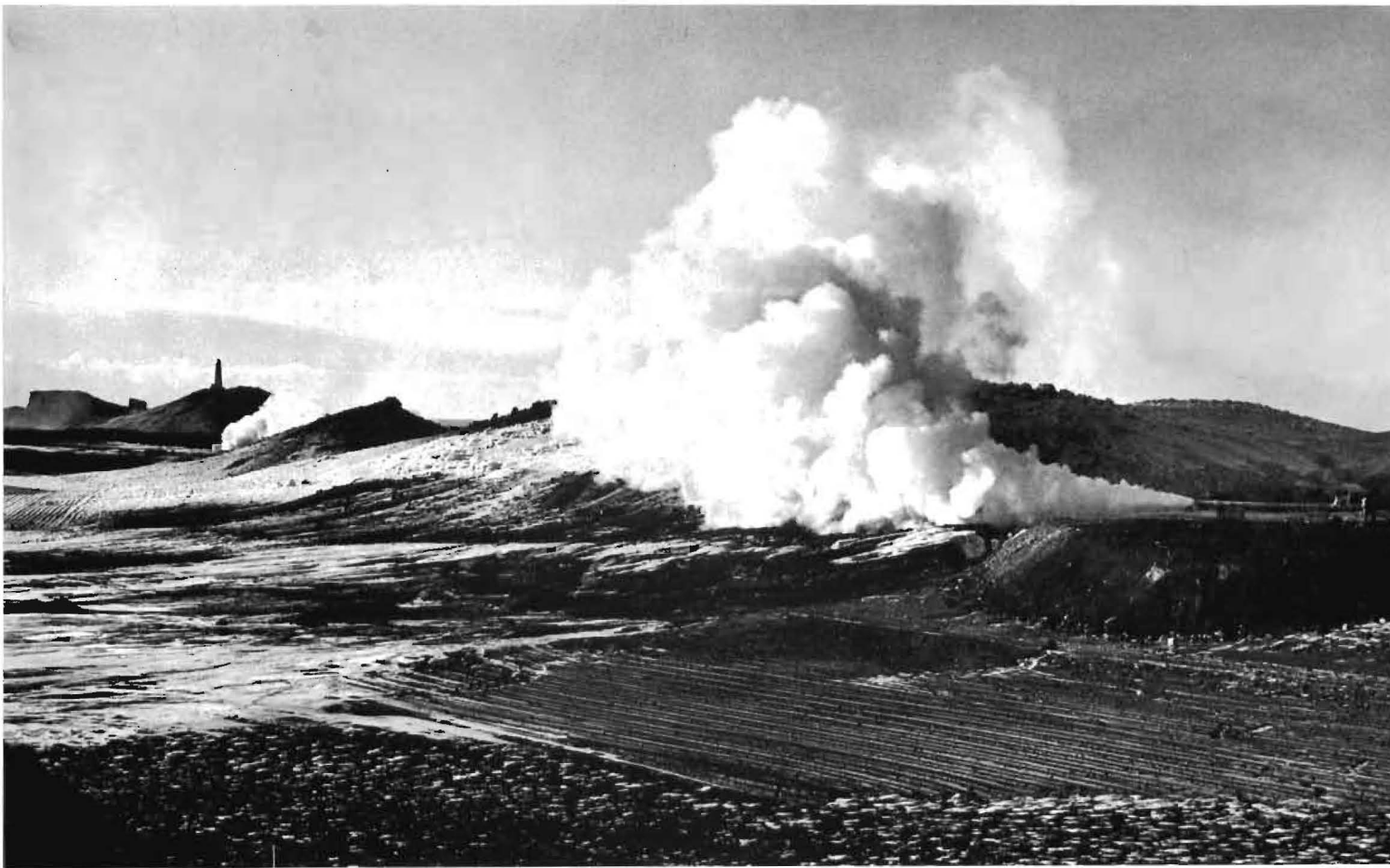




**ORKUSTOFNUN**  
JARÐHITAEIÐ

Febrúar 1971

# REYKJANES



HEILDARSKÝRSLA UM RANNSÓKN  
JARÐHITASVÆÐISINS

# REYKJANES

HEILDARSKÝRSLA UM RANNSÓKN  
JARÐHITASVÆÐISINS

## FORMÁLI

Þar sem greinargerð þessi er umfangsmikil og efnið margþætt, þykir rétt að leiðbeina lesendum, hvernig þeir geti á sem skemmstum tíma fundið þann fróðleik, sem þeir hafa helzt hug á.

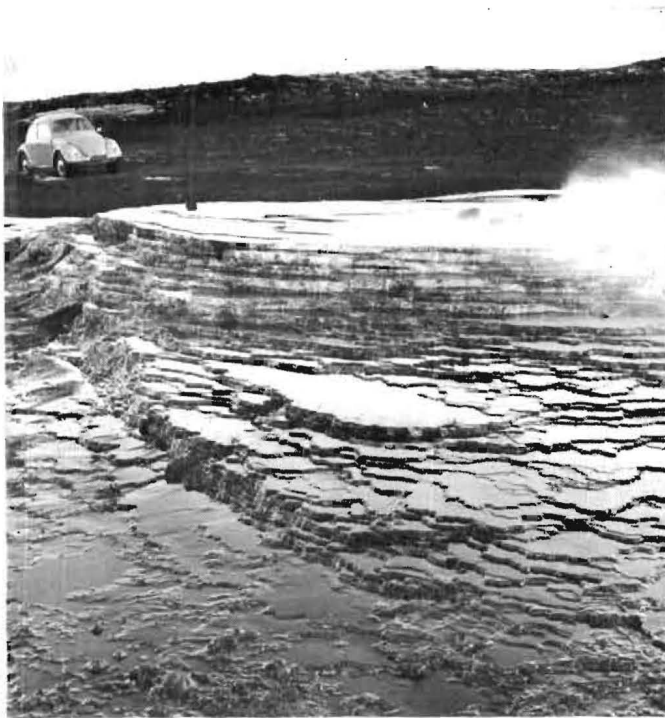
Í ágripi bls. 1-3 er í mjög stuttu máli rakið tilefni og markmið rannsóknarinnar, lýst meginniðurstöðu og ályktunum, sem af henni eru dregnar um horfur á jarðsjávarvinnslu á Reykjanesi. Ítarlegra yfirlit yfir helztu niðurstöður og framtíðarhorfur er að finna í kafla 6, bls. 110-119. Vilji menn rekja aðdraganda verksins, ákvarðanir og samhengi helztu rannsóknaraðgerða á hverju tímabili, er þeim bent á kafla 1, bls. 3-24. Þar er í lok hvers rannsóknarskeiðs dregin saman vitneskja um svæðið, og fæst þannig yfirlit yfir þróun hugmynda og þann árangur, sem náðist á hverju skeiði. Í köflum 2 og 3, bls. 27-72, er lýst ýmsum þáttum frumrannsóknar og djúprannsóknar. Þar sem mikill hluti þessara rannsókna hefur tiltölulega þröngt sérfræðilegt gildi, hafa verið samdar um þær sérskýrslur, sem fjölritaðar eru í færri eintökum og geymdar á Orkustofnun. Áhugamönnum um boranir og bortæknileg vandamál er sérstaklega bent á kafla 4, bls. 73-95, en þar er fjallað um gang hvers borverks og lýst vandamálum, sem við var að etja. Kostnaður við rannsóknarverkið er rakinn í kafla 5, bls. 96-109, og er þar gerð grein fyrir kostnaðaráætlunum, kostnaðargát og gefið yfirlit yfir kostnað einstakra verkhluta og heildaryfirlit um kostnað rannsóknarverksins. Safnað hefur verið eintökum af bréfum, fundargerðum, áætlunum og framvinduskýrslum, frumgögnum mælinga, sérskýrslum og heimildaritum, og eru þau varðveitt sem "Safnskýrsla um Reykjanes" á Orkustofnun. Ennfremur má geta þess, að á jarðhitaráðstefnu

S.Þ., sem haldin var í Pisa í september 1970, var lögð fram skýrsla um þessar rannsóknir (27), og mun hún birtast í tímaritinu Geothermics á þessu ári.

Greinargerð þessi er samin af Birnu Ólafsdóttur, Jens Tómassyni, Jóni Jónssyni, Stefáni Arnórssyni, Stefáni G. Sigurmundssyni og Sveinbirni Björnssyni. Gefa upphafsstafir í efnisyfirliti til kynna, hverjir eru höfundar einstakra greina. Ómar Hálfðanarson aðstoðaði við undirbúning undir fjölrítun.

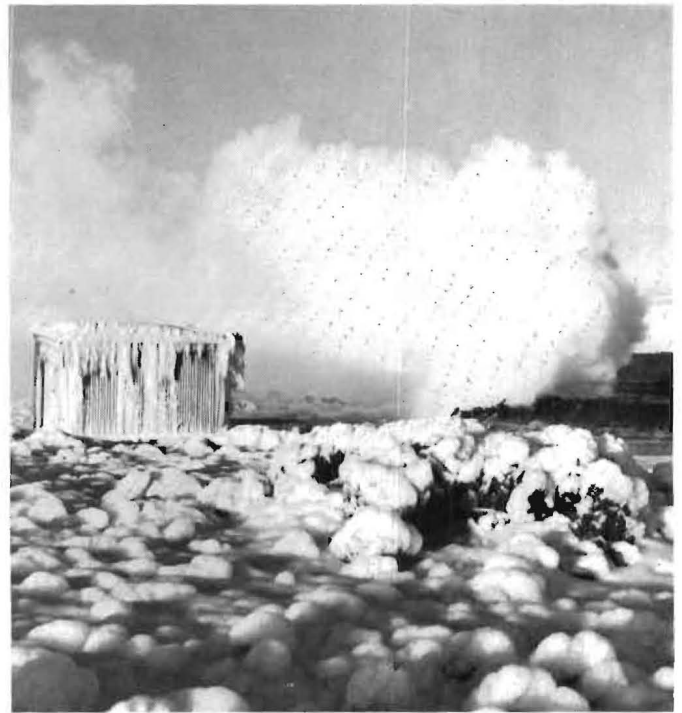
Þetta rannsóknarverk mun vera ein umfangsmesta könnun á jarðhitasvæði, sem gerð hefur verið hér á landi. Verkið var unnið sem hópvinna, og munu flestir starfsmenn jarðhitadeildar og jarðborana hafa komið þar við sögu. Enn fremur voru nán samráð höfð við Rannsóknaráð og ráðuneyti um ákvarðanir og tilhögun verksins. Niðurstöður rannsóknarinnar eru mikilvægar vegna sjóefnavinnslu á Reykjanesi, en jafnframt hafa þeir, sem að henni stóðu, öðlazzt dýrmæta reynslu, sem ætti að létta róðurinn við rannsókn þeirra svæða, er nú fylgja í kjölfarið.

Sveinbjörn Björnsson



*Kísil- og saltútjellingar við Holuhver.*

*Ljós. Mats Wibe Lund, jr. 19. jan. 1971.*



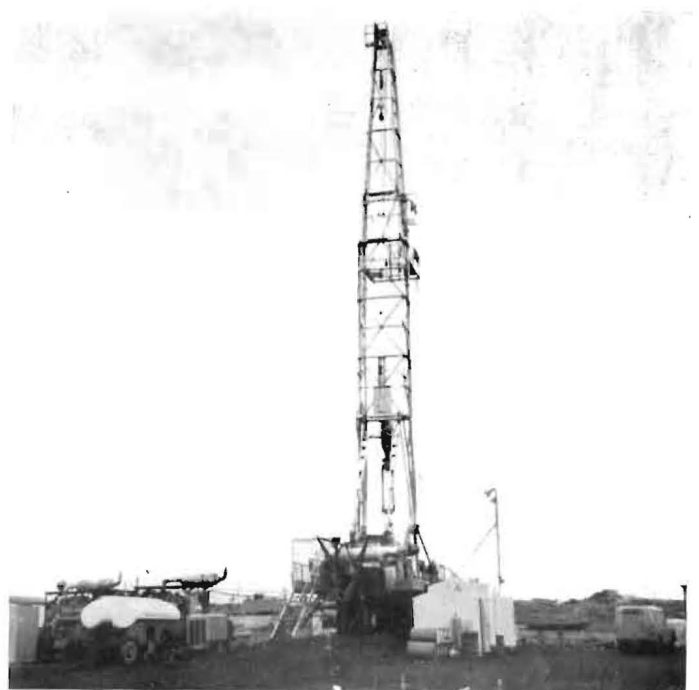
*Klakabönd við holu 2. Skiljuskúr er um 2 m á hæð og 3 m á lengd.*

*Ljós. Mats Wibe Lund, jr. 19. jan. 1971.*



*Hola 8 í gosi.*

*Ljós. Mats Wibe Lund, jr. 19. jan. 1971.*



*Gufubor við borun holu 3 á Reykjanesi.*

*Ljós. Jón Jónsson. Nóv. 1968.*

*Forsíðumynd. Jarðhitasæðið á Reykjanesi. Horft frá Sýrfelli. Fremst er hola 8 í blástvi, en í baksýn hola 2 og viltinn.*

*Ljós. Mats Wibe Lund, jr. 19. jan. 1971.*



*Jarðhitasæðið á Reykjanesi. Horft til suðvesturs.*

*Ljós. Mats Wibe Lund, jr. Febrúar 1970.*



*Jarðhitasæðið á Reykjanesi. Horft til norðausturs.*

*Ljós. Mats Wibe Lund, jr. Febrúar 1970.*





Jarðhitasvæðið á Reykjanesi. Horft í austur.

Ljósni. Mats Wibe Lund, jr. Febrúar 1970.



Jarðhitasvæðið á Reykjanesi. Horft í útsuður. Í forgrunni jarðsjávarljörn frá holtu 2.

Ljósni. Mats Wibe Lund, jr. Febrúar 1970.



*Hverasuæðið á Reykjanesi í október 1967.*

*Ljós. Jón Jónsson.*



*Sprungur á hverasuæðinu á Reykjanesi mynduðar í jarðskjálftunum 30. 9. 1967.*

*Ljós. Jón Jónsson.*



*Hverasuæðið á Reykjanesi. Fremst á myndinni eru hvernir frá 1967 að fyllast. Gíos er að hefjast í leirhvarnun, sem oft er nefndur 1918.*

*Ljós. Jón Jónsson.*



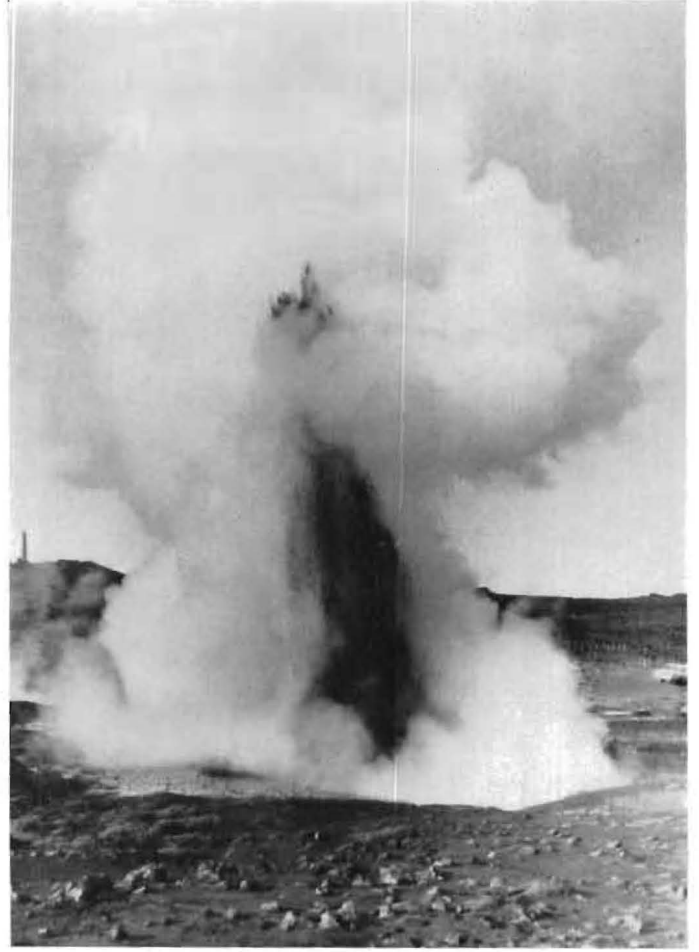
*Hverasuæðið á Reykjanesi. Fremst á myndinni eru hvernir, sem mynduðust við jarðskjálftana 30. 9. 1967. Bak við þá gýs leirhvarnin.*

*Ljós. Jón Jónsson.*





Leirgos í 1918 þann 3. 10. 1967. Hæð gossins áætluð 10–12 m. Þessi hver er nú tær vatnshver.  
Ljós. Jón Jónsson.



Leirgos í 1918 3. 10. 1967.

Ljós. Jón Jónsson.



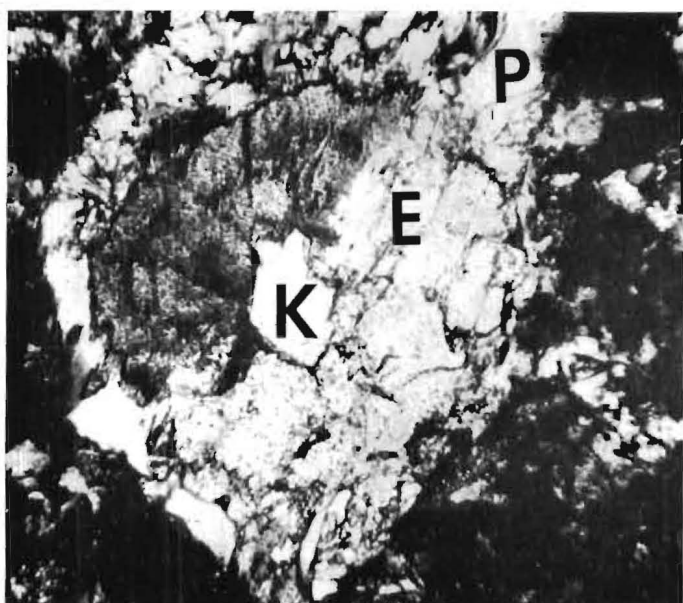
Stóri leirhverinn 1918 í upphafi goss 3. 10. 1967.

Ljós. Jón Jónsson.

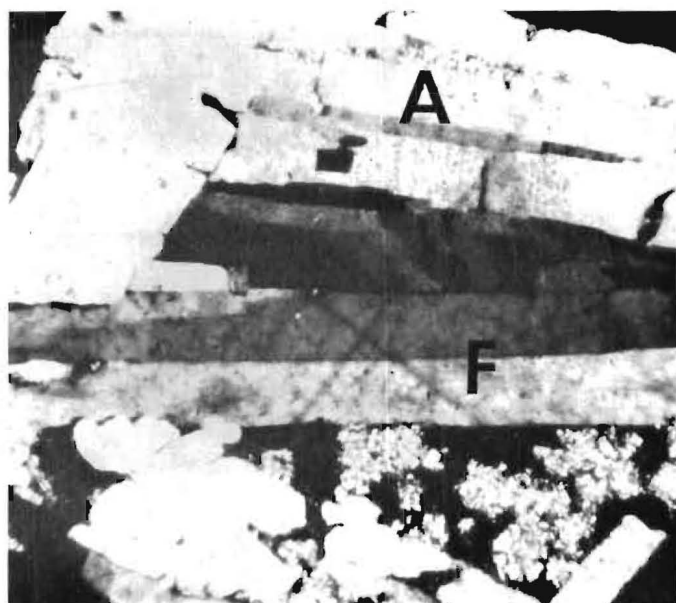


Gosi að ljúka í 1918 þann 3. 10. 1967.

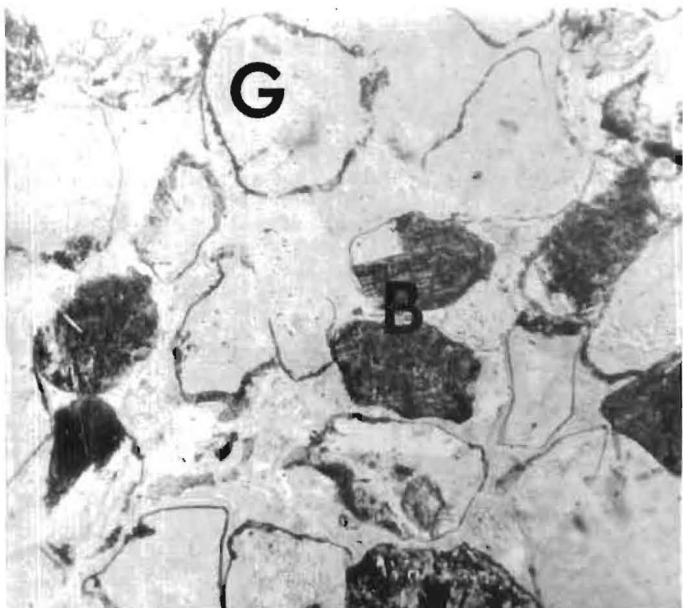
Ljós. Jón Jónsson.



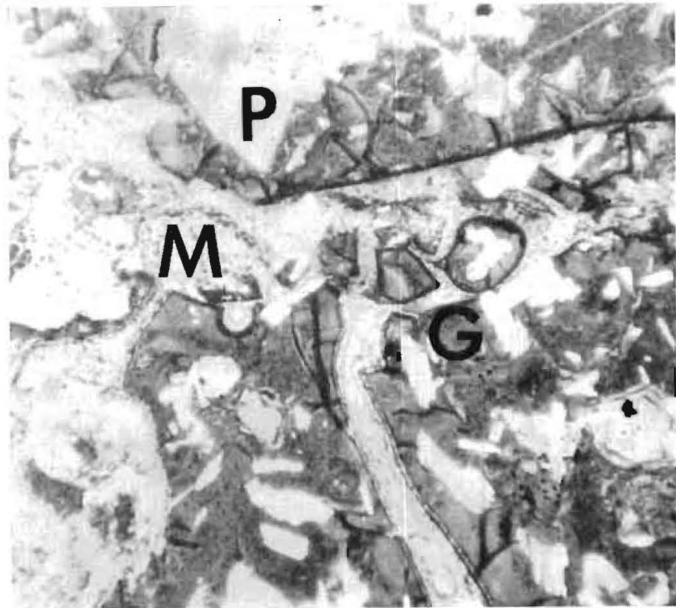
1. Þ nr. 1425 H 8  
 dýpi 1369 m. Stækkun x80.



2. Þ nr. 1293 H 2  
 dýpi 68 m. Stækkun x80.



3. Þ nr. 1243 H 4  
 dýpi 636 m. Stækkun x80.



4. Þ nr. 1201 H 6  
 dýpi 571 m. Breksía. Stækkun x80.

Þunnsneiðar af bergi úr borholum

SKÝRINGAR	G	Gler
A	K	Kalkspat
B	M	Montmorillonit
E	P	Plagióklas
F	Þ	Þunnsneið

EFNISYFIRLIT

	Bl.s.
0. ÁGRIP (SvB) .....	1
1. FRAMVINDA RANNSÓKNARVERKSINS (SvB) .....	3
1.1. Rannsóknir fyrir 1968 .....	3
1.2. Vitneskja um svæðið 1.júní 1968 .....	4
1.3. Rannsóknir 1968 - 1.marz 1969 .....	5
1.4. Vitneskja um svæðið 1.marz 1969 .....	10
1.5. Rannsóknir 1.marz - 1.sept. 1969 .....	12
1.6. Vitneskja um svæðið 1.sept. 1969 .....	17
1.7. Rannsóknir 1.sept. - 31.des. 1969 .....	18
1.8. Vitneskja um svæðið 1.jan. 1970 .....	23
1.9. Rannsóknir 1970 .....	24
2. FRUMRANNSÓKN .....	27
2.1. Jarðfræði og jarðsveiflumælingar (JJ/JT/SA) ...	27
2.2. Dreifing jarðhitans og eðli hans (SA/JJ) .....	28
2.3. Segulmælingar (SvB/BÓ) .....	29
2.4. Rafleiðnimælingar (SvB/BÓ) .....	30
3. DJÚPRANNSÓKN .....	34
3.1. Jarðlög og ummyndun (JT).....	34
3.1.1. Efni til greiningar jarðlaga .....	34
3.1.2. Bergtegundir og greining þeirra .....	34
3.1.3. Jarðlög á Reykjanesi .....	35
3.1.4. Myndbreyting bergsins .....	41
3.1.5. Leirmineröl .....	46
3.1.6. Saga jarðhitans og dreifing anhydrits og epidóts .....	49
3.2. Vatnsæðar og hiti (SA/SGS/JT) .....	50
3.3. Efni í jarðsjó (SA) .....	52
3.4. Útfellingar kísils (SA) .....	66
3.5. Afl borhola (SA).....	68
3.5.1.Hola 2 .....	68
3.5.2.Hola 4 .....	69
3.5.3.Hola 8 .....	70

	Bls.
4. BORANIR .....	73
4.1. Gangur borverka (SGS).....	73
4.1.1. Hola 1 .....	73
4.1.2. Hola 2 .....	76
4.1.3. Hola 3 (Gufubor) .....	77
4.1.4. Hola 4 (Gufubor) .....	77
4.1.5. Hola 5 (Gufubor) .....	78
4.1.6. Hola 6 (Mayhewbor) .....	80
4.1.7. Hola 7 (Mayhewbor) .....	81
4.1.8. Hola 8 (Gufubor) .....	81
4.1.9. Aðgerðir á H 4 (Mayhew- og Gufubor) .....	82
4.1.10. Fóðrun H 8 .....	89
4.2. Bortæknileg vandamál(SGS/SvB) .....	90
4.2.1. Borun í lek hraun og sandlög .....	91
4.2.2. Hrunhætta og viðgerð á hrundum holum .....	92
4.2.3. Steyping fóðringa og slit á fóðringum .....	93
4.2.4. Skolvatn og borleðja .....	94
4.2.5. Bortæki .....	94
5. KOSTNAÐUR (SGS) .....	96
5.1. Kostnaður rannsóknarverksins fyrir 1968 .....	96
5.2. Kostnaður rannsóknarverksins 1968-1.marz 1969 .....	96
5.3. Kostnaður rannsóknarverksins 1.marz-1.sept.1969 .....	100
5.3.1. Borun H 6 og H 7 .....	103
5.4. Kostnaður rannsóknarverksins 1.sept.-31.des.1969 .....	104
5.4.1. Viðgerð H 4 .....	105
5.4.2. Borun H 8 .....	105
5.4.3. Viðgerð H 4 eftir hrun .....	106
5.5. Kostnaður 1970 .....	107

	Bls.
6. STADA RANNSÓKNARVERKSINS OG FRAMTÍÐARHORFUR (SvB) ..	110
6.1. Eiginleikar svæðisins .....	110
6.1.1. Berglög og sprungur .....	110
6.1.2. Jarðhiti og jarðsjór .....	111
6.1.3. Gufa .....	112
6.1.4. Stærð jarðhitasvæðisins .....	113
6.1.5. Vinnslueiginleikar .....	114
6.2. Vinnsluboranir .....	115
6.3. Fjárfesting í svæðinu og verð á jarðsjó og gufu .....	115
6.4. Framtíðarhorfur .....	119
 HEIMILDARRIT .....	 120



MYNDASKRÁ

Mynd 1.1	Jarðfræðikort af Reykjanesi eftir Jón Jónsson.	Fnr. 9053
Mynd 1.2	Þyngdarsviðskort af jarðhitasvæðinu.	Fnr. 7730
Mynd 1.3	Hitamælingakort af jarðhitasvæðinu. Mælt á 50 cm dýpi.	Fnr. 9159
Mynd 1.4	Innrauð varmageislun frá jarðhitasvæðinu á Reykjanesi.	
Mynd 1.5	Líklegur þverskurður jarðhitasvæðisins.	Fnr. 9315
Mynd 2.1	Jarðlagaskipan á jarðhitasvæðinu samkvæmt jarðsveiflumælingum.	Fnr. 8637
Mynd 2.2	Segulsviðskort af jarðhitasvæðinu.	Fnr. 9160
Mynd 2.3	Viðnámskort af jarðhitasvæðinu.	Fnr. 9158
Mynd 3.1	Staðsetning borhola og sniða.	Fnr. 9767
Mynd 3.2	H 2. Borhraði og jarðlagasnið.	Fnr. 9768
Mynd 3.3	H 3. Borhraði og jarðlagasnið, blað 1 og 2.	Fnr. 8650
Mynd 3.4	H 4. Borhraði og jarðlagasnið, blað 1 og 2.	Fnr. 8688
Mynd 3.5	H 6. Borhraði og jarðlagasnið.	Fnr. 9585
Mynd 3.6	H 8. Borhraði og jarðlagasnið, blað 1, 2 og 3.	Fnr. 9055
Mynd 3.7	Jarðlagasnið A - B	Fnr. 9769
Mynd 3.8	Jarðlagasnið A - C	Fnr. 9770
Mynd 3.9	Jarðlagasnið D - E	Fnr. 9771
Mynd 3.10	Jarðlagasnið D - F	Fnr. 9772

Mynd 3.11	Mineralgreining í H 2 og H 3.	Fnr. 9759
Mynd 3.12	Mineralgreining í H 4 og H 6.	Fnr. 9760
Mynd 3.13	Mineralgreining í H 8	Fnr. 9761
Mynd 3.14	Hitamælingar í H 2	Fnr. 8654
Mynd 3.15	Hitamælingar í H 3	Fnr. 8659
Mynd 3.16	Hitamælingar í H 4	Fnr. 9257
Mynd 3.17	Hitamælingar í H 5	Fnr. 9776
Mynd 3.18	Hitamælingar í H 6	Fnr. 9259
Mynd 3.19	Hitamælingar í H 7	Fnr. 9775
Mynd 3.20	Hitamælingar í H 8	Fnr. 9258
Mynd 3.21	Stöðugleiki Na- og K-steintegunda.	Fnr. 9724
Mynd 3.22	Na/K atómhlutfall í vatni, sem stjórnast af uppleysanleika $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ og $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Fnr. 9331
Mynd 3.23	Útfelling kísils í borholum.	Fnr. 9656
Mynd 3.24	Aflmæling á H 2	Fnr. 8556
Mynd 3.25	Heildarrennsli H 4 á Reykjanesi.	Fnr. 9523
Mynd 3.26	Heildarrennsli H 2 og H 8.	Fnr. 9722
Mynd 3.27	Vinnsluferill H 8.	Fnr. 9723
Mynd 4.1	Rannsóknarhola fyrir Gufubor á Reykjanesi.	Fnr. 8614
Mynd 4.2	Fóðrun H 8.	Fnr. 9749
Mynd 5.1	H 3 - Tímaáætlun.	Fnr. 8615
Mynd 5.2	H 4 - Tímaáætlun.	Fnr. 8615
Mynd 5.3	H 5 - Tímaáætlun.	Fnr. 8615
Mynd 5.4	Tímaáætlun fyrir aðgerðir, boranir og jarðhitarannsóknir á jarðhitasvæðinu.	Fnr. 8851

Mynd 5.5	H 6. - Mayhew-holur - Verkáætlun A	Fnr. 8848
Mynd 5.6	Mayhew-holur - Verkáætlun B	Fnr. 8849
Mynd 5.7	H 7. - Mayhew-holur - Verkáætlun C	Fnr. 8850
Mynd 5.8	Tímaáætlun fyrir aðgerðir, boranir og jarðhitarannsóknir.	Fnr. 8991
Mynd 5.9	H 8. - Verkáætlun og gangur verksins.	Fnr. 8998

TÖFLUSKRÁ

	Bls.
Tafla 3.1 Efnasamsetning jarðsjávar í hverum og borholum á Reykjanesi .....	54
Tafla 3.2 Efnasamsetning jarðsjávar á Reykjanesi .....	58
Tafla 3.3 Samsetning jarðsjávar í þremur borholum og einum hver á Reykjanesi borin saman við ferskan sjó .....	60
Tafla 3.4 CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S og útreiknað pH í jarðsjó við innstreymi í H 2 og H 8 .....	63
Tafla 3.5 Innihald K <sub>2</sub> O í fersku og ummynduðu bergi af Reykjanesi .....	64
Tafla 3.6 Heildarrennsli og hiti í H 2 og H 4 .....	69
Tafla 3.7 Jarðsjór, gufa og efni í H 8 við mismunandi þrýsting .....	71
Tafla 5.1 Borun H 2 .....	97
Tafla 5.2 Kostnaður við Reykjanesboranir frá 15.09.1968	97
Tafla 5.3 Kostnaður 1968 - 1.marz 1969 .....	99
Tafla 5.4 Reykjanes - Heildargreiðsluáætlun maí-des. 1969 .....	101
Tafla 5.5 Greiðsluáætlun maí-des. 1969. Rannsóknir á jarðhita og borholum .....	102
Tafla 5.6 Kostnaður rannsóknarverksins 1.sept.- 31.des. 1969 .....	104
Tafla 5.7 Viðgerð og fóðrun H 4 .....	105
Tafla 5.8 Kostnaður 1.marz 1969 - 31.des. 1969 .....	107
Tafla 5.9 Kostnaður 1970 .....	108
Tafla 5.10 Heildaryfirlit yfir kostnað rannsóknarverksins 1968-1970 .....	109

	Bls.
Tafla 6.1 Samanburður á eignum í jarðsjó og ferskum sjó .....	112
Tafla 6.2 Fjárveitingar til rannsóknarverksins .....	116
Tafla 6.3 Áætluð fjárfesting í rannsókn svæðisins, vinnsluholum og veitubúnaði .....	117
Tafla 6.4 Árgjald fyrir jarðsjó og gufu .....	118



## 0. AGRIP

Til efni þeirrar rannsóknar á jarðhita á Reykjanesi, sem hér verður rakin, var áætlun um sjóefnavinnslu úr jarðsjó, sem gerð var að frumkvæði Rannsóknaráðs ríkisins. Í síðustu gerð hennar, sem birt var í marz 1969, var ráðgert að reisa á Reykjanesi saltverksmiðju, sem framleitt gæti árlega um 250 000 tonn af salti auk annarra efna. Að áliti sjóefna-nefndar Rannsóknaráðs gæti slík verksmiðja reynzt arðbær, ef unnt yrði að tryggja henni í 15 ár 250 l/s af 100° C heitum jarðsjó með sömu efnum og nú eru í hverum á svæðinu, og auk þess um 265 tn/klst af gufu með mismunandi vinnsluþrýstingi. Fyrir jarðsjó og gufu gæti verksmiðjan greitt allt að 35 Mkr á ári.

Með þessari nýtingu yrði varmatap svæðisins um tuttugu sinnum örara en náttúrulegt varmatap um yfirborð. Mjög óvíst var talið, hvort svæðið fengi staðizt svo öra og langvarandi varmavinnslu, og enn óvissara þótti, að efni í jarðsjónum héldust óbreytt um vinnslutímann. Í þriðja lagi var vinnslukostnaður á svæðinu óþekktur og vafamál, hvort unnt yrði að afla verksmiðjunni jarðsjávar og gufu á því verði, sem arðsemisreikningar um hana gerðu ráð fyrir, enda þótt svæðið stæðist það álag, sem áætlað var.

Markmið rannsóknarinnar var að afla gagna um jarðhita-svæðið, sem skorið gætu úr þessum vafaatriðum. Með alhliða rannsókn var þess vænzt, að leiða mætti svo sterkar líkur að vinnslugetu og rekstraröryggi svæðisins, að réttlætanlegt væri að leggja í vinnsluboranir, en þær yrðu svo endanlegur prófsteinn á getu svæðisins og forsendur um vinnslukostnað. Var þá haft í huga, að kostnaður við vinnsluboranir

gæti numið um 100 Mkr, en áætluð fjárfesting í mannvirkjum saltverksmiðju er hins vegar rúmar 1000 Mkr.

Rannsóknarverkið hófst um mitt ár 1968, og í árslok 1970 var kostnaður við það orðinn 29,7 Mkr. Þar af eru 9,0 Mkr kostnaður við gerð borholu H 8, sem er fyrsta vinnsluholan á svæðinu, og dregur hún um 72 l/s af jarðsjó úr berginu. Nægir hann til framleiðslu um 50 000 tonna af salti á ári, en það er svipað magn og nú er notað hér á landi árlega.

Meginniðurstaða rannsóknarverksins er, að sterkar líkur séu á því, að svæðið muni standast áætlað álag vegna sjóefnavinnslu, ef jarðsjórinn er sóttur í berglög á 1000-2000 m dýpi. Þar er bergið vel vatnsgengt og hár hiti á stærra svæði en ofar. Jarðsjórinn myndar víðáttumikið hringstreymi, og eru litlar líkur á því, að efni í honum breytist verulega við vinnsluna. Umhverfis jarðhitasvæðið er kaldari jarðsjór í bergi, en ekki ferskt vatn, og því hverfandi hætta á innrás fersks vatns í vinnsluholur, þótt langvarandi vinnsla lækki jarðsjávarstöðu á svæðinu. Horfur um vinnslukostnað eru allgóðar, og mundi 35 Mkr árgjald nægja, þótt bora þyrfti allt að sex vinnsluholur til viðbótar þeirri, sem fyrir er, og entust þær í fimm ár. Sjá nánar kafla 6.

Á grundvelli þessarar vitneskju telur Orkustofnun rétt að mæla með borun vinnsluhola og álagsprófun svæðisins í áföngum, ef tryggt þykir að öðru leyti, að ráðizt verði í sjóefnavinnslu á Reykjanesi. Hins vegar telur hún ekki rétt, að hafnar verði aðrar fjárfrekar framkvæmdir eða mannvirkjagerð á svæðinu, fyrr en bein vinnsluprófun hefur sýnt, að geta svæðisins er í reynd jafn mikil og rannsókn þess gefur fyrirheit um.

## 1. FRAMVINDA RANNSÓKNARVERKSINS

### 1.1. Rannsóknir fyrir 1968

Á undanförunum áratugum hefur verið unnið að ýmsum athugunum á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi, þótt ekki væri um skipulagða heildarrannsókn að ræða. Raforkumálaskrifstofan stóð að borun á Reykjanesi árið 1956 til rannsóknar á saltvatni í hverum. Þessari rannsókn stjórnaði Baldur Líndal, efnaverkfræðingur. Boruð var ein hola (H 1), 162 m djúp. Hiti reyndist mun hærri en við var búizt, mestur um 185°C í 154 m. Afl holunnar var 10-15 tn/klst af vatni og gufu. Fylgzt var með holunni í tíu ár, gerðar efnagreiningar á vatni og gufu, en ekki varð af frekari aðgerðum. Efni í saltvatninu héldust óbreytt þennan tíma.

Á árinu 1963 gerði Vermir s.f. athugun á hagkvæmni hitaveitu frá Reykjanesi til Keflavíkurflugvallar, Njarðvíkur og Keflavíkur (1). Skýrslu um þessa athugun fylgdi jarðfræðikort af Reykjanesi (M 1:30 000), gert af Jóni Jónssyni, jarðfræðingi, en hann hefur unnið að rannsóknum á jarð- og bergfræði Reykjannesskaga undanfarin tíu ár. (Mynd 1.1).

Þyngdar- og jarðsveiflumælingar hafa verið gerðar víða á Reykjannesskaga m.a. á Reykjanesi (2) (Mynd 1.2) Sumrin 1966 og 1968 var jarðhiti á Reykjanesi kortlagður með mælingu á innrauðri geislun úr lofti og til samanburðar gerðar mælingar á hita á 50 cm dýpi í jarðvegi á svæðinu (3,4) (Myndir 1.3 og 1.4).

Sumarið 1967 voru gerðar athuganir á smáskjálftum á Suðvesturlandi. Reyndust þeir mjög tíðir á Reykjanesi (um 23 á dag) (5). Í lok september 1967 varð mikil skjálftahrina á

Reykjanesškaga, sem virtist færast vestur skagann frá svæðinu norðan Grindavíkur og ná hámarki með 16 snörpum kippum (M 4,4) á Reykjanesi 30. sept. Hreyfing varð á Valabjargargjá, sem liggur frá sjó til norðausturs um hitasvæðið (Mynd 1.1), og seig vesturhlutinn næst sjónum um 5-8 cm. Vita-húsið sprakk þvert yfir. Þessir skjálftar höfðu veruleg áhrif á jarðhitann. Frá því í ársbyrjun 1967 hafði jarðhitinn á yfirborði verið að aukast á svæðinu, en við skjálftana lifnuðu allir hverir verulega við, og varmaútstreymi óx að miklum mun. Nýjar sprungur mynduðust í jarðvegi yfir Valabjargargjá, og streymdi þar út gufa. Rennsli jókst í hverum, og Stóri-Geysir tók að gjósa allt að 15 m háum gosum. Magníum mældist herra í hverum, og var það talið merki um, að sjór hefði komið inn í jarðhitasvæðið við skjálftana.

#### 1.2. Vitneskja um svæðið 1.júní 1968

Áður en boranir hófust sumarið 1968, var vitað, að vatn í hverum á Reykjanesi var um 1,6 sinnum saltara en sjór. Kalí- og kalsíummagn var um 5 sinnum herra en í sjó, en magníum mjög lítið. Kísilsýra í vatninu benti til allt að 265°C hita, en í H 1 hafði mælt 185°C í 154 m dýpi. Ekki var ljóst, hvort heitt aðstreymi svæðisins væri sjór eða ferskt vatn, sem blandaðist sjó í efstu jarðlögum. Vitað var um sjó í gjám og ekki talið líklegt, að gagn yrði að könnun svæðisins með raffleiðnimælingum, þar sem erfitt yrði að greina sundur sjó og heitt vatn. Heita svæðið var á yfirborði um 1 km<sup>2</sup> að stærð og náttúrulegt varmatap þess um yfirborð um 15 Gcal/klst. Ummyndun bergs á yfirborði náði yfir 6 km<sup>2</sup>, sem benti til þess, að heita svæðið gæti verið miklu meira að flatarmáli á nokkur hundruð metra dýpi og heildarvarmatap þess verulega meira en yfirborðsmerki sýndu.

### 1.3. Rannsóknir 1968 til 1.marz 1969

Rannsóknir á þessu tímabili áttu sér hægfara aðdraganda, sem nú verður rakinn.

Á árunum 1949-1959 fóru fram á vegum Raforkumálastjóra athuganir á hagkvæmni efnavinnslu úr sjó og þá 'einkum notkun jarðhita til saltframleiðslu. Niðurstaða af þessum athugunum varð sú, að efnahagslegur ávinningur af saltvinnslu væri líftill, enda þótt hún kynni að vera þjóðhagslega jákvæð. Frekari rannsóknir skyldu miðast við samhæfða vinnslu fleiri efna úr sjó, þar sem líkur á hagkvæmni yrðu meiri með fjölþættari vinnslu. (6-12). Í ágúst 1966 skiluðu efnaverkfræðingarnir Vilhjálmur Lúðvíksson og Baldur Líndal greinargerð til Rannsóknaráðs ríkisins um sjóefnavinnslu (13). Var þar bent á ýmsar hugsanlegar leiðir til að samhæfa vinnslu ýmissa efna úr sjó eða saltlegi í hverum á Reykjanesi, og gerðar tillögur um skipan frumrannsókna að sjóefnavinnslu. Í maí 1967 skilaði Baldur Líndal skýrslu til Rannsóknaráðs um saltvinnslu úr jarðsjó á Reykjanesi, þar sem borin var saman hagkvæmni verksmiðja, sem framleiddu 50, 100 eða 150 þús. tonn af salti á ári (14).

Í árslok 1967 skipaði Rannsóknaráð síðan sjóefnanefnd, sem skyldi, ásamt Baldri Líndal, athuga vandlega leiðir til efnavinnslu úr sjó, kanna tækni og hagkvæmni slíkrar vinnslu og gera tillögur um frekari rannsóknir, ef álitlegt þætti.

Í maí 1968 var ljóst, að álit nefndarinnar yrði jákvætt, og gerði hún ráð fyrir, að hagkvæmast yrði að vinna efni úr jarðsjó á Reykjanesi og nýta jarðgufu þar til frekari vinnslu. Til vinnslunnar þyrfti 160 l/sek af jarðsjó, með sömu efnasamsetningu og H 1 í 15 ár og um 300 tn/klst af 120°C gufu, sem ekki mætti kosta meira en 25 ct/tn. Þessar kröfur voru miðaðar við 150 þús. tonna framleiðslu af salti á ári, en helztu önnur efni voru kalíklórið, kalsíumklórið, vítissóði, magníummálmur og klórgas (15).



Um svipað leyti barst iðnaðarmálaráðherra fyrirspurn frá Alusuisse um saltvinnslu hér, en hugsanlegt var talið, að reist yrði í Straumsvík verksmiðja til framleiðslu á klór og víttissóða, og notaði hún salt sem hráefni. Varð þessi fyrirspurn og viðræður, sem á eftir fóru, mjög til að auka áhuga á sjóefnavinnslu, og reyndi nú á það, hvort forsendur vinnslunnar væru raunhæfar. Ekki var ljóst á þessu stigi, hvort jarðhitasvæðið á Reykjanesi mundi þola það álag, sem áætluð sjóefnavinnsla krafðist. Miðað við 300 tn/klst af gufu yrði varmaálag á svæðið um 300 Gcal/klst, en sýnilegt náttúrulegt varmatap þess er aðeins um 15 Gcal/klst. Enn óvissara var talið, hvort efnasamsetning jarðsjávarins mundi haldast óbreytt við svo mikið rennsli úr svæðinu. Úr þessu yrði ekki skorið nema með umfangsmiklum athugunum, og þá helzt borunum og beinum rennslisprófunum.

Í fyrstu tillögum jarðhitadeildar Orkustofnunar um rannsóknir á jarðhitasvæðinu var ráðgert að bora 1000-1400 m djúpa holu í svæðið og reyna að ná sýnum af hverri vatnsæð, sem holan skæri. Jafnframt fengjust upplýsingar um aðrennslis-hita svæðisins. Hinn 16. maí 1968 samþykkti Orkuráð að fela orkumálastjóra að láta fara fram á kostnað Orkusjóðs jarðboranir á Reykjanesi vegna sjóefnavinnslurannsóknar þeirrar, er fram fór á vegum Rannsóknaráðs ríkisins, og mátti verja til borananna allt að 3,6 Mkr. Borholurnar yrðu eign Orkusjóðs og skyldi orkumálastjóri annast um varðveislu þeirra, þar til stjórn sjóðsins ráðstafaði þeim á annan hátt.

Með bréfi dags. 6. júní 1968 fól orkumálastjóri Guðmundi Pálmasyni, deildarstjóra jarðhitadeildar, að láta framkvæma þessar boranir í fullu samráði við framkvæmdastjóra Rannsóknaráðs ríkisins. Til verksins átti að fá Norðurborinn, en Gufubor ríkis og Reykjavíkur var þá bundinn við boranir fyrir Reykjavíkurborg. Nokkur óvissa var þó um, hvenær Norðurborinn yrði laus til þessa verks, vegna borana við Námafjall fyrir gufufafstöð og kísiliðju. Til að eiga ekki á hættu að fresta þyrfti öllum borunum á Reykjanesi árið 1968, var upphaf-

legri boráætlun breytt og ákvörðun tekin um að láta Mayhewborinn byrja með því að bora eina holu (H 2), allt að 600 m djúpa, en það er hámarksdýpi, sem hann ræður við. Borun hófst 27. júní 1968 og var hætt 5. sept. 1968, er holan var orðin 300 m djúp. Lengra varð ekki komizt vegna kröftugrar æðar í botni holunnar. Eftirlit með borun höfðu Guðmundur Sigurðsson og Per Krogh af hálfu jarðboranadeildar, en Guðmundur Pálmason og Jón Jónsson fylgdust með borun af hálfu jarðhitadeildar og sáu um aðrar rannsóknir. Sigurður Rúnar Guðmundsson, efnafræðingur var ráðinn til að greina efni í jarðsjó úr holunni. Jarðsjór á 300 m dýpi reyndist mjög líkur jarðsjó í H 1 og hverum. Hiti á botni var 225°C, gufurennslí 16 tn/klst við 5 ata holuþrýsting og heildarrennslí 28 kg/sek. Hita- og aflmælingar önnuðust Stefán Sigurmundsson og Karl Ragnars, en síðar Stefán Arnórsson.

Síðari hluta sumars komu fram óskir frá iðnaðarmála-ráðherra um, að borunarframkvæmdum yrði hraðað. Til djúpborunar var þá vart um annað tæki að ræða en gufuborinn, og samdist svo um við Reykjavíkurborg, að hún léti borinn af hendi til þessa verks, og hófst borun H 3 með honum á Reykjanesi í byrjun nóvember. Borstjóri var Rögnvaldur Finnbogason, en Jón Jónsson var eftirlitsmaður Orkusjóðs með framkvæmd borana.

Um það var talsverð óvissa, hve mikið þyrfti að bora á Reykjanesi, til að hægt væri á samilega rökstuddan hátt að svara því, hvort forsendur sjóefnavinnslunnar um orkumagn og jarðsjó væru líklegar til að standast. Í upphafi var ljóst, að ein djúp hola með gufubor mundi ekki svara þessu á fullnægjandi hátt. Þegar ákvörðun var tekin um að láta gufuborinn hefja borun á Reykjanesi, og með hliðsjón af þeirri áherzlu, sem lögð var á að flýta rannsóknum á jarðhitasvæðinu, lagði jarðhitadeild til, að hann yrði látinn bora 2 holur (H 4 og H 5) í viðbót í beinu framhaldi af þeirri fyrstu. Þessum tveimur síðari holum var ætlað að gefa sem mest rennslí, og voru þær staðsettar og hannaðar í samræmi við það. Ákvörðun

um að bæta þessum tveimur holum við var þó ekki tekin fyrr en rétt um það leyti, er borun þeirrar fyrstu lauk. (16).

Upphaflega var ætlunin, að fyrsta gufuborsholan (H 3) yrði staðsett um 300 m NA við aðalgufusvæðið og boruð niður á um 1000 m til þess að ná vatnssýnum og hitamælingum á því dýpi. Á þessum stað voru taldar litlar líkur á kröftugum gufuæðum á litlu dýpi, er kynnu að torvelða dýpri borun. Jafnframt var staðsett önnur gufuborshola rétt við gufusvæðið. Svo fór, að fyrra borstæðið varð ónothæft vegna meitilfestingar, rétt áður en gufuborinn skyldi byrja, og var þá afráðið, að síðara borstæðið yrði valið í staðinn, en jafnframt var ákveðið að halda óbreyttri fyrirhugaðri dýpt holunnar, ef það reyndist hægt.

Hola 4 var sett um 375 m vestar, rétt við Stóra-Geysi. Gekk borun beggja holanna vel. Varð H 3 1165 m en H 4 um 1036 m djúp. Hitaferill í H 3 sýndi, að kalt sjólag var í berginu á um 100 m dýpi, en neðan 250 m var hiti orðinn yfir 220°C og hæstur í botni 286°C. Skoltap við borun var óverulegt, og benti það til þess, að holan hefði ekki hitt á neinar góðar vatnsæðar, þrátt fyrir háan hita. Í H 4 var hiti um 120°C í 100 m en kólnaði í 40°C í 200 m og fór síðan hægt vaxandi í um 90°C í 1000 m. Þótti þessi hitaferill undarlegur, þar sem hiti á botni í H 3 aðeins 375 m austar var 286°C. Skoltap við borun H 4 var mikið. Töpuðust um 20 l/sek í 700 m, 23 l/sek í 820 m og yfir 35 l/sek í 980 m. Var því búizt við góðum vatnsæðum, þegar holan næði að hitna eftir borun, en þrátt fyrir nokkurra mánaða bið breyttist hitinn ekki. Sennilegust skýring á þessari hegðan holunnar var, að kaldur sjór rynni inn í holuna við enda fóðurrörs á 244 m dýpi, niður eftir henni, út í æðar í botni og héldi henni þannig kaldri. Studdi það þessa skýringu, að í holuna var kominn sjór frá fóðurrörsenda allt niður í botn, enda þótt ferskt vatn hefði verið notað til skolunar í borun og aldrei dælt sjó í holuna. Af þessum athugunum var dregin sú ályktun, að H 4 mundi ekki hitna, fyrr en lokað hefði verið

fyrir innstreymi kalds sjávar við fóðurrörsenda í 244 m með dýpri fóðrun.

Jarðlög í H 3 og H 4 reyndust mjög svipuð. Í efstu 200 m eru hraunlög með gjallkenndum millilögum eða túffi. Allt niður undir 1000 m er meginhluti myndunarinnar set eða túfflög með basalt ívafi. Heilleg basaltlög eru á 460-570 m dýpi í H 3 og 524-544 m dýpi í H 4. Á 240-600 m dýpi voru jarðlögin mjög língröð, og töldu jarðfræðingar nokkra hættu á, að holuveggir hryndu inn við blástur úr holunum, ef þeir yrðu ekki studdir með fóðringu. Við hönnun holanna var ekki vitað um þessi lög, og ekki gert ráð fyrir dýpri fóðringu en 300 m og rör í lengri fóðringu ekki til í landinu.

Eins og áður var sagt, hitnaði H 3 fljótt eftir borun og var lokunarþrýstingur orðinn 31 ata þremur vikum eftir að borun lauk. Stóð holan þannig í 7 vikur, unz ákveðið var að hleypa henni upp. Var holan fyrst opnuð lítið og blés í einn dag með  $P_0 = 20$  atg og 14 kg/s heildarrennsli. Næsta dag var holan fullopnuð og blés þá í fyrstu með  $P_0 = 20$  atg og heildarrennsli 65 kg/s. Eftir 10 mín. var  $P_0$  orðinn 18 atg og heildarrennsli 57 kg/s, en tveimur mínútum síðar hrundi holan saman neðan fóðringar og stíflaðist algerlega á 10 sekúndum.

Reynt var að hreinsa efsta hluta holunnar með Craeliusbor, og hreinsaði hann fóðurrörið niður á 139 m dýpi. Svo virtist sem fóðurrör holunnar hefði slitnað við snögga kælingu eftir hrunið og var því ekki talið óhætt að hreinsa holuna dýpra án þess að gera við fóðurrörið. Til öryggis var steypdur 10 m tappi í holuna ofan á stífluna í 139 m. Vatnsborð í holunni stóð í 18 m, en það er jarðvatnshæð við holuna. Dælt var 3000 l af vatni á holuna undir 14 atg þrýstingi og hitaferill mældur fyrir og eftir dælingu. Samkvæmt þeim mælingum fóru um 800 l niður gegnum tappann, en hitt tapaðist út um fóðurrörið. Vatnsborð varð aftur í 18 m. Ekki tókst að staðsetja slit í fóðurrörinu, en telja má víst, að það sé slitið milli 18 og 139 m, og þyrfti að kanna það með því að steypa þéttari tappa og dæla á holuna mun meira vatnsmagni. Ættu þá

að finnast hitaskil, þar sem vatnið tapast út. Frekari aðgerðum á holunni var frestað um óákveðinn tíma.

Hola 5 var staðsett utan sýnilegs jarðhita um 300 m austur af H 3. Var henni ætlað að kanna vatnsæðar á jaðri svæðisins og ennfremur, hvort jarðhitasvæðið væri stærra um sig á 600-1200 m dýpi en á yfirborði. Borun hófst 20. jan. 1969 og gekk sæmilega, unz borinn lenti í sand- eða malarlagi (RS<sub>2</sub>)(Sjá Mynd 3.7) í 108 m og allt skolvatn tapaðist. Reynt var að þétta holuna og styrkja holuveggi, sem sífellt hrundu á 60-80 m dýpi (Sandlag RS<sub>1</sub>). Festist borinn hvað eftir annað, en náði þó að losa sig aftur. Eftir þriggja vikna basl var holan orðin hrein niður í 112 m dýpi, en þar tapaðist enn allt skolvatn. Var þá ákveðið að hætta borun í bili, enda var fjárveiting til borana á þrotum. Kaldur og ferskur sjór var í holunni, vatnsborð í 20 m. Sjávarfalla gætti í holunni og námu þau um 30% af sjávarföllum í Grindavík og voru um 170 mínútum á eftir sveiflunni í hafinu. Sýnir það, að sjór í sandlaginu er í greiðu sambandi við hafið.

#### 1.4. Vitneskja um svæðið 1. marz 1969

Með undanfarandi borunum var stefnt að beinni álagsprófun svæðisins með H 3 og H 4 og könnun á jaðri þess og stærð á nokkru dýpi með H 5. Þessu markmiði varð ekki náð. Forsendur þær, sem byggt var á við hönnun H 3 og H 4, reyndust ekki réttar. Hefði þurft að fódra holurnar a.m.k. 600 m niður og sérstaklega hefði þurft að gæta þess, að fódurrörið væri vel steipt til þess að hindra kalt innstreymi úr sjólaginu í 100-250 m. Miðað við síðari reynslu af hrúni í H 4 hefði jafnvel þurft að fódra holurnar í botn, en hafa raufar í fódruingu við helztu vatnsæðar. Borun H 5 mistókst vegna opinna hraunlaga og lauss sands, sem borinn náði ekki að þétta. Eru þess orðin mörg dæmi, að með núverandi bortækni ráða borar okkar ekki við þessar aðstæður. Hugsanlegt er þó, að aðstæður í H 5 hafi verið óvenju slæmar og borinn hafi lent í opinni gjá, en holan er mjög nálægt misgengisbrún.



Þrátt fyrir mikla erfiðleika í borunum, náðust í þessum áfanga mikilsverðar upplýsingar um jarðhitann og jarðsjóinn. Helztu niðurstöður til þessa tíma voru dregnar saman í tillögum um frekari rannsóknir (17) og fara þær hér á eftir:

1. Í H 3 vex hiti sífelld með dýpi og er orðinn  $286^{\circ}\text{C}$  í 1100 m. Hitinn er nálægt suðuhita vatns á þessu dýpi, og bendir hitaferill í H 3 til þess, að jarðsjórinn sjóði á leið sinni upp. Gæti upprunalegur hiti hans verið yfir  $300^{\circ}\text{C}$ . (Sjá Mynd 1.5). Vaxandi hiti með dýpi sýnir ennfremur, að varmi berst að svæðinu úr dýpri lögum undir því. Áður höfðu mest fundizt  $225^{\circ}\text{C}$  á svæðinu, og hafa líkur á hagkvæmri gufuvinnslu stórlega aukizt við staðfestingu á svo háum hita.
2. Efnagreiningar á vatni úr H 1 og H 2 sýna, að þessar holur skila jarðsjó með svipuðum eiginleikum og áður fannst í hverum. Efnagreiningar úr dýpstu holunum (H 3 og H 4) fást ekki, fyrr en þær hafa verið fóðraðar.
3. Boranir hafa sýnt, að mestur hluti jarðlaga á 200-1000 m dýpi eru setlög, mjög umbreytt af völdum jarðhita. Undir þeim taka við myndbreytt blágrýtislög. Talið er, að poruhluti þessara berglaga (holrými í berginu) sé varlega áætlaður 2-3%. Sýnileg jarðhitamerki á yfirborði ná yfir svæði, sem er  $6\text{ km}^2$  að flatarmáli. Ef gert er ráð fyrir, að öll holrúm í 1500 m þykkri súlu undir þessu flatarmáli séu fyllt með jarðsjó, yrði rúmmál jarðsjávar í þessari súlu um 180 milljónir rúmmetra, en það magn mundi nægja sjóefnaverksmiðju í 15 ár. Sé hins vegar litið á Mynd 1.5, sést að þessi súla er einungis lítið brot af því heildarrúmmáli óeðlilega heits bergs, sem gert er ráð fyrir undir svæðinu.
4. Á Mynd 1.5 er sýndur líklegur þverskurður jarðhitasvæðisins samkvæmt niðurstöðum, sem fengizt höfðu við frumrannsókn og boranir fram til 1. marz 1969. Lega jafnhitafleta í miðju svæðisins var samkvæmt hitamælingum í

holum, en utan svæðisins var eingöngu byggt á líkum. Gert var ráð fyrir, að í 10 km fjarlægð frá svæðinu nálgast 100°C flöturinn eðlilega legu á 1600 m dýpi. Þá var talið, að svæðið væri umlukið þétttri kápu og mestur hluti djúpvatnsstreymis lokuð hringrás, en óverulegur hluti tapaðist út í köld yfirborðslög. Kalt sjólag í efstu 200 m jarðlaga á nesinu gæti hulið verulega stærra jarðhitasvæði neðan 200 m. Næði kaldur sjór hins vegar að streyma niður á 500-1000 m dýpi á jöðrum hins sýnilega jarðhitasvæðis, gæti skammhlaup þessa sjávar inn í vinnsluholur, sem draga vatn á þessu dýpi, valdið verulegum rekstrarörðugleikum. Nauðsynlegt væri því að kanna hita og þéttleika bergs á jöðrum svæðisins með rannsóknarborunum.

5. Aflmælingar á H 2, sem er 300 m djúp, sýna, að holan getur gefið 14 tonn/klst af gufu við 5 ata þrýsting og um 21 l/s af 100°C jarðsjó. Aflmælingar á H 3 og H 4 verða ekki gerðar, fyrr en þær hafa verið fóðraðar. Í H 4 var skoltap við borun á þrem stöðum, um 20-35 l/s í hverjum, og því líklegt, að hún gæti gefið um 30-50 tonn/klst af gufu og 35-50 l/s af 100°C heitum jarðsjó.

#### 1.5. Rannsóknir 1.marz - 1.sept. 1969

Með hliðsjón af þeim erfiðleikum, sem tilraun til beinnar álagsprófunar jarðhitasvæðisins mætti, var nú ákveðið að endurskipuleggja rannsóknarverkið og reyna með óbeinum athugunum að meta stærð jarðhitasvæðisins, vinnslugetu og líkur á rekstraröryggi.

Um þetta leyti skilaði sjóefnanefnd Rannsóknaráðs skýrslu um athugun á hagkvæmni 250 þús. tonna saltverksmiðju á Reykjanesi. (18) Niðurstaða nefndarinnar var, að slík verksmiðja gæti reynzt hagkvæm, ef unnt yrði að tryggja verksmiðjunni í 15 ár 250 l/s af 100°C heitum jarðsjó með sömu seltu og nú er í hverum á svæðinu og auk þess 37 tn/klst af

gufu með 2 ata þrýstingi, 211 tn/klst með 4 ata og 17 tn/klst með 17 ata þrýstingi. Fyrir jarðsjó og gufu gæti verksmiðjan greitt allt að \$ 400.000 eða um 35 Mkr á ári.

Þessum kröfum um gufu, seltu og vatnsmagn yrði ríflega fullnægt, ef innstreymi í borholur á svæðinu næmi 350 l/s af 250°C heitum jarðsjó, sem við suðu og uppgufun gæfi sömu seltu og nú er í hverum. Þetta varmaálag er um 310 Gcal/klst, eða um 20 sinnum náttúrulegt varmatap svæðisins um yfirborð. Ljóst var, að beint svar við því, hvort svæðið stæðist þessar kröfur, fengist ekki nema með vinnsluborunum á svæðinu og langtíma efnagreiningum og aflmælingum á borholum. Markmið rannsóknarinnar var hins vegar að reyna stig af stigi að leiða svo sterkar líkur að nægilegri vinnslugetu og rekstraröryggi svæðisins, að unnt yrði að mæla með þeim vinnsluborunum, sem fyrirhugaðar voru. Þetta yrði reynt með því að kanna stærð heita svæðisins undir yfirborði, vatnsleiðni og poruhluta bergsins, legu vatnsæða, hita og efni í djúpvatni. Skipti þar miklu fyrir sjóefnavinnslu, hvort jarðsjór fyndist einnig í dýpri æðum og hiti færi vaxandi með dýpi. Ekki var enn að fullu úr því skorið, hvort jarðsjórinn væri að uppruna sjór, sem náð hefði 3-5 km dýpi og hitnað vegna snertingar við berg, en leitað síðan upp á uppstreymissvæði undir Reykjanesi, eða lögur, sem við aukna fergingu hefði þrýstst út úr sjávarsetum eða öðrum sjávarmyndunum undir nesinu. Ef jarðsjórinn hefði lokast inni, er jarðlögin mynduðust, mætti búast við vaxandi seltu með dýpi, en takmörkuðu magni. Væri jarðsjórinn hins vegar orðinn til í langri hringrás sjávar um bergið, mætti ekki vanta aukinnar seltu með dýpi, en magnið yrði nær óþrjótandi.

Afla þyrfti gagna til þess að áætla rúmmál heits bergs og nýtanlegt magn jarðsjávar og varma í því, og meta síðan vinnslugetu og rekstraröryggi með hliðsjón af kröfum sjóefnavinnslu.

Rannsóknarborunum var einnig ætlað að gefa vitneskju um gerð og vinnslueiginleika bergs undir svæðinu, nauðsynlega

dýpt fóðringar í vinnsluholum og líklegt afl og rennsli hola á svæðinu. Á grundvelli þessa væri fyrst unnt að gera áætlun um gerð vinnsluhola og áfanga í vinnsluborunum.

Í tillögum um rannsóknir 1969 (17) var rætt um segulmælingar úr lofti til þess að kortleggja myndbreytt berg, þar sem jarðhiti hefði þvegið segulmögnun í burtu. Ráðgerðar voru rafleiðnimælingar til þess að rekja útbreiðslu kalda sjávarlagsins á 100-200 m dýpi og legu heits jarðsjávar á 300-600 m dýpi, þar sem kaldur sjór væri ekki í efri lögum. Ekki var ljóst, hvort þetta mundi takast, þar eð kaldur sjór leiðir álíka vel og heitt þétt berg, og erfitt gat orðið að greina á milli. Til þessara mælinga þurfti að smíða ný tæki. Þá var gert ráð fyrir, að rekin yrði mælistöð til að staðsetja smáskjálfta undir Reykjanesi og nágrenni, en skjálftar voru þar mjög tíðir 1967 og 1968.

Lagt var til, að gert yrði við fóðurrör í H 3 og hún hreinsuð og fóðruð í 580 m dýpi. Kalt innrennsli í H 4 skyldi stöðvað og hún fóðruð í 620 m. Gert var ráð fyrir að nota Mayhewbor í þessi verk og fóðra með 7 5/8" röri, en það var stærsta þvermál, sem öruggt var talið að koma mætti í holurnar og jafnframt minnsta þvermál, sem gufubor gæti borað gegnum, ef hann þyrfti síðar að fara í holurnar. Ákvörðun um lengd fóðringa var tekin með hliðsjón af jarðlagasniðum og borhraðalínuriti, og var miðað við að fóðra holurnar niður í basaltlögin í 570 m í H 3 og 544 m í H 4. Til frekara öryggis var fóðring þó teygð niður í 638 m í H 4 til þess að fóðra af alla kafla með borhraða hærrí en 20 m/klst. Miðað við reynslu á Námafjallssvæði var talið ólíklegt, að jarðlög þar fyrir neðan hryndu inn.

Í þriðja lagi var lagt til, að boraðar yrðu fjórar rannsóknarholur í jaðra jarðhitasvæðisins. Í fyrri borunum hafði komið í ljós, að á suðurhluta svæðisins var kalt sjólag niður á 200 m dýpi og bentu það til þess, að heita svæðið stæði líkt og eyja upp úr sjónum. Líklegt þótti, að flatarmál heits bergs á 300-500 m dýpi væri verulega stærra

en yfirborðsmerki sýndu. Þar sem stærð jarðhitasvæðis er ein öruggasta vísbendingin um vinnslugetu og rekstraröryggi við langvarandi vinnslu, var mikilvægt að fá úr þessu skorið. Gert var ráð fyrir, að þessar holur yrðu í allt að 3 km fjarlægð frá miðju svæðisins. Átti að bora þær með Mayhewbor, fóðra niður fyrir kaldan sjó með 5" og bora síðan með 4 3/4" krónu allt niður í 500 m. Ekki yrði lögð nein áherzla á að fá verulegt rennsli úr þessum holum, heldur áreiðanlegar mælingar á hitastigi. Teknir yrðu kjarnar til bergfræðirannsóknna og athugana á ummyndun og þéttleika bergsins á jöðrum svæðisins. Með endurteknum hitamælingum og efnagreiningu djúpvatns ættu einnig að fást upplýsingar um streymi djúpvatns og líkur á innstreymi kalds vatns á svæðið.

Bæru þessar rannsóknir tilætlaðan árangur, var þess vænt, að jarðhitadeild gæti gefið umsögn um vinnslugetu og rekstraröryggi svæðisins um áramótin 1969/1970. Kostnaður við þessar aðgerðir, boranir og rannsóknir var áætlaður 10,3 Mkr, og samþykkti Alþingi í apríl 1969 að heimila lántöku þessa fjár handa Orkusjóði til að standa straum af rannsóknarverkinu. Með erindisbréfi dags. 28. apríl 1969 var Sveinbirni Björnssyni falið að gegna starfi vísindalegs ráðunauts og jafnframt starfi umsjónarmanns Orkusjóðs með framkvæmd rannsóknarverksins. Stefáni G. Sigurmundssyni var falið starf aðstoðarumsjónarmanns. Skiptu þeir svo með sér verkum, að Stefán sá um boranir og aðgerðir á borholum, en Sveinbjörn um rannsóknir á svæðinu og heildarstjórn verksins. Samið var við jarðboranadeild um borframkvæmdir, Raunvísindastofnun háskólans um flugsegulmælingu og Sigurð Rúnar Guðmundsson um efnagreiningu á jarðsjó. Að öðru leyti var rannsóknin í höndum starfsmanna jarðhitadeildar. Jens Tómasson sá um bergfræðirannsóknir á borsvarfi og kjörnum, Stefán Arnórsson um jarðefnafræðirannsóknir og aflmælingar, Stefán Sigurmundsson og Ólafur Sigurjónsson um könnun vatnsæða, þrýsti- og hitamælingar í borholum. Verkstjórnandi jarðboranadeildar var Guðmundur Sigurðsson og borstjóri Þórir Sveinbjörnsson. Eftirlitsmaður jarðhitadeildar með borverkum

var Stefán Sigurmundsson. Á grundvelli tillagna jarðhita-  
deildar um rannsóknarverkið (17), var samin um það ítarleg  
verklýsing, greiðsluáætlun gerð og kostnaðargát skipulögð.  
Vegna óvissu um jarðfræðilegar aðstæður við rannsóknarboranir  
voru gerðar þrjár mismunandi verkáætlanir um þessar borholur,  
og skyldi ákvörðun um gerð þeirra fara eftir aðstæðum, sem  
fram kæmu í borun.(19)

Lögð var áherzla á að flýta sem mest viðgerð H 4 til  
þess að stöðva kalt niðurrennsli og koma henni í blástur.  
Þar sem sending fóðurröra tafðist, var þó ákveðið að byrja á  
borun H 6. Var henni valinn staður utan í Flagghól um 300 m  
suður af Reykjanesvita eða um 1 km suðvestur af jarðhita-  
svæðinu, en þar er ummyndað berg á yfirborði, og þótti lík-  
legt, að hiti væri skammt undir. Borun gekk mjög vel og varð  
holan 572 m djúp. Hiti varð hins vegar mun lægri en búizt  
var við. Um 18°C kaldar æðar voru í berginu á 150-200 m, en  
frá 300-570 m var hitinn jafn um 35°C, líklega vegna rennslis  
í berginu (Mynd 3.18). Engar opnar æðar voru í holunni neðan  
200 m. Ummyndun bergsins sýndi, að þar hefur verið hár hiti,  
líklega yfir 250°C. Við innrás kalds sjávar hefur bergið  
kólnað snögglega, en varðveitir þó háhitaummyndunina lítið  
breytta. Mestur hluti jarðlaga ofan 500 metra er myndbreytt  
túff, en í 510-570 m eru þétt basaltlög. Kjarni tekinn í 300  
m reyndist ummyndað túff, með miklu magni af kalkspati, ópal  
og zeolítum. Holrými eða poruhluti bergsins mældist 31-35%.  
Annar kjarni var tekinn í 570 m, þegar borinn kom niður úr  
basaltlögum. Var hann einnig úr myndbreyttu túffi, poruhluti  
22-24%. Þessar mælingar á poruhluta sýna, að túffið er mjög  
opið, þrátt fyrir háhitaummyndun.

Næsta verk borsins var viðgerð H 4. Var fyrst steiptur  
tappi í 260 m og niðurrennsli stöðvað. Vatnsborð í holunni  
hafði verið í 96 m, en steig nú í 18 m. Að mati bormanna  
var innrennsli við fóðurrörsenda um 5 l/s, og má ætla, að  
þetta rennsli hafi verið niður eftir holunni þá 9 mánuði,  
sem liðu frá því að borun lauk, þar til viðgerð hófst. Vegna

Þessa rennslis var ekki búizt við, að holan hitnaði fljótt, en þó fór svo, að nokkrum dögum eftir að innrennslinu var lokað og borað hafði verið með grönnu niður úr tappanum var kominn 2,5 atg þrýstingur á aðalloka. Seinni mælingar sýndu, að æðin í 700 m hafði hitnað nær strax í 250°C, en æðar þar fyrir neðan héldust enn kaldar og óvirkar. Er þetta skýrt svo, að æðarnar neðan 700 m hafi tekið við köldu innrennslis og því, sem dælt var á holuna, en æðin í 700 m hafi haft hlutfallslega hærri þrýsting og ekki tekið við miklu köldu innrennslis. Vegna þessarar öru hitunar þótti vissara að útbúa tryggari öryggisloka á borinn, og var hann látinn bora H 7 á meðan.

H 7 var sett vestan undir Sýrfelli um 1 km norðaustur af hitasvæðinu. Með henni var ætlunin að kanna norðurjaðar svæðisins og fá gögn til að túlka rafleiðnimælingar á svæðinu. Borun hófst í móbergi, en fljótlega kom í lausari lög, sem hrundu inn í holuna. Átti borinn í miklum brösum við hrund, steypingar, festur og fiskun, unz borun var stöðvuð vegna endurskipulagningar rannsóknarverksins 6. sept. 1969. Var holan þá 59 m djúp. Í botni hennar var 10°C hiti og uppleyst efni í vatni 9,7% eða fjórum sinnum minna en í ferskum sjó. Hitamæling í febrúar 1971 sýndi um 15°C í 59 m dýpi (Mynd 3.19)

#### 1.6. Vitneskja um svæðið 1. sept. 1969

Um þetta leyti var rafleiðnimælingum að ljúka. Voru niðurstöður þeirra nokkuð óvæntar og mun skýrari en vonir stóðu til. Kaldur sjór er í bergi á öllu Reykjanesi og eins langt og mælt var norður fyrir Sýrfell. Nær hann að streyma a.m.k. niður á 600 m dýpi, en lengra ná mælingarnar ekki. Uppstreymissvæði jarðhitans stendur sem heit súla upp úr köldum sjónum. Er hún um 1 km í þvermál á yfirborði og breiðar ekki, að því er séð verður, niður á 600 m. Miðja svæðisins er nálægt H 2. Að austan takmarkast það af Valabjargargjá, og eru H 3, H 1 og H 4 því í suðurjaðri þess. Niðurstöður úr H 6 og H 7 styrktu þessa mynd, og hún kom einnig

heim við það, að í H 3 og H 4 var kaldur sjór efst, en enginn í H 2 á miðju uppstreymissvæðinu. Þrýstingur í heita jarðsjónum er allt að 10 loftþyngdum lægri en í kalda sjónum á sama dýpi, og eykur það hættu á innrás frá jöðrum svæðisins. Athugun á borsvarfi sýndi, að sjór hefur oft brotitzt inn á uppstreymissvæðið og skilið þar eftir súlfatútfellingar (sjá Myndir 3.11 - 3.13). Síðasta innrás sjávar inn á svæðið hefur að líkindum orðið af völdum jarðskjálfta haustið 1967, en þá komu fram merki um sjóblöndun í hverum.

Samkvæmt þessum gögnum er uppstreymi jarðhitans mun þrengra en áður var talið og líklegt, að vinnsla úr efstu 600 m svæðisins verði ótrygg. Svæðið gæti verið stærra um sig á meira dýpi, en hitinn liggur svo djúpt, að hvorki næst til hans með mælingum frá yfirborði né 500-600 m djúpum borunum. Til greina kæmi að kanna stærð svæðisins með 1000-2000 m djúpum rannsóknaborunum í jaðra þess, en þær boranir yrðu þó varla réttlætanlegar, þar eð þær yrðu dýrari en beinar vinnsluboranir í mitt svæðið, sem óhjákvæmilega yrðu síðasti áfangi í könnun svæðisins. Alitlegast virtist því á þessu stigi að stefna að beinni vinnsluprófun svæðisins, en líkur á góðum árangri höfðu verulega vaxið með aukinni þekkingu á svæðinu.

#### 1.7. Rannsóknir 1.sept. - 31. des. 1969

Á fundi sérfræðinga jarðhitadeildar og jarðborana 4.sept. 1969 voru niðurstöður rannsókna ræddar og samþykkt að mæla með þessum breytingum á rannsóknaráætlun:

1. Hætt verði við borun 500 m djúpra hola 8 og 9.
2. Stöðvuð verði borun H 7 um óákveðinn tíma.
3. Frestað verði viðgerð H 3 um óákveðinn tíma.
4. Flýtt verði sem mest fóðrun H 4 og blástursprófun hennar.
5. Boruð verði á þessu hausti 1800 m djúp rannsóknarhola með gufubor nyrzt á jarðhitasvæðinu (H 8).



Þessar tillögur voru lagðar fyrir fund með Orkumála-  
stjóra og fulltrúum frá Rannsóknaráði 8. sept. 1969 og sam-  
þykktar óbreyttar. Með þessum aðgerðum var stefnt að beinni  
vinnsluþrófun svæðisins með H 2, sem tekur um 25 l/s úr  
miðju svæðisins á 300 m dýpi, H 4, sem er í suðurjaðri svæðis-  
ins, og áætlað var að skilaði um 35-50 l/s úr 700-1000 m  
dýpi, og H 8 á norðurjaðri svæðisins, sem kanna átti vatns-  
æðar niður á 1800 m. Talið var, að það fé, sem enn var eftir  
af fjárveitingu, mundi nægja til þessara framkvæmda.

Tilgangur með borun H 8 í 1800 m dýpi var þessi:

1. Kanna, hvort æðar með heitum jarðsjó eru á 1000-1800  
m dýpi.
2. Kanna, hvort uppstreymissvæðið er stærra um sig neðan  
1000 m.
3. Kanna breytingar á efnainnihaldi jarðsjávar með dýpi.
4. Kanna, hvernig hiti breytist með dýpi.

Hætta á rekstrartruflun vegna innrásar kalds sjávar fer  
að líkindum minnkandi með dýpi. Ef góðar æðar fyndust neðan  
1000 m, yrði mun öruggara að vinna jarðsjóinn með holum, sem  
tækju hann inn þar. Mikilvægt er einnig að vita, hvernig  
hiti og selta breytast með dýpi. Ef jarðsjórinn er að uppruna  
sjór, ætti seltan í dýpri æðum að vera svipuð og í sjó og  
líkur á breytingum í efnainnihaldi jarðsjávarins að vera þeim  
mun minni, sem hringrás sjávarins er víðáttumeiri. Ef jarð-  
sjórinn er hins vegar saltlögur, sem þrýstst hefur úr  
sjávarsetum, er líklegt, að selta fari vaxandi með dýpi, en  
meiri hætta yrði á breytingum í efnainnihaldi við langvar-  
andi vinnslu og innrás kalds sjávar, þegar saltlöginn þrýtur.  
Ef kaldar æðar finnast neðan 1000 m, eykst hætta á rekstrar-  
truflunum, og varla getur talizt óhætt að leggja út í stór-  
fellda vinnslu á svæðinu við þær aðstæður. Sé hiti hins  
vegar jafn eða hækkandi með dýpi, eykur það traust á svæðinu  
og líkur á langvarandi vinnslu, sem drægi jarðsjó inn í  
holur á 1000-2000 m.

Til þess að auka enn rannsóknargildi holunnar var henni valinn staður í Sýrfellsdrögum á norðurjaðri hita-svæðisins, en hann hafði ekki verið kannaður í fyrri borunum.

Með þessu vali var ætlunin að sannprófa þá mynd af norðurjaðri svæðisins, sem fengin var með viðnámsmælingum og segulmælingum og kanna, hvort heita uppstreymissvæðið næði lengra til norðurs neðan 600 m.

Í þriðja lagi var þessi staður hagkvæmur til borunar, þar sem ummynduð berglög voru í efstu metrum, en laus sandlög í byrjun holu hafa reynzt erfið í borun.

Samið var við gufubor um borun H 8 og gerð verkáætlun í samvinnu við Rögnvald Finnbogason, borstjóra.

Borun holunnar gekk mjög vel í byrjun, og má að miklu leyti þakka það staðarvalinu, en sandlög, sem annars staðar höfðu valdið erfiðleikum, voru hér þétt vegna ummyndunar. Var borunin nokkuð undir áætlun í 925 m, en þar lenti borinn í mjög hörðum berglögum, sem boruðust illa, og gekk svo niður í 1100 m. Eftir það gekk mjög nærri áætlun, og varð holan 1754 m djúp. Holan var fóðruð með 9 5/8" fóðringu steyptri í 297 m, en neðst í hana var hengd 7 5/8" fóðring niður á 825 m dýpi. Var þetta dýpsta fóðring til þessa hér á landi. Fóðrað var niður fyrir alla þykka kafla með hærri borhraða en 20 m/klst.

Í heild fór kostnaður við borun holunnar 800 þús.kr. eða 15% fram úr áætlun, og lagði Rannsóknaráð fram þetta fé, svo að unnt yrði að ljúka boruninni í einum áfanga. Þegar þess er gætt, að nokkur óvissa var um berglagagerð, þar sem næstu holur gufubors eru um 1 km sunnar og að borað var 600 m dýpra en áður hafði verið gert á háhitasvæðum hér, verður þetta frávik frá áætlun að teljast vel viðunandi. Gefur það vonir um, að áætla megi vinnsluholur, sem síðar verða boraðar á jarðhitasvæðinu, með svipaðri eða betri nákvæmni.

Jarðlög í H 8 reyndust svipuð og í fyrri holum. Skiptast á túff- eða breksíulög og basaltlög. Er svo einnig um jarðlög neðan 1100 m, sem ekki voru áður könnuð. Þó eru basaltlög ríkjandi neðan 1100 m. Ummyndun er svipuð og í H 3 og H 4, en þó dýpra á hana. Reynt var að taka kjarna í 746, 1055, 1370 og 1754 m, en það tókst aðeins í 1370 m. Reyndist hann vera úr myndbreyttu móbergstúffi og seti (epidót 2-7%). Poruhluti í kjarnanum mældist 19,5%.

Skoltap varð mjög mikið í borun. Ofan 1000 m fannst aðeins ein æð, 3 l/s í 390 m, en neðan 1000 m fundust um 8 æðar með skoltapi 10-30 l/s og nokkrar smærri æðar. Heildarskoltap var meira en 120 l/s, og gaf það fyrirheit um mikið rennsli, þegar holunni yrði hleypt í gos.

Þegar borun lauk 28. nóv. 1969, var holan jafnheit, um 170°C, frá 500 m í botn, en var 23. des. 1969 orðin um 235°C frá 1000 m í botn, og fór enn hitnandi. (Mynd 3.20). Lögun hitaferils og ris á vatnsborði í holunni sýndi, að uppstreymi var frá botni upp á 1000 m dýpi, og kom því jarðsjór fljótlega í holuna. Selta í djúpsýnum var svipuð og í sjó, en þau voru þó enn nokkuð blönduð skolvatni.

Holan komst ekki í gos af sjálfsdáðum, en auðvelt var að hjálpa henni til þess. Vegna slæmrar reynslu af hruni í H 3 og H 4 þótti hins vegar ekki rétt að láta holuna gjósa, fyrr en hún hafði verið fódruð með raufuðum rörum í botn. Úrskurður um framhald vinnsluathugana á svæðinu veltur fyrst og fremst á þessari holu, og virtist því óvarlegt að taka neina áhættu við blástur hennar.

Mayhewbor lauk fódrun H 4 29. sept. 1969. Til frekara öryggis var fódurrörið látið ná niður á 638 m, en þar fyrir neðan var borhraði undir 20 m/klst. Hitamælingar voru gerðar 6. okt. og 13. okt. Sýndu þær, að hiti hafði vaxið mjög og var kominn yfir 150°C á 300-950 m, hæstur um 250°C í 700 m.

Á 200-300 m var hins vegar enn mikil kæling, hiti neðan við 60°C. (Mynd 3.16). Til þess að hjálpa holunni í gos, var leidd í hana vatns- og gufublanda úr H 2. Eftir 60 tíma hitun náðist holan í gos, 20. okt. Var rennsli úr holunni 20 kg/s, sem kemur vel heim við skoltap 20 l/s í 700 m. Aðrar æðar voru enn ekki virkar, en seinni hitamælingar sýndu, að gosæðin í 700 m dró upp með sér nokkuð af kaldari jarðsjó úr 980 m. Eftir viðgerð var botn í holunni á 1020 m, en 30. okt. mældist hann í 990 m. Benti það til þess, að hrunið hefði inn í holuna. Hinn 5. nóv. var botninn kominn í 778 m, og mátti sjá dreif af leir og mylsnu, sem komið hafði með vatni upp úr holunni. Ekki dró úr rennsli holunnar við þetta, en 27. nóv. var holan þögnuð og stífla komin á 580 m inni í fódurröri. Virðist æðin í 700 m smám saman hafa rutt inn veggjum holunnar. Á þessum stað er breksíulag með borhraða um 17 m/klst.

Enn hafði ekki fengizt úr því skorið, hvort æðin í 980 m væri köld vegna langvarandi niðurrennslis af köldum jarðsjó, eða köld vegna þess, að hún drægi inn kaldan jarðsjó úr berginu á jaðri svæðisins. Þar sem mikilvægt var að fá úr þessu skorið, var ákveðið að freista þess að hreinsa holuna og fódra hana í botn með raufaðri fódringu. Um þetta leyti var gufubor að ljúka borun H 8, og var hann fenginn til viðgerðarinnar. Þar sem ekki var gert ráð fyrir þessari viðgerð á kostnaðaráætlun, en brýnt þótti, að hún yrði framkvæmd hið fyrsta, lögðu Orkustofnun og Rannsóknarráð fram fé til hennar til bráðabirgða. Fódurrörið var 7" að innan, en holan neðan við fódringu um 9" og mun víðari, þar sem hrunið hafði úr veggjum. Borinn notaði borstengur með 6" tengistykkjum, 6 1/8" álagstengur og 6 5/8" borkrónu. Ljóst var, að með svo lítilli krónu mundi borinn eiga erfitt með að mylja hrunið nógu smátt, til þess að svarfið skolaðist upp með borstöngum um fódurrörið, en þess var vænzt, að með endurtekinni borun og steypingum á víxl, yrði unnt að mylja hrunmola og hreinsa holuna smám saman. Þá var talið líklegt, að samfelld stífla næði aðeins niður á 778 m, þar sem fyrir-

staða myndaðist fyrst í holunni, áður en mest hrun varð. Hreinsun holunnar gekk mjög illa. Aðalhrunið var í 724 m, en þaðan hafði hrunið étið sig upp undir fóðurrörsenda í 638 m, og virtist meðalvídd holunnar á þessum kafla orðin um 13". Til þess að komast áfram í holunni, varð að steypa í kaflann frá 746 m í 656 m og var þar með lokað æðinni í 700 m. Borinn komst í 774 m, en átti í stöðugum erfiðleikum vegna hruns á krónu og festa. Að endingu festist stangalengjan að lokinni steypingu svo rækilega, að borinn náði ekki að losa sig með neinum ráðum. Þar sem margt virtist benda til þess, að endi fóðurrörsins í 638 m hefði skemmzt og héldi stangalengjunni, voru borstengur sprengdar sundur í 620 m með dynamiti og þannig bjargað mestum hluta þeirra, en 130 m urðu eftir í holunni.

Þar með var útséð, að ekki yrði gert við holuna og nýtist hún ekki til álagsprófunar eins og áætlað var. Holan var í fyrstu óvirk, en tók að gjósa af sjálfsdáðum í febrúar 1970. Samkvæmt efnagreiningum er það æðin í 700 m, sem hefur rutt sér leið gegnum steypuna, en rennslið er mjög lítið enn sem komið er.

#### 1.8. Vitneskja um svæðið 1. jan. 1970

Merkasta viðbót við þekkingu á svæðinu á þessu rannsóknarskeiði fékkst með borun H 8 (20). Ofan 1000 m er holan í norðurjaðri svæðisins, en neðan 1000 m virðist svæðið ná lengra norður, og er holan þar vel innan þess. (Mynd 1.6). Berghitinn virtist nokkru lægri en á samsvarandi dýpi í H 3 í suðurjaðri. Í botni var holan um 240°C heit (Mynd 3.20), og fór enn hægt hitnandi. Vatnsæðar reyndust mun tíðari neðan 1000 m en ofar í svæðinu. Er það vel vatnsgengt, svo djúpt sem holan nær. Poruhluti í móbergskjarna, sem tekinn var á 1370 m dýpi, reyndist 19%. Heildarskoltap í borun varð yfir 120 l/s, og gaf það fyrirheit um mikið rennsli, þegar holunni yrði hleypt í gos. Selta í djúpsýnum af jarðsjó var svipuð og í sjó, og styrkti það enn það álit, að

jarðsjórinn væri fremur hringrás af sjó en setlögur. H 8 hefur alla eiginleika, sem krafizt verður af vinnsluholum, en talið var, að mikil hætta væri á hruni úr veggjum holunnar, ef hún væri látin blása með þáverandi fóðringu, sem náði niður á 825 m. Var því ætlunin að fóðra hana í botn og láta raufuð fóðurrör standa móts við vatnsæðar.

Svæðið virðist stærra um sig eftir því sem neðar dregur, og líkur á innrás kalds sjávar minni en í efri hluta svæðisins. Ef kanna ætti stærð svæðisins neðan 1000 m og þéttleika jaðranna þar, þyrfti rannsóknarboranir með Gufubor, sem yrðu álíka dýrar og vinnsluboranir fyrir sjóefnaiðjuna, en gæfu aðeins óbein svör um vinnslugetu og rekstraröryggi svæðisins. Því virðist ráðlegra að reyna getu svæðisins beint með borun vinnsluhola í áföngum og dæma um hvern áfanga, eftir að holurnar hafa blásið í nokkurn tíma.

Gera verður ráð fyrir að fóðra þurfi með heilli fóðringu niður í basaltlög, sem þekja svæðið í 500-600 m, eða jafnvel niður í basaltlögin í 900-1100 m. Þar fyrir neðan yrði einnig að fóðra, en raufar mættu vera í fóðringu við vatnsæðar.

Góðar líkur eru á, að fá megi í 3-6 vinnsluholum til viðbótar við H 8, það magn af jarðsjó, sem saltstig sjóefnaiðjunnar þarfnast (350 l/s). Líkur á endingu virðast góðar, ef jarðsjórinn er tekinn neðan 1000 m, en vissa um endingu og rekstraröryggi næst aðeins með langtímablæstri úr vinnsluholum.

### 1.9. Rannsóknir 1970

Haldið var áfram smásjárgreiningu á borsvarfi, flokkun jarðlaga og rannsókn á ummyndun bergs í holum. Gerðar voru hitamælingar í holum, tekin sýni til efnagreininga og fylgzt með þrýstingi og rennsli í H 2 og H 4. H 8 var fóðruð í botn með raufuðum rörum móts við vatnsæðar. Gekk það verk samkvæmt beztu vonum. Þegar holan hafði jafnað sig í

mánuð eftir kælingu við fóðrun, var henni hleypt í gos með gasaðferð 24. okt. 1970, og hefur hún blásið stöðugt síðan. Frá því að borun holunnar lauk 28.nóv. 1969, fór hún hægt hitnandi, og mældist hitinn hæstur um 262°C á botni, áður en holan gaus. Eftir 14 vikna blástur var hitinn hins vegar orðinn 292,5°C. Kom þessi öra hækkun hitans mjög á óvart. Heildarrennsli úr holunni var í fyrstu 85 kg/s um 8" pípu við 10 atg þrýsting undir aðalloka. Við 20 atg þrýsting var rennslið aðeins 20% minna, sem er óvenju mikið við svo háan þrýsting. Fram til 2. febr. minnkaði rennsli holunnar úr 85 kg/s í 70 kg/s. Er talið, að þessi minnkun á rennsli hafi orðið samhliða hærri innstreymishita jarðsjávarins, en streymisviðnám í holunni og útstreymisútbúnaði eykst eftir því sem hlutur gufu verður meiri í vatns- og gufublöndunni í efri hluta holunnar.

Hinn 2. febr. var sett 10" útblástursrör á holuna og 5. febr. mældist heildarrennsli um 78 kg/s við 5 atg vinnsluþrýsting. Þar sem nokkur hætta er talin á kísilútfellingum í aðalloka við svo lágan þrýsting, verður holan látin blása næstu mánuði við um 10 atg vinnsluþrýsting og fylgzt með rennsli.

Djúpsýni voru tekin til efnagreininga úr H 8, áður en hún gaus og síðan fylgzt reglulega með efnum í blæstri. Hafa breytingar verið mjög litlar, eftir að holan blés úr sér kælivatni, og er jarðsjórinn svipaður því, sem áætlað var eftir efnum í jarðsjó úr H 2 og H 4.

Má því í heild segja, að H 8 hafi uppfyllt frekustu óskir sem vinnsluhola, og gefur hún góð fyrirheit um jarðsjávarvinnslu á svæðinu.

Gerðar voru rafleiðnimælingar á Reykjanesskaga, við Njarðvíkur, Grindavíkurveg og á Krísuvíkursvæði. Bendir margt til þess, að jarðsjór sé almennt í bergi á skaganum vestan og sunnanverðum. Jarðsjór hefur fundizt í 500 m djúpri borholu á Njarðvíkurheiði. Jarðhitasvæðið á Reykja-

nesi virðist því umlukið viðáttumiklum jarðsjó, og er hætta á innstreymi fersks vatns í djúpar borholur þar mjög lítil. Ef breyting verður á efnunum í jarðsjó á Reykjanesi við langvarandi vinnslu, virðist sennilegast, að efnin breytist í átt að kaldari jarðsjó svipuðum þeim, sem finnst á Njarðvíkurheiði.

Heildarniðurstöðum og framtíðarhorfum er nánar lýst í kafla 6 í skýrslu þessari.



## 2. FRUMRANNSÓKN

### 2.1. Jarðfræði og jarðsveiflumælingar

Landsvæðið í nágrenni jarðhitasvæðisins á Reykjanesi er að mestu hulið hraunum, sem runnið hafa eftir ísöld. (Mynd 1.1). Móbergsmýndanir frá ísöld standa upp úr þessum hraunum á nokkrum stöðum og má þar nefna Sýrfell, Sýrfellsdrög, Bæjarfell og Valahnúka. Móbergsmýndanir þessar hafa hlaðizt upp í sprungugosum, annaðhvort undir jökli eða í sjó. (1).

Tvær gerðir eldstöðva frá nútíma eru á þessu svæði, gossprungur og dyngjur. Hraun, sem hafa runnið frá dyngjum, eru eldri en hraun frá gossprungum og öll runnin fyrir landnám. Einnig virðast hraun frá gossprungum eldri en landnám, nema Stampar, en talið er, að sú gígaröð hafi gosið á sögulegum tíma. Hraun frá gossprungum liggja á beltí í VSV-læga stefnu í átt á Reykjanestá, en dyngjuhraunin eru þar fyrir norðan og austan og svo á Reykjanestánni sjálfri.

Mikið sprungubelti liggur yfir Reykjanesskaga frá norðaustri til suðvesturs, þar sem jarðhitasvæðið á Reykjanesi er. Er það áberandi, að brotalínur eru þéttari á mjóu beltí, sem gengur gegnum jarðhitasvæðið en þar fyrir norðvestan og suðaustan. Brotalínurnar eru opnar sprungur og smá misgengi. Hefur miðja sprungubeltisins brotnað niður. Einstakar sprungur hafa hreyfzt um langan tíma, sem sést á því, að sum misgengin eru stærri í eldra bergi en því, sem yngra er.

Jarðlagasnið gegnum efstu jarðlög samkvæmt útbreiðslu bergmyndana á yfirborði og niðurstöðum úr borholum eru sýnd á Myndum 3.7 og 3.9.

Jarðsveiflumælingar á jarðhitasvæðinu sýna lághraðalög niður á um það bil 900 m dýpi (Mynd 2.1). Talið er, að þessi lághraðalög séu fyrst og fremst tiltölulega ung hraun og móberg, sem eru ekki mikið holufyllt. Fyrir neðan 900 m dýpi er hljóðhraði í berginu svipaður og í tertíeru bergi hér á landi. Samræmi er í niðurstöðum athugana á borsvarfi og jarðsveiflumælinga að því leyti, að breyting verður á gerð jarðmyndana á 800-1100 m dýpi í öllum holum, sem ná svo djúpt. Blágrýtislög verða ríkjandi í stað móbergs (Mynd 3.10).

Lag 3, sem er talið þétt og lítið vatnsgengt, er á 2,6 km dýpi undir svæðinu. Margt bendir til þess, að þar gæti verið 350-400°C hiti (2).

## 2.2. Dreifing jarðhitans og eðli hans

Jarðhitasvæðið á Reykjanesi er með minnstu háhitasvæðum hér á landi. Sjáanlegur jarðhiti á yfirborði nær yfir svæði, sem er um það bil 1 km<sup>2</sup> að flatarmáli. Talsverð jarðhitaummyndun er í móberginu í Sýrfellsdrögum, en mestur er jarðhitinn í hraununum þar fyrir sunnan og suðvestan og neðst í hliðum dyngjunnar, Skálafells.

Útlit jarðhitans á yfirborði er svipað því, sem gerist á öðrum háhitasvæðum. Mikill hiti er í jarðvegi, gufuaugu og leirhverir. Þó eru þrír vatnshverir á yfirborði og ber vatnið í þeim ýmis einkenni djúpvatns. Vatnið er tært, magn súlfats tiltölulega lítið, ekki lágt sýrustig, en tiltölulega lágt oxunarstig. Það er aðaleinkenni vatnsins í hverunum, að það er salt, nokkru saltara en sjór. Þó er magn ýmissa efna í þessum jarðsjó allfrábrugðið magni sömu efna í ferskum sjó.

Því hefur lengi verið haldið fram, að jarðsjórinn á Reykjanesi sé til orðinn við rennsli á ferskum sjó gegnum heitt berg. Þegar höfð er í huga landfræðileg lega jarðhitasvæðisins og gerð jarðmyndana í nágrenni þess, verður þessi

skýring að teljast eðlileg, enda hafa allar síðari athuganir rennt stoðum undir hana.

Selta jarðsjávarins í hverunum er nokkru meiri en í ferskum sjó, og er seltuaukningin bezt skýrð með gufutapi úr jarðsjónum við suðu í uppstreymisrásum. Magn kísilsýru í hveravatninu bendir til þess, að berghiti á svæðinu sé að minnsta kosti 237-265°C. Hafi vatnið eingöngu kólnað með suðu, gefur magn kísilsýru til kynna 237°C, en 265°C hafi jarðsjórinn eingöngu kólnað í uppstreymisrásum með varmatapi með leiðni út í bergið.

Efnasamsetning jarðsjávar úr tveimur hveranna er sýnd í Töflu 3.2.

Sumarið 1968 voru gerðar hitamælingar á 50 cm dýpi í jarðvegi á jarðhitasvæðinu (4) (Mynd 1.3). Þessar mælingar voru gerðar til að meta varmatap svæðisins um yfirborð og einnig til samanburðar við mælingar á innrauðri geislun frá svæðinu, sem gerð var úr lofti sumurin 1966 og 1968 (3). Út frá þessum mælingum hefur náttúrulegt varmatap svæðisins um yfirborð verið metið 15 Gcal/klst.

Innrauðar myndir sýna aðeins yfirborðshita, og þarf hiti í jarðvegi að vera um 50-70°C á 50 cm dýpi, til þess að fram komi heit svæði á innrauðum myndum. Aðferðin er því ekki næm til leitar að jarðhita, en hún hefur fyrst og fremst gildi til nákvæmrar kortlagningar á heitum svæðum, og gefur tækifæri til að fylgjast með breytingum, sem verða á útstreymi hitans með tíma.

### 2.3. Segulmælingar

Sumarið 1969 var segulsvið yfir Reykjanesi mælt úr flugvél og á jörðu. Flugsegulmælingarnar voru gerðar af Þorbirni Sigurgeirssyni með "flugmóða". Flogið var í um 150 m.y.s. eftir endilöngu nesinu; teknar 8 línur, um 6 1/2

km á lengd og með um 0,5 km millibili. Fram kom greinileg segulsviðslægð, um 1100 γ, og féll hún vel saman við ummyndun á yfirborði og hitabletti.

Segulsviðslægðin var síðan kortlögð nákvæmar með segulmælingum á jörðu. Þær voru gerðar með "magna" (magni og flugmóði eru báðir "proton precession" segulmælar og mæla heildarsvið). Fjarlægð milli mælilína var 100 m; fjarlægð milli mælipunkta á mælilínunum 25 m, mælt í 5 m hæð yfir jörðu.

Lægst var segulsviðið suður af H 1 og H 4 (Mynd 2.2). Þaðan gengur lögð til norðausturs eftir Sýrfellsdrögum. Stakar lögðir eru einnig í norðvestur stefnu yfir hitasvæðið. Segullægðirnar geta orsakast af þykkum ósegulmögnum móbergsmyndunum og einnig af myndbreyttu bergi, þar sem jarðhiti hefur eytt segulmögnun með efnabreytingum. Segulkortið er gagnlegt við val á borstæðum fyrir vinnsluholur. Borun í lek hraunlög og lausan sand hefur reynzt mjög erfið, og því er reynt að forðast slíkar aðstæður, en bora heldur í myndbreytt berg, eða heillegt móberg. Að öðru jöfnu ætti því að setja holurnar í segullægðir, og var þetta sjónarmið m.a. haft í huga, þegar H 8 var staðsett.

#### 2.4. Rafleiðnimælingar

Rafleiðnimælingar voru framkvæmdar á Reykjanesi sumarið 1969. Mælingarnar fóru þannig fram, að rekin voru niður í jörðina spennu- og straumskaut með ákveðnu millibili; síðan var straumur sendur um straumskautin og spennufall mælt yfir spennuskautin. Sýndarviðnám bergsins fannst síðan eftir jöfnunni  $\rho_a = K \frac{V}{I}$ ; K = stuðull háður uppröðun skauta; V = spennufall; I = straumur. Mælingarnar voru túlkaðar með aðstoð hjálparferla fyrir tvö og þrjú lög (21).

Við mælingarnar voru notuð tvenns konar mælitæki:

1) ABEM-tæki með riðstraumssendi (4 cps); þægileg í meðföllum, mælingar tiltölulega fljótlegar. Þessi tæki reyndust þó ekki nothæf, nema til frumkönnunar á svæðinu, því að þau dugðu illa, þegar eðlisviðnámið fór niður fyrir 10  $\Omega$ m, en það gerðist víða á Reykjanesinu. Við svo lágt viðnám myndast gjarnan spanstraumar, sem valda truflun í spennufalli, og fæst þar með skakkt sýndarviðnám,  $\rho_a$  ; ( $\rho_a = K \frac{V}{I}$  ).

2) Ný tæki með jafnstraumssendi voru sérstaklega smíðuð til þessara mælinga. Eru þau mun nákvæmari en eldri tækin, jafnvel við mjög lágt viðnám, en mælingar með þeim eru seinlegar. Þau eru því mun dýrari í rekstri en gömlu tækin, en reyndust vel á Reykjanesi.

Gerðar voru bæði dýptar- og lengdarmælingar:

1) Með dýptarmælingunum var kannað, hvernig rafleiðnin breyttist lóðrétt niður á hverjum mælistað. (Notuð var Schlumberger uppröðun á spennu- og straumskautum). Með riðstraumstækjunum voru gerðar 6 grunnar dýptarmælingar, en 11 dýpri með jafnstraumstækjunum. Bar riðstraumstækjum og jafnstraumstækjum vel saman, þar til spanstrauma tók að gæta í riðstraumstækjum.

2) Með lengdarmælingunum var könnuð rafleiðnin í láréttum fleti á vissu dýpi undir yfirborði, en dýpið ákvarðast af straum- og spennuskautabili (Wenner skautaröðun var notuð).

Með riðstraumstækjunum voru gerðar lengdarmælingar með 80 m skautabili; 46 mælipunktur á línu frá Reykjanesvita að Sýrfelli. Þar sem tækin réðu ekki fyllilega við aðstæður, gáfu niðurstöður þessara mælinga ekki nægar upplýsingar.

Með jafnstraumstækjum voru mældar 11 lengdarmælingalínur, 92 mælipunktur, notað var 200 m skautabil. Með lengdarmælingunum var þannig hægt að ákvarða jaðar háhitasvæðisins niður á um 300 m dýpi.

Rafleiðni í bergi er að mestu háð þeim vökva, sem er í berginu. Er hún þeim mun hærri, sem vökvinn er meiri, og fer hækkandi með vaxandi hita og seltu vökvans. Ef poruhluti bergs er nokkuð jafn á svæðinu, ætti rafleiðnin fyrst og fremst að vera komin undir hita og seltu vökvans, en vandinn er þá að greina, hvort lágt eðlisviðnám er vegna seltu eða hita, eða hvors tveggja.

Umhverfis jarðhitasvæðið mældist mjög lágt eðlisviðnám, 5-8  $\Omega$ m, og inni á svæðinu fór það niður í 1  $\Omega$ m. Í fyrstu var ekki ljóst, hvernig túlka bæri þetta lága eðlisviðnám utan heita svæðisins. Þegar lengdarmælingar norður fyrir Sýrfell og þaðan til sjávar í vestri sýndu alls staðar þetta lága viðnám, þótti líklegast, að kaldur sjór væri í berginu, og væri orsök 5-8  $\Omega$ m eðlisviðnáms því selta, en ekki hiti. Þessi túlkun fékkst síðan staðfest með borun H 6 og H 7. Enn lægra eðlisviðnám inni á jarðhitasvæðinu er þá túlkað sem heitur jarðsjór.

Niðurstöður lengdarmælinga með jafnstraumstækjum eru sýndar á Mynd 2.3. Mælipunktur eru merktir með króssi og dregnar jafnviðnámslínur milli þeirra. Þessar línur tákna eðlisviðnám á 200-300 m dýpi. Jaðar heita svæðisins virðist liggja nálægt 3  $\Omega$ m línunni. H 3 og H 4 eru þá nálægt suðurjaðri svæðisins, en H 5 rétt utan þess. H 2 er hins vegar nálægt miðju. Kemur þetta vel heim við ástand bergs í holunum. H 5 er alveg köld, og kalt sjólag fannst ofan á hita í H 3 og H 4, en í H 2 fannst ekkert kalt lag.

Niðurstöður dýptarmælinga eru einnig sýndar á þessari mynd. Eru mælistaðir merktir með hring og punkti í miðju. Talan neðan við hringinn er mesta dýpi, sem mælt var, en efri talan eðlisviðnámið á því dýpi. Þessar mælingar ná niður á 500-800 m, og samkvæmt þeim virðist heita uppstreymissvæðið ekki breiðara um sig ofan 600-800 m en það er á yfirborði.

Í heild verður niðurstaða rafleiðnimælinga þessi:

Jarðhitasvæðið er um  $1 \text{ km}^2$  að flatarmáli á yfirborði og ekki stærra um sig ofan 600 m dýpis. Kaldur jarðsjór er í öllu bergi á nesinu, og stendur heita svæðið líkt og eyja upp úr köldu umhverfi. Líklegt má telja, að svæðið sé ekki stærra, fyrr en kemur niður úr móbergsmýnduninni í blágrýtis-mýndunina á 900-2600 m dýpi.

### 3. DJÚPRANNSÓKN

#### 3.1. Jarðlög og ummyndun

##### 3.1.1 Efni til greiningar jarðlaga

Borinn malar bergið í svarf. Fínasti hluti svarfsins malast í mylsnu, sem flýtur burtu með skolvatninu og kemur aðeins grófari hluti svarfsins til greiningar. Þessi hluti er annað hvort sigtaður frá mylsnunni (Gufubor), eða tekið er vatn og svarf í fötu og það grófasta látið botnfalla. Einstök korn í svarfinu kallast brotkorn. Stærð þeirra er mjög mismunandi. Fer hún eftir því, hvaða bor er notaður, grófleika krónu, gerð bergs og dýpi. Brotkornastærðin hjá Gufubor er 0,3 - 5 mm í þvermál og algengust um 2 mm, en hjá Mayhewbor 0,1 - 1 mm í þvermál og algengasta stærðin um 0,2 mm.

##### 3.1.2 Bergtegundir og greining þeirra

Bergið á Reykjanesi er greint í eftirfarandi bergtegundir: Basalt, móbergsbreksíu, tuff og set. Setið má greina niður í undirflokkka eftir grófleika og samsetningu. Við greiningu bergtegunda er athuguð samsetning brotkorna, svo og borhraðinn. Samsetning brotkorna er ekki einhlít, því að alltaf verður einhver blöndun á milli laga, og einnig getur sláttur borstanga mulið efni úr efri jarðlögum, og blandast það því, sem frá borkrónu kemur (22). Brotkornin geta verið með tvennu móti; brotkorn úr einu bergkorni, eða fleirum og þá bundin saman með einhverju myndbreyttu minerali (sekunderu). Brotkorn í túffi og fínkornóttu seti



eru samsett úr dreifikornum, sem eru mest myndbreytt gler. Þetta eru því líkar bergtegundir, en það skilur setið frá túffi, að oftast er eitthvað af ávölum dreifikornum í setinu. Setið er oftast lagskipt og allmikill bergfræðilegur munur á einstökum lögum, en túfflag er ein bergfræðileg heild.

Í grófara seti, grófum sandi og konglomerati er meginhluti brotkornanna brotin dreifikorn og því ekki hægt að segja, hvort þessi dreifikorn hafi verið ávöl. Oftast eru þó nokkur ávöl dreifikorn í setinu. Auk þess hafa þessar bergtegundir mjög ósamstæð brotkorn og borhraði er mikill, þó að mikill hluti dreifikorna sé basalt. Oxun er algeng í þessum lögum, og eru þau oft rauðlituð af hematíti. Móbergsbreksía er með sprungnum glermassa, en ekki dreifikorn úr gleri. Auk þess er meira af basalti í móbergsbreksíunni en túffinu, og er hún því þéttari bergtegund en túffið.

### 3.1.3 Jarðlög á Reykjanesi

Á yfirborði skiptast á móbergshryggir og ung hraun. Langmestur hluti svæðisins er þakinn ungum hraunum (sjá mynd 3.1.) H 6, H 7 og H 8 eru staðsettar á móbergshryggnum, sem gengur frá Sýrfelli og niður að sjó við vitann. H 2, H 3 og H 4 eru á hraunum, en þó nærri þessum móbergströgum. Þessar holur eru með á langsniðunum, sniðum A-B og A-C. Á langsniðunum er lagskiptingin merkt með stöfum þannig, að fyrsti stafurinn táknar staðinn, í þessu tilfalli Reykjanes (R), annar stafurinn táknar jarðlagagerð, þannig að B stendur fyrir basalt, M fyrir móberg (breksíu og túff) og S fyrir set.  $RB_1$  er þá efstu samfelldu basaltlögin. Í 50-70 m dýpi, eða 30-50 m fyrir neðan sjávarmál er sand- og malarlag um 20 m þykkt, sem liggur bæði undir basaltinu og móberginu. Þetta lag er kallað  $RS_1$ -lagið og er undir öllu svæðinu, sem borað hefur verið á. Einnig er annað setlag,  $RS_2$ -lagið, um 90 m fyrir neðan sjávarmál í H 3, H 5 og H 8, en í H 6 nær  $RS_1$  niður í sama dýpi, og getur því verið, að lögin renni

þar saman í eitt. Milli þessara laga er að mestu basalt. Reyndar er í H 8 nokkuð af móbergsbreksíu, en það, sem kall- að er breksía, gæti líka verið set, sem væri svo grófkornótt, að það yrði skilgreint sem breksía með þeim greiningarað- ferðum, sem við höfum. Líklega er  $RS_1$ -lagið myndað fyrir síðustu ísöld, því að hryggirnir, sem liggja ofan á því, eru taldir vera myndaðir á síðustu ísöld. Bæði  $RS_1$  og  $RS_2$ -lögin eru laus í sér fyrir utan jarðhitasvæðið. Erfitt er að bora í gegnum þau, og stöðvaðist borinn í H 7 í  $RS_1$ -laginu og í H 5 í  $RS_2$ -laginu vegna hruns og leka. Líklega eru þessi lög myndað af árframburði, ef til vill í lok ísaldar, en talið er, að síðar hafi sjávarborð hækkað, sjór farið yfir þessi lög og jafnframt skolað það fínasta af efninu burtu úr setinu og þar með aukið mjög mikið vatnsgæfni þeirra.

Sennilegt er, að lághraðalög (Mynd 2.1), sem ná niður á um 200 m dýpi á þessu svæði, séu ung hraun og óhörðnuð sand- lög. Mætti kalla þessa jarðlagamyndun hraunamyndun, þótt ekki séu þetta allt hraun í venjulegum skilningi þess orðs, því að sennilega er hluti af þessari myndun eldri en síðasta ísöld og mundi þá kallast grágrýti. Hraunamyndunin er yfir- leitt allmiklu þynnri en 200 m, en flestar holurnar eru stað- settar í eða við móbergshrygg. Í sniði D-E er sýnt, hvernig hraunamyndunin þykkar til austurs og gæti verið yfir 200 m þykk við H 5.

Fyrir neðan hraunamyndunina tekur við móbergs- og set- myndun (lag-0 í Mynd 2.1). Í þessari myndun skiptast á mó- bergsbreksía, túff og set af ýmsu tagi. Efst í þessari myndun  $RM_2$  er móbergslagið  $RM_2$ , eða serían  $RM_2$ , því að lagið er skipt upp í smærri einingar af móbergsbreksíu, túffi og seti. Í þessu lagi er mikið af fjaðurpyroxen, sem oft myndbreytist í rauðleita fjaðraða myndbreytingu. Einnig finnst ferskt, brúnt gler, einkum í H 3. Oxun og rauður litur eru mjög áberandi, einkum í setlögum í breksíu. Í túfflaginu í H 8 er þó mjög lítil oxun. Lagið er mjög fínkornótt og líkt neðri lögum.

RM<sub>3</sub> Lagið RM<sub>3</sub> er plagioklasríkt túff í H 2, H 3 og H 4, en í H 6 er það túffkennd breksía og með minna magni af plagioklasi en í hinum holunum. Túffið er fínkornótt og eru dreifikornin úr myndbreyttu gleri og plagioklasi, bindiefnin klórít, kvarz og kalkspat. Lagið er myndað í einu þeytigosu. Gosefnin hafa setzt til í sjó eða vatni á tiltölulega sléttan flöt, 250-270 m undir núverandi sjávarborði. En við gosið hefur myndast hóll af túffi, um 110 m hár í H 2.

RS<sub>3</sub> Undir laginu RM<sub>3</sub> er setlagið RS<sub>3</sub>. Þetta er þykkasta setlagið á svæðinu, 70-230 m á þykkt. Í því eru linsur af móbergi og basalti í H 3 og H 8. Lagið RS<sub>3</sub> er misgróft og stundum lagskipt. Ávöl korn eru nokkuð útbreidd og þá einkum basaltdreifikorn. Lagið er fínast og túffríkast efst, og gæti verið gamalt sjávarset. Það er ekki óáþekkt Vestmannaeyja-setinu. Þó finnast hér engar dýraleifar, enda væru þær allar horfnar vegna ummyndunar. Ef þetta er rétt, er túfflagið RM<sub>3</sub> myndað á sjávarbotni, en setmyndun hefur haldið áfram eftir gosið, sem myndaði túffhólinn RM<sub>3</sub>, og í H 8 nær setið upp fyrir 200 m. Fyrir neðan 330-350 m er setið yfirleitt grófa-ara og gæti verið myndað á landi (Ísaldarset?). Í setinu eru dreifikorn úr myndbreyttu gleri, basalti, plagioklasi og pyroxeni í mjög mismunandi magni. Mest er af myndbreyttu gleri í fínkornótta setinu, en í grófa setinu eru basaltdreifikorn ríkjandi. Plagioklasdreifikorn eru í öllu setinu, en þó mest í frekar grófu seti. Mjög lítið er af pyroxendreifikornum, en þá helst í fínu seti. Útlínur dreifikornanna eru mismunandi. Basaltekorn eru nærri alltaf ávöl, ef þau eru álíka stór eða minni en brotkornastærðin. Aðeins stærstu plagioklasdreifikornin eru ávöl. Þau eru oft með myndbreytingarlinsur á köntum. Myndbreytta glerið er lítið ávalt, þó eru flest glerkornin ávalari í setinu en í túfflögunum, en einnig finnast vel ávalað gler. Bindiefnið í setinu er mjög mismunandi frá einum stað til annars, og er það kvarz, opal, leirmineröl, kalkspat og anhydrit á einstaka stað.

RM<sub>4</sub> Undir RS<sub>3</sub> liggur víðast móbergið RM<sub>4</sub>. Þetta lag er snautt

af plagioklasi og með fremur litlu basalti í H 3 og H 4, en í H 6 er mikið af basalti í laginu, mismunandi grófkristölluðu. Gæti þetta jafnvel verið set, en grófasta basaltið virðist vera frá sama gosbergi. Ekki finnast nein ávöl korn, en það gæti verið vegna þess, að brotkornin eru svo lítil (borað af Mayhewbor).

- RB<sub>4</sub> Á um 500 m dýpi eru basaltlög, RB<sub>4</sub>, sem ganga í gegnum allt svæðið. Lögin eru 17-53 m þykk, og þar sem þau eru þynnst er aðeins eitt hraunlag. Annars skiptast á tholeiit- og olivinbasaltlög með nokkrum millilögum. Í H 8 eru basaltlögin tvö og 18 m þykkt setlag á milli. Lögin RB<sub>4</sub> eru mynduð á landi, sennilega á hlýviðraskeiði milli ísalda. Undir
- RS<sub>4</sub> þessu lagi kemur setið RS<sub>4</sub>, sem er fínkornótt, túffríkt set, sem gæti jafnvel verið túfflag. En fyrir neðan 550-560 m dýpi er setið grófara og lagskipt og grófast neðst. Í H 8 eru linsur af móbergi, breksíu og basalti í laginu RS<sub>4</sub>, en að öðru leyti er setið svipað og í hinum holunum. Dreifikornin eru myndbreytt gler, basalt og plagioklas, bindiefni kvarz, kalkspat og leirmineröl. Basaltkornin eru alltaf ávöl, ef dreifikornastærðin er jöfn eða minni en brotkornastærðin. Stærstu plagioklasdreifikornin eru nokkuð ávöl, sérstaklega þau, sem nálgast brotkornastærðina. Myndbreytta
- RM<sub>5</sub> glerið er aðeins ávalt á einstaka stað. Móbergslagið RM<sub>5</sub> liggur alls staðar undir RS<sub>4</sub>. Þetta er þykk, basísk móbergsbreksía með nokkra basalteitla (olivinbasalt), sem er sennilega hluti af sömu gosmyndun. Breksían er með plagioklaslista og fremur lítið af plagioklasfenokristöllum. Myndbreytta glerið er oftast brúnleitt. Eitthvað gæti verið eftir af fersku, brúnu gleri í því. Nokkuð mikið er um svart gler. Út frá því vex rauðbrún, fjöðruð myndbreyting. Einnig er nokkuð fjaðurpyroxen, meira og minna myndbreytt. Lítið er um holufyllingarmineröl í þessu lagi, svo að það virðist
- RS<sub>5</sub> vera fremur þétt. Undir RM<sub>5</sub> kemur setlag RS<sub>5</sub> í H 3 og basalt-
- RB<sub>5</sub> lögin RB<sub>5</sub> í H 8. RS<sub>5</sub> og RB<sub>5</sub> eru sennilega mynduð á svipuðum tíma, hvort tveggja landmyndanir. Millilögin í RB<sub>5</sub> eru svip-

uð að gerð og setið  $RS_4$ . Seteinkenni í laginu  $RS_5$  eru ekki mjög skýr, en nokkuð er af ávölum basaltbrotkornum og nokkur greinileg setkorn. Oxun er allmikil í laginu, mikið af holufyllingarminerölum og borhraði mikill, þrátt fyrir talsvert meira magn basalts í þessu lagi en í breksíunum í kring. Í  $RS_5$  er mikið um svipað efni og í breksíunni fyrir ofan og neðan lagið. Í  $RB_5$  skiptast á olivin- og tholeiitbasalt lög.

$RM_6$  Undir þessum lögum kemur móbergslagið  $RM_6$ , sem er sennilega skipt í tvö móbergslög. Í H 3 er túffkennd móbergsbreksía, þar sem glerið er myndbreytt, gulgrænt efni, en í H 8 er breksía og mikið um fjaðraða myndbreytingu og basalt, líkt og  $RS_6$  í  $RM_5$ . Undir  $RM_6$  er setlagið  $RS_6$  í H 3, basaltlögin  $RB_6$  í  $RB_6$  H 8 og í H 4 kemur basaltið  $RB_6$  undir  $RM_5$ . Lagið  $RS_6$  er landset og er líkt millilögum í  $RB_6$ , sem eru nokkuð þykk. Undir  $RM_7$  þessum lögum er móbergið  $RM_7$ . Þetta er móbergsbreksía með mismiklu magni af basalti, nokkuð af því er grófkristallað. Magnið af plagioklasfenokristöllum er misjafnt, oftast fremur lítið, en mikið af plagioklaslistum. Í öllu laginu er nokkuð af svörtu gleri, einnig mikið af rauðbrúnni fjaðrismyndbreytingu (myndbreyting af fjaðurpyroxen), og slær hún rauðum lit á lagið. Þetta er merki oxunar, sem gæti verið vegna veðrunar. Væri þetta þá seteinkenni. Ekki fundust önnur seteinkenni, og er þetta því greint sem breksía, en breksían gæti einnig verið skipt með setlögum. Undir þessu lagi eru  $RB_7$  basaltlögin  $RB_7$ . Í þeim skiptast á olivinbasalt og tholeiitbasalt. Með basaltlögunum  $RB_7$  (í 900 m dýpi) má segja, að komið sé niður úr móbergssetmyndun í H 8 og H 4, og við taki basaltsetmyndun, þar sem skiptast á þykk basaltlög með millilögum, og þykk setlög og stöku móbergslag. Þessa myndun mætti kalla basalt- og setmyndun. Í H 3 er  $RB_7$  þunnt, eitt  $RM_8$  basaltlag efst, undir því kemur svo móberg  $RM_8$ , sem er móbergsbreksía, svipuð breksíunni fyrir ofan. Undir þessari  $RS_7$  móbergsbreksíu er setlag  $RS_7$  með einstaka basaltlögum.

Angar af þessu seti ganga inn í basaltseríuna  $RB_7$  í H 8. Setlagið  $RS_7$  er nokkuð basaltríkt, jafnvel gætu þar verið basaltlög, en basaltið er mjög sundurleitt í myndbreytingu

og gerð, og borhraði er mikill. Önnur dreifikorn en basalt eru myndbreytt gler og plagioklas. Bindiefnið er kvarz, kalkspat, klórít og epidót. Undir RS<sub>7</sub> og RB<sub>7</sub> eru samfelld RB<sub>8</sub> basaltlög, RB<sub>8</sub>, sem ná niður fyrir 1100 m dýpi. Basaltið nær á 1152 m í H 8, en í H 3 niður á botn í holunni, 1165 m dýpi. Þó er líklegt, að þar sé næstum komið niður úr basaltlögnum í H 3, því að borhraði var að aukast aftur á síðustu metrunum. Olivinbasalt er ráðandi í lögum RB<sub>8</sub>.

H 8 er eina holan, sem nær niður fyrir RB<sub>8</sub>. Það, sem á eftir fer, á því eingöngu við um hana. Verða lögin þó merkt á sama hátt og áður. Undir basaltlögnum RB<sub>8</sub> er setið RS<sub>8</sub> RS<sub>8</sub>, sem nær niður á 1231 m dýpi. RS<sub>8</sub> er konglomerat, líklega jökulberg. Þar skiptast á brotkorn úr basalti, sem virðast mjög mismunandi grófkornótt og myndbreytt, og svo mjög fínkornótt set, með brotkorn úr plagioklasi, myndbreyttu gleri og pyroxeni. Millimassinn er grákámóttur klórítmassi, og oft er langt á milli dreifikorna. Síðan RB<sub>9</sub> taka við basaltlögin RB<sub>9</sub>, sem ná niður í 1346 m dýpi. Í RB<sub>9</sub> er talsvert af millilögum, og er bæði olivin- og tholeiit- RS<sub>10</sub> basalt í lögnum. Setið RS<sub>10</sub> er þykkt og nær niður í 1424 m dýpi. RS<sub>10</sub> er misgróft og mistúffríkt set og ef til vill með nokkrum túfflögum. Í fínasta setinu eru dreifikornin að mestu myndbreytt gler, en í því grófasta eru basalt-dreifikornin ríkjandi. Bindiefnið er mest kvarz og svartur massi, sem á slær rauðleitum blæ. Fyrir neðan þetta set RB<sub>10</sub> taka við þunn basaltlög RB<sub>10</sub>, sem ná niður í 1474 m dýpi, með þykkum millilögum, sem eru setlög af svipaðri gerð og setið RS<sub>10</sub>. Basaltlögin eru flest fremur grófkristallað olivinbasalt.

RM<sub>9</sub> Móbergsbreksían RM<sub>9</sub> nær 1514 m dýpi. RM<sub>9</sub> er móbergsbreksía, sem er alloxuð. Er það líklega merki um veðrun á yfirborði og gæti því verið seteinkenni, en ekki er þetta svo öruggt, að það eitt nægi til að greina bergtegundina sem set. Mest ber á fjaðurmyndbreytni og basaltbrotkornum. Undir þessu eru samfelld basaltlög með millilögum niður í

RB<sub>11</sub> botn á holunni; basaltlögin RB<sub>11</sub>. Þar skiptast á olivin- og tholeiitbasalt. Á 1554-1640 m eru samfelld lög af olivin-basalti.

#### 3.1.4 Myndbreyting bergsins

Myndbreyting er annars vegar efnaskipti milli bergs og vökva og hins vegar umkristöllun á upprunalega berginu. Gerð ummyndaða bergsins er háð upprunalegri gerð bergsins. Nú er upprunaleg samsetning vökvans þekkt, og þær breytingar, sem á honum verða við myndbreytinguna. Vökvinn er sjór og breytingarnar eru þær, að magníum og súlfat hafa nærri horfið, en kalsíum og kalí aukizt. Unnið er að rannsóknnum á upprunalegri og núverandi efnasamsetningu bergsins. Gera má ráð fyrir, að megnið af berginu sé komið af basískum bergtegundum, en í slíkum bergtegundum eru SiO<sub>2</sub>, Na og K fremur lág, en Ca og Fe fremur há miðað við súrari bergtegundir. Bergtegundirnar eru greindar eftir fleiri eiginleikum en efnafræðilegum eins og lýst var hér á undan. Fróðlegt er að athuga, hvernig hinar mismunandi bergtegundir bregðast við myndbreytingunni og hvers vegna. Set og túff myndbreytast auðveldlegast. Við myndbreytingu á þessum bergtegundum gerist tvennt: Í fyrsta lagi fyllist rúmið á milli kornanna (sem getur verið upp í 60% til að byrja með) með nýmyndunarminerölum sem bindiefni, og í öðru lagi myndbreytast dreifi-kornin. Glerið á einkum létt með að myndbreytast, og þessi myndbreyting gengur betur með minnkandi kornastærð.

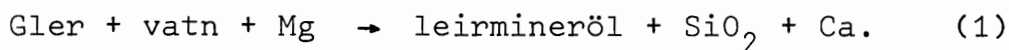
Breksíur myndbreytast fremur auðveldlega, því að mikið er um gler í þeim, og einnig eru þær sprungnar og poruhluti hár, þó að hann sé ekki eins hár og í setum. Myndbreytingin gerist á líkan hátt og í setunum.

Basaltið myndbreytist mun hægar en þær bergtegundir, sem hafa verið taldar upp hér á undan. Það hefur miklu minna glermagn, og einnig á vökvinn miklu ógreiðari aðgang að

berginu, þar sem kjarninn í basaltinu er lítið sem ekkert sprunginn. Þó myndbreytist olivinbasaltið léttar en tholeiitið, því að þar eru þynnri lög, og einnig meira af minerölum, sem myndbreytast auðveldlega.

Myndbreytingamineröl, þ.e.a.s. mineröl, sem falla út úr vökvanum, eru í formi holufyllingar og bindiefnis, og svo mineröl, sem koma í stað upprunalega efnisins í berginu.

Gler myndbreytist fyrr en öll mineröl. Það myndbreytist hér yfir í leirmineröl (aðallega montmorillonit, klórít og illít). Við þessa myndbreytingu gengur vatn inn í mineralbygginguna. Einnig hafa leirmineröl tekið upp magníum og losað kalsíum og kísil. Í líkingu (1) er skematísk mynd af því, sem gerist, þegar glerið myndbreytist.



Í leirminerölum eru 10-15% vatn. Við leirmineralmyndbreytingu verður rúmmálsaukning, þannig að leirminerölin koma ekki aðeins í staðinn fyrir glerið, heldur eru þau einnig sem bindiefni í túffinu og setinu. Mjög erfitt er að ákvarða leirmineröl optiskt, en Hrefna Kristmannsdóttir vinnur að röntgenákvörðun á þeim.

Auk þeirra myndbreytinga, sem eru örugglega leirmineröl, eru nokkrar myndbreytingagerðir, sem ekki er búið að ákvarða með vissu. Í fyrsta lagi er fjöðruð myndbreyting, sem er brún, rauðbrún eða grá að lit. Í öðru lagi er svört, ógegnsæ myndbreyting, sem stundum slær á rauðleitum blæ, sem stafar sennilega af oxun. Þessar tvær myndbreytingagerðir geta verið allt að 20% af massanum.

Í móbergi er oft mikið af fjöðruðu, kristölluðu efni, sem er pyroxen (23). Brúna eða rauðbrúna myndbreytingin er sennilega slíkt efni, meira og minna myndbreytt. Stundum finnst brúna eða rauðbrúna myndbreytingin sem ljósbrún, blaðlaga myndbreyting, sem sennilega er leirmineral (líkist



preníti). Gráa, fjaðraða myndbreytingin er líklega blanda af kvarzi og albíti. Þetta er a.m.k. líkt slíkri myndbreytingu á öðrum háhitasvæðum. Svarta myndbreytingin er myndbreytt, svart gler og magnetit. Auk þess eru einhver svört mineröl, sem hafa fallið út úr vökvanum og mynda bindiefni í seti og túffi. Sennilega eru þetta mest járn- og titansambönd.

Á myndum (3.11,12,13) er sýnd mineraldreifing á anhydriti, kvarzi, zeolítum, kalkspati, epidóti og preníti í holunum. Magnið er fengið með punktatalningu í þunnsneiðum, og er þetta því rúmmáls prósentu af hverju minerali. Dreifing á punktunum er mikil. Það er mjög mismunandi magn af hverju minerali í þunnsneiðum, sem eru á líku dýpi. Til að gefa einfalda mynd af mineraldreifingunni eru yztu punktarnir tengdir, og gefur þetta hugmynd um mest magn af hverju minerali á hverju dýptarbili. Einnig eru sýndir hitaferlar af berghitanum og einfaldað jarðlagasnið af holunum. Skal nú gerð grein fyrir þessum minerölum og athugað, hver áhrif hitinn og jarðlögin hafa á mineraldreifinguna.

Anhydrit er kalsíumsúlfat  $\text{CaSO}_4$ , og hefur fallið út úr jarðsjónum, enda er nær ekkert súlfat í heita jarðsjónum. Almennt er vitað um  $\text{CaSO}_4$ , að uppleysanleiki minnkar með vaxandi hita. Einnig er greinilegt samband á milli hita í holunum og anhydritmagnsins. Nærri ekkert anhydrit er þar, sem hitinn fer niður í  $60^\circ\text{C}$ , og finnst aðeins vottur af því á einum stað í H 6. Mest anhydrit finnst í H 3 og H 4, þar sem fer að hitna aftur fyrir neðan kalda kaflann, sem er í þessum holum, og eru allt upp í 30% í einni þunnsneið frá H 4. Í H 2 er anhydrit efst í holunni og mest í 70 m dýpi, en í H 8 finnst víða örlítið anhydrit, en hvergi í verulegu magni (ekki kalt belti er í þessari holu). Anhydrit er hvítt, ljósbrot 1,57  $\leq n \leq$  1,62, hátt tvíbrot. Það kemur fyrir í tvenns konar kristöllum; löngum reglulegum kristöllum og óreglulegum kristöllum með mjög smágerða tvíburamyndun. Fyrri gerðin er algengari.

Zeolít eru alkali- eða jarðalkaliálsiliköt, sem hafa mismikið bundið vatn. Zeolít eru yfirleitt holufyllingar-mineröl, því að þau hafa fallið út úr vökvanum. Myndun zeolíta verður sennilega við ákveðinn hita, en getur einnig verið háð jarðlögum. Þau eru alls staðar efst í holunum, nema í H 3, þar sem eru nær engin zeolít. Zeolítin ná a.m.k. niður á 300-600 m dýpi í hinum holunum og dýpst í H 8, en þar fyrir neðan er dreift analcime. Ekki voru merktir punktar fyrir zeolít (Mynd 3.13), þegar það var orðið eina zeolítið. H 3 er frábrugðin hinum holunum í því, að mun meira er um basalt í efstu 150 m. Einnig er minni myndbreyting þar í efstu 200 m, þar finnst t.d. ferskt gler. H 3 hitnar mjög ört milli 200 og 300 m, og er hún heitasta holan í 300 m. Eftir Myndum(3.11-3.13) má ætla, að zeolítin séu ekki lengur stöðug, þegar hitinn fer 220-240°C. Helztu zeolítin eru stiblít, mordenít og analcime. Líklegast er út frá þeim röntgenákvörðunum, sem fyrir liggja, að það mineral, sem talið hefur verið analcime, sé wairakite.

Kísilsýra,  $\text{SiO}_2$ , er bæði ókristölluð, ópal, og kristölluð, kvarz. Ópalið er ísótrópur, brúnleitur massi og finnst aðallega efst í holunum. Ópalið finnst einnig á stöku stað í kvarzbeltinu, sem bendir til staðbundins ójafnvægis. Kvarzið er alls staðar í holunum, nema efst. Það þarf örugglega einhvern lágmarkshita til þess að kvarzið myndist, og mun hann vera eitthvað yfir 100°C. En þegar hitinn er orðinn það mikill, að kvarzið geti myndast, er útbreiðsla þess mest háð bergtegundum, og er mest í seti og túffi.

Kalkspatið er kalsíumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), og hefur eingöngu fallið út úr jarðsjónum. Kalkspat er útbreitt í öllum holunum, og er til dæmis í H 8 frá yfirborði og niður í botn. En kalkspatið er mjög misjafnt að magni, og auðséð er, að magn þess er háð bergtegundum, mest í seti og túffi eins og kvarzið. Auk þess er áberandi, að mest er fyrir ofan 500-700 m. Sennilegasta skýringin á þessu mikla magni

af kalkspati í efri hluta holanna er suða á jarðsjónum, en við suðu breytist samsetning og efnajafnvægi (pH og efnasamsetning) í jarðsjónum. Er þessi skýring í samræmi við það, sem Brown og Ellis hafa fundið í jarðhitasvæðinu Broadlands á Nýja-Sjálandi (24). Í H 8 er kalkspatið í verulegu magni fyrir ofan 550 m, en í H 3 og H 4 nær það niður í 700 m, en þessar holur eru heitari en H 8. Þetta gæti þýtt, að suða næði, eða hefði náð, niður í 700 m í þessum holum, en u.þ.b. í 550 m í H 8 (sjá einnig 3.3 um samsetningu jarðsjávarins). Einnig væri hugsanlegt, að við myndun epidóts eyddist kalkspat, það gæti komið heim við H 3 og H 4, en ekki við H 8.

Epidót er kalsíumálsilikat ( $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$ ). Epidótið er myndað við myndbreytingu á leirminerölum og plagióklasi. Myndun epidóts virðist vera háð hita og sennilega vatnsleiðni jarðlaganna, því að epidót kemur fyrst í setlaginu  $\text{RS}_4$  í H 3, H 4 og H 8, en hverfur nær alveg í næsta breksiulagi fyrir neðan lagið  $\text{RM}_6$ . Epidótbeltið er samfelld í H 4 fyrir neðan  $\text{RM}_6$  lagið, eða frá 800 m. Í H 3 er það samfelld frá 870 m, en í H 8 frá 1200 m dýpi (almenn epidótisering, epidótið myndast óháð bergtegundum). Ef lesinn er hitinn af Myndum (3.11-3.13) sést, að epidótið getur myndast við hagstæðustu skilyrði 225-250°C, en til þess að almenn epidótisering geti orðið, þarf 260-270°C. Í H 6 finnst epidótið grynnt á svæðinu, eða í 450-550 m. Það er aðallega í móbergslaginu  $\text{RM}_5$ , en hverfur aftur í basaltinu  $\text{RB}_4$ . Nú er þessi hola hvergi yfir 60°C, en epidótið ber merki um gamlan háhita, sem eftir hinum holunum að dæma hefur verið 225-250°C. Epidótið hefur tvær kristallagerðir. Önnur hefur misgræn, köntuð eða ávöl korn, þar sem hver kristall er samsettur úr mörgum kornum (tvíburamyndum), og svo þráðlaga epidót, sem er ætíð dökkgrænt. Fyrri gerðin er miklu algengari. Í efri epidótbeltunum og u.þ.b. 100 m niður í almenna epidótbeltið, er epidót eingöngu myndað úr leirminerölum. Við þessa myndbreytingu við myndun epidóts-

ins þarf að taka burtu og bæta við efnum úr leirminerölum, og því er líklegt, að samsetning leirminerala breytist við epidótmyndunina. Eitt viðbótarefnanna, sem þarf við myndun epidóts, er kalsíum. Það getur verið frá jarðsjónum, en einnig frá kalkspati. Rök fyrir því, að epidót hafi að minnsta kosti stundum tekið kalsíum frá kalkspati eru þau, að epidót og kalkspat finnast stundum mjög samantvinnuð. Epidót og kalsíumríkt plagioklas (anortít) hafa líka samsetningu, og myndast því epidót fyrst úr kalsíumríkasta plagioklasinu. Oft má sjá í þunnsneiðum, að epidót myndast í miðjunni á stórum fenokristöllum úr plagioklasi. Sennilega er það vegna þess, að kjarni plagioklaskristallanna inniheldur mest kalsíum (sbr. sóneringu).

Prenít er kalsíumálsilikat  $(H_2Ca_2Al_2(SiO_4)_3)$ . Prenit hefur dreifða útbreiðslu og virðist myndast eitthvað fyrr en epidótið, en er oft með því. Prenit gæti verið mjög ofmetið, vegna þess að erfitt var að greina milli þess og bergtegundar með fjaðraðri myndbreytingu, sem ekki er búið að ákvarða með vissu. En það er öruggt, að prenit er víða í talsverðum mæli, þó að ákvörðun á því sé talsvert óvissari en á öðrum minerölum, sem sýnd eru á Myndum (3.11-3.13 ).

### 3.1.5 Leirmineröl

Hér fer á eftir nánari greining á þeim leirminerölum, sem fundizt hafa, en þau eru montmorillonit, klórit, illít og verumkalít, algengust eru tvö fyrstnefndu. Allmikið fannst af blönduðum minerölum. Optískt skiptist montmorillonit í marga fasa og sennilega einnig hvað snertir byggingu. Í fyrsta lagi er brúnleitt montmorillonit með lágt tvíbrott og mismunandi ljósbrot frá 1,510-1,570. Það er myndað við myndbreytingu á gleri, og er algengt í öllum holum í efstu 50-100 m, en þar fyrir neðan finnst það einkum í breksíum og fínkristölluðu basalti (bólstrabergi), og finnst alveg niður í botn á H 8. Í öðru lagi er Ca-montmorillonit, sem er

grænt montmorillonit með lágu tvíbroti og ljósbrot  $1,560 < n < 1,590$ . Þetta montmorillonit er einnig að mestu myndað við myndbreytingu á gleri, og er mest, þar sem glerið er brotið upp í frekar smáar einingar eins og í túffi og túffríku seti (t.d. í  $RM_9$  og  $RS_3$ ). Einnig getur það verið sem bindiefni í seti og túffi. Fremur sjaldgæft er, að montmorillonit, sem myndar bindiefni, sé alveg eins og það, sem kemur í staðinn fyrir glerið. Þetta montmorillonit er á takmarkaðra dýptarbili en brúna montmorillonitið, það er ekki allra efst í holunum og hverfur í epidótbeltinu (myndir 3.11-3.13), þar sem klórítið byrjar, en gæti þó verið eitthvað með klórítinu. Þessi mineröl eru lík við fyrstu sýn, þó að nokkur munur sé þar á við nánari athugun. Í þriðja lagi er grænt montmorillonit með háu tvíbroti, sem er mjög algengt sem bindiefni og holufyllingarmineral (fallið út frá vökvanum). Þó finnst það á einstaka stað í breksíum, þar sem þetta mineral hefur fallið út í sprungum og síðan etið sig inn í brúna montmorillonitið. Þetta montmorillonit er í fleiri bergtegundum, og nær sennilega niður á meira dýpi en Ca-montmorillonitið, sem var talað um næst á undan, en þessi mineröl eru mjög oft saman. Græna montmorillonitið er einnig með brúna montmorillonitinu (gæti verið blandað illíti). Þessar þrjár gerðir af montmorilloniti eru algengastar. Til eru nokkrar sjaldgæfari, og ef til vill eru þær blandaðar öðrum minerölum. Hvít býkúpulaga holufylling finnst efst í holunum, ljósbrot  $n > 1,500$  og mun vera montmorillonit. Auk glers myndbreytast bæði olivin og pyroxen í leirmineröl. Olivin hverfur nær alveg og finnst aðeins í litlu magni neðan 200 m. Myndbreyting olivins gerist í nokkrum þrepum. Það byrjar að myndbreytast yfir í rauðleita minerala, iddingsit, sem myndast meðfram köntum og sprungum. Síðar tekur við mineral með háum pleóklórisum, brúnt eða grænt og ljósbrot í kringum 1,600. Þetta mun sennilega vera notronit, járnríkt montmorillonit. Myndbreyting á pyroxen gengur miklu skemur en á olivin og eykst með dýpi, en jafnvel niður á 1754 m dýpi er mikið eftir af pyroxen.

Víðast hvar á jarðhitasvæðum hafa fundizt ákveðin dýptarmörk, þar sem klórít tekur við af montmorilloniti. Þessi montmorillonit-klórítmörk eru álitin vera háð hita. Í H 3 er klórítið dreift þannig, að það kemur fyrst fyrir á 350 m dýpi, og er þá blandað mineral úr montmorillonit/klóríti og virðist vera nokkurt klórít í setlögnum  $RS_3$  og  $RS_4$  ásamt montmorilloniti, en það virðist hverfa í  $RM_5$ -laginu. Ekkert klórít er heldur í  $RM_7$ , en fyrir neðan 890 m er klórít ráðandi mineral niður á botn. Þessi dreifing á klórítinu fellur mjög vel saman við epidótbelti í H 3 (sjá Mynd3.3). Klórít myndast ofar en epidótið, en þó fellur samfellda klórítbeltið alveg saman við samfellda epidótbeltið. Þetta virðist vera líkt í hinum holunum, þar sem klórít og epidót fylgjast að. Í H 6 hefur aðeins fundizt klórít á einum stað. Það er á 470 m dýpi, en þar er epidót einnig. Í H 8 er Ca-montmorillonit ráðandi niður í 500-600 m. Klórít finnst fyrst í 710 m, en verður ekki ráðandi fyrr en neðan 1100 m. Eins og montmorillonitið hefur klórítið meira en einn optískan fasa. Grænt klórít með lágt tvíbrot og ljósbrot  $n \geq 1,610$  getur komið í staðinn fyrir glermassa, og virðist einnig geta fallið út úr vökvanum. Klórítið, sem kemur í staðinn fyrir glermassann, er oftast grænt eða gulgrænt, oft pleokorist.

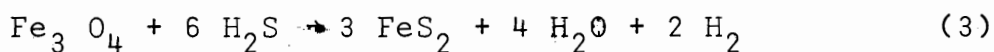
Illít finnst aðeins blandað montmorilloniti. Hugsanlegt er, að eitthvað sé af vermukuliti, en eftir er að athuga það betur.

Amfibol hefur ekki fundizt, svo að öruggt sé. Þó hafa fundizt grænir og brúnir, staflaga kristallar í H 8 neðan 1000 m, en ekki hefur þetta verið ákvarðað með vissu.

Albít. Plagioklasfenokristallarnir hafa stundum eyðilagða tvíburamyndun, og mun þetta vera albítmyndun (albítisering). Þessi albítmyndun virðist vera óháð dýpi, en er þó eitthvað í beltum.

Kalifeldspatið er hvítt, með lista- eða stöngullagaða kristalla. Það finnst efst í H 2, á einstaka stað neðst í H 8 og stundum með albíti. Þetta mineral finnst alltaf í litlum mæli eða < 1%, og í H 8 finnst aðeins einn og einn kristall af því og þá með albíti.

Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) finnst nær alls staðar í holunum, en í litlum mæli, < 1%, og er nokkuð misdreift. Sennilega er dreifingin mest háð jarðlögum. Pyritið hefur sennilega fallið út úr jarðsjónum skv. jöfnu (2), eða myndast við myndbreytingu á magnetiti, sem er sýnt skematísk í jöfnu (3).



Hematit finnst aðallega með svörtu myndbreytingunni, og er mest áberandi efst í holunum ( $\text{RS}_1$ ).

### 3.1.6 Saga jarðhitans og dreifing anhydrits og epidóts

Þar sem uppleysanleiki anhydrits minnkar með auknum hita, ætti anhydrit að finnast, þar sem sjór hefur hitnað. Þó að allt súlfatið, sem er í sjónum, yrði fellt út sem anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ), yrði það aðeins u.þ.b. 0,3% af þyngd sjávarins. Ef gert er ráð fyrir, að berg með háan poruhluta, td. 30% (sjá 6.1.5), sé fyllt af köldum sjó (10-20°C), ætti magnið af anhydriti að vera minna en 0,1%. En nú er magnið af anhydriti víða miklu meira en 0,1%, sem þýðir, að tiltölulega kaldur sjór hlýtur oft að hafa brotist inn á svæðið og smáukið anhydritmagnið í berginu. Magn anhydritsins gefur því til kynna, hve oft kaldur sjór hefur ruðst inn á svæðið.

Í H 6 finnst epidót, og hefur hitinn verið meiri en 225°C við myndun þess, þó að hann sé nú aðeins um 50°C. Af þessu leiðir, að H 6 er staðsett á kulnuðu jarðhitasvæði.

Ekkert í þeirri mineralsamsetningu, sem þegar er þekkt, er í samræmi við þann hita, sem nú er í holunni, nema sú staðreynd, að þar finnst ekkert anhydrit. En ef til vill gæti nánari ákvörðun leirmineralanna sagt okkur sögu þessarar kólnunar.

### 3.2. Vatnsæðar og hiti

Meðan á borun stendur, finnast vatnsæðar með því að mæla skoltap. Einnig geta hitaferlar gefið góða vísbendingu um, hvar vatnsæðar er að finna. Yfirlit yfir skoltap í H 2, H 4 og H 8 er sýnt á Myndum 3.2, 3.4 og 3.6. Hins vegar varð ekki vart við verulegt skoltap í H 3 og H 6. Aftur á móti sýna hitaferlar (Mynd 3.14) úr H 3, að nokkrar vatnsæðar eru í kringum 500 og 600 m, sennilega neðst í  $RS_3$  og efst í  $RS_4$ . Einnig eru einhverjar truflanir í kringum 900 og 1000 m. Þetta kemur greinilega fram í fyrstu hitamælingunni, sem var gerð 40 tímum eftir að hætt var að dæla í holuna.

Greinilegt samband er á milli jarðlagamyndana og vatnsgengni. Hraunamyndunin er mjög opin, sem bezt sést á því, að flóðs og fjöru gætir í H 5 (120 m djúp og 1200 m frá sjó), um 1/3 af eðlilegum sjávarföllum. Inni á jarðhitasvæðinu er hraunamyndunin orðin nokkuð þétt af útfellingu. Móbergs- og setmyndunin er mjög þétt, einkum þar sem suðu gætir í berginu, og er þar mikið magn kalkspatsútfellinga (sbr. 3.1). Suðan nær allt niður í 700 m, enda eru vatnsæðar sjaldgæfar ofan þess dýpis. Neðan 700 m dýpis er ekki ástæða til að ætla, að móbergs- og setmyndunin sé miður vatnsgeng en blágrýtis- og setmyndunin. Vatnsæðar eru aðallega á jarðlagamótum, og eru einkum algengar efst eða neðst í setum, en finnast þó í nálega öllum jarðmyndunum. Þar eð jarðlagaskiptin eru tíðari í blágrýtis- og setmynduninni en í móbergs- og setmynduninni, eru vatnsæðar



sennilega algengari í blágrýtis- og setmynduninni. Þó ber að gæta þess, að talsvert mikill munur er á vatnsgæfni einstakra hola, t.d. eru í H 4 mjög margar góðar vatnsæðar milli 700 og 1000 m. Eins er líklega, að einstök lög séu sérstaklega vatnsgeng. Á um 1000 m verður t.d. vart við vatnsæðar í öllum holunum, sem ná  $RS_{10}$ . Hitaferlar í holunum fylgja hér í Myndum(3.14,15,16,17,18,19,20). Mælingar voru gerðar meðan á borun stóð og eftir að henni lauk. Hæsti hitinn á svæðinu mældist í H 8 á 1700 m dýpi,  $292^{\circ}C$ , sem er  $36^{\circ}C$  undir suðumarki á þessu dýpi. Eftir að kalt niðurrennsli í H 4 hafði verið stöðvað, mældist þar mestur hiti  $250^{\circ}C$ . Mestur hiti mældist í H 2 strax eftir borun  $225^{\circ}C$ . Á hitaferli yfir H 3 og H 4 má sjá, að kaldur sjór er í berginu á milli 100 og 300 m, þó að hiti á yfirborði sé  $70-100^{\circ}C$ . Hin mikla kæling í H 4 stafar af niðurstreymi kalds sjávar af um 200 m dýpi, sem varð eftir að borun lauk í des 1968 þar til í sept. 1969, að fyrri viðgerð lauk. Þó má ekki útiloka þann möguleika, að kælingin neðan 700 m geti stafað að einhverju leyti af köldu innstreymi á svæðið á þessu dýpi. Allmikið anhydritmagn á þessu dýpi bendir samt til þess, að þegar holan var boruð, hafi verið þarna hár hiti. Hitastigull í H 6 er mjög lágur (Mynd 3.18), en myndbreyting bergsins gefur til kynna, að þarna hafi verið hár hiti. Er því ljóst, að jarðhitinn hefur kulnað á þessu svæði a.m.k. niður í 600 m. H 6 hefur kólnað síðan borun lauk, og er það líklega niðurrennsli í holunni, sem kælir hana, líkt og í H 4. Hitaferillinn í H 5 er talsvert athyglisverður (Mynd 3.17) sökum þess, að mikil kólnun á sér stað neðan 40 m dýpis. Þessi kólnun stendur í sambandi við ört gegnumrennsli kalds sjávar í setlögnum  $RS_1$  og  $RS_2$ . Fyrir ofan þessi lög í basaltlaginu  $RB_1$ , er sennilega heitt rennsli frá hverasvæðinu, sem er blandað staðbundnu grunnvatni (regnvatni). Í H 7 verður aftur á móti ekki vart neinnar kólnunar við  $RS_1$ , en það bendir til þess, að kaldri sjórinn nái ekki þangað. Hitaferillinn í H 7 gefur  $200^{\circ}C/100$  m, en holan er þó of grunn til áreiðanlegrar hitastigulsmælingar, sérstaklega vegna þess, að kæling á 100-200 m

er algeng á svæðinu. Þetta gæti samt sem áður gefið vissa vísbendingu um, að jarðhitasvæðið sé viðáttumeira en yfirborðsmerki sýna.

### 3.3. Efni í jarðsjó

Niðurstöður liggja nú fyrir um magn ýmissa uppleystra efna í jarðsjó í borholum og hverum á Reykjanesi (Töflur 3.1, 3.2, 3.3 og 3.4). Magn uppleystra efna í hverum og við innstreymi í grunnar borholur er nokkru hærra en í ferskum sjó, en svipað í djúpum borholum og í ferskum sjó. Samsetning jarðsjávar er einkum frábrugðin samsetningu fersks sjávar að því leyti, að í jarðsjó er magn súlfats og magníums miklu lægra, en magn kísils, kalís og kalsíums miklu hærra. Ekki hafa mælt sveiflur á efnainnihaldi í jarðsjó úr H 2, sem neinu nemur, frá júlí 1969 til jan. 1971.

Magn klóríðs í jarðsjó við innstreymi á 300 m dýpi í H 2 er um 20% hærra en í ferskum sjó. Aftur á móti var magn klóríðs við innstreymi í H 4 mjög svipað og í ferskum sjó, er holan blés í október og nóvember 1967. Við innstreymi úr æð á 700 m dýpi var magnið 18500-19170 ppm, og er sá munur innan söfnunar- og ákvörðunarskekkju. Hins vegar hafði klóríðmagn aukizt um 20% frá því, sem áður var, er H 4 tók að blása á ný í febrúar 1970. Stafar sú aukning sennilega af gufutapi vegna suðu í holunni af völdum dræms rennslis. Klóríðmagn í djúpsýnum, sem tekin voru af 400-1700 m dýpi í H 8, er 16630-17930 ppm, en það magn er um 10% lægra en klóríðmagn í ferskum sjó. Við borun var miklu skolvatni dælt niður, en í því voru um 400 ppm af klóríði. Síðan H 8 var látin blása 24. okt. 1970, sýna efnagreiningar, að selta jarðsjávar, sem streymir inn í holuna, hefur aukizt nokkuð, og er hún nú eins og í ferskum sjó.

Jarðsjórinn í H 4 og H 8 kom úr vatnsæðum af 700-1700 m dýpi, en eingöngu af 300 m dýpi í H 2. Munurinn á seltu jarð-

sjávarins í þessum borholum er talinn best túlkaður með gufutapi í bergi neðan innstreymi í H 2, sem leiðir til seltuaukningar. Niðurstöður efnagreininga benda til, að þetta gufutap sé dálítið breytilegt, en þó ekki meira en svo, að klóríðmagn í jarðsjó við innstreymi í holuna sveiflast um minna en 10%. Aftur á móti virðist jarðsjórinn í djúpu borholunum ekki hafa tapað neinni gufu, þar sem selta hans er svipuð og í ferskum sjó. Vegna hins háa berghita verður að telja líklegt, að nokkuð gufutap úr jarðsjó geti átt sér stað neðan 300 m vegna suðu í bergi.

Í H 7 er klóríðmagn 4170 ppm, en þessi hola er aðeins 59 m djúp og köld, enda fyrir utan jarðhitasvæðið. Samsetning vatns í H 7 bendir til þess, að jarðvatn nálægt yfirborði sé mest regnvatn að uppruna, þótt nokkurrar blöndunar (um 20%) gæti við salt jarðvatn, sem er sjór að uppruna.

Þar sem selta jarðsjávarins í djúpum holum er hin sama og í ferskum sjó, má telja fullvíst, að heiti jarðsjórinn sé sjór að uppruna, sem streymir um bergið, en ekki setlögur, sem myndast hefur um leið og jarðlögin. Er því talið, að ekki sé um neinn takmarkaðan forða jarðsjávar að ræða, heldur dragi borholur jarðsjó úr gegnumstreymi um bergið.

Ýmislegt bendir til þess, að jarðvatn á Reykjaneskaga, a.m.k. á skaganum vestanverðum, sé sjór að uppruna. Til dæmis er vitað um kaldan sjó í gjám nokkuð inni í landi fyrir vestan Grindavík, og jarðvatn af meira en 350 m dýpi í borholu á Njarðvíkurheiði er mjög svipað ferskum sjó að efnasamsetningu (sjá Töflu 3.1). Þó hefur  $Mg^{++}$  nær horfið, en  $Ca^{++}$  og  $SO_4^{--}$  aukizt. Eins og áður er nefnt, og sýni af 200 m dýpi úr borholu á Njarðvíkurheiði sýnir, er mikil blöndun regnvatns við sjó ofarlega í berggrunninum, en við því má búast, að vegna lægri eðlisþyngdar sinnar geti regnvatn ekki sigið djúpt í berggrunninn, þar sem fyrir er salt vatn.

Tafla 3.1 Efnasamsetning jarðsjávar í hverum og borholum á Reykjanesi. Niðurstöður fyrir borholur sýna efna-  
innihald við innstrey mishita og/eða kvarzhita.  
Efnagreint af Sig.R.Guðm. Magn í ppm.

Sýni nr.	Borhola	Safnað dags.	Kvarz- eða innstrey- is-hiti °C	pH/°C	SiO <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>
690077	2	22.07	190	6.52/21	452	13298	1593	2100
690078	2	22.07	190	7.02/19	506	13231	1591	2132
690204	2	19.12	(190)	6.56/22	415	10954	1562	1873
700009	2	29.01	(190)	6.71/23	339	13800	1660	2006
700010	2	29.01	(190)	7.23/23(205)	13527	1607	1950	
700012	2	25.02	(190)	6.50/23	368	11750	1621	1843
700013	2	25.02	(190)	7.21/23	374	11380	1607	1915
700014	2	03.03	(190)	6.50/23	365	11000	1642	1970
700026	2	24.03	(190)	6.60/23	384	11200	1636	1968
700068	2	27.04	(190)	7.62/20	331	10320	1574	1862
700071	2	25.05	(190)		402	10860	1525	1880
690192	4	27.10	244	6.50/20	522	9389	1238	1542
690193	4	29.10	243	6.78/20	591	11001	1274	1534
690197	4	31.10	243	6.98/25	556	10252	1274	1554
690198	4	03.11	242	6.49/14	463	10092	1272	1557
690199	4	05.11	241	6.61/15	?	10865	1327	1563
690200	4	10.11	238	6.71/17	550	10582	1290	1552
690201	4	13.11	236	6.66/13	544	10122	1327	1559
690203	4	21.11	236	6.72/15	416			1565
700061	4	13.04	(222)	6.40/20	334	9850	1138	1751
700067	4	27.04	237	6.92/20	417	10030	1699	1850
700070	4	25.05	240		431	11390	1643	1882
700062	7	13.04	10	(12.5/20)	3	3150	200	66

Tafla 3.1 - frh.

Sýni nr.	Borhola	Safnað dags.	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	Cl <sup>-</sup>	Uppleyst efni	Gufutap í 100°C	Djúpsýni dýpi m.
690077	2	22.07	20		23710		0.171	
690078	2	22.07	24		23950		0.171	
690204	2	19.12	23	87	21367	36732	0.171	
700009	2	29.01	10	72	22816	40078	0.171	
700010	2	29.01	12	64	22294	39508	0.171	
700012	2	25.02	10	66	21270	38040	0.171	
700013	2	25.02	8	60	21610	38200	0.171	
700014	2	03.03	17	170	22450	39160	0.171	
700026	2	24.03	25	121	23000	39200	0.171	
700068	2	27.04	15	94	21660	37220	0.171	
700071	2	25.05	31		21840	37780	0.171	
690192	4	27.10	17	75	18500	32044	0.275	
690193	4	29.10	26	72	18644	32331	0.273	
690197	4	31.10	27	73	18821	32245	0.273	
690198	4	03.11	48	74	19044	32894	0.271	
690199	4	05.11	45	79	19133	33310	0.269	
690200	4	10.11	29	79	18716	32450	0.262	
690201	4	13.11	28		18615	32380	0.258	
690203	4	21.11	21	75	18687	32247	0.258	
700061	4	13.04	21	106	20950	35960	0.262	
700067	4	27.04	21	99	22660	38980	0.262	
700070	4	25.05	41		23000	39820	0.268	
700062	7	13.04	?	276	4170	9716		

Tafla 3.1 - frh.

Sýni nr.	Borhola Hver	Safnað dags.	Kvarz- eða innstreyms- hiti °C	pH/°C	SiO <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>
700001	8	02.01	174	6.10/23	187	5540	774	808
700002	8	02.01	226	5.78/23	367	10220	1212	1484
700006	8	12.01	242	5.86/23	438	9920	1300	1652
700007	8	12.01	243	5.68/23	447	9630	1300	1555
700029	8	24.03		7.3 /20	10	643	32	120
700030	8	24.03	242	5.30/20	440	8760	1190	1635
700031	8	24.03	245	5.20/20	457	8760	1190	1660
700041	8	02.04	250	5.75/20	477	8450	1260	1654
700130	8	08.09		5.82/20		9200	1288	1728
700166	8	30.10	251	6.78/20	486	9440	1490	1573
700168	8	06.11	(251)	9.08/20	(407)	10020	1307	1626
700171	8	13.11	254	6.98/20	528	9950	1331	1620
700173	8	20.11	252	6.60/20	505	9810	1292	1631
700178	8	27.11	255	6.55/20	536	9650		1628
700179	8	04.12	257		542	9800	1371	1632
700193	8	18.12	268	6.90/20	584	9750	1350	1592
710001	8	05.01	(268)	6.83/20		9780	1285	1593
700011	Holuhver	29.01		6.80/23	(470)	17000	2300	2390
700069	"	27.04		7.02/20	696	14600	2040	2412
700072	"	25.05			699	14500	2155	2400
700015	Hver 1967	03.03		4.61/23	568	14900	2015	2308
700016	Hver 1918	03.03		5.31/23	558	14300	2030	2308
700017	Ferskur sjór	03.03		7.61/20		10520	416	386
700082	Njarðv.h. borh. 1	29.06			8	377	12	84
700083	"	29.06			54	8900	294	2140
700084	"	29.06			76	9170	359	3776

Tafla 3.1 - frh.

Sýni nr.	Borhola Hver	Safnað dags.	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	Cl <sup>-</sup>	Uppleyst efni	Gufutap í 100°C	Djúpsýni dýpi m.
700001	8	02.01	27	78	8960	15542		200
700002	8	02.01	64	90	16630	28262		750
700006	8	12.01	27	78	17820	30823		800
700007	8	12.01	32	76	17280	30214		1040
700029	8	24.03	21	44	1232	32186		100
700030	8	24.03	17	98	17720	30458		400
700031	8	24.03	15	95	17930	30686		800
700041	8	02.04	21	141	17900	31032		1700
700130	8	08.09	26	78	18220	32496		1640
700166	8	30.10	57	51	18700	38350	0.299	
700168	8	06.11	17	53	19600	33200	0.299	
700171	8	13.11	17	69	19530	33000	0.304	
700173	8	20.11	10	51	19310	33400	0.300	
700178	8	27.11	15	66	19520	33500	0.307	
700179	8	04.12	26	47	19390		0.310	
700193	8	18.12	10	49	19050	32500	0.336	
710001	8	05.01	20	46	19050	31950	0.336	
700011	Holuhver	29.01	26	101	28900	51187		
700069	"	27.04	37	128	29400	50517		
700072	"	25.05	37		29300	50474		
700015	Hver 1967	03.03	47	172	28500	48419		
700016	Hver 1918	03.03	53	60	28250	48525		
700017	Ferskur sjór	03.03	1282	2640	19800			
700082	Njarðv.h. borh. 1	29.06	25	159	709	1430		200
700083	"	29.06	442	2280	19800	35223		360
700084	"	29.06	24	1535	20070	36576		480

Tafla 3.2 Efnasamsetning jarðsjávar á Reykjanesi.  
Sýnum safnað við 100°C í borholum.  
Efnagreint af S.A.

Staður	Hiti	pH	Eh. volt 25°C	SiO <sub>2</sub>	B	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>
Magn í ppm.								
Borhola 1	185	7.0	+0.18	540	12.4	16200	1965	2580
Borhola 2		7.0	+0.13	394	12.8	11400	1600	1780
Hver 1918	99	5.1	+0.14	531	12.2	16440	1900	2370
Hver 1967	99	6.2	+0.02	544	12.0	14325	1670	2260

Staður	Fe	Ga	Ge	Mo	Ti
Magn í ppb.					
Borhola 1	59.0	3.8	?	?	?
Borhola 2	581.5	9.2	7.2	7.3	6.2
Hver 1918	374.0	6.4	7.6	9.2	8.8
Hver 1967	192.0	2.6	5.5	10.9	6.1

Magn Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ni og Zn var minna en 10 ppb í þessum sýnum.



Tafla 3.2 - frh.

Staður	Mg <sup>++</sup>	Total CO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	S <sup>--</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Uppl. efni
Magn í ppm.							
Borhola 1	30.0	<5.0	107.2	<0.1	30850	0.2	72390
Borhola 2	5.9	<5.0	84.7	<0.1	22600	0.2	43720
Hver 1918	129.3	<5.0	213.7	<0.1	31300	0.3	56600
Hver 1967	123.2	<5.0	206.4	0.2	29100	0.2	52160

Tafla 3.3 Samanburður á samsetningu jarðsjávar í þremur borholum og einum hver á Reykjanesi við ferskan sjó. Magn í ppm.

---

Staður	Kvarzhiti °C	SiO <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>
Sjór v.Reykjanes			10520	416	386
Sjór (R & S, 1950)			10556	380	400
H.2 (meðaltal 17)	221	353	10440	1382	1812
H.4 (meðaltal 8)	240	(520)	10320	1287	1555
H.8 (meðaltal 8)	(288)		9720	1349	1607
Holuhver (meðaltal 4)	250	469	10400	1495	1720

---

Tafla 3.3 - frh.

Staður	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	Cl <sup>-</sup>	Uppleyst efni
Sjór v. Reykjanes	1282	2640	19800	
Sjór (R & S, 1960)	1272	2649	18980	34816
H 2 (meðaltal 17)	15	72	20745	34550
H 4 (meðaltal 8)	30	75	18950	32400
H.8 (meðaltal 8)	21	54	19230	33050
Holuhver (meðaltal 4)	20	61	20850	35750

Samkvæmt þessu virðist jarðvatn umhverfis jarðhitasvæðið á Reykjanesi vera salt og sjór að uppruna, nema niður á u.þ.b. 200 m dýpi, þar sem blöndunar við niðurstreymiandi regnvatn gætir. Þess vegna þarf ekki að óttast blöndun við kalt, ósalt jarðvatn í djúpum borholum á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi, sem verða látnar blása lengi í vinnslu. Við kólnun á jarðsjó, sem gæti hugsanlega orðið við langtíma blástur, lækkar innihald á  $K^+$  og  $SiO_2$ , en  $SO_4^{--}$  eykst. Magn  $Ca^{++}$  og  $Mg^{++}$  helst tiltölulega stöðugt, og sama gildir um magn annarra aðalefna (sbr. samsetningu á jarðvatni í borholu á Njarðvíkurheiði).

Hlutfallið Cl/Na er svipað í jarðsjó í H 4 og í ferskum sjávarsýnum, sem var safnað í október og nóvember 1969. Annars er þetta hlutfall nokkru hærra í jarðsjónum í hverum og öðrum borholum heldur en í ferskum sjó. Ennfremur er Cl/Na hlutfall í sýnum úr H 4 frá apríl og maí 1970, nokkru hærra en í ferskum sjó. Áður en sýnum var safnað úr H 4 í október og nóvember 1969, hafði kaldur sjór af litlu dýpi runnið niður í holuna frá því að hún var boruð. Telja má líklegt, að jafnvægi milli vatns og bergs hafi ekki náðst vegna þessa niðurstreymis, og stafi óbreytt Cl/Na hlutfall jarðsjávarins í H 4 af því. Annars bendir hækkun á Cl/Na hlutfalli í jarðsjó miðað við ferskan sjó til þess, að  $Na^+$  falli út úr köldum sjó, þegar hann streymir gegnum berggrunninn og hitnar.

Niðurstöður í Töflu 3.4 sýna magn  $H_2S$ ,  $CO_2$  og útreiknað pH í jarðsjó við innstreymi í H 2 og H 8. Það er athyglisvert, að jarðsjórinn, sem streymir inn í borholurnar, er nokkuð súr, pH 4,8, en hreint vatn hefur pH 5,6 við 268°C (innstreymishiti í H 8, 18.12.1970) og 5,65 við 190°C (innstreymishiti í H 2). Til samanburðar eru sýndar sömu niðurstöður fyrir borholu N 3 við Námafjall og borholu G 8 í Hveragerði. Er áberandi, að magn  $H_2S$  er miklu lægra í jarðsjónum og  $CO_2$  og  $H^+$  hærra heldur en í heita djúpvatninu af hinum háhitasvæðunum. Talið er, að þetta megi rekja til seltu jarðsjávarins. Þessi munur á samsetningu getur leitt til annarra tær-

ingaráhrifa gufu úr jarðsjónum á járn, og er ekki æskilegt að hafa til hliðsjónar reynslu við Námafjall, hvað viðvíkur endingu á pípum, er gufa streymir um.

Tafla 3.4.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  og útreiknað pH í jarðsjó við innstreymi í borholur H 2 og H 8. Magn í ppm.

Borhola	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{S}$	pH
H 2 Reykjanes	940	36	4.8
H 8 Reykjanes	1450	26	4.8
N 3 Námafjall	244	166	7.0
G 8 Hveragerði	140	50	8.4

Búast hefði mátt við, að sýrustigið í H 2, sem er svo grunn, hefði reynzt herra en í H 8 vegna suðu. Lægra  $\text{CO}_2$  í djúpvatni í þessari grunnu borholu er að vísu merki um suðu, en hún er þó mjög lítil. Mögulegt er, að suða hafi átt sér stað í bergi neðan H 2, ef gufan og vatnið hafa ekki skilizt að, og streymi því blanda af gufu og vatni inn í borholuna. Enthalpíumæling með gasaðferð á H 2 bendir þó til, að svo sé ekki. Þetta þarf að athuga nánar.

Reynslan sýnir, að Na/K hlutfall í heitu vatni lækkar með auknum hita á vatninu. Þessi breyting hefur verið sett í samband við efnaskipti milli vatns, og steintegunda eins og montmorillonits, glimmers(mica), Na- og K-feldspata. Hið lága sýrustig á jarðsjónum á dýpi, þar sem hann hefur ekki náð að sjóða, leiðir til þess, að hann er ekki í jafnvægi við Na- og K-feldspöt, heldur K-mica (glimmer) (Mynd 3.21). Ekki hefur enn verið kannað, hvort útreiknað kalíamagn frá leysanleika K-mica sé svipað því, sem mælist í jarðsjónum,

en kalímagn hans er nokkru lægra en samsvarar uppleysanleika Na- og K-feldspata. Við suðu jarðsjávarins hækkar sýrustig svo, að jarðsjórinn ætti þá að vera í jafnvægi við Na- og K-feldspöt (sbr. ör á Mynd 3.21). Þess má geta, að heitt djúpvatn í Hveragerði ber einkenni þess að hafa soðið, en svo er ekki um djúpvatn við Námafjall og á Reykjanesi.

Kalí í ferskum sjó er aðeins 380 ppm, eða um 30% af því, sem er í jarðsjónum. Aukningin á magni kalís í jarðsjónum miðað við ferskan sjó er talin komin úr grannberginu við útskolun. Basalthraun innihalda oft aðeins 1000-1500 ppm kalí, svo að mikið gegnumstreymi á heitum jarðsjó um basalt getur valdið mikilli lækun á kalíinnihaldi bergsins, sem síðan leiðir til þess, að jafnvægi raskast og kalímagn jarðsjávarins verður lægra en búast má við fyrir þann hita, sem hann hefur. Talið er, að kalímagn í jarðsjó úr borholum, sem eru lengi í blæstri, geti minnkað af ofangreindum ástæðum.

Meðalinnihald kalís ( $K_2O$ ) í 25 sýnum af svarfi úr borholum í efstu 1000 m á Reykjanesi er um 7 sinnum hærri en í 19 sýnum á fersku bergi á svæðinu umhverfis Reykjanes (Tafla 3.5). Aukning  $K_2O$  í ummyndaða berginu er talin stafa

Tafla 3.5. Innihald  $K_2O$  í fersku og ummynduðu bergi af Reykjanesi.

	Fjöldi sýna	Meðalinnihald %	Magn - efri og neðri mörk - %
Ferskt berg	19	0.13	0.08 - 0.26
Ummyndað berg	25	0.91	0.20 - 6.35

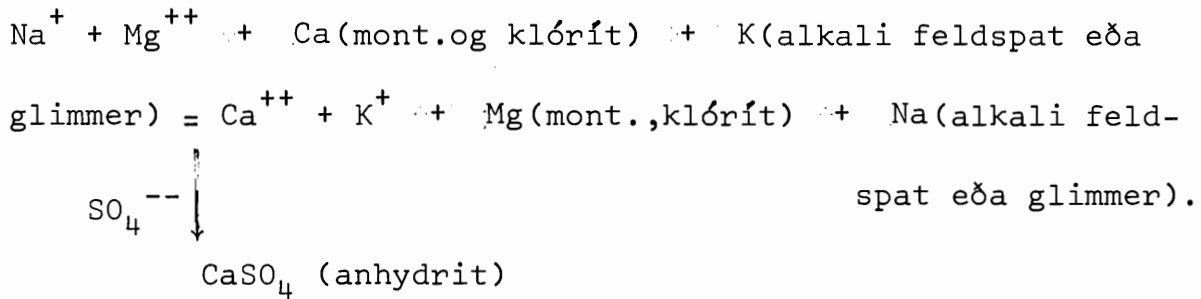
af útfellingu kalís úr jarðsjónum við kólnun. Ef heitur jarðsjór með 1700 ppm kalí tapaði 50% af kalíinnihaldi sínu vegna

kólnunar í efstu 1000 m, þyrfti þessi jarðsjór að hafa endurnýjazt 13 sinnum í uppstreymissvæðinu, til þess að gefa þá aukningu á  $K_2O$ , sem hefur mælt í ummyndaða berginu. Er þá gert ráð fyrir 15% poruhluta í því bergi. Sé gert ráð fyrir jafnvægi við Na- og K-feldspöt, samsvarar þessi lækun á kalíinnihaldi jarðsjávarins kólnun frá  $250^{\circ}C$  -  $200^{\circ}C$ , ef jarðsjórinn hefur sama natríuminnihald og ferskur sjór. Ef jafnvægi við mica (glimmer) á sér stað, yrði upphaflegi hitinn nokkru hærri.

Þessar niðurstöður benda til þess, að rennsli heits jarðsjávar um uppstreymissvæðið taki tíma, sem er a.m.k. einni stærðargráðu styttri en aldur jarðhitasvæðisins, og þar af leiðandi, að jarðsjórinn sé ekki setlögur, heldur sé um gegnumrennsli að ræða. Er það í samræmi við túlkun á seltu jarðsjávarins.

Þar sem talið er, að hið aukna magn kalís í jarðsjónum miðað við ferskan sjó, sé komið úr grannberginu við útskolun, er auðsætt, að neðan 1000 m þarf jarðhitakerfi, sem er a.m.k. sex sinnum stærra að rúmmáli en uppstreymissvæðið ofan 1000 m. Að öðrum kosti hefði ekki verið nóg kalí í berginu til staðar fyrir útskolun.

Magn súlfats í jarðsjónum er miklu minna en í ferskum sjó vegna útfellingar þess sem kalsíumsalts, en uppleysanleiki þess minnkar mjög með vaxandi hita. Lauslegir reikningar sýna, að jarðsjórinn er mettaður með tilliti til uppleysanleika anhydrits ( $CaSO_4$ ). Í samræmi við útfellingu súlfats hefur magn katjóna minnkað sem því svarar. Aftur á móti stafa breytingar á hlutfallslegu magni þessara katjóna, þ.e. natríums, kalsíums, kalís og magníums, frá ferskum sjó í jarðsjó að öllum líkindum af jónaskiptum milli sjávar og montmórálloníts, klóríts, og/eða alkálí-feldspats og glimmers í berginu:



Í Töflu 3.3 er gerður samanburður á samsetningu jarðsjávar í H 2, H 4 og H 8 ásamt einum hver á svæðinu. Leiðréttingar á magni efnanna í jarðsjónum vegna gufutaps hafa verið gerðar í töflunni, og er reiknað með gufutapi án varmataps frá síðasta jafnvægi við kvarz. Kemur í ljós, að magn allra efnanna er mjög svipað í jarðsjónum í öllum þremur borholunum og hvernum, nema hvað seltan er örlítið hærri í hvernum og H 2, sem er grunn (300 m). Þessi hærri selta er talin stafa af því, að útreiknaður kvarzhiti í þessum tveimur tilfellum er nokkuð lægri en raunverulegur hiti, þar sem suða hefst, vegna útfellingar kísils í bergi.

H 4 og H 8 eru í sitt hvorum enda jarðhitasvæðisins, en H 2 í því miðju. Niðurstöður efnagreininga úr þeim benda því sterklega til þess, að samsetning jarðsjávar á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi neðan 500-700 m sé mjög jöfn (hómógen), og að þær breytingar sem verða, stafi fyrst og fremst af hita. Með auknum hita hækkar kalí í jarðsjónum og sömuleiðis kísill, en eins og niðurstöður benda til, mun magn annarra efna breytast lítið, þótt hiti breytist frá 200°C til 300°C.

#### 3.4. Útfellingar kísils

Það hefur verið vel þekkt um nokkurt skeið, að magn kísils í heitu vatni á mörgum háhitasvæðum í ýmsum löndum stjórnast af uppleysanleika kvarz. Svo er einnig á Reykjanesi. Uppleysanleiki kvarz eykst mjög með hita á bilinu



200-300°C. Þegar vatn streymir upp borholu og sýður vegna lækunar á þrýstingi, verður vatnið yfirmettað af kísil með tilliti til uppleysanleika kvarz af tveimur ástæðum. Í fyrsta lagi á sér stað kólnun, og í öðru lagi gufutap. Hins vegar hefur reynsla sýnt, að í vatni yfirmettuðu af kvarzi fellur ekki út kvarz, heldur ópal. Uppleysanleiki ópals er miklu meiri en kvarz (Mynd 3.23). Útfellingar kísils í borholum eiga sér því aðeins stað, að yfirmettun af suðu og kólnun leiði til yfirmettunar á ópal.

Þegar suða á sér stað, hvort sem er í bergi eða borholu, hækkar sýrustig vatnsins. Leiðir þetta yfirleitt til þess, að hluti uppleystu kísilsýrunnar klofnar, og þarf meiri suðu og kólnun til að ná yfirmettun af þeim sökum en ella. Þessu er þó ekki svo varið á Reykjanesi, og stafar það af seltu jarðsjávarins.

Þótt heitt vatn verði yfirmettað af ópal, er ekki um það að ræða, að útfelling verði svo mikil, að jafnvægi náist. Þess vegna er ekki unnt að segja fyrir um hraða útfellinga á umræddum forsendum. Hins vegar er vitað, að selta örvar útfellingu og sömuleiðis óreglulegt streymi. Talið er líklegt, að útfellingar nái ekki að festast í sléttum pípum og fóðurrörum vegna rennslishraða vatns og gufu í þeim.

Á Mynd 3.23 er sýnt magn kísils í H 8, samkvæmt mælingu 6. des. 1970, og hvernig það eykst við suðu, og að mettun ópals næst við 5 ata þrýsting. Ef innstreymishiti væri 290°C, yrði jarðsjórinn mettaður af ópal við rúmlega 15 ata þrýsting. Nú hafa mælingar sýnt, að hiti í H 8 hefur aukizt frá því, að holunni var hleypt í gos. Mældist hitinn í botni 292°C 4. febrúar, en kvarzhiti reiknaðist 288°C út frá sýni, sem var safnað 5. febrúar. Auðvelt er að reikna, við hvaða þrýsting mettun við ópal næst, ef innstreymishiti jarðsjávar í borholu er þekktur. Er eðlilegt að gera ráð fyrir adiabatískri kólnun á vatninu við slíka reikninga.

Þar sem búast má við kísilútfellingu í H 8 við 15 ata og minni þrýsting, er auðséð, að kísilútfellingar munu valda vandamáli fyrir hugsanlega sjóefnavinnslu. Áætlað er, að mest af vinnslunni fari fram við 2. og 4. ata þrýsting. Auk þess bendir margt til þess, að við frekari boranir geti náðst hærri hiti en er í H 8, og þá eiga kísilútfellingar sér stað við hærri þrýsting. Ýmsir tæknilegir möguleikar eru fyrir hendi til þess að leysa vandamál kísilútfellinga, og væri æskilegt, að Rannsóknaráð ríkisins hefði forgöngu um að kalla saman viðkomandi aðila til að taka á þessum vandamálum fyrir hugsanlega sjóefnavinnslu.

### 3.5. Afl borhola

#### 3.5.1 Hóla 2

Aflmælingar voru gerðar á H 2 í september 1968 með mælingu á hita og krítiskum þrýstingi í útstreymisopi (16) (Sjá vinnsluferil - Mynd 3.24). Eftir að holan hafði blásið í u.þ.b. 4 sólarhringa, var heildarrennsli hennar um 31 kg/sek við  $P_0 = 4$  atg, ef reiknað er með  $200^\circ\text{C}$  innstreymishita. Heildarrennsli holunnar var meira fyrst eftir að hún var opnuð, og var enn minnkandi eftir 4 daga.

Í júlí 1969 voru enthalpia og heildarrennsli H 2 mæld með gasaðferð og krítiskum þrýstingi í útstreymisopi. Þá var hiti samkvæmt enthalpiumælingu  $190^\circ\text{C}$  og heildarrennsli um 26 kg/sek við  $P_0 = 5$  atg. Í janúar-júlí 1970 sýndi mæling á krítiskum þrýstingi í útstreymisopi, að heildarrennsli var 25-27 kg/sek á þessu tímabili, sé gert ráð fyrir sama innstreymishita og mældist í júlí 1969 eða  $190^\circ\text{C}$ . Afl H 2 hefur því ekki breytt mælanlega frá júlí 1969 til maí 1970, og líklegt er talið, að afl holunnar hafi minnkað í 25-27 kg/sek á fáum dögum eða vikum, eftir að hún var fyrst látin blása í september 1968 (Mynd 3.25).

Á Mynd 3.26 sést, að heildarrennsli H 2 hefur minnkað um nálægt 5 kg/sek, eða 20% frá miðju ári 1969 til janúar 1971. Samsetning jarðsjávarins í holunni hefur ekki breytt á sama tíma. Ekki voru gerðar þéttar aflmælingar á H 2 fyrir og eftir að H 8 var látin blása, en af lögun línuritsins á Mynd 3.26 mætti ætla, að afl H 2 hafi minnkað við það, að H 8 var látin blása. Þess vegna er ástæða til að fylgjast með aflri beggja holanna um tíma og sérstaklega, hvort breytingar eigi sér stað á annarri hvorri holunni, sé hinni lokað.

### 3.5.2 Hóla 4

Í október og nóvember 1969 voru gerðar 9 mælingar á heildarrennsli H 4 með mælingu á hita og krítiskum þrýstingi í útstreymisopi. Þegar fyrsta mæling var gerð 27. okt., var heildarrennsli holunnar um 21 kg/sek, en það minnkaði smám saman niður í um 18 kg/sek á 15 dögum, og hélzt síðan nálægt 18 kg/sek í um 10 daga, en þá lauk mælingum (Mynd 3.25). Holan blés út um 6" lóðrétt rör á aðaloka og var krítiskur þrýstingur í útstreymisopi mjög lágur, en ekki var aðstaða til að mæla  $P_o$ .

Tafla 3.6 Heildarrennsli og hiti í borholum 2 og 4.

H 2				H 4		
Dags.	Hiti °C	Heildarrennsli kg/sek	$P_o$ atg.	Dags.	Hiti °C	Heildarrennsli kg/sek
12.09.68	200	31	4,0	27.10.69	244	21,0
22.07.69	190	26	5,0	29.10.69	243	19.9
30.01.70	190	26	4,6	31.10.69	243	19.9
25.02.70	190	25.5	4,4	03.11.69	242	18.5
03.03.70	190	25.5	4,8	05.11.69	241	19.9
24.03.70	190	27	4,4	10.11.69	238	18.9
27.04.70	190	25	4,4	13.11.69	236	17.3
25.05.70	190	26	4,4	19.11.69	236	18.1
16.07.70	190	25	4,6	21.11.69	236	18.4

Í febrúar 1970 fór H 4 að blása á ný, eftir að hún hrundi í nóvember 1969. Gufu- og vatnsstreymi úr holunni var í fyrstu mjög lítið, en kísilsýrumagnið í vatninu gefur til kynna 237-240°C hita, sem bendir til þess, að vatnið sé komið úr æðinni á 700 m dýpi, en allt vatn kom úr þeirri æð, þegar holan blés í október og nóvember 1969. Í júní og byrjun júlí virðist heildarrennslið úr H 4 hafa aukizt nokkuð.

### 3.5.3 Hola 8

Síðan H 8 var hleypt í gos 24.október 1970, hefur afl hennar verið mælt reglulega (Mynd 3.26). Við þessar aflmælingar var Russel James aðferðin notuð, þ.e. mæling á krítiskum þrýstingi í útstreymisopi og enthalpíu. Enthalpía var reiknuð út frá kvarzhita, sem hefur aukizt frá 251°C til 288°C á tímabilinu 30. október 1970 til 5. febrúar 1971. Mestur hiti hefur mælt í botni holunnar 292°C (4. febrúar 1971). Margar vatnsæðar koma í holuna ofan við botn hennar, og er hiti þeirra nokkru lægri en botnhiti.

Heildarrennsli úr borholunni hefur minnkað um 15 kg/sek síðan henni var fyrst hleypt í gos (Mynd 3.26). Samtímis hefur meðalhiti á jarðsjó, sem streymir inn í holuna, aukizt úr 251°C í 288°C (Tafla 3.1, Mynd 3.20). Vegna hærri hita verður gufumyndun í holunni meiri og eykst þá streymisviðnám í holunni og útblástursútbúnaði. Talið er, að minnkun á heildarrennsli megi rekja til þessarar viðnámsaukningar, en ekki til lækunar á þrýstingi í innstreymisæðum.

Í byrjun febrúar 1971 var sett 10" útstreymispípa á holuna í stað 8", og mældist rennsli þá 78,5 kg/sek. Ekki er unnt að dæma um, hversu áreiðanleg sú mæling er, þar sem vera má, að nokkurn tíma taki að koma jafnvægi á heildarrennsli holunnar, vegna truflana samfara skiptingu á útstreymispípu.

Þess skal getið, að fyrstu 4 mælingarnar á aflri holunnar eru ekki eins nákvæmar eins og hinar 6 síðustu. Nokkrar sveiflur eru á heildarrennsli holunnar, sem taka yfir fáar mínútur eða fáa tugi mínútna. Síðustu 6 mælingarnar eru meðaltal margra mælinga gerðar á einum klukkutíma, en 4 þær fyrstu aðeins stakar mælingar.

Til þess að geta dæmt um heildarrennsli H 8 við langtímaavinnslu, er nauðsynlegt að gera reglulegar aflmælingar í a.m.k. hálf t. ári enn. Hafi verulegar breytingar á heildarrennsli átt sér stað á þeim tíma, er gert ráð fyrir, að lengri reynslutími sé nauðsynlegur, svo að unnt verði að segja fyrir um afl holunnar við langtímaavinnslu.

Í Töflu 3.7 er sýnt magn gufu og jarðsjávar í H 8 við mismunandi þrýsting, eins og gert er ráð fyrir í skýrslu Rannsóknarráðs ríkisins um hagkvæmni 250.000 tonna saltverksmiðju. Er þá miðað við heildarrennsli 78,5 kg/sek, eins og það mældist 5. febrúar 1971. Ennfremur er magn kísils, klórs og kalís í jarðsjónum við þennan mismunandi þrýsting sýnt í töflunni. Til samanburðar við efnasamsetningu jarðsjávar í H 8 (við 100°C) eru tölur úr skýrslu Rannsóknarráðs ríkisins, sem notaðar voru ásamt öðru sem forsenda

Tafla 3.7 Gufa, jarðsjór og efni í H 8 við mismunandi þrýsting.

Vinnslu- þrýst.ata	Jarðsjór kg/sek	Gufa tönn/klst	Cl <sup>-</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Ca <sup>++</sup> mg/l
2	51	100	29650	2020	1080	2480
4	54	91	28200	1980	1028	2358
17	59	60	24420	1717	890	2041
1	49	107	31100	2180	1130	2596
Forsendur fyrir 250.000 tonna verksmiðju við 1 ata.			30800	2200	(600)	2650

í athugun á hagkvæmni sjóefnavinnslu. Þessar tölur eru mjög svipaðar samsvarandi tölum frá H 8, nema hvað kísill er hærri, en við því var búizt. Það er talið líklegt, að með djúpri borun í mitt jarðhitasvæðið á Reykjanesi megi fá a.m.k. 300° C heitan jarðsjó. Á það skal bent, að borhola 8 er í útjaðri svæðisins, sé miðað við efstu 1000 m þess.

Vinnsluferill H 8 (Mynd 3.27) sýnir, að heildarrennsli hennar eykst ekki, þótt þrýstingur við aðaloka sé lækkaður niður fyrir 13 ata, og fer rennsli borholunnar ekki að minnka verulega, fyrr en þrýstingur undir aðaloka er meiri en 20 ata. Hér er gert ráð fyrir heildarrennsli 72,5 kg/sek við vinnslu við 2 og 4 ata.

## 4. BORANIR

### 4.1. Gangur Borverka

#### 4.1.1 HOLA 1

Á árinu 1956 var hafizt handa um könnun á seltumagni í heitu vatni á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi með borunum. Rannsaka skyldi seltumagn í grunnvatni á mismunandi dýpi (eðli hins núkallaða jarðsjávar). Könnun þessi fór fram á vegum Raforkumálaskrifstofunnar (nú Orkustofnun). Stað holunnar og rannsóknum réði Baldur Líndal, en hann starfaði þá hjá Jarðhitadeild Raforkumálaskrifstofunnar. Borunin var framkvæmd með höggbor, en hann er eins og nafnið bendir til frábrugðinn þeim borvélum, er síðar hafa borað á svæðinu. Heggur hann holurnar með meitli (mylur ekki bergið með borkrónu eins og snúningsborar) og notar ekki annað vatn en það, sem í jarðveginum er. Höggbor verður alltaf að bora í opinni holu, og stendur því berskjaldaður fyrir gosum.

Borunin fór fram á tímabilinu 12. apríl - 3. júlí 1956. Borunin gekk vel miðað við meðalborhraða höggbors. Meðalgangur var 4,7 m á bordag eða 3,5 m á verkdag. Þegar komið var í 12 m dýpi, var holan fódruð með 8" röri. Botnhiti var þá 89°C.

Í 16 m gaus holan í fyrsta sinn. "Holan gaus nokkuð miklu gosi, og kom upp mikið af leir, en gosið stóð stutt yfir". Í 45 m: "Holan gaus í dag einu sinni, og fylltist hún upp að fódurröri".

Við gosið hefur holan að öllum líkindum hrunið saman. Í 52 m: "Borun gekk illa í gær og í dag vegna þess, að holan

er hálf full af drasli, mól og leir, sem hreinsarinn nær ekki upp. Er að láta smíða hreinsara, sem ætti að ná þessu upp úr holunni."

Í 64 m var hitamælt í holunni: "Ekki er að marka hitamælingu vegna þess, að við veittum salthvernum í holuna og kólnaði hún mikið við það. Er ólíkt betra að hreinsa síðan, og yfirleitt að vinna við holuna."

Í 130 m: "Tók vatnið af holunni í gærkvöldi, og mældi hitann. Var hann 130°C í 130 m dýpi." Þegar komið var í 142 m dýpi, slitnaði borvírinn, og gekk erfiðlega að ná meitlinum upp. Í 154 m var hitamælt í holunni, og reyndist hitinn vera 185°C á botni.

Að lokum urðu bormenn að gefast upp, er komið var í 159 m. "Holan byrjaði að gjósa kraftmiklu gosi um kl.16:30 í dag, og varð við ekkert ráðið, vegna óhagstæðrar vindáttar og grjóttflugs. Biðum árangurslaust fram eftir kvöldi, en fórum þá til Reykjavíkur að ná í gúmmígalla og hjálma."

Daginn eftir var bornum náð upp úr holunni og borun hætt. Þannig endaði fyrsta tilraunin til djúprannsóknar á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi. Nú liggja frekari borframkvæmdir niðri til ársins 1968.

Árið 1962 voru holutoppur og frárennslisútbúnaður á holunni orðnir það lélegir, vegna tæringar og fúa, að hætta stafaði af. Frárennslid var í tréstocki undir veginn, er lá yfir jarðhitasvæðið. Grafið var niður með fóðurrörinu 1,5 m, og það skorið í sundur. Utan yfir stubbinn var komið fyrir víðara röri með þéttihring á milli, þannig að ekki lak meðfram, þótt holan blési (holan var látin blása meðan á viðgerð stóð). Rörin voru svo soðin saman og steipt að, upp undir topp. Rétt undir toppflans var svo tekinn leggur út, lagður undir veginn að nýju og um 15 m út fyrir vegarbrún. Síðan var loki settur á toppinn og holan látin blása út um þverlegginn. Með þessu var bægt frá þeirri hættu, að gufa



byrgði veginn á kafla.

Snemma sumars 1968 var ákveðið að bora aðra holu á Reykjanesi í allt að 600 m dýpi með Mayhewbor (snúningsbor).

Til þess að spara erfiðleika og kostnað, var ákveðið að notfæra sér H 1, og dýpka hana í allt að 500 m. Hafizt var handa 11. júní. Þegar til átti að taka, var frárennslispípan orðin það tærð, að ekki var hægt að notast við hana. Var steyppt upp í hana og síðan dælt steypu á holuna sjálfa úr 90 pokum af sementi. Er lokinn var opnaður, kom í ljós, að holan var með fullum krafti. Var nú enn steyppt í holuna úr 70 pokum af sementi, hvað dugði. Lokinn var tekinn af holunni, öryggisloka komið fyrir í staðinn og borun hafin.

Þar eð holan var fódruð með 8" röri í 12 m, var byrjað að bora með 7 7/8" krónu. Er skammt hafði verið borað, stöðvaðist krónan, og var talið, að samskeyti á fódurrörinu ylli því. Nú var borað með 7 3/8" krónu, en allt fór á sömu leið. Að öllum líkindum hafa krónurnar stöðvazt við samskeytin frá 1962. Nú var borað með 6 1/4" krónu. Þegar komið var í 3 m dýpi, gaus holan af fullum krafti, og kom mikill leir fyrst í stað.

Var þá fenginn steypublandari hjá Vitamálaskrifstofunni og steyppt í holuna úr 120 pokum af sementi og 9 pokum af spónum. Síðan var borað niður í 4,6 m, tekið ofan af holunni og grafið niður með fódringunum niður fyrir samskeytin frá 1962. Þar var fódurrörið skorið í sundur og flans soðinn á, steyppt að á nýjan leik, öryggisloki settur á og borun hafin.

Borað var með 7 3/8" krónu í steypu, en borinn stöðvaðist í 1,9 m, og gekk lítið úr því, eða um 15 cm á 4 tímum. Virtist sem skekkja væri í fódringunni, þar eð járnsvarf kom upp með skolvatninu.

Enn var skipt um krónu og borað með 6 1/4" frá 4,6 m í 15 m, en þá var komið niður úr steypunni og holan gaus

kröftuglega. Reynt var að kæfa hana með vatni, en það tókst ekki nema skamma stund í einu. Reyndist unnt að ná bornum upp í áföngum. Daginn eftir var ákveðið að yfirgefa þessa gömlu holu og bora annars staðar á svæðinu. Þá hafði verið eytt 11 verkdögum og kostnaður við verkið orðinn 330 þús.kr.

Það er af holu þessari að segja, að er liðið var sumarið og komið fram á vetur, kom upp vatn utan með fóðringunni og innan hennar líka og flæddi yfir veginn. Var reynt að stífla þessa framrás með möl og sandi o.fl., en tókst ekki. Holan er nú sem hver, og þar sem vatnið flæðir fram, er allt hvítt vegna kísilútfellingar, mjög sérkennilegt og fallett á að líta.

#### 4.1.2 Hóla 2

Þann 27. júní 1968 var byrjað á H 2, undirbúningi, plangerð og vatnslögn. 2. júlí var svo sjálf borunin hafin og fóðrað með 10" í 8,4 m. Næstu 11 dagar fóru í að forbora með 4 3/4" krónu í 47 m, og var steyppt úr 70 pokum af sem-enti vegna hruns o.fl. Tveir dagar fóru í viðgerð á bornum. Næstu 6 dagar fóru í að víkka holuna í 9 7/8", og fóðra með 8" röri, steypa það og ganga frá holutoppi fyrir áframhaldandi borun.

Næstu 6 daga var borað í 301 m með 4 3/4" krónu og síðan víkkað í 7 7/8" fyrir 6" fóðringu á næstu 3 dögum. Nú var holan fóðruð, og fóru 4 dagar í það, auk 2 daga helgi, er dælt var á holuna til kælingar, alls 6 dagar.

Þriðjudaginn 27. ágúst var holan dregin í gos með bullu. Kom hún fljótlega í kröftugt gos. Tekin voru vatns-sýni og ákveðið að bora dýpra. Um morguninn 28. ágúst var kominn 14 atg þrýstingur á holuna, og hafði hún þá verið lokuð frá kl. 20 kvöldið áður. Dælt var á hana köldu vatni í 12 tíma stanzlaust, en það dugði ekki til. Holan gaus svo

að segja strax og dælingu var hætt. Næsta dag var aftur dælt á holuna eins miklu magni og hægt var með dælu Mayhew-bors, en allt kom fyrir ekki. Nú var ákveðið að reyna að kæfa holuna með leðju. Blönduð var leðja úr geli og því dælt á holuna, eftir að hún hafði verið kæld fyrst með vatni. Fljótlega kom í ljós, að saltið í holunni eyðilagði gel-blönduna, þannig að þýðingarlaust var að dæla með Baroidi á eftir. Var nú ákveðið að hætta frekari tilraunum til dýpkunar á holunni. Þá voru liðnir 46 verk dagar frá því að hafizt var handa um borun H 2.

#### 4.1.3 Hóla 3 (Gufubor)

Vinna við H 3 hófst 14. október og lauk 22. nóvember 1968 (sjá Myndir 4.1 og 5.1).

Fyrstu 5 dagarnir fóru í flutning frá Reykjavík og uppsetningu borsins á borstað. Á 2 næstu dögum var borað fyrir 13 3/8" fóðringu, hún sett í og steyp. Nú var borað með 12 1/4" krónu í 243 m, holan rýmd og sett í hana 242 m af 9 5/8" fóðringu og hún steyp föst, alls 10 verk dagar. Sökum mikilla frosta tafðist verkið lítið eitt. Á næstu 7 dögum var borað með 8 3/4" krónu úr 243 m í 1166 m eða 923 m, meðalgangur 132 m á dag. Síðustu 2 dagarnir fóru í að taka saman og undirbúa flutning.

Alls fóru 27 verk dagar í að bora 1166 m, koma fyrir og steypa 42 m af 13 3/8" fóðringu og 242 m af 9 5/8" fóðringu.

#### 4.1.4 Hóla 4 (Gufubor)

Vinna við H 4 hófst 2. desember 1968 og lauk 17. desember 1968 (sjá Myndir 4.1 og 5.2).

Fyrstu 2 dagarnir fóru í flutning frá H 3 og uppsetningu. Á 3. degi hófst borun. Borað var í 44 m með 12 1/4"

og holan síðan opnuð í 17 1/2" og fóðruð í 38 m með 13 3/8" fóðringu, alls 3 dagar. Borað með 12 1/4" krónu í 246 m, holan rýmd, settir í hana 245 m af 9 5/8" fóðringu og hún steyp, 5 dagar. Á næstu 5 dögum var borað úr 246 m í 1036 m, eða 790 m, meðalgangur um 160 m á dag, en komst upp í 292 m einn daginn.

Síðasti verkdagurinn fór í að taka saman og undirbúa flutning. Alls fóru í verkið 16 verk dagar, og boraðir 1036 m, komið fyrir og steypdir fastir 38 m af 13 3/8" fóðringu og 245 m af 9 5/8" fóðringu.

#### 4.1.5 Hóla 5 (Gufubor)

Forboruð var síðari hluta desember 1968 með höggbor 18" víð hola, 21,5 m djúp. Borun lauk ekki fyrr en alveg undir mánaðamót, svo að ekki var hægt að hefja vinnu við borstæðið fyrr en í byrjun janúar (sjá Myndir 4.1 og 5.3).

Dagana 2. og 3. jan. var ekið mól í borstæðið og veg að því. Seinni daginn var einnig grafið fyrir kjallara og klöpp fleyguð til dýpkunar fyrir kjallarauppslátt.

Dagana 6.-10. jan. unnu nokkrir af starfsmönnum borsins við steypingu á kjallara og við jöfnun og þjöppun á borstæðinu, en aðrir unnu við vatnslögn og niðurtekt á bor.

Dagana 13.-17. jan. var borinn fluttur og reistur, og borun undirbúin. Við venjulegar aðstæður hefði átt að vera hægt að hefja borun á föstudag, en þar sem helgin var framundan og frost mikið, var ekki talið ráðlegt að hefjast handa. Rafstöð borsins bilaði einnig þennan síðasta verkdag vikunnar.

Borun hófst mánudaginn 20. jan. Borað var með 12 1/4" borkrónu í 51 m. Síðan var holan opnuð í 17 1/2". Þá var hún fóðruð í 40,5 m með 14" röri. Steyp var utan með röri

úr 125 pokum af sementi. Meðan á borun fyrir fóðurröri stóð, tapaðist allt borsvarf og skolvatn í sprungu, um 2,5 m undir yfirborði. Blanda þurfti geltappa eftir hverja boraða stöng (9 m) til þess að losna við borsvarfið. Borað var niður úr fóðurröri með 12 1/4" borkrónu. Skoltapi var haldið nokkuð í skefjum með tréspónum í skolvatninu. Í 108 m dýpi varð algjört skoltap. Borað var áfram niður í 112 m og síðan í 119 m, til þess að unnt væri að stífla þessa opnun með borsvarfi og tréspónum. Dælt var niður 150-200 pokum af spónum, en það virtist ekkert ganga.

Á mánudagsmorgun 27. jan. bilaði rafstöðin öðru sinni. Tafir urðu nokkrar á útvegum á annarri stöð, og var borinn rafmagnslaus til kl. 17 miðvikudaginn 29. jan., í 56 verkstundir. Vegna ljósleysis tafðist borun, en þó var steipt niður í 108 m úr 150 pokum af sementi. Þegar bora átti niður úr sementinu, fannst ekki vottur af því í holunni, og hafði það allt þvegizt úr. Þegar borað var niður, var mikið hröngl og hrun í holunni.

Næst var steipt í þetta sama dýpi úr 75 pokum og blandað í lögunina 10 pokum af tréspónum. Að 6 stundum liðnum var álíka skammti dælt niður, en niðurstaðan var sú sama, ekki fannst vottur af sementi í holunni. Enn var reynd þéttun á holu í 108 m, og nú var rennt niður 4 m<sup>3</sup> af sandlögun og nokkru síðar öðrum álíka skammti, en það sama gerðist sem fyrr, að allt tapaðist úr holunni.

Í næstu tilraun var mokað niður í holuna um 11 m<sup>3</sup> af perlumöl, og fylltist holan þá upp í 64 m. Munu því um 7,5 m<sup>3</sup> af perlumölinni hafa tapazt úr holunni. Nú þegar tekizt hafði að stífla holuna, lá næst fyrir að hreinsa hana niður í um 90 m, og steypa síðan og styrkja hrungjarna veggi hennar á bilinu 60-80 m.

Þegar dæling hófst, tapaðist allt skolvatn. Eftir að 100 pokum af spónum hafði verið dælt niður, kom vatnið upp,

en þegar borað var niður í mölina eða hrunið, tapaðist vatnið og borinn festist. Ekkert kom upp af þessu botnfalli, nema dælt væri niður þykkum geltöppum. Vegna hættu á festu var ákveðið að hreinsa holuna aðeins í 82 m og steypa í það dýpi. Steypt var úr 5 m<sup>3</sup> af sandsteypu. Þegar steypan var boruð út, reyndist hún góð úr 61 m í 65 m, en neðan 82 m mátti dæla henni upp. Voru þá um 14 klst. liðnar frá steypingu, og hrundi holan saman. Næst átti að steypa í holuna úr 100 pokum, en frost hafði hert mikið og var það um kvöldið og nóttina um ÷ 10° - ÷ 15°C. Kl. 16 daginn eftir dró heldur úr frostinu, og var þá steypt úr 95 pokum niður í 73-76 m. Þegar steypan var boruð út, virtist hún vera nokkuð góð úr 58 m til 73 m. Þar fyrir neðan var sandur og hrun.

Holan var hreinsuð niður í 88 m. Borað var gegnum hrun niður í 95,5 m, og tapaðist þá allt skolvatn, bor festist, og þurfti um 100 tonna átak til þess að draga borkrónuna upp úr hruninu. Nú var ákveðið að steypa úr 135 pokum af sementi og styrkja holuveggi frá 73 m til 90 m. Steypunni var dælt niður stengur í 83 m. Eftir 4 klst. var steypan komin í 58,5 m. Tafir urðu á steypingunni vegna mikils frosts. Steypan var boruð út niður í 86,5 m. Þá bilaði fæðidæla og þurfti að tæma vatnsleiðslu vegna frosts. Eftir viðgerð á fæðidælu var hafizt handa á nýjan leik. Í 96 m slitnaði efsta þorstöng. Fiskun gekk erfiðlega. Er skipt hafði verið um brotnu stöngina, var borað með geltöppum í 112 m, en þar tapaðist allt skol að nýju. Holan var þá hrein í 112 m.

Þar sem fjárveiting var nú á þrotum, var ákveðið að hætta við H 5 að svo stöddu.

#### 4.1.6 HOLA 6 (Mayhewbor)

Borun H 6 hófst 30. júní 1969, að undangengnum 3 daga undirbúningi (sjá Mynd 5.5). Borunin gekk mjög vel. Fyrsta daginn var borað í 10 m og 10" fóðring steypt föst. Næstu

9 daga var borað með 4 3/4" krónu í 303 m og tekinn kjarni í botni. Farið var í gegnum nokkra leka staði á efri lögum holunnar, en fljótlega tókst að steypa í þá. Nú var holan opnuð í 7 7/8" vídd niður í 223 m og undirbúið fyrir fóðrun. Holan var síðan fóðruð með 5" fóðringu í 222 m. Áfram var borað í 572 m (72 m lengra en áætlað var) og tekinn kjarni í lokin. Alls tók verkið 29 verkdaga.

#### 4.1.7 Hóla 7 (Mayhewbor)

Borun H 7 hófst 13. ágúst 1969 að undangengnum 2 daga undirbúningi (sjá Mynd 5.7). Þar áður hafði verið lögð vatnslögn frá svonefndri vatnsholu, er boruð var 1968 vegna Gufubors. Lögnin var um 1100 m löng. Fljótlega lenti borinn í erfiðleikum vegna hruns og festu. Borað var með 12 1/4" krónu í 10 m fyrir 10" fóðringu, og byrjaði þá strax að hrynja inn í holuna. Eftir fóðrun var borað áfram með 9 7/8" krónu í 38 m og þeir síðan fóðraðir af með 8" fóðringu. Nú var borað áfram með 4 3/4" krónu, og komizt í 52 m, en þá hvarf skolvatn og holan hrundi saman. Næstu 14 verk dagar fóru í borun, steypingar, festur og fiskun, og bættist 21 m við dýpi holunnar. Þann 6. sept. 1969 var ákveðið að hætta við holuna, og Reykjanesáætlun breytt þannig, að ekki skyldu boraðar fleiri grunnar holur á útjöðrum svæðisins. H 7 varð því 73 m á 21 verkdegi. Virðist þetta vera einkennandi gangur á borverkum í hraun- og sandlögum sem þessum.

#### 4.1.8 Hóla 8 (Gufubor)

Borun H 8 hófst 6. okt. og lauk 28. nóv., alls 40 verk dagar. Verkið var framkvæmt með Gufubor. Holan varð 1754 m djúp og kostnaður við borunina 6.2 Mkr. Þar af nam flutningskostnaður á Reykjanes og aftur til Reykjavíkur 550 þ.kr. eða um 9%. Gangur borunar er borinn saman við verkáætlun á Mynd 5.9. Í efstu 300 m gekk mun betur en áætlað var, og réði þar

miklu, að byrjað var í myndbreyttu móbergi, og auk þess að sandlög, sem valdið hafa erfiðleikum í öðrum holum, voru hér þétt vegna ummyndunar. Borun 300-900 m gekk mjög nærri áætlun. Í 925 m lenti borinn í mjög hörðum berglögum, sem boruðust illa, og gekk svo niður í 1100 m. Tapaðist þarna það forskot, sem unnizt hafði. Eyddust borkrónur ört á þessum kafla, og varð að fá sérstakar, harðar borkrónur með flugi frá Bretlandi til borsins. Reynt var að taka kjarna í 746 m og 1055 m, en hann náðist ekki. Borun 1100-1750 m gekk nokkurn veginn eftir áætlun, ef undan er skilin töf í 1200 m vegna brots á borstöng. Kjarni náðist í 1374 m, og reyndist hann vera úr móbergstúffi. Í botni var enn reynd kjarnataka, en hún mistókst. Holan var fóðruð með 9 5/8" fóðringu, steyptri í 297 m. Neðst í þá fóðringu var svo hengd 7 5/8" fóðring niður á 825 m dýpi. Var það 225 m lengra en áætlað var og dýpsta fóðring til þessa hér á landi. Við val á dýpt fóðringar var höfð hliðsjón af borhraða og fóðrað niður fyrir alla kafla með borhraða meiri en 20 m/klst.

Unnið var á þrískiptum vöktum, sem venja er á Gufubor, 5 daga á viku. Gistirými og mótuneyti var fengið hjá Hraðfrystihúsi Grindavíkur. Áhöfn Gufubors er 15 menn.

#### 4.1.9 Aðgerðir á holu 4 (Mayhewbor og Gufubor)

H 4 var boruð með Gufubor í nóv. og des. 1968, vídd 8 3/4" í 1030 m og fóðruð með 9 5/8" fóðringu í 244 m. Við borun varð 20 l/s skoltap í 700 m, 23 l/s skoltap í 820 m og algjört skoltap (> 35 l/s) í 980 m. Hiti eftir borun reyndist hæstur 150°C í 90-100 m. Þar fyrir neðan kólnaði snögglega í 40-50°C á 150-200 m, síðan var hiti jafnt vaxandi í 70°C í 700 m, en stökk þar í 80°C og var þaðan nokkuð jafn til botns, 87°C í 1000 m. Þessi hitaferill vakti nokkra furðu, þar sem H 3, aðeins 375 m frá H 4, var um 220°C í 250 m og hiti jafnt vaxandi í 286°C í 1160 m. Þótti ólíklegt, að hitaferill H 4 sýndi eðlilegan



berghita, heldur hlyti að vera kalt niðurrennsli í holunni. Djúpsýni sýndu, að ferskur sjór var í allri holunni frá enda fóðurrörs niður að botnæð, en við borun var notað ósalt vatn, og hefur sjórinn komizt inn í holuna eftir að borun lauk. Út frá þessum gögnum var dregin sú ályktun, að kaldur sjór streymdi niður með fóðurröri, inn í holuna við enda fóðurrörs og niður til botns, þar sem hann færi út í 980 m.

Í holunni eru lengerð lög með borhraða 40-60 m/klst frá 260-530 m, í 530-550 m er harðari kafli með borhraða um 5 m/klst, síðan linari lög með borhraða 20-30 m/klst niður í 630 m, en á 630-780 m er borhraði 10-20 m/klst. Síðan er borhraðinn yfirleitt minni en 10 m/klst. nema í 870-910 m. Þar er hann um 10-20 m/klst.

Ekki þótti ráðlegt að stöðva niðurrennslið í holunni, fyrr en unnt væri að fóðra hana með 7 5/8" fóðringu a.m.k. niður á 540 m, því að mikil hætta þótti á hruni í lengerð-ustu lögunum. Var beðið í hálf t ár eftir fóðurrörum frá Þýzkalandi, en síðan ráðizt í viðgerð og fóðrun með Mayhewbor. Til frekara öryggis var ákveðið að láta fóðurrör ná niður á 638 m, en þar fyrir neðan var borhraði undir 20 m/klst. Jafnframt var ákveðið að steypa þessa fóðringu í holuna til þess að koma í veg fyrir kalt niðurrennsli utan með fóðurröri. Í viðgerð var fyrst steypdur tappi í 260 m og niðurrennsli stöðvað. Vatnsborð í holunni hafði verið í 96 m, en steig nú upp í 28 m. Að mati bormanna var innrennsli við fóðurrörsenda um 5 l/s og má ætla, að þetta rennsli hafi verið niður eftir holunni þá 9 mánuði, sem liðu frá því að borun lauk, þar til viðgerð hófst. Viðgerð og fóðrun lauk 29. sept. 1969. Var þá lóðað á botn í 1020 m.

Hitamælingar voru gerðar 6. okt. og 13. okt. Sýndu þær, að hiti hafði vaxið mjög og var kominn yfir 150°C á 300-950 m dýpi, hæstur um 250°C í 700 m. Á 200-300 m var hinsvegar enn mikil kæling, hiti neðan við 60°C. Til þess að

hjálpa holunni í gos, var leidd í hana vatns- og gufublanda úr H 2. Eftir 60 tíma hitun náðist holan í gos 20. okt. Var rennsli úr holunni um 20 kg/s, sem kemur vel heim við skoltap 20 l/s í 700 m. Aðrar æðar voru enn ekki virkar, og var það skýrt svo, að þær, og þó einkum botnæðin, hefðu tekið við köldu niðurrennsli í 9 mánuði og skolvatni í viðgerð, og þyrftu lengri tíma til að ná fullum hita en æðin í 700 m. 30. okt. var holan hitamæld í botn, sem reyndist þá vera á 990 m. Hafði uppstreymið þá hitað kalda kaflann í 200-300 m í 180°C, en neðan 700 m hafði kólnað um 20°C milli 700 og 800 m og um 70°C þar fyrir neðan. Var þessi kólnun bergsins skýrð svo, að gosæðin í 700 m drægi með sér kaldari sjó úr 980 m. Hækkun botns úr 1020 m í 990 m benti til þess, að hrunið hefði úr veggjum holunnar. Hinn 5. nóv. var holan enn hitamæld, en nú komst hitamælir ekki nema í 778 m vegna fyrirstöðu í holunni. Virtist enn hafa hrunið úr veggjum holunnar, og mátti sjá dreif af leir og mylsnu, sem komið hafði með vatni upp úr holunni. Ekki dró úr rennsli holunnar við þessa fyrirstöðu, og kólnaði bergið enn neðan við 700 m, sem benti til þess, að vatn kæmi enn að neðan gegnum stífluna.

Gerðar voru ráðstafanir til að meitla fyrirstöðuna úr holunni, og átti sú aðgerð að fara fram 27. nóv. Þegar komið var að holunni, var hún þögnuð, og var stífla í 580 m, þ.e. inni í 7 5/8" fóðurröri. Í loka og útstreymisbúnaði var leir og leðja, og virtist holan hafa stíflazt af hruni úr veggjum. Reynt var að höggva tappann með meitli, en það bar engan árangur.

Þar sem enn hafði ekki fengizt vitneskja um afl og efni í neðri æðum holunnar, var ákveðið að freista þess að hreinsa holuna og fóðra hana með gataðri fóðringu í 1030 m. Skipti þar mestu, að fá úr því skorið, hvort æðar í 950 m hitnuðu eða héldust kaldar.

Um þetta leyti var Gufubor að ljúka borun H 8, og var

hann fenginn þaðan til viðgerðarinnar. Borinn flutti á holuna 1. des. Innanmál  $7 \frac{5}{8}$ " fóðurrörsins er 7", og nær það í 638 m. Borinn notaði borstengur með 6" tengistykkjum,  $6 \frac{1}{8}$ " álagsstengur og  $6 \frac{5}{8}$ " krónu. Neðan við enda fóðurrörs var holan upphaflega boruð með  $8 \frac{3}{4}$ " krónu og ætti vídd hennar þar yfirleitt að vera um 9", en nokkru meiri í linari lögum, þar sem borstengur hafa slegizt í veggina og víkkað holuna. Þar sem hrunið hafði úr veggjum holunnar, var vídd hennar að sjálfsögðu mun meiri. Ljóst var, að með aðeins  $6 \frac{5}{8}$ " krónu mundi borinn eiga erfitt með að mylja hrunið nógu smátt til þess að svarfið skolaðist upp með borstöngum um fóðurrörið, en þess var vænt, að með endurtekinni borun og steypingum á víxl yrði unnt að mylja hrunmola og hreinsa holuna smám saman. Þá var talið líklegt, að samfelld stífla næði aðeins niður á 778 m, þar sem fyrirstaða myndaðist fyrst í holunni, áður en mest hrun varð.

Stíflan í fóðurröri í 580 m reyndist 10 m löng. Aftur var komið í stíflu í 637-640 m, svo í aðalhrunið í 724 m. Hreinsun gekk mjög illa. Bornum gekk ákaflega erfiðlega að koma frá sér svarfi, vegna hins mikla munar á vídd borkrónu og holu. Þegar borinn var kominn í 756 m, tapaðist mikið skolvatn. Var þá reynt að þétta holuna með spónum, og tókst það.

Nú var ákveðið að steypa í þennan hluta holunnar til auðveldunar á skolun. Steypt var frá 746 m í 656 m, eða 90 m kafla, úr 200 pokum af sementi. Þar sem 200 pokar af sementi fylla  $8 \text{ m}^3$ , hefur meðalvídd holunnar á þessum kafla verið rúmar 13". Af þessu sést, hversu erfitt er að gera við hrundar holur, þar sem hlutfallið milli krónuvíddar og holuvíddar er svo óhagstætt. Þó að hægt hefði verið að fara með  $8 \frac{3}{4}$ " krónu í holuna til viðgerðar (sú vídd, sem holan er upphaflega boruð með), hefði það ekki bætt að mun. Skolvatnið heldur ekki nægum hraða til að koma upp með svarfið á þeim stöðum í holunni, sem víddarhlutfallið er svona mikið, og því alltaf hætta á botnfalli ofan á krónuna. Það sem gert er í þessum tilfellum, er að bora og steypa á víxl.

Nú var borað niður í 774 m og voru stöðugir erfiðleikar vegna hruns á krónu og festu. Í hvert skipti, er stöng var bætt í, kom 7-8 m botnfall í holuna. Aftur var steyppt frá 766 m í 681 m, úr 120 pokum. Strax og búið var að bora í gegn um þessa steypu, gekk borkrónan vel niður, en sífellt hrundi að henni, og reyndist eigi unnt að skipta um stöng. Þá var krónan tekin af og dælingarhaus settur niður og dælt bæði í gegnum stengur og eins meðfram þeim. Fékkst þannig upp töluvert af svarfi. Gæta varð þess að fara ekki of djúpt í svarfið með hausinn, því að þá tapaðist skolvatn. Meðan á þessu stóð, festist borinn enn einu sinni, en náðist laus aftur með um 65 tonna átaki. Ákveðið var að steypa í þessa 4-5 m, er höfðu skolast hreinir. Er steypingu var lokið og átti að draga stangarenda upp úr steypunni, meðan hún harðnaði, festist stangarlengjan eftir að teknir höfðu verið upp 16 m. Við þessari festu var brugðizt á venjulegan hátt, tekið á og reynt að snúa (átak yfir 100 tonn), en ekkert gekk. Nú voru dælur tengdar við og dælt bæði niður stengur og meðfram, til að dæla burt steypunni, svo að hún festi ekki neðsta hluta stangarlengjunnar, er hún harðnaði. Jafnframt var reynt að losa borinn með öllum mögulegum ráðum, en allt kom fyrir ekki.

Nú var kallað til fundar með verkstjórum Gufubors, deildarstjóra Jarðborana ríkisins, umsjónarmönnum Reykjanes-áætlunar og öðrum þeim mönnum innan OS, er gætu orðið til lausnar vandans.

Verkstjórar Gufubors nefndu þá möguleika, sem gætu valdið svo mikilli festu, og voru þeir ræddir hver af öðrum.

1. Að ekki hefði tekizt að eyðileggja steypuna, þannig að borstengur hefðu steypzt fastar.
2. Að hrunið hefði að stöngunum á óvenju löngum kafla.
3. Að brotnað hefðu stór stykki úr fyrri steypingum og hrunið að stöngunum.

4. Að neðsti hluti (0,5 m) 7 5/8" fóðringar, sem var ósteyptur, hafi smám saman teygzt, nuddast og vöðlast um stengurnar, eða brotnað af, við síendurtekna upp- tekt og niðursetningu á borstöngum (innanmál fóðringar 7", utanmál borstanga 4 1/2", utanmál tengimúffa 6") og ylli festingu.

Þau atriði, sem gengið var út frá, voru þessi:

1. Eftir að steypingu lauk, hafði tekizt að lyfta stöng- unum rúma 16 m, og sat þá allt fast.
2. Ekki reyndist unnt að snúa borstöngum.
3. Tekið hafði verið á stöngunum þrisvar með yfir 100 tonna átaki.
4. Skolvatn gekk greiðlega bæði niður stengur og niður holuna utan stanga.

Við umræður beindist athyglin meir og meir að 4. mögu- leikanum. Möguleiki 1 var afskrifaður fljótlega, þar eð tekizt hafði að lyfta stöngunum 16 m strax, og síðan var steypunni dælt í burtu (þynnt út) um leið og varð vart við festuna.

Þó að ósteyptur væri um 14 m kaflí í holunni neðan við fóðringu niður að fyrstu steypu, þótti mjög ólíklegt að hann hefði skyndilega hrunið, enda ætti hann ekki að stand- ast yfir 100 tonna átak. Þar með var horfið frá möguleika 2. 3. möguleiki var afskrifaður á svipuðum forsendum.

Svo sem áður er sagt, benti margt til þess, að um 4. möguleikann væri að ræða. Við upptekt og niðursetningu höfðu bormenn rekið sig á smá festur, þó aðallega við upptekt. Þótti þetta benda á það, að stangarmúffurnar kræktust undir fóðringarendann. Sé það einnig athugað, að neðstu 40-50 cm af fóðringunni voru ósteyptir og með 2 frekar stórum götum, eru allar líkur til þess, að sá hluti hafi lamizt til og

beyglazt. Þar sem hægt var að lyfta stöngunum um 16 m, áður en þær festust, leiddi það líkur að því, að þessi hluti fóðringarinnar hefði losnað frá og fallið utan um stengurnar niður á steypuna. Svo þegar tekið var upp, hafi þessi kragi krækzt á múffu og lyfzt upp í fóðringarendann, og við hin gífurlegu átök festst í honum. Þannig væri einskonar járnflækja föst uppi í fóðurrörsendanum. Þar eð allar líkur bentu til að festunni væri þannig varið, og engar tilraunir til losunar báru árangur, var ákveðið að sprengja í stangarlengjunni við fóðringarendann.

Vegna þess að slíkar sprengingar höfðu ekki farið fram hér á landi áður, var haft samband við Ólaf Gíslason og Co. h/f (innflytjandi á sprengiefni), um tilhögun og útbúnað á hleðslu, svo og hita- og þrýstipólmark dýnamits og hvellhettu. Eftir að hafa ráðfært sig við framleiðanda, gaf fyrirtækið eftirfarandi upplýsingar:

1. Hvellhetta þolir a.m.k. 70°C.
2. Ef sprengja skal dýnamit í yfir 20°C umhverfi, skal gera það svo fljótt sem auðið er, þar sem umkristöllum hefst í efninu við það hitastig, er breytir eiginleikum þess til hins verra.
3. Sjálfsprengihætta er eigi í dýnamiti undir 150°C.
4. Óhætt mun að sprengja á 7-800 m dýpi án sérstakra ráðstafana (þarf ekki að setja dýnamitið né hvellhettu í þrýstihylki) annarra en þeirra, að staðurinn sé ekki of heitur, né sú leið, sem hleðslan fer um á sprengistaðinn.

Ákveðið var að sprengja lítið fyrst, rétt til að losa um samsetningu og freista þess að skrúfa í sundur. Samkvæmt ráðleggingum framleiðanda var byrjað með 1/3 úr túbu. Það gekk ekki. Var nú aukið við hleðsluna smám saman, og í lokin var ákveðið að freista þess að sprengja í sundur stöng. Settar voru niður 10 túbur af venjulegu dýnamiti og þær

sprengdar. Ekki tókst það. Til aðstoðar við sprengingarnar var fenginn vanur sprengingamaður. Átti hann í fórum sínum slagharðara dýnamit, sem hann nefndi "slagbjörn". Væri það notað til að splundra klettum og stórum steinum, án þess að bora í þá holur. Daginn eftir kom hann með það efni, og voru settar niður 7 túbur af því. Það dugði til að splundra í sundur borstöng. Var sprengt á 620 m dýpi. Sprengingarnar voru framkvæmdar á þann hátt, að hleðslan var fest á enda mælikapals mælingabíls og kapallinn tengdur við hvellhettuna. Síðan var allt vafið með einangrunarbandi. Við hverja sprengingu skemmist ca 0,5-1 m af kaplinum. Til að tendra hvellhettuna var notuð 220V spenna úr rafkerfi Gufubors.

Eftir að tekizt hafði að sprengja í sundur stöngina, var tekið upp, borinn tekinn niður og fluttur til Reykjavíkur. Eftir eru í holunni um 130 m af borstöngum. Alls fóru 14 verk dagar í þessa síðustu aðgerð.

#### 4.1.10 Fóðrun H 8

Þegar borun H 8 lauk 22.nóv. 1969, var hún fóðruð í 825 m dýpi með 7 5/8" fóðurrörum, er hengd voru innan í 9 5/8" festilfóðringu á 275 m dýpi. Við val á fóðringardýpt var stuðzt við borhraðalínurit og fóðrað niður fyrir alla kafla, þar sem borhraðinn var meiri en 20 m/klst.

Vegna slæmrar reynslu af hrúni H 3 og H 4 í þann mund, er borun H 8 lauk, var ákveðið að láta holuna ekki blása fyrr en hún hefði verið fóðruð í botn með raufuðum rörum (sjá 1.7, 4.1 og 4.2.2). Til þess þurfti að útvega fóðurrör erlendis frá og framkvæma raufun þeirra hér.

Í des. 1969 var leitað tilboða í raufuð rör erlendis. Reyndust þau svo dýr, að boðin var út raufun röra hér heima, og varð hún mun ódýrari. Var ákveðið að flytja inn 900 m af heilum 7 5/8" rörum og láta raufa 350 m af þeim hér. Vélsmiðjan Héðinn sá um það verk. Raufuðu rörunum var svo raðað

í holuna við innstreymisæðar á fjórum völdum köflum, en annars staðar sett óraufuð rör (sjá Mynd 4.2). Verkið var svo framkvæmt dagana 8.-14. sept. 1970 með Gufubor og gekk eins og bezt varð á kosið. Tekin voru upp í 14 m lengjum þau 7 5/8" rör, er sett voru í holuna árið áður, alls um 550 m. Jafnóðum voru endar þeirra fasaðir og rörin undirbúin til niðursetningar í holuna aftur.

Alls voru settir 1425,20 m af 7 5/8" fódurrörum í holuna á 36 klst. Röralengjan var hengd á 260 m dýpi neðan í 9 5/8" festilfóðringuna með þar til gerðum lás.

Er verkinu var lokið og borinn fluttur af staðnum, var holan látin standa óhreyfð í rúman mánuð, meðan hún var að ná eðlilegum hita, en vatni var dælt í hana meðan á verkinu stóð.

19. okt. 1970 var farið á Reykjanes með útbúnað til þess að ganga frá holunni til blásturs og ná henni í gos. Er búið var að setja upp blásturspípu, var dælt lofti á holuna og vatnsborð hennar rekið niður. Vatnsborðið var í 40 m dýpi, og þurfti að reka það niður í 200 m og halda því þar í 12 tíma. Erfiðlega gekk að fá loftdæluna til að vinna á þessum þrýstingi (16 atg). Þá var farin sú leið, að fljótandi kolsýra var fengin á kútum frá Kolsýruhleðslunni og henni hleypt í holuna. Náðist fljótlega sá þrýstingur, er óskað var, og laugardaginn 24. okt. kl. 10 að morgni var holunni hleypt í gos. Var þá liðið rúmt ár frá því, að borun hennar hófst.

#### 4.2 Bortæknileg vandamál

Við framkvæmd borana á Reykjanesi komu ýmis vandamál skýrt í ljós. Komast má hjá sumum af þessum erfiðleikum, ef aðstæður eru vel þekktar á svæðinu. Þó er nauðsynlegt að vinna að endurbótum á núverandi bortækni, því að aðstæður geta verið slíkar, að þessi vandamál verði ekki sniðgengin. Boranir



verða dýrar og geta jafnvel mistekizt með öllu. Hér er vakin athygli á nokkrum þessara vandamála, ef það gæti orðið hvatning til umhugsunar um þau og leitt til skipulagðra athugana um úrbætur.

Þar sem boranir við svipaðar aðstæður og á Reykjanesi fara í vöxt á komandi árum, virðist full ástæða til að gera fræðilega athugun á þessum vandamálum með hópvinnu sérfræðinga í bortækni, jarðfræði og verkfræði, og hefja skipulegar tilraunir til að laga hefðbundnar aðferðir og nýjungar að íslenskum staðháttum.

#### 4.2.1 Borun í lek hraun og sandlög

Borun í lek hraun og sandlög er ákaflega erfið fyrir snúningsbora. Reynt hefur verið að komast hjá þessu vandamáli með höggbor eða að velja holunni stað á ummynduðu bergi (sbr. H 8), þar sem sandlög eru samlímd og sprungur þéttar. Góð dæmi um erfiðleika þessa er að finna í borsögu H 5 og H 7 á Reykjanesi, borun Norðurbors við Stapafell og í Námafjalli. Í megindráttum er vandamálið í því fólgið, að skolvatn tapast, svarf kemur ekki upp, laus lög hrynja á borstengur, sandur sezt í skápa, meðan borað er, en rennur í holuna, ef dæling er stöðvuð, og sezt að stangalengju eða í botn, þannig að erfitt er að bæta í stöng. Helztu úrræði hafa verið að skjóta svarfi upp með geltöppum, styrkja holuna með endurteknum steypingum eða bora hana fyrst með grönnum stöngum og þrýsta steypu út í tap- og hrunstaði, áður en borað er í endanlega vídd. Reynslan í dag sýnir, að engin af þessum aðferðum er fullnægjandi.

Lengi hefur verið rætt um að dæla grófari steypu á hættustaði þessa með þar til gerðri dælu (grautun), en ekki hefur orðið af því enn. Þegar þess er gætt, að 100 m hola við þessar aðstæður getur kostað 2,5 Mkr, virðist full ástæða til, að hafnar verði skipulegar tilraunir til lausnar

Þessu vandamáli. Gæti þar orðið samvinnuverkefni sérfræðinga í bortækni, jarðfræði, verkfræði og steyputækni.

#### 4.2.2 Hrunhætta og viðgerð á hrundum holum

Árin 1958 og 1960 boraði Gufubor 8 holur í Hveragerði, og voru þær 300 m til 1400 m djúpar. Engin þeirra hola er fódruð neðar en 300 m. Flestar þeirra hafa blásið tvisvar samfellt í 6 mánuði og ekkert hrun orðið. Um sama leyti var borað í Krísuvík og fódrað álíka djúpt. Gufugos fékkst úr 2 holum, en þær stífluðust fljótlega af hruni. Við Námafjall hrundi H 3 í blæstri, og hefur reynzt nauðsynlegt að fódra þar um 600 m til að koma í veg fyrir hrun. Á Reykjanesi hafa H 3 og H 4 hrundið vegna of stuttrar fódringar. Almennt virðist nú mega reikna með því, að á háhitasvæðum verði að fódra holur niður í gegn um móbergsmyndun og jafnvel í basaltmyndun, ef í henni eru þykk millilög úr móbergi.

Hætta á hruni úr veggjum hola virðist undir ýmsu komin. Hættan er mikil í mjúkum jarðlögum með miklum borhraða. Hún er einnig háð gerð jarðlaga og er meiri í sundurleitum lögum, t.d. þar sem linur millimassi er milli korna. Hættan er þannig meiri í setum og bólstrabergi en ólagskiptri breksíu. Hættan vex, ef vatnsæðar eru í mjúkum lögum. Mest er hún talin vera, þegar mikið þrýstifall er úr æðinni inn í holuna, t.d. þegar vatn sýður í bergi á leið sinni inn í hana. Draga má úr hrunhættu, ef hola er látin vinna á háum þrýstingi, en það kemur að sjálfsögðu niður á afköstum holunnar.

Viðgerð á hrundum holum hefur reynzt ákaflega erfið og varasöm. Ef holan er hrugin á löngum kafla, má búast við því, að verkið reynist bornum erfiðara en borun holunnar í upphafi. Þess vegna er varasamt að ætla borum að vinna að viðgerð eða hreinsun við erfiðari aðstæður en við borun nýrrar holu. Ef holubúnaður er í fullkomnu lagi og fódurrör

heilt og steyppt og boruð vídd holunnar þar fyrir neðan ekki meiri en innanmál fóðringar, mætti búast við, að borinn réði við viðgerð. Þó eru enn erfiðleikar, þrátt fyrir þessar aðstæður, vegna mikillar skápamyndunar af hruninu og skoltapi gegnum stífluna niður úr holunni. Hingað til hefur viðgerð farið fram á þann hátt, að steyppt hefur verið í skápa og hrunið síðan borað út. Hefur þetta verið endurtekið, allt niður í eins metra færslu í einu, þar til komizt hefur verið í gegnum hrunið eða borinn festst svo illilega, að ekki var talið fært að halda áfram. Reynsla sýnir, að séu aðstæður lakari en í borun holunnar í upphafi, er mjög ólíklegt, að viðgerð heppnist.

Að sjálfsögðu ber ætíð að hafa í huga, er ráðizt er í viðgerð á holu, að kostnaður má ekki fara fram úr verði samþarilegrar nýrrar holu. Ekki er ljóst, hvaða úrræði eru til endurbóta, en þó mætti leita að áhrifaríkari steypingaraðferðum.

#### 4.2.3 Steyping fóðringa og slit á fóðringu

Steypingar á löngum fóðringum á háhitasvæðum hafa oft mistekizt. Aðalorsök er sú, að steypan hefur farið út í æðar og ekki náð að koma upp með fóðurrörinu. Steyppt er þá ofan frá með fóðurröri, og myndast stundum við það ósteypptur kafli, þar sem hætta er á, að fóðringin slitni. Skiptir miklu máli, að holan sé þrýstiprófuð og örugglega þétt, áður en fóðringin er steyppt. Einnig hefur hár hiti oft valdið örðugleikum. Stundum hefur steypan harðnað of fljótt, þannig að hún hefur ekki náð að komast á staðinn. Í öðrum tilfellum virðist hún alls ekki hafa harðnað. Virðist vera full þörf á rannsókn á steypu til fóðrunar og hentugum blöndunarefnum í hana. Einnig þyrfti að rannsaka þenslueiginleika steypu og seigju steypu við hitaþenslu fóðurröra. Leitað hefur verið til Rannsóknarstofnunar Byggingariðnaðarins með þetta vanda-mál, og er þörf frekari rannsókna. Sækja mætti reynslu til

annarra þjóða, svo sem Nýsjaðlendinga o.fl. Nánar er fjallað um þessi efni í skýrslu (25).

#### 4.2.4 Skolvatn og borleðja

Sú tegund borleðju (gel), sem keypt hefur verið hingað til, er ónothæf, blandist hún sjó að einhverju magni. Hefur þetta valdið erfiðleikum á Reykjanesi, þar sem sjór er í öllu bergi. Búast má við svipuðum erfiðleikum við boranir annars staðar á Reykjannesskaga, t.d. Grindavík og e.t.v. Krísuvík. Virðist ástæða til að kaupa sjógel til notkunar á svæðum sem þessum.

Á það hefur reynt á Reykjanesi, að ekki er til rennandi skolvatn, og hefur því verið dælt með djúpdælu að bornum. Ef um frekari borframkvæmdir verður að ræða á Reykjanesi, þarf að bora fleiri vatnsholur og auka dælukost. Væri æskilegt, að Jarðboranir ríkisins fengju sér djúpdælur til þessara nota, sem afköstuðu þörfum Gufubors. Nægilegt skolvatn ræður miklu um gang borunar og öryggi í borun, einkum í holum með miklu skoltapi, eins og búast má við á Reykjanesi.

#### 4.2.5 Bortæki

Gufubor hentar ágætlega til vinnsluborana á Reykjanesi, en hann getur borað þar 1800 m holur. Ef fara á dýpra, verður að útvega bornum grennri borstengur.

Við rannsóknarboranir á jöðrum svæðisins hefði þurft allt að 1000 m borun. Gufubor getur framkvæmt það verk, en minni bor, sérstaklega til þess ætlaður, gæti framkvæmt verkið mun ódýrar. Þetta á einnig við um rannsóknarboranir á háhitasvæðum, sem áætlaðar eru á næstu árum.

Vegna tilrauna við boranir í lek hraunlög og laus sandlög þyrfti að útvega grautunardælu.

Við steypingar á fóðringu hefur þurft að átla meðalvidd holu og ákveða steypumagn eftir þeirri áætlun. Ef þessi áætlun er röng, getur fóðrun mistekizt eða mikið magn af steypu farið til spillis. Hjá þessum örðugleikum mætti komast, ef til væri holukannari, er mældi þvermál holunnar.

Kjarnataka með Gufubor í H 8 tókst aðeins í eitt skipti af fjórum, og eyðilagðist útbúnaðurinn síðast, er reynt var. Við rannsóknarboranir á jarðhitasvæðum þarf að taka kjarna á miklu dýpi, en útbúnaður og tækni virðast enn óáreiðanleg, og þyrfti að bæta úr því.

Saga borverka á Reykjanesi ber með sér, að miklar og dýrar tafir geta orðið, ef ekki eru til birgðir í landinu af algengasta efni til borunar, svo sem fóðurrörum, krónum, sementi og geli. Mörg verk á Reykjanesi hafa orðið dýrari og jafnvel mistekizt sökum efnisskorts í landinu, er óvæntar aðstæður komu í ljós. Einnig mætti benda á, að á síðustu árum hefur verðhækkun á borholuefni verið mun meiri en þeir vextir, sem tapazt hefðu af fjármagni bundnu í birgðum.

## 5.0 KOSTNAÐUR

Kostnaður við rannsóknarverkið verður nú rakinn og honum skipt í rannsóknarskeið, en þeim aftur skipt í þætti á sama hátt og köflum 1 og 4.

### 5.1. Kostnaður rannsóknarverksins fyrir 1968

Á þessu tímabili vann jarðhitadeild að ýmsum rannsóknum á svæðinu. Einnig var boruð ein hola með höggbor (sjá 4.1), 162 m djúþ. Kostnaður þessara verka var ekki bókfærður sérstaklega, en færður ásamt öðrum rannsóknarverkum unnum á árinu.

### 5.2. Kostnaður rannsóknarverksins 1968-1.marz 1969.

Eins og rakið er í 1.3 veitti Orkusjóður í maí 1968 3,6 Mkr. til borana á Reykjanesi vegna sjóefnavinnslurannsókna. Í fyrstu var áætlað að bora 1000 m holu með Gufubor eða Norðurbor. Þar sem þeir fengust ekki til verksins, var ákveðið að bora allt að 500 m holu með Mayhewbor, og skyldi fyrst reynt að dýþka H 1 (sjá 4.1). Kostnaður við þennan verkhluta varð 330 þ.kr. Þar sem árangur af þessu verki var ekki viðunandi, var ráðizt í borun H 2 (sjá 4.1). Kostnaðaráætlun vegna borunar þessarar holu var ekki gerð, en verkið unnið samkvæmt reikningi undir eftirliti starfsmanna jarðborana og jarðhitadeildar (sjá 1.3). Sundurliðaður reikningur verksins sést í Töflu (5.1).

Tafla 5.1Borun H 2

	þ.kr.	þ.kr.
Efni	362	1.200
Aðkeypt þjónusta	115	
Jarðboranir ríkisins	723	

Að þessu verki loknu komu fram óskir frá iðnaðarráðherra um, að borframkvæmdum yrði hraðað, og samdið svo við Reykjavíkurborg, að hún léti Gufuborinn af hendi til borana á Reykjanesi (sjá 1.3). Í kostnaðaráætlun fyrir 1000 m holu með Gufubor, gerðri af Ísleifi Jónssyni 29. júlí 1968, var heildarkostnaður lauslega áætlaður 3,3 Mkr. Endurskoðuð kostnaðaráætlun var lögð fram 11. okt. 1968, og varð heildarniðurstaða hennar að meðtöldum rannsóknarkostnaði jarðhitadeildar 3,85 Mkr.

Í bréfi til Orkumálastjóra 24. sept. 1968 gaf Guðmundur Pálmason, forstöðumaður jarðhitadeildar, yfirlit yfir þann kostnað, sem kominn var í boranir og rannsóknir á Reykjanesi 1968 (sjá Töflu 5.2).

Tafla 5.2Kostnaður við Reykjanesboranir pr. 15.9.1968

Hola I	kr.	328.441,-
Hola II	"	1.199.011,-
" (áætlaðar eftirstöðvar)	"	25.000,-
Efnarannsóknir	"	79.067,-
Afl- og hitamælingar (áætlað)	"	60.000,-
Umsjón jarðhitadeildar (áætlað)	"	50.000,-
		<u>Alls kr. 1.741.519,-</u>

Af fjárútvegum ársins 1968, 3,6 Mkr, voru nú eftir 1,86 Mkr. Í bréfi þessu lagði Guðmundur Pálmason til, að ákvörðun yrði tekin um borun á þrem gufuborsholum. Áætlaði hann kostnað við þær 9 Mkr og við aðrar athuganir 0,5-1 Mkr. Ef ráðizt skyldi í þessa framkvæmd vantaði því um 8 Mkr.

Á grundvelli þessarar áætlunar voru veittar úr Orkusjóði 2 Mkr til lúkningar einnar holu (H 3) með Gufubor. Gangur borunar þessarar holu er rakinn í 4.1, og í Mynd 5.1 er kostnaður og gangur verksins borinn saman við áætlun.

Borun H 3 lauk 22. nóv. 1968. Þann 11. nóv. 1968 barst Orkumálastjóra orðsending frá fjármálaráðherra Magnúsi Jónsyni, formanni Orkusjóðs, þar sem tilkynnt var, að borunum á Reykjanesi skuli haldið áfram án stöðvunar og boraðar tvær holur til viðbótar H 3. Fé til þessara borana mundi fjármálaráðuneytið útvega Orkustofnun jafnóðum og á þyrfti að halda, allt að 6 Mkr til viðbótar því, sem áður hafði verið ráðstafað til borframkvæmdanna.

Nú var ráðizt í borun H 4 og H 5 (sjá 1.3 og 4.1). Notuð var sama kostnaðaráætlun og verkhönnun og gerð hafði verið fyrir H 3. Kostnaður verksins og gangur borinn saman við áætlun sést á Myndum 5.2 og 5.3. Eftirlitsmaður Orkusjóðs með þessum framkvæmdum var Jón Jónsson jarðfræðingur, en verkið var unnið af jarðborunum samkvæmt kostnaðarreikningi. Rannsóknarkostnaður sérfræðinga jarðhitadeildar (staðsetning borhola - eftirlit með borframkvæmdum - rannsókn á bor-svarfi - hitamælingar - efnagreiningar á jarðsjó - aflmælingar o.fl.) nam alls 580 þ.kr. Heildaryfirlit yfir kostnað á þessu rannsóknarskeiði (1.jan. 1968 - 1. marz 1969) sést í Töflu 5.3.



Tafla 5.3Kostnaður 1968 - 1.marz 1969

	p.kr.	p.kr.	p.kr.
Hola 1 06.06.-29.06.'68 Mayhewbor		330	
Hola 2 27.06.-03.09.'68 Mayhewbor		1.200	
Hola 3		3.475	
23.08.-06.09.'68 Höggbor	90		
14.10.-22.11.'68 Gufubor	3.335		
13.02.-18.02.'69 Craeliusbor	55		
Hola 4		2.340	
11.11.-19.11.'68 Höggbor	80		
25.11.-20.12.'68 Gufubor	2.265		
Hola 5		2.645	
09.12.-30.12.'68 Höggbor	180		
06.01.-14.02.'69 Gufubor	2.465		
Skolvatnshola			
06.09.-23.09.'68 Höggbor		145	
Óvirk hola v/festu			
23.09.-22.10.'68 Höggbor		225	
Rannsóknarkostnaður jarðhitadeildar		580	
Eftirstöðvar		660	
Ráðstöfunarfé Orkusjóður			11.600
			<u>11.600</u> <u>11.600</u>

### 5.3. Kostnaður rannsóknarverksins 1.marz-1.sept. 1969

Í febrúar 1969 var Sveinbirni Björnssyni starfsmanni jarðhitadeildar falið að gera tillögur um frekari framkvæmdir við rannsókn Reykjanessvæðisins. Í marz 1969 kom svo greinargerð frá hans hendi (17), og voru þar gerðar tillögur um aðgerðir á borholum, jarðfræðilegar og jarðeðlisfræðilegar rannsóknir á svæðinu og grunnar rannsóknarboranir (sjá nánar 1.5). Kostnaður við þessar aðgerðir, boranir og rannsóknir var áætlaður 10,3 Mkr. Í apríl 1969 samþykkti Alþingi að heimila lántöku þessa handa Orkusjóði til að standa straum af kostnaði við rannsóknarverkið.

Með erindisbréfi dags. 28. apríl 1969 var Sveinbirni Björnssyni falið að gegna starfi vísindalegs ráðunauts og jafnframt starfi umsjónarmanns Orkusjóðs með framkvæmd verksins, og Stefáni G. Sigurmundssyni var falið starf aðstoðarumsjónarmanns. Skiptu þeir svo með sér verkum, að Stefán sá um borframkvæmdir, aðgerðir á borholum og kostnaðargát, en Sveinbjörn um rannsóknir á svæðinu og heildarstjórn verksins.

Í maí 1969 skiluðu þeir ítarlegri greinargerð (19) með verklýsingu, greiðsluáætlun fyrir einstaka verkþætti og tilhögun kostnaðargátar. Yfirlitsáætlun um rannsóknarverkið er að finna í Mynd 5.4. Vegna óvissu um jarðfræðilegar aðstæður við rannsóknarboranirnar voru gerðar þrjár mismunandi verkáætlanir um borholur, og skyldi ákvörðun um gerð þeirra fara eftir aðstæðum, sem fram kæmu í borun (Myndir 5.5, 5.6 og 5.7). Kostnaðar- og greiðsluáætlanir fyrir árið 1969 eru sýndar í Töflum 5.4 og 5.5.

Kostnaðargát var framkvæmd á þann hátt, að vikulega bárust umsjónarmanni verksins í hendur vinnuskýrslur frá borstjóra og flokksstjóra mælingaflokks. Vinnuskýrsla borstjóra (borskýrsla) er færð í dagbókarformi, og er þar getið um helztu framkvæmdir dagsins, svo sem gang borverksins (boraðir metrar), vinnustundafjöldi tækja og manna, keypt

Tafla 5.4

Reykjanes - Heildargreiðsluáætlun maí - des. 1969.

Sv.B/SGS.

	Frum- áætl.	Verk- áætl.	F J Á R Þ Ö R F				
	mar.69	30.4	maí	júní	júlí	ágúst	sept. okt. nóv. des.
	þ.kr.	þ.kr.	þ.kr.	þ.kr.	þ.kr.	þ.kr.	þ.kr. þ.kr. þ.kr. þ.kr.
1. Kaup á íbúðarskúrum, flutningur og niður- setning þeirra.		280	280				
2. Viðgerð og fóðrun á holu 3	1850	1620	830	790			
3. Viðgerð og fóðrun á holu 4	1550	1346	805	541			
4. Rannsókn á borholum og jarðhita	1500	1500	140	385	330	230	170 105 95 45
5. Rannsóknarboranir á jöðrum jarðhita- svæðisins, 4 holur	5400	5400	230	340	2800	1010	1010 1010 1010
	<u>10.300</u>	<u>10.146</u>	<u>2285</u>	<u>2056</u>	<u>3130</u>	<u>1240</u>	<u>1180 1115 95 45</u>

Tafla 5.5

Greiðsluáætlun maí-des.1969. Rannsóknir á jarðhita og borholum.

	Verk- áætl. þ.kr.	maí þ.kr.	júní þ.kr.	júlí þ.kr.	ágúst þ.kr.	sept. þ.kr.	okt. þ.kr.	nóv. þ.kr.	des. þ.kr.
1. Efni									
1. Útbúnaður til aflmælinga	50			50					
2. Aðkeypt þjónusta									
1. Flugsegulmæling RHI	10	10							
2. Efnagreining SRG	200	60	20	20	20	20	20	20	20
3. Sérfræðistörf									
1. Jarðfræðiath.	100		25	25	25	25			
2. Berg- og jarðefn.ath.	100			20	20	20	20	20	
3. Rafleiðnimælingar	100	50	25	25					
4. Smáskjálftamælingar	30		10	10	10				
5. Úrvinnsla gagna	150			25	25	25	25	25	25
4. Áhaldaleiga									
1. Rafleiðnimælitæki	50		25	25					
2. Skjálftamælitæki	20			10	10				
3. Hita- og þrýstimælitæki	50		10	10	10	10	10		
5. Vinnuflokkar									
1. Segulmælingar	40	20	20						
2. Rafleiðnimælingar	200		200						
3. Smáskjálftamælingar	100		50	50					
4. Könnun vatnsæða	200		50	50	50	50			
5. Aflmælingar	50			10	10	10	10	10	10
6. Úrvinnsla gagna	50					10	20	20	
	1.500	140	385	330	230	170	105	95	45

efni og aðstoð (getið upphæðar, eða hún áætluð, ef reikningur liggur ekki fyrir) o.fl. Í vinnuskýrslu flokksstjóra mælinga-flokks er getið vinnustundafjölda og framvindu verksins.

Unnið var úr þessum skýrslum jafnóðum og þær bárust, og eigi sjaldnar en á þriggja vikna fresti var skilað framvindu-skýrslu til Orkumálastjóra. Þar var getið framvindu einstakra verkþátta, þess fjármagns, er komið var í hvern verkþátt með samiburði við kostnaðaráætlun og að lokum greiðsluáætlun fyrir næsta tímabil.

Öll erlend efniskaup voru gerð af Innkaupastofnun Ríkis-ins. Öll innlend efniskaup voru gerð jafnóðum og þeirra þurfti með, en ætíð með vitund umsjónarmanns. Vikulega var hægt að gefa upp allnákvæma fjárhagslega stöðu verksins.

#### 5.3.1 Borun H 6 og H 7

Gerður var verksamningur við Jarðboranir Ríkisins um aðgerðir á borholum og boranir. Um framkvæmdir á þessu tímabili er fjallað í 1.5 og 4.1. Samanburður á kostnaði og gangi verksins miðað við áætlun á H 6 og H 7 sést á myndum 5.5 og 5.7. Kostnaður og gangur H 6 var mjög nærri bjartsýnustu áætlun, A. Frávik á borferli er vegna þess, að ákveðið var að bora holuna grannt a.m.k. í áætlað fóðringadýpi og víkka hana síðan út. Var þetta gert af öryggisástæðum.

Mynd 5.7 sýnir, að borun H 7 gekk mjög erfiðlega vegna jarðfræðilegra aðstæðna, og fer nærri svartsýnisáætlun C. Myndir þessar sýna, hversu erfitt er að áætla kostnað rannsóknaborana. Borun H 7 var stöðvuð 6. sept. 1969 vegna endurskipulagningar rannsóknarverksins (sjá 1.5 og 1.6).

5.4. Kostnaður rannsóknarverksins 1.sept.-31.des.1969

Á fundi sérfræðinga jarðhitadeildar og jarðborana 4.sept. 1969 voru niðurstöður rannsókna ræddar, og samþykkt að mæla með þessum breytingum á Reykjanesáætlun 1969:

1. Hætt verði við borun 500 m djúpra hola nr. 8 og 9.
2. Stöðvuð verði borun holu 7 um óákveðinn tíma.
3. Frestað verði viðgerð holu 3 um óákveðinn tíma.
4. Flýtt verði sem mest fóðrun holu 4 og blástursprófun hennar.
5. Boruð verði á þessu hausti 1800 m djúp rannsóknarhola með Gufubor nyrzt á jarðhitasvæðinu (H 8).

Vegna þessara breytinga á rannsóknarverkinu var lögð fram þann 8. sept. 1969 ný kostnaðaráætlun, og fer hún hér á eftir í Töflu 5.6. Einnig var tímaáætlunin endurskoðuð, sjá Mynd 5.8.

Tafla 5.6

	p.kr.	p.kr.
Almennur undirbúningur. Stofnkostnaður og leiga vegna vinnubúða	220	
Framlag til vegagerðar á Reykjanesi	125	
Rannsókn á jarðhitasvæði og borholum	1500	
Viðgerð og fóðrun holu 4	1577	
Borun holu 6	940	
Borun holu 7	560	
Borun holu 8	5040	
Útbúnaður til aflmælinga holu 8	<u>50</u>	10012
Fé bundið í efni, sem afgangs verður:		
25 m 10" vatnsrör	44	
155 m 8" vatnsrör	182	
3 stk. 6" 300 psi holulokar	<u>100</u>	<u>326</u>
		10338
Verkáætlun 30.4.69	10146	

5.4.1 Viðgerð H 4

Mayhewbor framkvæmdi viðgerð og fóðrun á H 4 eins og ráðgert var (sjá 1.2 og 4.1). Aðgerð þessi fór 323 þ.kr. fram úr verkáætlun frá 8. sept. 1969, eins og sést á Töflu 5.7.

Tafla 5.7Viðgerð og fóðrun holu 4

	Verkáætlun 8.sept. þ.kr.	varð þ.kr.
Efni	872	896,6
Aðkeypt þjónusta	334	440,4
Jarðboranir ríkisins	371	563,0
	1577	1900,0

Umframkostnaður þessi stafaði af auknum sementskaupum til fóðringarinnar og lengri verktíma vegna erfiðleika á framkvæmd. Í heild má segja, að heldur mikil bjartsýni hafi ráðið, er ákveðið var að nota Mayhewbor við verkið.

5.4.2 Borun H 8

Borun H 8 hófst 6.okt. 1969 og var þá lögð fram endurskoðuð kostnaðar- og verkáætlun fyrir hana, og er hún sýnd á Mynd 5.9, svo og gangur verksins.

Borun gekk mjög vel framan af, og í 900 m dýpi var verkið 500 þ.kr. undir áætlun. Síðan gekk mun tregar vegna óvenju harðra berglaga. 6. nóv. 1969 var holan orðin 1200 m djúp og fyrirsjáanlegt, að borinn yrði ekki kominn nema í 1300 m dýpi, er áætlað fé þryti. Til þess að unnt yrði að ljúka borun holunnar (1800 m) í einum áfanga, samþykkti framkvæmdanefnd Rannsóknaráðs að veita fé til lúkningar hennar, allt að 1 Mkr.

Í heild fór kostnaður við borun holunnar 800 þ.kr., eða 15% fram úr áætlun. Þegar þess er gætt, að nokkur óvissa var um berglagagerð, þar sem næstu holur Gufubors eru um 1 km sunnar, og að borað var 600 m dýpra en áður hefur verið gert á háhitasvæðum, verður þetta frávik frá áætlun að teljast vel viðunandi. Gefur það vonir um, að áætla megi vinnsluholur, sem síðar verða boraðar á jarðhitasvæðinu með svipaðri eða betri nákvæmni. Helztu kostnaðarliðir, sem fóru fram úr áætlun, voru borkrónur, fóðring, aðkeypt þjónusta og tíma-kostnaður við borun.

#### 5.4.3 Viðgerð H 4 eftir hrun

Eftir að H 4 hafði verið fóðruð í 638 m og blásið í 15 daga, hrundi hún við æð í 700 m (sjá 1.7 og 4.1). Þar sem mikilvægt þótti að ná holunni aftur í blástur, var Gufuborinn fenginn til þess að hreinsa holuna. Eðlilega hafði ekki verið gert ráð fyrir þessari viðgerð á kostnaðaráætlun, en svo brýnt þótti að hún yrði framkvæmd hið fyrsta, að Orkustofnun og Rannsóknarráð lögðu fram fé til hennar til bráðabirgða. Viðgerðin nam 1.335 Mkr (að mestu tímakostnaður borsins), þar af lagði Rannsóknarráð fram 0.4 Mkr.

Í skýrslu um stöðu rannsóknarverksins og horfur 1970, er gefin var út 5. jan. 1970 (20) var gefið yfirlit yfir kostnað rannsóknarverksins 1.marz til 31. des. 1969. Þetta yfirlit var byggt á kostnaðargát á þessu tímabili, þar eð reikningar fyrir einstök verk höfðu enn ekki borizt. Endanlegur kostnaður reyndist nokkru hærri en talið var í þessari skýrslu, og er nákvæmara yfirlit um hann í Töflu 5.8. Heildarkostnaður við rannsóknarverkið á þessu tímabili varð 13,75 Mkr, og var hann greiddur með 10,3 Mkr fjárveitingu úr Orkusjóði, bráðabirgðaframlögum frá Rannsóknarráði ríkisins 1,2 Mkr og frá Orkustofnun 1,6 Mkr og eftirstöðvum frá fyrra ári 0,6 Mkr.



Tafla 5.8Kostnaður 1.marz 1969 - 31.des.1969

	þ.kr.	þ.kr.
1. Stofnkostnaður v/vinnuskála	205	
2. Framlag til vegagerðar	185	
3. Viðgerð og fóðrun H 4 (Mayhewbor)	1.905	
4. Borun H 6	945	
5. Borun H 7	640	
6. Borun H 8	6.200	
7. Kostn. v/blásturs H 4	200	
8. Viðgerð H 4 (Gufubor)	1.335	
9. Jarðboranir ríkisins og aðkeypt v/rannsókn	545	
10. Rannsóknarkostnaður Jarðhitad.	1.590	
11. Fjárveiting úr Orkusj. marz 1969		10.300
12. Framlag frá Rannsóknarráði ríkisins nóv. 1969		1.200
13. Frá fyrra ári		660
14. Orkustofnun 1969		1.590
	<hr/>	<hr/>
	13.750	13.750
	<hr/>	<hr/>

5.5. Kostnaður 1970

Vegna slæmrar reynslu af hrúni í holum á Reykjanesi (sjá 1.7, 4.1 og 4.2.2), þótti ekki ráðlegt að hleypa H 8 í gos, nema hún væri fóðruð í botn með raufuðum rörum. Til þess verks voru veittar 3,5 Mkr úr Orkusjóði og auk þess 1 Mkr til rannsókna á borholum og úrvinnslu gagna. Fóðrun H 8 er lýst í 1.9 og 4.1. Í Töflu 5.9 er sýndur kostnaður á framkvæmdum 1970.

Tafla 5.9

Kostnaður 1970

	p.kr.	p.kr.	p.kr.
Efni og aðkeypt þjónusta vegna H 4, H 6, H 7 og H 8		485	
Fóðrun H 8		2.800	
Efni	1.275		
Aðkeypt þjónusta	665		
Jarðboranir ríkisins	830		
Aðkeypt vegna rannsókna		265	
Rannsóknarkostnaður Jarðhitadeildar		1.500	
Fjárveiting úr Orkusjóði			4.500
Orkustofnun			550
		<hr/>	<hr/>
		5.050	5.050
		<hr/>	<hr/>

Í rannsóknarkostnaði jarðhitadeildar felst, auk jarðfræðilegra og jarðeðlisfræðilegra rannsókna, kostnaður við að ná H 8 í gos og búa hana undir blástur, úrvinnsla gagna, aflmæling á H 2 og H 8 og áætlaður útgáfukostnaður skýrslu þessarar. Í Töflu 5.10 er sýndur heildarkostnaður rannsóknarverksins árin 1968-1970.

Tafla 5.10Heildaryfirlit yfir kostnað rannsóknarverksins 1968-1970

## Greiddur kostnaður:

	þ.kr.	þ.kr.
1. Hóla 1	330	
2. Hóla 2	1.200	
3. Hóla 3	3.475	
4. Hóla 4	5.780	
5. Hóla 5	2.645	
6. Hóla 6	945	
7. Hóla 7	640	
8. Hóla 8	9.000	
9. Skolvatnshóla	145	
10. Óvirk hóla	225	
11. Vinnuskálar og vegagerð	390	
12. Jarðboranir ríkisins, blástursprófanir		
		o.fl.1.030
13. Aðkeypt sérfræðistörf v/rannsókn	265	
14. Rannsóknarkostnaður Jarðhitadeildar	3.670	

## Fjárföng:

1. Orkusjóður	júní 1968	11.600
2. Orkusjóður	marz 1969	10.300
3. Orkusjóður	maí 1970	4.500
4. Rannsóknarráð ríkisins nóv. 1969		1.200
5. Orkustofnun	1969 og 1970	2.140
		<hr/>
		29.740
		<hr/> <hr/>

## 6. STAÐA RANNSÓKNARVERKSINS OG FRAMTÍÐARHORFUR

### 6.1. Eiginleikar svæðisins

#### 6.1.1 Berglög og sprungur

Efstu 200 m eru gerðir úr ungum hraunum og sandlögum (hraunamyndun). Á 200-900 m er móbergs- og setmyndun, að mestu gosbreksfúr eða setlög með nokkrum hraunlögum. Þykkust eru hraunlögin á 500-600 m dýpi og þekja þar allt svæðið. Neðan 900 m kemur blágrýtis- og setmyndun. Nær hún samkvæmt jarðsveiflumælingum niður á 2600 m. Þar tekur við mjög þétt bergmyndun (lag 3). Eru eiginleikar hennar lítt þekktir, en líklegast talið, að þar sé mjög ummyndað berg, um 350-400°C heitt (2).

Móbergs- og setmyndunin er vel vatnsgeng. Poruhluti í kjarna í H 6 í 300 m mældist 32% og 23% í 570 m. Blágrýtis- og setmyndunin er einnig vel vatnsgeng, a.m.k. niður á 1800 m, og virðast vatnsæðar algengari í henni en í móbergs- og setmynduninni. Kjarni úr setlagi í H 8 í 1370 m var með 19% poruhluta. Enginn kjarni náðist úr hraunlögum blágrýtismyndunarinnar, en þar má búast við mun lægri poruhluta, e.t.v. 3-5%.

Reykjanesið er hluti af Reykjaneshrygg, og eru berglög því svipuð eftir hryggnum langt suður í haf, norður undir Miðnesheiði og austur eftir Reykjaneskaga. Nesið er þétt-skorið af NA-SV-lægum sprungum og misgengjum og margar gjánna opnar út í sjó. Um jarðhitasvæðið liggur Valabjargargjá, og markar hún austurjaðar heita svæðisins í hraunamynduninni.

Land innan gjábelteisins virðist síga um allt að 40 m á 10 þúsund árum (26), og sannast það einnig á jarðlögum í borholum, sem myndast hafa ofan sjávar, en liggja nú á mörg hundruð metra dýpi.

### 6.1.2 Jarðhiti og jarðsjór

Í hraunamynduninni, þ.e. efstu 100-200 m, er grunnvatn að mestu ferskt regnvatn, en í móbergs- og setmynduninni er kaldur sjór í stað fersks grunnvatns. Sjór er einnig í blágrýtis- og setmynduninni og virðist streyma í djúpri og víðtækri hringrás innan hennar. Hár varmastraumur úr neðri berglögum veldur mishitun í berginu og knýr þannig hringstreymi sjávarins. Í neðri hluta blágrýtis- og setmyndunarinnar veldur varmastraumur að neðan um 300°C hita, og við hægfara rennsli um þessi lög hitnar sjórinn, þvær og leysir sum efni úr berginu, en skiptir við það á öðrum. Dæmi um þær efnabreytingar, sem verða í sjónum við þessa hringrás, má sjá í Töflu 6.1, en þar eru efni í sjó við Reykjanes borin saman við sýni af jarðsjó úr H 8, sem tekið var úr holunni blásandi 18. des. 1970. Þá var meðalhiti innstreymisæða 255°C, en hefur síðan hækkað í 288°C, 5. febrúar 1971 (sjá 3.2)

Tafla 6.1

Samanburður á efnum í jarðsjó og ferskum sjó

	Jarðsjór úr H 8 18.12.70. 1700 m, 255°C	Jarðsjór úr H 8 18.12.70. 1700 m, umreiknað fyrir suðu úr 255°C í 100°C	Ferskur sjór við Reykja- nes 03.03.70
t, °C	255	100	
pH (20°C)	6.90	-	7.61
SiO <sub>2</sub> , ppm	530	763	3
Na, "	10180	14600	10520
K, "	1407	2030	416
Ca, "	1661	2400	386
Mg, "	10	14	1282
SO <sub>4</sub> , "	51	73	2640
Cl, "	19900	28600	19800
Uppl. efni "	33900	48800	um 35000

Helztu breytingar frá sjó eru þær, að kísilsýra, kalí og kalsíum hafa aukizt, en magníum og súlfat minnkað.

6.1.3 Gufa

Búast má við, að innstreymishiti í vinnsluholur verði 260-300°C. Á leið sinni til yfirborðs sýður jarðsjórinn og breytist að nokkrum hluta í gufu. Hluti gufunnar eykst á kostnað vatnsins, og jafnframt eykst selta í vatnshlutanum.

Þrýstingi í vinnsluholu er stjórnað með aðalloka og veitubúnaði, en þar eru gufa og jarðsjór skilin að. Samkvæmt vinnsluferli H 8 (Mynd 3.27) er rennslið úr holunni lítið háð þrýstingi neðan 13 atg á aðalloka, en fer síðan lökkandi

með hækkandi þrýstingi í veitubúnaði.

Í áætlun sjóefnanefndar um saltvinnslu er reiknað með, að verksmiðjan þurfi 37 tn/klst af gufu með 2 ata þrýstingi, 211 tn/klst með 4 ata og 17 tn/klst með 17 ata þrýstingi. Ættu engin vandkvæði að vera á öflun þessarar gufu, ef vinnsluholur verða sambærilegar við H 8.

#### 6.1.4 Stærð jarðhitasvæðisins

Undir Reykjanesi hagar svo til, að 260-300°C heitur jarðsjór kemst upp í efsta borð blágrýtis- og setmyndunarinnar á 900-1100 m dýpi. Þaðan stígur hann upp á við og myndar heitt uppstreymissvæði í móbergs- og setmynduninni, um 1 km<sup>2</sup> að flatarmáli. Á leið sinni upp sýður jarðsjórinn og kólnar. Óverulegur hluti hans kemst til yfirborðs í hverri, en mestur hluti kólnar og streymir niður á jöðrum svæðisins, eða út í móbergs- og setmyndunina. Varmi tapast um yfirborð með varmaleiðni og gufu, og er sýnilegt varmatap þar um 15 Gcal/klst (jafngildi 17 l/s af 250°C jarðsjó), en búast má við, að mun meiri varmi tapist um jaðra svæðisins í móbergs- og setmynduninni. Lítið er vitað um víðáttu hringstreymisins í blágrýtis- og setmynduninni og heildarrúmmál heits jarðsjávar, sem nýtanlegur yrði. Til saltvinnslunnar þarf 350 l/s í 15 ár eða um 0,14 rúmkílómetra af jarðsjó. Ef jarðsjórinn er tekinn úr blágrýtis- og setmynduninni á 1000-2600 m dýpi og reiknað er með 5% poruhluta, en það virðist varlega áætlað, þar sem vitað er, að setlög í mynduninni eru með 15-20% poruhluta, ætti saltvinnslan að fullnýta á 15 árum jarðsjó í 1,75 km<sup>2</sup> af mynduninni. Flatarmál heita uppstreymissvæðisins í móbergs- og setmynduninni er aðeins um 1 km<sup>2</sup>, en jarðefnafræðilegar niðurstöður (sjá kalí, gr.3.3) og almennar jarðfræðilegar aðstæður benda hins vegar til þess, að hringrásin í blágrýtis- og setmynduninni sé mun víðáttumeiri og ekki þurfi að óttast verulegar breytingar á efnunum eða hita, ef jarðsjórinn er sóttur nógu djúpt í blá-

grýtis- og setmyndunina. Könnun á stærð svæðisins í blágrýtis- og setmynduninni með borunum yrði dýrari en bein könnun á vinnslugetu og rekstraröryggi með vinnsluborunum, og er því gert ráð fyrir, að seinni kosturinn verði valinn.

#### 6.1.5 Vinnslueiginleikar

Þar sem jarðhitasvæðið er talið stærra um sig í blágrýtis- og setmynduninni en móbergs- og setmynduninni, kæmi vel til greina að bora vinnsluholur utan við jarðhita á yfirborði. Reynsla af slíkum borunum á Reykjanesi er þó mjög slæm. Laus sandlög og opnar gjár í efstu lögum hafa reynzt erfið viðfangs, og kalt sjólag á 100-200 m dýpi eykur hættu á köldu innrennsli og sliti fóðringa. Sé hins vegar borað inni á heita svæðinu, eru sandlögin samlímd og þétt vegna ummyndunar, og þar virðist ekki vera neitt kalt sjólag.

Þrýstingur í heita jarðsjónum er allt að 10 loftþyngdum lægri en í köldum sjó á sama dýpi í móbergs- og setmynduninni, og eiga borar því ekki í neinum erfiðleikum með að halda gosi niðri í holum. Vegna þessa lága þrýstings er hins vegar hættu á innrás kalds sjávar frá jöðrum svæðisins. Útfellingar á súlfati í jarðlögum benda til þess, að sjór hafi oft brotizt inn á uppstreymissvæðið. Gerðist þetta síðast af völdum jarðskjálfta haustið 1967.

Vatnsæðar virðast fáar ofan 700 m, en mun tíðari í blágrýtis- og setmynduninni neðan 1000 m. Virðist því hagkvæmara og öruggara að vinna jarðsjóinn með vinnsluholum, sem ná vel niður í blágrýtis- og setmyndunina, en leggja minni áherzlu á að nýta æðar í móbergs- og setmynduninni.

Jarðlög í móbergs- og setmynduninni og setlög í blágrýtismynduninni eru víða mjög língræð og hættu á hruni holu-veggja svo mikil, að fóðra verður holurnar niður fyrir þessi lög. Taka verður ákvörðun um fóðrun, eftir að hver hola er boruð, þar sem raufa þarf fóðringuna við þær vatnsæðar, sem



nýta skal. Ef álitnið er, að holan verði góð vinnsluhola, er ráðlegast að fódra hana í botn. Frá þessu yrði aðeins vikið, ef hrunchætta er talin lítil eða afl holunnar er ekki þess virði, að sett sé í hana vinnslufóðring.

### 6.2. Vinnsluboranir

Vinnsluholur yrðu boraðar á jarðhitasvæðinu milli H 8 og H 2. Holurnar yrðu hannaðar eins og H 8, 1800 m djúpar og fódraðar í botn. Með vinnslufóðringu yrði kostnaður hvern holu um 10 Mkr. Miðað við reynslu af borun annarra hola á svæðinu, ætti borun einstakra hola ekki að víkja meira en 20% frá áætluðu kostnaðarverði.

Meiri óvissa er um afl holanna. Innstreymi í H 8 er um 72 l/s við 10 atg þrýsting undir aðalloka, og þyrfti 4-5 slíkar holur í viðbót til þess að ná 350 l/s, sem saltvinnslan þarfnast. Ekki er þó víst, að allar holur nái jafnmiklu innrennsli og H 8, og auk þess er óvissa um endingu holanna. Yfirleitt dregur úr rennsli hola með tíma, og verður því að gera ráð fyrir að bæta þurfi við holum til þess að halda óbreyttu heildarrennsli. Endanlegt svar um vinnslugetu og rekstraröryggi svæðisins, fjölda hola, sem bora þarf, og endingu þeirra fæst ekki nema með beinum prófunum, þ.e. borun vinnsluhola í áföngum og dómi um hvern áfanga, eftir að holurnar hafa blásið í nokkurn tíma. Hvert skref í þessari athugun kostar um 10 Mkr.

### 6.3. Fjárfesting í svæðinu og verð á jarðsjó og gufu

Árin 1968 til 1970 hafa fjárveitingar til rannsóknarverksins verið þessar:

Tafla 6.2

Fjárveitingar til rannsóknarverksins 1968-1970

Tímabil	Sjóður	Mkr
1968 - 1. 3.1969	Orkusjóður	11,6
1. 3.-31.12.1969	Orkusjóður	10,3
	Orkustofnun	1,6
	Rannsóknarráð	1,2
1970	Orkusjóður	4,5
	Orkustofnun	<u>0,5</u>
		29,7

Heildarrannsóknarkostnaður þessi ár er 29,7 Mkr, og greinist hann í 20,7 Mkr, sem nýtast eingöngu í rannsókn, og 9 Mkr í H 8, en hún nýtist einnig sem vinnsluhola.

Ef úr saltvinnslu verður, er reiknað með, að verk-smiðjan greiði fast árgjald fyrir jarðsjó og gufu í 15 ár. Þetta árgjald verður að standa undir öllum kostnaði við jarð-sjávarvinnsluna og rannsóknir á svæðinu. Í athugun sjóefna-nefndar á hagkvæmni saltvinnslu (18) var reiknað með \$ 400.000 eða 35 Mkr á ári. Enda þótt mikil óvissa sé enn um nauðsynlegan fjölda vinnsluhola og endingu þeirra, má fá nokkra hugmynd um lágmarksárgjald, sem greiða þyrfti til þess að jarðsjávarvinnslan beri sig. Fara þeir reikningar hér á eftir. Gert er ráð fyrir, að verksmiðjan taki til starfa í ársbyrjun 1974, og er áætluð fjárfesting í rann-sókn svæðisins, vinnsluholum og veitubúnaði sýnd í Töflu 6.3.

Boraðar yrðu þrjár vinnsluholur 1971, þrjár 1972 og loks þrjár 1973, ef nauðsyn krefur. Reiknað er með, að árið 1970 kosti vinnsluhola 10 Mkr, en veitubúnaður 3 Mkr. Kostnaður við þessa mannvirkjagerð fari síðan hækkandi um 8% á ári.

Tafla 6.3

Aætluð fjárfesting í rannsókn svæðisins, vinnsluholum og veitubúnaði.

Tölur eru í Mkr.

	1968	1969	1970	1971	1972	1973	Stofngildi fjárfestingar í ársbyrjun 1974 (vextir 8%)	Vextir og greiðslutími frá 1974
Rannsókn svæðis	11,0	7,5	2,2	1,0	1,0	1,0	31	8%, 15 ár
Vinnsluboranir:								
H 8		6,2	2,8				12	8%, 3-7 ár
1.áfangi, 3 holur				35			41	"
2.áfangi, 3 holur					38		41	"
3.áfangi, 3 holur						41	41	"
Veitubúnaður:								
Veita frá H 8						4	4	"
1.áfangi, 3 veitur						12	12	"
2.áfangi, 3vveitur						12	12	"
3.áfangi, 3 veitur						12	12	"
Rekstur svæðis 1974-1988							<u>15</u>	8%, 15 ár
Heildarfjárfesting	11	13,7	5	36	39	82	221	

Til þess að reikna árgjald er öll fjárfesting á árunum 1968-1973 færð með 8% vöxtum sem stofngildi í ársbyrjun 1974. Kostnaður við rekstur svæðisins er áætlaður 1,0 Mkr árið 1974 og talinn hækka um 8% á ári frá því. Stofngildi hans verður því 15 Mkr. Árgjaldið er síðan reiknað út frá heildarstofngildi, og er þá gert ráð fyrir, að rannsókn svæðis og rekstur þess greiðist með 8% vöxtum á 15 árum, en vinnsluholur og veitubúnaður með 8% vöxtum á 3, 5 eða 7 árum. Niðurstöður eru í Töflu 6.4.

Tafla 6.4

Árgjald fyrir jarðsjó og gufu, Mkr.

Fjöldi vinnsluhola	Afskriftartími vinnsluhola og veitubúnaðar		
	3 ár	5 ár	7 ár
4	32,5	22,8	18,8
7	53,1	36,1	29,0
10	73,7	49,4	41,6

Lágst verður árgjaldið 18,8 Mkr, ef aðeins þarf 4 vinnsluholur og þær endast í 7 ár. Hæst verður það 73,7 Mkr, ef vinnsluholur eru 10 og endast aðeins 3 ár. Sennilegur meðalvegur í þessum ágizkunum væri 7 vinnsluholur, sem entust í 5 ár, og yrði árgjaldið þá 36,1 Mkr og ekki fjarri 35 Mkr, sem sjóefnanefnd reiknaði með.

#### 6.4. Framtíðarhorfur

Góðar horfur eru á því, að fá megi nægilegan jarðsjó og gufu fyrir saltstig sjóefnavinnslu, en nauðsynlegt er að reyna vinnslugetu og rekstraröryggi svæðisins með vinnsluborunum í áföngum. Vinnslukostnaður er í mikilli óvissu, þar til vitað er, hve margar vinnsluholur þarf að bora, og reynsla er komin á endingu þeirra og veitubúnaðar. Ef nægilegt magn af jarðsjó fæst með 7 vinnsluholum og gera má ráð fyrir, að þær endist í 5 ár, verður árgjald fyrir vinnsluna um 36 Mkr á ári í 15 ár, en það er mjög nærri því árgjaldi, sem reiknað var með í könnun á hagkvæmni saltvinnslunnar. Með hliðsjón af góðum vatnsæðum í H 8, virðist líklegt, að þetta árgjald muni nægja, en vissa fæst ekki fyrr en bein prófun er gerð. Þessi prófun er hins vegar svo dýr í framkvæmd, að ekki verður í hana ráðizt, nema sterkar líkur séu á, að úr saltvinnslu verði. Ef horfur á saltvinnslu eru taldar svo góðar, að réttlætalegt sé að halda áfram vinnsluborunum, er ráðlegast að bora í áföngum, 3 holur á ári, og fylgjast með áhrifum þeirra á svæðið. Einnig þyrfti sem fyrst að hefja tæringarprófanir á veitubúnaði, því að tæring og útfellingar verða mun erfiðari viðfangs á Reykjanesi en á öðrum jarðhitasvæðum vegna seltu jarðsjávarins. Þessar prófanir eru einnig mikilvægar fyrir saltvinnsluna sjálfa.

HEIMILDARRIT

- (1) Gunnar Böðvarsson og Sveinn Einarsson: Feasibility Study for Geothermal Heating, Volume 1 og 2. Vermir s.f. Des. 1963.
- (2) Guðmundur Pálmason: Crustal Structure of Iceland from Explosion Seismology. Raunvísindastofnun Háskólans og Orkustofnun, Marz 1970.
- (3) Guðmundur Pálmason, J.D. Friedman, R.S. Williams Jr., Jón Jónsson og Kristján Sæmundsson: Aerial Infrared Surveys of Reykjanes and Torfajökull Thermal Areas, Iceland. U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970.
- (4) Jón Torfi Jónsson: Grunnhitamælingar á jarðhitasvæðinu við Reykjanesvita sumarið 1968. Orkustofnun. Sept. 1968.
- (5) Peter L. Ward, Guðmundur Pálmason, Charles Drake: Microearthquake Survey and the Mid-Atlantic Ridge in Iceland. Journal of Geophysical Research. 74, 665-684, 1969.
- (6) Baldur Líndal, Ísleifur Jónsson, Jóhann Jakobsson, Unnsteinn Stefánsson: Sjávarselta við strendur Faxaflóa og Suð-Vesturlands. Tímarit VFÍ 1.-2. hefti 1960.
- (7) Baldur Líndal: Um aðferðir, orkuþörf og staðarval saltvinnslu úr sjó. Jarðboranir Ríkisins 1954.
- (8) Baldur Líndal: Sjóefnaverksmiðja. Raforkumálastjóri, Jarðboranir Ríkisins. 1955.
- (9) Baldur Líndal, Ísleifur Jónsson: Sjóefnavinnsla og saltmarkaður. Raforkumálastjóri, Jarðhitadeild 1968.

- (10) Extraction of Salt from Sea Water.  
Prepared for the Government of Iceland by the Manistee Engineering Associates, 1960.
- (11) M.S.Patel: Report on the Possibility of Production of Salt in Iceland.  
Raforkumálastjóri, Jarðhitadeild. 1959.
- (12) Baldur Líndal: The Extraction of Salt from Sea Water by Multiple Effect Evaporators using Natural Steam.  
U.N.Conference on New Sources of Energy. Sept. 1961.
- (13) Vilhjálmur Lúðvíksson, Baldur Líndal: Greinargerð um tillögur varðandi rannsóknir á sjóefnavinnslu.  
Verkfræðistofa Baldurs Líndal. Ágúst 1966.
- (14) Saltvinnsla úr jarðsjó, verkfræðileg möguleikakönnun fyrir Rannsóknaráð Ríkisins.  
Verkfræðistofa Baldurs Líndal. Maí 1967.
- (15) Sea Chemicals Industry on Reykjanes. Report from the Sea Chemicals Committee based on studies and calculations by Baldur Líndal.  
Rannsóknaráð Ríkisins. Júlí 1968.
- (16) Guðmundur Pálmason, Karl Ragnars, Jens Tómasson, Sveinbjörn Björnsson, Þorsteinn Thorsteinsson: Jarðboranir og rannsóknir á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi vegna sjóefnavinnsluathugana.  
Orkustofnun. Jan. 1969.
- (17) Sveinbjörn Björnsson: Tillögur um aðgerðir á borholum, jarðhitarannsóknir og rannsóknarboranir á Reykjanesi.  
Orkustofnun. Marz 1969.
- (18) A Feasibility Study of a 250.000 Ton Salt Plant at Reykjanes.  
Rannsóknaráð Ríkisins. Marz 1969.




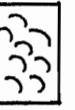



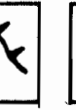



- (19) Stefán G. Sigurmundsson, Sveinbjörn Björnsson:  
Reykjanesáætlun 1969 - Verklýsing, greiðsluáætlun og  
kostnaðargát.  
Orkustofnun. Maí 1969.
- (20) Sveinbjörn Björnsson, Stefán G. Sigurmundsson, Jens  
Tómasson, Stefán Arnórsson: Reykjanesáætlun 1969 -  
Staða rannsóknarverksins og horfur 1970.  
Orkustofnun. Jan. 1970.
- (21) Ernesto Orellana, Harold M. Mooney: Master tables and  
Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered  
Structure. 125 pp. Madrid 1966.
- (22) Guðmundur Pálmason, Jens Tómasson, Jón Jónsson,  
Ísleifur Jónsson: Djúpbörðun í Vestmannaeyjum.  
Raforkumálastjóri, Jarðhitadeild og Jarðboranir Ríkisins.  
Feb. 1965.
- (23) Kristján Sæmundsson: Vulkanismus und Tektonik des  
Hengill-Gebietes.  
Acta nat. Isl. II no. 7, 1967, 101 pp.
- (24) P.R.L. Browne, A.J. Ellis: The Ohaki-Broadlands Hydro-  
thermal Area, New Zealand: Mineralogy and Related  
Geochemistry.  
American Journal of Science, 269, 97-131, 1970.
- (25) Karl Ragnars, Guðmundur Sigurðsson, Stefán G. Sigur-  
mundsson: Jarðboranir á háhitasvæðum.  
Orkustofnun. Apríl 1969.
- (26) Eysteinn Tryggvason: Surface Deformation and Fault  
Displacement Associated with an Earthquake Swarm in  
Iceland.  
Journal of Geophysical Research 75, 4407-4422, 1970.
- (27) Sveinbjörn Björnsson, Stefán Arnórsson, Jens Tómasson:  
Exploration of the Reykjanes Thermal Brine Area.  
Prepared for the U.N. Symposium on Geothermal Energy,  
Pisa 1970. Orkustofnun. Sept. 1970.



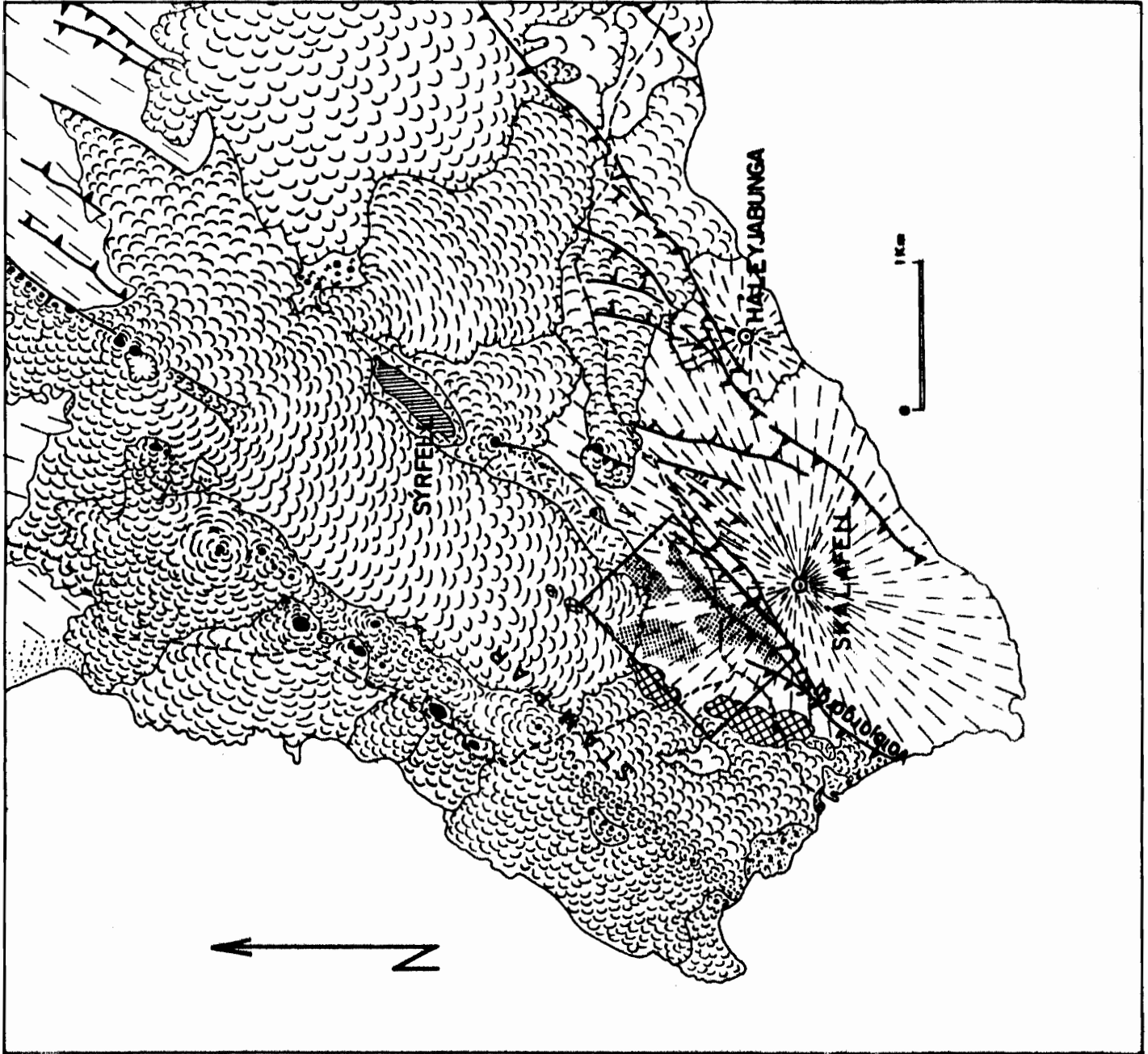
**GEOLOGICAL MAP OF REYKJANES.**

By Jón Jónsson.

**Explanations.**

-  Pillow lava.
-  Palagonite breccia and tuff.
-  Post glacial lava from shield volcano.
-  " " " " eruptive fissure.
-  Crater of shield volcano.
-  Eruptive fissure.
-  Pyroclastic ejecta.
-  Fault
-  Tectonic fissure without vertical displacement.
-  Basalt cover on top of palagonitic rocks (pillow lava and breccia.)
-  Thermal area.

Mynd 1.1



Viðmiðun; HÍ: 982.278.5 mgal

Worden Nr.68

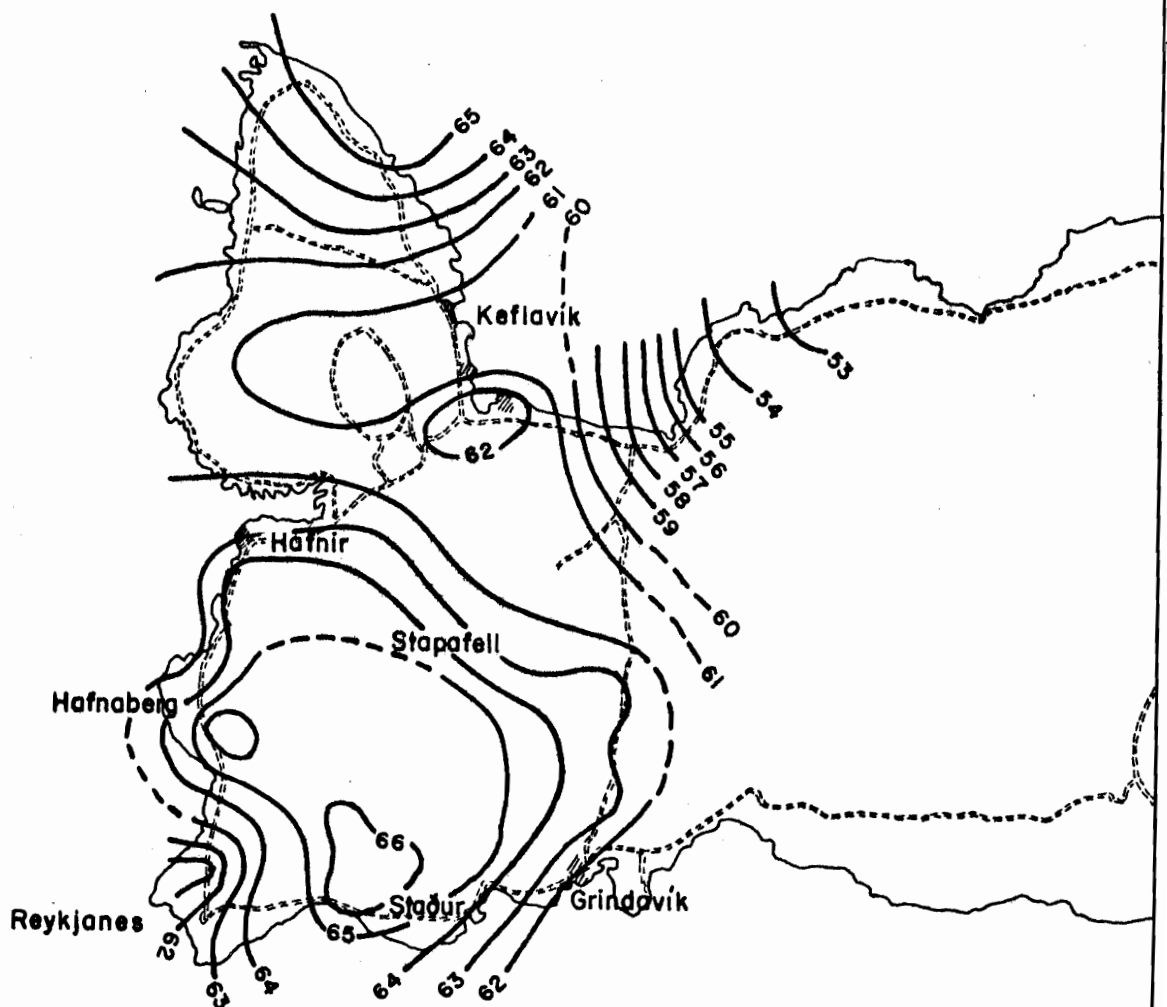
Mællínur:

Hafnaberg → Staður

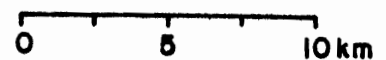
Hafnir → Stapafell → Grindavík

Eftir vegi, Hafnir → Reykjanes → Grindavík

→ Njarðvík → Hafnir



Mynd 1.2



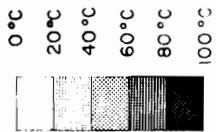
# REYKJANES THERMAL AREA

## TEMPERATURE SURVEY AT 0.5 METERS DEPTH

MEASURED IN JULY - SEPTEMBER 1968

— ROAD

● DRILLHOLE



LIGHTHOUSE

6

5

8



378 000

377 500

377 000

730 000

376 500

730 500

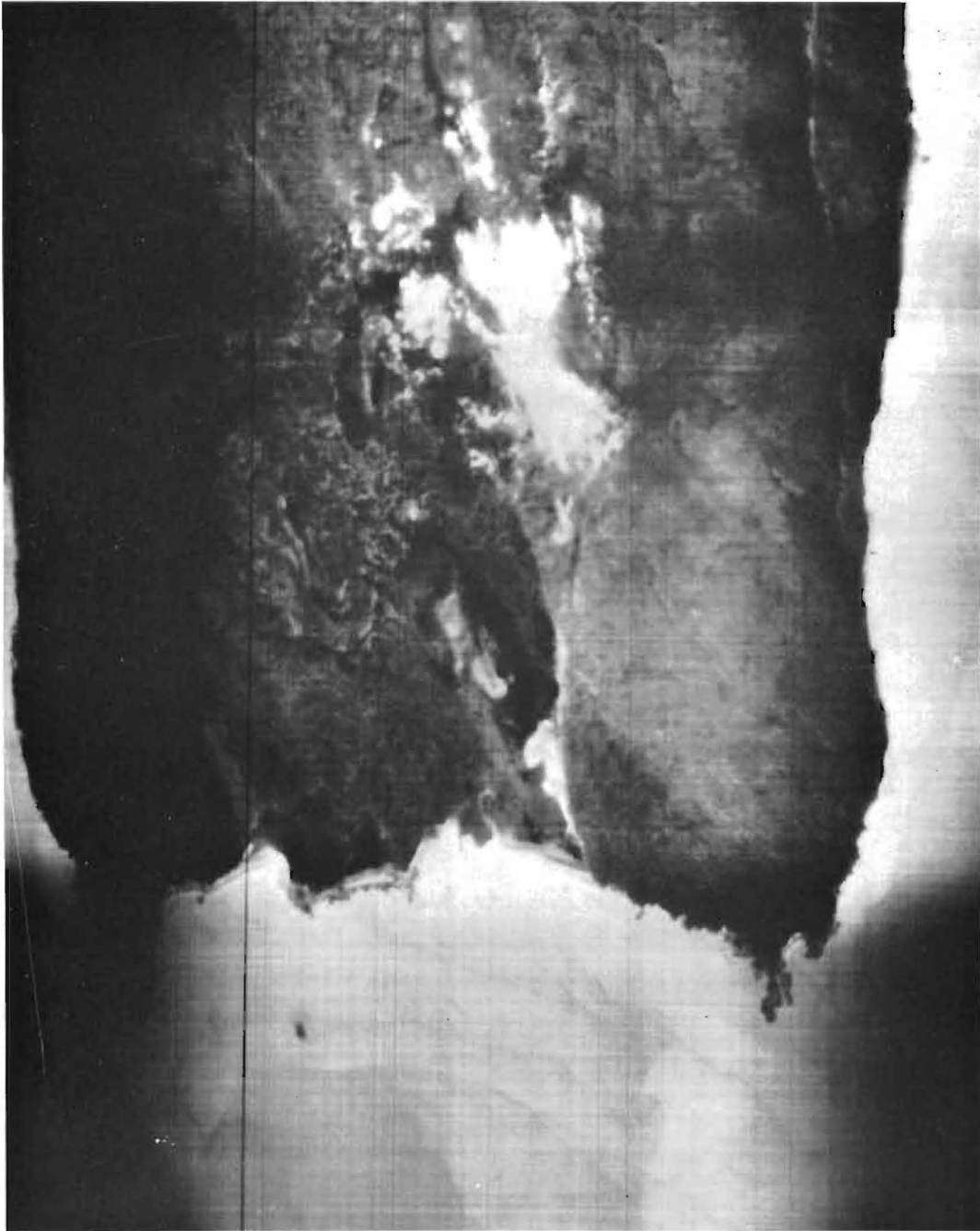
731 000

376 000

731 500

732 000

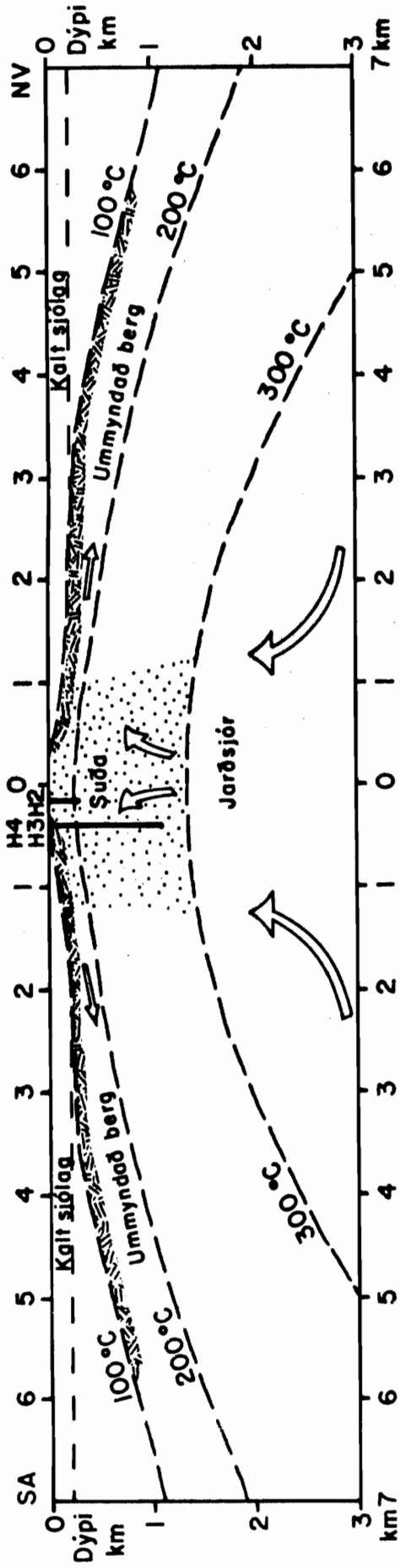
Mynd 1.3



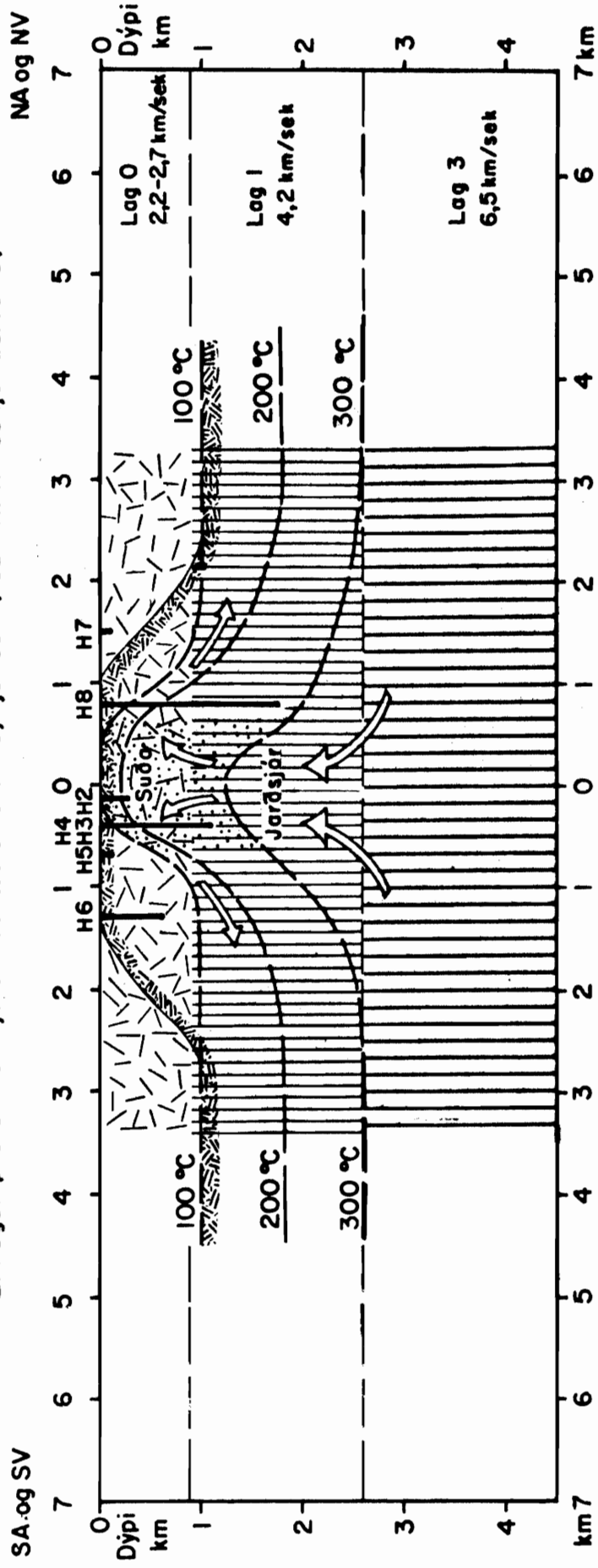
Mynd 1.4.

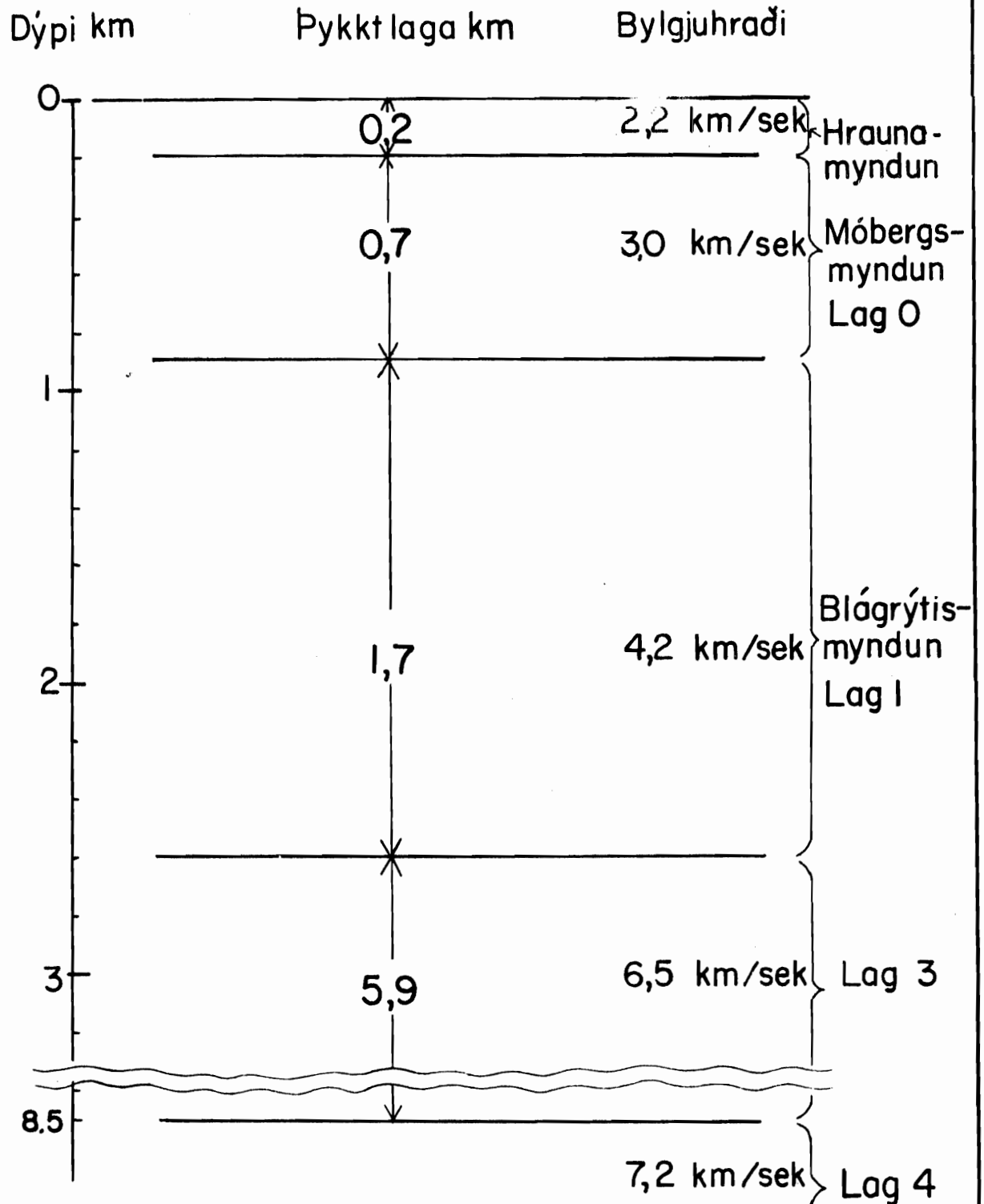
Innvið varmageishun frá jarðhlitasveðinu á Reykjanesi. (Mælt af Terrestrial Sciences Laboratories, Air Force Cambridge Research Laboratories, Massachusetts. Tími: 20. ág. 1966, 23<sup>37</sup> UMT. Flughæð 10 000 fet. Bylgjusvið 4,5–5,5 $\mu$ ).

Líklegur þverskurður jarðhitasvæðisins á Reykjanesi (samkv. vitneskju l.3.1969)



Líklegur þverskurður jarðhitasvæðisins á Reykjanesi (samkv. vitneskju l.3.1970)





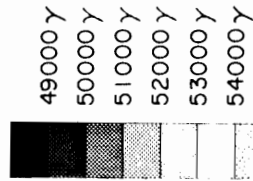
# REYKJANES THERMAL AREA

## MAGNETIC SURVEY

TOTAL FIELD INTENSITY  
AT 5M ABOVE SURFACE

— ROAD

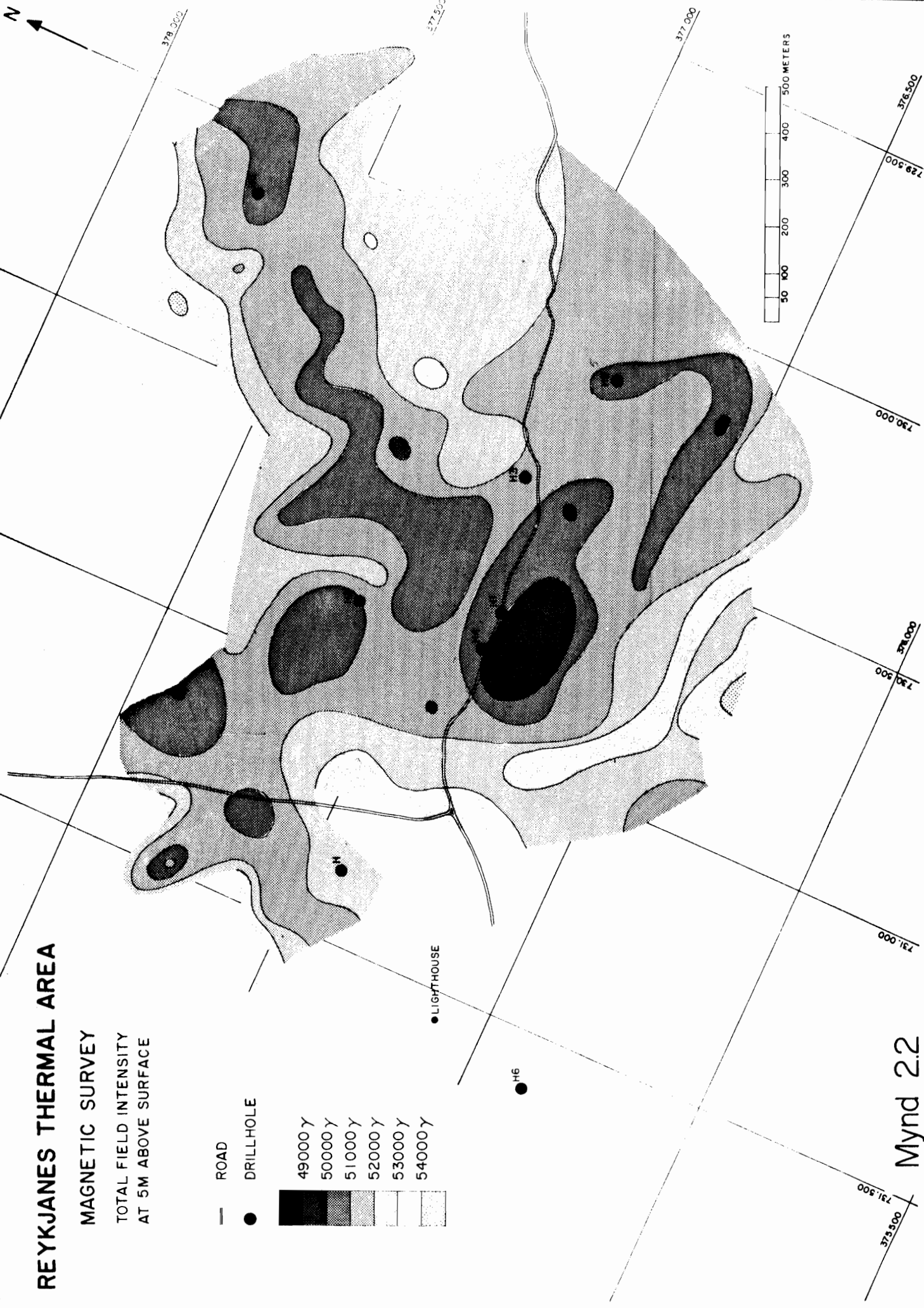
● DRILLHOLE



● LIGHTHOUSE

H6

H3



# REYKJANES THERMAL AREA

## RESISTIVITY SURVEY

+ WENNER ELECTRODE ARRAY, PROFILING,  $a = 300\text{ m}$

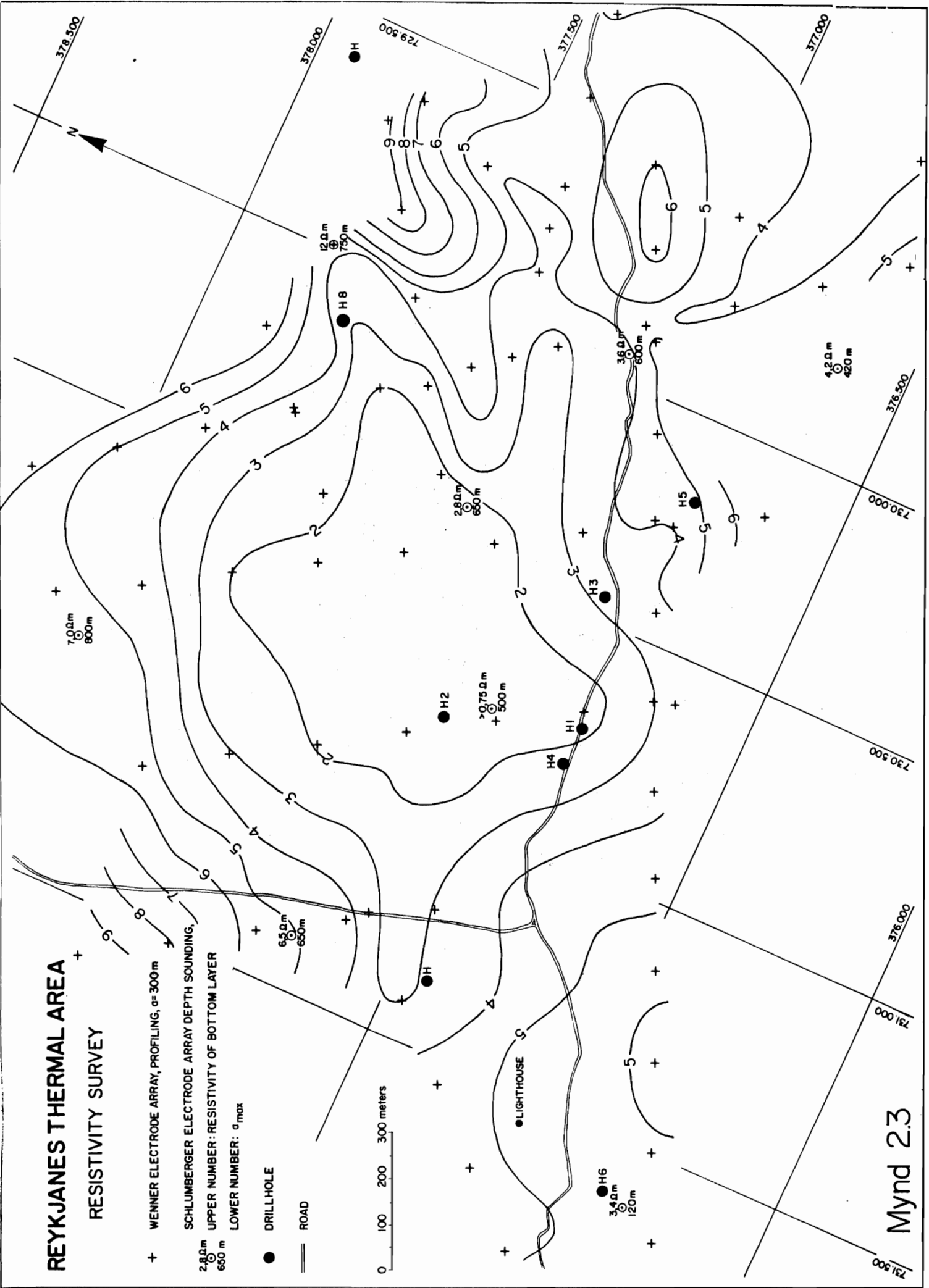
SCHLUMBERGER ELECTRODE ARRAY DEPTH SOUNDING,

2.8  $\Omega\text{m}$  650 m  
 ○ UPPER NUMBER: RESISTIVITY OF BOTTOM LAYER

LOWER NUMBER:  $\sigma_{\text{max}}$

● DRILLHOLE

== ROAD





SKÝRINGAR:

Snið A-B, A-C

Snið D-E, D-F

○ Hverir

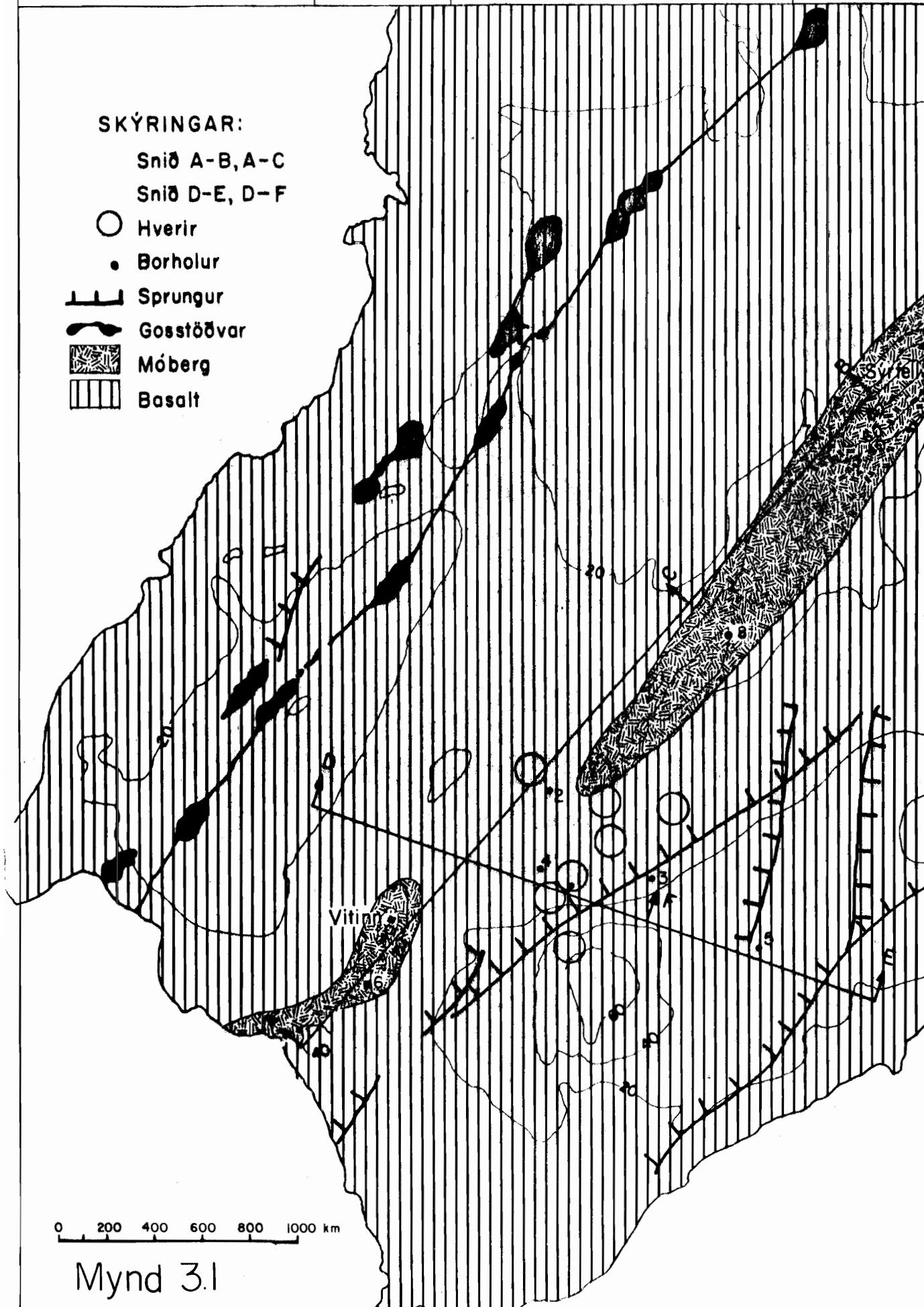
• Borholur

— Sprungur

— Gosstöðvar

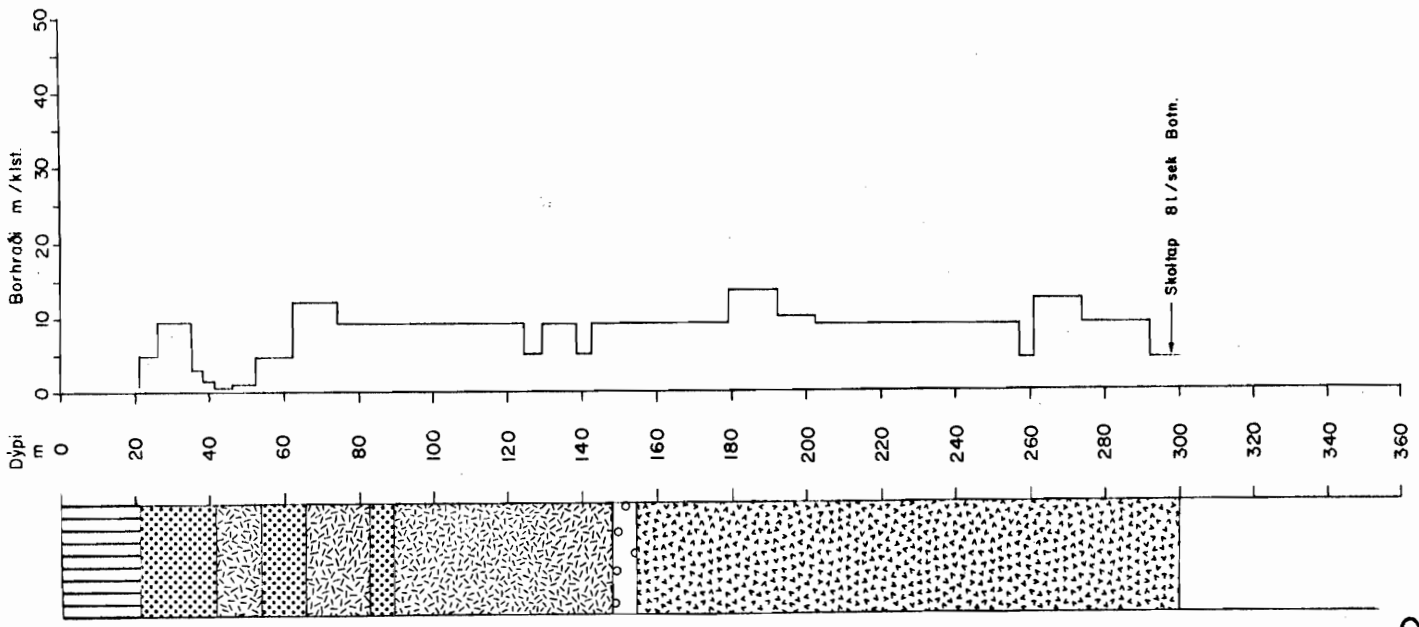
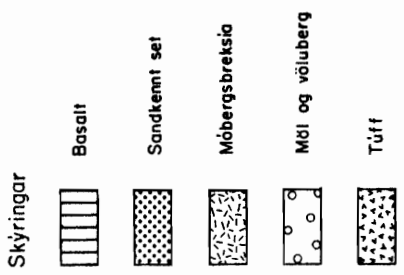
— Móberg

— Basalt

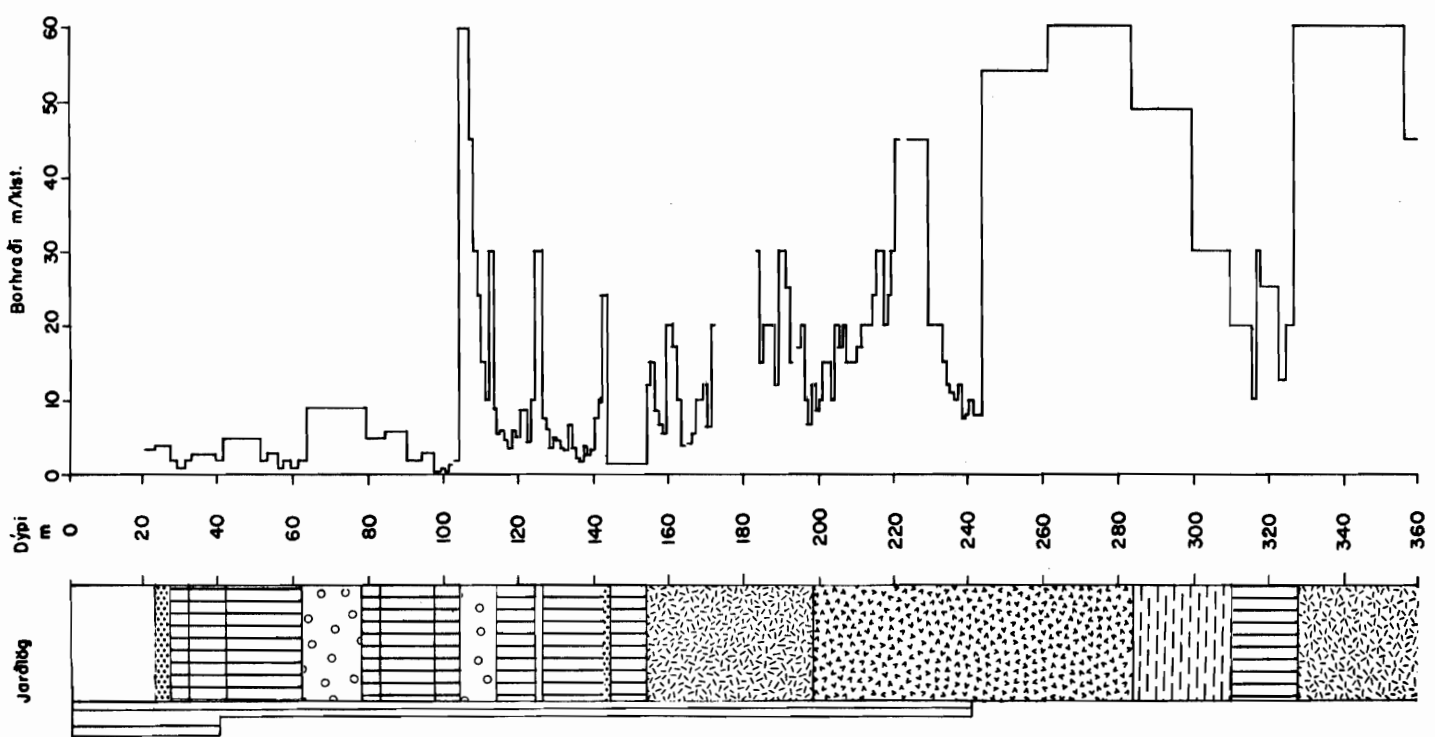
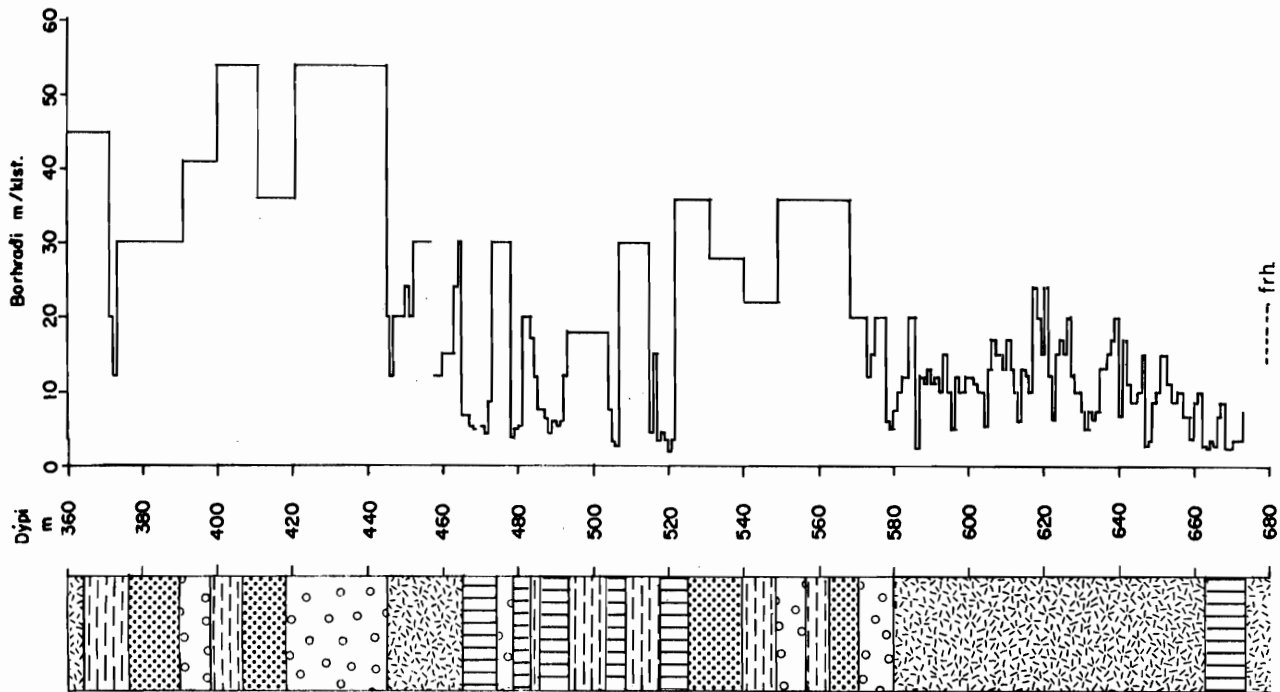


0 200 400 600 800 1000 km

Mynd 3.1



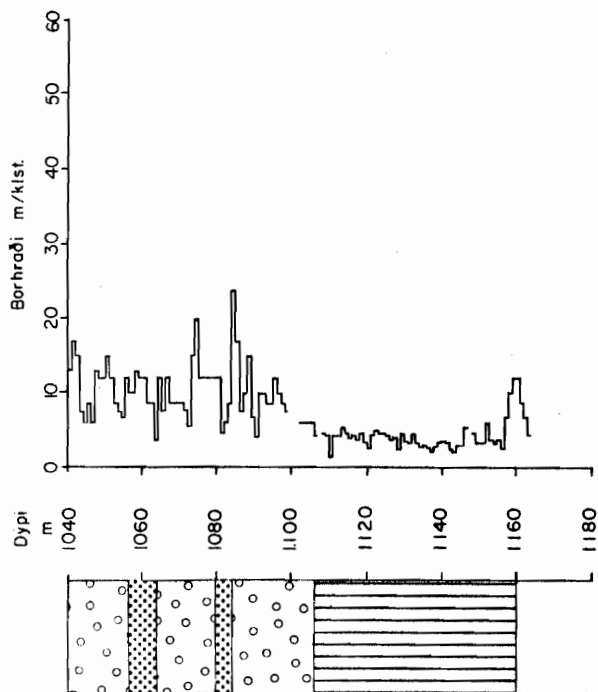
Mynd 3.2



Fóðurör 41 m  
 Ø 340 mm

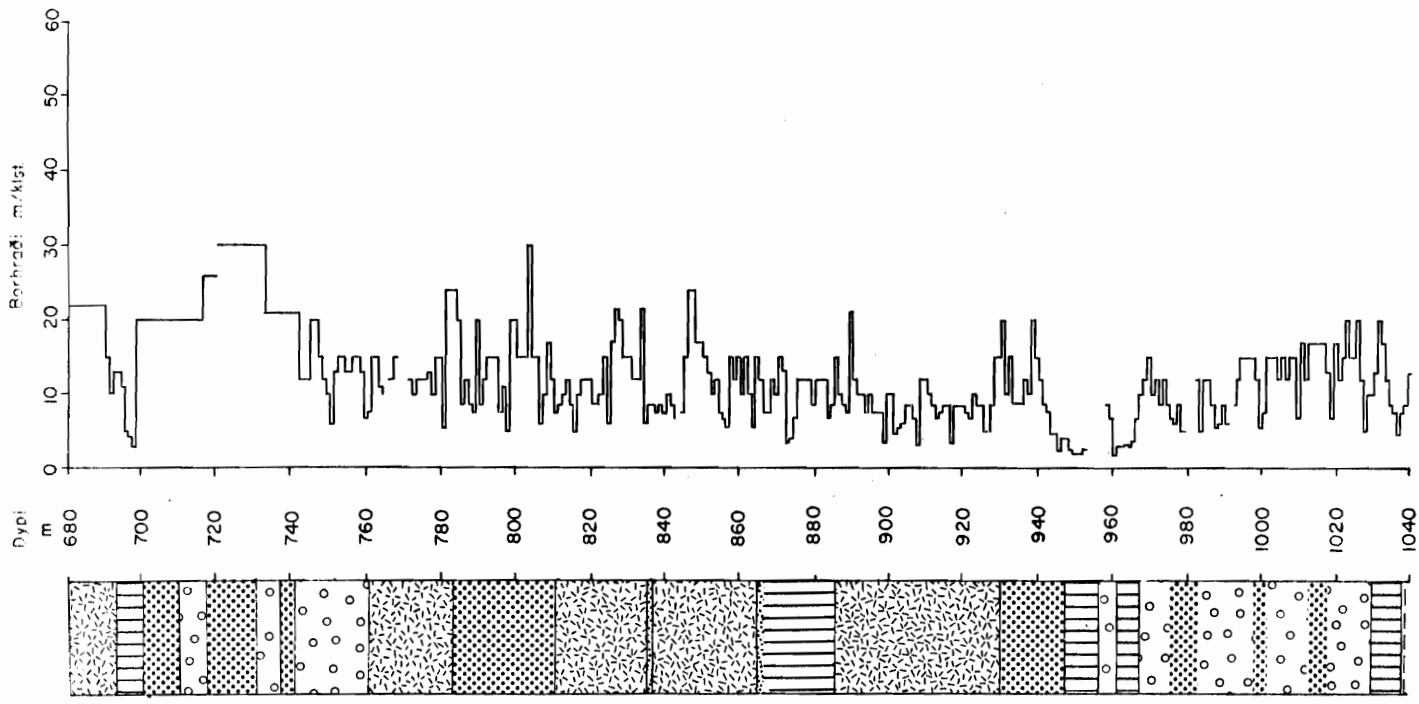
Fóðurör 242 m  
 Ø 244 mm

Borhole  
 Ø 222 mm



SKÝRINGAR:

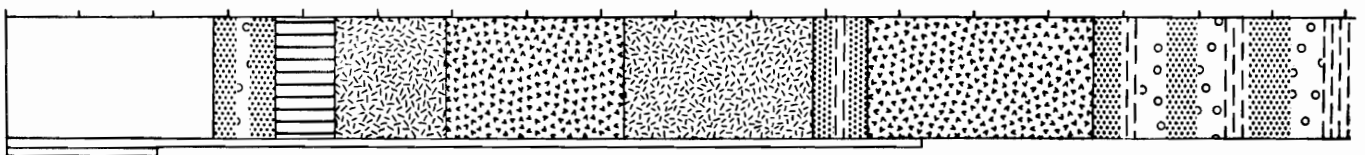
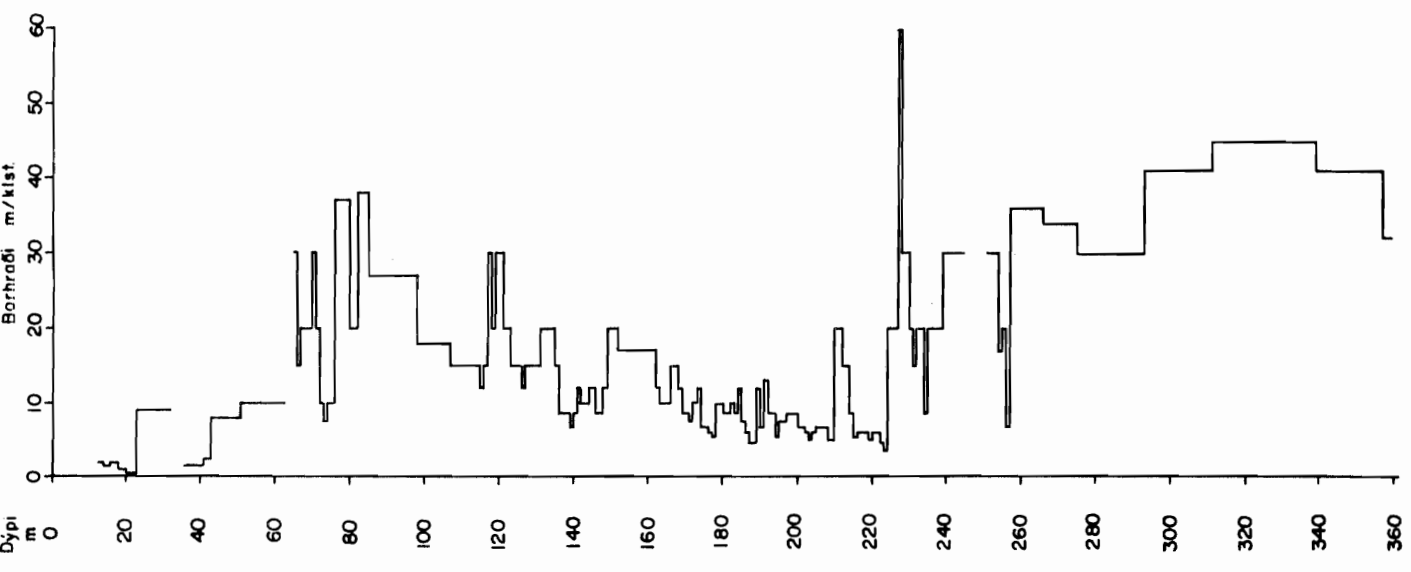
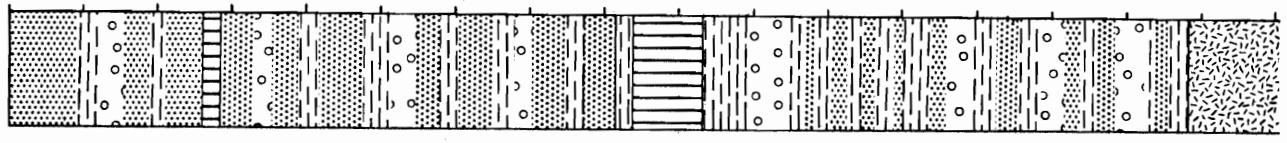
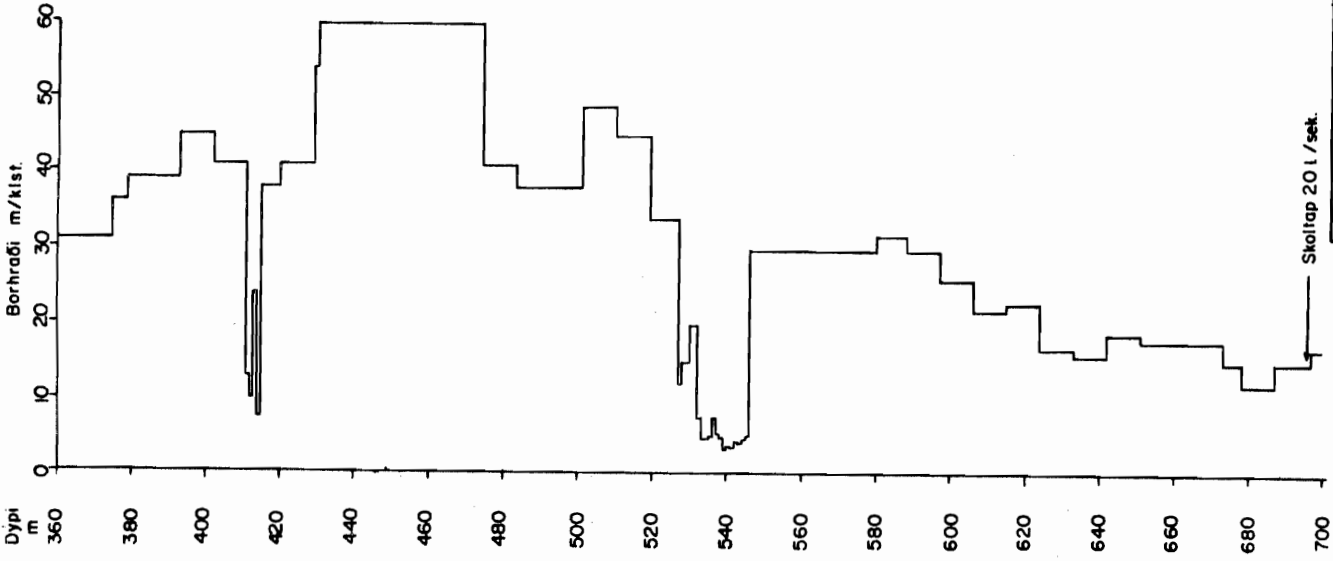
- Basalt
- Móbergbreksia
- Tuff
- Finkornött tuffkennt set
- Sandkennt set
- Gróft set (konglomerat)



frh.

<b>ORKUSTOFNUN</b> REYKJANES Hala 3	Jardhitadeild	
	51258 km/96	Tr. 16
	Bl. 2 of 2	J - Reykjan.
Fnr. 8650		

ORKUSTOFNUN	Jarðhitadeild	23/68/11/16
		Tnr. 26
REYKJANES	Bl. I af 2	J-Reykjan.
Hola 4		Fnr. 8688

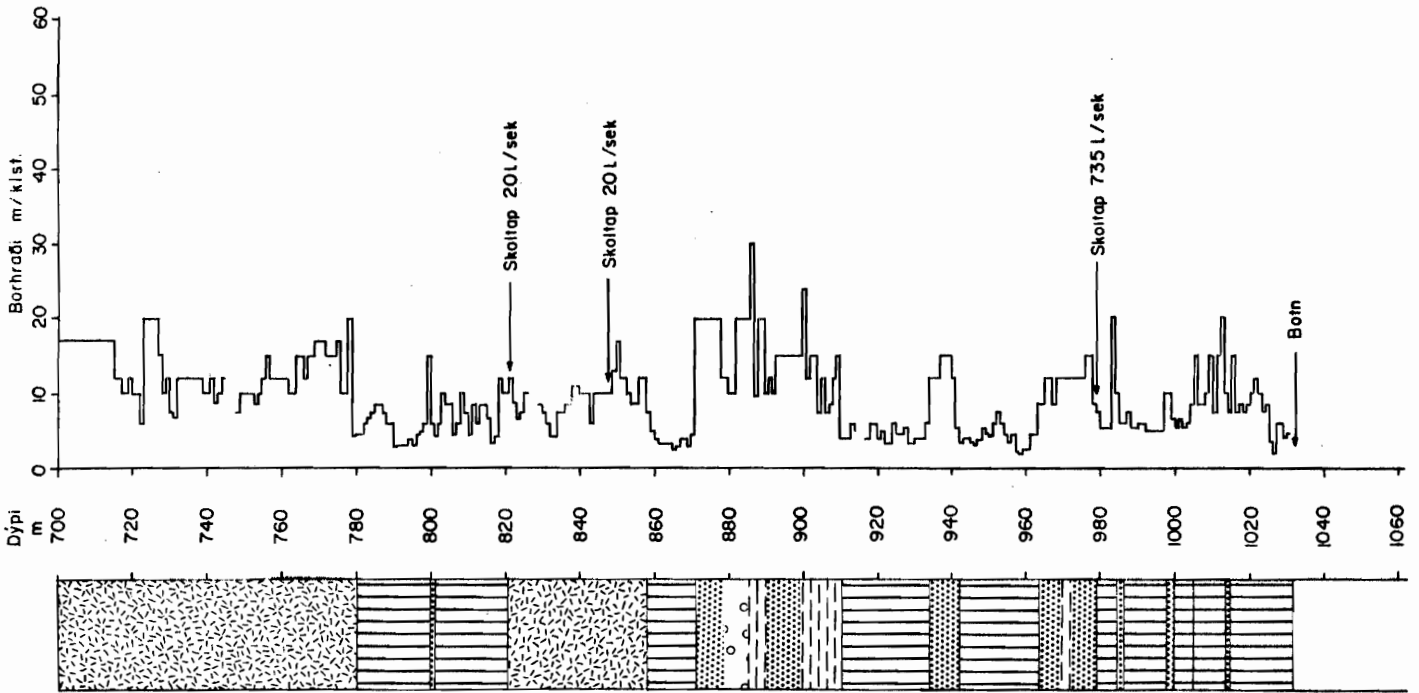


Fóðurrör 41m  
 Ø 340 mm

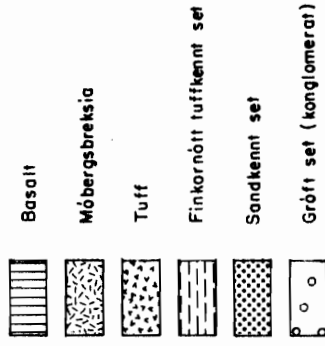
Fóðurrör 246 m  
 Ø 244 mm

Borhola  
 Ø 222 mm

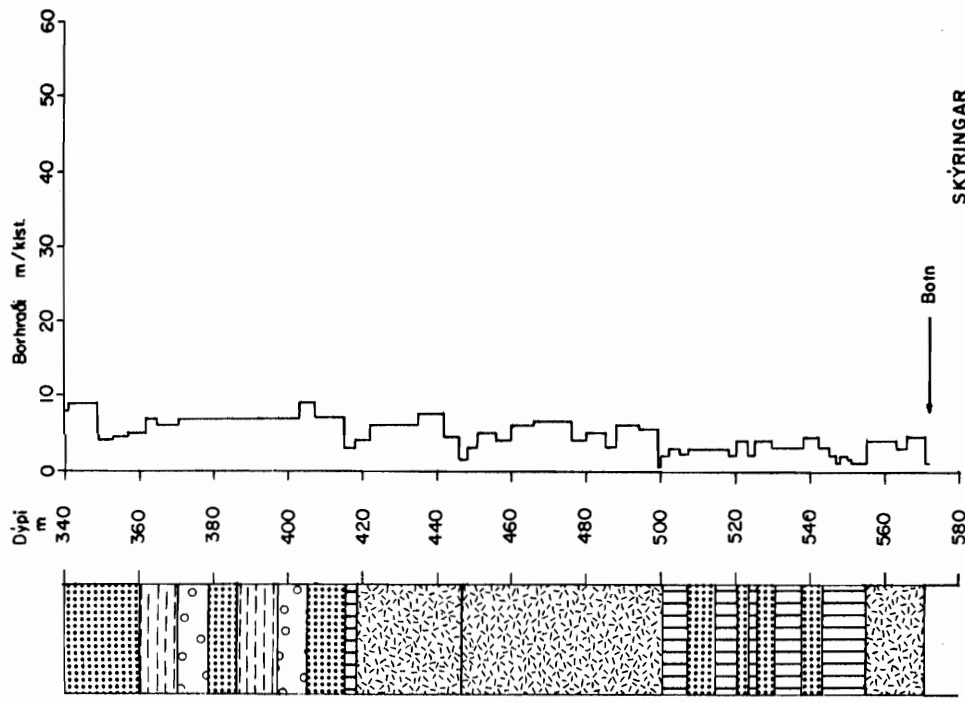
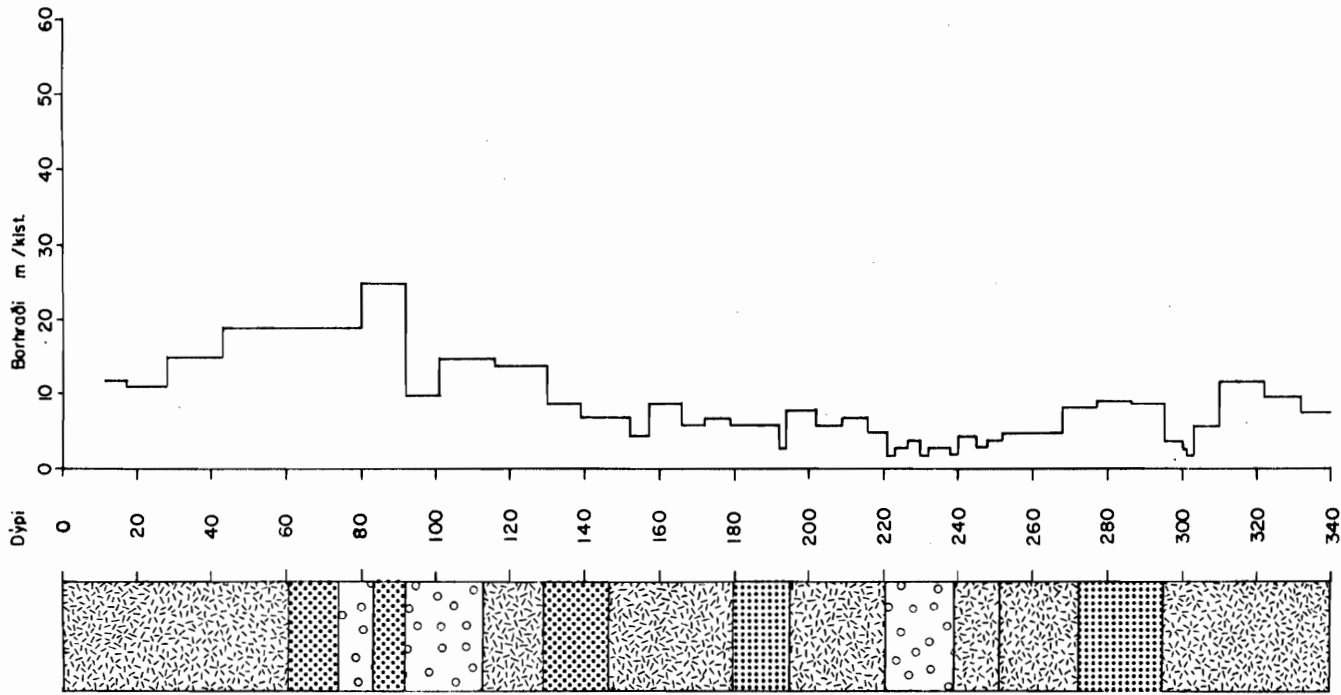
Mynd 3.4



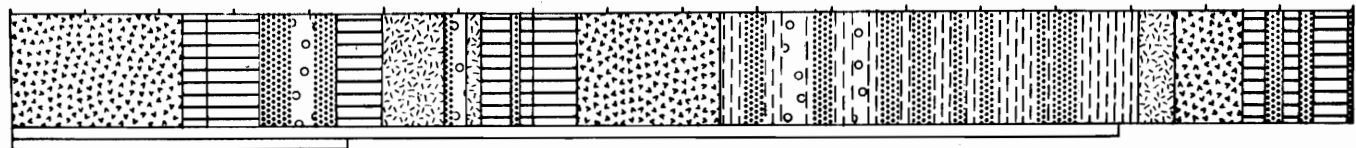
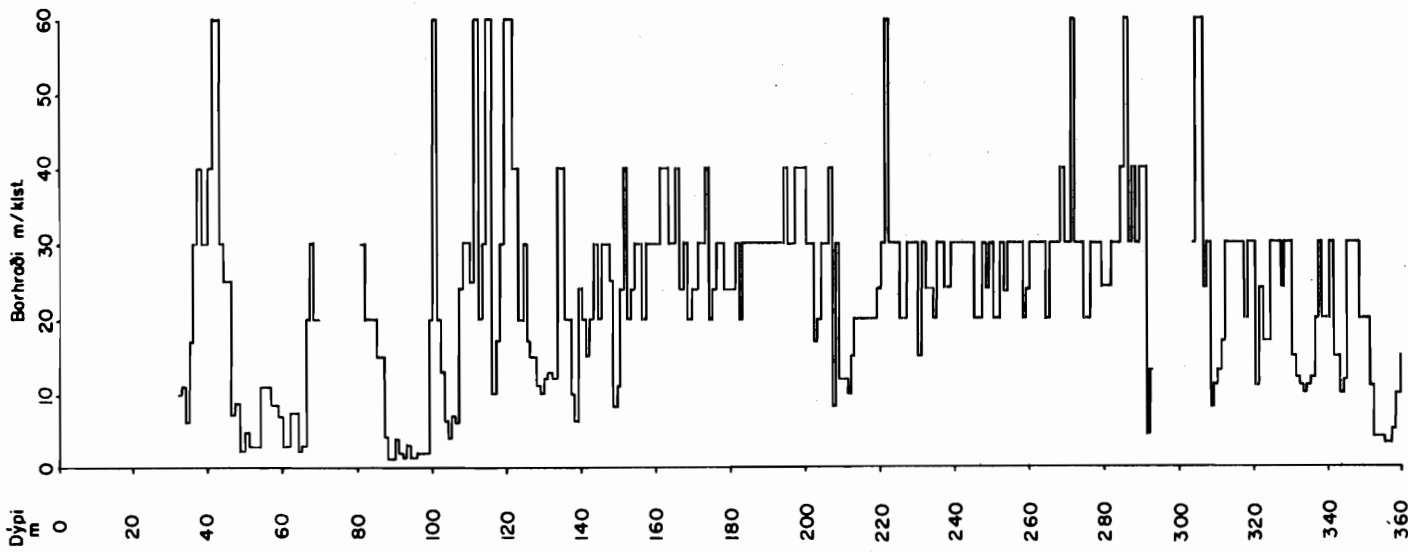
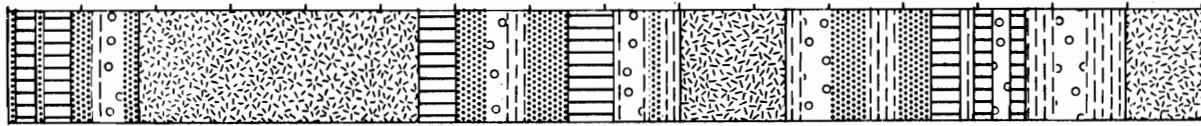
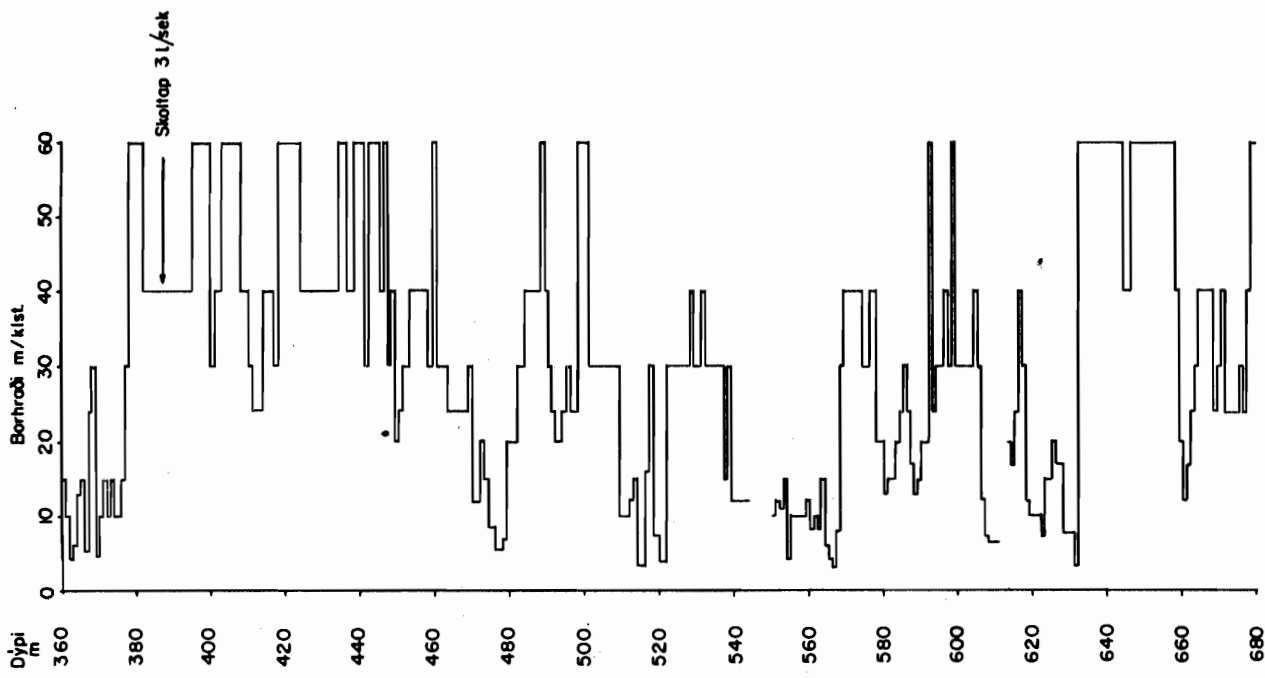
SKÝRINGAR:



ORKUSTOFNUN	Jarðhitadeild
	23.169 PPM
REYKJANES	Tnr. 26
	Bl. 2 af 2 J - Reykjan.
HOLA 4	
Fnr. 8 6 8 8	



ORKUSTOFNUN Jarðhitadeild	18.2.71.JT/0
	Tnc 64
	J-Reifjan.
Reykjanes Hóla 6	Fnr. 9585

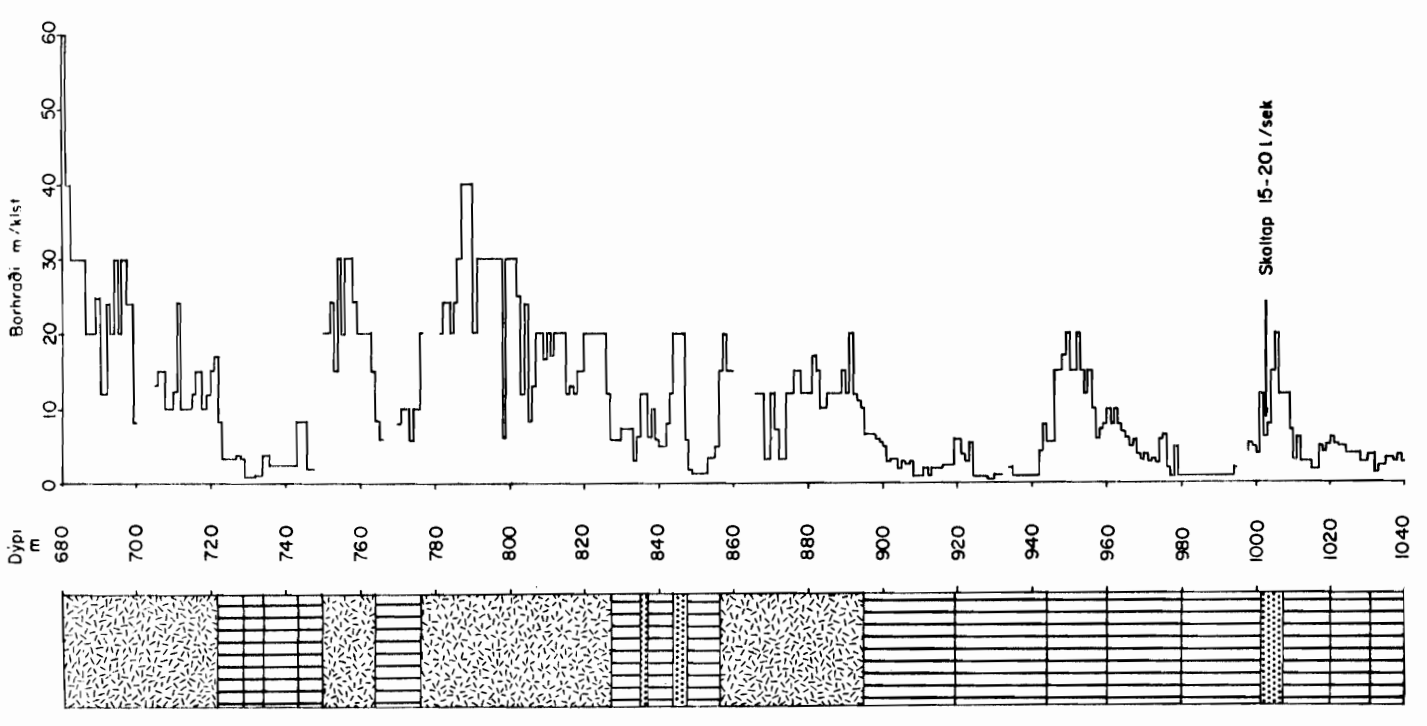
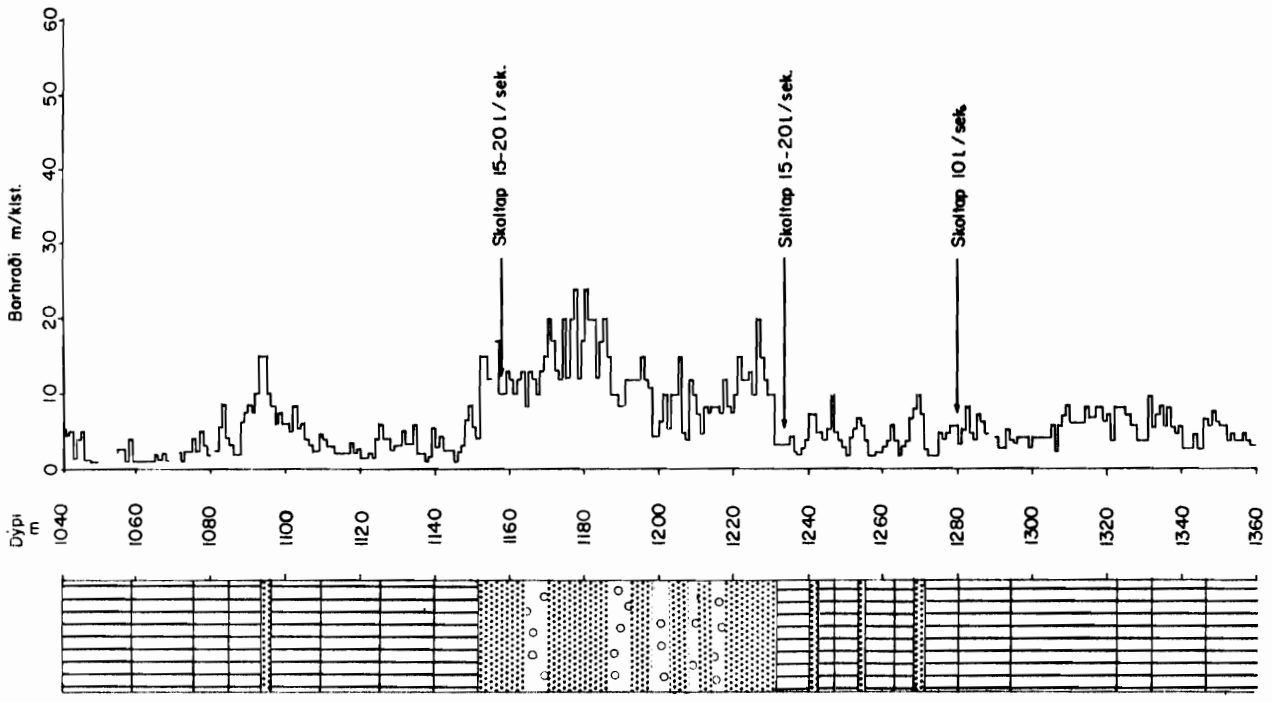


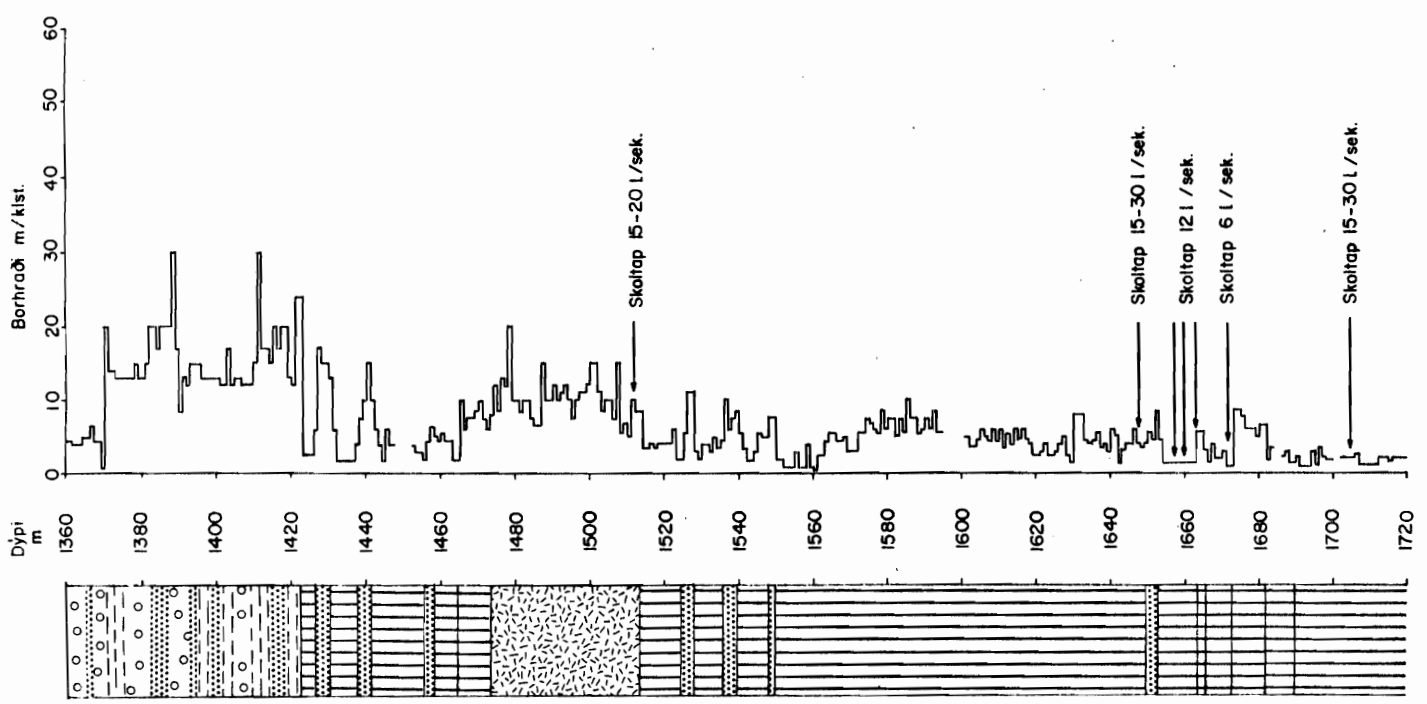
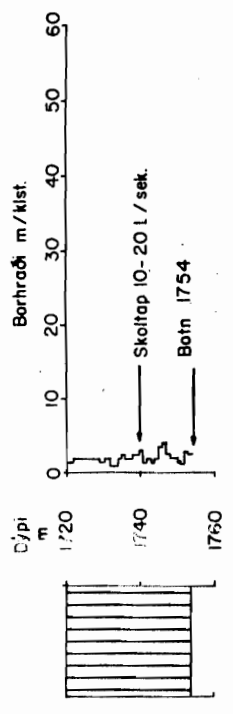
Fóðurtr 90m  
 $\Phi$  340 mm

Fóðurtr 297m  
 $\Phi$  244 mm

ORKUSTOFNUN	Jörðhitaleið	
	19/11 69 J.T/O.M.	Tlx. 49
REYKJANES	BLI ef 3	J-Reykjan.
Hala 8	Fnr. 9055	

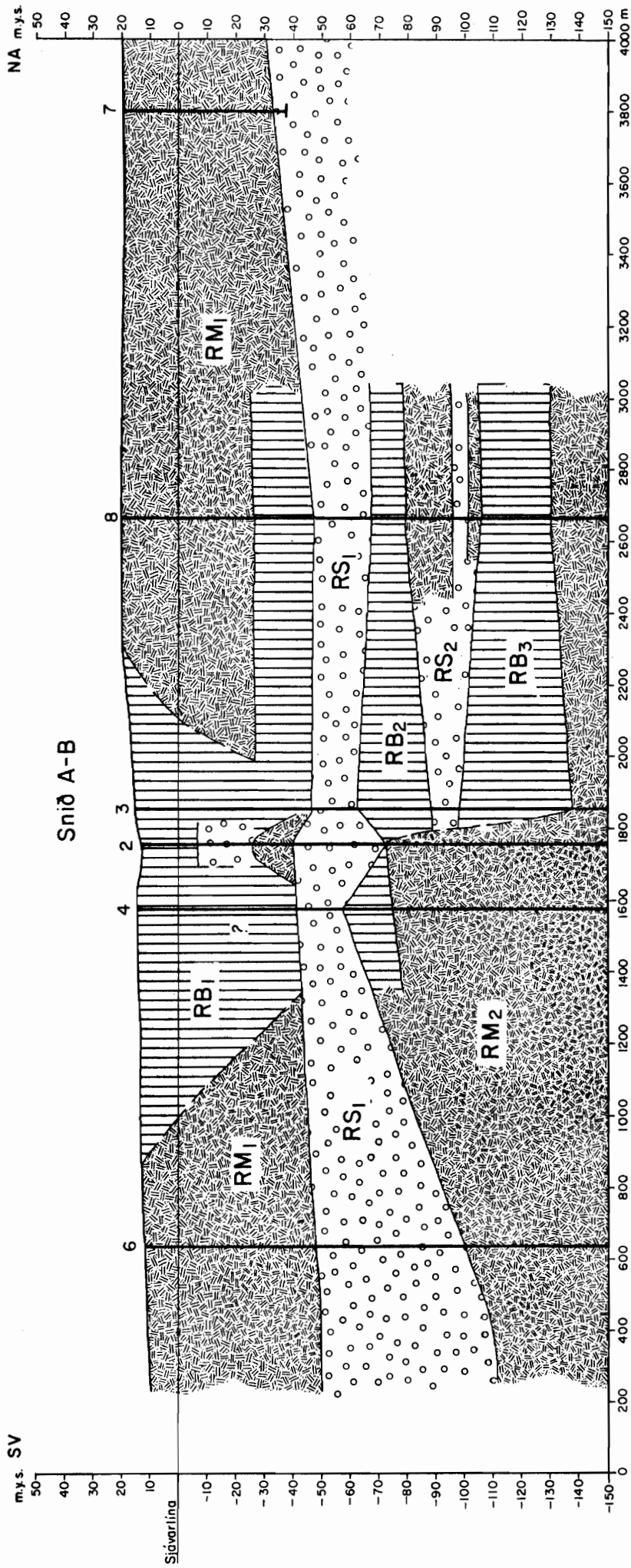









SKÝRINGAR:

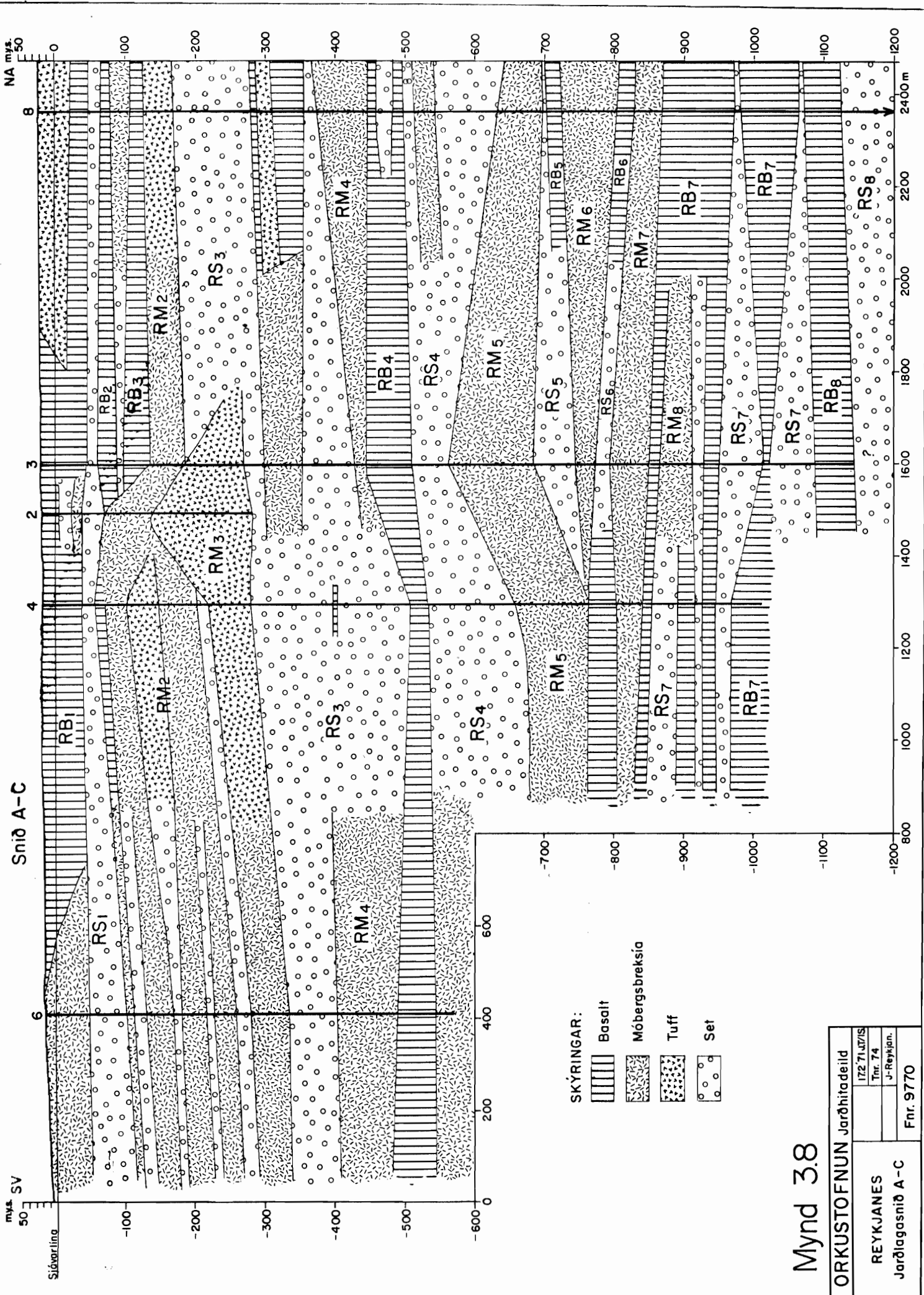
- Basalt
- Móbergbreksia
- Tuff
- Finkornótt tuffkennt set
- Sandkennt set
- Gróft set (konglomerat)



SKÝRINGAR:

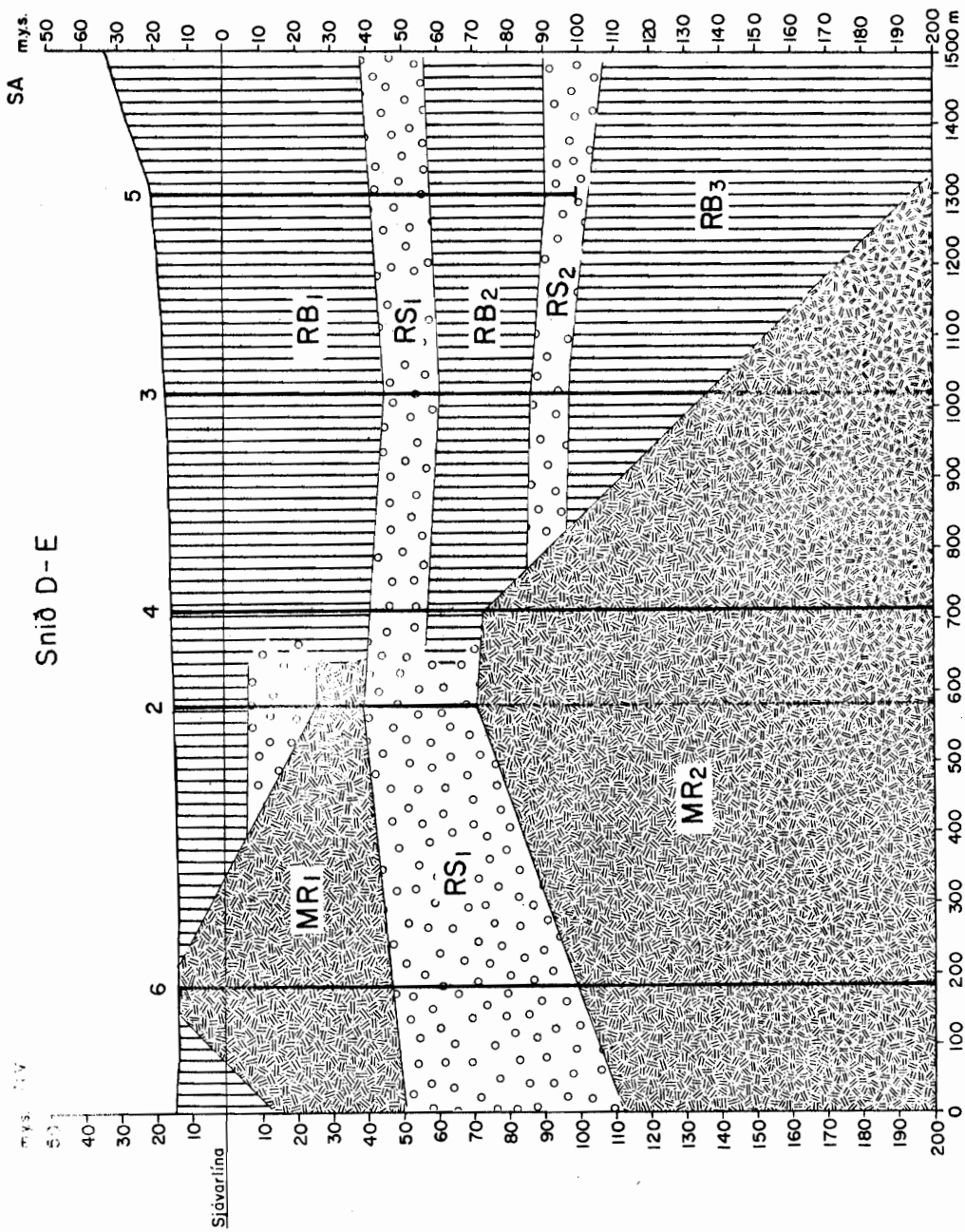
-  Basalt
-  Móberg
-  Set

ORKUSTOFNUN Jarðhitadeild	
REYKJANES	17271/JT/S
Jarðlagasnið A - B	Tr. 73
	J-Reykjan.
	Fnr. 9769



Mynd 3.8

ORKUSTOFNUN Jarðhitadeild	17271J/1/S
	Thr. 74 J-Reykjan.
REYKJANES	
Jarðlagasnið A-C	
	Fnr. 9770



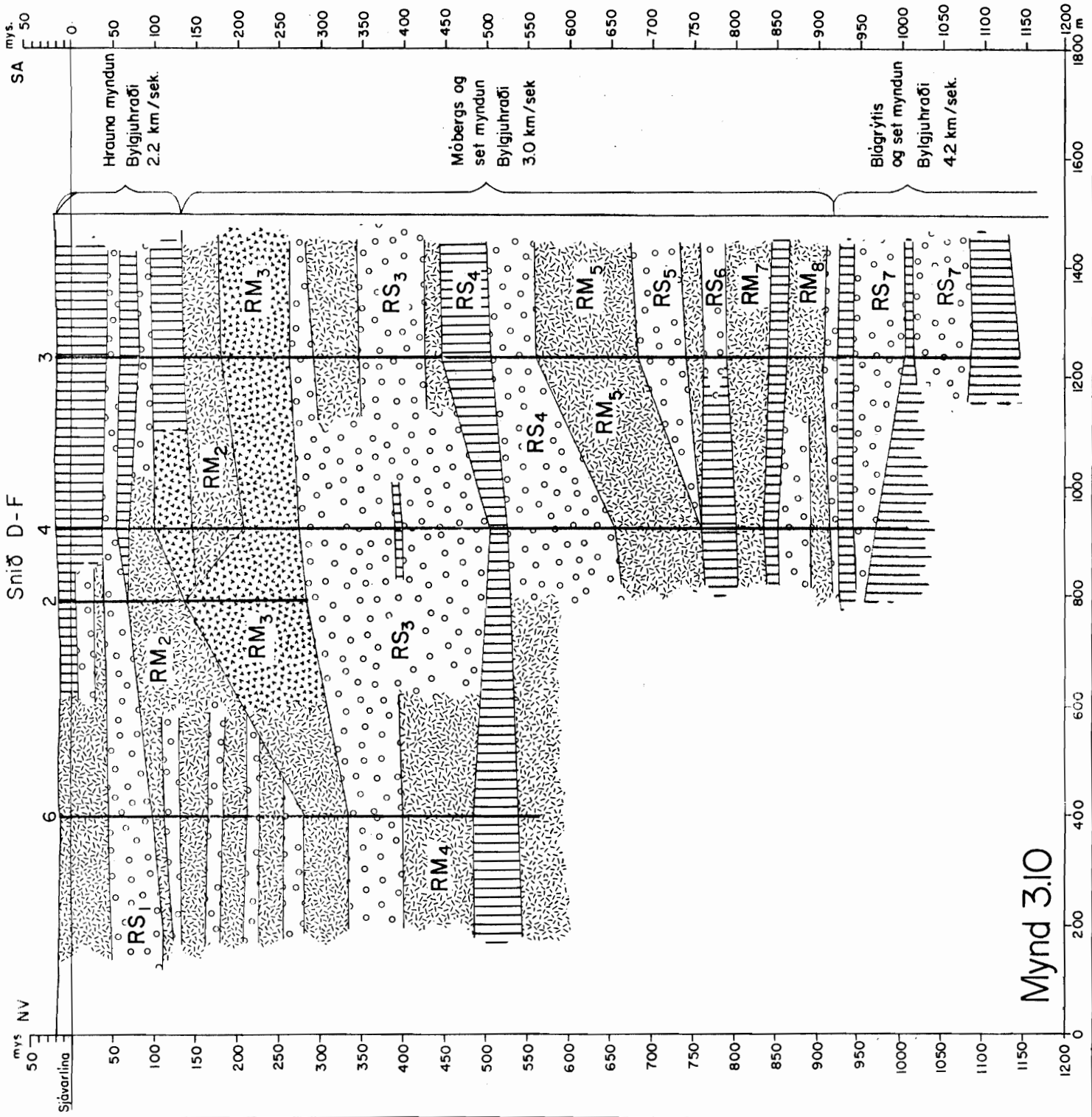
SKÝRINGAR:

Basalt  
Móberg  
Set

(RB) Basalt  
(RM) Móberg  
(RS) Set

ORKUSTOFNUN Jarðhitadeild	
REYKJANES	ITZ 71 J/T/S
Jarðlagasnið D-E	Tnr. 75
	J.-Reykjan
	Fnr. 9771

Mynd 3.9

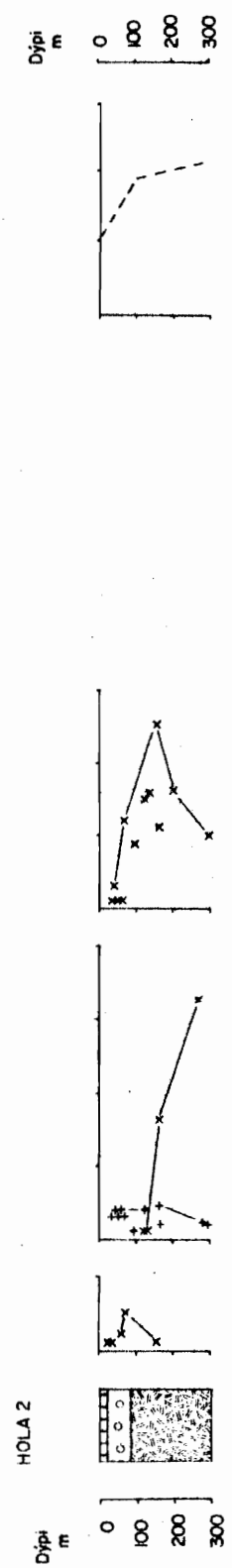
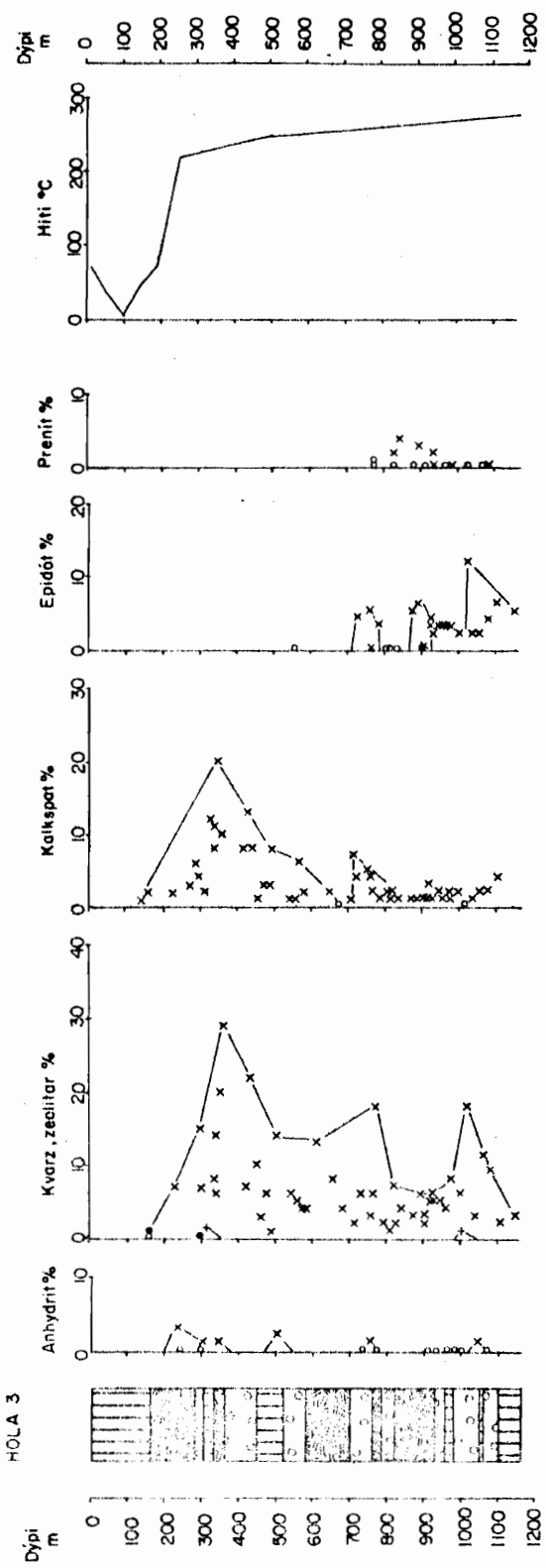


SKÝRINGAR:








- Basalt
- Móbergsbreksia
- Tuff
- Set

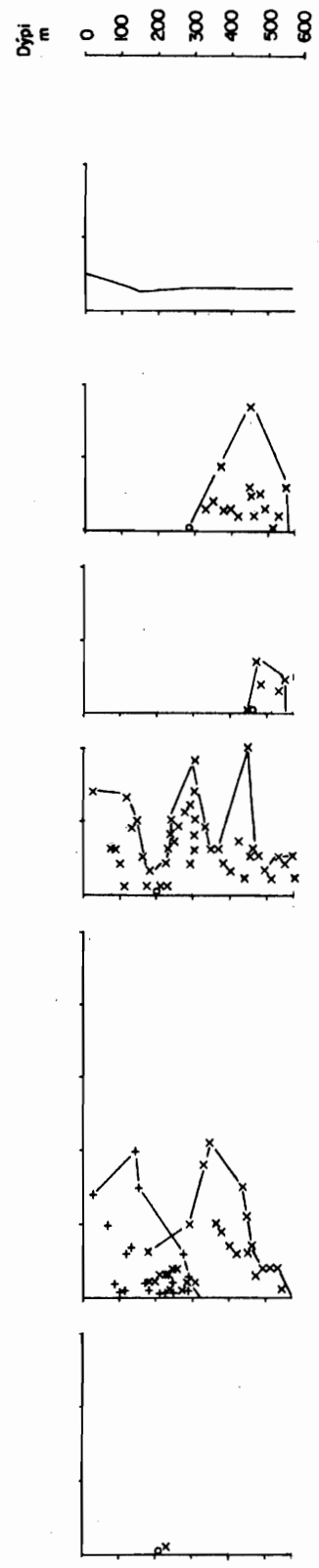
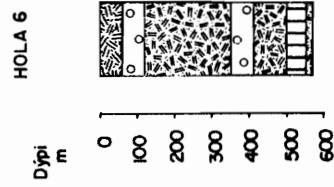
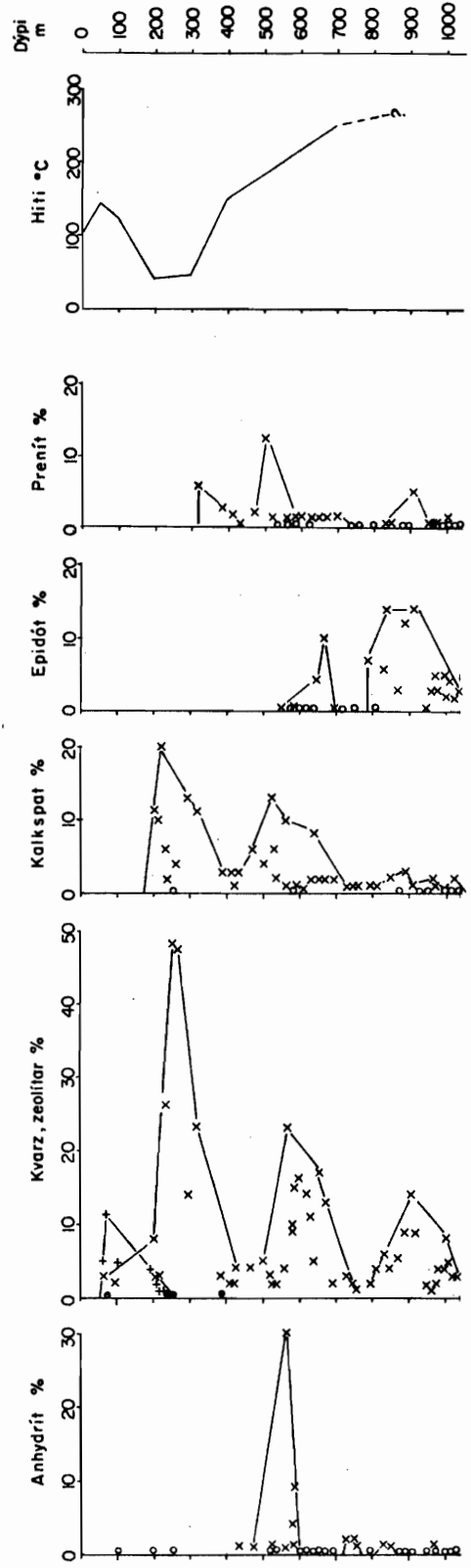
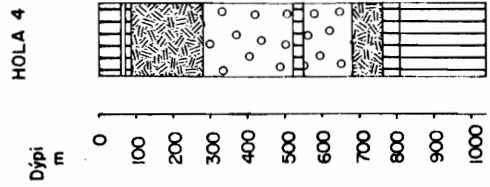
ORKUSTOFNUN Jarðhitadeild	22.27.17.0
	Tnr. 76
	J.-Reykjan.
REYKJANES	
Jarðlagasnið D - F	
	Fnr. 9772

Mynd 3.10



SKÝRINGAR:

-  Basalt
-  Máberg
-  Set
-  Kvarz og önnur mineröl
-  Zeolitar
-  Spur af kvarzi og öðrum minerölum
-  Spur af zeolítum



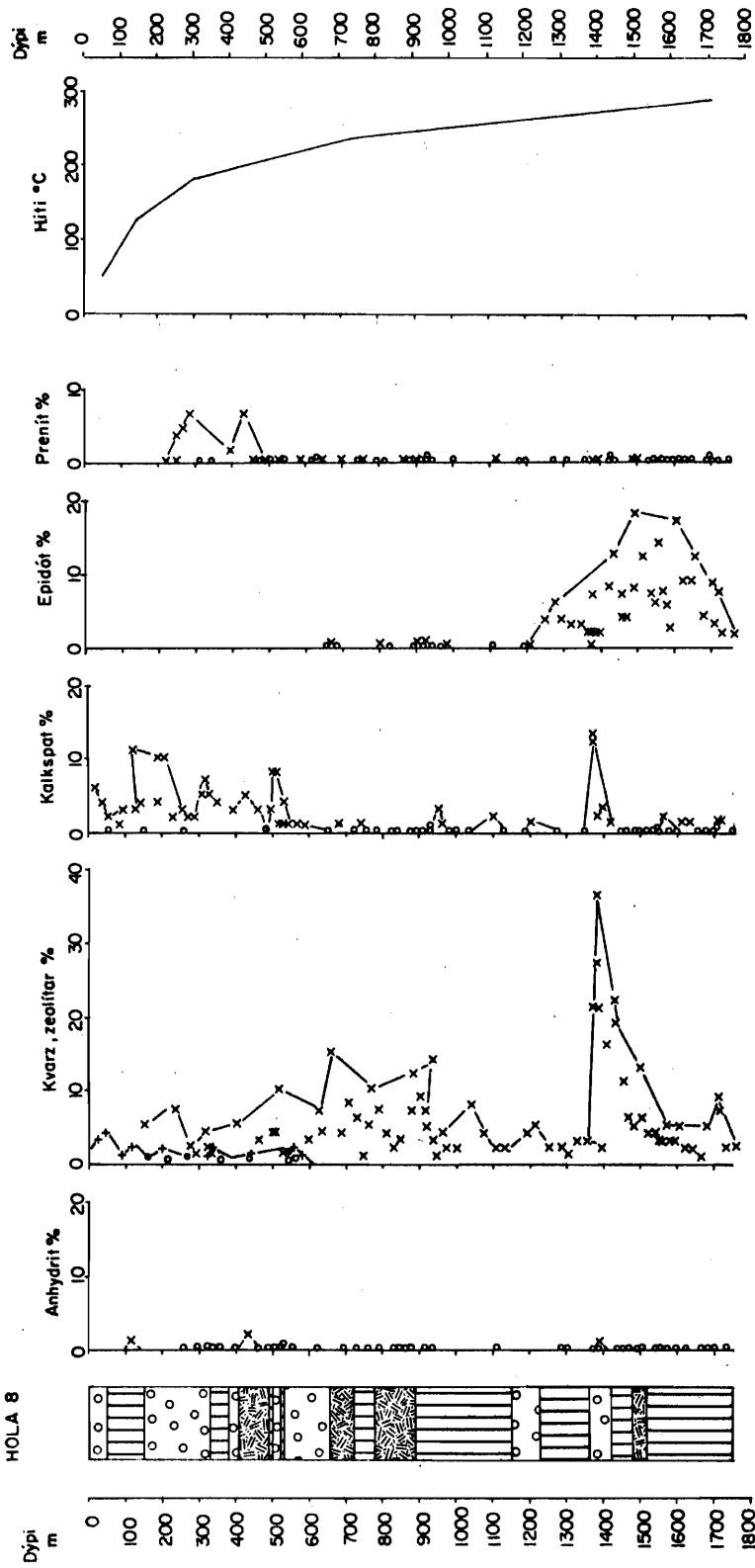
SKÝRINGAR:

- Basalt
- Móberg
- Set
- Kvarz og önnur minneröl
- Zeolítar
- Spur af kvarzi og öðrum minnerölum
- Spur af zeolítum

ORKUSTOFNUN

Mineralgreining í hola 4 og 6, Reykjanesi  
 17.2.71JT/e Tnr.69-11  
 J-Reykjanes J.-J.efnav. FNR. 9760



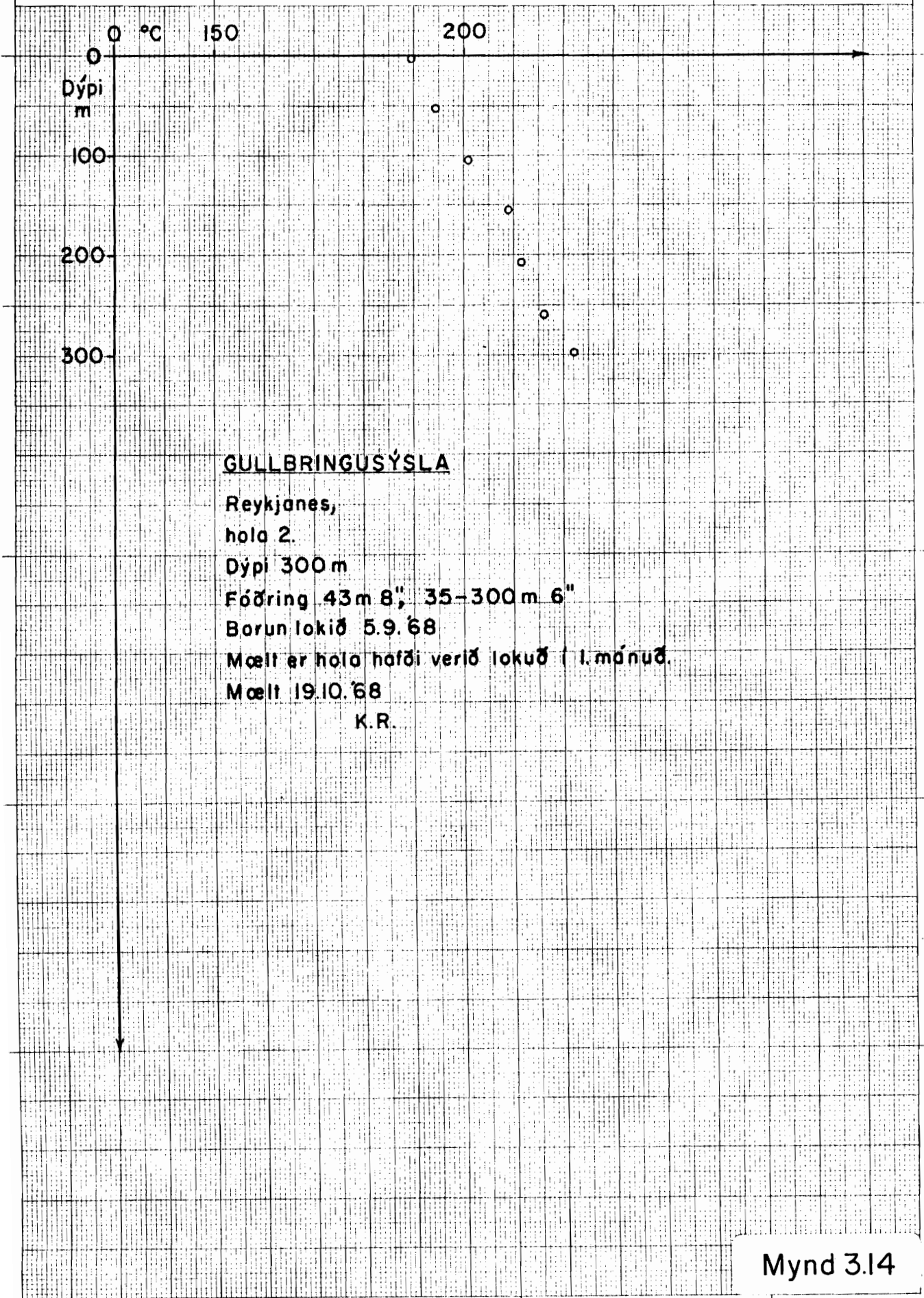


SKÝRINGAR:

- Basalt
- Móberg
- Set
- Kvarz og önnur mineröl
- Zeolítar
- Spur af kvarzi og öðrum minerólum
- Spur af zeolítum

<b>ORKUSTOFNUN</b>	
Mineralgreining í holu 8, Reykjanesi	
17.271JT/e	Tr.70-12
J-Reykjanes	J-Jafnáv.
FNR.9761	

Hitamælingar í borholum



GULLBRINGUSÝSLA

Reykjanes,  
hola 2.

Dýpi 300 m

Fóðring 43 m 8", 35-300 m 6"

Borun lokið 5.9.68

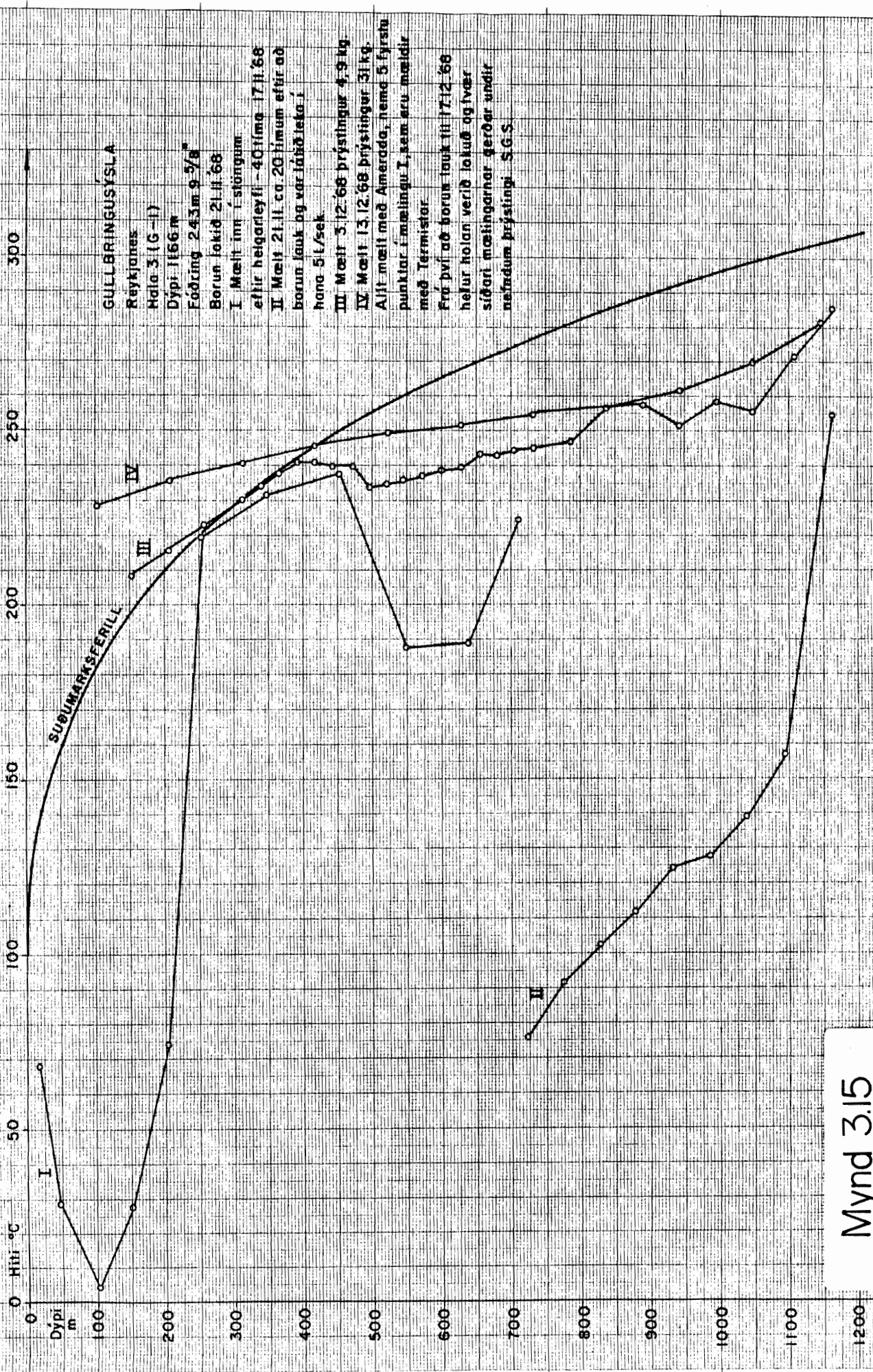
Mælt er hola hafði verið lokið í 1.mánuð.

Mælt 19.10.68

K.R.

16.12.68 SSS/Gyða  
 Tnr. 21 Tnr. 634  
 J-Reykjan, J-Hitam.  
 Fr. 8659

ORKUSTOFNUN  
 Jarðhitadælið  
 Hitamælingar í borholum



GULLBRINGUSÝSLA

Reykjanes

Hala 3 (G-I)

Dýpt 1166 m

Fádring 243 m 9 5/8"

Borun fokið 21.11.68

I Mælt inn í stöngum

eftir heilgareyfi - 40fima 17.11.68

II Mælt 21.11. ca. 20 tímum eftir að

borun lauk og var lokað leka í

hana 5 l/sek

III Mælt 5.12.68 þrýstingur 4,9 kg

IV Mælt 13.12.68 þrýstingur 31 kg

Allt mælt með Ameraða, nema 5 fyrstu

punktur í mælingu I, sem eru mældir

með Termistor

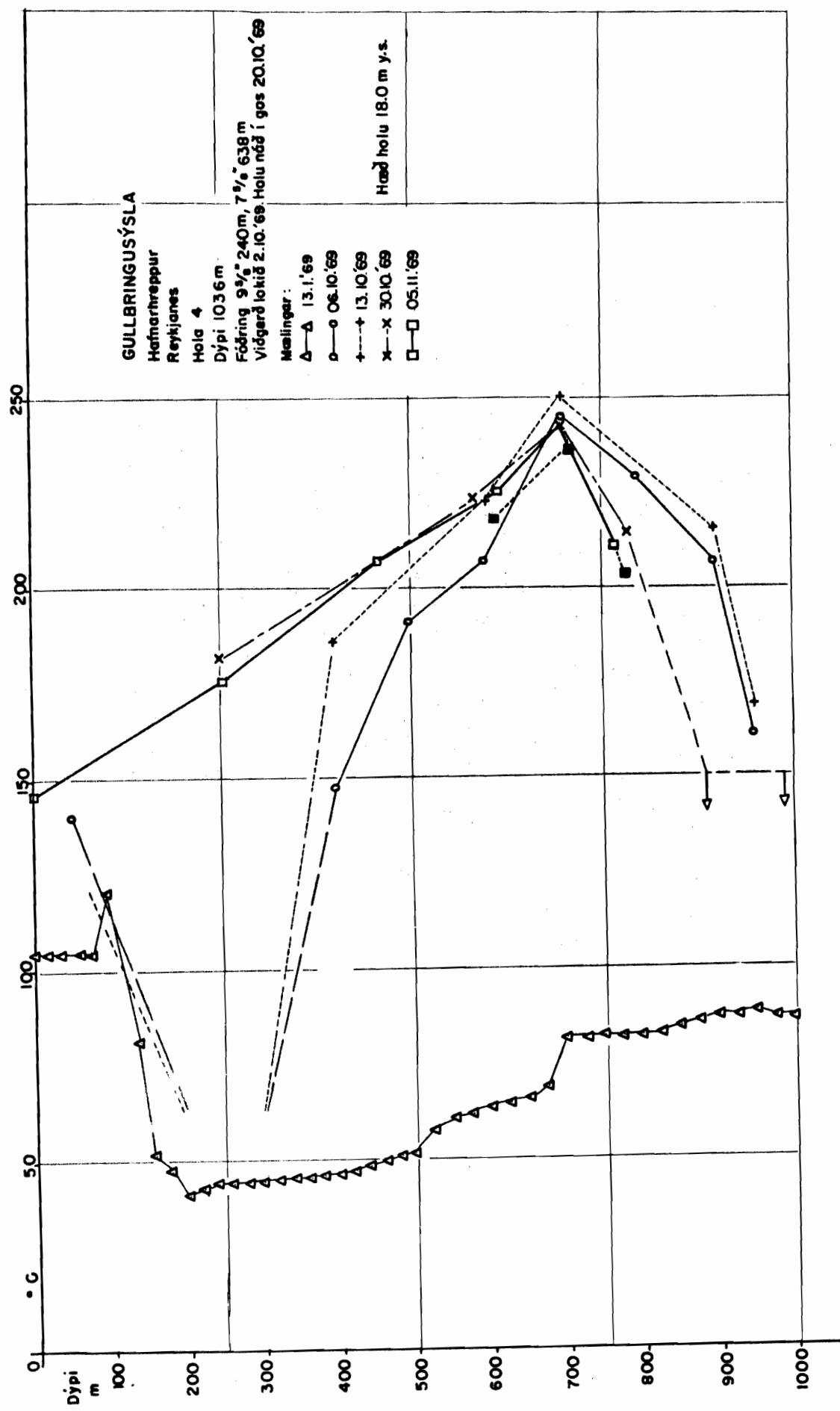
Fra því að borun lauk til 17.12.68

hefur holan verið lokað og tvær

sjóari mælingarnar gerðar undir

meðnum þrýstingi S.G.S.

Mynd 3.15



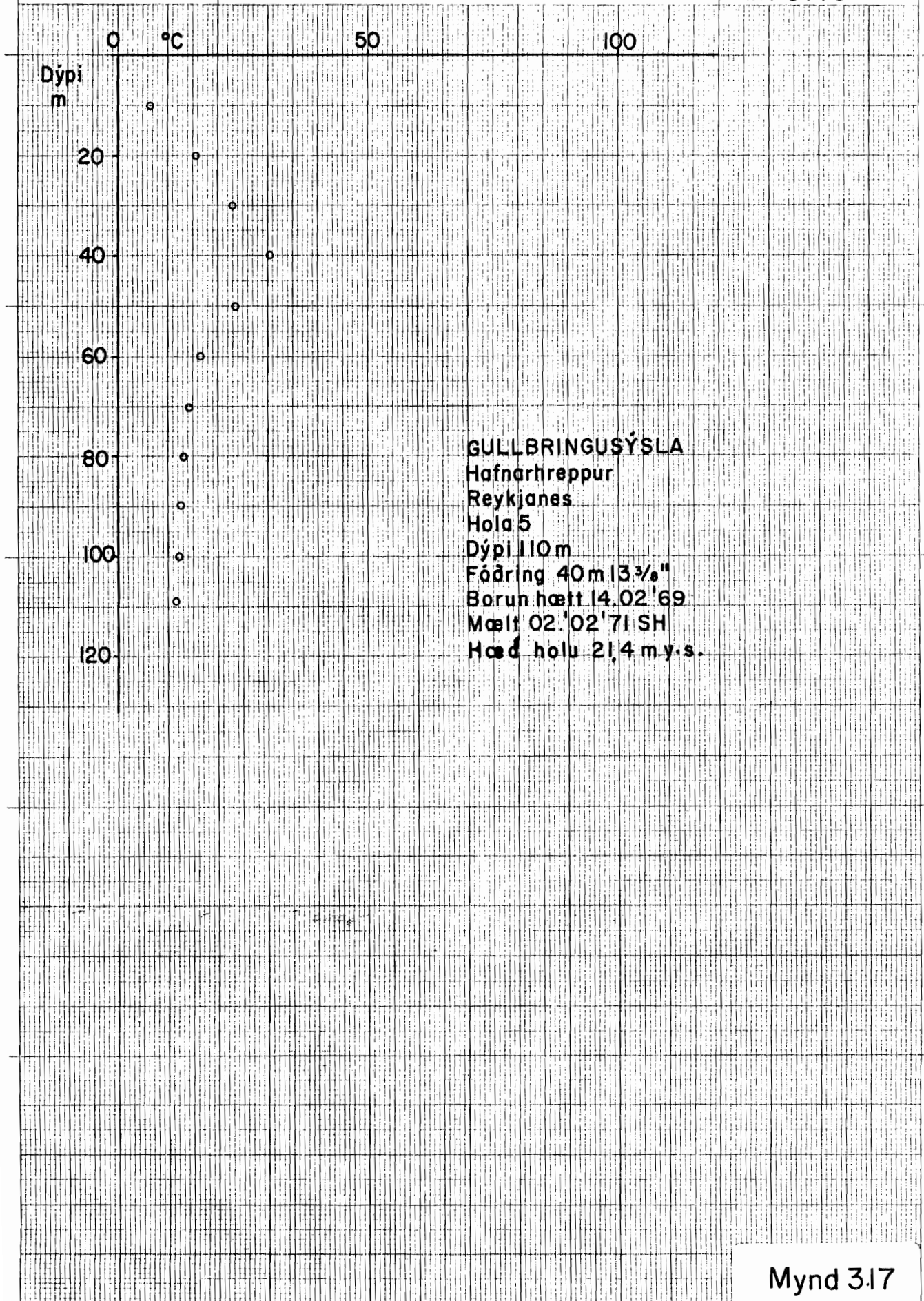
Mynd 3.16



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

Hitamæling í borholu

18.2'71 SH/e  
Tnr.78 Tnr.670  
J-Reykjan.-Hitam.  
Fnr. 9776



GULLBRINGUSÝSLA

Hafnartreppur

Reykjanes

Hola 5

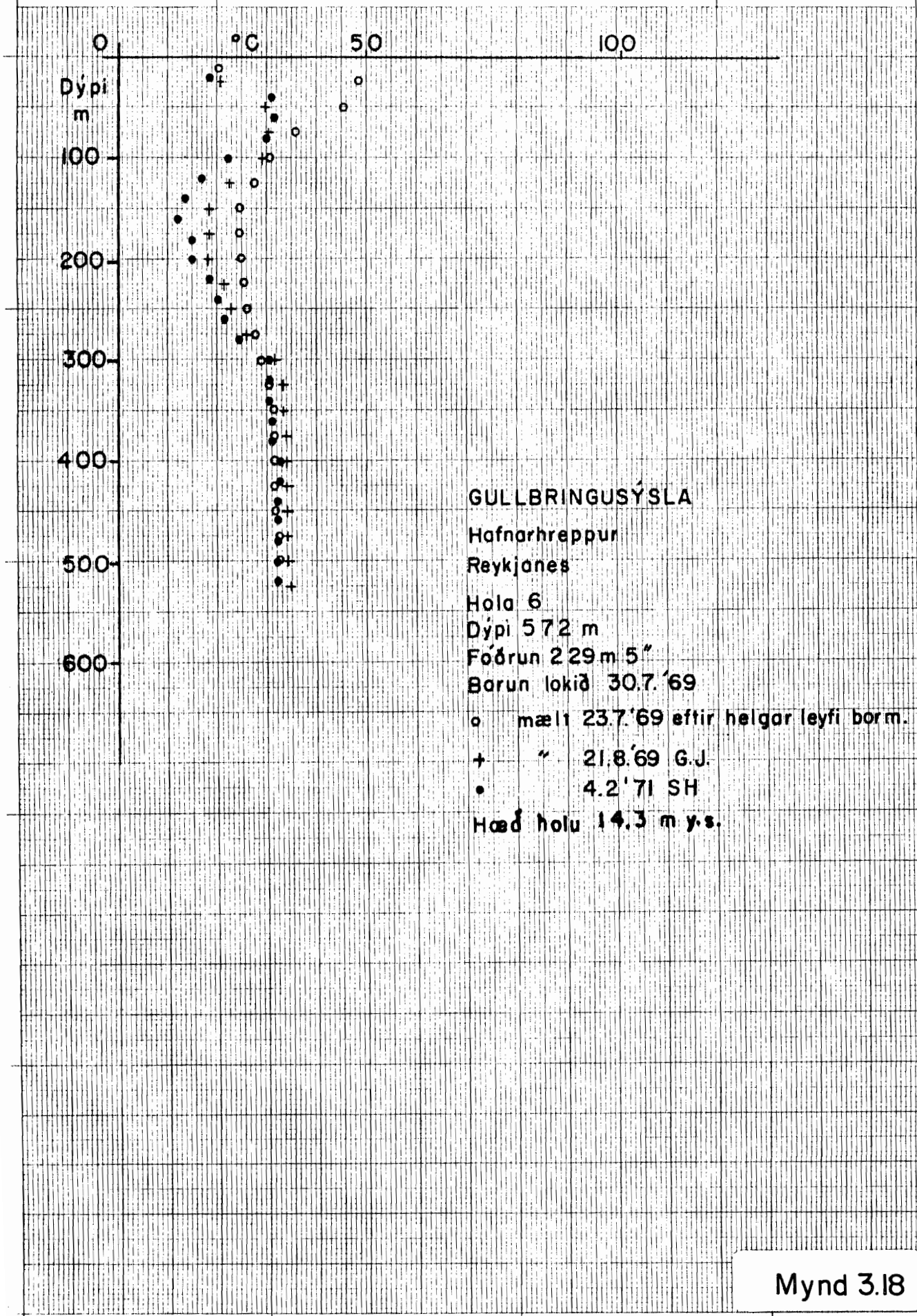
Dýpi 110m

Fóðring 40m 13 3/8"

Borun hætt 14.02'69

Mælt 02.'02'71 SH

Hæð holu 21,4 m.y.s.



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

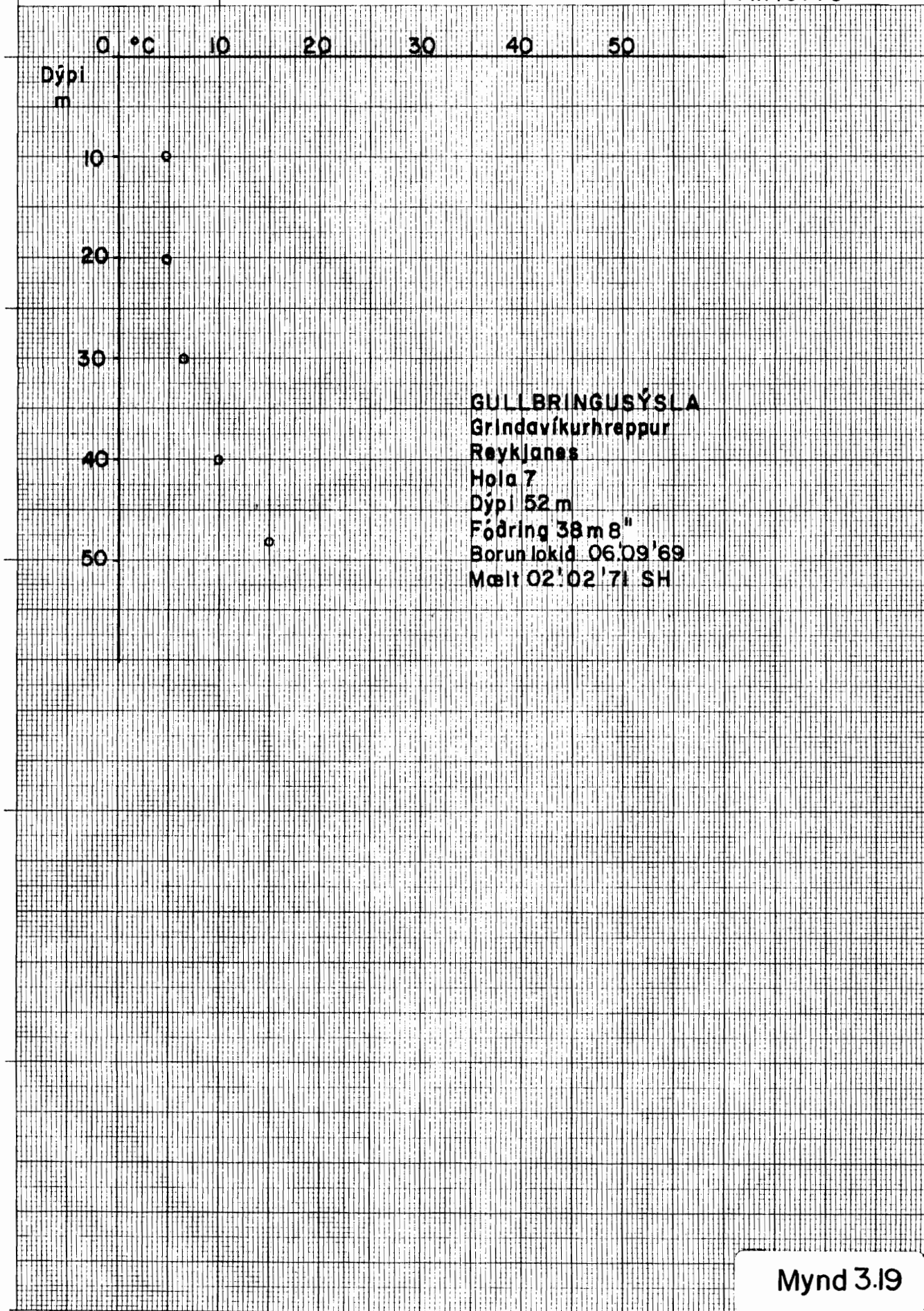
Hitamæling í borholu.

18.2'71 SH/e

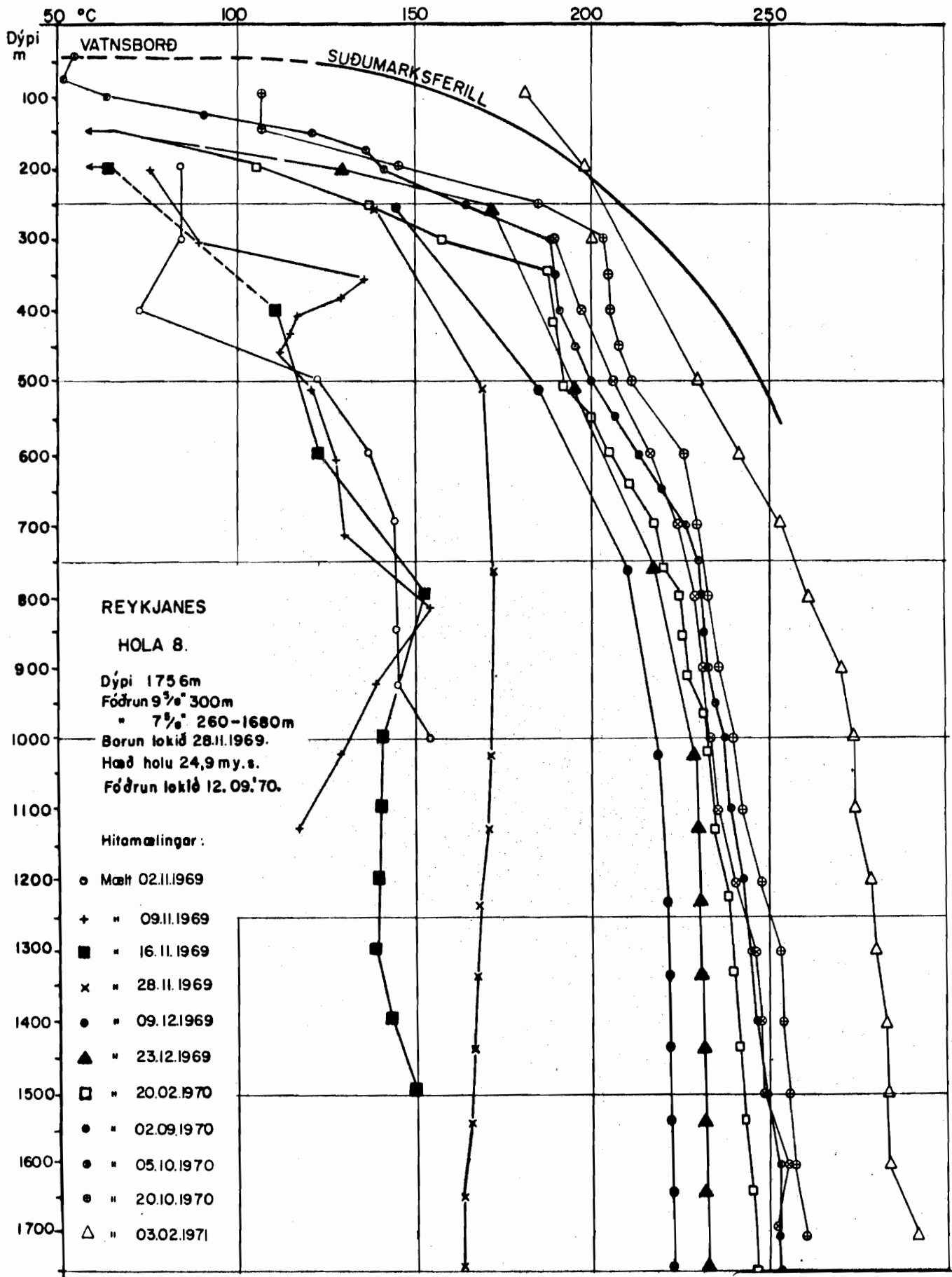
Tnr. 77 Tnr. 661

J-Reykjan.-Hitam

Fnr. 9775







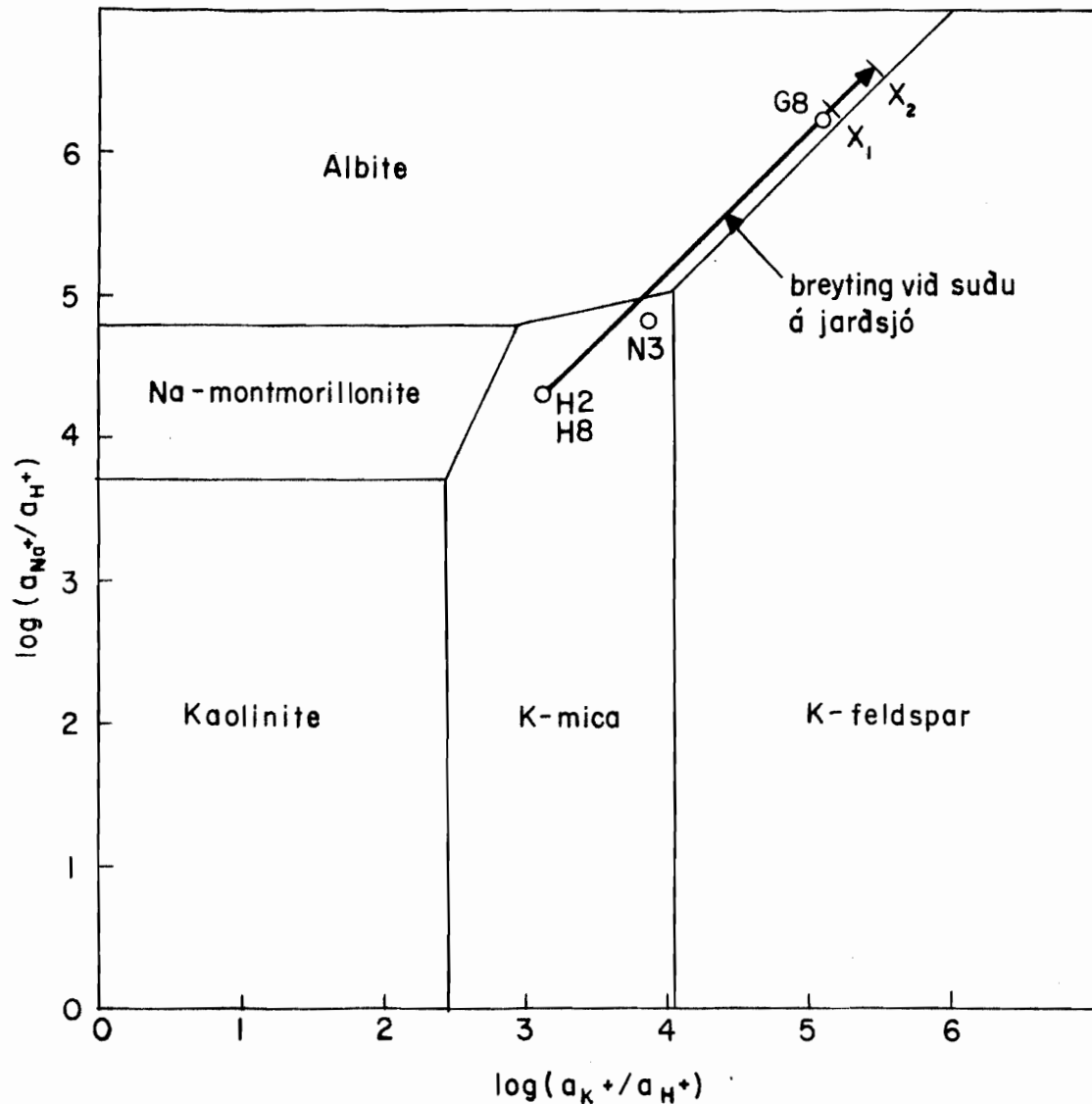
Mynd 3.20





Stöðugleiki Na- og K- steintegunda.

Samband milli jónavirkni hlutfallanna  $Na^+/H^+$  og  $K^+/H^+$  við stöðugleika Na- og K- steintegunda, sem eru algengar í bergi ummynduðu af jarðhita. Reiknað við 260°C



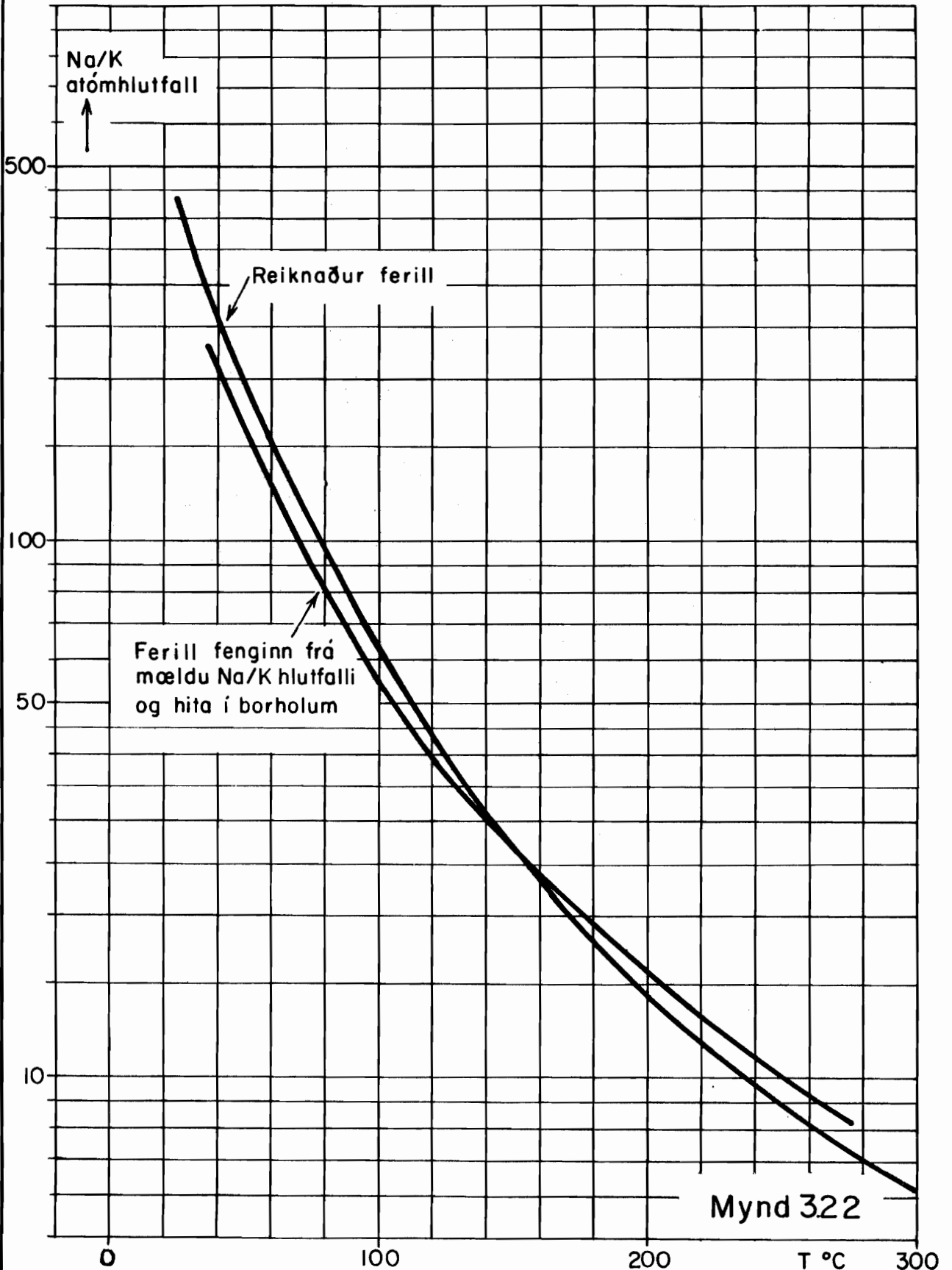
- H2  
H8     borholur 2 og 8 á Reykjanesi
- N3     borhola 3 við Námafjall
- G8     borhola 8 Hveragerði
- X<sub>1</sub>  
X<sub>2</sub>     jarðsjór, sem sodið hefur niður í 4ata og 1ata

Na/K ATÓMHLUTFALL Í VATNI, SEM  
STJÓRNAST AF UPPLEYSANLEIKA  
 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  OG  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$

Tnr. 3

J-Jarðefnafr.

Fnr. 9331

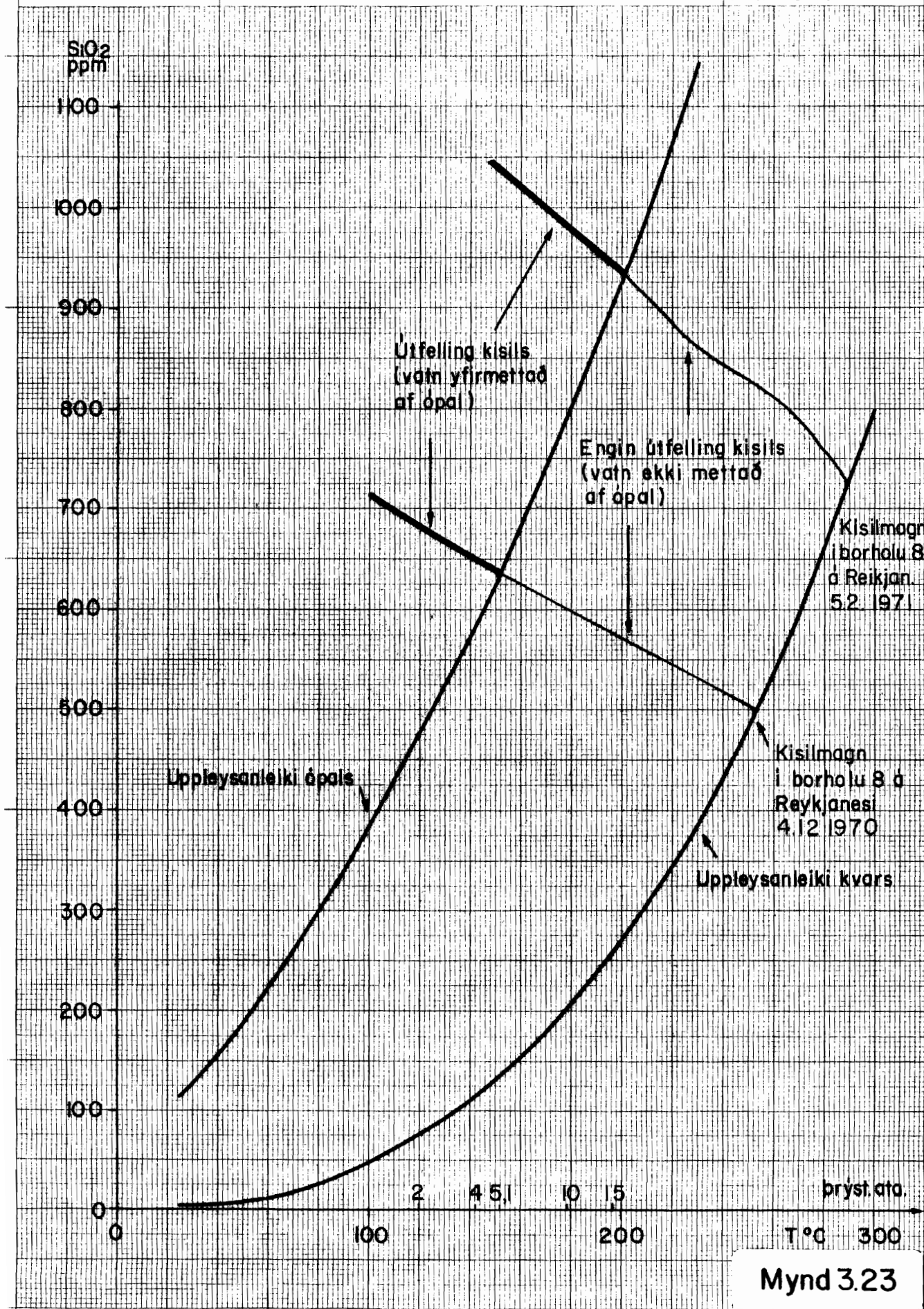


ÚTFELLING KÍSILS Í BORHOLUM

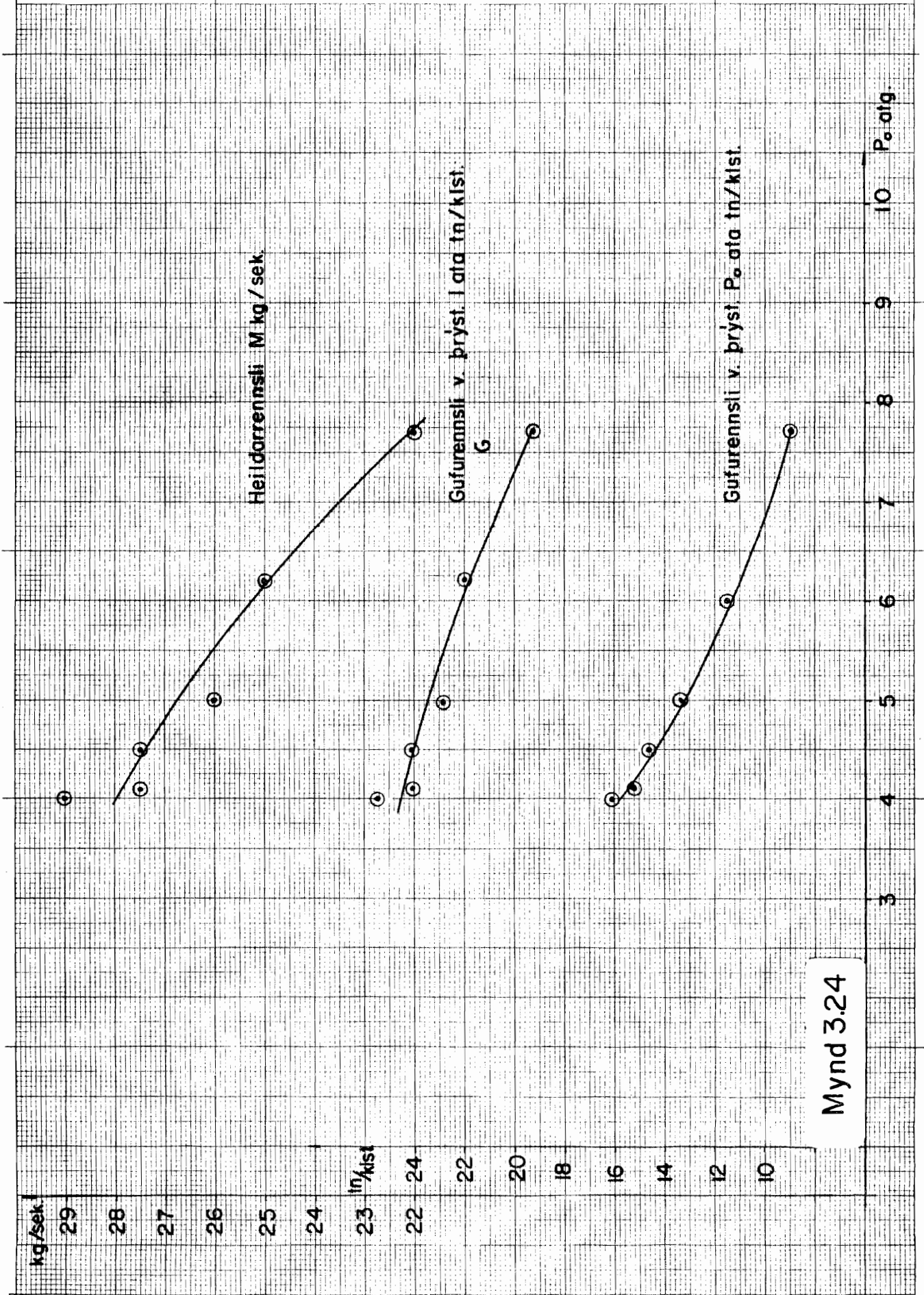
Tnr. 8

J - Jarðefnafr.

Fnr. 9656



Mynd 3.23



Mynd 3.24



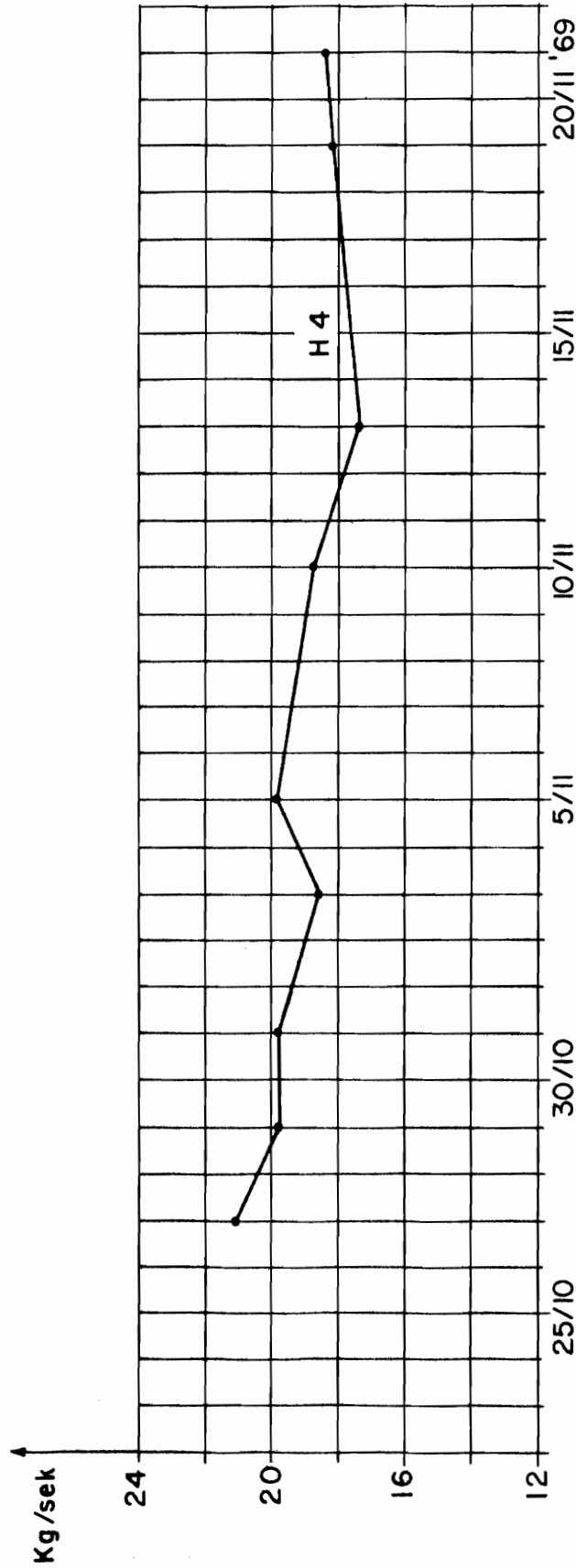
Heildarrensli borholu 4  
Reykjanesi.

3.3'71 SA/O.M

Tnr.63 Tnr. 14

J-Reykjan J-Aflm.

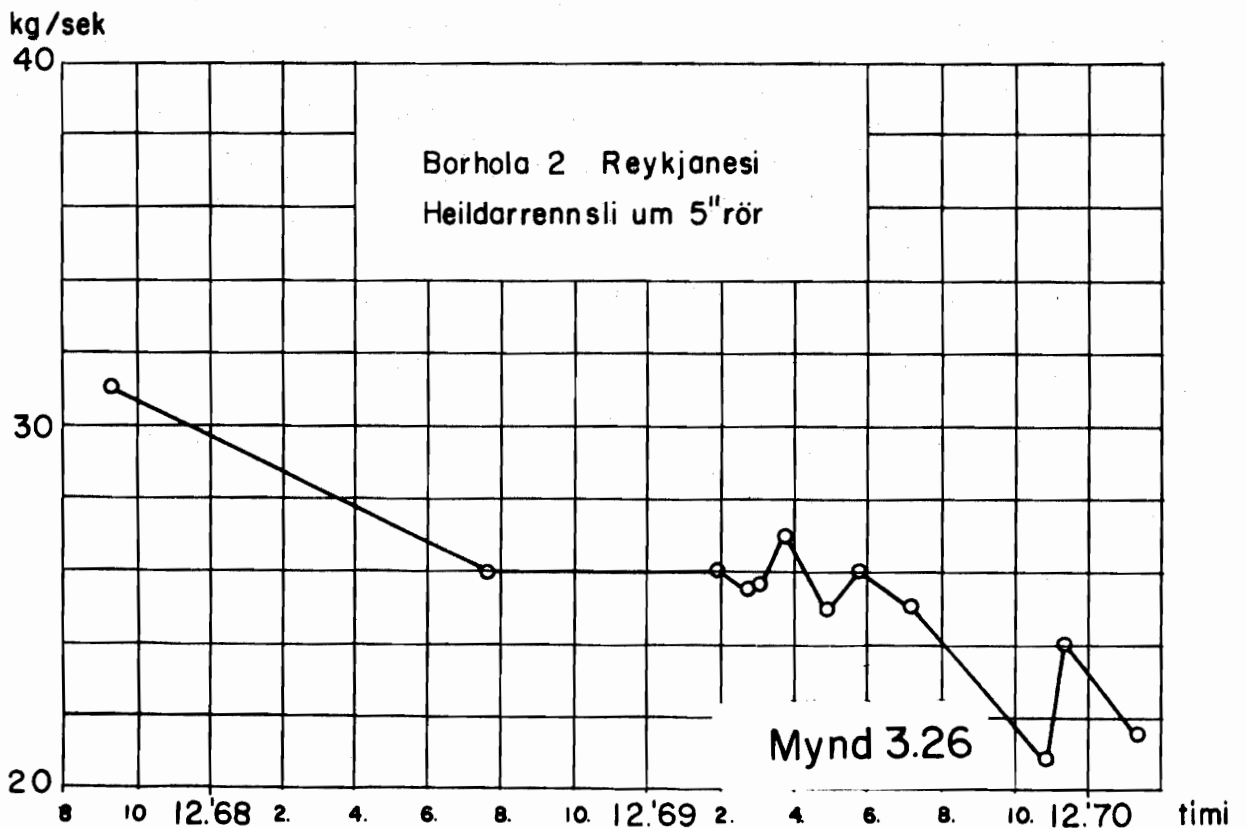
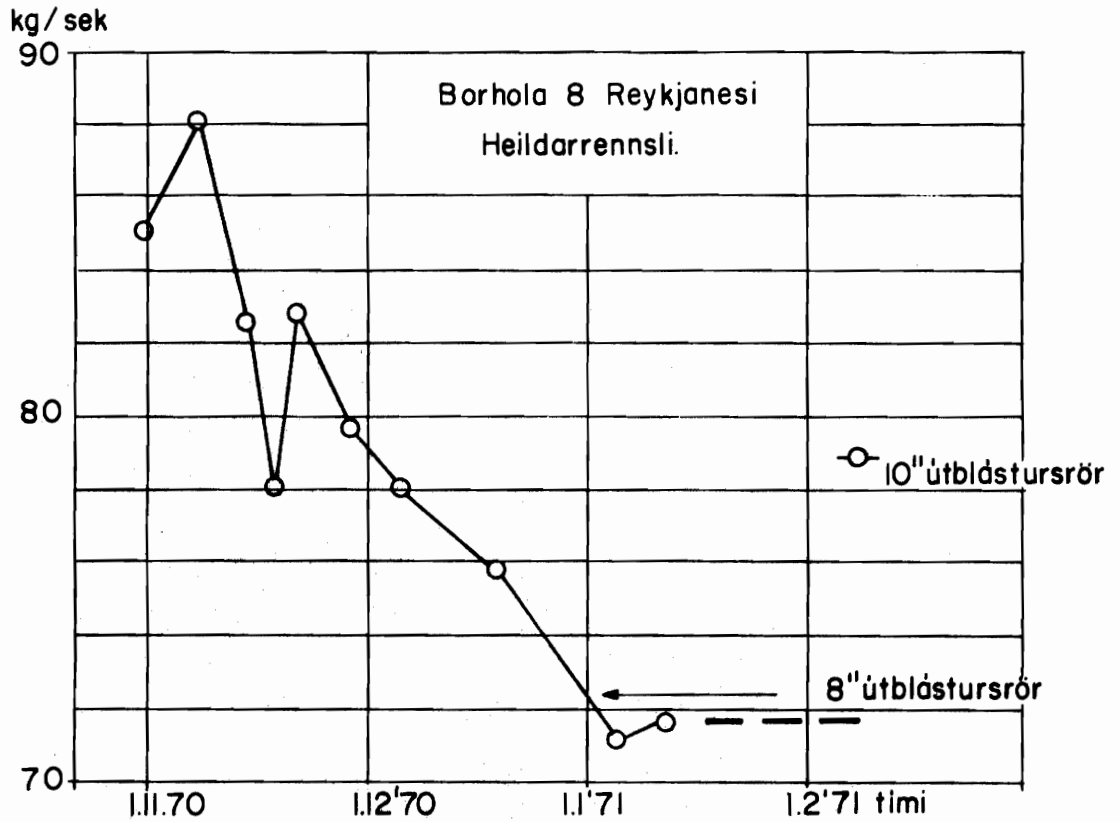
Fnr. 9523



Mynd 3.25

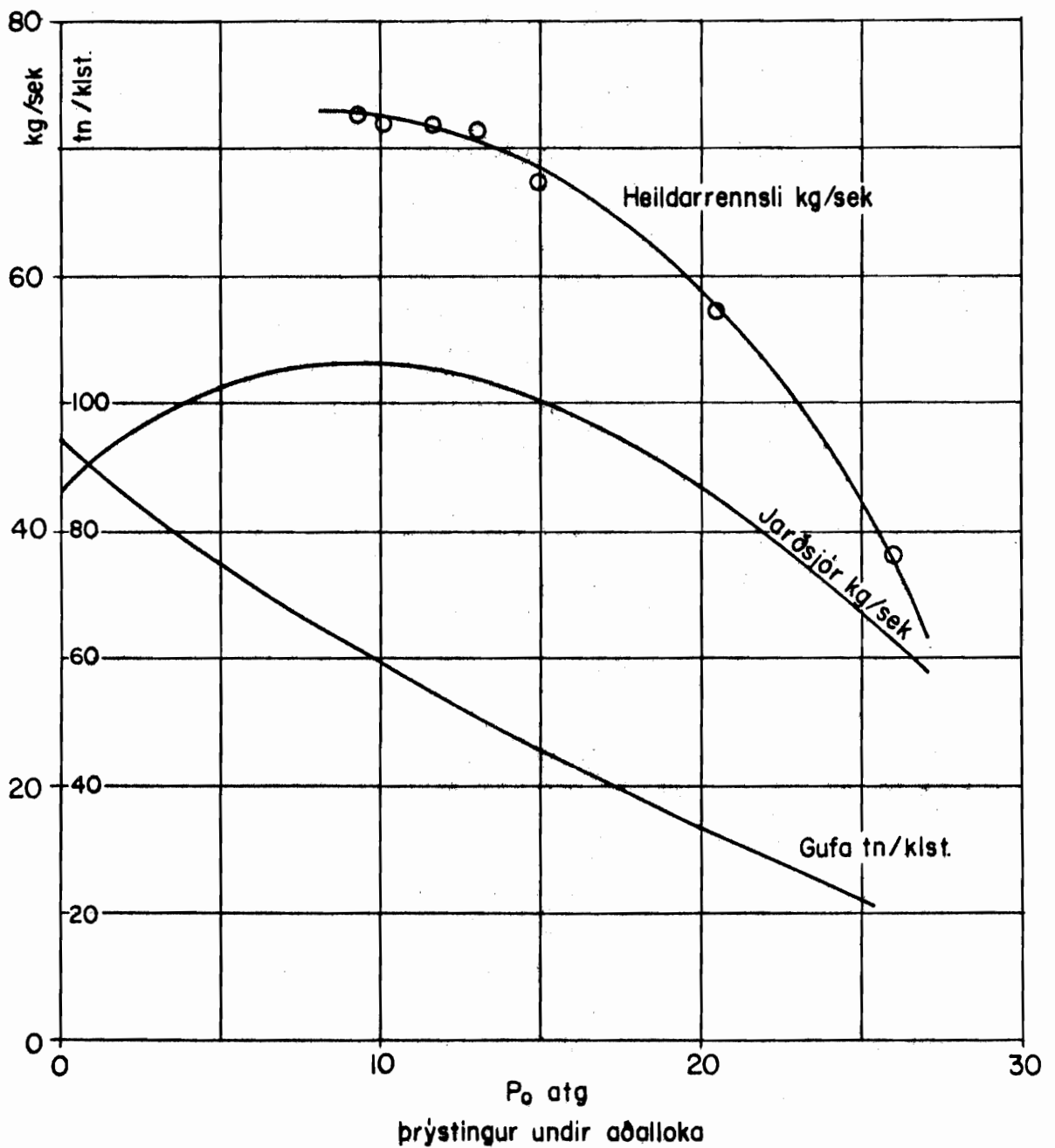


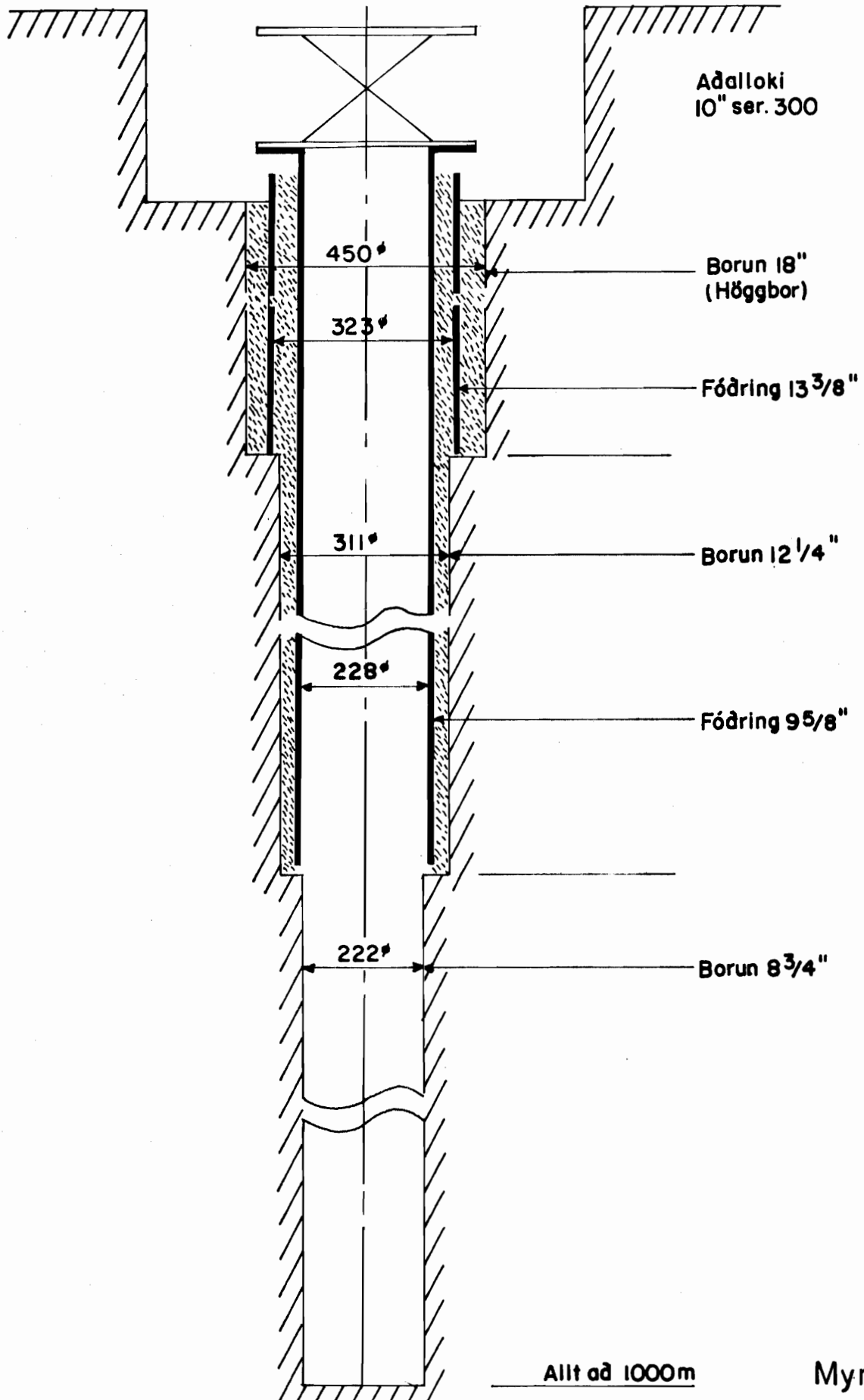
Heildarrennsli borhola 2 og 8 Reykjanesi





Holan blæs út um 8"pipu  
Mælt 10.01'71

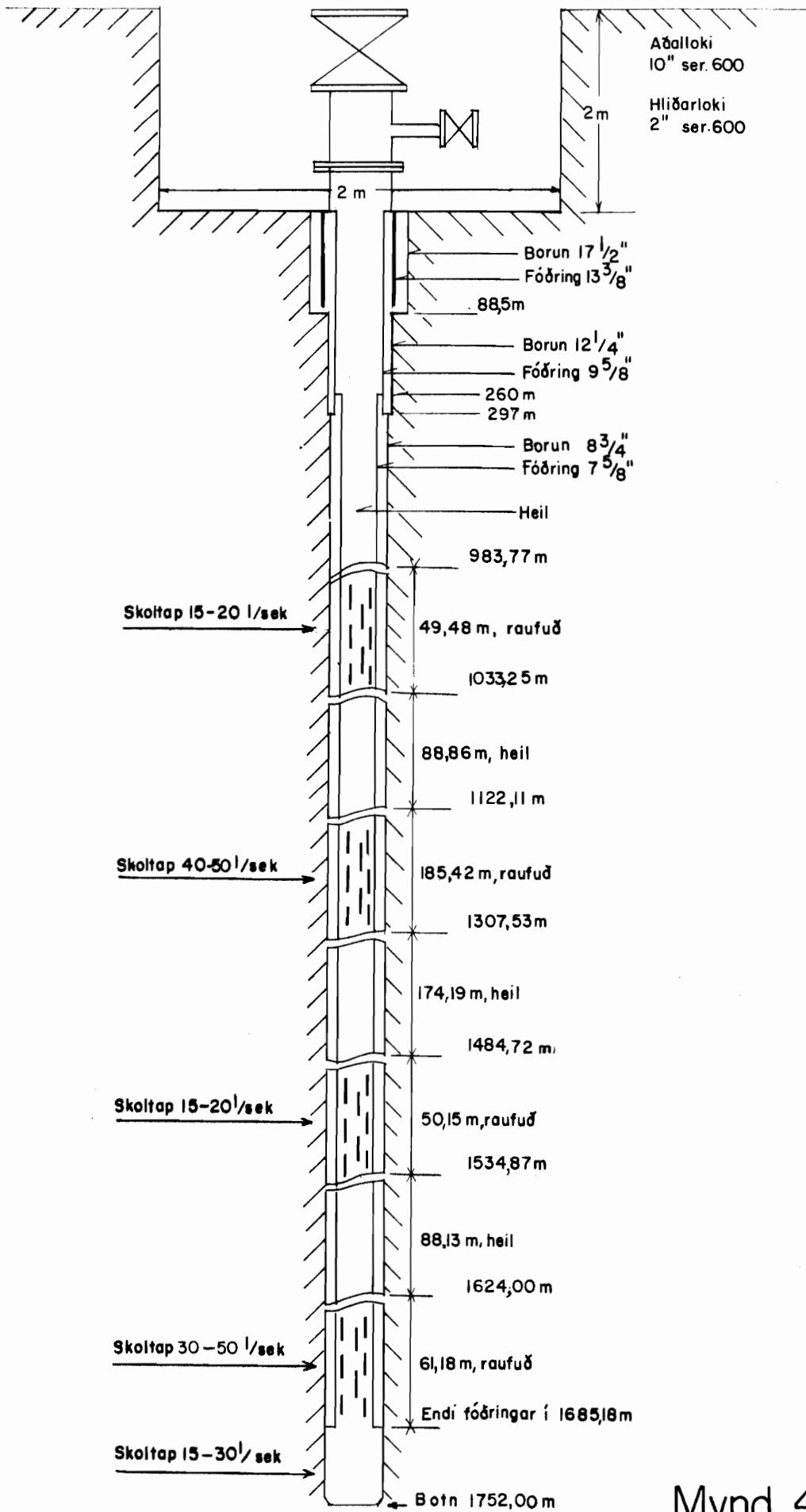




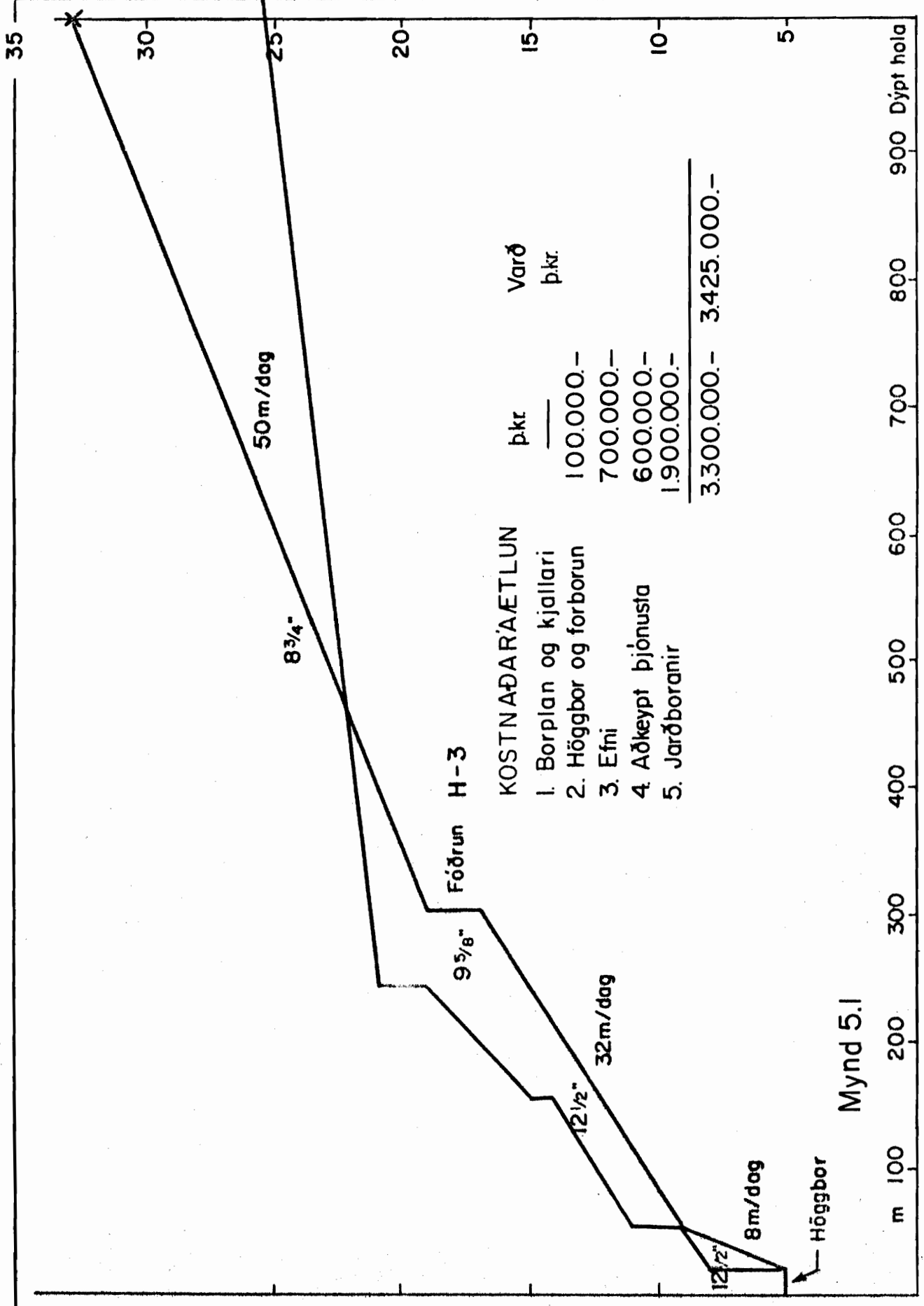


3.271 OH / P  
 Tnr 67  
 J-Reykjanes  
 Fnr. 9749

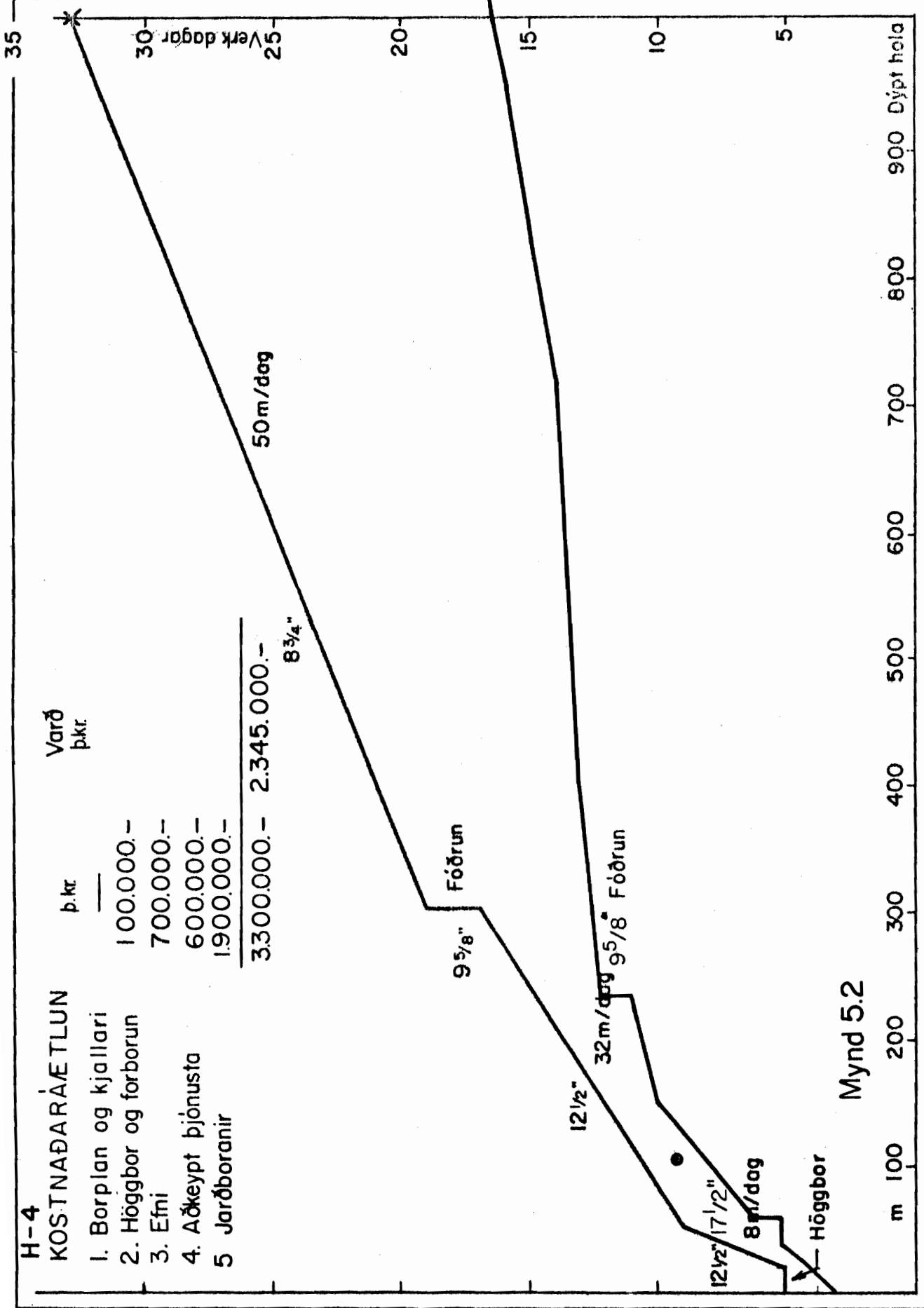
**ORKUSTOFNUN**  
 Jarðhitadælið  
 REYKJANES  
 HOLA 8. FÓÐRINGAR



Mynd 4.2



Mynd 5.1



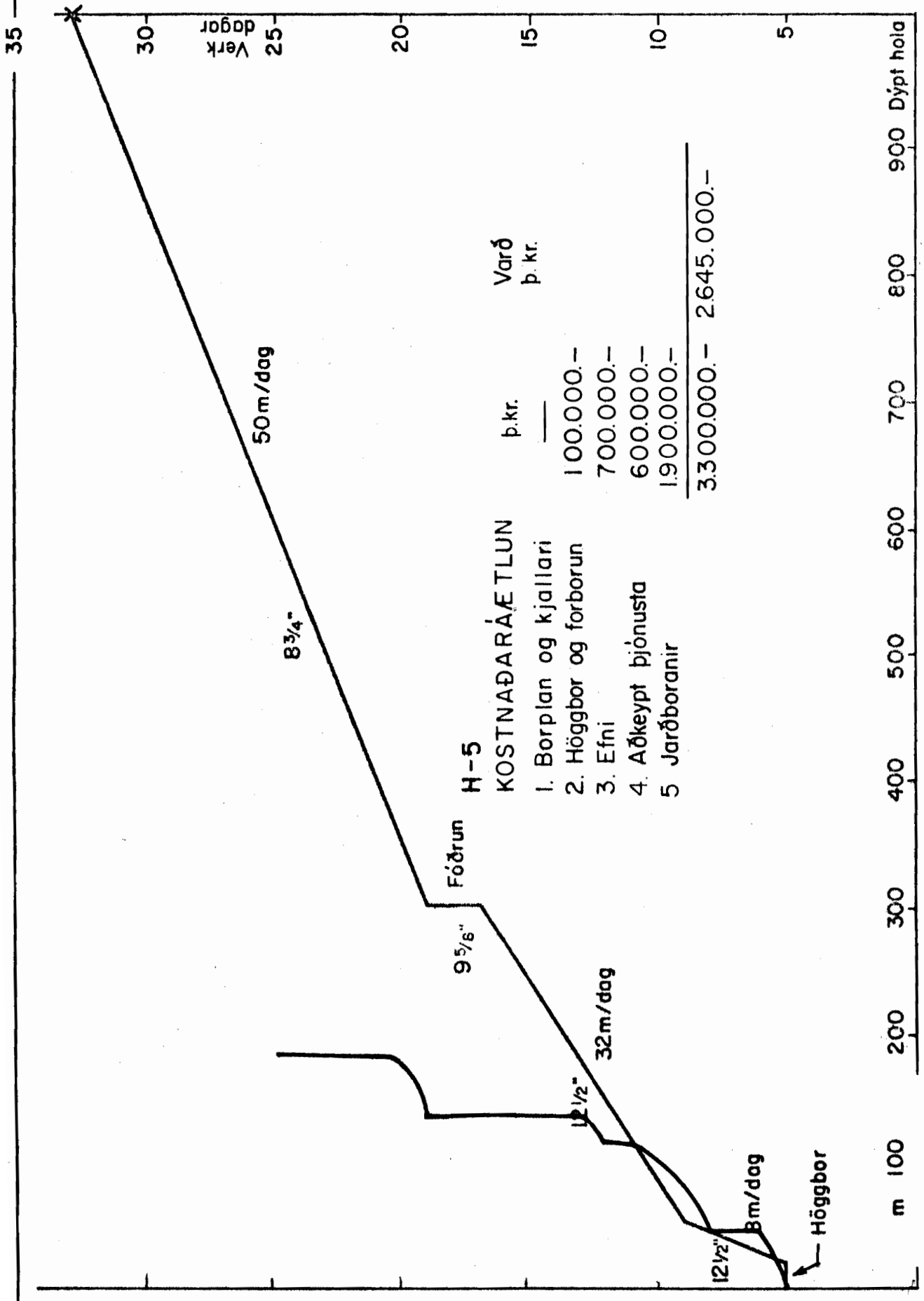
**H-4**

**KOSTNAÐARÁÆTLUN**

- |                        |                    |                    |
|------------------------|--------------------|--------------------|
| 1. Borplan og kjallari | p.kr.              | Varð p.kr.         |
| 2. Höggbor og forborun | —                  |                    |
| 3. Efni                | 100.000.—          |                    |
| 4. Aðkeypt þjónusta    | 700.000.—          |                    |
| 5. Jarðboranir         | 600.000.—          |                    |
|                        | 1.900.000.—        |                    |
|                        | <u>3.300.000.—</u> | <u>2.345.000.—</u> |

8 3/4"

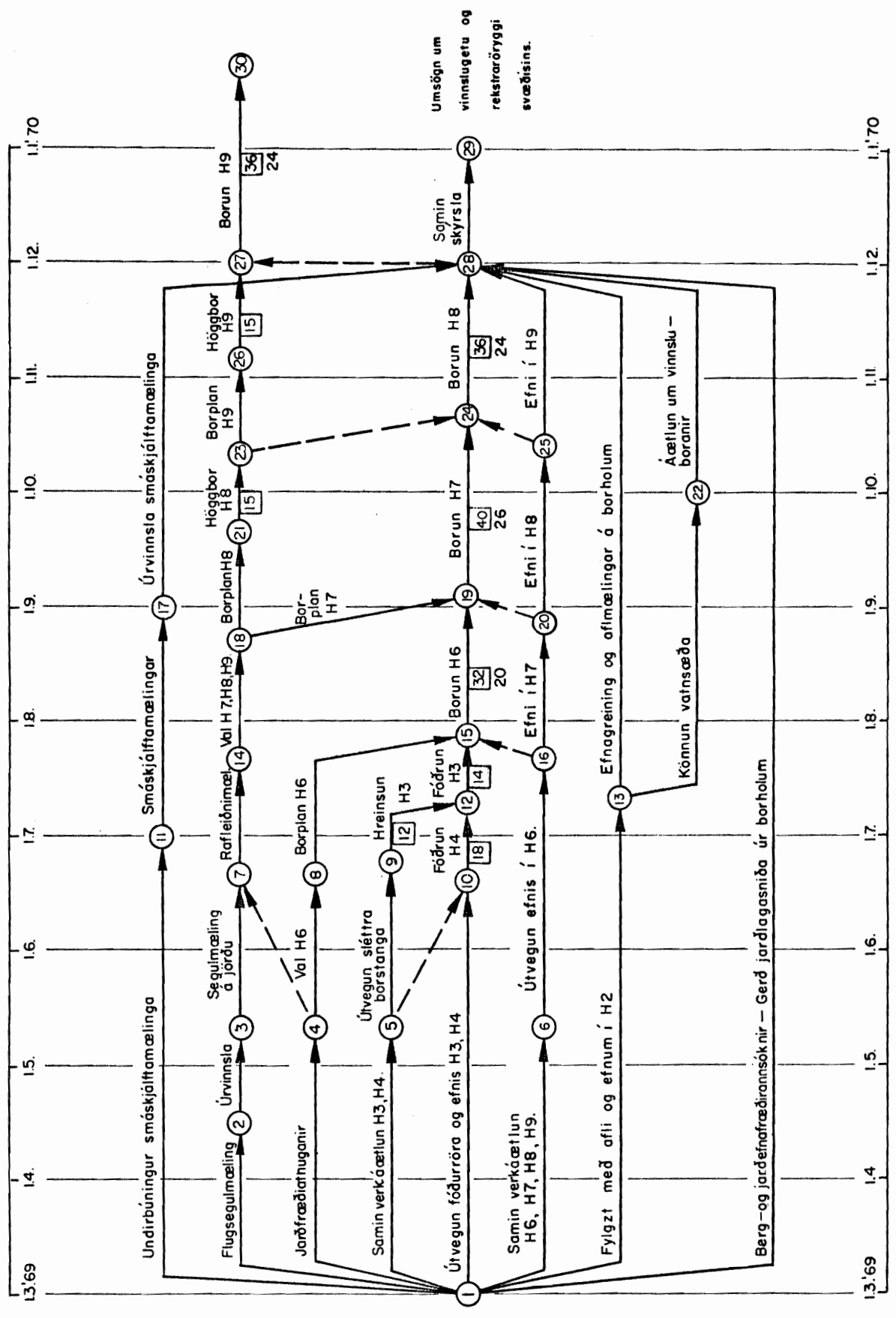
Mynd 5.2



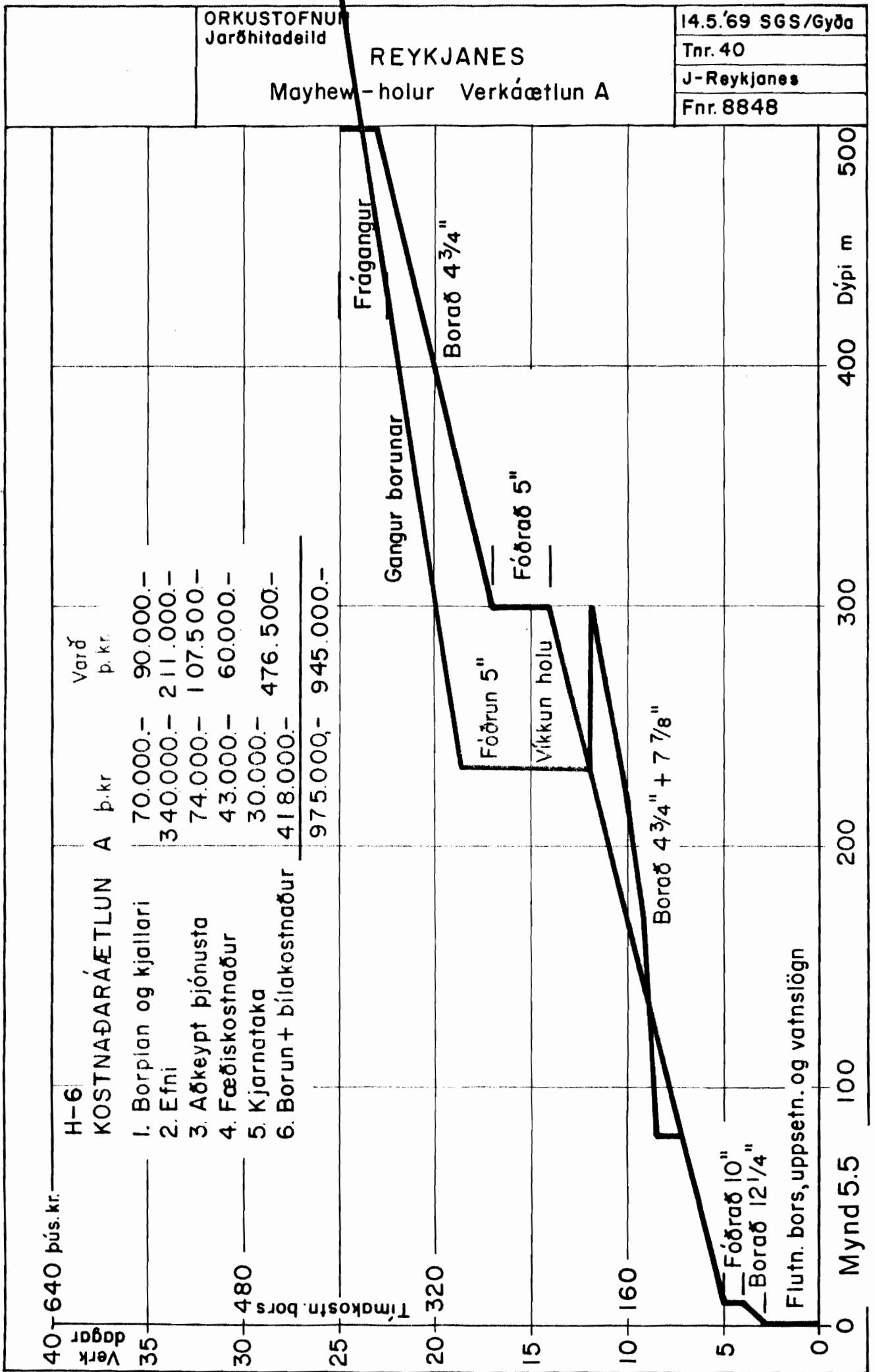
Mynd 5.3

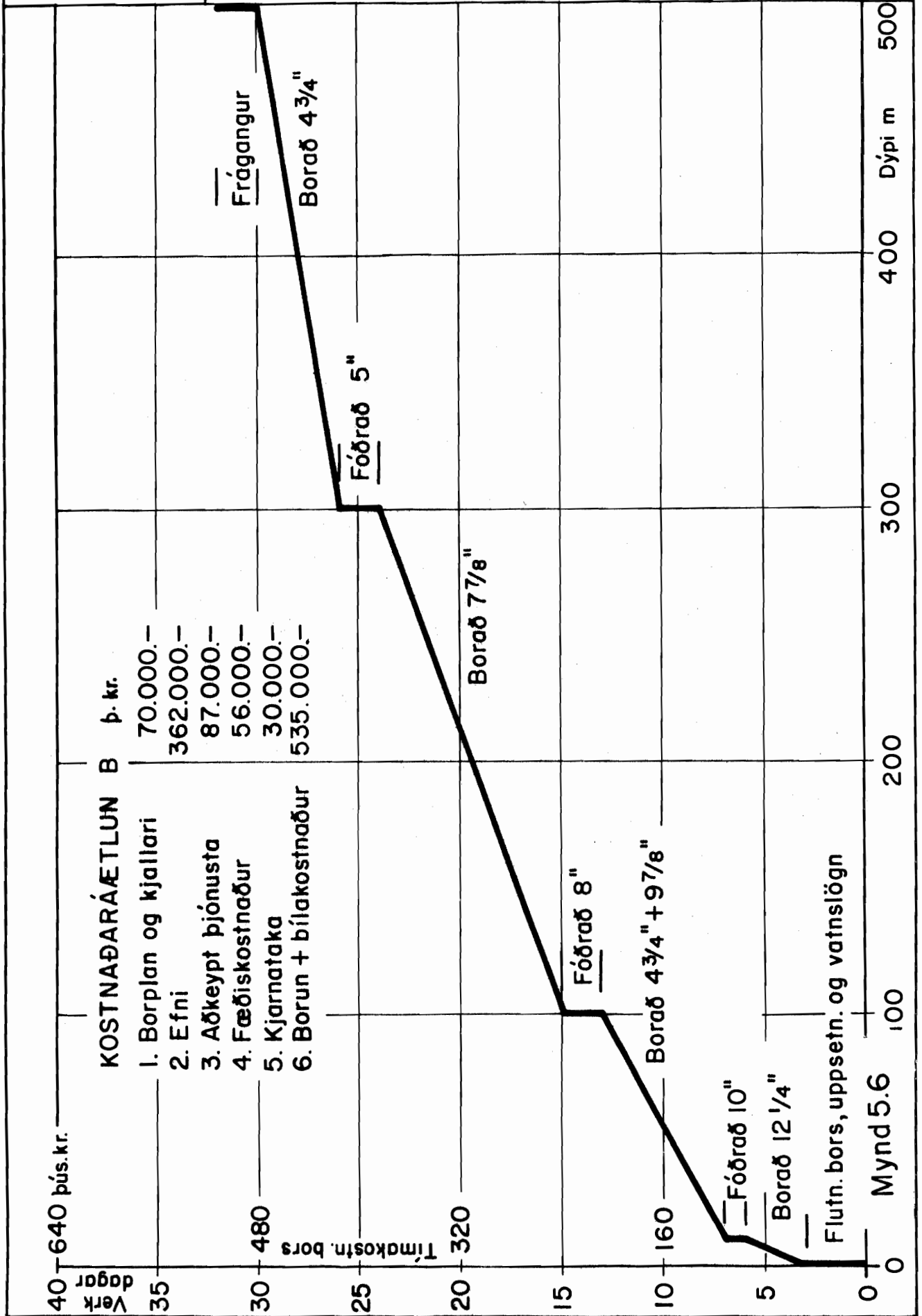
Tímaáætlun fyrir aðgerðir, boranir og jarðhitarsóknir á Reykjanesi 1969.

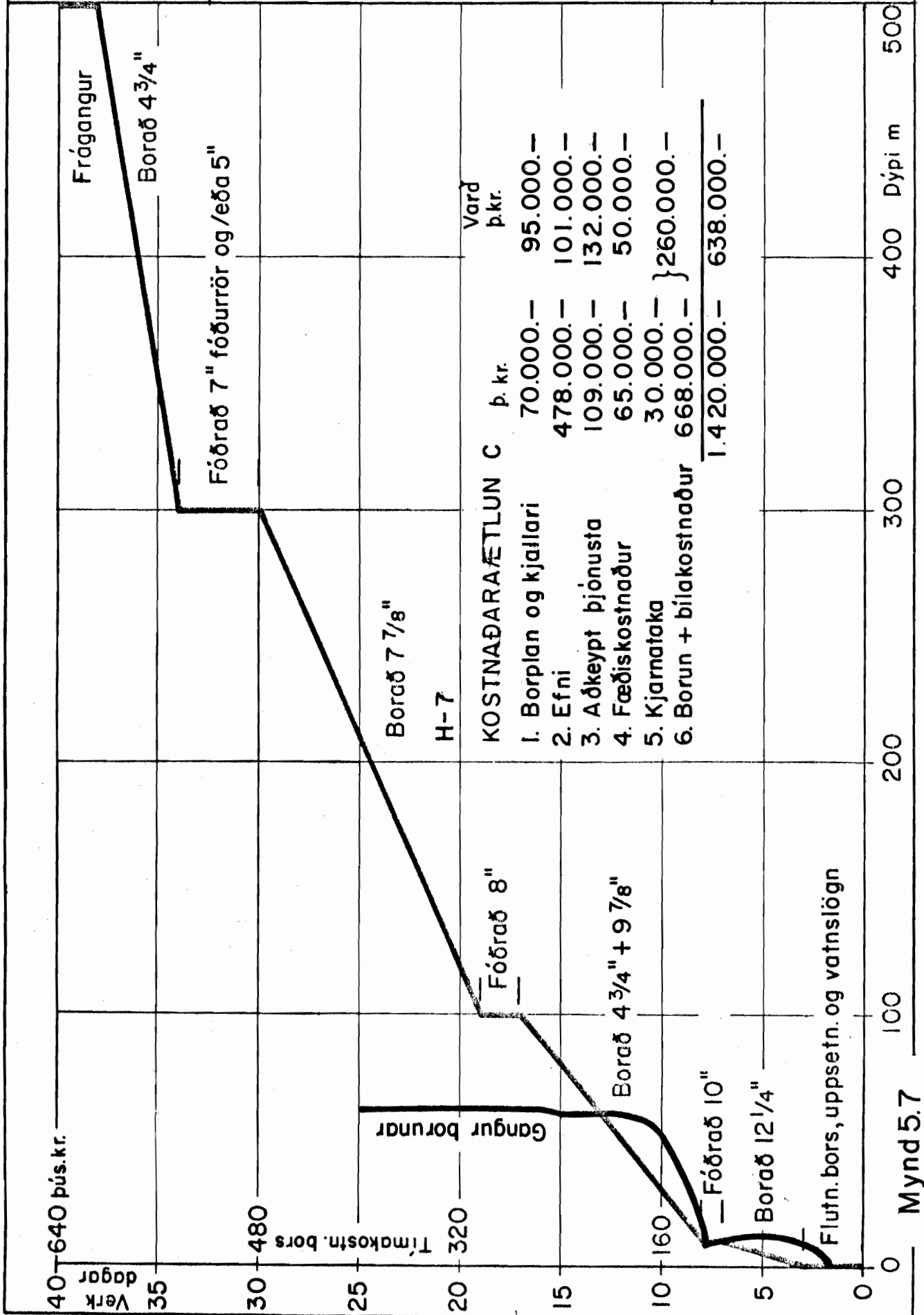
ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadéild.  
10.5.1969. Sv.B.



Mynd 5.4

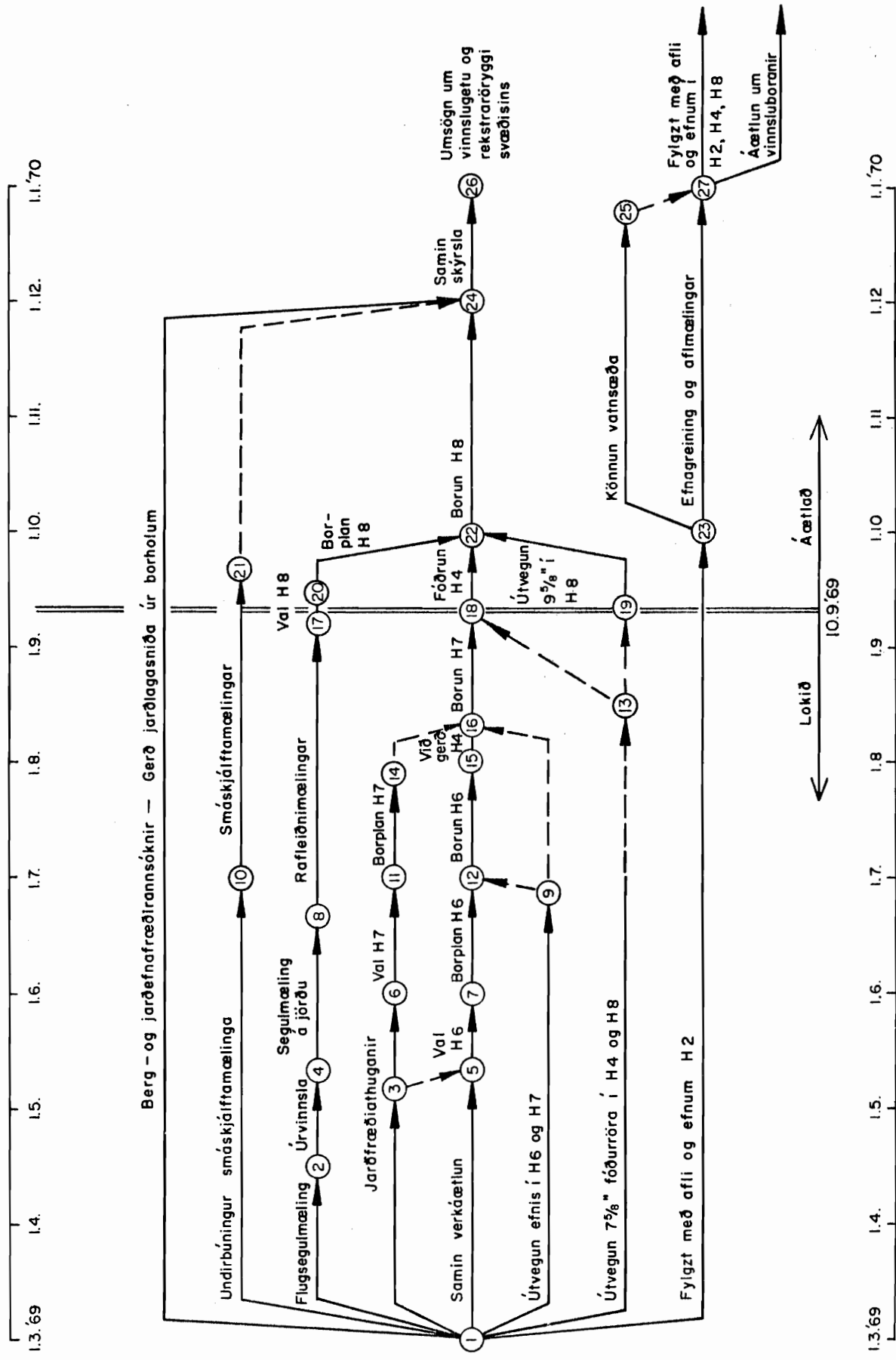






Mynd 5.7





Mynd 5.8

Hola 8, Reykjanes  
Verkæðtíun

ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadælið

Verk-  
dagar Tímakostnaður bors. þ. kr.

50 | 3000

KOSTNAÐARÁÆTLUN

BORUN LOKIÐ 28. 11. 69

1. Borplan og kjallari.	240 þ. kr.	290 þ. kr.
2. E.fni	2085	2432 "
3. Aðkeypt þjónusta	580	736 "
4. Fæði og húsnæði	285	300 "
5. Kjarnataka	150	150 "
6. Borun	2050	2280 "
	5390	6188 "

Mánaðar-  
dagar

Flufn-  
ingur

Fóðrun  
7 5/8"  
600 m  
Kjarni

24.11

17.11

10.11

3.11

27.10

20.10

13.10

6.10

Borun 8 3/4"

Kjarni

Borun 8 7/8"

Kjarni

Borun 8 3/4"

9 3/8" fóðring

Borun 12 1/4"

13 3/8" fóðring

Borun 12 1/4" opnun 17 1/2"

Flufn.  
Uppsetn.

Mynd 5.9

1800 Dypti  
1700  
1600  
1500  
1400  
1300  
1200  
1100  
1000  
900  
800  
700  
600  
500  
400  
300  
200  
100