

SKÝRSLA  
UM  
RANNSÓKNIR Á JARÐHITA  
í  
HENGLI, HVERAGERÐI OG NÁGRENNI.  
ÁRIN 1947-1949

SEINNI HLUTI

REYKJAVÍK  
MARZ, 1951

**SKÝRSLA**  
**UM**  
**RANNSÓKNIR Á JARÐHITA**  
**i**  
**HENGLI, HVERAGERÐI OG NÁGRENNI.**  
**ÁRIN 1947-1949**

**SEINNÍ HLUTI**

**REYKJAVÍK**  
**MARZ, 1951**

F O R M Á L I.  
-----

Jarðborunardeild raforkumálastjórnar ríkisins leggur hérmeð fram síðari hluta: "Skýrslu um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði og nágrenni, árin 1947 - 1949". Er þá lokið við þessa skýrslugerð að sinni.

Efnisval er að nokkru leyti frábrugðið því, sem í fyrstu var ráðgert. Hin eðlisfræðilegu atriði gufuvinnslunnar eru aðalefni þessa hluta skýrslunnar, en greinargerð fyrir hagnýtingarmöguleikum jarðhitans í efnaðnaði hefur verið látin falla niður. Bæði málin reyndust yfirgrípsmeiri en gert hafði verið ráð fyrir, og var því ákveðið að gera sérstaka skýrslu um iðnaðarmöguleikana, og hefur Baldur Lindal B.S. gengið frá henni.

Þessi síðari hluti Hengil-skýrslunnar er eingöngu saminn af undirrituðum, og er rétt að taka fram, að hér eru aðeins túlkaðar skoðanir undirritaðs á málunum, en að sjálfsögðu má gera ráð fyrir, að ágreiningur geti verið um ýmis atriði.

Reykjavík, 15. marz 1951.

*Gunnar Þaísson*

E f n i s y f i r l i t.

14.)	<u>Boranir fyrir heitu vatni</u> .....	Bls.	129
1)	Blágrýtismyndunin.....	"	130
a)	Laugaland í Hörgárdal.....	"	131
b)	Kristnes og Reykhús í Eyjafirði.....	"	132
c)	Ólafsfjörður.....	"	133
d)	Laugaland í Eyjafirði.....	"	134
e)	Áshildarholtsvatn við Sauðárkrók.....	"	135
2)	Vatnsvinnslan á svæðum blágrýtismyndunarinnar.....	"	136
a)	Sambandið milli artesisks þrýstings og vatnsmagns.....	"	137
b)	Átlanir um heildarvatnsmagn jarðhitasvæða.....	"	143
c)	Sambandið milli hita og vatnsmagns lauga.....	"	144
d)	Kæling laugavatsins á leiðinni til yfir- borðsins.....	"	146
3)	Boranir og vatnsvinnsla á svæðum grágrýtis- myndunarinnar.....	"	151
a)	Mosfellsdalur.....	"	152
b)	Laugadælir og Þorleifskot í Hraungerðis- hreppi í Árnessýslu.....	"	153
c)	Hlemmiskeið og Brautarholt á Skeiðum.....	"	156
4)	Boranir og vatnsvinnsla á svæðum brúgrýtis- myndunarinnar.....	"	156
a)	Reykjavellir í Biskupstungum.....	"	157
b)	Grafarbakki og Flúðir í Hrunamannahreppi.....	"	158
15.)	<u>Boranir fyrir jarðgufu</u> .....	"	162
1)	Varmgjafinn.....	"	162
2)	Breyting hitans með dýptinni.....	"	165
a)	Vatnsaðrennsli.....	"	165
b)	Gufuaðrennsli.....	"	168
c)	Samanburður svæða með vatnsaðrennsli við svæði með gufuaðrennsli.....	"	170
3)	Gufuvinnslumöguleikar.....	"	172
I)	Svæði með vatnsaðrennsli.....	"	172
a)	Gufuvinnsla við artesiskan þrýsting.....	"	172
b)	Gufuvinnsla við gufuþrýsting vatnsins.....	"	174
c)	Gufuvinnsla úr gljúpu bergi fylltu vatni.....	"	175
II)	Svæði með gufuaðrennsli.....	"	178
a)	Gufuvinnsla úr gufuæðum.....	"	178
b)	Gufuvinnsla úr gljúpu bergi fylltu gufu.....	"	180
4)	Áhrif gufuvinnslunnar á jarðhitasvæðið.....	"	185
16.)	<u>Gufu- og vatnsvinnsla á Hengilsvæðinu</u> .....	"	188
1)	Jarðfræði svæðisins.....	"	188
2)	Hiti og magn aðrennslis Suðursvæðisins.....	"	190
3)	Gufuvinnslumöguleikar Suðursvæðisins.....	"	194
4)	Aðrir hlutar Hengilsvæðisins.....	"	200
17.)	<u>Straumviðnám í borholum</u> .....	"	202
1)	Almennt um straumviðnám í pípum.....	"	203
2)	Straumviðnám í lögnum pípum við lítinn hraða.....	"	204
3)	Straumviðnám við mikinn hraða.....	"	206
4)	Straumviðnám rakkur gufu.....	"	215

5)	Straumviðnám rakkar gufu við litla hraða.....	Bls.	228
6)	Straumviðnám í misviðum og ófóðruðum holum.....	"	229
7)	Straumviðnámíð í berginu og gufumagn við mismunandi mótþrýsting.....	"	232
8)	Gufumagnsmælingar.....	"	235
9)	Val holuvíddar við boranir fyrir jarðgufu á Hengilsvæðinu.....	"	240
18.)	<u>Bortækni</u> .....	"	242
1)	Áætlun um fóðrun.....	"	242
2)	Aðstæður við jarðboranir á Hengilsvæðinu.....	"	243
3)	Borun á móti þrýstingi.....	"	244
4)	Val borvéla til gufuborana á Hengilsvæðinu.....	"	247
19.)	<u>Hagnýting jarðgufunnar</u> .....	"	252
1)	Hitaveita frá Hengli til Reykjavíkur.....	"	252
2)	Framleiðsla raforku á Suðursvæðinu.....	"	254
3)	Hagnýting jarðhita í iðnaði.....	"	259
20.)	Niðurstöður og útlit.....	"	260

#### 4. Kafli.

### BORANIR FYRIR HEITU VATNI.

Undanfarna rúma 2 áratugi hafa boranir fyrir heitu vatni verið framkvæmdar á 36 stöðum hér á landi. Alls hafa verið boraðar um 175 holur, og samanlögð lengd þeirra mun vera tæplega 34 km. Árangurinn hefur verið h.u.b. 620 l/sek af vatni, en meðalhiti þess mun vera nálægt 87°C.

Þessar boranir hafa leitt í ljós ýmsar staðreyndir, sem mikla þýðingu hafa fyrir alla framtíð jarðhitamálanna hér á landi; ekki aðeins fyrir komandi heitavatsboranir, heldur má einnig draga af þeim ályktanir, sem mikilsverðar eru fyrir hinar fyrirhuguðu gufuboranir í Hengli og annars staðar.

Tilgangur þessa kafla er að draga saman nokkrar helztu niðurstöður heitavatsborananna, til þess að þær megi nota til grundvallar þeim athugunum og ályktunum, sem síðar verða gerðar varðandi gufuboranirnar. Verður hér að miklu leyti stuðzt við boranir jarðborunardeildarinnar, en hún hefur borað fyrir heitu vatni á 24 stöðum. Af ýmsum ástæðum þykir rétt að fara all nákvæmlega í sakirnar, og verður því einnig dregið á ýmis atriði, sem frekar hafa sögulega en tæknilega þýðingu.

Bergmyndunum Íslands er venjulega skipt í 3 flokka eftir aldri og gerð, þ.e. blágrýtismyndun, grágrýtismyndun og brúngrýtismyndun. Grágrýtið er að vísu aðeins afbrigði blágrýtis (basalt), en þó hefur þessi skipting rutt sér til rúms meðal íslenskra jarðfræðinga.

Boranir verða hér flokkaðar eftir þeim bergmyndunum, sem borað hefur verið í.

1) Blágrýtismyndunin.

Blágrýtismyndunin er elzt framangreindra berglagaflokka; hún er ártertier og myndar undirstöðu landsins. Mikill hluti fjallanna á Vestur- Norður- og Austurlandi er gerður úr þessu bergi, en auk þess er talið, að hún liggja einnig undir hinum yngri myndunum á miðbiki landsins og Suðurlandi.

Í blágrýtismynduninni skiptast á hraunlög úr dökku blágrýti og þunnt set. Báðar þessar bergtegundir eru mjög þéttar og því vel vatnseldar. Hin einstöku hraunlög eru að vísu nokkuð sprungin, en sprungurnar eru yfirleitt fylltar. Hinn lóðrétti leki óbrotinna spildna er því lítill. Botn einstakra hraunlaga getur hinsvegar verið all hrufóttur og holóttur, og eru þar einhverjir möguleikar fyrir láréttum vatnsstraumum um spildurnar; þessi lárétti leki er vafalaust ekki mikill, en hann er þó meiri en lóðrétti lekinn.

Þetta á þó aðeins við um óbrotnar spildur. Blágrýtismyndunin er klofin af ótal brotlínum og blágrýtisgöngum, og hafa á þennan hátt á stöku stað myndast lóðréttar rásir, sem jafnan ná í gegnum alla myndunina, eða a.m.k. mikinn hluta hennar. Sumar þeirra eru að vísu fylltar, en aðrar eru vatnsgengar, og það er einmitt þar, sem heita vatnið leitar upp til yfirborðsins. Á Norður- og Vesturlandi er mikill fjöldi lauga og hvera, sem orðið hafa til fyrir þessar rásir.

Þannig eru flestar laugar í Eyjafirði við ganga. Í Skagafirði er hinsvegar mikil jarðhitalína frá Hofi norður á Reykjadisk, og mun þar vera um brotlínu að ræða. <sup>1)</sup>

---

<sup>1)</sup> TRAUSTI EINARSSON: Ueber das Wesen der heißen Quellen Islands. Vísindafélag Íslendinga. Reykjavík 1942.

Sami:

Ueber eine Beziehung zwischen heißen Quellen und Gängen. Vísindafélag Íslendinga. Greinar 1. 2. 1937.

Framangreint ásigkomulag blágrýtismyndunarinnar er að einu leyti mjög þýðingarmikið. Vegna þess hve sjálft bergið er þétt, eru veggir hinna lóðréttu rása vel vatnsheldir, og heita vatnið getur því verið undir talsverðum artesiskum þrýstingi. Þessi þrýstingur er raunverulega undirstaða allrar vinnslu heits vatns úr borholum.

Þéttleikinn hefur einnig þá þýðingu, að boranir eru yfirleitt árangurslausar nema því aðeins, að holurnar skeri sjálfar uppstreymisæðarnar við gangana eða á brotlínusvæðunum. Staðsetning holanna er því oft erfið og krefst talsverðrar nákvæmni.

Hér á eftir skal greint frá helztu heitvatnsborunum, sem framkvæmdar hafa verið á svæðum blágrýtismyndunarinnar, og er reynsla þeirra í samræmi við þá mynd, sem hér hefur verið dregin upp.

#### a) Laugaland í Hörgárdal.

Á árunum 1941 og 1942 lét bæjarstjórn Akureyrar bora fyrir heitu vatni að Laugalandi í Hörgárdal. Í árfarveginum fyrir neðan bæinn er lítil volgra, 47°C heit. TRAUSTI EINARSSON, sem var ráðunautur bæjarstjórnarinnar, athugaði staðinn og gerði meðal annars mælingar á deklination við laugina. Komst hann að þeirri niðurstöðu, að hún stæði í sambandi við gang, og staðsetti hann holuna með tilliti til þess. Á rúmlega 100 m. dýpt skar holan ganginn, og gaf þá um 3,5 l/sek af 77°C heitu vatni. Síðan var borað niður á 375 m. dýpt, en vatnsmagnið jókst ekki. Á botni mældust 85°C.

Í byrjun ársins 1946 var artesiskur þrýstingur holunnar mældur, og reyndist hann um 45 m. vatnssúlu. Holan var nokkurn tíma að ná þessum þrýstingi, og þegar hún var opnuð á ný, gaf hún stutta stund um eða yfir 15 l/sek, en vatnsmagnið minnkaði á fáum klst. í 3,5 l/sek. Hinn háí artesiski þrýstingur virðist hafa þrýst vatni upp í æðar og glufur í ganginum í hliðinni fyrir ofan holuna, og hefur



þar safnast nokkur forði, sem síðan ruddist upp úr henni, þegar hún var opnuð á ný. Veggir gangsins virðast því mjög þéttir.

b) Kristnes og Reykhús í Eyjafirði.

Á árinu 1943 hóf Kristneshælið boranir fyrir heitu vatni við Kristneslaugar. Samkvæmt athugun TRAUSTA EINARSSONAR eru laugarnar tengdar við breiðan gang, sem orsakar mikla segulskekkju. Gangurinn hallast um  $7^\circ$  til austurs.

Var fyrst gerð tilraun til þess að bora eftir miðju hans, þ.e. með  $7^\circ$  halla, en þetta reyndist ókleyft af tæknilegum ástæðum, og var hætt við holuna í 75 m. dýpt. T.E. taldi þá rétt að bora fyrir vestan laugarnar þannig, að holan skæri ganginn á h.u.b. 100 m. dýpt. Af tæknilegum ástæðum var þó horfið að því ráði að bora milli lauganna, og var því borað mjög ofarlega niður úr ganginum. Holan varð 407 m. djúp og gaf ekkert vatn. Á botni hennar mældust  $54^\circ\text{C}$ , en hitastigullinn var þar  $1/16^\circ\text{C}/\text{m}$ .

Það virðist mjög sennilegt, að holan hafi verið staðsett um 20 m. of austarlega. Þessi útkoma ber einnig vott um mjög þétt berg. Enda þótt borað hafi verið mjög nálægt austurvegg gangsins, fékkst ekkert vatn.

Við Reykhúslaug hafa 3 holur verið boraðar. Á þeim tíma, sem þessar boranir voru framkvæmdar, var ekki mögulegt að greina nein merki um gang við laugina, og varð því að staðsetja holurnar nokkuð af handahófi.

Tvær af holunum gáfu vatn; önnur rúmlega einn l/sek af  $76^\circ\text{C}$  heitu vatni frá 125 til 145 m. dýpt, en hin um  $\frac{1}{2}$  l/sek af  $62^\circ\text{C}$  heitu vatni frá 125 m. dýpt. Lauslegar athuganir á borkjörnunum frá fyrri holunni bentu til þess, að hún hefði skorið gang á því

svæði, sem vatnið kom. Sumarið 1950 voru gerðar segulmælingar við Reykhúslaug með nákvæmum tækjum, og sýndu þær greinilega gang við laugina, og hefur fyrri holan að líkindum skorið miðju hans á h.u.b. 140 m. dýpt.

### c) Ólafsfjörður.

Í Skeggjabrekukdal í Ólafsfirði var óveruleg volgra, sem gaf um einn l/sek af h.u.b. 50°C heitu vatni. Fyrir ráð TRAUSTA EINARSSONAR létu Ólafsfirðingar grafa brunn við hana, og reyndist kleift að dæla um 12 l/sek af 50°C heitu vatni ú honum. Árið 1944 gerðu þorpshúar hitaveitu til þorpsins frá brunninum og notuðu einfalda sogpípu til þess að dæla úr honum. Við dælingu að staðaldri lækkaði hiti vatnsins þó í 44°C, og mun það hafa stafað af innstreymi kalds vatns í brunninn. Varð því nauðsynlegt að framkvæma boranir til þess að ná artesisku vatni.

Sumarið 1947 var svæðið athugað, og voru m.a. gerðar segulmælingar og mælingar á jarðvegsviðnámi. Jarðfræðilegar aðstæður bentu til þess, að jarðhitasvæðið stæði í sambandi við gang eða gangakerfi, en þetta var þó ekki sjáanlegt af segulmælingunum. Hinsvegar var jarðvegsviðnámið óvenju lágt, og með tilliti til þess var talið rétt að freista þess að bora við gangakerfið.

Sama sumar voru gerðar þrjár holur í dalnum; ein þeirra mistókst af bortæknilegum ástæðum, en hinar voru 40 m. og 45 m. djúpar. Úr þeirri dýpri koma 1,5 l/sek af 51°C heitu vatni, en úr þeirri grynri um 4,5 l/sek af 52°C heitu vatni. Báðar munu hafa skorið gang, en vatnið fæst frá 20m. dýpt niður á botn.

Sumarið 1948 voru enn gerðar athuganir í dalnum og ákveðið að bora um 50 m. fyrir norðan framangreindar holur. Voru þar gerðar 2 holur, 50 m. djúpar. Koma úr annari um 10 l/sek af

57°C heitu vatni, en hinni um 4 l/sek af 56°C heitu vatni. Hvorug þeirra virðist hafa skorið gang, en vegna segulmælinga, sem gerðar voru þetta sumar, var ekki grunlaust, að þær væru mjög nálægt gangi.

Athyglisvert er, að þessar seinni holur virtust ekki hafa merkjanleg áhrif á fyrri holurnar, og hiti allra hola hefur haldizt óbreyttur frá byrjun.

Artesiskur þrýstingur var mældur í þeirri holu, sem gefur 10 l/sek, og reyndist hann vera um 5 m. vs. Þetta er tiltölulega lág tala, en gæta verður þess, að botn Skeggjabrekkudals er í 70 m. h.y.s., og athuganir á borkjörnum sýndu óvenjulegt berg, og skýrir það hið tiltölulega lága jarðvegsviðnám.

#### d) Laugaland í Eyjafirði.

Að Laugalandi er um 55°C heit laug, sem gefur um 1,5 l/sek af vatni. Auk þess fæst nokkuð magn úr brunni, sem grafinn var 10 m. austan við laugina. Báðir uppstreymisstaðir eru tengdir við gang eða gangakerfi, sem veldur mikilli segulskekkju, og var af þeim ástæðum mjög auðvelt að átta sig á jarðfræðilegum aðstæðum. Voru í því skyni gerðar ýtarlegar mælingar sumarið 1947.

Sama sumar voru einnig gerðar mælingar á jarðvegsviðnámi, en niðurstöður þeirra voru óglöggar og báru vott um lítinn jarðhita.

Vegna fyrirhugaðra bygginga á staðnum var óskað eftir aukingu vatnsmagnsins um  $\frac{1}{2}$  l/sek. Vegna þess hve jarðfræðilegar aðstæður reyndust auðskildar, taldi jarðborunardeildin rétt að freista þess að bora, enda þótt niðurstöður viðnámsmælinganna hefðu ekki verið hagstæðar.

Alls voru boraðar 4 holur án árangurs. Þrjár þeirra eru í ganginum, og er sú dýpsta 80 m. djúp. Á botni hennar mældust aðeins 34°C, og er það furðulega lágt, þar sem hún var boruð ská-

hallt inn undir laugina. Við rannsókn á borkjörnum kom í ljós, að gangurinn er óvenju þéttur; sprungur eru sárafáar og sýnilega allar fylltar. Hinn lági berghiti og þéttleiki bergsins skýra niðurstöður viðnámsmælinganna. Uppstreymissvæðið í ganginum viððist því vera mjög takmarkað.

#### e) Áshildarholtsvatn við Sauðárkrók.

Í norðvesturhorni Áshildarholtsvatns eru óveruleg merki um jarðhita. Var þar lítil pollur, sem ekki lagði að vetri til, og einnig voru í frostatíð óvenjulegar vakir á vatninu í námunda við ströndina.

Sumarið 1947 var svæðið athugað með viðnámsmælingum, og báru þær vott um all útbreiddan jarðhita undir staðnum. Virtist þarna vera um 40 m. þykkt set, og dreifðist heitt vatn um það á all stóru svæði. Var því ákveðið að hefja boranir.

Var fyrst gerð um 30 m. djúp hola á ströndinni, og gaf hún tæplega 3 l/sek af 51°C heitu vatni. Þar sem mælingarnar sýndu mestan hita undir vatninu í 50 til 100 m. fjarlægð frá ströndinni, var ákveðið að láta gera hólma í vatninu og bora þar. Þessar boranir voru framkvæmdar haustið 1948 og í byrjun ársins 1949. Tvær holur voru gerðar á hólmanum, og gáfu þær samtals um 20 l/sek. af 69°C heitu vatni frá 115 til 135 m. dýpt. Artesiskur þrýstingur þeirra reyndist um 15 til 17 m. vs.

Þessar holur höfðu engin áhrif á fyrstu holuna, og hiti þeirra hefur haldizt óbreyttur frá byrjun.

Þessi jarðhitastaður er á jarðhitalínunni frá Hofi norður á Reykjadisk, en hér er að líkindum um brotlinu að ræða. Við Áshildarholtsvatn er berggrunnurinn hulinn 30 til 40 m. þykku seti, og er því erfitt að átta sig á jarðfræðilegum aðstæðum. Á s.l.

sumri voru þarna gerðar nákvæmar segulmælingar, en niðurstöður þeirra eru ekki glöggar.

## 2) Vatnsvinnslan á svæðum blágrýtismyndunarinnar.

Burt séð frá Laugalandi í Eyjafirði, hefur á framangreindum stöðum tekizt að auka vatnsmagnið með borunum - sums staðar all verulega það verður eðlilega eitt veigamesta atriðið í jarðhitarannsóknum að gera sér grein fyrir orsökum aukningarinnar.

Vatnsvinnsla borholanna getur verið með þrennu móti:

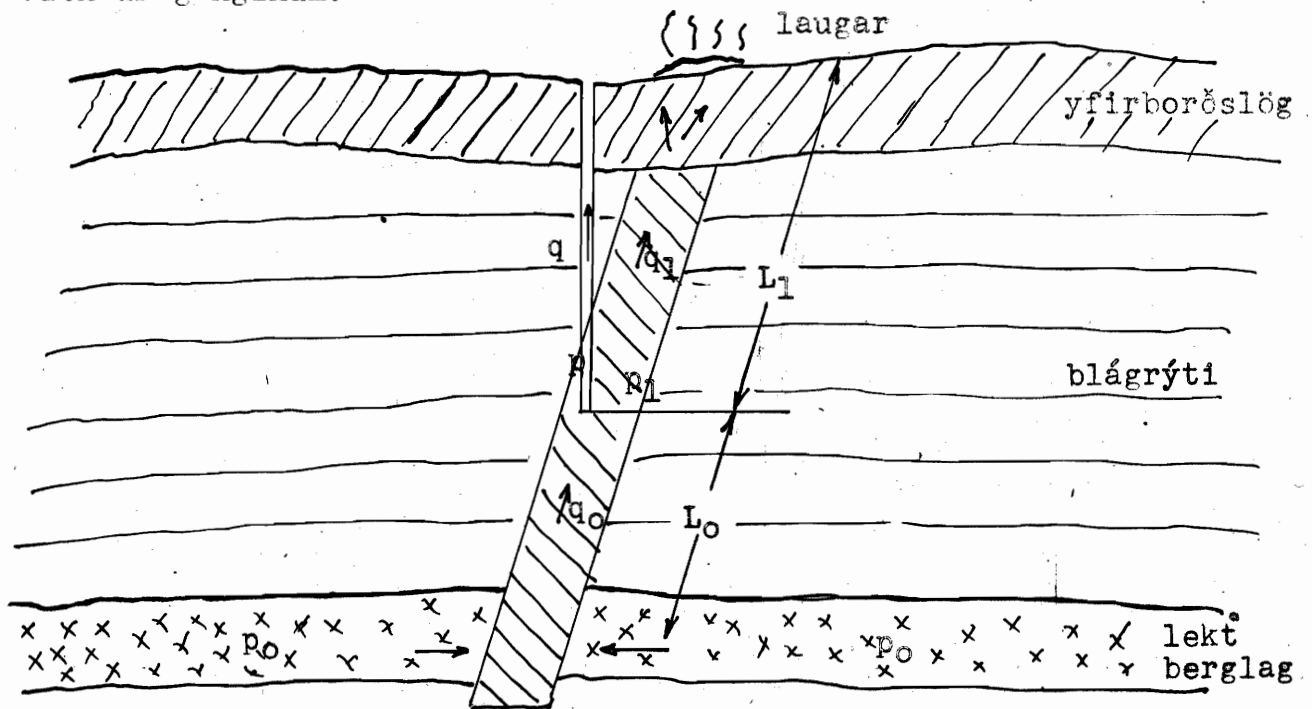
- 1) Boranirnar geta aukið aðrennslið frá upptökum jarðhitans. Holurnar veita vatnsstraumnum að sjálfsögðu minna viðnám en hinar tiltölulega þröngu sprungur bergsins. Heildarstraumviðnámið á uppstreymis-svæðinu minnkar því, og má gera ráð fyrir, að vatnsmagnið aukist einnig.
- 2) Boranirnar geta einnig minnkað vatnstap út frá uppstreymisæðunum og þannig veitt meiru vatni upp til yfirborðsins, enda þótt heildar- aðrennslið breytist ekki. Heita vatnið hefur jafnan talsverðan artesiskan þrýsting, og má því gera ráð fyrir, að vatn geti seitlað út frá aðrennsliðunum út í bergið og kólnað þar vegna varmaleiðslu til yfirborðsins og blöndunar við kalt vatn. Það vatn, sem tapast á þennan hátt, kemur því ekki fram á yfirborði. Borholurnar minnka hinn artesiska þrýsting æðanna, þ.e. minnka vatnstapið og auka þannig vatnsstrauminn til yfirborðsins.
- 3) Borholurnar geta tekið af heitu kyrrsetuvatni í berginu. Á svæðum með gljúpum berglögum getur mikið heitt vatn geymt í berginu, en þar sem það er léttara en hið aðliggjandi kalda grunnvatn, geta borholurnar orðið til þess, að grunnvatnið þrýsti hinu heita vatni upp um þær. Varmainnihald bergsins getur einnig stuðlað að þessu (sjá bls. 159).

Af framangreindum þrem möguleikum er sá þriðji afar ósennilegur á svæðum blágrýtismyndunarinnar. Þar er bergið yfirleitt mjög lítið gljúpt, og má því horfa fram hjá honum. Báðir fyrri möguleikarnir geta hinsvegar komið til greina.

Til þess að fá úr því skorið, hvor þessara möguleika sé veigameiri á hinum einstöku jarðhitasvæðum, má fara tvær leiðir, þ.e. gera kerfisbundna athugun á sambandi milli vatnsrennslis og artesisks þrýstings og mæla hitabreytingar vatnsins frá borholunum.

a) Sambandið milli artesisks þrýstings og vatnsmagns.

Athugum fyrst sambandið milli þrýstingsins og vatnsmagnsins. Til frekari glöggvunar á aðstæðum er nauðsynlegt að draga upp mynd af venjulegu jarðhitasvæði innan blágrýtismyndunarinnar, þ.e. svæði, sem er tengt við gang. Gert er ráð fyrir því, að heita vatnið komi frá leku láréttu berglagi á ákveðinni dýpt og streymi síðan upp ganginn til yfirborðsins. Á svæðinu sé borhola, sem tekur heitt vatn úr ganginum.



Mynd 1.

Frá upptökmheita vatnsins, þ.e. hinu leka berglagi, komi  $q_0$  l/sek af vatni, og hafi þar þrýstinginn  $p_0$  (artesiskan þrýsting). Þrýstingurinn sé  $p_1$ , þar sem borholan sker ganginn, en  $p$  á botni hennar, þ.e.  $p_1 - p$  er þrýstingsfallið við innstreymið í holuna. Vatnsmagnið dreifist þannig, að  $q_1$  fer upp um ganginn til yfirborðsins, en  $q$  fer upp um holuna. Með  $q_1$  er átt við það magn, sem fer til lauga á yfirborði eða tapast út í jarðveginn. Þá sé  $q_u$  það vatnsmagn, sem streymdi upp um ganginn, áður en boranir hófust.

Vegna þess hve sprungur bergsins eru þröngar, má ganga út frá því, að þar sé yfirleitt rakstraumur (laminar straumur), þ.e. þar sé línulegt samband milli vatnsmagns og þrýstingsfalls vegna straumviðnáms. Þá má rita, ef  $K$ ,  $K_0$  og  $K_1$  eru rennslisstuðlar rásanna:

$$q_0 = K_0 (p_0 - p_1) = q + q_1 \quad 1)$$

$$q = K (p_1 - p) \quad 2)$$

$$q_1 = K_1 p_1 \quad 3)$$

Rétt er að taka fram, að framangreindar jöfnur ná aðeins til nokkurs hluta hringrásarkerfis vatnsins. Þær fjalla aðeins um straumviðnámið á leiðinni upp frá þeim berglögum, sem vatnið hitnar í, en viðnámið niður að þessum lögum og innan þeirra er ekki reiknað með. Strangt tekið er hinn artesiski þrýstingur  $p_0$  því háður vatnsmagninu  $q_0$ .

En taka verður tillit til þess, að  $p_0$  er þrýstingur vatnsins í berglögum, sem í senn hafa mikið flatarmál og mikið rúmmál. Vatnstraumurinn um þau er afar hægur og mætir því tiltölulega litlu viðnámi, auk þess sem þau innihalda mikið vatnsmagn. Í samræmi við skoðanir TRAUSTA EINARSSONAR (sjá tilvitnun bls. 130) skal því gengið út

frá því, að  $q_0$  geti aukizt nokkuð, án þess að það hafi merkjanleg áhrif á þrýstinginn  $p_0$ , a.m.k. um nokkurn tíma, þ.e. í fyrstu nálgun má ganga út frá óbreytilegu  $p_0$ , og skal það gert við eftirfarandi útreikninga.

Þó er nauðsynlegt að leggja áherzlu á þann varnagla, sem hér hefur verið sleginn, þ.e. þetta ástand þarf engan veginn að vera varanlegt, enda þótt tími þess geti verið tiltölulega langur, þ.e. skipt tugum ára eða jafnvel meir. Það er því frá fræðilegu sjónarmiði full ástæða til þess að fylgjast vel með öllum aðstæðum á jarðhitasvæðum, þar sem mikið vatnsmagn er unnið úr borholum; slík kerfisbundin athugun er eini möguleikinn til þess að komast að breytingum, sem boða minnkun vatnsmagnsins.

Ef artesiskur þrýstingur borholunnar er nefndur  $H$ , verður  $p_1 = p = H$ , þegar holunni er lokað. Einnig er þá  $q_1 = q_u$ . Mesta sjálfrennandi vatnsmagn, sem fáanlegt er úr borholum á svæðinu, fæst með því að gera  $p_1 = 0$ , þ.e. með því að gera nægilega margar holur má vinna magnið  $Q = K_0 p_0$ . Með því að nota þessar stærðir, má breyta jöfnunum 1) til 3), og fæst þá:

$$Q = H(K_0 + K_1) = HK_0 + q_u \quad 4)$$

$$h = H(1 - q/aQ); \quad a = K/(K + K_1 + K_0) \quad 5)$$

Seinni jafnan sýnir, að botnþrýstingur holunnar minnkar línulega með vaxandi rennsli, en það er einmitt það lögmál, sem komið hefur fram við athuganir á nokkrum borholum. Framangreind forsenda um rakstraum í æðum bergsins vörðist því fyllilega á rökum reist.

Nú er augljóst af mynd 1, að borholan getur aðeins aukið aðrennslið  $q_0$ , með því að hún minnki þrýstinginn  $p_1$ . Fyrir litla breytingu þrýstingsins  $dp_1$  eykst aðrennslið um  $dq_0 = -K_0 dp_1$



samkvæmt jöfnu 1). Það fer því algerlega eftir rennslisstuðlinum í berginu fyrir neðan borholuna, hvernig  $q_0$  eykst með minnkandi  $p_1$ . Ef rennslisstuðullinn er mjög hár, þ.e. straumviðnámið hverfandi, geta litlar breytingar í  $p_1$  valdið mikilli aukningu vatnsmagnsins, en sé straumviðnámið hinsvegar mjög mikið, verður  $p_0$  raunverulega óháð  $p_1$ .

Nú er mjög ósennilegt, að straumviðnámið frá upptökum jarðhitans til borholunnar sé hverfandi. Vatnið verður að streyma langar leiðir um þröngar og krókóttar sprungur, og hlýtur þar að vera eitthvert viðnám. Það er því full ástæða til þess að ganga út frá því, að það þurfi merkjanlega breytingu þrýstingsins  $p_1$  til þess að auka aðrennslið  $p_0$ .

Afleiðing þessa er sú, að hafi borhola verið gerð á jarðhitasvæði, má af breytingum hennar við áframhaldandi boranir ráða, hvort um aukningu aðrennslisins sé að ræða. Komi ákveðið vatnsmagn úr fyrstu holunni, sem breyttist ekki, þótt gerðar séu fleiri holur með góðum árangri, getur ekki verið um breytingu þrýstingsins  $p_1$  að ræða, og þar af leiðandi hefur aðrennslið ekki aukizt.

Þetta er einmitt reynslan í Ólafsfirði og við Áshildarholtsvatn. Á báðum stöðum varð ekki vart við merkjanlegar breytingar fyrstu holanna, þegar seinni og vatnsmeiri holurnar voru boraðar. Verður því að álykta, að vatnsvinnslan á þessum stöðum hafi fyrst og fremst byggzt á breytingu rennslisins í efstu jarðlögum í samræmi við möguleika 2) á bls. 136, en ekki á aukningu aðrennslisins. Að Kristnesi og Laugalandi í Hörgárdal er hinsvegar ekki að sinni hægt að dæma um aðstæðurnar, þar sem of lítið hefur verið borað þar.

Hinsvegar hlýtur að reka að því, þegar nægilega margar holur hafa verið gerðar, að þrýstingurinn  $p_1$  taki að falla, og má þá gera ráð fyrir aukningu aðrennslisins. Við áframhaldandi boranir í Ólafsfirði eða við Áshildarholtsvatn má því reikna með þessu.

Ef aðeins er reiknað með sjálfrennandi vatni, er í mesta lagi hægt að gera hinn artesiska þrýsting  $p_1$  núll, og fæst þá, eins og þegar hefur verið tekið fram, vatnsmagnið  $Q = K_0 p_0$ . Samkvæmt jöfnu 4) getur hin hlutfallslega aukning aðrennslisins í mesta lagi orðið:

$$Q/q_u = 1 + K_0/K_1 \quad (6)$$

þ.e. aukningin ákveðst af hlutfalli rennslisstuðlanna  $K_0$  og  $K_1$ .

Það er að sjálfsögðu mjög erfitt að áætla þetta hlutfall. Ef gengið er út frá því, að straumviðnámið á hverja lengdareiningu gangsins sé jafnt, ætti  $K_0/K_1$  að vera jafnt hlutfallinu milli lengdar rásanna, þ.e.  $K_0/K_1 = L_1/L_0$ , ef notaðar eru merkingarnar á mynd 1).

Af ýmsum ástæðum virðist þetta þó frekar ósennilegt. TRAUSTI EINARSSON (sjá tilvitnun bls. 130) telur, að straumviðnámið sé hlutfallslega mikið í þeim rásum, sem eru næstar yfirborði vegna fíngerðs leirs, sem þar sezt fyrir í sprungunum, og gerir hann jafnvel ráð fyrir, að mestur hluti viðnámsins geti verið þar. Samkvæmt því ætti  $K_0/K_1$  að geta verið all há tala, og mætti því reikna með verulegri aukningu aðrennslisins.

Einnig ber að hafa í huga, að talsverður artesiskur þrýstingur hefur mælt í tiltölulega grunnum holum, þ.e. 20 til 45 m. vs. í holum, sem eru ekki dýpri en 100 m. Væri straumviðnámið á lengdareiningu jafnt, hlyti þessi þrýstingur að aukast línulega með dýptinni,

og metti því gera ráð fyrir 200 til 450 m. á 1.000 m. dýpt. Þetta virðast ósennilega háar tölur, og benda þær til þess, að viðnámið muni vera mikið nálægt yfirborði.

Auk þess má benda á, að kísilútfellingar geta verið hlutfallslega mestar nálægt yfirborði. Efnagreiningarnar á heita vatninu sýna, að vatnið leysir efni úr berginu, og verður að gera ráð fyrir að þetta fari aðallega fram í hinum dýpri rásum, þar sem yfirleitt verður vart við útfellingar í þeim borkjörnum, sem teknir eru á jarðhitasvæðum. Vatnið virðist því taka efni frá hinum dýpri rásum og skila nokkrum hluta þess aftur, þegar það nálgast yfirborð.

Það er ekki ósennilegt, að þessi útfelling fari einkum fram, þegar heita vatnið blandast köldu grunnvatni nálægt yfirborði. Þetta styrkir þá skoðun T.E., að viðnámið sé hlutfallslega mikið nálægt yfirborði.

Má því venjulega gera ráð fyrir, að á mörgum jarðhitasvæðum geti verið um ekki óverulega aukningu aðrennslisins að ræða.

Á aðeins einu jarðhitasvæði hér á landi hafa boranir verið framkvæmdar í það stórum stíl, að þar geti verið um aðrennslisaukningu að ræða, þ.e. á jarðhitasvæðunum í Mosfellssveit. Upplýsingar frá þessu svæði eru að vísu af skornum skammti, en þó virðist af ýmsu mega ráða, að þar hafi aðrennslíð verið tæplega tvöfaldað. Til þess að fyrirbyggja misskilning er nauðsynlegt að taka fram, að hér er ekki miðað eingöngu við rennslí fyrrverandi hvera á svæðinu.

Þessi reynsla bendir til þess, að á stórum jarðhitasvæðum með rétti ganga út frá 50% til 100% aukningu aðrennslisins, og verður þessi niðurstaða lögð til grundvallar útreikningum, sem síðar verða gerðir í þessari skýrslu. En eins og þegar hefur verið dregið á,

þarf þessi aukning ekki að vera varanleg, og verður að hafa það í huga.

b) Áætlanir um heildarvatnsmagn jarðhitasvæða.

Áður en skilið er við framangreint efni, skal hér vikið að athyglisverðri ályktun, sem draga má af útreikningunum. Samkvæmt jöfnu 5) er mesta vatnsmagn, sem borholan getur flutt, þ.e. við frjálst rennsli,  $q_m = aQ$ . Ef um fleiri holur er að ræða á sama jarðhitasvæði, breytast þessir útreikningar ekki í aðalatriðum; þá verða stærðirnar  $q_m$  og  $K$  summur yfir allar holur.

Ef ganga má út frá því, að artesiskur þrýstingur holanna sé ekki verulega breytilegur frá holu til holu, má gera nokkrar breytingar á jöfnunum 4) og 5), og fæst þá:

$$Q = q_m / (1 - q_m / KH) \quad 7)$$

Það athyglisverða við þessa jöfnu er, að hægri hlið hennar inniheldur aðeins mælanlegar stærðir, og virðast því möguleikar á að ákvarða  $Q$ , þ.e. heildarvatnsmagn svæðisins. Stærðirnar  $q_m$  og  $H$  er auðvelt að mæla;  $q_m$  er vatnsmagn allra hola við frjálst rennsli, og  $H$  er artesiskur þrýstingur, þegar öllum holum er lokað. Rennslisstuðuli  $K$  má auðveldlega mæla í hverri holu út af fyrir sig, og er  $K$  í jöfnu 7) summan af rennslisstuðlum hinna einstöku hola.

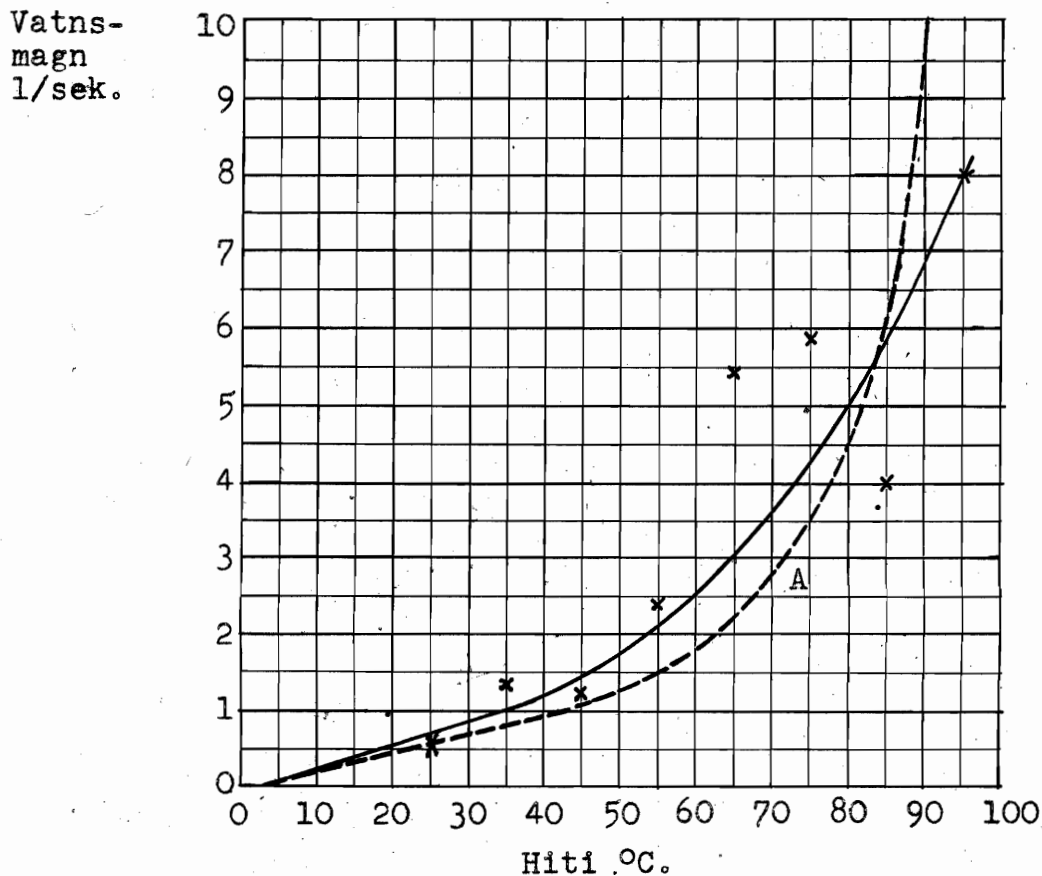
Þessir útreikningar geta þó fyrst komið að notum, þegar talsvert vatnsmagn er komið í borholur, þ.e. þegar þrýstingurinn  $p_1$  er tekinn að lækka. Að líkindum þarf  $q_m$  að vera um og yfir 1/3 af  $Q$ , ef niðurstaðan á að geta orðið til gagns.

Ekki hefur enn gefizt tækifæri til þess að gera slíkar athuganir, og er þetta því að sinni aðeins fræðilegur möguleiki.

c) Sambandið milli hita og vatnsmagns lauga.

Það er mjög athyglisvert, að greinilegt samband er milli hita og vatnsmagns lauga, þannig að hinar vatnsmestu eru jafnan heitastar. Þetta verður bezt ljóst af eftirfarandi línuriti á mynd 2) yfir jarðhitasvæðin á svæðinu frá Hrótafirði til Eyjafjarðar. Línuritið er þannig gert, að hitabilinu frá 20°C til 100°C er skipt í 8 jöfn bil með 10°C í hverju. Síðan er meðalvatnsmagn jarðhitasvæða í hverju bili reiknað út og dregið upp yfir meðalhita bilsins. Er hér stuðzt við mælingar TRAUSTA EINARSSONAR á vatnsmagni og hita lauga í framangreindum landshluta.

Yfirlit yfir jarðhitasvæði á Norðurlandi.



Mynd 2.

Á hverjum stað er miðað við hæsta hita, þar eð gert verður ráð fyrir, að hann gefi rétta mynd af aðrennslishitanum.

Sambandið er það reglulegt, að ákveðnar orsakir hljóta að liggja því til grundvallar. TRAUSTI EINARSSON hefur af því dregið þá ályktun, að laugavatnið blandist ekki köldu grunnvatni á leið sinni til yfirborðsins.

Þetta augljósa samband virðist mega skýra á tvennan hátt, þ.e. 1) með kælingu laugavatnsins vegna varmaleiðslu út frá aðrennslisrásunum og 2) með hitaþenslu vatnsins.

Ef hitaþensla orsakar hinn artesiska þrýsting heita vatnsins, er augljóst, að laugarnar verða því vatnsmeiri, sem þær eru heitari. Eins og síðar verður vikið að, er ekki vafi á því, að hitaþenslan hefur mikla þýðingu á hinum heitari jarðhitasvæðum, einkum þeim, sem hafa hærra aðrennslishita en  $100^{\circ}\text{C}$ . Skýrir þetta þá athyglisverðu staðreynd, að allir stærstu hverir landsins eru sjóðandi. En fyrir neðan  $100^{\circ}\text{C}$  er hitaþenslan ekki mikil; hún er við  $75^{\circ}\text{C}$  aðeins 2,5 % miðað við  $0^{\circ}\text{C}$ , og við  $100^{\circ}\text{C}$  er hún 4,2 %.

Nú hefur 17 m. artesiskur þrýstingur verið mældur í  $69^{\circ}\text{C}$  heitri borholu. Komi vatnið frá 1.000 m. dýpt getur hitaþenslan aðeins orsakað um 11 m. þrýsting, ef tekið er tillit til hitastigulsins. Nú virðist, vegna hins háa hitastiguls hér á landi, ósennilegt, að dýptin geti verið mikið meiri en 1.000 m., og er þá augljóst, að hitaþenslan ein getur ekki skýrt þrýstinginn. Hér hlýtur því að vera nokkur stöðuprýstingur fyrir hendi. Þrátt fyrir þetta er ekki ósennilegt, að hitaþenslan hafi þegar nokkra þýðingu, þegar laugahitinn er kominn yfir  $70^{\circ}\text{C}$ , og ætti það að skýra efri hluta línuritsins á mynd 2).

Ef þetta reynist rétt, styrkir það enn þá skoðun, að straumviðnámið sé einna mest í námunda við yfirborð. Hitapenslan getur því aðeins haft þýðingu, að straumviðnámið í aðrennslisrásunum sé lítið, og mælist tiltölulega hár þrýstingur í grunnum holum, sýnir það, að straumviðnámið er mest í efsta hluta þeirra.

En þá er eftir að skýra neðri hluta línuritsins á mynd 2).

d) Kæling laugavatnsins á leiðinni til yfirborðsins.

TRAUSTI EINARSSON hefur í hveraritgerð sinni ( sjá tilvitnun bls. 130) komið að þeirri niðurstöðu, að vatn hinna minni lauga kólni nokkuð vegna varmaleiðslu út frá aðrennslisrásunum, en við hinar stærri laugar sé kælingin hinsvegar hverfandi.

Þessi atriði skulu hér tekin til athugunar á nokkuð annan hátt, en T.E. hefur gert.

Gerum ráð fyrir laug, sem fær heitt vatn frá dýptinni  $h$ , en hiti þess sé þar  $T_0$ . Hiti laugarinnar sé  $T_L$ . Á dýptinni  $h$  hafi vatnið sama hita og bergið, þ.e.  $T_0 = gh$ , ef  $g$  er hitastigullinn í berginu umhverfis laugasvæðið.

Uppstreymisrásirnar séu það þéttar, að lítið vatn seitli út frá þeim. Þessi forsenda er að sjálfsögðu nokkuð varhugaverð, en um það skal rætt síðar.

Ekki má gera ráð fyrir, að laugavatnið streymi jafnan beint upp frá upptökunum, og skal því reiknað með því, að sjálf aðrennslisleiðin sé  $ah$ , þar sem  $a$  er sérstakur stuðull, sem tekur tillit til hinnar raunverulegu lengdar aðrennslisleiðarinnar.

Nú má með góðri nálgun ganga út frá því, að varmatapið út frá aðrennslisrásunum sé í beinu hlutfalli við hita vatnsins

umfram umhverfið, þ.e. sé vatnshitinn á dýptinni  $x$  nefndur  $T$ , verður varmatapið frá rásinni  $k(T - gx)dx$ , ef  $k$  er varmatapsstuðullinn.

Differentialjafna vatnshitans verður þá, ef  $q$  er vatnsmagnið í rásinni og  $s$  eðlisvarmi vatnsins:

$$sq \cdot dT/dx = ak(T - gx) \quad 8)$$

Þessa jöfnu er auðvelt að leysa, og með randskilyrðinu  $x = h$ ,  $T = T_0$  er lausnin:

$$T = gx + (1 - e^{-ak(h-x)/sq})gsq/ak \quad 9)$$

Hiti laugarinnar  $T_L$  verður því:

$$T_L = T_0 (1 - e^{-akh/sq})sq/akh \quad 10)$$

Það er því stuðullinn  $sq/akh$ , sem ákveður hina hlutfallslegu kælingu vatnsins.

Nú er nauðsynlegt að gera sér grein fyrir gildum varmatapsstuðulsins. Hann má reikna fyrir lóðréttar og láréttar, hringlaga rásir. Nánari athugun, sem ekki skal rakin hér, sýnir, að viðnámið gegn varmastraumnum út frá rásinni er lang mest í næsta nágrenni hennar, og skiptir því litlu máli, hvort hún er lárétt eða lóðrétt. Í fyrstu nálgun má því nota þá stuðla, sem gilda fyrir láréttar rásir. Ef gengið er út frá hringlaga rás með þvermálinu  $d$  á dýptinni  $h$ , er varmatapsstuðull hennar <sup>1)</sup>:

$$k = 2\pi c / \ln(4h/d) \quad 11)$$

Hér er  $c$  varmaleiðslustuðull bergsins.

<sup>1)</sup> Sjá GUNNAR BÖÐVARSSON: Varmatap neðanjarðaræða. T.V.F.Í. 3h. 1949.



Gera verður ráð fyrir, að heita vatnið streymi upp um fjölda langra en mjög þröngra æða; lengd þeirra getur eflaust skipt metrum. Þær munu einnig vera margar saman og þannig mynda uppstreymissvæði, og virðist ekki ósennilegt, að reikna megi með þeim eins og hringlaga rásum.

Stærð svæðanna er að sjálfsögðu mjög breytileg, og reynist því erfitt að áætla meðalþvermál þeirra. En þetta kemur ekki mjög að sök, þar sem stærðin  $d$  er undir logarítmanum í jöfnu 11), og getur  $d$  því breyttzt innan víðra marka, án þess að það hafi veruleg áhrif á stuðulinn  $k$ . Það skal því látið gott heita að áætla  $d$  nokkuð af handahófi, og verður hér gengið út frá meðaltölunni  $d=10$  m.

Stuðullinn  $k$  er einnig háður dýptinni  $x$ , en hún er einnig undir logarítmanum, og getur dýptin því einnig breyttzt innan víðra marka, án þess að  $k$  taki verulegum breytingum; það má því sömuleiðis fyrir dýptina reikna með meðalgildum. Nú mun heita vatnið að líkindum koma frá h.u.b. 1.000 m. meðaldýpt, og virðist því í fljótu bragði eiga að reikna með 500 m. við útreikninginn á  $k$ . En hér ber að gæta þess, að kælingin er mest nálægt yfirborði, og skipta gildin á  $k$  í námunda við yfirborðið því mestu máli; við útreikningana virðist því réttara að reikna með gildinu 250 m.

Ef gengið er út frá því, að varmaleiðslustuðull basaltsins sé  $1,8 \text{ kg}^\circ/\text{m},^\circ\text{C}$ , klst., fæst með framangreindum meðalgildum á  $d$  og  $x$ , að meðaltala varmatapsstuðulsins sé  $k = 2,5 \text{ kg}^\circ/\text{m},^\circ\text{C}$ , klst. Þar sem gert er ráð fyrir, að vatnið komi að meðaltali frá 1.000 m. dýpt, verður  $kh$  að meðaltali  $2.500 \text{ kg}^\circ/\text{C},\text{klst.}$

Loks þarf að gera sennilega áætlun um stuðulinn  $a$ , en hann tekur tillit til þess, að vegalengdin, sem vatnið streymir frá upp-tökunum er leagri en dýptin niður á þau. Virðist nauðsynlegt að

gera ráð fyrir, að vatnið streymi víða talsverða lárétta vegalengd, áður en það nær upp til yfirborðsins, og skal hér reiknað með því, að hún sé að meðaltali þreföld dýptin, þ.e. stærðin akh verður  $7.500 \text{ kg}^\circ / ^\circ\text{C}$ , klst.

Víkjum nú aftur að jöfnu 10). Ef vatnsmagnið  $q$  er mjög lítið, þ.e. ekki mikið yfir einn l/sek, verður sviginn h.u.b. einn, og jafnan verður þá mjög einföld:

$$T_L = \text{gsq/ak} \quad 12)$$

Þessi einfalda jafna sýnir, að hiti lítilla lauga á að vera línulega háður vatnsmagninu og auk þess óháður hitanum  $T_0$  við upptökin.

Þetta er einmitt það, sem kemur fram á mynd 2). Reikna verður með því, að mjög litlar laugar kælist niður í meðalhita ársins, en hann er á Norðurlandi  $3^\circ\text{C}$ . Sést þá, að neðri hluti línuritsins er bær lína.

Hið tölulega samræmi milli framangreindra útreikninga og línuritsins á mynd 2) er einnig furðulega gott. Ef gengið er út frá því, að á Norðurlandi sé meðaltal hitans við upptökin  $T_0 = 100^\circ\text{C}$ , má nota jöfnu 10) til þess að reikna hita lauganna. Með hliðsjón af hinu áætlaða gildi  $akh = 7.500$  fást gildi, sem sýnd eru með hinni smástrikuðu línu A á mynd 2).

Þótt fullt tillit sé tekið til þess, að framangreindar niðurstöður eru fengnar með ýmsum mjög grófum og lauslegum áætlunum, er ekki hægt að horfa framhjá hinu einkennilega samræmi milli útreikninganna og veruleikans. Útreikningarnir hljóta að vera byggðir á forsendum, sem ekki geta verið mjög fjarri lagi, þ.e. kæling vatnsins vegna varmaleiðslu frá aðrennslisrásunum hlýtur að vera aðal-

orsök hins áberandi sambands milli vatnsmagns og hita hinna minni lauga.

Þó er nauðsynlegt að taka fram, að framangreindar niðurstöður eru aðeins meðaltölur, og á einstaka jarðhitasvæðum geta því verið mikil frávik frá þeim aðstæðum, sem hér hefur verið reiknað með.

Þessi frávik eru einkum á stöðum, þar sem hitinn við upptökin er talsvert minni en sá meðalhiti, sem hér hefur verið reiknað með, þ.e.  $100^{\circ}\text{C}$ . Þar getur mikið magn af tiltölulega köldu vatni komið að neðan, og orsakast hinn lági hiti þá ekki af litlu vatnsmagni.

Af framangreindum niðurstöðum má draga nokkrar nytsamar ályktanir. Í fyrsta lagi má benda á það, að hiti laugar getur gefið hugmynd um magn aðrennslisins. Á Reykjum í Miðfirði koma  $3/4$  l/sek af  $86^{\circ}\text{C}$  heitu vatni úr laug. Með hliðsjón af framangreindum niðurstöðum er óhætt að fullyrða, að aðrennslið hljóti að vera talsvert meira en  $3/4$  l/sek. Að öðrum kosti hlýti laugin að vera mikið kaldari; ef byggt er á framangreindum útreikningum, mun aðrennslið vera a.m.k. 5 l/sek.

Hið gagnstæða þarf hinsvegar ekki að vera rétt, eins og þegar hefur verið tekið fram. Á stað með lítilli og tiltölulega kaldri laug er ekki víst, að aðrennslið sé lítið, enda þótt svo muni vera mjög víða. Þar getur hitinn við upptökin verið lágur, og þarf hinn lági hiti laugarinnar því ekki að benda til lítils aðrennslis.

Loks skal á það dregið, að framangreindir útreikningar gefa möguleika til þess að fylgjast með aðrennslisbreytingum á jarðhitasvæðum. Breytist vatnsmagnið, sem að neðan kemur, hlýtur hiti þess einnig að breytast nokkuð allt eftir því, hve mikið magnið er.

Þetta má athuga út frá jöfnu 10). Ef gengið er út frá

vatnsmagni yfir 5 l/sek, má rekja exponentialliðinn í veldisröð og sleppa upp frá þriðja lið. Jafnan verður þá:

$$T_L = T_0 (1 - akh/2sq) \quad 13)$$

Ef gengið er út frá framangreindum gildum á  $akh$  og  $T_0$ , á laug með 5 l/sek aðrennsli að vera um  $80^\circ\text{C}$  heit, en aukist aðrennslið í 10 l/sek á hitinn að hækka í  $90^\circ\text{C}$ . Á meðalvatnsmiklum laugasvæðum á hitinn því að hækka verulega, ef aðrennslið er aukið með borunum.

En hitaaukningin kemur ekki samstundis með aðrennslisaukningunni. Vatnið snertir ekki óverulegt magn af bergi á leið sinni til yfirborðsins. Þetta berg tekur þátt í öllum hitabreytingum vatnsins, og raskist hiti vatnsins, þarf nokkurn tíma til þess, að jafnvægi sé náð á ný. Allar hitabreytingar eru því mjög hægfara, og samkvæmt útreikningum, sem ekki verða raktir hér, virðist geta verið um mánuði að ræða, þ.e. breyti borhola aðrennslinu, líða mánuðir, þar til hitabreytingin kemur fram á vatninu.

Hér kemur nýr möguleiki til þess að ganga úr skugga um það, hvort boranirnar við Áshildarholtsvatn eða í Ólafsfirði hafi aukið aðrennsli svæðanna. Eins og þegar hefur verið tekið fram, hafa engar hitabreytingar komið fram á borholunum, og verður því enn á ný að svara þessari spurningu neitandi.

Í Ólafsfirði er hiti vatnsins að vísu ekki sá sami í öllum holum, en orsök þess er eflaust blöndun við yfirborðsvatn.

### 3) Boranir og vathsvinnsla á svæðum grágrýtismyndunarinnar.

Á Suðurlandi hafa boranir einkum farið fram í Mosfells-sveit og á láglandi Árnessýslu. Berggrunnurinn á þessum slóðum er

gerður úr grágrýtismynduninni. Um aldur hennar eru menn ekki á eitt sáttir; sumir telja hana árkrartera, og er HELGI PÉTURS höfundur þeirrar kenningar, en aðrir hafa talið hana síðtertiera, þ.á.m. ÞORVALDUR THORODDSEN, og hefur þeirri skoðun verið haldið nokkuð á loft síðari árin, m.a. af TRAUSTA EINARSSYNI.

En burtséð frá þessum ágreiningi, eru þó allir sammála um það, að grágrýtismyndunin sé mikið yngri en blágrýtismyndunin á láglandi Skagafjarðar og Eyjafjarðar.

Millilög grágrýtismyndunarinnar eru yfirleitt þykkari, og í hraunlögunum ber mikið minna á holu- og sprungufyllingum. Bergið er of ungt til þess, að verulegar fyllingar hafi getað myndast. Af þessum ástæðum er leki grágrýtismyndunarinnar mikið meiri en leki blágrýtismyndunarinnar.

Þetta er einnig augskýlegt af árangri borananna. Í Mosfellssveit kemur heita vatnið upp um brotlínusvæði; þar hefur tekist að vinna mikið magn þess því einu að dreifa holunum innan ákveðins svæðis án þess að þurfa að hnitmiða legu þeirra við ganga eða því um líkt, eins og nauðsynlegt er á Norðurlandi.

Staðsetning borhola á svæðum grágrýtismyndunarinnar er af þessum ástæðum öllu auðveldari en á svæðum blágrýtismyndunarinnar. Það hefur einnig talsverða þýðingu, að jarðhitasvæðin á Suðurlandi eru mun öflugri en á Norðurlandi.

Til frekari fróðleiks skal hér minnzt á nokkrar helztu boranir jarðborunardeildarinnar á svæðum grágrýtismyndunarinnar.

#### a) Mosfellsdalur.

Í Mosfellsdal voru á árunum 1945 og 1946 alls boraðar 5 holur; að einni undanskilinni báru þær góðan árangur, og komu alle

rúmlega 30 l/sek úr þeim. Dýpt þeirra er 75 til 185 m. Artesiskur þrýstingur var mældur í grynustu holunni, og reyndist hann um 21 m.vs.

b) Laugadælir og Þorleifskot í Hraungerðishreppi, Árnessýslu.

Í Hraungerðishreppi í Árnessýslu hafa all umfangsmiklar boranir verið framkvæmdar fyrir hitaveituna á Selfossi. Fyrsta holan var gerð af Rannsóknarráðinu í landi Laugadæla.

Þar er laug í túninu fyrir norðan bæinn; hiti hennar hefur verið nokkuð breytilegur allt frá 5°C í 30°C, en í landskjálftunum 189 var hann skamman tíma allt að 60°C. Jarðhita verður ekki annarsstaðar vart í landi Laugadæla, en hinsvegar er hlaðinn brunnur í landi Þorleifskots, um 500 m. fyrir austan Laugadæli. Einhver velgja kvað vera í honum, en hann frýs þó að vetri til.

Rannsóknarráðið boraði 22 m. djúpa holu við laugina, og mældust 60°C á botni hennar. Haustið 1945 gerði jarðborunardeildin tilraun til þess að dýpka holuna, en það gekk erfiðlega, og komst borinn aðeins örfáa metra niður. Var þá afráðið að nota meitilbor við þessa borun, og kom hann á staðinn í lok ársins 1945. Í febrúar 1946 var lokið við að bora 67 m. djúpa holu, og mældust á botni hennar 79°C. Var gerð prófdæling, og fengust 20 l/sek af 75°C heitu vatni, en dælan gat ekki afkastað meiru. Þótti þetta all góður árangur.

Borunum var síðan haldið áfram seinni helming ársins 1946 með öðrum meitilbor, og höfðu í lok ársins alls verið boraðar 6 holur, að holu Rannsóknarráðsins undanskilinni. Jarðfræðilegar aðstaður torvelduðu verkið, og tókst aðeins að koma einni holunni niður fyrir 50 m., en hún er 91 m. á dýpt. Ekki rann heitt vatn úr neinni, en hinsvegar mældust 80°C á botni þeirrar dýpstu.

Fyrri hluta ársins 1947 voru mælingar á jarðvegsviðnámi gerðar á þessum stað. Voru það með þeim fyrstu, sem framkvæmdar

voru hér á landi. Viðnámið reyndist óvenjulega lágt á stóru svæði umhverfis þann stað, sem borað hafði verið á, og var það talið bera vott um mikinn jarðhita. Reyndist illmögulegt að finna nokkur takmörk jarðhitasvæðisins. Að þessum mælingum loknum var talið nauðsynlegt að gera eina dýpri holu, og var til þess valinn demantsbor. Var borað með honum vorið 1947, og gekk það greiðlega, en holan varð 175 m. djúp. Mesti hiti, sem mældist í holunni var  $72^{\circ}\text{C}$ . Kom það nokkuð á óvart, þar sem  $79^{\circ}\text{C}$  heitt vatn hafði komið upp í holu, sem aðeins er 20 m. frá þessari.

Þá voru framkvæmdar prófdælingar á meitilborsholunum, og reyndust þær gefa allmikið magn af um  $70^{\circ}\text{C}$  heitu vatni. Með hliðsjón af dælingunum og niðurstöðum viðnámsmælinganna var þá talið rétt að hefjast handa um byggingu hitaveitu til Selfoss.

Hitaveitan var tekin í notkun sumarið 1948, og gekk allt að óskum fyrstu mánuðina. Síðla ársins fór þó að bera á því, að vatnið kólnaði, og stafaði það augskýtlega af innstreymi kalds vatns inn í þær holur, sem dælt var úr; var þá aðallega dælt úr þeirri, sem er 91 m. djúp. Vatnið úr henni kólnaði fyrst í stað smám saman og komst niður að  $50^{\circ}\text{C}$ , en þá kólnaði það skyndilega í h.u.b.  $30^{\circ}\text{C}$ , og varð holan því ónothæf. Var þá skipt um holu og dælt úr annari 75 m. djúpri holu, sem boruð hafði verið um haustið. Í byrjun ársins 1949 var hiti vatnsins úr henni einnig kominn niður að  $50^{\circ}\text{C}$ , og var þá auðséð, að við svo búið mátti ekki standa. Var þá hafizt handa um nýja og gaumgæfilega rannsókn svæðisins.

Mikill hluti láglandis Árnessyslu er þakinn hinu mikla hrauni, sem á upptök sín við Veiðivötn og er venjulega nefnt Þjórsárhraun. Í Laugadælum er þykkt þess h.u.b. 20 m. Undir því er set, sem reyndist h.u.b. 20 m. í borholunum. Þá tekur við grágrýti, sem

eflaust er efsti hluti grágrýtismyndunarinnar á þessum slóðum, þ.e. Hreppamyndunin. Virðist heita vatnið koma frá setinu, en sökum þess, hve það og hraunið fyrir ofan er lekt, var ógerningur að hindra blöndun við yfirborðsvatn. Fyrir neðan 50 m. dýpt voru holurnar 68°C til 70°C heitar.

Sá grunur vaknaði, að heita vatnið kæmi ekki upp á staðnum, heldur væru upptökin annars staðar, en setið leiddi það langar leiðir. Gat þetta verið í samræmi við niðurstöður viðnámsmælinganna frá 1947, sem sýndu mikla útbreiðslu heita vatnsins. Þó var á því stigi málsins ekki gerlegt að ganga algerlega úr skugga um þetta, og var því ákveðið að gera úrslitatilraun til þess að ná vatni úr berggrunninum fyrir neðan setið, og voru í þeim tilgangi boraðar 2 holur með <sup>meitil</sup> kúggbornum í byrjun ársins 1949. Var sú dýpri 137 m. á dýpt, og voru dælurnar tengdar við hana. Þetta gaf enn slæma raun, og var hiti vatnsins um 47°C.

Var þá tekið upp það ráð að mæla nákvæmlega hita í þessari holu, meðan á dælingu stóð. Hafði þá fengið ágætur rafviðnámshitamælir (Thermistor), sem notaður var við mælingarnar. Kom þá í ljós, að 67°C heitt vatn streymdi inn í holuna á 50 til 60 m. dýpt, en þar fyrir ofan kom það mikið kalt vatn, að hitinn fór niður í 47°C. Á bilinu frá 65 m. niður í 95 m. kólnaði holan um tæpar 5°C. Þessi niðurstaða var mjög athyglisverð, og tók hún af allan vafa um, að heita vatnið kæmi ekki upp á staðnum.

Augsýnilega var þá ekki um annað að ræða en að finna uppstreymisstaðinn. Sumarið 1949 voru nákvæmar viðnámsmælingar gerðar á ný, og var hægt að haga þeim með hliðsjón af hinum jarðfræðilegu aðstæðum, sem komu fram við boranirnar.

Svæðið umhverfis Laugadæli og austur fyrir Þorleifskot



var tekið til gaumgæfilegrar athugunar. Reyndist lægst viðnám á eins hektars svæði umhverfis Þorleifskot, en jafnviðnámslínurnar virtust benda til þess, að vatnið rynni þaðan neðanjarðar til Laugadæla.

Að fengnum þessum niðurstöðum var í byrjun ársins 1950 ákveðið að bora við Þorleifskot, og gaf það góða raun. Úr tveim fyrstu holunum fengust 15 l/sek af 82°C heitu vatni. Kom það úr grágrýtislagi á 130 til 140 m. dýpt. Borunum er nú haldið áfram.

#### c) Hlemmiskeið og Brautarholt á Skeiðum.

Haustið 1949 var boruð 82 m. djúp hola að Hlemmiskeiði í Skeiðahreppi. Þar var 30°C heit laug fyrir. Fengust um 2 l/sek af 72°C heitu vatni frá 60 til 82 m. dýpt. Hér hefur einnig verið borað í gegnum Þjórsárhraunið niður í Hreppamyndunina. Borunin var ákveðin með hliðsjón af viðnámsmælingum.

Vorið 1950 var ein 120 m. djúp hola boruð að Brautarholti í Skeiðahreppi. Staður hennar var ákveðinn með viðnámsmælingum. Aðstaður eru þar sömu og að Hlemmiskeiði, en um 15 l/sek af 73°C heitu vatni kom úr holunni frá 110 til 120 m. dýpt. Á þessum stað var enginn jarðhiti á yfirborði, en við skurðgröft höfðu menn komið niður á volgan jarðveg, og hafði Rannsóknarráðið látið gera tæplega 50 m. djúpa holu þar. Úr henni seittlaði 49°C heitt vatn.

Fleiri boranir hafa ekki verið gerðar með jarðborum ríkisins á svæðum grágrýtismyndunarinnar.

#### 4) Boranir og vatnsvinnsla á svæðum brúngrýtismyndunarinnar.

Mestur hluti hálendisins á Suðvesturlandi er byggður úr brúngrýtismynduninni, og er hún talin yngri en grágrýtismyndunin. Til hennar teljast m.a. jarðhitasvæðin í Hengli og nágrenni og

í Krýsuvík. Einnig eru brúngrýtisskikar á láglendi Árnessýslu.

Orðið brúngrýti er hér notað yfir all sundurleitan berglagaflokk. Sumt af því er eflaust set, en annað gosberg, og er oft erfitt að greina á milli. Sá hluti þess, sem er gosberg, er þó harla ólíkur öðru gosbergi, m.a. blágrýtinu; það er samellingur úr basisku gleri og hornóttum blágrýtishnullungum og hefur að mörgu leyti einkenni sets, enda þótt það sé myndað við jarðelda.

Brúngrýtislögin eru ekki sprungin á sama hátt og blá- og grágrýtislögin, en það mun þó vera vatnsleiðandi, og er leki þess sama eðlis og leki sets, þ.e. vatnið seitlar um háráðar milli agna bergsins. Þetta hefur þá mikilsverðu afleiðingu, að artesiskur vatnsþrýstingur getur síður haldizt í brúngrýtislögum við yfirborð, þ.e. í þeim lögum, sem ekki eru þakin þéttum berglögum.

Það er því jafnan þýðingarlítið að leita að artesisku heitu vatni í yfirborðsbrúngrýti eða yfirborðsseti. Boranir, sem framkvæmdar hafa verið við slíkar aðstæður, virðast staðfesta þessa skoðun.

Síðla árs 1946 og fyrri hluta ársins 1947 voru 3 holur boraðar að Reykjavöllum í Biskupstungum. Dýpt þeirra er 117 m., 31 m. og 54 m. Á þessum stað er um 80°C heit laug, og ber talsvert á jarðhita í nágrenni hennar. Á árinu 1946 gerði gróðurhúsa-eigandinn á Reykjavöllum tilraun til þess að bora holu með vatnspípum í heitan jarðveg í nágrenni laugarinnar. Honum tókst að koma þeim niður, og gaus þá stöku sinnum gufa og vatn úr pípunni. Hann varð þó af eðlilegum ástæðum að hætta við þessa borun og fór þess á leit við jarðborunardeildina, að hún tæki að sér að bora eftir gufu eða vatni.

Jarðborunardeildin taldi vegsummerki jarðhita vera það

mikil á staðnum að rétt væri að framkvæma boranir. En sjálfrennandi vatn fékkst þó ekki úr neinni fyrrnefndra hola.

Í þeirri dýpstu var 100°C hiti á 45 m. dýpt, og þar fyrir neðan mældust allt að 110°C. Við rannsókn á borkjörnum kom í ljós, að holan var eingöngu í brúngrýti og seti og náði því ekki niður í berggrunninn, þ.e. Hreppamyndunina. Samkvæmt framangreindu er því ekki að vænta, að hún geti gefið sjálfrennandi vatn. Sá staður, sem borað var á, er 2 til 3 m. hærrí en austanvert umhverfi, en vatnsborð í holunum er hinsvegar aðeins  $\frac{1}{2}$  m. undir yfirborði. Eru því tók á að ræsa fram holurnar, og hefur á þennan hátt fengið heitt vatn úr þeim. Boranirnar eru því ekki árangurslausar.

#### d) Grafarbakki og Flúðir í Hrunamannahreppi.

Boranir hafa einnig verið framkvæmdar við líkar aðstaður að Grafarbakka og Flúðum í Hrunamannahreppi. Á báðum þessum stöðum eru sjóðandi hverir, og er aðrennslisvatn þeirra að líkindum 120°C eða meir.

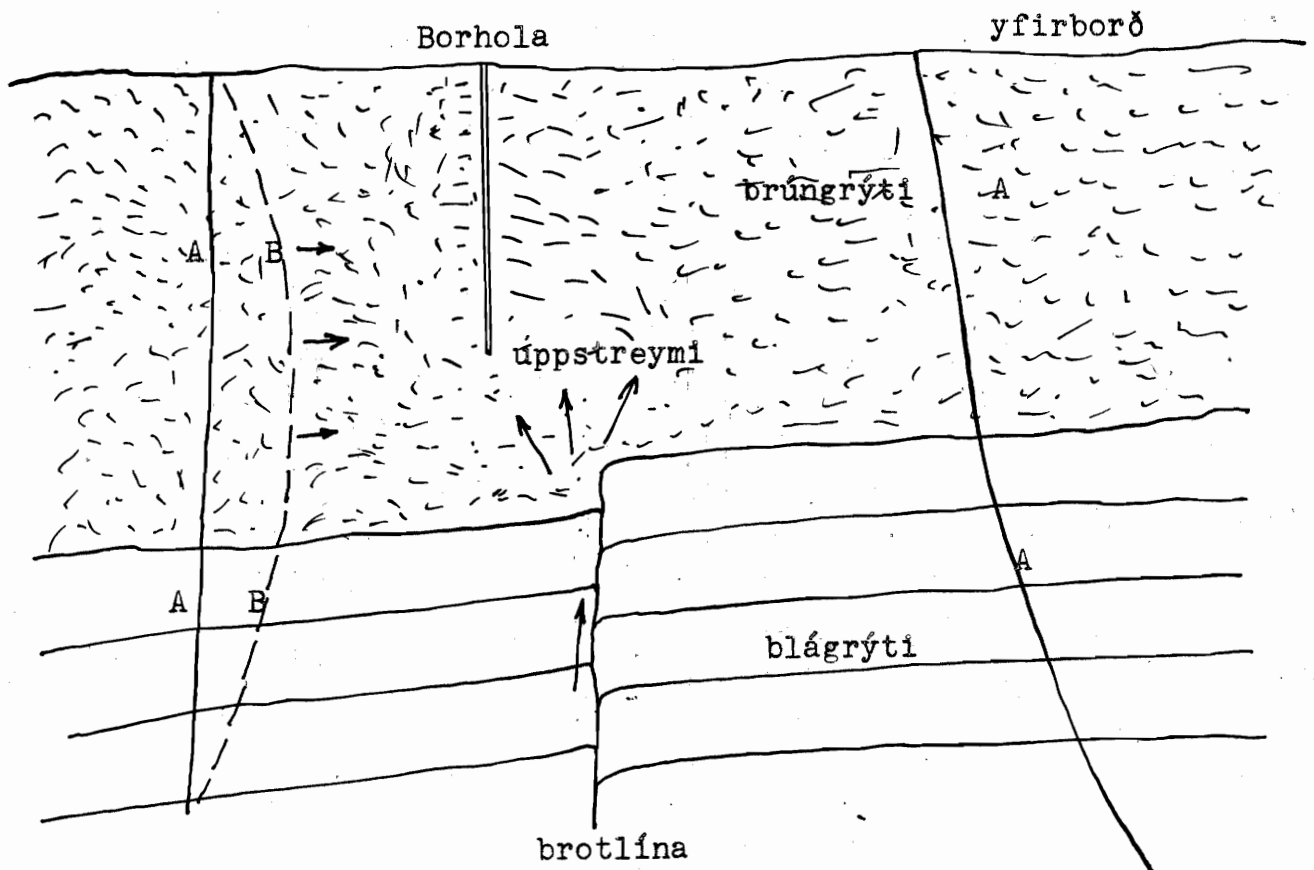
Að Grafarbakka var ein grunn hola boruð á árinu 1945, og fékkst úr henni all gott gos. Hún er eingöngu í seti, og mun gufuþrýstingur vatnsins valda gosinu.

Að Flúðum voru alls boraðar 3 holur. Sú dýpsta er 65 m., en þær eru allar í harðnaðri mól (konglomerati). Tæplega 10 l/sek af 100°C heitu vatni koma úr þeim frá 20 til 30 m. dýpt.

Umfangsmestu boranir í brúngrýti hafa að sjálfsögðu verið framkvæmdar í Hveragerði og nágrenni og í Krýsuvík. Holur þessar eru að vísu flestar gerðar með gufu fyrir augum, og verða aðstaður þar því teknar fyrir í næsta kafla. Hér er þó rétt að drepa á það, að reynslan af þeim hefur einnig sýnt, að sjálfrennandi vatns er ekki að vænta á þessum slóðum, a.m.k. ekki úr

grunnum holum. Þegar holurnar hafa gosið, er það mestmegnis vegna gufuprýstings vatnsins. Kemur þetta greinilegast fram í því, að sumar þeirra gjósa aðeins af og til, og væri það vart skiljanlegt, ef um sjálfrennandi vatn væri að ræða.

Þessar niðurstöður um brúngrýtið eru þó ekki fyllilega öruggar, þegar komið er niður á nokkra dýpt. Vegna mismunandi eðlispunga heits og kalds vatns er ekki óhugsandi, að artesískt vatn geti verið neðar í brúngrýtinu. Þetta skýrist nánar á eftirfarandi mynd, en þar eru aðstæður við borholu í brúngrýti sýndar:



Mynd 3.

Dýpt borholunnar sé t.d. 200 m. Ef hiti vatnsins, sem að neðan kemur, er  $100^{\circ}\text{C}$ , hefur kalda vatnið 8 m. vathssúlu þrýsting fram yfir það heita á þessari dýpt. Sé hitinn hinsvegar  $200^{\circ}\text{C}$ , er umfram þrýstingurinn 27 m.vs. Kalda vatnið hefur því tilhneigingu til þess að þrýsta heita vatninu út úr berginu og getur þannig framkallað artesiskan þrýsting í borholum. Á myndinni eru takmörkin milli heits og kalds vatns merkt með línunni A. Á jarðhitasvæðum eru þau að vísu ekki skörp, en það skiptir hér engu máli.

Línan A merkir það jafnvægisástand, sem er á jarðhitasvæðinu, áður en boranir hafa farið fram.

Sé borhola gerð, minnkar straumviðnámið upp til yfirborðsins, en við það raskast jafnvægisástandið, og kalda vatnið getur vegna umframþrýstingsins leitað inn á jarðhitasvæðið, þar til jafnvægi næst á ný, Þetta getur átt sér stað, hvort heldur er um að ræða brúngrýti eða blágrýti, en möguleikarnir eru því meiri, sem bergið er lekara.

Þegar kalda vatnið leitar inn í hið heita verg, hitnar það og getur komið upp um borholur. Hóla gæti því um nokkurn tíma gefið meira vatn en það, sem hún tekur frá uppstreyminu. Þetta stendur yfir, þar til jafnvægi er aftur komið, og mörk jarðhitasvæðisins eru flutt inn að línunni B. Því heitara sem vatnið að neðan er, því meiri möguleikar eru fyrir slíku uppstreymi.

Hér skal ekki um það dæmt, hvort þetta fyrirbrigði hefur komið fyrir. Oft mun þó auðvelt að ganga úr skugga um það með efnagreiningu á vatninu frá holunni. Innihaldi heita vatnið ákveðin efni, sem ekki eru í kalda vatninu, má greina á milli.

Þá er ekki útilokað, að straumviðnámið í brúngrýtinu sé það mikið, að heita vatnið hafi enn nokkurn þrýsting í neðri hluta

þess, og kemur hann þá fram í borholunni.

Við boranir á hinum heitari svæðum er réttað vera nokkuð á verði gagnvart þessum atriðum. Eskilegt er að mæla útbreiðslu jarðhitans með viðnámsmælingum, áður en boranir fara fram, og bera niðurstöðurnar saman við mælingar, sem gerðar eru reglulega, eftir að vatnsvinnsla fer fram.

---

## 5. Kafli.

### BORANIR FYRIR JARÐGUFU.

Í þessum kafla verður gerð grein fyrir hinum eðlisfræðilega og jarðfræðilega grundvelli gufuvinnslunnar, eins og þessi mál koma nú fyrir sjónir. Fyrst skal með fáum orðum dregið á sjálfa orsök jarðhitans; þó skal tekið fram, að niðurstöður kaflans um gufuvinnsluna eru að vissu leyti óháðar því, sem sagt verður í fyrstu greininni.

#### 1) Varmagjafinn.

Gufuvinnsla er því aðeins möguleg, að yfir  $100^{\circ}\text{C}$  heitt vatn sé fáanlegt frá dýpt, sem gerlegt er að bora niður á. Ef veruleg gufuvinnsla á að vera möguleg, þarf hitinn reyndar að vera talsvert hærri en  $100^{\circ}\text{C}$ , þ.e. um og yfir  $200^{\circ}\text{C}$ . Frá tæknilegu sjónarmiði er ekkert því til fyrirstöðu, að vatnið megi sækja frá a.m.k. 1.000 m. dýpt, en þó er mjög vafasamt, hvort dýpri holur en 1.000 geta svarað kostnaði.

Jarðgufunnar er því fyrst og fremst að leita á svæðum, sem hafa a.m.k.  $200^{\circ}\text{C}$  heitt aðrennslisvatn. En slíkar aðstæður virðast vart geta myndast nema með kvikuinnskotum á tiltölulega lítilli dýpt. Jarðgufuvinnslan er því bundin við hin "vúlkönsku" jarðhitasvæði, þ.e. hin stóru súru svæði, meðal annars Hengilsvæðið og Krýsuvíkursvæðið.

Varmagjafi þessara svæða er væntanlega kvika, sem ruðzt hefur upp í efri lög jarðskorpunnar, en staðnæmzt þar án þess að koma fram á yfirborð. Fyrst eftir myndun innskotsins er hiti kvikunnar að líkindum nálægt  $1.000^{\circ}\text{C}$ , og hitar hún því umhverfið fljótlega um mörg hundruð stig. Nú minnkar eðlisþungi vatns mjög ört

með vaxandi hita, þegar komið er yfir  $200^{\circ}\text{C}$ ; hann er við  $300^{\circ}\text{C}$  0,7 og við hætið (kritískt) ástand, þ.e.  $374^{\circ}\text{C}$ , er hann aðeins 0,32. Það er því augljóst, að hitaþæmslustraumar (convection) myndast, ef bergið er ekki algerlega þétt, en það mun það í engum tilfellum vera. Reikningslega má athuga þetta nánar, en það skal þó ekki gert á þessum stað.

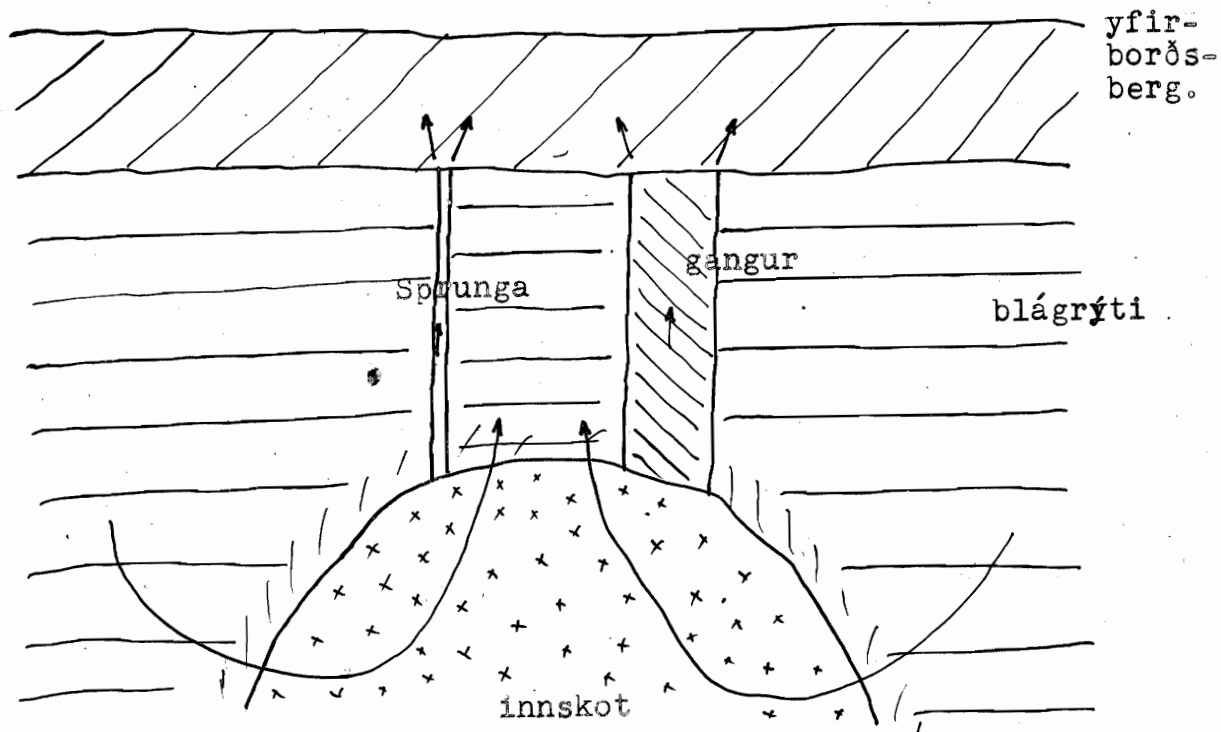
Núningsstuðull vatns lækkar einnig all mikið með vaxandi hita, og hefur það því möguleika á að seitla um fíngerðustu sprungur og rifur í berginu. Það verður því að gera ráð fyrir, að vatnið taki að seitla um innskotsbergið jafnarðan og það storknar. Á þennan hátt verða varmaskiptin við innskotið mjög greið, og virðist vart mögulegt að skýra á annan hátt hið mikla varmamagn, sem upp kemur á súru jarðhitasvæðunum. Varmaleiðslan ein gæti ekki flutt varmagnið, sem berst til vatnsins.

Hér er rétt að minnst á það, að ýmsir fræðimenn hafa talið kvikugufu vera helzta varmagjafa jarðhitans, eða a.m.k. hinna súru jarðhitasvæða. Gufan sé uppleyst í kvikunni, þegar hún kemur að neðan, en losni úr henni við kælingu og storknun. Á bls. 15 og 16 var komið að þeirri niðurstöðu, að kvikugufa væri þess <sup>ekki</sup> megnug að standa undir varmaeyðslu jarðhitasvæða á borð við Hengilsvæðið. Virðist því nauðsynlegt að hafna að miklu leyti þessari kenningu og ganga út frá þeirri mynd, sem dregin var upp hér að framan.

Frá innskotinu berst varminn með vatni og gufu upp til yfirborðsins, en þar myndast hin alkunnu vegsummerki jarðhitans, þ.e. gufuaugu, hverir og laugar. Það fer eftir hitanum við innskotið, hvort það er vatn eða gufa, sem leitar upp. Til þess að gufa geti myndast þarf hitinn að vera a.m.k. jafn suðuhita á þeirri dýpt, sem vatnið er á. Nú er innskotið yfirborðið þægja nokkuð djúpt.



Nú má gera ráð fyrir að dýptin á innskotinu sé vart minni en 2000 m; ef vatnsþrýstingurinn í þessari dýpt er 200 ata, þarf hitinn þar að vera a.m.k. 365 °C til þess að gufa geti myndast. Má því með rétti fullyrða, að gufustraums frá innskotinu sé vart að vænta nema hitinn þar sé um og yfir hinn hætta hita vatnsins, þ.e. 374 °C, en við þennan hita renna sem kunnugt gufu- og vatnsfasinn saman. Á mynd 4 eru hinar væntanlegu aðstæður við innskot sýndar í aðaldráttum:



Mynd 4.

Örvarnar sýna vatnsstraumana.

Næsta skref er að athuga breytingar á hita vatnsins eða gufunnar á leiðinni til yfirborðsins.

## 2) Breyting hitans með dýptinni.

Samkvæmt framangreindu fer það eftir hitanum við innskotið, hvort þaðan kemur gufa eða vatn. Aðstæðurnar geta að sjálfsögðu verið breytilegar við hvert innskot, þ.e. á sama jarðhitasvæði getur gufa leitað upp á einum stað en vatn á öðrum. Nauðsynlegt er að athuga hvorn möguleika út af fyrir sig.

### a) Vatnsaðrennsli.

Sé hitinn við innskotið undir suðuhita kemur þaðan vatn. Gera má ráð fyrir, að aðrennslishiti margra jarðhitasvæða hér á landi sé einmitt 150°C til 250°C, þ.e. að neðan kemur ótvírætt vatn.

Til yfirborðsins fer vatnið eftir tveim leiðum. Nokkur hluti þess leitar upp um greiðar æðar, þ.e. brotlinur og ganga, en sumt seitlar upp um hið óraskaða berg á stórum svæðum. Hinn síðarnefndi vatnsstraumur er að vísu mjög lítil á hvern fermetra, en uppstreymis-  
svæðið er það stórt, að verulegt magn fer þessa leið.

Vatn í sprungum, sem flytja mikið magn, kólnar yfirleitt ekki vegna varmaleiðslu, og hefur það því óbreyttan hita allt frá upptökunum og þar til að stöðubrýstingur þess verður jafn gufubrýstingnum, en þá tekur það að kólna vegna sjálfsuppgufunar.

Þannig mun 200°C heitt vatn halda hita sínum unz það kemur upp í 160 m dýpt, en þar hefst sjálfsuppgufunin, og þaðan leitar blanda af gufu og vatni til yfirborðsins. Hiti vatnsins verður upp frá því jafn suðuhita við þann brýsting, sem er á hverjum stað í sprungunni. Til yfirborðsins kemur 100°C heit blanda af gufu og vatni í hlutfallinu h.u.b. 1/5, þ.e. hvert kíló af blöndu inniheldur 0,19 kg af gufu og 0,81 kg af vatni.

Seitli vatnið hinsvegar upp um stóra fleti, en lítið magn á hverja flatareiningu, gerir varmaleiðsla til yfirborðsins vart við

sig; hún kælir vatnið, auk þess sem það getur kólnað vegna þrýstingslækkunarinnar. Reikningslega er auðvelt að gera sér grein fyrir þessu

Gerum ráð fyrir, að vatnsmagnið  $q$  á flatar- og tímaeiningu seittli upp frá dýptinni  $h$ , en þar hafi það hitann  $T_0$ . Hitinn á dýptinni  $x$  sé  $T$ , en  $s$  eðlisvarmi vatnsins, og  $c$  varmaleiðslustuðull bergsins.

Upp um hverja lárétta flatareiningu á dýptinni  $x$  er varmaleiðslan  $c \cdot dT/dx$ , en með vatninu berast  $sqT$  varmaeiningar á tímaeiningu. Varmastraumurinn  $Q$  er því alls:

$$c \cdot dT/dx + sqT = Q \quad 1)$$

Við ætætt ástand (stationary) verður heildarvarmastraumurinn  $Q$  óháður dýptinni, og jafna 1) er þá auðleyst:

$$T = A \cdot e^{-sqx/c} + Q/sq$$

Randskilyrðin  $T = 0$  við  $x = 0$ , og  $T = T_0$  við  $x = h$  ákveða stuðlana  $A$  og  $Q$ , og lausnin verður þá:

$$T = T_0 (1 - e^{-sqx/c}) / (1 - e^{-sqh/c})$$

Nú er dýptin  $h$  venjulega mörg hundruð eða jafnvel þúsund metrar, og verður liðurinn  $e^{-sqh/c}$  þá mjög lítill. Lausnina má því rita með nægilegri nákvæmni:

$$T = T_0 (1 - e^{-sqx/c}) \quad 2)$$

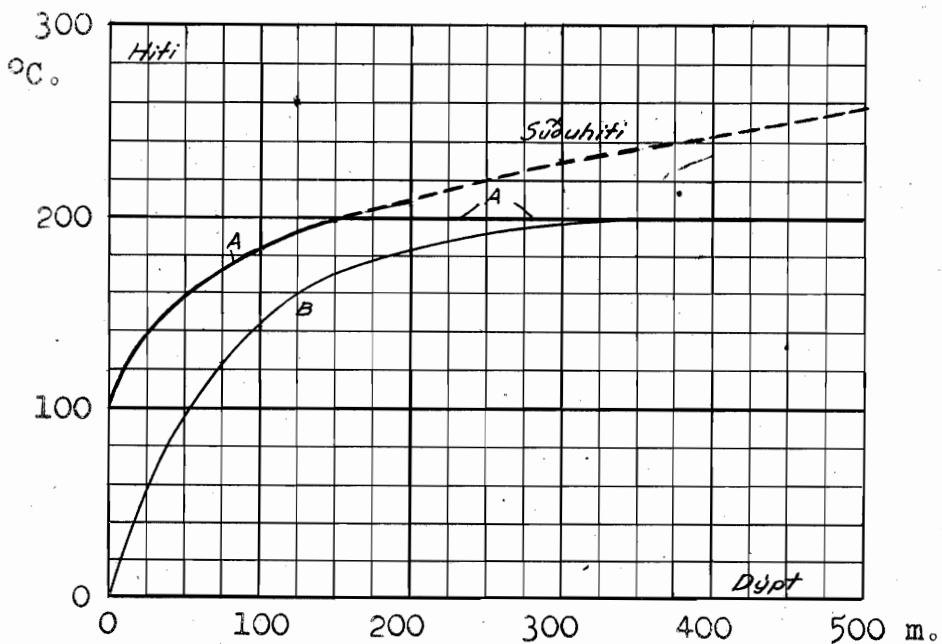
Nauðsynlegt er að taka fram, að framangreindir reikningar eru gerðir með þeirri forsendu, að vatnið breyti ekki um ástand á leiðinni til yfirborðsins, þ.e. sjóði ekki.

Til frekari skýringar skal hér tekið dæmi, þ.e. jarðhita-

svæði, sem hefur  $200^{\circ}\text{C}$  aðrennslisvatn. Sumt af vatninu leiti upp um greiðar sprungur, en sumt seitli upp um bergið þannig, að  $q = 0,025 \text{ kg/m}^2$ , klst. Varmaleiðslustuðull bergsins er  $2 \text{ kg}^{\circ}/\text{klst}$ ,  $\text{m}^{\circ}\text{C}$ , en dýptin  $h$  sé það mikil, að hennar gæti ekki í útreikningum, þ.e. hún sé yfir 500 m.

Hitinn á mismunandi dýpt er sýndur á eftirfarandi línuriti. Línan A sýnir hitann í greiðri sprungu, þar sem vatnsstraumurinn er það mikill, að kæling vegna varmaleiðslu er hverfandi. Vatnið er  $200^{\circ}\text{C}$  heitt unz það kemur í 160 m. dýpt, en frá því fylgir hitinn suðuhitalínunni.

Línan B sýnir hinsvegar hitann í berginu, þar sem  $0,025 \text{ kg/m}^2$ , klst af vatni seitlar upp á stórum fleti. Hitinn er þá talsvert undir suðuhitalínunni, eins og sjá má af línuritinu.



Mynd 5.

Enda þótt hér sé aðeins um reikningslegt dæmi að ræða, gefur það ágæta hugmynd um þær aðstæður, sem fyrir hendi eru á jarðhitasvæðum með mjög heitu aðrennslisvatni.

b) Gufuáðrennsli.

Komi hinsvegar gufa að neðan, verða aðstæður með nokkuð öðru móti. Á það hefur þegar verið dregið, að gufa geti því aðeins myndast, að hitinn við innskotið sé jafn suðuhita, og raunverulega verður hann þá að vera um eða yfir hinn hætta hita vatnsins, þ.e.  $374^{\circ}\text{C}$ .

Samkvæmt greininni hér á undan má gera ráð fyrir, að gufan leiti til yfirborðsins bæði eftir ákveðnum uppstreymisrásum, þ.e. brotlínum og göngum, og einnig seilti talsvert magn upp um hið óraskaða berg. Varmaleiðsla til yfirborðsins hefur yfirleitt lítil áhrif á ástand gufunnar í hinum stærri æðum, en hinsvegar gætir hennar nokkuð á stöðum, þar sem gufustraumurinn á hverja flatar- einingu er lítill. Þó munu þessi áhrif að líkindum ekki ná niður fyrir 500 m. dýpt. Það má því fullyrða, að varmaleiðslan hafi yfirleitt engin áhrif á gufustrauminn fyrir neðan þessa dýpt.

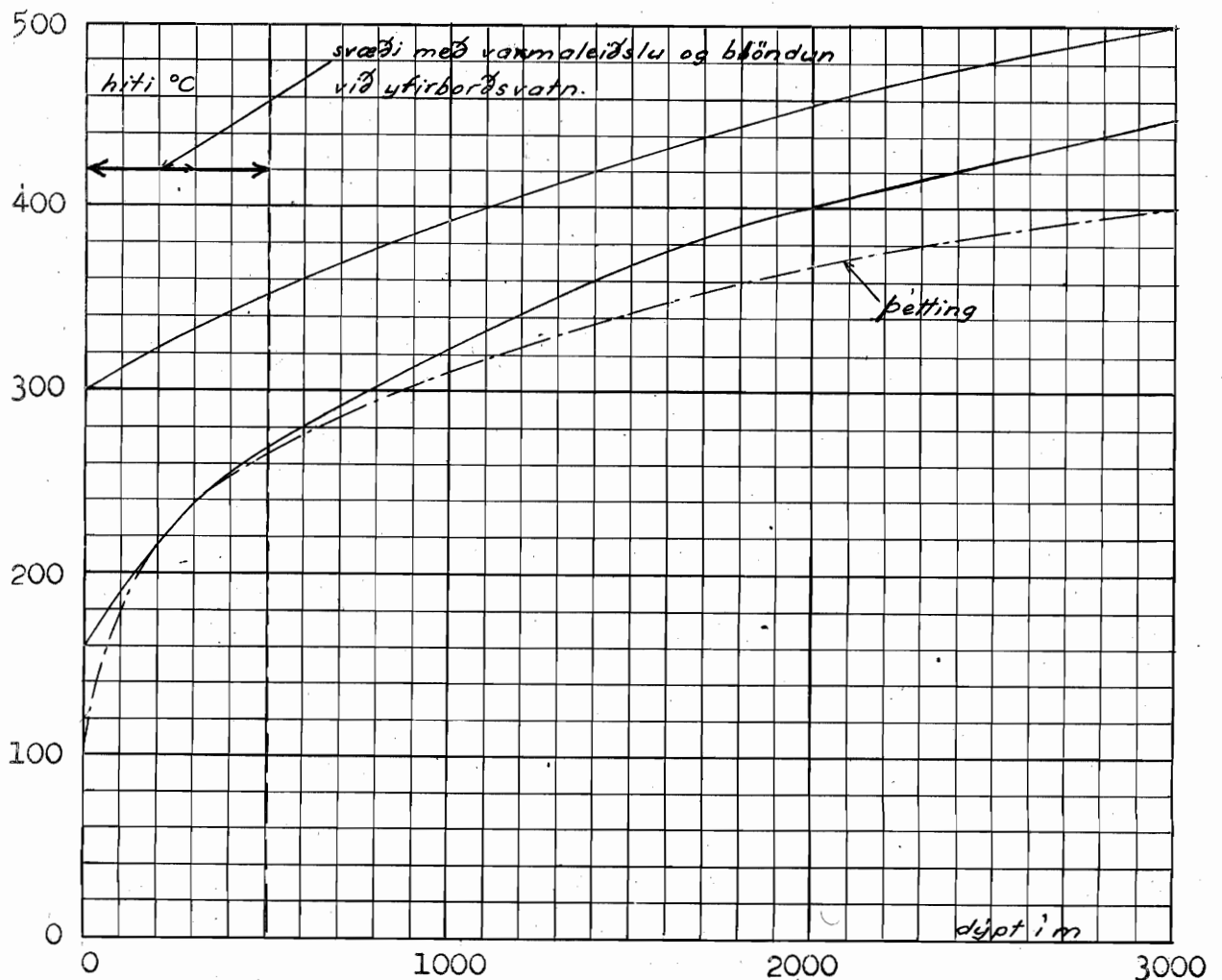
Hafi jarðhitinn, þ.e. gufustraumurinn, staðið yfir nægilega langan tíma, næst hitajafnvægi milli gufu og bergs, þannig að engin varmaskipti fara fram. Ástandsbreyting gufunnar á leið til yfirborðsins verður þá ísenthalpisk þensla.

Yfirleitt má gera ráð fyrir, að hitajafnvægi sé fyrir hendi á hinum stærri og eldri jarðhitasvæðum.

Nú er gufan engan vegin fullkomið gas; samfara þenslunni er því talsverð hitalækkun, sem auðveldlega má lesa úr i-s eða T-s línuritinu.

Ef ganga má út frá framangreindum forsendum og ákveðnu sambandi milli dýptar og þrýstings, má því nota þessi línurit til þess að finna hitann, a.m.k. fyrir neðan þá dýpt, sem blöndun við yfirborðsvatn fer fram. Réttast virðist að ganga út frá því, að þrýstingurinn sé jafn hinum venjulega grunnvatnsþrýstingi, þ.e. vaxi h.u.b. um 1 ata fyrir hverja 10 m. dýptarinnar.

Göngum hér út frá mismunandi hita við upptökin, þ.e.  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $450^{\circ}\text{C}$  og  $500^{\circ}\text{C}$  á 3.000 m. dýpt. Sambandið milli hita og dýptar er þá sýnt á eftirfarandi línuriti, þegar gengið er út frá framangreindu hlutfalli milli þrýstings og dýptar. Vegna hins æstaða ástands verður hiti gufunnar jafn hita bergsins.



Mynd 6.

Hér er rétt að geta þess, að falli forsendan um ætætt ástand, verður hitinn minni en gefið er á línuritinu.

Hitalækkun gufunnar á leiðinni til yfirborðsins er furðanlega mikil. Leggi hún  $450^{\circ}\text{C}$  heit af stað, og nái hún ókæld til yfirborðsins, er hún þar aðeins  $160^{\circ}\text{C}$  heit. En  $400^{\circ}\text{C}$  heit gufa byrjar að vökna í um 2.000 m. dýpt, og hiti hennar er upp frá því jafn suðuhita.

Yfirhitið gufa er mjög viðkvæm gagnvart vatnsblöndun, og verður fljótlega mettuð ef hún mætir nokkru vatni á leið sinni. Línuritinu má því ekki treysta nálægt yfirborði, þar sem vatnsblöndun getur farið fram, og má sjálfsagt gera ráð fyrir, að yfirborðsvatnið geti seitlað á móti gufustraumninum niður á talsverða dýpt; í línuritinu er af handahófi gert ráð fyrir 500 metrum. Einnig gerir varmaleiðslan vart við sig á þessu svæði, eins og þegar hefur verið tekið fram.

c) Samanburður svæða með vatnsaðrennsli við svæði með gufaaðrennsli.

Það hefur talsverða hagnýta þýðingu að geta aðgreint, hvort jarðhitasvæði hefur vatnsaðrennsli eða gufaaðrennsli. Samkvæmt framangreindum athugunum ættu hitamælingar í borholum að geta skorið úr þessu, a.m.k. fræðilega séð. Þó er þetta oft talsverðum vandkvæðum bundið.

Við verðum að gera ráð fyrir, að gufan blandist yfirborðsvatni í efstu jarðlöggunu, og mun þar því vera suðuhiti. Gerum ráð fyrir, að blöndunarsvæðið sé 500 m. þykkt, þ.e. suðuhiti sé niður á 500 m. dýpt.

Á svæði með  $250^{\circ}\text{C}$  heitu vatnsaðrennsli er einnig suðuhiti í öllum vatnsmeiri æðum niður á h.u.b. 500 m. dýpt, þ.e. sami hiti og á gufusvæðinu. Það þyrfti því dýpri mælingar til þess að geta

skorið úr því, hvort svæði, sem hefur suðuhita niður á 500 m. dýpt, sé vatnssvæði með um eða yfir  $250^{\circ}\text{C}$  aðrennslishita eða gufusvæði.

Borholudýptinni er að sjálfsögðu takmörk sett, og jafnvel má gera ráð fyrir, að 500 til 750 m. séu það dýpsta, sem fyrst um sinn verður farið. Hitamælingarnar eru því ekki einhlítar.

Athugun á vatnsmagni gufunnar getur leitt ýmislegt í ljós. Komu yfirhituð gufa að neðan, hlýtur vatnsmagn hennar innan blöndunarsvæðisins að fara minnkandi með dýptinni, gagnstætt því, sem er á svæðum með vatnsaðrennsli. Þó er þetta ekki heldur einhlítur mælikvarði, þar eð borholur á svæðum með vatnsaðrennsli geta gefið þurra gufu jafnvel þótt hitinn sé tiltölulega lágur (sjá síðar). Venjulega þarf því margar holur og ýmsar aðrar athuganir til þess að endanlega verði úr því skorið, hvort um vatnsaðrennsli eða gufuaðrennsli er að ræða.

Að lokum er rétt að verkja athygli á því, að gufustraumar mæta jafnan meira viðnámi en vatnsstraumar, einkum við hita undir  $250^{\circ}\text{C}$ .

Gufu- og vatnsstraumar í bergi fara yfirleitt eftir þröngum æðum og sprungum, og virðist því full ástæða að gera ráð fyrir, að straumviðnámið sé línuleg funktion af hraðanum og Darcys lögmál gildi, þ.e. ef  $k$  er lekastuðull bergsins,  $e$  eðlisþungi vökvans og  $u$  núningsstuðull hans, en  $dp/dx$  þrýstingsfallið í berginu, þá er efnisstraumurinn:

$$q = \frac{ek}{u} dp/dx$$

Við óbreytt  $k$  og  $dp/dx$  stendur efnisstraumurinn í öfugu hlutfalli við  $u/e$ , en þetta er sem kunnugt  $v/g$ , þar sem  $v$  er hinn kínematiski núningsstuðull og  $g$  þyngdaraksellerationin. Í eftir-



farandi töflu er hlutfall hinna kinematisku múningsstuðla fyrir þurr-mettaða gufu og vatn með sama hita gefið við mismunandi hita:

Hiti °C	100	200	300	374
Hlutfall	75	17,5	7,5	1

### 3) Gufuvinnslumöguleikar.

Jarðgufuvinnslan er að sjálfsögðu líkum lögmálum undir-  
orpin og heitvatnsvinnslan, sem drepið var á í kaflanum hér á undan.  
Hin fyrrnefnda er að því leyti til flóknari, að nýtt atriði kemur  
fram, þ.e. gufuþrýstingur vatnsins. Örugg heitvatnsvinnsla er því  
aðeins möguleg, að vatnið hafi artesiskan þrýsting, en gufuvinnslu  
má auk hans einnig byggja á gufuþrýstingnum. Raunverulega getur  
gufuvinnsla farið fram við fimm ólíkar aðstæður, eins og sýnt skal  
fram á hér á eftir.

#### I) Svæði með vatnsaðrennsli.

##### a) Gufuvinnsla við artesiskan þrýsting.

Gerum ráð fyrir, að borhola skeri æð með yfir 100°C heitu  
vatni. Hafi vatnið artesiskan þrýsting leitar það inn í holuna,  
og nokkur hluti þess breytist í gufu á leiðinni til yfirborðsins.  
Gufumyndunin hefst á þeim stað í holunni, þar sem stöðuþrýstingur  
vatnsins er jafn gufuþrýstingnum.

Úr holunni kemur blanda af gufu og vatni. Ef hreyfiorka  
blöndunarinnar er lítil, er ástandsþreytingin nokkurn veginn  
isenthalpisk, og er þá auðvelt að reikna hlutfallið milli gufu og  
vatns frá holunni. Ef enthalpi vatnsins, sem streymir inn í hol-  
una er  $i_{v,1}$ , en vatnsins, sem úr henni kemur  $i_{v,2}$ , og enthalpi  
gufunnar frá holunni er  $i_g$ , en gufuhlutfall blöndunnar nefnt  $x$ , verður

$$i_{v,1} = x \cdot i_g + (1 - x) \cdot i_{v,2}$$

og þarafleiðandi:

$$x = \frac{i_{v,1} - i_{v,2}}{i_g - i_{v,2}} \quad 3)$$

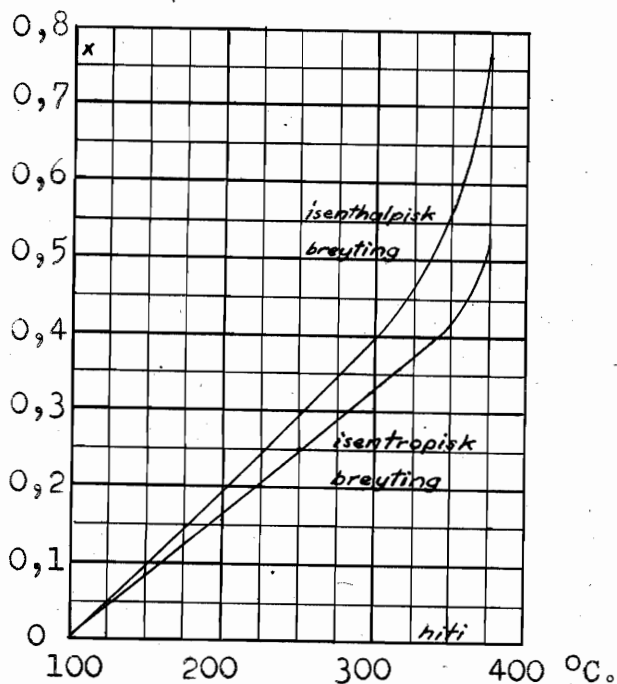
Við einnar ata mótþrýsting er  $i_{v,2} = 100 \text{ kg}^0/\text{kg}$  og  $i_g = 639 \text{ kg}^0/\text{kg}$ , og fæst þá:

$$x = \frac{i_{v,1} - 100}{539}$$

Á línuritinu í mynd

5 er  $x$  dregið upp yfir hita þess vatns, sem streymir inn í holuna, og gert ráð fyrir 1 ata mótþrýstingi.

Nái gufan talsverðum hraða í holunni, er ástands-breytingin í sjálfum gufuvatnsstraumnum ekki lengur ísenthalpísk, og nálgast þá frekar ísentropíska breytingu. Í línuritinu er  $x$  einnig sýnt við ísentropíska breytingu.



Mynd 7.

Hin ísentropíska breyting hefur þó aðeins fræðilegt gildi, því að venjulega er gufu-vatnsstraumnum frá holunni safnað í kút eða skilvindu, og þar breytist hreyfiorkan í varma, þ.e. ástandsbreytingin verður ísenthalpísk, ef miðað er við úttakið úr skilvindunni.

Gufuvinnsla við artesiskan þrýsting er raunverulega sömu

lögmaálum undirorpin og heitvatnsvinnslan, sem rædd var í undan- gengnum kafla. Einkum er mikilvægt að gera sér ljóst, að artesískt vatn er vart að finna í brúngrýti og seti, sem liggur nálægt yfir- borði, og er slíkrar gufuvinnslu því einkum að vænta úr borholum, sem ná niður í grágrýtis- eða blágrýtismyndunina.

Áætlanir um gufumagn byggjast á því að reiknað er með hæfilegri aukningu aðrennslisins. Við heitvatnsvinnslu virðist mega ganga út frá <sup>allt að</sup> tvöföldun. En þegar gufan er unnin úr holunum er hinn statiski þrýstingur þeirra mikið minni en í vatnsholum, en auk þess er vatnið á gufusvæðunum mjög heitt, og má því búast við háum artesískum þrýstingi. Það er því ekki ólíklegt, að aukningin geti verið hlutfallslega meiri á gufusvæðunum en á lauga- svæðunum.

Með því að fylgjast með hinum artesíska þrýstingi í bor- holum má gera þær athuganir á heildaraðrennslinu, sem raktar voru á bls. 145, og eru þá líkur fyrir því að mæla megj heildaraðrennslið, og þar með fá hugmynd um gufuvinnslumöguleikana.

#### b) Gufuvinnsla við gufuþrýsting vatnsins.

Gerum aftur ráð fyrir, að borhola skeri vatnsæð. Vatnið hafi suðuhita á þeirri dýpt, sem holan sker æðina, en hinsvegar engan artesískan þrýsting.

Þrýstingur vatnssúlu holunnar er þá jafn gufuþrýstingi vatnsins í æðinni. Sé örlitlu <sup>vatni</sup> dælt úr holunni, verður gufuþrýsting- urinn yfirsterkari og þeytir vatninu upp. En við það minnkar stöðu- þrýstingurinn í holunni, og vatn úr aðliggjandi bergi leitar inn í hana; vatnið er yfir 100°C heitt, og breytist því nokkur hluti þess í gufu, þ.e. holan gýs gufu og vatni. Ef þrýstingsfallið vegna straumviðnáms í holunni er minna en gufuþrýstingur vatnsins

í berginu, verður gosið stöðugt.

Slík gufuvinnsla fer einkum fram í grunnum holum í seti og brúngrýti; holurnar í Hveragerði eru ágætt dæmi.

Aðrennslishiti jarðhitasvæðisins ræður því, hve djúpt má sækja gufu á þennan hátt. Sé hann t.d.  $200^{\circ}\text{C}$  hefur vatnið ekki suðuhita fyrir neðan 160 m. dýpt, og borholur, sem skera dýpri æðar hafa því ekki framangreind skilyrði til gufuvinnslu. Með því að létta talsverðu vatni af þeim má að vísu framkalla gos, en það verður ætíð ótryggt. Nái nokkuð vatns að setjast fyrir í holunni getur það kæft gosið, og þarf þá á nýjan leik að dæla úr henni.

Með þessu fæst skýring á háttalgi borholanna í Hveragerði, en þar eru grunnar gufuholur ætíð tryggari en dýpri. Ástæðan fyrir þessu er sú, að aðrennslshitinn virðist aðeins vera um  $190^{\circ}\text{C}$ , og er suðuhiti því ekki fyrir neðan 125 m. dýpt.

Að öðru leyti er þessi gufuvinnsluaðferð lík þeirri, sem drepið var á hér að framan, þ.e. gufuvinnslu við artesiskan þrýsting. Áætlanir um gufumagn byggjast á sama grundvelli.

### c) Gufuvinnsla úr gljúpu bergi fylltu vatni.

Við framangreindar athuganir var gert ráð fyrir, að heitt vatn fengist úr ákveðinni æð, t.d. meðfram gangi, en bergið væri að öðru leyti mjög þétt. Vatn, sem streymir á þennan hátt hefur tiltölulega litla snertingu við bergið, og varmaskiptin eru því lítil.

Öðru máli er að gegna um gljúp setlög, sem fyllt eru heitu vatni. Snertiflötur bergsins og vatnsins er þá það mikill, að bergið tekur fullan þátt í öllum hitabreytingum vatnsins, en það breytir mjög aðstæðum.

Athugum einn rúmmetra af bergi, fylltan vatni með suðuhitanum  $T_0$ , en bergið og vatnið hafi sama hita. Þrýstingur vatnsins

er þá jafn gufuþrýstingnum  $p_0$  við hitann  $T_0$ . Ef gljúpleiki bergsins er  $g$ , eðlisvarminn  $s_B$ , og eðlisþunginn  $e_B$ , en eðlisvarmi vatnsins  $s_V$  og eðlisþungi þess  $e_V$ , verður varmainnihaldið:

$$(e_B s_B + g e_V s_V) \cdot T_0$$

Gæta verður þess, að stærðirnar  $e_V$  og  $s_V$  eru breytilegar, einkum við hita yfir  $200^\circ\text{C}$ , og verður því að nota meðaltölur.

Til þess að þrýstingurinn  $p_0$  geti haldið er bergið innibyrgt í þétt ílát. Sé rúmmálið stækkað, minnkar þrýstingurinn og vatnið tekur að sjóða. Þegar þrýstingurinn er fallinn í  $p$  eru  $x$  hluta vatnsins orðnir að gufu og hitinn fallinn í  $T$ , þ.e. suðuhita við þrýstinginn  $p$ . Sé þrýstingurinn enn lækkaður um  $dp$ , þ.e. hitinn um  $dT$ , breytast  $dx$  hlutar af hinu upprunalega vatnsinnihaldi bergsins í gufu. Ef  $G$  er hið upprunalega vatnsinnihald, og  $r$  suðuvarmi vatnsins, gildir eftirfarandi jafna:

$$(e_B s_B + (1 - x) G s_V) dT = - r G dx \quad 4)$$

Þetta er differentialjafna gufumyndunarinnar. Við lausn hennar verður að gæta þess, að  $r$  er breytilegur með hitanum; hér er þó um línulega funktion að ræða, og er jafnan því tiltölulega auðleyst.

En við venjulegar aðstæður má þó gera reikningana auðveldari. Það berg, sem er á íslenskum jarðhitasvæðum er yfirleitt lítið gljúpt, þ.e. vatnsinnihaldið  $G$  er yfirleitt lítið. Þá má í fyrstu nálgun sleppa seinni liðnum í sviganum, og reikna með meðalgildum á  $r$ , en þau skulu nefnd  $r_m$ . Lausn jöfnunnar verður þá með randskilyrðinu  $x = 0$  við  $T = T_0$ :

$$x = e_B s_B (T_0 - T) / r_m G$$

Þegar öllu vatninu er breytt í gufu er  $x = 1$  og  $T = T_1$ , þ.e.

$$T_1 = T_0 - r_m G / e_B s_B \quad 5)$$

Tökum dæmi, þ.e. gerum ráð fyrir ákveðnum gljúpleika, t.d. 10 %, og reiknum  $T_1$  fyrir mismunandi gildi á  $T_0$ . Gildin á  $T_1$  eru gefin í eftirfarandi töflu ásamt þrýstingnum  $p_1$  við  $T_1$ , þ.e. gufubrýstingnum, þegar allt vatnið er orðið að gufu:

$T_0$	$^{\circ}\text{C}$	200	250	300	350
$p_0$	ata	16	41	88	169
$G$	$\text{kg}/\text{m}^3$	87	80	72	58
$r_m$	$\text{kg}^{\circ}/\text{kg}$	496	446	375	258
$T_1$	$^{\circ}\text{C}$	110	176	244	319
$p_1$	ata	1,5	9,3	37	114

Reiknað er með venjulegum gildum á  $e_B$  og  $s_B$ , þ.e.  $e_B = 2.300 \text{ kg}/\text{m}^3$  og  $s_B = 0,21 \text{ kg}^{\circ}/\text{kg}, ^{\circ}\text{C}$ .

Þessar niðurstöður eru að ýmsu leyti athyglisverðar. Þær sýna, að hér kemur nýtt atriði til skjalanna, þ.e varmainnihald bergsins, en það getur breytt öllu vatninu í gufu. Borholur geta því gosið hreinni gufu, enda þótt aðeins sé vatn í berginu. Fæst þar með skýring á því einkennilega fyrirbrigði, að borholur geta á sama jarðhitasvæði ýmist gefið hreina gufu eða mjög vatnsblanda gufu. Hefur þetta m.a. komið fram í Hveragerði og í Krýsuvík.

Athugum eitt af þeim dæmum, sem reiknuð voru í töflunni. Ef setlag með 10 % gljúpleika er  $250^{\circ}\text{C}$  heitt á rúmlega 400 m. dýpt, getur það við þrýstingslækkun á 9 ata gefið hreina gufu, en gufu-

magnið er um  $80 \text{ kg/m}^3$  setsins. Sé borað í setið og þrýstingsfallið í holunni undir 8 ata, getur hún gosið hreinni gufu. Gufumagnið er þó takmarkað við rúmmál setsins, og má reikna það út, ef stærð setlagsins er kunn.

En af þessu má einnig draga þá ályktun, að borholur, sem gefa hreina og lítt vatnsblandna gufu geta verið varhugaverðar, þar eð gufuforðinn er takmarkaður.

Ein þýðingarmesta niðurstaða þessara athugana er sú, að hiti og varmainnihald bergsins geta haft mikla þýðingu fyrir gufuvinnsluna. Í kaflanum um gufuvinnsluna á Ítalíu var einmitt dregið á þetta atriði, og talið, að vegna sérstakra jarðfræðilegra skilyrða væri gufuvinnsla þar líklegast byggð á þessu.

## II) Svæði með gufuaðrennsli.

### a) Gufuvinnsla úr gufuæðum.

Á svæðum með gufuaðrennsli eru sprungur og æðar yfirleitt fylltar gufu, a.m.k. þegar komið er niður á þá dýpt, sem grunnvatn nær síður til. Ofarlega er gufan mettuð, en verður eflaust yfirhítuð, þegar neðar dregur. Það er erfitt að gera sér hugmynd um sambandið milli dýptar og þrýstings, en þó virðist full ástæða að gera ráð fyrir, að þrýstingurinn sé yfirleitt ekki undir grunnvatnsþrýstingi; hann getur jafnvel verið talsvert hærri í hinum dýpri lögum.

Gufuvinnsla á slíkum svæðum byggist að sjálfsögðu á því að skera nægilega víðar æðar með borholum. Holurnar ber að staðsetja eftir sömu grundvallarreglum og heitvatnsholur, þ.e. leitast við að skera leka staði, en þá er einkum að finna í göngum, brotlinum og gljúpum berglögum, m.a. setlögum.

Holurnar geta tekið þá gufu, sem streymir að neðan, og með nægilega mörgum holum ætti að vera hægt að ná mestum hluta þess

magns, sem streymir til jarðhitasvæðisins.

Á svæðum með vatnsaðrennsli hefur verið gert ráð fyrir því, að boranir geti aukið sjálfst aðrennslið, jafnvel tvöfaldað ~~þreifandið~~ það. Hinn artesiski þrýstingur er þar orsök aðrennslisins og gera má ráð fyrir línulegu sambandi milli vatnsstraumsins og þrýstingsfallsins í berginu.

Á svæðum með gufuaðrennsli er þessu öðru vísi varið, og hæpið, að þar megi gera ráð fyrir því líkri aukningu aðrennslisins. Að vísu er rétt að ganga út frá því, að Darcys lögmál gildi einnig fyrir gufustraumana, en vegna hins breytilega eðlisþunga gufunnar verður sambandið milli straums og þrýstingsfalls annað en á vatnsvæðunum. Skal þetta rakið nokkuð nánar.

Darcys lögmál var ritað á bls. 171, þ.e.

$$q = \frac{ek}{u} dp/dx$$

Ef um fullkomið gas er að ræða, gildir gasjafnan  $pV = RT$  og eðlisþunginn er því  $e = p/RT$ . Lögmálið verður þá:

$$q = \frac{kp}{uRT} dp/dx = \frac{k}{2uRT} dp^2/dx$$

Gastraumar um berg eru ísenthalpiskir, þ.e. ísotermiskir, og við fullkomið gas er núningstuðullinn  $u$  óháður þrýstingnum, þ.e.  $uRT$  breytist ekki, þótt gasið streymi frá einum stað til annars. Sé einnig gengið út frá óbreyttum leka  $k$ , en gasið streymi vegalengdina  $L$ , verður gasstraumurinn  $q$  á tímaeiningu og flatareiningu:

$$q = k(p_1^2 - p_2^2)/2uRTL$$

Hér er  $p_1$  þrýstingurinn, þar sem gasið streymir inn, en  $p_2$ , þar sem það streymir út.



Gufa er að vísu all langt frá því að vera fullkomið gas, en þó má í fyrstu nálgun ganga út frá því, að framangreind jafna gildi einnig fyrir gufustrauma, og þá fyrir strauminn upp til yfirborðsins. Við upptökin er þrýstingurinn  $p_1$ , en á dýpt, sem bora má niður á, t.d. 500 m., sé hann  $p_2$ .

Ef boraðar eru margar holur niður á þessa dýpt, hefur það þau áhrif, að þrýstingurinn  $p_2$  lækkar. Nú er  $p_1$  margfalt hærra en  $p_2$ , og er þá auðséð af framangreindri jöfnu, að lækkan  $p_2$  hefur mjög lítil áhrif á gufustrauminn að neðan. Það má því gera ráð fyrir, að boranirnar hafi nokkur veruleg áhrif á gufaaðrennslið til jarðhitasvæðisins.

Loks skal á það dregið, að gufustraumurinn inn í borholur er ísotermiskur, einkum vegna varmainnihalds bergsins.

Til yfirborðsins kemur gufan mjög yfirhituð, gagnstætt því, sem gera má ráð fyrir á svæðum með vatnsaðrennsli. Að þessu leyti er talsverður munur á þessum tveim tegundum svæða.

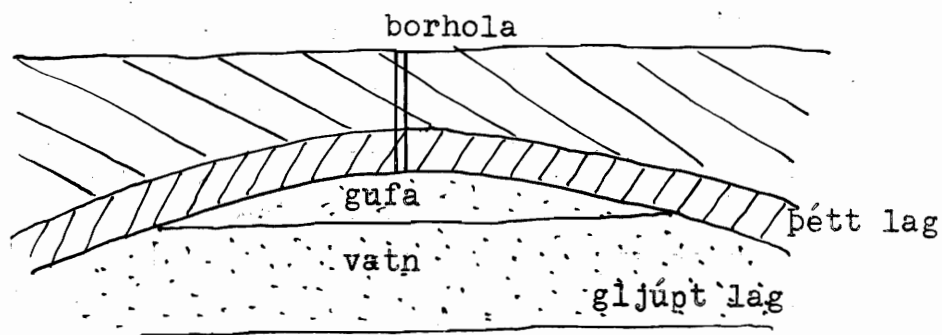
Áætlanir um gufuvinnslu við þær aðstæður, sem hér hefur verið greint frá byggjast að sjálfsögðu á áætlun heildaraðrennslis svæðisins.

#### b) Gufuvinnsla úr glijúpu bergi fylltu gufu.

Loks er sá möguleiki, að þurr gufa safnist fyrir í glijúpu bergi. Orsakir þess geta verið tvær. Vatnshitinn við innskotið getur verið það hár, að hrein gufa streymi að neðan, og er þá auðskilið, að hún getur safnast fyrir í holrúmunum bergsins.

En vatn og gufa geta einnig aðgreinzt á svæðum með vatnsaðrennsli vegna mismunandi eðlisþunga. Komi all heitt vatn að neðan, tekur það að sjóða vegna þrýstingslökkunar, þegar það nálgast yfirborð. Ef jarðfræðileg skilyrði eru fyrir hendi, getur eðlisþunga-

munurinn aðgreint gufuna frá vatninu, og safnað henni í ákveðin jarðlög. Einkum gæti gufa safnast undir jarðlagahvelfingum (anticlines), eins og alþekkt er um gas á olíusvæðum. Sjá mynd 6.



Mynd 8.

Nauðsynlegt er, að þak hvelfingarinnar sé það þétt, að gufan komist ekki út.

Slik gufusöfnun er þó ólíkleg hér á landi. Framangreind jarðfræðileg skilyrði eru einkum að finna í seti, en miklu síður í gosbergi, og berg á íslenskum jarðhitasvæðum er yfirleitt gosberg. Útilokað er þetta þó ekki, og er því rétt að drepa nokkru nánar á þennan möguleika.

Vegna hins mikla eðlismáls gufu er það magn, sem safnast getur í bergi frekar lítið, einkum við lægri þrýsting, þ.e. nálægt yfirborði. Þetta má sjá af eftirfarandi töflu, en þar er gufuinnihaldið við 10 % gljúpleika gefið, ef reiknað er með þurrmettaðri gufu:

Hiti,	°C	100	150	150	200	200	250	300	350
Gufumagn,	kg/m <sup>3</sup>	0,06	0,25	0,79	2,0	4,6	11,5		

Þensla lofttegunda, sem inniluktur eru í gljúpu efni, er

isenthalpisk, þ.e. ísotermisk, ef gengið er út frá fullkomnu gasi. Gufa er að vísu ekki fullkomið gas, og ætti því nokkur "Thomson-Joule"-hitalækkun að koma fram við isenthalpiska þenslu hennar. En vegna eðlisvarma bergsins verður hitalækkunin algerlega hverfandi, og þensla gufu í gljúpu bergi er því ísotermisk. Sé gufa unnin úr gljúpu bergi, breytist hiti hennar því ekki við þrýstingslækkun.

Varmainnihald bergsins, sem gufan er unnin úr hefur því enga hagnýta þýðingu, gagnstætt því, sem gerist þegar vatn er í berginu. Gljúpt berg, fyllt gufu getur því verið mun óhagstæðara til gufuvinnslu en berg, fyllt vatni með nægilegum hita. Þetta kemur greinilega fram þegar gildin í framangreindri töflu eru borin saman við gildin í töflunni á bls. 172.

Við gufuvinnslu úr gljúpu bergi, sem fyllt er þurrmettaðri gufu, er ákveðið samband milli gufumagnsins, sem unnið hefur verið og ~~er~~ þrýstings gufunnar, sem eftir er í berginu. Það á því að vera mögulegt að ákvarða gufumagnið í berginu út frá þrýstingsfallinu, sem fram kemur við gufuvinnslu. Þetta samband skal því athugað reikningslega.

Gengið skal út frá líklegustu aðstæðum, þ.e. aðliggjandi berg við gufulagið sé ekki þétt, heldur streymi vatn inn í það, þegar þrýstingur gufunnar tekur að minnka. Rúmmál gufuforðans minnkar því við vinnsluna. Vatnsstraumar við berg fylgja venjulega Darcys lögmáli, þ.e. sambandið milli straumviðnáms og hraða er línulegt.

Nefnum hið upphaflega heildarrúmmál gufunnar  $V_0$ , en á tímanum  $t$  eftir að vinnsla hófst sé það orðið  $V$ . Hinn upphaflegi þrýstingur gufunnar sé  $p_0$ , en  $p$  á tímanum  $t$ . Nú skal gert ráð fyrir,

að gufan sé þurr-mettuð, en vatnið, sem inn streymi hafi suðuhita. Þetta eru þær aðstæður, sem líklegastar eru á jarðhitasvæðum. Gufan og vatnið hafa þá engin áhrif hvort á annað. Ef gert er ráð fyrir línulegu sambandi milli þrýstingsfalls og hraða vatnsstraumsins, má ganga út frá eftirfarandi jöfnu:

$$dV/dt = - k( p_0 - p ) \quad . \quad 6)$$

Er þá gert ráð fyrir, að  $p_0$  sé einnig stöðubrýstingur vatnsins, sem umlykur gufulagið.

Enda þótt gufan sé ekki fullkomið gas, má þó í fyrstu nálgun nota gasjöfnuna við útreikninga á ástandsþreytingum hennar. Ef  $G_0$  er heildargufumagnið í berginu áður en vinnsla hófst, en  $G$  magnið á tímanum  $t$ ,  $R$  gasstuðullinn, en  $T$  hiti hennar er:

$$pV = GRT$$

Samkvæmt framansögðu breytist  $T$  ekki við vinnsluna. Ef gengið er út frá því, að magnið, sem unnið er, sé jafnt (constant) og nefnt  $m$ , verður:

$$d(pV)/dt = - mRT \quad , \quad m = dG/dt \quad 7)$$

Með differentialjöfnunum 6) og 7) má þá reikna þrýstingsfallið í gufulaginu, þegar magnið  $m$  er unnið, þ.e. sambandið milli  $p$  og  $t$ . Jafnan 7) er því miður ekki línuleg; hana má þó leysa án mikillar fyrirhafnar, en lausnin er hinsvegar ekki alveg einföld funktion. Nú er markmið framangreindra reikninga að finna sambandið milli gufumagnsins í berginu og þess þrýstingsfalls, sem fram kemur við gufuvinnsluna, og nota niðurstöðurnar til þess að ákvarða gufumagnið. Þetta hefur einkum hagnýta þýðingu í upphafi gufuvinnslunnar,

og skal því látið nægja að reikna það þrýstingsfall, sem fram kemur fyrst eftir að vinnslan<sup>hófst</sup>%. En þá má með góðri nálgun rita jöfnuna 7):

$$P_0 dV/dt + V_0 dp/dt = - mRT$$

Þessi jafna er línuleg og auðleyst með hliðsjón af jöfnu 6). Láusnin er:

$$p = p_0 - mV_0 (1 - e^{-kp_0 t/V_0}) / kG_0$$

$$dp/dt = - \frac{p_0 m}{G_0} e^{-kp_0 t/V_0}$$

og þarafleiðandi:

$$dp/dG = - \frac{p_0}{G_0} e^{-kp_0 t/V_0}$$

Þessi síðasta jafna gefur sambandið milli þrýstingsfallsins  $dp/dG$  og tímans  $t$ . Nú má mæla þrýstinginn  $p$  í berginu á hverju stigi vinnslunnar, og þarafleiðandi reikna  $dp/dG$ . Auk þess er  $p V_0 = G_0 RT$ , og á því með framangreindri jöfnu að vera kleift að reikna  $G_0$ . Stuðullinn  $k$  er að vísu óþekktur, en hann má ákvarða af breytingum  $dp/dG$ .

Reynslan verður að skerasúr um það, hvort framangreindir reikningar geti komið að notum, og er því ekki rétt að ræða þetta frekar að sinni.

Að lokum skal á það bent, að heita vatnið, sem leitar inn í bergið jafnframt því sem gufan er unnin, getur orðið grundvöllur að áframhaldandi gufuvinnslu, þegar hið upprunalega gufuinnihald hefur verið fullunnið. Þetta síðaraastig vinnslunnar verður þá sama eðlis og það, sem skýrt var frá í greininni c) hér að framan.

En samkvæmt töflunni í grein c) ætti talsvert meiri gufa að fást á þessu síðara stigi vinnslunnar.

Rétt er að taka fram, að framangreindir útreikningar (bls. 183 og 184) eru í eðli sínu ekki ólíkir þeim, sem gerðir eru við áætlanir um olíumagn á olíusvæðum. Þar eru aðstæður þó að ýmsu leyti frábrugðnar þeim, sem hér um ræðir, og fara olíuiðnaðarmenn því nokkuð aðrar leiðir. <sup>1)</sup>

#### 4) Áhrif gufuvinnslunnar á jarðhitasvæðið.

Í greinunum hér á undan var komið að þeirri niðurstöðu, að gufuvinnslu mætti í fyrsta lagi framkvæma með því að taka af hinu stöðuga aðrennsli til svæðisins, og jafnvel var gert ráð fyrir, að á vatnssvæðum mætti auka aðrennslið til muna. Í öðru lagi mætti hagnýta staðbundinn vatns-, gufu- eða varmaforða í berginu, en hann verður að sjálfsögðu uppurinn að ákveðnum tíma liðnum. Langvarandi gufuvinnsla getur því haft viðtæk áhrif á ástand jarðhitasvæðisins.

Hér hefur verið rætt um að auka aðrennslið, og ekki gefin frekari skýring á því, hvernig slík aukning megi verða til, eða hvort hún sé varanleg um ófyrirsjáanleg tíma.

Aukning aðrenslisins byggist að sjálfsögðu einnig á hagnýtingu ákveðins varmaforða, þ.e. á súru jarðhitasvæðunum er það varmaforði innskotsins. Aukist aðrennslið við boranir, eykst vatnsstraumurinn um innskotið, og varminn berst örrar á brött. Það kólnar því hraðar. En yfirleitt verður að gera ráð fyrir, að innskot séu það stór, að hið aukna aðrennsli geti staðið yfir tímabil, sem frá tæknilegu sjónarmiði verður að telja löng, þ.e. marga tugi ára eða

---

<sup>1)</sup> Sjá t.d. S.J.Pirson: Elements of Oil Reservoir Engineering McGraw-Hill. New York 1950.

jafnvel lengur.

En þegar rætt er um hagnýtingu ákveðins varmaforða á jarðhitasvæðinu, er fyrst og fremst átt við forða, sem ekki eru dýpri en það að ná má til þeirra með borholum. Slíkir forðar geta hinsvegar verið litlir og skammlífir. Það er því harla mikilvægt að gera sér ljóst, hvenær tekið er af þeim.

Ytarlegar jarðfræðiathuganir og athuganir á þrýstingi og hita í borholum er eina leiðin til þess að fylgjast með ástandi svæðisins og sjá, hvort boranirnar valda grunsömum breytingum.

Hægst er að gefa yfirlit yfir þau atriði, sem hér koma til greina með eftirfarnadi dæmi.

Gerum ráð fyrir jarðhitasvæði, sem nærast á innskoti á ákveðinni dýpt, t.d. 2 til 3 þús. metrum. Bergið ofan á innskotinu hafi sæmilegan gljúpleika og leka, og gufa streymi upp í það. Svæðið fyrir ofan innskotið er því fyllt gufu, en þrýstingur hennar stendur í jafnvægi við þrýsting aðliggjandi grunnvatns.

Nú eru umfangsmiklar boranir framkvæmdar á svæðinu, og þeim haldið áfram svo lengi sem árangur er góður. Vegna gufuforðans í berginu setndur árangur borananna fyrst í stað í engu sambandi við aðrennslið, og líður því fljótlega að því, að holurnar taka meiri gufu en við bætist að neðan. Þetta veldur þrýstingslökkun á svæðinu og jafnvægið við aðliggjandi grunnvatn raskast; vatnið leitar inn á svæðið samfara þrýstingslökkuninni.

Hiti bergsins, sem geymdi gufuna, breytist ekki, þótt hún sé tekin úr því. En vatn fyllir holrúmin eftir því sem gufan tæmist, og er þá auðvelt að sýna fram á, að <sup>mikill</sup> hluti grunnvatnsins, sem streymir inn á svæðið, hitnar í sama hita og bergið. En hiti bergsins hefur verið um og yfir suðuhita, og fyllist bergið því af vatni með

suðuhita. Í grein c) var sýnt fram á, að slíkt vatn ásamt varma-  
innihaldi bergsins getur orsakað mikla gufuvinnslu.

Gufuvinnslan færir þá yfir á nýtt stig með þeirri breyt-  
ingu, frá því sem áður var, að nú lækkar hiti bergsins við vinnsluna.  
Holurnar hætta að gefa yfirhitaða gufu, samfara því sem vatnsbrúnin  
breiðist út á svæðinu. Sé nægilegri gufuvinnslu haldið áfram,  
streymir meira grunnvatn inn á svæðið, en hiti bergsins er nú minni  
en áður, og nær vatnið því ekki sama hita og það, sem fyrst rann  
inn á svæðið.

Þrýstingur og magn holanna minnka því smám saman, sam-  
fara því sem hiti bergsins lækkar, og loks mun svo fara, að svæðið  
nær jafnvægi á ný og holurnar gefa gufu og heitt vatn í samræmi við  
það, sem streymir að neðan.

Stöðvist aðrennslið minnka afköst holanna, og þær hætta  
loks alveg að gefa gufu, þegar hiti bergsins er fallinn niður fyrir  
ákveðið mark. Einhverjar þeirra gefa heitt vatn, ef rennslisskil-  
yrði og artesískur þrýstingur eru fyrir hendi.

Þannig má gefa stuft yfirlit yfir hugsanlegt "líf" jarð-  
hitasvæðis. Hér hefur að sjálfsögðu verið stiklað á stóru, en hvert  
svæði verður að athuga út af fyrir sig, þar eð aðstæður geta verið  
afar breytilegar.

Ein mikilvægasta niðurstaða þessara athugana er, eins  
og þegar hefur verið tekið fram, sú staðreynd, að varmainnihald  
bergsins getur haft mikla hagnýta þýðingu, ef skilyrði eru hagstæð.

Með nákvæmum athugunum á jarðfræði, berghita og vatns-  
eða gufuþrýstingi ættu að opnast möguleikar að áætla og fylgjast  
með hagnýtingu þessara takmörkuðu forða.



6. Kafli.

GUFU- OG VATNSVINNSLA Á HENGILSVÆÐINU.

Að loknum hinum almennu athugunum í undangengnum kafla skal þessum kafla varið til þess að gefa yfirlit yfir möguleika Hengilsvæðisins. Að sjálfsögðu verður stuðzt við þann grundvöll, sem byggður var upp með hinum almennu athugunum.

1) Jarðfræði svæðisins.

Í skýrslu sinni á bls. 57-71 hefur TRAUSTI EINARSSON gefið ýtarlega jarðfræðilýsingu á Hengilsvæðinu. Auk þess mun hann innan skamms leggja fram aðra ritgjörð um sama efni, og er því ekki ástæða að endurtaka heildarniðurstöður hans hér. En vegna samhengisins við það, sem á eftir fer er þó rétt að rifja upp örfá atriði, sem beina þýðingu hafa fyrir gufuvinnsluna.

Af tæknilegum ástæðum er heppilegt að skipta Hengilsvæðinu niður í 4 svæði, þ.e. Suðursvæðið, Miðsvæðið, Norðursvæðið og Vestursvæðið. Þessi skipting þarf ekki ýtarlegrar skýringar við; hún er það augljós.

Með Suðursvæðinu er hér átt við jarðhitasvæðið frá Hveragerði norður til Gufudals, Reykjakots og norður eftir Grænadal og Djúpagili. Til Miðsvæðisins er talinn jarðhitinn við Hverakjálka, Ölkelduháls, Tjarnarhnjúk og Hrómundartind. Svæðin þar fyrir norðan eru talin til Norðursvæðisins. Jarðhitinn í Fremstadal, Innstadal, Miðdal, Hveradölum og Hverahlíð er talinn til Vestursvæðisins.

Tæknilega séð er Suðursvæðið þýðingarmest framangreindra svæða. Þar er einna mestur jarðhiti, og auk þess liggur svæðið bezt við samgöngum. Það er einnig eina svæðið, sem hefur samilegan aðgang að kælivatni fyrir raforkuver, en þetta er harla mikilvægt atriði.

Af þessum ástæðum hefur rannsóknarstarfsemi undanfarinna ára

einkum farið fram á Suðursvæðinu.

Suðursvæðið - og reyndar allt Hengilsvæðið - er þakið þykku brúngrýti með blágrýtisívafi. Þessi brúngrýtismyndum hvílir á grágrýtismynduninni, þ.e. Hreppamynduninni, sem fram kemur fyrir austan Hengilsvæðið. Lægðin milli Kamba og Reykjafjalls og flatlendi þar fyrir sunnan mun vera sigdæld, og takmarkast hún að austan af bró línunni um Kotströnd-Arnarbæli. Að norðan takmarkast hún að líkindum af brotlínu, sem væntanlega liggur um farveg Varmár.

Hugtakið brúngrýti er hér notað sem samnefni, og er með því átt við móberg, konglomeröt og set.

Með hliðsjón af þeim athugunum, sem gerðar voru í kaflanum hér á undan, er þykkt brúngrýtisins undir Suðursvæðinu það atriði, sem einna mestu máli skiptir. Dýpsta holan, sem boruð hefur verið á svæðinu fyrir sunnan Varmá, er Reykjakot 2, en hún er 267 m. djúp. Athuganir á borkjörnum hennar (bls. 49) sýna, að hún hefur ekki náð niður úr brúngrýtinu. Er því ástæða til að ætla, að það sé a.m.k. 300 m. þykkt á þessum slóðum.

Á síðastliðnu vori voru þungamælingar gerðar við brot- línuna Kotströnd-Arnarbæli, og kom þar fram þungastallur, sem reyndist vera 7 til 8 mgal. Ef gengið er út frá því, að meðalþungi brúngrýtismyndunarinnar sé 2,2, en grágrýtismyndunarinnar 2,6, verður þykktin um 450 m., og er það engan vegin óeðlileg niðurstaða.

Þessar niðurstöður benda því til þess, að þykktin fyrir sunnan Varmá sé um eða yfir 400 m.

Fyrir norðan Varmá mun þykktin vera talsvert minni, en þó er örðugt að gera sér ákveðna hugmynd um hana. Borholan Reykjakot 1 er gerð á þessu svæði, en borkjarnar hennar gefa ekki ljósa hugmynd um aðstæðurnar. Samkvæmt athugunum TÓMASAR TRYGGVASONAR (bls. 118)

virðist blágrýtið á 145 til 162 m. dýpt vera yfirborðsberg, og sæti það því verið efsti hluti grágrýtismyndunarinnar. Dýptin ætti því að vera um 150. m.

Nauðsynlegt er að taka fram, að brúngrýtið undir Suðursvæðinu getur verið hluti af sjálfri grágrýtismynduninni, og reyndar má fastlega gera ráð fyrir, að efri hluti hennar innihaldi mörg þykk brúngrýtislög. Fyrir gufuvinnsluna skiptir þó mestu máli að þekkja þykkt brúngrýtisins við yfirborð.

## 2) Hiti og magn aðrennslis Suðursvæðisins.

Næsta skref er að gera sér ljóst, hvort Suðursvæðið hefur vatns- eða gufuaðrennslis.

Á svæðinu frá Hofmannafleti og Reykjakoti til Hveragerðis kemur upp talsvert magn af alkalisku vatni. Samkvæmt mælingu SIGURJÓNS RIST renna úr hverum<sup>1</sup> á þessu svæði alls um 70 l/sek. Auk þess er vatn tekið úr hverunum til hitunar gróðurhúsa, og má áætla það um 20 l/sek, þ.e. alls koma upp um 90 l/sek. Hiti vatnsins er yfirleitt um 100°C. Hér eru borholurnar ekki taldar með, en þær gefa um 20 l/sek.

Jarðborunardeildin og HELMUTH SCHWABE hafa gert ýtarlegar efnagreiningar á vatninu, og sýna þær, að efnainnihaldið er mjög jafnt á öllu svæðinu, og virðist nær sama vatnið koma úr öllum hverunum (sjá bls. 30 til 46). Að efnainnihaldi er það mjög líkt hinu alkaliska laugavatni, sem upp kemur á laugasvæðum landsins.

Klórinnihald vatnsins á Suðursvæðinu er að vísu óvenjulega hátt, þ.e. 150 til 250 mg/l, en þetta einkennir hinsvegar allt

---

<sup>1</sup>) Á bls. 10 er magnið ranglega hermt 60 l/sek, og er hér um prentvillu að ræða.

laugavatn í syðri hluta Árnessýslu, og er því ekki bundið við Hengilsvæðið eitt.

Gufumagnið úr hverum Suðursvæðisins er lauslega áætlað um 25 tonn/klst. Gufan inniheldur lítið af gasi; samkvæmt efna- greiningu BALDURS LÍNDAL er það innan við einn lítra á hvert kílo af gufu (bls. 109 til 116).

Efnainnihald vatnsins og gufunnar og hið tiltölulega lága hlutfall milli gufu og vatns frá hverunum benda ótvírætt til þess, að aðrennsli svæðisins sé alkalískt vatn, nauðalíkt venjulegu laugavatni.

Á annan hátt væri erfitt að skýra klóriðmagnið og hið jafna efnainnihald á öllu svæðinu. Gasinnihald gufunnar er auk þess líkt því, sem þekkt á hinum heitari laugasvæðum landsins.

Sökum þess, að engar djúpar borholur hafa verið gerðar á svæðinu, er enn erfitt að ákvarða hita aðrennslisins. Í dýpstu borholunni í Hveragerði hafa verið mældar  $180^{\circ}\text{C}$  á 150 m. dýpt. Í borholunni Reykjakot 2 fyrir sunnan Reykjakot voru um  $190^{\circ}\text{C}$  á 240 m. dýpt, en hinsvegar mældust allt að  $220^{\circ}\text{C}$  á 190 m. dýpt í holunni Reykjakot 1 fyrir norðan brotlínuna um Varmá.

Aðrennslshitinn er því í Hveragerði ekki udnir  $180^{\circ}\text{C}$ , og fyrir norðan Varmá er hann vart undir  $220^{\circ}\text{C}$ . Þetta eru því aðeins lágmarkstölur, og raunverulega getur hitinn verið hærri.

Á bls. 55 eru hitalínurnar dregnar upp, og þeim til samanburðar er suðuhitalínan sett inn á línuritið. Einnig er þar hitalína, sem reiknuð hefur verið út með jöfnu 2) á bls. 166. Er þá gengið út frá  $220^{\circ}\text{C}$  hita og  $0,025 \text{ kg/klst,m}^2$ . Þetta á því aðeins við um þá staði, þar sem vatn seitlar upp um bergið á stórum svæðum, en þessar aðstæður ættu að vera fyrir hendi á því svæði, sem holan Reykjakot 2 er boruð.

Sé hin reiknaða lína borin saman við hitalínuna í þessari holu, kemur fram, að lögun beggja lína er ekki ólík. Hinsvegar er hitinn, sem lagður er til grundvallar hinni reiknuðu línu, þ.e.  $220^{\circ}\text{C}$  of hár. Væri hann lækkaður í  $190^{\circ}\text{C}$  til  $200^{\circ}\text{C}$  og gert ráð fyrir öllu minna vatnsmagni, myndu þær falla vel saman. Virðist því ástæða að halda, að holan Reykjakot 2 sýni  $190^{\circ}\text{C}$  til  $200^{\circ}\text{C}$  aðrennsli.

Af framangreindu má því draga eftirfarandi ályktanir. Aðrennslshitinn á syðri hluta Suðursvæðisins er  $190^{\circ}\text{C}$  til  $200^{\circ}\text{C}$ . Þegar norðar dregur hækkar hann yfir  $200^{\circ}\text{C}$ , og er yfir  $220^{\circ}\text{C}$  fyrir norðan brotlínuna um Varmá. Má þar jafnvel gera ráð fyrir  $230^{\circ}\text{C}$  til  $250^{\circ}\text{C}$ . Hin síðari tala er þó óviss. Virðist hæfilegt að reikna með  $210^{\circ}\text{C}$  sem meðaltali fyrir allt svæðið.

Loks þarf að áætla heildarvarmamagn svæðisins. Það skiptist í tvennt, annarsvegar er varmastraumurinn, sem stöðugt fer um yfirborð svæðisins, en hinsvegar er varmaínnihald bergsins undir svæðinu.

Úr hverunum koma alls um 90 l/sek af  $100^{\circ}\text{C}$  heitu vatni. Auk þessa mun svæðið hafa neðanjarðarafrennsli til suðurs. Efri hlutar brúngrýtisins í Hveragerði eru vafalaust lítt vatnsheldir, og verður því að gera ráð fyrir ekki óverulegum vatnsstraumi þaðan til suðurs. Auk þess má benda á, að hverirnir í Hveragerði koma upp við hraunrönd, en botn hrauna er ætíð mjög gljúpur og leiðir vel vatn. Boranir, sem framkvæmdar hafa verið í hraunið fyrir sunnan Hveragerði hafa sýnt, að sjóðandi vatn rennur undir hrauninu. Ekki eru nein tók á að áætla þetta afrennsli frá svæðinu, en hinsvegar má ekki horfa framhjá því við þær áætlanir, sem hér eru gerðar. Með hliðsjón af leka brúngrýtisins skal neðanjarðarafrennslið áætlað 100 l/sek, og er þessi tala sennilega of lág.

Alls er því gert ráð fyrir, að 190 l/sek af 100°C heitu vatni renni frá svæðinu. Gufan, sem kemur fram á yfirborð var alls áætluð um 25 tonn/klst.

Þá verður að taka tillit til þess varma, sem fer við varmaleiðslu um yfirborð svæðisins. Boranir hafa sýnt mjög háan hitastigul, jafnvel á stöðum, sem ekki hafa neinn sjáanlegan yfirborðshita. Víða virðist hitinn vera 25°C til 50°C í 10 metra dýpt, og nálægt hverunum er hann 100°C á örfárra metra dýpt.

Nú ákveðst varmaleiðslan til loftsins af hitastiglinum í sjálfu yfirborðinu, og verður að nota framangreindar tölur til þess að áætla þessa stærð. Virðist varlega áætlað, að hann sé að meðaltali 3°C/m á öllu svæðinu.

Flatarmál Suðursvæðisins er 10 km<sup>2</sup>, en varmaleiðslu-  
stuðull bergsins er um 2 kg<sup>o</sup>/klst, m,°C, og má þá auðveldlega reikna varmaleiðsluna til loftsins.

Samkvæmt framangreindu er heildarvarmaútreymi Suðursvæðisins því áætlað:

Með vatni berst alls	68·10 <sup>6</sup>	kg <sup>o</sup> /klst
" gufu " "	15 "	"
" varmaleiðslu "	60 "	"
Samtals	143·10 <sup>6</sup>	kg <sup>o</sup> /klst

Reiknað er með því, að þessi varmi berist upp með 210°C heitu vatni, og verður hið reiknaða heildarvatnsmagn á Suðursvæðinu því um 190 l/sek af 210°C heitu vatni.

Áætlunin er að sjálfsögðu lausleg, en gera má ráð fyrir, að hún sé varleg, og skal því reiknað með sléttum 200 l/sek.

Það kann að koma kynlega fyrir sjónir, að áætlunin gerir

ráð fyrir 200 l/sek, en hinsvegar var reiknað með að heildarafrennslið eitt væri 190 l/sek af 100°C heitu vatni. Þessar stærðir eru að nokkru leyti óháðar. Sumt af hinu 210°C heitu vatni kólnar niður í hinn venjulega hita yfirborðsvatns, og kemur því ekki fram í reikningunum. Hinsvegar getur afrennslið innihaldið regnvatn, og er sambandið milli stærðanna því rofið.

Loks er varmsinnihald bergsins undir Suðursvæðinu. Í undangengnum kafla var komizt að þeirri niðurstöðu, að varmainnihaldið gæti haft hagnýta þýðingu, ef sérstök skilyrði eru fyrir hendi, og skal áætlunin aðeins gerð um það magn, sem líklegt er til hagnýtingar.

Ekki er ólíklegt, að allt að 1.000 metra djúpar borholur verði gerðar á gufussyvæðunum. Borholurnar hafa því möguleika að ná til þess varma, sem er í nágrenni holanna, þ.e. í rúmlega efstu 1.000 metrunum. Ef reiknað er með svæðinu frá 200 m. niður í 1.200 m. dýpt, eru á Suðursvæðinu alls 10 km<sup>3</sup>, sem til mála koma. Samkvæmt framangreindum áætlunum er hiti þessa bergs að meðaltali um 210°C. Ef reiknað er með kælingu í 160°C er varmainnihaldið alls um  $2,5 \cdot 10^{14}$  kg<sup>o</sup>.

### 3) Gufuvinnslumöguleikar Suðursvæðisins.

Hér hefur verið komizt að þeirri niðurstöðu, að Suðursvæðið hafi vatnsaðrennsli, sem er að meðaltali um 210°C heitt. Samkvæmt niðurstöðum undangengins kafla má þá vinna gufu á þrennan hátt, þ.e. vegna artesisks þrýstings vatnsins, vegna gufuþrýstingsins og loks úr gljúpum berglögum, ef þau eru fyrir hendi.

Ekki þarf að draga það í efa, að aðrennslið hafi artesiskan þrýsting innan grágrýtismyndunarinnar. Borholur, sem ná niður í þessa myndun geta því unnið hið 210°C heita vatn, en

nokkur hluti þess breyttist í gufu á leiðinni upp til yfirborðsins. Samkvæmt útreikningunum í grein c) í undangengnum kafla gefur hvert kíló af  $210^{\circ}\text{C}$  heitu vatni við einnar ata mótþrýsting um 0,215 kg. af gufu og 0,785 kg af  $100^{\circ}\text{C}$  heitu vatni.

En þar sem ekki má gera ráð fyrir artesiskum þrýstingi innan brúngrýtismyndunarinnar, er aðeins hægt að vinna gufu á þennan hátt með því að bora niður í grágrýtismyndunina, þ.e. gera a.m.k. 400 m. djúpar holur á svæðinu fyrir sunnan Varmá, en þar geta að líkindum verið öllu grynri á svæðinu fyrir norðan.

Samkvæmt þeirri reynslu, sem fengin er við heitvatnsboranir stendur vatnsmagnið, sem vinna má á þennan hátt í beinu hlutfalli við magn aðrennslisins.

Á það hefur þegar verið minnzt, að með rétt framkvæmdum borunum mætti sennilega gera ráð fyrir 50 % til 100 % aukningu aðrennslisins á hinum stærra laugasvæðum; þó yrði að hafa í huga, að þessi aukning væri að líkindum aðeins tímabundið fyrirbæri.

Á jarðhitasvæðum með yfir  $100^{\circ}\text{C}$  heitu aðrennslis virðast af ýmsum ástæðum meiri aukningarmöguleikar en á laugasvæðunum; þar má í fyrsta lagi gera ráð fyrir hærri artesiskum þrýstingi, og auk þess getur hinn hái þerghiti komið að góðum notum, eins og þegar hefur verið dregið á í undangengnum kafla. Þessir möguleikar eru að sjálfsögðu háðir stærð jarðhitasvæðisins, þ.e. rúmmáli hins heita bergs, og jarðfræðilegum aðstæðum. Á stöðum með hagstæðri jarðlagaskipan, eins og er fyrir hendi í Toscana á Ítalíu, eru aukningarmöguleikarnir margfalt meiri en hér hefur verið reiknað með. Slík svæði hafa raunverulega ákveðna orku en ekki ákveðið afl.

En þó er rétt að fara gætilega við áætlun möguleika Suðursvæðisins; jarðlagaskipan er þar öll önnur en í Toscana,



og er því hyggilegast að áætla afl svæðisins á sama hátt og gert er á laugasvæðunum. Virðist á þessu stigi málsins ekki úr vegi að reikna með tvöföldun aðrennslisins. Núverandi vatnsmagn svæðisins var áætlað um 200 l/sek af 210°C heitu vatni, og ætti samkvæmt þessu því að reikna með alls 400 l/sek. Við einnartata mótþrýsting verður hið reikningslega gufumagn því 310 tonn/klst, og afgangsvatnið 310 l/sek af 100°C heitu vatni.

Reynslan ein getur úr því skorið, hve varanleg aukningin verður, en með tilliti til stærðar Suðursvæðisins virðist sennilegt að reikna megi með tugum ára, og ekki er óhugsandi, að þetta sé varleg tala.

Næsta skref er að athuga, hve margar borholur þarf til vinnslu þessa vatnsmagns. Þar má aftur grípa til reynslunnar af heitvatnsborunum.

Undanfarin 20 ár hafa umfangsmiklar boranir verið framkvæmdar á Reykjum í Mosfellssveit, og hefur þar einmitt verið borað í það berg, sem gert er ráð fyrir að vinna vatnið úr á Suðursvæðinu, þ.e. grágrýtismyndunina. Boranirnar hafa sýnt, að þessi myndun er það sprungin og lek, að lítil ástæða er að draga í efa, að boranirnar á Suðursvæðinu geti gefið tilætlaðan árangur, ef rétt er að farið.

Auk þess má nefna þær boranir, sem framkvæmdar hafa verið á öðrum jarðhitasvæðum innan grágrýtismyndunarinnar, þ.e. í Árnes-sýslu. Hafa þær flestar borið tilætlaðan árangur.

Ef reiknað er með jarðhitasvæðunum í Mosfellssveit sem einni heild, hafa meðalafköst á borholu verið um 7 l/sek.

Hinsvegar er ástæða að ætla, að artesiskur þrýstingur sé hærri í borholunum á Suðursvæðinu, og auk þess er hinn statíski þrýstingur í gufuholum talsvert minni en í vatnsholum. Má því gera

ráð fyrir, að meðalafköst borhola á Suðursvæðinu verði öllu meiri. Hér skal reiknað með rúmlega 12 l/sek meðalafköstum, þ.e. um 10 tonn/klst af gufu. Til þess að vinna 300 tonn/klst af gufu þarf því alls um 30 borholur.

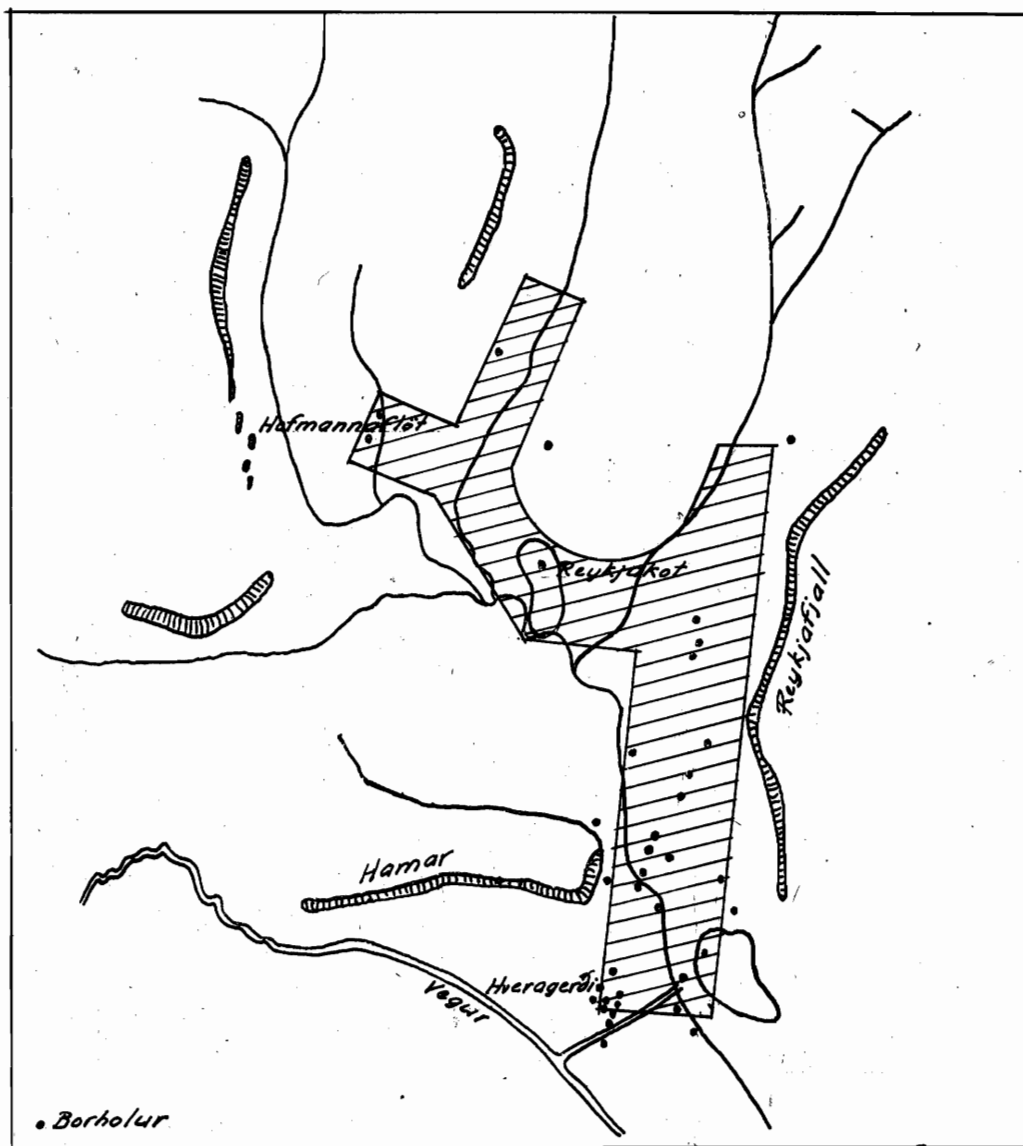
Dreifing borholanna um meðalafköstin verður að sjálf-sögðu mikil. Sumar geta verið þurrar, en aðrar geta gefið tvöföld eða þreföld meðalafköst.

Ekki má reikna með því, að borholurnar verði stöðugar. Ýmsar jarðfræðilegar breytingar, m.a. af völdum landskjálfta, og auk þess útfellingar í sprungum bergsins geta valdið því, að hver hola gýs aðeins takmarkaðan tíma. Það verður því að ganga út frá, að stöðugar boranir séu nauðsynlegar til þess að viðhalda gufumagninu. Þetta hefur einnig verið reynslan á Ítalíu.

Um staðsetningu borholanna er það að segja, að þær ber að gera á helztu uppstreymisstöðunum, þar sem þeir bera vott um greiðfærar sprungur og æðar í grágrýtismynduninni. Þær ber því að staðsetja með jöfnu millibili á línunni frá Hveragerði til Gufudals, í Reykjakotslandi og norður eftir Grænadal. Reynslan verði síðan látin skera úr því, hvort leitað verði til Hofmannaflatar eða jafnvel í Djúpagil.

Við staðsetningu borhola á laugasvæðum er venjulega farið eftir ákveðnum brotlínum eða göngum, en vegna þess að grágrýtismyndunin er hulin brúngrýtinu, er ekki kleift að greina þessar myndanir, og verður því að fara framangreinda leið. Eftir að fyrstu holurnar hafa verið gerðar er væntanlega auðveldara að átta sig á aðstæðum.

Ekki er ólíklegt, að nákvæmar þungamælingar á svæðinu geti gefið gagnlegar upplýsingar, en að sinni skal ekkert um það fullyrt.



Mynd 9.

Staðsetning borhola.

Skal þá lokið við að ræða gufuvinnslu við artesiskan þrýsting vatnsins.

Annar möguleikinn var að vinna gufuna með gufuþrýstingi vatnsins. Þetta er þó aðeins hægt á þeirri dýpt, sem vatnið hefur suðuhita. Aðrennslishitinn í Hveragerði sjálfu virðist vera um  $190^{\circ}\text{C}$ , og hefur vatnið þar því suðuhita í mesta lagi niður á 125 m. dýpt. Á svæðinu fyrir norðan Varmá er aðrennslishitinn væntanlega ekki undir  $230^{\circ}\text{C}$ , og er því suðuhiti niður á a.m.k. 300 m. dýpt.

Gufuvinnsla með gufuþrýstingi vatnsins er því aðeins möguleg í grunnum holum, þ.e. holum, sem á syðri hluta svæðisins ná ekki niður í grágrýtismyndunina.

Allar gufuholur, sem gerðar hafa verið í Hveragerði vinna gufu á þennan hátt. Gosin geta verið ótrygg, einkum í hinum dýpri holum. Þegar þær hætta að gefa gufu, þarf að framkalla gos á ný með því að minnka stöðuprýsting vatnsins í þeim. Þetta sýnir, að vatnið hefur ekki artesiskan þrýsting.

Gufa, sem unnin er í þessum grunnu holum er yfirleitt ótrygg, og því ekki treystandi á hana fyrir stærri virkjanir. Hinsvegar má á þennan hátt eflaust ná nokkru gufumagni á svæðinu og nota hana til upphitunar og smærrí iðnreksturs. Virðist ekki óvarlegt að reikna með 50 til 100 tonn/klst, ef nægilega margar grunnar holur eru boraðar.

Loks er sá möguleiki að vinna gufu úr gljúpum berglögum, sem fyllt eru vatni með suðuhita. Ekki er vitað um nein slík berglög undir Suðursvæðinu, og er því algerlega óvíst, hvort þessi möguleiki kemur til greina á svæðinu. Aðrennslishitinn á syðri hluta svæðisins virðist einnig of lágur til þess að hægt sé að hagnýta gljúp lög, sem eru fyrir neðan 150 m. dýpt. Reynist að-

rennslíshitinn á nyrðri hlutanum yfir  $230^{\circ}\text{C}$ , eru möguleikarnir þar meiri, enda þótt ekki megi á þessu stigi málsins reikna með þeim.

Innan brúngrýtismyndunarinnar geta þó verið takmörkuð gljúp svæði, sem geta gefið vatnslitla eða jafnvel þurra gufu um stundarsakir. En rétt er að treysta ekki á holur, sem gefa slíka gufu.

Á Suðursvæðinu virðast því litlir möguleikar að hagnýta varmainnihald bergsins, með því að vinna gufu úr gljúpum berglögum. Með þessu er þó ekki sagt, að varmainnihaldið sé óhagnýtanlegt. Ef mikil gufa er unnin úr djúpum borholum, er engan veginn útilokað, að gufuvinnslan geti framkallað víðáttumikla vatnsstrauma, sem leita að holunum, og bera varma bergsins með sér, eins og skýrt var frá í 4) grein undangengins kafla.

Á bls. 190 var komið að þeirri niðurstöðu, að varmainnihald bergsins undir Suðursvæðinu frá 200 m. niður í 1.200 m. dýpt væri  $2,5 \cdot 10^{14}$  kg<sup>o</sup>, ef reiknað er með kælingu úr  $210^{\circ}\text{C}$  í  $160^{\circ}\text{C}$ . Reynist mögulegt að hagnýta 10 % þessa varma fást um  $1,2 \cdot 10^8$  tonn af  $210^{\circ}\text{C}$  heitu vatni (Vatnið kemur  $210^{\circ}\text{C}$  heitt að holunum). Gufumagnið verður því  $2,5 \cdot 10^7$  tonn, þ.e. 300 tonn/klst í 10 ár.

Gufuvinnslan gæti því orðið meiri en reikna má með út frá sjálfu aðrennslinu.

#### 4) Aðrir hlutar Hengilsvæðisins.

Framangreindar áætlanir eru gerðar fyrir Suðursvæðið eingöngu. Á öðrum hlutum svæðisins eru að sjálfsögðu einnig möguleikar, en vegna þess hve lítið hefur verið borað þar er erfitt að átta sig á aðstæðunum, m.a. er aðrennslíshitinn ekki kunnur. Þó virðist vart koma til mála, að hann sé þar lægri en á Suðursvæðinu. Hinsvegar er afrennsli þessara svæða minna en Suðursvæðisins, og má vera, að það beri vott um nokkuð minni möguleika, einkum ef hugsað er til

Þess að vinna gufuna við artesiskan þrýsting vatnsins í grágrýtis- mynduninni. Hér skal þó ekki gerð tilraun til þess að áætla mögu- leikana á svæðunum.

Bæði Miðsvæðið og Norðursvæðið eru óhentugri til virkjunar en Suðursvæðið. Samgöngur við þessi svæði eru erfiðari, og sérstak- lega er slæmt, að kælivatn er þar ekki fáanlegt. Svæðin liggja auk þess í 250 til 400 m hæð y.s. og gæti verið erfitt að ná sjálfrennand vatni úr grágrýtismynduninni upp í það mikla hæð. Úr þessu verður þó ekki skorið nema með djúpum borholum.

Miðsvæðið liggur í beinu framhaldi af Suðursvæðinu, og virðist eðlilegt, að þangað verði leitað, þegar möguleikar Suður- svæðisins eru þrotnir, og bortækj<sup>n</sup>in e.t.v. komin á hærra stig.

Vestursvæðið hefur hinsvegar að því leyti til sérstöðu, að þaðan mætti flytja heitt vatn til Reykjavíkur, og hefði gufuvinnsla á þessu svæði því meiri fjárhagslega þýðingu. En jarðhiti Vestur- svæðisins er hinsvegar áberandi minni en jarðhiti hinna svæðanna. Borholurnar í Miðdal og við Kolviðarhól bera þess glögg merki. Við Kolviðarhól varð alls ekki vart við jarðhita í 90 m djúpri holu, og er það jafnvel furðulegt, þar eð yfirborðshiti er bæði í Hvera- dölum og Sleggjubeinsdal. Hugsanleg skýring á þessu er sú, eins og nefnt var hér að framan, að hæð svæðisins sé of mikil til þess að artesískt vatn frá grágrýtismynduninni geti leitað þangað, og gæti því verið örðugt að ná því í borholur.

Þrátt fyrir þessar niðurstöður er ekki rétt að útiloka möguleika Vestursvæðisins. Frekari vitneskja fæst þó aðeins með djúpri borholu á þessum slóðum, og virðist sjálfsagt að hefja borun hennar. Þó má ekki gera það nema með áhöldum, sem náð geta niður í grágrýtismyndunina, og þarf því að reikna með a.m.k. 500 m dýpt, og borinn þyrfti að geta farið í 750, ef þörf krefur.

## 7. Kafli.

### STRAUMVIÐNÁM Í BORHOLUM.

Vídd borhola á jarðhitasvæðum ber að velja þannig, að vinnslukostnaður hvernar einingar gufunnar eða heita vatnsins sé eins lítill og mögulegt er. Vinnslukostnaðurinn er hinsvegar summa af þrem liðum, þ.e. borkostnaði, virkjunarkostnaði og flutningskostnaði ofanjarðar. Það er einkum borkostnaðurinn, sem hefur áhrif á val holuvíddarinnar.

Nú vex borkostnaðurinn hröðum skrefum, þegar komið er yfir 150 mm. vídd, og má segja, að það sé tæknilega ill framkvæmanlegt að gera gufuholur, sem eru víðari en 500 mm.

Hinsvegar vex flutningsgeta sjálfrar holunnar með 2,5 veldi víddarinnar, og er af þeim ástæðum heppilegt að gera víðar holur. Þó verður að hafa í huga, að straumviðnámið frá berginu og til yfirborðsins er summa af tveim liðum, þ.e. aðrennslisviðnámið og viðnámið í sjálfri holunni. Aðrennslisviðnámið er hinsvegar háð leka bergsins, og virðist það miklu minna háð vídd holunnar en straumviðnámið í henni sjálfri. Þannig koma mjög víðar holur ekki að fullum notum, þar sem þær fá ekki alla þá gufu, sem þær geta flutt.

Við val á vídd holanna verður því að fara þenn meðalveg, sem tryggir lægstan vinnslukostnað. Af þeim ástæðum er óhjákvæmilegt að gera reikningslega athugun á/straumviðnámi í borholum, og skal það gert hér á eftir.

Straumviðnám við mikla hraða í löngum pípum virðist ekki hafa verið tekið til gaumgæfilegrar athugunar, og er því nauðsynlegt að gera hér all víðtæka útreikninga.

Fyrst í stað skal gengið út frá því, að holurnar séu fóðraðar niður á botn, og megi því reikna með þeim eins og venjulegum pípum. Það virðist af bortæknilegum ástæðum rétt að hafa eins djúpa fóðrun og við verður komið. Síðar verður straumviðnámið í ófóðruðum holum tekið til athugunar.

1) Almennt um straumviðnám í pípum.

Gerum ráð fyrir pípu með víddinni  $d$  og þverfletinum  $f$ . Um hana streymi gas og hraði þess á staðnum  $x$  sé  $w$ . Hér er átt við meðaltal hraðans yfir þverflötinn, en þar sem Reynoldtala gufustraumsins er venjulega um og yfir eina milljón, má með nægri nálgun ganga út frá því, að hinn raunverulegi hraði í mestum hluta þverflatarins sé jafn meðalhraðanum.

Á staðnum  $x$  sé eðlisrúmmálið  $v$ , þrýstingurinn  $p$  og hitinn  $T$ . Orkujafnan fyrir ætæðan straum á bilinu  $dx$  verður þá:

Þensluorkan = breyting hreyfiorkunnar + núningsorka; eða með öðrum orðum <sup>1)</sup>:

$$- vdp = d(w^2/2g) + k \cdot dx \cdot w^2/2gd \quad 1)$$

Stærðin  $k$  er núningsstuðull pípunnar og er hann háður Reynoldstölu straumsins, þ.e.  $wd/u$ , en  $u$  er hinn kínematiski núningsstuðull gassins. Auk þess er þessi stuðull háður Machtölunni, sem er  $w/c$ , ef  $c$  er hljóðhraðinn í gasinu. Þetta síðasta atriði hefur þó fyrst þýðingu, þegar hraðinn  $w$  nálgast hljóðhraðann. Stuðullinn  ~~$k$~~  verður að finna með tilraunum, og eru línurit fyrir  $k$  gefin í þeim ritum, sem hér er vitnað í <sup>1)</sup>.

Auk jöfnu 1) gildir jafnstraumsjafnan:

$$fw/v = G \quad 2)$$

en  $G$  er magn straumsins.

Þá er sambandið milli  $p$ ,  $v$  og  $T$  ákveðið af gasjöfnunni, sem við fullkomið gas er:

$$pv = RT \quad 3)$$

1) Þessar grundvallarjöfnur fyrir straumi lofttegunda í pípum má finna í eftirfarandi ritum:  
E. SCHMIDT: Einführung in die technische Thermodynamik. Berlin 1944.  
L. PRANDTL: Führer durch die Strömungslehre. Braunschweig 1949.  
B. ECK: Technische Strömungslehre. Berlin 1941.



Venjuleg gös, m.a. gufa, eru þó ekki fullkomin, og koma þá aðrar jöfnur í stað þessarar.

Loks gildir fyrsta aðallögmál varmafræðinnar:

$$Q = dh + A\rho dv$$

Hér er  $Q$  varminn, sem gasið fær á bilinu  $dx$ ;  $h$  er hinn innr varmi þess, og  $A$  er orkuinnihald varmans, þ.e.  $1/427$ , ef reiknað er í tekniskum einingum.

Ef gert er ráð fyrir því, að pípan sé fullkomlega einangruð, er núning svarminn eini varminn, sem gasið fær á bilinu  $dx$ , þ.e. fyrsta aðallögmálið verður:

$$Ak \cdot dx \cdot w^2 / 2g = dh + A\rho dv \quad 4)$$

Með framangreindum 4 jöfnum má reikna stærðirnar  $w$ ,  $p$ ,  $v$  og  $T$ , en þær eru allar háðar frumstærðinni  $x$ . Það er tiltölulega auðvelt að reikna hina almennu lausn þeirra, ef fullkomið gas streymir um pípunna. Skal sú lausn gefin hér á eftir, en fyrst skal þó vikið að einfaldari lausn, sem gildir við sérstakar aðstæður, þ.e. þegar hraðinn er lítill, en þessi lausn hefur mikla hagnýta þýðingu.

## 2) Straumviðnám í löngum pípum við lítinn hraða.

Við venjulegar aðstæður er gashraðinn í pípum hafður lítill, til þess að komast hjá miklu straumviðnámi, og verða framangreindar jöfnur þá einfaldari.

Streymi gas með litlum hraða um langa pípu má sleppa fyrri liðnum í hægri hlið jöfnunnar 1), þ.e. liðnum  $d(w^2/2g)$ . Þar sem núning orkan breytist í varma verður ástandsbreyting gassins auk þess ísenthaisk, þ.e. ísotermisk, ef gasið er fullkomið, og kemur þá ein jafna  $p v = C = RT$  fyrir jöfnurnar 3) og 4).

Jafnvel þótt gufa sé allí langt frá því að vera fullkomið gas breytist þv hennar lítið við ísenthalpíska þenslu á því þrýstingsbili, sem venjulega kemur fyrir á jarðhitasvæðum, og gildir framangreind forsenda því einnig um þurra gufu.

Jöfnurnar verða nú:

$$- vdp = k \cdot dx \cdot w^2 / 2gd \quad 5)$$

$$wf/v = G \quad 6)$$

$$pv = C \quad 7)$$

Á því hraðasviði, sem hér kemur til mála, er núningsstuðullinn  $k$  lítið breytilegur, og má því skoða hann óbreytanlegan við lausn jafnanna, en nota síðan meðalgildi við útreikninga. Jöfnurnar verða þá auðleystar, og fæst, ef  $p_1$  er þrýstingurinn við inntakið, en  $p_2$  við úttakið,  $l$  lengd pípunnar, og  $G$  gasmagnið <sup>1)</sup>:

$$p_1^2 - p_2^2 = klCG^2 / gf^2 d \quad 8)$$

Ef  $v_m$  er eðlisrúmmálið við meðalþrýstinginn  $(p_1 + p_2)/2$  má rita jöfnu 8):

$$G^2 = (p_1 - p_2) 2gf^2 d / klv_m \quad 9)$$

Ef reiknað er í hinu tekniska einingarkerfi, er  $p$  í  $\text{kg/m}^2$ ,  $l$  í  $\text{m}$ ,  $d$  í  $\text{m}$ ,  $C$  í  $\text{m}$ ,  $G$  í  $\text{kg/sek}$ ,  $g$  í  $\text{m/sek}^2$ ,  $f$  í  $\text{m}^2$  og  $v$  í  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Venjulega er  $p$  þó reiknað í  $\text{at}$ ,  $d$  í þunlungum og  $G$  í tonn/klst, og verður jafna 9) með þessum einingum, ef gengið er út frá  $k = 0,02$ :

$$G^2 = 0,88(p_1 - p_2)d^5 / lv_m \quad 10)$$

Eins og þegar hefur verið tekið fram gildir þessi jafna fyrir litla hraða, en gildistakmörk hennar skulu athuguð í næstu grein.

1) Sjá B. ECK: Technische Strömungslehre.

3) Straumviðnám við mikinn hraða.

Gufuhraðinn í borholum er venjulega það mikill, að hreyfiorkan er ekki hverfandi liður, og má því að óathuguðu máli ekki nota framangreinda jöfnu 8) við útreikninga á þrýstingsfalli í borholum. Við þessar aðstæður þarf að leysa jöfnurnar 1) til 4) og skal sú lausn gefin hér á eftir. Verður þá gengið út frá fullkomnu gasi. Eins og þegar hefur verið tekið fram er gufa ekki fullkomið gas, og verða niðurstöðurnar því nálgun, en hún mun þó vera fyllilega nothæf við venjulegar aðstæður.

Ef  $dN$  táknar núningsorkuna á bilinu  $dx$ , og  $c_p$  og  $c_v$  eru eðlisvarmar gassins, má losna við  $T$  úr jöfnunum 3) og 4), og fæst þá ein jafna:

$$AdN = +c_v v dp/R + c_p p dv/R \quad 11)$$

Einnig má losna við  $w$  úr jöfnu 1) með því að nota jöfnu 2). Fæst þá eftirfarandi jafna:

$$v dp + G^2 v dv / f^2 g = - dN \quad 12)$$

Með því að leggja jöfnu 11) við jöfnu 12) fæst ein jafna fyrir sambandinu milli  $p$  og  $v$ , og er auðvelt að leysa hana. Ef eðlisvarmahlutfallið  $c_p/c_v$  er nefnt  $m$ , verður útkoman:

$$w^2/2g + mpv/(m-1) = i_0 \quad 13)$$

Þetta er fyrsta integral jafnanna 1) til 4), og er raunverulega orkujafnan. Integrationsstuðull hennar  $i_0$  er enthalpi gassins við inntakið í öpuna <sup>1)</sup>.

---

1) Hér er  $i_0$  reiknað í mekanískum einingum.

Næsta skref er að leysa differentialjöfnu 1) með hliðsjón af jöfnunum 2) og 13). Er þá heppilegt að nota breytistærðina  $w$ , en losna við bæði  $v$  og  $p$  úr jöfnunum. Stærðin  $p$  og þar með  $dp$  fæst úr jöfnu 13) og  $v$  úr jöfnu 2). Verður jafna 1) þá ein eftir, og fæst eftir örlítinn útreikning:

$$(2g(m-1)i_0/(m+1)w^3 - 1/w)dw = m k dx/(m+1)d \quad 14)$$

Þetta er hin endanlega differentialjafna fyrir hraðanum. Áður en lausn hennar er fundin er nauðsynlegt að gera sér eftirfarandi ljóst.

Sviginn í vinstri hlið jöfnunnar verður núll fyrir ákveðinn hraða  $w_h$ :

$$w_h^2/2g = (m-1)i_0/(m+1) \quad 15)$$

Við þennan hraða vex  $dw/dx$  út yfir öll takmörk, þ.e. á þeim stað, sem  $w = w_h$  vex hraðinn mjög ört. Nú er  $w_h$  einmitt hljóðhraði gassins, og ætti því að myndast yfirhljóðhraði (supersonic) á þessum stað. En vegna þess að þverflötur pípunnar er óbreytilegur hlyti hin mikla hraðaukning að vera samfara mjög snöggri aukningu eðlisrúmmálsins og snöggu þrýstingsfalli, þ.e. í pípunni myndast þynningarþrep. En nú má sýna fram á, að slíkt þynningarþrep getur ekki verið stöðugt, og myndi það hverfa svo að segja samstundis og það myndast. Kemur þetta m.a. fram í því, að þynningarþrep er samfara entropiminnkun, en það er sem kunnugt ekki mögulegt. <sup>1)</sup>

Ekki er ástæða að rekja þessi atriði nánar hér, en aðalniður-

<sup>1)</sup> Almennar athuganir á þrýstingsþrepum má finna í riti L. PRANDTL Sjá tilvitnun bls. 203.

staðan er sú, að ~~þyngdar~~<sup>þyngingar</sup>þrepið getur ekki myndast innan pípunnar, og getur gasið því ekki náð hljóðhraða í henni. Úttakið er eini staðurinn þar sem hljóðhraði getur myndast án þyngingarþreps, og þar sem hljóðhraðinn getur ekki myndast í sjálfri pípunni, er hann mesti hraði, sem myndast getur í úttakinu.

Þýðingarmesta afleiðing þessa er sú, að flutningsgetu pípunnar eru takmörk sett, og getur hún ekki flutt meira magn en það, sem samsvarar hljóðhraða í úttakinu. Þessi hraði kemur fram við ákveðið þrýstingsfall, og skal það nefnt hið hætna (critical) þrýstingsfall pípunnar. Verður það reiknað út hér á eftir.

Til hvers inntaksþrýstings svarar því ákveðinn hætinn úttaksþrýstingur, og pípan flytur þá það mesta magn, sem hún getur flutt við hinn gefna inntaksþrýsting. Þótt úttaksþrýstingurinn sé lækkaður niður fyrir hinn hætna úttaksþrýsting eykst flutningsmagnið ekki; gufan þenst þá út fyrir utan pípunna.

Víkjum nú aftur að jöfnu 14), Með hliðsjón af jöfnu 15) má rita hana:

$$\left( w_h^2/w^3 - 1/w \right) dw = mk dx/d(m+1)$$

Með því að gera ráð fyrir óbreytilegum núningsstuðli er auðvelt að leysa þessa jöfnu. Það skal þó tekið fram, að þessi forsenda er engan veginn nauðsynleg, þar sem leysa má jöfnuna einnig fyrir breytilegan núningsstuðul. Þetta er þó heppilegast að gera með "iteration", þ.e. jafnan er fyrst leyst fyrir óbreytilegan stuðul, og síðan er hraðinn reiknaður út, og notaður til þess að finna Reynoldtöluna á hverjum stað. Með henni er hinn rétti núningsstuðull reiknaður, og jafnan integreruð á ný með hinum breytilega stuðli. Við útreikninga á gufuholum er sú skekkja, sem kemur inn, með því að nota óbreytilegan

núningsstuðul þó það lítil, að hún skiptir engu máli, og skal það því látið nægja að nota óbreytilegan stuðul.

Með randskilyrðinu  $w = w_1$  við inntakið er lausn framan- greindrar jöfnu:

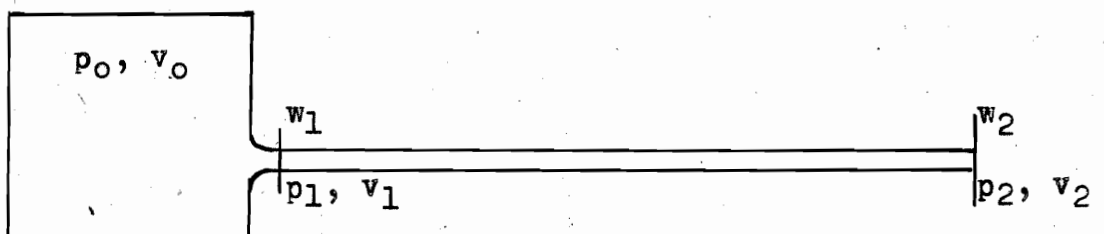
$$\left( \frac{w_h^2}{w_1^2} - \frac{w_h^2}{w^2} \right) / 2 + \ln(w_1/w) = mkx/d(m+1) \quad 16)$$

Þetta er hin almenna lausn jöfnukerfisins 1) til 4), þegar gengið er út frá fullkomnu gasi og óbreytilegum núningsstuðli  $k$ . Jafna 16) gefur sambandið milli  $w$  og  $x$ , en stærðirnar  $p$ ,  $v$  og  $T$  má finna með jöfnunum 2), 3) og 13). Er þannig hægt að framkvæma útreikninga á þrýstingsfalli. Áður en lengra er haldið er þó nauðsynlegt að reikna hið hætta þrýstingshlutfall.

Ef  $l$  er lengd pípuinnar og hljóðhraði er við úttakið, en hlutfallið  $w_h/w_1$  nefnt  $a$ , verður jafna 16):

$$\left( a^2 - 1 \right) / 2 - \ln a = mkl/d(m+1) \quad 17)$$

Þessa jöfnu er auðvelt að leysa með tilliti til  $a$ , og er því hlutfallið milli inntakshraðans og úttakshraðans þekkt. Nú þarf að athuga ástand gassins á þrem stöðum eins og sýnt er á eftirfarandi ríssi:



Mynd 8.

Gert er ráð fyrir að pípan taki gas úr stórum geymi, en gasið hafi þar þrýstinginn  $p_0$  og eðlismálmálið  $v_0$ . Í inntaki pípunnar sé þrýstingurinn  $p_1$ , eðlismálmálið  $v_1$  og hraðinn  $w_1$ , en  $p_2$ ,  $v_2$  og  $w_2$  í úttakinu. Við þessar aðstæður er þrýstingsfall pípunnar  $p_0 - p_2$  og hið hætta þrýstingshlutfall er skilgreint  $(p_0/p_2)_h$ .

En framangreindir reikningar ná aðeins til pípunnar sjálfrar, þ.e. þeir gefa sambandið milli  $p_1$ ,  $v_1$  og  $p_2$ ,  $v_2$  en ekki sambandið við  $p_0$ ,  $v_0$ . Til þess að finna hið síðara þarf að gera ákveðna forsendu um ástandsbreytinguna í inntaksstút pípunnar. Eðlilegast er að gera þar ráð fyrir ísentropiskri breytingu, þ.e.

$$p_0 v_0^m = p_1 v_1^m \quad 18)$$

Þegar hljóðhraði er í úttakinu er  $w_2 = w_h$ , og þar sem  $i_0 = m p_0 v_0 / (m - 1)$ , er samkvæmt jöfnunum 13) og 15):

$$p_1 v_1 = p_0 v_0 (1 - (m - 1)/(m + 1)a^2) \quad 19)$$

$$p_2 v_2 = 2 p_0 v_0 / (m + 1) \quad 20)$$

Nú er  $v_2/v_1 = a$ , og má þá með jöfnunum 19) og 20) reikna hið hætta þrýstingshlutfall:

$$(p_0/p_2)_h = a(m + 1)/2(1 - (m - 1)/(m + 1)a^2)^{1/(m - 1)} \quad 21)$$

Mesta flutningsmagn pípunnar  $G_h$  reiknast síðan með eftirfarandi jöfnu:

$$G_h = f w_h / v_2 = f w_h / a v_1$$

Þegar lengd pípunnar er mjög lítil, þ.e. hún er aðeins stútur, verður  $a = 1$ , og fæst þá:

$$(p_0/p_2)_h = ((m + 1)/2)^{m/(m - 1)}$$

Þetta er einmitt hið hætta þrýstingshlutfall fyrir stúta.<sup>1)</sup>

Borholur á jarðhitasvæðum eru venjulega yfir 100 m. djúpar, þ.e. liðurinn í hægri hlið jöfnunnar 17) er venjulega yfir 5, og í dýpri holum er hann 10 til 30. Þessi liður er því stór í samanburði við  $\ln a$  og  $1/2$  og má því við dýpri holur ganga með góðri nálgun út frá:

$$a^2 = 2mkl/d(m + 1) \quad 22)$$

Einnig verður jafna 21) mun einfaldari, þ.e.

$$(p_0/p_2)_h = \sqrt{m(m - 1)kl/2d} \quad 23)$$

Loks verður við sömu skilyrði mesta flutningsmagn pípunnar við inntaksþrýstinginn  $p_0$  og inntakseðlisrúmmálið  $v_0$ :

$$G_h = f \sqrt{gp_0 d/klv_0} \quad 24)$$

Með þessu skal lokið við hina fræðilegu athugun, en hinsvegar er rétt að drepa á örfá dæmi til frekari glöggvunar.

Á það hefur þegar verið minnzt, að gufa sé ekki fullkomið gas, og séu framangreindar niðurstöður því nálgun. Við útreikninga á þrýstingsfalli í gufupípum hefði verið réttara að nota ástandsjöfnu gufunnar í stað gasjöfnunnar 3) og geta einnig þess, að hinn innri varmi í jöfnu 4) er þá ekki eingöngu háður  $T$ .

Nú eru þær ástandsjöfnur, sem reiknaðar hafa verið fyrir gufu óþægilega flóknar, og hefðu framangreindir reikningar þá orðið talsvert erfiðari.

En lítið hefði áunnizt með þessu. Það þrýstingssvið, sem

---

<sup>1)</sup> Sjá Schmidt tilvitnun bls. 203.



fyrir kemur í jarðgufuholum er venjulega 1 til 20 at, jafnvel þótt bor- að sé niður á yfir 500 m. dýpt. Stafar þetta meðal annars af því, að þótt reikna megi með yfir 50 ata þrýstingi á 500 m. dýpt, er þrýstingsfallið inn í holurnar það mikið, að botnþrýstingurinn verður venjulega talsvert fyrir neðan 20 at, ef holan er gerð nægilega víð.

En þurr gufa er á framangreindu þrýstingssviði ekki það langt frá því að fylgja jöfnunni  $p_v = RT$  að það geti skipt verulegu máli við þá útreikninga, sem gerðir eru fyrir jarðgufuholur. Fráviknið frá gasjöfnunni er fyrst verulegt, þegar komið er upp fyrir 25 ata í námunda við suðuhita.

Hér ber einnig að geta þess, að reikningarnir eru einnig að því leyti til nálgun, að reiknað hefur verið með óbreytilegum núningsstuðli  $k$ , en þetta er að sjálfsögðu ekki fyllilega rétt. Auk þess er gildi núningsstuðulsins háð ástandi innra yfirborðs pípunnar, og getur það verið í nokkurri óvissu, einkum við pípur, sem farnar eru að tærast. Eins og áður var getið er gildi stuðulsins háð Reynoldtölunni og Macktölunni. Um áhrif þeirrar síðarnefndu hefur lítið sem ekkert verið ritað, og kemur hér því nokkur óvissa inn í reikningana. Það er því tilgangslítið að eyða tíma í útreikninga með flóknum ástandsjöfnum, þegar ónákvæmni er á öðrum stöðum í reikningunum.

Þrátt fyrir þessa annmarka eru framangreindar niðurstöður fyllilega nothæfar við þá útreikninga, sem koma fyrir við jarðhita-virkjanir, einkum ef þess er gett að nota meðalgildi fyrir  $m$  og  $k$ .

Fyrri stuðulinn má finna í gufutöflum <sup>1)</sup>, og núningsstuðulinn má finna í hinum fjölmörgu ritum um straumfræði (sjá tilvitnanir bls. 203).

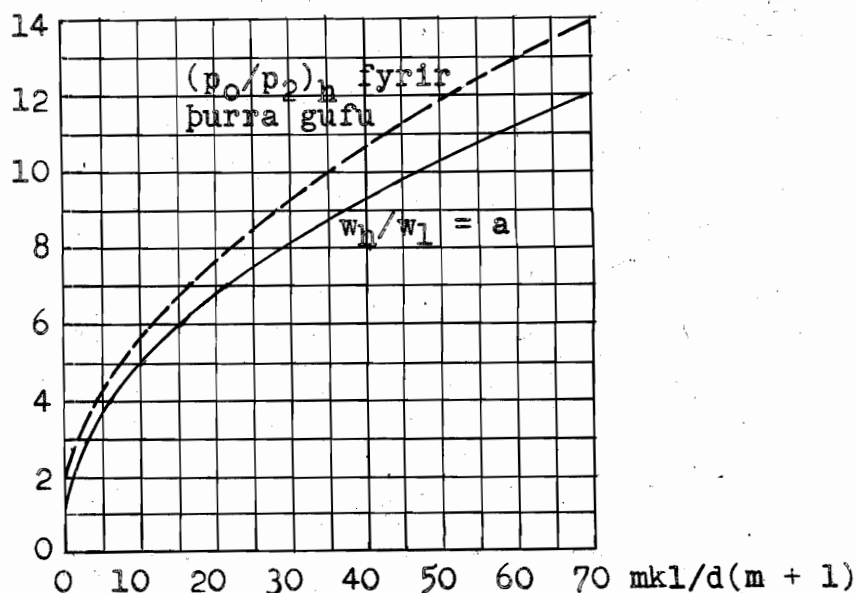
---

<sup>1)</sup> J.H. KEENAN and F.G. KEYS: Thermodynamic Properties of Steam. John Wiley & Sons. New York 1936.

Loks ber að geta þess, að enthalpi gufunnar er skilgreind í framangreindum reikningum  $i = mpv/(m - 1)$ , en þetta eru allt önnur gildi en þau, sem eru í hinum venjulegu enthalpitöflum. Þessi munur stafar af því, að með framangreindri skilgreiningu er hinn innri (molekulari) suðuvarmi ekki reiknaður með. Þetta skiptir þó engu máli, því hér er aðeins reiknað með enthalpidifferensum, og kemur hið absolutta gildi því ekki inn í reikningana.

Á jarðhitasvæðum má gera ráð fyrir allt að 500 m. djúpum og 8" til 12" víðum borholum. Hér skal fyrst hið hætta þrýstingshlutfall reiknað fyrir 3 mismunandi víddir, þ.e. 8", 10" og 12", og 2 dýptir, þ.e. 250 m. og 500 m. Gengið er út frá því, að holurnar séu fólðar niður á botn. Ef gengið er út frá þrýstingssviðinu 1 ata til 10 ata nálægt þéttingarlínunni, verður  $m = 1,31$ . Núningsstuðullinn skal áætlaður 0,018, en þetta er góð meðaltala fyrir örlítið tærðar stálpípur við þær Reynoldtölur, sem hér koma til mála.

Fyrst þarf að leysa jöfnu 17), og eru lausnir hennar gefnar á eftirfarandi línurit:



Mynd 8.

Fást þá eftirfarandi gildi á hinu hætna þrýstingshlutfalli:

	vídd	8"	10"	12"
Dýpt 250 m.	$(p_0/p_2)_h = 6,4$	5,7	5,2	
" 500 "		8,7	7,7	7,0

Þá skal gufumagnið við hið hætna þrýstingshlutfall reiknað, þegar gengið er út frá 6 ata, 170°C og 0,33 m<sup>3</sup>/kg eðlisrúmmáli á botni hinna 250 m. djúpu hola, en 8 ata, 180°C og 0,25 m<sup>3</sup>/kg á botni hinna 500 m. djúpu. Gufan er þá örlítið yfirhitið. Gufumagnið og hinn hætni mótþrýstingur eru gefin í eftirfarandi töflu:

	Vídd	8"	10"	12"
Dýpt 250 m.	$G_h = 30$	53	84 tonn/klst.	
	$p_2 = 0,94$	1,05	1,15	
" 500 "	$G_h = 29$	52	82	
	$p_2 = 0,92$	1,04	1,14	

Vegná hins lága inntakshraða hefur hér ekki verið reiknað með neinni breytingu í inntakinu, þ.e.  $v_0 = v_1$ . Þar sem mótþrýstingurinn í framangreindum dæmum er h.u.b. 1 ata, er magnið  $G_h$  það minnsta, sem holurnar geta flutt við hætið þrýstingsfall. Með hærri botnþrýsting vex flutningsmagnið, en þrýstingurinn í úttakinu er þá yfir 1 ata, og gufan þenst þá fyrir utan pípuana, ef holan er látin gjósa óhindruð.

Þegar reikna skal þrýstingsfall, sem er minna en hætið, verður að nota jöfnu 16). Fyrir gefið flutningsmagn og inntaksþrýsting fæst  $w_1$  með jöfnu 2) og  $w_h$  með jöfnu 15). Jafna 16) gefur þá  $w_2$  og jafna 2)  $v_2$ . Síðan er  $p_2 v_2$  fundið með jöfnu 13) og fæst þá  $p_2$ , og því þrýstingsfallið  $p_1 = p_2$ .

Tökum dæmi, þ.e. reiknum þrýstingsfallið í 250 m. djúpri og 10" víðri holu, þegar 48 tonn/klst af þurri gufu streyma um hana, en byrjunarástandið sé það sama og gert var ráð fyrir hér að framan, þ.e.  $p_0 = 6$  ata og  $v_0 = 0,33 \text{ m}^3/\text{sek}$ .

Nú er  $m = 1,31$ , og fæst þá hljóðhraðinn við þetta byrjunarástand  $w_h = 477 \text{ m/sek}$ . Inntakshraðinn er  $87 \text{ m/sek}$ , þegar ekki er tekið <sup>tillit</sup> til ástandsþreyingarinnar í inntaksstútnum, en hún er hverfandi við svo lítinn hraða. Jafna 16) verður þá:

$$((477/87)^2 - (477/w_2)^2)/2 - \ln(w_2/88) = 1,31 \cdot 0,018 \cdot 250/2,31 \cdot 0,25$$

Með þessar jöfnu fæst  $w_2 = 167 \text{ m/sek}$ , og  $v_2 = 0,63 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Þá er  $p_2 v_2 = 19.500$  og því  $p_2 = 3,1$  ata og þrýstingsfallið  $2,9$  ata.

Þrýstingsfallið við 48 tonn/klst er því  $2,9$  at, en við 53 tonn/klst var það  $4,95$  at. Af þessu má sjá, að þrýstingsfallið vex mjög ört, þegar þrýstingshlutfallið nálgast það að vera hætíð.

Ef þrýstingsfallið er reiknað með jöfnu 8), fást  $p_2 = 3,4$  ata, og þrýstingsfallið því  $2,6$ . Af þessu má sjá, að jafna 8) gefur samlega nálgun enda þótt flutningsmagnið sé nálægt hinu hætna flutningsmagni.

Nánari athugun sýnir, að jöfnu 8) má nota við útreikninga á þrýstingsfallinu við allt að 80 % af hinu hætna flutningsmagni.

#### 4) Straumviðnám rakkur gufu.

Á svæðum með vatnsaðrennsli er sjaldgæft, að þurr gufa fái stúr borholum. Holurnar munu yfirleitt fá mjög heitt vatn, sem breytist að nokkru leyti í gufu á leiðinni til yfirborðsins. Við slíkar aðstæður þarf að endurskoða framangreindar niðurstöður.

Í fyrsta lagi þer að gæta þess, að við raka gufu er annað

samband milli  $p$  og  $v$ , en við þurra gufu. Í öðru lagi er hreyfiorkan summa af hreyfiorku gufunnar og vatnsdropanna, en hraði þeirra er ekki sá sami. Loks hafa vatnsdroparnir áhrif á núningsstuðulinn  $k$ , þar sem þeir auka túrbúlensinn í straumnum. Þessi atriði skulu nú athuguð nánar.

Gerum ráð fyrir pípu með lengdinni  $l$ , þvermálinu  $d$  og þverfletinum  $f$ . Um hana streymi magnið  $G_b$  af blöndu af gufu og vatni. Ef eðlisrúmmál blöndunnar er  $v_b$ , skal hraði hennar skilgreindur:

$$w_b = G_b v_b / f \quad (25)$$

Ef hvert kíló af blöndu inniheldur  $u$  kíló af gufu, verður eðlisrúmmál blöndunnar, ef  $v_g$  er eðlisrúmmál gufunnar en  $v_v$  eðlisrúmmál vatnsins:

$$v_b = (1 - u)v_v + uv_g \quad (26)$$

Þá er enthalpi blöndunnar, ef  $i_g$  er enthalpi gufunnar en  $i_v$  enthalpi vatnsins:

$$i_b = (1 - u)i_v + ui_g \quad (27)$$

Ef  $w_g$  er hraði gufunnar og  $w_v$  er hraði vatnsdropanna, er hreyfiorka blöndunnar:

$$E = (1 - u)w_v^2/2g + uw_g^2/2g \quad (28)$$

Nú er eðlisrúmmál gufunnar miklu meira en eðlisrúmmál vatnsins, og er fyrri liðurinn í jöfnu 26) því venjulega hverfandi lítil í samanburði við seinni liðinn. Aðeins þegar  $u$  er mjög lítið þarf að taka tillit til hans. Af þessum ástæðum má ganga út frá  $v_b = uv_g$ , og hraði blöndunnar verður raunverulega jafn hraða gufunnar, þ.e.  $w_b = w_g$ .

Vatnsdroparnir, sem gufan flytur með sér, fara miklar króka-

leiðir í pípunni; milli þeirra eru stöðugir árekstrar, og einnig rekast þeir á veggina. Af þessum ástæðum og vegna hins háa eðlisþunga þeirra verður hraði þeirra talsvert minni en hraði gufunnar.

Það er að sjálfsögðu talsverðum vandkvæðum bundið að gera sér hugmynd um hinn raunverulega hraða dropanna. Engar mælingar hafa farið fram á þessu, enda munu þær vera mjög erfiðar.

Í gufutúrbinum, sem reknar eru með eimsvala, myndast venjulega nokkur raki í síðustu þrepunum, og geta yfir 10% af þunga gufunnar þétzt á þessum stöðum. Vatnið kemur fram sem örfínir dropar í gufunni. Með mælingum hafa menn komið að þeirri niðurstöðu, að droparnir nái yfirleitt aðeins 10% til 15% af hraða gufunnar. Gefur þetta bendingar um hinn hlutfallslega hraða dropanna.

Þá má benda á það, að goshæð gufuhola er aðallega háð hraða þess vatns, sem er í gufunni. Nýja holan í Krýsuvík gýs um 50 m, en gufuhraðinn í úttakinu er um 300 m/sek. Bendir þetta til þess, að vatnsdroparnir hafi a.m.k. ekki yfir 50 m/sek hraða, þ.e. ekki yfir 17% af hraða gufunnar. Líkar niðurstöður koma fram við athugun á öðrum holum. Kemur þetta að nokkru leyti heim við framangreindar mælingar í gufutúrbinum. Virðist af þessu mega ráða, að hraði vatnsdropanna sé 10% til 20% af hraða gufunnar, og skal gengið út frá því hér.

En við þessar aðstæður verður hlutdeild vatnsins í hreyfiorkunni litil, þegar  $u$  er ekki undir 0,1. Það má því með góðri nálgun rita hreyfiorkuna  $E = bw_g^2/2g$ , og er  $b$  þá stuðull, sem reiknast með eftirfarandi jöfnu:

$$b = w_v^2/aw_g^2 + 1$$

Við þær aðstæður, sem hér hafa verið nefndar, þ.e. að  $w_v$  er 10% til 20% af  $w_g$  og  $u$  er 0,1 til 0,2, er  $b$  1,1 til 1,4.

Hinn mikli munur á hraða gufunnar og vatnsdropanna virðist geta haft þá kynægu afleiðingu, að droparnir geti orðið kaldari en gufan. Á hliðum dropa, sem eru í hröðum gufustraumi, getur myndast nokkur undirþrýstingur, sem hefur uppgufun frá þeim og kælingu þeirra í för með sér. Ekki er þó vitað, hvort slíkt á sér stað.

Eðlisrúmmál gufu í gufu-vatnsblöndu er eingöngu háð þrýstingnum og hinu hlutfallslega gufumagni hennar  $u$ . Stærðin  $u$  er hinsvegar háð ástandsþrengingunni.

Af ýmsum ástæðum er hengugt að rita ástandsþrengingu gufu-vatnsblöndunnar  $p v_b^n = C$ , og verður þá að finna veldisstuðulinn  $n$  með sérstökum útreikningi. Ef þessi jafna er differentíuð fæst:

$$n p v_b^{n-1} dv_b + v_b^n dp = 0$$
$$n = - \frac{v_b}{p} \frac{dp}{dv_b} \quad 29)$$

Með síðari jöfnunni er því hægt að reikna veldisstuðulinn, þegar sambandið milli  $p$  og  $v_b$  er þekkt.

Hinsvegar er  $v_b = u v_g$ , og er því:

$$dv_b/dp = u dv_g/dp + v_g du/dp$$

Ef þessi jafna er margfölduð með  $-p/v_b$  fæst:

$$1/n = - \frac{p}{v_g} \frac{dv_g}{dp} - \frac{p}{u} \frac{du}{dp} \quad 30)$$

Fyrri liðurinn í hægri hlið þessarar jöfnu er  $1/n_g$ , ef  $n_g$  er skilgreint með  $p v_g^n = C$ , en  $v_g$  er eðlisrúmmál hinnar þurrmettuðu gufu, þ.e.  $n_g$  er veldisstuðull fyrir ástandsþrengingu á línunni  $u = 1$  í gufulínuritinu, en  $n_g = 1,06$ . Seinni liðurinn er hinsvegar háður stærðinni  $u$ , og er því háður ástandsþrengingunni.

Nú er sambandið milli enthalpi og hreyfiorku gefið með eftirfarandi jöfnu, ef  $i_0$  er enthalpi við hraðann 0 en  $i$  enthalpi við hraðan

$$Aw^2/2g = i_0 - i$$

Við gufu- vatnsblöndu verður þessi jafna:

$$Aw_b^2/2g = i_0 - (1 - u)i_v - ui_g \quad 31)$$

Þær ástandsbreytingar, sem koma fram við straum blöndunar um pípur má afmarka milli tveggja breytinga, þ.e. milli ísenthalpískrar og ísentropískrar. Breytingin er ísenthalpísk, þegar hraðinn er lítill, þ.e. þegar liðurinn í vinstri hlið jöfnunnar 31) er hverfandi. Hinsvegar er hún mjög nálægt því að vera ísentropísk í stuttum pípum við mikla hraða. Þannig kemur slík breyting fram í stútum. Við venjulegar aðstæður mun ástandsbreytingin í pípum því liggja milli þessara breytinga.

Hér er gengið út frá því, að ástandsbreyting blöndunnar fylgi jöfnunni  $pv_b^n = C$ , og er því nauðsynlegt að ákvarða stuðulinn  $n$  fyrir ísenthalpíska og ísentropíska breytingu. Skal fyrst vikið að þeirri ísenthalpísku.

Við slíka breytingu er enthalpian óbreytt, þ.e.  $di = 0$ . Vinstri hlið jöfnu 31) er hverfandi lítill, og fæst stærðin  $u$  því:

$$u = (i_0 - i_v)/(i_g - i_v) = (i_0 - i_v)/r \quad 32)$$

Út frá þessu er auðvelt að finna seinni liðinn í hægri hlið jöfnunnar 30). Ef gengið er út frá því, að gufu- vatnsblandan hafi myndast við sjálfsuppgufun  $T_0$  heits vatns, verður  $i_0 = s_v T_0$ , ef  $s_v$  er meðaleðlisvarmi vatnsins frá 0 upp í  $T_0$ . Þessi stærð er lítið breytileg fyrir neðan  $200^\circ\text{C}$ , og er við  $300^\circ\text{C}$  aðeins 7% hærri en við  $200^\circ\text{C}$ . Við venjulegar aðstæður má því með góðri nálgun ganga út frá því, að



$s_v$  sé óbreytileg stærð.

Þá verður við ísenthalpíska breytingu  $u = s_v(T_0 - T)/r$ .

Nú er  $du/dp = (du/dT) \cdot (dT/dp)$ , en samkvæmt Claussius-Clapeyron jöfnunni er :

$$A(v_g - v_v)dp/dT = r/T,$$

og er því auðvelt að reikna seinni liðinn í hægri hlið jöfnu 30).

Fyrir ísenthalpíska ástandsbreytingu verður hún því, ef veldisstuðullinn er nefndur  $n_1$ , við þessa breytingu:

$$1/n_1 = 1/n_g + A p v_g T / r (T_0 - T) \quad 33)$$

Sökum þess hve  $v_v$  er lítið í samanburði við  $v_g$  hefur því verið sleppt í þessari jöfnu.

Við ísentropíska ástandsbreytingu verða útreikningarnir hliðstæðir. Við þessa breytingu er entropían  $q$  óbreytileg, þ.e.  $dq = 0$ . Ef  $q_v$  er entropía vatnsins, en  $q_g$  entropía gufunnar, er entropía gufuvatnsblöndunnar:

$$q_b = (1 - u)q_v + uq_g \quad 34)$$

Ef blandanmyndast við sjálfsuppgufun  $T_0$  heits vatns, er byrjunarentropían  $q_0 = s_v \ln(T_0/273)$ . Hér er reiknað með  $0^\circ\text{C}$  sem núllpúntki og óbreytilegu  $s_v$ . Við hitann  $T$  er entropía vatnsins hinsvegar  $q_v = s_v \ln(T/273)$ . Samkvæmt skilgreiningu entropiunnar er loks  $q_g - q_v = r/T$ . Með hliðsjón af jöfnu 34) verður því:

$$u = (q_0 - q_v)/(q_g - q_v) = \frac{s_v T}{r} \ln(T_0/T) \quad 35)$$

Út frá þessu er auðvelt að reikna seinni liðinn í hægri hlið jöfnu 30), og fæst þá með sömu aðferð og notuð var við ísenthalpíska

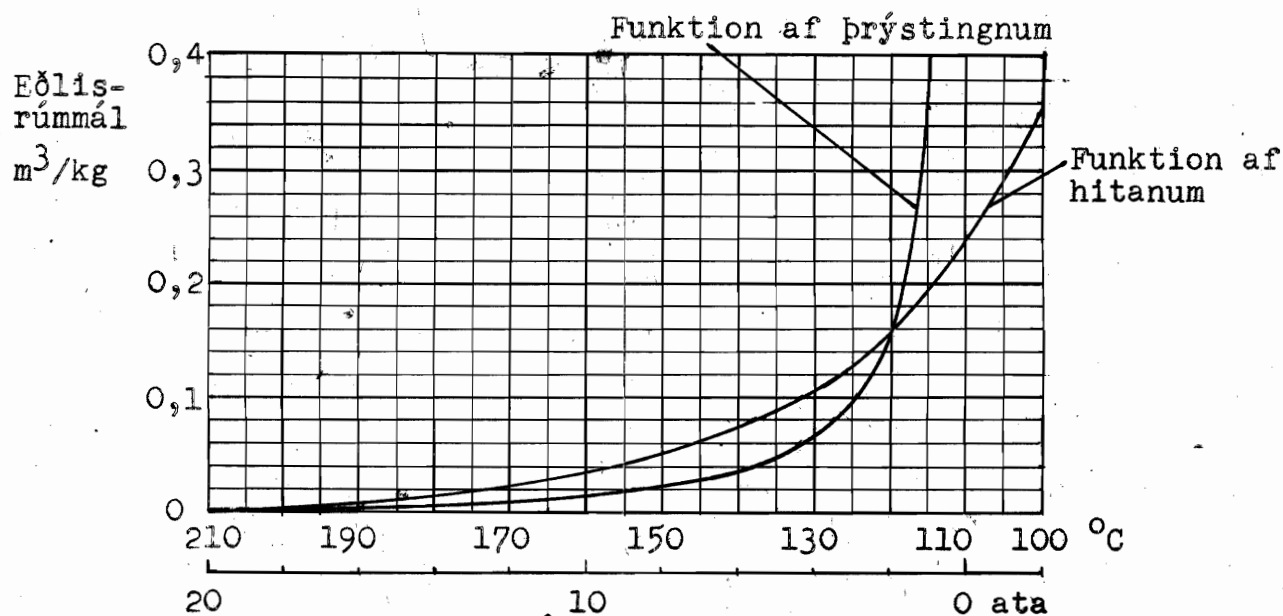
breytingu, þ.e. með notkun Claussius-Clapeyron jöfnunnar:

$$1/n_q = 1/n_g - \frac{Apv_g(\ln(T_o/T) - 1))}{r\ln(T_o/T)} \quad 36)$$

Hér er  $n_q$  veldisstuðullinn við ísentropíska ástands-breytingu gufu-vatnsblöndunnar.

Með jöfnunum 33) og 36) er því hægt að fylgjast með hinu reikningslega sambandi milli þrýstings og eðlisrúmmáls gufu-vatnsblöndunnar við þær tvær ástands-breytingar, sem um ræðir. Það skal tekið fram, að eina nálgunin, sem notuð hefur verið við útreikninga þessara jafna er forsendan um hið óbreytilega  $s_v$ , en hún hefir ekki teljandi áhrif á gildi þeirra. Claussius-Clapeyron-jafnan er sem kunnugt algerlega rétt, og verða framangreindar jöfnur því nær algerlega réttar.

Áður en lengra er haldið er rétt að taka dæmi. Við skulum athuga ísenthalpíska og ísentropíska þenslu  $210^\circ\text{C}$  heits vatns. Á eftirfarandi línuritil er eðlisrúmmál gufu-vatnsblöndunnar sýnt sem fúнкtion af hitanum og þrýstingnum við ísenthalpíska ástands-breytingu. Suðuprýstingur  $210^\circ\text{C}$  heits vatns er 19,4 ata.



Mynd 9.

Á eftirfarandi töflu eru stærðirnar  $u$  og  $n$  gefnar við mismunandi hita við sömu aðstæður, þ.e. þegar gengið er út frá  $210^{\circ}\text{C}$  heitu vatni.

	Hití	150	140	130	120	110	$100^{\circ}\text{C}$
Ísenthalpísk breyting	$u =$	0,123	0,141	0,158	0,177	0,197	0,215
	$n_1 =$	0,64	0,70	0,74	0,78	0,81	0,84
Ísentropísk "	$u =$	0,113	0,127	0,143	0,158	0,171	0,182
	$n_q =$	0,65	0,71	0,75	0,80	0,83	0,86

Af töflunni má sjá, að það skiptir líttlu máli fyrir stærðina  $n$ , hvort breytingin er ísenthalpísk eða ísentropísk, en hinsvegar kemur fram, að hún er breytileg, þ.e. háð ástandinu, gagnstætt því, sem er við fullkomin gös og þurra gufu.

Loks þarf að athuga og áætla núningsstuðul og núningsorku gufu-vatnsblöndunnar. Nú er  $w_p = w_g$ , og er því eðlilegt að reikna núningsorku blöndunnar út frá hraða gufunnar og rita:

$$dN = uk \cdot dx \cdot w_g^2 / 2gd \quad (37)$$

Þessi jafna er í fullu samræmi við núningsorkuliðinn í jöfnu 1). Stærðin  $dN$  er núningsorkan á hvert kíló af blöndu, en þar sem núningsorka gufu er  $k \cdot dx \cdot w_g^2 / 2g$  á hvert kíló, og hvert kíló af blöndu inniheldur  $u$  kíló af gufu, er eðlilegt að rita núningsorku blöndunnar á þann hátt, sem hér hefur verið gert. En núningsstuðullinn er hér ekki sá sami og við þurra gufu.

Vatnsdroparnir hafa mikil áhrif á gufustrauminn; þeir þeytast eftir óreglulegum brautum um pípuana, og trufla gufustrauminn með því að auka þverhreyfingar í honum, þ.e. túrbulensinn. Droparnir geta þannig haft lík áhrif og mjög hrufótt og óslétt pípuyfirborð.

NIKURADSEE <sup>1)</sup> hefur gert ýtarlegar mælingar á núningsstuðli í pípum með mjög ósléttu yfirborði, og komið að þeirri niðurstöðu, að hann geti þá verið tvöfaldur eða jafnvel þrefaldur miðað við venjulegt pípuyfirborð. Gefur þetta nokkra hugmynd um við hverju má búast í pípum, sem flytja gufu-vatnsblöndu.

Þá hefur GASTERSTÄDT <sup>1)</sup> gert mælingar á núningsstuðlinum við flutning á korni með lofti í pípum (pneumatic transport). Niðurstöður hans eru þær, að núningsstuðullinn megi reikna með eftirfarandi jöfnu, ef  $k_0$  er núningsstuðullinn með hreinu lofti, en  $Q$  kornmagnið á tímaeiningu og  $L$  loftmagnið:

$$k = k_0(1 + 0,3Q/L) \quad 38)$$

Ef jafna þessi er notuð á gufu-vatnsblönduna er  $L/Q = a$  og fengist þá með  $a = 0,2$  gildið  $k = 2,5k_0$ , en það er í góðu samræmi við niðurstöður NIKURADSEE.

Að sjálfsögðu eru niðurstöður þeirra GASTERSTÄDT og NIKURADSEE hvergi nærri fullnægjandi til þess að áætla núningsstuðullinn, en þó má segja, að þær gefi vissar bendingar um stærð hans. Örugglega verður ekki úr þessu skorið nema með mælingum á þrýstingsfalli í pípum, sem flytja gufu-vatnsblöndu, en þær hafa því miður ekki verið gerðar enn sem komið er.

Að athugunum þessum loknum má rita jöfnurnar fyrir straumi gufu-vatnsblöndunnar. Þær verða í samræmi við jöfnurnar 1), 2) og framangreindar athuganir:

$$-v_b dp = d(buw_g^2/2g) + uk \cdot dx \cdot w_g^2/2gd \quad 39)$$

---

<sup>1)</sup> Sjá L. PRANDTL tilvitnun bls. 203.

$$G_b v_b / f = w_g \quad 40)$$

$$p v_b^n = C \quad 41)$$

Samkvæmt framangreindu er vitað, að stuðlarnir  $u$ ,  $n$  og  $k$  eru breytilegir með ástandi blöndunnar, og virðast jöfnurnar í fljótu bragði því algerlega óviðráðanlegar. En það er þó mögulegt að komast að mikilsverðum niðurstöðum án þess, að þessi breytileiki komi verulega að sök.

Nú má með jöfnunum 40) og 41) losna við  $v_b$  og  $p$  úr jöfnu 39), og fæst þá eftir örlítinn útreikning:

$$(nCG_b^{(n-1)} / w_g^{(n+2)} f^{(n-1)} - bu / gw_g) dw_g = d(bu) / 2g + ukdx / 2gd \quad (42)$$

Þessi jafna samsvarar jöfnu 14) við þurra gufu. Við útreikning hennar hefur verið gengið út frá því, að stuðullinn  $n$  sé óbreytilegur. Þetta má réttlæta á eftirfarandi hátt:

Af línuritinu í mynd 9) má sjá, að eðlisrúmmál gufuvatnsblöndunnar vex mjög hratt með lakkandi þrýstingi, einkum við lágan þrýsting. Nú eruhreyfiorka og núningsorka blöndunnar háðar öðru veldi hraðans, og er því auðséð, að þeirra gætir langmest við lágan þrýsting. Þrýstingsfallið fer því að lang mestu leyti eftir hegðun blöndunnar á tiltölulega þröngu þrýstingsbili, en innan þess bils má ganga út frá því, að stuðullinn  $n$  sé óbreytilegur. Sama má segja um stuðulinn  $b$ .

Af jöfnu 42) má draga sömu ályktanir, og af jöfnu 14). Vinstri hliðin verður núll fyrir ákveðinn hraða, sem hér skal nefndur hinn hættni hraði blöndunnar. Við þann hraða vex  $dw_g / dx$  út yfir öll takmörk, og má hér á sama hátt og á bls. 207 komast að því, að hinn hættni hraði er mesti hraði, sem myndast getur í pípunni, og getur hann aðeins myndast í úttakinu. Ef vinstri hlið 42) er sett jöfn núll og

notaðar jöfnurnar 40) og 41) ásamt jöfnunni  $uv_g = v_b$ , fæst hinn hætni hraði blöndunnar  $w_{hb}$  :

$$w_{hb}^2 = gn_p v_g / b \quad 43)$$

Þessi jafna samsvarar jöfnu 15) við þurra gufu, en er henni þó frábrugðin að því leyti, að hér er hinn hætni hraði reiknaður út frá ástandinu á þeim stað, sem hann myndast, en í jöfnu 15) var hann reiknaður út frá byrjunarástandinu. Stærðirnar  $n$ ,  $p$ ,  $v_b$  og  $b$  ber því að taka á þeim stað, sem hraðinn myndast, þ.e. við úttakið.

Nú er  $w_b = w_g$ , og verður það mesta gufumagn, sem sýpa með þverfletinum  $f$  getur gefið, ef  $p_2$  og  $v_2$  eru þrýstingur og eðlisrúmmál í úttakinu:

$$G^2 = gn_p f^2 / v_2 b \quad 44)$$

Til frekari glöggvunar skal hér reiknað mesta gufumagn 8", 10" og 12" víðra borhola við 1 ata og 2 ata úttaksþrýsting. Holurnar séu gerðar á jarðhitasvæði með 210°C heitu vatnsaðrennsli, og þær séu fóðraðar og jafn víðar niður á bótn.

Þar sem gengið er út frá 210°C heitu aðrennsli má nota gildi í töflunni á bls. 222. Gildið á  $n$  ber að taka úr hinum ísentropíska dálki, en stuðullinn  $b$  skal valinn  $b = 1,25$ .

Við 1 ata úttaksþrýsting verður hinn hætni hraði þá 345 m/sek en 340 m/sek við 2 ata úttaksþrýsting. Við þurra gufu var hinn hætni hraði hinsvegar 450 til 500 m/sek, og kemur hér fram ein helzta orsök þess, að holur með gufu-vatnsblöndu geta ekki flutt jafn mikið magn og þær, sem flytja þurra gufu.

Gufumagnið er gefið í eftirfarandi töflu:

	Vidd	8"	10"	12"	
1	ata úttaksprýstingur	23	37	53	tonn/klst
2	"	43	69	98	"

Samanburður á þessari töflu og töflunni á bls. 214 sýnir, að við sama úttaksprýsting er hið hætna gufumagn talsvert minna, þegar um gufu-vatnsblöndu er að ræða.

Næsta skref er að integrera jöfnu 42), en með hliðsjón af hinum hætna hraða má rita hana:

$$\left( w_{hb}^2/w_g^3 - 1/w_g \right) dw_g = d(bu)/2bu + k \cdot dx/2bd \quad 45)$$

Af jöfnu 43) má sjá, að hinn hætni hraði  $w_{hb}$  er hér ekki óbreytilegur eins og þegar um þurra gufu er að ræða. Hann er háður ástandi gufu-vatnsblöndunnar, og breytist því með frumstærðinni  $x$ . En við nánari athúgun kemur fram, að þessar breytingar eru ekki miklar, a.m.k. á því prýstingsbili, sem aðalprýstingsfallið kemur fram. Með samilegri nálgun má því ganga út frá því, að hann sé óbreytilegur, og er þá auðvelt að integrera jöfnuna. Með rangskilyrðinu  $x = 0$  (þ.e. í inntakinu),  $w_g = w_{g1}$  og  $u = u_1$  verður lausnin:

$$\left( w_{hb}^2/w_{g1}^2 - w_{hb}^2/w_g^2 \right) / 2 + \ln(w_{g1}/w_g) = \frac{1}{2} \ln(u/u_1) + kx/2db$$

Nú má sýna fram á það, að við venjulegar aðstæður er fyrri liðurinn í hægri hlið jöfnunnar mjög lítill, og má því sleppa honum. Með samilegri nálgun verður lausnin því:

$$\left( w_{hb}^2/w_{g1}^2 - w_{hb}^2/w_g^2 \right) / 2 + \ln(w_{g1}/w_g) = kx/2db \quad 46)$$

Þetta er sama og jafna 16); aðeins örlítið frábrugðin hvað hægri hliðina snertir. Með henni og jöfnunum 40) og 41) á að vera

kleift að reikna þrýstingsfallið með samilegri nákvæmni.

Jafna 46) skal nú notuð til þess að reikna hið hetna þrýstingsfall í 8", 10" og 12" víðum og 250 m. og 500 m. djúpum holum, en mesta mögulega gufumagn þessara hola var gefið á bls. 226, þegar gengið er út frá 210°C heitu vatni í berginu. Við útreikningana er nauðsynlegt að gæta þess, að sambandið milli  $p$  og  $v_p$  er gefið með jöfnu 41) og er því reiknað með öðru eðlisrúmmáli við inntakið en því, sem raunverulega er fyrir hendi í holunum.

Í samræmi við það, sem gert var í greininni hér á undan skal hlutfallið  $w_{hb}/w_{gl}$  nefnt  $a$ , og verður því jafna 46) við hætið þrýstingsfall :

$$(a^2 - 1)/2 - \ln a = kl/2\delta b \quad (47)$$

Hér er  $l$  dýpt holunnar. Þetta er sama jafna og 17) og má því nota línuritið í mynd 8) til þess að finna  $a$ . Ef gengið er út frá því, að núningstuðull gufu-vatnsblöndunnar sé 2,5 sinnum stuðullinn fyrir hreina gufu, verður hann 0,045. Þegar stærðin  $a$  er fundin úr línuritinu er  $w_{gl}$  fundið, og er þá auðvelt að finna inntaksþrýstinginn  $p_1$  út frá jöfnunni  $p v_p^n = C$ . Vegna þess að hraðinn  $w_{gl}$  er mjög lítill skal gengið út frá því, að  $p_0 = p_1$ , og er hið hetna þrýstingsfall þá fundið. Með því að nota meðalgildið  $b = 1,25$  og  $n = 0,8$  við 1. ata mótþrýsting en 0,73 við 2. ata mótþrýsting verður hið hetna þrýstingshlutfall samkvæmt eftirfarandi töflu:

	Vídd	8"	10"	12"
Dýpt 250 m. 1. ata mótþr.	$(p_0/p_2)_h =$	4,7	4,4	4,1
" " " 2. " "		4,2	3,8	3,6
" 500 " 1. " "		6,1	5,7	5,2
" " 2. " "		5,2	4,9	4,5



Við 1 ata mótprýsting gefur taflan beint þann botnprýsting, sem þarf til þess að framkvæma hætistöð prýstingsfall, en við 2 ata þarf að margfalda gildin í töflunni með 2 til þess að fá botnprýstinginn.

Fyrir 10" víðar holur má því draga þessar niðurstöður saman á eftirfarandi hátt. Ef gengið er út frá því, að í berginu sé  $210^{\circ}\text{C}$  heitt vatn, og borholan skeri á 250 m. dýpt nægilega víða æð með þessu vatni, getur hún við 1 ata prýsting í úttakinu í mesta lagi flutt um 37 tonn/klst af gufu og um 50 l/sek af vatni. Botnprýstingur hennar er þá um 4,7 ata, þ.e. prýstingsfallið í holunni er um 3,7 at. Þar sem suðuprýstingur  $210^{\circ}\text{C}$  heits vatns er 19,4 ata samsvavar þetta ástand því, að prýstingsfallið í berginu sé 14,7 at. Sé æðin hinsvegar það víð, að botnprýstingur holunnar er hærri en 4,7 ata, verður prýstingurinn í úttakinu einnig hærri en 1 ata, og gefur holan þá gufu, sem hefur hærri prýsting en 1 ata. Gufan þenst þá fyrir utan holuna, en það lýsir sér í því, að gufustrókurinn breikkar strax og hún kemur út úr pípunni. Sé botnprýstingurinn 8,4 ata, er prýstingurinn í úttakinu 2 ata og holan flytur þá um 69 tonn/klst af gufu og um 100 l/sek af vatni.

500 m. djúp hola þarf 6,1 ata botnprýsting til þess að flytja 37 tonn/klst af gufu við 1 ata prýsting í úttakinu, en 10,4 ata á botni til þess að flytja 69 tonn/klst við 2 ata prýsting í úttakinu.

#### 5) Straumviðnám rakkur gufu við litla hraða.

Enda þótt útreikningar með jöfnunum 40), 41) og 46) séu ekki flóknir er þó rétt að gefa hér jöfnu til þess að reikna flutningsmagn eða prýstingsfall við litla hraða, þ.e. hraða, sem eru talsvert neðan við hinn hætta hraða blöndunnar, en hann er, eins og þegar hefur verið dregið á um 350 m/sek.

Slík jafna er auðfundin með því að sleppa hreyfiorkuliðnum í

jöfnu 39) og integrera hana síðan með aðstoð jafnanna 40) og 41) og jöfnunnar  $v_b = uv_g$ .

Ef  $G_b$  er blöndumagníð í pípunni en  $G$  gufumagníð við úttakið verður  $G = uG_b$ , og skal þá nota það gildi á  $u$ , sem er í úttakinu. Jöfnuna má þá integrera á sömu forsendum og í greininni hér á undan og fæst þá:

$$G^2 = \frac{gndf^2}{k1} \frac{P_2}{v_{g2}} \left( (p_1/p_2)^{2/n} - 1 \right) \quad (48)$$

Hér er  $p_1$  þrýstingur gufunnar við inntakið, en  $p_2$  og  $v_{g2}$  þrýstingur og eðlisrúmmál við úttakið. Að sjálfsögðu ber að velja  $k$  í samræmi við það, sem drepið var á í greininni hér á undan, og meðalgildið á  $n$  ber að taka úr hinum ísenthalpiska dálki töflunnar á bls. 222

Þessi jafna samsvarar að öllu leyti jöfnu 9); vatnsmagníð í gufunni hefur gefið henni nokkuð annað form.

#### 6) Straumviðnám í misvíðum og ófóðruðum holum.

Við jarðboranir er yfirleitt ekki hægt að halda óbreyttri vídd frá yfirborði til botns, jafnvel þótt um tiltölulega grunnar holur sé að ræða. Á jarðhitasvæðum má yfirleitt reikna með því, að holurnar hafi tvær víddir og e.t.v. þrjár, ef dýptin er mikil. Finnig er óhjákvæmilegt, að neðri hluti þeirra sé ófóðraður, og fer það eftir aðstæðum hve langur hann er. Í framangreindum reikningum var hinsvegar gengið út frá algerlega fóðruðum holum. Hér er því nauðsynlegt að athuga, hvaða áhrif það hefur á reikningana, ef hola eða einhver hluti hennar er ófóðraður.

Ófóðruð hola er pípa, með mjög hrufóttum vegg, en það hefur sem kunnugt mikil áhrif á núningstuðulinn  $k$ . Hann getur þá verið allt að þrisvar sinnum hærri en við venjulegar stálpípur. En auk þess getur verið erfitt að skilgreina hið rétta þvermál ófóðraðar holu. Holan er

að sjálfsögðu örlítið víðari en þvermál borsins, en hinsvegar er erfitt að gera sér ljóst, hve miklu munar. Þessi munur er að sjálfsögðu ekki mikill, en hinsvegar er gufumagnið háð 2,5 veldi þvermálsins, og getur því munað um örfáa millimetra.

Ef háð rétta þvermál holunnar er þekkt, verður að sjálf- sögðu að reikna með talsverðri hækkun núningsstuðulsins, einkum þegar um þurra gufu er að ræða. Virðist þá nauðsynlegt að gera ráð fyrir 0,04 til 0,05. Við gufu-vatnsblöndu verður hækkunin hinsvegar hinsvegar hlutfallslega minni. Vatnsdroparnir verka á strauminn líkt og hrufótt yfirborð, og skiotir þá minna máli, hvort sjálft yfirborðið er raun- verulega hrufótt. Við þer aðstæður ætti því að hækka stuðulinn frá 0,045 upp í 0,055 eða 0,06.

En ef þvermál borsins er lagt til grundvallar reikningunum, verður að leiðrétta þessa núningsstuðla vegna þess að holan er raun- verulega víðari en borinn. Ef þessi munur er áætlaður 5%, þarf að lækka stuðulinn um  $(20/21)^5$ , þ.e. um 30%. Við þurra gufu yrði hann því 0,03 til 0,035, en um 0,04 við gufu-vatnsblöndu.

Vitanlega er hér aðeins um lauslegar áætlanir að ræða, en hinsvegar mun talsverðum örðugleikum bundið að mæla stuðulinn, og verður því ekki lengra komið að sinni.

Niðurstöðurnar í greinunum 2) til 5) má einnig nota til þess að reikna þrýstingsfall og flutningsmagn í misvíðum holum. Þetta er sérstaklega einfalt, þegar um litla hraða er að ræða, þ.e. þegar nota má jöfnurnar 8) og 48).

Gerum ráð fyrir borholu, sem flytur hreina gufu og hefur þvermálið  $d_1$  niður á dýptina  $l_1$ , en þvermálið  $d_2$  niður á dýptina  $l_2$ . Núningsstuðull efri hlutans sé  $k_1$  en  $k_2$  í neðri hlutanum. Botnþrýst- ingurinn er  $p_0$  og  $v_0$  eðlisrúmmál gufunnar á botni, en  $p_1$  og  $v_1$  í efri enda neðri hlutans og  $p_2$  og  $v_2$  í úttakinu á yfirborði. Þá má taka

stærðirnar fyrir framan svigann í jöfnu 8) saman í eina stærð, sem táknuð skal  $F$ , en hana má nefna flutningsstuðul. Fyrir jöfnu 8) fást þá í þessu tilfalli tvær jöfnur:

$$G^2 = F_1 (p_0^2 - p_1^2)$$

$$G^2 = F_2 (p_1^2 - p_2^2)$$

Þessar tvær jöfnur má taka saman í eina og losna við hinn óþekkta þrýsting  $p_1$ , en þá fæst:

$$G^2 = F (p_0^2 - p_2^2) \quad 49)$$

$$1/F = 1/F_1 + 1/F_2 \quad 50)$$

Með jöfnu 50) má reikna flutningsstuðul allrar holunnar út frá stuðlum beggja hlutanna og leysa þannig vandann. Hefði holunni verið skipt niður í fleiri hluta, hefðu útreikningarnir orðið hliðstæðir, og er því óþarfi að fara nánar inn á það. Einnig er auðvelt að reikna milliprýstinginn  $p_1$ .

Af framangreindu má sjá, að röð hinna mismunandi holuvídda skiptir engu máli fyrir flutningsmagnið. Það er óháð því, hvort grenni hlutinn er fyrir ofan eða fyrir neðan. Þó verður að hafa í huga, að framangreindar jöfnur gilda aðeins við hraða, sem eru talsvert minni en hinn hættni hraði, og gildir þessi regla því að sjálfsögðu ekki við tiltölulega mikla hraða.

Þegar hraðinn í einhverjum hluta holunnar nálgast hinn hættna hraða, gilda jöfnurnar 8) og 48) ekki lengur, og verður þá að grípa til jafnanna 16) og 46) ásamt meðfylgjandi jöfnum. Þá er ekki hægt að koma niðurstöðunum fyrir í svo einföldum jöfnum sem 49) og 50). Ef reikna á þrýstingsfallið við ákveðið gufumagn, verður að hefja útreikningana í öðrum hvorum enda holunnar og reikna hvert þrep út af fyrir sig. Ef

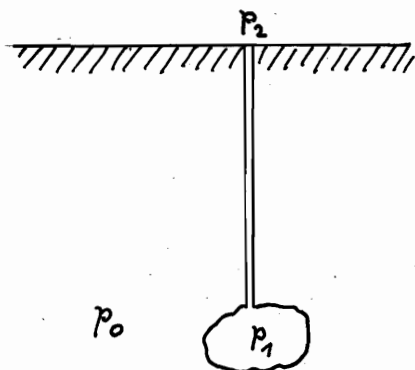
reikna á botnþrýstinginn við ákveðið gufumagn, verður að byrja við úttakið og reikna með jöfnunum 16) eða 46) ástandið við endann á þeim hluta holunnar, sem hefur jafna vídd frá yfirborði. Með útkomunum er síðan reiknað ástandið við endann á næsta hluta og þannig þrep af þrepi. Hér er um tiltölulega einfalda útreikninga að ræða, og er því óþarfi að fara nánar inn á þá hér.

### 7) Straumviðnámið í berginu, og gufumagn við mismunandi mótþrýsting.

Hér hefur aðeins verið rætt um straumviðnámið í sjálfum holunum, en ekki um aðrennslisviðnám þeirra, þ.e. það þrýstingsfall, sem kemur í berginu við það, að gufa eða vatn streyma inn í holurnar.

Það er að sjálfsögðu ógerningur að gera nokkra kvantitativa áætlun um straumviðnámið í berginu á íslenskum jarðhitasvæðum. Gosberg er það sundurleitt, að ekki er hægt að gera áætlun um leka þess. Þó má gera sér kvalitatíva hugmynd um breytingar aðrennslisviðnámsins með botnþrýstingnum, og þannig má fá hugmynd um áhrif þess á gufumagnið við mismunandi mótþrýsting.

Þegar hola gýs frá ákveðinni dýpt myndar hún jafnan holrúm í berginu á þeim stað, sem gufan og vatnið koma inn í hana. Gufan og vatnið leita inn í þetta holrúm um margar glufur og sprungur (sjá mynd 10).



Mynd. 10.

Ef  $p_0$  er gufuþrýstingurinn í berginu í námunda við holrúmið, en  $p_1$  botnþrýstingur holunnar, verður aðrennslisviðnámið  $p_0 - p_1$ . Straumviðnámið í holunni er hinsvegar  $p_1 - p_2$ .

Gerum nú ráð fyrir, að þessar sprungur, sem liggja inn í holrúmið, séu það fíngerðar, að nota megi Darcys lögmál.

á strauminn inn í holrúmið. Gerum einnig ráð fyrir, að þurr gufa streymi inn í holuna, en hana má með samilegri nákvæmni telja fullkomið gas. Nú er straumviðnámið aðallega í ákveðinni þykkt af bergi, þ.e. í vissri fjarlægð frá holrúminu er þrýstingurinn orðinn  $p_0$ . Samkvæmt þeim athugunum, sem gerðar voru á bls. 179 má rita strauminn inn í holrúmið:

$$G = K(p_0^2 - p_1^2) \quad 51)$$

Hér er  $K$  stuðull, sem ákveðst af gerð bergsins, stærð holrúmsins og eiginleikum gufunnar. Þessi jafna gefur þegar mikilsverðar upplýsingar. Ef  $p_0$  er talsvert stærra en  $p_1$  skipta breytingar í  $p_1$  engu máli fyrir gufumagnið, sem streymir inn í holrúmið. Sé  $p_0 = 25$  ata en  $p_1 = 5$  ata, þá minnkar gufumagnið aðeins um 12% þótt  $p_1$  tvöfaldist, þ.e. verði 10 ata.

Hinsvegar er gufumagn borholanna venjulega ákveðið af jöfnu af eftirfarandi gerð:

$$G^2 = F(p_1^2 - p_2^2) \quad 52)$$

Úr þessum jöfnum má losna við  $p_1$  og fæst þá

$$G/K + G^2/F = p_0^2 - p_2^2 \quad 53)$$

Þegar um 250 til 500 m. djúpar holur er að ræða er  $p_0$  yfirleitt ekki minna en 25 til 50 ata. Af jöfnu 53) má þá sjá, að  $p_2$  getur breyttzt innan víðra takmarka án þess, að það hafi nokkur áhrif á gufumagnið. Hækki  $p_2$  frá einni ata í 10 ata ætti gufumagnið í mesta lagi að breytast um 10%.

Hér hefur verið gengið út frá þurri gufu. Ef um svæði með vatnsaðrennsli er að ræða og gufuvatnsblanda streymir um bergið, er ástands-

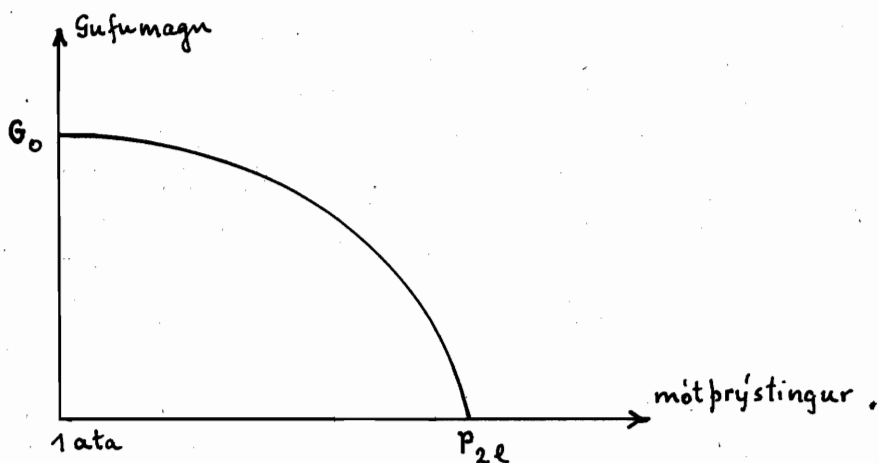
breyting hennar ákveðin af jöfnunni  $pv_b^n = C$ , en stuðullinn  $n$  er þá í námunda við 0,5. Ef hann er einmitt 0,5 má með sömu útreikningum og gerðir voru á bls. 179 finna, að í þessu tilfalli verður jafna 51) af eftirfarandi gerð:

$$G = K(p_0^3 - p_1^3) \quad 54)$$

Af þessu má sjá, að breytingar þrýstingsins  $p_1$  hafa þá enn minni áhrif á gufumagnið en þegar um þurra gufu er að ræða.

Af þessum athugunum má því draga þá ályktun, að gufumagn sæmilega djúpra borhola muni yfirleitt vera ónæmt fyrir breytingum mótþrýstingsins, a.m.k. þegar mótþrýstingurinn er undir 10 ata.

Gufulínurit borhola mun því yfirleitt hafa eftirfarandi útlit:



Mynd 11.

$G_0$  er gufumagnið, sem fullopið hola gefur, en  $p_{2l}$  er þrýstingurinn í lokaðri hól. Línuritið er mjög flatt út frá punktinum  $G_0$ , en fellur ekkert verulega fyrr en við hærri þrýsting.

Í öðru lagi sýna þessar athuganir, að gufuþrýstingurinn í berginu hefur mjög mikla þýðingu fyrir gufumagnið. Hann er í öðru og þriðja veldi í framangreindum jöfnum, og skiptir því miklu máli, að hann

sé sem hæstur. Ef ganga má út frá því, að leki bergsins minnki ekki mjög mikið með vaxandi dýpt, en gufuprýstingurinn vaxi hinsvegar, eiga djúpar borholur að hafa talsvertameiri vinnslumöguleika en grunnar, og er af þessum ástæðum rétt að gera eins djúpar holur og tiltækilegt er.

Á svæðum með vatnsaðrænnisli með lágum hita getur þessu þó verið öðru vísi varið, eins og tekið var fram á bls. 174. Á slíkum svæðum vex gufuprýstingurinn ekki með dýptinni, þegar komið er niður fyrir ákveðna dýpt.

#### 8) Gufumagnsmælingar.

Mælingar á gufumagni borhola, sem gefa þurra gufu, eru auðveldar, og má framkvæma þær með mikilli nákvæmni. Við slíkar mælingar er rétt að styðjast við þær mælingaraðferðir, sem ráðlagðar hafa verið af opinberum aðilum, og má þar sérstaklega nefna hinar þýzku aðferðir DIN 1952 <sup>1)</sup>).

Sömuleiðis má ná góðri nákvæmni með því að nota Pitotpípu e eða Prandtlpípu, og eru slíkar mælingar mun handhægari en mælingar með stútum, eins og ráðlagt er í DIN 1952. Við þær kröfur, sem gerðar eru til nákvæmninnar á jarðhitasvæðum er vafalaust réttara að nota þessar pípur í stað stútanna.

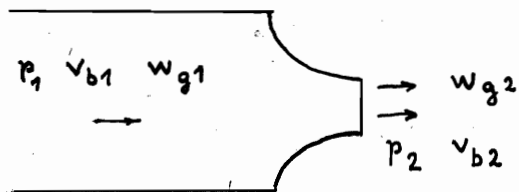
Þegar um raka gufu er að ræða verða mælingarnar talsvert erfiðari, og má að óathuguðu máli ekki nota DIN aðferðirnar né heldur Pitot- eða Prandtlpípurarnar. Einkum þær síðarnefndu gefa allt of háar niðurstöður, en það er í sjálfu sér skiljanlegt, þar sem vatnið hefur mikil áhrif á prýstinginn í pípunni, Má því fullyrða, að það komi yfirleitt ekki til mála að nota þessar pípur við mælingar á rakri gufu.

<sup>1)</sup> Regeln für Durchfluss<sup>mess</sup>ungen mit genormten Düsen und Blenden DIN 1952. VDI-Verlag. Berlin 1937.



Nákvæmasta aðferðin til þess að mæla gufumagn borhola, sem gefa raka gufu, er að sjálfsögðu sú að taka allt magnið frá holunni í skilvindu, og losna þannig við vatnið. Við stórar holur getur þetta þó verið talsverðum vandkvæðum bundið, og getur því verið heppilegt að hafa handhægari aðferðir til taks, enda þótt þær gefi ekki eins nákvæmar niðurstöður. Framangreindir mælistútar virðast þá geta komið að notum.

Þeir eru ekki jafn næmir fyrir vatnsinnihaldinu og Pitot-pípan, og geta þeir því gefið mun betri niðurstöður. Hinsvegar er við notkun þeirra nauðsynlegt að endurskoða útreikningana í sambandi við slíkar mælingar, þar sem grundvöllur sá, sem m.a. er gefinn í DIN 1952 gildir ekki fyrir raka gufu. Skal þetta athugað nánar.



Mynd 12.

Gerum ráð fyrir slíkum mælistúti samkvæmt mynd 12). Fyrir framan hann sé þrýstingurinn  $p_1$ , eðlisrúmmáli  $v_{b1}$  og hraðinn  $w_{g1}$ , en fyrir aftan hann séu þessar stærðir:  $p_2$ ,  $v_{b2}$  og

$w_{g2}$ . Um stútinn streymi magnið  $G_b$  af gufu-vatnsblöndu. Flötur pípuinnar fyrir framan stútinn sé  $f_1$ , en flötur stútsins  $f_2$ .

Lögun stútsins sé þannig að ekki þurfi að gera ráð fyrir neinni teljandi samþjöppun gufustróksins í úttakinu, þ.e. hann sé nægilega ílangur. Þrýstingurinn  $p_1$  og  $p_2$  séu mældir á réttum stöðum, þ.e. í hæfilegri fjarlægð frá sjálfum stútum.

Hér er því gert ráð fyrir nokkuð annari gerð mælistúta en mælt er með í DIN 1952. Þess ber þó að gæta, að stútarnir í DIN 1952 eru valdir með það fyrir augum, að auðvelt sé að koma þeim fyrir í pípu; þeir eru því stuttir, og þrýstingurinn er mældur alveg við stútinn. Við þessar aðstæður kemur nokkur samþjöppun fram, og þrýstingsmælingin truflast. Í útreikningunum verður síðan að taka tillit til þessara atrið

Við mælingar á borholum skiptir fyrirferð stútsins engu máli, en hinsvegar er nauðsynlegt að forðast allt það, sem gerir útreikningana flóknari, einkum þegar um raka gufu er að ræða. Er því heppilegt að nota aðra gerð stúta en DIN 1952 mælir með.

Með hliðsjón af niðurstöðunum í grein 4) er auðvelt að finna þær jöfnur, sem gefa sambandið milli þrýstingsfallsins og magnsins  $G_b$ .

Þar sem stúturinn er mjög stuttur skiptir múningsorkan engu máli, og verður ástandsþreytingin því ísentropísk, en þá má með góðri nákvæmni ganga út frá jöfnunni  $p v_b^n = C$ , einkum ef þrýstingsfallið í stútum er ekki mikið. Með hliðsjón af jöfnunum 39), 40) og 41) verða hreyfingarjöfnur blöndunnar þá:

$$-v_b dp = b \cdot d(uw^2/2g) \quad 55)$$

$$f_1 w_{g1} / v_{b1} = f_2 w_{g2} / v_{b2} = G_b \quad 56)$$

$$p v_b^n = C \quad 57)$$

Þessar jöfnur má auðveldlega integrera, ef gengið er út frá því að stuðullinn  $b$  sé óbreytanlegur. Niðurstaðan er:

$$G_b^2 = \frac{2gn(p_1 v_{b1} - p_2 v_{b2})}{b(n-1)(u_2(v_{b2}/f_2)^2 - u_1(v_{b1}/f_1)^2)} \quad 58)$$

Nú er gufumagnið  $G = u_2 G_b$ , og er því hægt að reikna  $G$ , ef stærðirnar í jöfnu 58) eru þekktar. Stærðin  $b$  veldur einna mestum örðugleikum, og er ekki um annað að gera en að áætla hana eftir aðstæðum. Það er einnig nokkrum vandkvæðum bundið að mæla stærðina  $u_2$  við úttakið, ef ekki er notuð skilvinda til þess að skilja vatnið frá gufunni, en eins og þegar hefur verið tekið fram er það aðaltilgangur þessara reikninga að gera það mögulegt að áætla gufumagnið án þess að nota skilvindu fyrir allt magnið, og má því ekki ganga út frá, að hún sé fyrir hendi. Með því að safna nokkrum hluta gufu-vatnsblöndunnar í litla skilvindu, má þó með tiltölulega hægu móti gera samsílega mælingu á  $u_2$ , og leggja hana til grundvallar útreikningunum.

Rétt er að minnast á það, að við ísentropíska ástandsbreytingu er  $v dp = di$ , og má því einnig rita jöfnu 58):

$$G_b^2 = \frac{2g(i_1 - i_2)}{b(u_2(v_{b2}/f_2)^2 - u_1(v_{b1}/f_1)^2)} \quad 59)$$

Ef gott  $i$ -s línurit er fyrir hendi er auðvelt að reikna teljarann, en venjuleg  $i$ -s línurit ná þó ekki niður á það svið, sem ástandsbreytingar mjög rakkur gufu fara fram á, og koma þau því ekki að notum.

Loks þarf að gera sér ljóst, að við ákveðið þrýstingshlutfall  $(p_1/p_2)_h$  kemur hætinn hraði í stútinn, og flytur hann þá það mesta gufumagn, sem hann getur flutt við byrjunarþrýstinginn  $p_1$ , þ.e. gufumagnið eykst ekki þótt  $p_2$  sé lækkaður niður fyrir þann þrýsting, sem samsvarar hinu hætna þrýstingshlutfalli  $(p_1/p_2)_h$ . Við mælingar með stútum er því nauðsynlegt að þekkja þetta hlutfall, en það er reiknað á sama hátt og þegar um þurra gufu er að ræða <sup>1)</sup>. Ef hraðinn  $w_{gl}$  er lítil verður hlutfallið:

$$(p_1/p_2)_h = (2/(n + 1))^{n/(1 - n)} \quad (60)$$

Við útreikning þessarar jöfnu hefur verið gengið út frá því, að stærðin  $u$  sé óbreytileg í stútnum, en það er fyllilega leyfileg nálgun, einkum vegna þess, að hið hætna þrýstingshlutfall reynist óvenju lágt, þegar um gufu-vatnsblöndu er að ræða.

Þau gildi á  $n$ , sem venjulega koma fyrir við gufu-vatnsblöndur eru 0,7 til 1,0. Í eftirfarandi töflu er hið hætna þrýstingshlutfall reiknað út fyrir nokkur gildi á  $n$  á þessu sviði:

$n$	=	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
$(p_1/p_2)_h$	=	1,46	1,50	1,52	1,55	1,58	1,60	1,65

Við venjulegar aðstæður er hið hætna þrýstingshlutfall þurrar gufu 1,8 til 1,85, og kemur því fram, að hlutfall gufu-vatnsblöndunnar er nokkru minna.

Ef þrýstingshlutfallið  $p_1/p_2$  er meira en hið hætna hlutfall, er ekki hægt að reikna gufumagn stútsins út frá jöfnu 58), heldur fæst

---

<sup>1)</sup> Sjá E. Schmidt tilvitnun bls. 203.

það með eftirfarandi jöfnu:

$$G_b = f_2 w_{hb} / v_{b2} \quad (61)$$

Hér er  $w_{hb}$  hinn hætni hraði blöndunnar, en hann má reikna með jöfnu 43), en  $v_{b2}$  er eðlisrúmmál blöndunnar við þrýstinginn  $p_1: (p_1/p_2)_h$ , þ.e. hið raunverulega eðlisrúmmál í stútnum við hætíð þrýstingshlutfall.

Að þessum athugunum loknum er fróðlegt að gera sér ljóst, hve mikil skekkja kemur inn í gufumagnsmælingar, ef rök gufa er mæld með mælistút, en útreikningarnir framkvæmdir á sama hátt<sup>og</sup> við þurra gufu.

Hér er heppilegt að taka ákveðið dæmi. Gerum ráð fyrir 10" víðri borholu, sem gefur gufu-vatnsblöndu. Magnið sé mælt með 225 mm. mælistút, og komi þá fram 1,35 ata þrýstingur fyrir framan stútinn. Með því að taka nokkurn hluta blöndunnar frá stútnum í pípu og leiða í vatnsskilju sé komið að því, að frá stútnum komi blanda, sem er h.u.b. 78% vatn en 22% gufa.

Við þessar aðstæður er  $p_1 = 1,35$  ata,  $p_2 = 1,0$  ata og eðlisrúmmálið  $v_{b2} = 0,22 \cdot 1,72 = 0,38 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Aðstæður eru hér líkar og reiknað var með í töflunni á bls. 222, og má því með aðstoð hennar áætla veldisstuðulinn  $n = 0,85$ . Með jöfnunni  $p v_b^n = C$  fæst þá eðlisrúmmálið  $v_{b1} = 0,268 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Flatarmálið  $f_1 = 0,0505$  og  $f_2 = 0,0395 \text{ m}^2$ .

Ef  $T_1$  er hitinn fyrir framan stútinn en  $T_2$  í úttakinu, má reikna stærðina  $u_1$  með eftirfarandi jöfnu, en hún er fundin með líkum útreikningum og gefnir voru á bls. 220:

$$u_1 = u_2 T_1 / T_2 - \frac{s T_1}{r} \ln(T_1 / T_2) \quad (60)$$

Nú er hitinn við  $1,35$  ata  $107,6^{\circ}\text{C}$  og fæst þá  $u_1 = 0,212$ . Stærðin  $b$  veldur einna mestum örðugleikum, en ef gert er ráð fyrir, að vatnsdroparnir nái  $15\%$  til  $20\%$  af hraða gufunnar, verður meðaltalið  $b = 1,15$ , og skal það notað.

Að þessu loknu er auðvelt að reikna magn blöndunnar, og fæst þá með jöfnu 58)  $G_p = 127$  tonn/klst og gufumagnið því  $28$  tonn/klst.

Ef reiknað hefði verið með gufunni einni, og gengið út frá eðlisrúmmálinu  $v_2 = 1,72 \text{ m}^3/\text{kg}$  og veldisstuðlinum  $n = 1,3$ , en hann gildir fyrir yfirhitaða gufu, hefði útkoman orðið  $35$  tonn/klst, þ.e. skekkjan er um  $25\%$ .

Það skal tekið fram, að við  $28$  tonn/klst er hraðinn í stútnu tæplega  $340$  m/sek, en það er mjög nálægt því að vera hinn hættni hraði. Þrýstingshlutfallið var þó aðeins  $1,35$ , en hætið þrýstingshlutfall við  $n = 0,85$  er hinsvegar  $1,55$ . Orsök þessa er sú, að hið hættna þrýstingshlutfall er reiknað með þeirri forsendu, að hraðinn fyrir framan stútninn sé lítill, en í þessi dæmi er hraðinn í  $10''$  pípunni hinsvegar um  $265$  m/sek, en það er engan veginn lítill hraði.

#### 9) Val holuvíddar við boranir eftir jarðgufu á Hengilsvæðinu.

Á bls. 195 til 197 var komið að þeirri niðurstöðu, að reiknað mætti með um  $300$  tonn/klst gufuvinnslu á Suðursvæðinu, en gufa þessi fengist við sjálfsuppgufun  $2100\text{C}$  heits vatns. Vatnið yrði að sækja frá h.u.b.  $500$  m. dýpt. Samkvæmt reyngu undanfarinna ára af heitvatnsborunum mætti gera ráð fyrir um  $10$  tonn/klst meðalafköstum á borholu, og yrði því að gera ráð fyrir um  $30$  holur. Eftir er að ákvarða hina heppilegustu holuvídd.

Gera verður ráð fyrir, að dreyfing gufumagnsins um meðalafköstin sé mikil. Sumar holur munu e.t.v. gefa þreföld eða jafnvel

fjórfold meðalafköst, en aðrar munu vera þurrar. Virðist því nauðsynlegt að ákvarða holuvíddina þannig, að holurnar geti í minnsta lagi flutt fjórfold meðalafköst, þ.e. um 40 tonn/klst af gufu.

Nú er gert ráð fyrir, að vatnið fáiist frá h.u.b. 500 m. meðaldýpt, en þar er stöðuprýstingur þess væntanlega um 50 ata. Hinsvegar er gufuprýstingurinn  $210^{\circ}\text{C}$  heits vatns 19,4 ata. Út frá þessu virðist hæfilegt að gera ráð fyrir um 10 ata botnprýstingi í holunum, þ.e. prýstingsfallið sé um 40 ata.

Töflurnar á bls. 226 og 227 sýna, að við 10 ata botnprýsting og 2 ata úttaksprýsting geta 8" holur flutt rúmlega 40 tonn/klst, en 10" holur tæplega 70 tonn/klst. Það virðist því nægja að gera 8" holur, og skal hér því gengið út frá því að 8" vídd sé minnsta vídd, sem reikna megir með á Suðursvæðinu.

-----

8. Kafli.

B O R T A E K N I N.

1) Aætlun um fóðrun.

Hér var komið að þeirri niðurstöðu, að 8" væri minnsta vídd, sem reikna ætti með við gufuboranir á Suðursvæðinu; en þó mun vera æskilegt, að holurnar geti verið lítið eitt víðari, þ.e. 9" til 10". Hvað dýptina snertir virðist verða að gera ráð fyrir um 500 m.

Nauðsynlegt er að fóðra holurnar all djúpt, enda þótt það minnki vídd þeirra nokkuð. Fóðrunin eykur öryggið á meðan á borun stendur, og einnig er með djúpri fóðrun minni hætt á því, að gufan geti brotist neðanjarðar úr holunni. Gjósi borhola á meðan á borun stendur, er hætt við hruni úr veggjunum, ef holan er ekki fóðruð, en það getur valdið festum og öðrum óþægindum.

Með hliðsjón af framangreindu virðist rétt að ganga út frá eftirfarandi áætlun um holuvíddirnar. Byrjað sé með h.u.b. 14" bor og borað niður á 10 til 25 m dýpt - allt eftir aðstæðum. Þá sé fóðrað með 13-3/8" y.þ. pípu, en þessi fóðrun á að koma í veg fyrir hrun úr efstu og lausustu jarðlögunum. Síðan sé borað niður á 200 til 300 m dýpt með 12" bor og fóðrað með 10-3/4" y.þ. pípu. Að lokum sé borað með 9" bor niður á 500 m, eða þá dýpt, sem henta þykir.

Við venjuleg skilyrði ætti ekki að þurfa að fóðra holurnar frekar, og vídd neðri hluta þeirra yrði því um 9" en efri hlutans 9-3/4".

Séu skilyrði hinsvegar erfið, getur verið nauðsynlegt að fóðra enn einu sinni, og yrði þá að nota 8-1/8" y.þ. pípu og bora niður



úr henni með 6-1/2" bor. Slík hola yrði því heldur of þröng.

Þetta þarf þó væntanlega ekki að koma fyrir nema í einstaka holum og er því hægt að setta sig við það.

Það skal tekið fram, að pípuvíddirnar, sem hér er gengið út frá, eru samkvæmt A.P.I. standard (American Petroleum Institute)

Samkvæmt framangreindu verða borvélarar því að geta gert all að 14" víðar holur og borað með 12" krónum niður á a.m.k. 250 m dýpt og með 9" krónum niður á a.m.k. 500 m dýpt. Þetta eru þó aðeins lágmarkstölur, og er því rétt að gera ráð fyrir vélum, sem geta gert 12" holur niður á 500 m dýpt og 9" holur niður á 750 til 1000 m dýpt.

## 2) Aðstæður við jarðboranir á Hengilsvæðinu.

Boranir og jarðfræðilegar athuganir, sem framkvæmdar hafa verið á Suðursvæðinu gefa til kynna, að efstu 150 til 400 metrnir séu þar úr brúngrýti. Lægri talan á við svæðið fyrir norðan Varmá, en sú hærri við svæðið fyrir sunnan ána. Þetta eru að sjálfsögðu ekki mjög ábyggilegar tölur, - einkum sú lægri - en þær munu þó ekki vera alveg fjarri lagi.

Fyrir neðan brúngrýtið tekur við grágrýti, sem að líkindum tilheyrir Hreppamynduninni.

Báðar þessar bergtegundir eru á Suðursvæðinu mjög ummyndaðar af jarðhitnum. Brúngrýtiskjarnarnir úr borholum svæðisins hafa verið mjög ólíkir hinu upphaflega bergi; þeir eru ljósari að lit og miklu linari. Hvað hörkuna snertir eru þeir ekki ólíkir linu olíusvæðaseti.

Að vísu hefur að líkindum ekki náðst í kjarna úr grágrýtinu, en hinsvegar hafa ummyndaðir blágrýtiskjarnar komið úr holunum, og sýna þeir mjög greinilega áhrif jarðhitans á slíkt berg.

Jarðhitinn hefur lík áhrif á blágrýtið og brúngrýtið; hann gerir það ljósara og linara en hið upphaflega berg. Er ekki að efa, að grágrýtið hefur orðið fyrir líkum áhrifum.

Að undanskildum örfáum mjög þunnum blágrýtislögum nálægt yfirborði mun berg Suðursvæðisins því yfirleitt vera óvenju lint af íslenzku gosbergi að vera, og frá bortaknilegu sjónarmiði virðist það því sízt erfiðara viðfangs en bergtegundir á olíusvæðum. Hin fáu og þunnu hörðu lög skipta litlu máli.

Nú verður borað fyrir jarðgufu einmitt á þeim stöðum, sem hafa mestan jarðhita, þ.e. hæstan hita og mest vatnsrennsli; það er því mjög líklegt, að bergið sé einna mest ummyndað á þessum stöðum, og boranirnar fari yfirleitt því fram í tiltölulega línu bergi.

### 3) Borun á móti brýstingi.

Borun á móti brýstingi er eitt helzta vandamálið við gufuboranir og þarf það því sérstakrar athugunar við.

Nú er augljóst, að snúningsborar, þ.e. krónuborar <sup>1)</sup> og haglborar verða óvinnufærir, ef gufa myndast í holunum. Við það myndi

---

<sup>1)</sup> Hér er tekinn upp sá háttur að nota orðin krónubor fyrir fræsibor og meitilbor fyrir höggbor. Þau orð, sem hingað til hafa verið notuð, þ.e. fræsibor og höggbor eru að ýmsu leyti óheppileg. Kemur þetta m.a. fram í því, að hin svokallaða fræsikróna (roller bit) gerir mikið meira af því að höggva bergið en skafa það, og mætti því með vissum rétti telja þá bora, sem vinna með þessum krónum til höggbora. Þessi tegund borkróna verður hér því nefnd keflíkróna, en orðið fræsikróna notað yfir allar sköfukrónur (drabits) m.a. tannakrónur.

skolunin truflast og borunin þarafleiðandi stöðvast. Ef borun á að takast er það því alger nauðsyn að hindra gufumyndun eða gufuinnstreymi inn í holurnar.

Meitilborar geta hinsvegar unnið þótt gufa sé í holunum, en slík borun er þó í alla staði óheppileg og áhættusöm.

Líkar aðstæður eru víða fyrir hendi á olíusvæðum, þar sem borað er fyrir gasblandinni olíu. Gasþrýstingur hennar getur verið mjög hár, þ.e. mörg hundruð atmosferur. Þrátt fyrir þetta hafa olíu- iðnaðarmenn sigrazt á þeim örðugleikum, sem eru í sambandi við slíkar boranir.

Nota þeir yfirleitt krónubora og skolleðju, sem hefur ákveðinn eðlisþunga til þess að hindra gasinnstreymi í holuna. Með því að hnitmiða eðlisþungann við þau skilyrði, sem eru á hverjum stað í holunni og nota djúpa fóðrun má algerlega koma í veg fyrir, að gasið trufla borunina, eða leðja tapist út í veggina. Þetta síðastnefnda atriði er ekki síður þýðingarmikið, þar sem skolleðjan er mjög verðmæt; kostnaður við hana getur verið 15 % til 25 % af heildarkostnaðinum.

Auk þess nota menn öryggislokur, sem loka holunni, ef gasið kynni að valda örðugleikum, en þær eru jafnan opnar á meðan á borun stendur.

Með þessum útbúnaði hefur á hinum síðari árum nær algerlega tekizt að koma í veg fyrir gasgos úr olíuholum, en þau voru tíð fyrir 20 til 30 árum, og ullu miklu tjóni.

Sama útbúnað má að sjálfsögðu einnig nota við gufuboranir, og virðist hann raunverulega sá eini, sem gefur fullt öryggi. Samkvæmt því, sem dregið hefur verið á í 15. kafla þessarar skýrslu má á svæðum

með vatnsaðrennsli yfirleitt gera ráð fyrir, að gufubrýstingurinn á mismunandi dýpt sé nokkurn veginn jafn grunnvatnsbrýstingnum. Í blá-  
eða grágrýtismynduninni mun heita vatnið þó hafa nokkurn artesiskan  
brýsting, en hann getur væntanlega verið 5 til 10 at.

Við boranir fyrir gufu á slíkum svæðum þarf skolleðjan því  
aðeins að mæta hinum artesiska brýstingi. Sé brýstingurinn 10 at á 25  
m dýpt - en það verður að teljast mjög hár brýstingur - þarf eðlis-  
þungi skolleðjunnar að vera 1,4. Hinsvegar má hæglega gera leðju, sem  
hefur eðlisþungann 2,0 og virðist þetta atriði því ekki þurfa að valda  
örðugleikum við gufuboranir hér á landi.

Það skal og tekið fram, að Ítalir nota nú nær eingöngu þessa  
aðferð við gufuboranirnar í Toscana.

Hinn hái berghiti og efnafræðileg atriði valda væntanlega því  
að nota verður sérstaka gerð leðju við gufuboranirnar, og er hér mik-  
ilsvert atriði, sem kryfja verður til mergjar áður en stórfelldar  
gufuboranir geta hafizt.

Auk áhrifa leðjunnar á brýstinginn í borholunum kælir hún  
einnig veggina, en það er æskilegt til frekara öryggis. Við þetta hitn-  
ar leðjan og verður því við gufuboranir að hafa sérstakan útbúnað til  
þess að kæla hana. Af þessum ástæðum er æskilegt, að miklu leðjumagni  
sé dælt til þess að koma í veg fyrir of miklar hitabreytingar í henni,  
en það getur haft slæm áhrif á ástand leðjunnar. Auk þess verður al-  
gerlega að hindra að leðjan ofhitni þannig, að hún sjóði efst í hol-  
unni.

Gufubörun með þungri leðju getur raunverulega aðeins farið  
fram með krónuborum, og hafa þeir því mikla yfirburði fram yfir aðrar  
gerðir að borum. Aftur á móti er miklum örðugleikum bundið að nota

hana við haglabora og meitilbora. Með haglakrónu og kjarnapípu í holunni er aðeins hægt að dæla mjög litlu magni af þykkri leðju um hana, en það er hættulegt vegna hitabreytinga eða jafnvel suðu leðjunnar ein og drepið var á hér að framan. Auk þess mun leðjan trufla sjálfa borunina, þar sem hún getur þrýst höglunum undan krónunni.

Í holum, sem boraðar eru með meitilborum er leðjan algerlega kyrrstæð, en það er mjög óheppilegt samkvæmt framansögðu.

#### 4) Val borvéla til gufuborana á Suðursvæðinu.

Auk hinna tæknilegu atriða við gufuborunina skipta borhraði og afköst miklu máli. Eins og drepið var á í grein 2) hér að framan má yfirleitt gera ráð fyrir mjög ummynduðu, þ.e. línu bergi á Suðursvæðinu, a.m.k. á þeim stöðum, sem helztu gufuboranirnar munu fara fram.

Við þessi skilyrði og venjulegar holuvíddir, þ.e. 8" til 15" eru afköst krónuboranna sem kunnugt langmest, enda er þetta meginástæðan fyrir notkun þeirra við olíuboranir.

Þar sem krónuborar hafa ekki verið notaðir við gufuboranir hér á landi, er að sjálfsögðu erfitt að áætla borhraða þeirra, en þó liggja fyrir nokkur gögn, sem benda eindregið til þess, að með 8" til 12" borkrónum megi niður á 500 metra dýpt gera ráð fyrir um og yfir 1,0 m/klst netto-meðalhraða í hinu venjulega ummyndaða bergi á Suðursvæðinu.

Við sömu skilyrði mun netto-meðalhraði haglabora og meitilbora vera aðeins 0,2 til 0,3 m/klst, ef borunin truflast ekki af gosum eða öðrum óþægindum við gufuboranir. Afköst krónuborsins munu því vera margfalt meiri.

Nú ber vitanlega að taka tillit til hinna tæknilegu yfirburða krónuborsins við boranir fyrir jarðgufu; hinn árlegi hagnýtingartími hans er af þessum ástæðum meiri, og hin hlutfallslegu afköst verða því enn meiri en samanburður framangreindra talna gefur til kynna.

Við allar meiri háttar boranir er unnið allan sólarhringinn, og er einnig sjálfsagt að hafa þann hátt við gufuboranir í stórum stíl. Þannig virðist mega gera ráð fyrir, að árlegur bortími krónuborsins á Suðursvæðinu geti orðið 4.500 til 5.000 stundir, og árleg afköst því a.m.k. 3.500 metrar miðað við þá holuvídd, sem hér um ræðir, þ.e. 12" og 9".

Einn slíkur bor ætti því að geta lokið við 7 gufuholur á ári, og þannig lokið á rúmlega 4 árum við þá borun, sem um ræðir á Suðursvæðinu. (sjá bls. 197)

Nú mun verð krónubors fyrir þau afköst, sem hér er gengið út frá vera um 2,3 milljón kr. og árlegur reksturskostnaður:

Vextir, fyrning og viðhald	460.000,-
Vinnulaun 15 manna	550.000,-
• Flutningskostnaður	150.000,-
Olíur	250.000,-
Borkrónur og leðja	<u>450.000,-</u>

Samtals kr. 1.860.000,-

Samkvæmt þessu yrði meðalverð hvers boraðs metra um 550 kr, en það er líkt verð og það, sem nú er greitt fyrir heitavatnsboranir hér á landi.

Hver 500 metra djúp gufuhola ætti samkvæmt framangreindu að

kosta um 275.000 kr auk fóðrunar og frágangs. Ef gengið er út frá, að meðalpípulengd í holu sé 300 m, yrði kostnaður við fóðrun og annan frágang um 100.000 kr og heildarkostnaður hvernar holu því um 375.000 kr.

Þar sem gengið er út frá 10 tonn/klst meðalafköstum á holu yrði kostnaður gufuvinnslunnar því um 38.000 kr á hvert tonn á klukkustund. Við hinar grunnu gufuholur í Hveragerði hefur kostnaðurinn hinsvegar verið talsvert lægri, þ.e. innan við 10.000 kr, en holur þessar eru ekki stöðugar og má því ekki reikna með þeim.

Með framangreindum áætlunum yrði heildarkostnaður við borun á þeim 300 tonn/klst af gufu, sem gengið var út frá á bls. 196 því nálægt 11 milljón kr.

Þessum áætlunum ber að sjálfsögðu að taka með varkárni, en þær ættu þó að gefa nokkra hugmynd um arköst krónuboranna og kostnað við notkun þeirra.

Samskonar áætlanir má að sjálfsögðu einnig gera fyrir haglabora og meitilbora.

Þegar um haglabora er að ræða ber að gæta þess, að þeir geta borað talsvert víðari holur en aðrar gerðir af borum. En flutningsgeta <sup>holanna</sup> er eins og áður hefur verið dregið á, mjög háð holuvíddinni, og virðist því sjálfsagt að notfæra sér þetta við gufuboranir með haglaborum, þ.e. binda ekki aðalvíddina við tæpar 10" heldur gera holuna þannig að nota meggi a.m.k. 15" fóðurpípur í stað þeirra 10-3/4" pípu, sem gert var ráð fyrir hér að framan. Borunin yrði því að hefjast með um 20" krónu.

Hæfilegur haglabor til slíkra boranna mun nú kosta um 1,4 milljón kr og árlegur reksturskostnaður hans yrði væntanlega:

Vextir, fyrning og viðhald	280.000,-
Vinnulaun 15 manna	550.000,-
Flutningur	50.000,-
Olíur	75.000,-
Krónur, högl o.fl.	<u>75.000,-</u>

Samtals kr 1.030.000,-

Þegar tekið er tillit til ýmissa örðugleika við gufuboranir með slíkum borum, virðast árleg afköst haglaborsins geta orðið í mesta lagi um 750 metrar, og er þá reiknað með borun allan sólarhringinn. Kostnaður á hvern boraðan metra yrði samkvæmt þessu um 1.400 kr. Hver 500 metra djúp hola myndi því kosta um 700.000 kr. Ef gengið er út frá 300 metrum af 15" fóðurpípum, yrði kostnaður við fóðrun og frágang væntanlega um 130.000 og heildarkostnaður holunnar því um 830.000 kr.

Gufuafköst slíkrar holu yrðu því að vera 2,2 föld afköst þeirra hola, sem gert var ráð fyrir að boraðar yrðu með krónuborum, en kostnaður á hvert tonn á klukkustund af gufu á að vera sá sami.

Þegar hliðsjón er höfð af þéttleika grágrýtismyndunarinnar, verður mjög að draga í efa að afköst 15" holu geti verið svo miklu meiri en afköst 10" holu. Með tilliti til öryggisins er einnig heppilegast, að fjöldi holanna sé sem mestur, ef það hefur ekki aukinn kostnað í för með sér. Hér verður að vísu að taka tillit til flutningskostnaðs gufunnar ofanjarðar, þ.e. kostnaðs við safnleiðslur, en væntanlega fara gufuboranirnar á Suðursvæðinu aðallega fram á einni línu, og er þessi kostnaðarliður því ekki verulega háður fjölda holanna.

Með meitilborum má bora sömu holuvídd og með krónuborum.



Hinsvegjar er ekki að draga í efa, að árleg afköst eru miklu minni, þ.e. gera verður ráð fyrir um 750 metrum, enda þótt borað sé allan sólarhringinn. Skiptir hér miklu máli, hve erfitt það er að ráða við þrýstinginn með þessari bortegund.

Meitilbor af hæfilegri stærð mun nú kosta um 500.000 kr og árlegur reksturskostnaður hans yrði væntanlega um 550.000 kr, þ.e. kostnaður á hvern boraðan metra um 700 kr, og er það hærri tala en væntanlega fæst með krónubornum. Afköst þessara bora eru það lítil, að nota yrði 3 til 4 meitilbora til þess að jafnast á við krónuborinn, og er þá auðséð, að slíkir borar koma síður til mála við meiriháttar gufuboranir, enda þótt heppilegt sé að nota þá við fyrstu tilraunaboranir, þegar heildarkostnaðurinn þarf að vera sem lægstur.

Niðurstaðan af þessum samanburði virðist því vera sú, að heppilegast sé að nota krónubor við gufuboranir á Suðursvæðinu.

Þetta mun einnig vera niðurstaða þeirra manna, sem vinna að gufuborunum í Toscana á Ítalíu. Þar hafa allar gerðir af borvélum verið reyndar, en nú eru þar aðeins notaðir krónuborar - að undanskildum einum meitilbor. Nýlega hefur jarðhitafélagið í Larderello fest kaup á einum mjög öflugum krónubor frá National Supply Co. í Bandaríkjunum.

Þá er rétt að hafa í huga, að með krónubornum má að sjálf-sögðu einnig nota haglakrónur, ef þess gerist þörf, þ.e. þegar mjög hörð berglög koma fyrir, en eins og þegar hefur verið tekið fram virðast litlar líkur fyrir þessu á Suðursvæðinu.

9. Kafli.

H A G N Ý T I N G J A R Þ G U F U N N A R.

Að lokum er rétt að minnast með örfáum orðum á hagnýtingarmöguleika þeirrar jarðgufu, sem gert er ráð fyrir að fáist með borunum á Hengilsvæðinu.

Jarðgufu má sem kunnugt er hagnýta til:

- 1) Hitunar íbúðarhúsa.
- 2) Framleiðslu raforku.
- 3) Margvíslegra nota í iðnaði.

Skal hér farið nokkrum orðum um þessa möguleika.

1) Hitaveita frá Hengli til Reykjavíkur.

Helzta atriðið varðandi hagnýtingu jarðgufunnar til hitunar er að athuga, hvort það geti komið til mála að leiða heitt vatn frá Hengilsvæðinu til Reykjavíkur til aukningar hitaveitunnar þar.

Eskilegast væri, að heitt vatn, sem leitt yrði til Reykjavíkur, fengist frá Vestursvæðinu, þ.e. frá jarðhitasvæðunum við Kolviðarhól og Innstadal. Um þennan möguleika hefur þegar verið rætt á bls. 201. Var þar komið að þeirri niðurstöðu, að jarðhitinn á þessu svæði væri áberandi minni en á öðrum hlutum Hengilsvæðisins, og hefur þetta m.a. komið fram við hitamælingar í þeim borholum, sem gerðar hafa verið í Miðdal og við Kolviðarhól.

Ýmislegt bendir til þess, að jarðhitinn á Vestursvæðinu hafi vatnsaðrennsli á líkan hátt og Suðursvæðið. Gufuhverirnir í Sleggju-beinsskarði, Innstadal o.s.frv. eru því aðeins myndaðir vegna suðu í grunnvatnsborðinu. Ekki er vitað um hæð hins heita grunnvatnsborðs, en

þó bendir borunin við Kolviðarhól til þess, að það liggi tiltölulega lágt. Er þetta í samræmi við þær skoðanir, sem TRAUSTI EINARSSON hefur látið í ljós á öðrum stað í þessari skýrslu (sjá bls. 92).

Það eru því ástæður að ætla, að hið þykka brúngrýti og hin tiltölulega mikla hæð svæðisins yfir sjávarmáli geti valdið því, að erfitt verði að ná sjálfrennandi vatni eða gufu-vatnsblöndu úr borholum á þessum slóðum. Eins og þegar hefur verið tekið fram, er leki brúngrýtisins það mikill, að heita vatnið missir hinn artesiska þrýsting innan þess, og eru því litlar líkur fyrir sjálfrennandi vatni, nema því aðeins að borað sé niður úr hinu kvartera brúngrýti. Þykkt þess mun hinsvegar vera mörg hundruð metrar, og yrðu holurnar því líklega að vera a.m.k. 500 metra djúpar.

En sökum hæðar svæðisins yfir sjávarmáli, verður heita vatni að hafa það mikinn artesiskan þrýsting innan grágrýtismyndunarinnar, að hann geti lyft því upp fyrir brúngrýtið, þ.e. upp í a.m.k. 250 m hæð. Heldur virðist ólíklegt, að svo mikill þrýstingur sé fyrir hendur.

Möguleikar Vestursvæðisins virðast því litlir. En þó er nauðsynlegt að geta þess, að hér er ekki um ábyggilega niðurstöðu að ræða og virðist því sjálfsagt að gerð verði tilraun með a.m.k. eina holu á Vestursvæðinu eins og þegar hefur verið tekið fram. Dýpt hennar þyrfti að geta orðið a.m.k. 500 metrar.

Þá er að athuga, hvort það gæti komið til mála að leiða heitvatn frá Suðursvæðinu til Reykjavíkur. Fjarlægð þess mun vera um 45 kílómetrar; fullkomin heitvatnsleiðsla þaðan myndi því að líkindum kosta yfir 60 milljón kr. Heildarkostnaður hitaveitu frá Suðursvæðinu yrði því væntanlega ekki mikið innan við 100 milljón kr og er þá auðséð, að slíkt fyrirtæki yrði fjárhagslega óhagstætt, einkum vegna þess:

að hitaveitan frá Suður-Reykjum fullnægir nú hitaþörf um 65 % af bænu

Til þess að þessi hitaveita geti komið til mála þarf hitaþörf bæjarins að aukast verulega frá því, sem nú er.

## 2) Framleiðsla raforku á Suðursvæðinu.

Vinnsla raforku við jarðgufu á Suðursvæðinu er sá hagnýtingarmöguleiki jarðhitans, sem mest hefur verið rætt um og mestur áhugi er fyrir.

Í þessari skýrslu hefur verið komið að þeirri niðurstöðu að væntanlega megi gera ráð fyrir, að það tækist að vinna með borunum á þessu svæði um 300 tonn/klst af gufu við 1 ata þrýsting og um 300 l/sek af 100°C heitu vatni. Vera má að borholurnar geti gefið álíka magn við nokkuð hærri þrýsting, en þó er af eðlisfræðilegum ástæðum ekki rétt að reikna með þessu í bili.

Ef gengið er út frá þessum niðurstöðum, verða það fyrst og fremst fjárhagsleg atriði, sem munu skera úr um það, hvort heppilegt sé að hefja vinnslu raforku í stórum stíl á Suðursvæðinu. Til þess að kryfja þetta mál til mergjar er nauðsynlegt að gera áætlun um rafstöð, sem hagnýtir þetta gufu- og vatnsmagn.

Eitt helzta vandamálið við hagnýtingu jarðgufu eru þau áhrif sem ýmis fylgiefni gufunnar hafa á gufuleiðslur og gufutúrbínur.

Frá þessu hefur að nokkru leyti verið skýrt í grein, sem höfundur þessarar skýrslu ritaði í tímarit V.F.I. <sup>1)</sup>, og er því ekki nauðsynlegt að ræða þessi mál ítarlega hér.

Eins og kunnugt er má algerlega koma í veg fyrir skemmdir á

---

<sup>1)</sup> GUNNAR BÖÐVARSSON: Um hagnýtingu jarðhita, T.V.F.I. 5 h 1945

gufutúrbínunum með því að nota sérstaka lágþrýstikatla og nota jarðgufuna til þess að eima á þeim hreint vatn, en gufan frá því er síðan notuð á túrbínurnar. Þetta hefur þó aukinn kostnað í för með sér og væri því heppilegt að geta komizt hjá þessum kötlum.

Ítalir notuðu fram til síðustu ára að mestu leyti slíka katla í jarðhitaorkuverunum í Larderello og víðar, enda er jarðgufan þar mjög menguð tærandi lofttegundum, og auk þess er magn þeirra það mikið, að það hefur mjög slæm áhrif á tómið í eimsvölunum.

Á árunum eftir síðari heimstyrjöldina virðast hinsvegar hafa orðið það miklar framfarir í smíði ryðfastra efna, að nú mun vera auðveldara að reka túrbínur með sjálfri jarðgufunni. Ítalir eru nú að reisa nýtt raforkuver á jarðhitasvæðinu í Toscana og gera þar ráð fyrir beinni notkun gufunnar, og sýnir þetta að vandamálin hljóta að vera að miklu eða öllu leyti leyst.

Nú er sú jarðgufa, sem fengið hefur með borunum á Suðursvæðinu mun hreinni en gufan í Toscana. Hún inniheldur aðeins 0,5 til 1,0 lítra af gasi í kg, en gufan í Toscana mun hinsvegar innihalda um 30 lítra. Auk þess er það alkalískt vatn, sem fylgir gufunni á Suðursvæðinu, en það er að öllu leyti hagstætt. Er þá auðséð, að skilyrði til beinnar notkunar gufunnar eru mun betri á Suðursvæðinu, og verður því að gera ráð fyrir, að það sé fyllilega réttlátanlegt að ganga út frá beinni notkun í eftirfarandi áætlun.

Má hér einnig nefna það, að í sambandi við undirbúning virkjunarinnar í Krýsuvík hefur ítalska verksmiðjan Franco Tosi talið rétt, að gufan verði þar notuð beint á túrbínuna.

Þó verður að hafa í huga, að enn er engin reynsla fengin í þessum efnum og er því rétt að gera ráð fyrir, að í slíkri jarðhitaafstöð séu notaðar nokkrar margar vél og nægilegt varaafli

fyrir hendi til þess að kleift sé að hreinsa túrbínurnar með hæfilegum millibilum.

Í eftirfarandi áætlun skal einnig gert ráð fyrir því, að heita vatnið, sem úr borholunum kemur, sé hagnýtt til vinnslu raforku. Þar sem vatninu má safna í geyma, skal hér gengið út frá því, að það sé notað til toppreksturs, en gufan framleiði hinsvegar grunnaflið.

Aflstöðin sé staðsett á fletinum fyrir sunnan Reykjakot og vestan Gufudal.

Borkostnaður er áætlaður í samræmi við útreikningana í undangengnum kafla. Þá er og gert ráð fyrir 4 kílómetra safnleiðslum fyrir gufu og vatn. Vatnið sé skilið frá gufunni við holurnar og leitt í sérstökum pípum í geymana.

A Suðursvæðinu er kælivatn ekki nægilegt fyrir stórt orkuver, og er því nauðsynlegt að gera ráð fyrir notkun kæliturna.

Þá er og gert ráð fyrir, að raforkan frá stöðinni fari inn á háspennulínu, sem flytur hana til Reykjavíkur.

Með því að gera ráð fyrir 1 ata og 100°C við inntakið í gufú-túrbínurnar og 0,06 ata í eimsvalanum, má með 300 tonn/klst framleiða um 23.000 kw. Ef gert er ráð fyrir því, að heita vatnið komi um 95°C heitt inn í stöðina má með 300 l/sek framleiða að staðaldri um 1.600 kw en sé það notað aðeins 6 stundir á hverjum sólarhring, getur það skilað um 6.400 kw, þ.e. heildarafl stöðvarinnar verður við mesta álag um 30.000 kw.

Gert er ráð fyrir 5 eimtúrbínunum með 6.000 kw afli fyrir jarðgufuna en tveim 3.200 kw eimtúrbínunum fyrir þá gufu, sem unnin er úr heita vatninu.

Lausleg kostnaðaráætlun verður sem hér segir, og er þá gengið út frá núverandi verðlagi:

Gufuboranir og frágangur á gufuhólum .....	kr	11.000.000
Safnleiðslur fyrir gufu og vatn .....	"	6.000.000
Heitvatnsgeymar .....	"	6.000.000
Gufutúrbínur, eimsvalar og rafalar, uppsett .	"	45.000.000
Rafbúnaður, uppsettur .....	"	25.000.000
Byggingar og undirstöður .....	"	10.000.000
Kælivatnskerfi .....	"	10.000.000
Vaxtatap, ófyrirséð o.fl. ....	"	<u>17.000.000</u>

Samtals kr 130.000.000

Ef reiknað er með því, að afl stöðvarinnar sé 30.000 kw, er kostnaðurinn samkvæmt þessu um 4.300 kr/kw. Niðurstaðan er, að bor-kostnaðurinn, sem eflaust er ríflega áætlaður, er aðeins 8,5 % af heildarkostnaðinum. Þetta er einmitt sá liður, sem einna örðugast er að áætla, en sýnilegt er, að tiltölulega miklar skekkjur í honum hafa aðeins lítil áhrif á heildarkostnaðinn.

Næsta skref er að reikna hinn árlega reksturskostnað. Verður þá að áætla hæfilegan fyrningartíma og viðhaldskostnað hinna einstöku hluta stöðvarinnar.

Þar sem gera verður ráð fyrir, að hver borhola endist ekki nema ákveðinn tíma, verður stöðugt að gera nýjar holur, og má gera ráð fyrir, að það verði fullt verk fyrir einn krónubor. Árlegur reksturskostnaður borholanna er því mjög hár.

Einnig ber að hafa í huga, að viðhaldskostnaður safnleiðslunnar og túrbínanna er hærri en vejulega gerist, og skal hér reiknað með 12 ára fyrningartíma og 3 % árlegum viðhaldskostnaði. Að öðru

leyti verður reiknað á venjulegan hátt. Reksturskostnaðurinn verður væntanlega því sem hér fer á eftir:

1) Vextir 5 % af 130.000.000 .....	kr	6.500.000
2) Fyrning og viðhald:		
Borholur .....	"	1.500.000
Safnleiðslur .....	"	560.000
Gufutúrbínur .....	"	4.180.000
Annað .....	"	2.800.000
3) Mannahald o.fl. ....	"	<u>1.500.000</u>

Samtals kr 17.040.000

Hinn árlegi reksturskostnaður er því áætlaður um 13 % af byggingarverðinu.

Með fullri hagnýtingu ætti stöðin að geta skilað um 200 milljón kwst á ári og verður einingarverðið við stöðvarvegg samkvæmt framan greindri áætlun því 0,085 kr/kwst. Kostnaður á kílówattár yrði væntanlega 550 til 600 kr.

Til samanburðar skal þess getið, að kostnaður árskílówattsins frá hinni fyrirhuguðu vatnsaflstöð við Írafoss og Kistufoss er áætlaður um 400 kr og ekki yfir 500 kr frá hinni fyrirhuguðu Laxárvirkjun.

Hinsvegar er framleiðslukostnaður raforku í venjulegum olíukyntum hitaafstöðvum af sömu stærð ekki undir 0,30 kr/kwst.

Framleiðsla raforku við jarðhita á Suðursvæðinu virðist því í bili vera nokkuð óhagstæðari en virkjun vatnsaflsins í Soginu, en framleiðslukostnaðurinn er hinsvegar miklu lægri en í venjulegum hitaafstöðvum. Í þessum samanburði ber þó að taka tillit til þess, að virkjunarskilyrði Sogsins eru sérstaklega hagstæð, og má því ekki



ganga út frá því, að sama niðurstaða fáiist, þegar borið er saman við vatnsvirkjanir af sömu stærð á öðrum stöðum.

En þegar hliðsjón er einnig höfð af þeirri áhættu, sem ætíð hlýtur að vera samfara jarðhitavirkjuninni er óhjákvæmilegt að álykta, að það sé rangt að ráðast í stærri virkjanir á Hengilsvæðinu á meðan að möguleikar eru til vatnsvirkjana í Sogi.

Að Soginu fullnýttu koma hinsvegar fram nokkrir örðugleikar við aukningu raforkuvinnslunnar. Virðist þá óhjákvæmilegt að ráðast fyrir eða síðar í virkjun vatnsfalla í Hvítá eða Þjórsá. En virkjun þeirra er að ýmsu leyti örðug og krefst mikils undirbúnings og mun meiri fjárfestingar en þekkst hefur hingað til hér á landi.

Er því hætt við, að all langur tími geti liðið frá því, að Sogið er fullnýtt og þar til virkjanir í Hvítá og Þjórsá geti tekið til starfa. Möguleikar jarðhitans virðast einmitt vera á þessu tímabili, þ.e. til þess að fylla upp í skarðið á meðan að unnið er að undirbúningi og byggingu framangreindra stórvirkjana.

Þetta tímabil er raunverulega ekki langt framundan, og má jafnvel gera ráð fyrir - einkum vegna hinnar fyrirhuguðu áburðarverk-smiðju - að æskilegt verði, að stærri jarðhitavirkjun geti tekið til starfa ekki síðar en 1960, eða þar um bil.

Og þá verður að gæta þess, að undirbúningur jarðhitavirkjunarinnar, þ.e. boranir og ýmsar athuganir geta tekið 4 til 6 ára tíma og þyrfti sá undirbúningur því að geta hafizt mjög bráðlega.

### 3) Hagnýting jarðhitans í iðnaði.

Sérstök skýrsla hefur verið gerð um þessi mál, og er því vísað til hennar.

20. Kafli.

N I Ð U R S T Ö Ð U R O G Ú T L I T.

Það er skoðun höfundar, að þær rannsóknir, sem framkvæmdar hafa verið á Hengilsvæðinu hafi að miklu leyti varpað ljósi á hinn eðlisfræðilega og jarðfræðilega grundvöll gufuvinnslunnar; að minnsta kosti eru þessi mál nú ólíkt betur kunn en þau voru áður en rannsóknirnar hófust.

Byggt á þessum grundvelli, og með hliðsjón af reynslu við boranir eftir heitu vatni á ýmsum stöðum hefur jafnvel verið hægt að leggja fram áætlun um væntanlegt gufumagn á syðri hluta Hengilsvæðisins og kostnað við vinnslu þess. Þessa áætlun ber að sjálfsögðu að skoða aðeins sem fyrstu tilraun til þess að fá hugmynd um orkubúskap jarðhitasvæðisins, og verður vitanlega að taka henni með varkárni. En á þessu stigi málsins verður ekki lengra komið.

Næsta skrefið er að hefja á svæðinu frá Reykjakoti til Hvera gerðis þær gufuboranir, sem frá tæknilegu sjónarmiði er æskilegt að ráðist verði í, og þannig láta reynsluna sjálfa skera úr því, að hve miklu leyti framangreind gufuvinnsla er möguleg.

Þó skulu hér nefnd þrjú rannsóknarverkefni, sem rétt virðist að vinna að óháð gufuborunum. Ber þar fyrst að nefna hina almennu jarðfræðirannsókn svæðisins, og er sjálfsagt að henni verði haldið áfram eftir því sem tök eru á. Í öðru lagi er rétt að gera nákvæmt þungakort af svæðinu og umhverfi með hinum nýja og fullkomna þungamæli, sem jarðborunardeildin hefur fest kaup á.

Verði á næstunni ekki tök á því að hefja gufuboranir með til-  
tölulega stórvirkjum tækjum, er æskilegt að framkvæmd verði borun á

einni djúpri rannsóknarholu í námunda við Reykjakot með stærsta bor Hitaveitu Reykjavíkur. Tilgangur þessarar borunar er fyrst og fremst að mæla aðrennslishita svæðisins og gefa hugmynd um jarðfræðilegan þverskurð þess.

Auk þessa er að sjálfsögðu rétt að gera tilraun til gufuborunar á Suðursvæðinu með þeim öflugasta meitilbor, sem nú er fyrir hendi.