



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

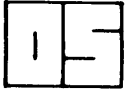
Valgarður Stefánsson
Jens Tómasson
Einar Gunnlaugsson
Hilmar Sigvaldason
Hjalti Franzson
Ómar Sigurðsson

NESJAVELLIR, HOLA NG-6

Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar

OS-83023/JHD-04
Reykjavík, apríl 1983

Unnið fyrir
Hitaveitu Reykjavíkur



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Valgarður Stefánsson
Jens Tómasson
Einar Gunnlaugsson
Hilmar Sigvaldason
Hjalti Franzson
Ómar Sigurðsson

NESJAVELLIR, HOLA NG-6

Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar

OS-83023/JHD-04
Reykjavík, apríl 1983

Unnið fyrir
Hitaveitu Reykjavíkur

ÁGRIP

Skýrslan fjallar um jarðhitarannsóknir sem gerðar voru samhliða borun holu NG-6 á Nesjavöllum. Sú hola er um 600 m sunnar en fyrri holur á Nejsavöllum og var boruð í október 1982. Borun holunnar gekk vel og varð hún 1144 m djúp. Jarðlagamyndanir í holunni eru móberg og basalt. Skipting þeirra er í grófum dráttum þannig að í efri hluta holu (ofan 600 m dýpis) er móberg ráðandi, en basalt í neðri hluta. Ummyndun er tiltölulega lítil í móberginu í efri hluta holunnar en mikil ummyndun er í neðri hluta holu neðan við 600-700 m dýpi. Skipting mismunandi jarðlaga og ummyndunarstiga kemur vel fram í borholumælingum þar sem poruhluti bergs er mældur með nifteindadreifingu. Meðalporuhluti túffs í efri hluta holu er $15 \pm 4\%$ en $30 \pm 6\%$ í neðri hluta holu. Í breksíu er meðalporuhluti $12 \pm 9\%$ í efri hluta holu en $31 \pm 9\%$ í neðri hluta holu. Meðalporuhlti basalts, sem er að meginhluta til í ummyndaða hluta holunnar mælist $23 \pm 10\%$. Jarðlagamyndanir í holu NG-6 samsvara mjög vel jarðlagamyndunum í öðrum holum á Nesjavöllum og er ekki að sjá nein misgengi í jarðlagastaflanum á milli holanna. Tenging ummyndunar við aðrar holur er nokkru flóknari og stafar það m.a. af því að ummyndunin er tengd við þröngar rásir þannig að ef litið er á jarðhitakerfið í heild má segja að ummyndun í kerfinu sé ekki í jafnvægi, þó að á hverjum stað í kerfinu sé jafnvægi milli steinda og jarðhitavökva. Þessar aðstæður eru túlkaðar svo að á jarðfræðilegum tímaskala sé jarðhitakerfið nú í sköpun eða að það sé meiriháttar breyting að fara fram í kerfinu. Annars vegar byggir þessi túlkun á því hve efstu 600 m holunnar eru lítið ummyndaðir og hins vegar á röðun ummyndunarsteinda í sprungum og holufyllingum í berginu. Í þessari röðun má sjá tvö ummyndunarskeið í jarðfræðilegri sögu jarðhitakerfisins. Áhrif yngra ummyndunarskeiðsins ná ofar í jarðlagastaflann en áhrif eldra tímaskskeiðsins, eða með öðrum orðum jarðhitakerfið er að hitna. Helstu æðar í holunni eru tvær, á 740 og 1092 m dýpi, en alls voru skrásettar 14 æðar í holunni. Meðan á borun stóð var yfirþrýstingur á æðum niður fyrir 800 m dýpi, og er því ályktað að æðin í 740 m sé í hreinum vatnsfasa. Á dýptarbilinu 900-1000 m virðist þrýstingur í jarðhitakerfinu aukast mjög óverulega með dýpi, og var mældur þrýstingur (84 bar) við æðina á 1092 m dýpi lægri en þrýstingur sjóðandi vatnssúlu á því dýpi. Talið er að æð á 1092 m dýpi sé hrein gufa, 300 °C heit. Vegna þrýstingsmunar á æðum á 740 m og 1092 m dýpi var millirennslí í holunni við lok borunar og því er erfitt að meta vatnsleiðni berglaga. Skásta nálgun er talin vera

$$\frac{kh}{\mu} = (3,5 - 5,0) 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$$

en það gildi er um þrisvar sinnum hærra en samsvarandi gildi í holu NG-5. Holunni var hleypt í blástur 9. desember 1982 og nær þessi skýrsla til 3 mánaða blásturssögu. Á fyrstu vikum lækkaði heildarrennsli holunnar á meðan varmainsihald þess jókst. Eftir tveggja vikna blástur var komið rennslisjafnvægi þar sem heildarrennsli var 23 kg/s með varmainsihaldi 2.100 kJ/kg. Eftir tveggja mánaða blástur má sjá þess merki að rennsli sé farið að aukast aftur. Blásturssaga holunnar fylgir því mynstri sem þekkt er frá jarðhitaholum sem boraðar eru í sjóðandi jarðhitakerfi. Þess vegna er trúlegt að hnignun holunnar verði tiltölulega hæg. Efnasamsetning borholuvökva úr holu NG-6 er keimlík efnasamsetningu úr öðrum holum á Nesjavöllum svo og á öðrum íslenskum háhitasvæðum sem eru með ósaltan jarðhitavökva. Athugaðar voru fimm kvarðanir á efnahitastigi, og reyndust þær skiptast í tvo hópa. Fyrri hópurinn gefur efnahitastig nálægt 265°C en hinn síðari um 295°C. Marktækur munur er milli þessara tveggja hópa. Hita og þrýstimælingar í holu benda til að innstremishiti sé á bilinu 290-300°C. Því er talið að seinni hópurinn í efnahitakvörðum gefi raunhæfari niðurstöður en hinn fyrri. Vinnslueiginleikar holu NG-6 á Nesjavöllum eru óvanalega hagstæðir. Sem varmi er afl holunnar 49 MW, en vegna hins háa varmainsihalds er nýtanlegt hreyfiafl 7-8 MW (t.d. til raforkuframleiðslu). Þurrufusvæði eru talin hagkvæmustu vinnslukostir á sviði jarðvarma. Möguleikar á að geta unnið hreina gufu með 84 bar þrýstingi er nýjung sem býður upp á mikla nýtingarmöguleika. Við rekstur holunnar er ekki að vænta útfellinga í holu ef holutoppsþrýstingur er hærri en 10 bar. Nákvæm mynd af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum liggur enn ekki fyrir, og ýmsar niðurstöður frá rannsóknum tengdum borun NG-6 hafa vakið áleitnar spurningar um gerð jarðhitakerfa. Það er þó ljóst að vinnslueiginleikar á suðurhluta Nesjavallasvæðisins eru mun hagstæðari en á norðurhlutanum og ef það sýnir sig að á suðurhlutanum megi vinna hreina gufu með 84 bar þrýsingi má halda því fram að þar séu fyrir hendi hagstæðustu vinnslueiginleikar sem fram að þessu hafa fundist í heiminum.

EFNISYFIRLIT

	Bls.
ÁGRIP	3
EFNISYFIRLIT	5
TÖFLUSKRÁ	6
MYNDASKRÁ	6
1 INNGANGUR	8
2 HÖNNUN OG BORUN HOLU	12
2.1 Framvinda borunar	12
2.2 Yfirprýstingur	14
2.3 Hönnun og frágangur holu	14
3 JARÐLAGASKIPAN	16
3.1 Jarðlagamyndanir	16
3.2 Poruhluti	27
3.3 Tenging jarðlaga	32
4 UMMYNDUN	36
4.1 Greiningaraðferðir	36
4.2 Ummyndun frumsteinda og glers	36
4.3 Dreifing ummyndunarsteinda	38
4.4 Ummyndunarbelti	45
4.5 Tenging ummyndunar NG-6 við eldra borsvæði	46
4.6 Röðun ummyndunarsteinda	47
4.7 Skipting ummyndunarbelta NG-6 í tíma	49
4.8 Umræða	50
5 EÐLISÁSTAND JARÐHITAKERFIS	54
5.1 Staðsetning vatnsæða	54
5.2 Vatnsleiðni	58
5.3 Samanburður á vatnsleiðni við aðrar holur	62
5.4 Hiti og þrýsingur í jarðhitakerfi	63
5.4.1 Þrýsingur	63
5.4.2 Hiti	66
5.4.3 Hiti og þrýsingur í öðrum holum	66
6 BLÁSTUR	68
6.1 Upphleypling	69
6.2 Varmainnihald og rennsli	69
6.3 Efnasamsetning borholuvökva	71
6.3.1 Söfnunar- og efnagreiningaraðferðir	71
6.3.2 Niðurstöður efnagreininga	73
6.3.3 Breytingar á efnasamsetningu með tíma	76
6.3.4 Efnahiti og jafnvægi bergs og vökva	79
6.3.5 Efnasamsetning í öðrum holum	83

	Bl.s.
7 HELSTU VINNSLUEIGINLEIKAR	84
8 LÍKAN AÐ JARÐHITAKERFI NESJAVALLA	86
HEIMILDASKRÁ	89
VIÐAUKI: V-1 Aðferðir við gerð jarðlagasniðs	93
VIÐAUKI: V-2 Tafla um mælingar í holu	99

TÖFLUSKRÁ

1 Yfirlit yfir borholur á Nesjavöllum	11
2 Holutoppsprýstingur NG-6 frá borlokum fram að upphleypingu	68
3 Upphleyping holu NG-6 þann 9. desember 1982	69
4 Aflmælingar á holu NG-6	70
5 Nesjavellir hola NG-6. Yfirlit yfir efnagreiningaaðferðir	72
6 Efnainnihald í heildarrennsli úr holu NG-6 á Nesjavöllum	74
7 Efnainnihald vatns og gufu við 290°C í holu NG-6 á Nesjavöllum ..	74
8 Efnainnihald í heildarrennsli í holu NG-5 á Nesjavöllum miðað við mælt varmainnihald	75
9 Efnainnihald vatns og gufu við 265°C í holu NG-5 á Nesjavöllum ..	75
10 Efnahiti reiknaður út frá efnasamsetningu vökva úr holu NG-6 á Nesjavöllum	79
11 Meðalstyrkur klórs og flúors og hlutfallið Cl/F í vatni úr borholum á Nesjavöllum, sem soðið hefur niður í 100°C	83

MYNDASKRÁ

1 Staðsetning borhola á Nesjavallasvæði	9
2 Gangur borunar holu NG-6	13
3 Mælingar á skolvökva í borun	13
4 Frágangur, halli, vatnsæðar og aðalflangs.....	15
5 Jarðlagasnið og borholumælingar	21
6 Poruhlutadeifing á dýptarbilinu 225-1102 m	28
7 Poruhlutadeifing í a) efri hluta holu b) neðri hluta holu	28
8 Poruhlutadeifing í túffi, breksíu og basalti (8a - 8g)	30
9 Nesjavellir - Þversnið jarðlagamyndana	33
10 Ummyndun frumsteinda og ummyndunarsteindir	39
11 Einfaldað jarðlagasnið, greiningaraðferðir og dreifing ummyndunarsteinda	42

	Bls.
12 Ummyndunarbelti	45
13 Tenging ummyndunarbelta	46
14 Einfaldaður þverskurður útfellinga í holrýmum berglaga	47
15 Tíðni útfellinga á mismunandi dýptarbilum	47
16 Líkleg röðun útfellinga í tíma	48
17 Skipting ummyndunar í tíma	49
18 Staðsetning vatnsæða í holu NG-6 á Nesjavöllum	54
19 Upphitun þegar holan var 225 m djúp	57
20 Upphitun þegar holan var 639 m djúp	57
21 Upphitun þegar holan var 1144 m djúp	57
22 Hita- og þrýstimælingar í upphitun	57
23 Þrepaðæling í holu NG-6 á Nesjavöllum	59
24 Þrýstifall er 41,7 l/s dælingu var hætt	60
25 Þrýstihækkun við þrepaðælingu.....	60
26 Hæsta vatnsborðsstaða í hverju dæluprepi	61
27 Samband heildarrennslis og varmainnihalds	63
28 Þrýstingur í jarðhitakerfi	65
29 Hitastig í jarðhitakerfi	65
30 Líklegt hitastig í jarðhitakerfinu við Nesjavelli	67
31 Líklegur þrýstingur í jarðhitakerfinu við Nesjavelli	67
32 Nesjavellir, hola NG-6 - Blásturssaga	70
33 Breyting á varmainnihaldi, heildarrennslis og hlutfalli gass og gufu í NG-6 á Nesjavöllum	77
34 Styrkur efna í rennslis	77
35 Styrkur vetnis í rennslis	77
36 Styrkur natríums, kalíums, súlfats og kísils í rennslis.....	78
37 Styrkur kalsíums, klórs og flúors í rennslis	78
38 Breytingar á hlutfallinu H ₂ S/SO ₄ með tíma	78
39 Samanburður á hita reiknuðum út frá efnasamsetningu vökva úr holu NG-6 á Nesjavöllum	81
40 Breytingar á leysnimargfeldi kalsíts og anhydríts með tíma í vökva úr holu NG-6 á Nesjavöllum	82
41 Útfellingar kalsíts	85
42 Útfelling kísils	85
43 Nesjavellir. Líkan að jarðhitakerfi	88

1 INNGANGUR

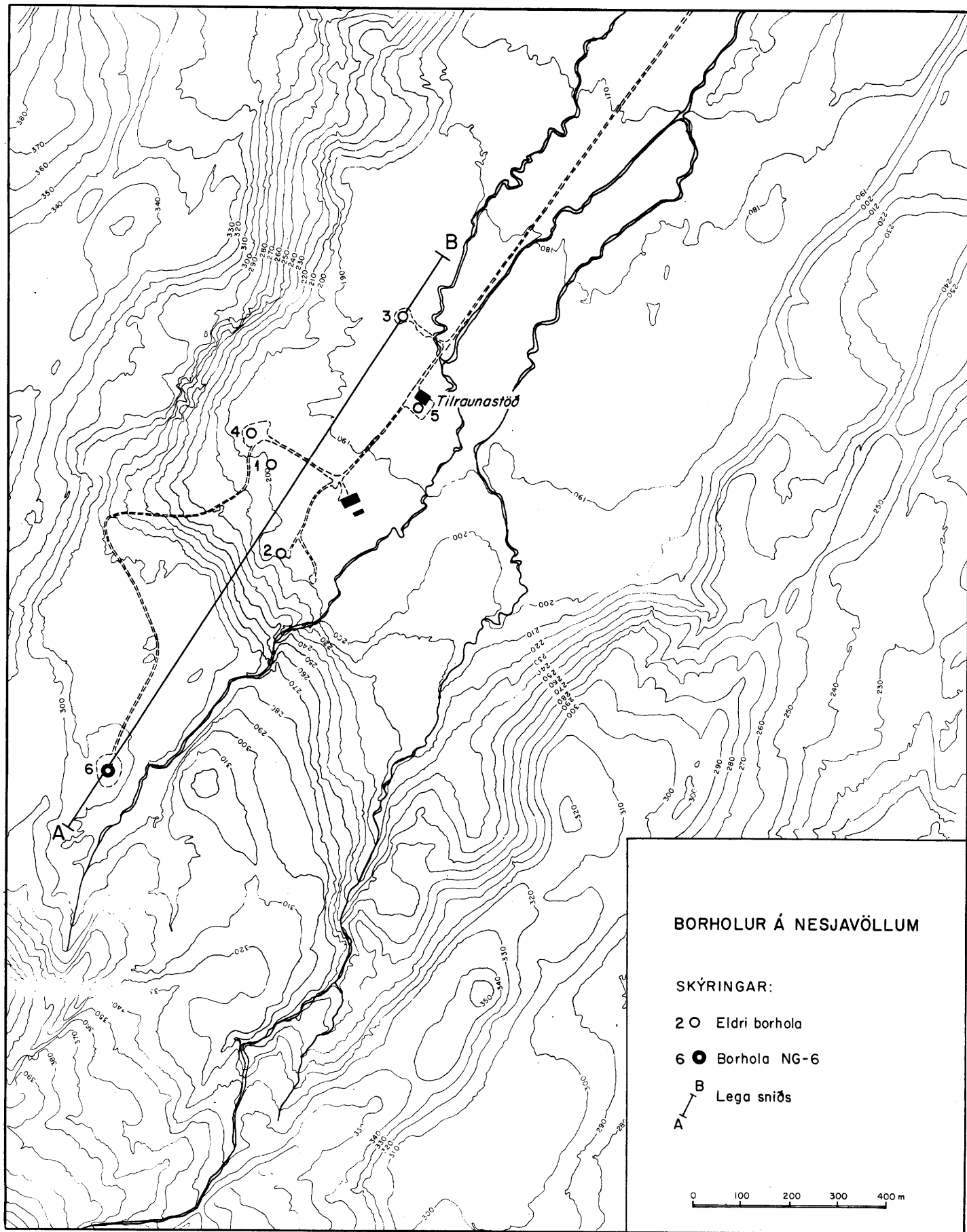
Boranir á Nesjavöllum hófust árið 1965. Það ár voru boraðar þrjár holur, sú dýpsta (NV-3) 602ja m djúp. Árið eftir (1966) var NV-3 dýpkuð í 836 m.

Á árunum 1970-1972 voru boraðar holur NG-4 og NG-5, og varð NG-5 1804 m djúp. Er hún dýpsta hola sem boruð hefur verið á svæðinu.

Tíu árum síðar, 1982, er rannsókn Nesjavallasvæðisins með borunum haldið áfram og er hola NG-6 boruð á tímabilinu 5. til 31. október. Áætlað var að bora holuna í 1800-2000 m dýpi. Í 1091 m dýpi varð mikið skoltap og athuganir á vatnsleiðni gáfu til kynna að holan væri orðin það góð að ekki væri ástæða að bora dýpra. Endanlegt bordýpi varð því 1144 m. Staðsetning allra hola á Nesjavallasvæði er sýnd á mynd 1. Svo sem þar kemur fram er hola NG-6 um 600 m sunnar en fyrri holur á svæðinu auk þess sem hún er mun hærra (110 m) í landinu. Ástæður þess að hola NG-6 var staðsett svo sunnarlega eru tvíþættar, og skulu þær raktar hér.

1. Í fyrri borunum á Nesjavöllum (1965-1970) urðu nokkrir erfiðleikar við borun inn á því svæði þar sem jarðhiti var virkur á yfirborði (holur NV-1, NV-2 og NG-4). Stafar það af miklum þrýstingi á jarðhitavökva, svo stundum var erfitt að halda holum niðri meðan á borun stóð. Nú er hins vegar fyrir hendi betri tækjabúnaður (fyrst og fremst öryggislokar) þannig að borun inni á virka hluta jarðhitasvæðisins er auðveldari en áður. Eins var talið að þrýstingur væri viðráðanlegri í þeirri hæð sem holunni var valinn staður.
2. Svo sem ítarlega er rakið hjá Benedikt Steingrímssyni og Valgarði Stefánssyni (1979) hækkar bæði hitastig og þrýstingur í jarðhitakerfinu til suðurs. Aðal uppstreymi kerfisins var því talið vera sunnan við holur 1-5, og að öðru jöfnu er talið að vinnsla úr uppstreymi sé heppilegri en úr öðrum hlutum jarðhitakerfis.

Árangur borunar NG-6 hefur sýnt að forsendur staðsetningar voru réttar.



MYND 1 Staðsetning borhola á Nesjavallasvæði

Yfirlit yfir frágang borhola á Nesjavallasvæði er sýnt í töflu 1. Þar kemur fram að gömlu holurnar eru fremur illa farnar, einkum vegna hruns. Hola NG-5 er t.d. aðeins opin niður á 1010 m dýpi.

Niðurstöður fyrri rannsókna á Nesjavöllum hafa einkum verið birtar í skýrslum Jarðhitadeildar Orkustofnunar (Jens Tómasson og Kristján Sæmundsson 1967, Jens Tómasson o.fl. 1971, Jens Tómasson o.fl. 1974).

Seinni hluta áttunda áratugarins hafa hugmyndir manna um gerð háhitasvæða breyst nokkuð. Rannsóknir á jarðhitasvæðunum í Kröflu, í Olkaria í Kenya, á Broadlandssvæðinu á Nýja Sjálandi og Tongonan á Filipseyjum hafa sannfært menn um að sum jarðhitakerfi eru í suðu, þannig að jarðhitavökvinn í berginu er blanda af gufu og vatni. Áður töldu menn að jarðhitakerfi væru bara tvenns konar, gufukerfi eða vatnskerfi. Skömmu eftir að menn fundu að hluti af jarðhitakerfinu í Kröflu er í suðu vaknaði sá grunur að Nesjavallasvæðið væri líka í suðu. Benedikt Steingrímsson og Valgarður Stefánsson (1979) athuguðu eldri gögn og mælingar frá Nesjavöllum og leiddu líkur að því að svo væri. Þar sem fyrri mælingar voru ekki gerðar til þess að ákvarða þessa hluti var erfitt að fá fram einhlítt svar úr þeim gögnum, sem lágu fyrir. Athuganir á holu NG-6 hafa hins vegar leitt í ljós að ágiskunin var rétt. Jarðhitakerfið á Nesjavöllum er í suðu, og er jafnvel mögulegt að á vissu svæði sé lag með hreinni 300° C heitri gufu.

Borun holu NG-6 gekk vel (sjá kafla 2) og í borun virtist árangur vera mjög góður (sjá kafla 5). Holunni var hleypt upp 9. desember 1982, og var rennsli úr henni þá 50 kg/s með varmainnihaldi um 1200 kJ/kg. Holan hefur blásið samfelld síðan og í febrúar 1983 hefur varmainnihald rennslis aukist í 2150 kJ/kg en heildarrennsli dalað í 23 kg/s.

Vinnslueiginleikar holunnar eru góðir, og hentar hún vel til raforkuframleiðslu, þar sem gufuhlutfall rennslis er hátt og auðvelt er að reka holuna með háum gufuprýstingi.

Í fyrirbyggjandi skýrslu eru rakin þau rannsóknaratriði og niðurstöður sem fram komu við borun holunnar, upphitun hennar og blástur fram í febrúar 1983.

Jarðhitadeild Orkustofnunar og Hitaveita Reykjavíkur hafa staðið

eiginlega að gerð þessarar skýrslu. Þeir Valgarður Stefánsson, Jens Tómasson, Hilmar Sigvaldason, Hjalti Franzson og Ómar Sigurðsson eru starfsmenn Jarðhitadeildar en Einar Gunnlaugsson er starfsmaður Hita-veitu Reykjavíkur. Auk þeirra hafa Guðjón Guðmundsson, Þorsteinn Thorsteinsson, Steinar Þór Guðlaugsson, Guðni Guðmundsson, Hildigunnur Þorsteinsdóttir, Benný Baldursdóttir og Gyðríður Jónsdóttir hjá JHD og Sigurður Jónsson og Árni Gunnarsson hjá HR unnið að einstökum þáttum í þessum rannsóknum. Árni Gunnarsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Sigurður G. Tómasson lásu yfir handrit skýrslunnar og bentu á margt til bóta. Við þökkum öllum þessum aðilum framlag þeirra og áhuga á þessu verki.

TAFLA 1 Yfirlit yfir holur á Nesjavöllum

Hola nr.	Borun lokið	Fóðrun	Leiðari	Dýpi	Ath.
NV-1	65.08.19	6" í 74 m		129,0 m	
NV-2	65.09.22	6" í 85,2 m		393,0 m	Holan hrunin. Dýpi 85 m
NV-3	65.12.05	6" í 92,5 m		601,9 m	Endurfóðruð 1979 í 298 m
NV-3	66.08.09			836,9 m	Holan hrunin. Dýpi 167 m
NG-4	70.11.03	9 5/8" í 306 m		431,0 m	Steypt í holu 1979
NG-5	72.10.11	8 5/8" í 442 m	417-1240 m	1804,0 m	Leiðari raufaður Holan hrundi 31/1 1975 Núverandi dýpi 1010 m
NG-6	82.10.31	9 5/8" í 633 m	599-1131 m	1144,5 m	Raufaður leiðari

2 HÖNNUN OG BORUN HOLU

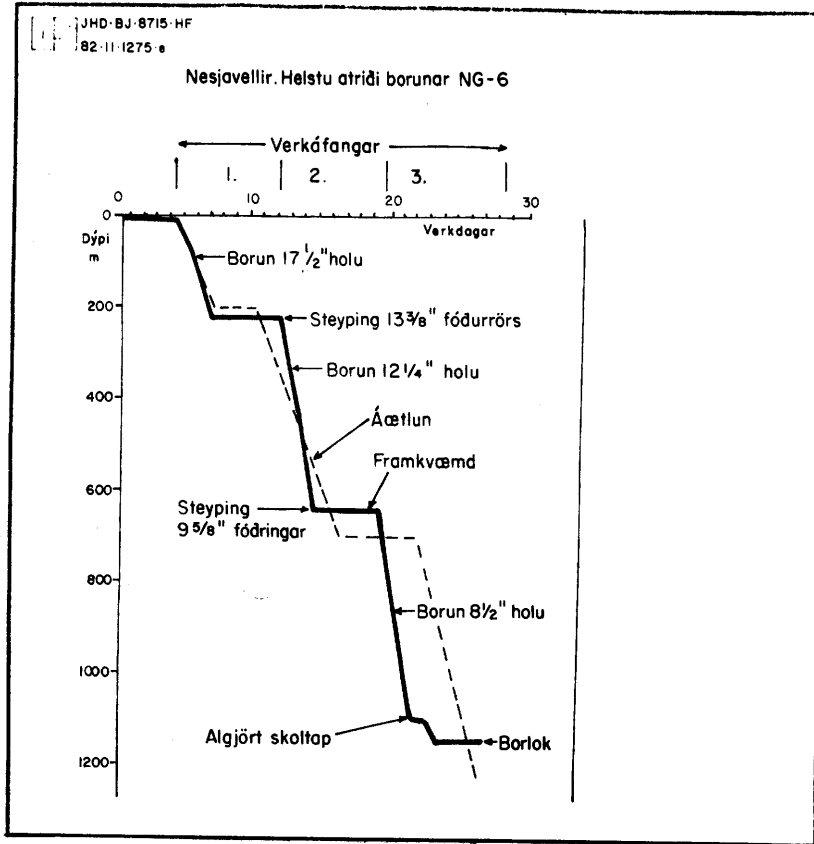
2.1 Framvinda borunar

Á mynd 2 er sýndur gangur borverksins þar sem lóðrétti ásinn sýnir dýpi en lárétti ásinn sýnir borverkdaga. Verkið skiptist í þrjá verkáfanga. Þar sem hverjum boráfanga hefur þegar verið ýtarlega lýst í þremur framvinduskýrslum (Jens Tómasson o.fl. 1982, Hjalti Franzson o.fl. 1982, Hilmar Sigvaldason o.fl. 1982) verður hér aðeins stiklað á stóru varðandi borunina.

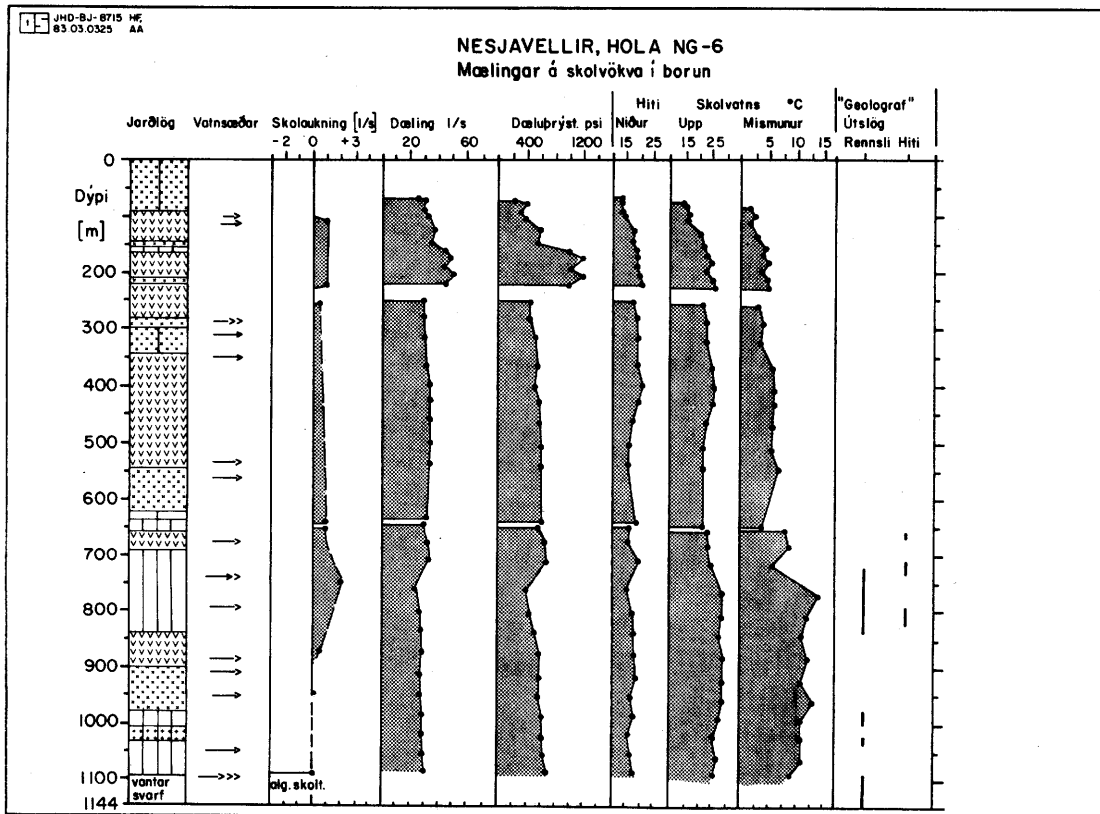
Fyrsti áfangi var borun 17 1/2" holu fyrir 13 3/8" öryggisfóðringu. Sá hluti holunnar varð 225 m djúpur og fóðringin varð 220 m djúp. Næsti verkáfangi var borun 12 1/2" holu fyrir 9 5/8" fóðringu. Þessi verkáfangi hófst 12. október og lauk 17. október með steypingu 633 m langs fóðurrörs. Þriðji áfanginn var borun vinnsluhluta holunnar og var sá hluti holunnar boraður með 8 1/2" krónu. Þann 28. október var holan orðin 1145 m djúp, var þá borun hætt og borverki lauk 31. október 1982.

Á áðurnefndri mynd er sýndur áætlaður gangur borverks ásamt raunverulegri framkvæmd. Eins og sést var borverkið 5 daga, eða um 20%, á undan áætlun og verður það að teljast góður gangur. Meðan á borun stóð var mæld breyting á skolvatni (aukning eða tap), dæling í l/s, dæluþrýstingur, hiti á vatni niður holuna og hiti upp úr holunni. Á mynd 3 eru þessar mæliniðurstöður sýndar ásamt útreikningi á hitamismuni á vatninu sem fór niður í holuna og því sem kom upp. Einnig eru vatnsæðar merktar inn til samanburðar. Eins og sést á mynd 3 var skolaukning í efri hluta holunnar, en þar var yfirþrýstingur á vatnsæðunum og rann upp úr holunni við stangaskipti. Var sjálfrennsli úr holu niður á um 900 m dýpi en í 950 m var sjálfrennslið hætt og komið skoltap í holuna. Mesta rennsli upp var gróflega áætlað um 3 l/s í 750 m en í 1092 m varð algjört skoltap. Eftir þrepaðælingu var ákveðið að hætta borun þegar búið væri að bora nokkurra tuga metra djúpan sokk. Þrepaðæling gaf til kynna að holan væri góð og ekki væri ástæða til að bora dýpra.

Vegna rennslis upp úr holunni voru nokkur kælingarvandamál við að koma öryggis- og vinnslufóðringu fyrir. Holan var kæld með ofanáðælingu þegar 220 m fóðringunni var komið fyrir, en þegar 633 m fóðringunni var komið fyrir var holan kæld með hringdælingu (sjá nánar Jens Tómasson o.fl. 1982 og Hjalti Franzson o.fl. 1982).



MYND 2 Gangur borunar holu NG-6



MYND 3 Mælingar á skolvökva í borun NG-6

2.2 Yfirprýstingur

Þegar borun var lokið í 225 m, rann um 1 l/s upp úr holunni. Þegar lokað var fyrir holuna var toppprýstingur um 1 bar á holutopp, með 20-30°C heita vatnssúlu fyrir ofan æðarnar í 102 og 112 m. Með þessu rennsli hefði tekið um 5 klst fyrir æðarnar að fylla efstu 100 m holunnar.

Þessum æðum var haldið niðri með því að dæla öðru hverju 3 l/s undir 5 bar prýstingi meðan stangir voru teknar upp og fóðurrör látin niður. Ákveðið var að sleppa öllum mælingum á holunni nema hitamælingum, enda tæknilega örðugt að mæla við slíkar aðstæður.

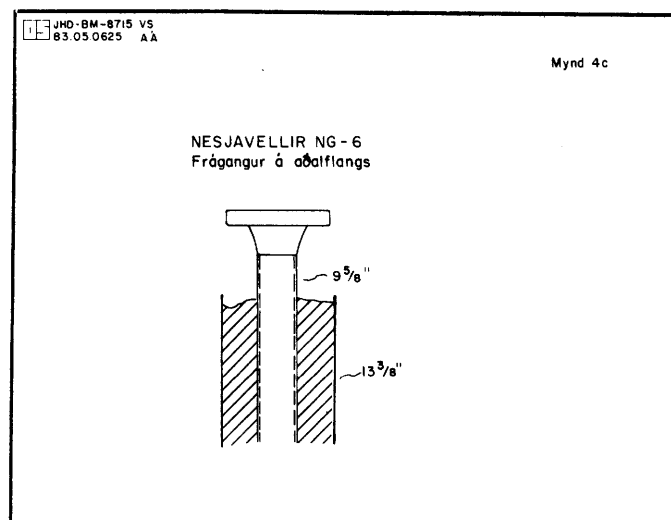
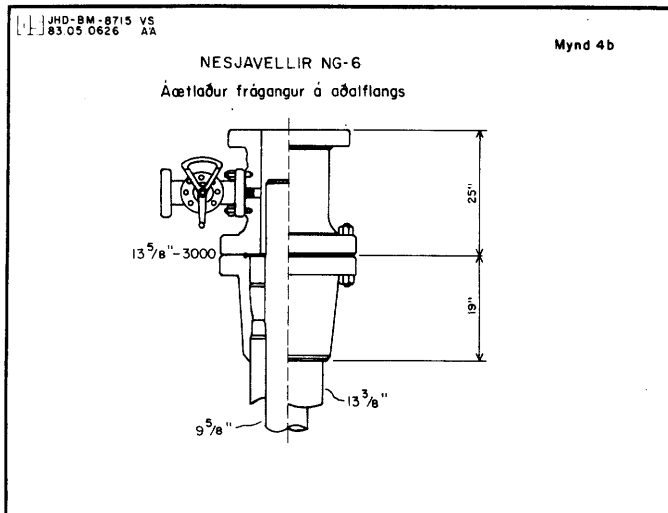
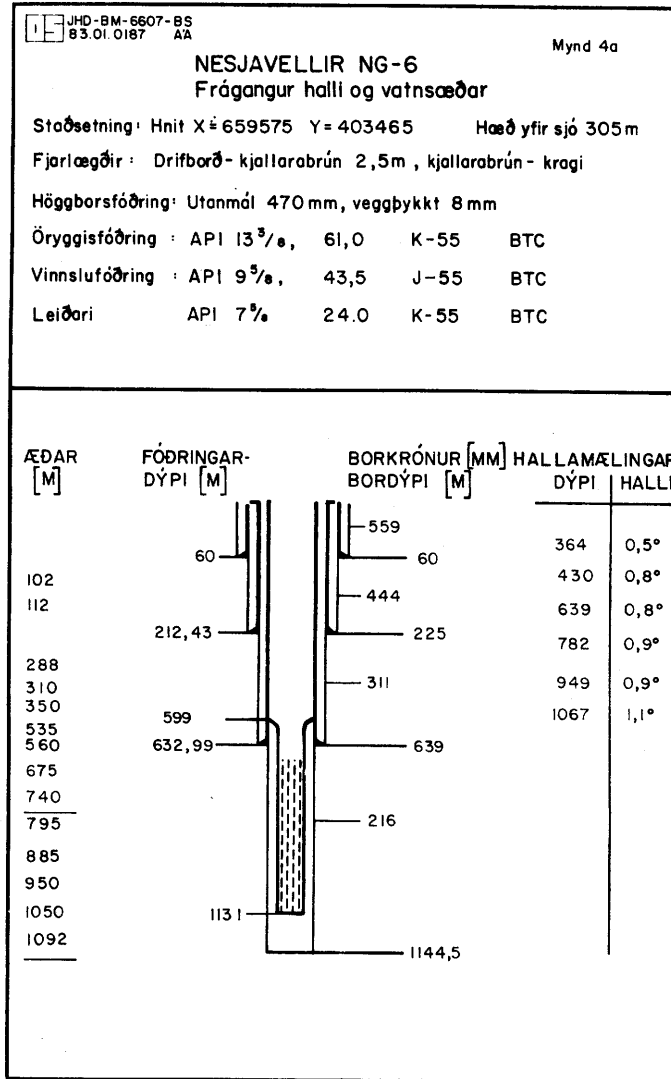
Eftir að borun lauk í 639 m seytleði upp úr holunni. Reynt var að dæla á holutopp undir prýstingi en það reyndist gagna lítið til kælingar á holunni og var því holan kæld með hringdælingu í 8 klst, áður en upptekt hófst. Eftir upptekt var fylgst náið með upphitun holunnar á meðan holan var víddar- og nifteindamæld. Í lok borunar var vatnsborð niðri á 230 m dýpi og tók æðin í 1092 m við öllu skolvatninu.

2.3 Hönnun og frágangur holu

Hola NG-6 er hönnuð á svipaðan hátt og nú tíðkast á íslenskum háhitasvæðum. Dýpt steyptra fóðringa var miðuð við að holan væri boruð í allt að 2000 m dýpi.

Endanlegur frágangur holu er sýndur á mynd 4a. Þar koma einnig fram niðurstöður hallamælinga í borun og staðsetning vatnsæða í holunni.

Í upphafi var áætlað að aðalflangs holu væri festur á 13 3/8" fóðurrör svo sem sýnt er á mynd 4b. Framkvæmd verksins varð hins vegar sú sem sýnd er á mynd 4c. Þessar breytingar voru gerðar vegna þess að eftir steypingu á 9 5/8" fóðurröri kom í ljós svo mikil hliðrun á miðjustillingu fóðurröranna að ómögulegt reyndist að koma fyrir þeim frágangi sem áætlaður hafði verið. Var þá gripið til þess ráðs að sjóða aðalflangs á 9 5/8" fóðringu eins og sýnt er á mynd 4c. Þetta þýðir að veikasti hluti holunnar er suðan á aðalflangs og fóðurrörið þar rétt fyrir neðan.



MYND 4 Frágangur, halli, vatnsæðar og aðalflangs

3 JARÐLAGASKIPAN

3.1 Jarðlagamyndanir

Á mynd 5 er sýnt jarðlagasnið og niðurstöður borholumælinga í holu NG-6. Aðferðum við gerð jarðlagasniðs er lýst í viðauka 1. Jarðlögin eru flokkuð upp í myndanir, en það eru upphleðsluform sem orðið hafa til á sama jarðsögulega tíma. Í sumum jarðlagamyndunum má greina bergfræðilega undirflokka. Eftirfarandi myndanir hafa verið greindar í holu NG-6:

Basaltmyndun B-1, 0-6 m dýpi. Í þessari myndun er aðeins eitt hraun í þessari holu. Þetta hraun er ólivínþóleiít og er nefnt Nesjahraun (Kristján Sæmundsson 1967).

Bólstrabergsmyndun M-1, 6-88 m dýpi. Þetta eru basaltríkar breksíur og glerjað basalt. Bergfræðilega skiptist þessi myndun í tvennt:

6-38 m dýpi. Plagióklasdílótt þóleiítísk móbergsbreksía, sem er gegnumstungin af einu basaltlagi. Plagióklasdílarnir eru stórir, oft mun stærri en brotkornastærðin, en grunnmassinn hefur þóleiítbasalt kristöllum ásamt siderómelangleri.

38-88 m dýpi. Hópdílótt ólivínþóleiítísk móbergsbreksía. Dílarnir eru mest stjörnulaga þyrpingar af plagióklaslistum með stöku pýroxen- og ólivínkristöllum. Grunnmassinn er basalt með ófitískan textúr, oft hlutkristallað, og með mismunandi gleri bæði siderómelan og takkilytískt. Grunnmassinn verður grófkristallaðri með dýpi.

Túffmyndun M-2, 88-188 m dýpi. Dílalaust túff gegnumstungið af einu þóleiítbasaltlagi. Túffið er svolítið breytilegt og gæti vel verið setlag á milli túffsins og bólstrabergsmyndunarinnar. Túffið er mest ummyndað gler sem myndar dreifkorn í túffinu, oft eru glerkornin minni en brotkornastærðin og því er bindiefnið oftast leirsteindir af svipaðri gerð og sá sem ummyndar glerið, en einnig finnast á stöku stað kalsít og zeólítar sem bindiefni. Gler dreifikornin sem eru stærri en brotkornastærðin hafa oft dreifða plagióklaslista en einnig er dreif af hlutkristölluðu basalti, og nokkur nær fersk þóleiítbasaltkorn. Í hlutkristallaða basaltinu er oft mikil oxun og í sumum brotkornum virðist mestallt magnetít farið yfir í hematít eða skyldar steindir. Fyrir ofan basaltlagið eru dreifikornin mjög smá, og gæti það verið fínkornað set.

Plagióklasdólótt túffmyndun M-3, 188-281 m dýpi. Plagióklasdílarnir eru misstórir, flestir þó minni en brotkornastærðin, grunnmassinn er mest ummyndað gler, þar sem gler dreifikornin eru minni en brotkornastærðin og bindiefnið er leir, kalsít og í minna mæli zeólítar. Í þessu túffi er ein basaltrík móbergsbreksía í kringum 220 m dýpi (sjá mynd 5). Basaltríka breksían er einnig dólótt svo þetta er hluti af dólóttu móberginu. Töluvert er af sprungum. Þær eru fylltar kalsíti, og neðst eru kólnunarsprungur í plagióklasi.

Basaltmyndun B-2, 288-343 m dýpi. Basaltlög með þykkum túffkenndum millilögum. Millilögin eru mest takkilytískt og siderómelan gler, einnig eru nokkur setkorn með dreifikornum úr mjög fínkristölluðu þóleiítbasalti. Annars eru seteinkenni ekki mikil en nokkuð mikil oxun. Það væri því hægt að túlka þetta sem bólstrabergsbreksíu. Basaltlögin eru misjafnlega grófkristölluð og mismikið ummynduð. Það er því líklegra að þetta séu basaltlög með millilögum heldur en breksía. Í miðjunni er meðal grófkristallað basalt, mjög mismikið ummyndað. Sum brotkornanna eru aðeins með plagióklaslistana eftir af upprunalegum steindum, einnig eru nærri fersk brotkorn meðal grófkristallað basalt með sömu plagióklaslista og það sem er mest ummyndað. Þetta meðalgrófa basalt virðist einnig vera þóleiít en með fremur lítið af magnetíti. Neðst er fínkristallað þóleiít fremur ferskt.

Móbergsmyndun M-4, 343-528 m dýpi. Glerrík móbergsbreksía með mismiklu magni af basalti. Breksíunni er skipt upp í nokkur lög (sjá mynd 5) að mestu á grundvelli mismunandi kristöllum t.d. í næst neðsta laginu er kristöllun hverfandi. Basaltmagnið er oftast mest á laga-mótum. Nærri öll glerdreifikorn eru stærri en brotkornastærðin og virðist glerið hafa verið bæði takkilytískt og siderómelan gler. Oftast er glerið með plagióklaslistum og er meira af þeim í takkilytíska glerinu. Ekki eru alltaf skýr mörk á milli takkilytíska glersins og hlutkristallaða basaltsins, þar sem hlutkristöllunin byrjar oft með smádílum í takkilytíska glerinu. Kristalmagnið smávex upp í það að vera alkristallað. Kristalínsku brotkornin eru tvenns konar, meðal grófkristölluð brotkorn oft með ófitískan textur eða fremur ferskt og mjög fínkristallað basalt með þóleiítískan textúr. Þetta virðist vera kristöllunarmunur því hvort tveggja finnast í sama brotkorni.

Plagióklasadólótt basaltrík móbergsmyndun M-5, 528-620 m. Breksían er talsvert misjafnlega kristölluð. Stöku basaltlög eru skráð á sniðið,

Þau tilheyra þessari sömu myndun því þau eru jafndílótt og þessi bergmyndun, sem þó er hér minna kristölluð. Plagióklasdílarirnir eru misstórir, þeir stærstu eru talsvert stærri en brotkornastærðin (12-13 mm í þvermál) og niður í 1 mm í þvermál. Glerið er mest takkilytískt með plagióklaslista og sömu listarnir eru hlutkristallaðir og í kristallaða basaltinu. Basaltið og hlutkristallaða basaltið er meðalgrófkristallað, oft með ófítískan textúr og oft er ilmenít ráðandi í stað magnetíts, gæti verið einkenni á ólivínþóleiíti.

Þóleiítbasaltmyndun, B-3 620-848 m dýpi. Þetta eru þóleiítbasaltlög sem mörg hver eru aðskilin með móbergs setlögum. Þykkasta setlagið er um 30 m þykkt. Þetta er mjög túffkennt set með gler, plagióklas, pyroxen og basalt dreifikornum. Dreifikornin eru oft ávöl einkum basaltið. Bindiefnið er oftast leirsteindir af svipaðri gerð og það sem ummyndað hefur glerið. Inn á milli þóleiítlaganna koma fyrir meðalgrófkristölluð ólivín-þóleiítlög og á mynd 10 sést að ólivín er fremur algengt í berginu. Þóleiítbasalt er fremur ferskt, svolítið misjafnlega grófkristallað en yfirleitt er það allt fremur fínkristallað og dílalaust nema fyrir neðan 790 m koma fram einstaka plagióklasdílar.

Móbergsmýndun M-6, 848-980 m dýpi. Þessari myndun má skipta í þrennt:

840-890 m dýpi. Móbergstúff. Þetta er túff sem hefur verið að mestu leyti siderómelangler en er nú ummyndað yfir í leir. Það er dílalaust ef frá er talin stöku plagióklaslistar, og eru gler deifikornin stærri en brotakornastærðin. Efst gæti verið setlag.

890-954 m dýpi. Basaltrík móbergsbreksía, sem er mest takkilytískt gler með plagióklaslista og hlutkristallað basalt, oft með fjaðurpyroxen, einnig er nokkuð af kristölluðum basaltbrotkornum. Basaltið og hlutkristallaða basaltið er dílalaust meðalgrófkristallað basalt og hefur oft ófítískan textúr. Lagið virðist vera ein bergfræðileg heild.

954-980 m dýpi. Mjög fínkorna túffkennt set með dreifikorn af gleri og plagióklas 0,01-0,05 mm í þvermál, bindiefnið er mest grænn leir. Lagið er gegnumstungið af einu 4 m þykku þóleiítbasaltlagi.

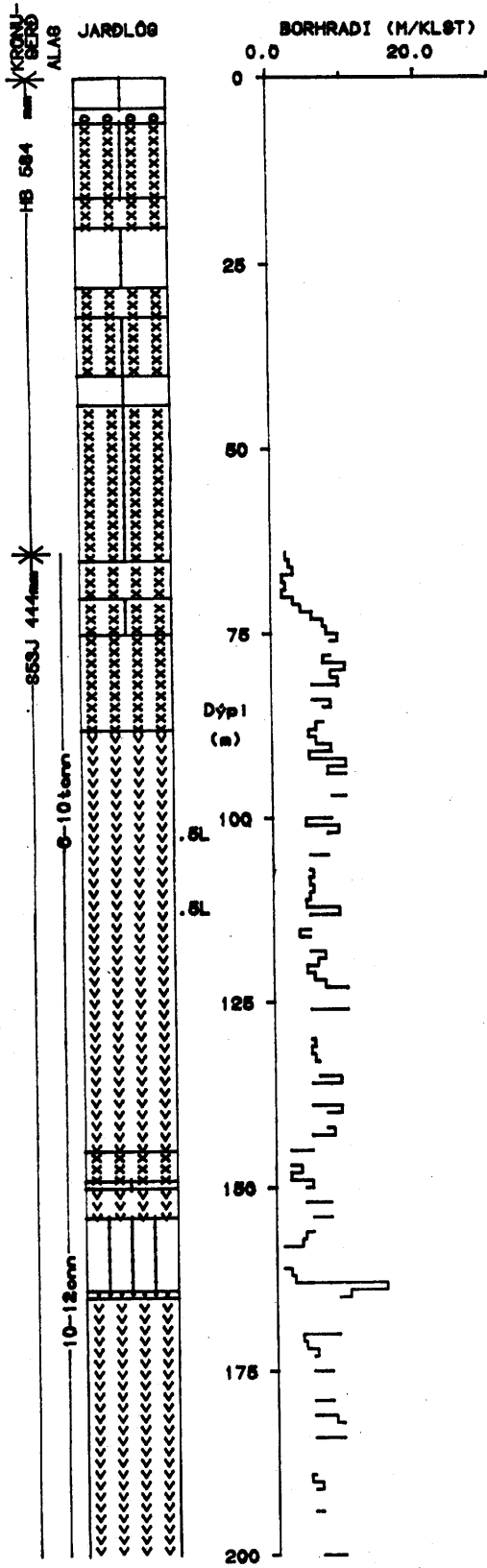
Basaltmyndun B-4, 980-1092 m dýpi. Basaltlög með nokkrum túffkenndum millilögum sem eru einkum neðan til í mynduninni. Einnig er myndunin

gegnumstungin af nokkrum dólerítlögum. Það eru sennilega nokkru fleiri millilög en merkt eru inn á sniðið, því það finnst dreif af fínkorna túffset brotkornum í þeim hluta syrpu þar sem engin millilög eru merkt inn á sniðið. Millilögin eru fínkorna túffkennt set eins og setið neðst í M-4. Neðsta setið, er þó að hluta til mun grófara og þar finnast dreifikorn upp í 1 mm í þvermál. Dreifikorn í þessu seti eru mest takkilytískt gler, ávöl með kvars og kalsít sem bindiefni. Bergfræðilega skiptist þessi syrpa í tvennt.

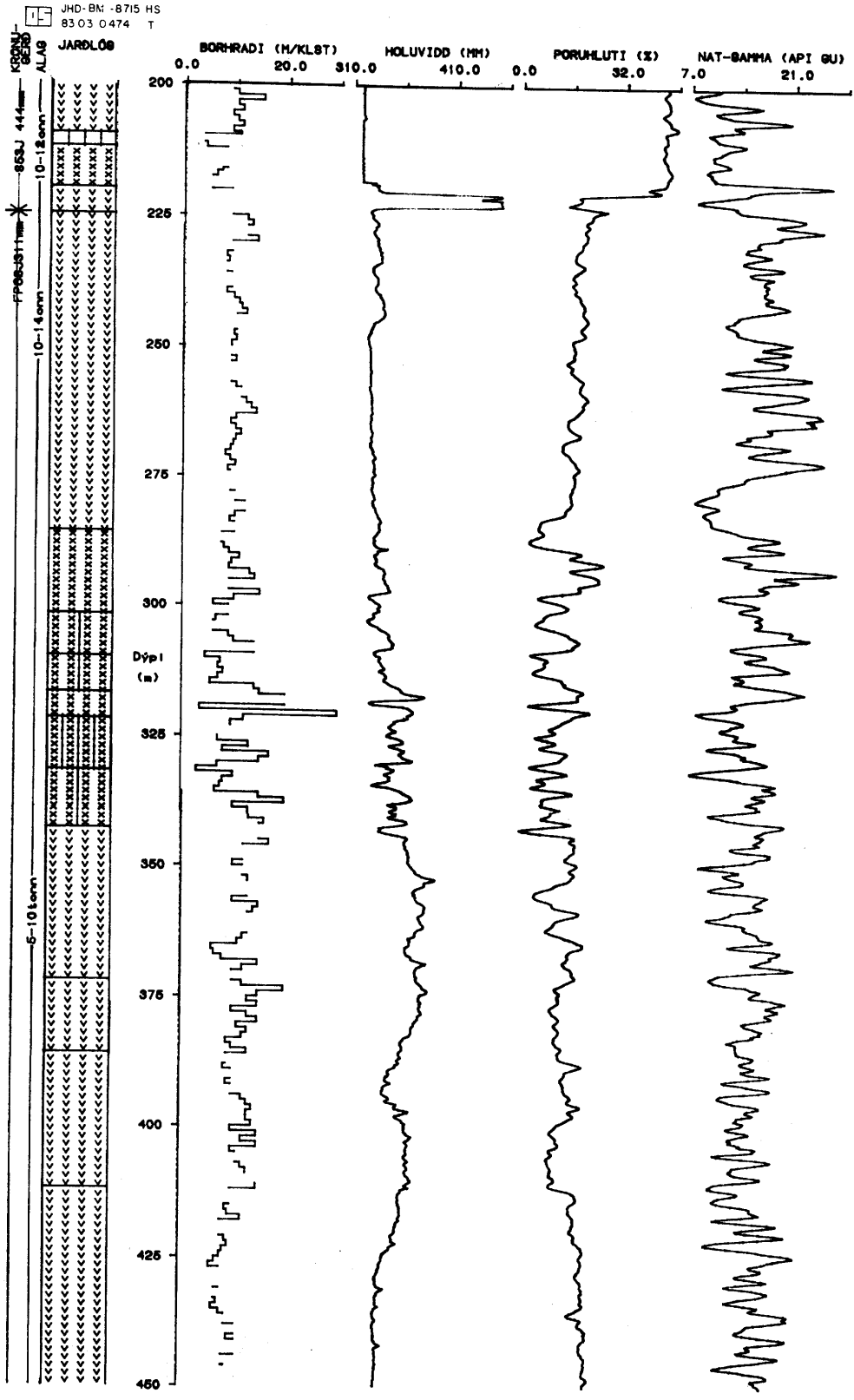
980-1070 m dýpi. Mest meðal- til grófkristallað basalt. Hluti af grófkristallaða basaltinu gæti verið dólerít. Mjög lítið er af málmum í þessu basalti og ekkert ólivín finnst og aðeins smáhluti basaltsins er með ófítískan textúr, þá helst það grófkristallaðasta. Sennilega er þetta millistig milli póleiíts og ólivín-póleiíts.

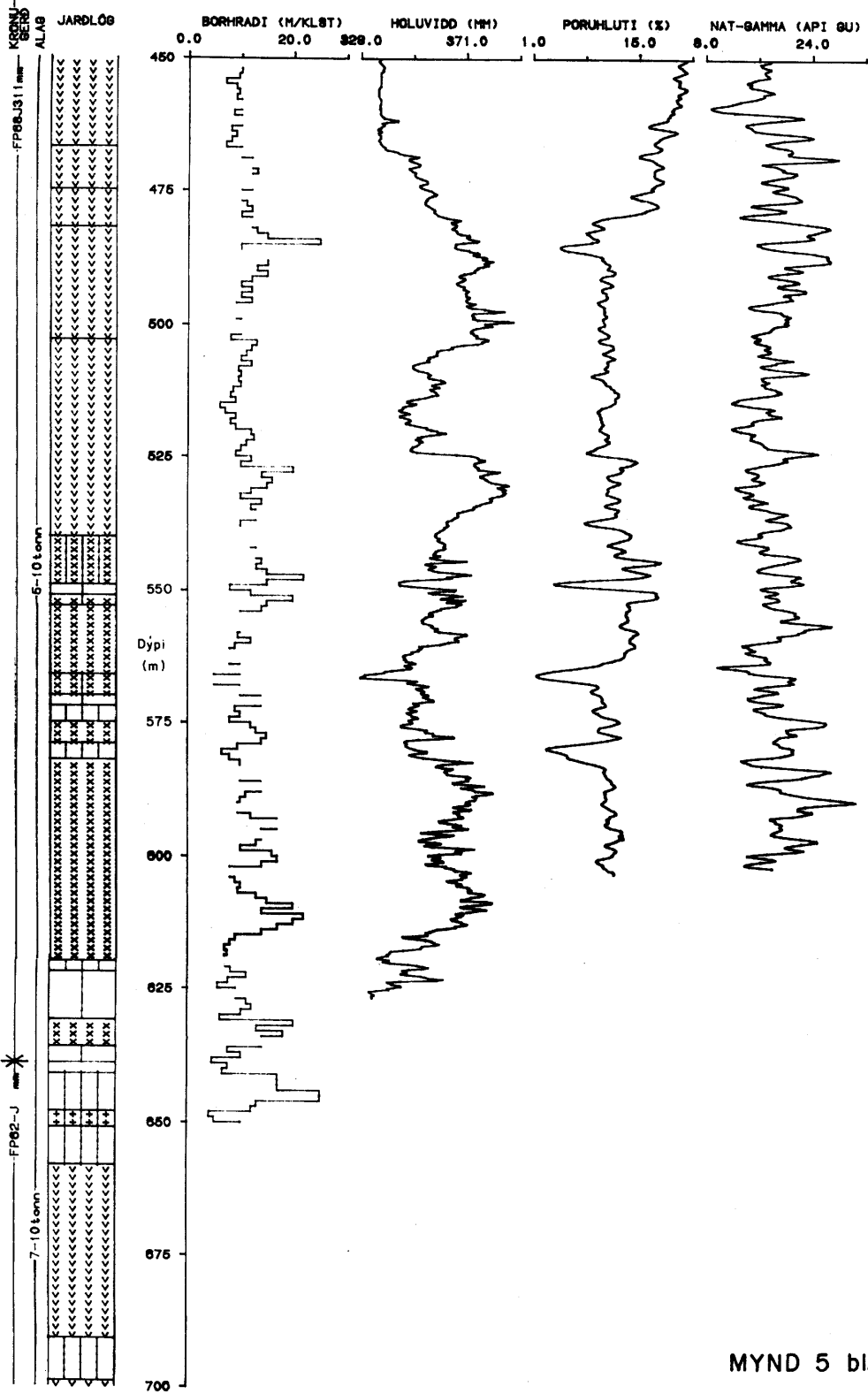
1070-1092 m dýpi. Fremur fersk fínkristölluð og stök plagíóklas-dílótt póleiítlög.

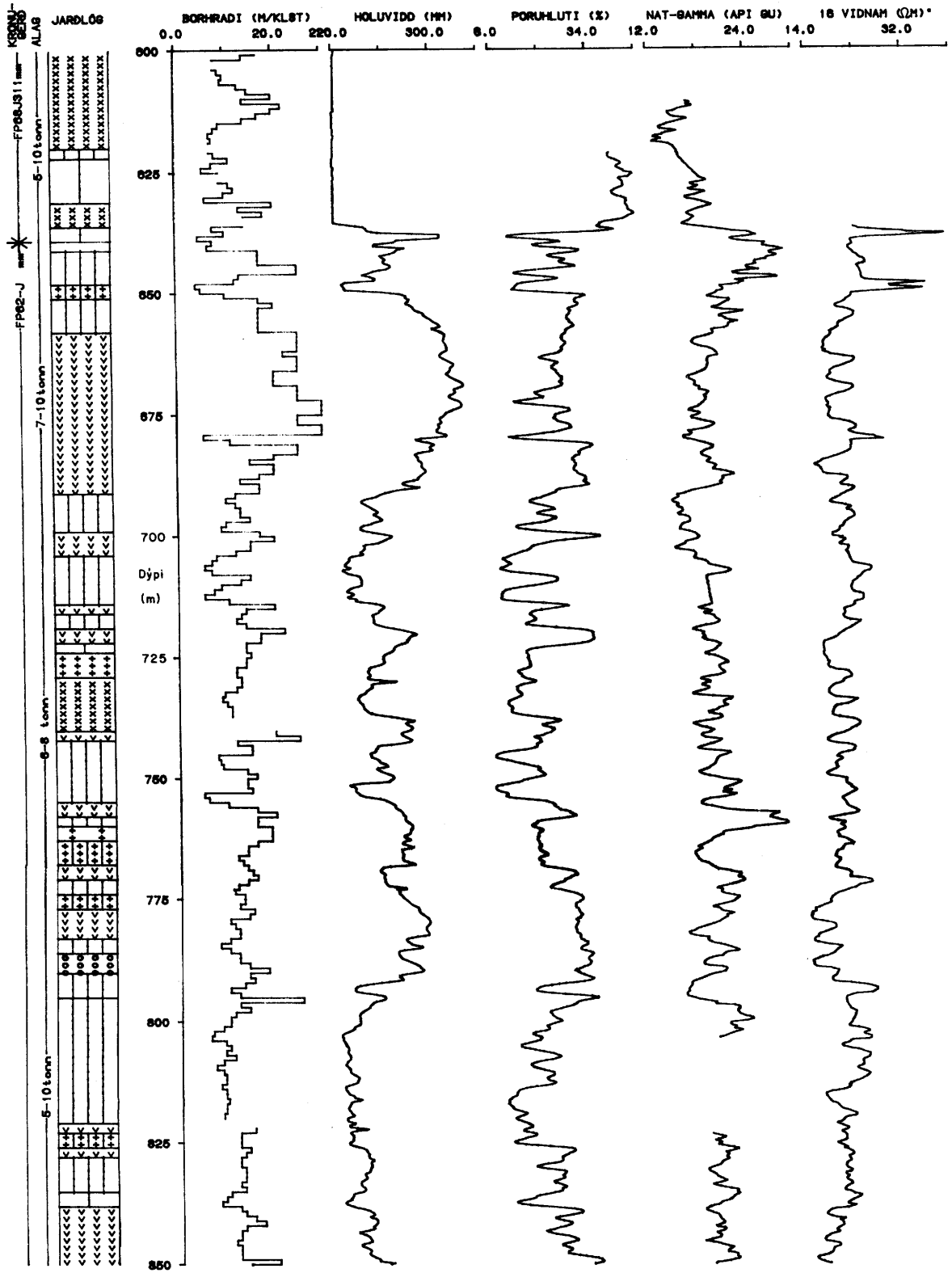
1092-1145 m dýpi. Eins og áður var getið varð algjört skoltap í 1092 m dýpi svo ekkert er vitað með vissu um jarðlög neðan þess dýpis. Við æðina er mikill borhraði, og síðasta sýni fyrir skoltap var úr holufylltu seti.



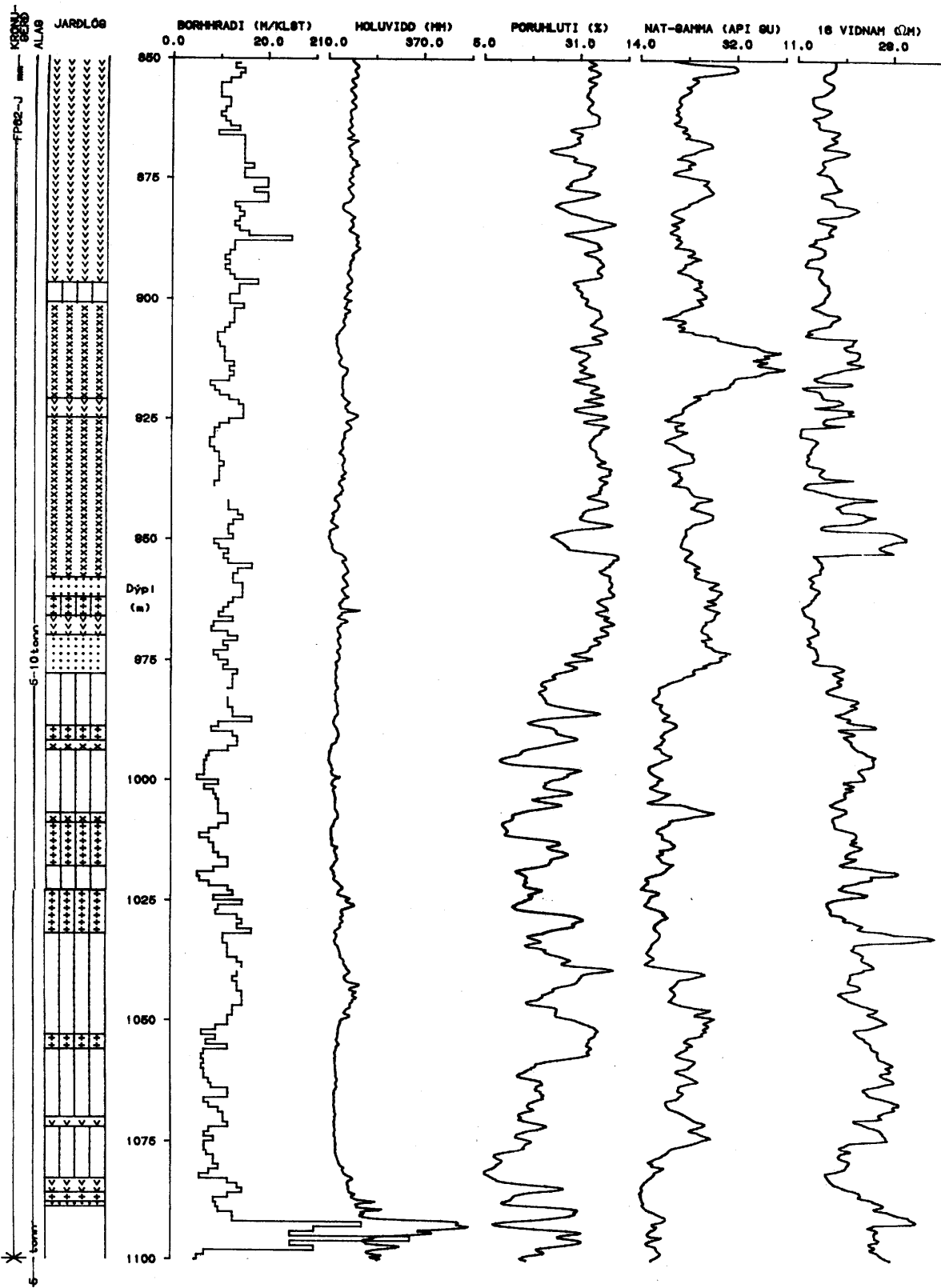
MYND 5 bl. 1 af 6
Nesjavellir, hola NG-6
Jarðlög, borhraði og
borholumælingar

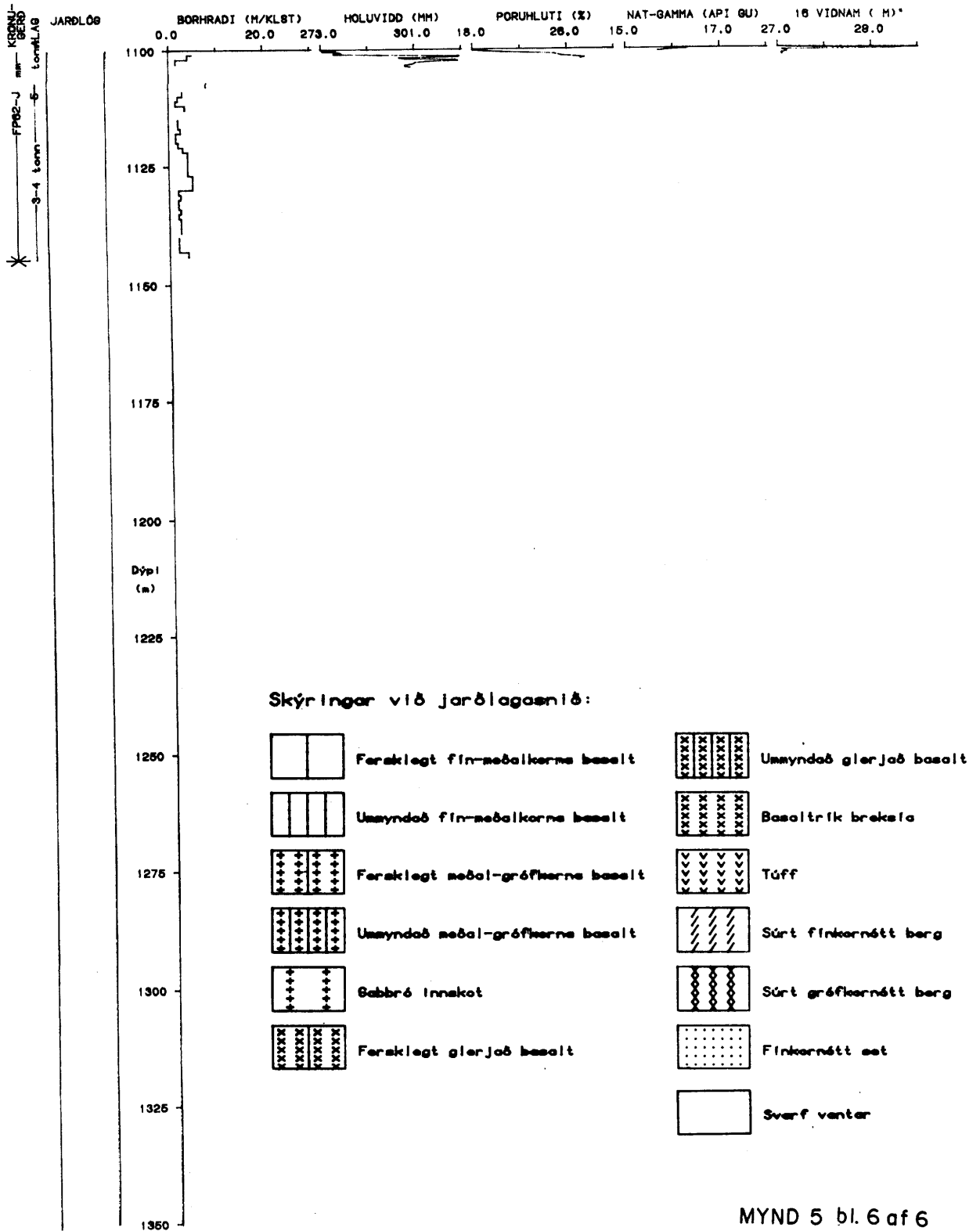






M)





3.2 Poruhluti

Poruhluti bergs í veggjum holunnar er mældur með þeirri aðferð borholumælinga sem kennd er við nifteindadreifingu. Þessari aðferð, svo og öðrum borholumælingum, er lýst í viðauka V-1.

Á mynd 5 er sýndur poruhluti sem fall af dýpi. Þar sést að poruhluti mælist á bilinu 0-40%. Það vekur athygli að poruhluti í basaltmyndunum virðist vera hærri en í móbergi. Af þessum sökum hefur dreifing poruhluta í holunni verið skoðuð nánar.

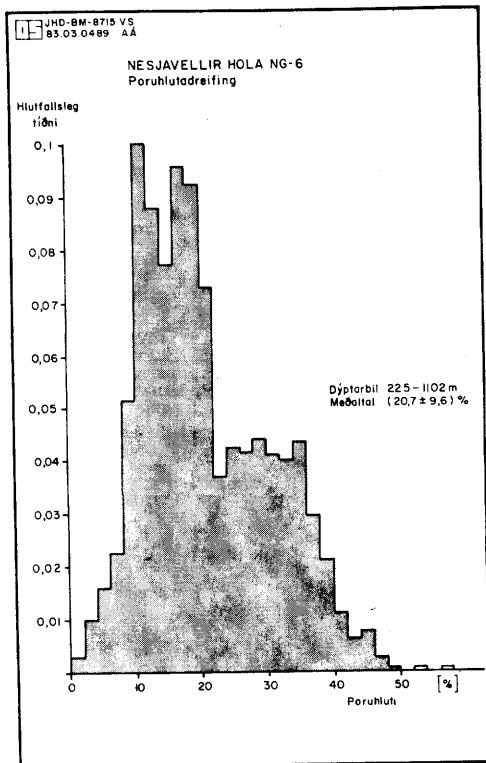
Mynd 6 sýnir poruhlutadreifingu á dýptarbilinu 225-1102 m, sem er allt það dýptarbil sem mælingar ná til. Í þessari dreifingu má sjá a.m.k. tvo toppa, þar sem meðalgildi annars toppsins er um 16% en meðalgildi hins er nálægt 30%. Í raun er fyrri toppurinn tvíklofinn, og mætti því einnig tala um að þrír toppar kæmu fram í dreifingunni. Hágildi þessara toppa væru þá við 12%, 18% og 30%. Tíðnideifing poruhluta á bilinu 225-1108 m er í grófum dráttum þessi:

63% af staflanum með meðal poruhluta 12-18%

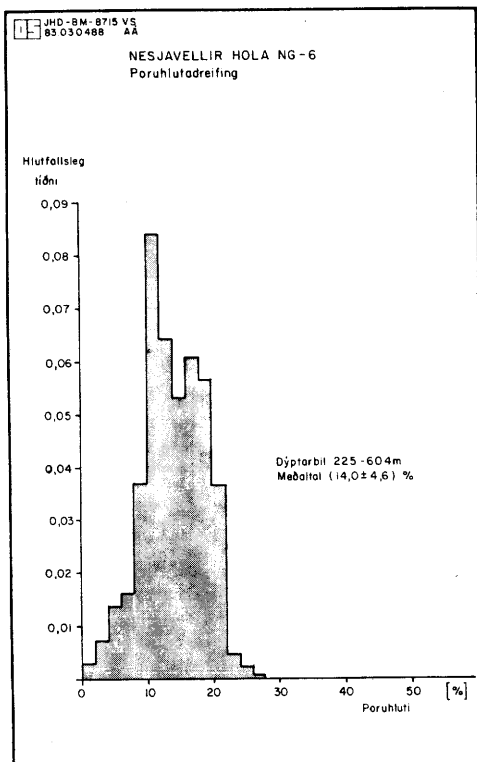
37% af staflanum með meðal poruhluta 30%

Til að athuga nánar þennan mun í poruhluta var holunni skipt í tvö dýptarbil (225-604 m og 620-1102 m) og poruhlutadreifing á hverju dýptarbili athuguð. Mynd 7a sýnir poruhlutadreifingu í efri hluta holunnar (225-604 m) en mynd 7b sýnir poruhlutadreifinguna í neðri hluta holunnar (620-1102 m). Af myndum 6 og 7 sést greinilega að jarðlög með háum poruhluta (ca 30%) eru einkum í neðri hluta holunar, en jarðlög með lægri poruhluta (meðaltal 14% á mynd 7) eru algengari í efri hluta holunnar. Greining jarðlaga (sjá myndir 5 og 9) sýnir að móberg er svo til alls ráðandi í efri hluta holunnar, en basaltmyndanir í neðri hlutanum.

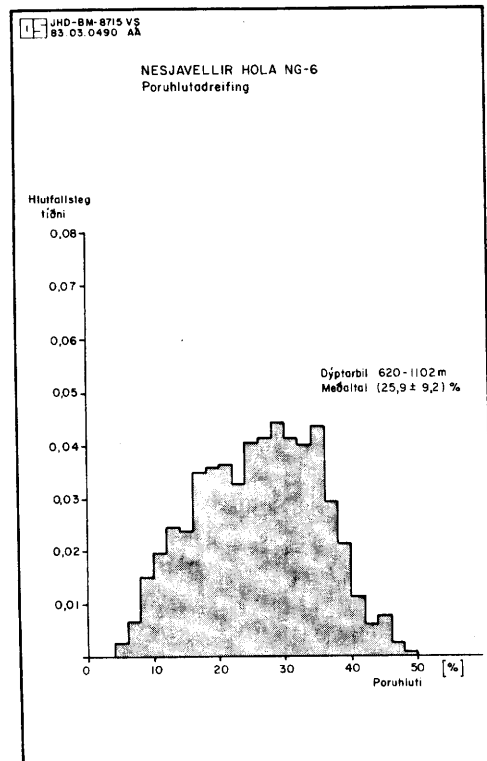
Dreifing poruhluta í mismunandi jarðlögum er sýnd á mynd 8. Þar kemur fram tvískipt dreifing í túffi og breksíu (myndir 8a og 8b) en þau jarðlög eru bæði til staðar í efri og neðri hluta holu. Poruhlutadreifing basalts er að mestu leyti með einum topp (mynd 8c) enda er basalt nær eingöngu að finna í neðri hluta holu (neðan við 600 m dýpi).



MYND 6 Poruhlutadreifing á dýptarbilinu 225-1102 m



MYND 7a. Poruhlutadreifing í efri hluta holu



MYND 7b. Poruhlutadreifing í neðri hluta holu

Skipting poruhluta eftir dýpi í efri og neðri hluta holu kemur mjög greinilega fram þegar einstökum myndunum er skipt í efri og neðri hluta. Myndir 8d og 8e sýna hvernig poruhluti túffs skiptist milli efri og neðri hluta holunnar. Samsvarandi skipting á breksíu er sýnd á myndum 8f og 8g. Á þessum myndum (8d-g) kemur fram að samsvarandi jarðlög hafa mismunandi poruhluta í efri og neðri hluta holunnar.

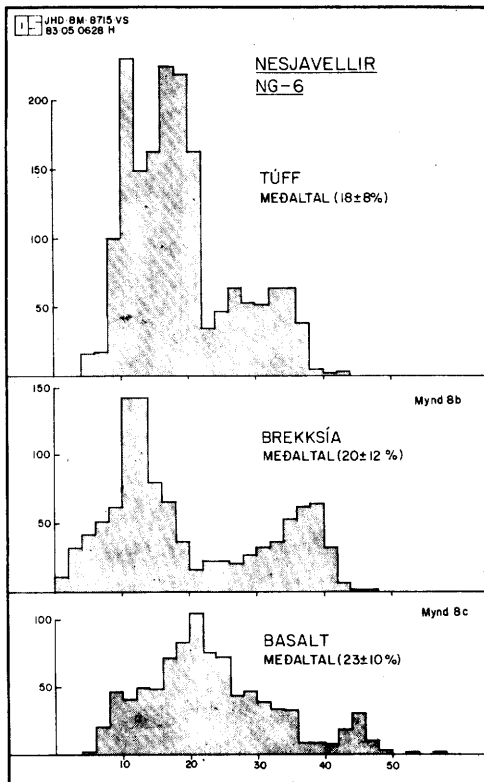
Dreifing poruhluta í holu NG-6 á Nesjavöllum virðist því vera byggð upp af tveimur þáttum. Annars vegar af berggerð (túff, breksía og basalt). Hins vegar af dýpt í holu. Þar sem basalt er því nær eingöngu til staðar í neðri hluta holunnar getur þessi flokkun skekkst eitthvað.

Yfirleitt hefur verið talið að poruhluti móbergsmýndana sé að jafnaði hærri en í hraunlagamyndunum. Fyrirliggjandi poruhlutadreifingar í NG-6 falla illa að þessari skoðun. Skýringar á þessu mismunandi gætu verið:

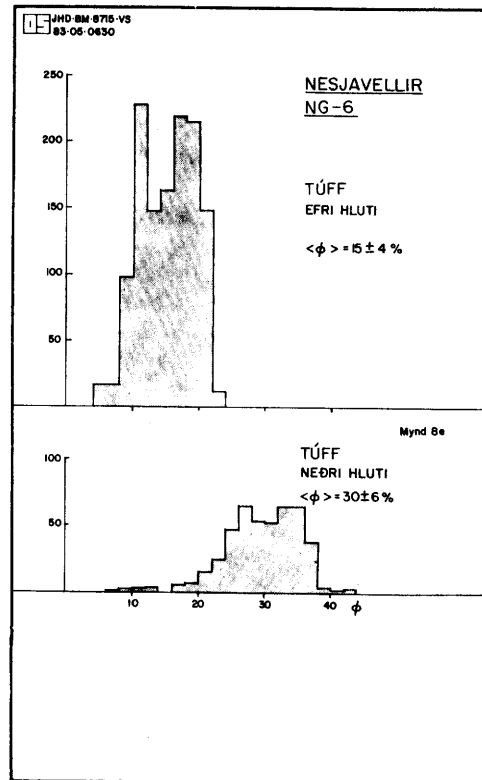
- a) Mælingar í efri hluta (225-604 m) og neðri hluta (620-1102 m) holunnar eru gerðar hvor á sínum tíma og í misvíðum holum. Þessar mismunandi aðstæður gætu hliðrað til poruhlutakvörðun þannig að mismunandi poruhlutadreifingar fást úr mismunandi mælingum. Þessi möguleiki er nefndur hér þó ekki liggja fyrir neinar vísbendingar í mæligögnum um að ástæða sé til að ætla að kvörðunin sé ekki rétt.
- b) Áhrif ummyndunar á mæligidi í nifteinda poruhlutamælingu eru veruleg þannig að meðaltal mælds poruhluta hækkar um 15%.

Nifteindir nema allt það vatn sem fyrir er í berginu, þ.e. bæði vatn í porum eða sprungum í berginu, og einnig bundið vatn í móðurbergi eða ummyndunarsteindum. Ummyndað berg ætti því að öðru jöfnu að sýna hærri nifteindaporuhluta en ferskt berg. Tölulegar upplýsingar um þennan mun hafa fram að þessu ekki legið fyrir.

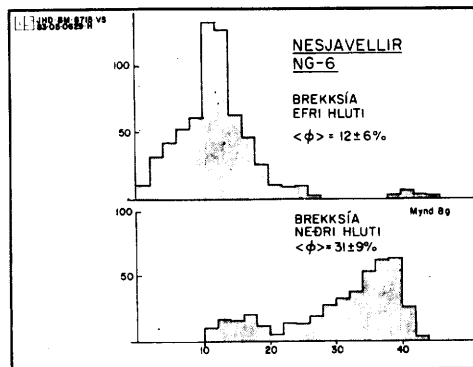
Í kafla 4 er fjallað um ummyndun í holu NG-6. Þar kemur m.a. fram að neðan við 500-600 m dýpi er ummyndun á mun herra stigi en ofar í holunni, og að í neðri hluta holunnar virðist ummyndun vera í jafnvægi meðan mun meiri breytileiki er í ummyndun ofar í holunni.



MYND 8 a, b, c,
Poruhlutadreifing í túffi
breksíu og basalti



MYND 8 d og e
Skipting poruhluta túffs milli
efri og neðri hluta holu



MYND 8 f og g
Skipting poruhluta breksíu milli efri
og neðri hluta holu

Zeólítabelti ummyndunar er talið ná niður fyrir 600 m dýpi, en á næsta 500 m dýptarbili eru greind fjögur ummyndunarbelti (blandlagsleirsteinda-klórít-, klórít-epidót og klórít-aktinólít belt). Það virðast því vera fyrir hendi aðstæður í holu NG-6 sem benda til að túlka megi háa poruhlutann ($\phi=30\%$) í neðri hluta holunnar sem áhrif ummyndunar.

Ef þessi túlkunarmöguleiki er talinn gildur má hugsa sér að poruhlutadreifing eins og fram kemur á myndum 8d og 8f sé nálægt upphaflegri dreifingu í túffi og breksíu, en ummyndun hafi þau áhrif að poruhlutadreifingin verði eins og myndir 8e og 8g sýna.

Framhald þessarar túlkunaraðferðar gæti verið að beita henni á poruhluta basalts (mynd 8c). Þar sem meginhluti basaltmyndana er í ummyndaða hluta holunnar má hugsa sér að basaltið hafi orðið fyrir jafn miklum áhrifum frá ummyndun eins og túff og breksía, eða að meðalporuhluti í ummynduðu basalti sé nálægt 15% hærri en í fersku basalti. Þá mundi eftirfarandi mynd fást af poruhlutadreifingu í bergi á Nesjavöllum.

Meðalporuhluti í bergi á Nesjavöllum

Berggerð	Ferskt	Ummyndað
Túff	15 ± 4	30 ± 6
Breksía	12 ± 6	31 ± 9
Basalt	(8)	23 ± 10

Þessi túlkunaraðferð gefur niðurstöður sem eru í samræmi við þá skoðun að poruhluti í basalti sé að öðru jöfnu minni en poruhluti í móbergi.

Þess ber að geta að sú túlkunaraðferð á poruhlutadreifingu sem hér er viðruð hefur ekki verið reynd áður, og lítið er vitað um gildi hennar. Aðferðin virðist þó vera í samræmi við þær upplýsingar sem fyrir liggja um holu NG-6, og ekki eru þekktar athuganir, sem eru í andstöðu við þessa túlkun.

Að endingu er rétt að benda á að öllum poruhlutadreifingum (myndir 6,

7 og 8) er hlutfallsleg tíðni poruhluta nálægt núlli lág. Þetta er túlkað á þann veg að innskot séu fá í holu NG-6. Þessar niðurstöður eru í samræmi við jarðlagagreiningu (sbr. kafla 3.1).

3.3 Tenging jarðlaga

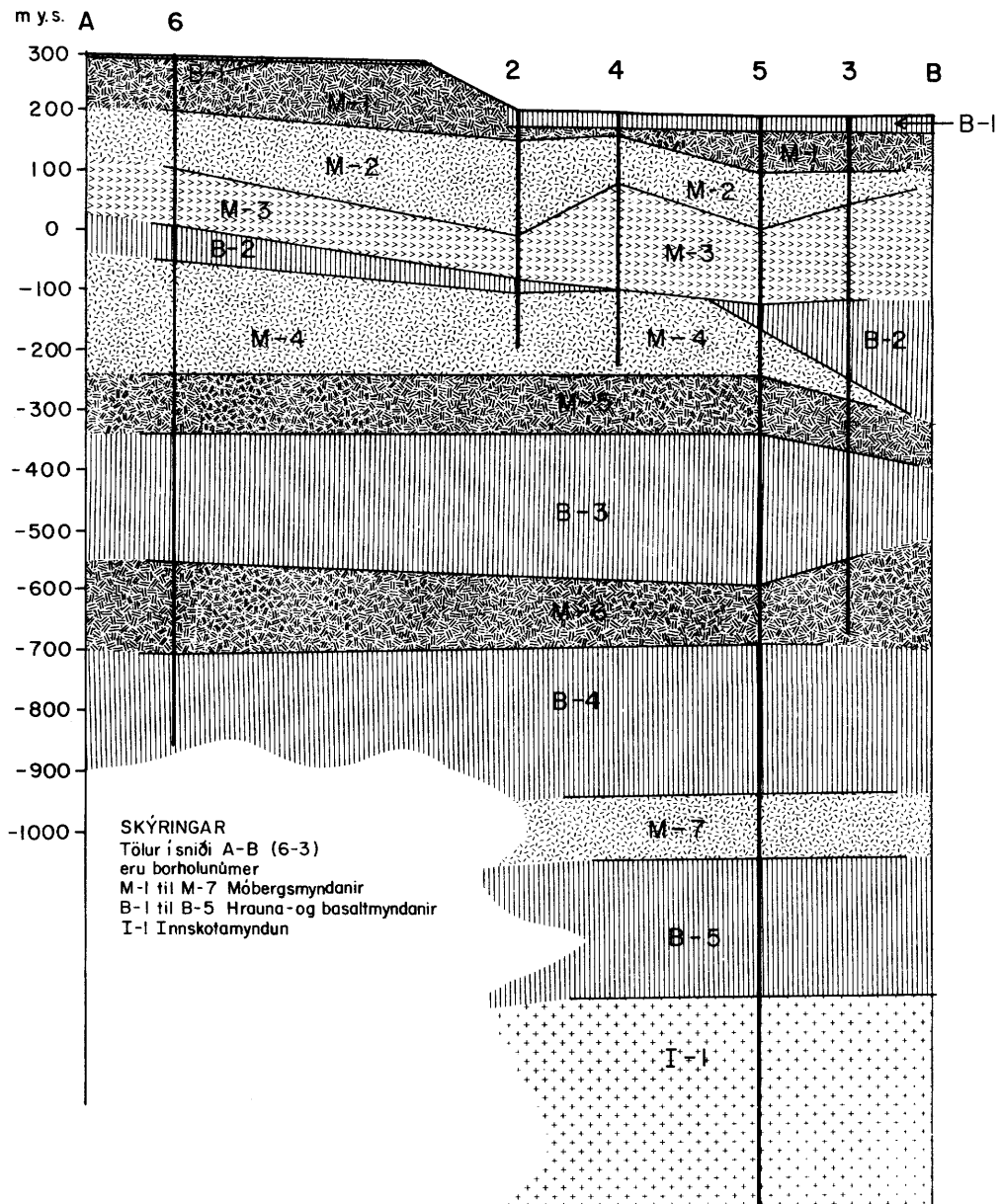
Á mynd 9 hafa jarðlagamyndanir verið tengdar á milli hola. Á mynd 1 er sýnt hvernig sniðið liggur og er holunum varpað þvert á sniðlínuna. Í þessum tengingum hafa allar lýsingar á jarðlögum í holum 2-5 verið teknar úr fyrri skýrslum Jarðhitadeildar um Nesjavallasvæðið (Jens Tómasson og Kristján Sæmundsson 1967, Jens Tómasson o.fl. 1971, Jens Tómasson o.fl. 1974). Eftirfarandi skipting er bergfræðileg en einnig er tekið tillit til hvernig jarðmyndunin varð til t.d. móberg eða kristallað berg. Jarðlögum er skipt upp í eftirfarandi jarðlagamyndanir og byrjað efst í jarðlagastaflanum, en einnig er stutt lýsing á hverri myndun.

B-1 Hraunmyndun. Allar holurnar eru boraðar í Nesjahrauni og í sumum holum eru eitt til tvö hraun undir því. Þessi hraun eru næstum öll ólivínþóleiít. Þykkt þessarar jarðlagamyndunar er 5-30 m.

M-1 Móbergsmýndun. Plagióklasdílótt móbergsbreksía. Myndunin er nokkuð misjafnlega basaltrík, mest í holum NV-2 og NG-6, en í öðrum holum er grunnmassinn mun túffkenndari, mest siderómelan gler. Plagióklasdílarnir eru oftast stórir og að magni til allt upp í 6% af berginu. Í holu NG-6 er þessi syrpa tvískipt, í neðri hlutanum eru stjörnulaga plagióklasdílar í ólivínþóleiítiskum grunnmassa, í holu NV-2 er M-1 lagið eins og neðra lagið í holu NG-6. Í holu NV-5 er M-1 lagið einnig tvískipt en þar er því á annan veg farið að efri hlutinn er glerríkur en sá neðri glerjað ólivínþóleiít með sömu stóru plagióklasdílanum og í efri hluta lagsins. Fremur lítil ummyndun er í þessari myndun og er mikið af fersku gleri í öllum holunum. Þessi myndun er 30-100 m þykk og er þynnst í holu NG-4.

JHD-BJ-8715-JT,
83.03.0329 AA

NESJAVELLIR ÞVERSNID JARÐLAGA



MYND 9 Nesjavellir - þversnið jarðlagamyndana

M-2 Móbergsmýndun. Dílalaus glerrík móbergs- eða túffbreksía, gegnumstungin af einu til tveimur þóleiítbasaltlögum. Túffið er nokkuð setkennt. Efst er líklegt að sé þunnt setlag á milli túffsins og plagióklasdílóttu móbergsbreksíunnar fyrir ofan í nærri öllum holunum. Túffið er siderómelangler misjafnlega ummyndað. Ferskt gler finnst einkum í afmörkuðum rásum, en meginhluti glersins er ummyndaður, og kemur fram sem dreifikorn í túffinu. Oft eru glerkornin minni en brotkornastærðin, og er bindiefnið oftast leirsteindir af svipaðri gerð og sá sem ummyndar glerið en einnig er kalsít og zeólítar sem bindiefni. Gler dreifikornin sem eru stærri en brotkornastærðin eru oft með dreifða plagióklaslista. Einnig finnst takkilytiskt gler, hlutkristallað basalt og nokkur dreif af nærri ferskum þóleiítbasalt brotkornum. Í hlutkristallaða basaltinu er oft mikil oxun og í sumum brotkornum virðist mestallt magnetítið farið yfir í hematít eða skyldar steindir. Oxun er mikil í þessu lagi einkum áberandi í holu NG-4. Mýndunin er mjög svipuð frá einni holu til annarar, helsti munurinn er að magn kalsíts í bindiefnum er mismikið á milli hola, og svo áðurnefnd oxun. Þykkt þessarar myndunar er frá 70-170 m og er þynnst í holu NV-3 og þykkust í holu NV-2.

M-3 Móbergsmýndun. Plagióklasdílótt túff með basaltríkum linsum sem einnig eru plagióklasdílóttar. Plagióklasdílarnir eru misstórir og er þetta misjafnt á milli hola, stærstir í holu NG-4, en í hinum holunum eru þeir minni. Dílamagnið er misjafnt bæði innan hvernar holu og einnig á milli hola, mest í holu NG-4 (upp í 22%). Grunnmassinn er mest ummyndað siderómelangler, þar sem glerdreifikornin eru oft minni en brotkornastærðin og bindiefnið er leir, kalsít og í minna mæli zeólítar. Mýndunin er frá 90-180 m á þykkt og er þynnst í holu NV-2 en þykkast í holu NG-4. Hóla NG-4 er því talin liggja næst gígnum sem myndaði þetta gos. Í holu NG-4 er neðsti hluti myndunarinnar basaltrík breksía, síðan tekur við túff en efst er túffið mjög setlegt. Í holu NV-3 og NG-5 er basaltlag á milli M-3 og M-2.

B-2 Basaltmýndun. Í þessari myndun er bæði þóleiít og meðal- til grófkristallað ólivínþóleiít með þykkum túffkenndum millilögum. Þessi myndun er misþykk, hana vantar í holu NG-4 og í holu NV-3 er hún þykkust 150 m þar sem mest ber á þóleiítlögum.

M-4 Móbergsmýndun. Glerrík móbergsbreksía með breytilegu magni af basalti. Enginn munur virðist vera á breksíunni á milli hola. Nærri öll glerdreifikornin eru stærri en brotkornastærðin. Glerið er bæði siderómelangler og takkilytiskt gler meira og minna ummyndað. Ferskt gler

finnst í þessu lagi. Glerið er með plagióklaslistum og virðist vera meira af plagióklaslistum í takkilytiska glerinu. Auk glersins finnst hlutkristallað basalt sem er stundum með fjaðurpýroxen og svo finnast bæði póleiít og ólivínþóleiítísk brotkorn í þessu lagi. Þessi myndun er misþykk (35-200 m) og þynnist til norðurs. Hún er þykkust í holu NG-6 og þynnst í holu NV-3.

M-5 Móbergsmýndun. Plagióklasdílótt basaltrík móbergsbreksía. Hugsanlegt er að þetta séu basaltlög með þykkum túffkenndum millilögum. Þetta virðist vera plagióklasdílótt ólivínþóleiít. Þessi lög eru nokkuð misjöfn á milli hola, t.d. er allt dílótt í holu NG-6 en í holu NV-3 er bæði dílótt og svo ólivínþóleiít, mjög grófkristölluð lög með ófitískan textur. Myndunin er mjög jafnþykk og er í kringum 100 m.

B-3 Basaltmyndun. Þóleiít myndun með þykkum millilögum sem eru oftast túffkennt set. Þetta eru að langmestu leyti þóleiítlög nema efst í holu NV-3 er um 50 m þykk lög af ólivínþóleiíti oft dílóttu. Þessi myndun er um 200-250 m þykk og er þykkust í holu NG-5.

M-6 Móbergsmýndun. Í þessari myndun skiptast á túff, basaltrík breksía og set. Mest túff er efst í laginu í holu NG-6. Basaltrík breksía finnst í öllum holunum einnig er neðst í bæði holu NG-5 og NG-6 allþykkt túffkennt set. Þykkt þessarar myndunar er 100-150 m.

B-4 Basaltmyndun. Þetta er basaltmyndun með frekar litlum millilögum. Ólivínþóleiít og þóleiít skiptast á innan þessarar myndunar. Hola NG-6 endar í þessari myndun en hún nær niður á 1110 m í holu NG-5.

M-7 Móbergsmýndun. Aðeins í holu NG-5 á 1110-1240 m dýpi. Hún er að langmestu gerð úr glerríkri móbergsbreksíu með nokkrum ferskum basaltþrepum sem eru væntanlega gangar. Auk þess eru tvö ummynduð basaltlög í þessari myndun og er annað ólivínþóleiít, hitt þóleiít. Epidót finnst fyrst í þessari myndun.

B-4 Basaltmyndun 1240-1470 m. Hér skiptast á ólivínþóleiít og þóleiítlög með talsverðu af túffkenndum millilögum.

I-1 Innskotamyndun 1470-1804 m. Þetta eru mest dólerítinnskot.

4 UMMYNDUN

4.1 Greiningaraðferðir

Þegar jarðhitavatn leikur um berg tekur það að ummyndast. Hraði ummyndunar svo og ummyndunarstig er komið undir mörgum samverkandi aðstæðum, en af þeim er hitastig og vatnsleiðni einna áhrifamest. Líta má á ummyndun frá tveimur sjónarhornum; annars vegar áhrif jarðhitans á frumhluta bergsins, svo sem gler, ólivín, pýroxen og plagióklas, og hins vegar hvaða og hve mikið jarðhitavökvinn hefur myndað af steindum. Þrjár rannsóknaraðferðir eru hér notaðar til þess að fá sem besta heildarmynd af ummyndunarmynstrinu. Er þar fyrst um að ræða svarfgreiningu með stereósmásjá þar sem hvert sýni sem tekið er, er athugað. Í annan stað voru valin 120 þunnsneiðarsýni og þau skoðuð í bergfræðismásjá, og í þriðja lagi voru valdar steindir greindar með röntgen diffraksjón (XRD). Í síðastnefndu greiningunni voru sýnin greind á tvennan hátt, annars vegar 33 sýni af steindum, og hins vegar 73 sýni af leirsteindum. Dreifing sýnanna er sýnd á mynd 11.

Ummyndunarrannsóknir á háhitasvæðum gefa margs konar upplýsingar. Gerðir ummyndunarsteinda gefa vísbendingu um hita sem nú ríkir eða hefur ríkt í jarðhitageyminum, og stöku steindir geta gefið vísbendingu um efnasamsetningu jarðhitavökvans. Magn myndbreytingar getur sagt til um vatnsgæfni jarðlaga og legu vatnsæða.

4.2 Ummyndun frumsteinda og glers

Á mynd 10 er sýnt ummyndunarstig frumsteinda og glers eins og það var greint í 120 þunnsneiðum. Samræmi er yfirleitt á milli þess sem í svarfgreiningu (stereósmásjá) er greint sem ummyndað og þess sem í þunnsneiðargreiningum sést að plagióklas og pýroxen eru tekin að ummyndast.

Gler. Breytilegri ummyndun glers í berglögum holunnar má skipta í eftirfarandi dýptarbil:

- i Ofan 90 m dýpis er ummyndun glers hverfandi.
- ii Frá 90 m niður á 350 m dýpi er meirihluti glersins ummyndaður. Innan þessa dýpis má greina aukningu í ummyndun milli 100-200 m er rúmlega helmingur glersins ummyndaður, á milli 200-300 m mikið til ummyndað og frá 300-350 m telst allt gler ummyndaður.
- iii Frá um 350 m niður á 525 m dýpi, (mið- og neðri hluti M-4), telst aðeins um helmingur glersins vera ummyndaður.
- iv Frá 525 m niður á um 700 m dýpi er ummyndunin breytileg en telst þó mun meiri en á næsta dýptarbili fyrir ofan.
- v Frá um 700 m og niður á botn holunnar telst nær allt gler hafa ummyndast. Þó er á undantekning þar sem á milli 850-900 m sést enn nokkuð af ferskum glerkornum.

Breytileiki í ferskleika eða ummyndun glersins virðist á grundvelli svarf- og þunnsneiðagreininga stafa af fjórum orsökum:

- a) Hækkandi hita með dýpi.
- b) Berggerð virðist eiga hér hlut að máli, því víða þar sem móbergstúff er ráðandi er ummyndun glersins í lágmarki, en þar sem bergið hefur náð að kristallast að einhverju marki (basaltrík breksía, glerjað basalt, fín-meðalkorna basalt) er ummyndun að jafnaði mun meiri.
- c) Eins og sést á mynd 10 er nokkur munur á hvað ummyndun glersins er meiri á milli 100-300 m dýpis en á milli 350-525 m en á þessu dýptarbili er mjög glerrík breksía (M-4 sbr. mynd 9). Í þunnsneiðagreiningum er almennt reynt að athuga hve sprungufyllingar voru algengar. Kemur þar m.a. í ljós að slíkar fyllingar eru áberandi fleiri í efra dýptarbilinu en því neðra (sjá mynd 10). Er því nokkuð sennilegt að öllu meiri lekt sé í efri hlutanum eftir sprunguflötum og hafi það stuðlað að meiri ummyndun glersins.
- d) Greinilegt er, að þar sem þunnsneiðarsýni eru nærri vatnsæðum er ummyndun glersins að jafnaði meiri en fyrir ofan og neðan.

Glerið ummyndast alls staðar yfir í leirsteindir nema á tæplega 570 m dýpi sér votta fyrir ummyndun þess í kvars (hitamæling sýnir vatnsæð nærri 560 m) og á tæplega 900 m og 1030 m sér votta fyrir kalsíti.

Ólivín er oft til staðar í basísku bergi en jafnan í litlu magni. Þar sem ólivín fannst ofan 90 m reyndist það ferskt, en það sem finnst neðar í holunni er næstum alltaf ummyndað. Ólivínið ummyndast undantekningalaust yfir í leirsteindir.

Pýroxen telst ferskur niður á 550 m, ef frá er talið dýptarbilið 310-340 m þar sem örlar á ummyndun hans. Frá 550-770 m er hann ýmist ferskur eða að byrja að ummyndast. Neðan 700 m er ummyndunin breytileg en þó öllu meiri og sums staðar er allt að helmingur hans horfinn. Pýroxeninn er á sama hátt og glerið mun ferskari þar sem hann hefur náð að kristallast innan móbergstúffs en þar sem hann er innan basaltríkrar breksíu, glerjaðs basalts eða fín- meðalkorna basalts. Ummyndun pýroxens er yfirleitt mun meiri þar sem sýni eru tekin við vatnsæðar heldur en fyrir ofan og neðan. Pýroxen er undantekningalaust ummyndaður yfir í leirsteindir.

Plagióklas Ummyndun plagióklas er mjög áþekk ummyndun pýroxen. Að undanteknu dýptarbilinu 300-340 m þar sem vottar fyrir ummyndun hans, þá telst hann ferskur niður á um 550 m dýpi. Þar fyrir neðan er ummyndun hans mjög breytileg, en er yfir höfuð heldur minni en pýroxensins. Á sama hátt og með ummyndun pýroxensins, þá er plagióklasinn innan móbergstúffsins áberandi minna ummyndaður heldur en þar sem bergið er meira kristallað. Plagióklas ummyndast að mestu í leirsteindir. Neðan 850 m dýpis ummyndast hann einnig yfir í albít. Neðan 1000 m sést vottur þess að hann ummyndast yfir í epidót, prenit og kalsít.

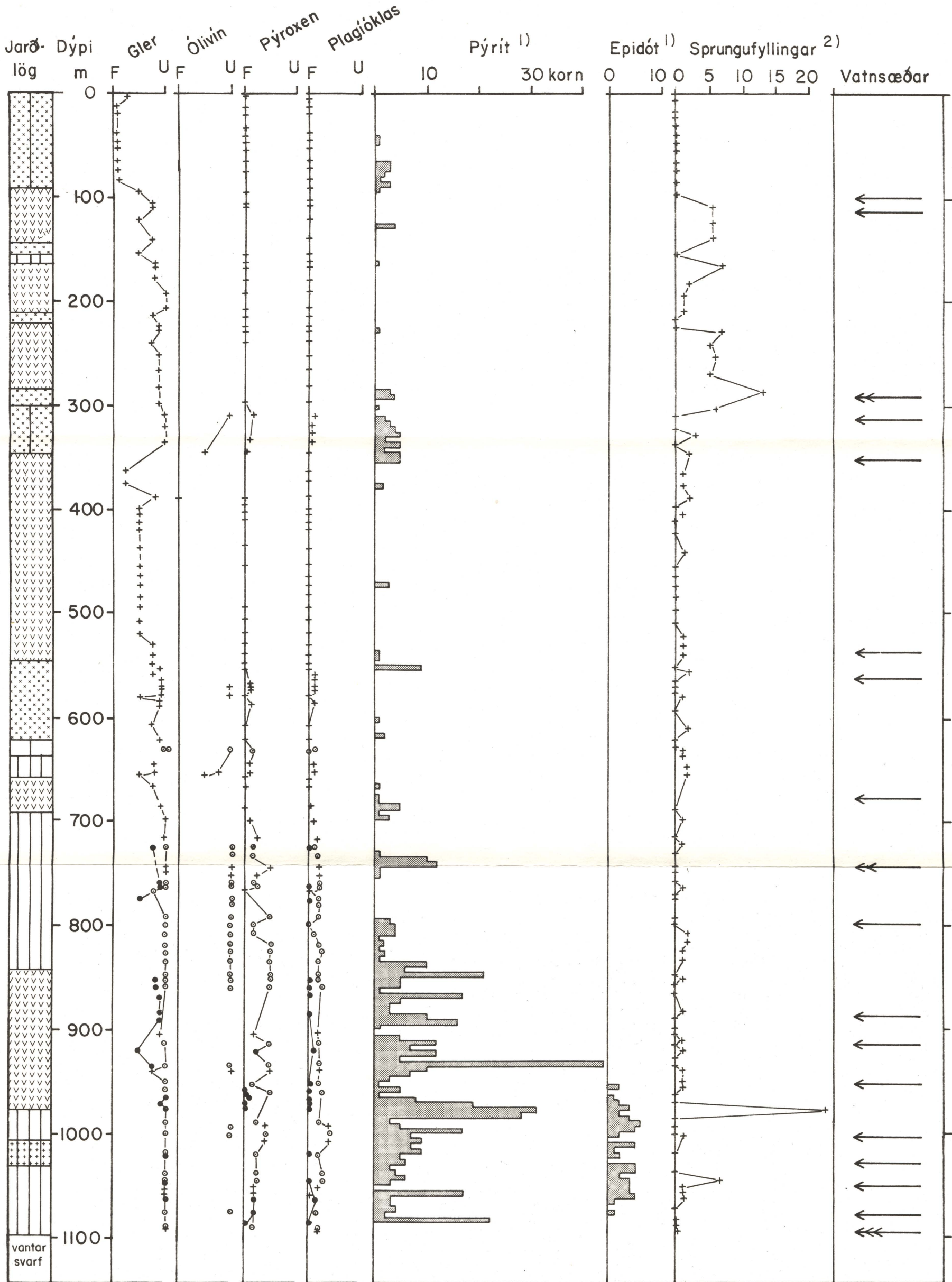
Ef miðað er við önnur berglög sem holan sker þá hefur móbergstúffið einna hæst poruhlutfall en er í mörgum tilfella minnst holufyllt, og helst tiltölulega ferskt niður undir botn holunnar. Sennilegasta orsök þessa er sú að túfflögin eru þrátt fyrir hátt poruhlutfall þau berglög sem hafa lægstu vatnsleiðnina.

4.3 Dreifing ummyndunarsteinda

Á mynd 11 er sýnt einfaldað jarðlagasnið, yfirlit yfir greiningar- aðferðir auk svarfgreiningar, svo og dreifing ummyndunarsteinda í jarðlögum borholunnar. Ef steind var greind á 10 m fresti eða minna taldist hún samfelld í holunni en að öðrum kosti er lína á mynd 11 slitin.

NESJAVELLIR HOLA NG-6

Ummyndun frumsteinda og glers, magndreifing pýrits, epidóts og sprungufyllinga



SKÝRINGAR

Jarðlög (sjá mynd 5)
F Ferskt
U Ummyndað

+ Berg óskilgreint
• Túff
• Kristallað basalt

1) Fjöldi korna á svarfspjaldi sem hafa pýrit eða epidót
2) Fjöldi sprungufyllinga í þunnsneið

Kalsít er, að leirsteindum frátöldum, algengasta ummyndunarsteindin og finnst nær samfelld niður alla holuna. Kalsít er einkum greint í þunnsneiðum, en einnig í svarfgreiningu og með röntgen. Magn þess er mjög breytilegt. Niður á tæplega 100 m dýpi er magn þess fremur lítið en þaðan og niður á um 400 m er það mjög algengt. Þetta áberandi mikla magn kalsíts er innan sama dýptarbils og vart verður við sem flestar sprungufyllingar í berginu (flestar eru fylltar kalsíti) svo og tiltölulega mikla ummyndun glersins. Magn kalsíts er fremur lítið frá 400-650 m, þaðan og niður á um 950 m fremur algengt en frá um 950 m niður á botn holunnar er kalsít í litlu magni. Kalsít er að langmestu leyti sem holu-/sprungufylling.

Kalsedón er einna auðþekkjanlegast í svarfgreiningu en einnig má stundum greina það í þunnsneið sem mjög smábert kvars. Eins og vel sést á mynd 11 er það sérstaklega að finna á 150-350 m og á 550-900 m dýpi, og aðeins á einum stað þar fyrir neðan (rúmlega 1000 m). Alls staðar þar sem kalsedon greindist ásamt öðrum útfellingum, reyndist það elst.

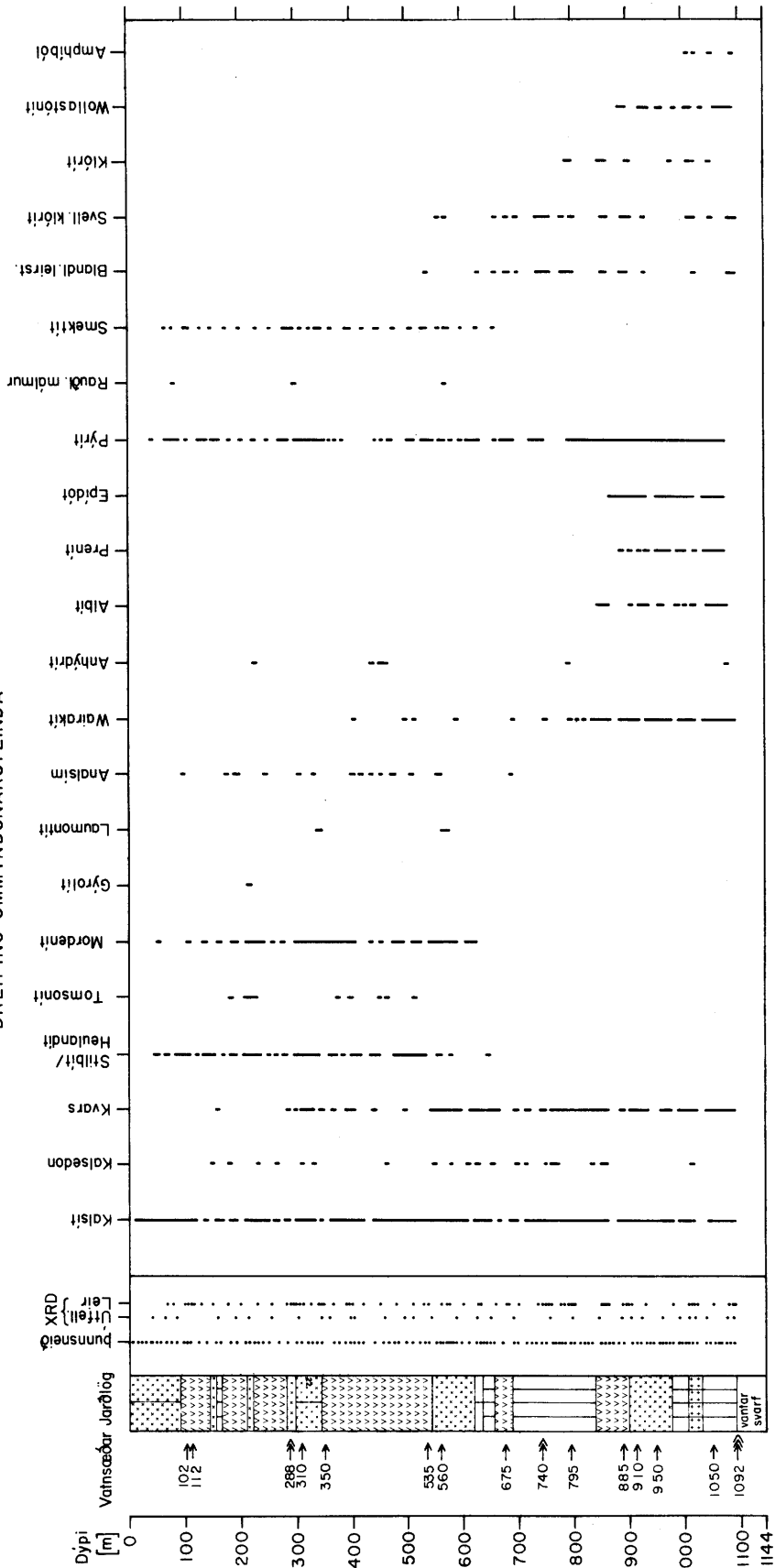
Kvars er mjög auðþekkjanlegt í þunnsneið og oft einnig í svarfgreiningu, og var einnig greint með XRD. Ef frá er talin XRD greining á kvasi á um 60 m dýpi verður þess ekki vart fyrr en á um 280 m en er þaðan fremur algengt niður á um 400 m. Þaðan og niður á um 530 m finnst vottur þess aðeins á tveimur stöðum. Neðan 530 m er kvars algengt. Kvars finnst nær eingöngu í blöðrum eða sprungum.

Zeólítarnir stilbít og heulandít eru hér settir í sama flokk vegna þess hve þeir eru lítt aðgreinanlegir í þunnsneiðum. Þeir eru algengustu zeólítarnir í holunni, finnast nær samfelld frá um 50 m niður á um 580 m dýpi. Í svarfgreiningu (stereósmásjá) má í sumum tilfella greina á milli þeirra og virðist þar heulandít vera einna helst ofan 400 m dýpis en stilbít vera meira ráðandi í neðri hlutanum. Báðar steindirnar finnast eingöngu í blöðrum og sprungum.

Thomsonít. Þessi zeólítategund greindist í svarfi sem sveipumyndaðar kúlulaga kristalþyrpingar og í þunnsneið sem fremur gróffjaðraðir kristallar og líkjast þeir helst thomsoníti. Þeirra verður fyrst vart á um 170-230 m dýpi og svo aftur frá um 370 til 520 m dýpi.

JHD-BJ-8715-HF
83.03.0321-AA

NEJAVELLIR HOLA NG-6
DREIFING UMMYNDUNARSTEINDA



MYND 11 Einfaldað jarðlagasnið, greiningaraðferðir og dreifing ummyndunarsteinda

Mordenít var greint með röntgen en einnig í svarfi og þunnsneiðum. Fyrsti vottur þess er á um 50 m dýpi, en er fremur fáséð niður á um 180 m dýpi. Þaðan og niður að um 630 m þar sem það hverfur, telst það nokkuð algengt. Mordenít finnst aðallega sem blöðrufylling, en er einnig til staðar í einstaka sprungum.

Gýrolít greindist í einu röntgensýni af um 210 m dýpi.

Laumontít Vottur greindist á tveimur stöðum í holunni. Annars vegar í svarfsýnum á 340-350 m dýpi og hins vegar í tveimur þunnsneiðum af 560-575 m dýpi, í öllum tilfellum sem blöðrufyllingar.

Analsím er hér nefnt sem ein zeólítategund. Það er aðgreint frá wairakíti á tvennan hátt, í svarfgreiningu eru kristallarnir mjög tærir, en wairakít hefur á sér gráhvíta slikju. Í þunnsneið er analsím algjörlega isotrópt enda með kúbíska kristalgerð, en wairakít sýnir lágt tvíbrot (mónóklínísk kristöllun) og virðast tvíbrotslitir þess síðarnefnda aukast með dýpi. Mun á þessum steindum má oft greina með XRD. Analsíms verður fyrst vart á nær 100 m dýpi og finnst vottur þess allt niður á um 560 m dýpi. Eins og aðrir zeólítar þá koma þeir fyrir eingöngu í holrýmum berglaga.

Wairakíts verður fyrst vart á um 400 m dýpi en er fremur fátíð steind allt niður á tæplega 800 m dýpi. Neðan þess finnst hún í nokkru magni í nær hverri þunnsneið og í mörgum röntgengreininganna.

Anhýdrít Vottur af anhýdríti fannst í þunnsneiðum á þremur stöðum í holunni, þ.e. á um 225 m dýpi, í þremur þunnsneiðum á milli 435 og 465 m dýpis og á um 790 m dýpi. Röntgengreining á holu-/sprungufyllingum af um 1080 m dýpi bendir til tilveru anhýdríts. Í öllum tilfellum er anhýdrítið í blöðrum.

Albít greindist aðeins í þunnsneiðum og finnst í öllum tilfellum sem ummyndun á plagióklas eins og áður hefur verið getið. Albíts verður fyrst vart á um 840 m og er algeng ummyndunarsteind þar fyrir neðan nema þar sem bergið er túffkennt, þar verður albíts að jafnaði ekki vart nema að litlu leyti.

Prenít var aðeins greint í þunnsneiðum. Þess verður fyrst vart á um 880 m dýpi í holunni, og er til staðar nær samfelld til botns holunnar. Prenít er sérstaklega algengt á dýptarbilinu frá um 915 m til 970 m og á um 1050 m dýpi. Prenít finnst aðallega sem

blöðrufylling, en einnig sem sprungufylling á 910 m, 945 m og á milli 1035 og 1055 m dýpis. Eins og síðar verður getið eru vatnsæðar við eða nærri öllum þessum dýptarmörkum. Í einu sýni af um 1050 m dýpi sést pýrít sem ummyndun á plagióklasi.

Epidót er mjög auðþekkjanlegt bæði í svarf- og þunnsneiðagreiningum. Þess verður fyrst vart í um 860 m dýpi og er nær samfellt þaðan og niður í botn holunnar. Epidót er oftast sem blöðrufylling, en á rúmlega 960 m og á 1035-1045 m dýpi er það einnig sem sprungufylling. Í einu sýni af um 990 m dýpi sést epidót sem ummyndun af plagióklas. Vegna þess hve epidót greinist auðveldlega í svarfi var afstætt magn þess athugað með talningu á svarfspjaldi og er sýnt á mynd 10. Þar kemur fram að magn epidóts helst tiltölulega jafnt neðan 950 m og allt niður á um 1070 m dýpi.

Pýrít er hér notað sem samheiti yfir súlfíðsteindir (s.s. pýrít, pyrrhótít, markasít). Pýrít er mjög auðþekkjanlegt í svarfgreiningum og finnst mjög víða í borholunni allt frá tæpum 50 m og niður í botn holunnar. Pýrít finnst samfellt neðan tæplega 800 metra. Svo virðist sem pýrít sé sjaldgæfara í túffi en í basaltríkum breksíum og glerjuðu basalti. Gerð var könnun á magndreifingu pýríts á svarfspjaldi líkt og gert var við epidót og er afstætt magn þess sýnt á mynd 10. Ofan 800 m koma fram einstakir toppar í pýrít magni. Virðist vera fylgni á milli þeirra og tilveru sumra vatnsæðanna í holunni t.d. í 288 m, 350 m, 535 m, 675 m, 740 m, og 795 m. Magn pýríts virðist aukast að mun neðan við 800 - 850 m dýpi.

Wollastónít sem hefur ekki áður fundist á Nesjavallasvæðinu var greint í svarfi, þunnsneiðum og röntgen. Þess verður fyrst vart á um 870 m dýpi og finnst eins langt niður og svarfsýni náðust. Wollastonítið fannst eingöngu sem blöðrufylling.

Rauðleitur málmur, sem í þunnsneið sést sem hálfkúlulaga skán í blöðrum, greindust á tveimur stöðum í holunni, sá fyrri við 300 m og sá síðari við um 570 m. Líklegast er hér um að ræða límonít. Rauðleitrar oxunar í berginu verður víða vart í svarfi en nánari skýring á því fyrirbæri er ekki fyrir hendi á þessu stigi máls.

Leirsteindir er langalgengasta ummyndunin í berglögum holunnar. Leirsteindir eru mjög algengur sem holu- og sprungufyllingar auk þess sem þær eru ráðandi ummyndunarsteindir í frumhluta bergsins (gler, ólívín, pýroxen, plagióklas) eins og áður er getið. Leirsteindum er

skipt í fjórar tegundir á grundvelli röntgengreininga, en 73 greiningar voru gerðar.

Smektít greindist nær undantekningarlaust niður á 660 m dýpi.

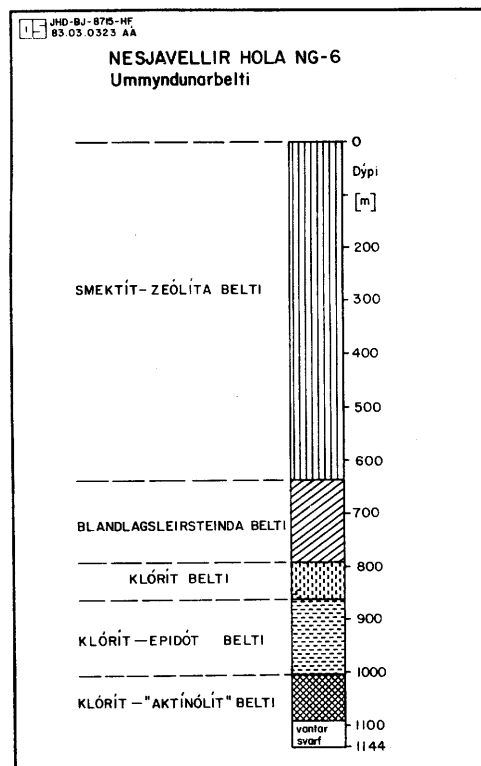
Blandlagsleirsteindir finnast á dýptarbilinu frá um 530 m allt niður á botn holunnar. Um 100 m dýptarmunur er á efsta sýninu og næsta fyrir neðan. Líkleg skýring þessa er sú að efsta sýnið var tekið við æðina í 535 m.

Svellandi klórít greindist í sýnum frá um 550 m niður á botn holunnar. Eins og með blandlagsleirsteindirnar, þá er um 100 m bil frá efstu tveimur svellandi klórítgreiningunum til þeirra næstu fyrir neðan, og er líklegasta skýringin sú að sýnin voru tekin við vatnsæðina í 560 m. Svellandi klórít við vatnsæðarnar í 675 m, 740 m og 885 m þenst mun minna en í sýnum fyrir ofan og neðan viðkomandi æðar.

Klórít kemur fyrst fram í röntgensýni af um tæplega 800 m dýpi og finnst allt niður á um 1040 m dýpi en er ekki merkjanlegt þar fyrir neðan. Efsta klórítsýnið er á mjög svipuðu dýpi og æðin í 795 m.

4.4 Ummyndunarbelti

Á mynd 12 er sýnd beltaskipting ummyndunar á grundvelli þeirrar dreifingar steinda sem sýnd er á mynd 11. Samkvæmt því nær smektít-zeólítabeltið niður á um 685 m dýpi. Sé tekið mið af hvað zeólítarnir eru ráðandi miðað við óverulega tilveru blandlagsleirsteinda og svellandi klóríts á 500-600 m dýpi, þá nær blandlagsteindabeltið niður á tæplega 800 m, klórítbeltið niður á rúmlega 850 m dýpi, klórít-epidót beltið á um 1000 m og þar fyrir neðan er klórít-aktínólítbeltið.



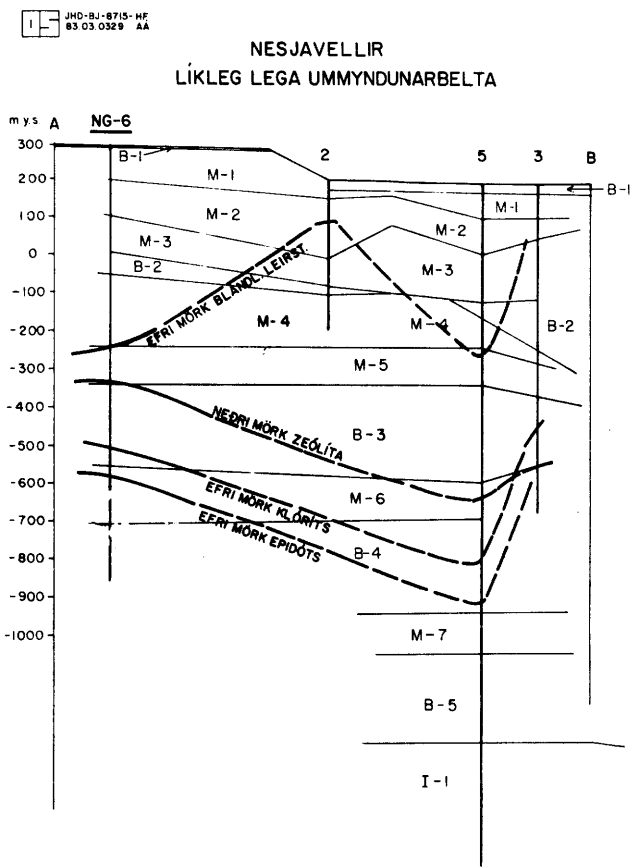
MYND 12 Ummyndunarbelti

4.5 Tenging ummyndunar í NG-6 við eldra borsvæði

Ummyndun í berglögnum í holum NV-2, NV-3 og NG-5 hefur verið gerð skil (Kristmannsdóttir og Tómasson 1974, Jens Tómasson o.fl. 1974). Þær rannsóknir voru túlkaðar þannig að ummyndunarmynstrið væri ekki í samræmi við þann hita sem vart varð við í holunum. Var það túlkað á þann veg að jarðhitakerfið væri að færa sig til norðurs.

Eins og áður hefur verið rakið hér að framan þá benda rannsóknir á ummyndun í NG-6 eindregið til sams konar ójafnvægis á milli ráðandi ummyndunarmynsturs og hita. Þetta gæti bent til að háhitakerfið allt á Nesjavöllum sé jarðfræðilega mjög ungt.

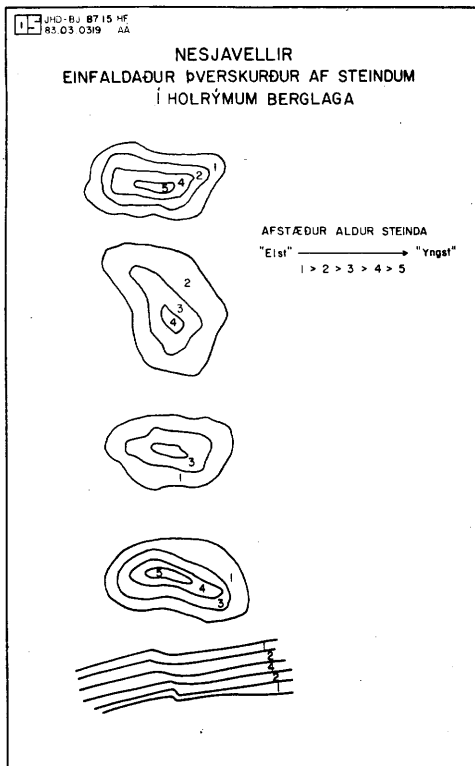
Á mynd 13 er sýnd líkleg tenging ummyndunar á milli þeirra borhola þar sem ummyndun hefur verið rannsökuð. Það atriði sem sterkast kemur fram á þeirri mynd er hve lóðrétti þátturinn í ummyndunarmynstrinu er ráðandi. Í ljósi þess sem kemur fram í ummyndunarsögu NG-6 svo og náinn skyldleiki sprungna og misgengja annars vegar og jarðhitaummerkja á yfirborði hins vegar, er nokkuð ljóst að lóðrétti þátturinn í ummyndunarmynstrinu sé vísbending um hvað sprungur og misgengi séu ráðandi í flæðinu í jarðhitakerfinu.



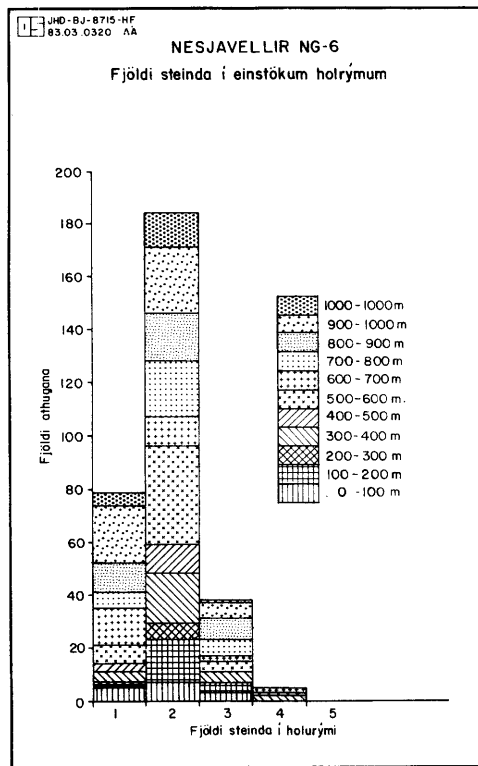
MYND 13 Tenging ummyndunarbelta

4.6 Röðun ummyndunarsteinda

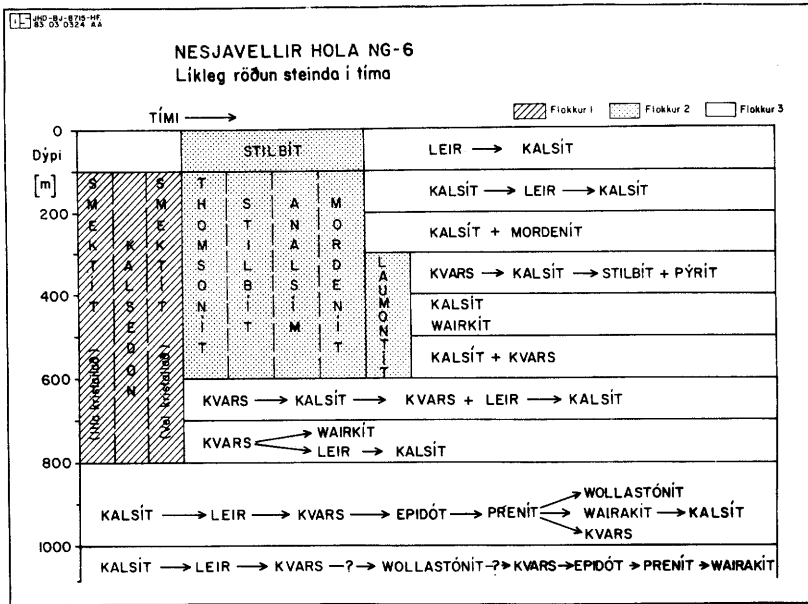
Fjöldi steinda í einstökum holrýmum er mjög breytilegur. Innbyrðis lega þeirra í hverju holrými gefur til kynna afstæðan aldur þeirra eins og sýnt er á einfaldan hátt á mynd 14. Röðun þeirra í tíma og rúmi geta gefið upplýsingar um þær breytingar sem orðið hafa í jarðhitakerfinu og jafnvel veitt upplýsingar um hvaða steindir eru líklegastar til að vera í jafnvægi við núverandi ástand jarðhitakerfisins. Athugun þessi á röðun steinda í NG-6 var að miklu leyti gerð í þunnsneiðum en einnig að nokkru í svarfgreiningu. Samtals var gerð athugun á 296 holu- og sprungufyllingum og sýnir súluritið á mynd 15 fjölda tegunda í þeim holrýmum sem athuguð voru og fjölda slíkra athugana innan hvers 100 m dýptarbils. Sú röðun sem líkleg er að sé til staðar í NG-6 er sýnd á einfaldaðan hátt á mynd 16. Til hægðarauka er holufyllingum skipt í þrjá megin flokka:



MYND 14 Einfaldaður þverskurður útfellinga í holrýmum berglaga



MYND 15 Tíðni útfellinga á mismunandi dýptarbílum



MYND 16 Líkleg röðun útfellinga í tíma

1. Leirsteindir, kalsedón. Þessi flokkur steinda fyrirfinnst frá 100 m niður á um 800 m dýpi. Ráðandi röðun steindanna er sú að næst holuveggjum er skán af illa kristölluðum leir, líklegast smektíti, þar ofan á hefur kalsedón myndast (kalsedón sést víða endurkristallað yfir í kvars) og að síðustu koma leirsteindir aftur, nú mun betur kristallaðar. Niður á um 700 m er smektít einrátt en þar fyrir neðan er skv. þunnsneiðagreiningum líklegt að séu blandlagsleirsteindir og/eða svellandi klórít.

2. Zeólítar. Þessi steindaflokkur nær frá yfirborði allt niður á um 600 m dýpi. Í efstu hundrað metrum holunnar er stilbít ráðandi en þar fyrir neðan koma mun fleiri tegundir. Fremur gróffjaðraður zeólít, líklegast thomsonit er þeirra elstur, síðan kemur stilbít (heulandít). Analsím vottur myndast á staka stað í holunni áður en mordenít, sem er nokkuð áberandi zeólíti í NG-6, kemur til sögunnar. Að síðustu myndast laumontít neðan 300 m dýpis.

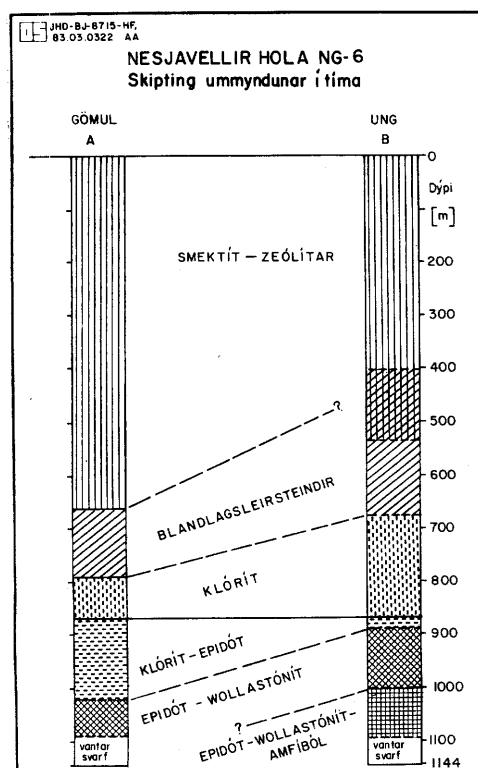
3. Aðrar steindir. Innan þessa flokks teljast aðrar steindir á mynd 16. Ofan 800 m er aðallega um þrjár tegundir að ræða þ.e. kalsít, kvars og leir, en innbyrðis röðun þeirra er nokkuð mismunandi eftir dýpi. Merki um tilveru zeólítanna stilbíts og mordeníts er að finna aðallega í sprungufyllingum ásamt með kalsíti. Ekki er fullvíst hvort það wairakít, sem fannst á milli 400-500 m dýpis, tilheyrir þessum flokki eða flokki 2, nema líklegt er að sú útfelling eigi sér stað

nokkru seinna en analsím. Neðan 800 m er röðun steinda nokkuð áþekk í byrjun, þ.e. fyrst kemur kalsít og síðan leir og kvars, en eftir það breytir nokkuð um. Ofan 1000 m er röðunin epidót, prenit og síðan kvars eða wairakít og kalsít, eða wollastónít. Neðan 1000 m virðist wollastónít og kvars koma á undan epidóti og prenití og wairakíti. Athyglisvert er að wollastónít og wairakít koma aldrei fyrir innan sama holrýmis.

4.7 Skipting ummyndunarbelta í NG-6 í tíma

Hér að framan hefur nokkuð ýtarlega verið fjallað um bæði dreifingu ummyndunarsteinda með dýpi í holunni og einnig hvernig steindamynstrið hefur breyst með tíma. Sú síðarnefnda gefur ákveðna mynd af þróun jarðhitakerfisins. Þótt breytingarnar í steindamynstrinu séu fremur samfelldar þá virðast tvö tímaskeið ummyndunarinnar vera algengust. Sú skipting er sýnd á mynd 17. Helstu atriði sem lögð eru til grundvallar skiptingunni eru eftirfarandi.

- i Frá 530 m niður að um 660 m eru blandlagsleirsteindir og svellandi klórít eingöngu við virkar æðar.
- ii Síðari myndunartími zeólíta nær a.m.k. niður á um 400 m.
- iii Breytingin á svellandi klóríti við virkar æðar í átt að klóríti bendir til að klórítbeltið sé að færast ofar.
- iv Neðan rúmlega 1000 m dýpis virðist wollastónít falla út á undan epidóti en þar fyrir ofan er það jafnan myndað seinast.
- v Vart var við amfiból í röntgengreiningum neðan 1000 m dýpis en engin vísbending um slíkt í þunnsneiðum. Ógreinileg tilvera þess gæti hugsanlega bent til að það sé ungt í jarðhitakerfinu.



MYND 17 Skipting ummyndunar í tíma

4.8 Umræða

Á mynd 16 má merkja athyglisverðar upplýsingar um þróun þess jarðhitakerfis sem hola NG-6 sker. Í fyrsta steindaflokki ber hin illa kristallaða leirskán merki um lágt hitastig, en aukning í kristöllum leirsteinda sem við tekur á eftir kalsedón er líklega merki um hækkun í hita.

Rannsóknir varðandi efri stöðugleikahitamörk zeólíta (sjá Kristmannsdóttir og Tómasson 1978) sýnir að við hækkandi hita hverfur thomsonít á undan heulandíti og stílbíti, sem aftur hverfa fyrir en mordenít. Laumontít er sá zeólíti sem síðast hverfur við hækkandi hita, þó að wairakíti undanskildu, sem helst stöðugt upp að mun hærri hita. Þessi zeólítaröð er mjög svipuð þeirri sem birtist á mynd 16 og er því líklegt að slíkt sé túlkað sem merki um hækkandi berghita ofan við um 600 m dýpi. Í þriðja steindaflokki verður vart við zeólíta en þeir ná aðeins niður á um 400 m dýpi. Slíkt getur bent til að hiti hafi orðið hærri en stöðugleikasvið zeólíta.

Í fyrsta steindaflokki hefur kalsedón myndast (en það gefur tilefni til að halda að berghiti hafi verið $< 180^{\circ}\text{C}$) en í þriðja steindaflokki myndast kvars neðan 300 m. Slíkt gefur því einnig til kynna hækkun berghita með tíma. Ummyndunarsteindin epidót finnst á flestum háhitasvæðum á Íslandi. Ummyndunarrannsóknir benda til að neðri hitamörk í stöðugleikasviði þess sé 230°C eða hærri. Amfiból (aktinólít) hefur víða fundist í neðri hluta jarðhitakerfisins í Kröflu og hefur því verið haldið fram að það myndaðist við herra hitastig en 280°C (Kristmannsdóttir 1978).

Röðun útfellinga á dýptarbilinu 800-1000 m í NG-6 gefur markverðar upplýsingar þar sem upphaf epidóts gæti bent til hækkunar hita, en einnig að wollastonít tekur fyrst að falla út á eftir preníti. Hvort tveggja bendir til umtalsverðrar hækkunar hita e.t.v. frá $< 230^{\circ}\text{C}$ til um eða yfir 300°C . Neðan 1000 m er röðunin hugsanlega frábrugðin að því leyti að wollastónít getur hafa fallið út á undan epidóti og preníti.

Bent hefur verið á (t.d. Hrefna Kristmannsdóttir 1978) að kalsítútfellingar í Kröflu minnka að mun við berghita um eða yfir $270\text{-}300^{\circ}\text{C}$ líklega vegna eyðingar á kalsíti. Í NG-6 er kalsít algeng útfelling ofan 950 m en gætir fremur lítið þar fyrir neðan, og gæti það bent til hins sama.

Í vali á sýnum til greininga á leirsteindum var einkum tvennt haft að leiðarljósi. Annars vegar að fylgjast með breytingum á leirsteindagerð með dýpi og hins vegar að athuga ef einhverra breytinga yrði vart nærri þeim vatnsæðum sem vart varð við í borun. Varðandi síðarnefnda atriðið varð ekki vart við neinar breytingar í leirsteindagerð ofan 500 m. Við æðina í 535 m dýpi kemur fyrsta merki um blandlagsleirsteindir og við æðina í 560 m kemur fram fyrsta merki um svellandi klórít. Við æðarnar í 675 m, 740 m og 885 m verður þess greinilega vart að þenslan í svellandi klórítinu er miklu mun minni en í sýnum ofan og neðan viðkomandi æða. Einnig virðist klórít koma fram á sama dýpi og æðin í 795 m svo og við æðina í 1040 m. Þessi atriði í greiningum á leirsteindum benda á að virkar vatnsæðar í jarðhitakerfinu hafa mikil áhrif á beltaskiptingu leirsteinda, og virðast vera að breyta og færa beltin hærra, nær yfirborði.

Eins og vel kemur fram á mynd 10 er í mörgum tilfella gott samræmi á milli pýríttoppa og virkra vatnsæða og einnig virðist í mörgum tilfella gott samband neðan 500 m á milli leirgreininga og vatnsæða. Athyglisvert er að við virkar vatnsæðar, ofan 300 m helst smektít alveg stöðugt og gæti það bent til að hitastig sé $<200^{\circ}\text{C}$ (sem og einnig tilvera zeólíta þarna bendir til). Í nýlegri grein (Einar Gunnlaugsson og Stefán Arnórsson 1983) er bent á að markasít sé í jafnvægi við jarðhitavökva við hitastig lægra en 180°C en þar fyrir ofan sé jarðhitavökvinn í jafnvægi við pýrít. Athugun á slíku í svarfi úr NG-6 í framtíðinni gæti enn rennt stoðum undir þær vísbendingar um hitastig sem núverandi ummyndun gefur. Með hliðsjón af mynd 16 er bent á að þær ummyndunarsteindir sem líklegar eru til að vera í jafnvægi við jarðhitakerfið á Nesjavöllum eru:

- a) Ofan vinnslufóðringadýpis; pýrít (markasít), smektít, kalsít, stilbít, mordenít og wairakít.
- b) Í vinnsluhluta holunnar; pýrít, lítið þanið klórít, klórít wollastónít, kalsít, wairakít og líklega kvars og amfíból.

Í ljósi þess að á Nesjavöllum er mjög virkt háhitasvæði hlýtur það að teljast óvenjulegt, og þá sérstaklega í efri hluta slíks jarðhitakerfis, að kalsít og pýrít taka ekki að myndast fyrr en eftir tiltölulega langdregna sögu leirsteinda kalsedón og zeólíta- myndana (sbr. flokka 1 og 2 á mynd 16).

Því er nokkuð haldið á lofti, að það koldíoxíð og sá brennisteinn sem

til þarf til að jarðhitakerfið geti fellt út áður nefndar tvær steindir sé að öllum líkindum annaðhvort komið úr kvikugufum frá kólnandi innskotum eða sem útskolun úr basalti neðan og utan uppsteymisrás jarðhitakerfis (Stefán Arnórsson o.fl. 1980). Sé þetta rétt hlýtur sú hugmynd að vakna að steindaflokkar 1 og 2 annars vegar og 3 hins vegar (a.m.k. ofan 600 m dýpis) hafi myndast úr tveimur ólíkum vatnskerfum. Annars vegar er eldra vatnskerfi sem líklegt var talið að væri undirmettað með tilliti til pýríts og kalsíts og hins vegar þess háhitavatnskerfis sem er yfirmettað með tilliti til beggja útfellingategunda.

Á mynd 10 þar sem sýnd er ummyndun frumhluta bergsins og magndreifing epidóts og pýríts, er einnig merkt inn athugun á fjölda sprungufyllinga í hverri þunnsneið. Miðað við holuna í heild virðist óvenju mikill fjöldi af sprungufyllingum vera á dýptarbilinu 100-300 m, og fellur það saman við það bil þar sem ummyndun glersins er mikil. Er eðlilegt að telja þetta merki um sprungu eða sprungukerfi sem holan sker og þær æðar sem merkjast á þessu dýptarbili séu því tengdar. Í þunnsneiðum var einnig athugað það mynstur sem ríkti í sprungufyllingum. Ráðandi steind bæði í blöðrum og sprungunum er kalsít, en einnig eru merki um að a.m.k. stilbít hafði myndast á undan.

Sé þeirri hugmynd enn haldið á lofti, að steindaflokkar 1 og 2 ofan 600 m séu merki um annað og ólíkara vatnskerfi en það háhitakerfi, sem nú er sem virkast, þá bendir röðun holufyllinga til þess að sprungurnar gætu verið a.m.k. jafn gamlar zeólítabeltinu og virki sem uppsteymisrás fyrir núverandi háhitakerfi.

Hér að framan hefur verið bent á ýmis atriði sem sýna að jarðhitakerfið sem NG-6 sker er mjög ungt. Má þar til nefna:

1. Óvenju litla ummyndun móbergsins, nema þar sem virkt sprunguflæði er til staðar.
2. Greinilegt upphaf í breytingum á leirsteindum við jarðhitaæðar í átt að stöðugleika við hærri hita.
3. Í röðum steinda ofan 600 m dýpis koma steindir, t.d. pýrít og kalsít sem endapunktur í langdreginni útfellingasögu í holrýmum berglaga.

Á meðan á borun NG-6 stóð var gerð stuttleg könnun á ummerkjum jarðhitans á yfirborði og mögulegum tengslum hans við jarðfræðileg fyrirbæri. Ekki verður á þessu stigi máls gerð úttekt á þeim gögnum sem safnað var en stiklað á stóru varðandi helstu drætti þessa máls:

Öll merki um jarðhita tengjast stöðum þar sem jarðhitinn er virkur.

Jarðhitinn tengist á mjög auðsæjan hátt tveimur sprungumisgengjakerfum. Annars vegar með NA-SV stefnu sem er sú stefna sem mest áhrif hefur í sprungukerfi Hengilsvæðisins. Hins vegar er sprungukerfi sem hefur N-S eða NNV-SSA stefnu og gengur yfir sigdæld Nesjavalla. Ekki hefur orðið vart við að misgengi tengdust þessari síðarnefndu stefnu, hvorki eftir gögnum á yfirborði, né í jarðlagatengingunum á milli borhola á svæðinu. Þótt ekki hafi orðið vart við misgengi með þessari stefnu þá virðast stallarnir ofan og sunnan Nesjavalla að einhverju leiti mótast af þessari stefnu, og er e.t.v. um áhrif þessarar stefnu á upphleðslu gosefna að ræða, eða að sprungustefnan myndi veikleika í berggrunni sem roföfl ísalda kunna að hafa fært sér í nyt og mótað landslag samkvæmt því (Kristján Sæmundsson, pers. upplýsingar).

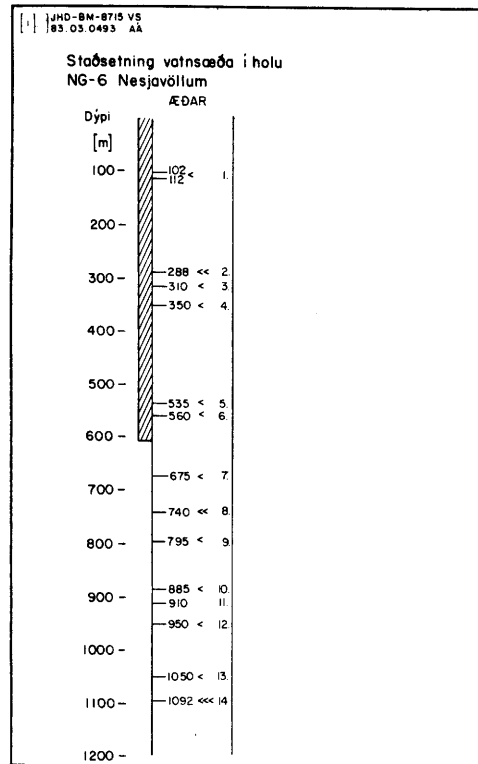
Jarðhitinn á yfirborði er langöflugastur við mót þessara áður nefndu sprungustefna. Einnig er athyglisvert að norðan og austan við einstakar þversprungur liggur jarðhitinn mun lægra í landi en sunnan og vestan megin. Þannig á sér stað tröppulaga lökkun á jarðhitaummerkjum í norðurátt sem skýrir að einhverju leyti hvers vegna ummerki jarðhitans eru svo takmörkuð í botni sigdældarinnar á Nesjavöllum (gamla borsvæðinu) en mjög áberandi í þeirri hæð sem NG-6 er í.

5 EÐLISÁSTAND JARÐHITAKERFIS

5.1 Staðsetning vatnsæða

Vatnsæðar í NG-6 eru merktar inn á mynd 18. Í holunni er að finna vísbendingar um allt að 14 æðar, en 6 efstu eru ofan 633 m vinnslufóðringar. Við staðsetningu vatnsæða var stuðst við hitamælingar, skoltapsmælingar og svarfgreiningu. Vegna yfirprýstings á æðum í efri hluta holunnar var holan hitamæld ítarlega í upphitun fyrir fóðrun. Þessar hitamælingar voru notaðar til að reikna út hve hratt holan hitnaði upp á mismunandi dýpi.

Þar sem þessar hitamælingar voru oftast gerðar stuttu eftir að ádælingu lauk og skammur tími leið á milli þeirra, þá var holan ekki komin í hitajafnvægi og er hitaaukningin illa ákvörðuð (mynd 21). Í þessum kafla eru birtar hitamælingar ásamt útreiknuðum ferlum upphitunarhraða sem best sýna æðar í holunni (myndir 19- 22).



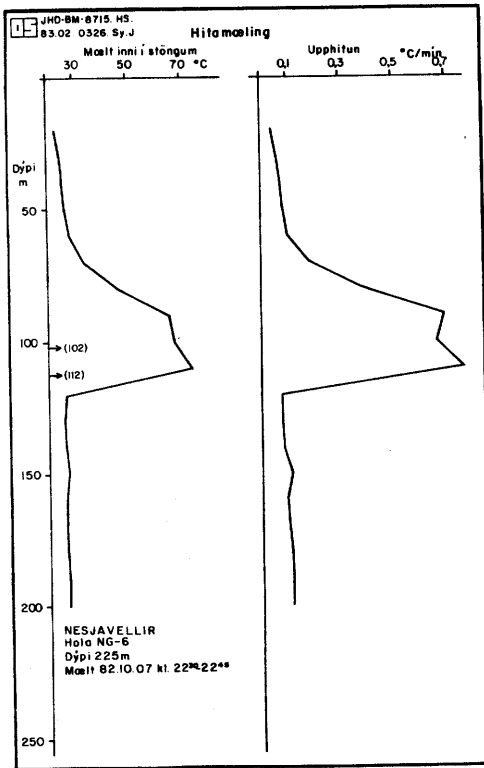
MYND 18 Staðsetning vatnsæða í holu NG-6 á Nesjavöllum

1. (102 og 112 m) Í þessu dýpi fór að renna um 1 l/s upp úr holunni og hiti skolvatns hækkaði. Á hitamælingu sem gerð var strax eftir að skolun lauk sést að þetta rennsli er úr 102 og 112 m dýpi (mynd 19). Á mynd 19 er einnig teiknað upp hve hratt holan hitnar upp, en það er reiknað út frá tveim hitamælingum sem gerðar voru með 1,5 klst. millibili. Á þessu dýpi kemur einnig fram aukin ummyndun á gleri og vart verður við sprungufyllingar í svarfi.
2. (288 m) Á þessu dýpi mátti merkja upphaf á óverulegri aukningu skolvatns (< 1 l/s) auk þess sem það hitnaði. Á hitamælingu sem gerð var eftir að upptekt á borstöngum lauk, kemur þessi æð vel í ljós (mynd 20). Út frá hitamælingu rúmlega 2 tímum síðar mátti reikna út hve hratt holan hitnar upp og er það teiknað inn á mynd

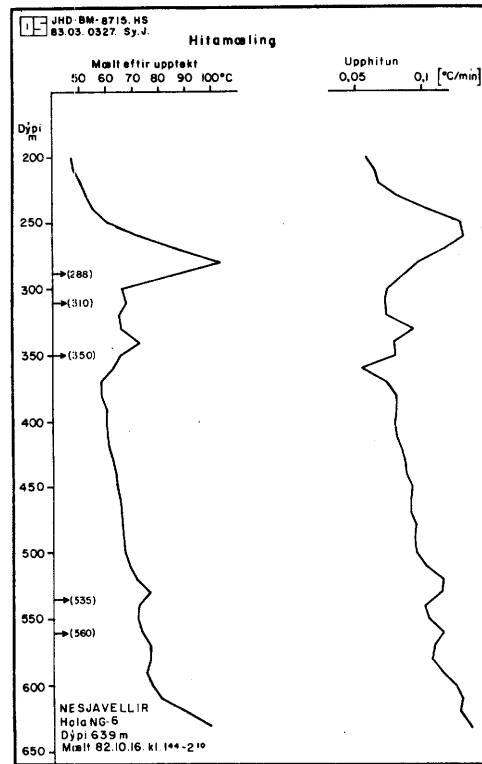
20. Við þetta dýpi verður vart aukningar í pýrítí og mjög áberandi fjölgun á sprungufyllingum í svarfi.
3. (310 m) Á þessu dýpi hækkaði hiti á skolvatni. Á hitamælingu (mynd 20) má greina óverulegan hitatopp. Allt gler er ummyndað og hér verða fyrstu merki um ummyndun pýroxen og plagíóklasa. Pýrít verður hér nokkuð algengt. Æðin kemur fram í glerjuðu basalti.
 4. (350 m) Þessi æð kemur fram á hitamælingu og hraða upphitunarinnar (mynd 20). Einnig hitnaði skolvatn á þessu dýpi. Æðin kemur fram nærri mótum jarðlagamyndana B2 og M4. Pýrít er nokkuð algengt og samfellt frá æð 3 niður að þessari æð en hverfur þar fyrir neðan.
 5. (535 m) Á þessu dýpi hitnaði skolvatn. Á hitamælingu og hraða upphitunarinnar (mynd 20) sést þessi æð vel. Á svipuðu dýptarbili kemur fram aukin ummyndun á gleri og pýrít sést vel. Æðin kemur fram í glerjuðu basalti. Við þessa æð greindist fyrst blandlagsleirsteind.
 6. (560 m) Hér má ætla að sé smáæð. Hraði upphitunarinnar (mynd 20) sýnir lítinn topp á þessu dýpi. Ummyndun glersins er alger auk þess sem pýroxen og plagíóklas eru að byrja að ummyndast. Við þessa æð greinist fyrst svellandi klórít.
 7. (675 m) Þessi æð kemur greinilega fram á hitamælingu sem mæld var eftir upptekt í 20 l/s ádælingu (mynd 21). Á þessari hitamælingu sést að ádælingin fer niður í 1092 m þar sem hún fer út í æð. Inn í holuna streymir heitara vatn úr æðunum ofar í holunni, og sýnir hitaferillinn því snögga hitaaukningu við hverja æð. Þessi æð kemur einnig fram á ferli sem sýnir hraða upphitunar (mynd 21) en hann var reiknaður út frá tveim hitamælingum með 1 klst millibili sem mældar voru þegar holunni var leyft að hitna upp án ádælingar. Ummyndun glers virðist aukast á þessu dýpi og aukning verður í pýrít. Við æðina er klórítið mun minna þanið en í sýnum fyrir ofan og neðan.
 8. (740 m) Á þessu dýpi varð lítilsháttar aukning í skolvatni. Á báðum ferlunum á mynd 21 sést þessi æð greinilega. Allt gler er ummyndað og greinileg aukning verður á ummyndun pýroxens. Ákveðinn og vel afmarkaður pýríttoppur kemur fram við þetta dýpi. Á þessu dýpi verður vart við að svellandi klórít er mun minna

þanið.

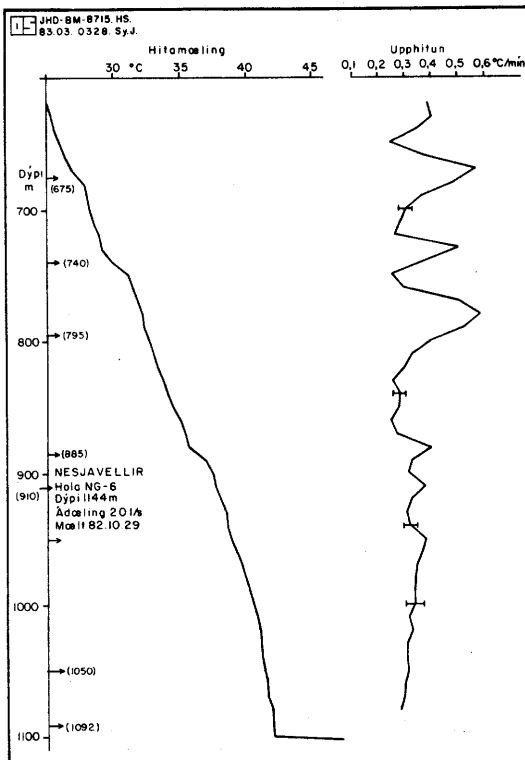
9. (795 m) Þessi æð kemur greinilega fram á báðum ferlunum á mynd 21. Pýroxen sýnir mun meiri ummyndun og pýrít er meira áberandi. Við þessa æð koma fram fyrstu merki um klórít.
10. (885 m) Þessi æð kemur fram á báðum ferlunum á mynd 21. Við þessa æð er svellandi klórítið minna þanið, og rétt þar fyrir neðan (um 890 m) greinist klórít. Nokkuð áberandi pýríttoppur.
11. (910 m) Ummyndun pýroxensins er meiri við þetta dýpi. Smátoppur kemur fram í upphitun (mynd 21) en hann er varla marktækur.
12. (950 m) Á hraða upphitunarinnar (mynd 21) sést að á þessu dýpi hefur holan hitnað heldur hraðar en næst fyrir ofan og neðan, og í hitamælingunni kemur fram lítilsháttar hitabreyting. Einnig eru merki um aukna ummyndun á þessu dýpi.
13. (1050 m) Á ferlunum á mynd 21 eru engin merki um þessa æð, en út frá hitamælingu 3 vikum eftir að borun lauk (mynd 22) má ætla að þarna sé æð.
14. (1092 m) algjört skoltap varð á þessu dýpi. Á hitamælingu (mynd 21) sést að allt vatn í 20 l/s ádælingu fer út í þessa æð. Mjög stór skápur er á þessu dýpi eins og sjá má á víddarmælingu.



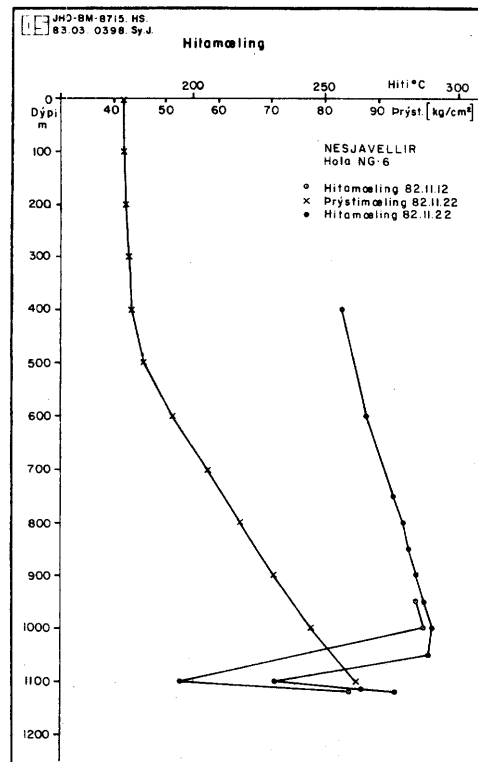
MYND 19 Upphitun þegar holan var 225 m djúp



MYND 20 Upphitun þegar holan var 639 m djúp



MYND 21 Upphitun þegar holan var 1144 m djúp

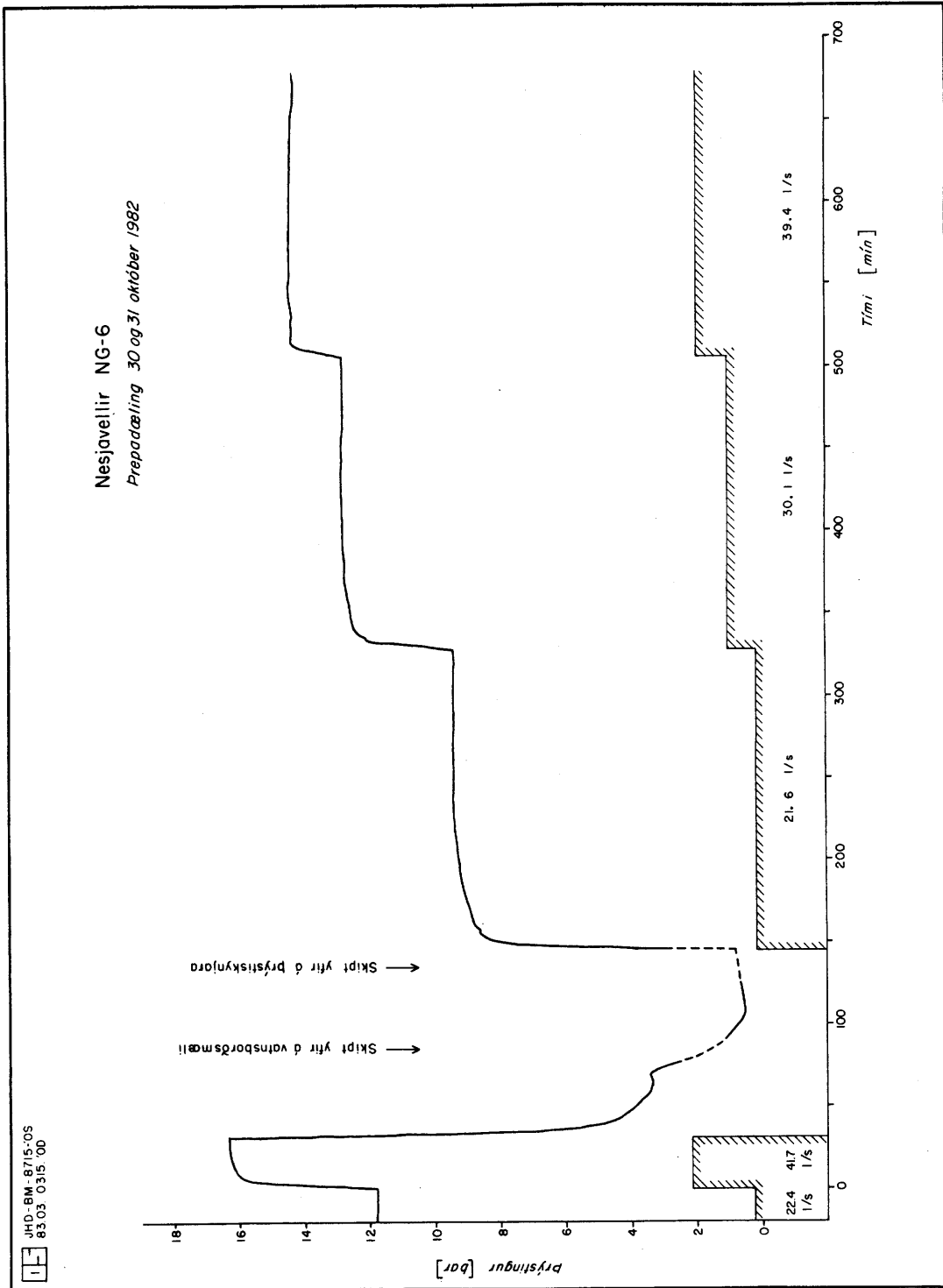


MYND 22 Hita- og þrýstimælingar í upphitun

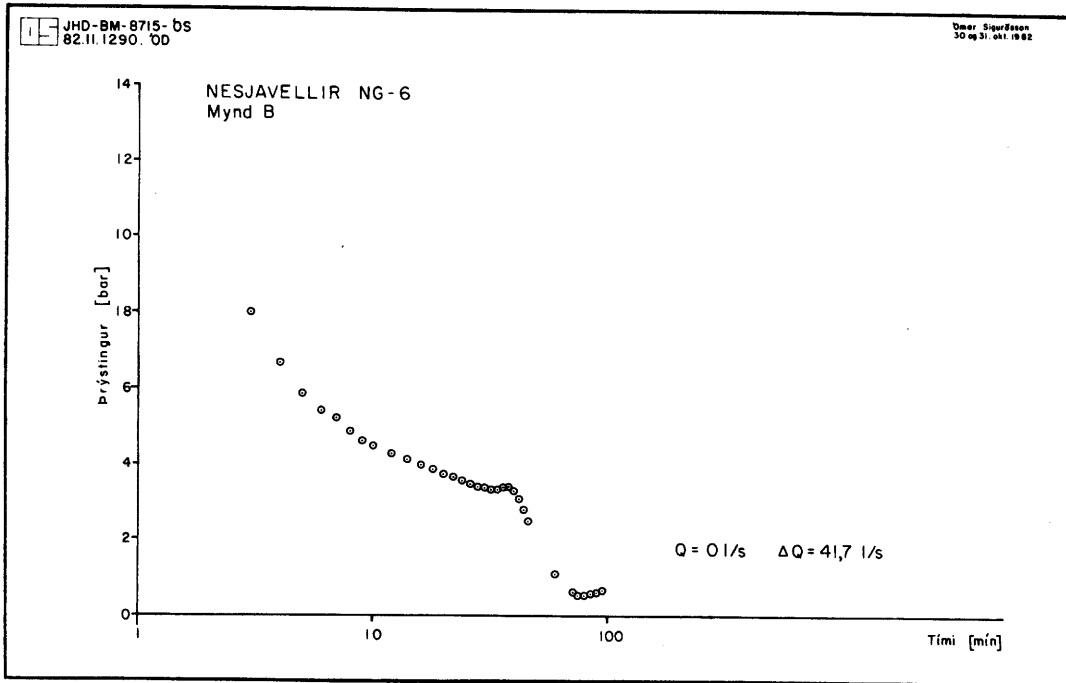
5.2 Vatnsleiðni

Við borun vinnsluhluta holu NG-6 var sjálfrennsli úr holunni þar til hún náði meir en 870 m dýpi, en algjört skoltap varð í rúmlega 1090 m dýpi. Vegna þessa er talið að tiltölulega lítið vatnstap út í jarðhitakerfið hafi orðið ofan 870 m dýpis. Skolvatn tapaðist því ekki að ráði fyrr en á 1091 m dýpi. Út frá dagafjölda, frá því holan náði þessu dýpi og fram að þrepaðölingu og meðaládölingu, er áætlað að um 13700 m³ af kælivatni hafi tapast út í jarðhitakerfið. Þetta kælivatn nægir til að kæla svæði sem nær um 2,2 m út frá holunni. Hafi hins vegar mest allt kælivatnið tapast á þröngu bili í holunni, gæti kælda svæðið þar náð allt að 11 m út frá holunni. Við dæluþrófanir gæti áhrifa kælda svæðisins því gætt fyrstu 0,5 til 11 mín. í hverju dæluþrepi.

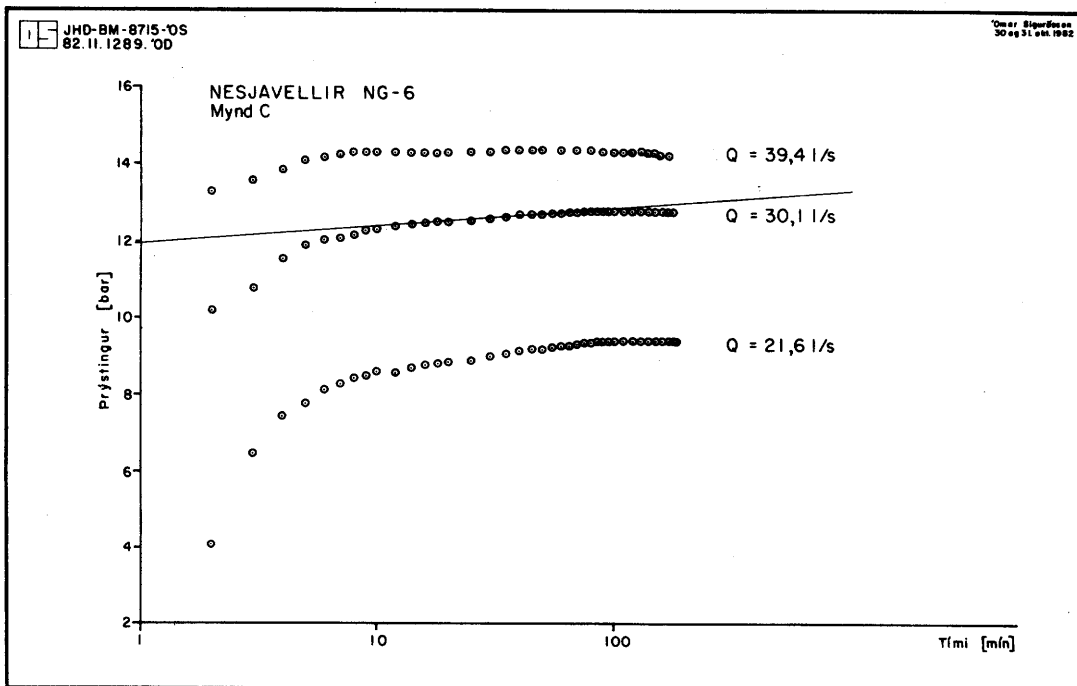
Holan var þrepaðöld 30. og 31. október 1982. Dæluþrófunin hófst um kl. 20 að kvöldi þess 30. og lauk upp úr kl. 8 morguninn eftir. Önnur dæluþrófun var gerð þann 27. til að afla upplýsinga til ákvörðunar um áframhaldandi borun eftir að algjört skoltap varð á 1091 m dýpi. Gæði þessarar mælingar eru takmörkuð og verður því lítið fjallað um hana hér. Á mynd 23 er sýndur þrýstingurinn á 225 m dýpi ásamt ádæluþrepi fyrir mælinguna 30. og 31. október. Áður en þrepaðölingin hófst hafði verið dælt á holuna 22,4 l/s í rúmlega tvo tíma, en áður rann álíka magn á holuna meðan verið var að setja leiðara niður. Byrjað var á að auka dælinguna upp í 41,7 l/s, en það reyndist meira en hægt var að dæla að bornum við þáverandi aðstæður. Kar tæmdist því og stöðva varð dælingu. Fylgst var með þrýstifallinu, en síðan var dælt á holuna í þrepuum 21,6-30,1-39,4 l/s. Fyrsta þrepið (41,7 l/s) reyndist of stutt til að nota nema til samanburðar, en hin þrepi eru sýnd nánar á myndum 24 og 25. Á mynd 24 sést að stöðugt dregur úr hraða þrýstifallsins (eða vatnsborðslökkunarinnar) fyrstu mínúturnar en eftir tæplega 40 mín. eykst hann aftur. Þetta er meðal annars talin vísbending um millirennslis í holunni. Einnig sést á myndinni að eftir um 80 mín. rís þrýstingurinn. Þetta er talið stafa af upphitun í holunni. Af framansögðu er því ljóst að þrepaðölingin er trufluð af áhrifum millirennslis og hitabreytinga. Á mynd 26 er teiknuð hæsta vatnsborðsstaða í hverju dæluþrepi. Af þeirri hegðun, sem kemur fram á mynd 26, má einnig draga þá ályktun að millirennslis sé í holunni. Þá má áætla að dæling þurfi að vera meiri en 25 l/s svo áhrif af millirennslis séu í lágmarki. Aðeins tvö dæluþrep höfðu meiri dælingu og eru útreikningar að mestu byggðir á þeim.



MYND 23 Prepadæling í holu NG-6 á Nesjavöllum.



MYND 24 Prýstifall er 41,7 l/s dælingu var hætt



MYND 25 Prýstihækkun við þrepadælingu

Mynd 25 sýnir ádæliprepin og er vatnsleiðnin reiknuð út frá 30,1 l/s prepinu sem:

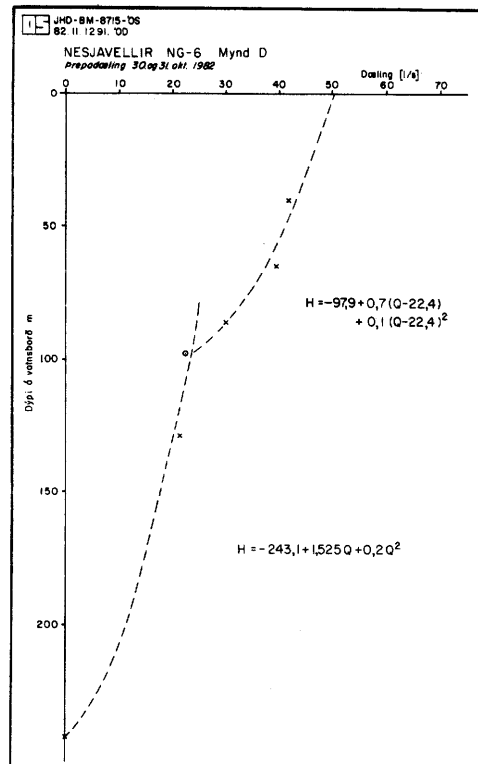
$$\frac{kh}{\mu} = 3,5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$$

Einnig sést að fyrstu 10 mín hefur holurýmdin verulega truflandi áhrif á prepin og áhrifa kælingar í borun gætir jafnvel einnig.

Ef reiknað er með að um það bil 30°C heitu vatni sé dælt út í nær 300°C heitt jarðhitakerfi má meta vatnsleiðnina út frá ádælingarstuðlinum B (sjá mynd 26). Það mat gefur nokkuð herra gildi fyrir vatnsleiðnina eða

$$\frac{kh}{\mu} = 5,0 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$$

Sú parabolulögun sem kemur fram á mynd 26 er yfirleitt talin merkja tregðu gegn streymi við holuna sjálfa, þ.e. vatnsleiðni er minni við borholuveggina en úti í jarðhitakerfinu. Þetta getur til dæmis gerst með því að borsvarf fari út í og þétti vatnsleiðandi lög eða æðar við borun. Hér aftur á móti er talið að megnið af þeirri tregðu sem kemur fram í þrepadælingunni stafi af áhrifum kælda svæðisins umhverfis holuna. Við nánari athugun er jafnvel talið að tregðustuðullinn sé neikvæður, sem getur þýtt að sprungur séu opnar inn í holuna. Sprungur sjást að öðru leyti ekki í þrepadælingunni.



MYND 26 Hæsta vatnsborðsstaða í hverju dæluprepi

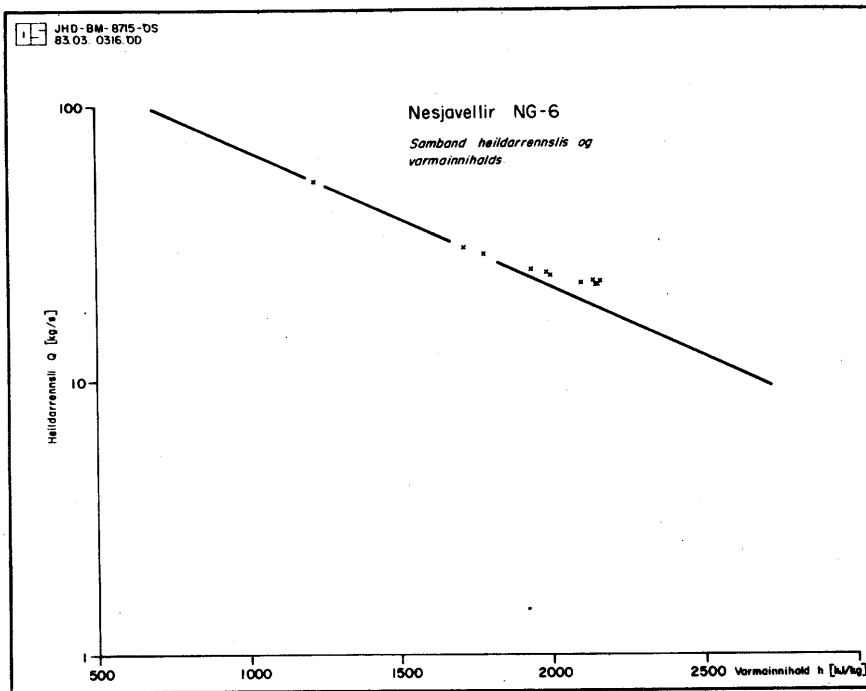
5.3 Samanburður á vatnsleiðni við aðrar holur

Prepadæling var gerð í holu NG-5 við borlok. Gæði mælingarinnar eru ekki mikil og hefur lítið verið hægt að lesa út úr henni annað en það sem hefur verið birt í skýrslu Orkustofnunar um holu NG-5 (Jens Tómasson o.fl., 1974). Lengsta samfellda vatnsborðsmælingin fyrir eitt dæluþrep nær yfir 55 mín. Út frá því hefur vatnsleiðni fyrir holu NG-5 verið áætluð sem:

$$\frac{kh}{\mu} = 1,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$$

Í skýrslu Jens Tómassonar o.fl. 1974 er línuleg mótstaða holunnar eða B-stuðull gefinn sem $B = 2,6 \text{ m}/(1/\text{s})$. Út frá honum má áætla vatnsleiðnina og fæst sama gildi og áður. Samkvæmt þessu er vatnsleiðni NG-6 tæplega 3 sinnum meiri en fyrir NG-5.

Í skýrslu Orkustofnunar um holu 13 í Kröflu (Valgarður Stefánsson o.fl., 1982) er sett fram tilgáta um línulegt samband milli logarithmans af heildarrennsli og varmainnihalds. Gert er ráð fyrir að við blástur þegar varmainnihald rennslis eykst komi fram línuleg hegðun sem hefur verið kölluð kennilína, og að hún hafi sömu hallatölu fyrir allar sambærilegar jarðhitaholur. Á mynd 27 hefur blásturssaga holu NG-6 verið teiknuð á Q - h graf. Kennilína holunnar hefur verið færð inn og framlengd til varmainnihalds 2700 kJ/kg. Þar er samsvarandi heildarrennsli lesið af grafinu sem $Q_{2700} = 9,7 \text{ kg/s}$. Í skýrslu Valgarðs Stefánssonar o.fl. (1982) er bent á hugsanlegt samband milli heildarrennslis með 2700 kJ/kg varmainnihaldi og vatnsleiðni holunnar. Samkvæmt því ætti hola með vatnsleiðnina $3,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa} \cdot \text{s}$ að hafa heildarrennslið $Q_{2700} = 9,4 \text{ kg/s}$. Ef tekið er mið af mynd 27 og þeirra gilda sem fengust fyrir holu NG-6 fellur hún vel að fyrrnefndum reynslusamböndum.



MYND 27 Samband heildarrennslis og varmainnihalds

5.4 Hiti og þrýstingur í jarðhitakerfi

Hiti í jarðhitakerfinu við holu NG-6 (berghiti) er illa ákvarðaður, og stafar það m.a. af því að fáar hitamælingar voru gerðar í holunni í upphitun. Hins vegar má fá fram sémilega mynd af þrýstingi í jarðhitakerfinu með því að bera saman þrýstimælingar, þrepaðalingar og borsögu holunnar. Þess ber að geta að mældir hita- og þrýstiferlar í borholum eru frábrugðnir þeirri dreifingu sem er á hita og þrýstingi í jarðhitakerfi.

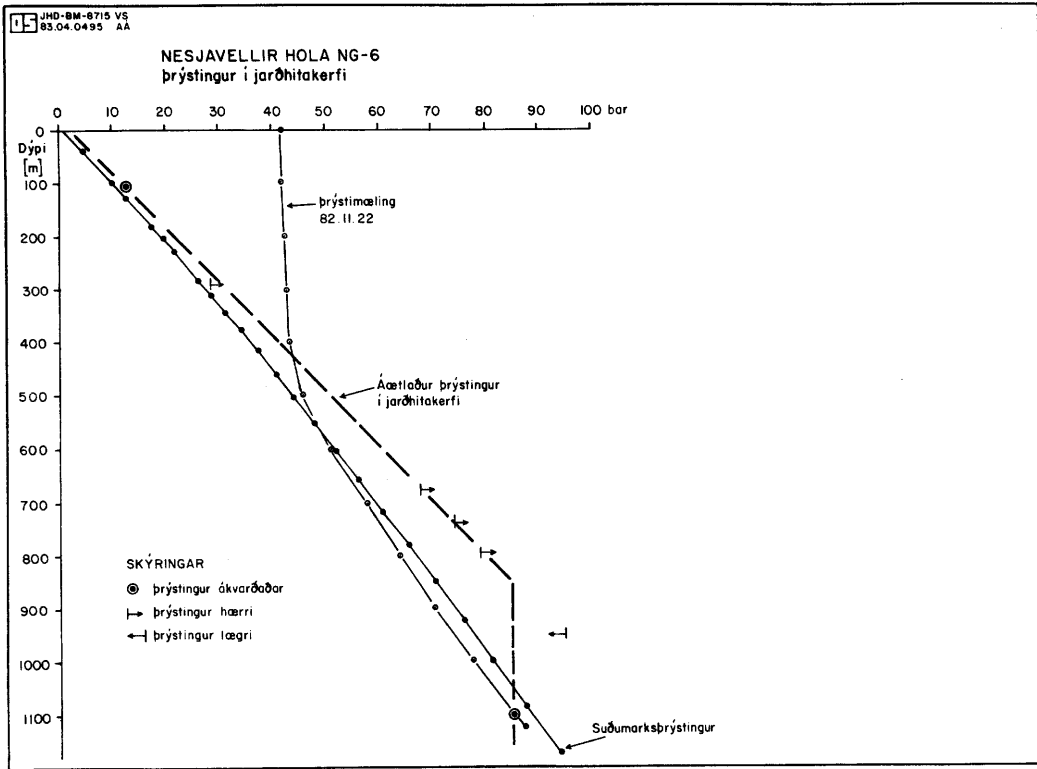
5.4.1 Þrýstingur

Ákvörðun á þrýstingi í jarðhitakerfi er möguleg við æðar á 104-112 m dýpi svo og við æð á 1095 m dýpi. Í borsögu kemur fram að þegar stungið hafði verið á æðum á 104-112 m dýpi var þrýstingur á holutoppi 1 bar þegar hitastig á vatni í holu var 25°C. Þetta gefur þrýsting 12,0 bar við æð á 112 m dýpi. Við borlok mælist vatnsborð í holu á 243 m dýpi og hitastig á vatni í holu var nálægt 40°C. Þrýstingur við æð á 1100 m dýpi reiknast þá 83,3 bar. Þrýstimæling gerð 82.11.22 í holu NG-6 gefur þrýsting 84,2 bar á 1100 m dýpi. Þar sem þessum

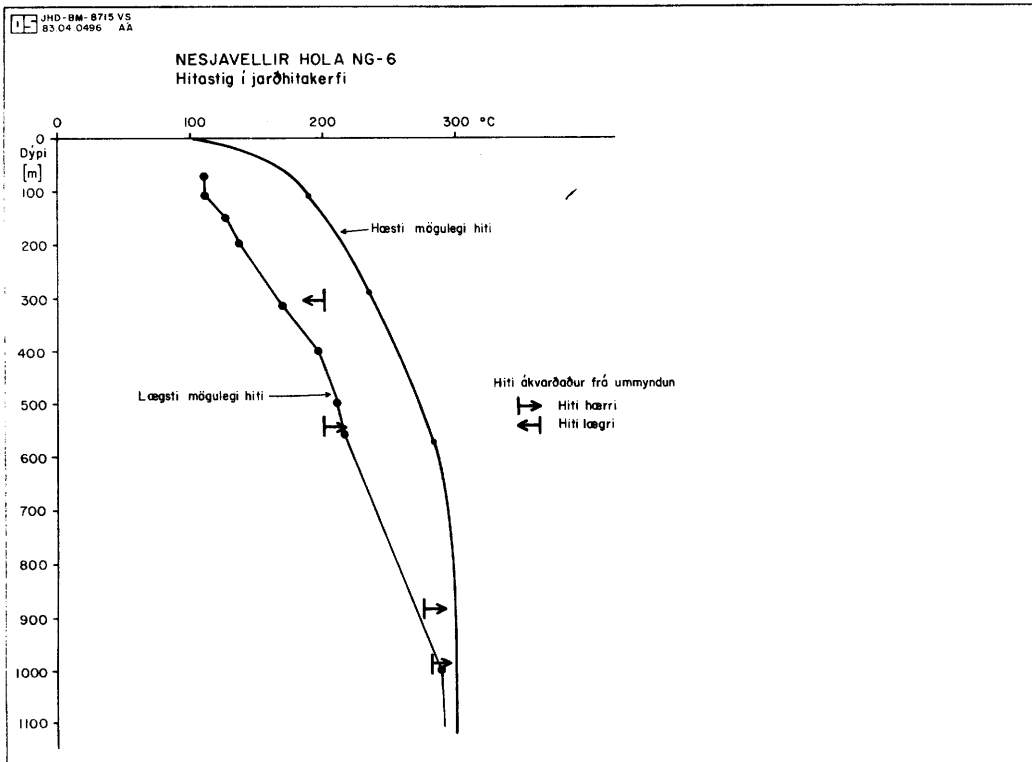
ákvörðunum ber mjög vel saman er þrýstingur við æð á 1095 m dýpi talinn vera 83,8 bar.

Nokkrar fleiri vísbendingar um þrýsting má fá úr borsöggunni (sjá mynd 3). Fyrsta æð sem skorin er eftir fóðringu í 212 m er æðin á 288 m dýpi. Þá fer að renna upp úr holu og hitastig á skolvatni í holunni er nálægt 25 °C. Þrýstingur á þessari æð er því hærri en samsvarar þunga vatnssúlunnar í holunni, en hann samsvarar þrýstingnum 28 bar. Á sama hátt má fá fram að þrýstingur á æð í 675 m er hærri en 66,0 bar. Æðin í 675 m er fyrsta æð sem skorin er eftir að 633 m fóðring hafði verið steypt í holuna. Í borsögu er þess einnig getið að rennsli hafi aukist úr holu allt niður fyrir 800 m dýpi. Það er því trúlegt að æðar í 740 og 795 m dýpi hafi einnig þrýsting sem er hærri en sem svarar þrýstingi frá 25°C vatnssúlu. Á hinn bóginn er alveg hætt að renna úr holu þegar komið er niður á 950 m dýpi. Má af því ráða að þrýstingur í jarðhitakerfi á 950 m dýpi sé lægri en 92,8 bar. Niðurstöður þessara athugana eru sýndar á mynd 28. Á þeirri mynd er einnig sýndur suðumarksþrýstingur miðaður við vatnsborð við yfirborð svo og þrýstiferill sem mældur var í holunni 82.11.22. Áætlaður þrýstistigull í jarðhitakerfi ofan við 800 m dýpi er svipaður og í kaldri vatnssúlu, sem er mun hærri stigull en í sjóðandi vatnssúlu. Af þessu má álykta að ofan við 800 m dýpi sé jarðhitavökvinn í hreinum vatnsfasa og að lóðrétt lekt bergsins sé fremur treg (sjá t.d. Donaldson et al. 1983). Neðan við 800-850 m dýpi virðist þrýstingur hins vegar breytast lítið með dýpi, og er þrýstingur þar um 84 bar. Þessar aðstæður eru samrýmanlegar við að á þessu dýpi (850-1100 m) sé gufulag. Einnig má fullyrða að ekki er í jarðhitakerfinu neitt greitt samband milli æðar í 740 m og æðar í 1095 m dýpi, enda byrjaði bullandi niðurrennsli í holunni og vatnsborð datt niður um 250 m eftir að komið var í æð á 1095 m.

Ef raunverulegt gufulag er fyrir hendi á 900-1100 m dýpi er þrýstingur gufunnar um 84 bar og hitastig hennar nálægt 300 °C. Öll þurr-gufusvæði, sem fram að þessu hafa fundist í heiminum hafa 240°C hita og 35 bara þrýsting. Tilvera 300°C heits gufulags er því nýmæli í rannsóknum jarðhitakerfa.



MYND 28 prýstingur í jarðhitakerfi



MYND 29 Hitastig í jarðhitakerfi

5.4.2 Hiti

Það eina sem vitað er um hita í jarðhitakerfinu við holu NG-6 er að æð á 1095 m er í suðu og hiti við þá æð er því nálægt 300°C.

Meðan á borun stóð kom hins vegar í ljós að sumar æðar voru mjög fljótar að hitna. Gæti það stafað af því að æðarnar eru nálægt suðumarki, eða af því að tiltölulega mikið lárétt rennsli er í kerfinu. Hér hjálpar einnig til að þrýstingur á æðum ofan við 800 m dýpi virðist vera hærri en sem samsvarar þunga kaldrar vatnssúlu. Þess vegna verður kæling á æðum við borun tiltölulega lítil. Með því að nota ákvörðun á þrýstingi í kerfinu (sjá mynd 28) má fá fram hæsta mögulega hita í jarðhitakerfinu. Þessi ferill er sýndur á mynd 29.

Á sama hátt má fá fram lágsta mögulegan hita í jarðhitakerfinu með því að athuga hitamælingar í holunni á mismunandi tímum. Slíkur ferill er einnig sýndur á mynd 29.

Á mynd 29 eru einnig teiknuð nokkur hitamörk á jafnvægishitastigi ummyndunarsteinda í berginu. Yfirleitt er þessi ummyndunarhiti á milli hæsta og lágsta mögulega hita sem fenginn er úr hita- og þrýstimælingum.

Milli lágsta og hæsta mögulega hita er 60-80°C munur í efri hluta holunnar, en talið er líklegt að raunverulegur berghiti liggja nær hæsta hitastigi en því lágsta.

5.4.3 Hiti og þrýstingur í öðrum holum

Í skýrslu þeirra Benedikts Steingrímssonar og Valgarðs Stefánssonar (1978) er dregið upp þversnið af dreifingu hita og þrýstings í jarðhitakerfinu við Nesjavelli. Niðurstöður hér að framan (sjá myndir 28 og 29) hafa verið bornar saman við eldri niðurstöður og líkleg dreifing á hita og þrýstingi í jarðhitakerfinu er sýnd á myndum 30 og 31. Þessar myndir eru snið í gegnum jarðhitakerfið frá suðri til

6 BLÁSTUR

Borun holunnar lauk þann 31. okt 1982 og var þá lokað fyrir holuna. Þegar holan var tilbúin til mælinga þann 12. nóvember, kom í ljós að holutoppsprýstingur var meiri en 60 bar. Byrjað var að láta holuna blæða gegnum 3 mm gat þann 15. nóv. Toppþrýstingur holunnar frá borlokum fram að upphleypingu er skráður í töflu 2. Þegar holan var hita- og þrýstimæld 22. nóvember 1983 var holutoppsprýstingur 42 bar. Ekki viðraði til upphleypingar fyrr en 9. desember og var holan allan þann tíma á blæðingu.

TAFLA 2 Holutoppsprýstingur NG-6 frá borlokun fram að upphleypingu.

1982	Holutoppsprýst. Athugasemdir	
Dags.	Kl	bar
31/10		Bormastur fellt - holu lokað.
12/11		>60 Hita- og þrýstimælingar.
15/11	16:00	68 Byrjað að láta blæða í gegnum 3 mm gat.
16/11	02:00	37,5
16/11	10:00	29,9 Holutoppur orðinn heitur.
16/11	14:00	Lokað fyrir blæðingu.
18/11		60
20/11	15:00	64 Byrjað að láta blæða í gegnum 3 mm gat.
20/11	16:35	57 Skipt yfir í 1,5 mm gat - í sömu andrá snarhitnaði holutoppurinn.
21/11	14:00	42
22/11	11:00	41,5 Hita- og þrýstimælingar.
23/11	19:30	44
24/11	21:40	44
25/11	22:35	44
27/11	18:00	42
2/12	18:00	48 Skipt yfir í 3 mm gat.
3/12	00:15	48
3/12	15:30	45
5/12	15:00	45,8
6/12	16:05	46
9/12	12:30	38,5 Byrjað að undirbúa upphleypingu holunnar. Holutoppur með samsvarandi hitastigi svo ekki var þörf á hægfara upphitun.

6.1 Upphleyping

Hafist var handa við upphleypingu þann 9. desember 1983 kl. 13:00. Holutoppsþrýstingur var þá 35,5 bar. Byrjað var að opna fyrir holuna kl. 13:53 og búið að fullopna fyrir holu kl. 15:35. Tafla 3 rekur helstu aðgerðir við upphleypingu.

TAFLA 3 Upphleyping holu NG-6 þann 9. desember 1982

Tími	P ₀ [bar]	P _C [bar]	Vatnshæð í kári [cm]	Vatnsrennsli [kg/s]	H [kJ/kg]	Q kg/s	G ₁ ks/s	G ₇ kg/s	Athugasemdir
13,00	35,5								
13,53	35-38								Opnað fyrir holu
13,54	32								Hert að
14,00	31								
14,12	29								
14,20	29								Opnað á legg
14,25	29								
14,30	27								
14,36	27								
14,45	24	1,0	17,0						
15,00	18	2,0	21,0						
15,10	16	2,5	24,0						Fullopið fyrir holu. Vatn drullugt. Lítið af grjóti, en smáskothríð á ca 15 mín. fresti.
15,25	12	3,3	24,0						
15,35									
15,48	10,5	3,2	23,0						
16,08	10,0	3,1	23,0						
16,45	10,0	3,0	23,0	32,2	12,51	51,0	18,8	13,7	

6.2 Varmainnihald og rennsli

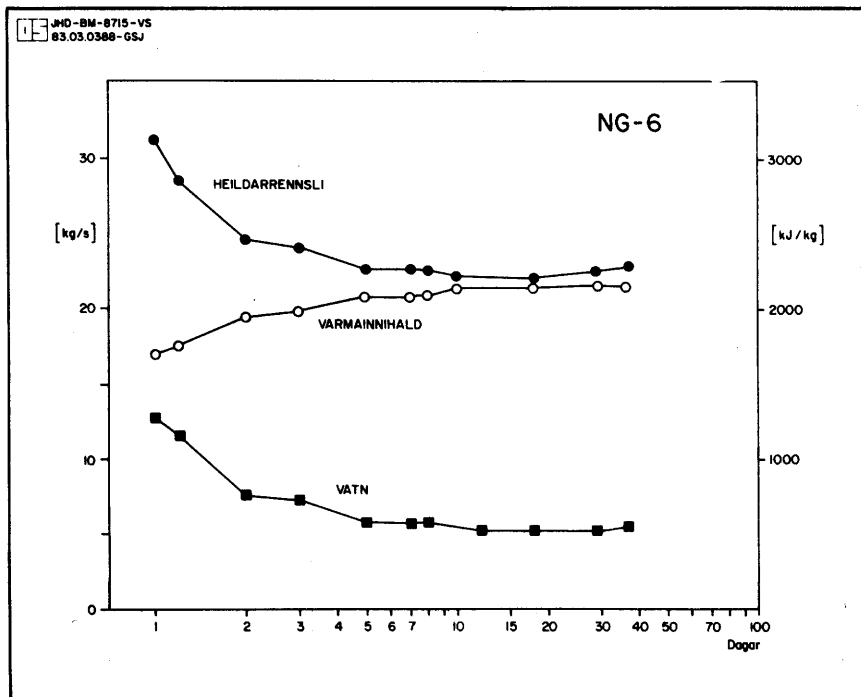
Holan hefur blásið samfelld frá upphleypingu, og eru aflmælingar fram í febrúar 1983 sýndar í töflu 4 og blásturssagan teiknuð á mynd 32.

Við upphleypingu er varmainnihald rennslis 1250 kJ/kg en hækkar á einum sólarhring í 1700 kJ/kg. Á sama tíma minnkar heildarrennsli úr 50 kg/s í 30 kg/s en gufuhluti breytist lítið. Þessi þróun heldur síðan áfram næstu 20-30 daga blásturs og er heildarrennsli þá orðið nokkuð stöðugt við 22 kg/s og varmainnihald rennslis er um 2150 kJ/kg. Rennslissagan er mjög dæmigerð fyrir vinnslu úr tveggja fasa sjóðandi jarðhitakerfi, eins og einnig kemur fram á mynd 27.

Eftir um það bil mánaðar blástur hættir rennsli úr holu að minnka, og má jafnvel sjá örlitla aukningu í rennsli á mynd 32. Greinilegar

TAFLA 4 Aflmælingar á holu NG-6

Dags.	Tími	P ₀ bar	P _c bar	V-hæð cm	Vatn kg/s	H kJ/kg	Q kg/s	G ₁ kg/s	G ₇ kg/s	G _{P₀} kg/s
82-12-09	17,00	10,0	3,0	23,0	34,0	1217	52,6	18,6	13,3	11,4
12-10	11,25	9,0	2,3	15,5	12,8	1711	31,1	17,2	14,8	14,1
12-10	16,30	8,5	2,25	15	11,4	1774	28,5	17,1	14,9	14,3
12-11	12,10	8,0	2,15	13,0	8,3	1929	25,2	16,8	15,0	14,7
12-11	14,10	8,0	2,15	12,5	7,5	1979	24,5	16,9	15,2	14,9
12-12	10,40	7,8	2,1	12,2	7,2	1996	23,9	16,7	15,0	14,7
12-14	16,10	7,85	2,1	11,3	5,8	2095	22,6	16,8	15,3	15,1
12-16	14,00	7,8	2,1	11,3	5,8	2095	22,6	16,8	15,3	15,1
12-16	16,00	7,6	2,08	11,2	5,8	2092	22,5	16,7	15,2	15,0 Skipt um þrýstimla
12-17	15,15	7,7	2,1	11,2	5,8	2095	22,6	16,8	15,3	15,1
12-21	23,10	8,0	2,1	10,8	5,2	2144	22,1	16,8	15,5	15,2
12-22	14,00	7,8	2,08	10,8	5,2	2141	22,0	16,7	15,4	15,1
12-27	11,30	7,9	2,08	10,8	5,2	2141	22,0	16,7	15,4	15,1
83-01-07	12,55	8,2	2,2	10,8	5,2	2157	22,6	17,4	16,0	15,7
01-15	13,30	8,4	2,2	11,0	5,5	2133	22,9	17,4	15,9	15,6
01-17	15,15	8,7	2,2	11,7	6,5	2060	23,8	17,3	15,7	15,3
01-30	17,00	8,8	2,3	12,0	6,8	2050	24,6	17,8	16,1	15,7
02-03	15,30	8,8	2,3	12,0	6,8	2050	24,6	17,8	16,1	15,7
02-10	16,15	9,0	2,3	12,0	6,8	2050	24,6	17,8	16,1	15,7
04-06	18,50	9,5	2,48	12,8	7,9	2007	26,5	18,6	16,8	16,3
05-06	14,00	8,7	2,40	12,5	7,5	2015	25,8	18,2	16,5	16,1
05-16	14,10	8,8	2,38	12,5	7,5	2013	25,7	18,1	16,4	15,9
06-03	10,40	8,9	2,40	12,5	7,5	2015	25,8	18,2	16,6	16,0
06-08	15,30	9,1	2,50	12,7	7,9	2005	26,7	18,7	16,9	16,4



MYND 32 Nesjavellir, hola NG-6 - Blásturssaga

kemur þessi breyting þó fram á mynd 27 þar sem teiknað er upp samband heildarrennslis og varmainnihalds vökvans. Þar sést að blástur holunnar er farinn að víkja frá kennilínu.

Þegar blástur holu vikur frá kennilínu er það talið stafa af því að rennslisviðnám í holuni sjálfri eða í jarðhitageyminum breytist. Ef rennsli eykst með tíma miðað við kennilínu er það talið stafa af því að blástur holunnar kælir bergið í næsta nágrenni holu þannig að aðrennslissprungur víkka og skapa þannig aukna vatnsleiðni inn í holuna (Stefánsson and Steingrímsson 1980).

Meginhluti rennslis úr holu NG-6 er talinn koma úr tveim æðum, á 740 og 1095 m dýpi. Í kafla 3.4.1 er sýnt fram á að 740 m æðin er með hreinann vatnsfasa, en að 1095 m æð er að öllum líkindum hrein gufa (mynd 28). Blásturssaga holunnar fellur hins vegar mjög vel að kennilínunum fyrir holur sem taka vökva úr sjóðandi jarðhitakerfi, og gæti það táknað að líta megi á æðina í 740 m sem sjóðandi.

Miðað við reynslu af holum í Bjarnarflagi og á Tongonan svæðinu á Filippseyjum má jafnvel búast við að rennsli úr holu NG-6 aukist eitthvað á næstu mánuðum.

6.3 Efnasamsetning borholuvökva

Frá því að holu NG-6 á Nesjavöllum var heypt í blástur (9. des. 1982) hefur verið fylgst með samsetningu borholuvökvans. Fyrstu fjóra dagana var fylgst mjög náíð með breytingum á efnainnihaldinu. Voru þá tekin 5 sýni. Á næstu tveim vikum var tekið sýni vikulega, en síðan hefur verið safnað sýnum til efnagreininga á um það bil mánaðar fresti.

6.3.1 Söfnunar- og efnagreiningaaðferðir

Sýnum var safnað undir þrýstingi og vatni og gufu + gasi safnað sitt í hvoru lagi. Gasi og gufu var safnað í gastúpu með septum, sem lofttæmd var á staðnum. Sýni til greininga á heildarstyrk koldíoxíðs og brennisteinsvetnis var safnað í ákveðið rúmmál af 60 % KOH lútarlausn (með þekkta eðlisþyngd), sem sprautað var inn í túpuna, en aðrar gastegundir (H₂, CH₄, N₂, O₂ +Ar) söfnuðust fyrir yfir lútnum. Hlutfall gass og gufu var mælt sérstaklega. Vatnssýnum var safnað á

fimm mismunandi vegu. Safnað var á gastúpu til ákvörðunar á sýrustigi, heildarkarbonati og heildarbrennisteinsvetni í vatnsfasanum. Hluti sýnisins var síaður og sýrður til ákvörðunar á katjónum. Í hluta sýnisins, sem síðan var notað til ákvörðunar á súlfati og klór, var bætt zinkacetati. Hluti sýnis var þynntur og notaður til mælingar á kísli, og loks var safnað ómeðhöndluðu sýni á plastflösku. Samhliða söfnun var gerð aflmæling á holunni. Þær efnagreiningar sem notaðar voru við efnagreiningar eru sýndar í töflu 5.

TAFLA 5 Nesjavellir hola NG-6. Yfirlit yfir efnagreiningaraðferðir

	<u>Efni</u>	<u>Aðferð</u>
Vatnsfasi	pH	pH-mælir
	SiO ₂	Spektrófótómetrískt með ammonium molybdati
	Na	"Atomic absorption" mæling
	K	" " "
	Ca	" " "
	Mg	" " "
	CO ₂	Títrun með 0.1N HCl úr pH 8.2 til 3.8
	SO ₄	Títrun með Ba(ClO ₄) og thorin sem indikator
	H ₂ S	Títrun með Hg(CH ₃ COO) ₂ og dithizone sem indikator
	Cl	Títrun með AgNO ₃ og kalium kromat sem indikator
F	Selektródumæling	
Gufufasi	CO ₂	Eins og í vatnsfasa
	H ₂ S	Eins og í vatnsfasa
	H ₂	Gaskrómatógraf
	CH ₄	"
	N ₂	"
	O ₂ +Ar	"

Við efnagreiningu á sýni úr holu NG-5 sem notað er til samanburðar var beitt sömu aðferðum, nema gasi og gufu var safnað aðskilið. Brennisteinsvetni og koldíoxíð í gasi var þá greint með gaskrómatógraf.

6.3.2 Niðurstöður efnagreininga

Þegar varmainnihald borholuvökvans er hærra en gufumettaðs vatns, við sama þrýsting og er í jarðhitakerfinu, er talað um umfram-varmainnihald (excess enthalpy) vökvans. Gefur það til kynna tvo fasa, vatn og gufu í jarðhitakerfinu. Styrkur sumra efna dreifist milli beggja fasanna og er sú dreifing háð þrýstingi. Efnasamsetning heildarrennslis er aftur á móti sú sama ef sama ástand ríkir í jarðhitageyminum. Breytileg efnasamsetning heildarrennslisins gefur því til kynna breytingar í jarðhitageyminum, svo sem breytingar á hitastigi og áhrif mismunandi heitra æða.

Styrkur efna í rennsli holunnar, reiknaður út frá niðurstöðum efnagreininga, er skráður í töflu 6, ásamt aflmælingum gerðum á sama tíma. Í töflu 7 er skráð djúpvatnssamsetning reiknuð við 290° C, sem er nærri mældum hita í holunni.

Til eru nokkrar efnagreiningar á borholuvökva í holu NG-5 á Nesjavöllum. Flestar greiningarnar eru frá því fyrir eða um 1975. Einungis er til ein aflmæling af holu NG-5, þar sem mældur er krítiskur þrýstingur og vatnsrennsli (Benedikt Steingrímsson og Valgarður Stefánsson 1979). Yngsta efnagreining á vökva úr holu NG-5 hefur verið valin til samanburðar við holu NG-6. Í töflu 8 er skráð samsetning á heildarrennsli miðað við varmainnihald fengið úr einu aflmælingunni sem mæld hefur verið með krítiskum þrýstingi og vatnsrennsli. Í töflu 9 er skráð djúpvatnssamsetning þessa sýnis bæði miðað við reiknað varmainnihald (þ.e. gufumettaðs vatns) svo og varmainnihald úr aflmælingunni sem nefnd er að framan.

TAFLA 6 Efnainnihald í heildarrennsli úr holu NG-6 á Nesjavöllum.
Styrkur efna í mg/kg

Sýni nr.	5201	5202	5203	5204	5205	5206	5207	5002	5013
Dags.	821209	821210	821210	821211	821212	821216	821222	830115	830308
Po bara	11,0	10,0	9,5	9,0	8,8	8,7	8,8	9,4	9,6
Ho (kJ/kg)	1217	1711	1775	1954	1996	2092	2141	2133	2062
SiO ₂	364	297	255	230	226	180	179,6	190,7	226
Na	74,2	53,0	49,8	38,8	35,5	29,6	27,1	32,1	36,5
K	35,1	14,4	10,8	9,4	7,9	7,7	7,8	6,7	7,3
Ca	1,0	0,69	0,72	0,34	0,33	0,2	0,13	0,07	0,08
Mg	0,03	0,03	0,43	0,01	0,096	0,303	0,004	0,001	0,001
SO ₄	41,3	24,7	23,9	17,8	12,4	6,69	4,66	2,00	2,38
Cl	1,3	2,21	1,07	0,85	2,16	7,8	8,42	3,79	3,31
F	0,23	0,15	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	
CO ₂	8049	2289	1864	2262	1890	2979	2214	2916	2598
H ₂ S	388,1	1031,1	737,4	1043,3	1403	1073	1390	1334	1288
H ₂	9,95	33,3	30,5	43,9	42,7	47,5	46,7	45,3	62,3
CH ₄	2,89	8,35	1,63	2,58	0,37	2,59	1,14	0,25	1,42
N ₂	559	514	388	315	199	94,1	56,7	33,2	60,3

TAFLA 7 Efnainnihald vatns og gufu við 290°C í holu NG-6 á
Nesjavöllum. Styrkur efna í mg/kg

Sýni	5201	5202	5203	5204	5205	5206	5207	5002	5013
Dags.	821209	821210	821210	821211	821212	821216	821222	830115	830308
Po bara	11,0	10,0	9,5	9,0	8,8	8,7	8,8	9,4	9,6
Ho (kJ/kg)	1289	1711	1774	1954	1996	2092	2141	2133	2062
pH	6,84	7,81	7,90	7,82	7,77	7,75	7,69	7,70	7,60
SiO ₂	468,5	567,1	520,6	574,5	596,5	543,3	583,7	605,7	645,6
Na	95,6	101,0	101,4	96,9	93,4	89,4	88,0	102	104,3
K	45,2	27,4	22,0	23,5	21,0	23,1	25,3	21,4	20,8
Ca	1,34	1,31	1,46	0,84	0,88	0,60	0,41	0,22	0,22
Mg	0,04	0,06	0,87	0,03	0,25	0,92	0,01	0,004	0,004
SO ₄	53,2	47,1	48,7	44,4	32,8	20,2	15,2	6,34	6,81
Cl	1,68	4,21	2,17	2,12	5,07	23,6	27,4	12,1	9,45
F	0,29	0,28	0,27	0,33	0,34	0,41	0,46	0,47	
CO ₂ (v)	1035	115,2	95,4	91,7	71,0	103,5	70,5	94,1	82,9
H ₂ S(v)	500	197,4	147,5	166,4	205,2	144,3	171,1	166,8	155,0
H ₂ (v)	12,8	0,32	0,27	0,33	0,31	0,32	0,30	0,30	0,43
O ₂ +Ar(v)	12,4	0,08	0,08	0,05	0,03	0,04	0,04	0,01	0,04
CH ₄ (v)	3,72	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
N ₂ (v)	719,7	4,02	2,84	1,96	1,19	0,52	0,31	0,18	0,35
CO ₂ (g)		4686	3573	3713	3000	4451	3167	4213	3952
H ₂ S(g)		1951	1308	1629	2133	1534	1931	1870	1899
H ₂ (g)		69,7	59,7	73,0	68,5	71,1	67,4	66,0	95,7
CH ₄ (g)		6,92	3,19	4,29	0,59	3,87	1,64	0,37	2,18
N ₂ (g)		1076	760	524	319	140	81,7	48,4	92,5
O ₂ +Ar(g)		17,5	15,6	10,5	5,7	7,5	7,7	2,12	7,86

TAFLA 8 Efnainnihald í heildarrennsli í holu NG-5,
Nesjavöllum, miðað við mælt varmainnihald.
Styrkur efna í mg/kg

Sýni	5001
Dags.	811208
Po (bara)	7,2
Ho (kJ/kg)	1479
SiO ₂	359,6
Na	68,1
K	15,1
Ca	0,72
Mg	0,23
SO ₄	9,24
Cl	6,74
F	0,52
CO ₂	2112
H ₂ S	602
H ₂	30,7
CH ₄	13,5
N ₂	84,9

TAFLA 9 Efnainnihald vatns og gufu við 265°C í holu NG-5,
Nesjavöllum. Styrkur efna í mg/kg

Sýni	5001	5001
Dags.	811208	811208
Po bara	7,2	7,2
Ho (kJ/kg)	1159 (reiknað)	1479 (mælt)
pH	7,03	7,9
SiO ₂	581,2	538,5
Na	110,0	109,5
K	24,4	24,2
Ca	1,17	1,16
Mg	0,36	0,36
SO ₄	14,9	14,9
Cl	10,8	10,8
F	0,85	0,84
CO ₂ (v)	681,3	115,4
H ₂ S(v)	274,2	136,7
H ₂ (v)	9,4	0,18
O ₂ +Ar(v)	0,0	0,00
CH ₄ (v)	4,14	0,05
N ₂ (v)	26,0	0,41
CO ₂ (g)		5392
H ₂ S(g)		1367
H ₂ (g)		80,8
CH ₄ (g)		35,7
N ₂ (g)		223,8
O ₂ +Ar(g)		0,00

6.3.3 Breytingar á efnasamsetningu með tíma

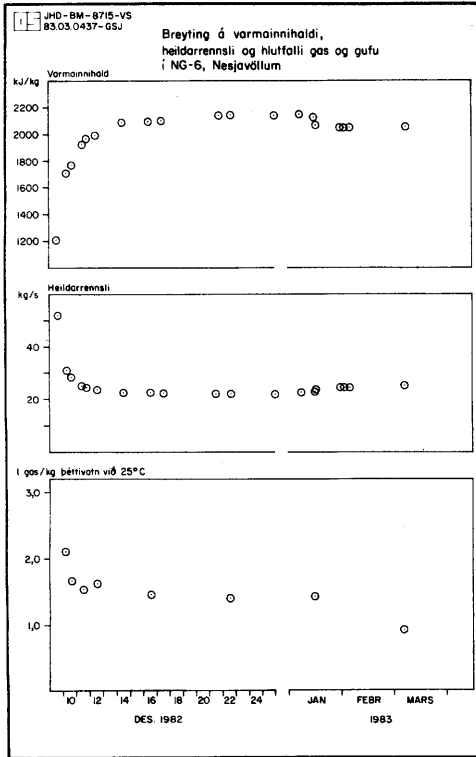
Myndir 34 til 38 sýna helstu breytingar á efnainnihaldi frá því holunni var hleypt í blástur. Á mynd 33 sjást til samanburðar breytingar á varmainnihaldi, heildarrennsli og hlutfall gass og gufu við 25°C. Eftir um það bil viku blástur hefur varmainnihaldið og rennslið nokkurn veginn náð jafnvægi. Þó virðist heldur vera aukning á rennsli síðasta mánuðinn og er aukningin heldur meiri á vatni en gufu (sjá kafla 6.2). Hlutfallið gas/gufa minnkaði niður í um 1,5 lítra af gasi með 1 kg af gufu á um það bil viku. Á fyrstu 3 til 4 dögum hafði holan náð að hreinsa út gasið sem hafði safnast fyrir áður en holunni var hleypt í blástur. Síðan hefur gasmagnið verið nokkuð stöðugt þar til í febrúar - mars 1983. Á sama tíma og rennslið eykst minnkar gasið í gufunni.

Mynd 34 sýnir breytingar á styrk koldíoxíðs, brennisteinsvetnis og köfnunarefnis með tíma. Segja má að styrkur þessara efna hafi orðið nokkurn veginn stöðugur eftir um það bil einnar viku blástur. Styrkur köfnunarefnis, sem í upphafi er eflaust að mestu upprunnið úr andrúmslofti og stafar af mengun af skolvatni, minnkar oft í byrjun, en styrkur annarra gastegunda svo sem kolsýru, brennisteinsvetnis og vetnis eykst að sama skapi.

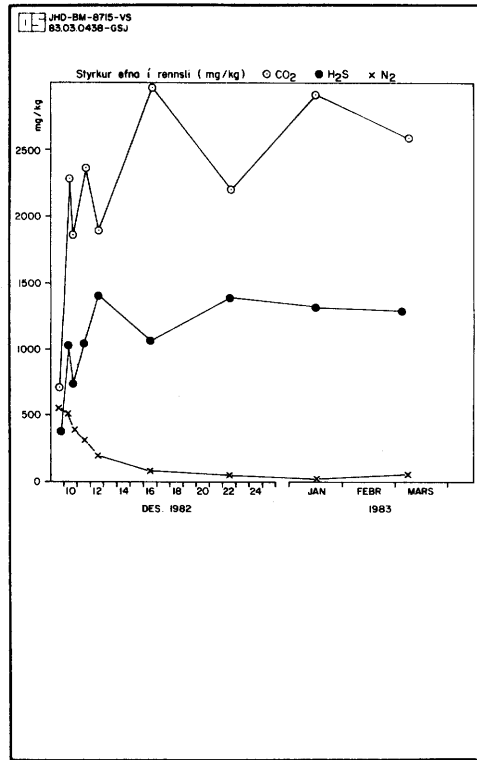
Styrkur flestra uppleystra efna minnkar ört í rennslinu í byrjun, samhliða minnkun vatnshlutans (myndir 36 og 37). Aukning í vatnshluta umfram gufuhluta í síðustu mælingum kemur strax fram í styrk kísils og natríums, þó að aukning vatnsins sé einungis um 3%.

Á mynd 38 er sýnd breyting á hlutfallinu H_2S/SO_4 með tíma. Hlutfallið sem er lágt í upphafi, líklega vegna áhrifa andrúmslofts og skolvatns, en hækkar með tíma. Hátt hlutfall í síðustu sýnum bendir til lítt oxandi aðstæðna og að ekki sé um að ræða blöndun við andrúmsloft.

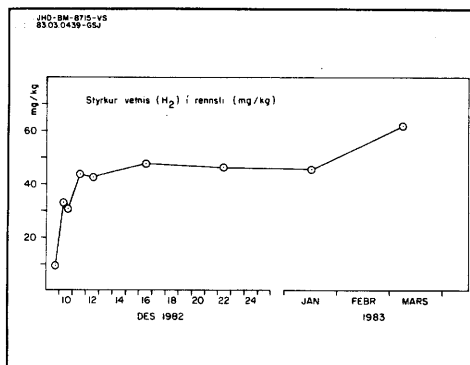
Það kemur glögg fram í efnainnihaldi rennslisins að áhrifa skolvatnsins gætir verulega í byrjun blásturs, en á mjög skömmum tíma eftir að blástur hefst hverfa áhrif þess.



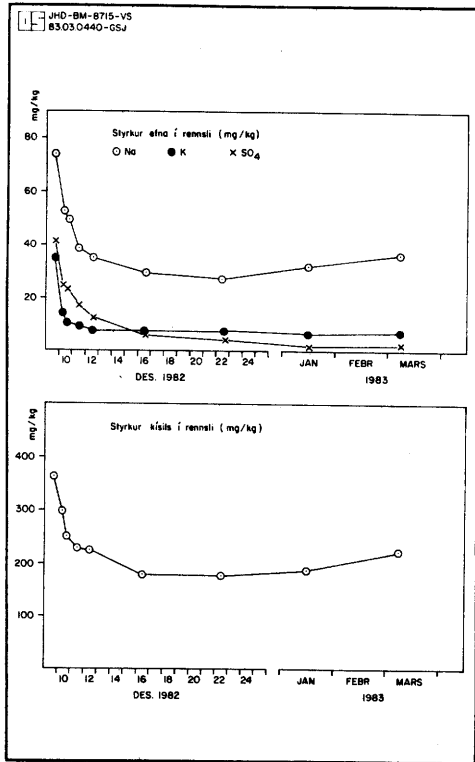
MYND 33 Breyting á varmannihaldi, heildarrensli og hlutfalli gass og gufu



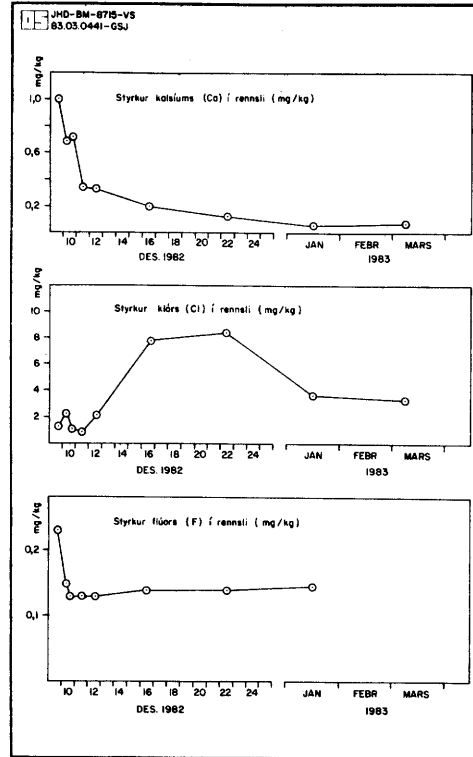
MYND 34 Styrkur efna í rennsli



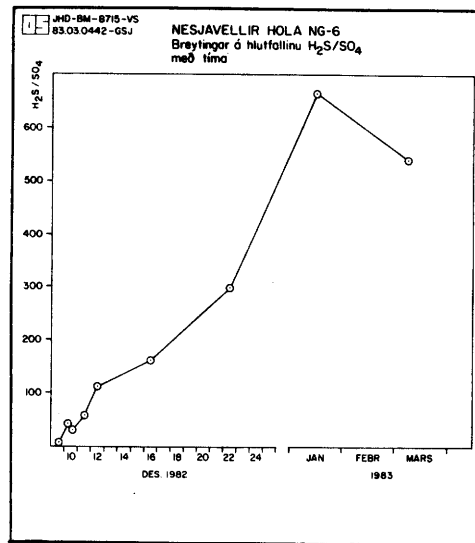
MYND 35 Styrkur vetnis í rennsli



MYND 36 Styrkur natríums, kalíums, sulfats og kísils í rennsli



MYND 37 Styrkur kalsíums, klórs og flúors í rennsli



MYND 38 Breytingar á hlutfallinu H₂S/SO₄ með tíma

6.3.4 Efnahiti og jafnvægi bergs og vökva

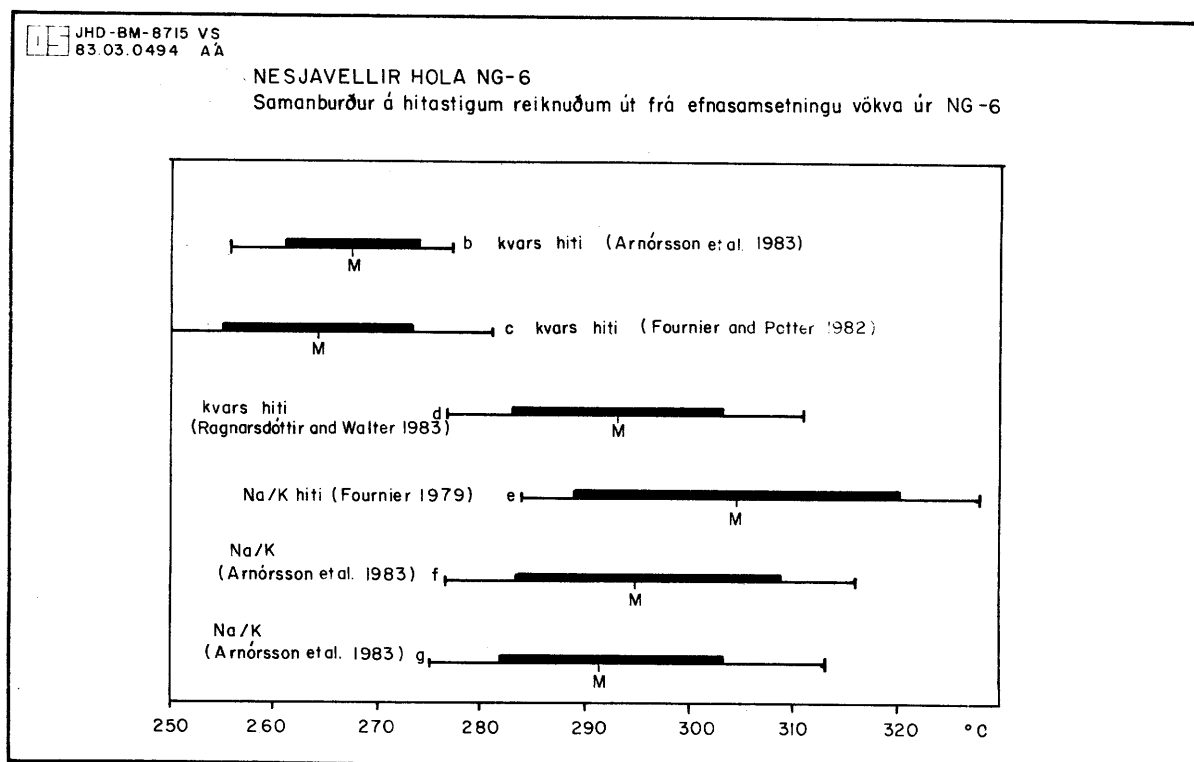
Þegar efnasamsetning jarðhitavökva nær jafnvægi við bergið, stjórnast styrkur flestra aðalefna í vökvanum af uppleysanleika steintegunda, en uppleysanleikinn er háður hitastigi. Styrkur efna eða hlutföll efna er þannig háður hitastigi. Styrkur efna eða hlutföll efna er þannig mælikvarði á hitastig í jarðhitageyminum. Hin ýmsu efni eru misjafnlega vel til þess fallin að áætla hitastig í jarðhitageyminum. Mest reynsla hefur fengist af styrk kísils (kvarshiti, kalsedónhiti) og styrkhlutföllum natríums og kalíums (Na/K hiti). Kvarðanir fyrir þessi efni hafa sýnt trúverðugar niðurstöður upp að um það bil 250° C, en við hærri hita hefur skekkjan verið stærri. Kísilhitakvörðunin hefur byggst að mestu á ákvörðunum á uppleysanleika kvars og kalsedóns við stofuhita og þau gildi síðan framreiknuð. Nýlega hefur komið fram kvörðun fyrir kvarshita, sem byggir á uppleysanleika tilraunum á kvarsí við 250°C (Ragnarsdóttir and Walter 1983). Na/K hiti byggir á jónaskiptajafnvægi milli Na feldspata og K feldspata. Nýlega hefur Na/K hitinn verið endurkvarðaður út frá borholugögnum (Arnórsson et al. 1983a).

Tafla 10 sýnir útreiknað efnahitastig kvarshita og Na/K hita fyrir sýni úr holu NG-6. Sýndar eru nokkrar mismunandi kvarðanir. Mældur hiti í holunni var um 290°C.

TAFLA 10 Efnahiti reiknaður út frá efnasamsetningu vökva úr holu NG-6, Nesjavöllum.

Sýni	Dags.	kvars - hiti				Na/K - hiti		
		a	b	c	d	e	f	g
82-5201	821209	246		242	268	400	378	357
82-5202	821210		266	260	289	321	309	300
82-5203	821210		256	250	277	294	285	275
82-5204	821211		267	262	291	307	297	288
82-5205	821212		272	268	297	297	288	282
82-5206	821216		262	256	284	315	304	301
82-5207	821222		270	266	295	328	316	313
83-5002	830115		271	271	300	290	282	282
83-5013	830308		277	281	311	284	277	276
Meðaltal (8)			267	264	293	305	295	290
Meðalfrávik			6,5	9,5	10,4	15,6	14,0	13,6

(1982) fyrir kísilhita gefa mun lægri hita en mælst hefur í holunni. Þessar kvarðanir virðast því ekki henta við svona hátt hitastig. Kvörðun Fournier (1979) fyrir Na/K hita gefur að meðaltali 12° C hærri hita en kvarðanir Arnórsson et al. (1983). Munurinn er þó ekki marktækur ef litið er á meðaltöl hitastiganna og meðalfrávik. Mismunur hitastiga reiknuðum með kvörðun Kristínar Völu Ragnarsdóttur og Walters (Ragnarsdóttir and Walter 1983) fyrir kísilhita og kvörðun Arnórsson et al. fyrir Na/K hita er um 10°C.



MYND 39 Samanburður á hita reiknuðum út frá efnasamsetningu vökva úr holu NG-6 á Nesjavöllum

Þar sem kvarts hita og Na/K hita ber nokkuð vel saman og þeir gefa hitastig nokkuð nærri mældum hita má gera ráð fyrir að jarðhitavökvinn hafi náð jafnvægi við kvars og þær steindir sem stjórna Na/K hita.

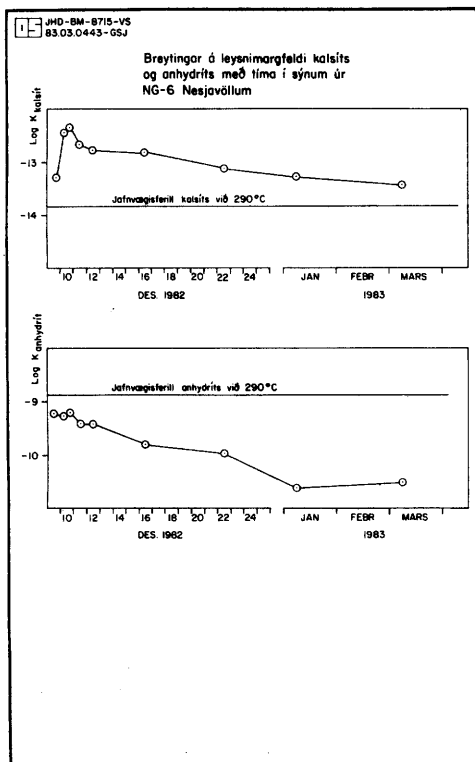
Efnasamsetning vökvans bendir til hitastigs 290 til 310 ° C. Jarðhitavökvi í jafnvægi við berg er yfirleitt mettaður af kalsíti. Anhydrítmettun næst yfirleitt í söltu vatni og oft í jarðhitavökva með litla seltu við hitastig yfir 200° C. Jafnvægi milli flúoríts og vatns næst yfirleitt ekki hér á landi nema ef vatnið streymir um súrt berg. Á mynd 40 er sýnt hvernig leysnimargfeldi kalsíts og anhydríts

breytist með tíma í vökva úr holu NG-6. Í upphafi blásturs fjarlægist vökvinn kalsítjafnvægi en nálgast jafnvægi aftur við áframhaldandi blástur. Í síðustu sýnum er útreiknað leysnimargfeldi kalsíts innan skekkjumarka jafnvægisferils fyrir kalsít. Í upphafi blásturs er vökvinn í jafnvægi með tilliti til anhydrits, en verður undirmettaður er frá líður. Vökvinn úr NG-6 er í öllum tilfellum undirmettaður með tilliti til flúoríts.

Erfitt er að segja til um hvort jafnvægi hafi náðst við aðrar jarðhitasteindir, þar sem flestar þeirra innihalda járn eða ál en þessi efni hafa ekki verið greind í vatninu.

Hér á landi hafa ýmis óhlaðin sýrumólikúl (H_4SiO_4 , H_2CO_3 , H_2S , H_2SO_4 , HF) og katjóna/prótónu hlutföll í jarðhitavatni hagað sér mjög reglulega með hitastigi. Sú athugun sem fram hefur farið (Arnórsson et al., 1983b) nær einungis upp í um $250^\circ C$. Sýnin úr NG-6 eru nærri framreiknuðum jafnvægisferlum, en þó eru frávik heldur stærri en búast hefði mátt við ef um jafnvægi væri að ræða. Þetta getur stafað af því að það getur verið erfiðleikum bundið að reikna efnasamsetningu vökva í jarðhitageyminum þegar um er að ræða umframvarmainnihald.

Í heildina má þó líta svo á að vökvinn úr NG-6 á Nesjavöllum hafi náð jafnvægi við berg á fyrstu viku blásturs.



MYND 40 Breytingar á leysnimargfeldi kalsíts og anhydrits með tíma í vökva úr holu NG-6 á Nesjavöllum

6.3.5 Efnasamsetning í öðrum holum

Einungis fáar gamlar greiningar eru til á vökva úr öðrum holum á Nesjavöllum. Hola NG-5 hefur verið best könnuð. Í töflu 8 er skráð reiknuð efnasamsetning í rennsli úr NG-5. Notuð er yngsta efnagreiningin (des. 1981) og eina aflmælingin sem til er, þar sem mældur er krítískur þrýstingur og vatnsrennsli (2. apríl 1975). Í töflu 9 er skráð djúpvatnssamsetning borholuvökva í NG-5, bæði miðað við reiknað varmainnihald (þ.e. gufumettaðs vatns) svo og varmainnihald í áður nefndri mælingu. Ekki er hægt að sjá neinn mun á efnasamsetningu NG-5 annars vegar og NG-6 hins vegar, ef miðað er við þá óvissu sem ríkir um rétt varmainnihald NG-5. Þess má geta að Na/K hiti miðað við kvörðun Stefáns Arnórssonar o.fl. (Arnórsson et al. 1983) er 287 til 288°C og kvars hiti miðað við kvörðun Krústínar Völu Ragnarsdóttur og Walters (Ragnarsdóttir and Walter 1983) 288 til 297°C eftir því hvort um er að ræða mælt varmainnihald eða reiknað. Benedikt Steingrímsson og Valgarður Stefánsson (1979) telja líklegt að hitastig í æðum á um 1550 m dýpi sé 300-325°C.

Tafla 11 sýnir meðalstyrk klórs, flúors og hlutfallið Cl/F í vatni úr borholum á Nesjavöllum sem soðið hefur í 100°C. Mjög lítill munur er á öllum holum. Flúormagn er ekki alveg sambærilegt vegna mismunandi greiningaaðferða. Styrkur klórs í holu NG-4 og í síðustu sýnum úr holu NG-6 er heldur hærri. Óvíst er hvort um marktækan mun er að ræða. Frekara eftirlit með holu NG-6 mun ef til vill skera þar úr um.

Tafla 11 Meðalstyrkur klórs og flúors og hlutfallið Cl/F í vatni úr borholum á Nesjavöllum, sem soðið hefur niður í 100 C

Hola	Fjöldi greininga	Cl mg/kg	F mg/kg	Cl/F
NV-2	1	14,5	0,3	48,3
NV-3	2	13,2	1,1	12,0
NG-4	4	46,4	2,0	23,2
NG-5	11	13,4	2,35	5,70
NG-5 (1981)	1	16,4	1,27	12,91
NG-6	9	17,2	0,63	27,3
NG-6 (4 síðustu)	4	32,1	0,77	41,2

7 HELSTU VINNSLUEIGINLEIKAR

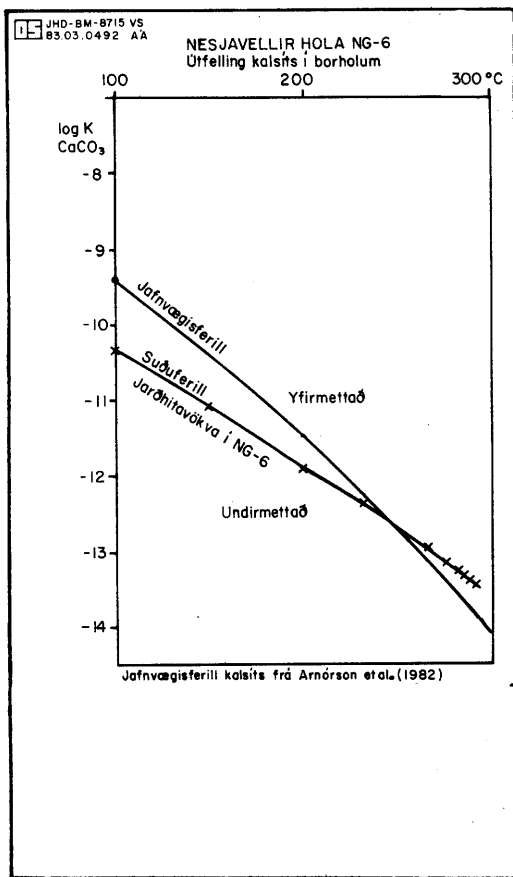
Vinnslueiginleikar holu NG-6 á Nesjavöllum eru óvanalega hagstæðir. Massastreymi úr holunni er í meðallagi (23 kg/s), en hið háa varmainnihald rennslis (2100 kJ/kg) hefur það í för með sér að afl holunnar er tiltölulega mikið. Sem varmi er afl holunnar 49 MW og gufurennslid ætti að standa undir 7-8 MW raforkuframleiðslu í eimsvalatúrbínu. Hlutfall milli vinnanlegrar hreyfiorku (til raforkuframleiðslu) og varmaorku er þannig 15%, sem er um tvisvar sinnum hærra en hægt er að fá úr jarðhitaholum sem taka inn jarðhitavökva í hreinum vatnsfasa. Til samanburðar má geta þess að ef allt rennsli úr holunni væri hrein gufa mundi hlutfall hreyfiorku og varmaorku aðeins aukast í 17%, sem er hæsta hlutfall sem hægt er að ná.

Í kafla 5.4 hér að framan er sýnt fram á að á 900-1100 m dýpi í holu NG-6 sé að öllum líkindum gufulag með 300°C hita og 84 bar þrýstingi. Þessar aðstæður gera Nesjavallasvæðið einstætt meðal allra jarðhitakerfa heimsins, og vinnslutæknilega er 300°C heitt "þurr-gufusvæði" trúlega mun hagstæðara en venjuleg þurr-gufusvæði, sem hafa hitastig 240°C við 35 bara þrýsting. Með vissum rétti má því segja að borun NG-6 bendi til hagstæðustu vinnslueiginleika jarðhitakerfis sem fram að þessu hefur fundist í heiminum. Við nýtingu háhita á Íslandi er raforkuframleiðsla talin harðasta fjárhagslega viðmiðun, en aðrir nýtingarmöguleikar auðveldari. Vinnslueiginleikar Nesjavallasvæðisins virðast hins vegar mjög heppilegir til raforkuvinnslu.

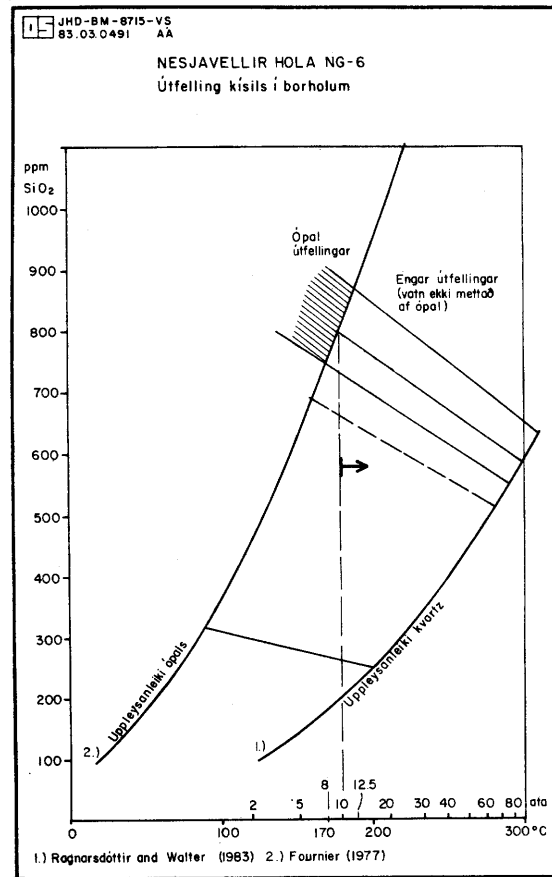
Blásturssaga holu NG-6 ber einkenni holu sem tekur vökva úr sjóðandi jarðhitakerfi. Ef þessi einkenni haldast má búast við að hnignun holunnar verði hægfara. Erfitt er að segja nánar til um þetta atriði, en möguleiki gæti verið á að það líði 1-2 ár þangað til hnignun fer að segja til sín.

Selta jarðhitavökvans er mjög lítil (Cl=10 ppm) en annars er efnasamsetning vökvans svipuð því sem fundist hefur á öðrum ósöltum háhitasvæðum á Íslandi. Mynd 41 sýnir jafnvægisferil kalsíts sem fall af hitastigi, svo og feril jarðhitavökvans úr NG-6 á Nesjavöllum ef gert er ráð fyrir suðu niður í 100°C. Samkvæmt reynslu verður kalkmettun aðeins ef vökvinn er verulega yfirmettaður af kalsíti. Í jarðhitakerfinu er vökvinn mettaður af kalsíti, en verður

undirmettaður við suðu. Hætta á útfellingu kalsíts er því hverfandi. Jarðhitavökvinn er í jafnvægi við kvars í jarðhitakerfinu (sjá kafla 6.3). Mynd 42 sýnir ferla fyrir uppleysanleika kvars og ópals sem fall af hitastigi. Þegar vökvinn sýður eykst styrkur kísils í þeim vökva sem eftir er. Inn á myndina eru dregnir ferlar fyrir breytingu á kísilstyrk við suðu. Kísilútfellingar geta myndast þegar vökvinn nær mettunarferli ópals. Af myndinni sést, að ef hola NG-6 er rekin við 10 bar holutoppþrýsting eða hærri, ætti ekki að vera hætt á kísilútfellingum í holunni sjálfri. Hins vegar má búast við kísilútfellingum ef holutoppþrýstingur er lægri en 10 bar. Þess vegna er lagt til að holan verði ekki rekin með lægri holutoppþrýstingi en 10 bar.



MYND 41 Útfellingar kalsíts



MYND 42 Útfelling kísils

8 LÍKAN AÐ JARÐHITAKERFI

Í Henglafjöllum er megineldstöð og tengist henni mikill jarðhiti. Talið er að hitagjafi háhitasvæða séu kólnandi innskot í rótum megineldstöðvarinnar. Ef innskotin hafa ekki náð að storkna eru þau kölluð kvikuhólf og er dæmi um slíkt t.d. í Kröflueldstöðinni. Fram að þesu hefur ekki fundist kvikuhólf í Hengli, en þyngdarmælingar benda til víðáttumikilla innskota svo sem títt er um megineldstöðvar. Jarðhita í Hengli má flokka efnafræðilega í að minnsta kosti tvö uppstreymissvæði (Einar Gunnlaugsson, óbirt gögn). Er annað uppstreymissvæðið í vesturhluta Hengils (Hveradalir) en hitt að austanverðu (Ölkelduháls).

Ekki liggur ljóst fyrir frá þessum efnafræðigögnum hvort telja beri Nesjavelli til annarrar hvorrar þessarar uppsteymisrás, eða hvort telja beri Nesjavelli sjálfstætt uppstreymissvæði. Ýmis almenn jarðhitaleg gögn um Nesjavallasvæðið, svo sem hið háa hitastig í jarðhitakerfinu, benda til að jarðhitakerfið á Nesjavöllum sé ekki langt frá uppsteymisrás.

Hér verður ekki fullyrt um það hvar nákvæmlega sú uppsteymisrás er sem fæðir jarðhitakerfið á Nesjavöllum. Hins vegar er það ljóst að sú rás er sunnan til á svæðinu. Þannig gæti hola NG-6 verið í uppstreyminu eða að uppstreymið sé enn sunnar. Erfitt er að segja til um hvað tilvera 300°C heits gufulags tákna, þar sem þetta er í fyrsta skipti sem menn rekast á slíkt fyrirbæri. Trúlega er þetta þó tákn um að jarðhitakerfið er ekki í varmafræðilegu jafnvægi (sjá t.d. Stefánsson and Björnsson 1982), því þurr-gufusvæði virðast leita inn á jafnvægi við 35 bara þrýsting og 240°C hita, en við þau skilyrði er varmainnihald gufu í hámarki. Á öllum þurr-gufusvæðum, sem fram að þessu hafa fundist í heiminum hefur hitastig gufulagsins verið 240°C. Ef jarðhitakerfið á Nesjavöllum er ekki í varmafræðilegu jafnvægi gefur það auga leið að það hlýtur að vera jarðfræðilega mjög ungt kerfi, eða réttara sagt að það er jarðfræðilega mjög stutt síðan núverandi ástand kerfisins kom til. Jarðhitakerfið gæti þannig verið gamalt, en þá hafi ríkt aðrar aðstæður í kerfinu.

Þetta eru nákvæmlega sömu niðurstöður og fást úr rannsókn ummyndunar (sjá kafla 4). Það eru því fyrir hendi tvær óháðar niðurstöður, önnur frá athugun á ummyndun, hin frá varmafræðilegu ástandi jarðhitakerfisins, sem benda til að jarðhitakerfið sé jarðfræðilega

mjög ungt og jafnvel að það sé að brjóta sér leið til norðurs.

Á því svæði, sem fram að þessu hefur verið borað í á Nejsavöllum er ekki hægt að fá fram neinn marktækan mun á efnasamsetningu jarðhitavökva. Það er því ekki hægt að nota efnafræðigögn til að draga ályktun um steymisleiðir í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum. Hins vegar er allmikill munur á efnasamsetningu jarðhitavökva á Nesjavöllum og í Hveragerði (Ölfusdal). Það atriði gengur inn í heildarmynd af jarðhita á Hengilssvæði og verður ekki nánar fjallað um það hér.

Selta jarðhitavökva á Nesjavöllum er mjög lítil ($Cl = 10$ ppm) og liggur þar beint við að álykta að samband sé milli lágs styrks á klóri og þess að jarðhitakerfið er í suðu og að þar sé jafnvel nokkur hundruð metra þykkt gufulag. Í Kröflu og Námafjalli er styrkur klórs svipaður og á Nesjavöllum en kerfin í Kröflu og Námafjalli eru einnig í suðu.

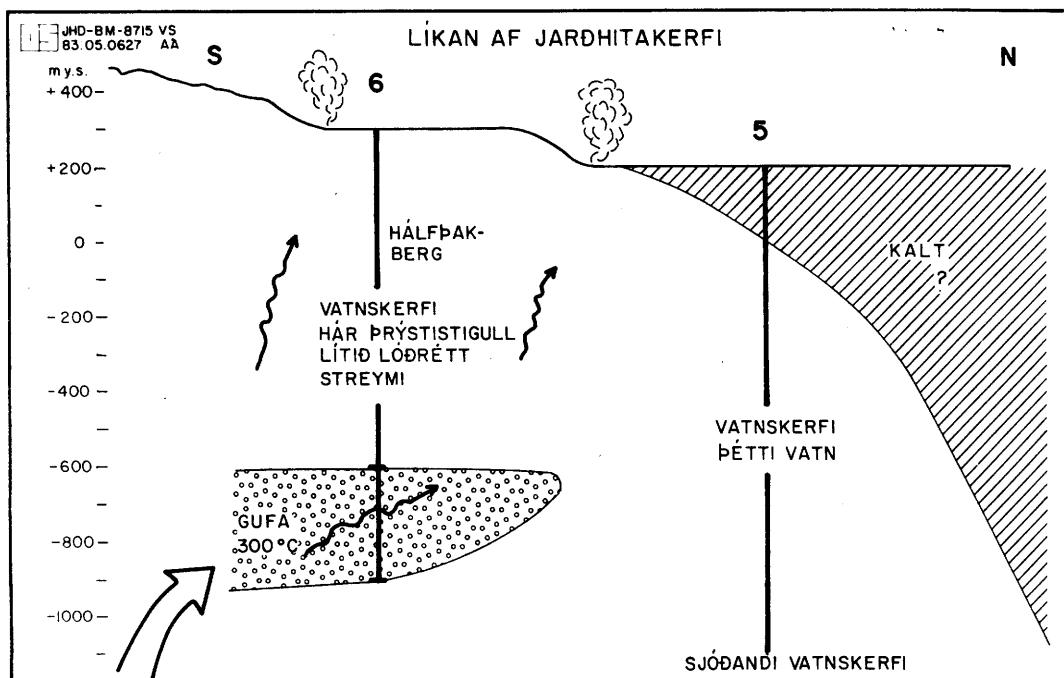
Yfirborðsummerki jarðhita á Nesjavöllum tengjast mjög augljóslega sprungu- og misgengjakerfum á svæðinu. Tvö slík kerfi eru augljós, annað með NA-SV stefnu, hitt með NNV-SSA stefnu. Lóðrétt skil í ummyndun eru mjög áberandi á Nesjavöllum, og breytingar á hitastigi og þrýstingi í jarðhitakerfinu er mjög verulegar. Öll þessi atriði benda til þess að jarðhitinn á Nesjavöllum sé tengdur meiri háttar sprungum og misfellum í berggrunnum, en að kerfið sé ekki ennþá samansóðið í eina heild. Í efri hluta kerfisins er sums staðar mjög ferskt berg og þrýstistigull í kerfinu er mjög hár. Rennsli upp á við í þessum hluta kerfisins hlýtur því að vera mjög tregt og mætti þess vegna líkja efstu 800 m hjá holu NG-6 við þakberg (cap rock). Ummyndun á þessu dýptarbili tengist þá fyrst og fremst þessum fáu rásum sem jarðhitavökvinn kemst upp með, en stórir hlutar bergsins hafa enn sem komið er ekki orðið fyrir teljandi ummyndun.

Einu mörkin sem nú eru þekkt á jarðhitakerfinu á Nesjavöllum eru til norðurs. Þar dýpkar mjög snögglega á jarðhitann milli holu NG-4 og NG-5, þannig að ekki er líklegt að vinnslusvæðið nái langt norður af holu NG-5. A.m.k. þarf að bora mun dýpra þar en á suðurhluta svæðisins. Mörk til austurs og vesturs eru ekki þekkt, en með tilliti til þess að jarðhitinn virðist einkum bundinn við meiri háttar misfellar í berginu og þar sem N-S sprungustefna er ráðandi á svæðinu þá væri ekki óeðlilegt að skilin til austurs og vesturs væru mjög glögg. Möguleiki er á að kerfið geti náð mjög langt til suðurs en frekari rannsóknir þarf til að segja til um það. Af framanskráðu má

ljóst vera að einungis er hægt að draga upp grófa mynd af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum. Stafar það af því að:

- Staðsetning uppsteymis er illa þekkt
- Ytri mörk jarðhitakefis eru illa þekkt
- Lítið er vitað um streymisleiðir í jarðhitakerfinu

Aðaluppistaðan í jarðhitalíkani verður því hita- og þrýstidreifing í jarðhitakerfinu (sjá myndir 30 og 31). Mynd 43 er hugsuð sem einföld skýringarmynd á mögulegri uppbyggingu jarðhitakerfisins við Nesjavelli. Reynt er að draga fram aðalatriði kerfisins, en að öðru leyti verður á þessu stigi málsins að vísa til þess sem áður hefur komið fram í þessari skýrslu.



MYND 43 Nesjavellir. Líkan að jarðhitakerfi

HEIMILDASKRÁ

- Arnórsson, S., Sigurðsson, S., and Svavarsson H. 1982: The chemistry of geothermal waters in Iceland I. Calculation of aqueous speciation from 0-370 C. *Geochim. Cosmochim Acta*, 46: 1513-1532.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H. 1983a: The chemistry of geothermal waters in Iceland. III Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 567 - 577.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H. 1983b: The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 547 - 566.
- Benedikt Steingrímsson og Valgarður Stefánsson 1979: Nesjavellir. Hitastig og þrýstingur í jarðhitasvæðinu. Orkustofnun OS79032/JHD15. 131 s.
- Donaldson, I.G., M.A. Grant, and P.F. Bixley 1983: Nonstatic Reservoirs. The Natural State of the Geothermal Reservoir, *J. Petrol. Tech.* 35: 189-194.
- Fournier, R.O. 1979: A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council Transactions*, 3: 221-224.
- Fournier, R.O. 1977: Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5: 41-50.
- Fournier, R.O. and Potter, R.W. 1982: A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, Nov. 1982: 3-9.
- Gunnlaugsson, E. and S. Arnórsson 1982: The chemistry of iron in geothermal systems in Iceland, *J. Volcanology Geoth. Res.* 14, 281-299.
- Hjalti Franzson, Hilmar Sigvaldason, Jens Tómasson og Guðjón Guðmundsson 1982: Nesjavellir, hola NG-6. Borun frá 225 m í 639 m og steyping 9 5/8" fóðringar. Orkustofnun, Greinargerð HF-HS-JT-GjG-82/01.
- Hilmar Sigvaldason, Jens Tómasson, Ómar Sigurðsson og Hjalti Franzson 1982: Nesjavellir - hola NG-6. Borun vinnsluhluta, frá 639 m í 1144

m. Orkustofnun, Greinargerð HS-JT-ÓS-HF-82/01.

Hrefna Kristmannsdóttir and Jens Tómasson 1974: Nesjavellir Hydrothermal alteration in a high-temperature area. International Symposium on Water-Rock Interaction. Prague, September 1974.

Hrefna Krsitmannsdóttir 1978: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300 C. In: International Clay Conference 1978. Edited by M.M. Mortland and V.C. Framer. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

Hrefna Kristmannsdóttir and Jens Tómasson 1978: Zeolite zones in geothermal areas in Iceland. In: Natural Zeolites. Occurrence, Properties, Use. Edited by L.B. Sand Mumpton. Pergamon Press. Oxford and New York 1978.

Jens Tómasson og Kristján Sæmundsson 1967: Borholur á Nesjavöllum, Raforkumálastjóri, 25 s.

Jens Tómasson, Guðmundur Guðmundsson og Stefán Arnórsson 1971: Jarðhitarannsóknir á Nesjavallasvæðinu. Orkustofnun, 31 s.

Jens Tómasson, Karl Grönvold, Hrefna Kristmannsdóttir og Þorsteinn Thorsteinsson 1974: Nesjavellir, hola 5. Orkustofnun, OSJHD7423, 47 s.

Jens Tómasson, Hilmar Sigvaldason, Hjalti Franzson og Guðjón Guðmundsson, 1982: Borun NG-6 frá 60-225 m dýpi og fóðring með 17 1/2" niður í 220 m dýpi. Greinargerð JT-HS-HF-GjG-82/01.

Ragnarsdóttir, K.V. and Walter, J.V. 1983: Pressure sensitive "silica geothermometer" determined from quartz solubility experiments at 250 C. Geochim. Cosmochim. Acta. Í prentun.

Stefán Arnórsson, Einar Gunnlaugsson og Hörður Svavarsson 1980: Uppleyst efni í jarðhitavatni og ummyndun. Náttúrufræðingurinn, 50, 189-205.

Stefánsson, V. and R. Emmerman 1980: Gamma ray activity in Icelandic Rocks. Presented at the IRDP Second Post-Drilling Science Review Meeting, Reykjavík, Iceland, May 13-15, 1980.

Stefánsson, V., A. Gudmundsson and R. Emmerman 1982: Gamma Ray Logging in

Icelandic Rocks. The Log Analyst XXIII, No. 6: 11-16.

Stefánsson, V., and B. Steingrímsson 1980: Production characteristics of wells tapping two phase reservoirs at Krafla and Námafjall. Stanford 6: 49-59.

Stefánsson, V., and Sv. Björnsson 1982: Physical aspects of hydrothermal Systems. In: Continental and Oceanic Rifts, Ed. G. Pálmason, pp. 123-145. Am. Geophys. Union, Washington D.C.

Sæmundsson, K. 1967: Vulkanismus and Tektonik des Hengill-Gebietes. Acta Nat. Island. II, 7, 101 s.

Valgarður Stefánsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Halldór Ármannsson, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson og Trausti Hauksson, 1982: Krafla. Hóla KJ-13. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Orkustofnun, OS82046/JHD07, 108 s.

VIÐAUKI V-1

Aðferðir við gerð jarðlagasniðs

AÐFERÐIR VIÐ GERÐ JARÐLAGASNIÐS

V.1.1 Greining á borsvarfi

Borinn malar bergið í svarf. Fínasti hluti svarfsins malast í mylsnu, sem flýtur burt með skolvatninu og kemur aðeins grófari hluti svarfsins til greiningar. Þessi hluti er sigtaður frá mylsnunni með hristisigti. Einstök korn í svarfinu kallast brotkorn. Brotkornin eru 0,3-5 mm í þvermál, en algengust um 2 mm í þvermál.

Meðan á borun stendur eru tekin sýni af borsvarfi á 2 m fresti. Sýnin eru greind á borstað í smásjá og jarðlagasnið teiknað. Þar sem nokkur tími líður frá því að borkróna mylur bergið sundur og þar til sýni er tekið á yfirborði þarf að leiðrétta fyrir þessum tímamun. Til þess að það sé hægt þarf að þekkja eftirtalda þætti:

1. Borhraða
2. Skolhraða kælivatns
3. Fallhraða svarfsins í vatni

Á sírita borsins (Geolograph) er skráður borhraði og þrýstingur skolvatns. Borhraði er skráður þannig, að penni gefur útslag á 25 cm fresti, en á jarðlagasniði er borhraði teiknaður þannig að meðaltal fjögurra slíkra bila er skráð sem m/kls.

Reglubundnar skráningar eru gerðar á eftirtöldum atriðum:

1. Þrýstingur á dælum
2. Vatnsmagn niður holu
3. Skoltap
4. Hitastig á skolvökva niður holu
5. Hitastig á skolvökva sem upp kemur.

Mynd 3 í kafla 3 sýnir hvernig þessi atriði breytast með dýpi í holu NG-6 á Nesjavöllum. Allar þessar upplýsingar eru notaðar við þá frumgerð jarðlagasniðs, sem framkvæmd er á borstað.

Til þess að fullvinna jarðlagasnið eru útbúnar þunnsneiðar til frekari smásjárathugana og auk þess er tekið mið af mælingum á eðliseiginleikum jarðlaga (sjá næsta kafla). Þunnsneiðagreining á að skera úr um vafaatriði en upplýsa einnig oft um hluti sem ekki voru áður vitaðir, t.d. gerð einstakra brotkorna.

Gerð brotkorna: Brotkornin geta verið brot af bergi, þau geta einnig verið einstakar steindir eða gler. Bergbrotkorn geta verið frá tvennskona bergi, þ.e. af samstæðu gosbergi eða úr gosbergsbrotum eða steindabrotum, sem eru límd saman með myndbreytingarsteindum löngu eftir storknun bergsins. Slíkar bergtegundir eru t.d. set og sumt móberg. Einstök bergkorn eða steindir eru kölluð dreifikorn, en það sem bindur dreifikornin saman, bindiefni. Móberg og fínkornótt túffkennd set geta verið mjög líkar bergtegundir og oft er erfitt að skilja þær í sundur. Það, sem skilur setið frá móbergi er, að í seti geta verið ávöl dreifikorn, en ekki í túffi. Dreifikornin í túffi eru samstæð og öll kornin frá sama gosi, en dreifikorn setsins geta verið komin frá margskonar bergi. Meiri og fíngerðari lagskipting er í seti en í túffi. Gler í seti er yfirleitt meira oxað og því rautt eða svart á lit. Þegar setið er orðið það grófkornótt, að dreifikornin í setinu eru orðin jafnstór eða stærri en brotkornin, sést ekki lengur hvort dreifikornin hafa verið ávöl eða ekki. Hin einkenni setsins haldast, ósamstæð brotkorn, lagskiptingin og oxun.

Talað er um tvenns konar gler, það er sideromelan gler sem er brúngegnsætt í þunnsneið og takkilytískt gler sem er svart ógegnsætt gler vegna smáagna af magnetíti sem hafa kristallast í glerinu. Basaltinu er aðallega skipt upp í tvo flokka; póleiít og ólivínþóleiít. Þessi skipting er byggð á mismunandi efnasamsetningu þessara bergtegunda. Þessari mismunandi efnasamsetningu fylgir einnig mismunandi útlit og samsetning steinda. Þóleiít er oftast fínkristallað með pyroxenkristallana raðaða á milli plagíóklaslistanna (interstitial textúr) og mikið magn af smáum magnetítkristöllum og ólivín sjaldgæft eða ekkert. Ólivínþóleiít er fremur grófkristallað þar sem plagíóklaslistarnir skerast inn í pyroxenkristallana (ofitískur textúr), magnetítkristallarnir eru fáir, oft mun stærri en í þóleiítinu, einnig er ilmenít algengara í ólivínþóleiíti en í þóleiíti. Í ólivínþóleiíti er ólivín algengt og oftast yfir 5%.

Jafnframt jarðlagasniði er unnið að ummyndunarsniði. Smásjárathuganir á borstað gefa nokkra vísbendingu, en þar er ummyndunarsteindum raðað

niður á þau dýptarbil sem þær finnast. Þunnsneiðagreining er þá yfirleitt nauðsynleg til þess að fá fram haldgott ummyndunarsnið, svo og röntgengreiningar (XRD). Mismunandi ummyndunarsteindir eru vísbending um það hitastig sem er í berginu eða það hitastig sem ríkt hefur þegar þessar steindir mynduðust. Með því að meta þá myndbreytingu sem jarðlögin hafa orðið fyrir má gera sér grein fyrir hvort mikið eða lítið magn jarðhitavökva hefur streymt um bergið. Með því að athuga röðun ummyndunarsteinda í holum er hægt að komast að því hvaða steindir eru í jafnvægi við núverandi hita á svæðinu og hvaða steindir eru í jafnvægi við annan hita en nú ríkir á svæðinu.

Í sumum tilvikum eru gerðar efnagreiningar á jarðlögum. Geta það bæði verið greiningar á aðalefnum eða á ákveðnum snefilefnum. Þetta er mjög tímafrekur þáttur við rannsóknir og er yfirleitt ekki gerður nema sérstakar ástæður kalli á slíkar greiningar.

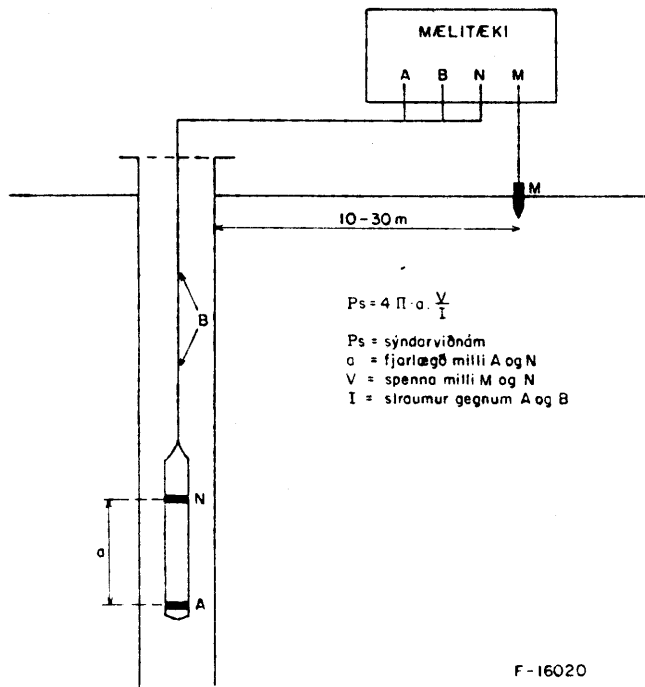
V.1.2 Mælingar á eðliseiginleikum jarðlaga

Auk greininga á því sem kemur upp úr holunni gefa mælingar á eðliseiginleikum borholuveggjanna upplýsingar um gerð og eiginleika jarðlaga. Þær stærðir sem mældar voru í holu NG-6 eru vídd, viðnám, poruhluti og gamma geislun. Hér verður þessum mæliaðferðum lýst lauslega og bent á hvernig niðurstöður þeirra eru notaðar við gerð jarðlagasniðs.

Vídd borholu hefur áhrif á allar jarðeðlisfræðilegar mælingar í henni. Þessi áhrif eru þó mismikil fyrir mismunandi mæliaðferðir. Mælitæki til að mæla vídd borholu er með þremur færanlegum örmum, sem spennast út í holuveggina. Armarnir eru tengdir við breytilegt viðnám inni í tækinu, og fæst þannig mæling af vídd holunnar á hverju dýpi. Mæld gildi í borholumælingum þarf að leiðrétta fyrir holuvídd á hverjum stað í holu til þess að fá fram raungildi þess sem mælt er. Slíkar leiðréttingar eru framkvæmdar með aðstoð tölvu.

Viðnámsmælingum í borholum svipar mjög til viðnámsmælinga sem gerðar eru á yfirborði. Notuð eru fjögur rafskaut, tvö til að mæla spennun og tvö til að mæla rafstraum. Viðnám berglaga ræðst af hlutfalli milli spennu og straums og innbyrðis afstöðu rafskautanna. Mynd V-1 sýnir vanalega gerð tækja og uppsetningu sem ætluð eru til viðnámsmælinga í borholum.

Ef lítið er af vatni í bergi er viðnám hátt, en lágt ef poruhluti er hár. Þannig mælist lágt viðnám í móbergi og á mótum hraunlaga, en hátt viðnám í innskotum og miðju hraunlaga.



MYND V-1. Uppsetning mælitækja við viðnámsmælingar í borholum.

Sú mæliaðferð, sem kennd er við poruhluta (neutron-neutron log) byggir á því hvaða áhrif mismunandi frumefni hafa á nifteindadreifingu. Í borholumælitækinu er komið fyrir geislavirku efni sem sendir út nifteindir, og í ákveðinni fjarlægð er nemi sem telur þann fjölda sem nær fram til nemans. Upphafleg orka nifteindanna er 4,5 MeV. Á ferð sinni um bergið missa þær hreyfiorku við það að rekast á atómkjarna. Mesta orku missa þær við árekstur við vetniskjarna (prótónu) enda eru nifteindir jafn þungar og prótónur. Eftir nokkra slíka árekstra hafa nifteindirnar misst svo til alla hreyfiorku sína og eru þá í hitajafnvægi við umhverfið. Það fer eftir vatnsmagni í berginu hversu langt nifteindirnar komast áfram í berginu, og hversu margar nifteindir koma fram í nemanum. Fjarlægðin milli nema og geislavirka efnisins er valin þannig að ef lítið vatn er í bergi ná margar nifteindir fram til nemans, en ef mikið vatn er í bergi missa nifteindirnar hreyfiorku sína áður en þær ná fram til nemans. Innbyrðis breytingar á niðurstöðum poruhlutamælinga eru yfirleitt mjög áþekkar niðurstöðu viðnámsmælinga, enda er það í báðum tilvikum vatnið í berginu sem þessar mælingar eru næmar fyrir.

Náttúruleg gammageislun bergsins stafar af geislavirkum efnum í berginu. Þau eru kalíum, úraníum og þóríum. Í íslensku storkubergi er fylgni milli þessara geislavirku efna og kísilsýru bergsins. Með því að mæla geislavirkni bergsins með gamma-nema fæst vitneskja um hvernig styrkur þessara efna breytist niður holuna. Geislavirkni er nokkuð jöfn frá basalti og öðrum bergtegundum með kísilsýruinnihaldi á bilinu 45-50%. Marktækur munur í náttúrulegri gammageislun er fyrst og fremst heppilegur til að kortleggja súr og ísúr berglög.

Reynt hefur verið að kvarða geislavirkni mælingar á þann hátt að hægt sé að meta styrk kísilsýru í bergi út frá mælingum á náttúrulegri gammageislun (Stefánsson og Emmerman 1980, Stefánsson et al. 1982). Í ljós hefur komið að nokkur munur er á þessu sambandi í holum í Kröflu annars vegar og í IRDP holunni á Reyðarfirði hins vegar. Tilraunir til að nota þessa kvörðunarferla á mæligildi úr holu NG-6 sýndu óeðlilega lágt gildi á SiO₂. Sú ályktun er því dregin að samband kísilsýru og náttúrulegrar gamma geislunar sé svæðisbundin, einkum fyrir basalt (45% < SiO₂ < 52%).

Komið hefur í ljós að stundum er meiri geislun frá móbergslögum en tilsvareandi hraunlögum. Talið er að það stafi af aðfluttum geislavirkum efnum, fyrst og fremst K (kalíum) og U (úraníum). Allir efnisflutningar eru auðveldari í ókristölluðu efni heldur en í kristölluðu. Þessi áhrif eru yfirleitt ekki mikil, en taka þarf tillit til þeirra við túlkun mælinga.

Kvörðun á jarðeðlisfræðilegum mælingum í borholum er ekki alltaf einföld aðgerð. Á það einkum við um poruhluta, eðlisþyngd og kísilsýru. Þar sem tiltölulega stutt er síðan farið var að nota þessar aðferðir hér á landi eru skekkjumörk mælinga tiltölulega víð, e.t.v. 10-30%. Hins vegar má t.d. kvarða hitastig og þrýsting með lítilli (0.1-1%) skekkju.

VIÐAUKI V-2

Tafla um mælingar í borholu NG-6 á Nesjavöllum.

Nesjavellir NG-6. Mælingar í borun og upphitun eftir borun.

Dags.	Tími	Hvað mælt	Dýptarbil (m)	Astand holu	Tilgangur mælinga	Ath.
82.10.07.	21.30-21.50	Hiti	0-225	Fóðrunard. Tap <1 l/sek.	Athugun á upphitun	Borstangir niðri
82.10.07.	21.50-23.25	Hiti	0-225	- " -	- " -	- " -
82.10.08.	00.24-03.20	Hiti	0-225	- " -	- " -	- " -
82.10.16.	07.10-12.00	Hiti	0-639	Fóðrunard. Tap <0.5 l/sek.	- " -	Borstangir niðri
82.10.16.	01.40-02.30	Hiti	0-639	Uppteikt lokið	- " -	Rennsli ca 0.5 lt/sek.
82.10.16.	02.40-03.30	Vídd	0-639	- " -	Skápaathuganir	- " -
82.10.16.	04.00-04.40	Hiti	0-639	- " -	Athugun á upphitun	- " -
82.10.16.	04.30-06.00	N · N + NAT Y	0-600	- " -	Ákvörðun jarðlaga	- " -
82.10.21.	15.00-16.00	Hiti	0-290	9 5/8" fóðrun lokið	Athugun á upphitun	Mælt eftir frí borm.
82.10.21.	16.40-17.50	Hiti (Amerada)	0-493	- " -	- " -	- " -
82.10.22.	22.00-23.00	Hiti (Amerada)	0-556	- " -	- " -	- " -
82.10.28.	12.00-15.00	Hiti	0-1100	Borun lokið	- " -	Borstangir niðri
82.10.29.	23.40-00.50	Hiti	0-1122	Uppteikt lokið	- " -	Vatnsb. ca 200 -
82.10.29.	01.00-02.05	Vídd	0-1122	- " -	Skápaathuganir	- " -
82.10.29.	02.30-05.00	Víðnám (16")	600-1120	- " -	Ákvörðun jarðlaga	64" mæling ónýt
82.10.29.	05.00-07.00	N · N + NAT Y	600-1100	- " -	- " -	- " -
82.11.12.		Hiti (Amerada)	0-1123		Upphitun	Holan komin undir
82.11.12.		Prýstímæl. (Amerada)	0-1123		Vendipunktur prýstings	- " -
82.11.22.		Hiti (Amerada)	0-1123		Upphitun	- " -
82.11.22.		Prýstingur (amerada)	0-1123		Vendipunktur prýstings	- " -