

G.O.F.



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

**Jarðhitaleit við Ísafjörð
og Bolungarvík 1997-98**

**Ragna Karlsdóttir
Kristján Sæmundsson**

Unnið fyrir Orkubú Vestfjarða

1998

OS-98062



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 610 402

Ragna Karlsdóttir
Kristján Sæmundsson

JARÐHITALEIT VIÐ ÍSAFJÖRÐ OG BOLUNGARVÍK 1997-98

Unnið fyrir Orkubú Vestfjarða

OS-98062

Október 1998

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

Skýrsla nr.: OS-98062	Dags.: Október 1998	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Jarðhitaleit við Ísafjörð og Bolungarvík 1997-98	Upplag: 30	
	Fjöldi síðna: 28	
Höfundar: Ragna Karlsdóttir Kristján Sæmundsson	Verkefnisstjóri: Ragna Karlsdóttir	
Gerð skýrslu / Verkstig: Jarðhitaöflun, forrannsókn	Verknúmer: 610 402	
Unnið fyrir: Orkubú Vestfjarða		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Í skýrslunni er fjallað um jarðhitaleit í nágrenni Ísafjarðar með hitastigulsborunum annarsvegar og í Bolungarvík með TEM-mælingum hinsvegar. Rannsóknasvið Orkustofnunar sá um ráðgjöf og eftirlit með borunum og annaðist viðnámsmælingarnar, fyrir Orkubú Vestfjarða. Jarðboranir hf önnuðust boranir. Hitastigulsmælingar leiða í ljós svonefndan svæðisstigul, en frávik frá honum sýna hvar hærri hita er að finna. Í nágrenni Ísafjarðar hafa með borun 29 grannra rannsóknarholna fundist tvö svæði, við Valhöll og Bræðratungu í Tungudal, með umtalsvert hærri hitastigli en svæðisstigull, sem verður einungis skýrt sem áhrif frá jarðhita. Hæsti hitastigull við Valhöll er 150°C en yfir 200°C við Bræðratungu þar sem vænta má 60-70°C heits vatnskerfis á 800-1400 m dýpi. Efnainnihald vatnssýnis úr holu OV-20 við Bræðratungu bendir til hins sama. Mælingarnar geta ekki sagt til um vatnsmagn, til þess þarf að bora holu ofan í vatnskerfið. TEM-mælingar í Bolungarvík gefa til kynna tvö svæði, við Gil og í Hlíðardal, með áberandi lágt viðnám, sem gætu verið áhrif frá jarðhita. Í viðauka 1 eru hitamælingar og efnagreiningar úr öllum holunum, og í viðaukum 2 og 3 lýsing á TEM-mæliaðferðinni og mæliferlar viðnámsmælinganna í Bolungarvík.		
Lykilord: Ísafjörður/Bolungarvík, jarðhitaleit, borholur, hitastigull, viðnámsmælingar	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: <i>Ragna Karlsdóttir</i>	
	Yfirfarið af: PI	

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	3
2. JARÐHITALEIT Í NÁGRENNI ÍSAFJARÐAR	3
2.1 VALHÖLL	3
2.2 BRÆÐRATUNGA	3
2.3 ÁÆTLAÐ HITASTIG Í JARÐHITAGEYMINUM	8
3. TEM-MÆLINGAR Í BOLUNGARVÍK	10
4. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	15
5. LOKAORÐ	15
6. HEIMILDIR	16
VIÐAUKI 1: Hitamælingar og efnagreiningar	17
VIÐAUKI 2: TEM-viðnámsmælingar	27
VIÐAUKI 3: TEM-mælingar í Bolungarvík. Mæliferlar og túlkun	29
Tafla 1. Hnit og hæð TEM-mælinga í Bolungarvík 1997	10

MYNDIR

Mynd 1. Staðsetning borholna	5
Mynd 2. Staðsetning borholna í Tungudal	5
Mynd 3. Hitastigulshámark við Valhöll	6
Mynd 4. Hitamælingar úr borholum við Valhöll	6
Mynd 5. Hitamælingar úr borholum við Bræðratungu	7
Mynd 6. Hitastigulshámark við Bræðratungu	7
Mynd 7. Staðsetning borholna við Bræðratungu	8
Mynd 8. Berghiti og áætlað hitastig í jarðhitageymi	9
Mynd 9. Staðsetning TEM-mælinga í Bolungarvík	11
Mynd 10. Viðnámsnið S1	13
Mynd 11. Viðnámsnið S2	14

1. INNGANGUR

Rannsóknasvið Orkustofnunar tók að sér ráðgjöf og eftirlit með hitastigulsborunum við Ísafjörð vegna jarðhitaleitar fyrir Orkubú Vestfjarða. Samningur Orkubúsins við Jarðboranir, sem tóku að sér borun holnanna, kvað á um 14 hitastigulsholur í fyrstu, og var þeim valinn staður í Engidal, Tungudal, Eyrarhlíð og Óshlíð. Í framhaldi af því var ákveðið að bæta við holum í Tungudal.

Rannsóknasvið Orkustofnunar tók einnig að sér að mæla nokkrar TEM-viðnámsmælingar í Bolungarvík til jarðhitaleitar.

2. JARÐHITALEIT Í NÁGRENNI ÍSAFJARÐAR

Hitastigulsrannsókn fer þannig fram að boraðar eru grunnar rannsóknarholur, hiti mældur í þeim og fundinn hitastigull, þ.e. hitnun með dýpi. Leitað er eftir hver hitastigullinn er þar sem hann virðist ótruflaður af jarðhita þ.e. svæðisstigull, svo og hvort finnist svæði með áberandi hærri hitastigli en umhverfis. Við Ísafjörð var ákveðið að bora grunnar rannsóknarholur, að jafnaði 100 metra djúpar og í fyrstu lotu var borið niður vítt og breitt. Mynd 1 sýnir hvar holurnar í Engidal, Tungudal, Eyrarhlíð og Óshlíð eru. Hitamælingar úr öllum borholunum eru í viðauka 1.

Þegar búið var að bora 13 holur á víð og dreif um nágrenni Ísafjarðar var ljóst að svæðisstigull var 65-90°C/km og er töluvert hærri en sunnar á Vestfjörðum þar sem hann er um 50°C/km. Enn hærri hitastigul var aðeins að sjá í Tungudal, í holu OV-5 við Valhöll (144°C/km). Hitamælingar úr eldri holum, TD-02 og TD-03, gáfu einnig vísbendingar um hærri hitastigul í nágrenni Bræðratungu.

2.1 VALHÖLL

Í Tungudal háttar þannig til að volgt 20-30°C vatnskerfi er niður á um 100 metra dýpi. Framhald rannsókna beindist að því að finna hvar þetta kerfi væri heitast og þar með reyna að finna uppstreymi heits vatns í þetta vatnskerfi. Ákveðið var að skoða betur svæðið við Valhöll og var þar bætt við 4 holum. Mynd 2 sýnir hvar holur við Valhöll eru. Hæstur stigull var í holu OV-16 eða nálægt 150°C/km. Sjá snið á mynd 3. Á mynd 4 eru hitamælingar úr holunum við Valhöll. Hóla OV-16 er dýpst og er trufluð af vatnsrennsli niður á 160 metra dýpi. OV-5 og OV-16 eru heitastar; OV-16 þó ívið heitari.

2.2 BRÆÐRATUNGA

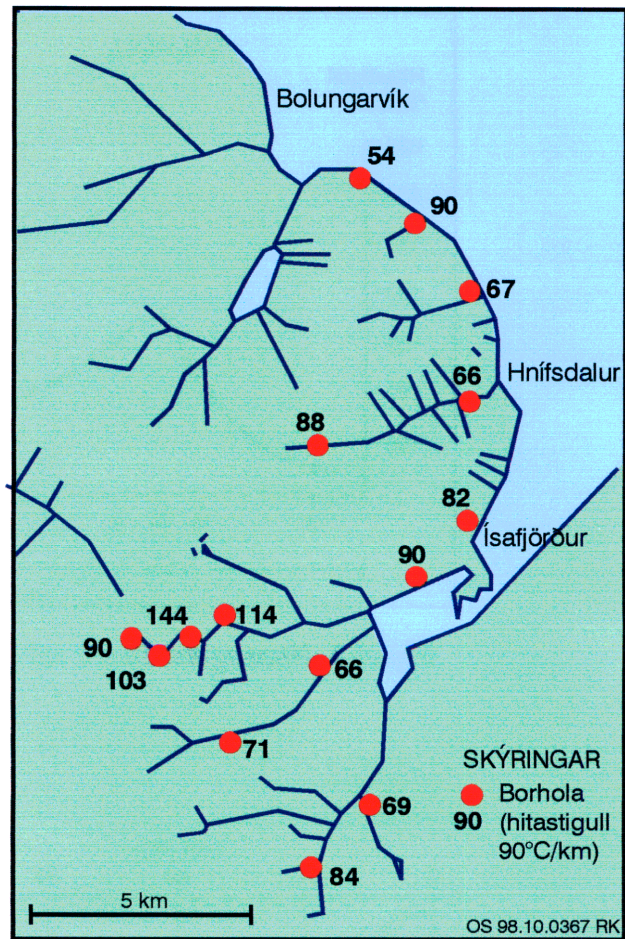
Á áttunda áratugnum voru boraðar tvær djúpar holur, TD-02 og TD-03, í Tungudal. Þær gáfu ekki árangur. Við skoðun hitamælinga úr þeim, var ákvarðaður hitastigull fyrir efstu 100 metrana, þ.e. sambærilegt dýpi og í rannsóknarholunum nú. Hitastigull í TD-03 var nálægt 130°C/km og því var ákveðið að rannsaka nánar þetta svæði, sem kennt er við Bræðratungu.

Boraðar voru í fyrstu 4 holur við Bræðratungu. Lega þeirra er á mynd 2 og hitamælingar úr þeim á mynd 5. Hóla OV-17 fór í gegnum 30°C heita vatnsæð á um 100 metra dýpi en var kaldari fyrir neðan. Á mynd 5 eru hitamælingar úr holunum við Bræðratungu. Þetta bendir til þess að a.m.k. 30°C heitt vatn renni lárétt frá uppstreymisrás í nágrenni holunnar. Holur OV-18 og OV-19 voru báðar kaldari en OV-17 ofan 100 metra dýpis en OV-19 er heitust neðan við 100 metra og því trúlegast næst uppstreyminu. Hóla OV-20 var því á milli OV-17 og OV-19. OV-20 er líklega mjög nærri uppstreymi rúmlega 30°C heits vatns. Hitamæling úr henni sýnir 31°C á 100 -130 metra dýpi en aðeins kólnun (~1°C) neðan við 130 metra. Borun þessarar holu gekk fremur erfiðlega í sprungnu og hrungjörnu bergi og er hugsanlegt að hún sé í sprungukerfi sem leiðir heitt vatn upp undir yfirborð. Nokkurt rennsli var í OV-20 og var tekið vatnssýni í dælingu. Kísilmagn í sýninu bendir til þess að vatnið sé talsvert heitara eða 60 -70°C í jarðhitakerfinu.

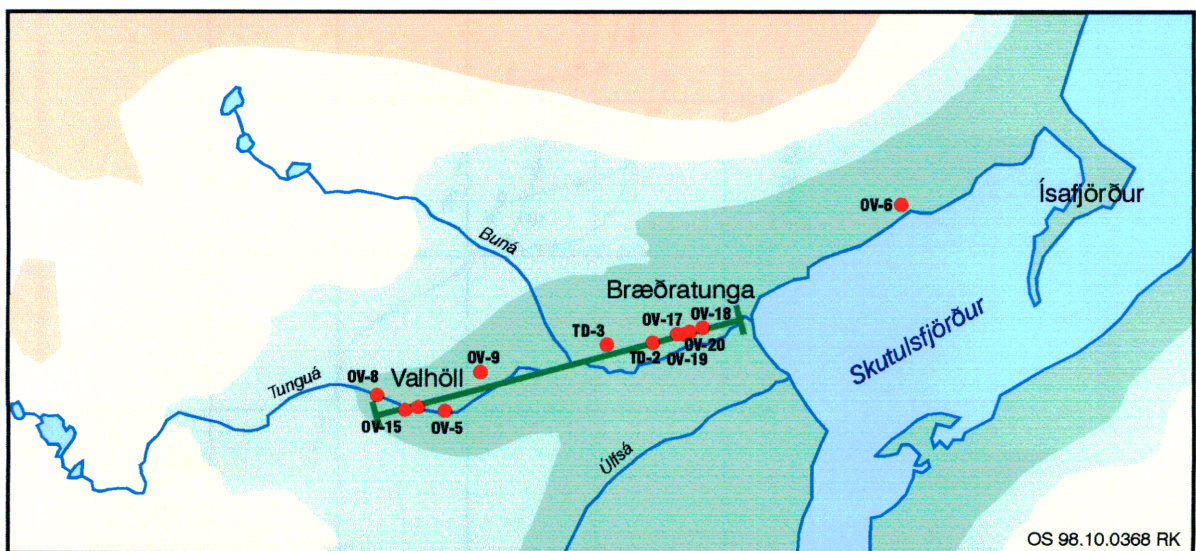
Með þessum holum fékkst snið gegnum hitasvæðið við Bræðratungu. Mynd 6 sýnir hitastigulinn í holunum. Sjálfur hitastigulstoppurinn er mjög skarpur og gefur til kynna þrönga uppstreymisrás á litlu dýpi. Hins vegar eru allar holurnar við Bræðratungu með hærri stigul en svæðisstigullinn, og það sýnir áhrif frá hitakerfi á einhverju dýpi.

Þessar niðurstöður eru fengnar út frá einu sniði í gegnum hitastigulshámark við Bræðratungu. Þegar hér var komið, var ákveðið að bæta við 8-10 holum til þess að ákvarða lögun og stefnu hitahámarksins.

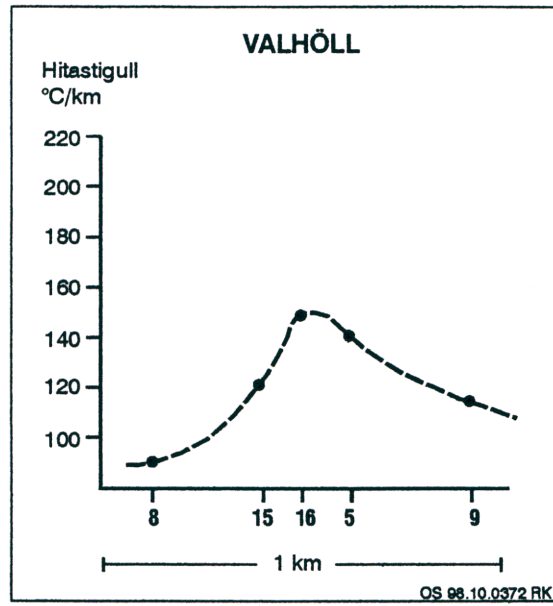
Viðbótarholurnar urðu 9 og á mynd 7 sést staðsetning þeirra. Holurnar eru margar truflaðar af vatnsrennsli og því erfitt að ákvarða hitastigulinn, en með því að skoða hitaferla úr þeim má gera sér grein fyrir afstöðu þeirra til hitauppstreymisins. Á myndinni er einnig sýndur áætlaður hitastigull út frá hitastigi í botni hverrar holu. Fram kemur aflangt svæði (100x150m) með NV-SA stefnu þar sem hitastigull er áberandi hæstur. Þetta er sama stefna og á jarðhitasvæðinu í Súgandafirði og á brotabeltinu á Breiðadalsheiði, sem mest rann úr, þegar göngin voru sprengd. Uppstreymisrásin virðist vera þröng og líklegt að hún sé nærri holu OV-20.



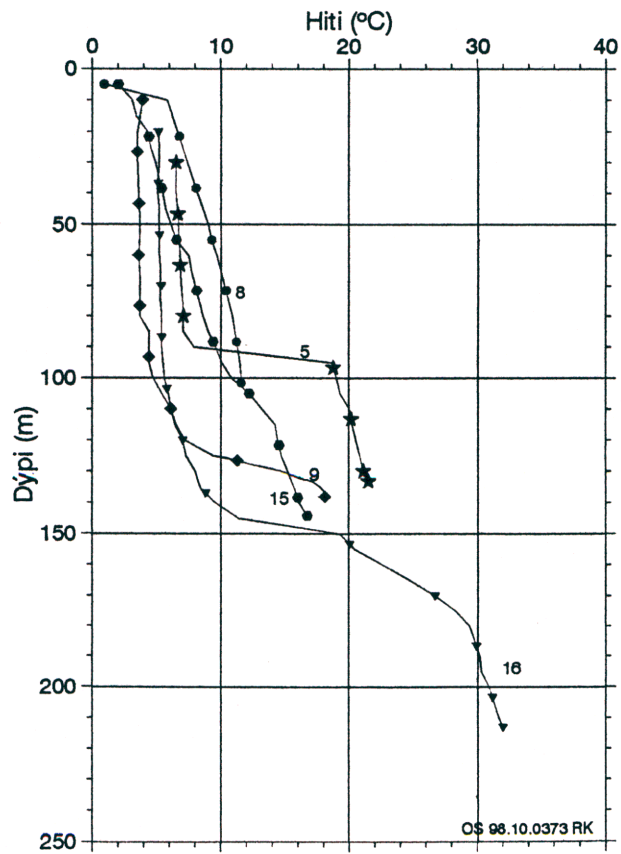
Mynd 1. Staðsetning borholna.



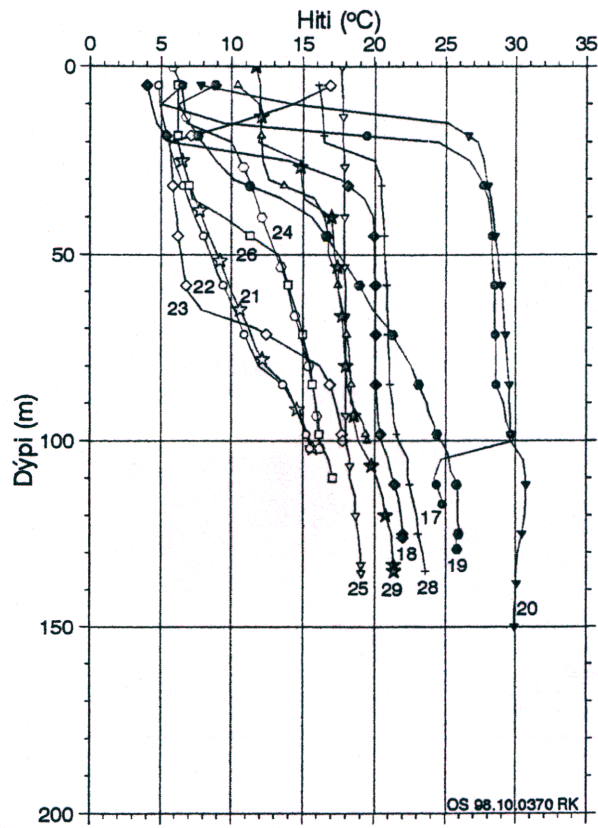
Mynd 2. Staðsetning borholna í Tungudal



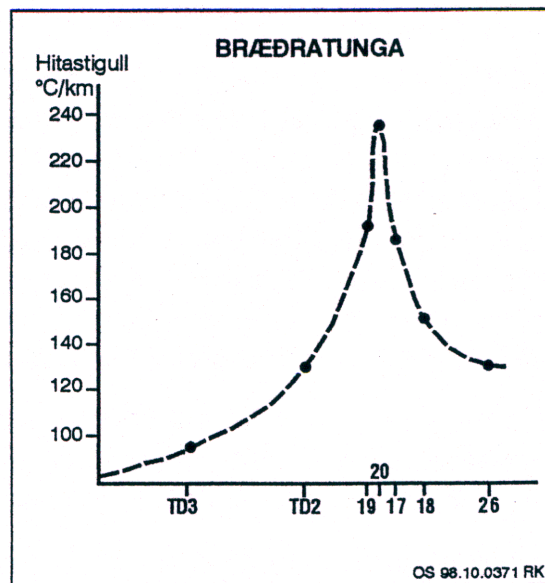
Mynd 3. Hitastigulshámark við Valhöll.



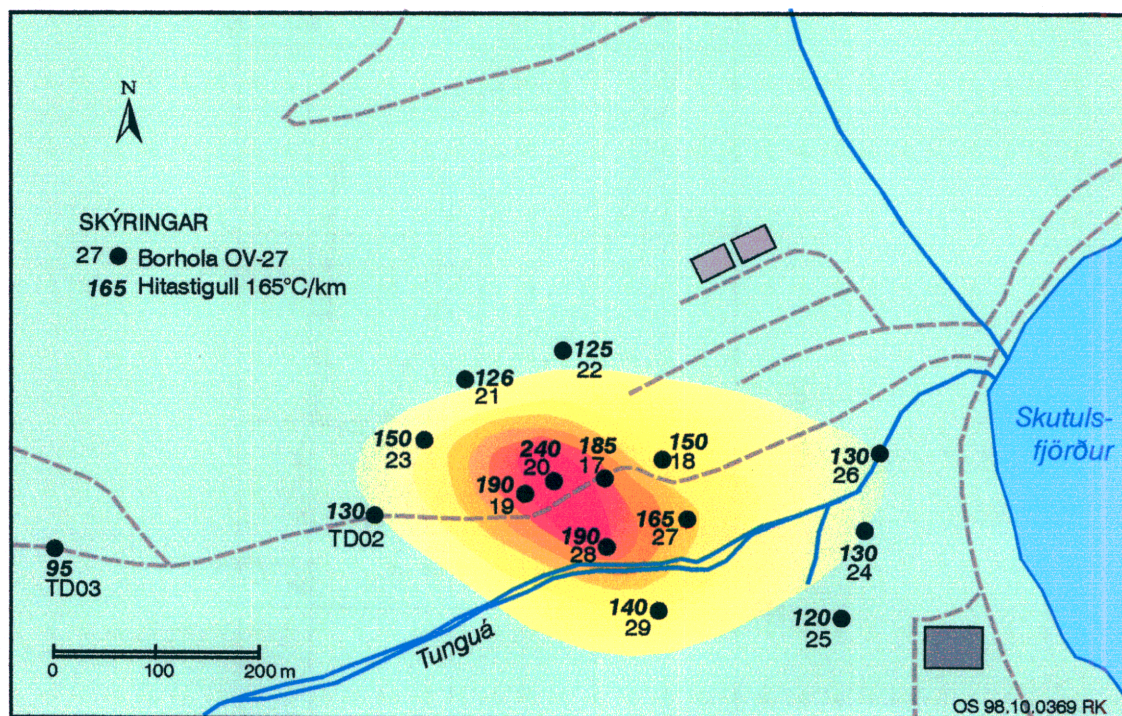
Mynd 4. Hitamælingar úr borholum við Valhöll.



Mynd 5. Hitamælingar úr borholum við Bræðratungu.



Mynd 6. Hitastigulshámark við Bræðratungu.



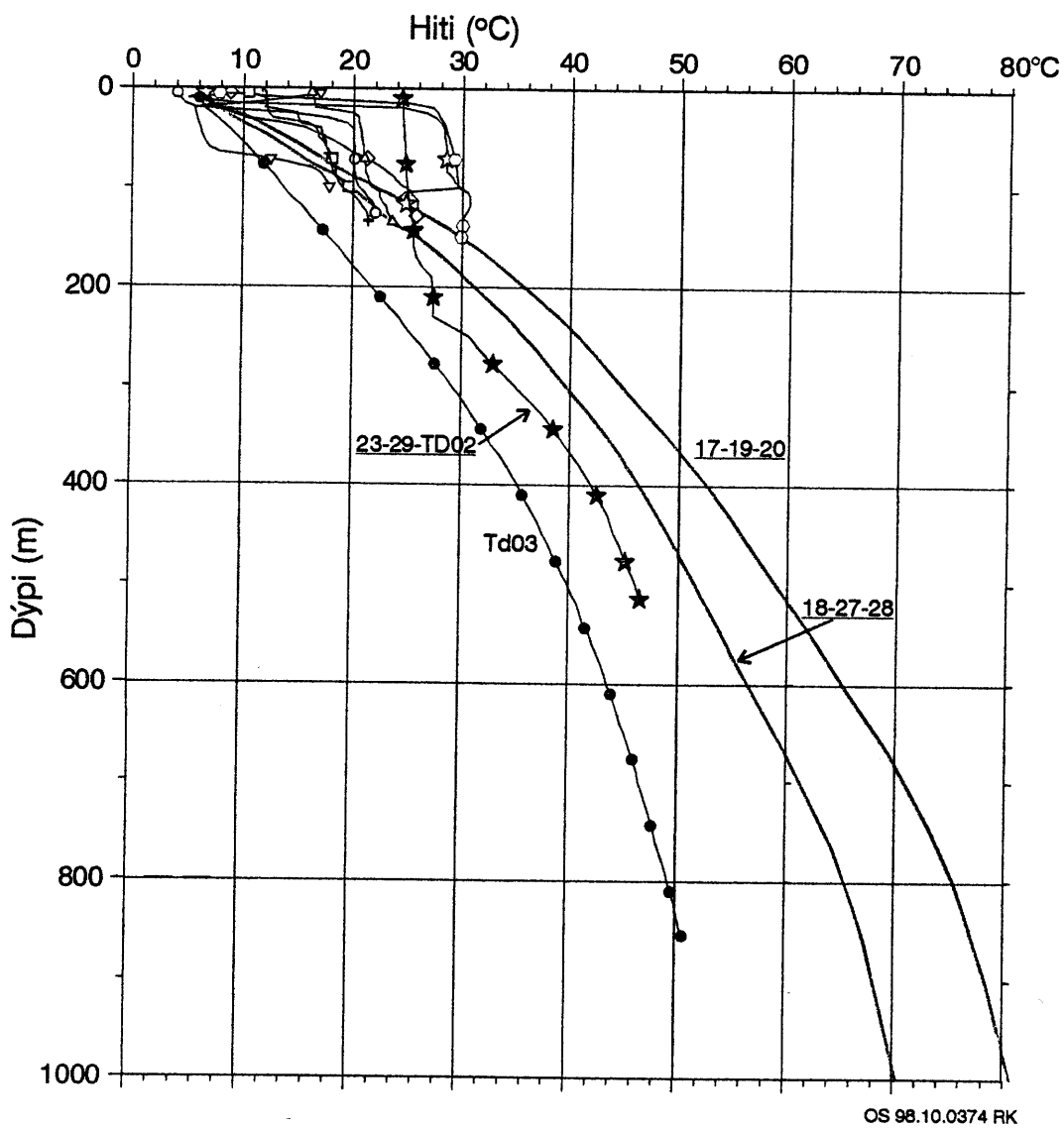
Mynd 7. Staðsetning borholna við Bræðratungu.

2.3 ÁÆTLAÐ HITASTIG Í JARÐHITAGEYMINUM

Eins og áður er vikið að voru tvær djúpar holur boraðar í Tungudal á árunum 1975-1977. Reynt var að ákvarða berghita í holunum út frá hitamælingum í þeim. Hola TD-03 er 985 metra djúp og var alveg þurr. Hún er rúmar 50°C í botni. Hitamæling úr holu TD-03 sýnir berghita enda er hún ekki trufluð af vatnsrennsli. Hola TD-02 er 1110 metra djúp og er smá rennsli í henni úr grunna kerfinu, sem þar er allt að 28°C heitt og nær niður á um 250 metra dýpi. Hitamæling sem tekin var í borun sýnir að berghiti í henni er ívið hærri en í holu TD-03. Efnagreiningar á vatni (djúpsýni) úr holum TD-02 og TD-03 benda til $60\text{-}70^{\circ}\text{C}$ heits vatnskerfis. Efnagreiningarnar eru aftast í viðauka 1.

Við að áætla berghita í OV-20 er stuðst við botnhita í holunni þegar hún var um 90 metra djúp og síðan þegar hún var í fulli dýpt (130 m). Frá þessum punktum er áætlað að berghitinn hegði sér eins og í djúpu holunum. Sjá mynd 8.

Ef dreginn er ferill í gegnum botnhitastig í holu OV-20 og hann framlengdur eftir berg-hitaferlinum úr holum TD-02 og TD-03, sést að vænta má $60\text{-}70^{\circ}\text{C}$ hita neðan við 800-1000 metra. Þessu til stuðnings er greining á kísli úr vatnsýni úr holu OV-20, sem gefur til kynna $60\text{-}70^{\circ}\text{C}$ í jarðhitageyminum. Á myndinni sést einnig að botnhitastig í holum OV-23 og OV-29 fellur á sama feril og TD-02. Holur OV-18, OV-27 og OV-28 eru saman á ferli, sem er heldur "heitari" og holur OV-17 og OV-19 eru síðan á sama ferli og OV-20, enda næstar heitasta svæðinu.



Mynd 8. Berghiti og áætlað hitastig í jarðhitageymi.

3. TEM-MÆLINGAR Í BOLUNGARVÍK

TEM-mælingar hafa rutt sér til rúms sem viðnámsmælingaaðferð til jarðhitaleitar á síðustu árum. Þær eru ódýrari í framkvæmd og gagnasöfnun fljótlegri en í eldri viðnámsmælingaaðferð (Schlumberger). Nánari lýsing á TEM-mæliaðferðinni er í viðauka 2.

Fram til þessa hafa TEM-mælingar einkum verið notaðar til rannsókna á háhitasvæðum hér á landi. Samsvörun milli Schlumberger- og TEM-mælinga á háhitasvæðunum er allgóð en þar háttar þannig til að viðnámsmælingar sjá þykk viðnámslög með miklum mun í viðnámi. Munur á milli mæliaðferða kom fram í efstu 100 metrum í mælingunni þar sem Schlumbergermælingar eru viðkvæmari fyrir lágviðnámi í yfirborði. Dýptarskynjun var álitin mjög sambærileg í báðum mæliaðferðum.

Þegar farið var að bera saman niðurstöður Schlumberger- og TEM-mælinga utan gosbeltanna kom fram allnokkur munur. Utan gosbeltanna eru jarðlög mjög lagskipt og er berggrunnurinn gjarnan úr mörgum þunnum hraunlögum með karga á milli. Fræðileg úttekt var gerð á mæliaðferðunum fyrir lagskiptan stafla. Kom þá í ljós að mæliaðferðirnar gefa mismunandi þykkt og meðaleðlisviðnám fyrir syrpur, þar sem í jarðlögum eru syrpur af mörgum þunnum lögum með breytilegu viðnámi. Einnig þykir ljóst að TEM-mælingar hafi betri upplausn með dýpi, þ.e. hafi betri möguleika á að greina lagskiptar syrpur upp í einstök lög en Schlumbergermælingar (Knútur Árnason, 1995).

Í TEM-mælingum í Eyjafirði 1995 kom í ljós að TEM-mælingar sjá lagskiptingu á 500-1300 metra dýpi þar sem Schlumberger-mælingarnar sjá aðeins meðalviðnám. Schlumberger-mælingarnar sjá hins vegar nákvæma lagskiptingu í efstu 100-200 metrunum sem TEM-mælingarnar sjá ekki.

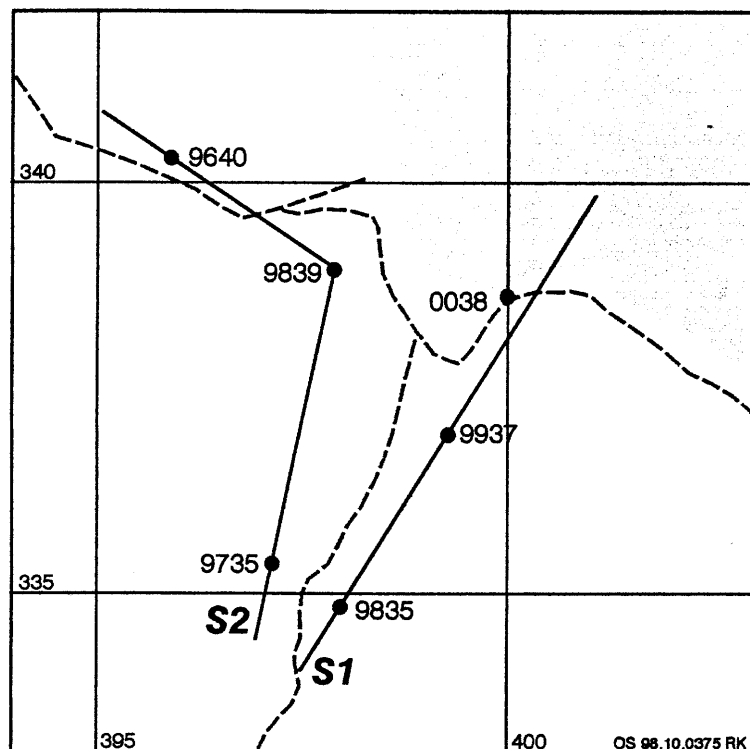
Mælt var í Bolungarvík í júlímánuði 1997, alls 6 mælingar. Lega þeirra er sýnd á mynd 9 og hnit þeirra í töflu 1.

Tafla-1. Hnit og hæð TEM-mælinga í Bolungarvík 1997.

Mæling	Breidd	Lengd	Hæð yfir sjó
9640	7395886	7340256	115
9735	7397126	7335304	60
9835	7397991	7334769	10
9839	7397906	7338904	10
9937	7399312	7336864	10
0038	7400036	7338525	20

Gögn úr öllum mælingunum eru góð nema þeim í Óshlíð. Þar er mælingin of nærri háspennulínu sem hefur áhrif á mæligildin. Einnig er mælingin svo nærri sjó að það hefur áhrif.

Niðurstöður mælinganna eru kynntar með tveimur sniðum. Lega þeirra sést á mynd 9.



Mynd 9. Staðsetning TEM-mælinga í Bolungarvík.

VIÐNÁMSSNIÐ S1 (sjá mynd 10)

Efst í mælingunum vestan til í Bolungarvík kemur fram lag með háu viðnámi ($>300\Omega\text{m}$) nema í mælingunni sem er hæst í landi (9640 í Hlíðardal). Í 9839 í Bolungarvík er þetta lag um 150 metra þykkt og um 400 metra þykkt í 9735 í Syðradal. Þar fyrir neðan er 200-300 metra þykkt lag með viðnámi 100-200 Ωm). Neðar kemur þykkara lag með viðnámi undir 100 Ωm og neðst hækkar svo viðnámið verulega. Þessum viðnámslögum hallar inn til landsins og sýna trúlega jarðlagahalla á þessu dýpi. Jarðlagahalli í fjöllunum inn af Bolungarvík er 4-6° til SA (Ágúst Guðmundsson, 1991).

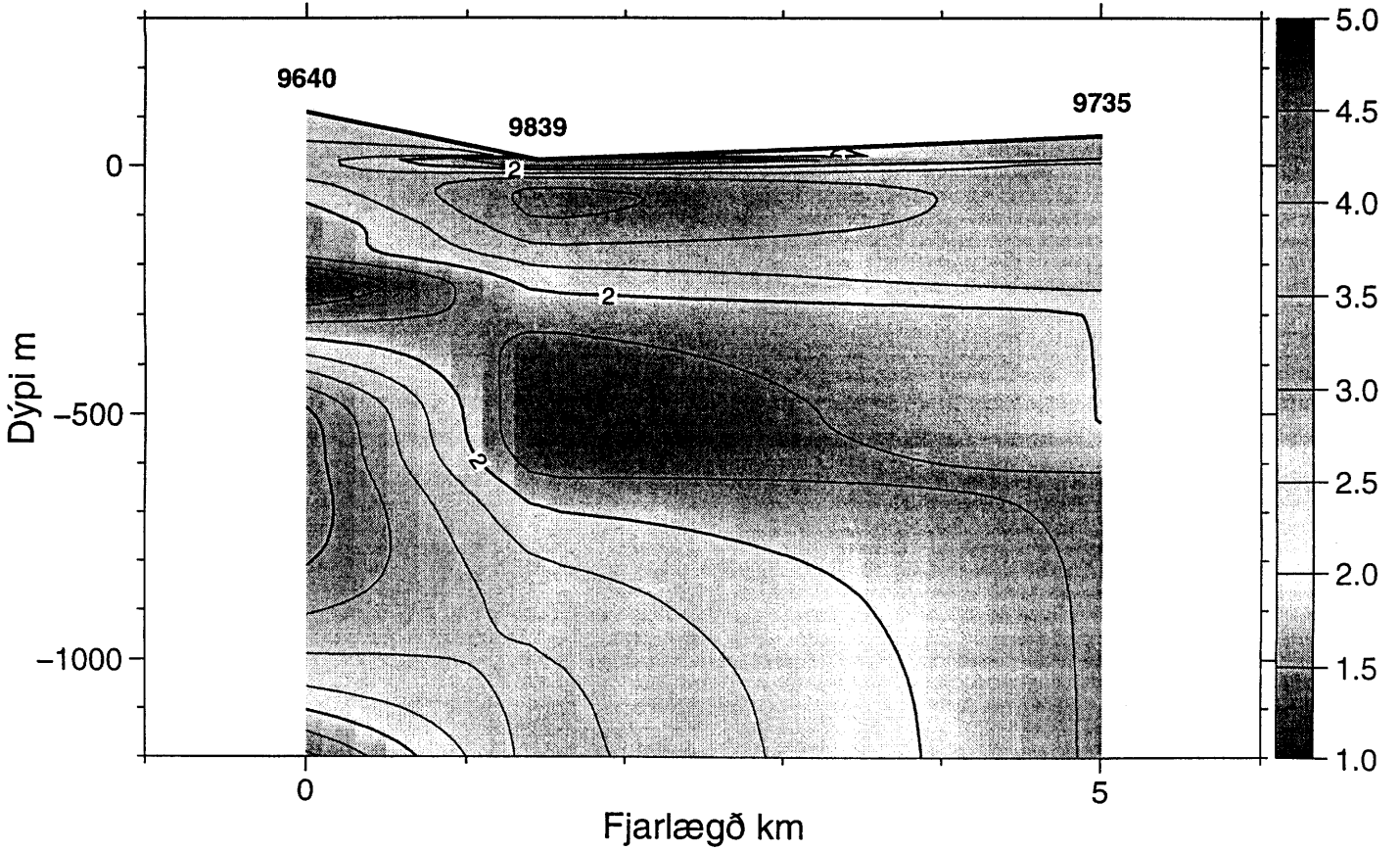
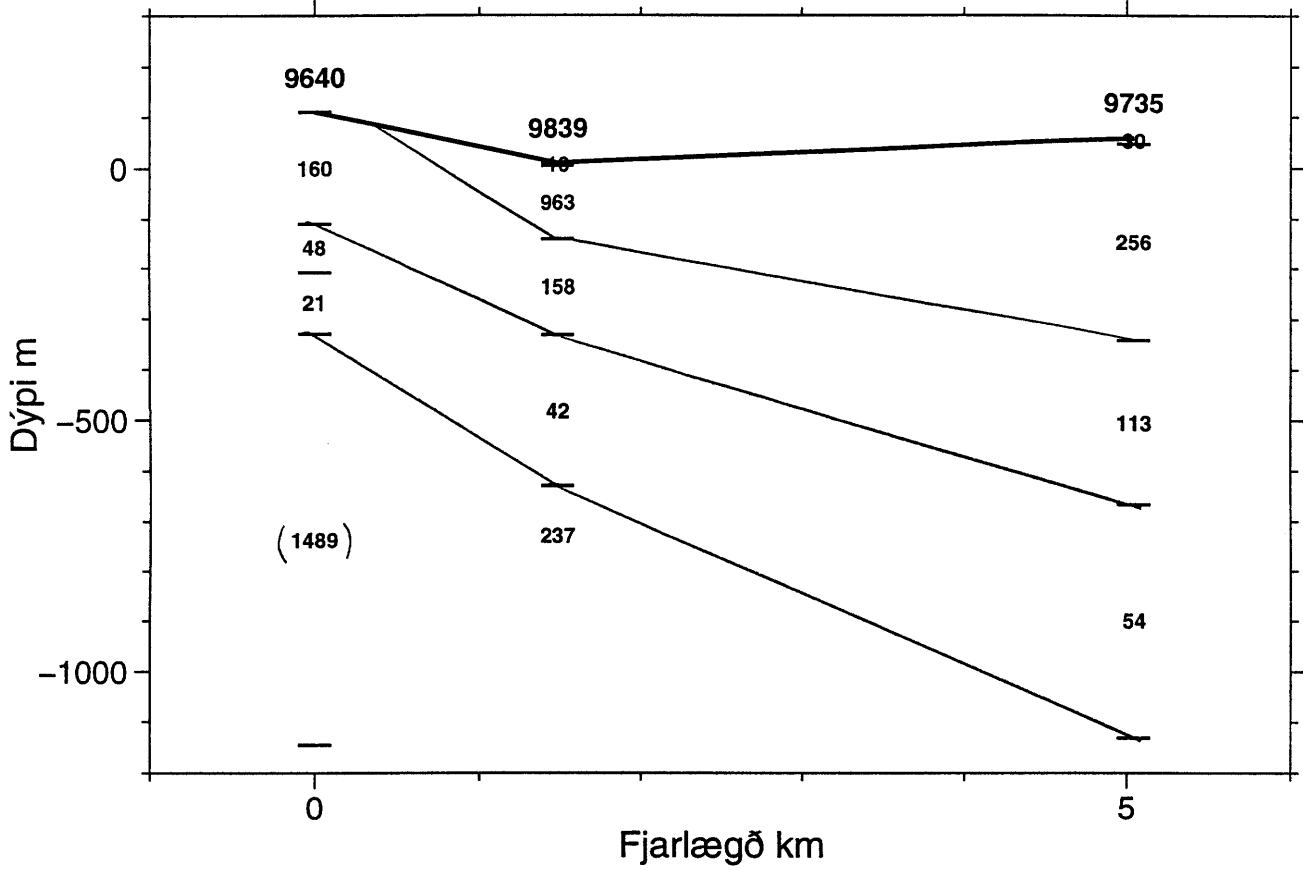
Viðnámið í "lágviðnámslaginu" er 40-60 Ωm , en í mælingunni í Hlíðardal skiptist lagið og er með 21 Ωm viðnám neðst í laginu. Þetta gæti bent til jarðhita. Einnig eru vísbendingar um að lágt viðnám sé neðan 1200 metra dýpis í mælingunni í Hlíðardal, sem gæti bent til jarðhita á talsverðu dýpi. Efra sniðið á myndinni sýnir niðurstöður túlkunar sem gerir ráð fyrir "ótalmörgum" þunnum láréttum viðnámslögum en neðra sniðið sýnir einfaldað líkan.

VIÐNÁMSSNIÐ S2 (sjá mynd 11)

Hvernig snið S2 tengist S1 er ekki alveg augljóst. Mælingin við Gil (9835) var erfið í túlkun, þ.e. háa viðnámið neðan 300 metra dýpis er ekki vel ákvarðað (viðnámsgildið) né heldur þykkt þess. Trúlega er þó þetta háviðnám tengt 100-200 Ωm viðnámslaginu í sniði S1 og 139 Ωm viðnáminu í mælingu 9937 við Syðradalsvatn. Það sem er áberandi öðruvísi í sniði S1 en S2 er lágviðnámslag á 100-300 metra dýpi. Viðnámið í því er lægst í mælingunni við Gil og geta þetta verið áhrif frá jarðhita. Ákveðnar vísbendingar eru um viðnámslækkun með dýpi í 9835 en eins og fyrr er sagt var hún erfið í túlkun og því ekki hægt að segja það með vissu. Efra sniðið á myndinni sýnir niðurstöður túlkunar sem gerir ráð fyrir "ótalmörgum" þunnum láréttum viðnámslögum en neðra sniðið sýnir einfaldað líkan.

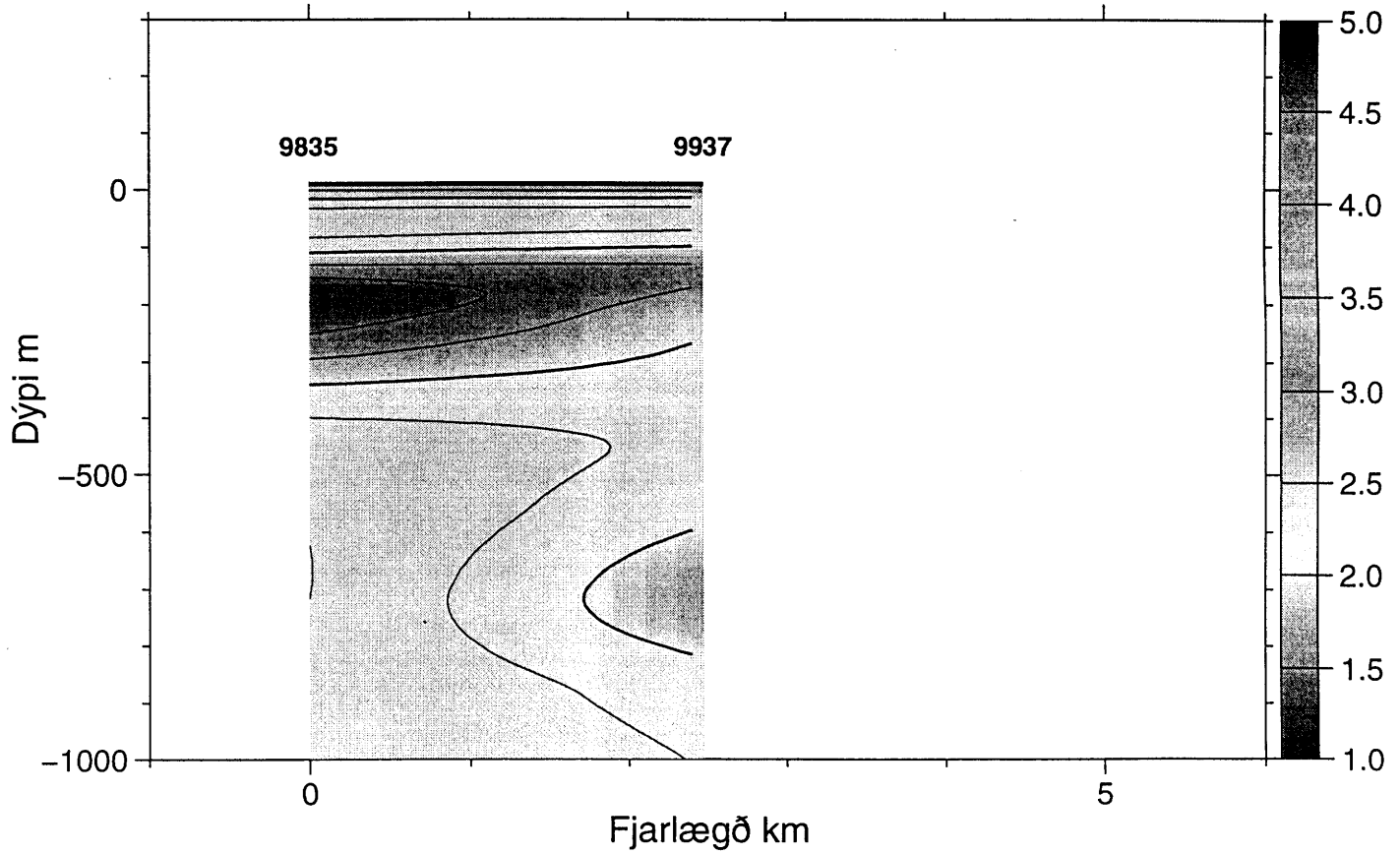
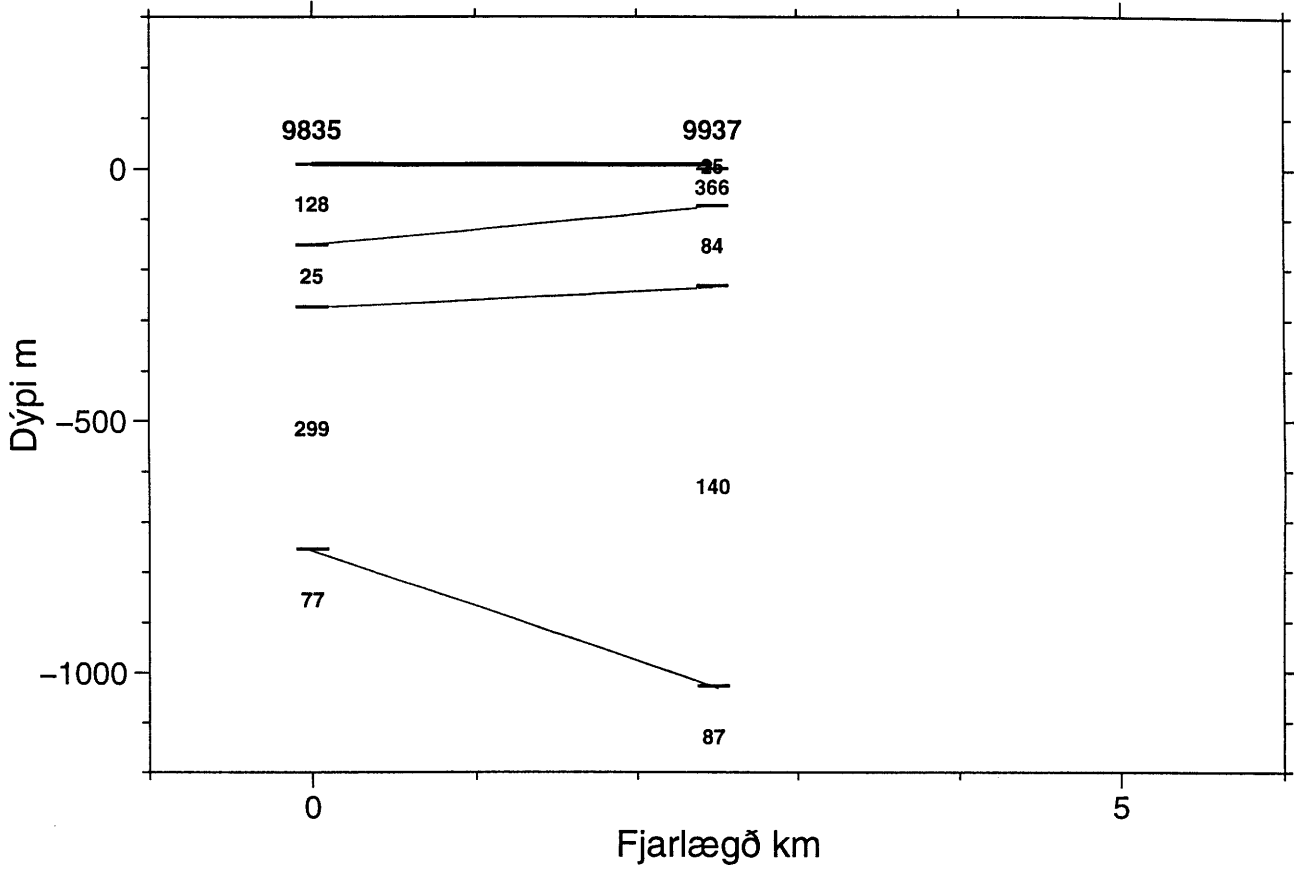
Niðurstöður TEM-mælinganna vísa á tvo staði með áberandi lægst viðnám, í Hlíðardal og við Gil. Í Hlíðardal eru engin merki um jarðhita í yfirborði. Hvort lágviðnámið er merki um jarðhita verður einungis rannsakað með rannsóknarborunum. Við Gil er laug með 26°C heitu vatni. Þar voru boraðar tvær holur á árunum 1964-65, 56 og 163 m djúpar. Unnt var að dæla 6 l/s af 23,5°C heitu vatni. Hola 3 (570 m) var svo boruð 1977 en gaf ekki árangur. Lága viðnámið svo grunnt í mælingunni við Gil (9835) getur bent til að mælingin nemi lárétt rennsli og uppstreymi heita vatnsins sé í einhverri fjarlægð. Flest bendir til að holurnar, einkum hola 3, séu allt of vestarlega og uppstreymið sé tengt gangi eða gangakerfi nokkuð uppi í hlíðinni austur af holunum.

SI



Mynd 10. Viðnámssnið SI.

S2



Mynd 11. Viðnámssnið S2.

4. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

- Tvö svæði hafa fundist í nágrenni Ísafjarðar með því að bora 29 grannar rannsóknarholur, við Valhöll og Bræðratungu í Tungudal, þar sem hitastigull er greinilega hærri en svæðisstigull, sem er 65-90°C/km. Verulega hærri hitastigull á þessum stöðum verður aðeins skýrður með uppstreymi heits vatns.
- Hæsti hitastigull við Valhöll er um 150°C/km og við Bræðratungu >200°C/km. Hitatoppurinn við Bræðratungu er mjög skarpur, sem getur bent til uppstreymis grunnt í volga vatnskerfið. Tiltölulega hár hitastigull er hins vegar í öllum holunum, sem bendir til áhrifa frá heitu vatnskerfi sem liggur nokkuð djúpt. Athyglin beinist að Bræðratungu vegna nálægðar við Ísafjörð, hærri hitastiguls og vegna meiri upplýsinga um það svæði.
- Ákvörðun berghita í gömlu holunum TD-02 og TD-03 við Bræðratungu og samanburður við hitamælingar í nýju holunum leiddi í ljós að vænta má 60-70°C heits vatnskerfis á 800-1400 metra dýpi.
- Efnainnihald vatnssýnis, sem tekið var úr holu OV-20 við Bræðratungu í loftdælingu bendir til 60-70°C hita í jarðhitakerfinu.
- TEM-mælingar í Bolungarvík gefa til kynna tvö svæði, við Gil og í Hlíðardal, með áberandi lágt viðnám, sem gætu verið áhrif frá jarðhita.
- Lágt viðnám á 200-300 metra dýpi í TEM-mælingu við Gil getur gefið til kynna lárrétt rennsli. Uppstreymi er þá í einhverri fjarlægð og beinist grunur að sprungukerfi sem er í hlíðinni austan við Gil. Gamlar efnagreiningar vatns úr lauginni við Gil benda ekki til heitara vatns á meira dýpi. Þetta svæði verður aðeins rannsakað frekar með grunnum rannsóknarholum.
- Lágt viðnám er í TEM-mælingu í Hlíðardal. Enginn jarðhiti er á yfirborði. Hvort jarðhiti er þarna er einungis hægt að rannsaka með borunum.

5. LOKAORÐ

Grunnar rannsóknarboranir í Tungudal sýna tvö svæði með umtalsvert hærri hitastigul en svæðisstigul sem er 60-90 °C/km. Hann verður einungis skýrður sem áhrif frá jarðhita. Með því að áætla berghita út frá mæligögnum úr borholunum má gera ráð fyrir 60-70°C hita í jarðhitageyminum. Greining kísils úr sýni úr holum TD-02, TD-03 og OV-20 styðja það. **Mælingarnar geta hins vegar ekki sagt til um vatnsmagn**, slíkt verður einungis ákveðið með borun.

Lagt er til að djúpri holu verði valinn staður nærri OV-20 við Bræðratungu. Hitaferlarnir gefa til kynna, að 60°C verði náð e.t.v. á 600 metra dýpi. Rétt þykir þó að gera í upphafi ráð fyrir a.m.k. 1000-1200 metra djúpri holu til að ná ofan í vatnskerfi sem líkast til er 60-70°C.

Í Bolungarvík sýna viðnámsmælingar lágt viðnám sem getur bent til jarðhita við Gil og í Hlíðardal. Ein grunn hola í lágviðnámið í Hlíðardal dugar til að staðfesta eða afsanna að

þar sé jarðhiti. Ef hár hitastigull kemur í ljós má taka ákörðun um frekari rannsóknir þar.

Við Gil virðist vera um hliðarrensli að ræða þ.e. uppstreymi heits vatns er í nokkurri fjarlægð frá holunum sem þar eru. Verði um frekari rannsóknir að ræða þar er rétt að gera ráð fyrir a.m.k 10 grunnum rannsóknarholum.

6. HEIMILDIR

Ágúst Guðmundsson, 1991: *Breiðadals- and Botnsheiði tunnel. Geological report.* Jarðtæknistofan hf og Orkustofnun, OS-91006/VOD-02.

Knútur Árnason, 1984: *The effect of finite potential electrode separation of Schlumberger soundings.* 54th Annual International SEG Meeting, Atlanta. Extended Abstracts, 129-132.

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986: *Nesjavellir. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1985.* Orkustofnun, OS-86017/JHD-02, 125 s.

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: *Nesjavellir - Ölkelduháls. Yfirborðsrannsóknir 1986.* Orkustofnun, OS-87018/JHD-02, 112 s.

Knútur Árnason, Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Gylfi Páll Hersir, 1987a: *Resistivity Structure of High-Temperature Geothermal Systems in Iceland.* International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) XIX General Assembly, Vancouver, Kanada, 9.-22. ágúst. Abstracts V.2: 447.

Knútur Árnason, 1989: *Central-Loop Transient ElectroMagnetic Sondings over a Horizontally Layered Earth.* Orkustofnun, OS-89032/JHD-06, 128 s.

Knútur Árnason, 1990: *Central-loop Transient ElectroMagnetic Soundings in Geothermal and Ground Water Exploration, A Step Forward.* Geothermal Resource Council Transactions, Vol. 14, Part#II, 845-851.

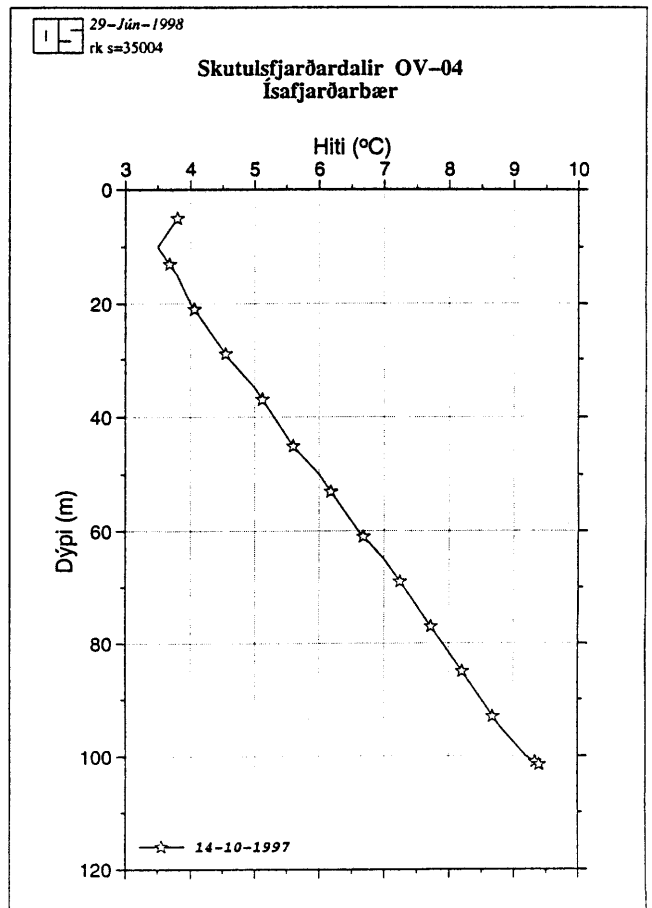
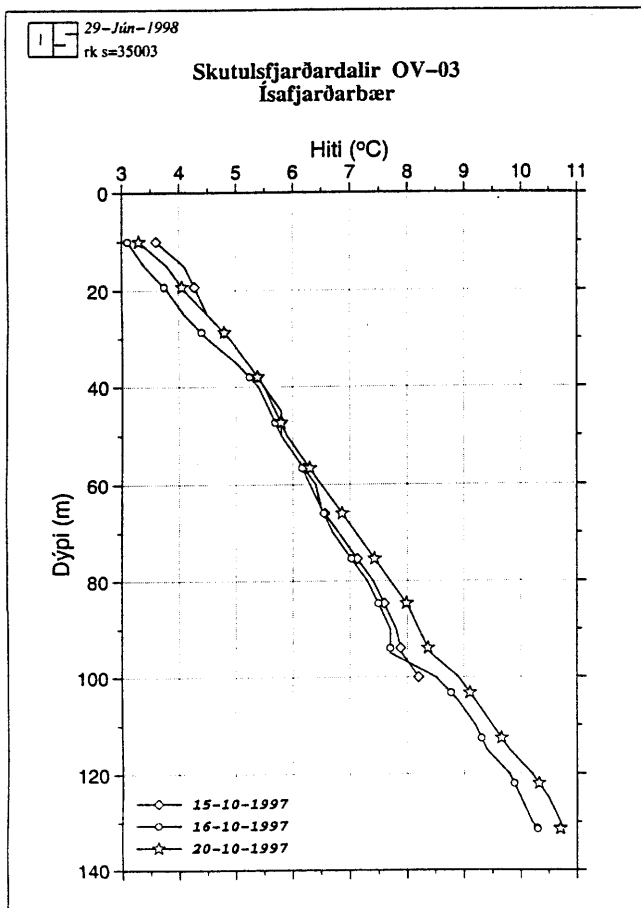
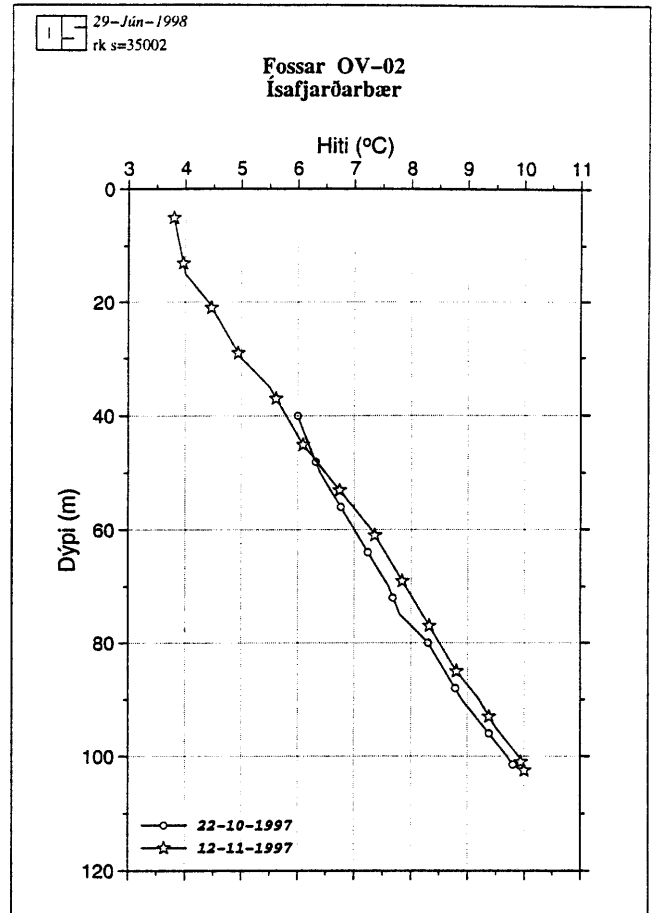
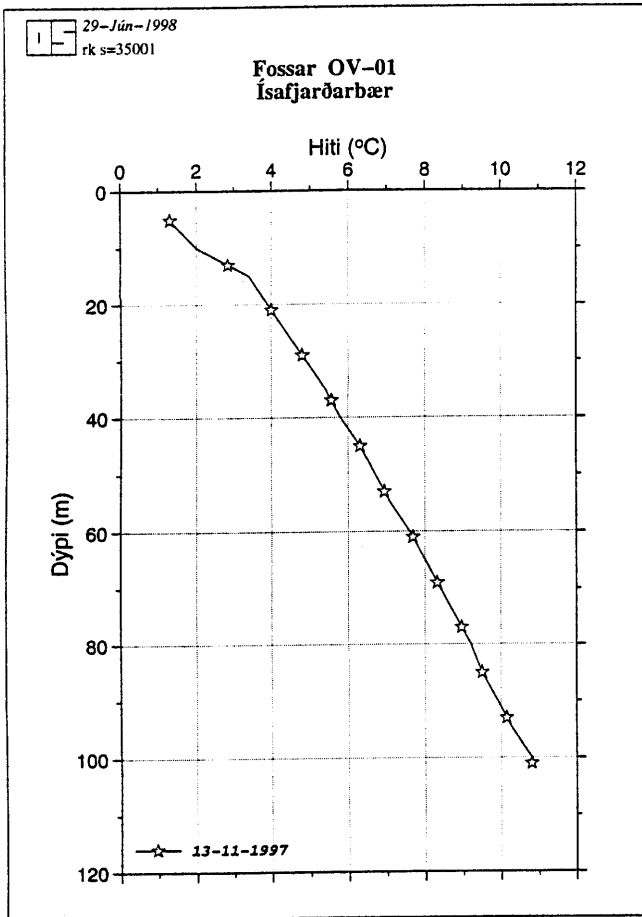
Knútur Árnason, 1995: *Áhrif lagskiptingar á niðurstöður viðnámsmælinga.* Orkustofnun OS-95013/JHD-08 B, 12 s.

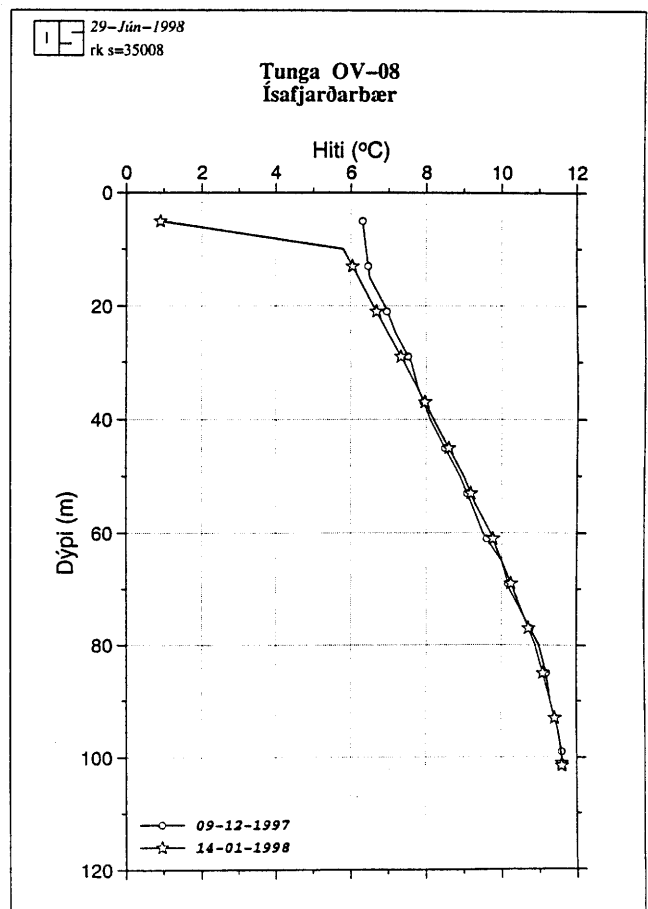
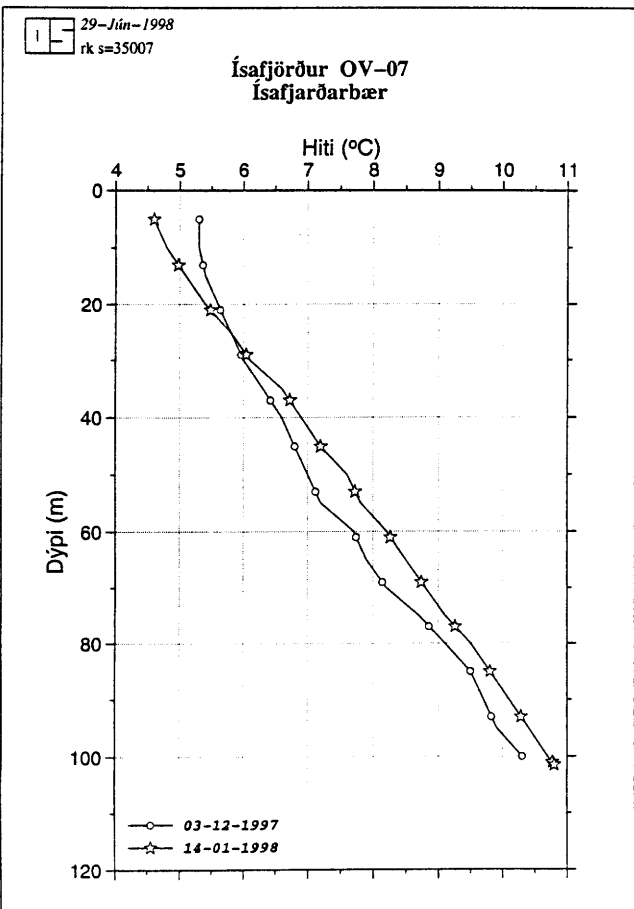
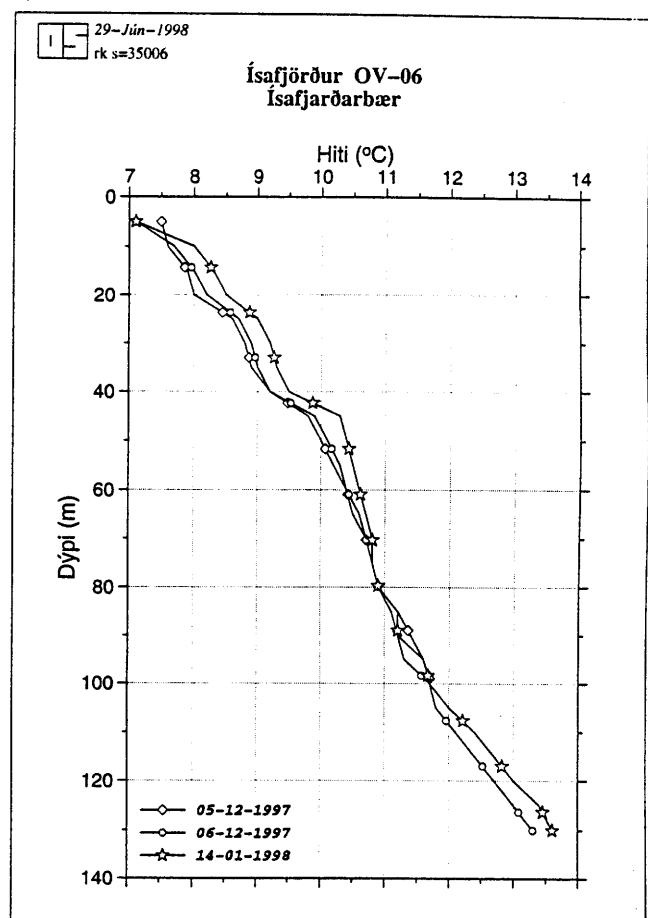
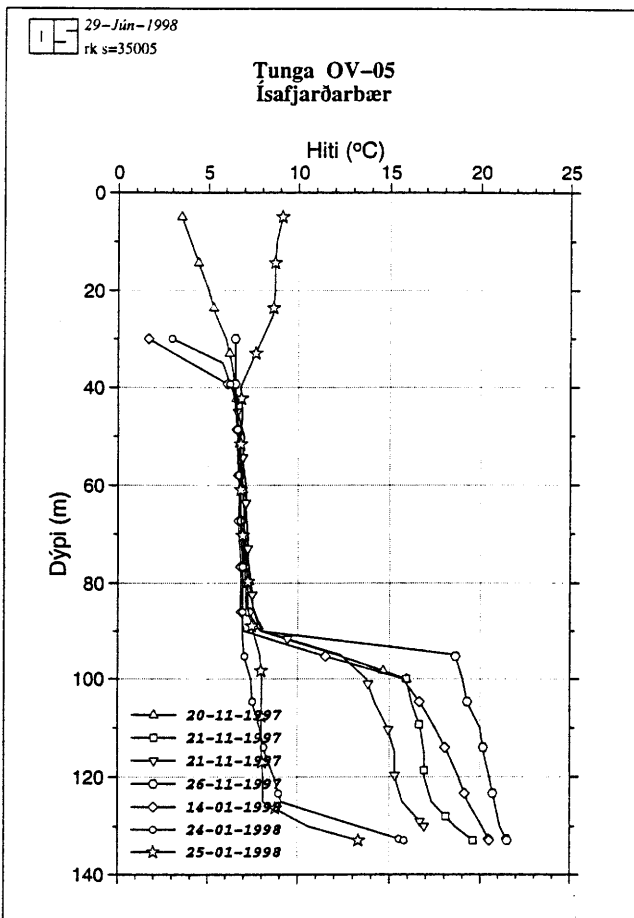
Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í Kröflu* Orkustofnun OS-96005/JHD-03, 96 s.

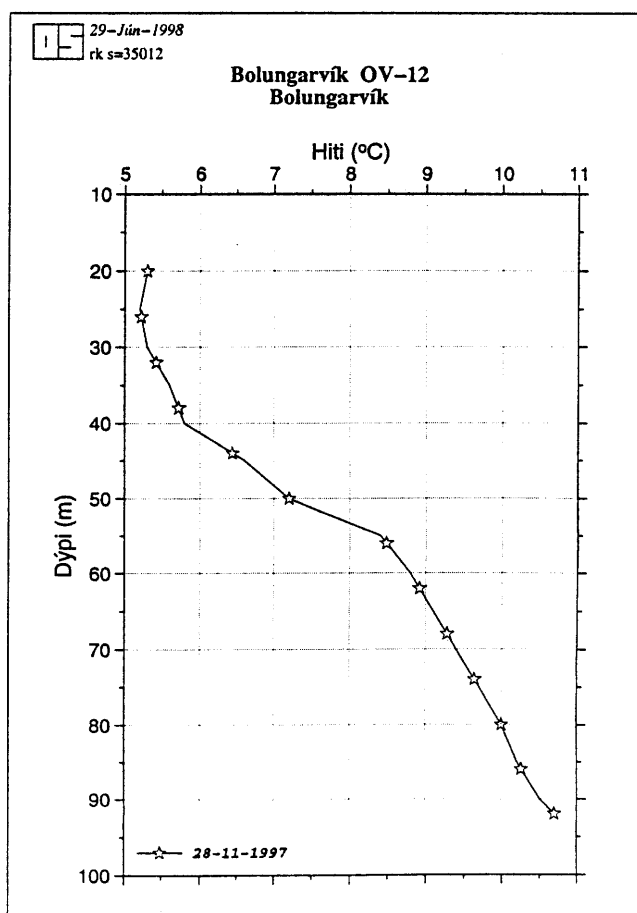
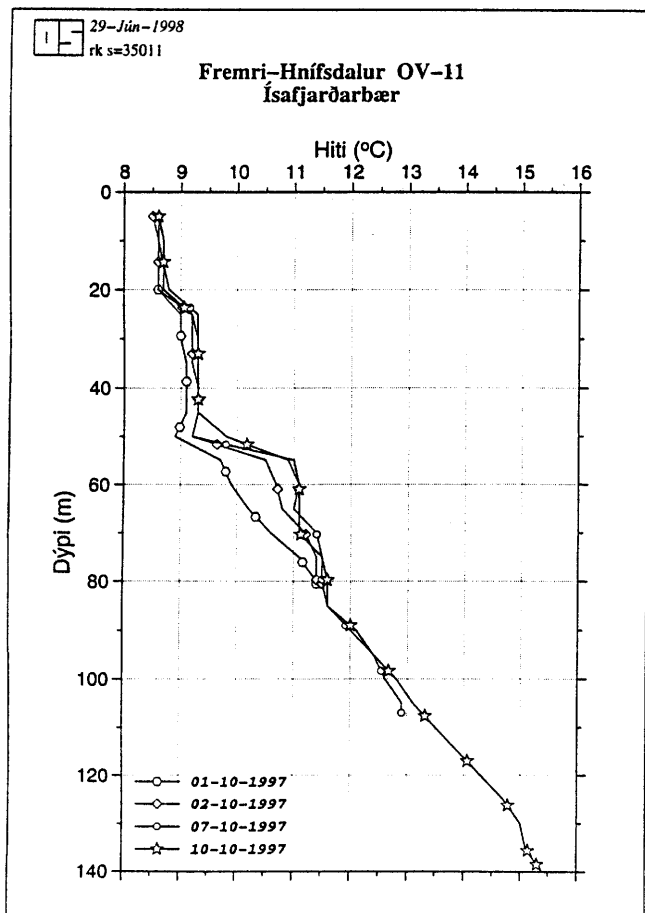
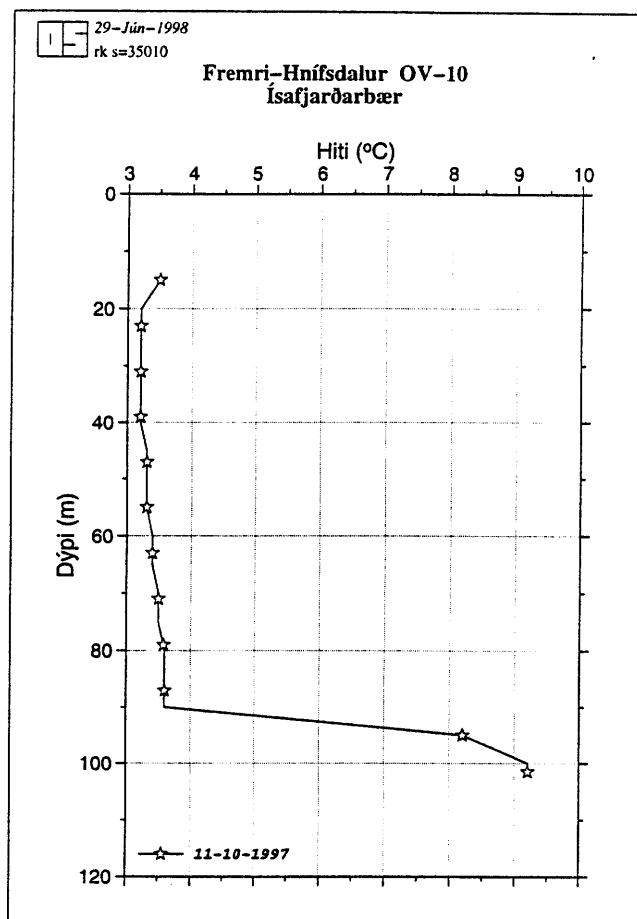
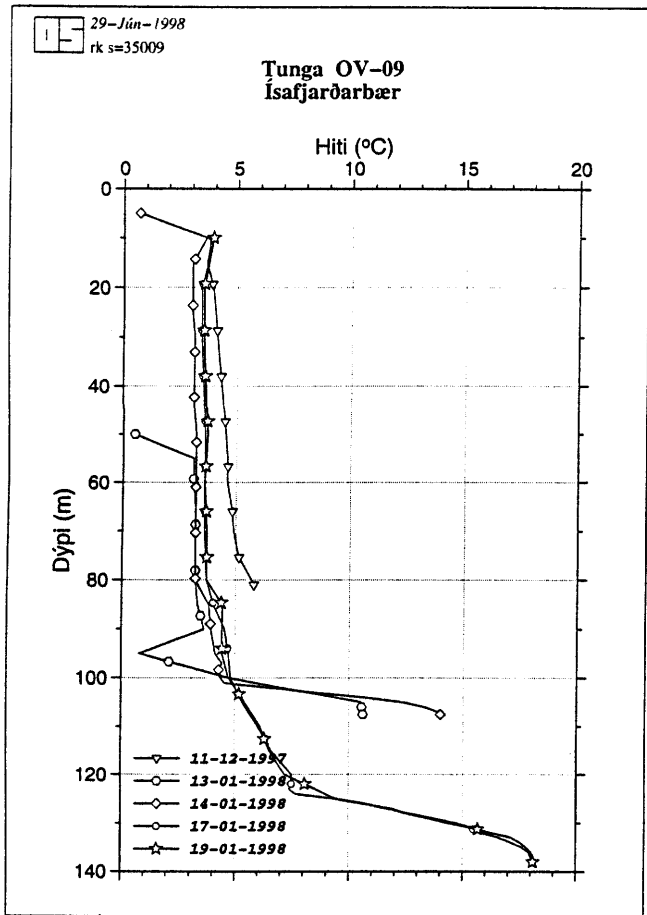
Ólafur G Flóvenz, 1977: *Jarðhitaleit á Vestfjörðum 1976* OS JHD 7701, 81 s.

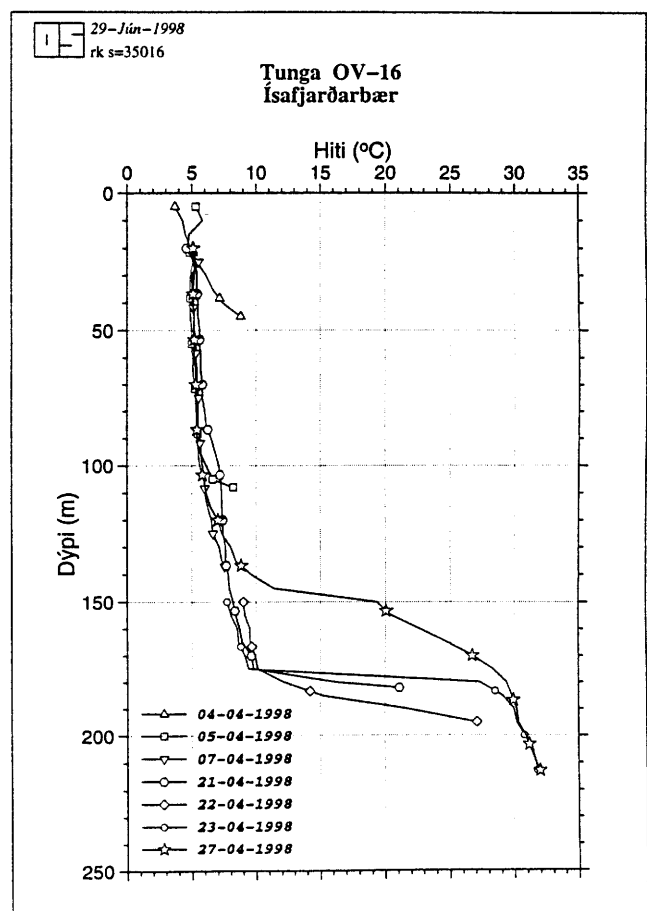
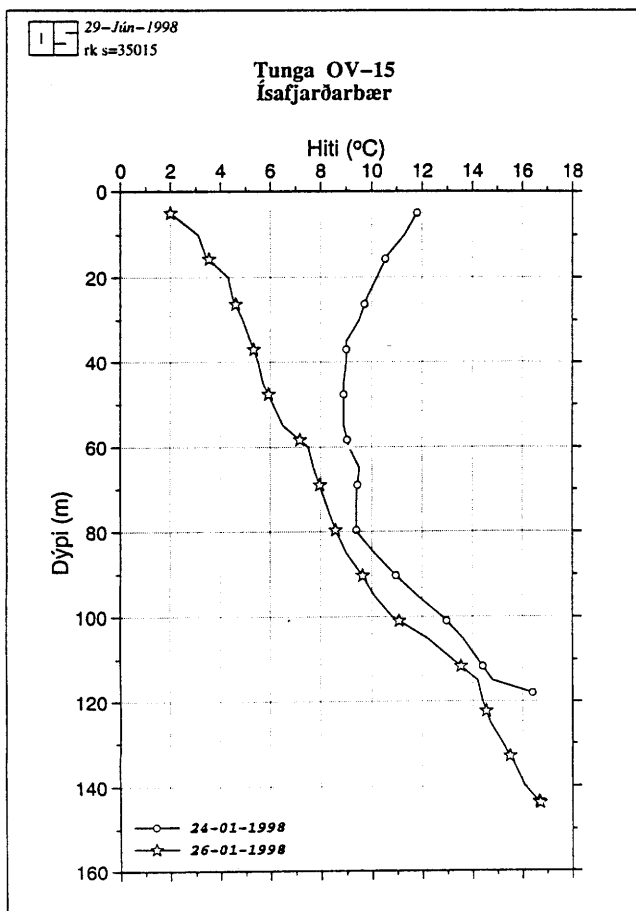
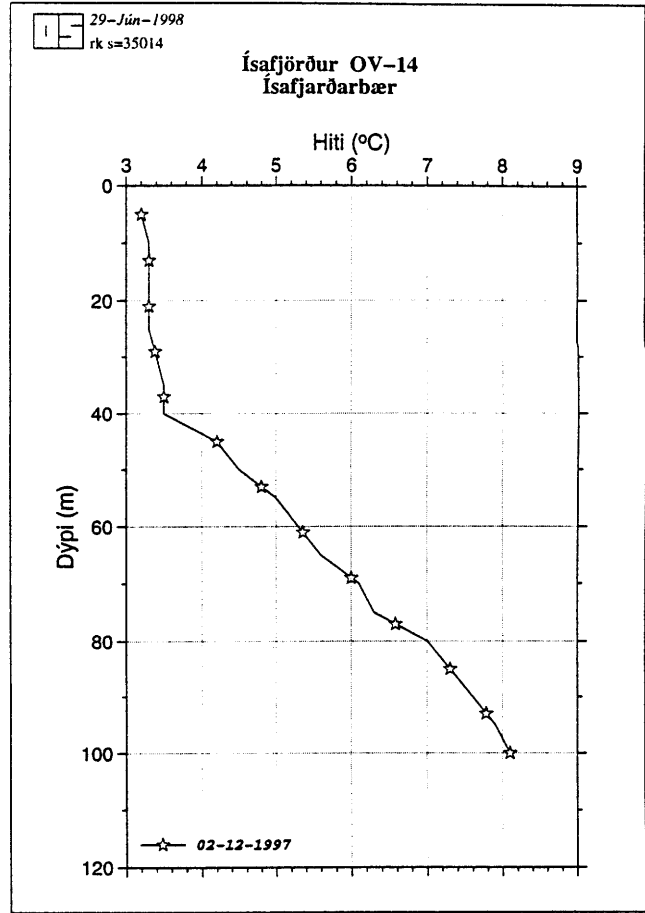
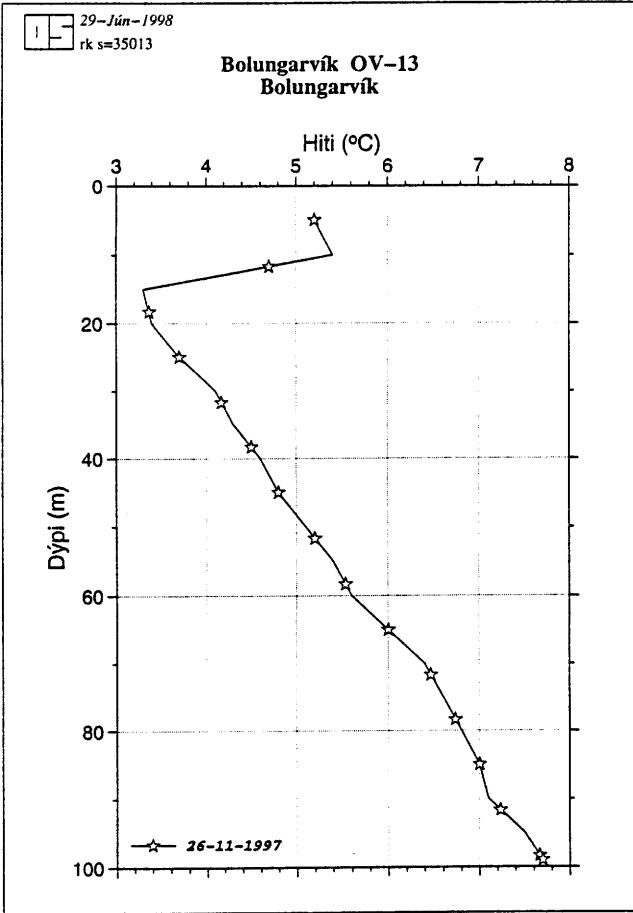
Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L., 1988: *Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings.* Geophysics, v. 53: 1459-1468.

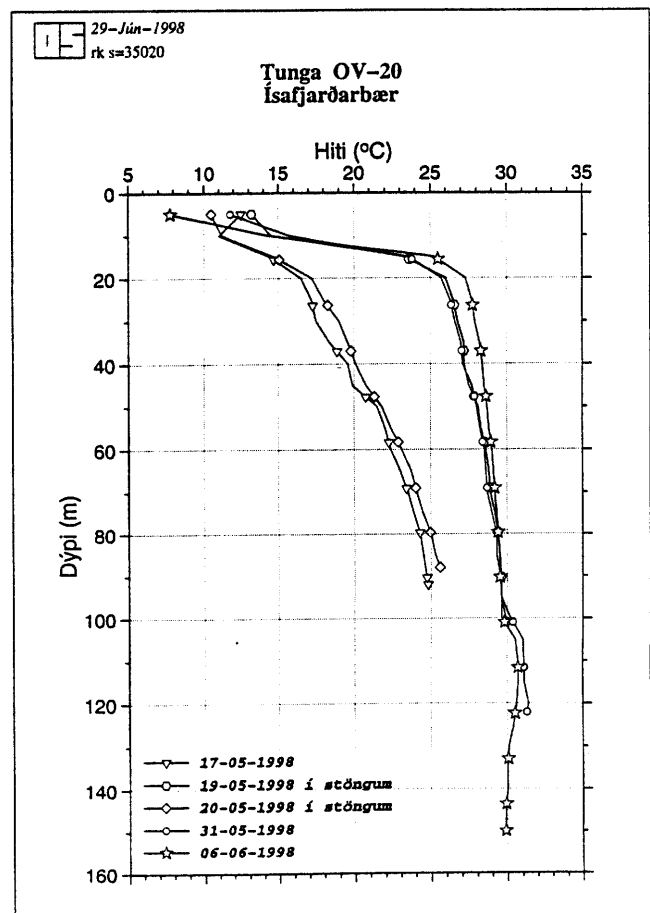
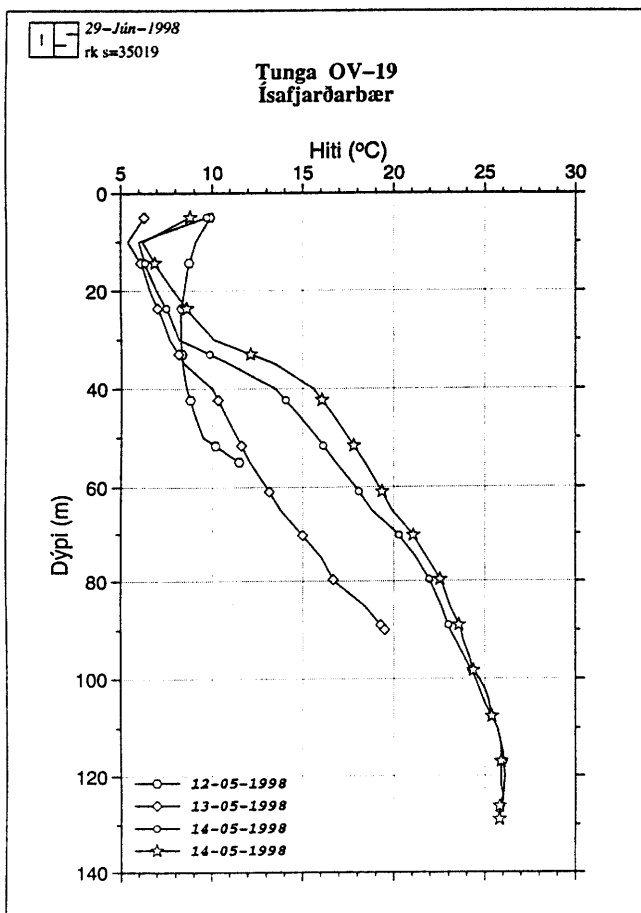
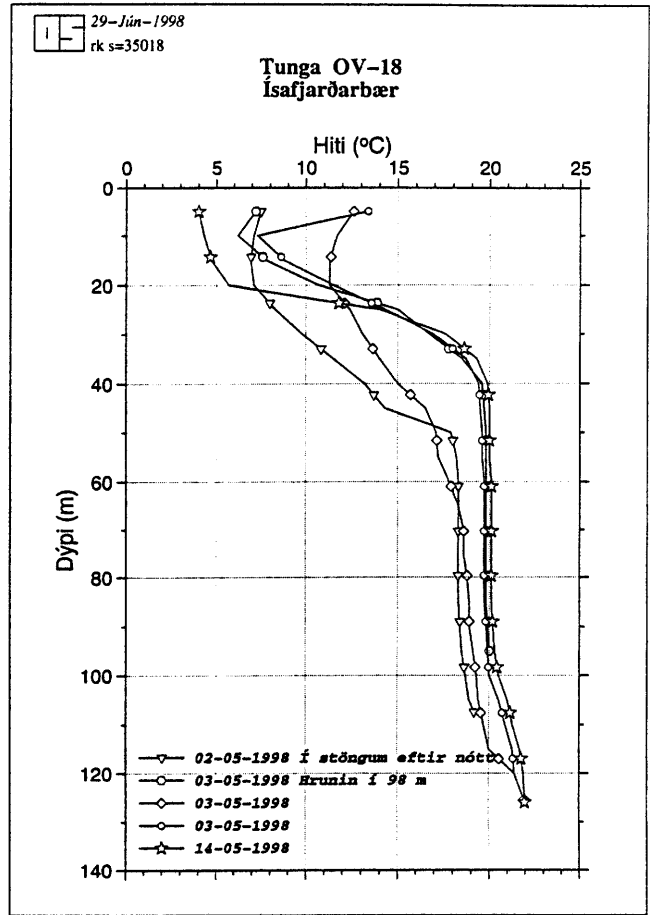
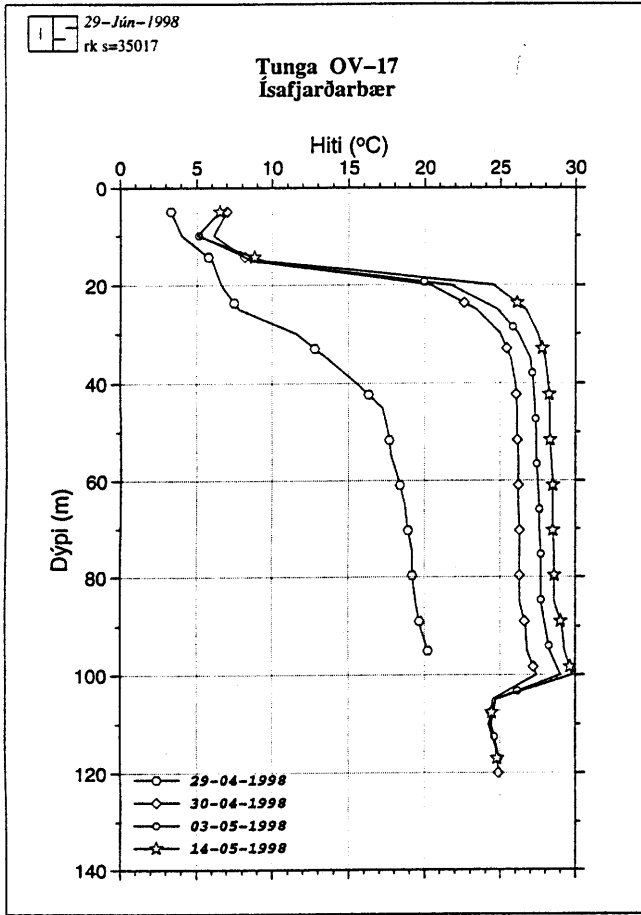
VIÐAUKI 1: Hitamælingar og efnagreiningar

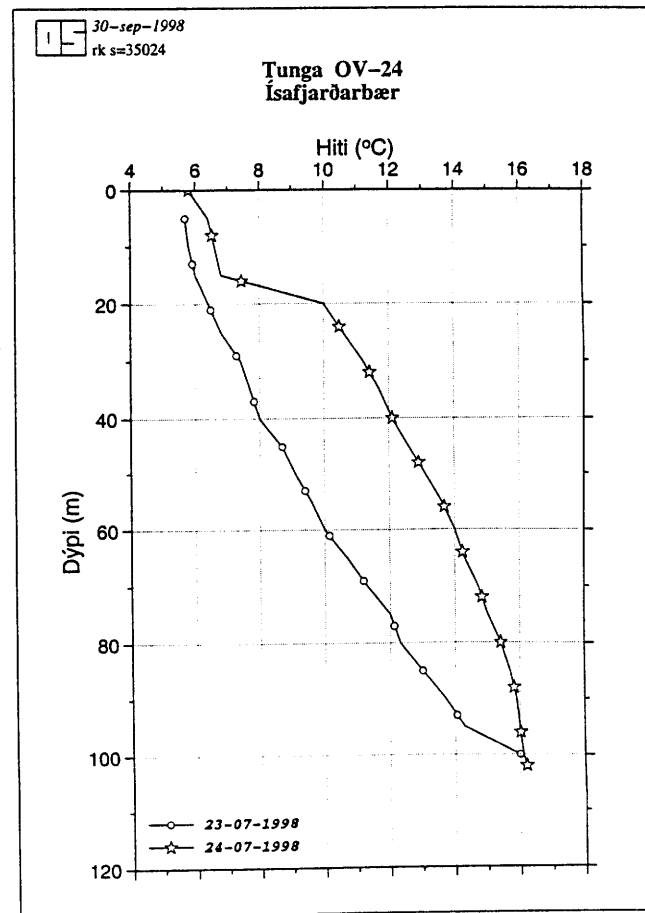
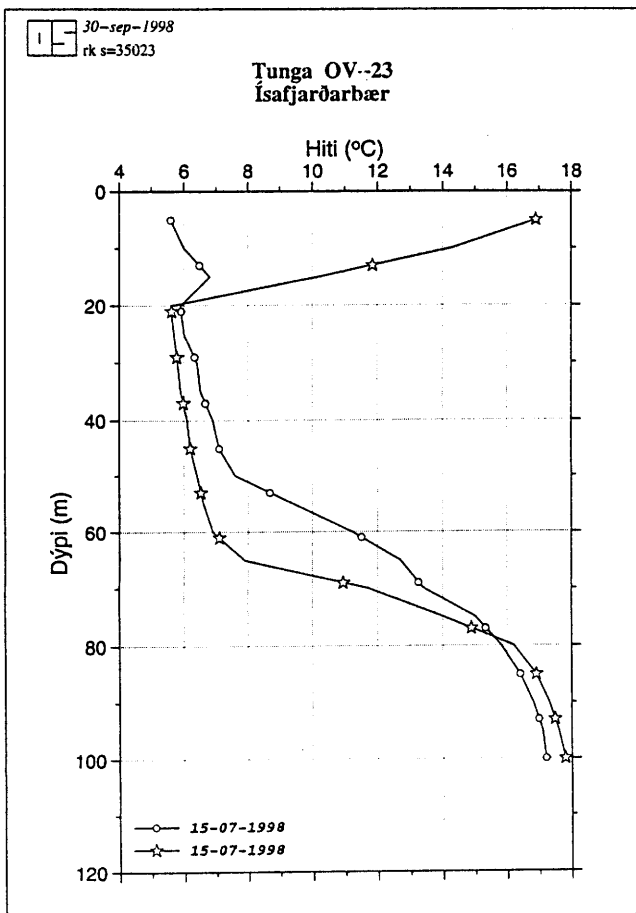
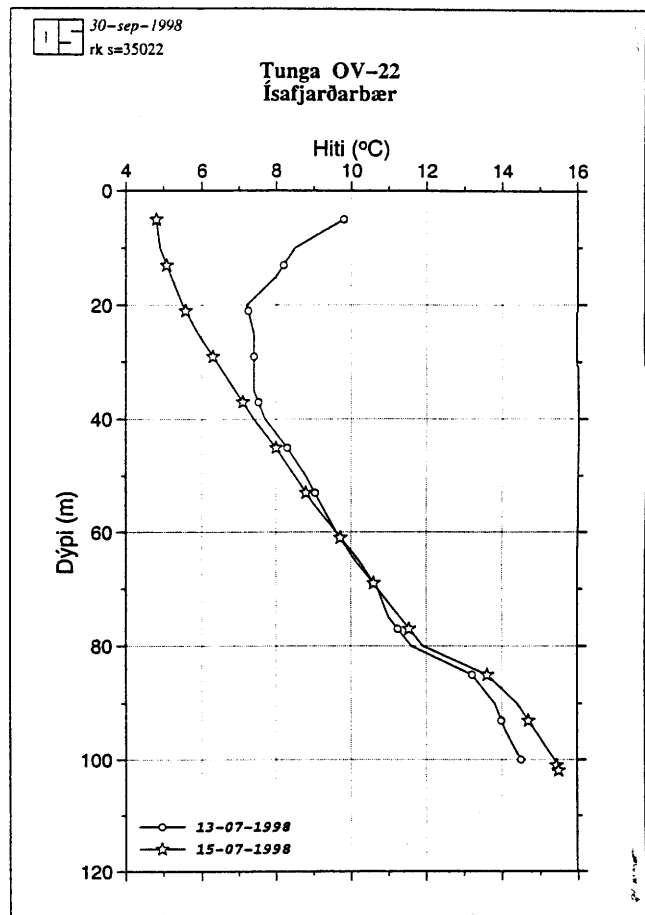
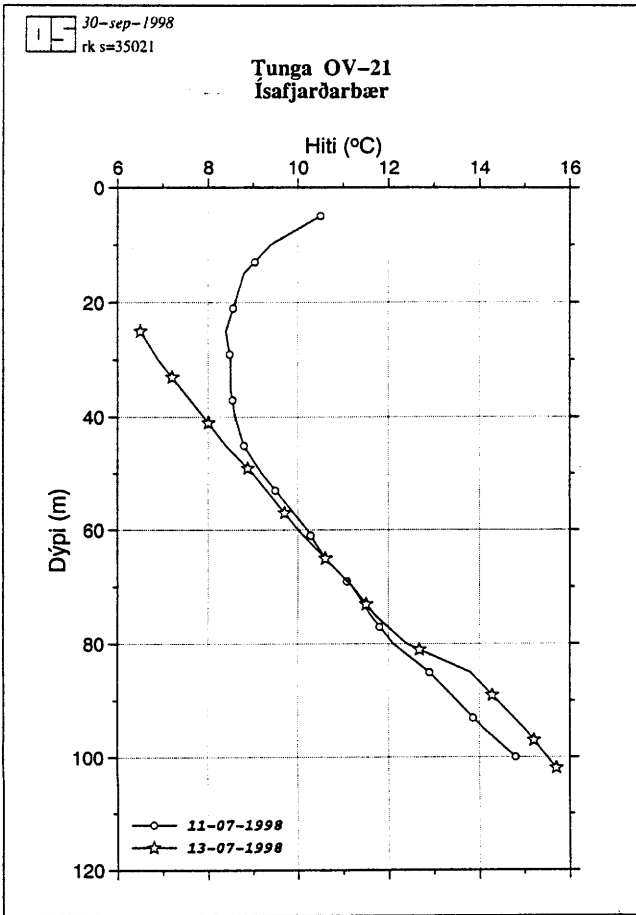


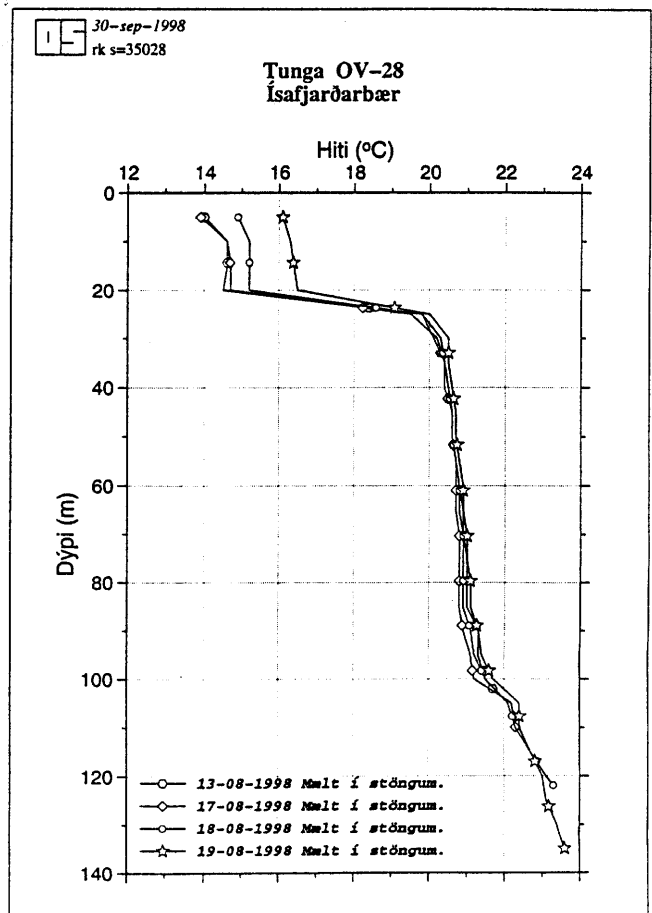
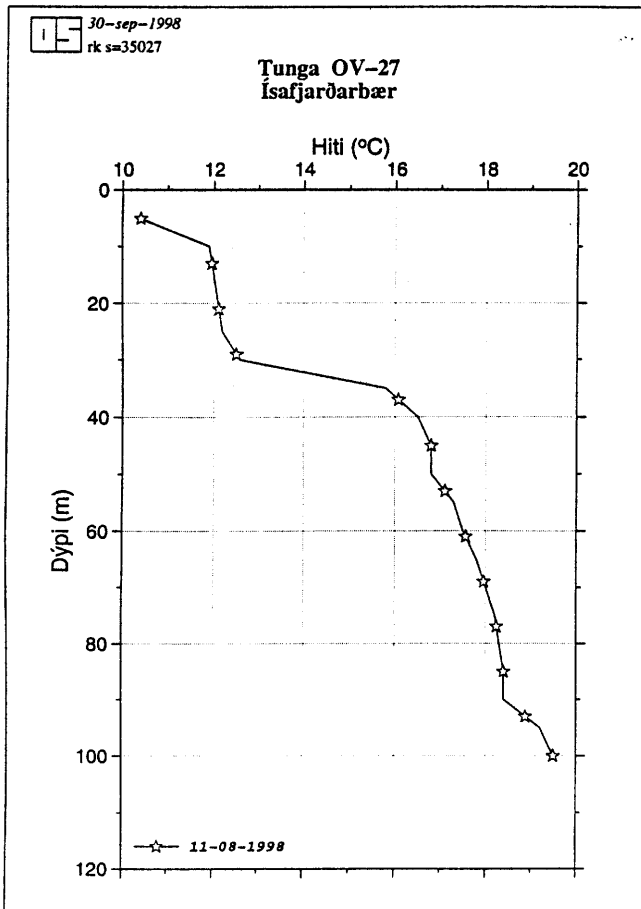
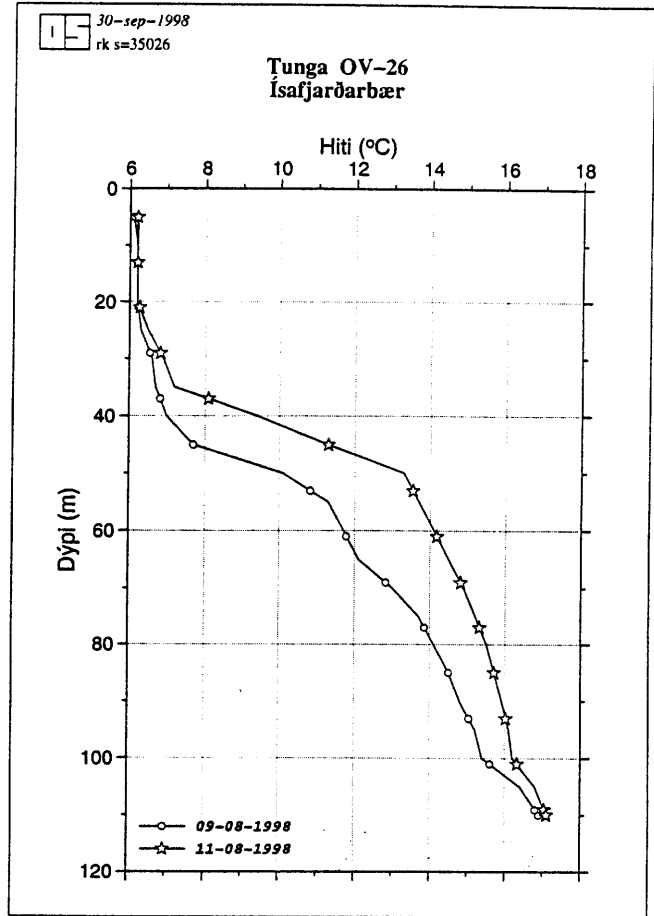
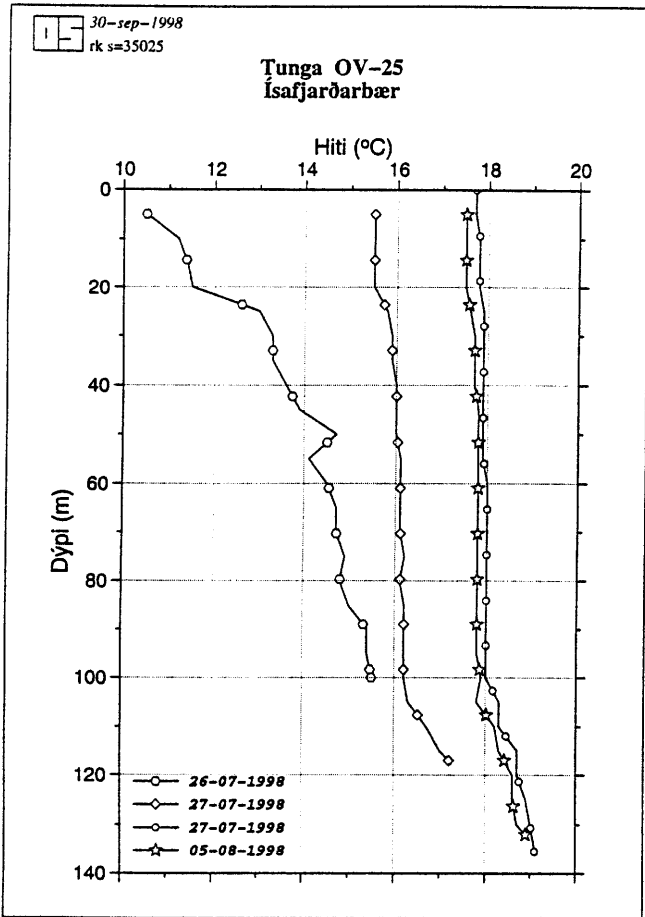


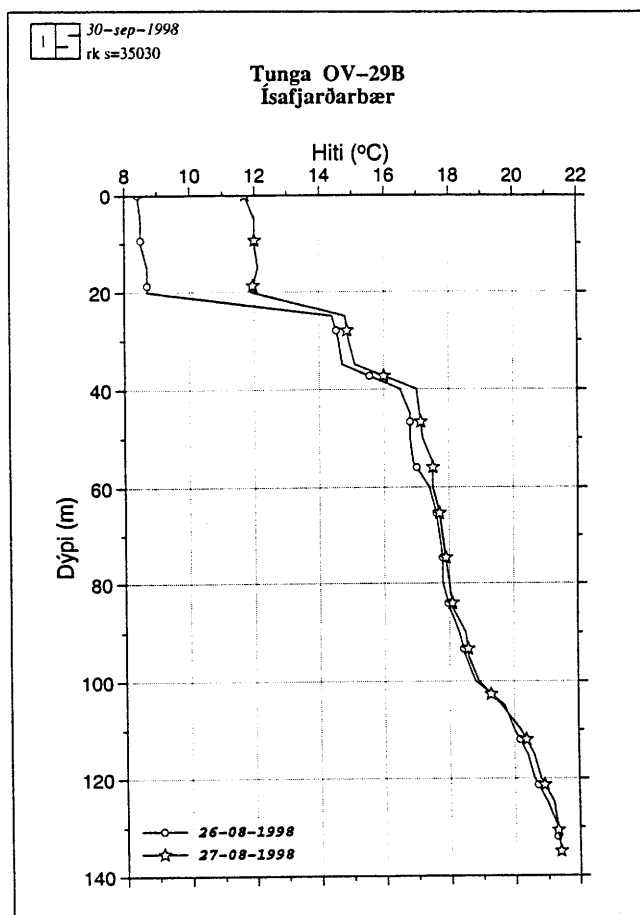
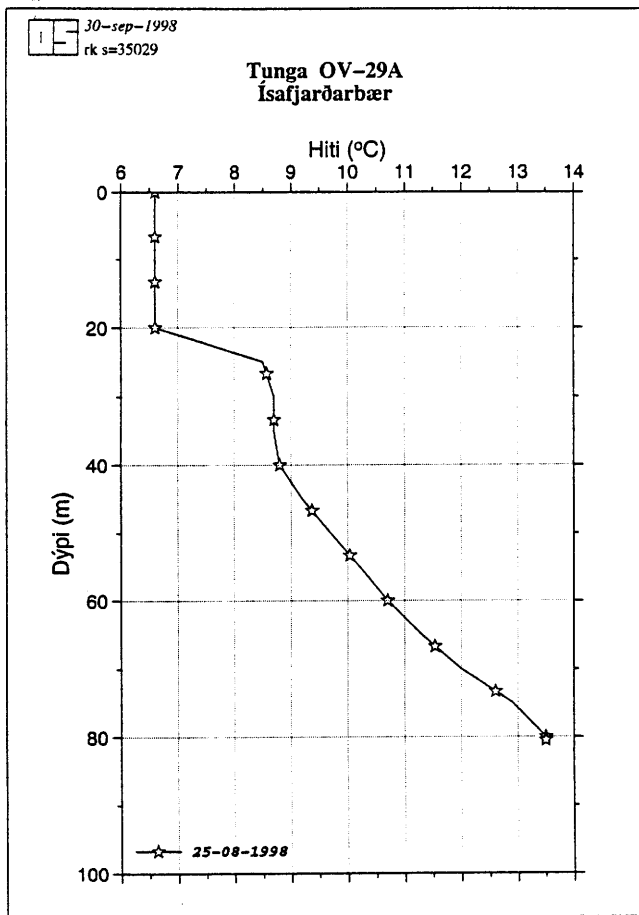












Dagsetning	Tími	Númer	Hiti (°C)	Rennsli (l/s)	Dýpi (m)	Sýni tók
1978-12-16	00:00	1978-0088				HS
Tungudalur Borhola 2 Ísafjörður						Kalsedónhiti=64°C
Efnasamsetning vatns (mg/kg)						
pH	9.51	Li				Al
/Hiti	24	Na		96.9		Cr
CO ₂	17.5	K		.45		Mn
H ₂ S	0	Mg		.01		Fe
NH ₃		Ca		3.47		Cu
B		Sr				Zn
Leiðni [§]	490	F		1.49		As
/Hiti	24	Cl		81.3		Ag
SiO ₂	60	Br				Cd
Uppleyst efni	339	I				Sb
		NO ₂				Hg
O ₂		NO ₃				Pb
Rn [†]		HPO ₄				
δD [†]		SO ₄		68.4		Jónavægi (%)
δ ¹⁸ O [†]						Massavægi (%)
						-14
						-7.96

§ μS/cm ‡ dpm/kg † ‰ SMOW

Dagsetning	Tími	Númer	Hiti (°C)	Rennsli (l/s)	Dýpi (m)	Sýni tók
1978-12-15	00:00	1978-0087			770	HS
Tungudalur Borhola 3 Ísafjörður						Kalsedónhiti=66°C
Efnasamsetning vatns (mg/kg)						
pH	9.3	Li				Al
/Hiti	23	Na		239		Cr
CO ₂	20	K		2		Mn
H ₂ S	0	Mg		.052		Fe
NH ₃		Ca		91.31		Cu
B		Sr				Zn
Leiðni [§]	1563	F		.29		As
/Hiti	22	Cl		382		Ag
SiO ₂	55	Br				Cd
Uppleyst efni	1047	I				Sb
		NO ₂				Hg
O ₂		NO ₃				Pb
Rn [†]		HPO ₄				
δD [†]		SO ₄		189.1		Jónavægi (%)
δ ¹⁸ O [†]						Massavægi (%)
						-2.83
						-8.43

§ μS/cm ‡ dpm/kg † ‰ SMOW

VIÐAUKI 2: TEM-viðnámsmælingar

Knútur Árnason hefur tekið saman greinagóða lýsingu á TEM-mælingum og túlkun þeirra sem birtist í skýrslu um viðnámsmælingar á Kröflusvæði (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996) og fer hún hér á eftir:

Í rafsegulaðferðum er notað tímaháð rafsegulsvið í stað tímaóháðs spennusvið frá jafnstraumi eins og gert er í jafnstraumsaðferðum. Rafsegulaðferðir skiptast raunar í tvo flokka eftir uppruna rafsegulsviðsins. Annarsvegar eru aðferðir þar sem rafsegulsvið með þekktri og fyrirfram ákveðinni hegðun er framkallað með sendibúnaði eða straumgjafa og hinsvegar aðferðir sem nota rafsegulsvið frá sveiflum í segulsviði jarðar.

TEM-mælingar (transient electromagnetic) með straumlykkju sem uppsprettu eru mælingar þar sem rafsegulsviðið er gert af manna völdum. Lögð er vírlykkja á jörðina, yfirleitt ferningslaga og um 300 m á kant. Rafstraumur er sendur í lykkjuna og hann síðan rofinn skyndilega. Straumurinn býr til segulsvið og þegar hann er rofinn fer segulsviðið að dofna. Við það spanast straumar í jörðinni sem leitast við að viðhalda segulsviðinu. Eftir því sem lengra líður frá því að straumurinn var rofinn ná spanstraumarnir dýpra í jörðu og segulsviðið á yfirborði dofna. Hnignun segulsviðsins er mæld með því að mæla span í spólu í miðju sendilykkjunnar. Út frá styrk spansins í móttökuspólunni, sem fall af tíma, má síðan ákvarða eðlisviðnám undir mælistað, sem fall af dýpi (Knútur Árnason, 1989).

TEM-mælingar með straumlykkju sem uppsprettu voru fyrst reyndar hér á landi sumarið 1986. Nesjavallasvæðið varð fyrir valinu sem þrúfustaður því að þar fékkst samanburður við bestu fánlegar niðurstöður með eldri aðferðum. Samanburðurinn leiddi í ljós að TEM-mælingar væru mjög fýsilegur kostur (Knútur Árnason o.fl. 1986, 1987 og 1987a). Þær reyndust mun ódýrari og fljótlegrar í framkvæmd en jafnstraumsmælingarnar, bæði vegna þess að ekki þarf að safna jafn miklu af gögnum og einnig vegna þess að einungis þarf 2 mælingamenn borið saman við 4-6 í jafnstraumsmælingum. Úrvinnsla og túlkun mælinganna reyndist einnig mun umfangsminni því að í ljós kom að einvið túlkun TEM-mælinga getur gefið allt að því jafn mikla upplausn og tvívið túlkun jafnstraumsmælinga. Ástæða þessa er sú að TEM-mælingar eru í miklu meira mæli háðar viðnámskipan beint undir mælistað en Schlumbergermælingar. Auk þess eru svokölluð jafngildisvandamál mun minni í TEM-mælingum en Schlumbergermælingum (Knútur Árnason, óbirt gögn). Jafngildisvandamál felast í því að fyrir lágviðnámslag er oft ekki hægt að ákvarða með vissu viðnámsgildi og þykkt lagsins heldur einungis hlutfall þykktar og viðnáms, þ. e. heildarleiðnina. Ennfremur eru TEM-mælingar mun minna næmar fyrir staðbundnum viðnámsóreglum á mælistað (Sternberg o.fl., 1988) en slíkar óreglur geta haft veruleg áhrif á jafnstraumsmælingar (Knútur Árnason, 1984). Af þessum sökum gefa viðnámsnið byggð á einviðri túlkun TEM-mælinga mun áreiðanlegri mynd en samsvarandi nið byggð á Schlumbergermælingum. Tilraunamælingarnar á Nesjavöllum sumarið 1986 sýndu að einvið túlkun TEM-mælinga gefur lítið lakari upplausn og tvívið túlkun á jafnstraumsmælingum á háhitasvæðum (Knútur Árnason, 1987 og 1990).

TEM-mælingar hafa þann ótvíræða kost fram yfir jafnstraumsmælingar að ekki þarf að senda straum ofan í jörðina. Það er oft mikið vandamál að koma nægilegum

straumi til jarðar í jafnstraumsmælingum á svæðum þar sem jarðvegur og gróður er lítill. Þetta gerir ennfremur kleift að gera TEM-mælingar þegar jörð er þakin snjó. Með því að nota vélsleða eða bíla búna til aksturs á snjó má oft, seinni hluta vetrar, komast auðveldlega um mælisvæði sem eru lítt- eða ófær farartækjum að sumarlagi. Helsti gallinn við mælivinnu seinni part vetrar er sá að meiri hættu er á að veður hamli vinnu en að sumri til.

VIÐAUKI 3: TEM-mælingar í Bolungarvík. Mæliferlar og túlkun

