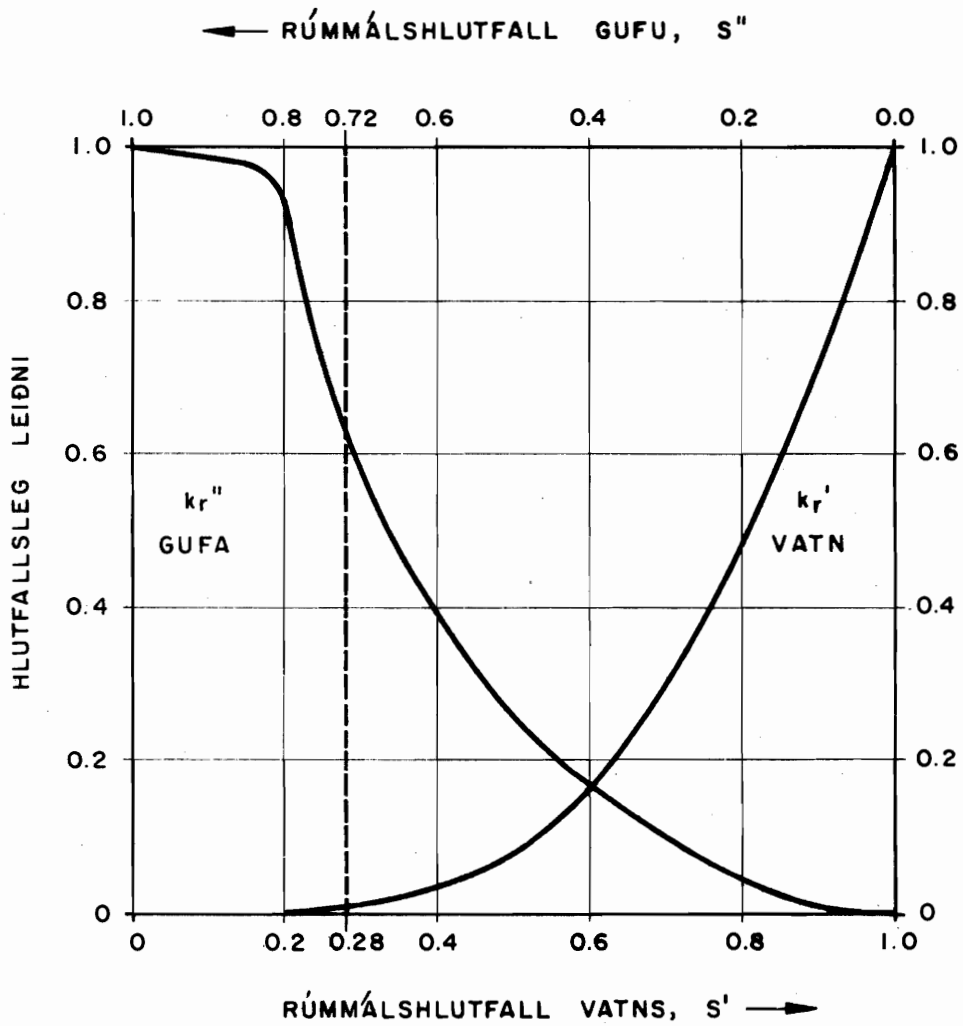
Júni '77 SPK/KaBo

T 213

Svartse.

F16048

MYND 4.4



5. NIÐURSTÖÐUR OG ÁLYKTANIR

Á háhitasvæðinu í Svartsengi lítur út fyrir að vera gegnumrennsli sem nemur 200 kg/sek og þar að auki 400 kg/sek í hringrás. Upphitun verður á 2000 - 2500 metra dýpi vegna innrennslis af um 300 stiga heitu vatni sem er heldur ferskara en sjálfur jarðhitavökvinn, sem er um 63% sjóblandaður. Kæling verður vegna suðu milli 200 og 600 metra dýpis. Vegna suðunnar streyma allt að 27 kg/sek af gufu til yfirborðs en afgangurinn af innrennslinu rennur sem affallsvatn suðvestur á bóginn.

Svæðið er lítið, um 4 - 6 km², en vatnsleiðni innan þess mjög góð. Umhverfis virðist vera töluvert þéttara berg. Náttúruleg varmaframleiðsla reiknaðist 260 MW. Vinnslugeta reiknuð eftir mismunandi aðferðum er metin 130 - 550 MW. 130 MW vinnslugeta svæðis svarar til um það bil 190 MW orkuvers miðað við að orkuverið noti 2 kg/s/MW og orkumarkað sem svarar til 3500 stunda nýtingartíma á ári. Leggja skal áherzlu enn einu sinni á, að sennilega verður það þrýstilækkun á svæðinu við vinnslu, sem takmarkar afl orkuvers, en ekki vinnslugeta svæðis.

Vatnsborðsmælingar og vinnsluprófanir hafa reynst vel til ákvörðunar á vatnsleiðni og geymslueiginleikum jarðhitasvæðisins. Ekki hefur fyllilega tekist að lesa þrýstilækkun í djúplögum úr vatnsborðsmælingum en það verður reynt áfram.

Vegna hinnar góðu leiðni á svæðinu virðist óhætt að hafa vinnsluholur tiltölulega nálægt hver annari. Lagt er til að fjarlægð milli hola verði þó ekki höfð minni en 100 m.

Tekist hefur með þrýstimælingum að sýna fram á þrýstilækkun á svæðinu vegna vinnslu. Sú þrýstilækkun er nokkuð mikil og bendir ekki til þess að aðrennsli hafi aukist. Gerðir útreikningar á þrýstilækkun benda til að hér sé um mjög þýðingarmikið atriði að ræða og er því lagt til að mælingum verði haldið áfram. Talnalegar niðurstöður umræddra út-

reikninga eru hinsvegar enn mjög óöruggar. Vonast er til, að öruggari niðurstöður fáiast með áframhaldandi rannsóknum, og munu þær þá varða væntanleg afköst og heppilega fóðrun á einstökum holum. Athugandi væri að mæla þrýstilækkun svæðis við verulega meiri vinnslu, t.d. eftir að þriðja djúpholan hefur verið boruð. Mætti þá hafa tvær djúpholurnar í blæstri og fylgjast með þrýstibreytingum í þeirri þriðju.

Affallsvatn frá jarðhitasvæðinu leitar suður og suðvestur á bóginn í jarðlögum á 200 metra dýpi og þar fyrir ofan. Er hér um að ræða gegnumrennsli sem gufa sýður úr. Væntanlegar breytingar á þessu ástandi með vinnslu eru þær að affallsvatnsstraumurinn færist ofar og mengar grunnvatn eitthvað meir en verið hefur.

Ofangreindar niðurstöður benda til, að svæðið standi undir þeirri vinnslu sem áætluð er vegna Hitaveitu Suðurnesja, en ástæða er til að halda spart á varmorkunni uns niðurstaða er fengin um væntanlega þrýstilækkun vegna vinnslu. Verði þær niðurstöður mjög óhagstæðar ber að íhuga skifti frá námuvinnslu yfir í dípólvinnslu.

Rétt er að leggja áherzlu á til skýringar að undanritaðar megawatttölur byggjast á varmorku jarðhitasvæðisins og þarf því að vera gott aðrennsli fyrir vökvann til að hægt sé að ná þessari varmaorku. Ef þrýstilækkun svæðis við vinnslu veldur því, að suða færist niður fóðrorð og jafnvel út í berg tregast innrennsli og kalkútfellingar geta hafist og þar af leiðandi næst ekki sú varmaorka, sem fyrr var getið. Vinnslugeta svæðis er skilgreind í þessari skýrslu sem varmaorka svæðis, sem hægt er að taka miðað við ákveðinn vinnslustuðull (recovery factor), sjá 3. kafla. Vitaskuld væri einnig hægt að gefa upp vinnslugetu svæðis, þar sem tillit hefur verið tekið til þrýstilækkunar og kæmi það þá fram í breyttum vinnslustuðli, en þar sem mat á hoðum byggist ekki á mælingum þótti rétt að aðgreina þessa tvo þætti. P.e.a.s. Afl orkuvers ákveðst af, 1) vinnslugetu svæðis miðað við ágiskaðan meðal vinnslustuðull, og 2) þrýstilækkun svæðis við vinnslu. Eins og svo oft segir er það 2) sem takmarkar afl orkuvers í Svartsengi.

Rétt er að geta þess að lokum, að nokkur þeirra líkana, sem sett eru fram í þessari skýrslu byggjast á mælingum, þar sem frávik þau sem líkanið á að skýra fellur nálægt óvissumörkum mælinganna. Þetta veikir vitaskuld grundvöllinn, en hann styrkist aftur á móti af því að hér er ekki um mælingu á einni stærð að ræða, heldur margar mælingar á ólíkum stærðum.

6. HEIMILDASKRÁ

1. Rannsókn á jarðhitasvæðinu í Svartsengi. Stefán Arnórsson, Valgarður Stefánsson, Stefán G Sigurmundsson, Gestur Gíslason, Karl Grönvold, júní 1975. Orkustofnun.
2. Rafleiðnimælingar í Eldvörpum og Svartsengi. Valgarður Stefánsson, Lúðvík S Georgsson, Rúnar Sigfússon, júlí 1976. Orkustofnun.
3. Crustal Structure of Iceland from Explosion Seismology. Guðmundur Pálmason, 1971. Vísindafélag Íslendinga, XL.
4. Íslensk Vötn. Sigurjón Rist, 1956. Raforkumálastjóri, Vatnamælingar.
5. Evaporation and Potential Evapotranspiration in Iceland. Markús Einarsson, 1972, Veðurstofa Íslands.
6. Groundwater Systems in Iceland. Brafi Árnason, 1976. Vísindafélag Íslendinga. XLII.
7. Convective Ground Water Flow. Jónas Elíasson, 1973, ISVA, Tækniháskóli Danmerkur.
8. Greinargerð um Aflmælingar á Gufuholum. Sveinbjörn Björnsson, Sigurður Benediktsson, júní 1968. Orkustofnun.
9. Feasibility Report for the Olkaria Geothermal Project. Des. 1976, SVECO, VIRKIR, United Nations-Government of Kenya.
10. The Hydrogen-Water Isotope thermometer Applied to Geothermal Areas in Iceland. Brafi Árnason, Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, (óútgefið handrit fengið hjá höfund).

11. On the Temperature of Water Flowing through Fractures. Gunnar Böövarsson, apríl 1969, Journal of Geophysical Research Vol 74, No 8.
12. Thermal Problems in the Siting of Reinjection Wells. Gunnar Böövarsson 1972, Geothermics Vol 1, No 2.
13. The Exergy of Thermal Water. Gunnar Böövarsson, sept. 1972, Geothermics, Vol 1, No 3.
14. Geothermal Resource Energetics, Gunnar Böövarsson, sept. 1974, Geothermics Vol 3, No 3.
15. Varmaorkuver við Svartsengi. Fyrirkomulag og áfangar. Fjarhitun hf, Orkustofnun, jarðhitadeild, Rafteikning hf, Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns. Maí 1976. Hitaveita Suðurnesja.
16. Hitaveita Suðurnesja. Ferskvatnsrannsóknir. Áfangaskýrsla fyrir árið 1976. Freyr Þórarinsson, Freysteinn Sigurðsson, Guttormur Sigbjarnarson, desember 1976. Orkustofnun, Hitaveita Suðurnesja.
17. A Hydrological Model for the Flow of Thermal Water in Southwestern Iceland with Special Reference to the Reykir and Reykjavik Thermal Areas. Jens Tómasson, Ingvar Birgir Friðleifsson, Valgarður Stefánsson. Second UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Proceedings, Lawrence Berkeley Lab., Univ. of California, 1975.