



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Borun holu ST-16 við Sigtún í Eyjafjarðarsveit



Arnar Hjartarson
Bjarni Gautason

Unnið fyrir Norðurorku

2002

OS-2001/034



**Arnar Hjartarson
Bjarni Gautason**

Borun holu ST–16 við Sigtún í Eyjafjarðarsveit

Unnið fyrir Norðurorku

OS–2001/034

Nóvember 2002

ORKUSTOFNUN — RANNSÓKNASVIÐ

Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. — Sími: 569 6000 — Fax: 568 8896
Akureyri: Sólborg v/ Norðurslóð, 600 Akureyri — Sími: 463 0559 — Fax: 463 0560
Netfang: os@os.is — Veffang: <http://www.os.is>



Skýrsla nr: OS-2001/034	Dags: Nóvember 2002	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Borun holu ST-16 við Sigtún í Eyjafjarðarsveit		Upplag: 30
		Fjöldi síðna: 42
Höfundar: Arnar Hjartarson Bjarni Gautason	Verkefnisstjóri: Ólafur G. Flóvenz	
Gerð skýrslu / Verkstig: Jarðhitarannsóknir – Niðurstöður rannsóknarborunar	Verknúmer: 8 610 604	
Unnið fyrir: Norðurorku		
Samvinnuaðilar:		
<p>Útdráttur:</p> <p>Hola ST-16 var boruð í júní árið 2000 í landi Sigtúna í Eyjafjarðarsveit. Holan var boruð niður á 1001 m dýpi en hrún á kafla í kringum 830 m dýpi hindraði frekari dýpkun holunnar. Mældir hitaferlar í holunni eru truflaðir af millirennсли en upphitunarmælingar sýna að hiti á um 975 m dýpi er um 91 °C. Holan virðist vera komin í rúmlega 90 °C vatnskerfi neðan 900 m dýpis ef marka má túlkun hitamælinganna. Vísbendingar eru um að normal misgengi sé á svæðinu á milli holu ST-16 og holna GR-12 og ST-15. Stefna þess er í NV eins og hitafrávikið á svæðinu. Uppstreymisrásin er því hér talin vera eftir misgenginu. Áhrif vinsslunnar á Syðra-Laugalandi virðist vera minni við Sigtún en á öðrum jarðhitasvæðum í Eyjafirði, s.s. Ytri-Tjörnum. Lagt er til að framkvæmdar verða mælingar með holusjá (televisioner) í völdum holum á rannsóknarsvæðinu til að staðsetja betur sprungustefnur þar til að kortleggja sprungur, halla þeirra og stefnu. Jafnframt er lagt til að gerð verði úttekt á bortækninni sem notuð hefur verið á þessum slóðum til að kanna hvort koma megi í veg fyrir hrún úr jarðlögum með breyttri bortæknii.</p>		
Lykilord: Rannsóknarborun, Sigtún, jarðlagamælingar, jarðlagagreining, hitamælingar, jarðlagasnið, jafnhitakort	ISBN-númer:	
		Undirskrift verkefnisstjóra:
		Yfirlætið af: ÓGF, PI

Efnisyfirlit

1 Inngangur	7
2 Fyrri rannsóknir	7
3 Borsaga ST-16	7
4 Jarðlög og jarðlagamælingar	9
4.1 Jarðlagaskipan	10
4.2 Ummyndun	11
4.3 Jarðlagamælingar	15
4.3.1 Almennt um jarðlagamælingar	15
4.3.2 Framkvæmd og úrvinnsla jarðlagamælinga í holu ST-16	16
4.4 Jarðlagatengingar	18
5 Hitamælingar í ST-16	20
5.1 Upphitunarmælingar	22
5.2 Jafnhitakort og hugmyndalíkan	25
6 Vatnsborðsbreytingar í holum ST-15 og ST-16	26
7 Samandregnar niðurstöður og tillögur að áframhaldandi rannsóknum	28
8 Heimildir	29
Viðauki A: Dagbók	31
Viðauki B: Tíðnidreifing mældra og reiknaðra bergeiginleika í holu ST-16	33
Viðauki C: Samanburður á nifteindamælingum	37
Viðauki D: Vatnsborðsmælingar í borholum ST-16 og ST-15	41

Myndaskrá

1	Rannsóknasvæðið við Grýtu og Sigtún	8
2	Skýringar við jarðlagasnið	12
3	Jarðlagasnið og jarðlagamælingar holu ST-16	13
4	Meðalviðnám í holu ST-16	18
5	Staðsetning líklegra misgengja	20
6	Hitamælingar í ST-16	21
7	Upphitunarmæling í ST-16 þann 20.júní 2000 á 750 m dýpi	22
8	Mæld upphitun á 750 m sýpi þann 20.júní 2000 sem fall af Horner tíma .	22
9	Upphitunarmæling í ST-16 þann 23.júní 2000 á 950 m dýpi	23
10	Mæld upphitun á 975 m dýpi þann 23.júní 2000 sem fall af Horner tíma .	24
11	Áætlaður berghiti í ST-16	24
12	Jafnhitakort á 100 m dýpi undir sjávarmáli	25
13	Vatnsborðsbreytingar í holum ST-15 og ST-16	27
B.1	Tíðnidreifing 16" viðnáms í holu ST-16	33
B.2	Tíðnidreifing 64" viðnáms í holu ST-16	34
B.3	Tíðnidreifing poruhluta í holu ST-16	35
B.4	Tíðnidreifing kísilsýru í holu ST-16	36
C.1	Nifteindamælingar í holum ST-16, GR-1 og GR-12 á dýpisibili 0–850 m .	37
C.2	Nifteindamælingar í holum ST-16, GR-1 og GR-12 á dýpisibili 0–200 m .	38
C.3	Nifteindamælingar í holum ST-16, GR-1 og GR-12 á dýpisibili 350–550 m	39

Töfluskrá

1	Hallamælingar í holu ST-16	9
2	Jarðlagamælingar í holu ST-16	17
3	Meðalgildi mældra og reiknaðra bergeiginleika í holu ST-16	17
4	Áætlaðar vatnsborðsbreytingar í Eyjafirði vegna vinnslu á Syðra-Laugalandi	26
D.1	Vatnsborðsmælingar í holu ST-16	41
D.2	Vatnsborðsmælingar í holu ST-15	42

1 Inngangur

Í júní sumarið 2000 var 1000 m djúp rannsóknahola boruð við Sigtún í Eyjafjarðarsveit. Hún hlaut nafnið ST-16 og var ætlað að skera ganga sem taldir voru líklegir til að stjórna rennsli á heitu vatni djúpt úr berggrunninum til yfirborðs í átt að Grýtulaug. En árangurinn var ekki í samræmi við væntingar. Skýrsla þessi greinir frá borun holunnar, jarðlagamælingum, sem gerðar voru í henni, og úrvinnslu þeirra og jarðfræði berggrunnsins sem hún er boruð í. Jafnframt er leitast við að draga lærðóm af þeim upplýsingum sem söfnuðust og í lokin greint frá niðurstöðum og settar fram tillögur að áframhaldandi rannsóknum á svæðinu.

2 Fyrri rannsóknir

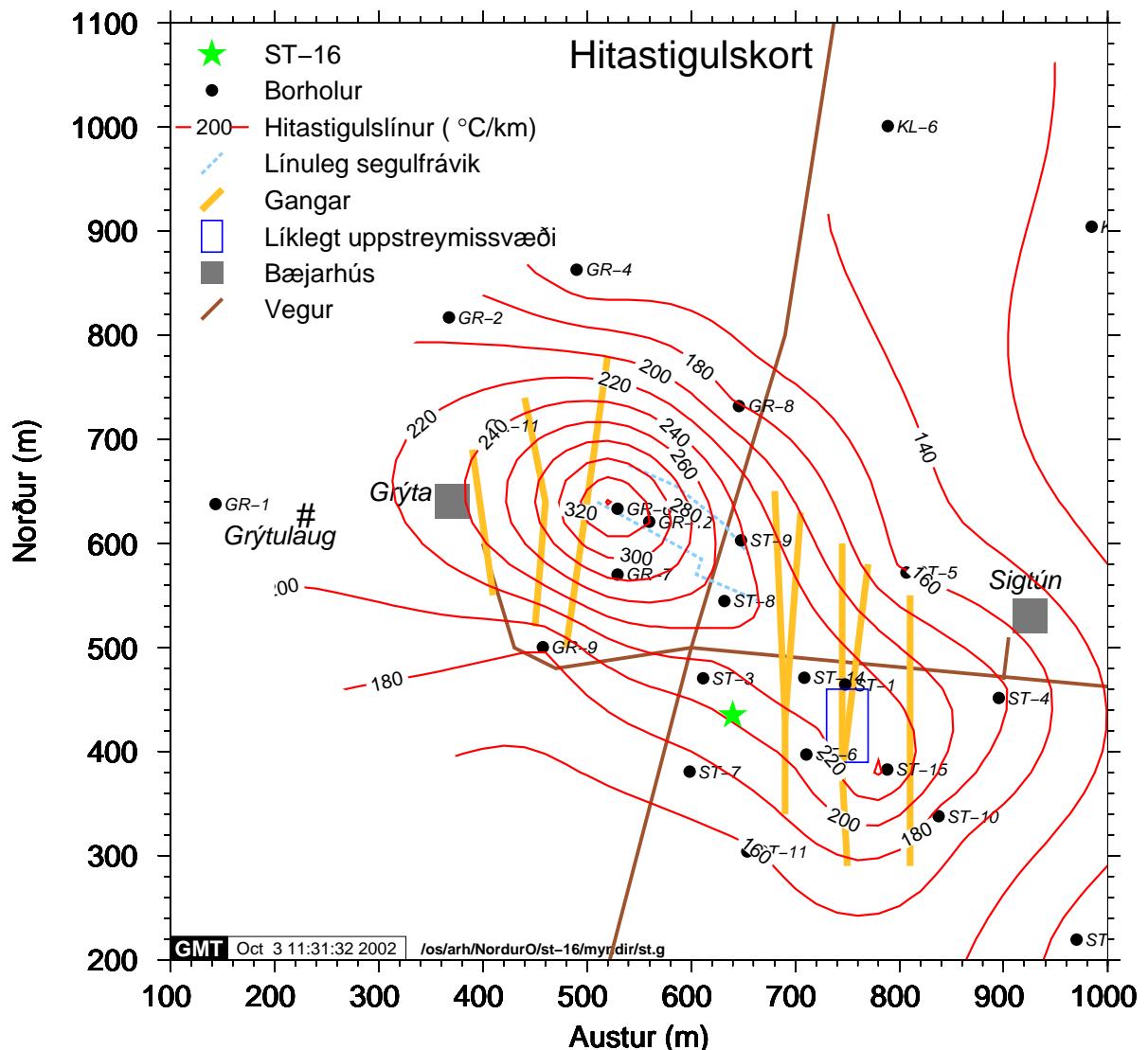
Umfangsmiklar jarðhitarannsóknir fóru fram á síðari hluta árs 1999 á Grýtu- og Sigtúns-svæðinu í Eyjafjarðarsveit (Arnar Hjartarson og Ingunn María Þorbergsdóttir, 2000). Þær fólu í sér boranir á 21 grunnri (< 100 m) rannsóknarholu (hitastigulsholu), segulmælingar og boranir á 5 millidjúpum (100–400 m) rannsóknarholmum. Tilgangur rannsóknanna var að kortleggja varmaflæði til yfirborðs og afmarka þannig uppstreymisrásina sem fæðir Grýtulaug með volgu jarðhitavatni. Rannsóknarsvæðið má sjá á mynd 1. Niðurstöður þessara rannsókna gáfu til kynna að uppstreymissvæðið sé að finna langt austan við Grýtulaug. Heitt jarðhitavatn var talið berast upp á mjóum kafla meðfram tveimur göngum sem ná til yfirborðs við holu ST-1. Ofan við 200 m dýpi leitar vatnið út í basaltsyrpu og berst þaðan upp jarðlagahallan um 500 m leið og kemur loks fram í Grýtulaug. Hitamælingar í rannsóknarholunum gefa til kynna 80 °C hita á 800 m dýpi í berggrunninum.

Ofangreindar niðurstöður voru talðar það jákvæðar að lagt var til að boruð yrði allt að 1000 m djúp rannsóknarhola með það að markmiði að hitta á gangana sem taldir voru veita vatninu til yfirborðs. Gert var ráð fyrir að halli ganganna væri um 6,4 °. Með því að gera ráð fyrir hóflegri skekkju í mati á halla þeirra var reiknað með að gangarnir yrðu skornir á 825 til 960 m dýpi. Var holunni valin staður í samræmi við það, um 60 m austan við Eyjafjarðarbraut og 70 m sunnan við heimreiðina að Sigtúnum (sjá mynd 1).

Rannsóknarholunni var gefið nafnið ST-16, en holurnar á svæðinu eru auðkenndar með hlaupandi númeri og tveimur bökstöfum í nafni landareignarinnar sem holan er á. Holan hefur staðarnúmer 55685 í gagnagrunni Orkustofnunar. Allar dýptartölur sem fram koma í þessari skýrslu eru miðaðar við holutopp nema annað sé tekið fram.

3 Borsaga ST-16

Borhola ST-16 var boruð með jarðbornum Sleipni í eigu Jarðboranna hf í júní og byrjun júlí 2000. Borverkið hófst með flutningi og uppsetningu Sleipnis og þann 5. júní hófst borun fyrir yfirborðsfóðringu. Borað var með 15" borkrónu og borleðju. Borun fyrir



Mynd 1: Rannsóknasvæðið við Grýtu og Sigtún.

yfirborðsfóðringu var lokið þann 7. júní og var borað niður á 30,3 m dýpi. Sama dag var yfirborðsfóðring sett í botn holunnar og steypt föst en hún er samansett af 14", heildregnum 9 mm fösuðum fóðurrörum (Grade H-40). Fóðringin er 30,7 m löng og eru 40 cm frá kjallaragólfí upp í flans sem er í jarðhæð.

Eftir helgarfrí þann 13. júní var sett niður 9 7/8" borkróna með lofthamri og var borað niður á 299,5 m (m.v. flans) þann 15 júní. Eftir það var rýmt fyrir 10 3/4" hjálparfóðringu og henni komið fyrir. Þann 17. júní var sett niður 8 1/2" borkróna með bormótor og borað með vatni sem skolvökva. Borað var nánast viðstöðulaust niður á 758 m en þá var tekið upp vegna krónuskipta. Aðeins var gert hlé á borun meðan holan var hallamæld, en það var gert á um 100 m bili. Samkvæmt hallamælingunum hefur holan lítið frávik frá lóðréttu en niðurstöður mælinganna má finna í töflu 1. Borun hófst aftur snemma að morgni dags 21. júní. Að kvöldi 22. júní var búið að bora niður á 1001 m dýpi án þess að hitta á vatnsæð. Þá var mæld upphitun á holubotni fram að hádegi bess 23. en að

Tafla 1: Hallamælingar í holu ST-16 (dýpisgildi m.v. pall Sleipnis sem er í 4,8 m yfir flans)

Dýpi (m)	Halli (°)
330	0,7
430	0,7
552	0,7
630	0,8
720	0,7
842	1,0
950	1,1

því loknu var borstrengurinn hífður upp í 798 m, og eftir það héldu bormenn í helgarfrí.

Eftir helgarfrí var búið að taka ákvörðun um að bora allt að 200 m til viðbótar. Þegar byrjað var að bora eftir hádegi þann 26. júní varð hrún í holunni og settist gróft efni að borstrengnum sem stíflaði holuna þegar strengurinn var hífður. Mikið af grófu efni kom upp úr holunni með dælingu. Hrunið átti sér stað á um 830–840 m dýpi og hindraði frekari borun. Í fjóra daga var reynt að skola holuna en án árangurs. Ávallt hrundi hún saman þegar strengurinn var hífður upp fyrir hrunkaflann. Þann 30. júní var gerð tilraun til að steypa í hrunkaflann. Snemma morguns þess 2. júlí var ljóst að steypingin bar ekki þann árangur sem vonast var til því enn var hrún á kaflanum og kom enn upp mikið af grófu svarfi með dælingu. Á þeim tíma var búið að baksa við hrunið í holunni í eina viku. Sama dag var ákveðið að yfirgefa holuna og reyna ekki frekar að hindra hrunið í holunni. Borverkinu lauk 2. júlí. Nákvæmari lýsingu á borverkinu má finna í dagbók í viðauka A.

Ekki varð vart við neinar vatnsæðar í holunni við borun. Í loftblæstri á um 100 m dýpi gaf holan um 21/l. Hiti vatnsins var ekki mældur meðan á loftblæstri stóð.

4 Jarðlög og jarðlagamælingar

Til að öðlast þekkingu á uppbyggingu berggrunnsins, sem hola ST-16 er boruð í, er vænlegast að bera saman jarðlagamælingar og greiningar á borsvarfinu sem upp kemur við borun. Jarðlagasniði af holunni má finna á bls. 13. Hafa ber í huga þegar jarðlagasniðið er skoðað að ekki er leiðrétt fyrir fartíma borsvarfsins upp holuna með skolvökvanum. Hinsvegar hefur þessi skekkja verið metin gróflega útfrá vídd holunnar, ytra ummáli borstanga og flæði skolvökvans. Niðurstaða matsins er sú að jarðlagasúlan hliðrast upp um 1 til 5 m miðað við jarðlagamælingarnar, og er hún meiri eftir því sem dýpra er skoðað. Skýr dæmi um þetta má sjá við setlögin á 125 og 452 m dýpi þar sem frávik er í vídd holunnar, viðnámið er lágt og poruhluti er hár. Hér á eftir verður lýst jarðlögum sem hola ST-16 er boruð í, fjallað verður um jarðlagamælingarnar sem framkvæmdar voru í holunni og túlkanir þeirra, og jafnframt verður fjallað um jarðlagatengingar milli holna á svæðinu.

4.1 Jarðlagaskipan

Borsvarfi var safnað í 80 ml dósir á 2 m bili, eins og venja er. Borsvarf var greint samhliða boruninni á rannsóknarstofu útibús ROS á Akureyri. Þannig fengust jafnharðan upplýsingar um um gerð jarðlaga, vatnsæðar og gróft mat á hitaástand í jörðu. Nánari úrvinnsla á borsvarfinu fór svo fram samhliða úrvinnslu borholumælinga. Á þeim greiningum er jarðlagasniðið af berggrunninum á mynd 3 byggt. Skýringar við jarðlagasniðið má finna á mynd 2.

Efst í bergrunninum er komið í þunnt fínkorna basalt hraunlag og undir því er þunnt rauðt millilag. Þar neðan við er jarðlagaskipan í stórum dráttum eftirfarandi:

8–26 m

Syrpa af basalti þar sem meðal- til grófkorna basalt er ráðandi efst en heldur fínkornóttara neðst. Efri hluti þess er áberandi plagíoklasdílóttur. Þetta er líklega sama eining og nefnd var hr4 í skýrslu Arnars Hjartarsonar og Ingunnar Maríu Þorbergsdóttur (2000).

26–136 m

Syrpa af meðal- til grófkorna basalti. Dílótt berg á stöku stað en ekki eins áberandi og fyrir ofan. Neðst í syrpunni eru tvö þykk (beltótt?) hraunlögg, það eftir (á 104 til 120 m) gefur mjög ákveðið og einkennandi útslag í nifteinda- og viðnámsmælingum. Þetta lag er heppilegt til að tengja á milli þeirra rannsóknarhola á svæðinu sem hafa verið jarðlagamældar (sjá síðar).

136–294 m

Blönduð syrpa þar sem mikið ber á millilögum. Hraunlögin eru ýmist fín eða meðal- til grófkorna, oft blöðrótt og er þá iðulega svört leirskán (klórófeít) í holum. Setlögin er oft nokkuð þykk og mjög litrík. Setlögin eru stundum kargaskotin að hluta og er nokkuð af útfellingum í þeim.

294–402 m

Syrpa af lítt ummynduðum hraunlögum, heldur grófara í korninu efst og mjög fersklegt en fínkornóttari neðri hlutinn. Engin millilög koma fram í svarfsýnum á þessum kafla, en á 354 og 366 er dálítil blöndum af millilagskornum svo hugsanlega voru þunn millilög skorin þar.

402–498 m

Á þessum kafla skiptast áfram á fínkorna og meðal- til grófkorna hraunlögg, en nú fer að bera meira á að gjallkargi fylgi hraunlögunum.

498–666 m

Blandað basalt. Á þessu dýptarbili er ummyndun í bergeninu hvað mest. Á 510 til 520 m er bergið hins vegar mjög ferskt sem bendir eindregið til þess að holan skeri þunnt inniskot (berggang) á þessu dýpi. Hugsanlegur gangur er einnig á 648 til 666 m.

666–748 m

Þessi eining svipar til þeirrar næst fyrir ofan nema hvað ummyndun hefur heldur minnkad. Engin millilög koma fram á þessu kafla. Á 716 m til 738 m dýpi er líklegt inniskot.

748–876 m

Syrpa þar sem meðal- til grófkorna basalt er ráðandi. Nokkur millilög eru á þessu bili og er eitt mjög þykkt á 834 m til 836 m. Hrun úr þessu millilagi olli miklum vandræðum í borun holunnar. Hér gæti verið sama setmyndun og kemur fram í mörgum holum á Syðra-Laugalandi á um 500 m dýpi. Þetta er mjög litríkt lag sem í er leirkennt set og mikið af samlímdum túfflegum kornum.

876–998 m

Þykk syrpa af fínkornóttu basalti. Á 918 m til 928 m dýpi er þó grófkornóttara berg, mjög fersklegt að sjá sem líklega er berggangur.

4.2 Ummyndun

Pegar vatn streymir um jarðög í langan tíma við hita og þrýsting sem eykst með dýpi verða breytingar á steindasamsetningu bergsins sem kölluð er ummyndun. Við ákveðinn hita myndast ákveðnar ummyndunarsteindir og með auknu dýpi, hita og þrýstingi verða til dýptarbil í jarðlagastaflanum þar sem ákveðin steind eða steindahópur eru í jafnvægi við ríkjandi aðstæður. Pannig verða til ummyndunarbelti í jarðlagastaflanum.

Í efsta hluta holunnar er ummyndun frekar lítil. Nokkuð er þó um útfellingar sem fylgja millilögum og á stöku stað eru blöðrótt hraun holufyllt. Svartur leir (klórofeít) er algengur sem skán í blöðruveggjum og kemur stundum í stað frumsteinda í grunnmassa bergsins. Útfellingar af geislasteinum eru aðallega mesólít og skólesít í efstu 300 metrum holunnar. Kabasít og analísí finnast á stöku stað í efstu 200 metrunum. Heulandít kemur fyrir er neðar dregur og jafnframt fer að bera meira á stilbíti en skólesít virðist hverfa. Stilbít er líklega mest sem sprungufylling ofarlega í holunni en greinist sem holufylling í basalti á 480 m. Ópall verður meira áberandi eftir því sem neðar dregur. Laumontít kemur fyrst fram á 540 m dýpi og er viðvarandi eftir það ásamt stílbíti, ópal og stundum kvars.

Samkvæmt þessu liggur efri hluti holunnar í mesólít-skólesít beltinu en Laumontít beltið tekur við á um 540 m dýpi, sem er ekki ólíkt myndinni á Syðra-Laugalandi, t.d. í holu LJ-5 (Hrefna Kristmannsdóttir og Ásgrímur Guðmundsson, 1976). Athyglisvert er að ummyndun minkar neðan 666 m dýpis, (þ.e.a.s. magn ummyndunarsteinda), sem mætti skýra með því að jarðög séu þéttari í neðri hluta holunnar (sbr. kafli 4). Ummyndunarsteindirnar eru hins vegar þær sömu svo minni ummyndun þýðir ekki hitalækkun.

Skýringar við jarðlagasnið

Berggerðir



Hraunlagakargi



Basaltbreksía



Fín-meðalkorna basalt



Meðal-grófkorna basalt



Grófkorna basalt



Millilag



Svarf vantar

Innskot



Innskot



Hugsanlegt innskot

Ummyndunarstig



Engin ummyndun



Lítill ummyndun



Meðal ummyndun



Mikil ummyndun

Vatnsæðar



Lítill æð



Meðal æð



Stór æð

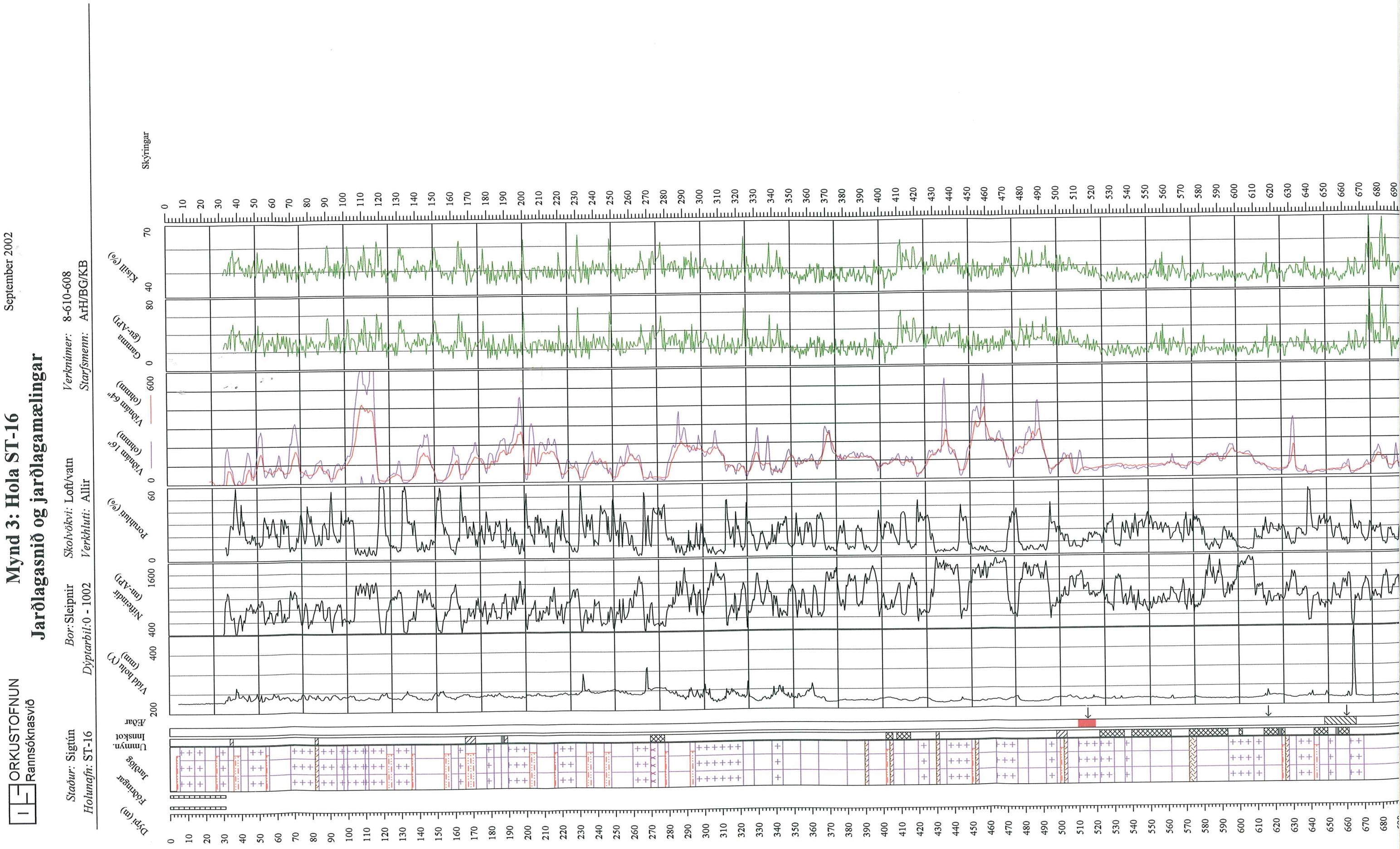
Mynd 2: Skýringar við jarðlagasnið.

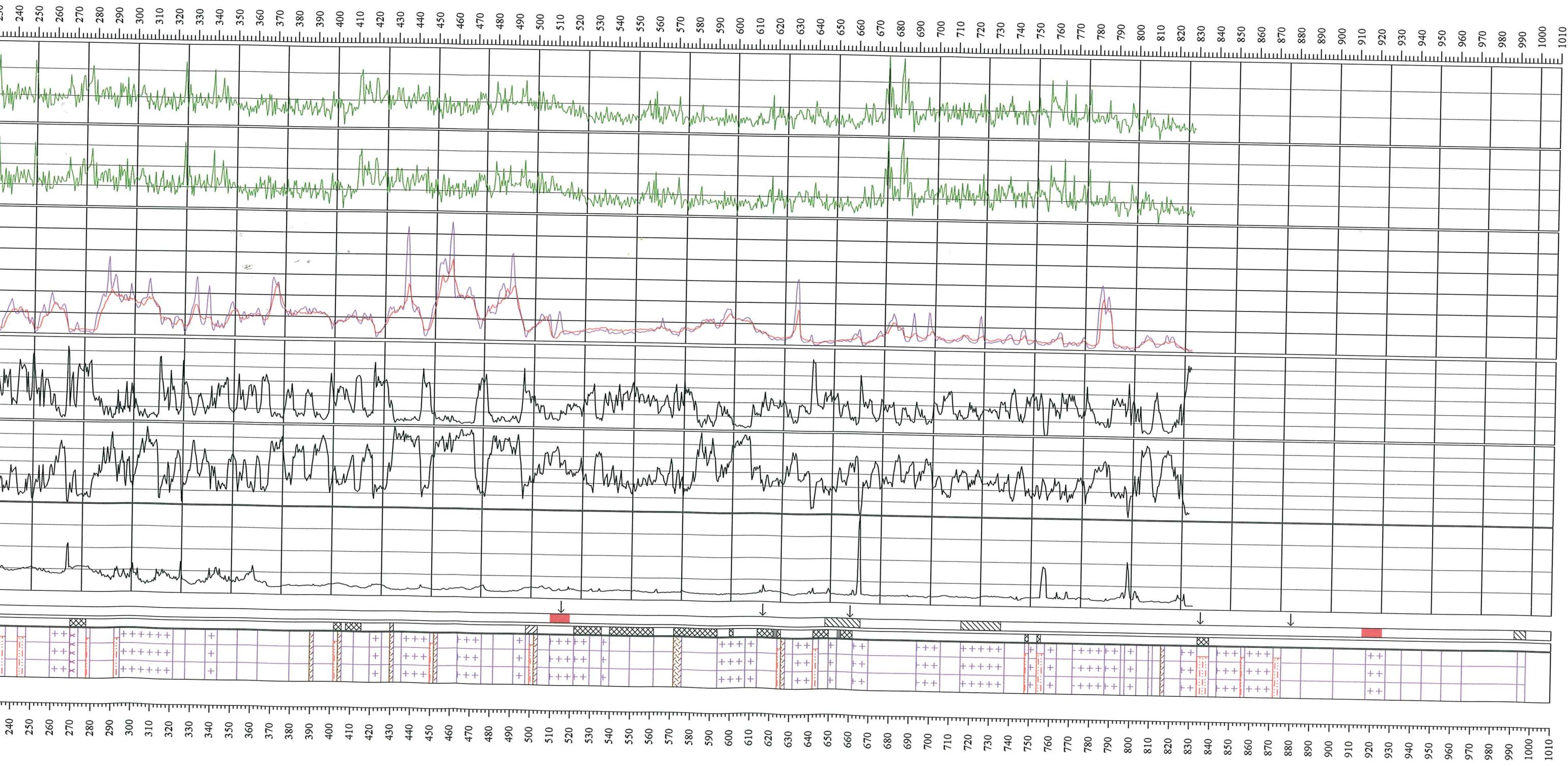
Stáður: Sigrtún
Holunafn: ST-16

Bor: Sleipnir
Dýptarbil: 0 - 1002

Sko/hökví: Loft/vatn
Verkhult: Allir

Verknúmer: 8-610-608
Starfsmenn: ArH/BG/KB





4.3 Jarðlagamælingar

Jarðlagamælingar í holu ST-16 voru framkvæmdar dagana 29. og 30. ágúst árið 2000. Holan mældist um 831 m djúp. Vídd holunnar var mæld auk náttúrulegrar gammageislunar, rafviðnáms og sjálfspennu borholuveggjanna og hvernig geislun nifteinda dreifist um bergið. Áður en lýst verður framkvæmd og úrvinnslu jarðlagamælinganna verður aðeins fjallað almennt um jarðlagamælingar.

4.3.1 Almennt um jarðlagamælingar

Jarðlagamælingar gefa upplýsingar um ýmsa eiginleika bergsins sem borað er í. Með því að greina svarfið sem upp kemur úr holunni við borun og samtlíka við jarðlagamælingarnar má fá góða hugmynd um uppbyggingu jarðlagastaflans. Það má greina milli jarðmyndana, bæði einstakra jarðлага og heilla syrpa, og ákvarða þykkt þeirra. Víddarmælingarnar eru ekki eiginlegar jarðlagamælingar en vídd holunnar er notuð til leiðréttингar á víddaráhrifum í öðrum mælingum og gefur mikilvægar vísbindingar um hörku jarðlaganna og skil þeirra.

Poruhluti er skilgreindur sem hlutfall holrýmis í bergi af heildarrúmmáli bergsins, en poruhluta þess má meta með nifteindamælingum. Slíkar mælingar byggja á því að hraðfara nifteindum er skotið út í borholuna. Þegar nifteindirnar lenda í árekstrum við frumendir í umhverfinu hægir verulega á hraða þeirra. Það eru fyrst og fremst vetriskjarnar sem bremsa nifteindirnar og þegar það gerist sendir nifteindin frá sér gammageislun sem mælitækið nemur. Því fleiri vetriskjarnar sem eru umhverfis mælitækið því meiri mælist gammageislunin. Pannig er styrkur gammageislunar mælikvarði á fjölda vetriskjarnar í umhverfi mælitækisins. Þar sem vetriskjarnar er fyrst og fremst að finna í vatni í porum bergsins ætti nifteindamælingin að vera mælikvarði á poruhluta bergsins sem myndar holuna sem mælt er í. Einnig er augljóst að vídd holunnar hefur áhrif á mælinguna þar sem borholurnar eru fullar af vatni en leiðrétt er fyrir þessum áhrifum.

Poruhlutinn sem reiknast út frá nifteindamælingunni er svokallaður sýndarporuhluti kalksteins. Ástæðan er sú að nifteindamælingin er kvörðuð miðað við sérstaka kvörðunarholu í kalksteini í Houston í Texas. Þar sem basalt og kalksteinn eru ólíkar bergtegundir er kvörðunin ekki viðeigandi, en þessi kvörðun er stöðluð fyrir þau mælitæki sem í boði eru. Hafa ber í huga að nifteindamælingar mæla heildarfjölda vetriskjarnar, sama á hvaða formi þær finnast. Vatnaðar steindir, eða kristalvatn, er að finna í ummynduðu basalti, leir og mörgum ummyndunarsteindum og koma því fram sem poruhluti í nifteindamælingum. Sýndarporuhlutinn er því meiri heldur en raunverulegur poruhluti bergsins sem mældur er. Hversu mikill þessi munur er fer eftir kristalvatninu. Setlöög geta innihaldið mikið af slíku og því reiknast poruhlutinn oft mikill í þeim.

Með mælingu á náttúrulegri gammageislun holuveggins má meta innihald geislavirkra efna í jarðlögmum, en þau eru einkum kalíum, úraníum og þóríum. Þessi geislavirkur efni eru í hlutfalli við kísilsýrumagn bergsins þannig að því súrara sem bergið er þeim mun meiri geislun fylgir því. Í millilögum milli hraunlaga er oft kalíumríkur leir sem einnig hækkar geislunina. Mjórir toppar í mældri gammageislun benda því til millilaga.

Eðlisviðnám jarðlaga í borholum er mælt með aðferð sem nefnd er normal aðferð. Þá er eðlisviðnámið mælt við 16" og 64" fjarlægð frá straumskauti. Viðnámsmælingar geta greint á milli jarðmyndana í borholum. Þær er hægt að hafa til hliðsjónar þegar túnka á viðnámsmælingar sem framkvæmdar eru á yfirborði, t.d. vegna svæðisbundinnar jarðhitaleitar. Eðlisviðnámið er háð poruhluta og ummyndun jarðlagamna sem mælt er í, ásamt hita og seltu vatnsins í holunni. Þessu þarf að leiðréttu fyrir. Með mælingum á sjálffspennu má greina hlutfallið á milli viðnáms borholuveggjanna og viðnáms vatnsins í berginu. Þar sem vatnið í jarðhitakerfum hérlandis er yfirleitt einsleitt, með tilliti til dýpis, gefur mæling á sjálffspennu ekki svo mikilvægar upplýsingar, en sjálffspenna er mæld samhliða rafviðnámi.

Frekari fróðleik um borholumælingar má sækja í skýrslum Orkustofnunar meðal annars eftir Valgarð Stefánsson og Benedikt Steingrímsson (1990) og Ólaf G. Flóvenz o.fl. (1994).

4.3.2 Framkvæmd og úrvinnsla jarðlagamælinga í holu ST-16

Í töflu 2 má sjá yfirlit yfir þær mælingar sem framkvæmdar voru í holu ST-16 en niðurstöður mælinganna má sjá í jarðlagasniðinu á mynd 3. Mæliferlarnir eru skráðir sem fall af dýpi og eru þeir geymdir í gagnagrunni Orkustofnunar undir svokölluðu svuntunúmeri. Gögnin voru sótt úr gagnagrunnum til leiðréttингar og úrvinnslu en þau eru skráð sem mæligildi sem fall af dýpi. Leiðrétt er fyrir dýpi því núllstilling í upphafi mælingar er ekki alltaf nákvæm. Víddar- og viðnámsmælingarnar voru leiðréttar útfrá lengd fóðringar en þessar mælingar sýna fóðringuna greinilega með jafna vídd og mjög lágu viðnámi. Nifteinda- og gammamælingarnar voru leiðréttar með því að reikna fylgni mæliferlanna sem fall af innbyrðis dýpishliðrun við 16" viðnámsferilinn. Dýpisleiðréttингar voru á bilinu 0,5 til 1,5 m.

Holan var víddarmæld með fjögurra arma víddarmæli og því fæst þvermál holunnar eftir tveimur ásum (x og y). Þvermál y-áss passaði vel við innanmál fóðringarinnar. Mæling eftir x-ás var hinsvegar ekki eins sannfærandi. Þegar mælt var í fóðringu sýndi x-mælingin stökk og hliðranir miðað við y-mælinguna sem nam allt að 50 mm. Mælingunni eftir x-ás er því ekki treystandi og því er hún ekki teiknuð samhliða mælingunni eftir y-ás, eins og vant er. Þvermál holunnar er því einungis ákvarðar út frá y-hluta víddarmælingarinnar.

Holan var viðnámsmæld með 16" og 64" skautbili. Leiðrétt var fyrir hita, vídd og eðlisviðnámi borholuvökvans. Það var gert með forritinu *bhmrtw* sem skrifð var á forðafræðideild ROS af Þórði Arasyni, en það er byggt á forritinu *rtw* eftir Knút Árnason og Ragnar Sigurðsson. Þessi forrit byggja á víddarleiðréttингarferlum frá Gerhart-Owen (Gerhart-Owen formation Evaluation data handbook) og hitaleiðréttингu frá Drury og Hyndman (Drury og Hindman, 1979). Reiknað var með $40\Omega\text{m}$ viðnámi borholuvökvans sem er í samræmi við aðrar borholur í Eyjafirði (Guðni Axelsson o.fl., 1999).

Svo virðist sem 16" og 64" viðnámsferlunum beri vel saman. Meðalgildi 16" ferilsins er $103\Omega\text{m}$ en 64" ferilsins $90\Omega\text{m}$. Viðnámsmæling með 16" skautvídd hefur hærri upplausn en mæling með 64" skautvídd og getur því betur greint þunn háviðnámslög sem oft koma

Tafla 2: Jarðlagamælingar í holu ST-16 (dýpisgildi m.v. flans)

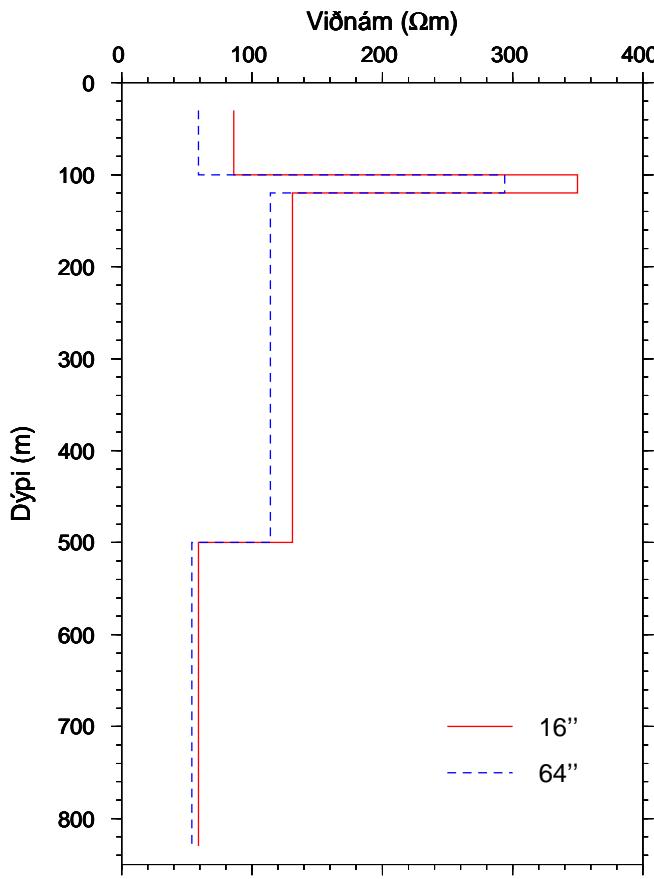
Dagsetning	Svunta	Hvað mælt	Dýpi frá (m)	Dýpi til (m)
29.08.2000	23894	16" viðnám	831	5
29.08.2000	23895	64" viðnám	831	5
29.08.2000	23896	Sjálfspenna (mV)	831	26,2
29.08.2000	23898	Vídd x-armur	831	26,2
29.08.2000	23899	Vídd y-armur	831	26,2
30.08.2000	23902	Nifteindir (API NU)	830	3,5
30.08.2000	23903	Gamma (API GU)	830	3,5

fyrir í holunni. Meðalgildi 16" ferilsins er því hærra og hefur hann stærri útslög heldur en 64" ferillinn. Efst í holunni er meðalviðnámið 59 til 86 Ωm , en á 100 til 120 m dýpi kemur fram háviðnámslag með viðnám milli 290 og 350 Ωm . Þar fyrir neðan er viðnámið milli 110 til 130 Ωm . Neðan við 500 m dýpi lækkar viðnámið í holuveggjunum niður í 50 til 60 Ωm og háviðnámstoppar verða sjaldgæfari. Meðalviðnám þessara hluta má sjá sem fall af dýpi á mynd 4. Meðalgildin má einnig finna í töflu 3 en tíðnidreifingu reiknaðs viðnáms í holunni má finna á myndum B.1 og B.2 í viðauka B. Samkvæmt reynslulögumáli Archie minnkar rafviðnám bergs með auknum poruhluta. Setlög sem hafa umtalsvert hærra poruhluta en hraunlög hafa því lægra viðnám. Þetta kemur greinilega fram í holu ST-16. Skýrasta dæmið er að finna á 100 til 170 m dýpi. Einig sjást þykkar hraunlagasyrpur á 425 til 495 m dýpi, þó að setlögin greinist ekki alltaf í svarfi.

Poruhluti bergsins var reiknaður út frá nifteindamælingunni og leiðrétt var fyrir víddaráhrifum. Þetta var gert með forritinu *bhmpor* eftir Þórð Arason en það byggir á forritinu *porurk* eftir Knút Árnason og Ragnar Sigurðsson. Í þessum forritum er víddarleiðrétt-tingin einnig gerð eftir ferlunum frá Gerhart-Owen. Meðalporuhluti bergsins sem myndar holu ST-16 er um 17,6 %. Á mynd B.3 má sjá tíðnidreifingu poruhluta og í töflu 3 sést að meðalporuhlutinn er mestur efst en lækkar þegar neðar dregur vegna útfellinga og fergingu bergsins sem ofar er. Poruhlutinn í hraunlögum virðist vera undir 10 % en hærri í setlögum, allt að 40 til 60 %, sem er mjög ótrúverðugt. Hafa ber í huga varnarordin í síðasta kafla um að reiknaði poruhlutinn er ofmat á raunverulegum poruhluta vegna kvörðunar mælitækisins og kristalvatns í jarðlögunum.

Tafla 3: Meðalgildi mældra og reiknaðra bergeiginleika í holu ST-16.

Dýpi (m)	16" viðnám (Ωm)	64" viðnám (Ωm)	Poruhluti (%)	Kísilsýra (%)
30–100	86	59	23,1	51
100–120	350	294	17,5	53
120–500	131	114	17,4	50
500–830	59	54	16,8	48
30–830	103	90	17,6	49



Mynd 4: Meðalviðnám í holu ST-16.

Kísilsýruinnihald bergsins var reiknað útfrá gammamælingunni með forritinu *bhmsio2* eftir Þórð Arason, en það forrit leiðréttir einnig fyrir vídd með víddarleiðrétttingarferlum frá Gerhart-Owen. Meðalkísilsýruinnihald jarðlagastaflans við Sigtún reiknast 49 % sem segir einfaldlega að verið sé að bora í basalt hraunlagastafla. Tíðnidreifingu kísilsýrustyrks má sjá á mynd B.4 en í töflu 3 má sjá að svo virðist sem kísisýrustyrkur fari lítið lækkandi með dýpi. Nokkrir toppar koma fram í kísilsýrustyrk. Á sömu stöðum kemur fram útvöskun í víddarmælingum, poruhlutinn eykst og viðnám lækkar. Kísilsýrutopparnir eru því skýrðir með setlögum sem hugsanlega innihaldið kalíumríkan leir sem er geislavirkur.

4.4 Jarðlagatengingar

Þar sem verið er að bora í lítið eitt hallandi lagskiptan jarðlagastafla koma sömu jarðmyndanirnar fram í nokkrum holum allt eftir dýpi þeirra og staðsetningu í landi. Með því að tengja saman auðkennanleg jarðlög á milli borholna og bera staðsetningu þeirra í rúmi saman við jarðlagahallann á svæðinu, má fá hugmynd um hvort einhverjar ósamfellur, eða misgengi, séu á svæðinu. Sem dæmi um auðkennanleg jarðlög má nefna litrík setlög eða áberandi þykk hraunlög. Jarðlagamælingar, einkum nifteindamælingar, eru

hentugar til að staðfesta slíkar tengingar. Í rannsóknunum sem stóðu yfir árið 1999 voru dregin 6 jarðlagasnið milli hitastigulsholnanna á svæðinu. Niðurstöður þeirra greininga gáfu ekki til kynna að verulegt jarðhnik væri á svæðinu. Til að mynda fékkst góð tenging milli GR-12 og ST-15 sem byggði meðal annars á þykku setlagi með ákveðin útlitseinkenni (Arnar Hjartarson og Ingunn María Þorbergsdóttir, 2000). Þetta setlag er á 242 m dýpi í GR-12 en á 306 m dýpi í ST-15 sem er í góðu samræmi við strik ($N60^{\circ}A$) og jarðlagahalla (9°) á svæðinu. Nú hafa hinsvegar vísbendingar um misgengi litið dagsins ljós sem byggja á tengingum milli holna ST-16 og GR-1 annarsvegar og ST-16 og GR-12 allt hinsvegar.

ST-16 – GR-12

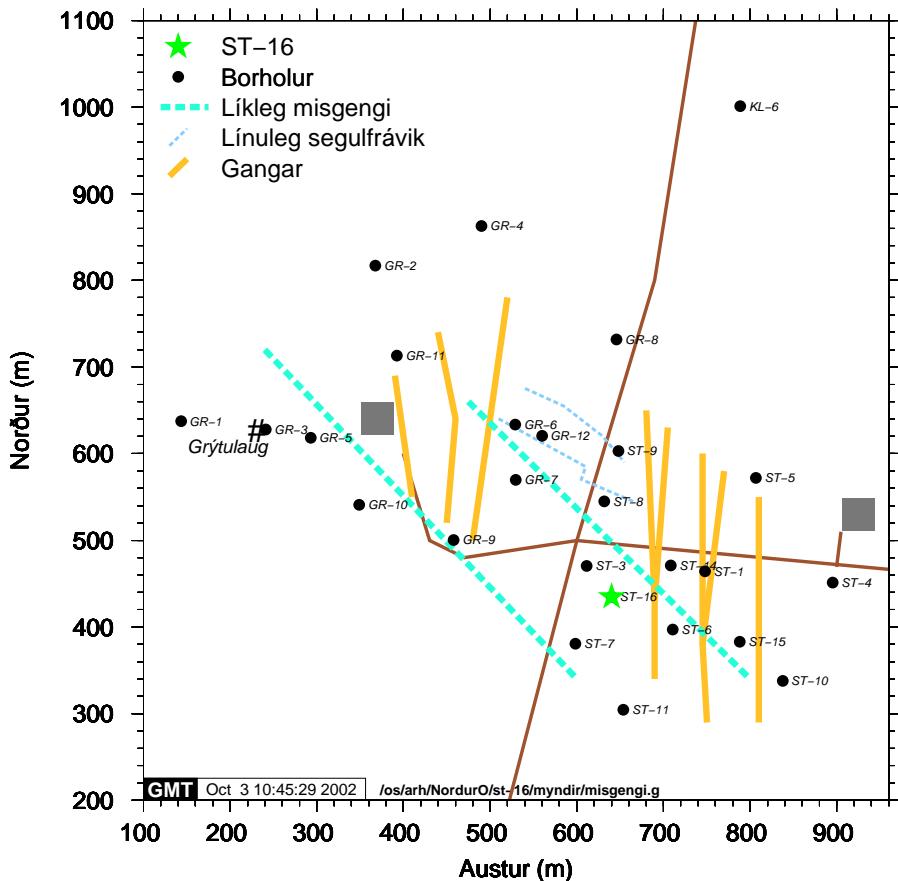
Efkert misgengi er á milli ST-16 og GR-12 ætti sama þykka, harða og litríka millilagið, sem finnst á 242 m dýpi í GR-12 en á 306 m dýpi í ST-15, að finnast á 284 m dýpi í holu ST-16 samkvæmt striki og jarðlagahalla. Þar finnst það hinsvegar ekki. Ekki er að sjá að holan skeri innskot á þessu dýpi, en það gæti skýrt að millilagið kæmi ekki fram. Þykkt millilag ætti að koma fram sem toppur í nifteindamælingu, þó svo það komi ekki fram í sýnatöku á 2 m fresti, en engin vísbending er um slíkan topp á 280 til 290 m dýpi í holu ST-16. Hins vegar er svipað setlag á 244 til 248 m dýpi í ST-16, það er rauðt að ofan en grænleitt að neðan. Sé þetta sama setlagið í öllum holunum þremur verður að líta svo á að jarðög í ST-16 standi 30 til 40 m hærra en í GR-12 og ST-15 miðað við strik og halla jarðlaganna.

Samanburður á nifteindamælingum í ST-16 og GR-12 gefur það sama til kynna. Mynd C.1 í viðauka C sýnir nifteindamælingar í holum ST-16, GR-1 og GR-12, þar sem mælingum í GR-1 og GR-12 hefur verið hliðrað þannig að auðkennd jarðög koma fram á sama dýpi miðað við ST-16. Mynd C.2 sýnir nánar dýptarbilið 0 til 200 m í ST-16 og hvernig þykka hraunlagið á 104 til 118 m dýpi í holu ST-16 kemur einnig fram í nifteindamælingunni í holu GR-12. Þetta hraunlag er á 92 til 106 m dýpi í GR-12. Nú er ST-16 í um 79 m hæð yfir sjó en GR-12 í 68 m hæð. Þá byrjar þetta hraunlag í 25 og 24 m hæð undir sjávarmáli í holunum tveimur. Samkvæmt striki og jarðlagahalla ætti þetta hraunlag að vera 33 m neðar í ST-16 en það er miðað við GR-12.

Að ofansögðu er ekkert jarðhnik á milli GR-12 og ST-15 en ST-16 stendur 33 m hærra miðað við GR-12 og ST-15 en hún á að gera. Þetta er því vísbending um að lóðrétt misgengi sé einhversstaðar á milli holu ST-16 og holna GR-12 og ST-15. Líklega staðsetningu þess má sjá á mynd 5. Stefna þess er því í átt til NV, eins og hitafrávik-ið á þessum stað, með halla til NA. Hugsanlega eru veiku segulfrávíkin sem fundust í segulmælingunum 1999 merki um þetta misgengi.

ST-16 – GR-1

Samanburður á nifteindamælingum var einnig gerður á milli ST-16 og GR-1. Mynd C.3 sýnir nánar dýptarbilið 350 til 550 m í holu ST-16. Á henni má greina tvær þykkar hraunlagasyrpur frá 445 til 495 m dýpis í holu ST-16. Pessi hraunög sjást einnig greinilega í nifteindamælingunni í GR-1. Þar eru þessi hraunög á 288 til 343 m dýpi í GR-1. Hæð GR-1 er um 7 m yfir sjó og því er þessi hraunög fyrst að finna á 466 og 281 m undir sjávarmáli í þeirri holu. Samkvæmt striki og halla ættu þessu hraunög að koma fram 18 m neðar í GR-1 en þau gera. Því eru líkur á því að annað lóðrétt misgengi sé á rannsóknarsvæðinu á milli ST-16 og GR-1, og ætti það að öllum líkindum að hafa svipaða stefnu og misgengið sem fyrr var nefnt (sjá mynd 5).

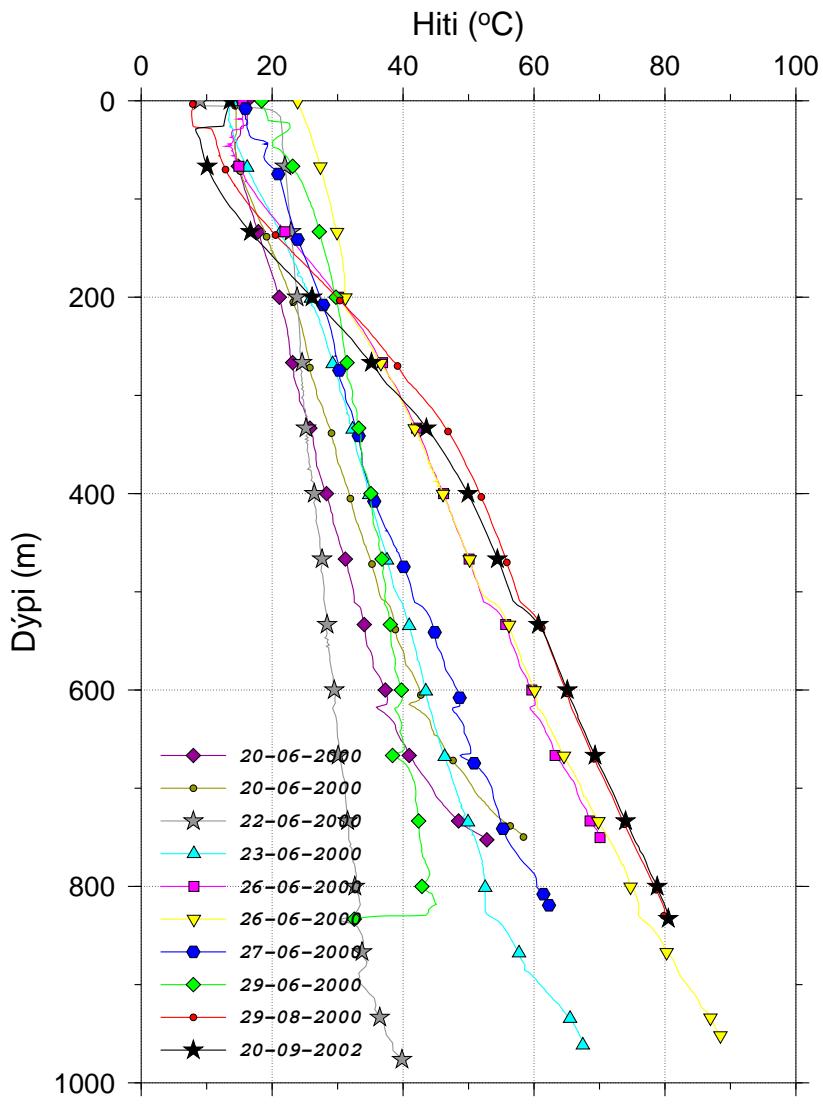


Mynd 5: Staðsetning líklegra misgengja.

5 Hitamælingar í ST-16

Mynd 6 sýnir niðurstöður hitamælinga sem gerðar hafa verið í holu ST-16. Fyrsta mælingin var gerð þann 20. júní þegar var skipt um borkrónu, eftir að boraðir höfðu verið 758 m. Við það tækifæri var hitamælt í opinni holu í botn ásamt stuttri upphitunarmælingu. Eftir að holan var boruð í 1000 m þann 22. júní var hitamælt í stöngum í 975 m, tekin upphitunarmæling í 10 klukkustundir og mælt upp að henni lokinni þann 23. með 0,51/s ádælingu. Að loknu helgarfríi þann 26. júní var hitamælt tvísvar í stöngum. Fyrri mælingin var gerð niður á einstreymisloka sem var á um 750 m dýpi en sú seinni var mæld niður á 950 m dýpi, eftir að strengurinn var kominn á botn holunnar. Þann 27. og 29. júní, meðan á tilraunum til hreinsunar stóð, var hitamælt í opinni holunni. Hitamælt var í holunni 29. ágúst eftir tæplega tveggja mánaðar langa upphitun, þegar holan var jarðlagamæld, og svo loks þann 20. september 2002 til að kanna endanlega upphitun hennar.

Hiti mældist hæstur $88,4^{\circ}\text{C}$ á 952 m dýpi þann 26. júní. Mælingarnar gefa til kynna litlar vatnsæðar á um 515, 618, 660, 830 og 880 m dýpi. Vatnsæðin á 515 m dýpi er tengd berggangi (innskoti) sem greinist á um 510 til 520 m dýpi. Ekki er hægt að tengja æðina á 618 m dýpi, hvorki við gang né setlag útfrá svarfgreiningu. Á sama dýpi kemur fram

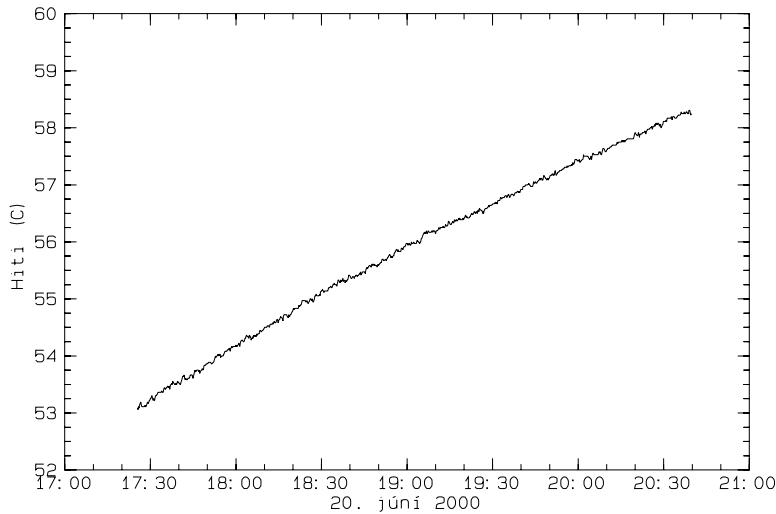


Mynd 6: Hitaæltingar í ST-16.

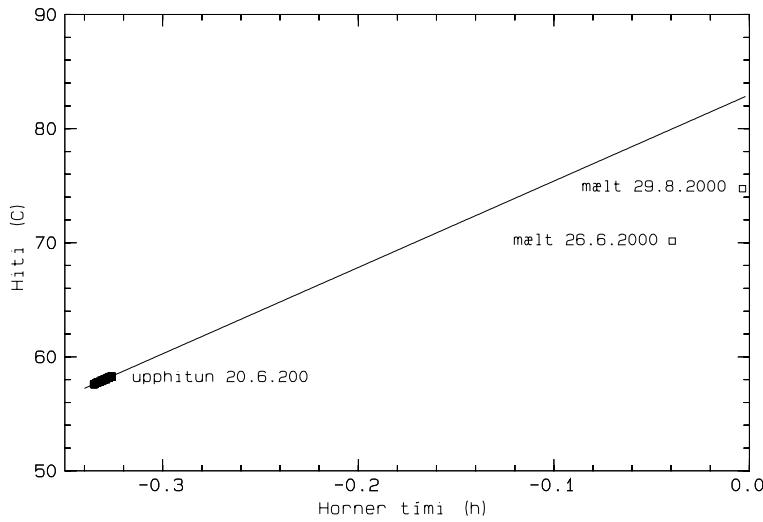
Lítið frávik í vídd holunnar sem bendir til þunns setlags. Æðin á 660 m dýpi tengist gangi sem vísbendingar eru um í svarfi á 648 til 665 m dýpi. Ummyndanir eru tengdar honum sem gefa til kynna að heitt vatn hafi lengi leikið um hann. Við neðri enda gangsins er stærsti skápur holunnar með 400 mm þvermál. Æðin á 830 m kemur greinilega fram á hitaferlinum þegar dælt var á holuna. Æðin er greinilega tengd setlaginu sem veldur hrúninu í holunni. Mjög miklar útfellingar eru í setlaginu sem bendir til vatnsstreymis. Æðina á 880 m má einnig tengja setlagi sem grenist á 872 til 876 m ef taftími á flutningi svarfsins er hafður í huga.

5.1 Upphitunarmælingar

Pegar hitamælingarnar í ST-16 eru skoðaðar og borðar saman við mælingar í holum GR-12, ST-14 og ST-15 sést að hola ST-16 er mun kaldari ofan til en búast mætti við. Ástæðan er sú að vatn vætlar inn í holuna, líklega ofan við 100 m dýpi og berst niður. Á um 515 m dýpi bætist einnig smáraði við innstreymið. Að öllum líkindum fer vatnið svo úr holunni í æðum á 830 m og 880 m og hugsanlega neðar. Holan er því trufluð af niðurstreymi og gefur því hitamælingin þann 29. ágúst ekki rétta mynd af hita bergsins í kringum holuna. Hitamælingin sem gerð var í september 2002 staðfestir að niðurrennslí er niður á 515 m dýpi en gefur vísbendingu um að vatn vætti í mjög litlu mæli niður á 830 m dýpi.



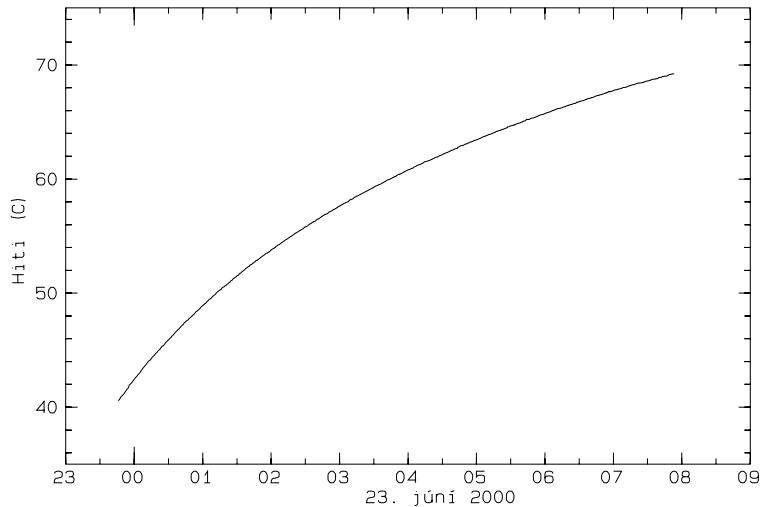
Mynd 7: Upphitunarmæling í ST-16 þann 20. júní 2000 á 750 m dýpi.



Mynd 8: Mæld upphitun á 750 m dýpi þann 20. júní 2000 sem fall af Horner tíma ásamt mældum hita á sama dýpi daganna 26. júní og 29. ágúst 2000.

Þegar hitaferlar eru truflaðir geta upphitunarmælingar reynst mjög mikilvægar þegar kemur að því að áætla berghitann. Tvær upphitunarmælingar voru gerðar á botni holunnar. Sú fyrri var gerð þann 20. júní við krónuskipti en sú seinni þann 23. júní eftir helgarhlé. Báðar upphitunarmælingarnar voru túlkaðar með aðferðum Horner og Albrights. Aðferð Horners byggir á þeirri staðreynd að hitinn í holubotni vex logaritmískt sem fall af tíma. Með því að teikna hitann sem fall af $\ln(\Delta t / (\Delta t + \tau))$, þar sem Δt er tími liðinn frá lok dælingar og τ er kælingartíminn vegna dælingar í borun, fæst bein lína. Með því að láta Δt vaxa upp í óendanlegt fæst berghitinn sem skurðpunktur við y-ás. Aðferð Albrights var þróuð til að áætla beghita í botni borholu í stuttum borhléum. Forritið *berghiti* notar aðferð Albrights og var það einnig notað til að túlka upphitunarmælingarnar (Páll Helgason, 1993).

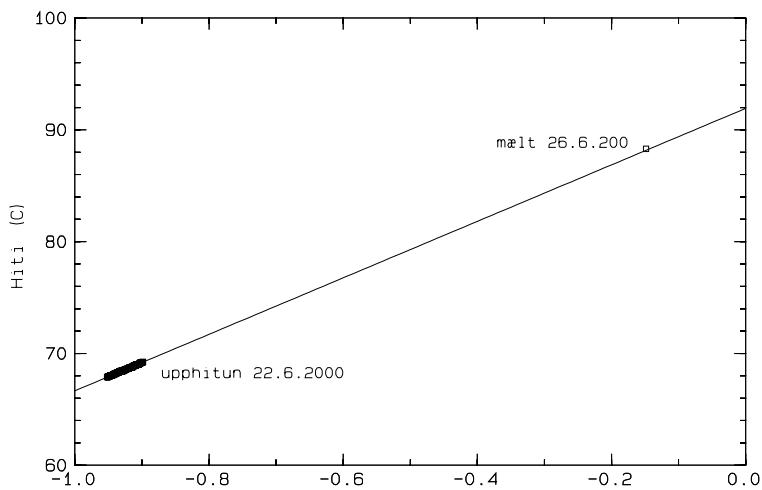
Fyrri upphitunarmælingin var gerð á um 750 m dýpi og stóð hún yfir í rúma þrjá tíma. Hana má sjá á mynd 7. Mynd 8 sýnir hitann svo teiknaðan sem fall af Horner tíma. Í gegnum gögnin hefur besta beina línan verið felld í gegnum gögnin með aðferð minnstu kvaðrata (R^2 óvissa 98,5 %). Skurðpunktur við y-ás er 83°C . Með aðferð Albrights er jafnvægishitinn 81°C . Bergitinn á 750 m dýpi í holu ST-16 er því metinn 82°C . Á mynd 8 má einnig sjá mældan hita á sama dýpi eftir helgarhlé þann 26. júní og þann 29. ágúst 2000. Þau hitagildi eru langt fyrir neðan áætlaðan berghita, jafnvel þó að holan hafi fengið að hitna í two mánuði. Þessi niðurstaða gefur sterkelega til kynna kælingu á þessu dýpi og kaldara vatn að ofan streymir niður holuna og niður fyrir 750 m dýpi.



Mynd 9: Upphitunarmæling í ST-16 þann 23. júní 2000 á 950 m.

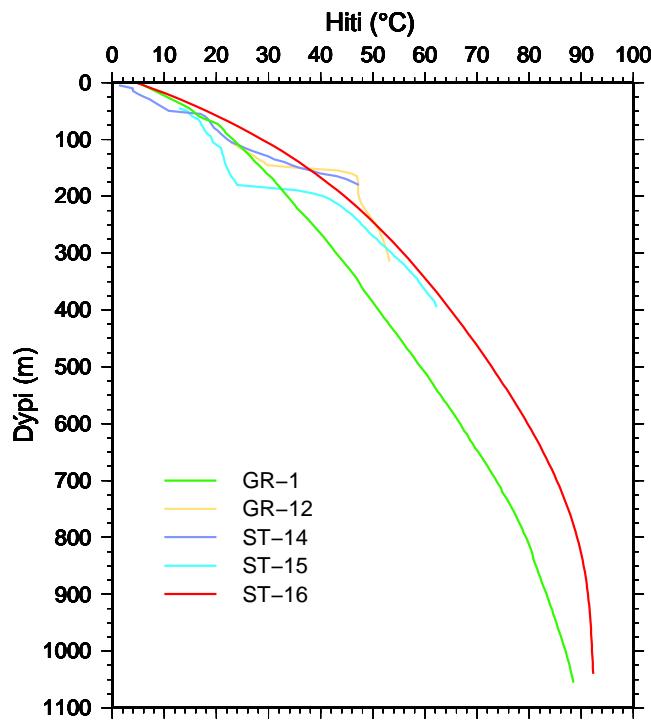
Seinni upphitunarmælingin var framkvæmd á um 975 m dýpi. Hún stóð yfir í átta tíma og hana má sjá á mynd 9. Mynd 10 sýnir hitann teiknaðan sem fall af Horner tíma. Besta beina lína í gegnum gögnin (ákvörðunarstuðull R^2 : 99,7 %) hefur skurðpunkt við y-ás í 92°C . Aðferð Albrights gefur 90°C . Áætlaður berghiti á 950 m dýpi er því 91°C . Eftir helgarhlé þann 26. júní mældist hitinn á sama dýpi $88,4^\circ\text{C}$ og fellur það gildi vel að línunni á mynd 10. Þetta gerir áætlaða berghitann trúverðugan.

Þar sem holan er öll kæld vegna niðurstreymis er aðeins hægt að áætla berghitann samkvæmt upphitunarmælingunum. Því fást aðeins tveir markverðir punktar: 82°C á



Mynd 10: Mæld upphitun á 975 m dýpi þann 23. júní 2000 sem fall af Horner tíma dýpi ásamt mældum hita á sama dýpi 26. júní 2000.

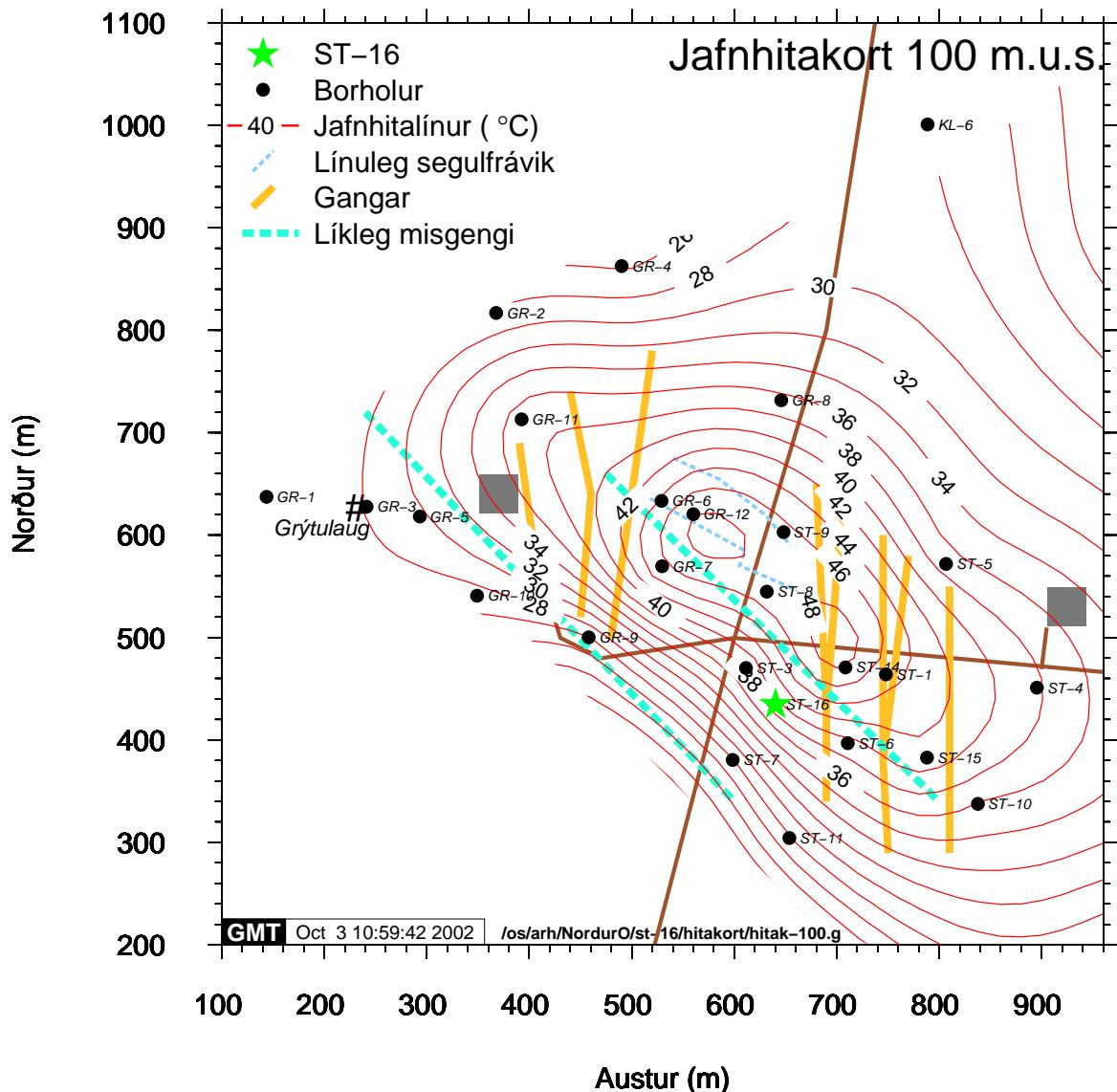
750 m dýpi og 91 °C á 950 m dýpi. Fyrri upphitunarmælingin er mun styttri en sí seinni og þar af leiðandi ekki eins áreiðanleg. Frekar er hún vanmat heldur en ofmat og gæti munað fáum gráðum. Til að áetla berghitaferilinn ofan 700 m dýpis verður að taka mið af holunum í næsta nágrenni. Berghitaferillinn er því ekki vel ákvarðaður. Mynd 11 sýnir túlkaðan berghita í ST-16 ásamt mældum hita í nokkrum holum á rannsóknarsvæðinu. Af þessum berghitaferli má ráða að holan sé komin í rúmlega 90 °C heitt jarðhitakerfi neðan 900 m dýpis.



Mynd 11: Áætlaður berghiti í ST-16 ásamt mældum hita í öðrum holum á rannsóknarsvæðinu.

5.2 Jafnhitakort og hugmyndalíkan

Tilgangur borunnar holu ST-16 var að skera ganga sem taldir voru veita heitu vatni í átt til yfirborðs. Samkvæmt svarfgreiningu eru gangar örugglega á um 515 og 925 m dýpi. Ef þessir gangar eru framlengdir til yfirborðs að þeim stöðum sem gangar finnast, austan megin við holuna í 40 og 100 m fjarlægð á yfirborði, reiknast halli þeirra um 4,4 og 6,2 ° miðað við lóðrétt. Þetta er innan þeirra marka sem eðlilegt getur talist á þessu svæði. Einnig voru gangar hugsanlega skornir á um 660, 725 og 995 m dýpi. Líklegt getur því talist að gangarnir hafi verið skornir eins og lagt var upp með í upphafi en þeir séu einfaldlega ekki uppstreymisrásin eins og verið var að kanna með borun holunnar. Hugmyndalíkanið af svæðinu þarf því að endurskoða.



Mynd 12: Jafnhitakort á 100 m dýpi undir sjávarmáli.

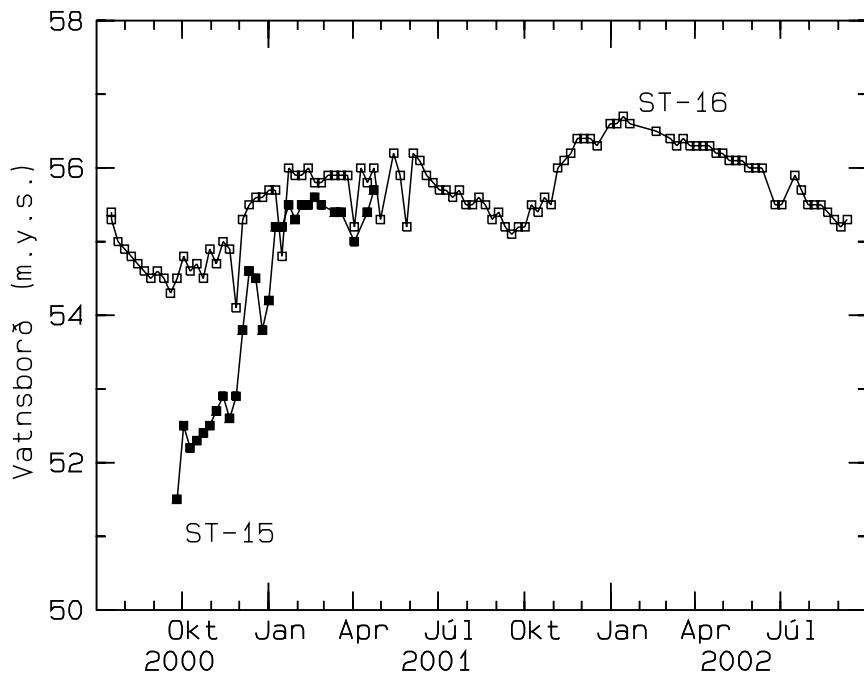
Mynd 12 sýnir hitakort af rannsóknarsvæðinu á 100 m dýpi undir sjávarmáli. Notast var við áætlaðan hita í holu ST-16, dýpri holurnar á svæðinu og flestar af grunnu hitastigulsholunum þar sem hægt var að framlengja stigulinn án mikillar óvissu. Hitinn er hæstur á svæðinu milli holna GR-12 og ST-14 og hefur frávikið NV-SA stefnu eins og á hitastigulskortinu (mynd 1). Á myndinni eru einnig teiknuð segulfrávikin sem fundust í segulmælingunum sem gerðar voru sumarið 1999 (Hjálmar Eysteinsson, 1999). Gangarnir, sem hafa N-S stefnu gefa mest áberandi segulfrávikin (gular línur) en einnig sjást segulfrávik með stefnu NV-SA (ljósblá punktalína) og liggur það syðra um hámark hitafráviksins. Jarðlagatengingar milli hola ST-16 og GR-1 og GR-12 gefa til kynna að lóðrétt misgengi geti verið á svæðinu með sömu stefnu og hitafrávikið. Lóðrétt misgengi geta verið af tvennum toga, siggengi (normal misgengi) og þrýstimisgengi (reverse misgengi). Að öllum líkindum er hér um normal misgengi að ræða þar sem þrýstimisgengi eru nær óþekkt á Íslandi. Því má álykta að halli misgengisins sé til NA. Hugsanlegt er að segulfrávikin séu merki um þetta misgengi og uppstremmisrásin sé tengd því en ekki göngunum eins og talið var líklegast við upphaf borun holunnar. Samkvæmt jafnhitakortinu er líklegra að þessu fyrirbæri halli til norðurs með dýpi frekar en suðurs því kólnunin er hraðari til suðurs út frá þeim en til norðurs sem samræmist áætluðum halla misgengisins. Geta ber þess þó að hitinn er betur ákvarðaður sunnanmegin við hitahámarkið en norðan því þar eru holur fleiri og dýpri.

6 Vatnsborðsbreytingar í holum ST-15 og ST-16

Eftir borun ST-16 hefur dýpi á vatnsborð í holunni verið mælt vikulega. Það er gert til að kanna hvort þrýstisamaband sé á milli Sigtúna og Syðra-Laugalands. Mynd 13 sýnir vatnsborð í metrum ofan sjávarmáls í holum ST-15 og ST-16, frá júlí 2000 og fram í september 2002. Gögnin að baki myndarinnar má finna í viðauka D í töflum D.1 og D.2. Myndin sýnir árstíðarbundnar sveiflur í vatnsborði á svæðinu. Vatnsborðið stendur hærra á veturna en á sumrin. Pessar sveiflur, sem eru um 1,5 m, eru líklega af völdum vinnslunnar á Laugalandi sem einnig er árstíðabundin. Fasamunurinn er um sex mánuðir þar sem vinnslan er mest á veturna. Það er því ljóst að tengsl eru á milli svæðanna. Til að meta hversu mikil tengslin eru má bera þau saman við tengsl annarra jarðhitakerfa við Laugaland.

Tafla 4: Áætlaðar vatnsborðsbreytingar í Eyjafirði vegna vinnslu á Syðra-Laugalandi.

Staður	Hola	Vatnsborðsbreyting (m)	Fasamunur (mán)	Fjarlægð til Laugalands (km)	Stefna
Ytri Tjarnir	TN-4	50–100	<1	1,9	N
Grísará	GG-1	10–20	3	1,7	V
Klauf	KW-2	5–8	3	1,3	S
Sigtún	ST-16	1–2	6	2,2	S



Mynd 13: Vatnsborðsbreytingar í holum ST-15 og ST-16.

Tafla 4 sýnir áætlaðar vatnsborðsbreytingar í borholum við Ytri Tjarnir, Gríslá, Klauf og Sigtún vegna vinnslunnar á Laugalandi og áætlaðan fasamun. Gögnin frá Ytri Tjörnum, Gríslá og Klauf eru fengin úr skýrslunni um niðurdælingartilrauninnar á Laugalandi 1999 til 2001 (Guðni Axelsson *o.fl.*, 2000). Í töflunni sést að áhrif vinnslunnar á Laugalandi gætir mest við Ytri Tjarnir og skila áhrifin sér þangað á skemmstum tíma, eða á innan við mánuði. Við Gríslá er sveiflan um 10 til 20 m og fasamunurinn um 3 mánuðir. Við Klauf, sem er miðja vegu á milli Lauglands og Sigtúna, er sveiflan um 5 til 8 m og fasamunurinn um 3 mánuðir. Við Sigtún virðist sveiflan vera milli 1 og 2 m og fasamunurinn er um hálft ár. Það er því ljóst að vinnslunnar á Laugalandi gætir hvað minnst á Sigtúnum af jarðhitakerfunum fjórum sem nefnd eru í töflu 4. Petta bendir til þess að lektin sé mest í stefnu norður frá Laugalandi en minnst í stefnu suður. Niðurstöður ferilprófananna, sem framkvæmd voru í tengum við niðurdælingartilraunina 1999 til 2001, benda einnig til þess að tengsl Grytu við Laugaland séu minni en á hinum svæðunum (Guðni Axelsson *o.fl.*, 2000) sem er jákvætt ef vatn í vinnanlegu mæli finnst við Sigtún.

7 Samandregnar niðurstöður og tillögur að áframhaldandi rannsóknum

Hola ST-16 var boruð í júní árið 2000 í landi Sigtúna í Eyjafjarðarsveit. Holan var boruð niður á 1001 m dýpi en hrún á kafla í kringum 830 m dýpi hindraði frekari dýpkun holunnar. Líkt og aðrar holur á svæðinu er hún boruð í basalt hraunlagastafla með þykum setlögum á köflum. Mældir hitaferlar í holunni eru truflaðir af millirennslu en upphitunarmælingar sýna að hiti á um 975 m dýpi er um 91 °C. Af upphitunarmælingunum má ráða að holan sé komin í yfir 90 °C heitt jarðhitakerfi neðan 900 m dýpis en hafi ekki enn hitt á meginæðar þess. Líklegt þykir að holan hafi skorið hluta þeirra ganga sem henni var ætlað, en þeir virðast ekki vera uppstreymisrásin eins og vonast var til. Vísbendingar eru um að normal misgengi sé á svæðinu á milli holu ST-16 og holna GR-12 og ST-15. Stefna þess er í NV eins og hitafrávikið á svæðinu. Líklegt má teljast að segulfrávikan sem fundust árið 1999 séu tengd þessu misgengi. Uppstreymisrásin er því hér talin vera eftir misgenginu. Því er lagt til að rannsóknum verði haldið áfram og þeim beint að hugsanlegum sprungum í stefnu NV með halla í NA.

Lagt er til að gerðar verða mælingar með holusjá (televíwer) í völdum holum (t,d, ST-16, ST-15 og GR-12) á rannsóknarsvæðinu. Slíkar mælingar gefa vitnesku um halla og stefnu sprungna sem skera boruholuveggi. Þær ættu því að segja til um líkindi þess að vatnsleiðandi misgengi sé á svæðinu eins og rannsóknargögnin benda til og gefa upplýsingar um strik þeirra og halla. Séu þær rannsóknir jákvæðar er næsta skref þar á eftir að staðfesta niðurstöðurnar með borunum. Hversu umfangsmiklar þær geta orðið veltur á fyrri niðurstöðum.

Komið hefur fram að jarðhitakerfið við Sigtún og Grýtu er ennþá vænlegur virkjana-kostur fyrir Norðurorku. Hitinn í kerfinu er yfir 90 °C og áhrif vinnslunnar á Syðra-Laugalandi virðist vera minni þar en á öðrum jarðhitasvæðum í Eyjafirði. Grýtulaug vætlar einnig enn þrátt fyrir áratugavinnslu á Laugalandi, sem bendir til þess að eftir nokkru vatni geti verið að slægjast.

Hrungjörn millilög er að finna í flestum holum á þessum slóðum. Stundum hefur gengið vel að bora í gegnum þau stundum illa. Þetta kann að stafa af því að sama jarðlagið er mishrungjarnt frá einni holu til annarrar. Allt eins getur þó verið um bortæknileg atriði að ræða. Því er lagt til að gerð verði sérstök úttekt á þeim borunum sem þarna hafa farið fram og skorið hafa umrædd jarðög og reynt að finna út við hvaða bortæknilegu skilyrði hrún fer að myndast. Slík úttekt gæti sparað stórfé í framtíðinni ef ástæðan er bortæknilegs eðlis.

8 Heimildir

Arnar Hjartarson, 1997: *Viðnámssniðsmælingar við Uppsali 1996*. Unnið fyrir Hitaveitu Akureyrar. Orkustofnun, OS-97007, 19 s.

Arnar Hjartarson og Ingunn María Þorbergsdóttir, 2000: *Niðurstöður rannsóknaborana við Grytu og Sigtún*. Orkustofnun, OS-2000/028, 88 s.

Drury, M.J. og Hyndman, R.D., 1979: The electrical resistivity of oceanic basalts. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84. No.B9.

Gerhart-Owen formation Evaluation data handbook, Gerhart Industries, Inc., 1978.

Guðni Axelsson, Arnar Hjartarson, Steinunn Hauksdóttir, Ólafur G. Flóvenz, Guðrún Sverrisdóttir, Franz Árnason, Magnús Finnsson, Árni Árnason og Reynir Böðvarsson, 2000: *Demonstration of improved energy extraction from a fractured geothermal system. (Final report for THERMIE project GE-0060/96)*. Orkustofnun, OS-2000/016, 219 s.

Guðni Axelsson, Steinunn Hauksdóttir, Ólafur G. Flóvenz og Guðrún Sverrisdóttir, 1999: *Hita-veita Akureyrar. Eftirlit með jarðhitasvæðum 1998 og horfur í orkubúskap veitunnar*. Orkustofnun, OS-99087, 89 s.

Hjálmar Eysteinsson, 1999: *Segulmælingar við Sigtún og Grytu Eyjafirði*. Unnið fyrir Hita- og vatnsveitu Akureyrar. Orkustofnun, OS-99081, 4 s. +kort.

Hrefna Kristmannsdóttir og Ásgrímur Guðmundsson, 1976: *Borun við Syðra-Laugaland. Hola LJ-5*. Orkustofnun OS-7628/JHD, 19 s.

Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson, Grímur Björnsson, Jens Tómasson, Guðrún Sverrisdóttir, Hilmar Sigvaldason og Sigurður Benediktsson, 1994: *Laugaland á Pelamörk. Boranir og vinnsluprófun 1992–1993*. Orkustofnun, OS-94032/JHD-07.

Ólafur G. Flóvenz og Ragna Karlsdóttir, 2000: *TEM-resistivity image of a geothermal field in N-Iceland and the relation of the resistivity with lithology and temperature*. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000.

Páll Helgason, 1993: *Step by step guide to BERGHITI*. Orkustofnun, Reykjavík, 1993. (Er í ICEBOX forritapakkanum.)

Valgarður Stefánsson og Benedikt Steingrímsson, 1990: *Geothermal logging I. An introduction to techniques and interpretation*. Orkustofnun, OS-80017/JHD-09, 3. útg.

Viðauki A: Dagbók

Gögnin eru fengin úr borskýrslum og foldarbók fyrsta höfundar þessar skýrslu. Öll dýpisgildi eru hér miðuð við pall Sleipnis sem er í 4,5 m hæð yfir jörðu.

5. júní 2000

Músarholu boruð og kláruð. Byrjað að bora fyrir 14" yfirborðsfóðringu með 15" hjólakrónu og borleðju.

6. júní 2000

Borað fyrir yfirborðsfóðringu.

7. júní 2000

Lokið við að bora fyrir yfirborðsfóðringu árla morguns. Borað var í 30,3 m frá kjallarabréði. Fóðrað var með heildregn 9 mm, fösuðum (Grade H-40) fóðurrörum. Rörin soðin saman og slakað ofan í holuna. Fóðring steypt föst með 3 m^3 steypu. Fóðringin er 30,7 m og nær 40 cm upp frá kjallaragólfí.

8. júní 2000

Unnið við holutopp, viðhald og þrif áður en haldið var í helgarfrí.

13. júní 2000

Undirbúið fyrir borun með 9 7/8" borkrónu og lofthamri. Borað var í steypu í 21,9 m.

14. júní 2000

Borað með krónu og lofthamri.

15. júní 2000

Borað niður á 295 m, þá skolað og tekið upp. Settur niður $12\frac{1}{2}$ " rýmari til að rýma fyrir hjálparfóðringu.

16. júní 2000

Rýmað niður í 35 m. Hjálparfóðring $10\frac{3}{4}$ " sett niður og gengið frá holutoppi. Frárennslismæli komið fyrir.

17. júní 2000

Sett niður $8\frac{1}{2}$ " borkróna með bormótum. Borað var frá 295 m í 330 m en þá var skolað og hallamælt. Halli mældist $0,7^\circ$.

18. júní 2000

Borað áfram. Skolað og hallamælt í 430 m. Halli mælist $0,7^\circ$. Skolað og hallamælt í 552 m. Halli mælist $0,7^\circ$. Dæling aukin úr 331/s í um 371/s.

19. júní 2000

Borað áfram, skolað og hallamælt í 630 m. Halli mælist $0,8^\circ$.

20. júní 2000

Halli mældur $0,7^\circ$ í 720 m. Tekið upp eftir borun í 758 m vegna krónuskipta. Hitamælingar standa yfir frá kl. 16:30 til 22:00. Ný króna sett niður.

21. júní 2000

Borun hefst um kl. 5. Skolað og hallamælt í 842 m. Halli mælist $1,0^\circ$.

22. júní 2000

Komið niður á 1001 m um kl. 21:30 og eftir það var skolað í klukkutíma. Hitamæling í stöngum hefst um kl. 22:50. Mælt var niður á 976 m dýpi og upphitunarmæling sett í gang.

23. júní 2000

Upphitunarmælingu lokið um kl. 8:15. Þegar hitamæla átti upp var hitamælirinn fastur í einstreymislokum. Einstreymislokinn var af annarri gerð en haldið var í fyrstu. Hitamælir losaður um kl. 12 og hitamælt upp. Stangir teknar upp í 798 m og farið í helgarfrí.

26. júní 2000

Hitamælt í stöngum niður á 760 m frá kl. 9:00 til 10:30. Strengur settur niður frá 789 m til 988 m. Halli mældur $1,1^\circ$ í 950 m. Hitamælt í 950 m frá kl. 12:30 til 14:30. Byrjað að bora og kom þá upp mikið af grófu svarfi. Skolað frá kl. 15:45 til 17:30. Teknar upp 6 stangir og skolað. Skolað í einn tíma í 800 m. Unnið við upptekt borstrengs.

27. júní 2000

Skol hreint í 375 m. Upptekt lokið um kl. 6. Víddarmælt frá kl. 7:30 til 11:00. Borstrengur settur niður eftir hádegi. Hreint skolvatn og ekkert svarf á 290 m. Hreint skolvatn og ekkert svarf á 450 m. Hreint skolvatn og ekkert svarf á 550 m. Rauðt skolvatn í smá tíma og smá svarf á 700 m.

28. júní 2000

Hreint skolvatn í 800 m. Komið í fyrirstöðu á 833,5 m. Skolað í 829 m til 839 m og kom mikið svarf upp. Á hádegi hætti að falla undir krónu í 858 m. Farið niður í 876 m og skolað. Það hrundi ofan á krónu á leiðinni upp þegar tekið var upp í 820 m. Farið niður aftur og fannst fyrirstaða í 838,5 m. Skolað í 838 m til 848 m frá kl. 14:00 til 16:00. Hrun í 830,5 m og skolað til kl. 24:00.

29. júní 2000

Byrjað að hreinsa holu um kl. 5:30. Fyrirstaða í 840 m til 843 m. Skolað í 839 m til 848 m til 13:30. Leðja sett í holuna í von um að hún haldist opin. Fyrirstaða í 840 m. Upptekt lokið um 22:30 og mælingar hefjast.

30. júní 2000

Mælingum lokið um kl. 3:50. Víddarmælir stoppar í 834 m. Ákveðið að fara niður með stangir. Fyrirstaða í 839 m. Steypt úr 5 m^3 steypu í 836 m og dælt á eftir 2000 l vatns. Stangir teknar upp og króna sett niður.

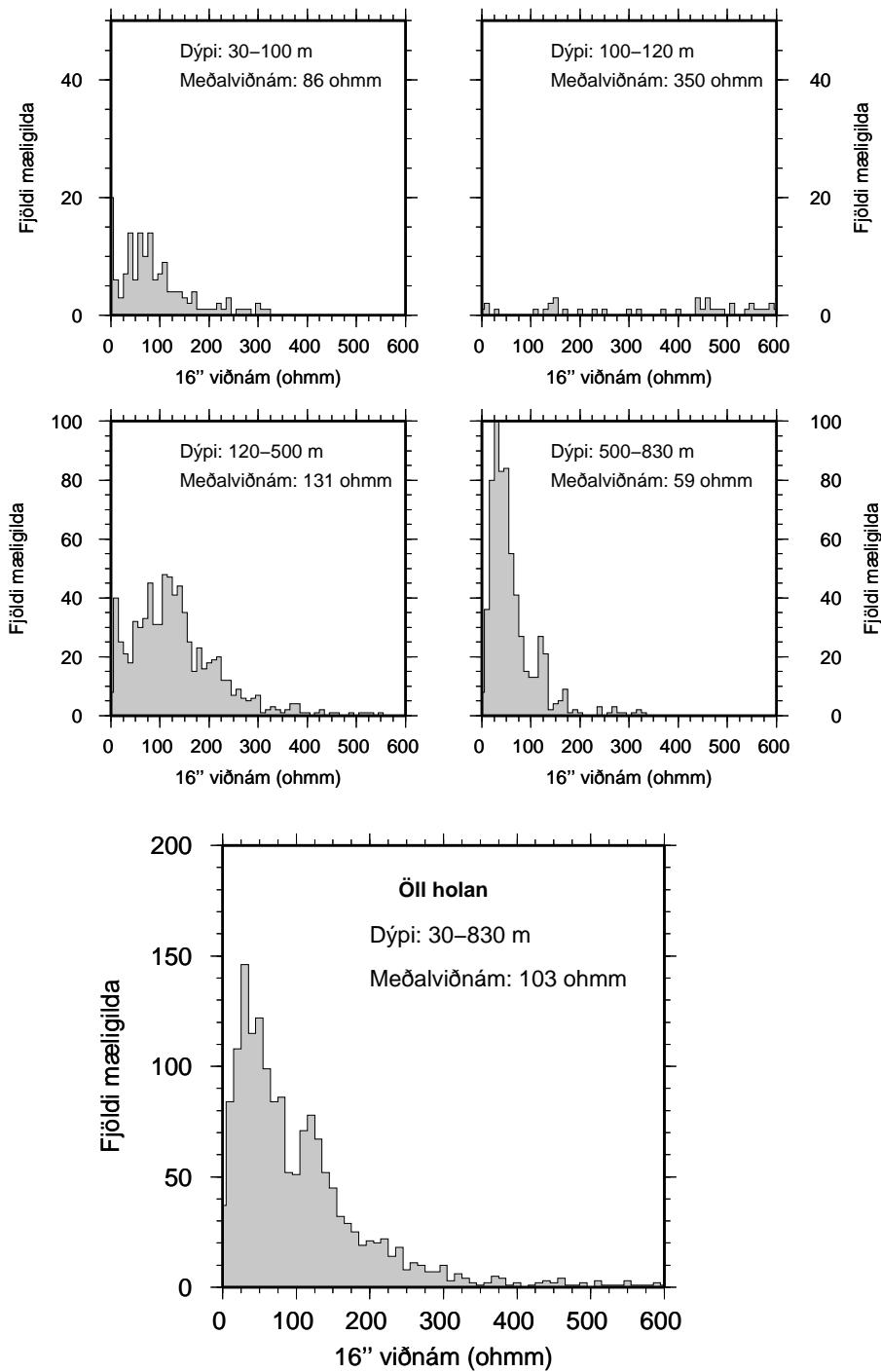
1. júlí 2000

Komið í steypu á 796 m dýpi. Preifað á steypu fram eftir degi og dælt á milli. Farið niður í 808 m en steypan var of lin.

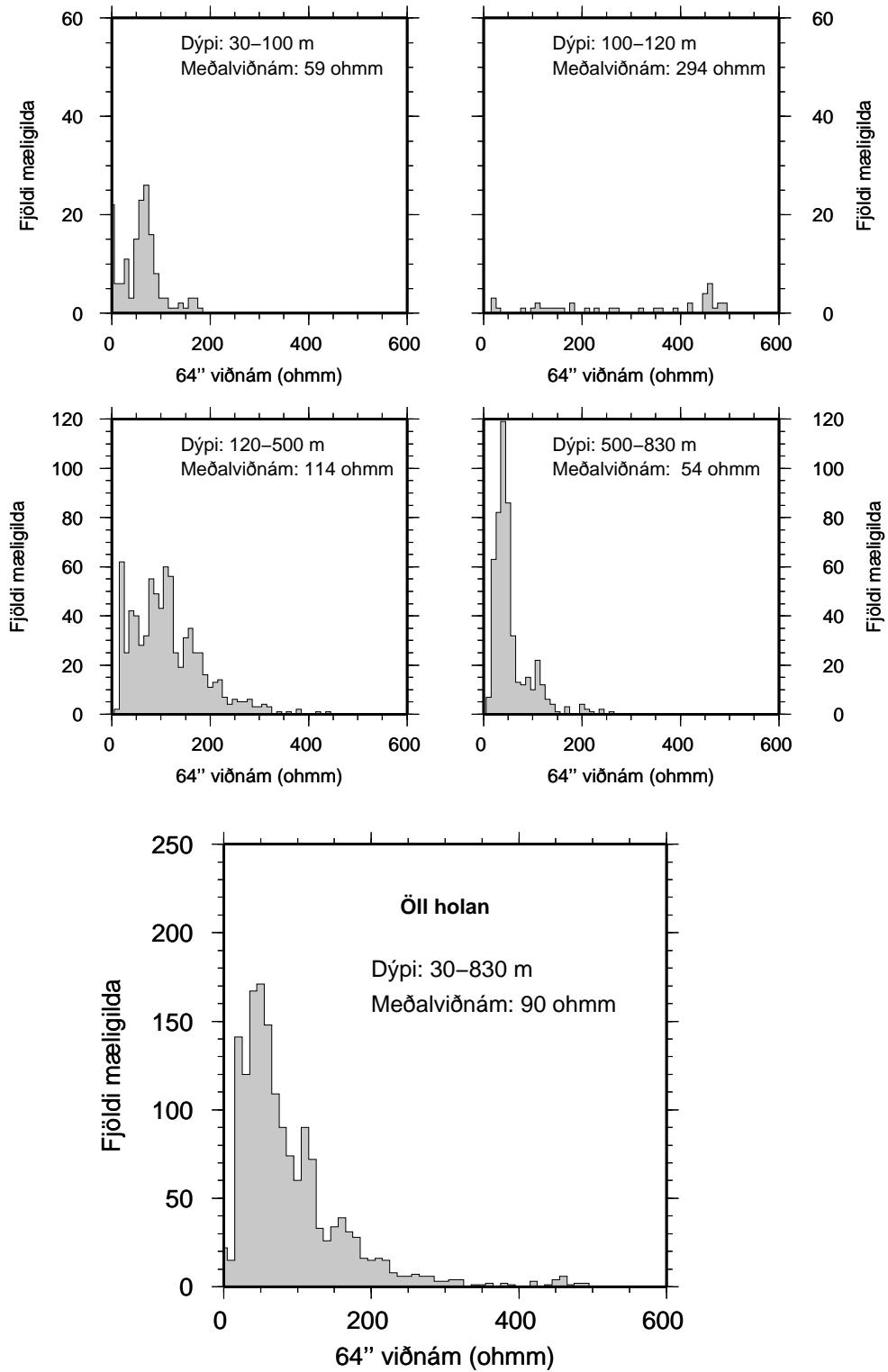
2. júlí 2000

Mjúk steypulögn niður á 834 m. Komið í harða steypu í 834 m. Komið niður úr steypu í 839 m. Þá var hífð upp ein stöng en þegar farið var niður aftur var undir krónu síðustu 3 metrana. Það var híft og slakað og skolað frá kl. 5:40 til 8:30. Mikið svarf kom upp. Eftir það var tekið upp. Frárennsli breytt fyrir loftdælingu. Holan gaf í loftblæstri á um 100 m dýpi um 21/s. Borverki er lýkur þennan dag.

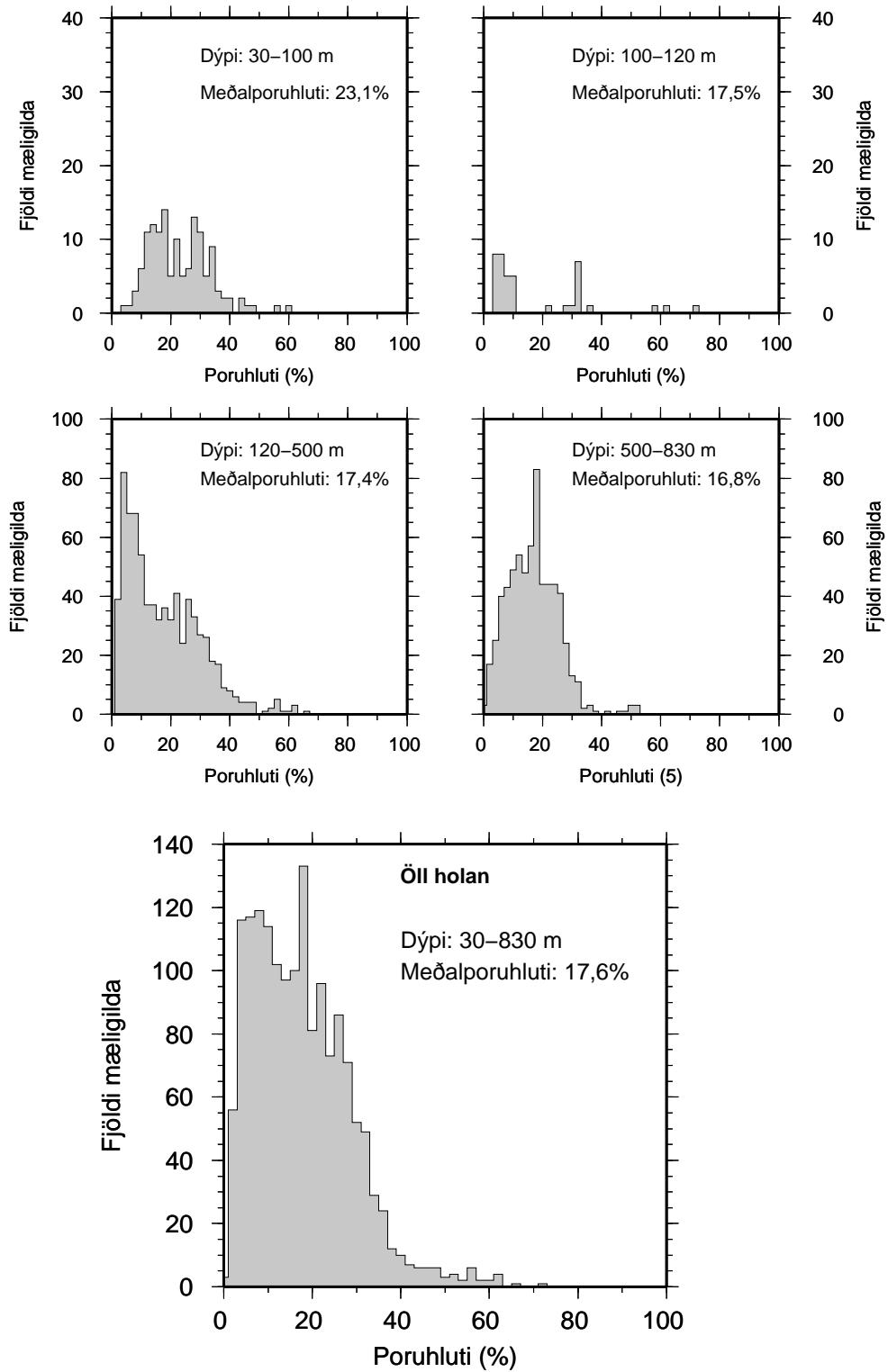
Viðauki B: Tíðnidreifing mældra og reiknaðra berg-eiginleika í holu ST-16



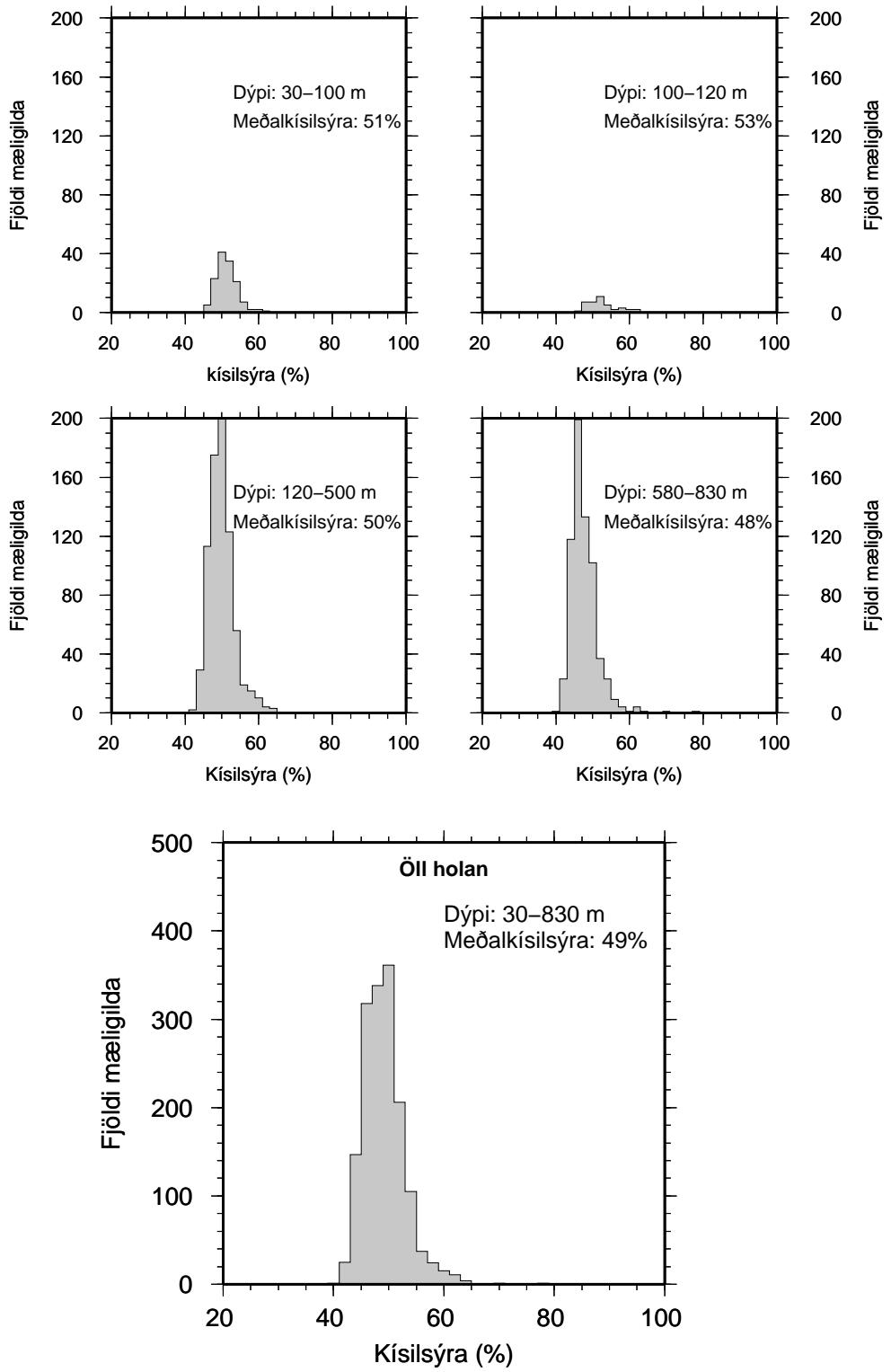
Mynd B.1: Tíðnidreifing 16'' viðnáms í holu ST-16.



Mynd B.2: Tíðnidreifing 64'' viðnáms í holu ST-16.

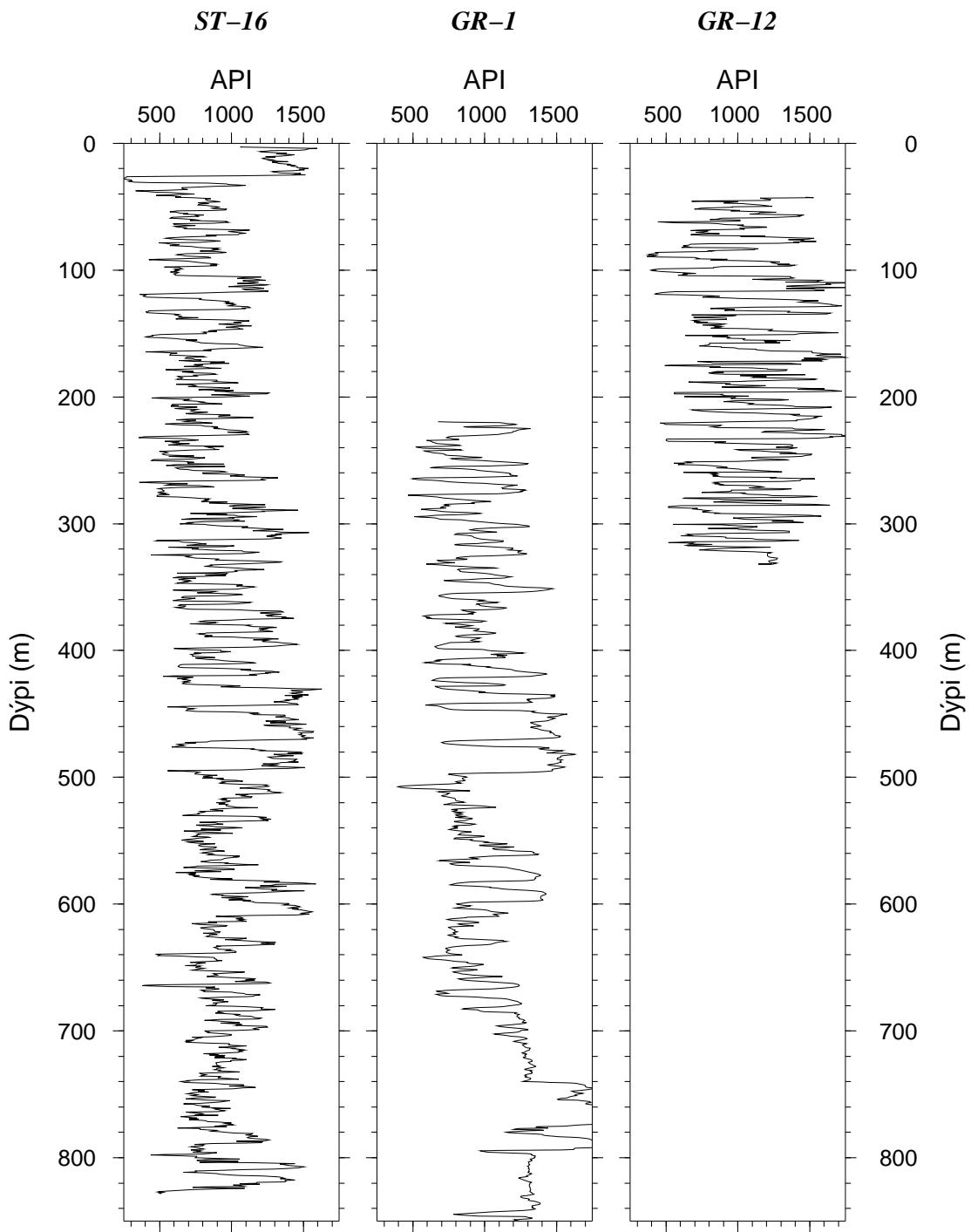


Mynd B.3: Tíðnidreifing poruhluta í holu ST-16.

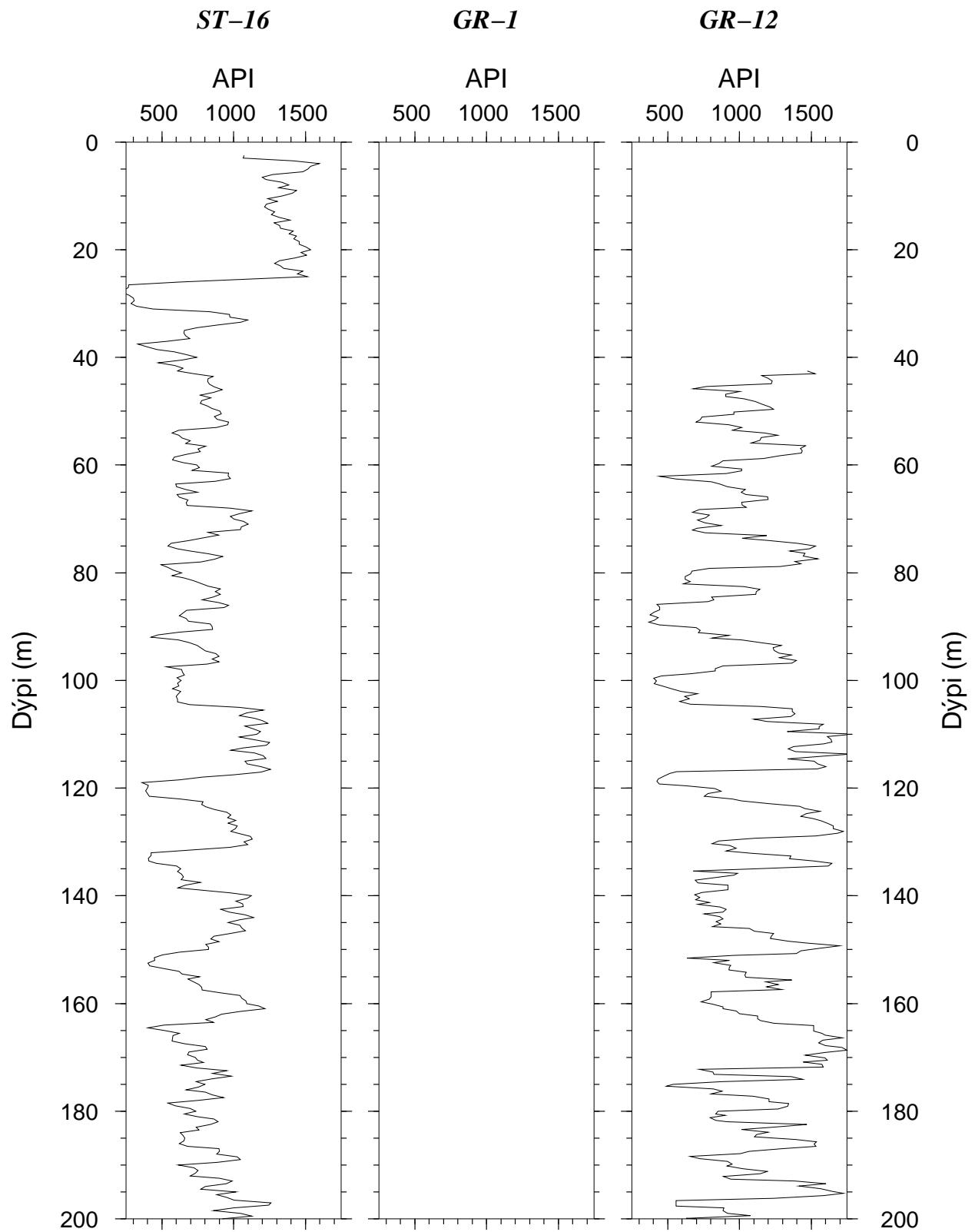


Mynd B.4: Tíðnidreifing kísilsýru í holu ST-16.

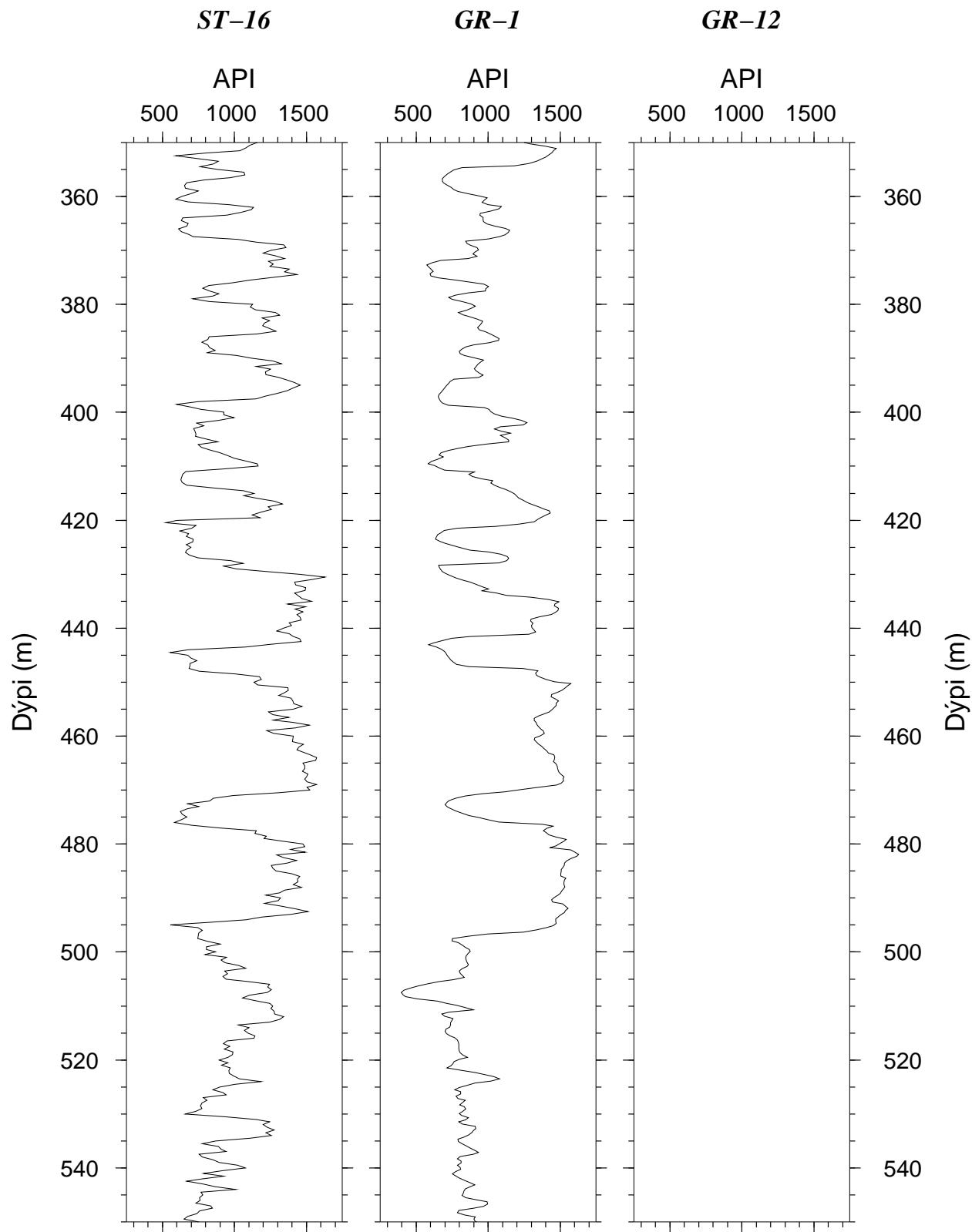
Viðauki C: Samanburður á nifteindamælingum



Mynd C.1: Nifteindamælingar í holum *ST-16*, *GR-1* og *GR-12* á dýpisbili 0–850 m. Mælingum í *GR-1* og *GR-12* er hliðrað m.v. holu *ST-16*. Athugið að dýpiskvarðinn á aðeins við holu *ST-16*.



Mynd C.2: Nifteindamælingar í holum ST-16, GR-1 og GR-12 á dýpisbili 0–200 m. Mælingum í GR-1 og GR-12 er hliðrað m.v. holu ST-16. Athugið að dýpiskvarðinn á aðeins við holu ST-16.



Mynd C.3: Nifteindamælingar í holum ST-16, GR-1 og GR-12 á dýpisbili 350–550 m. Mælingum í GR-1 og GR-12 er hliðrað m.v. holu ST-16. Athugið að dýpiskvarðinn á aðeins við holu ST-16.

Viðauki D: Vatnsborðsmælingar í borholum ST-16 og ST-15

Tafla D.1: *Vatnsborðsmælingar í holu ST-16 (mælt frá holutoppi).*

Dags	ST-16 (m)	Dags	ST-16 (m)	Dags	ST-16 (m)
2000.07.17	25.6	2001.03.12	25.1	2001-11-26	24.6
2000.07.17	25.7	2001.03.19	25.1	2001-12-03	24.6
2000.07.24	26.0	2001.03.26	25.1	2001-12-10	24.6
2000.07.31	26.1	2001.04.02	25.8	2001-12-17	24.7
2000.08.07	26.2	2001.04.09	25.0	2001-12-31	24.4
2000.08.14	26.3	2001.04.16	25.2	2002-01-07	24.4
2000.08.21	26.4	2001.04.23	25.0	2002-01-14	24.3
2000.08.28	26.5	2001-04-30	25.7	2002-01-21	24.4
2000.09.04	26.4	2001-05-14	24.8	2002-02-18	24.5
2000.09.11	26.5	2001-05-21	25.1	2002-03-05	24.6
2000.09.18	26.7	2001-05-28	25.8	2002-03-12	24.7
2000.09.25	26.5	2001-06-04	24.8	2002-03-19	24.6
2000.10.02	26.2	2001-06-11	24.9	2002-03-26	24.7
2000.10.09	26.4	2001-06-18	25.1	2002-04-02	24.7
2000.10.16	26.3	2001-06-25	25.2	2002-04-09	24.7
2000.10.23	26.5	2001-07-02	25.3	2002-04-16	24.7
2000.10.30	26.1	2001-07-09	25.3	2002-04-23	24.8
2000.11.06	26.3	2001-07-16	25.4	2002-04-30	24.8
2000.11.13	26.0	2001-07-23	25.3	2002-05-07	24.9
2000.11.20	26.1	2001-07-30	25.5	2002-05-14	24.9
2000.11.27	26.9	2001-08-06	25.5	2002-05-21	24.9
2000.12.04	25.7	2001-08-13	25.4	2002-05-28	25.0
2000.12.11	25.5	2001-08-20	25.5	2002-06-04	25.0
2000.12.18	25.4	2001-08-27	25.7	2002-06-11	25.0
2000.12.25	25.4	2001-09-03	25.6	2002-06-25	25.5
2001.01.01	25.3	2001-09-10	25.8	2002-07-02	25.5
2001.01.08	25.3	2001-09-17	25.9	2002-07-16	25.1
2001.01.15	26.2	2001-09-24	25.8	2002-07-23	25.3
2001.01.22	25.0	2001-10-01	25.8	2002-07-30	25.5
2001.01.29	25.1	2001-10-08	25.5	2002-08-06	25.5
2001.02.05	25.1	2001-10-15	25.6	2002-08-13	25.5
2001.02.12	25.0	2001-10-22	25.4	2002-08-20	25.6
2001.02.19	25.2	2001-10-29	25.5	2002-08-27	25.7
2001.02.26	25.2	2001-11-05	25.0	2002-09-03	25.8
2001.03.05	25.1	2001-11-12	24.9	2002-09-10	25.7

Tafla D.2: Vatnsborðsmælingar í holu ST-15 (mælt frá holutoppi).

Dags	ST-15 (m)
2000.09.25	35.5
2000.10.02	34.5
2000.10.09	34.8
2000.10.16	34.7
2000.10.23	34.6
2000.10.30	34.5
2000.11.06	34.3
2000.11.13	34.1
2000.11.20	34.4
2000.11.27	34.1
2000.12.04	33.2
2000.12.11	32.4
2000.12.18	32.5
2000.12.25	33.2
2001.01.01	32.8
2001.01.08	31.8
2001.01.15	31.8
2001.01.22	31.5
2001.01.29	31.7
2001.02.05	31.5
2001.02.12	31.5
2001.02.19	31.4
2001.02.26	31.5
2001.03.12	31.6
2001.03.19	31.6
2001.04.02	32.0
2001.04.16	31.6
2001.04.23	31.3