



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Jarðhitakerfið í Bjarnarflagi
Mat á hita, þrýstingi og afköstum

Ómar Sigurðsson

OS-93016/JHD-08 B

Mars 1993



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 720 104
[/os/pi/jhd.os/háiti/bjarnaflag.t](#)

Jarðhitakerfið í Bjarnaflagi
Mat á hita, þrýstingi og afköstum

Ómar Sigurðsson

OS-93016/JHD-08 B

Mars 1993

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	4
2. HITI OG ÞRÝSTINGUR VIÐ EINSTAKAR HOLUR	4
2.1 Hola B-1	5
2.2 Hola B-2	5
2.3 Hola B-3	6
2.4 Hola B-4	6
2.5 Hola B-5	6
2.6 Hola B-6	7
2.7 Hola B-7	7
2.8 Hola B-8	8
2.9 Hola B-9	8
2.10 Hola B-10	9
2.11 Hola B-11	10
2.12 Hola B-12	10
3. HITI Í JARÐHITAKERFINU	18
4. HITABREYTINGAR VIÐ ELDSUMBROTIN 1977	18
5. AÐRIR ÞÆTTIR JARÐHITAKERFISINS	24
5.1 Þrýstingur	24
5.2 Jarðeðlisfræðimælingar	24
6. VINNSLUSAGA OG AFKASTAMAT	29
6.1 Ágrip vinnslusögu	29
6.2 Stærðarmat	31
6.3 Gerð þrívíðs líkans	31
6.4 Afkastamat	33
7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR	44
8. HEIMILDIR	45

TÖFLUSKRÁ

1. Áætluð massataka úr jarðhitakerfi Bjarnarflags	30
2. Eðlisstærðir notaðar í reiknilíkani	33

MYNDASKRÁ

1. Yfirlitsmynd af Bjarnarflagi	11
2. Áætlaður upphafshiti við holu B-1 nálægt suðuferli ásamt síðustu hitamælingu	12
3. Áætlaður upphafshiti við holu B-2, samsvarandi suðuferill og síðasta hitamæling	12
4. Áætlaður upphafshiti við holu B-3 og líklegur suðuferill þar	13
5. Áætlaður upphafshiti við holu B-4 og samsvarandi suðuferill	13
6. Áætlaður upphafshiti við holu B-5 nálægt suðuferli ásamt síðustu hitamælingu	14
7. Áætlaður upphafshiti við holu B-6, samsvarandi suðuferill og síðasta hitamæling	14
8. Áætlaður upphafshiti við holu B-7, samsvarandi suðuferill og síðasta hitamæling	15
9. Áætlaður upphafshiti við holu B-8 nálægt suðuferli	15
10. Áætlaður upphafshiti við holu B-9, samsvarandi suðuferill og tvær hitamælingar	16
11. Áætlaður upphafshiti við holu B-10 og samsvarandi suðuferill	16
12. Áætlaður upphafshiti við holu B-11, samsv. suðuferill og síðasta upphitunarmæling	17
13. Áætlaður upphafshiti við holu B-12 og samsvarandi suðuferill	17
14. Jafnhitalínur á 300 m dýpi	20
15. Jafnhitalínur á 500 m dýpi	20
16. Jafnhitalínur á 700 m dýpi	21
17. Jafnhitalínur á 1000 m dýpi	21
18. Hitasnið NV - SA um holur B-4 og B-12	22
19. Dýpi á skemmdir hola við umbrot og lega hugsanlegs skriðbrots	23
20. Jafnþrýstílinur á 700 m dýpi	26
21. Jafnsegullínur frá 1965 sem sýna segullægð á borholusvæðinu í Bjarnarflagi	27
22. Jafnvíðnámslínur á um 150 m dýpi frá 1970 sem sýna víðnámslægð í Bjarnarflagi	28
23. Blásturssaga holu B-11	35
24. Blásturssaga holu B-12	35
25. Lagskipting og bútnun í þrívíða reiknilíkaninu. Innstu 15 smábúturnir samsvara vinnslusvæðinu í Bjarnarflagi	36
26. Nálgun reiknilíkans við mælt rennsli holu B-11 (x mælingar)	37
27. Nálgun reiknilíkans við mælt vermi holu B-11 (x mælingar)	37
28. Nálgun reiknilíkans við mælt rennsli holu B-12 (* mælingar)	38
29. Nálgun reiknilíkans við mælt vermi holu B-12 (* mælingar)	38
30. Reiknuð áhrif 20 MW _e virkjunar á rennsli holu B-11	39
31. Reiknuð áhrif 20 MW _e virkjunar á vermi holu B-11	39
32. Reiknuð áhrif 20 MW _e virkjunar á rennsli holu B-12	40
33. Reiknuð áhrif 20 MW _e virkjunar á vermi holu B-12	40
34. Reiknað rennsli úr 4 aukaholum vegna tilkomu 20 MW _e virkjunar	41
35. Reiknað vermi úr 4 aukaholum vegna tilkomu 20 MW _e virkjunar	41
36. Áætlaðar hitabreytingar í vinnslusvæði Bjarnarflags yfir blásturssögu hola B-11 og B-12 og spátímabils virkjunar	42
37. Áætlaðar þrýstingsbreytingar í vinnslusvæði Bjarnarflags yfir blásturssögu hola B-11 og B-12 og spátímabils virkjunar	42
38. Áætluð breyting suðu (gufumettun) í vinnslusvæði Bjarnarflags yfir blásturssögu hola B-11 og B-12 og spátímabils virkjunar	44

1. INNGANGUR

Skýrsla þessi er hluti af samvinnuverkefni Orkustofnunar og nokkurra fyrirtækja í orkuiðnaði sem nefnist "Jarðhiti til raforkuvinnslu". Vinnan að baki skýrslunni fellur undir lið sem kallast "Hagkvæmniathugun í Bjarnarflagi" með verknúmer 720-104.

Boranir í Bjarnarflagi hófust árið 1963 með borun hola 1 og 2. Næstu árin voru þar töluverðar borframkvæmdir við borun nýrra hola, hreinsanir og dýpkun eldri hola. Árið 1970 var búið að bora 9 holur á svæðinu, en þá varð hlé á borunum fram til 1975 er hola 10 var boruð. Umbrot hófust um mitt sama ár með aukningu í skjálftavirkni í sprungusveimnum sem nær frá sunnanverðri Mývatnssveit um Bjarnarflag og Leirhnjúk og þaðan um Gjástykki norður í Kelduhverfi. Miðja mestu virkni var nálægt Leirhnjúk og varð lítið eldgos norðan hans 20. desember 1975 sem talið er marka upphaf Kröfluelda. Umbrotavirknin einkenndist aðallega af kvikuhlaupum með tilheyrandi höggum á sprungum og misgengjum. Oftast fór kvikan eftir sprungusveimnum norður í Gjástykki, en fá hlaup urðu til suðurs. Alls hafa kvikuhlaupin orðið 21 og í níu skipti varð eldur uppi samfara þeim, síðast í september 1984 (Axel Björnsson o. fl., 1985). Sprungusveimurinn við Bjarnarflag afmarkast af Grjótagjármisgenginu að vestan og Krummaskarðsmisgenginu að austan. Árið 1977 gengu tvö kvikuhlaup suður sprungusveiminn og ollu töluverði hreyfingu á sprungum við Bjarnarflag. Við síðara hlaupið, sem varð í september það ár, komu fram skemmdir á flestum borholum í Bjarnarflagi og meðal annars gaus hola 4 þá gjalli. Síðustu tvær holurnar (11 og 12), sem boraðar voru í Bjarnarflag á árunum 1979 og 1980, voru því staðsettar austan við virka sprungusveiminn.

Í skýrslunni er leitast við að meta ríkjandi hita í jarðhitakerfinu í Bjarnarflagi eins og hann var fyrir eldsumbrotin 1977. Einnig er reynt að leggja mat á þrýsting í jarðhitakerfinu þó gögn þar að lútandi séu mun takmarkaðri en um hita. Þá er reynt að átta sig á þeim hitabreytingum sem urðu í kerfinu í kjölfar umbrotanna og niðurdrætti í því vegna vinnslu undanfarin 30 ár. Að lokum er gerð tilraun til að meta áhrif aukinnar vinnslu úr jarðhitakerfinu vegna hugsanlegrar virkjunar og fá mat á lágmarksafköstum kerfisins.

2. HITI OG ÞRÝSTINGUR VIÐ EINSTAKAR HOLUR

Árið 1989 var tekin saman skýrsla um allar mælingar sem höfðu verið gerðar í og á borholum í Bjarnarflagi (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 1989). Í skýrslunni er einnig fjallað um borsögu holanna, hönnun þeirra, helstu vatnsæðar, þáverandi ástand þeirra og gerðar tillögur um endanlegan frágang þeirra. Alls hafa verið boraðar 12 holur í jarðhitakerfið í Bjarnarflagi og er afstaða þeirra sýnd á mynd 1. Af þessum 12 holum er eingöngu helmingur þeirra enn opinn eða holur B-2, B-4, B-5, B-9, B-11 og B-12, en hinar hafa verið fylltar af sandi og steypu.

Við mat á hita við einstakar holur er aðallega stuðst við ofangreinda skýrslu og þær mælingar sem þar er fjallað um. Ekki höfðu bætst við fleiri hita- og þrýstingsmælingar úr holunum í árslok 1992 og verður því ekki fjallað um einstaka mælingar hér heldur vísað til ofangreindrar skýrslu. Til að meta hita á ákveðnu dýpi í holunum voru allar aðgengilegar hitamælingar af því dýpi teiknaðar með tíma. Þá voru valin úr einstök hitagildi úr þeim mælingum sem voru taldar minnst truflaðar á því dýpi af einhverjum aðgerðum á holunni, svo sem borun, blæstri, kæfingu eða lokun eftir blástur. Þessi gildi voru látin marka líklegan hita á því dýpi, í mörgum tilfellum lágmarkshita á viðkomandi dýpi og í nokkrum tilvikum hámarkshita. Þar sem til voru tvær eða fleiri hitamælingar frá upphitun holu eftir borun var reynt að meta hámarkshita á

viðkomandi dýpi með því að setja hitagildin inn á svokallað Horner-graf. Hér á eftir verður helstu niðurstöðum þessa lýst fyrir einstakar holur.

2.1 HOLA B-1

Hola 1 var boruð 1963 og dýpkuð 1965. Holan varð 342 m djúp með steypa fóðringu í 107 m. Hitamælingar hafa verið gerðar í 333 m dýpi, en engar þrýstingsmælingar eru til. Í umbrotunum 1977 skemmdist holan á 90 m dýpi og er nú fyllt af steypu. Nokkur óvissa er um það í hvers konar ástandi holan var fyrir sumar af þeim hitamælingum sem gerðar voru í holunni og það sama á við um margar af þeim mælingum sem gerðar voru í fyrstu 10 holunum. Mælingar frá því að holan var 265 m djúp benda til um 217-218°C botnhita og var vatnsborð í holunni þá á um 25 m dýpi. Með hliðsjón af öðrum mælingum er áætlað að hiti hafi verið nálægt suðuferli á þessu dýpi og að berghiti við holuna fylgi nokkurn veginn suðuferli frá 25 m niður á rúmlega 300 m (mynd 2).

Holan var síðast hitamæld í september 1979, tveimur árum eftir eldsumbrotin sem gengu í gegnum Bjarnarflag. Þá mældist hiti undir 100°C niður á 90 m dýpi og vatnsborð á um 51 m dýpi. Miðað við suðuferil hefur holan kólnað á 100 m dýpi um allt að 70°C.

Árið 1966 mældist vatnsborð í holunni eftir kæfingu á um 47 m dýpi. Reiknaðir þrýstingsferlar út frá hitamælingu og vatnsborði benda þannig til að þrýstingur í holunni sé svipaður 1966 og 1979. Hins vegar gæti verið um 1,5 bar niðurdráttur í holunni 1966 miðað við upphafsástand eða að vatnsæðin á 337 m hafi verið þrýstingslægr en æðar ofan 265 m dýpis. Hafi æðin verið þrýstingslægr hefur hiti hennar líklega verið um 4°C undir suðuferli.

2.2 HOLA B-2

Endanlegt dýpi holu 2 varð 492 m með steypa fóðringu niður á 207 m, en holan var boruð 1963 og dýpkuð 1965. Ekki urðu skemmdir á holunni við umbrotin 1977 og mældist hún síðast (árið 1988) 485 m djúp. Frá borun holunnar hefur verið niðurrennsli í henni. Holan hefur aldrei verið nýtt, en blés af og til fyrstu árin. Í fyrstu var aðallega niðurrennsli frá vatnsæð á rúmlega 220 m dýpi niður í æð á 426 m dýpi. Truflun hefur komið á niðurrennslið eftir umbrotin og hin síðari ár hefur æð á 290 m dýpi orðið virkari með niðurrennsli í 426 m æðina. Vegna niðurrennslisins er erfitt að meta hita á dýptarbilinu 200-430 m. Af lögun mælinga er ljóst að hitahámark er á um 150 m og gæti hiti þar hafa verið allt að 163°C. Hiti í vatnsæðinni á 220 m var hins vegar mun lægr, líklega á bilinu 125-140°C. Hiti hefur síðan hækkað strax neðan æðarinnar. Neðan niðurrennslisins er vitað að hiti á um 450 m dýpi hefur verið minnst 246°C og líklega hefur holan soðið í botn í blæstri, sem bendir til æðar nálægt botni holunnar. Áætlað er að neðan 450 m dýpis hafi hiti verið nálægt suðuferli. Á mynd 3 er sýndur hugsanlegur hitaferill fyrir holuna ásamt suðuferli og síðustu hitamælingu úr holunni (1988).

Tvær þrýstingsmælingar eru til úr holunni frá því eftir umbrot (1984 og 1988). Þær benda til að þrýstingur hafi verið óbreyttur á því tímabili. Vatnsborð var í fyrstu á um 55 m dýpi, en eftir umbrotin fór vatnsborð lækkanði og mældist á 64,4 m í september 1988. Mestur hluti þessarar vatnsborðslækkunar stafar af þeirri kólnun sem hefur orðið í holunni eftir umbrotin 1977. Þannig var hiti í vatnsæðunum á 220 m og 290 m kominn niður í um 90°C í síðustu hitamælingu (1988) og nær hluti niðurrennslisins til botns holunnar. Reikningar benda til um 15,7 bar þrýstings í 220 m æðinni 1963 og um 22,2 bar þrýstings í 290 m æðinni 1979 eða eftir umbrotin.

2.3 Hola B-3

Hola 3 var boruð 1966 í 682 m dýpi með steypa fóðringu í 205 m. Aðeins þrjár hitamælingar eru til úr holunni, þar af tvær frá borun eða hreinsun holunnar. Ekki er vitað um ástand holunnar eftir eldsumbrotin, en hún stóð með 10-20 bar toppþrýstingi árið 1988, þannig að umbrotin hafa líklega ekki skemmt hana mikið. Holan hefur nú verið fyllt af sandi og steypu. Lítið er hægt að segja um hita holunnar, en vitað er að hann var hærri en 90°C á 70-150 m, hærri en 140°C á 200 m og hækkandi með dýpi neðan 300 m. Á 650 m dýpi hefur hiti verið að minnsta kosti 264° (mynd 4). Áætlað er að hiti við holuna hafi verið nálægt suðuferli frá um 200 m dýpi og til botns. Ofan 200 m dýpis gæti hiti hafa verið eitthvað lægri.

Engar þrýstingsmælingar eru til úr holunni, en vatnsborð var mælt við borlok á 18 m dýpi. Út frá þessu vatnsborði og hitamælingu getur þrýstingur hafa verið 52-54 bar á 650 m dýpi sem samsvarar 267-270°C suðuhita. Nokkrar mælingar eru til á holutoppþrýstingi og þá aðallega við og eftir blástur. Þær gagnast því lítið til að meta þrýsting í jarðhitakerfinu.

2.4 Hola B-4

Hola 4 var boruð árið 1968 í 1138 m dýpi með steypa fóðringu niður á 380 m dýpi. Leiðari var í holunni frá 335 m í 625 m dýpi. Holan gaus gjalli í eldsumbrotunum í september 1977 og stíflaðist eftir þau á um 630 m dýpi. Þrjár hitamælingar eru til frá upphitun í holunni, en aðrar mælingar eru gerðar eftir blástur. Mælingarnar benda til að hiti á 300-600 m dýpi hafi verið hærri en 185-195°C. Þá hefur hiti á 900 m verið um 276°C og niður við botn hefur hitinn verið um eða yfir en 281°C. Áætlað er að hiti við holuna hafi verið nálægt suðuferli allavega frá um 200 m niður á tæplega 600 m dýpi. Þar fyrir neðan hafi hiti verið nokkuð undir suðuferli. Aflmæling, sem gerð var á holunni fyrir umbrot, gaf vermi um 1085 kJ/kg (250°C) og styður þá skoðun en helstu æðar holunnar voru á um 638 m og 1036 m dýpi. Mynd 5 sýnir líklegan hitaferil fyrir holuna. Ofan 200 m dýpis gæti hiti hafa verið undir suðuferli. Hitamælingarnar geta bent til lagskiptingar í efstu 200 m með hitahámörk á um 75 m og 160 m, en neðan 200 m vex hiti hins vegar hratt. Hiti á 75 m og 160 m hefur verið yfir 100°C og 115°C.

Ein þrýstingsmæling er til úr holunni sem mæld var eftir blástur árið 1984. Virðist sem mælirinn hafi fengið högg og kvörðun hans breytst á 300-400 m, en mælingin gaf þrýsting á 626 m um 50 bar. Í borhléi þegar holan var rúmlega 900 m djúp mældist vatnsborð á 25 m og var hækkandi. Þá var æð á um 700 m dýpi líklega virk í holunni, en óvíst er hvaða fleiri æðar voru virkar og hver þeirra stjórnadi þrýstingi í holunni. Lítið er því hægt að segja um þrýstingsástand holunnar. Reiknaðir þrýstingsferlar út frá hitamælingum í borhléinu og í borlok er holan náði fullu dýpi gefa svipaðan þrýsting í efri hluta holunnar og mælingin 1984. Mælingin frá 1984 er gölluð neðan 300 m dýpis, en stigull hennar í efri hlutanum bendir til að hún liggja aðeins undir reiknuðu ferlunum dýpra í holunni. Reiknuðu ferlarnir gefa þrýsting um 53,5 bar á 626 m, um 60 bar á 700 m, um 77,5 bar á 900 m og um 96,7 bar á 1125 m dýpi. Líklegt er að reiknuðu ferlarnir liggja nálægt mesta mögulega þrýstingi við holuna.

2.5 Hola B-5

Erfiðlega gekk að bora holu 5 vegna uppstreymis úr æð á um 637 m og upp í æð á um 170 m dýpi. Holan varð stjórnlaus um tíma og leirhver sprakk upp í hlíðinni norður af holunni. Borverkið náði því yfir 6 mánaða tímabil og lauk því fyrri hluta árs 1969. Holan varð aðeins 638 m djúp með steypa fóðringu í 478 m, en botnfall var í holunni svo raundýpi hennar var um 615 m. Nokkrar hitamælingar eru til frá upphitun holunnar eftir að hún hafði endanlega verið

beisluð. Þær benda til að hiti á 250 m dýpi hafi verið hærri en 189°C og hafi farið hækkandi til botns. Á um 580 m hefur hiti verið hærri en 245°C og vart undir 251°C. Síðari mælingar benda til að hiti á 250 m hafi verið um 208°C og á 300 m um 218°C, eða við suðuferil á þessum dýpum. Því er áætlað að hitaferill holu B-5 hafi upphaflega fylgt suðuferli til botns (mynd 6).

Eftir umbrotin hefur holan mælst rúmlega 600 m djúp og skemmdist því ekki við þau. Tvær þrýstingsmælingar eru til úr holunni, frá 1984 og 1988, ásamt vatnsborðsmælingu frá 1979. Samkvæmt þeim hefur þrýstingur lítið breytst við holuna eftir umbrotin og verið um 50,3 bar á 600 m dýpi. Reiknaður þrýstingur út frá áætluðu vatnsborði bendir til svipaðs þrýstings á þessu dýpi við borlok. Hins vegar hefur holan kólnað eitthvað ofan 150 m dýpis og mjög mikið neðan 400 m dýpis eftir umbrotin. Síðasta hitamæling úr holunni (frá 1988) er sýnd á mynd 6 og samkvæmt henni getur holan hafa kólnað um 90-100°C niður við botn.

2.6 HOLA B-6

Hola 6 var boruð árið 1969 og varð 1193 m djúp með steypa fóðringu niður í 195 m dýpi. Leiðarar voru settir í holuna niður á 953 m dýpi. Holan skemmdist á 512 m dýpi í umbrotunum 1977 og hefur nú verið fyllt af sandi og steypu. Ein hitamæling er til frá borhléi sem sýnir að hiti neðan 250 m dýpis var yfir 200°C og að hiti á rúmlega 500 m hafi verið um 260°C. Mæling frá upphitun holunnar sýnir að botnhiti hafi verið hærri en 271°C. Aðrar mælingar gefa hugmyndir um mögulegt hitasvið á ákveðnum dýpum. Með hliðsjón af öðrum holum í nágreppi holu 6 er þannig áætlað að hiti við holuna hafi fylgt nokkurn veginn suðuferli niður á um 700 m dýpi, en þar fari hiti undir suðuferil og hafi lágan stigul til botns, þar sem hiti var vart yfir 280°C (mynd 7).

Tvær þrýstingsmælingar eru til úr holunni, frá 1984 og 1988, ásamt vatnsborðsmælingu frá 1979. Þessar mælingar benda ekki til neinna þrýstingsbreytinga við holuna eftir eldsumbrot, þar sem vatnsborð hefur aðeins breytst um 3 m og mældur þrýstingur 1984 og 1988 á 500 m er um 42,4 bar. Lítið er hægt að segja til um þrýsting við holuna fyrir umbrotin, þar sem engar vatnsborðsmælingar eru til úr holunni frá þeim tíma. Reikningar benda þó frekar til að þrýstingur á 500 m hafi þá verið 1-2 bar lægri en eftir umbrot. Holan hefur kólnað mikið eftir umbrotin eins og dæma má af hitamælingu frá 1988 sem sýnd er á mynd 7. Samkvæmt henni hefur holan kólnað á um 400 m dýpi um 80°C.

2.7 HOLA B-7

Hola 7 var boruð í lok árs 1969 í 1206 m dýpi með steypa fóðringu í 217 m og leiðara í 582 m dýpi. Í eldsumbrotunum 1977 þagnaði holan snögglega er hún skemmdist og stíflaðist á 400 m dýpi. Holan hefur nú verið fyllt af sandi og steypu. Ein hitamæling er til frá því í lok borunar sem bendir til að hiti á 300 m hafi verið um 220°C og á 800 m hærri en 246°C. Þá benda mælingar gerðar eftir stuttan blástur til að hiti við botn hafi verið um eða rúmar 289°C. Aflmæling á holunni gaf vermi um 1200 kJ/kg sem getur bent til innstreymis af 273°C heitu vatni, sem líklega er þá að mestu úr æðum ofan 950 m dýpis. Ofan 300 m dýpis er lítið vitað um hita, en þó er hægt að gera sér grein fyrir hámarkshita þar. Samkvæmt ofansögðu er áætlað að hiti hafi fylgt nokkurn veginn suðuferli vatns niður á 350-400 m dýpi, en þar fari hiti undir suðuferilinn en sé þó vaxandi með dýpi. Mynd 8 sýnir mögulegan hitaferil holunnar ásamt suðuferli og síðustu hitamælingu (1988).

Engar þrýstingsmælingar eru til úr holunni. Ekki eru heldur til mælingar á vatnsborði fyrir umbrotin, en vatnsborðsmælingar eftir umbrotin sýna að vatnsborð breyttist aðeins um 6 m á

tímabilinu 1980 til 1988. Niðurrennsli hefur verið í holunni eftir umbrotin, aðallega frá æð á um 230 m dýpi og niður í æð á um 340 m dýpi, en einnig eitthvað niður til skemmdarinnar á 400 m dýpi. Líklega hefur eitthvað dregið úr niðurrennslinu með árunum, þar sem hiti hefur hækkað á þessu dýptarbili. Reikningar benda til að þrýstingur á 230 m gæti verið um 14,8 bar og um 30,4 bar á 400 m dýpi. Þá sýna hitamælingar að efsti hluti holunnar hefur kólnað mikið eftir umbrotin. Kælingin getur sýnst eitthvað meiri í hitamælingunni en hún raunverulega er vegna niðurrennslis, engu að síður er hún á um 300 m dýpi um 120°C.

Nær ómögulegt er að áætla þrýsting í holunni fyrir umbrotin. Mest skoltap í borun varð við æð á 787 m dýpi, en æðar gætu einnig verið á um 930 m og 1050 m dýpi. Flestar hitamælingar fyrir umbrot eru gerðar eftir blástur úr holunni. Reikningar benda til að suða hafi verið í holunni niður á um 800 m dýpi og töluverður niðurdráttur þegar nokkrar þeirra voru gerðar. Reikningar á þrýstingi út frá hitamælingunni við borlok og áætluðu vatnsborði á 50 m dýpi gefa þrýsting á 800 m um 60,8 bar, sem er sama og suðuþrýstingur fyrir áætlaðan suðuferil fyrir holuna. Þrýstingur á þessu dýpi gæti þó verið um 2 bar hærri en ofangreindir reikningar gefa.

2.8 Hola B-8

Hola 8 varð 1312 m djúp með steypa fódruingu í 248 m og lausa fódruingu í 537 m dýpi, en holan var boruð um sumarið 1970 og dýpkuð um haustið. Eftir eldsumbrotin fannst fyrirstaða í holunni á 310 m, en við hreinsun var byrjað að bora á 253 m dýpi. Farið var út úr holunni á 336-345 m dýpi og er hún nú full af sandi og steypu. Nokkrar hitamælingar eru til frá því skömmu eftir borun. Ástand holunnar fyrir þær mælingar er óþekkt en hugsanlega er byrjuð blæðing af holunni og jafnvel einhver blástur. Mælingarnar benda þó til að hiti á 500 m dýpi sé um 259°C og að hiti sé hærri en 274°C á 950 m dýpi. Þá benda þær frekar til að hiti hafi verið nálægt suðuferli alla vega ofan 500 m dýpis. Neðan 950 m dýpis eru eingöngu til mælingar sem eru gerðar strax eftir blástur og sýna að suða hefur verið í holunni niður til botns og hiti strax eftir blástur er þar hærri en 246°C. Hér er því gert ráð fyrir að holan hafi fylgt suðuferli að mestu til botns (mynd 9).

Engar þrýstingsmælingar eru til úr holunni og engar hitamælingar eftir umbrotin. Ein vatnsborðsmæling er til frá 1984 þar sem vatnsborð er á 20,1 m dýpi. Holan var þá stífluð, hugsanlega á um 253 m dýpi. Um breytingar í holunni eftir umbrot er því erfitt að dæma, en líklegt er að einhver kæling hafi orðið í efstu 200 m við holuna þar sem hún stendur með vatnsborð. Nær ómögulegt er að meta þrýsting í holunni fyrir umbrotin vegna takmarkaðra upplýsinga með hitamælingunum sem gerðar voru í holunni. Þeir reikningar sem hafa verið gerðir til að áætla þrýsting benda frekar til að þrýstingur hafi verið nálægt suðuþrýstingi miðað við áætlaðan hitaferil fyrir holuna.

2.9 Hola B-9

Hola 9 var boruð um haustið 1970 í 1312 m dýpi með steypa fódruingu í 256 m og með leiðara frá toppi í 600 m og frá 570 m í 819 m dýpi. Tveimur árum eftir borun var komin fyrirstaða í holuna á 955 m dýpi og eftir umbrot mældist holan 843 m djúp. Tvær hitamælingar eru til frá upphitun holunnar. Þær benda til að hiti á 350 m dýpi hafi verið hærri en 210°C og á 1300 m hærri en 253°C. Þá gefa mælingarnar lágmarkshita í allri holunni. Út frá Horner-grafi var hámarkshitinn frá 800 m til botns áætlaður. Síðari mælingar eru svo notaðar til að reyna að þrengja hitasviðið á ákveðnu dýpi. Mynd 10 sýnir áætlaðan hitaferil fyrir holuna. Gert er ráð

fyrir að hitinn fylgi nokkurn veginn suðuferli frá tæpum 100 m og niður á um 450 m dýpi. Þar fer hiti undir suðuferil og jafnvel er hugsanlegur viðsnúningur í hitaferlinum á 700-900 m dýpi. Neðan 900 m fer hiti líklega hækkandi með dýpi.

Mynd 10 sýnir áætlaðan hitaferil fyrir holu 9 ásamt suðuferli og tvær hitamælingar sem gerðar hafa verið eftir umbrot. Fyrstu mælingar eftir umbrot (1980 og 1984) sýna kælingu í holunni neðan 500 m dýpis. Kælingin eykst milli mælinga og er vaxandi með dýpi frá 600 m og niður á fyrirstöðuna á 843 m. Miðað við áætlaðan hitaferil var kælingin rúmar 40°C á 800 m dýpi. Seinni hitamælingar í holunni (1988 og 1989) sýna breytta hegðun. Mælingarnar líta út eins og rennsli hafi verið upp holuna fyrir mælingarnar (blæðing um óþéttan loka). Þar sem rennslið nær upp frá þáverandi botni holunnar sést kælingin frá um 800 m og upp í 500 m dýpi ekki lengur.

Þrjár þrýstingsmælingar eru til úr holunni eftir eldsumbrotin (1980, 1984 og 1988) og alla vega ein vatnsborðsmæling frá því fyrir umbrot (1974). Þrýstingsmælingarnar sýna að nær engin þrýstingsbreyting hefur orðið í holunni eftir umbrotin, en mælingarnar gefa 68,5-69,5 bar þrýsting á 830 m dýpi. Miðað við gefið vatnsborð og hitamælingu frá 1974 var samsvarandi þrýstingsferill reiknaður fyrir holuna. Reikningar gefa þrýsting á 830 m dýpi um 2-3 bar lægri 1974 en eftir umbrot. Um ástand holunnar fyrir hitamælinguna 1974 er ekki mikið vitað og óvíst hvaða æð stjórnaði þrýstingi í holunni. Vitað var um æðar í 481 m, 648 m og 1175 m dýpi, og var sú síðastnefnda hugsanlega ein besta æð holunnar. Þá var komin fyrirstaða í holuna á 955 m dýpi er mælingin var gerð 1974. Segja má að þrýstingur hafi ekki lækkað við holuna frá því hún var boruð.

2.10 HOLA B-10

Hola 10 var boruð í 1809 m dýpi í lok árs 1975. Holan var með steypa fóðringu í 598 m og leiðara í 1780 m dýpi. Í eldsumbrotunum 1977 skemmdist holan á 539 m dýpi. Reynt var að hreinsa holuna 1980, farið var út úr holunni við skemmdina og borað í 1519 m dýpi. Öflugt millirennslí reyndist þá í holunni frá 550 m niður í 1450 m dýpi af um 150°C heitu vatni. Holan var því talin óvinnsluhæf og fyllt af sandi og steypu. Árangur af steypingunni er þó talinn óviss. Tvær hitamælingar eru til frá upphitun holunnar og gefa þær lágmarkshita við holuna frá 300 m og til botns. Þá eru til hitamælingar eftir viðgerð, önnur líklega áður en holan fór í blástur, og mælingar á botnhita við um 1500 m dýpi, þegar holan var endurboruð. Þannig má ætla að hiti hafi tæplega verið hærri en 254°C á 500 m dýpi, líklega um 256°C á 600 m, hærri en 246°C á 1000-1200 m, hærri en 270°C á 1400 m, um 290°C á 1500 m og um 310°C á 1800 m dýpi. Þá var reynt að meta hámarkshita á nokkrum stöðum í holunni út frá upphitunarhraða (Hornergraf). Þannig var hitaferillinn, sem sýndur er á mynd 11, áætlaður fyrir holu 10. Gert er ráð fyrir að hiti við holuna hafi fylgt nokkurn veginn suðuferli niður á 600-650 m dýpi. Þar fer hitinn undir suðuferil og er með lágan stigul niður á um 1400 m dýpi. Neðan 1400 m vex hiti svo aftur ört með dýpi niður til botns (1800 m).

Ein þrýstingsmæling er til frá því þegar holan var endurboruð 1980. Vatnsborðsmælingar sem þá voru gerðar og þegar holan var fyrst boruð sýna hækkandi vatnsborð með tíma vegna upphitunar í holunni. Gjöfular vatnsæðar voru á 700 m, 919 m og 1467 m dýpi í holunni 1975. Reiknaðir voru þrýstingsferlar fyrir holuna út frá hitamælingum og vatnsborði og benda niðurstöður til að þrýstingur hafi stjórnað af efri æðunum. Reikningarnir benda til að þrýstingur á 700 m hafi verið um 53 bar eða rétt yfir suðuþrýstingi fyrir þann hita sem hefur verið áætlaður á því dýpi. Þegar holan var endurboruð 1980 hefur þrýstingur í holunni stjórnað af vatnsæð á

550 m dýpi sem gaf vatn inn í holuna og olli miklu niðurrennsli í henni. Þrýstingur á 550 m hefur þá verið um 44,9 bar.

2.11 Hola B-11

Hola 11 var boruð sumarið 1979 um tveim árum eftir kvikuhlaupin sem gengu suður í Bjarnarflag. Holan er staðsett austan við virka sprungusveiminn og var hún boruð í 1923 m dýpi með steypa fóðringu í 620 m og leiðara frá 604 m í 1915 m dýpi. Hola 11 er eina holan í Bjarnarflagi sem mæld var á sama hátt og almennt er gert nú til dags við borun háhitahola. Þannig var fylgst með breytingum í holunni á ýmsum borstigum og upphitun hennar eftir borun. Þó nokkrar mælingar eru því til frá upphitun holunnar bæði hitamælingar og þrýstingsmælingar.

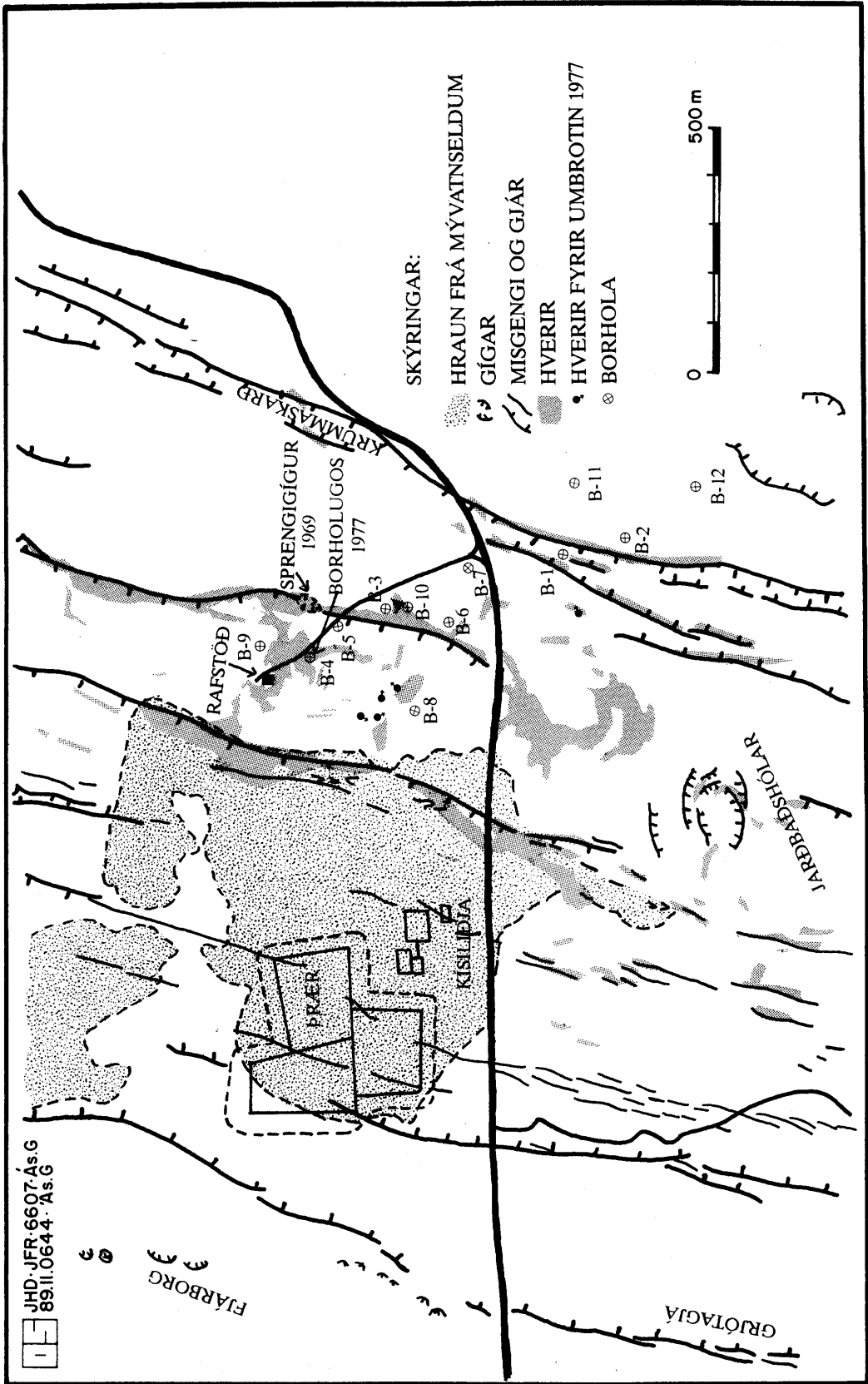
Hitamælingar úr holunni sýna að berghiti hafi verið innan við 100°C niður á rúmlega 400 m dýpi. Nokkur lagskipting kemur fram með hitahámark á um 170 m dýpi og hita lágmark kringum 120 m og 230 m dýpi. Neðan 400 m dýpis vex hiti hratt og er kominn vel yfir 220°C á 600 m dýpi. Mynd 12 sýnir síðustu hitamælingu sem gerð var í upphitun ásamt suðuferli og líklegum hitaferli fyrir holuna. Hiti heldur áfram að hækka með dýpi og nálgast suðuferil á rúmlega 900 m og fylgir honum nokkurn veginn niður á 1450 m dýpi, þar sem hiti er um 320°C. Neðan 1450 m lækkar hiti og er hugsanlegur viðsnúningur á hitaferlinum þar, en hæsti hiti mældur á 1900 m dýpi er 298°C. Ljóst er að hiti hefur ekki náð jafnvægi á dýptarbilunum 500-1000 m og 1450-1923 m þegar síðasta upphitunarmæling er gerð. Hiti er því eitthvað hærri á þessum dýptarbilum heldur en mælingin sýnir og hefur verið áætlaður eins og sýnt er á mynd 12.

Fjórar þrýstingsmælingar eru til úr holunni, þar af þrjár frá upphitun hennar sem sýna vendipunkt á um 1400 m dýpi (116,4 bar). Þrýstingur var þar þá lítið eitt hærri en suðuprýstingur fyrir mældan hita þannig að ólíklegt er að suða sé í jarðhitakerfinu þar heldur er hiti mjög nærri suðumarki. Fjórða mælingin var gerð í blæstri og sýnir að holan sýður sig þá til botns.

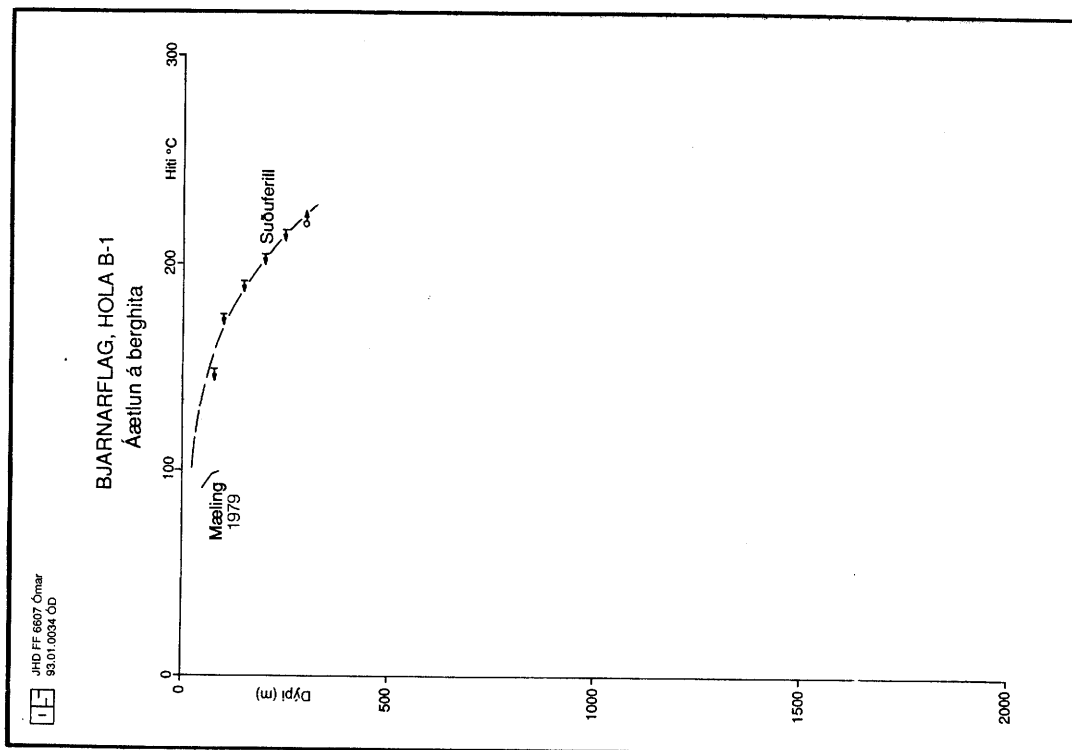
2.12 Hola B-12

Hola 12 er síðasta holan sem boruð hefur verið í Bjarnarflagi. Hún var boruð haustið 1980 í 1999 m dýpi með steypa fóðringu í 686 m og leiðara frá 631 m í 1955 m dýpi. Eins og hola 11 er hola 12 boruð austan við virka sprungusveiminn. Færri mælingar voru gerðar í holu 12 en holu 11, því borverki var flýtt eins og hægt var vegna yfirvofandi hættu á eldsumbrotum. Frá upphitun holunnar eru því aðeins til tvær hitamælingar og hefur hiti ekki náð jafnvægi er síðari mælingin var gerð. Sú mæling gefur því lágmarkshita á viðkomandi dýpi. Mælingarnar benda til að berghiti sé vel innan við 100°C niður á um 550 m dýpi, en vaxi þar hratt með dýpi og sé orðinn um eða yfir 200°C á 700 m dýpi. Þá benda mælingar til að hiti í 1500 m sé um 306°C og í botni rúmar 310°C. Áætlað er því að hiti vaxi með dýpi og nálgist suðuferil á 900-1000 m dýpi, eins og sýnt er á mynd 13. Hitinn hækkar svo líkt og suðuferill niður á rúmlega 1500 m dýpi, en er þó nokkru lægri en suðuferillinn. Neðan 1500 m dýpis fjarlægist hitaferillinn suðuferillinn og hefur lágan stigul til botns.

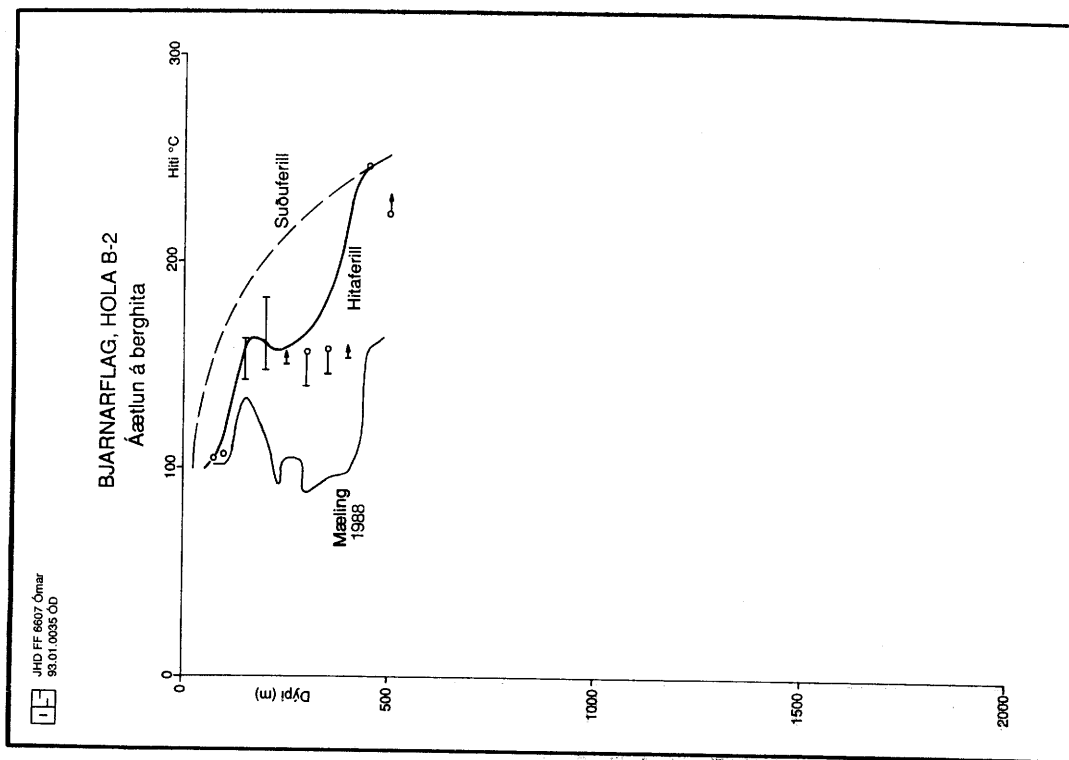
Tvær þrýstingsmælingar eru til úr holunni, önnur frá upphitun, en hin gerð rétt áður en holunni var hleypt í blástur. Mælingarnar benda til vendipunkts á rúmlega 1400 m dýpi (116,2 bar). Þrýstingur þar er hærri en suðuprýstingur fyrir áætlaðan hita á því dýpi þannig að ekki er suða í jarðhitakerfinu þar.



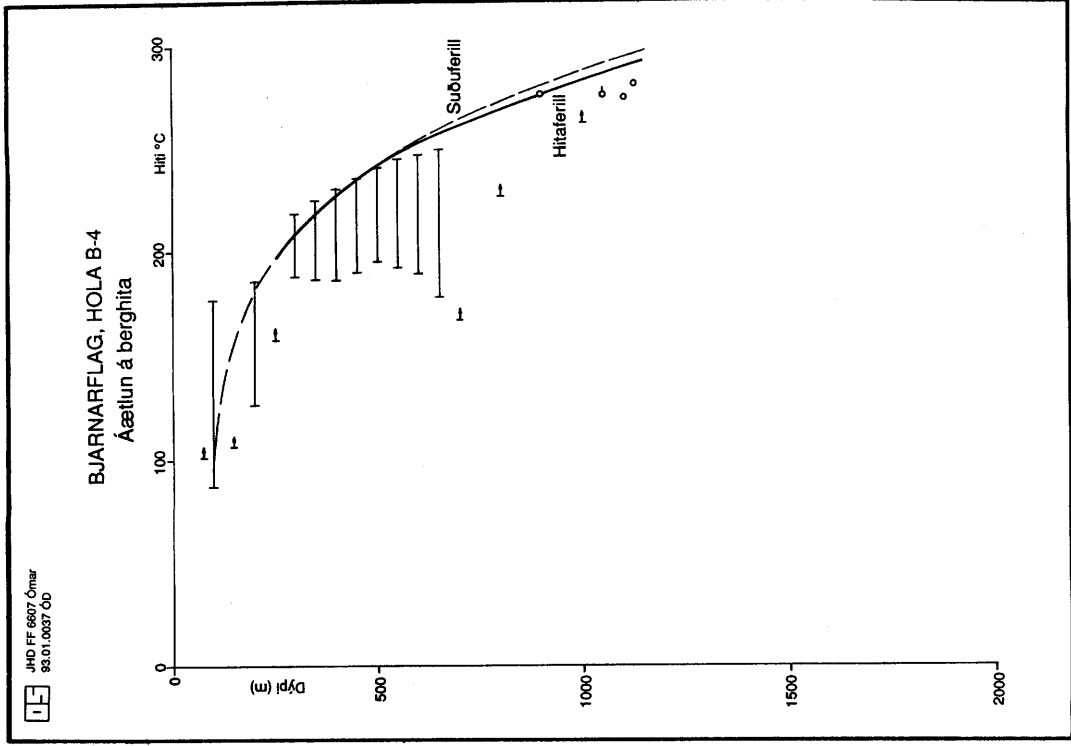
MYND 1. Yfirlitsmynd af Bjarnarflagi



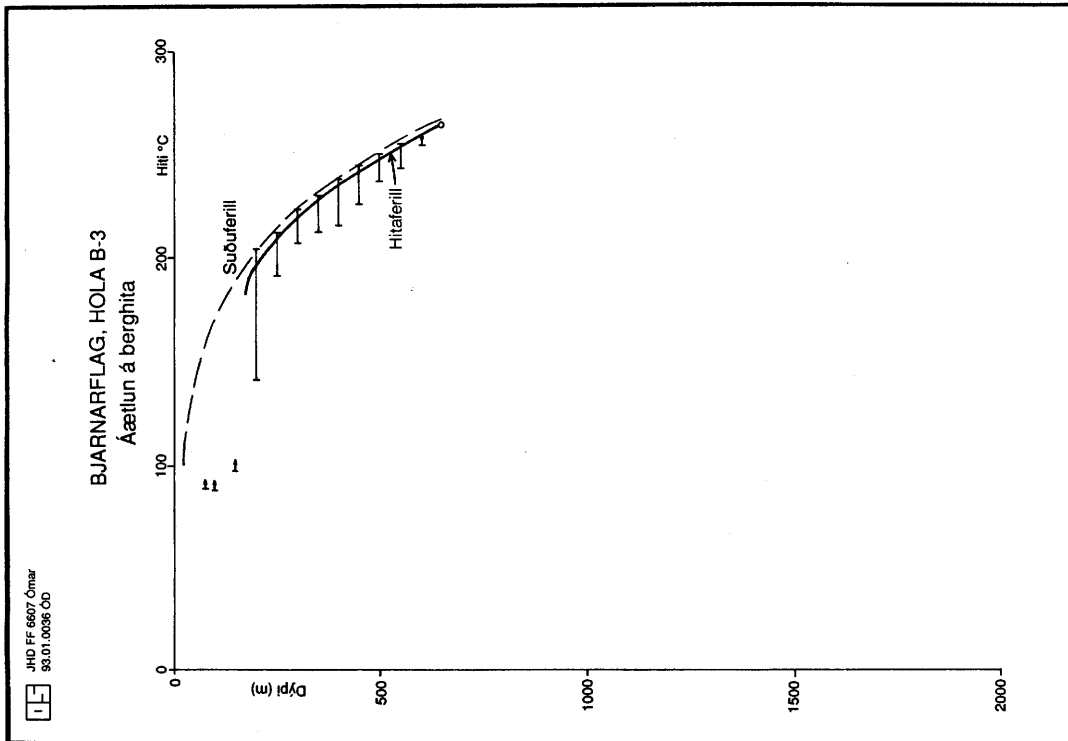
MYND 2. Áætlaður upphafshiti við holu B-1 nálægt suðuferli ásamt síðustu hitamælingu



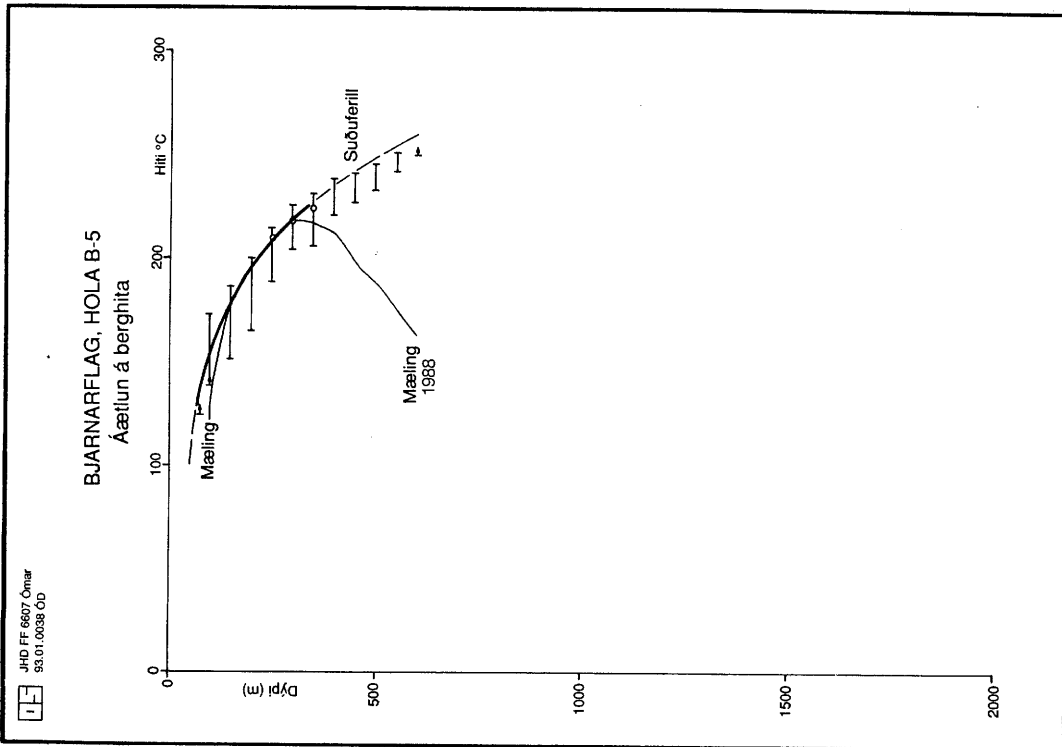
MYND 3. Áætlaður upphafshiti við holu B-2, samsvarandi suðuferill og síðasta hitamæling



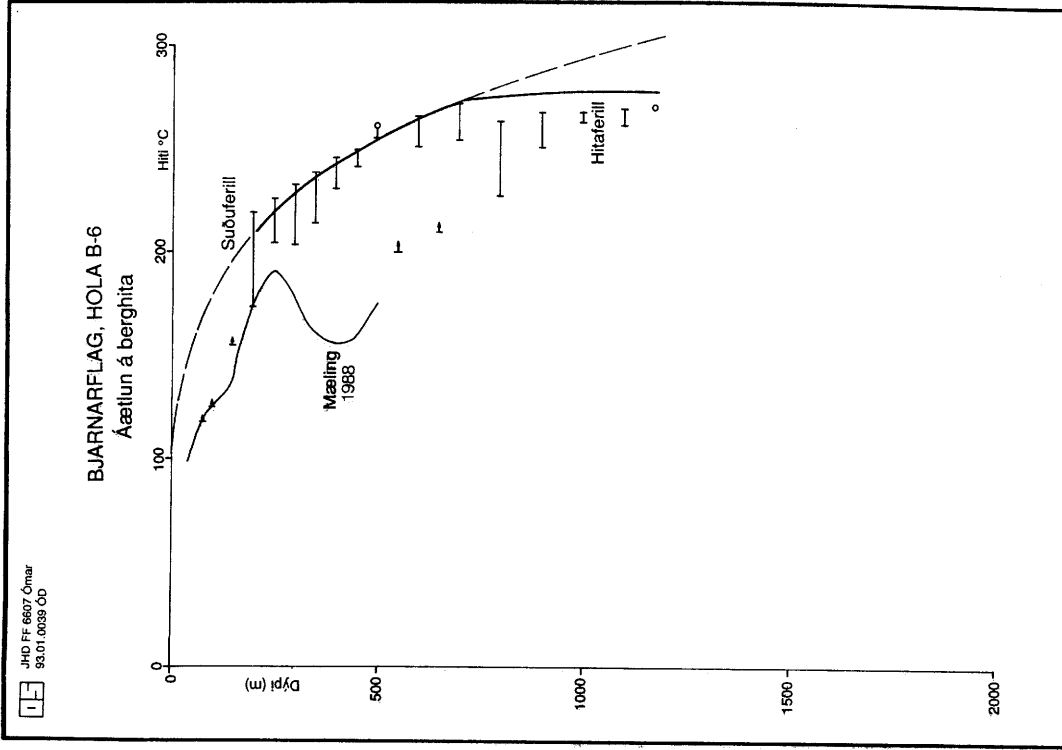
MYND 5. Áætlaður upphafshiti við holu B-4 og samsvarandi suðuferill



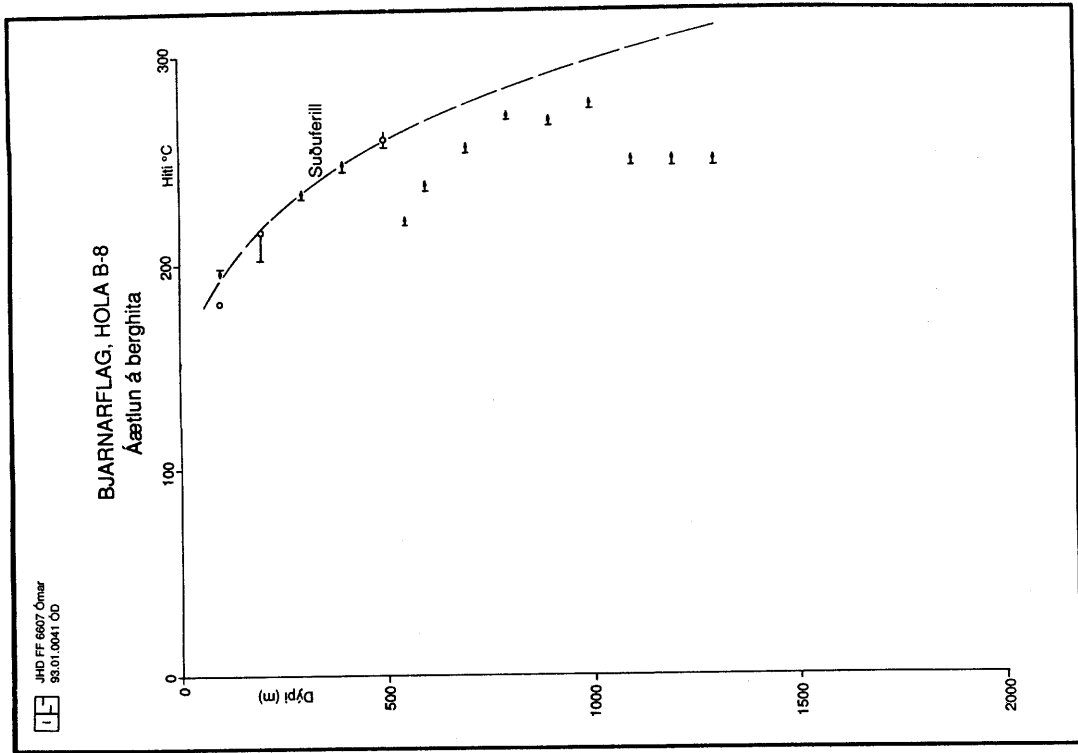
MYND 4. Áætlaður upphafshiti við holu B-3 og líklegur suðuferill þar



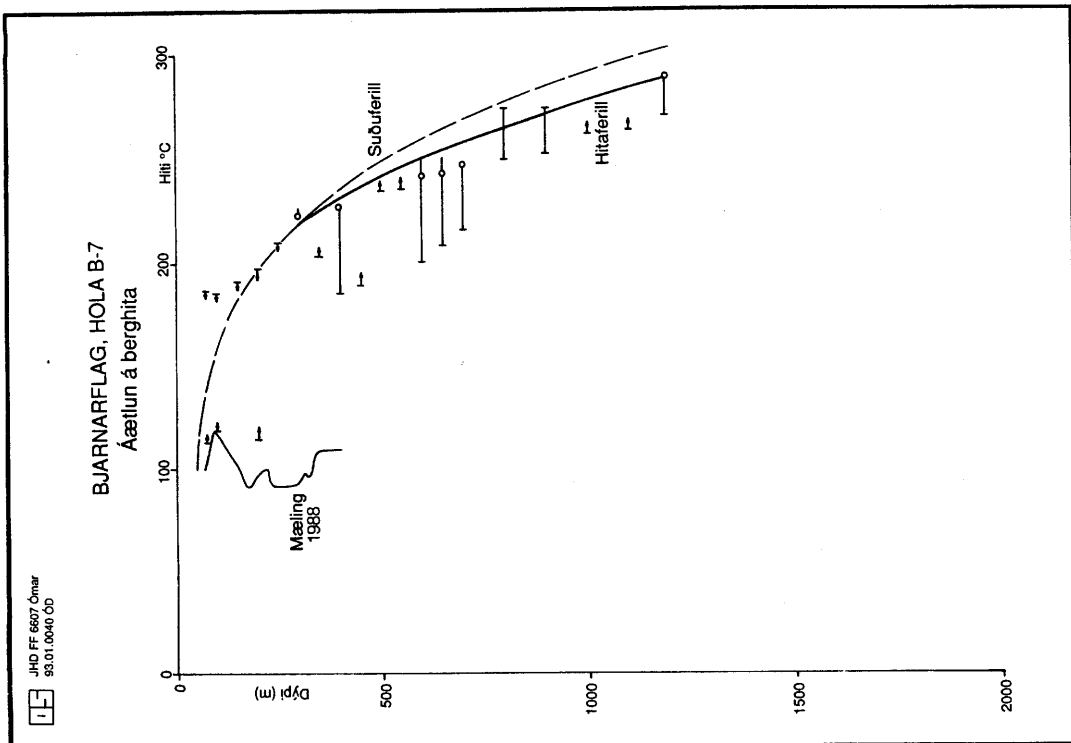
MYND 6. Áætlaður upphafshiti við holu B-5 nálægt suðuferli ásamt sýðstu hitamælingu



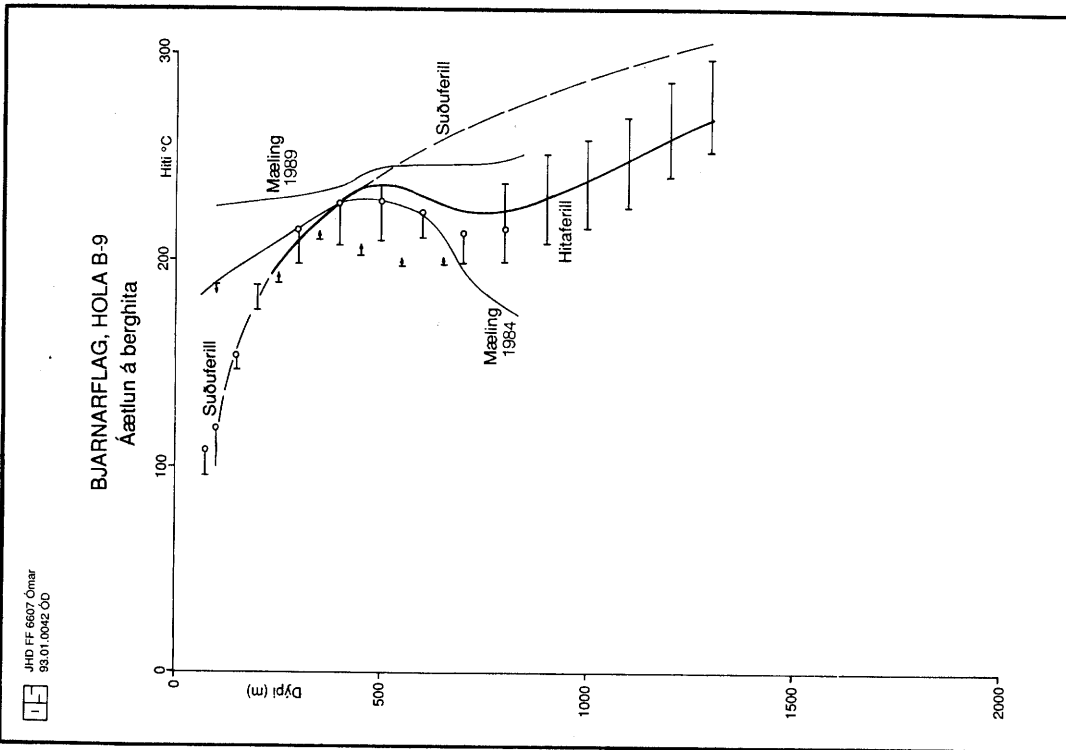
MYND 7. Áætlaður upphafshiti við holu B-6, samsvarandi suðuferill og sýðsta hitamæling



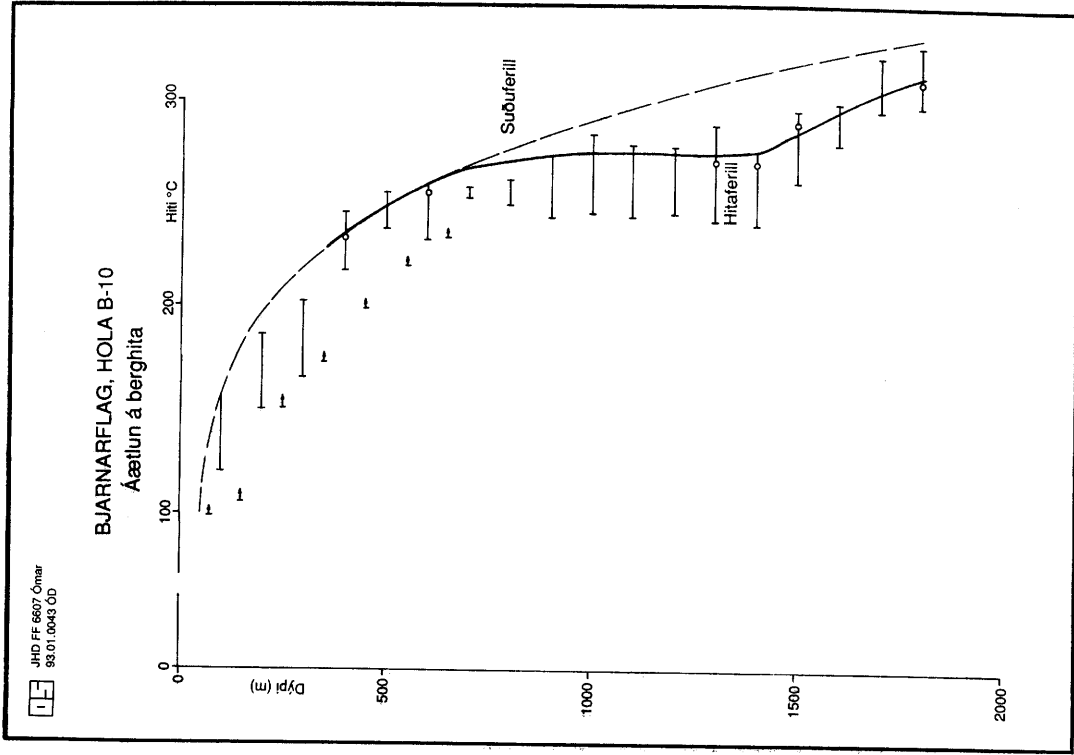
MYND 9. Áætlaður upphafshiti við holu B-8 nálægt suðuferli



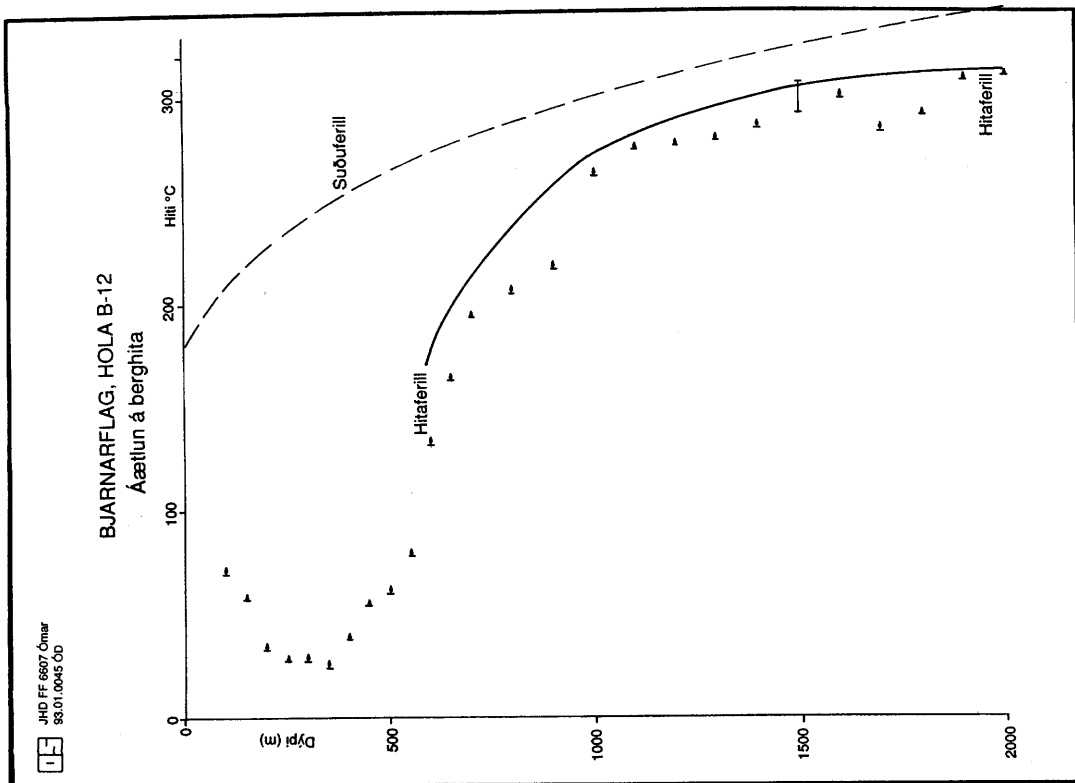
MYND 8. Áætlaður upphafshiti við holu B-7, samsvarandi suðuferill og síðasta hitamæling



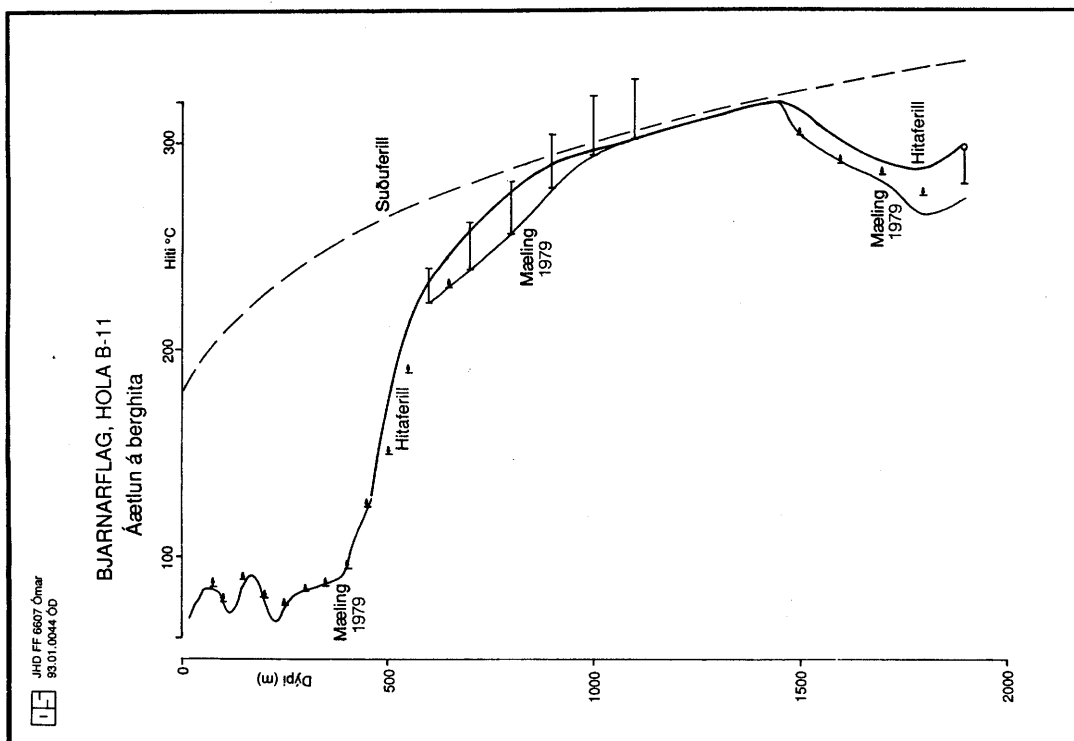
MYND 10. Áætlaður upphafshiti við holu B-9, samsvarandi suðuferill og tvær hitamælingar



MYND 11. Áætlaður upphafshiti við holu B-10 og samsvarandi suðuferill



MYND 13. Áætlaður upphafshiti við holu B-12 og samsvarandi suðuferill



MYND 12. Áætlaður upphafshiti við holu B-11, samsvarandi suðuferill og síðasta upphitunarmæling

3. HITI Í JARÐHITAKERFINU

Myndir 14 til 17 sýna jafnhitalínur í jarðhitakerfinu fyrir umbrot á 300 m, 500 m, 700 m og 1000 m dýpi, samkvæmt áætluðum berghita í kaflanum hér á undan. Vitað er að kæling varð í jarðhitakerfinu, aðallega ofan 600 m dýpis, eftir umbrotin 1977. Ekki er vitað hversu útbreidd kælingin var til austurs, en holur 11 og 12 voru boraðar eftir að kælingin var komin fram í jarðhitakerfinu. Því er óvíst hversu mikið tillit ber að taka til áætlaðs hita í efstu 500 m í þeim þegar jafnhitalínur eru dregnar til að lýsa jarðhitakerfinu fyrir umbrot. Engu að síður er ljóst að hiti lækkar til austurs í efstu 500 m, sama hvaða hiti er valinn fyrir holur 11 og 12, suðuferill eða mældur hiti. Einnig lækkar hiti til norðurs frá holu 8 í átt að holu 9. Dýpra fer aftur á móti að hitna við holu 11 og jafnhitalínurnar fara að sýna tvær hitatungur, þar sem önnur teygir sig til norðurs um holu 8, en hin meir til austurs í átt að holu 11. Þessi lögum jafnhitalínanna bendir til þess að aðstreymið að borholum í Bjarnarflagi sé komið af svæði sem er sunnan holu 8 og vestan holu 11, hugsanlega í námunda við Jarðbaðshóla. Þessi mynd byggir verulega á því að það sé rétt mat að hiti við holu 8 hafi fylgt nokkurn veginn suðuferli til botns. Hafi hiti við holu 8 verið lægri en áætlað er, færirst aðstreymissvæðið aðeins til austurs í átt að holu 11.

Á mynd 18 er sýnt hitasnið um línu sem liggur NV-SA gegnum holur 4 og 12 og er öðrum holum varpað á þá línu. Hitasniðið nær niður á 1200-1500 m dýpi, en aðeins þrjár holur eru dýpri en það. Á sniðinu sést greinilega hvað hiti lækkar til norðurs og suðausturs eða austurs.

4. HITABREYTINGAR VIÐ ELDSUMBROTIN 1977

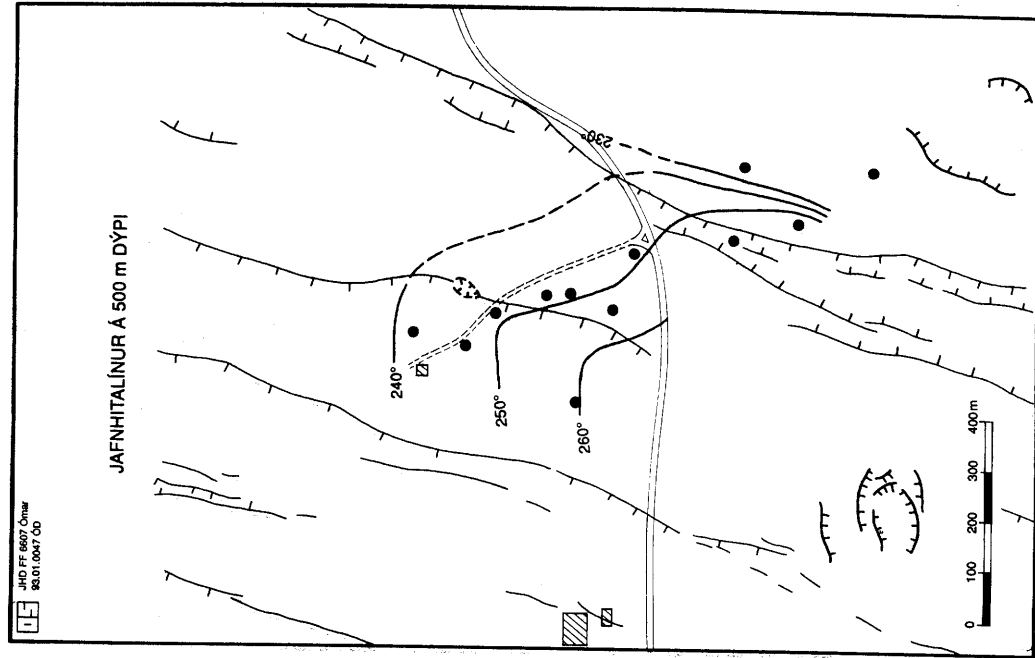
Miklar hreyfingar urðu á sprungum og misgengjum í sprungusveimnum við Bjarnarflag þegar kvikuhlaup gengu suður eftir honum árið 1977. Tvö kvikuhlaup gengu til suðurs þetta ár, það fyrri í apríl og það síðara í september. Í og eftir aprílhrinuna efldust holur mjög og afköst þeirra jukust. Vatnsrásir í jarðhitakerfinu hafa því opnast betur og aukin afköst holanna bera þess frekar vitni að þær hafi sloppið nær Ólaskaðar frá þeirri hrinu. Í septemberhrinunni, hins vegar, þögnuðu sumar holur strax og afköst annarra minnkuðu mikið eftir hrinuna. Þegar holurnar voru kannaðar síðar kom í ljós að þær höfðu flestar skemmst í umbrotunum. Mynd 19 sýnir snið þvert á sprungusveiminn, þar sem dýpi holanna er teiknað inn eins og það mældist eftir umbrotin. Einnig er settur inn hugsanlegur skriðflötur sem tengir saman skemmdirnar í holunum austan til í sprungusveimnum. Við yfirborð afmarkast skriðflöturinn af Krummaskarðsmisgenginu og hann endar á rúmlega 600 m dýpi við misgengið austan holu 5. Skriðflöturinn minnir óneitanlega á skriðbrot, eins og kemur fram í jarðvegi þar sem skurður hefur verið grafinn í gegn. Skriðflöturinn getur því hafa myndast þannig að gliðnun hefur orðið á misgenginu austan holu 5 eða rétt vestan þess og fyllan austan gliðnunarinnar síðan brotnað og skriðið niður.

Í septemberhrinunni 1977 gaus hola 4 gjalli, en holan er vestan misgengisins við holu 5. Minnst tvær goshrinur komu í holuna sem hvor um sig stóð í um eina mínútu og skilaði um 3 tonnum af gjalli upp úr holunni (Guðrún Larsen o.fl., 1978). Holan var í blæstri meðan á gosinu stóð og sömuleiðis eftir það. Talið er að kvika hafi ruðst inn í holuna djúpt, hugsanlega um vatnsæð á 1036 m dýpi og flætt upp holuna. Vatnsæðin á 638 m hafi hins vegar blásið stöðugt og haldið efri hluta holunnar hreinum (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 1989). Ekki kom gos úr holum 8 og 9 sem fylgja sprungustefnunni gegnum holu 4. Hér mun því hins vegar verða hald-

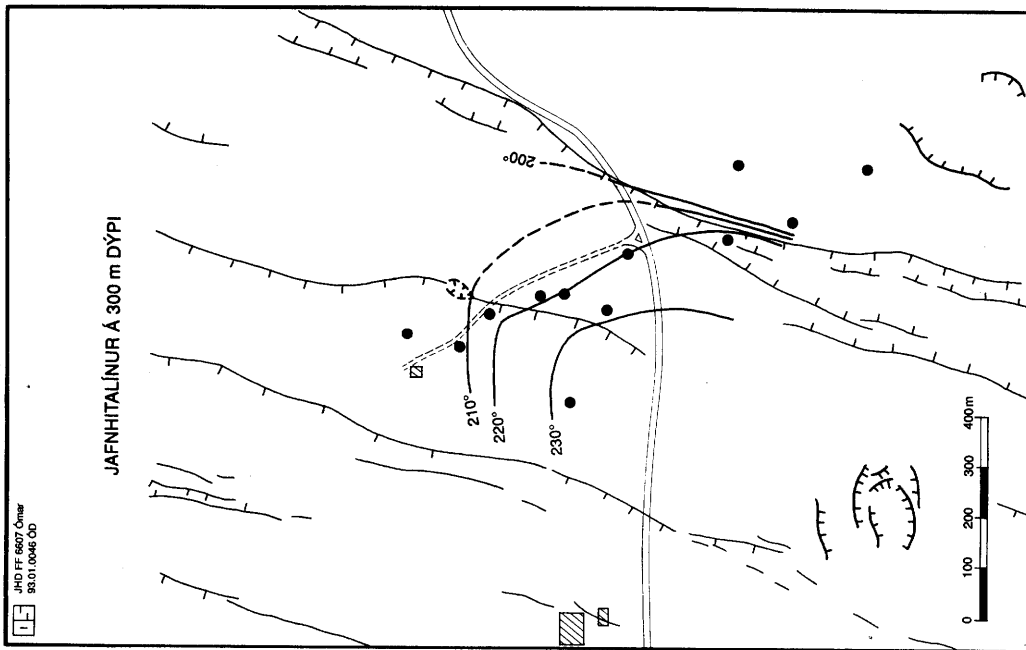
verða haldið fram að skemmdirnar í þeim séu af svipuðum toga og í holu 4. Hóla 8 er um 240 m suður af holu 4. Holan var með vatnsæðar á um 554 m, 840-860 m og niður við botn á um 1300 m dýpi. Einhverjar fleiri æðar voru í holunni, en ekki er vitað hver þeirra var öflugust. Alla vega hefur æðin á 554 m ekki verið nógu öflug til að halda efri hluta holunnar hreinum enda náði fóðring aðeins í 537 m dýpi. Samfara gosumbrotunum getur holan því hafa hrunið og gjall því ekki náð að ryðjast upp holuna nema að takmörkuðu leiti. Eftir umbrotin gekk lóð niður á 310 m dýpi, en fyrirstaða fyrir bor varð á 193 m og bora varð niður frá 253 m dýpi. Gjall og molar sem hafa hrunið úr jarðlögum við holuna hafa aðeins náð að fylla lausu fóðringuna, en fyrirstaða þá verið orðin of mikil fyrir gos úr holunni. Hóla 9 er rúmum 100 m fyrir norðan holu 4. Fyrir umbrotin 1977 var komin fyrirstaða í holuna á 955 m dýpi. Þessi fyrirstaða getur hafa haldið aftur af því að gjall kæmist mikið upp holuna því eftir umbrotin lóðaðist holan 843 m djúp.

Kæling hefur orðið í holu 2, sem liggur rétt austan Krummaskarðsmisgengisins, niður á minnst 500 m dýpi eftir umbrotin 1977. Ekki er vitað hvort eða hve langt kælingin hefur náð til austurs. Holur 11 og 12, sem boraðar eru eftir umbrotin og austan holu 2, eru aðeins kaldari en hóla 2 og tiltölulega kaldar niður á 500-600 m dýpi. Vestan Krummaskarðs er hóla 1 orðin innan við 100 °C niður á 90 m dýpi eða eins djúpt og mælar komust þá í holunni. Næst sést að mikil kæling varð í holu 7 niður á rúmlega 400 m dýpi. Hluti þeirrar kælingar gæti stafað af hugsanlegu niðurrennsli í holunni. Þá hefur hóla 6 kólnað, en aðallega á dýptarbilinu 350-450 m. Hitamælingar fyrst eftir umbrotin sýna að kælingin hefur verið álíka mikil til botns (512 m), en dregið úr henni þar í síðustu mælingum (1988). Ekki eru til ótruflaðar mælingar úr holum 3 og 10 eftir umbrotin. Hins vegar bendir niðurstreymi af 150 °C vatni frá 550 m niður holu 10, þegar hún var endurboruð 1980, til þess að kæling hafi þá verið sú sama við holu 10 og við holu 6. Að öllum líkindum hefur kæling við holu 3 verið eins og við holur 6 og 10. Vestar er hóla 5 og hefur mest kæling þar orðið niður við botn holunnar á rúmum 600 m. Vestastar eru svo holur 4, 8 og 9. Engar mælingar eru til úr holu 8 eftir umbrotin og mælingar úr holu 4 verið truflaðar af blæstri. Hitamælingar úr holu 9 sýna að fyrst eftir umbrotin kólnaði holan aðallega neðan 600 m dýpis og til botns (843 m). Síðustu hitamælingar úr holunni (1988 og 1989) bentu til breyttrar hegðunar eða rennslis frá botni og upp holuna, hugsanlega vegna blæðingar um óþéttan holuloka.

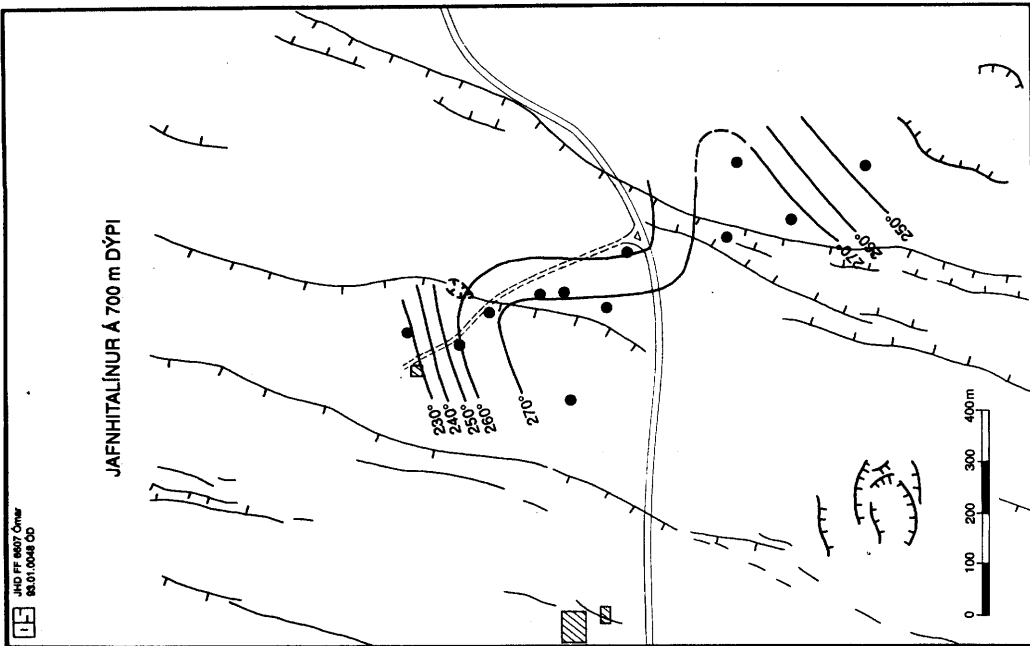
Í stuttu máli má segja að svæðið austan Krummaskarðs sé kalt (< 100 °C) niður á rúmlega 400 m dýpi. Ekki er vitað hvort austasti hluti svæðisins hafi alltaf verið það kaldur. Vestan Krummaskarðs og næst því hefur efsti hluti jarðhitakerfisins niður á rúmlega 400 m dýpi kólnað niður í um 100 °C. Vestar virðist kælingin mest bundin ákveðnum dýptarbilum sem geta tengst áður nefndum skriðfleti og dýpkar á kælinguna til vesturs. Skriðflöturinn getur því veitt köldu grunnvatni niður í jarðhitakerfið.



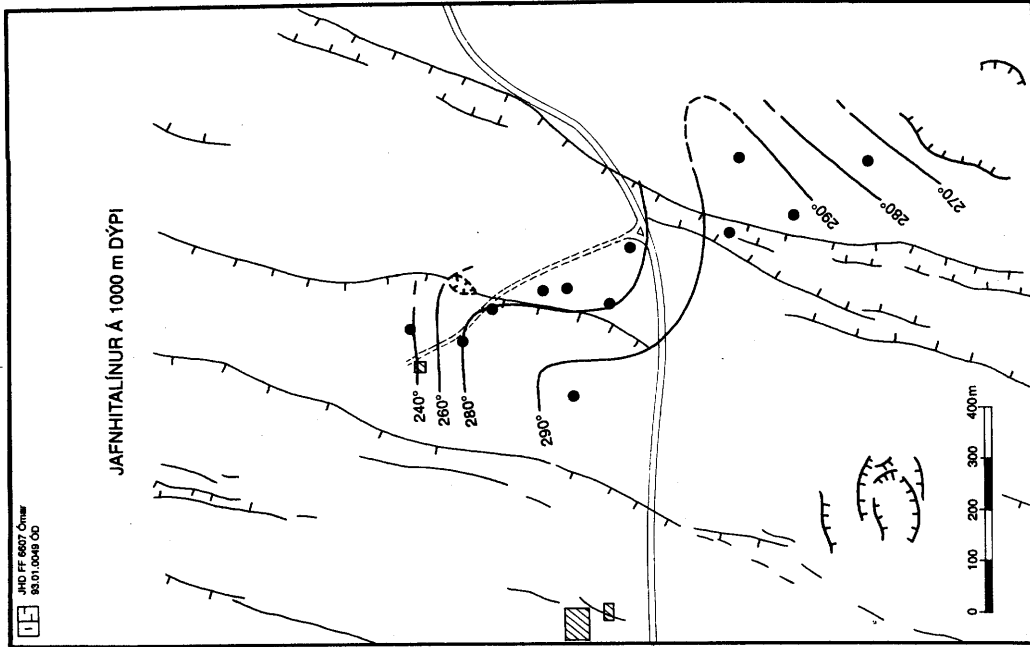
MYND 15. Jafnhitalínur á 500 m dýpi



MYND 14. Jafnhitalínur á 300 m dýpi



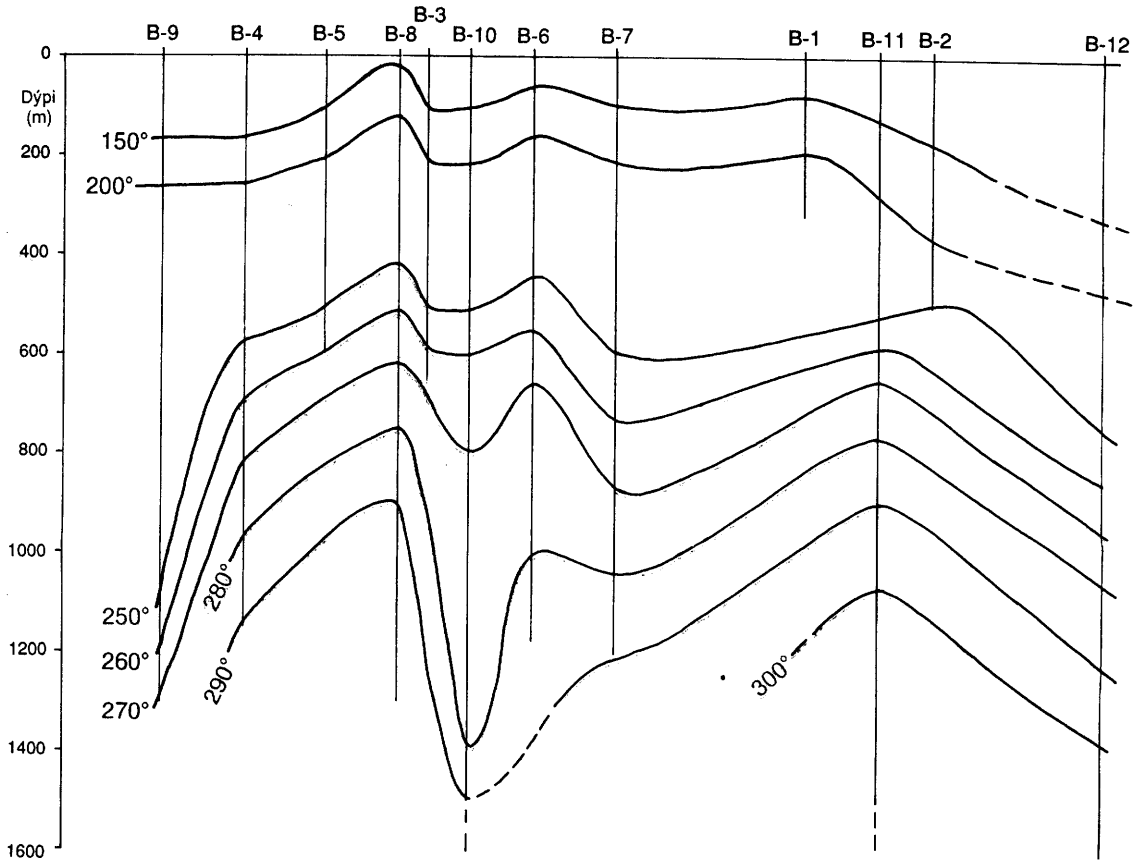
MYND 16. Jafnhitalínur á 700 m dýpi



MYND 17. Jafnhitalínur á 1000 m dýpi

JHD FF 6607 Ómar
93.01.0053 ÓD

BJARNARFLAG Hitasnið NV - SA um holur 4 og 12



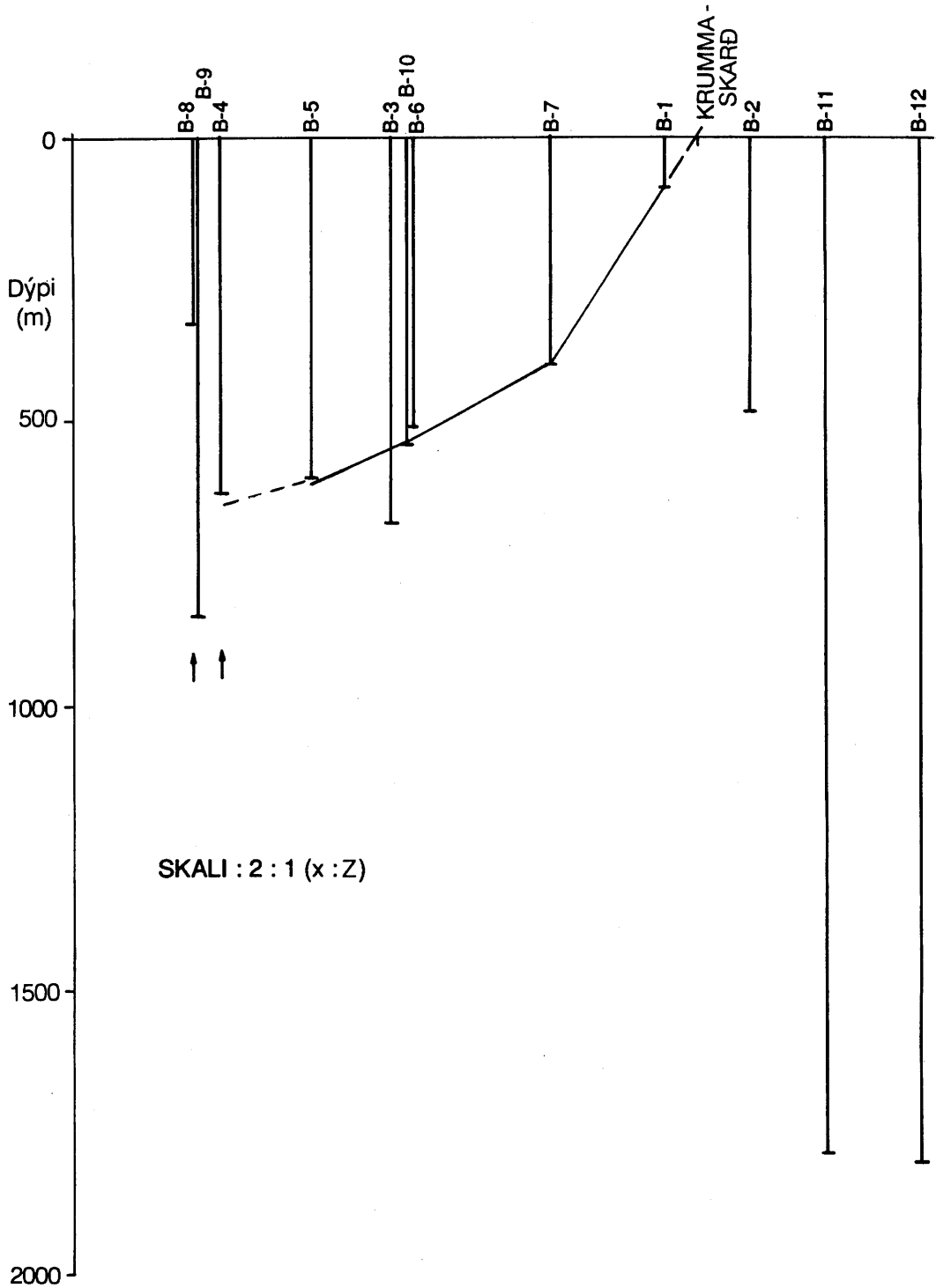
MYND 18. Hitasnið NV - SA um holur B-4 og B-12



JHD FF 6607 Ómar
93.01.0052 ÓÐ

BJARNARFLAG

Dýpi á skemmdir hola við umbrot
Snið þvert á sprungusveim



MYND 19. Dýpi á skemmdir hola við umbrot og lega hugsanlegs skriðbrots.

5. AÐRIR ÞÆTTIR JARÐHITAKERFISINS

5.1 Þrýstingur

Reynt var að leggja mat á þrýsting í jarðhitakerfinu á um 700 m dýpi til að kanna hvort þrýstingsdreifingin benti til svipaðar niðurstöðu og fékkst úr hitamælingunum. Á 700 m dýpi er komin ákveðin mynd á jarðhitakerfið samkvæmt hitamælingum og vatnsæðar komu fram í mörgum holunum á 600-700 m dýpi þannig að valið var að kanna þrýstingsdreifinguna þar. Ýmis vandkvæði voru hins vegar á að ákvarða þrýsting á þessu dýpi. Má þar fyrst nefna að engar þrýstingsmælingar eru til úr holunum frá því fyrir umbrotin 1977, en margar þeirra skemmdust þá. Fáar vatnsborðsmælingar eru til og vatnsborð var ekki mælt í öllum holunum fyrir 1977. Nokkrar holur voru ekki boraðar í þetta dýpi (700 m). Þess vegna er veruleg óvissa í þrýstingsferlum sem reiknaðir voru út frá hitamælingum í viðkomandi holum. Þó eitt eða tvö vatnsborðsgildi væru til fyrir ákveðna holu var yfirleitt ekki hægt að ákvarða hvaða æð holunnar stjórnaði þrýstingi í henni. Þannig getur óvissan í ákvörðun á þrýstingi fyrir ákveðið dýpi verið 2-5 bar.

Þegar valin hafa verið úr líkleg þrýstingsgildi á 700 m dýpi kemur í ljós þrýstingstunga (mynd 20) sem tegir sig um holu 8 og norður um holur 4 og 5 líkt og kemur fram í hitamælingunum (mynd 16). Þrýstingur á þessu svæði er um 57-60 bar og lækkar til norðurs við holu 9. Þá virðist þrýstingur lægri við holur 3, 6, 7 og 10. Þrýstingur gæti verið þar á bilinu 54-57 bar. Í hitamælingunum kemur fram hitatunga til austurs um holu 11. Samsvarandi þrýstingstunga sést ekki skýrt í áætluðum þrýstingi á 700 m dýpi og kemur þar margt til. Hóla 1 var aðeins boruð í 342 m dýpi og nær því ekki niður í vatnsæðarnar á 600-700 m. Þrýstingur framreiknaður niður á 700 m dýpi bendir til lítið hærri þrýstings við holu 1, en áætlað er við holur 6 og 7 norður af henni. Hóla 2 var boruð í tæplega 500 m dýpi og virðist þrýstingur þar vera hærri en við holu 1. Þá voru holur 11 og 12 boraðar eftir umbrotin 1977. Í þeim stjórnast þrýstingur af æðum á rúmlega 1400 m dýpi og þrýstingsstigull þeirra gefur um eða rúmlega 60 bar þrýsting á 700 m dýpi. Það er aðeins hærri þrýstingur en er áætlaður við holur 1 og 2 á því dýpi þannig að tenging þeirra til vesturs við þrýstingshæð í grend við Jarðbaðshóla er ekki augljós.

Hér má geta þess að eftir að hóla 10 var boruð 1975, eða fyrir umbrotin 1977, virðist þrýstingur í holunni hafa stjórnast af æðum á 700-920 m dýpi. Þær gáfu þrýsting á 700 m dýpi í holunni rúm 53 bar, sem er lægsti þrýstingur áætlaður á því dýpi fyrir umbrot. Eftir umbrotin, þegar hóla 10 var endurboruð 1980, stjórnast þrýstingur í holunni af æð á um 550 m dýpi sem gaf vatn inn í holuna og olli miklu niðurrennsli í henni. Þrýstingsstigull gefur þá tæplega 59 bar þrýsting í holunni á 700 m dýpi eða rúmlega 5 bar hærri en hann var fyrir umbrot. Þetta dæmi sýnir vandann við að ákvarða þrýsting í holunum þegar lítið er til af mælingum til að styðjast við. Einnig sýnir það að fyrst eftir umbrotin hefur skriðflöturinn, sem gerð var grein fyrir í kaflanum hér á undan, getað veitt vatni greiðlega niður í jarðhitakerfið þannig að ekki verður vart við marktækan niðurdrátt í því í fyrirliggjandi mælingum. Þó verður að hafa í huga að mælingar í holum 1 til 10 eftir umbrot ná aðeins til efstu 600 til 800 m jarðhitakerfisins.

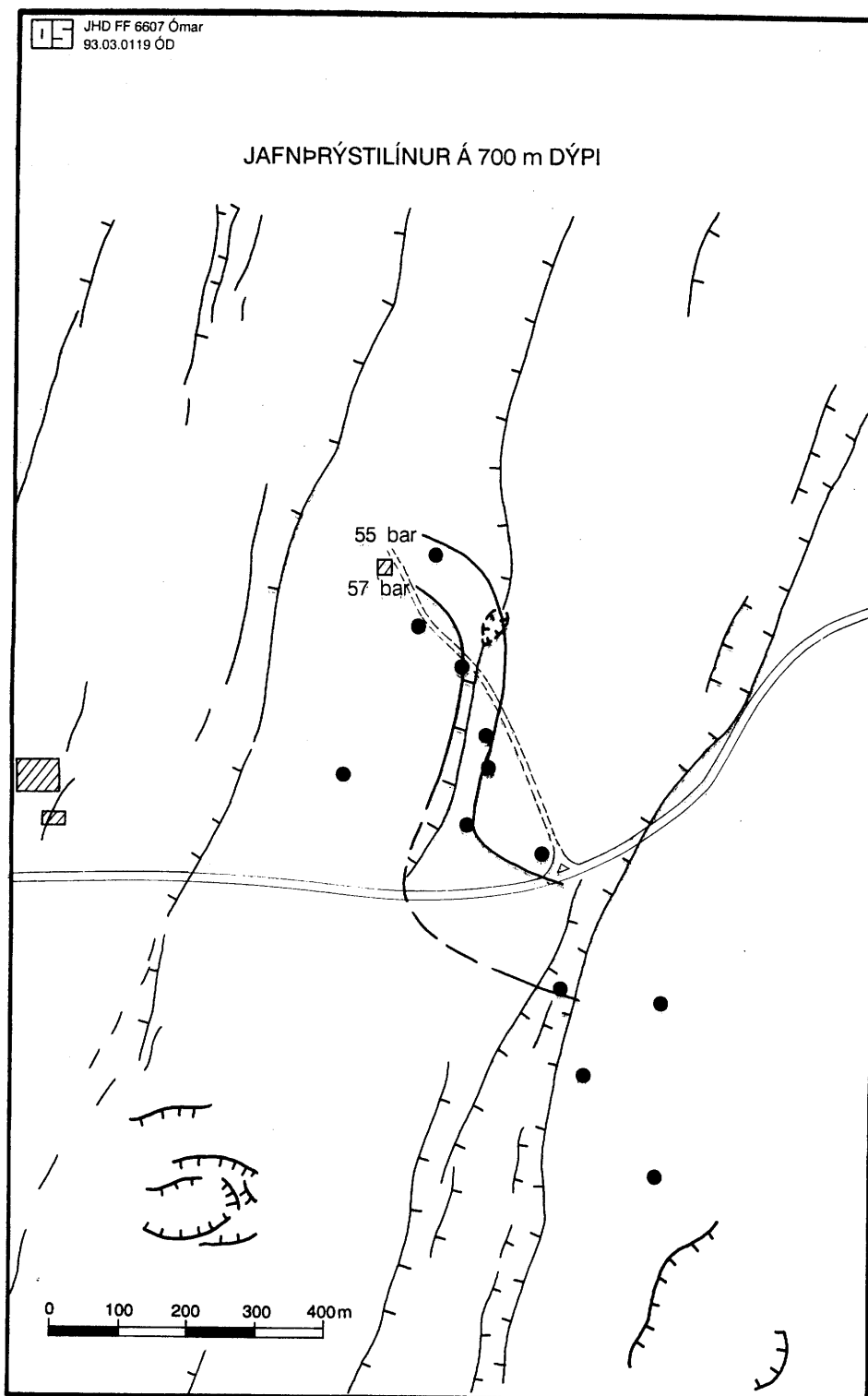
5.2 Jarðeðlisfræðimælingar

Ýmsar jarðeðlisfræðilegar athuganir hafa verið gerðar á jarðhitasvæðunum við Námafjall. Flestar eru þessar athuganir frá þeim árum þegar framkvæmdir voru hvað mestar til að nýta jarðhitann í Bjarnarflagi. Hér verður aðeins mynnst á nokkur atriði úr þessum athugunum.

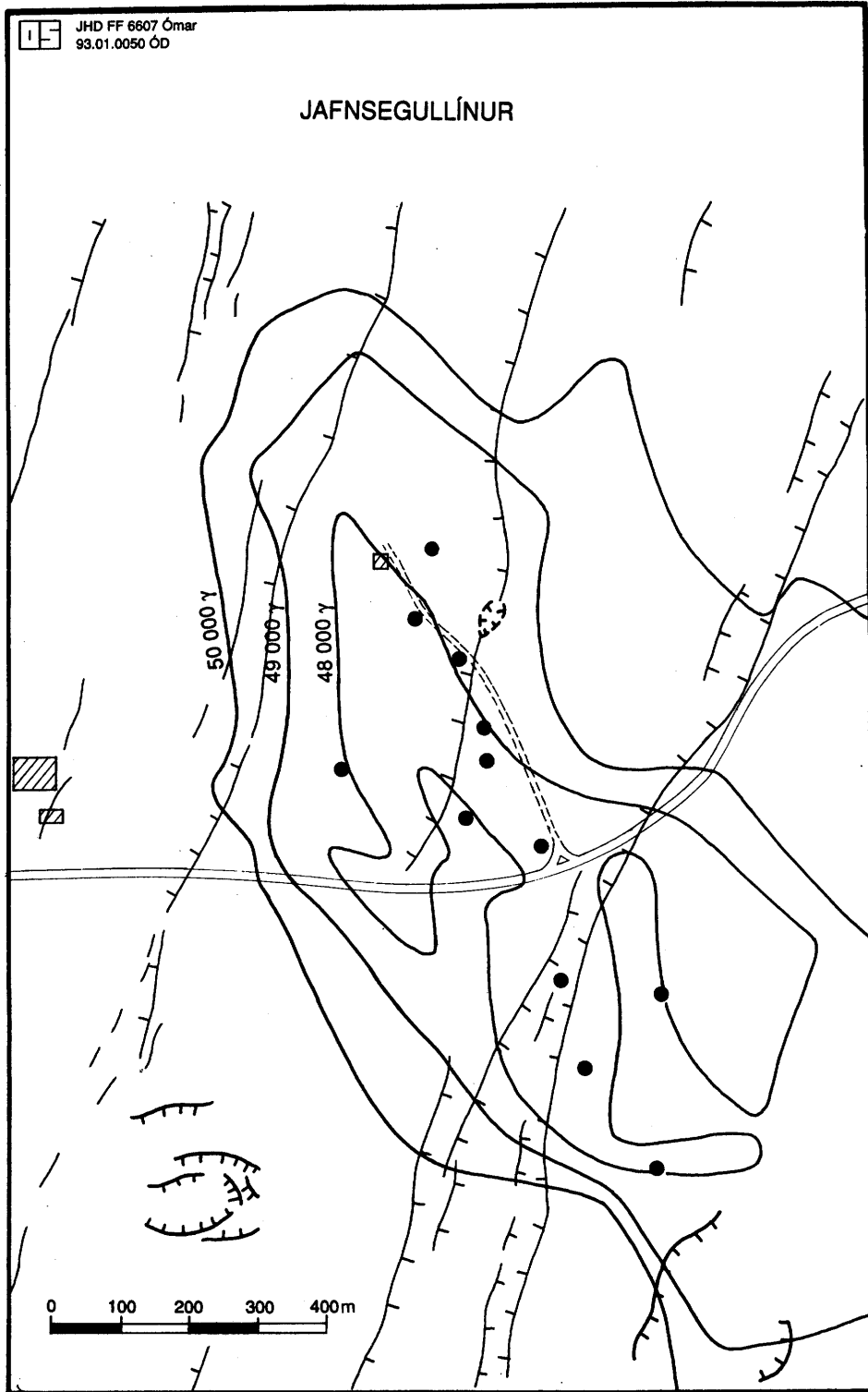
Á árunum 1964 og 1965 voru gerðar segulmælingar á svæðinu umhverfis Námafjall. Mælingarnar voru gerðar með prótónumæli í 5 m hæð yfir yfirborði. Í mælingunum kom fram segullægð sem gengur suður og suðaustur um Bjarnarflag, sveigir svo til austurs inn undir Námafjall og nær austur til Hverarandar (Guðmundur Guðmundsson o.fl., 1965). Út frá samanburði við mælingar á bergsýnum var ályktað að segullægðin stafaði af eyðingu magnetíts við ummyndun á berginu. Á mynd 21 er sýnt hvernig segullægðin teigir sig yfir borsvæðið í Bjarnarflagi. Segullægðin er þar vel afmörkuð til suðurs og suðvesturs, en túlkun hitamælinganna er þar í mótsögn, þar sem þær benda frekar til aðstreymis til jarðhitakerfisins á því svæði.

Árið 1970 voru gerðar viðnámsmælingar á Námafjallssvæðinu, aðallega dýptarmælingar en einnig lengdarmælingar (Kristján Sæmundsson o.fl., 1971). Almenn er talið að eðlisviðnám bergs lækki með vaxandi hita, auknu vatnsinnihaldi og ummyndun upp að vissu ummyndunarstigi. Í megindráttum gáfu viðnámsmælingarnar svipaða mynd af svæðinu og fékkst úr segulmælingunum. Þannig kemur fram viðnámslægð sem liggur um Bjarnarflag og gengur austur undir Námafjall til Hverarandar. Á mynd 22 er sýnd útbreiðsla viðnámslægðarinnar á 100-200 m dýpi í Bjarnarflagi. Eins og segullægðin er viðnámslægðin vel afmörkuð til suðvesturs og túlkun hitamælinganna því í mótsögn við viðnámsmælingarnar af sömu ástæðum og áður er nefnt.

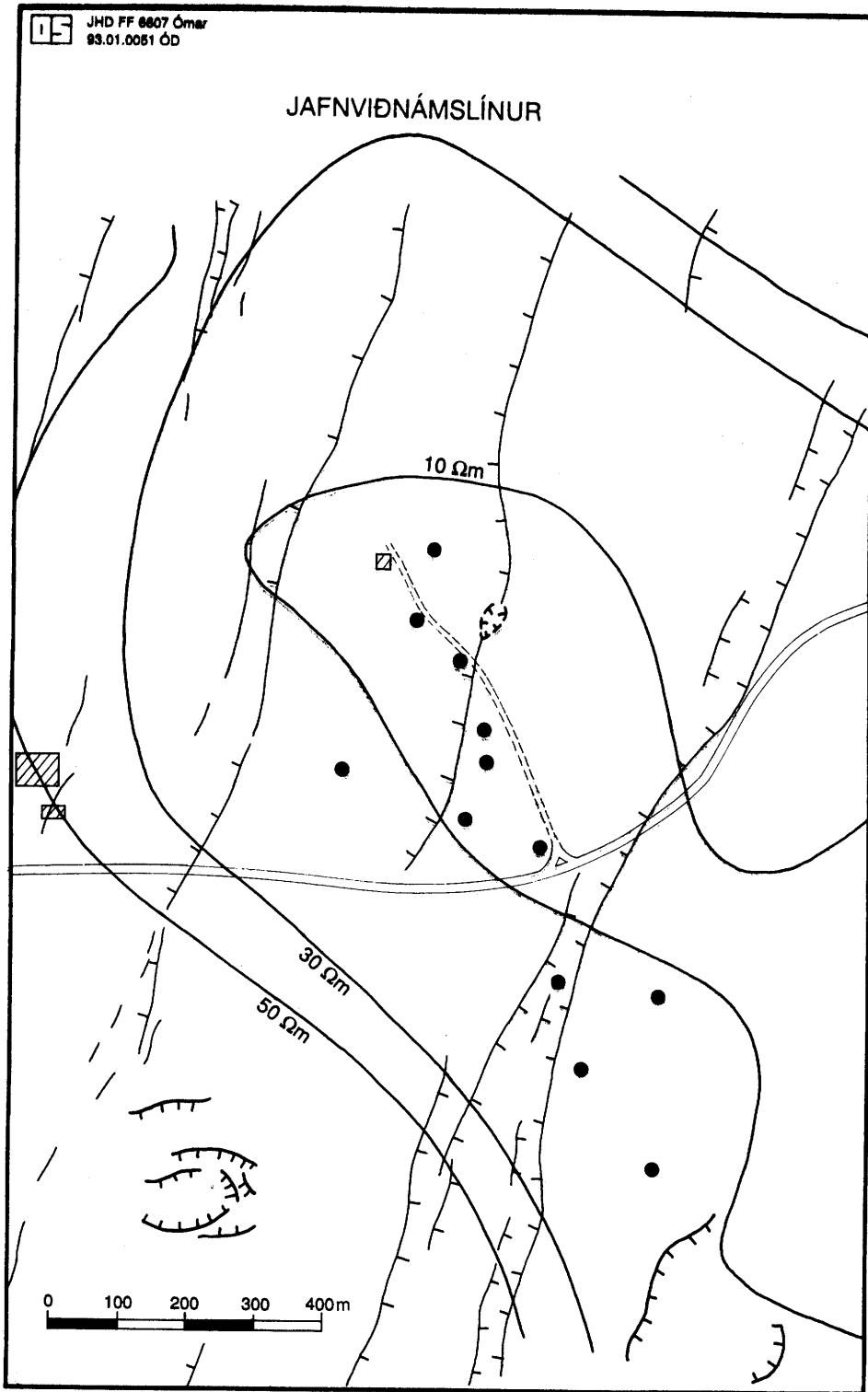
Mælingarnar sem hér eru nefndar taka aðallega til jarðlaga í efstu 300-500 m. Nýrri tæki og úrvinnsluaðferðir geta skyggst eitthvað dýpra, en vinnsludýpi jarðhitakerfisins í Bjarnarflagi byrjar neðan 700 m dýpis. Könnun á ummyndun borsvarfs úr borholunum í Bjarnarflagi gæti skýrt núverandi mynd af hitaástandi jarðhitakerfisins eitthvað frekar, en síðan mun þurfa nýjar borholur til að fylla upp í hana.



MYND 20. Jafnþrýstilínur á 700 m dýpi



MYND 21. Jafnsegullínur frá 1965 sem sýna segullægð á borholusvæðinu í Bjarnarflagi



MYND 22. Jafnviðnámslínur á um 150 m dýpi frá 1970 sem sýna viðnámslægð í Bjarnarflagi

6. VINNSLUSAGA OG AFKASTAMAT

6.1 Ágrip vinnsluögu

Eins og áður sagði hófust boranir í Bjarnarflag 1963. Á þessum árum var reynt að koma holum í blástur eins fljótt og hægt var eftir að borun var lokið. Stuttar fóðringar voru í holunum til að byrja með og hrundu margar á fyrstu dögum eða vikum blásturs. Holurnar voru því hreinsaðar, endurfóðraðar og jafnvel dýpkaðar nokkrum mánuðum eða árum síðar. Lítil vinnsla var því úr jarðhitakerfinu fram undir árslok 1967, en þá tengdist hola 3 gufuveitunni. Heildarvinnsla úr jarðhitakerfinu fram til ársloka 1967 hefur því vart verið meiri en 3 milljónir tonna. Árið 1968 tekur Kísiliðjan til starfa. Það ár gæti vinnslan hafa verið rúmlega 1,1 milljón tonn, en hún eykst í lok ársins er hola 4 tengist gufuveitunni í stað holu 3. Einhver aukning verður fyrri hluta árs 1969 er hola 5 bætist við þó hún hafi verið aflítil. Um mitt ár 1969 er jarðgufurafstöðin tengd gufuveitunni. Nauðsynleg vinnsluaukning vegna tilkomu hennar er um 125 þúsund tonn árið 1969 þannig að heildarvinnsla það ár getur hafa verið rúm 1,5 milljón tonna. Í ársbyrjun 1970 bætist hola 7 við, sem þá varð aflmesta holan á svæðinu, en lokað var fyrir holu 1. Raforkuframleiðsla var aukin og notuðu Kísiliðjan og gufurafstöðin um 446 þúsund tonn af gufu það ár. Eftir 1970 er gufunotkun Kísiliðjunnar og gufurafstöðvarinnar tiltölulega vel þekkt og er vinnslusagan tekin saman í töflu 1.

Vermi úr fyrstu 10 holunum í Bjarnarflagi var líklega að meðaltali rúm 1200 kJ/kg og var gufan til fyrirtækjanna skilin við um 10 bar-a þrýsting. Þannig var gufuhlutinn aðeins um 22% af heildarrennslinu. Í töflu 1 hefur gufunotkun fyrirtækjanna fyrir árin 1970-1978 verið margfölduð með stuðlinum 4,47 til að fá heildarvinnsluna vegna þeirra. Auk þess bætist við notkun Hitaveitu Reykjahlíðar, en hún hefur líklega verið á bilinu 60-125 þúsund tonn af gufu á ári. Hér er litið á vinnslu vegna hitaveitunnar sem aukagetu kerfisins, þar sem sú gufa getur skilist við mun lægri þrýsting en gufuveitan notar, og er því aðeins bætt 85 þúsund tonnum í áætlaða ársvinnslu í töflu 1. Út frá gufunotkun rafstöðvarinnar eftir 1978 fæst að stöðin notar um 20,5 kg/klst fyrir hvert framleitt kW og að meðalafi hennar er um 3,1 MW_e. Þessar tölur voru notaðar til að áætla gufunotkun rafstöðvarinnar fyrir árin 1971-1978 (sjá Orkumál nr. 20-35). Við samanburð á orkunotkun og framleiðslu Kísiliðjunar kemur í ljós að gufunýting hennar batnar á árunum 1981-1982 og er frá því 1983 tæp 10,5 tonn á hvert framleitt tonn af kísilgúr (sjá Jarðvarmaveitur ríkisins - Ársreikningar 1981-1986 og Jarðvarmaspá 1987-2015).

Framhald vinnsluögunnar er á þá leið að veturinn 1970-71 var hola 8 tengd gufuveitunni og var talin gefa um 10 kg/s af háþrýstigufu. Um svipað leyti var hola 9 einnig tengd, en hún var aflítil og gekk illa að reka hana við þrýstinginn á gufuveitunni. Holan var því nýtt óreglulega í fyrstu, en hefur verið lokuð frá 1974. Seinni hluta árs 1971 kemst hola 6 einnig í notkun og er hún talin hafa verið svipuð holu 8 í afköstum. Í byrjun árs 1976 bætist síðan hola 10 við, en hún mun þá hafa verið aflmesta holan í Bjarnarflagi. Tvær umbrotahrinur gengu gegnum Bjarnarflag 1977. Í fyrri hrinunni jukust afköst holanna, en í þeirri síðari skemmdust flestar þeirra. Vinnslan minnkaði því verulega þar til hola 11 tengdist gufuveitunni í september 1979. Hola 12 bættist svo að lokum við í desember 1980. Holur 11 og 12 vinna vökva með miklu hærra vermi en eldri holurnar gerðu, þannig að gufuhluti þeirra hefur verið yfir 70%. Í töflu 1 eru afköst hola 11 og 12 því skráð beint frá og með 1979 að viðbættum 85 þúsund tonnum til hitaveitunnar, sem nú er tengd holu 4.

Tafla 1. Áætluð massataka úr jarðhitakerfi Bjarnarflags

Ár	Gufusala tonn	Ársvinnslan tonn	Jafnaðarvinnsla kg/s
1963		84.100	2.7
1964		631.100	20.0
1965		696.900	22.1
1966		788.900	25.0
1967		788.900	25.0
1968		1.167.600	37.0
1969	39.032	1.546.300	49.0
1970	446.000	2.078.620	65.9
1971	483.660	2.246.960	71.2
1972	711.280	3.264.421	103.3
1973	730.000	3.348.100	106.1
1974	395.020	1.850.739	58.6
1975	623.940	2.874.012	91.1
1976	618.240	2.848.532	90.3
1977	495.520	2.299.974	72.9
1978	281.437	1.343.023	42.6
1979	170.945	358.499	11.4
1980	184.000	902.342	28.6
1981	450.000	1.521.186	48.2
1982	397.000	1.510.141	47.9
1983	506.000	1.499.096	47.5
1984	420.000	1.488.051	47.2
1985	302.000	1.477.006	46.8
1986	241.177	1.465.961	46.5
1987		1.454.915	46.1
1988		1.443.870	45.8
1989		1.432.825	45.4
1990		1.421.780	45.1
1991		1.266.332	40.1
1992		1.392.116	44.1

Tafla 1 gefur lágmarksvinnslu úr jarðhitakerfi Bjarnarflags, því vitað er að heildarafköst borholanna voru oft meiri en jafnaðarvinnslan yfir árið í töflu 1 gefur til kynna. Þannig er vitað að ef gufunotkun fyrirtækjanna minnkaði í stuttan tíma þá blésu holurnar út um öryggisloka og massataka úr kerfinu minnkaði því ekki að sama skapi. Fáar mælingar eru til af afköstum einstakra hola gegnum árin og til að fá mynd á vinnslusöguna, verður því að miða við þá notkun sem er þekkt. Jarðhitakerfið í Bjarnarflagi á að baki nærri 30 ára vinnslusögu og í lok árs 1992 hafa verið teknar yfir 46 milljónir tonna úr kerfinu.

6.2 Stærðarmat

Blásturssaga hola 11 og 12 er sýnd á myndum 23 og 24. Af myndunum sést að vinnsla hefur verið tiltölulega jöfn úr holunum, en þó farið aðeins minnkandi með árunum. Eins hefur vermi holanna heldur lækkað frá upphafi vinnslu. Ef frá eru taldar truflanir í mælingum holu 11 á árunum 1987-1988, sem stöfuðu af skemmdum á blástursstút, kemur í ljós að dölun hola 11 og 12 er mjög svipuð að magni til bæði fyrir rennsli og vermi og þar með fyrir orku. Þannig hefur rennsli holu 11 minnkað að jafnaði um 0,19 kg/s á ári og vermið um 19 kJ/kg á ári. Sambærilegar tölur fyrir holu 12 eru 0,16 kg/s og 20 kJ/kg. Þetta er mjög hæg dölun eða innan við 1% á ári.

Ef reiknað er með að öll rennslisminnkun hola 11 og 12 stafi af niðurdrætti í jarðhitakerfinu, en ekki af ástandsþreytingu í holunum, samsvarar það þrýstingslækkun í kerfinu um 0,6 bar á ári. Sé þessi þrýstingslækkun ásamt heildarvinnslu hola 11 og 12 eftir 1979 notuð til hermi-reikninga með tank-líkani, eins og algengt er að nota við fyrstu hermun lághitakerfa (Guðni Axelsson og Þórður Arason, 1992), gefur líkanið bestu svörun fyrir einn lokaðan tank með mikla rýmd (24266 ms^{-1}). Láti jarðhitakerfið allan vökva frá sér með samþjöppun þarf kerfið að vera mjög stórt eða yfir 500 km^3 , þ.e. ef valdar eru venjulegar stærðir fyrir grophlutfall og samþjappanleika bergs og vatns. Stafi rýmdin hins vegar af sambandi kerfisins við frjálst vatnsborð, þ.e. kerfið hefur aðsteymi grunnvatns, þarf stærð hleðslusvæðisins ekki að vera meiri en $2,4 \text{ km}^2$ og kerfið því um 5 km^3 . Segja má að þetta sé lágmarksstærð jarðhitakerfisins, þar sem líkanið og skilyrðin sem notuð eru valda hámarkstakmörkun hvað það varðar. Í reynd getur hluti af rennslisminnkun holanna stafað af útfellingum í þeim og vitað er að mælilóð hafa stoppað í holu 12 (1989). Sýni benda til að fyrirstaðan í holu 12 sé leirdrulla svipuð þeirri er fannst í holu KJ-21 í Kröflu á sínum tíma. Þannig myndi þrýstingslækkun kerfisins vera ofmetin hér að ofan og stærð þess vanmetin.

Þegar tekin er heildarvinnslan úr jarðhitakerfinu síðastliðin nær 30 ár og miðað við grophlutfall milli 5-10 % þarf um 0,6-1,2 km^3 til að geyma þann massa. Mælingar benda ekki til mikillar þrýstingslækkunar í kerfinu, þannig að kerfið þarf að vera miklu stærra en þetta eða/og hafa töluvert aðsteymi jarðhitavatns til að bæta upp massatökuna.

Erfiðara er að meta á einfaldan hátt hvað veldur breytingu í vermi holanna, þar sem það stjórnast meðal annars af hvernig suða hefur breiðst út í bergið við holurnar og þá hvernig aðsteymi er að þeim. Ef gert er ráð fyrir að lækkun vermis hola 11 og 12 stafi af lækkuðum meðalhita aðsteymis og að blástursþrýstingur og þar með skiljuþrýstingur holanna hafi verið óbreyttur gegnum árin má áætla hitabreytingu í kerfinu. Út frá ofangreindum forsendum fæst að meðalhiti í jarðhitakerfinu hafi lækkað um $0,5^\circ\text{C}$ á ári. Þó skiljuþrýstingur holanna hafi breytst um nokkur bar breytast niðurstöður ofangreindra reikninga ekki.

6.3 Gerð þrívíðs líkans

Tank-líkanið sem notað var hér á undan getur aðeins hermt eina breytu (þrýsting) með tíma. Hins vegar sýnir blásturssaga hola 11 og 12 breytingar í rennsli og vermi holanna. Til þess að meta á raunhæfari hátt afköst jarðhitakerfisins með tilliti til hugsanlegrar aukinnar vinnslu fyrir nýja virkjun, var útbúið einfalt þrívítt reiknilíkan fyrir það. Forritið TOUGH var notað við reikningana, en það getur hermt þrýstings-, hita- og ástandsþreytingar í kerfinu samtímis (Pruess, 1986). Stuðst var við þær upplýsingar sem áður eru komnar fram um jarðhitakerfið, en jafnframt var reynt að halda reiknilíkaninu sem einföldustu og verða því gerð lauslega skil hér

á eftir.

Reiknilíkaninu var skipt í þrjú lög. Efsta lagið (lag 1) náði niður á 500 m dýpi, þá tók við 200 m þykkt lag (lag 2) en neðsta lagið (lag 3) var haft 1400 m þykkt. Hverju lagi var síðan skipt í mismarga og misstóra búta. Efstu tveim lögnum var hvoru um sig skipt í 9 búta og þekja þeir svæði sem er tæpir 22 km^2 ($3,6 \times 6 \text{ km}^2$). Gert var ráð fyrir að litlar þrýstingsbreytingar yrðu í efsta laginu vegna gegnumstreymis grunnvatns samanber að ekki mælist niðurdráttur í elstu tíu holunum á svæðinu. Því voru jaðrar efsta lagsins hafðir opnir, það er þrýstingi var haldið óbreyttum við jaðrana. Jaðrar lags tvö voru hafðir lokaðir og lagið notað sem nokkurs konar þak á sjálfan jarðhitageyminn, en hiti í holum 11 og 12 vex mjög mikið á dýptarbilinu 500-700 m. Þriðja laginu var skipt í 31 búa og voru jaðrar þess hafðir lokaðir, sem merkir að ekkert rennsli hafi verið yfir þá. Hins vegar var fjarlægðin að jöðrunum höfð meiri í lagi þrjú en í efri lögnum og nær því yfir svæði sem er $117,6 \text{ km}^2$ ($8,4 \times 14 \text{ km}^2$). Innsta hluta lags þrjú, sem nær yfir $2,4 \text{ km}^2$ svæði og samsvarar vinnslusvæðinu í Bjarnarflagi, er skipt í 15 búta sem eru 400 m á kant. Með því að hafa tvær holur í innstu bútum lags þrjú fæst holubéttleikinn 12 holur/ km^2 , eða sambærilegur þéttleiki og talin var lágmarks þéttleiki fyrir holur á Nesjavöllum. Heildarrúmmál lags þrjú er um 165 km^3 og sést af ofangreindum stærðum að tillit er tekið til niðurstaðna úr tank-líkaninu. Mynd 25 sýnir í meginatriðum bútonina í líkaninu.

Ekki var reynt að líkja eftir náttúrulegu ástandi jarðhitakerfisins, þar sem það hefði krafist ítarlegri upplýsinga en nú eru fyrirliggjandi um kerfið og hefði einnig getað tekið mjög langan tíma. Í staðinn var líkaninu gefið ákveðið upphafsástand sem tók mið af því sem er vitað um kerfið. Þannig var miðað við að vinnsla hæfist úr kerfinu með tilkomu holu 11. Ekki var tekið tillit til vinnslu fyrir þann tíma enda var hún að mestu úr efri hluta jarðhitakerfisins, sem samsvarar lögum 1 og 2 í líkaninu. Hiti og þrýstingur var því valinn svipaður og hann mældist við holur 11 og 12 þegar þær voru boraðar. Þannig var hiti í lögum 1, 2 og 3 á 250 m, 600 m og 1400 m dýpi settur 90°C , 230°C og 317°C . Þrýstingur var settur 116,2 bar á 1400 m, en þrýstingsstigull vatnssúlu fyrir ríkjandi hita látinn ráða þrýstingi í efri lögnum sem varð þá um 22,8 bar og 54 bar í lögum 1 og 2. Kerfið var þannig alls staðar í vatnsfasa í upphafi. Byrjað var með algengar stærðir fyrir grophlutfall og lekt í kerfinu, en lektin látin vera misleit í x:y (0,6:1) stefnur í líkingu við lögum líkansins. Þá var hlutlekt vatns og gufu látin breytast línulega með mettnarstigi.

Tveir svelgir voru settir í miðju lags 3, sem samsvara holum 11 og 12, og þeir látnir taka massa og varma úr kerfinu á móti 30 bar þrýstingi. Það samsvarar að valin er 30 bar blástursþrýstingur í botni holanna sem ætti að tryggja um 15 bar þrýsting á holutoppi og því ávallt að vera nógu hár fyrir gufuveituna. Reiknilíkanið var síðan keyrt og lekt, hlutlekt og grophlutfall stillt þannig að líkanið sýndi samsvörun við mælingar á holum 11 og 12. Þar sem líkanið er frekar gróft, þ.e. samanstendur af fáum og frekar stórum bútum, og nokkuð einfölduð upphafsskilyrði voru notuð, þá var ekki reynt að laga misræmi sem greinilega stafaði af grófleika líkansins.

Myndir 26 til 29 sýna nálgun líkansins við blásturssögu hola 11 og 12. Á myndunum eru ferlarnir niðurstöður líkansins og punktarnir mælingar. Sveiflurnar sem sjást á ferlunum stafa að mestu af grófleika líkansins. Þar sem flestir bútarnir eru tiltölulega stórir í líkaninu þarf meiri þrýstingsmismun milli búta svo þeir verði virkir og hafi áhrif á viðbrögð kerfisins, en ef þeir væru litlir. Viðbrögð líkansins verða því rykkjöttari en ella þegar virkni nálægs bútar bætist inn í viðbrögð þess. Mjög viðunandi samsvörun fæst við rennsli holanna, en ekki tekst að halda eins mikilli suðu við þær og mælingar gefa til kynna, meðal annars vegna þess hve bú-

arnir eru stórir. Í heild er þó samsvörunin viðunandi og nægileg fyrir tilgang líkansins hér, sem er að kanna lágmarksafköst kerfisins.

6.4 Afkastamat

Þegar þrívíða reiknilíkanið hafði verið stillt af fyrir blásturssögu hola 11 og 12 voru helstu eiginleikar þess þeir sem sýndir eru í töflu 2. Auk þess var hlutlekt vatns og gufu látin breytast línulega með mettnarstigi. Þannig hættir vatn að streyma um bergið ef vatnsmettunin fer undir 40%, en hlutlekt þess verður 1 við 100% vatnsmettun. Gufa verður hreyfanleg um bergið við 5% gufumettun, sem samsvarar 95% vatnsmettun, og hlutlekt gufu verður 1 við 60% gufumettun (40% vatnsmettun). Þá voru holur 11 og 12 láttnar blása á móti 30 bar þrýstingi, eins og áður var lýst, og með vinnslustuðlana (productivity index) $1,86 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3$ og $1,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3$.

Tafla 2. Eðlistærðir notaðar í reiknilíkani

Syrpa	Eðlismassi (kg/m^3)	Grop (%)	Lekt (md)		
			k_x	k_y	k_z
Lag 1	2650.	10	3.0	5.0	5.0
Lag 2	2650.	4	0.15	0.25	0.45
Lag 3	2650.	4	0.85	1.4	1.2

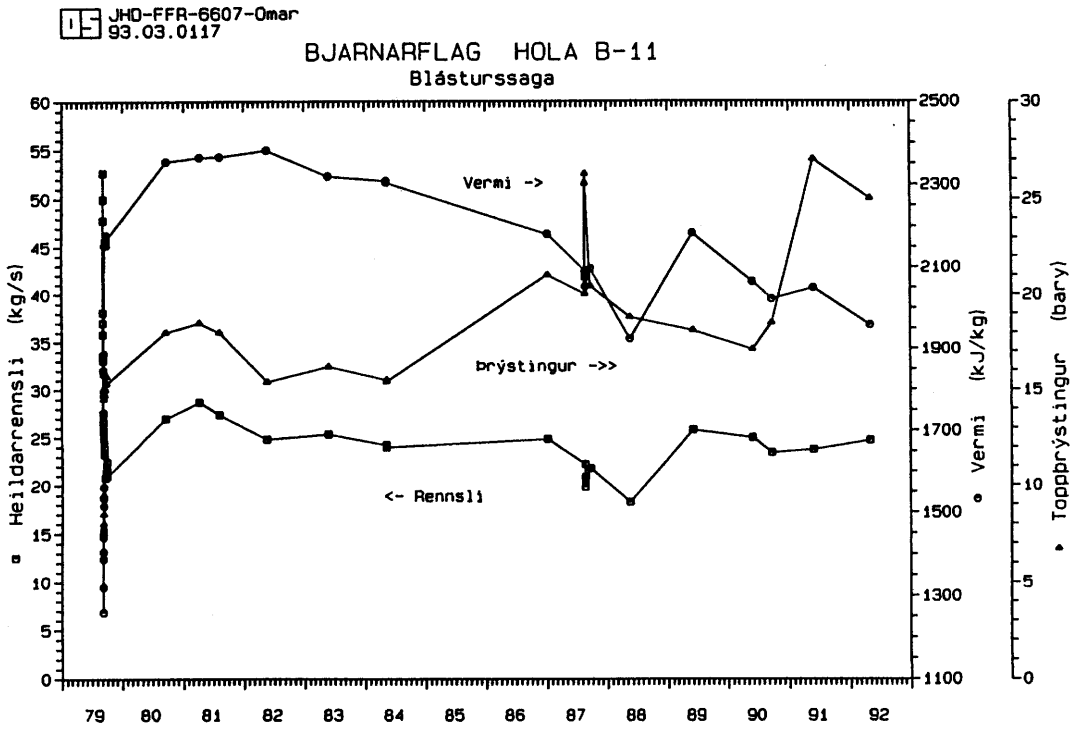
Í lok blásturssögu hola 11 og 12, sem nær yfir um 13 ára tímabil, hafa ekki orðið miklar breytingar í efstu tveim lögum í líkaninu eða í efstu 700 m kerfisins. Þó hefur þrýstingur á vinnslusvæðinu (innsta hluta líkansins) lækkað um 2 bar í lagi 1 og um 3 bar í lagi 2. Hiti hefur ekki breytst í þeim lögum. Í lagi 3 sem samsvarar meginhluta jarðhitakerfisins hafa hins vegar orðið breytingar. Í um 300-400 m fjarlægð frá holunum hefur þrýstingur lækkað um 10 bar (106,1 bar) og suða í kerfinu er með um 28,5% gufumettun. Um 200-300 m fjær holunum hefur niðurdrátturinn minnkað og er um 8 bar ásamt því að suða er þar minni eða 2-5 % gufumettun. Enn fjær holunum er suða hætt og niðurdráttur minnkar. Skammt utan vinnslusvæðisins (innsta hluta líkansins) er niðurdrátturinn 4,4 bar (111,8 bar) og minnkar út til jaðrana í 2,9 bar (113,3 bar). Eins og áður hefur verið tekið fram eru jaðrar lags 3 lokaðir og því kemur fram niðurdráttur alls staðar í því lagi. Þessi skilyrði takmarka einnig afköst kerfisins og tryggja þannig að afkastamat líkansins er nærri lágmarksafköstum kerfisins. Í lok blásturssögunar hefur hiti víðast hvar ekki breytst í lagi 3, eða þar sem suða er ekki byrjuð. Við lok blásturssögunnar (áramótin 1992/93) gefa holur 11 og 12 samkvæmt líkaninu um 43,1 kg/s með vermi um 1930 kJ/kg. Þá gefur líkanið að hleðsla til lags 3 vegna niðurrrensli frá efri lögum þess sé um 8,7 kg/s eða um 20% af því sem tekið er úr kerfinu.

Áætluð hefur verið gufuþörf fyrir Kísiliðjuna og nýja 20 MW_e gufufarstöð sem staðsett yrði í Bjarnarflagi. Samanlagt er gufuþörfin áætluð um 55 kg/s af gufu sem yrði skilin við um 10 bar-a þrýsting (Landsvirkjun, 1993). Miðað við afköst hola 11 og 12 þyrfti minnst 3 nýjar borholur með sambærilega vinnslueiginleika til að fullnægja þessari gufuþörf. Þegar tillit er tekið til viðbragða jarðhitakerfisins gæti hins vegar þurft allt að 5 þannig holur. Könnuð voru viðbrögð reiknilíkansins ef vinnsla væri aukin skyndilega vegna tilkomu nýrrar virkjunar. Bætt var við fjórum holum í líkanið og voru tvær holur settar í bütana fyrir norðan og sunnan

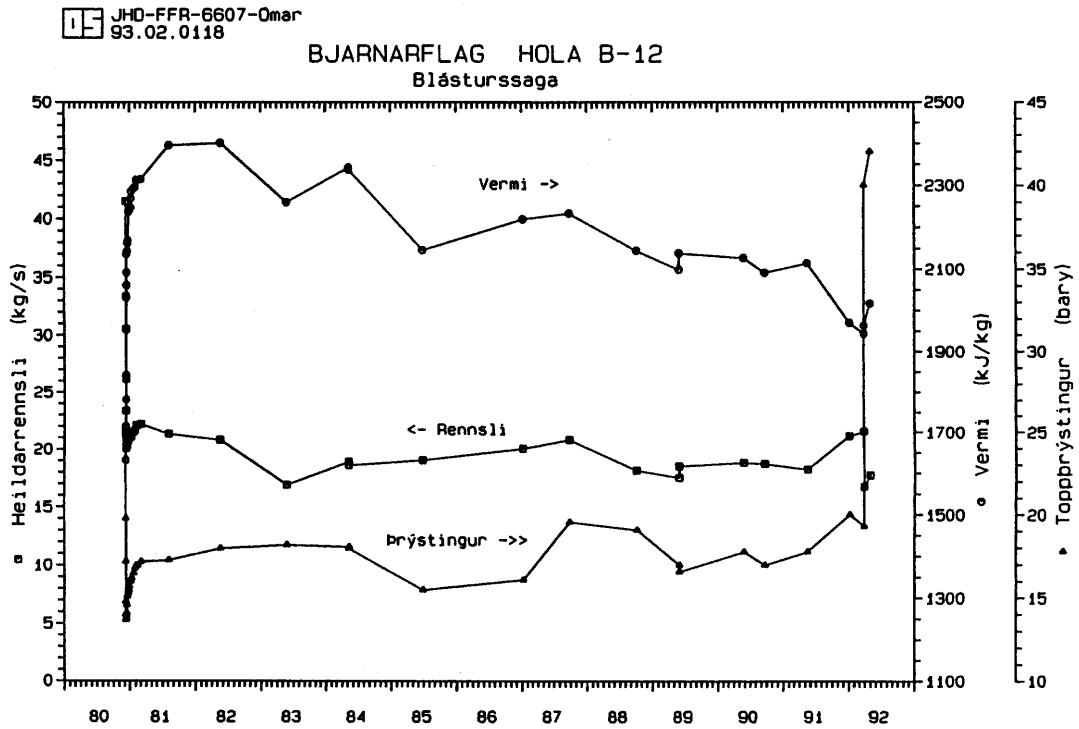
miðjubúttinn sem inniheldur holur 11 og 12 (mynd 25). Holurnar fjórar voru hafðar eins og gefnir meðaleiginleikar hola 11 og 12. Þannig voru þær látnar blása á móti 30 bar botnþrýstingi, sem tryggir holutoppþrýsting þeirra vel yfir 10 bar-a, og með vinnslustuðulinn $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3$. Líkanið var síðan keyrt í 30 ár frá lokum blásturssögu hola 11 og 12.

Myndir 30 til 33 sýna hvernig vinnslan úr holum 11 og 12 kæmi til með að breytast á spátímabilinu. Fyrsti hlutinn á myndunum er blásturssaga holanna ásamt nálgun líkansins eins og sýnt var á myndum 26 til 29. Þá sýna myndir 34 og 35 hvernig blásturssaga nýju holanna yrði á spátímabilinu. Fyrst eftir að vinnslan er aukin gefa holurnar yfir 120 kg/s og vermi nýju holanna fer í um 2750 kJ/kg eða þurra gufu. Minni breytingar verða í eldri holunum í fyrstu. Smásaman dregur úr rennsli holanna og vermi þeirra lækkar er niðurdrátturinn breiðist út í kerfið og aðstreymi af vatni með lægra vermi eykst. Undir lok spátímabilsins hefur þrýstingur í lagi 1 á vinnslusvæðinu lækkað um rúmlega 2,5 bar í viðbót við það sem var í upphafi tímabilsins eða alls um 4,8 bar. Í lagi 2 er þrýstinglækkunin þar orðin alls 7,1 bar. Utan vinnslusvæðisins dregur úr niðurdrættinum og er hann alls um 3 bar í lagi 1, en um 4,1 bar í lagi 2. Hiti hefur nær ekkert breytst í lagi 1, enda það lag tengt stórum veitum, en í lagi 2 hefur hiti hækkað innan vinnslusvæðisins um 22°C vegna uppstreymis gufu, en utan svæðisins hefur hiti lækkað um 2°C vegna niðurrennslis. Í lagi 3 hefur súða breiðst út um allt vinnslusvæðið og er gufumettunin þar á bilinu 43-48%. Rétt utan vinnslusvæðisins er súða við það að byrja, en utar er kerfið enn þá í vatnsfasa. Innan vinnslusvæðisins, í um 300-500 m fjarlægð frá holunum, hefur þrýstingur lækkað um alls 24,4 bar (91,8 bar) og hiti hefur einnig lækkað um allt að 12°C. Þessar breytingar eru sýndar á myndum 36 til 38. Utan vinnslusvæðisins hafa breytingar orðið minni, enda búturnir í líkaninu þar mjög stórir. Þar hefur þrýstingur í lagi 3 lækkað nokkuð jafnt út til jaðrana um rúm 7 bar, en hiti helst nær óbreyttur eða lækkar um 0,2°C. Undir lok spátímabilsins taka holurnar um 68 kg/s með vermi að jafnaði um 2240 kJ/kg. Þetta uppfyllir tæplega gufuhörfina, sem áður var skilgreind, svo undir lok spátímabilsins gæti þurft að bæta við fimmtu aukaholunni. Hleðsla til lags 3 vegna niðurrennslis frá efri lögum er undir lokin um 17,9 kg/s eða um 26 % af rennsli holanna.

Ofangreint líkan verður að teljast góð fyrsta nálgun fyrir viðbrögð jarðhitakerfisins í Bjarnarflagi við vinnslu. Líkanið tekur að nokkru tillit til niðurrennslis grunnvatns, eins og hitamælingar úr holunum og efnagreiningar sýna að er til staðar (Tole o.fl., 1993). Þá nær það að nálgá blásturssögu hola 11 og 12 á viðunandi hátt. Einnig eru notuð íhaldssöm randskilyrði sem virka takmarkandi fyrir kerfið, þannig að reikningar sýni frekar lágmarksafköst þess. Reikningar með líkaninu sýna að jarðhitakerfið í Bjarnarflagi getur auðveldlega staðið undir aukinni vinnslu til 30 ára, sem þarf fyrir 20 MW_e gufurafstöð.



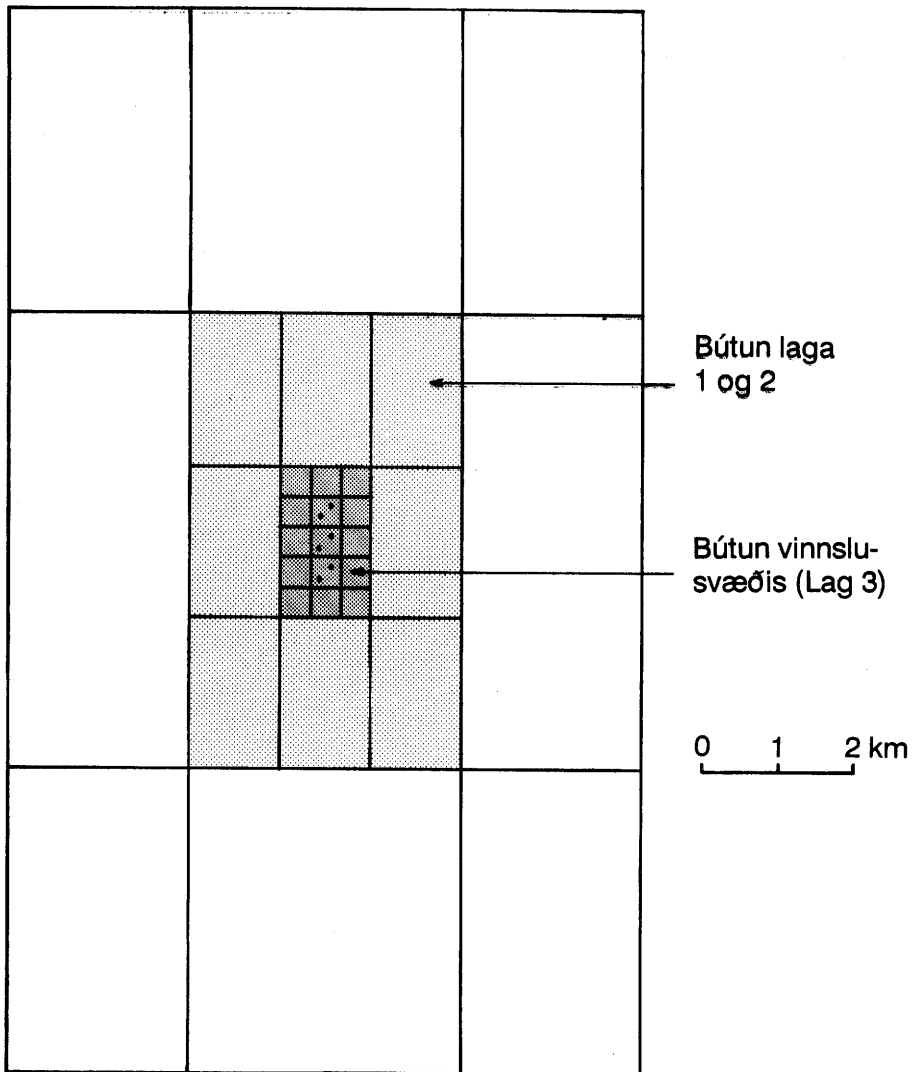
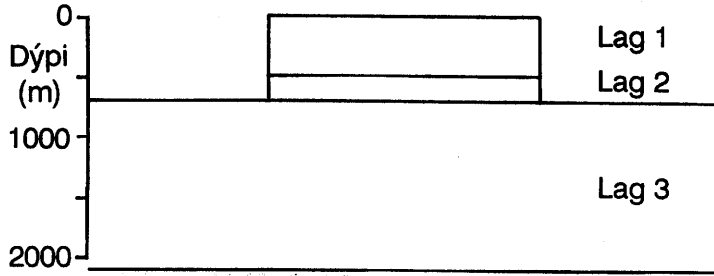
MYND 23. Blásturssaga holu B-11



MYND 24. Blásturssaga holu B-12

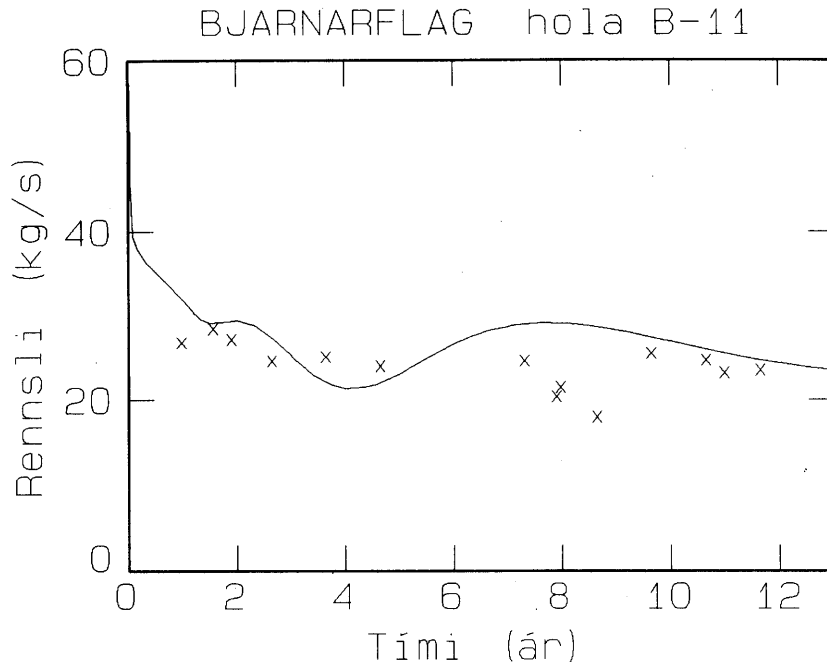
JHD FF 6607 Ómar
93.04.0146 ÓD

BÚTUN REIKNILÍKANS



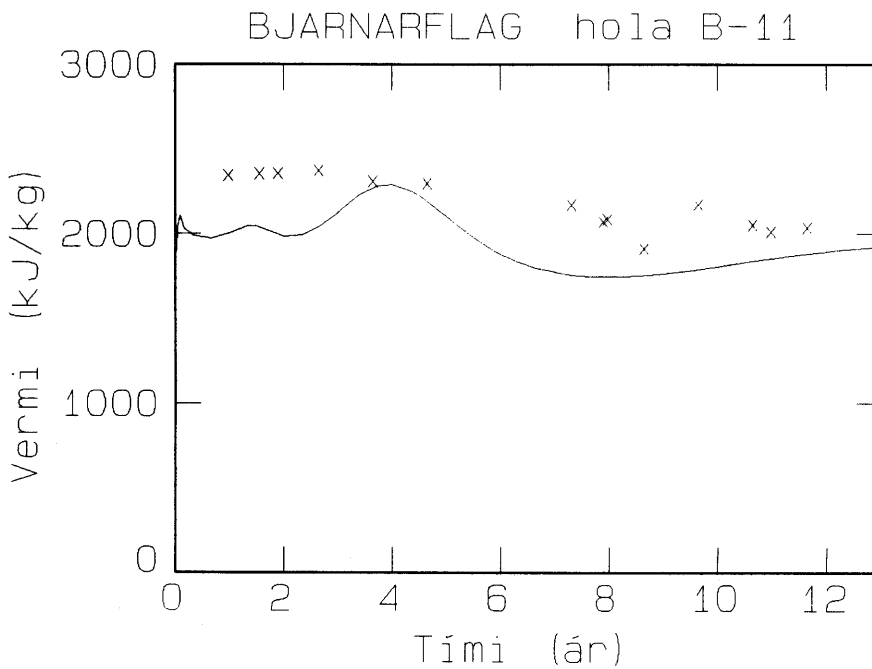
MYND 25. Lagskipting og bútun í þrívíða reiknilíkaninu. Innstu 15 smábútarnir samsvara vinnslusvæðinu í Bjarnarflagi

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0117/04 T



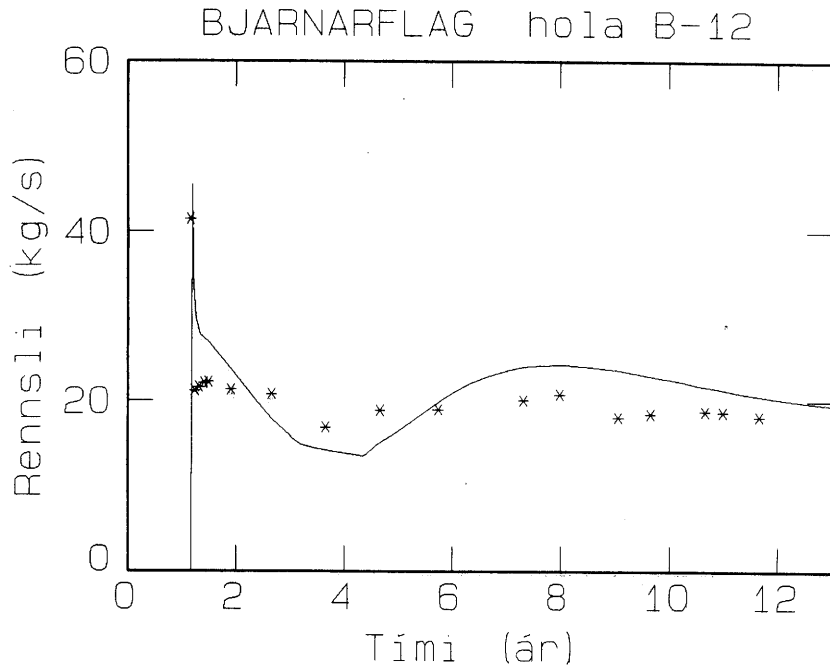
MYND 26. Nálgun reiknilíkans við mælt rennsli hola B-11 (x mælingar)

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0117/03 T



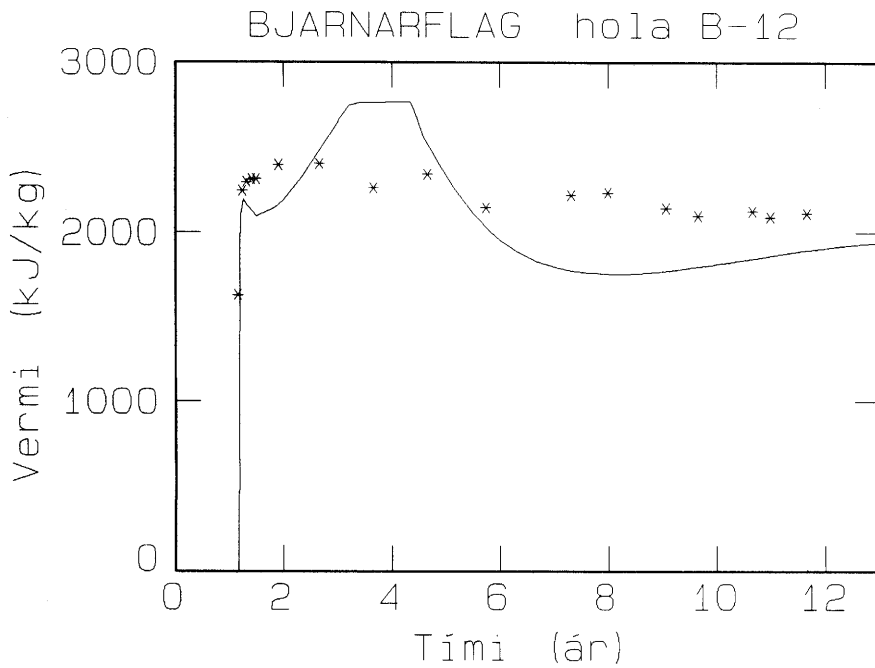
MYND 27. Nálgun reiknilíkans við mælt vermi hola B-11 (x mælingar)

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0118/02 T



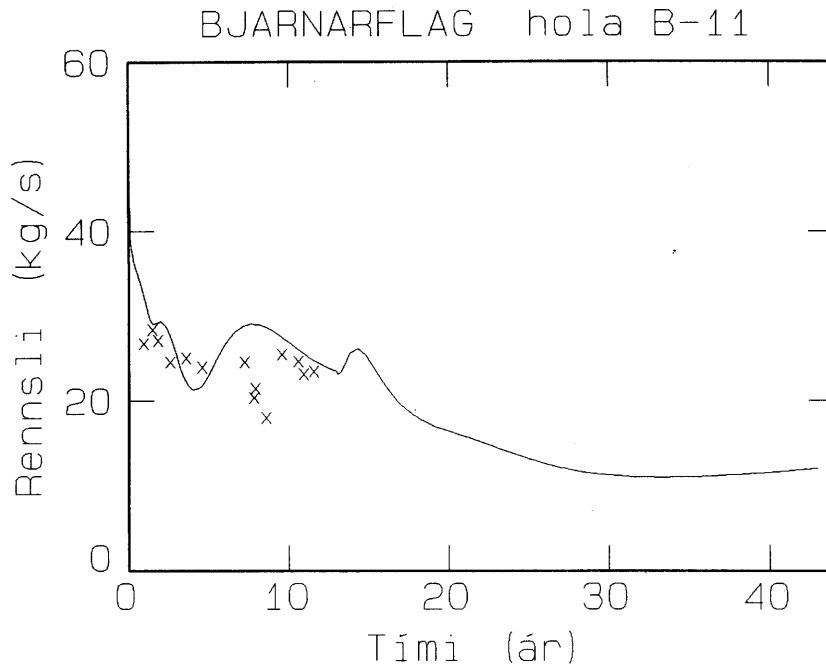
MYND 28. Nálgun reiknilíkans við mælt rennsli hola B-12 (* mælingar)

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0118/01 T



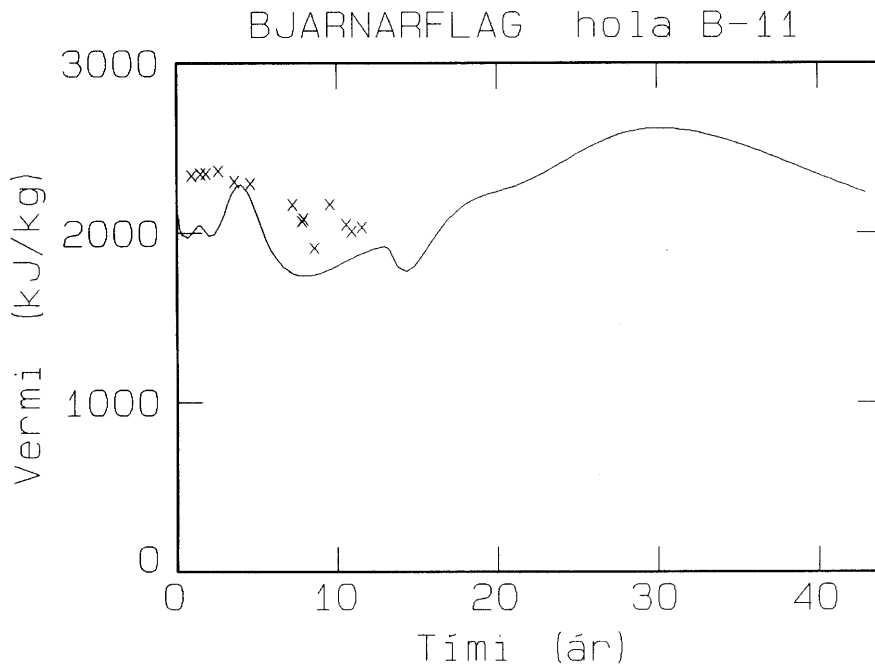
MYND 29. Nálgun reiknilíkans við mælt vermi hola B-12 (* mælingar)

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0117/02 T



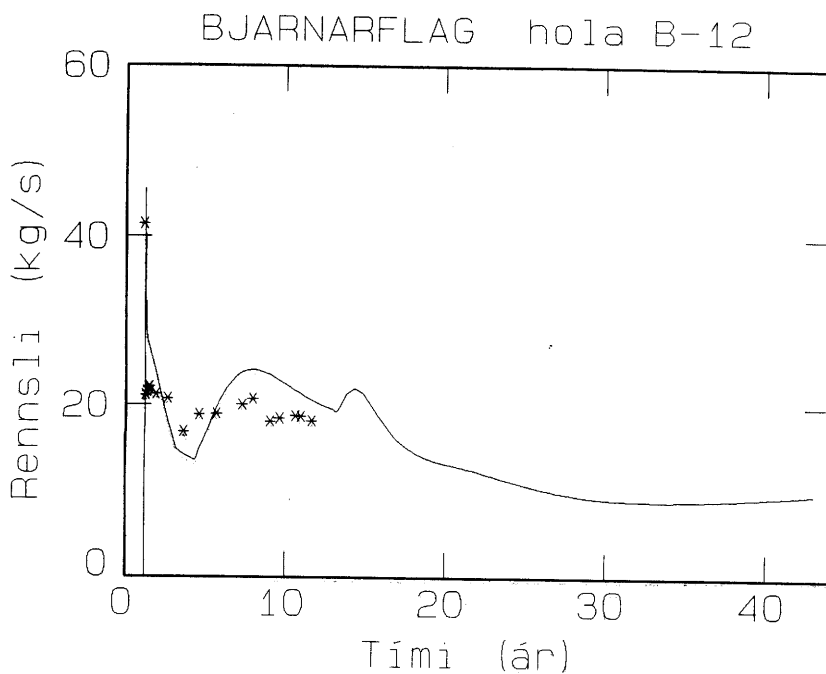
MYND 30. Reiknuð áhrif 20 MW_e virkjunar á rennsli holu B-11

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0117/01 T



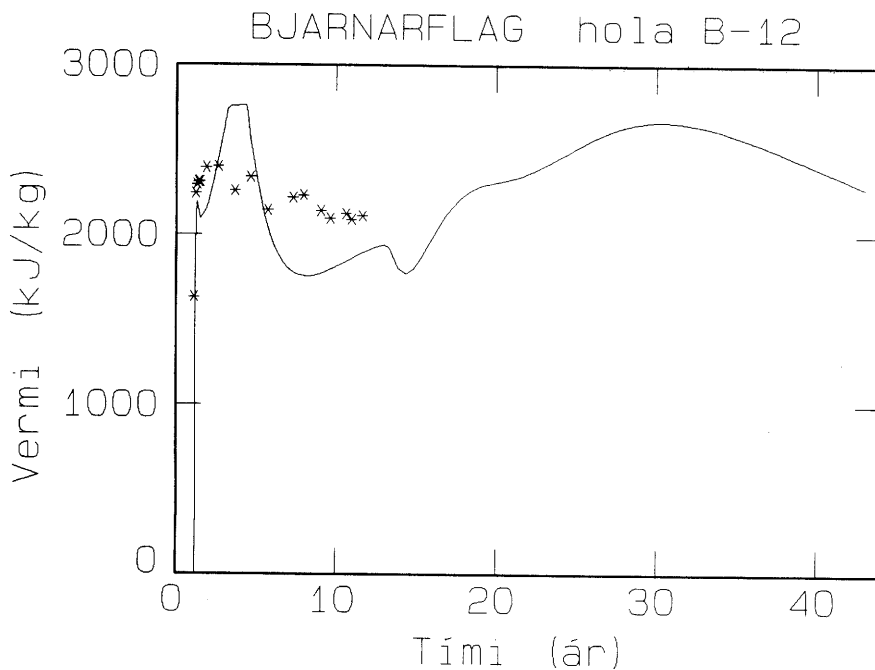
MYND 31. Reiknuð áhrif 20 MW_e virkjunar á vermi holu B-11

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0118/04 T



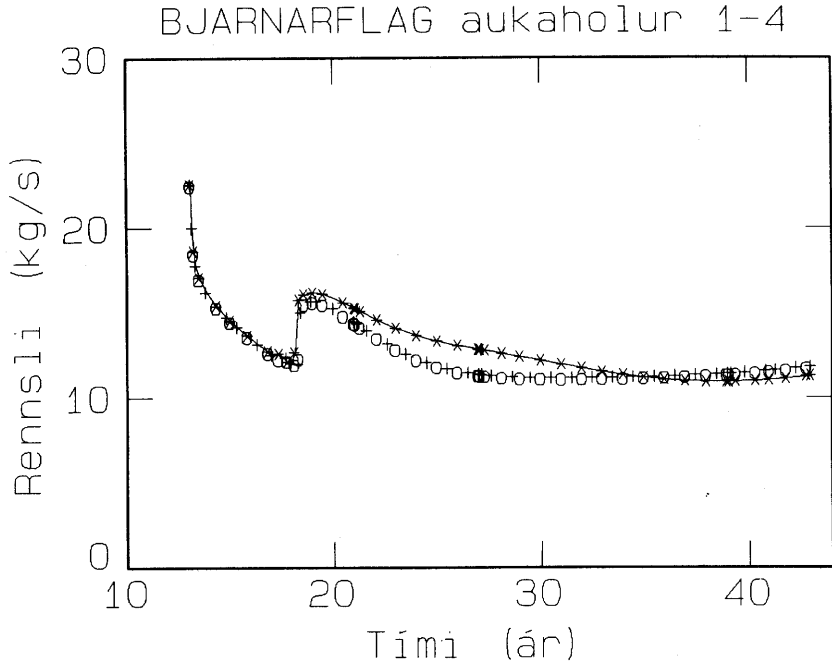
MYND 32. Reiknuð áhrif 20 MW_e virkjunar á rennsli holu B-12

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0118/03 T



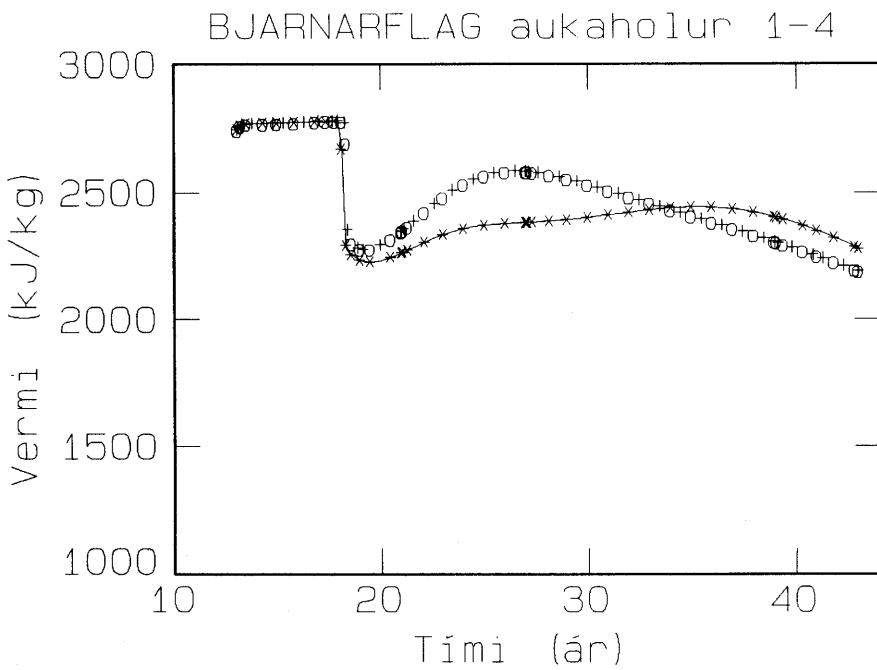
MYND 33. Reiknuð áhrif 20 MW_e virkjunar á vermi holu B-12

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0136 Ómar



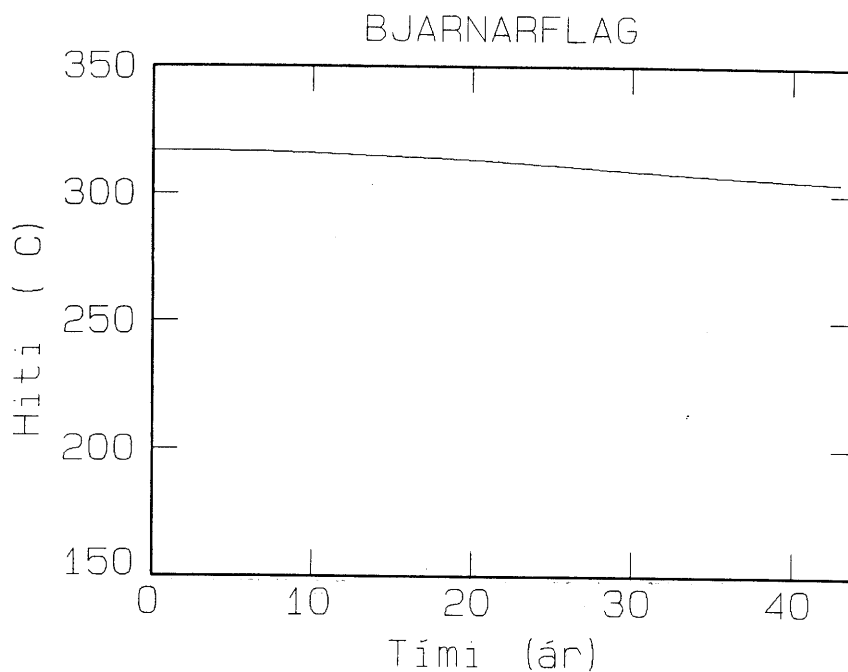
MYND 34. Reiknað rennsli úr 4 aukaholum vegna tilkomu 20 MW_e virkjunar

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0137 Ómar



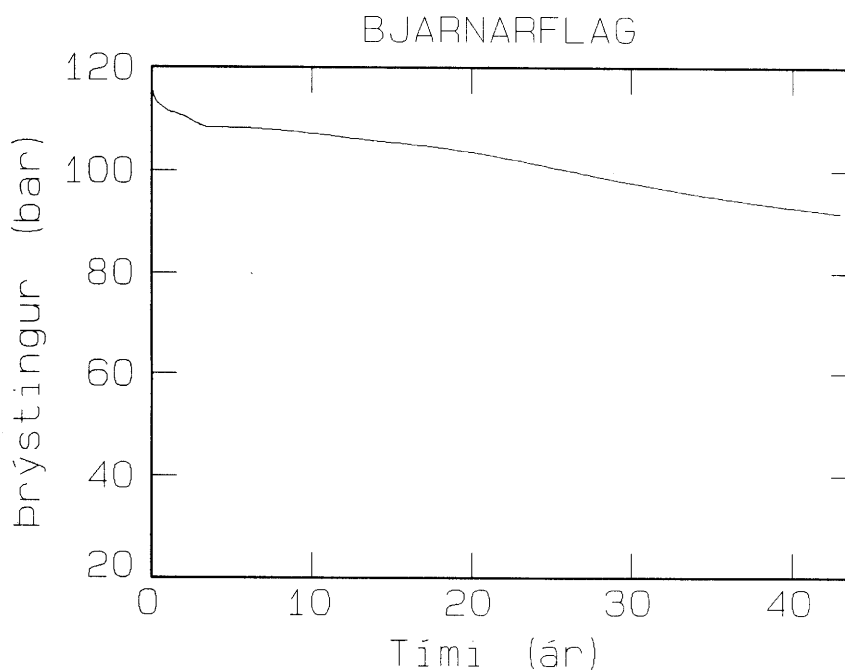
MYND 35. Reiknað vermi úr 4 aukaholum vegna tilkomu 20 MW_e virkjunar

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0133 Ómar



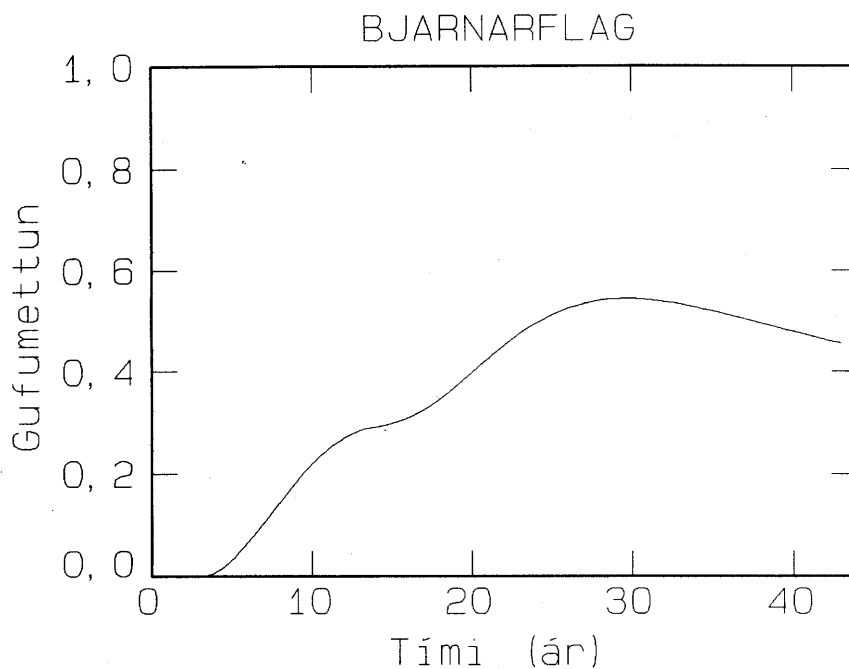
MYND 36. Áætlaðar hitabreytingar í vinnslusvæði Bjarnarflags yfir blásturssögu hola B-11 og B-12 og spátímabils virkjunar

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0135 Ómar



MYND 37. Áætlaðar þrýstingsbreytingar í vinnslusvæði Bjarnarflags yfir blásturssögu hola B-11 og B-12 og spátímabils virkjunar

JHD FF 6607 Ómar
93.03.0134 Ómar



MYND 38. Áætluð breyting suðu (gufumettun) í vinnslusvæði Bjarnarflags yfir blásturssögu hola B-11 og B-12 og spátímabils virkjunar

7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

- Nokkur óvissa er varðandi ákvörðun á hita á ákveðnu dýpi við borholur í Bjarnarflagi, þar sem tiltölulega fáar hitamælingar eru til úr holunum og þær flestar gerðar við truflandi aðstæður. Á ákveðnum stöðum í holunum getur óvissan því farið yfir 10°C, en almennt er reiknað með að hún sé um eða innan við 5°C.
- Á norðurhluta borsvæðisins er talið að hiti hafi fylgt nokkurn veginn suðumarksferli vatns niður á 400-700 m dýpi. Dýpra hækkar hiti hægar en suðumarksferillinn. Þá er hugsanlegur hitaviðsnúningur við holu 9 nyrst á borsvæðinu.
- Flestar holur inni á virka sprungusveimnum, sem afmarkast af Grjótagjá að vestan og Krummaskarði að austan, skemmdust í eldsumbrotunum 1977. Skemmdirnar í holunum geta fylgt skriðbroti sem getur hafa veitt grunnvatni niður í jarðhitakerfið. Efstu 400 m jarðhitakerfisins næst Krummaskarði hafa kólnað um tugi gráða eftir umbrotin. Vestar dýpkar á kælinguna og virðist hún að mestu bundin ákveðnu dýptarbili um skriðbrotið.
- Holur 11 og 12, sem boraðar eru eftir umbrotin og austan virka sprungusveimsins, eru tiltölulega kaldar niður á 450-600 m dýpi. Dýpra hækkar hiti og nálgast suðuferil á 900-1000 m dýpi. Hugsanlegur viðsnúningur er í hitaferli holu 11 neðan 1450 m dýpis.
- Hiti í jarðhitakerfinu neðan 700 m dýpis er á bilinu 260 til 320°C. Hæstur hiti virðist hafa verið í grennd við holu 8 og suður af henni. Einnig á tungu eða rennu sem teygir sig til austurs um holu 11.
- Ekki verður vart við marktækan niðurdrátt í jarðhitakerfinu frá upphafi vinnslu þegar lagt er mat á þrýsting í einstökum holum fyrir og eftir eldsumbrotin.
- Massataka úr jarðhitakerfi Bjarnarflags er um áramótin 1992-93 orðin um 46 milljónir tonna og nær vinnslusaga þess yfir um 30 ár.
- Rennsli og vermi hola 11 og 12 hafa dalað svipað að magni til í báðum holunum síðastliðin 12-13 ár. Ef gert er ráð fyrir að dölunin sé óháð holunum og stafi eingöngu af þrýstingslækkun og kólnun í jarðhitakerfinu þá fæst að þrýstingslækkunin getur mest hafa verið um 0,6 bar/ári og kólnunin um 0,5°C/ári.
- Líkan sem miðar við mestu þrýstingslækkun í jarðhitakerfinu og meðhöndlar það sem lokaðan tank sýnir að kerfið þarf að vera mjög stórt. Það ræðst svo af því hvernig kerfið lætur frá sér vökvann hvort stærð þess er um 5 km³ eða allt að 100 falt meiri.
- Einfalt þrívítt reiknilíkan, sem gert var af jarðhitakerfinu og hermir hita-, þrýstings- og ástandsþreyingar í því, nær að líkja eftir blásturssögu hola 11 og 12 á viðunandi hátt. Þegar líkanið er síðan notað til að spá fyrir um áhrif aukinnar vinnslu úr kerfinu, vegna tilkomu 20 MW_e virkjunar, sýnir það að jarðhitakerfið getur auðveldlega staðið undir þeirri vinnslu til næstu 30 ára.
- Fyrir viðbótarvinnslu handa 20 MW_e virkjun þarf 3-5 nýjar borholur með sambærilega vinnslueiginleika og holur 11 og 12 hafa. Fjöldi holanna ræðst að nokkru af randskilyrðum kerfisins.

8. HEIMILDIR

- Axel Björnsson, Grímur Björnsson, Ásgeir Gunnarsson og Gunnar Þorbergsson, 1985: Breytingar á landhæð við Kröflu 1974-1984. Orkustofnun OS-85019/JHD-05, 67s.
- Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Sæþór L. Jónsson og Sverrir Þórhallsson, 1989: Borholur í Bjarnarflagi. Orkustofnun OS-89046/JHD-21 B, 87s.
- Guðmundur Guðmundsson, Stefán Arnórsson og Jens Tómasson, 1965: Námafjall - jarðfræði, segulmælingar og borholusnið. Raforkumálastjóri/jarðhitadeild, 31s.
- Guðni Axelsson og Þórður Arason, 1992: LUMPFIT - Automated simulation of pressure changes in hydrological reservoirs. Version 3.1, user's guide. Copyright by Guðni Axelsson and Orkustofnun, 32s.
- Guðrún Larsen, Karl Grönvold og Sigurður Þórarinnsson, 1978: Volcanic eruption through a geothermal borehole at Námafjall, Iceland. Nordic Volcanological Institute 78-12 & Science Institute RH 78-10, 22s.
- Jarðvarmaveitur ríkisins - Ársreikningar 1981-1986. Í ársskýrslum Orkustofnunar fyrir árin 1981 til 1986.
- Jarðvarmaspá 1987-2015. Spá um vinnslu og notkun jarðvarma. Unnið af Orkuspárnefnd 1987. Orkustofnun OS-87045/OBD-01, 178s.
- Kristján Sæmundsson, Guðmundur Guðmundsson, Guðmundur Pálmason, Karl Grönvold, Karl Ragnars og Stefán Arnórsson, 1971: Námafjall - Krafla. Áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðanna. Orkustofnun/JHD, 114s.
- Landsvirkjun, 1993: Jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi. Frumáætlun. Áfangaskýrsla gerð af Verkfræðistofu Guðmundar og Kristjáns hf, 31s.
- Orkumál nr. 20-35. Ritstjóri Rútur Halldórsson. Tölulegar upplýsingar um raforkuvinnslu og aðra orkunotkun á Íslandi. Tekið saman og gefið út af Orkustofnun á árunum 1970-1985.
- Pruess, K., 1986: TOUGH User's guide. LBL-20700, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California, U.S.A. 85s.
- Tole, M.P., H. Ármannsson, P. Zhong-he and S. Arnórsson, 1993: Fluid/mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry. Geothermics, 22 (in press)