



**ORKUSTOFNUN**

**RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri**

# **Reykjanes**

**Rannsóknir á vökvabólum  
í útfellingum í holum  
RN-9 og RN-10**

**Hjalti Franzson**

**Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja**

**2000**

**OS-2000/021**



**ORKUSTOFNUN**  
**Rannsóknasvið**  
**Reykjavík - Akureyri**

**Verknr. 8-630247**

**Hjalti Franzson**

**Reykjanes**  
**Rannsókn á vökvabólum í útfellingum**  
**í holum RN-9 og RN-10**

**Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja**

**OS-2000/021**

**Mars 2000**

**ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ**  
Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. - Sími 569 6000 - Fax 568 8896  
Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0998  
Netfang: [os@os.is](mailto:os@os.is) - Veffang: <http://www.os.is>



Skýrsla nr: OS-2000/029	Dags: Apríl 2000	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
----------------------------	---------------------	--

Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: REYKJANES Rannsóknir á vökvabólum í útfellingum í holum RN-9 og RN-10	Upplag: 30
	Fjöldi síðna: 20
Höfundar: Hjalti Franzson	Verkefnisstjóri: Sverrir Þórhallsson
Gerð skýrslu / Verkstig:	Verknúmer: 8-630247

Unnið fyrir: Hitaveitu Suðurnesja
Samvinnuaðilar:

**Útdráttur:**

Gerð er grein fyrir athugun á dreifingu hita og seltu í yfir 150 vökvabólum í kristöllum í bergi af mismunandi dýpi í holum RN-9 og RN-10 á Reykjanesi. Í þessum holum virðist jarðhitakerfið vera í suðu frá um 600 m niður á 1000-1100 m. Þar fyrir neðan er 290-310°C heitt vatnskerfi í hræringarástandi. Engar vísbendingar fundust um að jarðhitakerfið þar hafi orðið fyrir kælingu. Mælingar á frostmarki vökvu í vökvabólum sýna mikil ferskvatnsáhrif í jarðhitakerfinu, en ekki var unnt að greina nein tengsl milli dýptar í því og áhrifa frá ferskvatni. Væntanlega stafa ferskvatnsáhrifin frá ferskvatnslinsu sem liggur ofan salta grunnvatnsins. Sett er fram sú hugmynd að að linsan, sem er tiltölulega þunn nú, hafi verið mun þykkari á jökulskeiði ísaldar og verið meira ráðandi sem innsteymisgjafi í jarðhitakerfin. Samanburður á seltu í vökvabólum sýnir að efri mörk seltu aukast frá Svartsengi út á Reykjanes, og einnig kemur ótvírætt fram við samanburð á vökvabóluseltu og seltu jarðhitavökvu í jarðhitakerfunum þremur nú að þau eru að þróast í átt til meiri seltu. Einnig er sett fram sú hugmynd að aukin selta í grunnvatnskerfum utan háhitakerfanna valdi því að innsteymi kaldara grunnvatns inn í kerfin stíflist mun hraðar vegna anhýdrftútfellinga.

Lykilorð: Reykjanes, jarðhitakerfi, borholur, jarðhitavökvi, selta, ummyndun, berghiti, grunnvatn, vökvabólur	ISBN-númer:
	Undirskrift verkefnisstjóra: 
	Yfirfarið af: GÓF, PI

**EFNISYFIRLIT**

<b>SAMANTEKT</b>	<b>3</b>
<b>1. INNGANGUR</b>	<b>3</b>
<b>2. AÐFERÐAFRÆÐI</b>	<b>4</b>
<b>3. MÆLINGAR Á VÖKVABÓLUM</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Vökvabólur í holu RN-9</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Vökvabólur í holu RN-10</b>	<b>6</b>
<b>4. UMRÆÐA OG NIÐURSTÖÐUR</b>	<b>11</b>
<b>4.1 Umræða</b>	<b>11</b>
<b>4.2 Niðurstöður</b>	<b>13</b>
<b>4.3 Frekari rannsóknir</b>	<b>13</b>
<b>5. HEIMILDIR</b>	<b>16</b>
<b>VIÐAUKAR:</b>	
1. Stöplarit af mælingum á frostmarki einstakra vökvabóla í holu RN-9	17
2. Stöplarit af mælingum á frostmarki einstakra vökvabóla í holu RN-10	19

**Myndaskrá**

1. (I) Skematísk mynd af myndun vökvabóla	7
(II) Samgróningur á sprungu í kristal og myndun sekúnderra vökvabóla	7
(III) Mynd af vökvabólu	7
2. Vökvabólusmásjá	7
3. Mælingar á samrunahita ( $T_h$ ) í holu RN-9 og samanburður við ummyndunar- og berghita	8
4. Samanburður á frostmarki ( $T_m$ ) og samrunahita ( $T_h$ ) á vökvabólum í holu RN-9	8
5. Mælingar á frostmarki ( $T_m$ ) í vökvabólum í holu RN-9	9
6. Mælingar á samrunahita ( $T_h$ ) í holu RN-10 og samanburður við ummyndunar- og berghita	9
7. Samanburður á frostmarki ( $T_m$ ) og samrunahita ( $T_h$ ) í vökvabólum í holu RN-1010	10
8. Mælingar á frostmarki í vökvabólum í holu RN-10	10
9. Samanburður á dreifingu á frostmarki ( $T_m$ ) vökvabóla í Svartsengi, Eldvörpum og Reykjanesi	14
10. Jarðfræðikort af Reykjanesi. Breytileiki á frostmarki vökvabóla frá Reykjanesi, Eldvörpum og Svartsengi, ásamt samanburði við núverandi seltu í þeim kerfum og jarðhitakerfinu í Krísuvík	15

## SAMANTEKT

Athuguð var dreifing hita og seltu í yfir 150 vökvabólum í kristöllum í bergi af mismunandi dýpi í holum 9 og 10 á háhitasvæðinu á Reykjanesi. Í þeim holum virðist jarðhita-kerfið vera í suðu frá um 600 niður á 1000-1100 m dýpi, en neðan þess er 290-310°C vatnskerfi í hræringarástandi. Engar vísbendingar sáust um að jarðhita-kerfið þar hafi orðið fyrir kælingu. Mælingar á frostmarki ( $T_m$ ) vökva í vökvabólum sýna mikil ferskvatnsáhrif í jarðhitakerfinu. Ekki er unnt að sjá nein tengsl á milli dýptar í því og áhrifa frá ferskvatni, og er það í samræmi við niðurstöður sem fengist hafa úr svipuðum rannsóknum í Svartsengi og Eldvörpum. Eðlilegt er að álykta að ferskvatnsáhrifin í jarðhitakerfunum séu ættuð frá ferskvatnslinsu sem liggur ofan salta grunnvatnskerfisins. Þar sem þykkt hennar er óveruleg við núverandi aðstæður, er sú kenning sett fram að hún hafi verið mun þykkari á jökulskeiði ísaldar og þá meira ráðandi sem innstreymisgjafi í jarðhitakerfin þrjú, Svartsengi, Eldvörp og Reykjanes. Samanburður á seltu í vökvabólum sýnir að selta eykst frá Svartsengi út á Reykjanes. Samanburður á seltu í vökvabólum og núverandi seltu jarðhitavökva þessara þriggja jarðhitakerfa bendir eindregið til að þau séu að þróast í átt að meiri seltu. Vísbendingar eru um að kæling innan jarhitakerfa fari minnkandi frá Krísuvík út á Reykjanes. Sett er fram sú hugmynd að aukin selta í grunnvatnskerfum utan háhitakerfanna valdi því að innstreymi kaldara grunnvatns inn í jarðhitakerfin stíflist mun hraðar með tilkomu anhýdrítútfellinga.

## 1. INNGANGUR

Rannsóknir á vökvabólum hafa mjög rutt sér rúms sem öflug aðferð til að nema breytingar í hita og uppleystum efnum í jarðhitakerfum í tíma og rúmi. Árið 1984 keypti Jarðhitaskóli Háskóla Sameinuðu þjóðanna sérstaka smásjá til slíkra rannsókna. Árið 1987 vann höfundur við slíka smásjá í endurmenntunarleyfi á Nýja Sjálandi. Þar voru meðal annars mæld sýni frá holu SG-12 í Svartsengi og í holu EG-2 í Eldvörpum. Niðurstöður þeirra mælinga leiddu í ljós að bæði jarðhitakerfin hefðu verið heitari áður fyrr, ásamt því að jarðhitavökvinn var seltuminni. Þessar niðurstöður þóttu benda til þess að sjávaráhrif hefðu verið minni áður fyrr, sem gæti samræmst því að jöklar hefðu hulið stór svæði sjávar umhverfis Reykjanes og minnkað þannig aðstreymi hans inn í jarðhitakerfið. Áhugavert þótti að gera svipaða könnun á Reykjanesi, bæði til að kanna hitabreytingar sem orðið hafa á jarðhitakerfinu, sem og að kanna hvort ferskvatnsáhrifa gætti einnig þar eins og sýnt hafði verið fram á í Svartsengi og Eldvörpum.

Verkefnið átti að vinna á síðastliðnu ári. Það reyndist ekki unnt, og var meginástæðan sú, að hin sérhæfða þunnsneiðagerð, sem nauðsynleg er fyrir slíkar mælingar, fluttist frá Orkustofnun upp á Rannsóknastofnun byggingaiðnaðarins. Nokkurn tíma tók að ná þar ásættanlegri aðferð til að gera slíkar sneiðar.

Ljóst var að sá tími, sem ætlaður var í verkið, myndi rétt nægja til að kanna lauslega helstu eiginleika vökvabóla í jarðhitakerfinu á Reykjanesi, svo sem hitabreytingar, svo og að fá svar við þeirri spurningu hvort og hvað miklar seltubreytingar hefðu orðið á líftíma háhitakerfisins. Því var ekki lögð áhersla á að rekja tímaþróun seltu- og hitabreytinga í jarðhitakerfinu, og verður það að bíða síðari tíma.

Skýrslunni er skipt í 4 kafla. Í kafla 2 er aðferðum stuttlega lýst, og í kafla 3 er fjallað um vökvabólugögnin, en sýni voru fengin úr holum 9 og 10. Umræða, helstu niðurstöður og hugmyndir að frekari rannsóknum eru settar fram í kafla 4.

Verkið er unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja samkvæmt samningi dagsettu 12.4.1999.

## 2. AÐFERÐAFRÆÐI

Jarðhitaútfellingar kristallast út úr vökva. Á mynd 1 (I) er sýnt hvernig vökvi lokast inni í kristal þegar gallar koma í kristalbygginguna. Þessar innlyksur kallast vökvabólur, og þegar þær myndast á sama tíma og kristallinn kallast þær prímerar. Eftir kristöllun geta komið sprungur í kristalinn, sem síðan gróa saman. Við það lokast vökvi inni í sprungufletinum eins og sýnt er á mynd 1 (II). Slíkar vökvabólur eru kallaðar sekúnderar og lýsa jarðhitaáðstæðum á tímabili eftir að kristallinn myndaðist. Á mynd 1 (III) er sýnd ein slík vökvabóla. Oft er um að ræða óreglulegt hólf innan í kristalnum sem sjaldnast er stærra er 30µm. Þegar vökvinn, sem lokast inni í kristal í 200-300°C háhitakerfi, kólnar niður í stofuhita, dregst vökvinn saman. Við það myndast hringlaga gufubóla, sem merki um undirþrýsting vökvans, og er hún sýnd innan vökvabólunnar í mynd 1 (III).

Tvenns konar mælingar eru algengar á þessum vökvabólum:

- Önnur mælingin felst í að sýnið er hitað upp í samrunahita. Við hitnun þenst vökvinn út og gufubólan (lofttæmið) minnkar. Þegar vökvinn hefur náð sama hita og hann hafði er vökvabólan lokaðist inn í kristalnum, þá hverfur gufubólan. Þessi hiti er hér kallaður samrunahiti (temperature of homogenization). Með þessum hætti er unnt að mæla nokkuð nákvæmlega fornhita á ákveðum stöðum í jarðhitakerfinu á þeim tíma sem vökvinn lokaðist inni í kristalnum.
- Hin aðferðin er mæling á frostmarki vökvans. Samhengi er á milli frostmarks og magns uppleystra efna í vökvannum, þar sem frostmark lækkar með auknu magni uppleystra efna. Þau efni sem mest áhrif hafa á frostmark í jarðhitakerfum er selta og koldíoxíð. Selta, sem jafngildir seltu sjávar, hefur frostmark -1,9°C. Koldíoxíð í íslenskum jarðhitakerfum er ekki talið jafngilda meiri lækkun en um 0,2°C, ef marka má niðurstöður rannsókna á Nesjavöllum (Hjalti Franzson, óbirt gögn).

Á mynd 2 er sýndur tækjabúnaður ásamt sérstakri smásjá sem notuð er til vökvabólurannsóknna. Sýnið sem rannsaka skal er sett í einangrandi hylki milli glerplatna svo unnt er að sjá það í smásjóni. Heitu lofti er dælt inn í hylkið þar sem kristallinn situr. Hitanemi heldur kristalnum og mælir hitann á sama tíma. Þannig er unnt að mæla nákvæmlega við hvaða hita ( $T_h$ ) gufubólan í vökvabólunni hverfur. Þegar frostmark vökvans er mælt er kældu köfnunarefni dælt inn í hylkið, og vökvinn í bólunni frystur. Hitinn er síðan hækkaður þar til síðasti ísinn í vökvabólunni hefur bráðnað. Á þann hátt fæst frostmarkið  $T_m$  (temperature of melting).

Nokkuð gott reynslusamband hefur fengist á þann lágmarkshita sem þarf til að ýmsar ummyndunarsteindir myndist í jarðhitakerfi. Má þar nefna leirsteindir, geislasteindir, kvars, epidót, amfíból og granat. Vökvabólumælingar bæta við þær upplýsingar, og veita auk þess upplýsingar um breytingar sem orðið hafa á hitaástandi í kerfinu. Berghiti er oftast metinn út frá hitamælingum í borholum. Áreiðanleiki slíks mats er háður því hversu kyrrstæður vökvinn í holunum er á upphitunartímanum. Oft verður

vart við millirennslu á milli æða í sömu borholu, eða þá að jarðhitavökvinn sýður í borholu á upphitunartíma, og hvortveggja veldur erfiðleikum í mati á berghita. Mælingar á  $T_h$  í vökvabólum geta hjálpað til að meta líklegan berghita á slíkum stöðum. Einnig geta mælingar á  $T_h$  flýtt fyrir mati á berghita, þar sem borhola er oft marga mánuði að hitna upp.

Mælingar á frostmarki gefa vísbendingar um breytingar á magni uppleystra efna með tíma, og þá sérstaklega seltu.

### 3. MÆLINGAR Á VÖKVABÓLUM

Eins og getið var um í inngangi, var ekki lögð sérstök áhersla á að gera greinamun á prímerum og sekúnderum vökvabólum. Ljóst er þó að þær síðarnefndu eru mun algengari en þær fyrrnefndu. Leit að vökvabólum var aðallega gerð í kvarsi, en einnig var leitað í kalsíti og epidóti. Wairakít hefur gjarnan mikið af fallegum vökvabólum, en  $T_h$  mælingar eru mjög erfiðar og óábyggilegar þar sem vökvinn sleppur auðveldlega úr bólunni inn í kristalstrúktúrinn við hitnun, en ein af forsendum fyrir áreiðanleika  $T_h$  mælinga er að rúmmálið sem vökvabólann fyllir breytist ekki. Auðvelt er þó að gera seltumælingar í þeim bólum. Í einu tilviki var unnt að greina vökvabólur sem hafa myndast í samgrónum (sekúnderum) sprungum í plagíóklasdíl. Alls voru gerðar 139 mælingar á samrunahita ( $T_h$ ) og 133 mælingar á frostmarki ( $T_m$ ) í vökvabólum í holum 9 og 10.

#### 3.1 Vökvabólur í RN-9

Athugaðar voru vökvabólur í kvarsi á 1002 og 1338 m dýpi í holu 9. Niðurstöður 51  $T_h$  mælinga eru sýndar á súluritum á mynd 3, þar sem þau eru sett í samhengi við hita, dýpi, suðukúrfu (ferskvatns) og ummyndunarhita. Hiti á báðum dýptarbilum reyndist liggja að miklu leyti á bilinu 280-300°C með hámarki á 290-295°C. Ummyndunarhitinn virðist ívið lægri en sá sem vökvabólurnar gefa. Samrunahiti vökvabólanna virðist falla á suðukúrfuna á 1002 m dýpi, en á 1338 m er hann lægri en suðuferillinn. Þetta bendir til að jarðhitakerfið sé eða hafi verið sjóðandi ofan 1000 m dýpis, en í vatnsfasa þar fyrir neðan.

Á mynd 4 er sýndur samanburður samrunahita og frostmarki í vökvabólum. Frostmark þeirra dreifast yfir nokkuð vítt svið, eða frá um  $-2^\circ$  upp í um  $-0,7^\circ\text{C}$ . Ígildi seltu sjávar er um  $-1,9^\circ\text{C}$ , þannig að selta fer lítt yfir það mark, eða að gera verður ráð fyrir að  $\text{CO}_2$  í jarðhitavökvum hafi einhver áhrif til lækkunar frostmarks.

Á mynd 5 er sýnt stöplarit af dreifingu frostmarks í 33 vökvabólum í þeim mælingum sem gerðar voru í holu 9. Er sú mynd unnin út frá stöplaritum sem sýnd eru í viðauka 1. Hún gefur til kynna fremur jafna dreifingu á frostmarki sem spannar frá  $-0,4^\circ$  niður í um  $-2,2^\circ\text{C}$ .

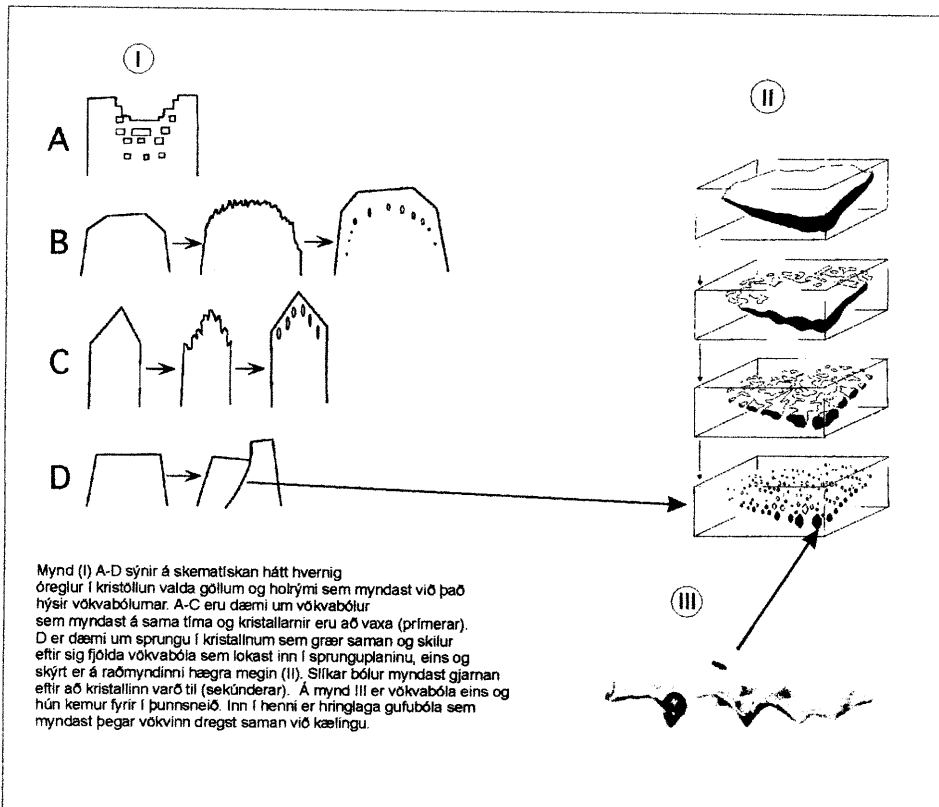


### 3.2 Vökvabólur í RN-10

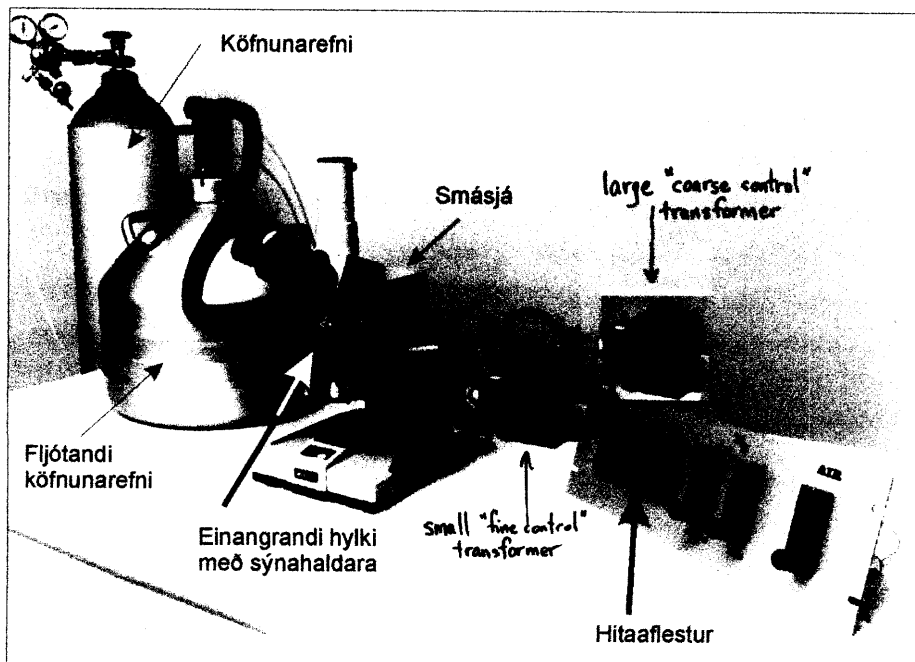
Samrunahiti ( $T_h$ ) í vökvabólum var mældur á þremur dýptarbilum í holu 10; á 546, 1146 og 1874 m dýpi. Alls var  $T_h$  mælt í 88 vökvabólum. Á mynd 6 er sýnt samspil þessara mælinga, ummyndunarhita, suðukúrfu og dýpi. Á 546 m dýpi er dreifing gildanna, sem mæld voru í kalsíti, mjög mikil eða frá um 170°C upp í um 255°C. Ástæða þessarar miklu dreifingar er næsta augljós, þegar horft er til þess að stigull ummyndunarhitans á þessu dýpi er afar brattur, en fyrstu merki um kvars (180°C) finnst á um 470 m dýpi og epidót (250°C) finnst litlu neðar eða á um 600 m dýpi. Á 1146 m dýpi fannst í svarfi plagíóklas díll sem var með fjölda sprungna með sekúnderum vökvabólum. Hiti þeirra reyndist vera 300°C  $\pm$ 10°C, en það fellur nokkuð saman við suðumark ferskvatns á því dýpi. Vökvabólur í kvarsí á 1874 m dýpi sýndu einnig samrunahita á bilinu frá 295-320°C með áberandi hápunkti í 305-310°C, en það er um 30°C neðan við suðukúrfu ferskvatns á þessu dýpi. Ein vökvabóla, sem líklega er prímer (myndast um leið og kvars útfellingin verður til), mældist 340°C, og það sem er merkilegra er að vökvinn í henni mældist án seltu. Veik vísbending er því um heitari aðstæður á þessum stað í jarðhitakerfinu, sem þyrfti að staðfesta með fleiri mælingum.

Frostmark ( $T_m$ ) var mælt í alls 100 vökvabólum. Á mynd 7 er sýnt samband frostmarks ( $T_m$ ) og samrunahita ( $T_h$ ) í þeim bólum þar sem hvort tveggja var mælt. Hún sýnir mjög breytilegt frostmark í vökvabólunum, allt frá jafngildi ferskvatns upp í rúmlega sjávarseltu. Ekki er að sjá neinn skyldleika á milli seltu og dýpis í jarðhitakerfinu, t.d. finnast vökvabólur á 1876 m dýpi sem hafa frostmark sem jafngildir ferskvatni yfir í frostmark sem jafngildir ívið meiri seltu en sjór.

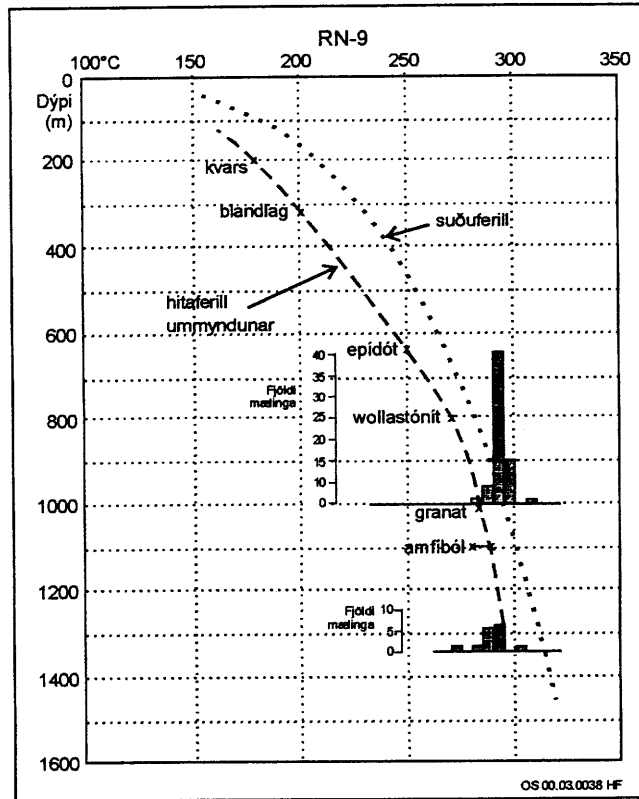
Á mynd 8 er sýnt súlurit af dreifingu frostmarks um 100 vökvabóla í holu 10 (sjá einnig viðauka 2). Á myndinni má greina þrjá toppa; sem samsvara efnasamsetningu nærri ferskvatni, ísöltu vatni og síðan vatni sem jafngildir sjávarseltu.



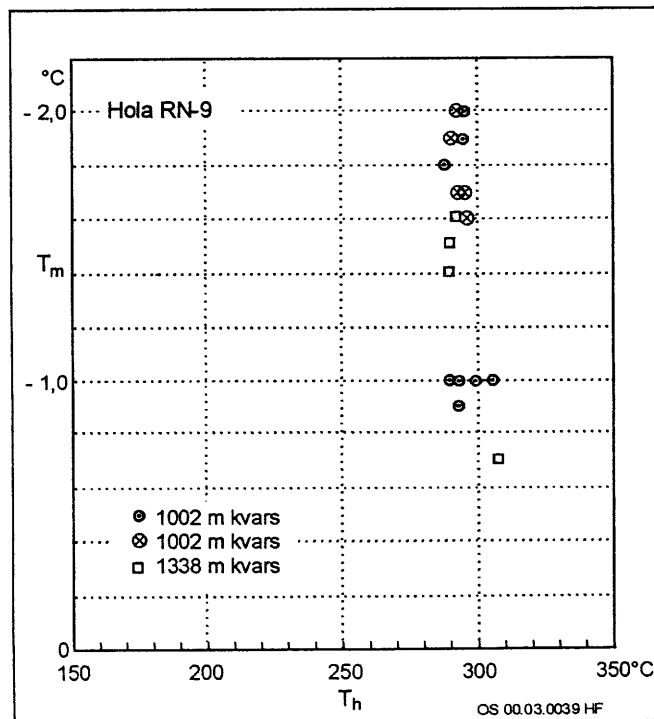
Mynd 1. Vökvabólur.



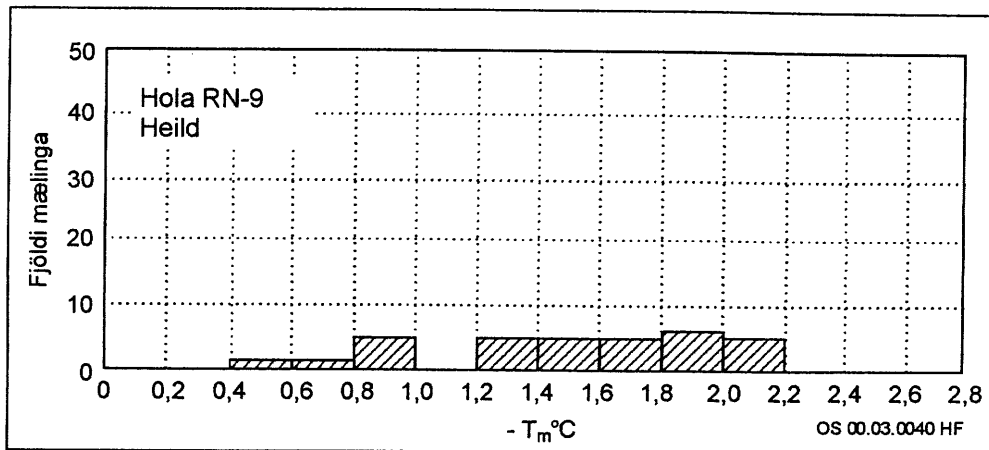
Mynd 2. Vökvabólusmásjá.



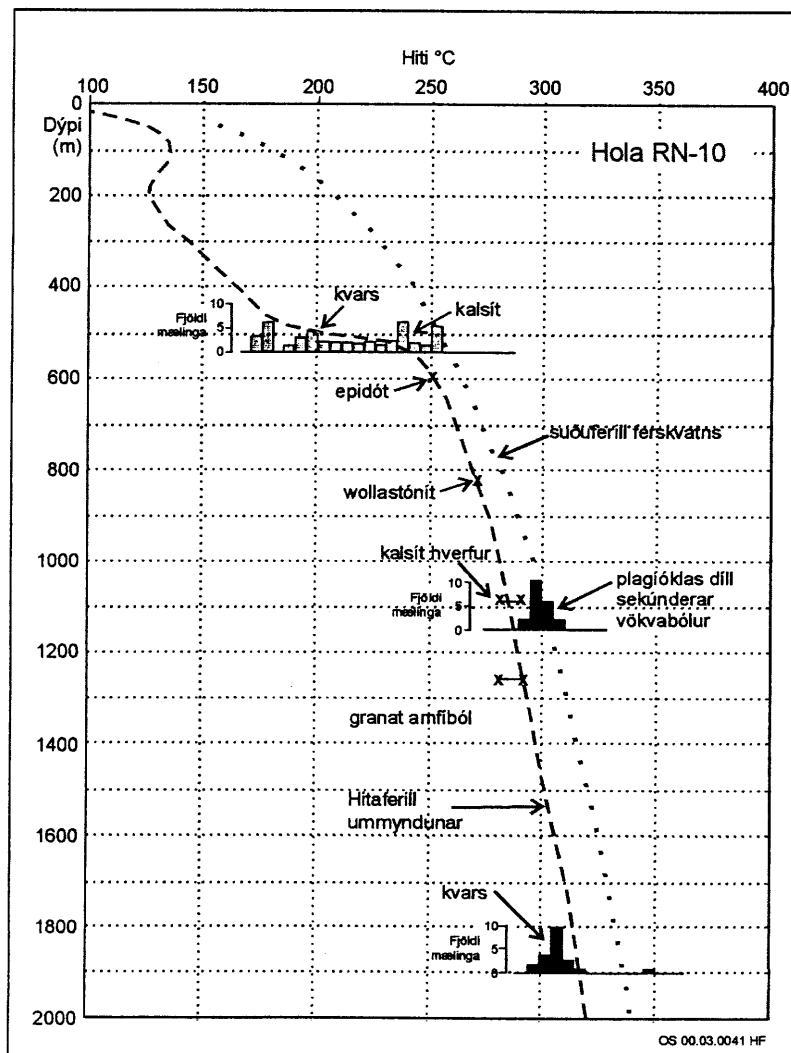
Mynd 3. Mælingar á samrunahita ( $T_h$ ) í holu RN-9 og samanburður við ummyndunar- og berghita.



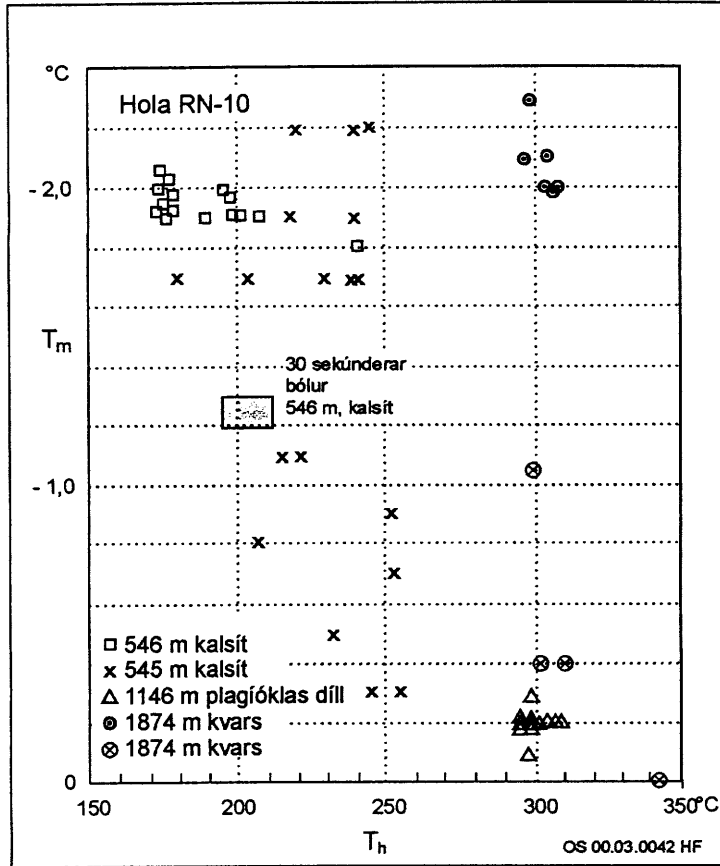
Mynd 4. Samanburður á frostmarki ( $T_m$ ) og samrunahita ( $T_h$ ) á vökvabólum í holu RN-9.



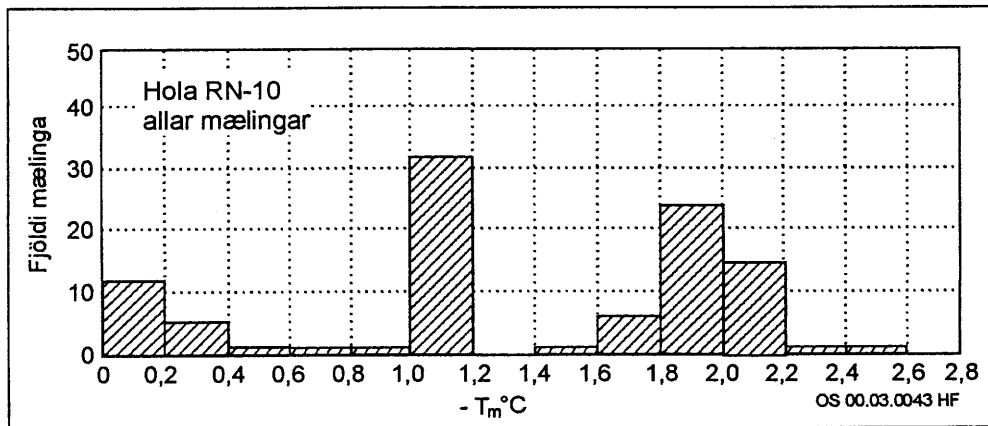
Mynd 5. Mælingar á frostmarki ( $T_m$ ) í vökvabólum í hólun RN-9



Mynd 6. Mælingar á samrunahita ( $T_h$ ) í hólun RN-10 og samanburður við ummyndunar- og berghita.



Mynd 7. Samanburður á frostmarki ( $T_m$ ) og samrunahita ( $T_h$ ) í vökvabólum í holu RN-10.



Mynd 8. Mælingar á frostmarki í vökvabólum í holu RN-10.

## 4. UMRÆÐA OG NIÐURSTÖÐUR

### 4.1. Umræða

Í þessu verkefni var mældur samrunahiti ( $T_h$ ) í alls 139 vökvabólum, og frostmark ( $T_m$ ) í alls 133 vökvabólum úr borholum 9 og 10 á Reykjanesi. Tilgangur mælinganna var að kanna sveiflur í hita og seltu, sem orðið hafa í jarðhitakerfinu.

Háhitakerfið á Reykjanesi sýnir, samkvæmt fyrstu niðurstöðum, mjög afmarkað hitabil í vökvabólum á hverju dýptarbili fyrir sig. Það bendir til að breytingar í hita hafi verið tiltölulega litlar á líftíma þess. Undantekningu má þó finna á 546 m dýpi í holu 10 þar sem hitadreifingin í bólunum spannar tæpar  $100^\circ\text{C}$ . Þessi mikla hitadreifing á sér þó þá eðlilegu skýringu, eins og áður hefur verið skýrt frá, að útfellingarnar eru innan þakbergs jarðhitakerfisins þar sem hitastigull er afar brattur, og þess að vænta að hitabreytingar þar geti verið miklar. Samanburður á hitadreifingu í vökvabólunum og suðuferli bendir einnig til að jarðhitakerfið frá rúmlega 600 m (neðan þakbergsins) niður á 1000-1100 m dýpi sé í suðu, en að neðan þess dýpis sé hitinn  $290\text{-}310^\circ\text{C}$  og stjórnað þar af lóðréttri hræringu (uppstreymi). Mjög athyglisvert er að Reykjanes sker sig frá Svartsengi og Eldvörpum að því leyti að vökvabólurnar sýna ekki vott af kælingu í jarðhitakerfinu (sbr. Hjalti Franzson 1995, 1996).

Ferskvatnsáhrif, sem fundist hafa í vökvabólum í jarðhitakerfunum í Svartsengi og Eldvörpum, finnast ekki síður á háhitasvæðinu á Reykjanesi. Mynd 9 sýnir stöplarit af niðurstöðum  $T_m$  rannsókna í vökvabólum frá þessum svæðum. Þau sýna öll að vökvabólur eru með frá ígildi ferskvatnssamsetningar upp í ísalts til ígildis sjávarsamsetningar. Mesta selta innan hvers svæðis virðist aukast frá Svartsengi út á Reykjanes. Á mynd 10 eru þessar seltubreytingar í vökvabólum enn fremur sýndar sem fall af fjarlægð frá Reykjanesi yfir til Krísuvíkur. Inn á þá mynd eru sett reiknað frostmark núverandi jarðhitavökva á Reykjanesi, Eldvörpum (skv. efnafræðigögnum úr skýrslu Gríms Björnssonar o.fl. 1998), Svartsengi og Krísuvík (Stefán Arnórsson o.fl. 1975). Myndin sýnir nokkuð óbyggjandi hvernig efri mörk seltunnar aukast til vesturs, og jafnframt að núverandi selta í þessum jarðhitakerfum liggur nærri efri seltumörkum á hverju svæði fyrir sig. Sennilega liggja bræðslumörk jarðhitavökvanna á þessum svæðum a.m.k.  $0,2^\circ\text{C}$  neðar þar sem ekki er tekið tillit til magns koldíoxíðs í vökvunum, en rannsóknir á vökvabólum á Nesjavöllum sýna að frostmark er um  $0,2^\circ\text{C}$  neðan frostmarks vatns (Hjalti Franzson, óbirt gögn). Myndir 5 og 7 sýna að ekki er unnt að tengja seltubreytingar við dýpi í jarðhitageyminum, þar sem lítt saltar vökvabólur greinast jafnt grunnt sem djúpt í jarðhitakerfunum. Kjara o.fl. (1979) settu fram þá kenningu að ferskvatnsáhrif í jarðhitakerfinu í Svartsengi mætti skýra með því að uppruni ferskvatnsins væri á svæðinu við Krísuvík. Þar læki það niður í skjálftarennuna svokallaða (sbr. mynd 10) og eftir henni til vesturs í átt að Reykjanesi. Á þeirri leið blandaðist vökvu úr söltum grunnvatnskerfum, sem leiddi til ísalts jarðhitakerfis í Svartsengi og saltara jarðhitakerfis á Reykjanesi. Ólafsson og Riley (1978) héldu fram þeirri kenningu að áhrifa ferskvatns gætti í jarðhitakerfinu á Reykjanesi, og byggðu þeir það á súrefnis- og vetnisisótópa rannsóknum. Sveinbjörnsdóttir o.fl. (1986) túlkuðu á sama hátt óvenju léttu súrefnisisótópa í kvarsu úr holu 8 á Reykjanesi sem vísbendingu um ferskvatnsáhrif í jarðhitakerfinu, og settu það í samband við ferskvatn sem jarðhitakerfið bræddi úr íshettu jökulskeiðs sem lá

yfir Reykjanesi fyrir 12-115 þúsund árum síðan. Vökvabólurannsóknir staðfesta kyrfilega túlkun á ísótópagögnum um ferskvatnsáhrif í jarðhitakerfunum. Þær sýna enn fremur að innstreymis"púlsar" í jarðhitakerfin hljóta að vera mjög staðbundin fyrirbæri, og geta átt upptök sín úr hreinu ferskvatnslagi, ísöltu eða söltu grunnvatnskerfi. Núverandi ferskvatnslinsa umhverfis háhitakerfið á Reykjanesi er vart yfir 20 m þykk, og umhverfis Svartsengi og Eldvörp nær hún vart yfir 50 m. Ákaflega erfitt er að ímynda sér þann möguleika að ferskvatn nái við núverandi aðstæður að flæða nær ómengi niður á nær 1900 m dýpi á jarðhitasvæðunum á vestanverðu Reykjanesi. Ein lausn er að gera ráð fyrir að ferskvatnslagið hafi fyrr á tímum verið mörgum sinnum þykkara. Þær aðstæður gætu hafa verið fyrir hendi á ísöld (fyrir 12-115 þúsund árum). Þá var sjávarstaðan mun lægri, og jökulísinn hefur auk þess rekið sjávaráhrif langt á haf út. Er jökullinn hvarf í lok ísaldar og sjórinn nær núverandi stöðu, minnkar og þynnist ferskvatnslagið. Gera má ráð fyrir að sjórinn flæði fyrst inn eftir lekustu jarðlögum, en nái síðast yfirhendinni í lekaminustu bergskrokkunum. Líklegt er að ferskvatnsléifar geti enn verið til staðar í opnum porum í bergi þar sem lekt er lítil, bæði innan grunnvatnskerfisins sem og í jarðhitakerfunum sjálfum. Meginatriðið í samanburðinum á seltuáhrifum í vökvabólum og núverandi seltu í vökva háhitasvæðanna á vestanverðu Reykjanesi er það, að öll jarðhitakerfin eru að þróast í átt að meiri seltu. Þessi þróun er mislangt á veg komin, og ætla má að hraði hennar hljóti að vera tengdur á einhvern hátt mishraðri þynningu á ferskvatnslagsins.

Samtenging vökvabólugagnanna sem safnað hefur verið á Reykjaneskaganum við önnur skyld gögn geta hrundið af stað enn frekari hugmyndasmíð.  $T_h$  hiti í Svartsengi og í Eldvörpum sýna að áberandi kólnun hefur átt sér stað í jarðhitakerfunum frá þeim tíma sem þau voru heitust, sérstaklega því fyrrnefnda. Þótt ekki hafi verið gerð nein athugun á vökvabólum í jarðhitasvæðinu í Krísuvík, er ljóst með samanburði ummyndunar og hitamælinga að þar hefur orðið jafnvel enn meiri kæling (t.d. Muhammad Kamah 1996; Ruel Malapitan 1995). Á háhitasvæðinu á Reykjanesi verður hins vegar ekki vart við neina umtalsverða kælingu, nema ef vera skyldi í holu 6 (Sveinbjörn Björnsson o.fl. 1971). Innrennsli inn í jarðhitakerfi stjórnast af lekt (oftast talið vera sprungulekt) sem tengir kaldara grunnvatnskerfi við jarðhitakerfi. Þessar lektartengingar rofna þegar útfellingar setjast í sprungurnar. Í þessu sambandi má flokka útfellingar í tvo hópa, annars vegar þær sem falla út við kólnun jarðhitasvökvans, hins vegar útfellingar sem falla út við hitnun vökva. Þegar grunnvatn flæðir inn í jarðhitakerfi á það síðarnefnda við þar sem grunnvatnið hitnar á leið sinni inn í heitara berg. Steindin kalsít er ein slík og er mjög algeng innan og við jaðra jarðhitakerfa. Höfundur telur að sú steind sé góður kandídat til að stífla samtengingu grunnvatns- og jarðhitakerfis. Við aukna seltu grunnvatns kemur önnur steind einnig til skjalanna, en það er anhýdrít. Sú steind virðist falla mun hraðar út í hitnandi grunnvatnsvökva en kalsít samkvæmt þeim gögnum, sem fengist hafa við boranir á Svartsengis-, Eldvarpa- og Reykjanesvæði. Hraðari útfelling leiðir af sér skammvinnari innstreymipúlssa grunnvatns inn í jarðhitakerfi. Sú minnkun í kælingu jarðhitakerfa, sem virðist eiga sér stað frá Krísuvík út á Reykjanes mætti túlka sem áhrif af auknum anhýdrít útfellingum í átt að Reykjanesi.

## 4.2. Niðurstöður

Helstu niðurstöður þessarar rannsóknar eru eftirfarandi:

- Samrunahiti ( $T_h$ ) í vökvabólum bendir til að jarðhitakerfið á Reykjanesi sé sjóðandi neðan við um 600 m dýpi (neðan þakbergsins) og niður á 1000-1100 m dýpi. Neðan þess er 290-310°C vatnskerfi í hræringarástandi.
- Engar vísbendingar sjást í vökvabólunum úr holum 9 og 10 um að jarðhitakerfið hafi orðið þar fyrir kælingu.
- Mælingar á frostmarki ( $T_m$ ) í vökvabólum sýna mikil áhrif ferskvatns í jarðhitakerfinu. Ekki er unnt að sjá nein tengsl á milli dýptar og ferskvatnsáhrifa, og er það í samræmi við niðurstöður sem fengist hafa úr svipuðum rannsóknum í Svartsengi og Eldvörpum.
- Eðlilegt er að álykta að ferskvatnáhrifin í jarðhitakerfunum séu ættuð frá ferskvatnslinsu sem liggur ofan salta grunnvatnskerfisins. Þar sem hún er óveruleg á nútíma, er sú kenning sett fram að hún hafi verið mun þykkari á jökulskeiði ísaldar og þá meira ráðandi sem innstreymisgjafi í jarðhitakerfin.
- Samanburður á seltu í vökvabólum sýnir að efri seltumörk hækka frá Svartsengi út á Reykjanes. Samanburður á þeirri seltu og núverandi seltu jarðhitavökva þessara þriggja kerfa bendir eindregið til að jarðhitakerfin séu að þróast í átt að meiri seltu.
- Vísbendingar eru um að kæling innan jarðhitakerfa fari minnkandi frá Krísuvík út á Reykjanes. Sett er fram sú hugmynd að aukin selta í grunnvatnskerfum utan háhitakerfanna valdi því að innstreymi kaldara grunnvatns inn í jarðhitakerfin stíflist mun hraðar með tilkomu anhýdrítútfellinga.

## 4.3. Frekari rannsóknir

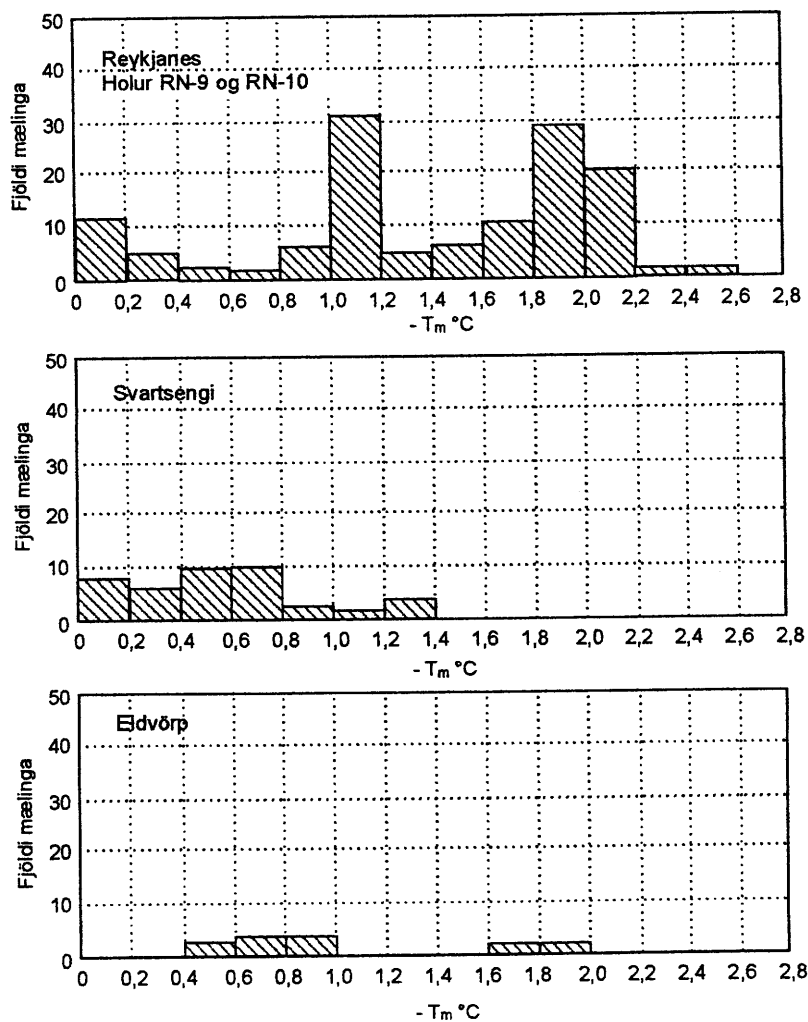
Ljóst er að þær mælingar, sem nú hafa verið gerðar, hafa skilað áhugaverðum upplýsingum um jarðhitakerfið á Reykjanesi, og leitt til þess að unnt hefur verið að setja fram hugmyndir að heildstæðri mynd um þróun kerfanna á vestanverðu nesinu.

Vökvabólur eru, eins og áður er getið, algengastar í útfellingum, og með nákvæmum greiningum er unnt að skilja á milli þeirra sem myndast um leið og viðkomandi útfelling verður til (prímer) eða síðar sem vökvabólur í samgrónum sprunguflötum í útfellingunni (sekúnder). Í úrvinnslu á ummyndun í svarfi úr borholum hefur verið rannsakað hvernig útfellingar raða sér í tíma í holrými jarðhitakerfisins, og á þann hátt hefur fengist innsýn í þróun jarðhitakerfis með tíma. Slíkt mat hefur verið gert í Svartsengi, og Eldvörpum, og verið er að vinna að slíku í úrvinnslu í holu RN-10. Á Nesjavöllum var gerð viðamikil úttekt á röðun útfellinga í holrými og sýnt fram á upphitun og kælingu í jarðhitakerfinu með tíma (Hjalti Franzson 1994). Athugun á vökvabólum í jarðhitakerfinu, og tenging þeirra upplýsinga við útfellingaraðir, leiddi til þeirrar niðurstöðu að jarðhitakerfið sé sennilega nú í hitnunarfasa (Hjalti Franzson 2000). Lagt er til að nákvæmari rannsókn á vökvabólum fari fram þegar unnið hefur

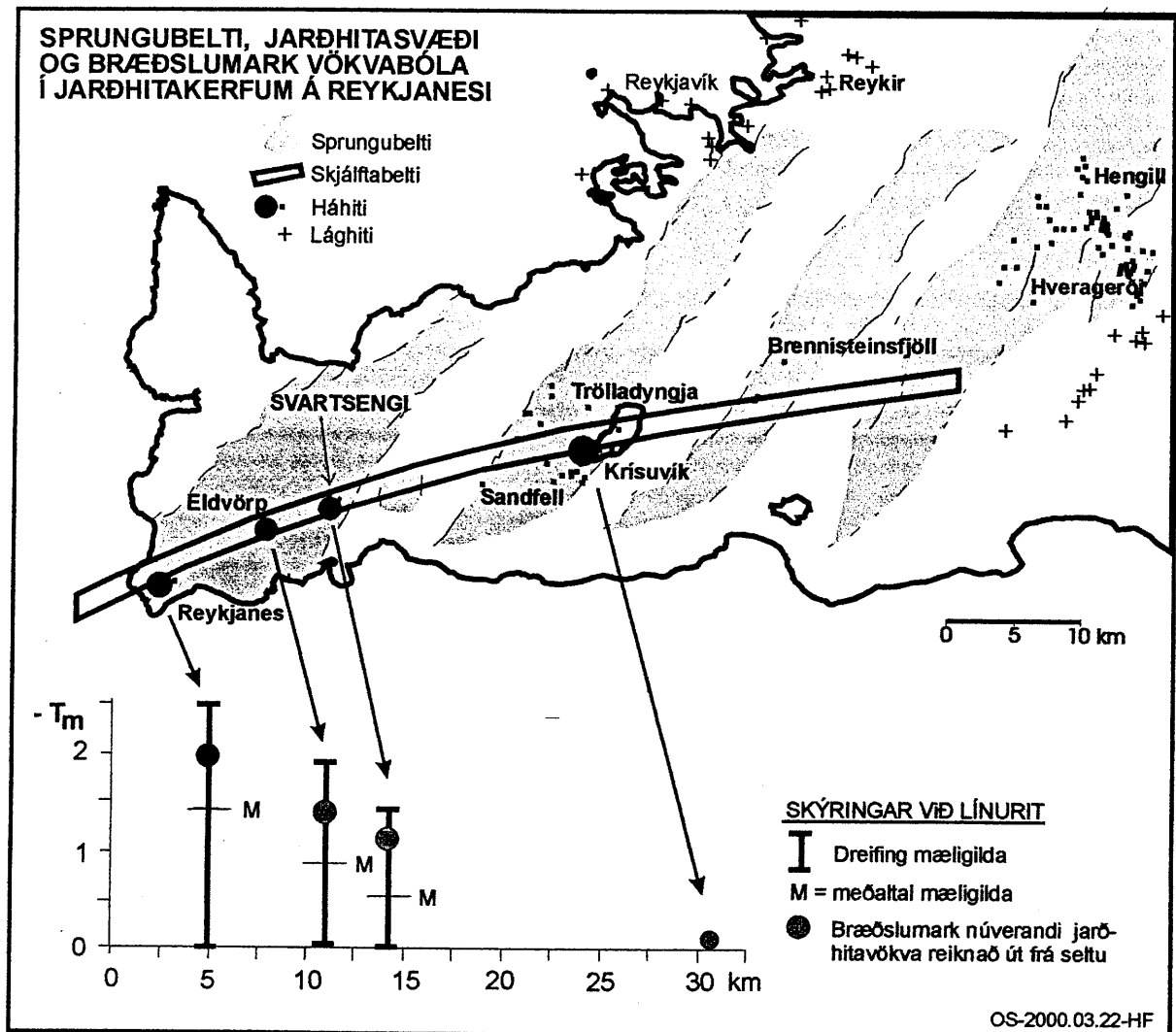


verið úr gögnum um röðun útfellinga. Væntanlega má þá fá betri heildarsýn yfir hita- og seltubreytingar í jarðhitakerfinu á Reykjanesi.

Sá annmarki er á mati á berghita byggðum á upphitun sumra hola á Reykjanesi, að vatn í þeim tekur að sjóða á ákveðnu dýpi og aflagar berghitaferilinn, og eru holur 9 og 10 dæmi um slíkt. Fróðlegt væri að gera fleiri vökvabólumælingar á þeim dýptarbilum í holum 9 og 10 þar sem berghitamælingar eru erfiðleikum bundnar, og einnig í öðrum holum þar sem svipað er ástatt um, svo sem holu 8. Túlkun á berghita í holu 6 hefur einnig verið nokkrum vandkvæðum bundin, og langt frá því að vera í samræmi við ummyndunina. Mögulegt er að hitinn í holunni tengist millirensli þar sem kaldur jarðsjór flæðir úr efri æð niður í botnæð í holunni. Með mælingum á  $T_h$  í vökvabólum mætti komast að því hver berghiti gæti í raun verið í berggrunnum á slóðum þeirrar holu.



**Mynd 9.** Samanburður á dreifingu á frostmarki ( $T_m$ ) vökvabóla í Svartsengi, Eldvörpum og Reykjanesi.



*Mynd 10.* Jarðfræðikort af Reykjanesi. Breytileiki á frostmarki vökvabóla frá Reykjanesi, Eldvörpum og Svartsengi, ásamt samanburði við núverandi seltu í þeim kerfum og jarðhita-kerfinu í Krísuvík.

## 5. HEIMILDIR

Grímur Björnsson, Jón Örn Bjarnason og Sigvaldi Thordarson 1998. Afkastamælingar í borholum í Svartsengi og í Eldvörpum árin 1996 og 1997. Orkustofnun, OS-98008, 68 s.

Hjalti Franzson 1994. Nesjavellir. Þætti af ummyndun jarðhitakerfis. Orkustofnun, OS-94402/JHD-06. 52 s.

Hjalti Franzson 1995. Geological aspects of the Svartsengi high-T field, Reykjanes peninsula, Iceland. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International symposium on Water-Rock Interaction WRI-8, Vladivostok. s. 497-500.

Hjalti Franzson 1996. Eldvörp, hola EG-2. Jarðfræðirannsóknir. Orkustofnun, OS-96030/JHD-05. 64 s.

Hjalti Franzson 1998. Forðafræðistuðlar. Hugleiðingar um kalsít (og pýrít) í jarðhitakerfum. Orkustofnun, OS-ROS-HF-98/03. Greinargerð. Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja. 6 s.

Hjalti Franzson 2000. Hydrothermal evolution of the Nesjavellir high-temperature system, Iceland. WGC-2000 Japan, í útgáfu.

Kjara, S.P., Halldórsson, G.K., Thorhallsson, S. and Elíasson, J. 1979. Reservoir engineering aspects of Svartsengi geothermal area: Geothermal Resources Council, Transactions, vol. 3, s. 733-736.

Muhammad Yustin Kamah 1996. Borehole geology, hydrothermal alteration and temperature evolution of well KR-2, Krísuvík, SW-Iceland. In Reports of the United Nations University Geothermal Training Programme 1966. s. 71-102.

Ruel T. Malapitan 1995. Borehole geology and hydrothermal alteration of well KR-9, Krísuvík, SW-Iceland. In Reports of the United Nations University Geothermal Training Programme, s.185-206.

Stefán Arnórsson, Guðmundur Guðmundsson, Stefán G.Sigurmundsson, Axel Björnsson, Einar Gunnlaugsson, Gestur Gíslason, Jón Jónsson, Páll Einarsson, Stefán G. Sigurmundsson og Sveinbjörn Björnsson 1975. Krísuvíkursvæði. Heildarskýrsla um rannsókn jarðhitans. Orkustofnun, OS-JHD-7554, (100) s.

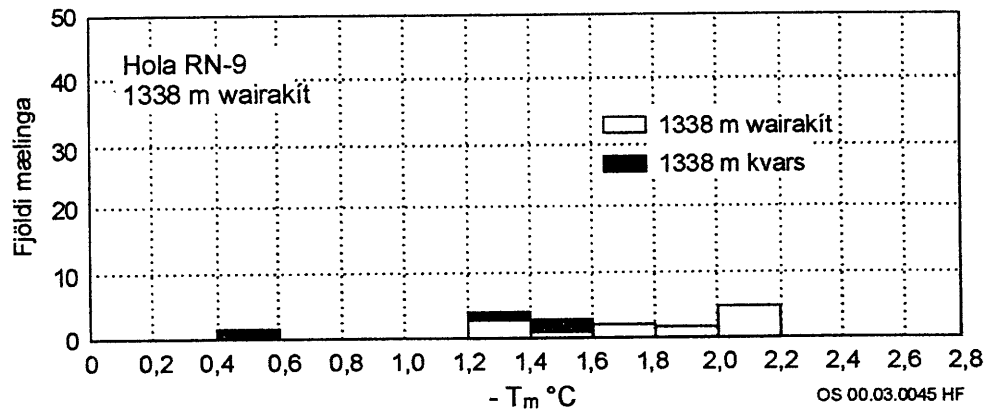
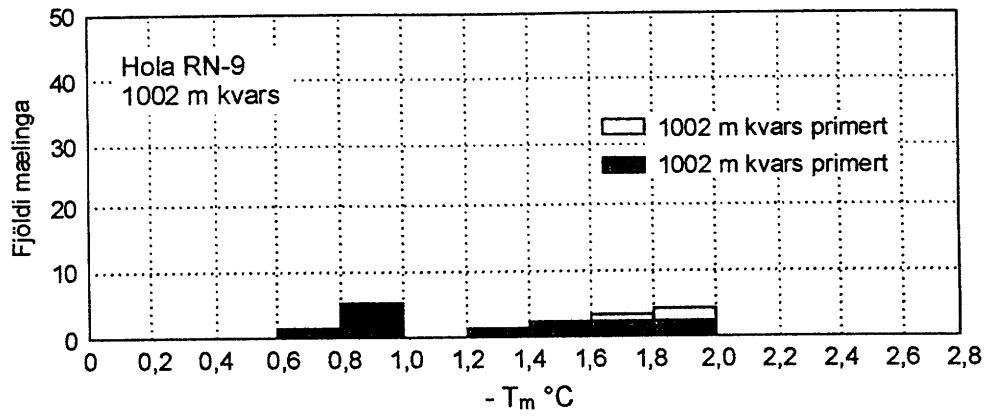
Sveinbjörn Björnsson, Jón Jónsson, Jens Tómasson, Stefán Arnórsson, Birna Ólafsdóttir og Stefán Sigurmundsson 1971. Reykjanes. Lokaskýrsla um rannsókn háhitasvæðis. Orkustofnun, febrúar 1971, 172 s.

Sveinbjörnsdóttir, A.E., M.L. Colemann and B.W.D Yardley 1986. Origin and history of hydrothermal fluids of the Reykjanes and Krafla geothermal fields, Iceland. A stable isotope study. Contrib. Min. Metr. 94, s. 99-109.

Sveinbjörn Björnsson, Jón Jónsson, Jens Tómasson, Stefán Arnórsson, Birna

## **Viðauki 1**

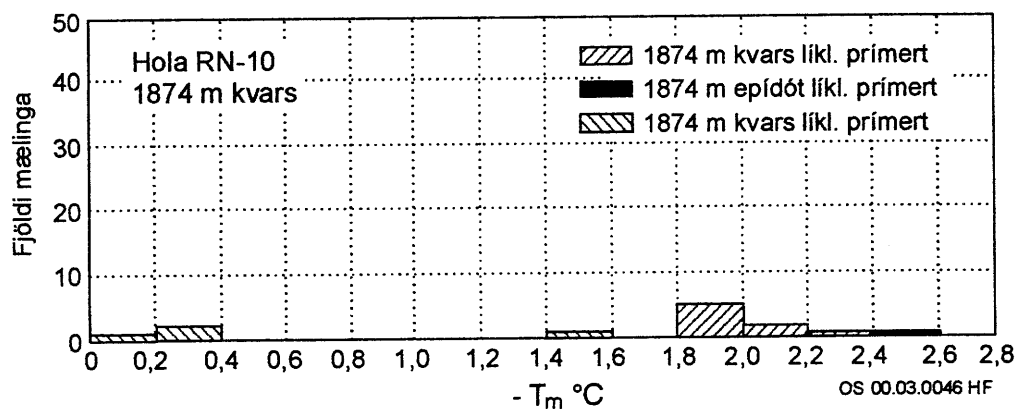
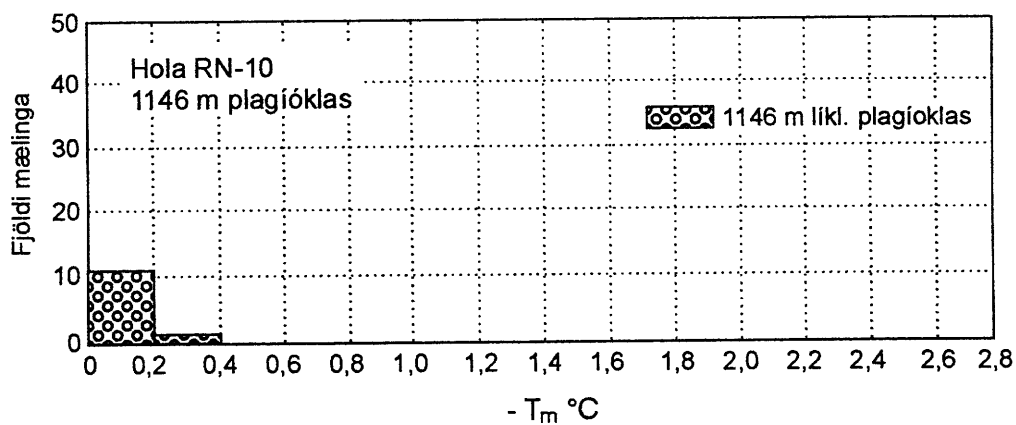
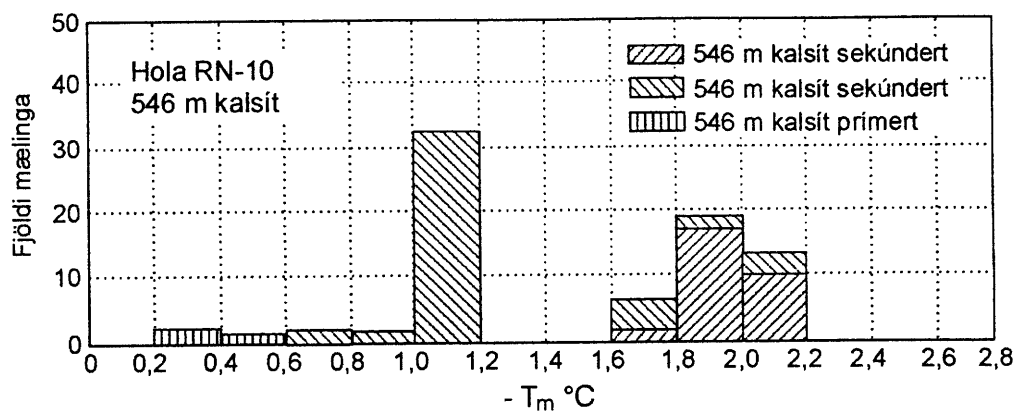
**Stöplarit af mælingum á frostmarki einstakra vökvabóla í holu RN-9**



Stöplarit af mælingum á frostmarki einstakra vökvabóla í holu RN-9.

## **Viðauki 2**

**Stöplarit af mælingum á frostmarki einstakra vökvabóla í holu RN-10**



Stöplarit af mælingum á frostmarki einstakra vökvabóla í holu RN-10.