



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**Ummyndunarhiti jarðhitakerfisins  
í Bjarnarflagi**

Samvinnuverkefni Landsvirkjunar og Orkustofnunar

Ásgrímur Guðmundsson

OS-93065/JHD-31 B

Nóvember 1993



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 720 104

## **Ummyndunarhiti jarðhitakerfisins í Bjarnarflagi**

**Samvinnuverkefni Landsvirkjunar og Orkustofnunar**

**Ásgrímur Guðmundsson**

OS-93065/JHD-31 B

Nóvember 1993

## EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	2
2. UMMYNDUNARHITI	5
3. UMMYNDUN VIÐ HOLU B-9	6
4. UMMYNDUN VIÐ HOLU BG-10	8
5. UMMYNDUN VIÐ HOLU B-6	10
6. UMMYNDUN VIÐ HOLU BJ-11	11
7. UMMYNDUN VIÐ HOLU B-2	14
8. UMMYNDUN VIÐ HOLU BJ-12	14
9. UMMYNDUNARHITI Í BJARNARFLAGI	16
10. HELSU NIÐURSTÖÐUR HEIMILDIR	20 21

## MYNDASKRÁ

1. Afstöðumynd af borholum í Bjarnarflagi	4
2. Ummyndun við holu B-9	7
3. Ummyndun við holu BG-10	9
4. Ummyndun við holu B-6	11
5. Ummyndun við holu BJ-11	13
6. Ummyndun við holu BJ-12	15
7. Bjarnarflag - hitaþversnið byggt á ummyndun	18

## TÖFLUSKRÁ

1. Hitanæmar steindir	5
2. Hitadreifing við holur í Bjarnarflagi byggð á ummyndun	19

## 1. INNGANGUR

Árið 1992 var stofnað til samvinnu milli orkufyrirtækja, sem framleiða raforku úr jarðvarma, og Orkustofnunar. Eitt þeirra verkefna sem varð til í því samstarfi var hagkvæmniathugun á 20 MW jarðgufustöð í Bjarnarflagi. Þetta tiltekna verkefni var sérstakt samvinnuverk Landvirkjunar og Orkustofnunar. Aðilar komu sér saman um að hefja verkið með gerð frumáætlunar, sem lokið var við í lok árs 1992 (Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns 1993). Niðurstöður úttektarinnar voru það jákvæðar að ástæða þótti til að leggja út í frekari undirbúningsvinnu. Einn þeirra þátta, sem skoða þurfti nánar, er jarðfræðileg uppbygging og ummyndun í jarðhitakerfinu. Hér á eftir verður fjallað sérstaklega um hvaða hita megi búast við í jarðhitakerfinu útfrá athugunum á ummyndun.

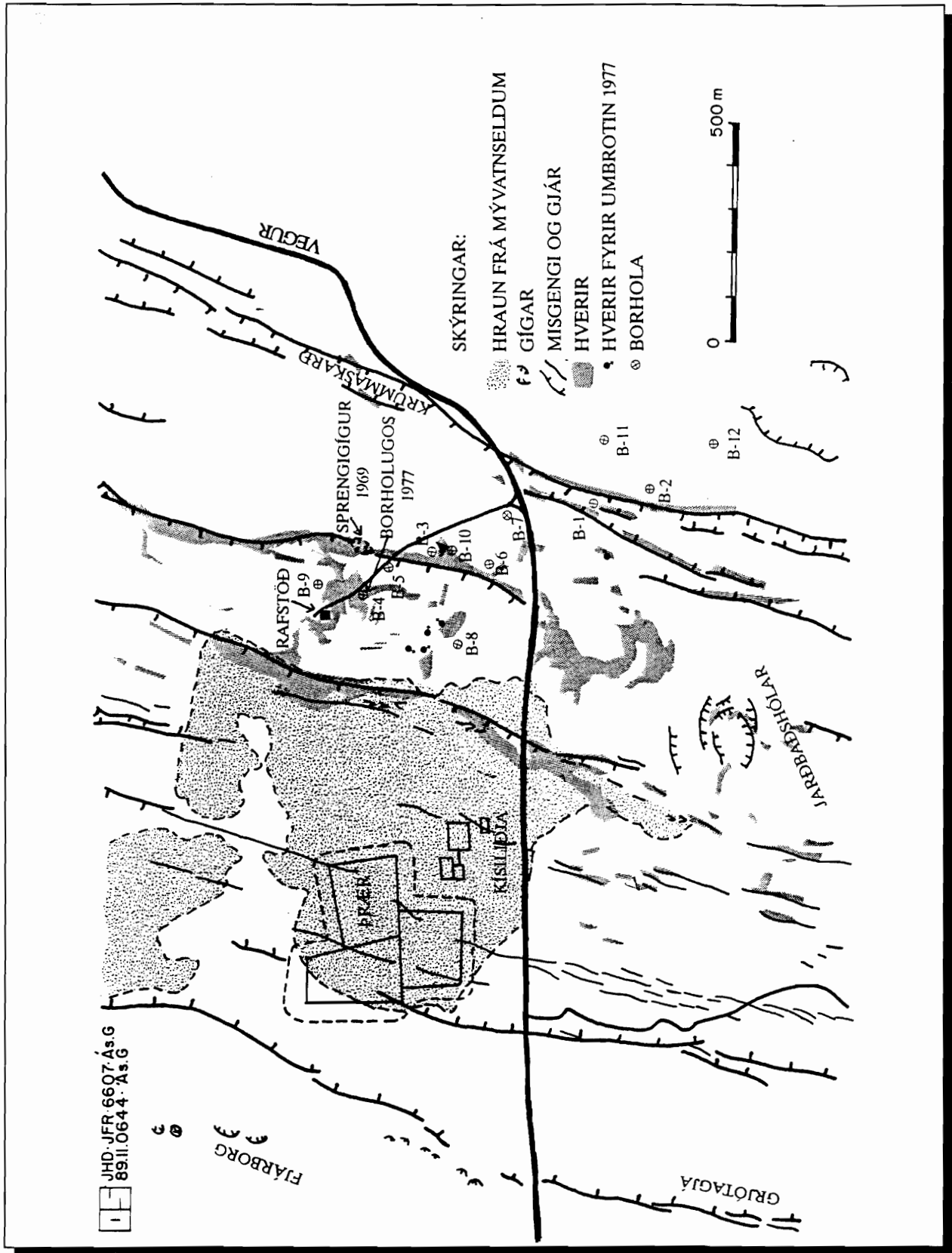
Boranir hófust í Bjarnarflagi árið 1963 og voru boraðar með hléum 12 holur fram til 1980 (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1989). Úrvinnsla úr borholugögnum var af frekar skornum skammti og liggur fyrir allmikið af gögnum, sem ekki hefur enn verið unnið úr. Árið 1971 var gefin út áfangaskýrsla eða eins konar stöðuskýrsla um rannsóknir jarðhitasvæðanna í Kröflu og Námafjalli (Kristján Sæmundsson o.fl. 1971). Þar voru tíundaðar rannsóknir fram til þess tíma eins og úrvinnslu var háttáð í þá daga. Mikið vatn hefur runnið til sjávar síðan þá og mikil þróun hefur átt sér stað á öllum sviðum jarðhitarannsókna og á það ekki síst við rannsóknir á borholusvarfi og úrvinnslu gagna sem safnað er meðan á borun stendur. Í tengslum við Kröflueldu hefur all mikið verið skrifað um áhrif umbrotanna á yfirborði jarðar, en lítið verið fjallað um áhrif þeirra á sjálft jarðhitakerfið í Bjarnarflagi. Áhrif umbotanna voru þó umtalsverð enda voru allar holurnar nema hola 2 boraðar á sprungureininni, sem megin landhreifingarnar áttu sér stað á, og voru þess valdandi að flestar holurnar skemmdust eða döludu í afli. Í þá daga voru Jarðvarmaveitur ríkisins skuldbundnar til þess að sjá Kísiliðjunni h.f. fyrir nægjanlegri gufu. Til að standa við þá samninga voru tvær holur boraðar á árunum 1979 og 1980 austan við Krummaskarðssprunguna, sem markaði austurjaðar umbrotabeltisins.

Eins og gefur að skilja er til allmikið að jarðfræðigögnum úr 12 borholum í Bjarnarflagi. Úrvinnsla gagnanna er hins vegar stutt á veg komin og lítið verið birt um þá vinnu. Þess í stað var algengast að gögnin væru á formi teikninga eða nánast óunnin. Óhjákvæmilegt er að gera þar bragabót á og þurfti því að vinna betur úr hluta gagnanna til þess að markmið þessa verkefnis skiluðu sér. Nauðsynlegt reyndist að auka við leirsteindagreiningar með XRD-aðferð og voru valin milli 50 og 60 sýni til viðbótar. Að öðru leyti var stuðst við eldri leirsteindagreiningar og skoðaðar voru á annað hundrað þunnsneiðar. Það er mikil vinna að skoða ummyndun úr 12 borholum, því var tekin sú stefna að velja til að byrja með holur sem gætu gefið nokkuð góða heildarmynd af núverandi borsvæði og nóg er til af upplýsingum um. Fyrir valinu urðu B-9, B-6, BG-10, BJ-11, B-2 og BJ-12, og eru þær taldir frá norðri til suðurs eins og þær koma fyrir á þversniði, en lega sniðsins er sýnd á mynd 1. Svo heppilega vill til að holurnar liggja á sniði sem skásker Krummaskarðssprunguna. Það gefur því bæði upplýsingar utan og innan virka Kröflueldasvæðisins á sniði sem spannar um 1200 m, með stefnu því sem næst NNV-SSA.

Berggrunnurinn hefur að geyma samfellda jarðsögu. Mikilvægt er að gera sér grein fyrir hvernig sagan er skráð og hvernig best er að lesa hana. Stór hluti sögunnar fjallar um hita og hitabreytingar jarðhitakerfisins og er skráður í ummynduninni. Ummyndunarrannsóknir fela í sér

yfirgripsmiklar athuganir. Þar er um að ræða greiningu steinda, efnasamsetningu þeirra, mat á steindasamfélögum og þróun steindasamfélaga, svo eitthvað sé nefnt. Síðan má draga vissar ályktanir í ljósi þekkingar og reynslu. Markmiðið með skoðun ummyndunarinnar var fyrst og fremst athugun á hitaástandi með tilliti til dreifingar ummyndunarsteinda. Þessi hluti verksins tekur því aðallega yfir þann þátt. Í lok umfjöllunar um hverja holu um sig eru niðurstöður bornar saman við áætlaðan berghita út frá hitamælingum (Ómar Sigurðsson 1993).

Í næsta hluta þessa verkþáttar verður jarðlagastaflinn skoðaður m.a. með hliðsjón af ummyndun til að útskýra mun sambærilegara jarðlaga, sem finnast á mismunandi dýpi, og til að meta vatnsleiðni. Hér á eftir verður fjallað um hverja holu fyrir sig og lagt mat á hitaástand í næsta nágrenni hennar og að lokum er lagt mat á hitabreytingar í öllu svæðinu út frá undangenginni skoðun. Á mynd 1 er sýnd staðsetning borhola ásamt helstu jarðfræðilegum yfirborðsummerkjum.



Mynd 1. Afstöðumynd af borholum í Bjarnarflagi.

## 2. UMMYNDUNARHITI

Hér á eftir verður reynt að leggja mat á hitaástand svæðisins eins og það var um það leyti sem holurnar voru boraðar, og eru notaðar við það reynslutölur frá athugunum af öðrum háhitasvæðum hér á landi. Gögn þar að lútandi hafa birst í fjölmörgum skýrslum og greinargerðum Orkustofnunar. Einnig hafa verið birtar greinar þar um og fjallað um í erindum á ráðstefnum (Kristmannsdóttir, H. 1979 og Steingrímsson, B. et al. 1989). Í töflu 1 eru sýndar hitaháðar steindir sem ákvarðanir á ummyndunarhita byggja á. Öll gögn sem notuð eru við þessa skoðun nú eru frá þeim tíma er viðkomandi holur voru boraðar. Þar af leiðandi er ekki hægt að leggja mat á það hver áhrif umbrotanna 1977 hafi verið á jarðhitakerfið nema með samanburði á holum fyrir og eftir umbrot. Vafasamt verður að teljast hvort slíkur samanburður sé raunhæfur. Fleiri þætti þarf að skoða um leið eins og t. d. afstöðu hola til misgengja og sprungna á yfirborði.

Tafla 1. Hitanæmar steindir

Steindir	min °C	max °C
Ýmsir zeólítar		~150
Lámontít	~100	~180
Kvars	~180	
Smektít	< 100	~200
Wairakit	~200	
Blandlag	~200	220-230
Klórít	~230	> 300
Prenít	~230	
Epidót	230-250	> 300
Wollastónít	260-280	
Aktínólít	~280	> 300
Kalsít		280-300

Ummyndun og berg var skoðað í þunnsneiðum, sem voru gerðar skömmu eftir borun holanna. Berggerð og ummyndun frumsteinda var skoðuð jafnframt því sem sekúnderar ummyndunarsteindir voru greindar. Reynt var að meta innbyrðisafstöðu steindanna til að sjá þróunina í jarðhitakerfinu og hvaða steindir væru ráðandi í viðkomandi þunnsneiðum. Yfirleitt eru steindaákvarðanir nokkuð ábyggilegar í þunnsneiðum, en ákveðin óvissa kemur oft fram við ákvörðun á leirsteindum. Svarfið úr holunum hefur verið varðveitt þannig að hægt var að bæta við nauðsynlegum athugunum og var gripið til þess ráðs að greina leirsýni með XRD-aðferð til þess að bæta og fylla upp í myndina.

Hefðbundin úrvinnsla ummyndunargagna hefur byggst á því, að flokka steindir niður í samfélög, sem mynda ákveðin ummyndunarbelti, t.d. mynda smektít og zeólítar samnefnt belt sem gefur til kynna að hiti hafi ekki farið yfir 200 °C. Í umfjöllun um hverja holu er aftur á móti gefin upp

hitabil sem viðkomandi steindir standa fyrir. Í samantekt í lokin er hin hefðbundna framsetning valin þegar holurnar eru bornar saman og hitadreifing samkvæmt ummyndun skoðuð í sniði yfir svæðið.

Í seinni tíð eða frá 1976 hefur borsvarf verið greint á borstað í flest öllum háhitaholum og eru til ítarleg gögn þar um. Holur BJ-11 og BJ-12 falla undir þennan flokk hola og var aðallega stuðst við svarflýsingar úr holu BJ-12, þar sem þunnsneiðar voru ekki til.

### 3. UMMYNDUN VIÐ HOLU B-9

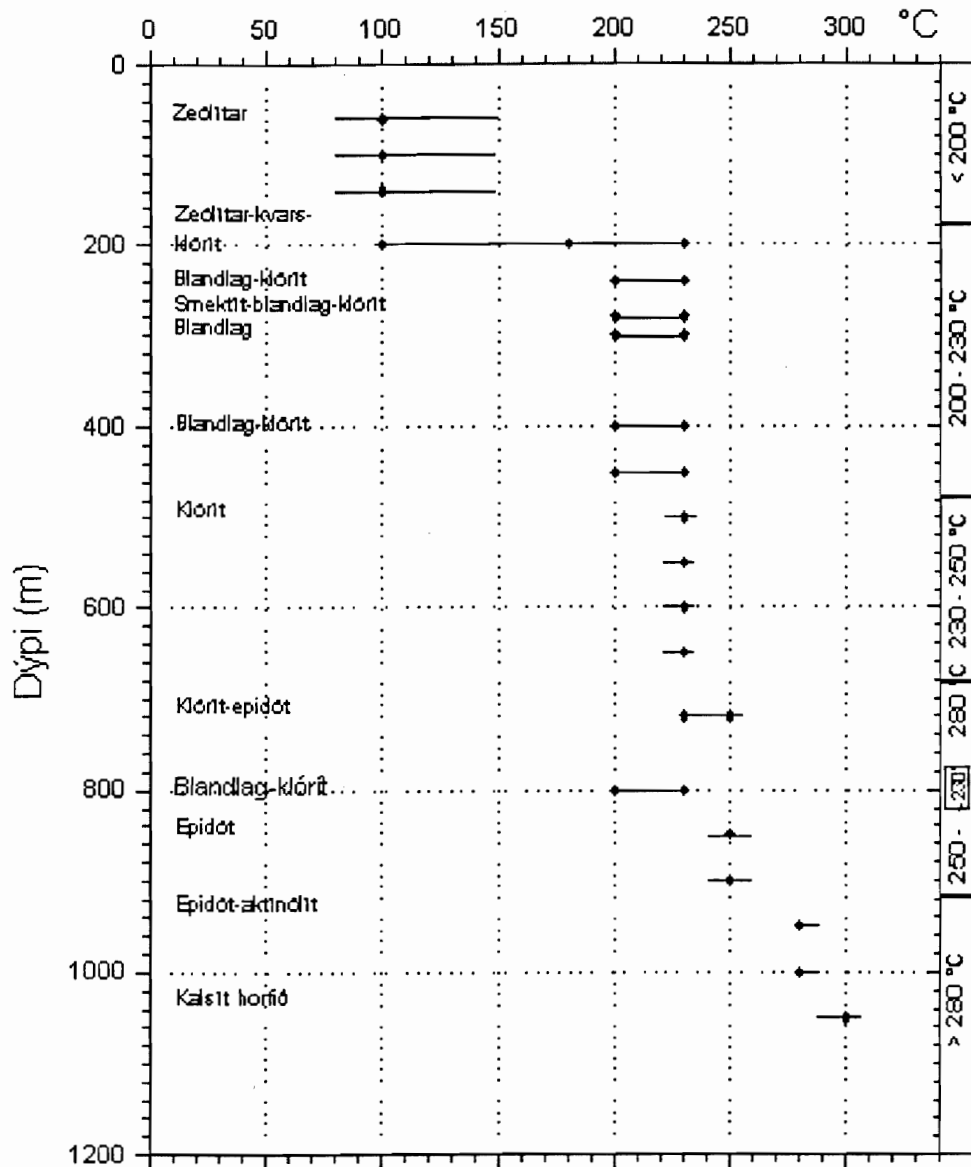
Hola B-9 er nyrst þeirra hola sem hér eru til umfjöllunar. Hún er skammt austan við rafstöðina í Bjarnarflagi. Hún var boruð með Norðurbor niður á 1312 m dýpi undir haust 1970. Helstu æðar samkvæmt skoltöpum voru á 481 m (3 l/s), 648 m (8 l/s) og algjört skoltap á 1175 m dýpi. Leiðari var settur í holuna, en hann náði aðeins niður á 819 m dýpi og er sennilegt að holan hafi hrunið þar fyrir neðan. Aðalæðin, sem talin er hafa verið á 1175 m dýpi, hefur þá væntanlega tekið lítinn þátt í stuttri blásturssögu holunnar.

Berg og ummyndun var skoðað í 28 þunnsneiðum, sem voru útbúnar skömmu eftir að borun holunnar lauk, og voru því nokkuð komnar til ára sinna en reyndust ágætlega nothæfar. Berggerð og ummyndun frumsteinda var skoðuð jafnframt því sem sekúnderar ummyndunarsteindir voru greindar. Reynt var að meta innbyrðis afstöðu steindanna til að sjá þróunina í jarðhitakerfinu og hvaða steindir væru ráðandi í viðkomandi þunnsneiðum. Yfirleitt eru steindaákvörðanir nokkuð ábyggilegar í þunnsneiðum, en þar er oftast ákveðin óvissa varðandi greiningu leirsteinda. Því var gripið til þess ráðs að greina með XRD-aðferð 14 leirsýni til þess að bæta og fylla upp í myndina. Niðurstöður athugana úr holu B-9 eru sýndar á myndum 2 og 7. Mynd 2 sýnir hvernig áætla má hitaástand í kerfinu útfrá dreifingu hitaháðra steinda. Eðlileg er ákveðin óvissa, þegar ekki er um beinar mælingar að ræða. Mesta óvissan er í efstu 200 metrunum þar sem zeólítar (geislasteindir) eru ráðandi ásamt leirsteindinni smektít. Aftur á móti virðist hitamatið verða nákvæmara strax á 240 m dýpi og niður eins og holan leyfir.

Í efstu 200 m hefur hitinn ekki farið yfir 200 °C eins og tilvist zeólíta á því svæði gefur ótvírætt til kynna, auk þess sem leirgreiningar styðja það enn frekar. Á 180-200 m dýpi verður snögg hitahækkun þar sem kvars og klórít sjást með zeólítunum. Röðun steindanna í sprungum gefur til kynna að kvars og klórít komi á eftir zeólítunum og benda því til þess að hitinn sé kominn yfir 180°C. Annað mikilvægt sem sést er að hiti hefur ekki farið upp fyrir 180 °C ofan 180 m dýpis. Blandlagsleir og klórít eru síðan ráðandi niður á um 450-500 dýpi en með einni undantekningu. Á 260 m dýpi sést smektít með blandlagi og klóríti og er þá um leið vísbending um að þar hafi átt sér stað kólnun eitthvað niður fyrir 200 °C. Ef til vill er eðlilegra að gera ráð fyrir hitasveiflum í bergmassanum, sem er að hitna upp og upphitunin sé ójöfn í ósamleitu efni.

Engar röntgengreiningar eru til á dýptarbilinu frá 440 m dýpi niður á rúmlega 900 m dýpi. Þunnsneiðaathuganir gefa til kynna klórít eins langt niður og séð verður. Á rúmlega 700 m dýpi sést epidót og kemur það ekki fyrir eins ofarlega í neinni af þeim holum sem hér eru til umfjöllunar. Epidót gefur til kynna hita vel yfir 230 °C og jafnvel yfir 250 °C, en reynslan hefur





Mynd 2. Ummyndun við holu B-9.

sýnt, að þegar epidót er orðin ráðandi ummyndunarsteind þá er hitinn kominn yfir 250 °C. Á um 800 m sést blandlag á ný með klórítinu, en epidót er þar ekki til staðar. Það verður að teljast marktæk vísbending um kólnun í allt að 200 °C. Þar neðan við eru vísbendingar um öra hitnun með innkomu aktínólíts á rúmlega 900 m dýpi og fjarveru kalsíts neðan 1000 m dýpis. Það gefur til kynna að suðumarksferli sé náð á um 1000 m.

Ef ofangreind lýsing er borin saman við áætlun á berghita útfrá hitamæligildum úr holunni (Ómar Sigurðsson 1993) þá kemur í ljós gott samræmi í megin atriðum. Í fyrstu fylgir hiti suðumarksferli niður undir 450 m en þar fyrir neðan er hiti stöðugur eða jafnvel viðsnúinn. Neðan við 900 m gerir berghitaáætlunin ráð fyrir að hiti fari líklega hækkandi með dýpi. Ummyndunarhitinn sér aftur á móti öra hækkun frá 800 m til 1000 m dýpis og ýtir þar með undir að hiti fari þar hækkandi.

### 3. UMMYNDUNARHITI HOLU BG-10

Hola BG-10 var boruð með Dofra (Gufubor) niður á 1809 m dýpi í lok árs 1975. Hún er 250 -300 m sunnan við B-9 (mynd 1). Helstu æðar samkvæmt skoltöpum voru á 700 m (8 l/s), á 919 m (aukning í 11 l/s). og á 1467 m dýpi (algjört skoltap, trúlega 30-40 l/s). Holan var aflmikil til að byrja með en eftir umbrotahrinurnar 1977 dró verulega úr afköstum og lognaðist hún að lokum út af. Eftir tilraunir til viðgerðar 1980 var ljóst að holan var ónýt.

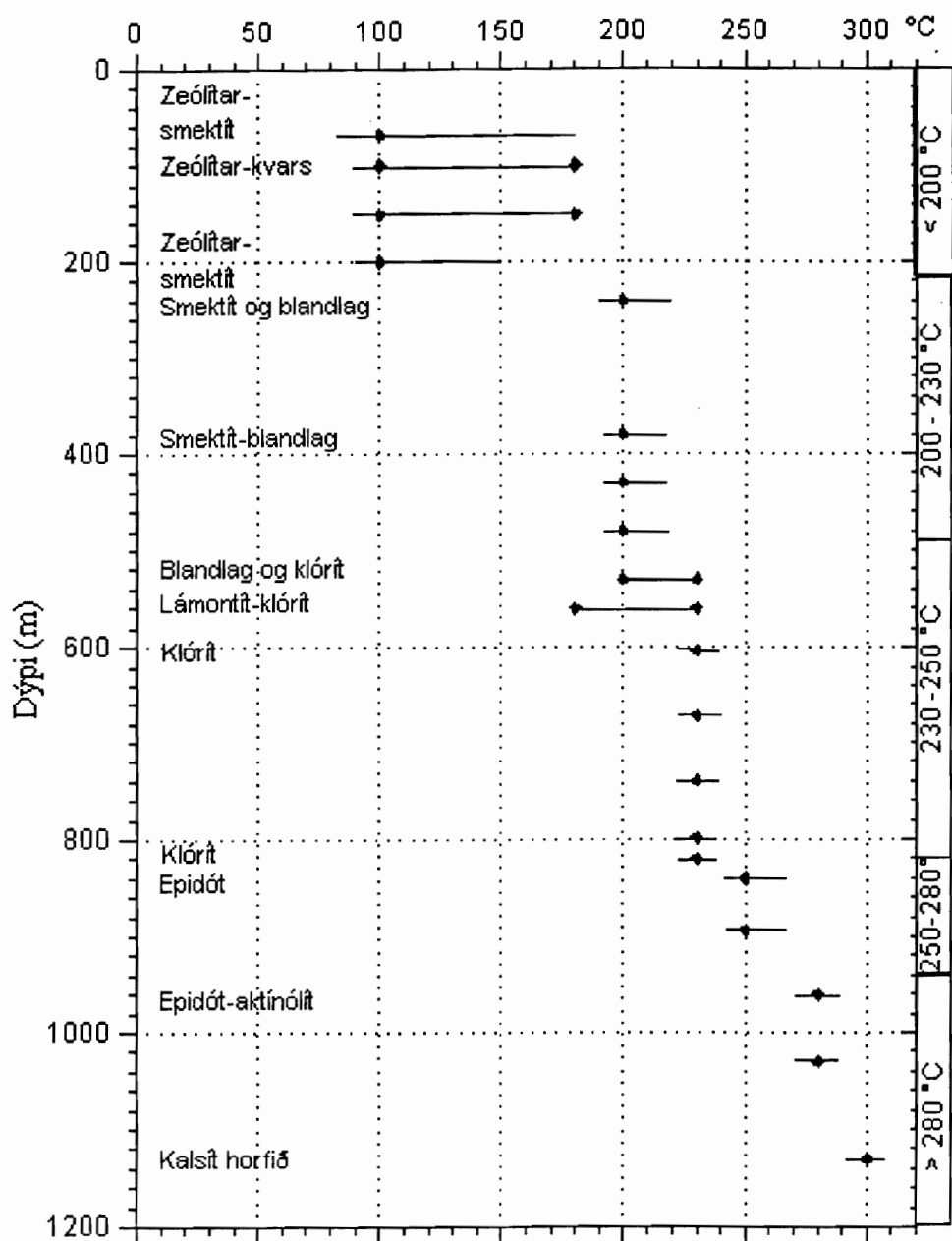
Niðurstöður athugana byggja á greiningu 27 þunnsneiða og fjölda röntgengreininga, bæði af leir og öðrum steindum. Engar þunnsneiðar voru til ofan 840 m dýpis en þess í stað 19 XRD-steindagreiningar og 15 XRD-leirgreiningar. Mikill ókostur er að hafa ekki þunnsneiðar úr efstu 800 metrunum til þess að geta kannað innbyrðis afstöðu steindanna og þá um leið þróun jarðhitakerfisins. Aftur á móti koma fram nokkuð skörp skil með dýpi í dreifingu ummyndunarsteindanna, sem gefa ekki til kynna neinar meiriháttar hitasveiflur í jarðhitakerfinu. Mynd 3 sýnir ummyndunarhita í holu BG-10 og mynd 7 sýnir ummyndunarbeltin.

Zeólítar og leirsteindin smektít eru einkennandi niður á rúmlega 200 m dýpi og gefa þar með til kynna hita undir 180-200 °C. Kvars sést á tveimur stöðum, þ.e. á 100 og 150 m dýpi, og þar af leiðandi hefur hiti náð eða farið yfir 180 °C en ekki náð 200 °C. Lámontít sést í næsta sýni neðan við 150 m, eða á um 200 m dýpi. Samkvæmt því virðist kólna þar lítilega, en lámontít sést oft með kvasi þegar það síðarnefnda er að myndast. Það getur þar af leiðandi bent til lítilla hitabreytinga.

Á um 230 m dýpi sést blandlagsleir og á sama dýpi hverfa zeólítarnir. Niður á 530 m dýpi eru leirsteindirnar smektít og blandlag einkennandi. Það gefur til kynna hita um eða yfir 200 °C en örugglega undir 230 °C. Klórít sést fyrst á 530 m dýpi og heldur síðan áfram niður alla holuna. Blandlag og klórít saman gefa til kynna hita á bilinu 220-230 °C, en tilvera lámontíts á um 560 - 610 m dýpi bendir til kólnunar, þ.e. hita á bilinu 180 - 230 °C. Aftur á móti sjást þar hvorki smektít né blandlag og er það vísbending um að lámontítið geti verið leif frekar en steind í hitajafnvægi á tilteknu dýpi.

Neðan 620 m dýpis má telja nokkuð víst að hiti sé um eða yfir 230 °C og engin sjáanleg kæling þar fyrir neðan. Þegar komið er niður á 850 m sést epidót sem ráðandi ummyndunarsteind og er

BJARNARFLAG  
UMMYNDUNARHITI BG-10



Mynd 3. Ummýndunarhiti við holu BG-10.

Það haldgóð staðfesting á því hiti hafi náð 250 °C. Næsta kennileiti er aktínólít á 960 m dýpi og er þá væntanlega komið í hita um eða yfir 280 °C. Að síðustu ber að geta þess að kalsít er svo til horfið á rúmlega 1000 m dýpi. Það er túlkað á þann veg að hiti sé kominn á suðumarksferil, sem er á þessu dýpi tæpar 300 °C og virðist fylgja þeim ferli eins langt niður og sést. Mynd 3 sýnir hita byggðan á ummyndun aðeins niður á 1200 m dýpi þrátt fyrir að holan sé 1809 m djúp. Ástæðan fyrir því er sú að ummyndunarhiti gefur ekki annað til kynna en að frá og með 1000 m dýpi fylgi hiti suðumarksferli eða sé nálægt 300 °C.

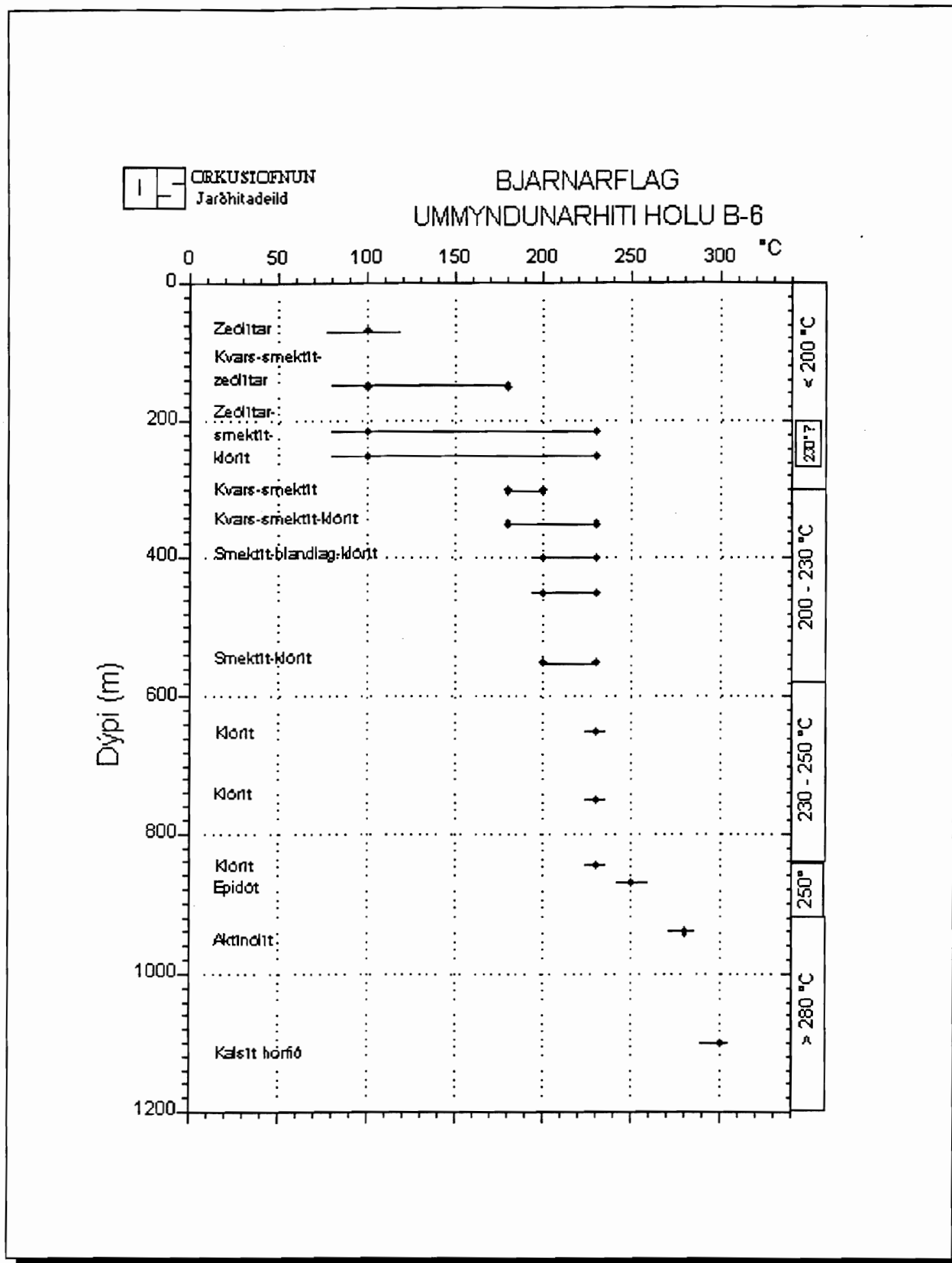
Nokkuð ósamræmi kemur fram þegar áætlaður berghiti byggður á hitamælingum er borinn saman við ummyndunarhita. Helst ber að nefna að ummyndun sér ekki 250 °C með vissu fyrr en á rúmlega 800 m dýpi meðan áætlaður berghiti gerir ráð fyrir þeim hita á tæplega 500 m dýpi. Á 950 m dýpi sér ummyndun 280 °C hita og síðan hækkandi þaðan og er talið að neðan 1000 m dýpis fylgi hann suðumarksferli eða liggi nálægt 300 °C. Áætlaður berghiti sér 254 °C á 500 m dýpi, líklega 256 °C á 600 m, hærri en 246 á 1000 - 1200 m, hærri en 270 °C á 1400 m, um 290 °C á 1500 m og um 310 °C 1800 m dýpi (Ómar Sigurðsson 1993).

## 5. UMMYNDUNARHITI VIÐ HOLU B-6

Hola B-6 var boruð með Norðurbor niður á 1193 m dýpi sumarið 1969. Hún er 100 m SSV af holu BG-10. Ekki var getið um skoltap í borun fyrr en á 1176 m dýpi, en þar tapaðist allt skolvatn. Út frá hitamælingum má sjá æðar á 250 - 300 m dýpi og á 400 - 500 m dýpi, en ein hitamæling er til frá þeim tíma er holan var í borun. Aðrar hitamælingar voru gerðar eftir að holan fór að blása. Hola B-6 liggur um 100 m vestan við þversniðið eins sýnt er á mynd 1. Hún var frekar tekin með í úrvinnslu en hola B-7, þar sem mikið var til af gögnum úr henni og flýtti það fyrir framgangi verksins.

Zeólítar eru alls ráðandi í efstu 200 metrunum og hverfa ekki fyrr en á 300 m dýpi. Þannig er ljóst að hiti í efstu 200 m er um 100 °C. Í zeólítabeltinu, þ.e. þar sem zeólítar og smektít eru ráðandi steindir, birtist klórít óvænt á 220 m dýpi og síðan aftur á 250 m. Wairakít sést einnig á 220 m dýpi og gefur til kynna að minnsta kosti 200 °C hita. Í þunnsneið frá 252 m sést greinilega að kvars er að yfirtaka zeólítana. Það sést á því að í hluta kvarsins er zeólítastrúktúrinn varðveittur. Þessar vísbendingar gefa tilefni til þess að álíta þessi hluti sé að hitna frekar en kólna og ætti núverandi hiti að liggja nær efri mörkum sem gefin eru fyrir hitaspönnina fyrir dýptarbilið á mynd 4. Það þýðir að hitinn er á bilinu 200 - 230 °C frá rúmlega 200 m niður undir 300 m. Klórít sést ekki á 300 m dýpi heldur er þar að finna kvars og smektít, og er það vísbending um kólnun. Hiti er þar af leiðandi á bilinu 180 - 200 °C. Samkvæmt hitamælingum gæti æð verið á þessu dýpi, sem veitir inn vökva sem er kaldari en bergið fyrir ofan og neðan.

Á 350 m dýpi sést klórít á ný og þaðan niður á botn holunnar. Blandlag sést með því niður á 450 - 500 m dýpi og er hitinn þar af leiðandi 200 - 230 °C. Á 550 m dýpi sést smektít með klórítinu. Það gæti bent til kólnunar frá 230 niður undir 200 °C. Í þessari umfjöllun er hallast að því að smektiitið sé leif frá því að svæðið var að hitna upp í núverandi ástand. Síðan er klórít ráðandi niður á 820 m dýpi og hiti líklega hægt vaxandi frá 230 - 250 °C. Þá tekur epidót við með upplýsingar um hita um eða yfir 250 °C. Þannig er ástandið niður á tæplega 950 m þar sem aktínólít sést og þá um leið



Mynd 4. Ummýndunarhiti við B-6

hiti kominn yfir 280 °C. Á um 1100 m dýpi er kalsítið horfið og þá hefur hitastigið náð suðumarksferli eins og það er túlkað eða að það liggur nálægt 300 °C.

Samanburður við áætlaðan berghita út frá hitamælingum er í stórum dráttum á þann veg að ummyndunarhiti er ívið lægri niður á 900 m dýpi, en þar neðan við nokkru hærrí. Meiri sveiflur koma fram í umynduninni. Hún geymir í sér vitnisburð um eldra hitaástand og þá um leið hitabreytingar sem hafa átt sér stað. Það er því fyrst og fremst spurningin að meta rétt aðstæður og túlka þær breytingar í þá veru sem eru ríkjandi í jarðhitakerfinu. Ákveðið ósamræmi kemur fram milli aðferða, þegar ummyndunarhiti sér kólnun á um 300 m dýpi, sem kemur ekki fram í áætluðum berghita. Einnig það að í hitamælingum, frá þeim tíma er holan var í borun, sást 260 °C hiti á rúmlega 500 m dýpi, en engar vísbendingar um svo háan hita sáust í ummynduninni á þessu dýpi.

## 6. UMMYNDUNARHITI VIÐ HOLU BJ-11

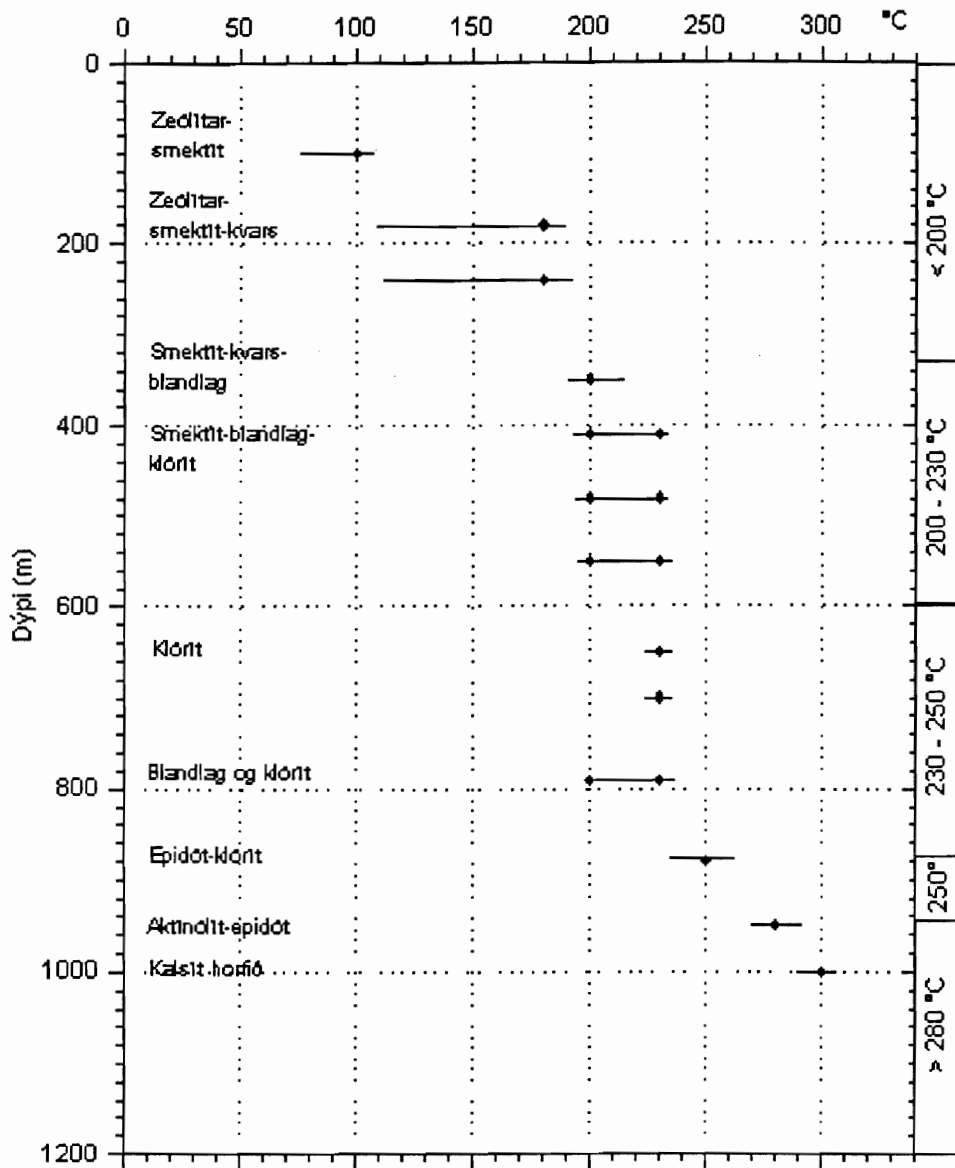
Hola BJ-11 var boruð með Jötni á vormánuðum 1979 niður á 1923 m dýpi. Hún er rúma 100 m austan við Krummaskarðssprunguna og um 250 m sunnan við Þjóðveginn. Skoltap var óverulegt í vinnsluhlutanum en bordagbækur greina frá 6-8 l/s tapi á 1334 m dýpi. Að borun lokinni tók holan við 70 l/s. Efstu 100 m voru mjög lekir, en næstu æðar samkvæmt hitamælingum eru á ~ 420 m og ~ 580 m. Í vinnsluhlutanum sjást í hitamælingum æðar á 1400 og 1870 m dýpi. Í borun var fylgst reglulega með halla holunar og telst hún vera nokkuð bein.

Við ummyndunarrannsóknirnar var stuðst við 26 XRD-steindagreiningar, 11 XRD-leirgreiningar og 50 þunnsneiðar. Engar röntgengreiningar á leir voru til og þurfti að gera þær sérstaklega fyrir þessar athuganir.

Zeólítar einkenna efsta hluta svæðisins og eru þeir fjölbreytilegir niður á 350 m dýpi ásamt smektíti. Í efstu 160 - 180 metrunum er hitinn innan við 180 °C, en þá sést kvars fyrst og síðan eins langt niður og holan endist. Hitinn er þar af leiðandi 180 - 200 °C frá 200 m niður á 350 m dýpi, þar sem fyrst grillir í blandlag. Niður á 500 m dýpi eru blandlag, smektít og kvars einkennandi steindir ásamt wairakíti. Það þýðir að hitinn sé á bilinu ~ 200 - 220 °C. Smektítið gefur til kynna hita við eða undir 200 °C og blandlagið hefur spönnina frá 200 upp í 220-230 °C. Wairakít gefur til kynna hita um eða yfir 200 °C. Frá 500 m niður á 580 m sést klórít með ofangreindum steindum og bendir það til þess að hitinn liggja þar nær 230 °C en áður. Tilvist smektíts og blandlags á þessu dýptarbili benda til þess að hitinn sé ekki kominn yfir 220 -230 °C. Einnig er sá möguleiki fyrir hendi að blandlag og smektít séu ekki lengur í jafnvægi við ríkjandi berghita og séu eins konar leif.

Klórít er einkennandi frá 580 m niður á 870 m dýpi og bendir steindasamfélagið til þess að hitinn sé nokkuð stöðugur eða rúmlega 230 °C. Sennilega fer hitinn að stíga rétt neðan 800 m dýpis og hækkar rólega upp í 250 °C þar til neðri mörkum klórítbeltisins er náð á rúmlega 870 m dýpi. Þar er epidót að verða ráðandi steind. Á 880 m kemur epidót nokkuð sterkt inn, sem þýðir að 250 °C hita er náð. Það belti sem kennt er við epidót og klórít er afar stutt, þar sem aktínólít sést á 940 m dýpi. Epidót og aktínólít sýna að hitinn er kominn í eða yfir 280 °C. Síðan hverfur kalsít á um

BJARNARFLAG  
UMMYNDUNARHITI BJ-11



Mynd 5. Ummýndunarhiti við holu BJ-11.

1000 m dýpi og fylgir hitinn þá líklega suðumarksferlinum niður eða liggur nálægt 300 °C. Engar fleiri vísbendingar um hitabreytingar í ummyndun eru sjánlegar þar fyrir neðan.

Samanburður á áætluðum berghita leiðir í ljós sömu mynd niður á 200 m dýpi, en þaðan og niður á um 400 m skynjar ummyndun hærri hita. Frá 400 m og niður á 1450 m gæti verið sambærilegur hiti miðað við þau skekkjumörk, sem eru til staðar í báðum aðferðunum. Áætlaður hiti gerir ráð fyrir ívið hraðari hitnun frá 750 m niður á 900 m. Aftur á móti kemur fram viðsnúningur neðan 1450 m dýpis, sem ummyndun nemur ekki enda á hitabilinu frá 320° niður í tæpar 300 °C.

## 7. UMMYNDUNARHITI VIÐ HOLU B-2

Hola B-2 var boruð Norðurlandsbor seinni parts árs 1963 niður á 431 m dýpi og var dýpkuð í júlí 1965 niður í 492 m. Hún er tæpa 300 m sunnan við þjóðveginn rétt austan við Krummaskarðssprunguna. Getið var um tvö skoltöp í borun án þess að tilgreina magn þess er tapaðist, þ.e. á 112 og 426 m dýpi. Í hitamælingum sjást vatnsæðar á 220 og 290 m dýpi.

Gögn úr holunni voru frekar takmörkuð en rétt þótti að taka hana með. Þrjár þunnsneiðar voru til og byggir þessi umsögn á þeim og er ummyndunarsnið sýnt á mynd 7.

Þunnsneiðar af 178 og 242 m dýpi sýna zeólítaríkt berg og kvars í sprungum. Zeólítasamfélagið samanstendur af analsími, skólesít/mesólít, stilbít, mordenít og lámontít. Hiti er samkvæmt þessu á bilinu 180 - 200 °C. Á 411 m dýpi sést kvars, en leifar af zeólítastrúktúr sést í því. Þá sjást þar wairakít og leir, sem virðist vera blandlag og svellandi klórít. Það gefur til kynna hita á bilinu 200 - 230 °C.

Samanburður ummyndunarhita við áætlaðan berghita gefur nokkuð svipaða mynd, nema hvað ummyndun sér ekki eins háan hita og sést í hitamælingum neðst í holunni eða rúmar 240 °C. Eftir umbrot hefur holan kólnað verulega.

## 8. UMMYNDUNARHITI VIÐ HOLU BJ-12

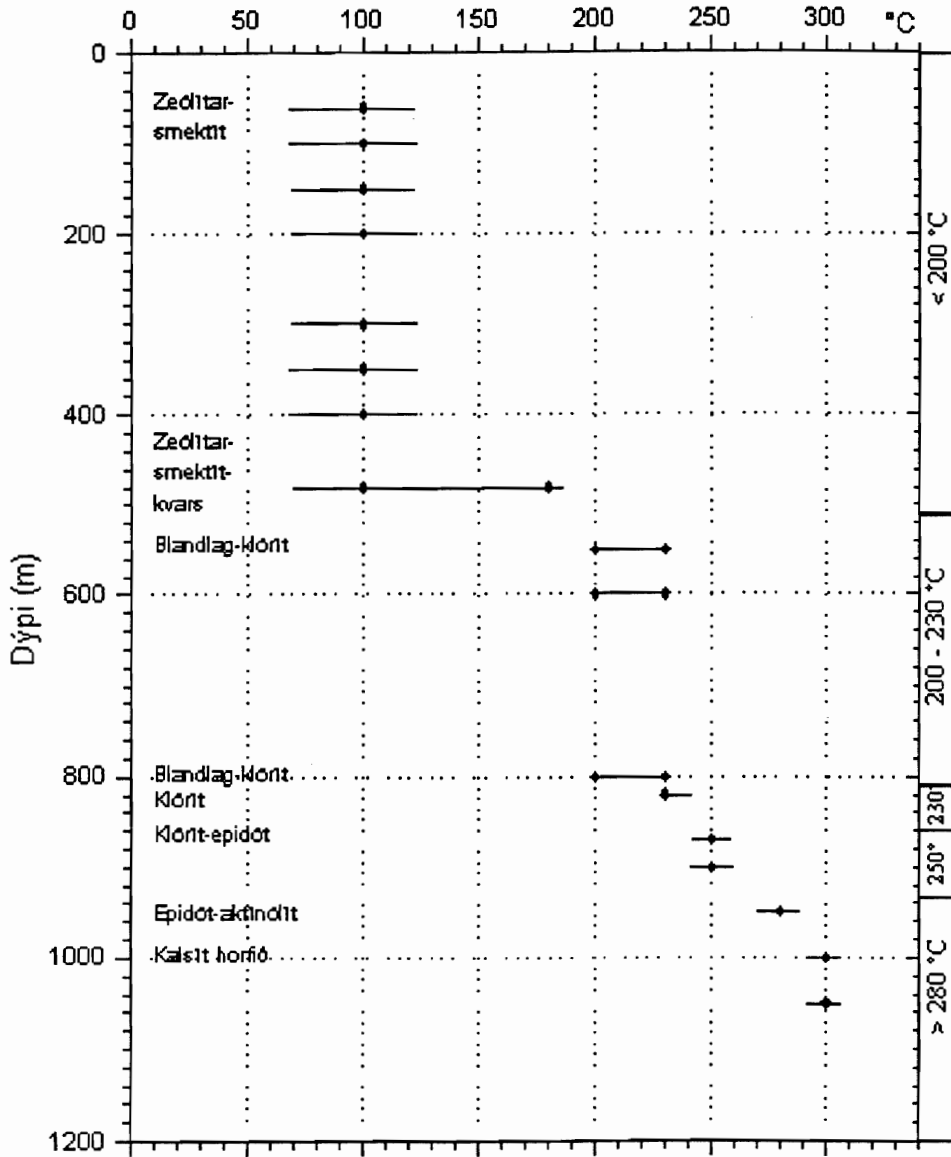
Hola BJ-12 var boruð með Jötni í upphafi vetrar 1980 niður á 1999 m dýpi. Hún er um 180 m austan Krummaskarðssprungunar og um 250 m suður af BJ-11. Eitt skoltap (12 l/s) mældist á 395 m dýpi og ekki komu fleiri æðar fram í skoltapsmælingunum, en holan flugopnaðist eftir borun. Út frá hitamælingum má sjá æðar á um 600, ~ 1700 og ~ 1900 m dýpi. Þrýstimælingar sýna að megin æð holunnar er á 1400 m dýpi. Holan var hallamæld og reyndist nánast bein.

Engar þunnsneiðar né röntgengreiningar voru gerðar af svarfsýnum úr holunni, en aftur á móti voru til greinagóðar svarflýsingar frá þeim tíma er holan var boruð. Þeim til stuðnings voru gerðar 12 XRD-leirgreiningar. Niðurstöður eru sýndar á mynd 6.

Zeólítar og smektít eru einkennandi steindir niður á 500 m dýpi og samkvæmt því er hitastigið undir 180 °C. Ef zeólítasteindirnar eru skoðaðar nánar til að meta hitann nákvæmar bendir



BJARNARFLAG  
UMMYNDUNARHITI BJ-12



Mynd 6. Ummyndun við holu BJ-12.

zeólítasamfélagið sem samanstendur af analími, heulandíti, skólesíti/mesólíti, mordeníti og lámontíti, bendi til hita á bilinu 80 - 100 °C. Þar vegur einna þyngst tilvist lámontíts, en á þeim stöðum þar sem lámontít er ekki til staðar í þessu steindasamfélagi má segja að hitinn sé undir 100 °C. Því má búast við hitatoppum á við 100 m, 200 m, og á bilinu 300 - 400 m. Á um 500 m dýpi sést fyrst örla á kvasi og á 550 m sjást blandlag og klórít saman. Það þýðir með öðrum orðum að á bilinu 500 - 550 m skriði hitinn yfir 200 °C.

Leirsteindirnar smektít, blandlag og klórít sjást saman frá 550 m dýpi niður fyrir 600 m. Þar neðan við sjást blandlag og klórít saman niður á um 800 m dýpi. Það þýðir að hitinn virðist fara hægt stígandi frá um 200 °C á 550 m upp í 230 °C á um 800 m dýpi. Frá 800 m niður í 1000 m er ör hitahækkun frá 230 °C upp í 300 °C, að suðumarksferli. Sá kafli, þar sem klórít er einkennandi og epidót sést ekki, er aðeins um 50 m og þar sem klórít og epidót sjást saman án aktínólits er aðeins um að ræða 70 m. Kalsít virðist hverfa á um 1000 m dýpi og er hitinn þar nálægt 300°C.

Samanburður á áætluðum berghita og ummyndunarhita sýnir svipaða fylgni, þ.e. tiltölulega kalt niður á um 500 m dýpi, en þar fer hiti að stíga samkvæmt ummyndun og er kominn í 200 °C áður en 550 m er náð. Áætlaði berghitinn gerir ráð fyrir 200 °C í nánd við 700 m dýpi. Báðar aðferðirnar greina öra hitnun frá 800 m niður í 1000 m dýpi. Þar er hitinn kominn inn á suðumarksferil samkvæmt ummyndun eða um 300 °C, en er um 20 - 30° lægri samkvæmt áætluninni um berghita.

## 9. UMMYNDUNARHITI Í BJARNARFLAGI

Hér á undan hefur verið rakin hitasaga viðkomandi hola eins og hún kemur fyrir í ummyndun bergsins og síðan borin saman við áætlaðan berghita útfrá hitamælingum. Hver hola var skoðuð án tillits til umhverfisaðstæðna og er því full ástæða til þess að taka fram hvaða þættir geta haft veruleg áhrif þegar farið er út í nánari samanburð. Allar holurnar eru á um 1200 m langri línu með legu í NNV-SSA. Línan liggur að hluta eftir sigdæld, sker sprungur og misgengi og fer í gegnum öflugan yfirborðsjarðhita á nokkrum stöðum. Eftirtalin atriði er því vert að hafa í huga áður en lengra er haldið:

- ◆ Sprungur og misgengi á yfirborði.
- ◆ Halla og stefnu hola.
- ◆ Áreiðanleik gagna.
- ◆ Aðrar rannsóknaraðferðir.

Til þess að geta tekið tillit til sprungna og misgengja þurfa að vera til góð jarðhita- og jarðfræðikort af viðkomandi svæði. Því var til að dreifa og er skoðunin byggð á óútkomnum kortum, sem Kristján Sæmundsson hefur unnið að mestu leyti. Mynd 1 er nokkurs konar skissa af þeim þar sem reynt er að sýna staðsetningu holanna með tilliti til sjáanlegra brota á yfirborði og hvernig og hvort virkur jarðhiti tengist þeim.

Lítið er vitað um halla og stefnu holanna í Bjarnarflagi þar eð aðeins holur BJ-11 og BJ-12 voru hallamældar í borun og reyndust þær vera nánast beinar eða með innan við 50 m frávik frá lóðréttu við holubotn. Engar stefnumælingar eru til. Gengið er útfrá því í samantekt hér á eftir að holurnar séu því sem næst beinar.

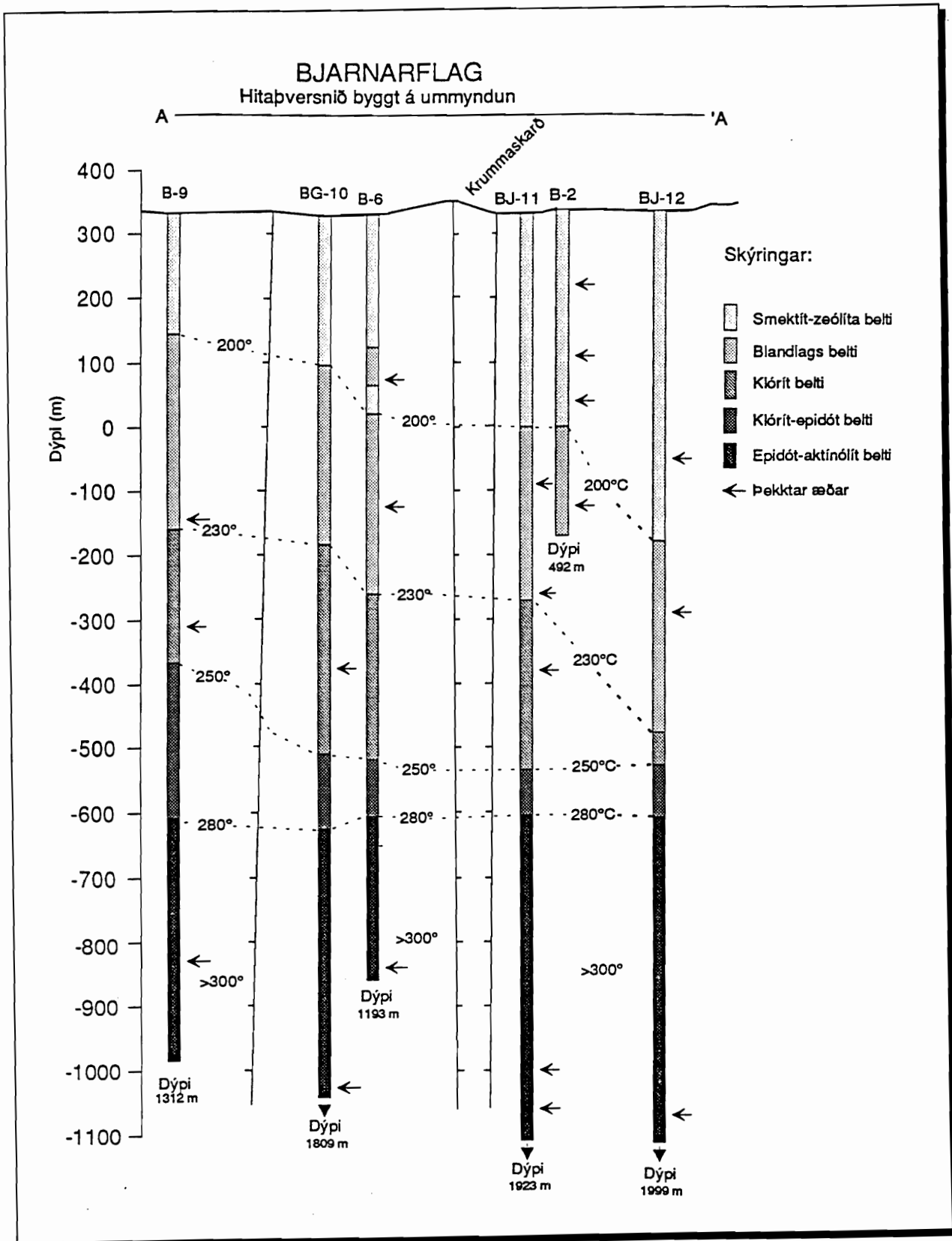
Þessar athuganir byggjast að mestu á borsvarfi, sem safnað var á tveggja metra fresti meðan á borun holanna stóð. Svarfið var tekið og þurrkað áður en það var sett í geymslu. Úr nokkrum holum var búið að útbúa þunnsneiðar og/eða greina ummyndunarsteindir með XRD-aðferð. Þrátt fyrir að elstu holurnar séu allt aftur til 1963 þá eru sýnin úr þeim enn góð til síns brúks og mikill stuðningur er af ítarlegum bordagbókum.

Aðrar rannsóknaraðferðir sem stuðst er við í þessari umfjöllun eru fyrst og fremst beinar mælingar eins og hita- og þrýstimælingar og er þá eingöngu um samanburð að ræða á aðferðum. Mörgum mæliaðferðum hefur verið beitt á yfirborði og eru þær mælingar flestar komnar nokkuð til ára sinna og verða ekki tíundaðar hér. Á síðast liðnu ári var Námafjallssvæðið viðnámsmælt með TEM-aðferð. Verið er að vinna úr þeim gögnum en í grófum dráttum virðist vera ágætt samræmi milli þeirra og ummyndunar (Ragna Karlsdóttir 1993).

Í jarðlögin hefur verið skráð ítarleg samtímasaga. Hluti af þeirri skráningu er saga jarðhitakerfisins, sem lesa má út úr ummyndun bergsins og myndun ummyndunarsteinda. Því er mikilvægt að átta sig á hvernig skráningin fór fram til þess að lesa hana rétt. Í aðalatriðum virðist svæðið vera að hitna upp og fá merki eru um kólnunaratburði. Kólnun sést í holu 9 niður undir 800 m dýpi og ef til vill má skýra hana á þann hátt að þar sé um að ræða hægari hitnun heldur en fyrir ofan og neðan enda er bergmassinn frekar ósamleitur. Engin merki um yfirprentun voru sjáanleg. Skammvinnir atburðir eins og umbotahrinurnar 1977 eru ekki sjánlegir í ummyndun, en það hefði átt að vera mögulegt í holum BJ-11 og BJ-12 ef eitthvað væri að sjá. Öll gögn úr öðrum holum eru fyrir þá atburði. Það verður jafnframt að hafa í huga að slíkir atburðir áttu sér stað á svæðinu í Mývatnseldum á fyrri hlut 18. aldar og hafa verið all tíðir á nútíma (Kristján Sæmundsson 1992). Það er frekar lítið á atburði af þessu tagi sem hitaskot inn í jarðhitakerfið, sem þá viðhalda hitanum í því.

Á mynd 7 er sýnt þversnið af ummyndunarhita jarðhitasvæðisins í Bjarnarflagi. Lega sniðsins er sýnd á mynd 1. Á þversniðinu er holunum skipt niður í ummyndunarbelti, sem draga nöfn af einkennissteindum, og eru skil milli belta dregin við hámarkshita þeirra. Auk holanna eru helstu brot á svæðinu sýnd ásamt þekktum vatnsæðum út frá skoltöpum og hita- og þrýstimælingum. Til að átta sig betur á hitadreifingunni í holunum er sýnt í töflu 2 á hvaða dýpi viðmiðunarhitastig ummyndunarinnar er að finna samkvæmt mynd 7.

BG-10 svipar nokkuð til B-9, en síðan lækkar hiti með dýpi verulega í jarðhitakerfinu til suðurs og er lægstur í holu BJ-12 í efstu 800 metrunum. Það þarf ekki að koma á óvart að hitinn sé hæstur í holunum norðanlega í efstu hundruð metrunum, þar sem virkur jarðhiti á yfirborði er miklu víðáttumeiri og öflugri en fyrir sunnan. Holurnar austan Krummaskarðssprungunnar virðast vera á milli virkra yfirborðsjarðhitasvæða og er það í góðu samræmi við niðurstöður TEM-mælinga (Ragna Karlsdóttir 1993).



Mynd 7. Hitabversnið byggt á ummyndun.

**Tafla 2. Hitadreifing í holum í Bjarnarflagi samkvæmt ummyndun.**

Hitu °C	B-9	BG-10	B-6	BJ-11	B-2	BJ-12
200	140 m	230 m	380 m	330 m	390 m	510 m
230	490 m	510 m	590 m	600 m		810 m
250	700 m	730 m	870 m	870 m		860 m
280	940 m	960 m	940 m	930 m		940 m

Ef þessar niðurstöður eru skoðaðar í ljósi þeirra vitneskju sem fékkst við athuganir á Kröflueldum, þá virðist megineldstöðin Krafla framleiða kviku og senda til nágrannasvæða eins og Námafjalls (Bryndís Brandsdóttir og Páll Einarsson 1979) og viðhalda eða auka jarðhitavirkni. Kvikuinnskot leita suður frá Kröflu og leitast við að fylla upp í það rúmmál, sem til verður vegna gliðunar. Það fer eftir magni kvikunnar, sem skýst suður, hvort hluti af henni nái til yfirborðs eða hvort hún storkni öll sem innskot. Í síðustu hrinum hefur mesta virknin verið í Bjarnarflagi, milli Krummaskarðs og Grjótagjár. Það skýrir ef til vill meiri hita í efrihlutanum vestan við Krummaskarðið og að hitajafnvægi náist síðan neðar. Ennfremur má búast við skammvinnri kælingu niður sprungur, sem opnast í umbrotunum. Þannig má e.t.v. skýra kælingu við holu B-2 eins hún sést í hitamælingum (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1989). Kerfið leitar síðan aftur í jafnvægi, sprungur hitna á ný og yfirborðsummyndun eykst.

Ef aftur á móti afmörkuð dýptarbil eru skoðuð eins og t.d. frá 800 niður í 1000 m, þá er örust upphitun í holu BJ-12. Það vill segja að þegar komið er niður fyrir 900 m dýpi þá er hitinn mjög svipaður í öllum holunum, en holurnar austan Krummaskarðs virðast vera kaldari í efstu hundruð metrnum. Eitt atriði á mynd 7, sem kemur fyrir í holu 6, er vert að skoða nánar. Neðarlega í smektít-zeólíta beltinu sést um 60 m langur bútur af blandlags belt. Miðað við þær ályktanir sem dregnar hafa verið hér á undan um að svæðið sé að hitna upp þá má búast við að innan skamms hafi blandlagið vaxið saman og þannig stytt smektít-zeólíta beltíð í neðri endann.

Ef hitaþversniðið af Bjarnarflagi samkvæmt ummyndun er lagt til grundvallar við ákvörðun á fóðringardýpi borhola er ljóst að vinnslufóðringar syðst á svæðinu þurfa að ná niður á um 800 m dýpi til þess að fóðra af kaldara svæði. Aftur á móti duga 600 - 700 m fóðringar innan virka beltisins í næsta nágrenni hola B-9, BJ-11 og B-6. Ekki virðist skipta máli hvar er borað á athugunarsvæðinu svo fremi sem fóðringar ná niður á 800 m dýpi. Megin æðarnar virðast vera á 1100 - 1400 m dýpi, en í holum BJ-11 og BJ-12 eru vísbendingar um æðar niður á 2000 m dýpi.

Full ástæða er til að skoða tvær holur til viðbótar þ.e. holur B-7 og B-8. Miðað við undangengna skoðun þá ætti hola B-8 að sýna jafnt stigandi hita frá yfirborði til botns, eða vera nálægt því að fylgja suðumarksferli. Hola B-7 er næst Krummaskarðssprungunni að vestanverðu og forvitnilegt væri að vita hvort hún líkist holunum austan sprungunnar.

## 10. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Ummyndunarhiti hefur verið ákvarðaður fyrir jarðhitasvæðið í Bjarnarflagi útfrá borholugögnum, sem lýst hefur verið hér að framan. Ástæða er til að draga fram eftirtalin atriði og leggja á þau áherslu.

- ◆ Þokkalegt samræmi er milli ummyndunarhita í Bjarnarflagssvæðinu og áætlaðs berghita.
- ◆ Vísbendingar eru um það að svæðið sé enn að hitna og ummyndun því góður mælikvarði á hitann í svæðinu.
- ◆ Upphitun er örust nyrst á svæðinu inni í virka beltinu við holur B-9 og BG-10, þar sem yfirborðsjaðhiti er mestur. Þar er komið í 250 °C hita á um 700 m dýpi.
- ◆ Efstu 500 m austan Krummaskarðs eru vel innan við 200 °C og til dæmis í nágrenni holu BJ-12 eru zeólítar ráðandi niður á það dýpi.
- ◆ Á öllu athuganarsvæðinu virðist 250 -280 °C hita vera náð á um 900 m dýpi

## HEIMILDIR

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Sæþór L. Jónsson og Sverrir Þórhallsson 1989: Borholur í Bjarnarflagi. OS-89046/JHD-21 B, 87 s.

Brandsdóttir, B. and Einarsson, P. 1979: Seismic activity associated with the September 1977 deflation of the Krafla central volcano in NE Iceland. J. Volcanol. Geotherm. Res., 6, 197-212, 1979.

Kristján Sæmundsson 1991: Jarðfræði Kröflusvæðisins í: Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson ritstj, Náttúra Mývatns. Hið Íslenska Náttúrufræðifélag 1991, 24-95.

Kristján Sæmundsson, Guðmundur Guðmundsson, Guðmundur Pálmason, Karl Grönvold, Karl Ragnars og Stefán Arnórsson 1971: Námafjall - Krafla. Áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðanna. Orkustofnun júní 1971, 81 s, 32 m.

Kristmannsdóttir, H. 1979: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100 - 300 °C. Reprinted from International Clay Conference 1978, edited by M.M. Mortland and V.C. Farmer. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam, 359 - 367.

Ómar Sigurðsson 1993: Jarðhitakerfið í Bjarnarflagi - Mat á hita, þrýstingi og afköstum. OS-93016/JHD-08 B, 45 s.

Ragna Karlsdóttir 1993: Námafjall - TEM-mælingar 1992. OS93022/JHD-12 B.

Steingrímsson, B., Guðmundsson, Á., Franszon, H. and Gunnlaugsson, E. 1987: Evidence of a supercritical fluid at depth in the Nesjavellir field.

Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns 1993: Jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi - Frumáætlun, Áfangaskýrsla. VGK, 36 s.