



Jarðfræði og jarðhitaummyndun við vesturjaðar sigdældar Hengils

Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir



**Jarðvísindadeild
Háskóli Íslands
2011**

Jarðfræði og jarðhitaummyndun við vesturjaðar sigdældar Hengils

Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir

90 eininga ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í jarðfræði

Leiðbeinendur
Hjalti Franzson
Björn Sverrir Harðarson
Níels Örn Óskarsson

Prófdómari / Fulltrúi deildar
Vigdís Harðardóttir

Jarðvísindadeild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, nóvember 2011

Jarðfræði og jarðhitaummyndun við vesturjaðar sigdældar Hengils
90 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í jarðfræði

Höfundarréttur © 2011 Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir
Öll réttindi áskilin

Jarðvísindadeild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Askja, Sturlugötu 7
107 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:
Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, 2011, *Jarðfræði og jarðhitaummyndun við vesturjaðar sigdældar Hengils*, meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 242 bls.

Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, nóvember 2011

Útdráttur

Aðaláhersla þessarar rannsóknar er á vesturjaðar sigdældar Hengils og voru þrjár borholur rannsakaðar ítarlega í því skyni að kortleggja jarðlög, innskot og ummyndun á svæðinu og skoða tengsl lektar við jarðfræðilega þætti á borð við innskot og jarðlagamót. Tvær holanna, HE-31 og HE-33, eru boraðar frá vestanverðu Skarðsmýrarfjalli og samanstendur jarðlagstaflinn þar af móbergseiningum allt niður á um 1500 m dýpi þegar komið er í hraunlagasyrpu. Sú þriðja, HE-46, er boruð frá Kolviðarhóli og samanstendur jarðlagastaflinn þar af móbergseiningum frá jökulskeiðum og hraunlögum frá hlýskeiðum. Innskot úr þróðu bergi eru fremur algeng í holunum og er það talið tengjast nálægð þeirra við Sleggju. Ummyndun er keimlík í HE-31 og HE-33 allt niður á um 1000 m dýpi en liggur grynna í HE-46 og er ástæða þess talin tengjast jarðhitavirkni undir jökulfargi. Samanburður á ummyndunar- og berghita í holunum sýnir ýmist jafnvægi eða kólnun á svæðinu. Út frá kortlagningunni voru valin svarfsýni úr átta borholum á svæðinu sem talin eru endurspeglar bergfræðilegt umhverfi þess til að rannsaka myndun leirsteinda í mismunandi bergi, með tilliti til kristalgerðar og efnasamsetningar. Niðurstöður benda til þess að magn Fe(III) í leirhluta sýnanna (korn $>2 \mu\text{m}$) aukist mjög með dýpi auk þess sem vatnsmagn leirhlutans lækkar verulega. Þessi þróun gæti átt þátt í að skýra þær viðnámsbreytingar sem einkenna íslensk háhitakerfi, þar sem lágviðnámskápa umlykur háviðnámskjarna dýpra í kerfinu. Almenn virðist engin fylgni vera milli hlutfalls aðalefna í leirhlutanum og heildarsýnunum. Leirsteindir virðast því frekar endurspeglar efnasamsetningu myndunarumhverfisins og efnaflutning jarðhitavökvans fremur en efnasamsetningu grannbergsins sem leirsteindirnar myndast í.

Abstract

The main focus of this study is on the western margin of the Hengill volcanic system. The stratigraphy was studied in three wells; HE-31 and HE-33 in Skarðsmýrarfjall mountain and HE-46 near Kolviðarhóll. The stratigraphy of wells HE-31 and HE-33 is characterized by hyaloclastite formations down to 1500 m b.s.l. while the stratigraphy of well HE-46 consists of hyaloclastites and interglacial lava flow. Intermediate intrusions are common in the wells, presumably due to the neighbouring Sleggja, where intermediate formations are found on the surface. Temperature dependent alteration minerals appear at similar depths in HE-31 and HE-33 down to 1000 m, but at shallower depths in HE-46, most likely due to a geothermal episode during glacial periods. Comparison of formation temperatures with the first appearance of temperature dependent alteration minerals show either cooling of the geothermal system or equilibrium. The results of the study of HE-31, HE-33 and HE-46 were used to select 30 samples of cuttings from eight wells in the area, presumed to represent the local geological settings to study the chemical composition and crystal structure of clay minerals in different formations. The results indicate increasing amount of Fe(III) and decreasing amount of H₂O with increasing depth. This development may be the cause for the change seen in resistivity in geothermal areas in Iceland, where a low-resistivity cap overlies a high-resistivity core deeper in the geothermal system. Generally no correlation is seen between the concentrations of the main elements in the clay-samples (particles >2 µm) and the bulk samples. The clay minerals are therefore thought to represent the regional chemical composition and the chemical transport of the geothermal fluid rather than the chemical composition of the host rock of the clay minerals.

Þessi ritgerð er tileinkuð móðurömmu minni, Ellen Helgu Guðmundsdóttur, og móðurafa mínum, Ólafi H. Stephensen, sem ferðuðust með mér um Ísland og vöktu þann áhuga sem nú kristallast í þessari ritgerð.

Efnisyfirlit

Myndir	xv
Töflur	xviii
Þakkir	xix
1 Inngangur	1
1.1 Jarðfræði Hengils	4
1.2 Jarðhiti í Hengli	7
2 Jarðlög, ummyndun og lekt í holum HE-31, HE-33 og HE-46	11
2.1 Sýnataka og rannsóknaraðferðir	15
2.1.1 Sýnataka	15
2.1.2 Greining svarfs í víðsjá	15
2.1.3 Greining svarfs í bergfræðismásjá	16
2.1.4 XRD-greiningar	16
2.1.5 Vökvabólurannsóknir	16
2.1.6 Borgögn og jarðlagamælingar	17
2.2 Jarðlög	18
2.2.1 Jarðlög í holum HE-31 og HE-33 á Skarðsmýrarfjalli.	19
2.2.2 Jarðlög í holu HE-46 við Kolviðarhól	24
Tengingar milli hola við vesturjaðar sigdældar Hengils.....	28
2.3 Innskot	32
2.3.1 Innskot í HE-31	33
2.3.2 Innskot í HE-33	35
2.3.3 Innskot í HE-46	37
2.3.4 Innskotatíðni	39
2.4 Lekt	43
2.4.1 Vatnsæðar í holu HE-31	44
2.4.2 Vatnsæðar í holu HE-33	46
2.4.3 Vatnsæðar í holu HE-46	48
2.4.4 Stærð og dreifing vatnsæða og tengsl þeirra við jarðfræðilega þætti	50
2.5 Ummyndun	53
2.5.1 Ummyndun frumsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46	55
2.5.2 Dreifing ummyndunarsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46	61
2.5.3 Ummyndunarhiti og berghiti í HE-31, HE-33 og HE-46	77
2.5.4 Útfellingaraðir	83
2.5.5 Vökvabólurannsóknir í holu HE-46	88
2.6 Samantekt	90
3 Myndun leirsteinda og oxun járn í borholum á Hellsheiði	93
3.1 Sýnasafnið	95
3.2 XRD-greiningar á kristalgerð leirsteinda	98
3.3 Efnagreining á svarfsýnum og leirhluta þeirra	103

3.3.1	Vatnsmagn í berg- og leirsýnum og oxunarstig leirhlutans.....	106
3.3.2	Samsetningarmunur borsvarfs og leirhluta þess	111
3.4	Örgreiningar á leir	118
3.5	Samantekt.....	123
4	Umræða	125
	Heimildir	127
	Viðaukar.....	133
	Viðauki A – Hönnunarforsendur HE-31, HE-33 og HE-46, staðsetningar og fódringadýpi.	133
	Viðauki B - Jarðlög í holum HE-31, HE-33 og HE-46	147
	Viðauki C – Innskot í HE-31, HE-33 og HE-46.....	177
	Viðauki D – Vatnsæðar í HE-31, HE-33 og HE-46	181
	Viðauki E – Hitamælingar í HE-31, HE-33 og HE-46	187
	Viðauki F –Gerð leirsýna.....	221
	Viðauki G – Framkvæmd XRD-greininga á leirsýnum.....	223
	Viðauki H - Efnagreining berg- og leirsýna með ICP-OES	225
	Viðauki I – Títurun leirsýna, Wilson aðferðin.....	227
	Viðauki J – Örgreiningar	229
	Viðauki K – Grein fyrir World Geothermal Congress(WGC) á Bali 2010	231

Myndir

Mynd 1.1 Staðsetning Hengils á jarðfræðikorti af Íslandi.....	4
Mynd 1.2 Yfirlitskort yfir jarðmyndanir í og við Hengil.. ..	6
Mynd 1.3 Niðurstöður viðnámsmælinga á Hellisheiði (TEM) við sjávarmál og á 500 m dýpi.....	7
Mynd 1.4 Undirsvæði jarðhitasvæðisins í Hengli; Nesjavellir, Hellisheiði, Bitra og Hverahlíð auk helstu örnefna.. ..	9
Mynd 2.1 Yfirlitskort af Hellisheiði. Svæðið sem rannsóknin beinist að er merkt með rauðum ferningi.	13
Mynd 2.2 Staðsetning HE-31, HE-33 og HE-46 á Hellisheiði.....	14
Mynd 2.3 Holuferlar HE-31 og HE-33 á SO-plani á Skarðsmýrarfjalli og HE-46 við Kolviðarhól. Horft til norðurs.	14
Mynd 2.4 Jarðlagasnið af HE-31 og HE-33 á SO-plani á suðvestanverðu Skarðsmýrarfjalli.	19
Mynd 2.5 Jarðlagasnið af HE-46 á plani HE-08 við Kolviðarhól.	24
Mynd 2.6 Jarðlagamyndanir og tengingar í HE-46, HE-31 og HE-33.....	28
Mynd 2.8 Jarðlagasnið og tengingar í holum við Kolviðarhól og á Skarðsmýrarfjalli.	31
Mynd 2.9 Jarðlagasnið í HE-31 sýnt með hliðsjón af dreifingu innskota.....	33
Mynd 2.10 Jarðlagasnið í HE-33 sýnt með hliðsjón af dreifingu innskota.....	35
Mynd 2.11 Jarðlagasnið í HE-46 sýnt með hliðsjón af dreifingu innskota.....	37
Mynd 2.12 Innskotatíðni í holum HE-31, HE-33 og HE-46.....	39
Mynd 2.13 Hitamælingar í holu HE-31.....	45
Mynd 2.14 Hitamælingar í holu HE-33.....	47
Mynd 2.15 Hitamælingar í holu HE-46.....	49
Mynd 2.16 Tenging vatnsæða við lagmót og innskot í holum HE-31, HE-33 og HE-46.	50
Mynd 2.17 Stærð og dreifing vatnsæða í HE-31, HE-33 og HE-46.....	52

Mynd 2.18 <i>Ummyndun frumsteinda í HE-31 (í miðju), HE-33 (hægra megin) og HE-46 (vinstra megin) ásamt ummyndunarbeltum.</i>	56
Mynd 2.19 <i>Þversnið sem sýnir ummyndunarbelti og efri mörk nokkurra hitaháðra ummyndunarsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46.</i>	63
Mynd 2.20 <i>Skýringar við dreifingu ummyndunarsteinda og jarðlagasnið.</i>	69
Mynd 2.21 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-31 frá 0-1000 m (mælt dýpi).</i>	70
Mynd 2.22 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-31 frá 1000-2100 m (mælt dýpi).</i>	71
Mynd 2.23 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-33 frá 0-1000 m (mælt dýpi).</i>	72
Mynd 2.24 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-33 frá 1000-2000 m (mælt dýpi).</i>	73
Mynd 2.25 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-46 frá 0-1000 m (mælt dýpi).</i>	74
Mynd 2.21 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-46 frá 1000-2000 m (mælt dýpi).</i>	75
Mynd 2.21 <i>Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-46 frá 2000-3000 m (mælt dýpi).</i>	76
Mynd 2.28 <i>Ummyndunarhitaferill (rauður) ásamt berghitaferli (appelsínugulur) í holu HE-31.</i>	79
Mynd 2.29 <i>Ummyndunarhitaferill (rauður) ásamt berghitaferli (appelsínugulur) í holu HE-33.</i>	80
Mynd 2.30 <i>Ummyndunarhitaferill (rauður) ásamt berghitaferli (appelsínugulur) í holu HE-46.</i>	81
Mynd 2.31 <i>Holufjarlar HE-31, HE-33 og HE-46 ásamt niðurstöðum samanburðar á berg- og ummyndunarhita.</i>	82
Mynd 2.32 <i>Vökvabólurannsóknir á plötukalsíti í HE-46.</i>	89
Mynd 3.1 <i>Grunneiningar leirsteinda - bygging kísillags (tetrahedral).</i>	94
Mynd 3.2 <i>Grunneiningar leirsteinda - bygging gibbsítlags (oktahedral.)</i>	94
Mynd 3.3 <i>Þversnið af því svæði þar sem sýni voru tekin fyrir leirgreiningar.</i>	95
Mynd 3.4 <i>Magn H₂O í berg- og leirsýnum.</i>	107
Mynd 3.5 <i>Magn H₂O í berg- og leirsýnum.</i>	108

Mynd 3.6 %Fe(III) magn í leirsýnum ákvarðað með Wilson-títrun sýnt sem fall af dýpi. Mismunandi kristalgerð leirsýnanna táknuð með mismunandi litum....	110
Mynd 3.7 Hlutfall Fe(III)/H ₂ O í leirsýnum sýnt sem fall af dýpi.....	110
Mynd 3.8 Magn CaO í svarfsýnum og leirhluta þeirra með vaxandi dýpi.....	112
Mynd 3.9 Magn TiO ₂ í svarfsýnum og leirhluta þeirra með vaxandi dýpi.....	112
Mynd 3.10 Magn K ₂ O í svarfsýnum og leirhluta þeirra með vaxandi dýpi.	113
Mynd 3.11 Magn FeO í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.	116
Mynd 3.12 Magn MgO í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.	116
Mynd 3.13 Magn Al ₂ O ₃ í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.	117
Mynd 3.14 Hlutfall Al ₂ O ₃ og SiO ₂ í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.	117
Mynd 3.15 Hlutfall MgO og Al ₂ O ₃ í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð er táknuð með mismunandi litum.	121
Mynd 3.16 Hlutfall K ₂ O og CaO+Na ₂ O í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð er táknuð með mismunandi litum.	121
Mynd 3.17 Hlutfall K ₂ O og MnO í leirsteindum.	122
Mynd 3.18 Hlutfall FeO og SiO ₂ í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð táknuð með mismunandi litum.	122

Töflur

Tafla 2.1 <i>Hitaháðar ummyndunarsteindir (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979; Hjalti Franzson, 1998).</i>	77
Tafla 2.2 <i>Útfellingaraðir í HE-31 og HE-33. Óvíst er með tímasamband milli lághita- og háhitaummyndunar og eru lághitaummyndunarraðir því merktar með bláu en háhitaummyndunarraðir með bleiku.</i>	85
Tafla 2.3 <i>Útfellingaraðir í HE-31 og HE-33, framhald.</i>	86
Tafla 2.4 <i>Útfellingaraðir í HE-4. Óvíst er með tímasamband milli lághita- og háhitaummyndunar og eru lághitaummyndunarraðir því merktar með bláu en háhitaummyndunarraðir með bleiku.</i>	87
Tafla 3.1. <i>Sýni valin fyrir greiningar á kristalgerð og efnasamsetningu leirsteinda</i>	97
Tafla 3.2. <i>Niðurstöður XRD-greininga á leirsýnum. Tafla sýnir grunnbil (d001) sýnanna og 060-kristalbilið þar sem það var greint auk flokkunar leirsteinda eftir kristalgerð.</i>	101
Tafla 3.3. <i>Yfirlit yfir kristalgerð leirsteinda, ummyndunarsteindir í sýnunum og myndanir sem sýnin eru úr.</i>	102
Tafla 3.4 <i>Niðurstöður ICP-greininga og glæðingar á bergsýnum (svarf).</i>	104
Tafla 3.5 <i>Niðurstöður ICP-greininga, glæðingar og FeO-títrunar á leirsýnum.</i>	105
Tafla 3.6. <i>Yfirlit yfir dýptarbil sem sýni eru tekin á, úr hvaða háhitaholu og úr hvers konar myndun. Einnig má sjá niðurstöður XRD-greininga á kristalgerð leirsteinda í leirhluta sýnanna.</i>	118
Tafla 3.6. <i>Niðurstöður örgreininga á leir.</i>	119

Þakkir

Mínar bestu þakkir fá þeir Hjalti Franzson og Björn S. Harðarson fyrir alla hjálpina, stuðninginn og hvatninguna við vinnu þessa verkefnis.

Ég vil einnig þakka Níelsi Erni Óskarssyni fyrir hjálpina við efnagreiningar, títranir og örgreiningar. Þá fær Gunnlaugur M. Einarsson þakkir fyrir aðstoð við gerð korta og vinnu við PETREL og Sigurður Sveinn Jónsson fyrir aðstoð við XRD-greiningar og fjölmörg samtöl um leir, leirgreiningar og undraveröld XRD.

ÍSOR, jarðhitaklasinn GEORG og Orkuveita Reykjavíkur fá þakkir fyrir að styrkja þetta verkefni.

Þá fá Náttúrustofa Vesturlands og Theódóra Matthíasdóttir mínar bestu þakkir fyrir að hýsa mig og hlúa að mér við skriftir í Stykkishólmi.

Loks vil ég þakka vinum mínum og fjölskyldu fyrir allan stuðninginn, ekki síst félögum mínum í meistaranáminu þeim Helgu Margréti Helgadóttur, Sveinborgu H. Gunnarsdóttur og mínum kæra Steinþóri Níelssyni fyrir ómetanlega hjálp og vináttu við vinnu þessa verkefnis.

1 Inngangur

Jarðfræði Hengils hefur verið rannsökuð ítarlega í tengslum við jarðhitanýtingu á svæðinu. Á árunum 1947-1949 voru gerðar yfirgripsmiklar rannsóknir í Hengli, Hveragerði og nágrenni sem Gunnar Böðvarsson fjallaði um í skýrslu sinni (1951). Niðurstöður þeirra rannsókna bentu til þess að jarðhitanýting í vesturhluta Hengils, á Hellisheiði, væri ekki hagkvæm, enda væri jarðhiti þar áberandi minni en á hinum svæðunum sem rannsóknin tók til. Möguleikar Hellisheiðar voru þó ekki útilokaðir, en frekari vitneskja fengist þó aðeins með a.m.k. 500 m djúpri borholu á þessum slóðum. Það var árið 1985 sem sú hugmynd varð að veruleika með borun KhG-1 við Kolviðarhól, en sú hola er 1816 m djúp. Síðan þá hafa verið boraðar 57 vinnsluholur og 17 niðurdælingarholur á svæðinu auk fjölda kaldavatns- og svelghola.

Undanfarin ár hafa þó nokkrar rannsóknir átt sér stað á Hellisheiði. Jarðfræði og ummyndun svæðisins hefur t.a.m. verið skoðuð ítarlega, m.a. af Hjalti Franzsyni (2005, 2010), Helgu M. Helgadóttur og félagum (2010, 2011) og Steinþóri Níelssyni (2010, 2011). Þá skoðuðu Daniel Larsson og félagar (2002) niðurbrot plagíóklaskristalla og myndun albíts og K-feldspats í holum NG-7 á Nesjavöllum og KhG-1 við Kolviðarhól.

Þessi ritgerð er afrakstur rannsókna sem gerðar voru í samstarfi ÍSOR, Háskóla Íslands, Orkuveitu Reykjavíkur og GEORG-jarðhitaklasans.

Markmið þessa verkefnis er að kortleggja jarðlög, innskot, ummyndun og lekt í þremur vinnsluholum á Hellisheiði við vesturjaðar sigdældar Hengils og fá þannig hugmynd um jarðfræði og ummyndunarsögu svæðisins. Kortlagningin var höfð til hliðsjónar þegar þrjátíu sýni voru valin sem ætlað er að endurspegla bergfræðilegan breytileika svæðisins með það að markmiði að skoða myndun leirsteinda í mismunandi bergi, bæði með tilliti til kristalgerðar og efnasamsetningar.

Vaxandi ummyndun við fergingu bergstaflans í gosbeltinu er greinilegust í kristalgerð leirsteindanna, enda getur efnasamsetning leirsteinda með ólíka kristalgerð verið mjög áþekkt. Með vaxandi hita og dýpi verða þó nokkrar breytingar í efnasamsetningu leirsins. Meginþróunin er á þann veg að sú leirsteind sem fyrst myndast við ummyndun staflans verður byggingarefni hitaþolnari leirsteinda þegar neðar dregur. Innan smektítzeólítabeltisins myndast leirsteindir á borð við smektít eða vermikúlít sem síðar þróast yfir í blandlagsleir (*e. mixed layer clay, MLC*) þar sem klórítlög fara að myndast milli smektítlaganna. Við enn hærri hita afvatnast blandlagsleirinn og verður sífellt klórítríkari þar til klórít, með aðeins lítils háttar smektítblöndun, verður ríkjandi.

Jónskiptahæfni leirsteinda veldur því að mismunandi samsetning bergs sem er að ummyndast getur komið fram í kristalgerð þeirra. Þetta á einkum við ummyndun þróaðs og kalíumríks bergs og myndun illíts, en lítill munur er á smektíti og illíti annar en K-jónin í illítinu, enda myndar illít blandleir með klóríti á sama hátt og smektít og vermikúlít. Auk þess innihalda flest illít-sýni smektít- eða klórítlög. Þá getur K-innihald illíts verið breytilegt þar sem Ca og Na geta staðgengið fyrir K (*Deer o.fl., 1992*).

Mikið er til af XRD-greiningum (*e. X-Ray Diffraction*) á kristalgerð leirsteinda í íslenskum jarðhitakerfum og hafa t.a.m. um tvö þúsund greiningar verið gerðar á kristalgerð leirsteinda í jarðhitakerfinu á Hellisheiði (*munleg heimild, Sigurður S. Jónsson, 2011*). Þessar greiningar gefa góða mynd af þróun kristalgerðar leirsteinda allt frá smektíti, mynduðu í basalti við berghita undir 200°C, í klórít myndað við berghita um eða yfir 230°C (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1976; Hjalti Franzson, 1998*).

Efnasamsetning leirsteinda í háhitakerfum á Íslandi hefur hins vegar lítið verið rannsökuð ef frá eru taldar efnagreiningar á leir úr IRDP-borholunni í Reyðarfirði þar sem Richard. A. Exley gerði örgreiningar á klóríti (*Exley, 1982*) og James Mehegan og félagar framkvæmdu örgreiningar á smektíti og klóríti (*Mehegan o.fl., 1982*). Þá gerðu Peter Schiffman og Guðmundur Ómar Friðleifsson örgreiningar á klóríti, blandlagsleir og smektíti úr holu NJ-17 á Nesjavöllum (*Schiffman & Friðleifsson, 1991*) og Steven W. Lonker og félagar örgreiningar á klóríti úr borholum á Rekjanesi og Svartsengi (*Lonker o.fl., 1993*). Örgreiningar á leir eru þó þeim annmörkum háðar að vandasamt er að skyggja leirsýni svo vel sé og því erfitt að fá nákvæmar greiningar.

Með því að greina efnasamsetningu grannbergsins sem leirsýnin eru tekin úr og bera saman við efnagreiningu á leirhluta sýnisins (korn < 2µm) má ráða nokkuð í samsetningu, vötnun og oxunarstig leirsteinda. Þó ber að hafa í huga að því fer fjarri að leirhlutinn sé eingöngu úr leirsteindum. Aðskilnaður leirhlutans úr svarfinu er framkvæmdur með hátíðnihljóðbylgjum sem mynda grugglausn af leirsteindum en óhjákvæmilega er alltaf einhver blöndun frá öðrum steindum. Algengast er að feldspöt, zeólítar og kalsít sé til staðar í sýninu í örsmáum kristöllum (*Moore & Reynolds, 1997*).

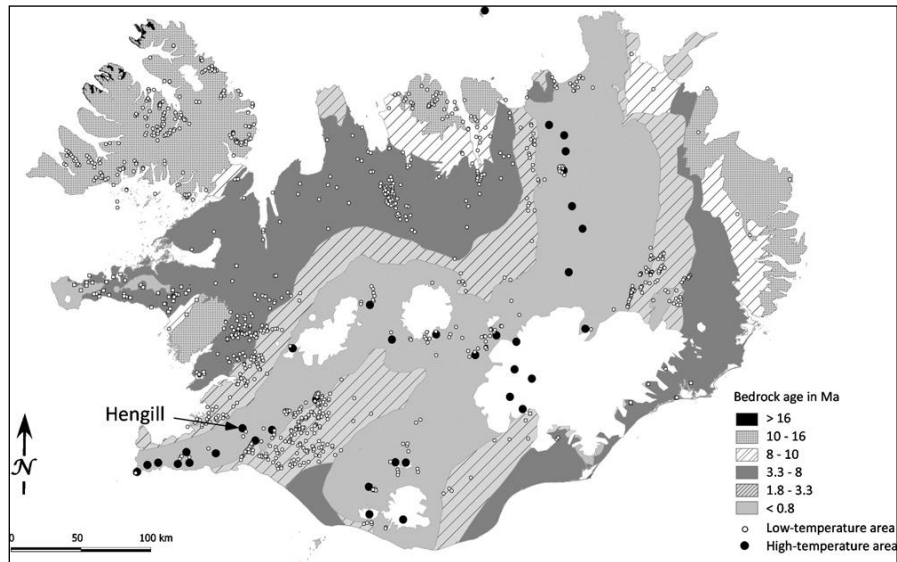
XRD-greining til að ákvarða kristalgerð leirsteindanna var framkvæmd á leirhluta allra sýnanna en auk þess voru leirsteindir og helstu ummyndunarsteindir fimm þunnsneiða af 210, 640, 690, 782 og 3055 m dýpi greindar með örgreini.

Í heild gefur verkefnið nokkuð glögga mynd af þróun leirsteinda með auknu dýpi og hita og jafnframt nokkra mynd af áhrifum samsetningar grannbergsins á efnasamsetningu og kristalgerð leirsteindanna.

Leirsteindir eru algengustu steindirnar sem myndast við ummyndun basalts í jarðhitakerfum. Í ummynduðu móbergi geta þær verið allt að 80-90% bergmassans og allt að 60% í basískum hraunlögum, en þær myndast við ummyndun basaltglers, ólivíns, pýroxens og einnig stundum við ummyndun á plagíóklas. Leirsteindir bregðast hraðar við hitabreytingum í jarðhitakerfinu en aðrar ummyndunarsteindir. Ástæða þess liggur í byggingu leirsteindanna, sem einkennist af mismunandi uppröðun mjög áþekkra blaðsilikata og jónaskiptahæfni þeirra. Jónaskiptahæfnin veldur því að samsetning leirsteinda er í sífelldum tengslum við samsetningu jarðhitavökvans og geta þær því nýst við túlkun á þróun jarðhitakerfa í tímans rás (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1975, 1979*).

1.1 Jarðfræði Hengils

Hengill er megineldstöð staðsett um 30 km austur af Reykjavík, á þrípunkti þar sem tvö virk gliðnunarbelti, hið skástíga Reykjanesbelti og vestra gosbeltið, tengjast Suðurlandsþverbrotabeltinu. Staðsetning Hengils er sýnd á mynd 1.1.



Mynd 1.1 Staðsetning Hengils á jarðfræðikorti af Íslandi. Lághitakerfi eru merkt með hvítum punktum og háhitakerfi með svörtu auk þess sem jarðmyndanir af mismunandi aldri eru merktar inn. (Knútur Árnason o.fl., 2010).

Hengill samanstendur að mestu leyti af móbergsmýndunum, sem hlaðist hafa upp á jökulskeiðum, umkringdum hraunum sem runnið hafa á hlýskeiðum út á láglandri svæði. Ísúrt og súrt berg hefur fundist á yfirborði í vesturjaðri eldstöðvarinnar en einnig hefur þróað innskotaberg verið greint í borholum á svæðinu (Hjalti Franzson o.fl., 2010; Kristján Sæmundsson, 1995).

Yfirlitskort yfir sprungureinar og nútímahraun á Hengilssvæðinu má sjá á mynd 1.2.

Í Hengilskerfinu eru tvær gosreinar. Aðalreinin, Hengilsrein er um 3-5 km breið og nær yfir kerfið enda á milli með um 40 km löngum, fullmótuðum sprungusveimi með sprungustefnuna NA-SV. Sigdalur liggur innan sprungusveimsins og er sig við vesturjaðar hans meira en 300 m, en austurjaðarinn hefur ekki verið kortlagður eins nákvæmlega. Það má þó leiða að því líkum að sig við austurjaðarinn sé á svipuðum nótum, en misgengissprungur eru enn tíðari við austurjaðarinn (Kristján Sæmundsson, í útgáfu; Hjalti Franzson o.fl., 2010; Knútur Árnason o.fl., 2010).

Eystri gosreinin, Hrómundartindsrein, er austan megin í Hengilskerfinu. Kjarninn í henni er í jaðrinum á eldri megineldstöð, Hveragerðiseldstöðinni. Fimm gos eru þekkt á nútíma í Hengilskerfinu. Það elsta er gos mjög snemma á nútíma úr Tjarnarhnjúk, sunnan við

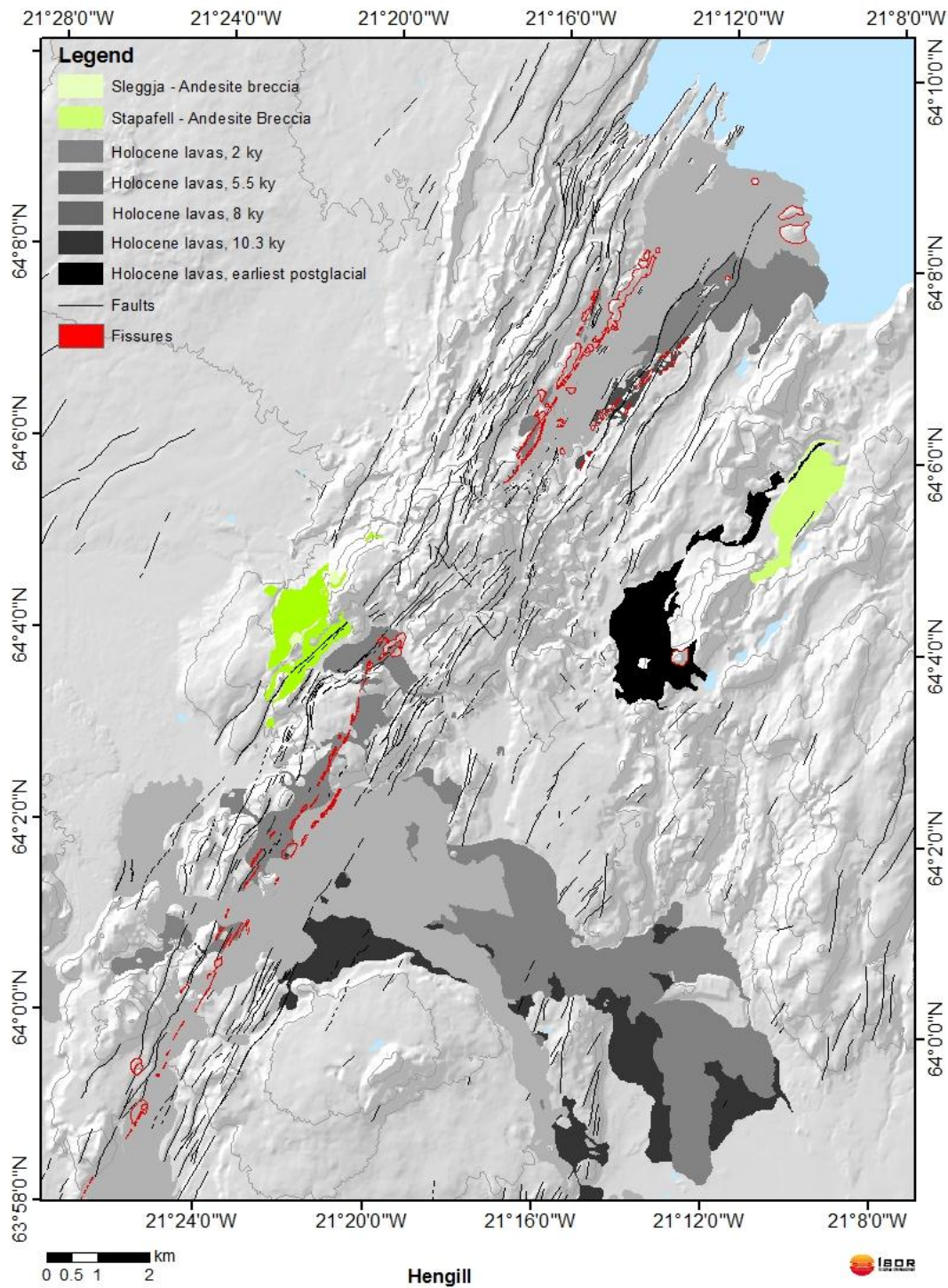
Hrómundartinda. Auk þess eru þekkt fjögur gos úr gossprungum á Hengilsrein (*Kristján Sæmundsson, 2002*).

Elsta gossprungan á Hengilsrein er sunnan Hengils og er hraunið úr henni nefnt *Hellisheiðarhraun a* af Trausta Einarssyni (*1951*). Lífrænar leifar sem fundust undir því reyndust um 10.000 ára. Næst að aldri er *Stangarhálshraun* í Uppgrafningi. Illa hefur gengið að finna samsvörun þessa hrauns sunnan Hengils. Jafnvel er talið að það hafi runnið úr gossprungu í Innstadal og styrktist sá grunur þegar gossprungu fannst austan í Reykjafelli. Það hraun hefur runnið niður Hellisskarð og er aldur þessara hrauna á að gíska um 8000 ár. Þriðja í röðinni er *Hagavíkurhraun* norðan Hengils og *Hellisheiðarhraun b/c* sunnan Hengils, en þau hraun sem aðgreind voru sem b og c reyndust vera hrauntungur úr sama gosi. Þessar myndanir eru samtíma samkvæmt þykkt jarðvegs á þeim en fjórar aldursgreiningar liggja fyrir, allar á Hellisheiðarhrauninu og gefa sama aldur innan skekkjumarka um 5700-5800 ár. Yngstu hraun úr Hengilsreininni eru *Nesjahraun* og *Hellisheiðarhraun d*, bæði aldursgreind og er aldur þeirra um 2000 ár. Aldursmunur á þessum hraunum gæti verið nokkur en talið er að þau tilheyri sömu „eldum“ (*Kristján Sæmundsson, í útgáfu, 2002*).

Auk Hengils og Hrómundartinds finnst megineldstöð norðan Hengilskerfisins sem kennd er við Grændal, eða Grensdal. Hún er talin hafa verið virk fyrir um 0,3-0,7 milljón árum en virkni hennar er talin hafa fjarað út við rek hennar til aust-suðausturs út úr gliðnunarbeltinu og flust til vesturs í Hengil og Hrómundartind. Gossprungurnar raða sér í norðausturstefnu og er sú elsta, Grændalur, nyrst en Hengill syðstur (*Foulger & Toomey, 1989*).

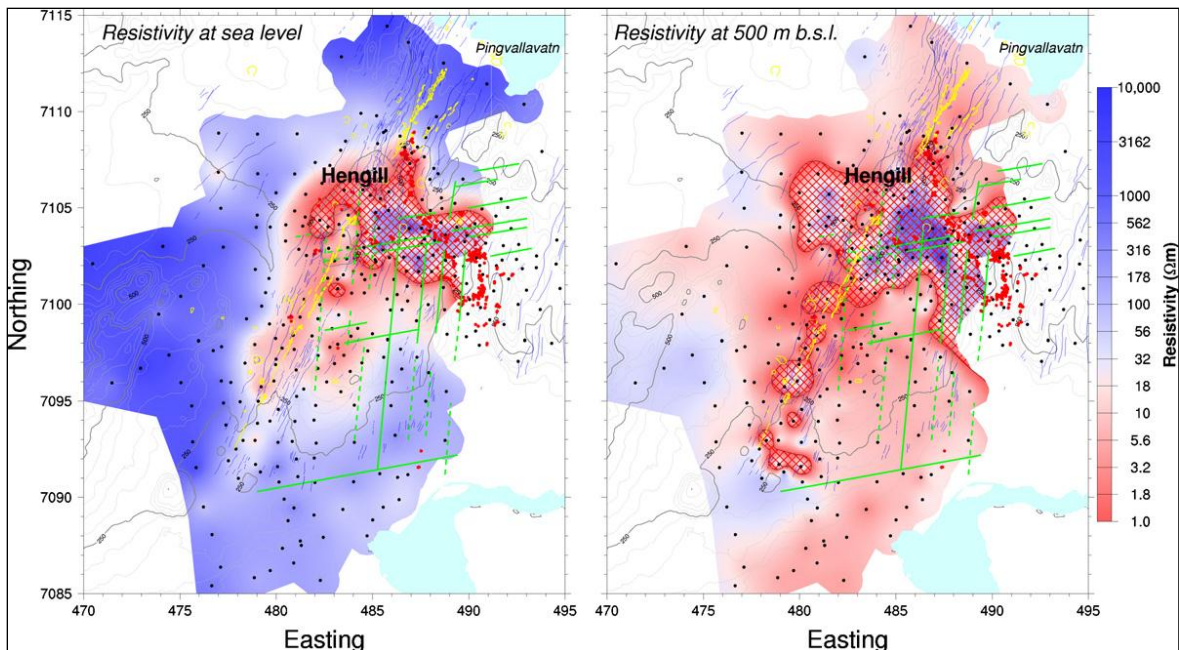
Hengill er virkt jarðskjálftasvæði og virðist virknin vera af tvennum toga; annars vegar vegna gliðnunar í tengslum við sprungusveiminn líkt og átti sér stað árið 1789 og hinsvegar vegna tengsla svæðisins við suðurlandsbrotabeltið. Mikil virkni af þeim toga varð í austurhluta Hengils á tímabili frá 1991-2001 þegar mælanet Veðurstofunnar skráði yfir 90.000 jarðskjálfta á svæðinu. Virknin náði yfir svæði með stefnuna N-S og ANA-VSV, suðaustan við sjálfan Hengil en virtist deyja út í norðvesturhluta sprungusveimsins.

Umtalsvert landris, allt að 18 mm/ár, sem varð í nágrenni Bitru á tímabilinu frá 1993-1998 er talin tengjast innskotum í efri hluta jarðskorpunnar (*Knútur Árnason o.fl., 2010*).



Mynd 1.2 Yfirlitskort yfir jarðmyndanir í og við Hengil. Nútímahraun eru merkt í gráum tónum eftir aldri, ljósustu yngst. Þróað berg er merkt í grænleitu tónum og gossprungur með rauðu (Steinþór Níelsson, 2011).

1.2 Jarðhiti í Hengli



Mynd 1.3 Niðurstöður viðnámsmælinga á Hellisheiði (TEM) við sjávarmál og á 500 m dýpi. Jarðskjálftasprungur eru sýndar með grænu, gossprungur með gulu og yfirborðssprungur með svörtu. Rauðir punktar tákna ummerki um jarðhita á yfirborði og svartir punktar tákna TEM-stöðvar. Fjarlægðir eru gefnar í kílómetrum. (Knútur Árnason o.fl. 2010).

Mikill jarðhiti er í nágrenni Hengils og er jarðhitasvæðið eitt það stærsta á Íslandi.

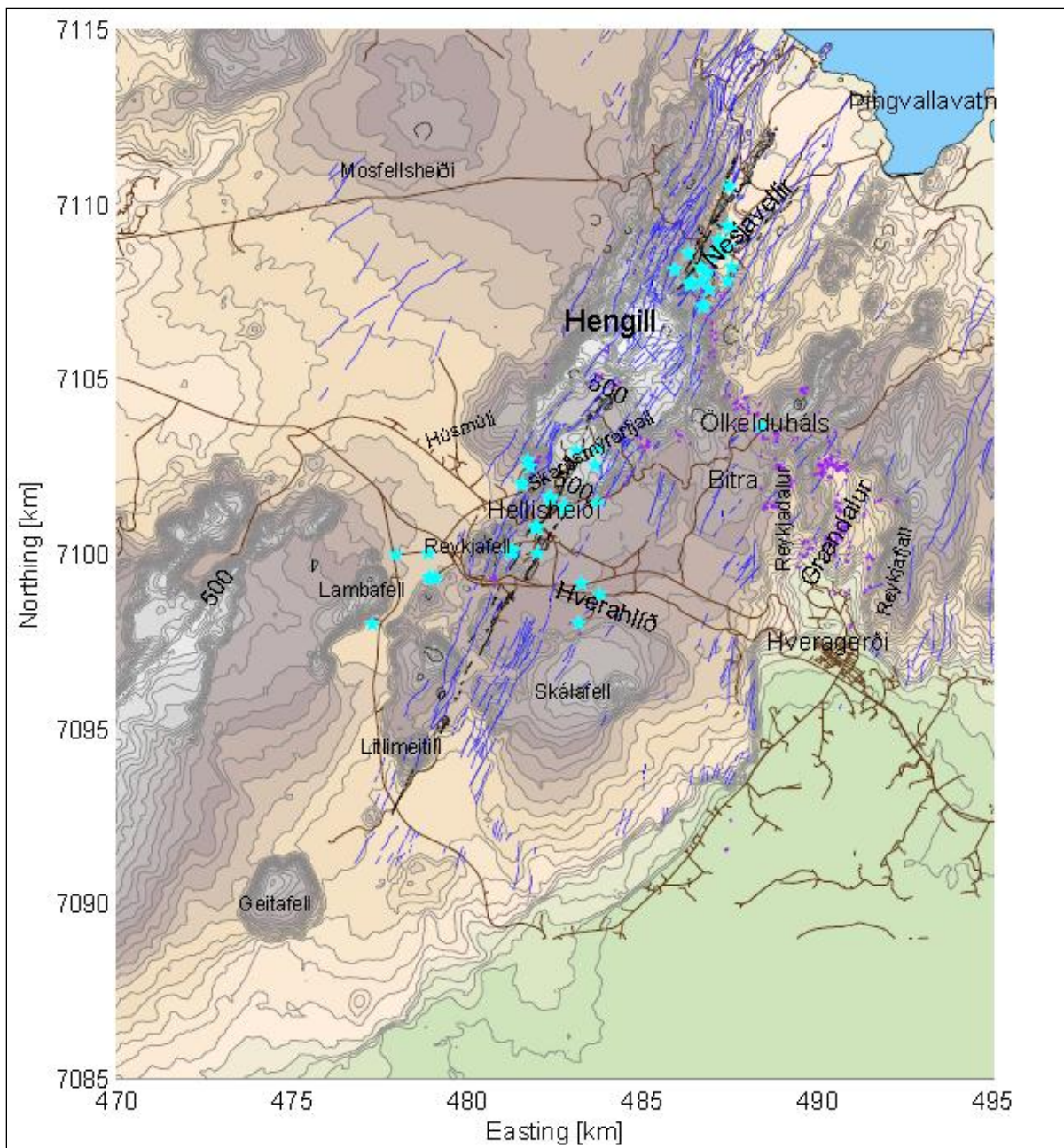
Rannsóknir á háhitakerfum á Íslandi (t.d. Knútur Árnason o.fl., 2010) sýna að þau einkennast af lágviðnámskápu (1-10 Ω) sem umlykur háviðnámskjarna dýpra í jarðhitakerfinu. Þessar breytingar á viðnámi í berginu tengjast ummyndun bergsins og þróun ummyndunarsteinda úr smektíti og zeólítum við 50- 200°C í blandlagsleir við 200-230°C, þar sem klórítlög fara að myndast á kostnað smektíts, og þaðan í klórít-epidótbeltið við um 230°C þar sem klórít er ríkjandi.

Jarðhitasvæðið á Hengilssvæðinu er talið tengjast um 110 km² lágviðnámskápu sem staðsett hefur verið með viðnámsmælingum og sýnd er á mynd 1.3. Því er oft skipt í fjögur undirsvæði; Nesjavelli í norðri, Bitru í norðaustri, Hellisheiði í suðri og Hverahlíð í suðaustri og eru þau sýnd á mynd 1.4.

Orkuveita Reykjavíkur hefur nýtt jarðhitann á Nesjavöllum og Hellisheiði til rafmagns- og heitavatnsframleiðslu og er þar mesta jarðhitánýting á Íslandi. Auk þess hafa rannsóknarboranir verið framkvæmdar í Bitru og í Hverahlíð.

Nesjavallavirkjun hefur verið starfrækt frá árinu 1987 og framleiðir 120 MWe af rafmagni og 290 MWt af heitu vatni. Fyrsta rannsóknarholan á Hellisheiði var boruð við

Kolviðarhól við vesturjaðar svæðisins árið 1985. Síðan þá hafa 57 vinnsluholur og 17 niðurdælingarholur verið boraðar á svæðinu sem allar eru á bilinu 800-3000 m djúpar. Hellisheiðarvirkjun hóf starfsemi sína árið 2006 með gangsetningu tveggja 45 MW túrbína, og í dag eru þar framleidd 303 MWe af rafmagni og 133 MWt af heitu vatni.



Mynd 1.4 Undirsvæði jarðhitasvæðisins í Hengli; Nesjavellir, Hellisheiði, Bitra og Hverahlíð auk helstu örnefna. Bláar stjörnur tákna borholur á svæðinu (Guðni K. Rosenkjær, 2011).

2 Jarðlög, ummyndun og lekt í holum HE-31, HE-33 og HE-46

Aðaláhersla þessarar rannsóknar er, sem fyrr segir, á jarðhitakerfið á Hellisheiði og vesturjaðar sigdældar Hengils.

Þrjár vinnsluholur hafa verið rannsakaðar ítarlega í því skyni að skoða jarðlög, ummyndun, lekt og dreifingu innskota á þessum slóðum með það að markmiði að fá gleggri mynd af jarðfræði og ummyndunarsögu svæðisins. Gerð er grein fyrir niðurstöðum þeirrar rannsóknar í þessum kafla. Auk þess er myndun leirsteinda á svæðinu skoðuð sérstaklega en fjallað er um þann hluta rannsóknarinnar í kafla 3.

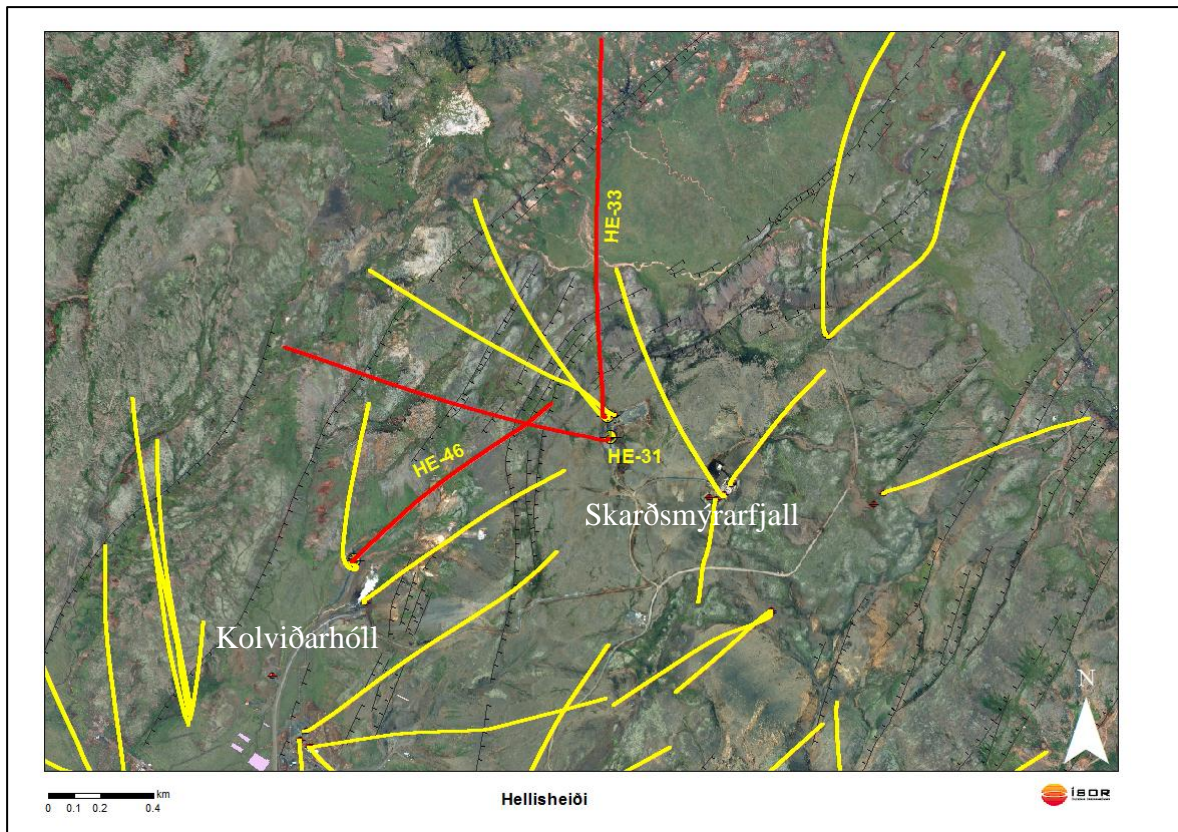
Holurnar sem valdar voru eru holur HE-31 og HE-33, sem staðsettar eru á vestanverðu Skarðsmýrarfjalli og hola HE-46 sem staðsett er við Kolviðarhól (Mynd 2.1 2.1 og 2.2.) en þær voru allar boraðar í þeim tilgangi að kanna nánar vesturjaðar sigdældar Hengils.

Til að greina milli mismunandi gosmyndanna var bæði notast við svarfsýni úr borun auk jarðlagamælinga sem gerðar voru í lok hvers áfanga borverksins og gagna úr síritakerfi boranna. Fyrst af öllu var svarf greint af jarðfræðingi á borstað en svarfsýnum var safnað á tveggja metra bili líkt og tíðkast við háhitaboranir hér á landi. Þá voru gerðar þunnsneiðar af völdum sýnum svo hægt væri að styðjast við mismunandi bergfræðileg einkenni til að greina frekar á milli myndana. Þunnsneiðarnar voru skoðaðar með hliðsjón af svarfi. Gögn úr síritakerfi boranna gátu svo gefið hugmyndir um mismunandi myndanir út frá borhraða og álagi. Loks var stuðst við jarðeðlisfræðilegar mælingar, sér í lagi eftir því sem neðar dró í staflanum þegar svarfsýni urðu bæði blandaðri og fínni. Framkvæmdar voru mælingar á vídd, viðnámi (16“ og 64“), gamma- og nifteindasvörun.

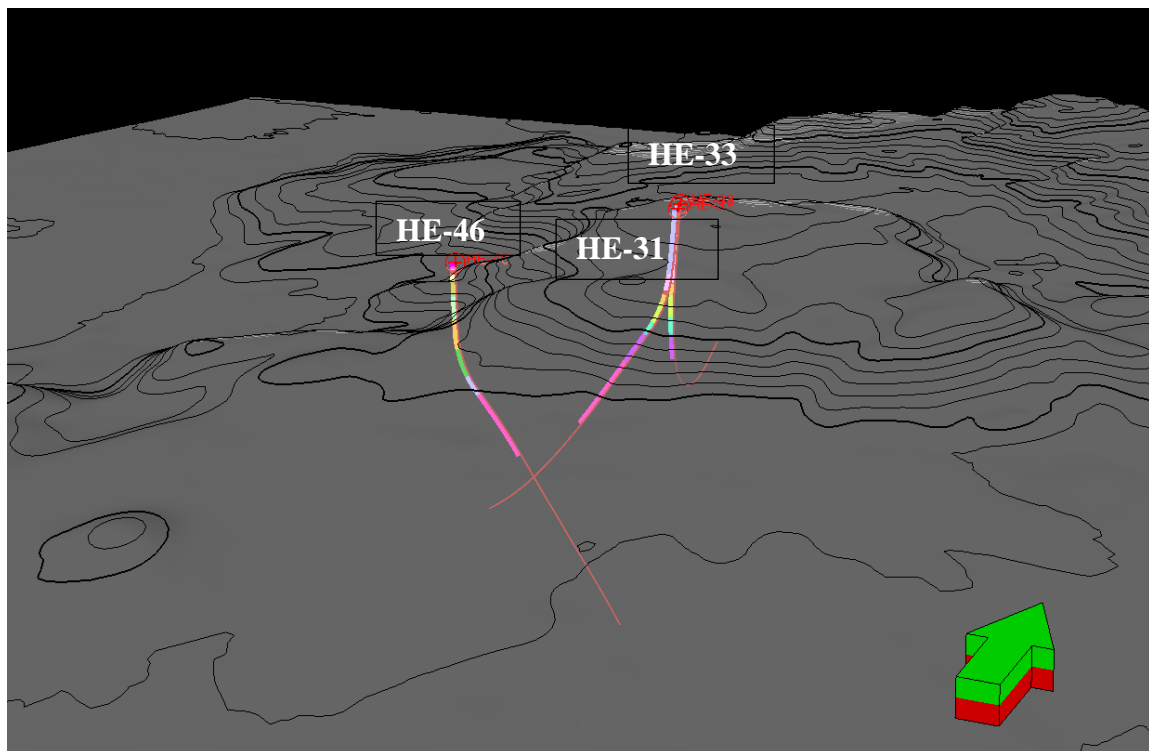
Holur HE-31 og HE-33 eru á svokölluðu SO-plani á vestanverðu Skarðsmýrarfjalli (mynd 2.3). Þær voru boraðar sumarið 2007. Holu HE-31 er stefnt til vesturs (280°) en holu HE-33 til norðurs (350°) og hófst hallauppygging um 20 m neðan öryggisfóðringar í þeim báðum, en öryggisfóðringur situr á 301 m dýpi í holu HE-31 og 333 m dýpi í holu HE-33. Hallauppygging fór þó út um þúfur í holu HE-33 og er hún eina hola á Hellisheiði þar sem raundýpi (1320 m) er minna en lárétt færsla holunnar (1375 m) og fer halli yfir 100° í botni holunnar. Hönnunarforsendur gerðu ráð fyrir að lokahalli beggja hola yrði 30°. Lokadýpi HE-31 er 2703 m (mælt dýpi, MD) og 2325 m (MD) í holu HE-33. Nánar er fjallað um hönnun HE-31 og HE-33 í **viðauka A**.

Hola HE-46 er staðsett á plani HE-8 í Sleggjubeinsdölum við Kolviðarhól og var boruð vorið 2008 (mynd 2.2). Henni er stefnt til norðausturs (50°) og gerðu hönnunarforsendur ráð fyrir að hallauppygging hæfist um 20 m neðan öryggisfóðringar, en hún situr á 338 m

dýpi. Gert var ráð fyrir 30° halla þegar hallaupbyggingu lyki. Lokadýpi HE-46 er 2744 m (MD). Nánar er fjallað um hönnun HE-46 í **viðauka A**.



Mynd 2.2 Staðsetning HE-31, HE-33 og HE-46 (rauðir ferlar) á Hellisheiði.



Mynd 2.3 Holuferlar HE-31 og HE-33 á SO-plani á Skarðsmýrarfjalli og HE-46 við Kolviðarhól. Horft til norðurs.

2.1 Sýnataka og rannsóknaraðferðir

2.1.1 Sýnataka

Sýnum af borsvarfi er safnað á meðan borun stendur af starfsmönnum borsins. Við háhitaboranir hér á landi tíðkast að safna sýnum á 2 m fresti. Svarfsýni berast til yfirborðs með skolvökva sem notaður er við borun, ýmist vatni, vatni blönduðu borleðju eða vatni blönduðu þrýstilofti (jafnvægisborun).

Greining á borsvarfi veitir góðar upplýsingar um aðstæður í jarðhitakerfinu og er mun ódýrari aðferð en til dæmis að taka borkjarna. Þó eru nokkur atriði sem þarf að hafa í huga við túlkun á þeim upplýsingum sem svarfsýnin gefa.

Þegar borað er í gegnum mýkri, sprungnari eða fínkornóttari jarðlög er hættu á að þau komi ekki fram í sýnum. Einnig geta jarðlög sem þegar hafa verið skorin komið fram aftur vegna hruns í holunni eða blöndunar á svarfi í skolvökvanum. Auk þess þarf að leiðrétta fyrir þeim tíma sem það tekur sýni að berast til yfirborðs, annars er hættu á að jarðlög séu staðsett á meira dýpi en þau í raun eru vegna ferðatíma svarfsins til yfirborðs. (*Hulen & Sibbett, 1981*).

Óvissupættir við jarðlagagreiningu aukast eftir því sem dýpra er komið, en þá er ferðatími svarfsins til yfirborðs orðinn lengri og blöndun á svarfsýnum meiri. Auk þess minnkar kornastærð sýnisins eftir því sem neðar dregur.

Reynt hefur verið af fremsta megni að leiðrétta fyrir þessum þáttum, meðal annars með hjálp jarðlagamælinga, borgagna og útreikninga á þeim tíma sem það tekur sýni að berast til yfirborðs miðað við dýpt og þvermál holu og því vatnsmagni sem dælt er á holuna.

2.1.2 Greining svarfs í víðsjá

Við greiningu á svarfsýnum í víðsjá er berggerð ákvörðuð, ummyndunarstig bergs metið og ummyndunarsteindir greindar. Auk þess er oxun bergs metin, þar sem hún er til staðar, sem og gerð og magn sprungufyllinga. Þessar upplýsingar eru svo notaðar til að ákvarða jarðlagaskipan, ummyndunarhita og hitadreifingu í jarðhitakerfinu. Þá eru þær hafðar til hliðsjónar við staðsetningu vatnsæða ásamt hitamælingum.

Notaðar voru Olympus SZX 16 víðsjár með við greiningu á svarfsýnum úr holum HE-31, HE-33 og HE-46.

2.1.3 Greining svarfs í bergfræðismásjá

Greining svarfs í bergfræðismásjá er notuð til að ákvarða með meiri vissu jarðlagaskipan í holunum, skoða ummyndun í þaula svo sem ummyndun á frumsteindum, magn holu- og sprungufyllinga og útfellingaraðir.

Útbúnar eru þunnsneiðar af svarfsýnum sem valin eru með hliðsjón af svarfsgreiningu og jarðlagamælingum.

Greindar voru 41 þunnsneiðar af svarfsýnum úr holu HE-31, 43 þunnsneiðar úr HE-33 og 50 þunnsneiðar úr HE-46. Notaðar voru bergfræðismásjár af gerðinni Leitz Wetzlar og Olympus. SZX við greininguna.

2.1.4 XRD-greiningar

XRD-greiningar eru notaðar til að greina á milli mismunandi leirsteinda auk þess sem aktínólít er einnig greint með XRD. Sýni eru valin, útbúin og mæld eins og lýst er í viðaukum F og G.

Samkvæmt hegðun leirsteindanna og breytingum sem á þeim verða við glýkólmettun og hitun er unnt að greina þann flokk eða fjölskyldu sem leirinn heyrir til.

Notaður var diffractometer frá Bruker, D8 Focus og notuð Cu α geislun á 1,54 Å bylgjulengd á 40 mA og 40 kV með 1°raufum og NaI sindurteljara (*e. scintillation counter*).

2.1.5 Vökvabólurannsóknir

Framkvæmdar voru vökvabólurannsóknir á fimm sýnum af plötukalsíti úr holu HE-46.

Vökvabólur í plötukalsítinu voru hitaðar upp þar til þær hurfu, en það hitastig svarar til myndunarhita þess hluta steindarinnar sem umlykur bóluna. Þannig er hægt að fá vísbendingar um það umhverfi sem ríkti þegar steindin kristallaðist, eða eftir þann tíma er bólurnar eru *sekúnderar*, þ.e. í sprungum sem myndast eftir að kristallinn myndaðist t.d. vegna tektónískra atburða eða hitaþenslu. Á þennan hátt er svo hægt, á grundvelli útfellinganna, að ákvarða „steingert“ hitastig á mismunandi svæðum í jarðhitakerfinu.

Notast var við Linkam vökvabólutæki við greiningarnar með 40 X linsu og er nákvæmni mælinganna áætluð vera ± 1 °C.

2.1.6 Borgögn og jarðlagamælingar

Ýmsum gögnum er safnað á meðan borun háhitahola stendur. Sem dæmi má nefna gögn um borhraða, álag á borkrónu, snúningshraða og –vægi, skolprýsting og heildardælingu. Gögn úr síritakerfi boranna geta gefið hugmyndir um mismunandi myndanir og er þá helst stuðst við borhraða og álag á borkrónu. Þá geta skoltapsmælingar og breytingar á skolprýstingi gefið hugmyndir um staðsetningu og stærð vatnsæða.

Einnig eru ýmsar jarðeðlisfræðilegar mælingar framkvæmdar á meðan borun stendur. Gerðar eru mælingar á vídd, viðnámi (16° og 64°), gamma- og nifteindasvörun.

Jarðlagamælingarnar gefa upplýsingar um uppbyggingu jarðlagastafans, eðliseiginleika bergsins og afl jarðhitakerfisins (*Benedikt Steingrímsson & Valgarður Stefánsson, 1990*). Vegna mismunandi rafleiðni jarðlagaeininga er viðnám notað til að greina á milli þeirra ásamt því sem að viðnám eykst með ummyndun og er þannig hægt að fylgjast með ummynduninni. Gammamælingarnar mæla gammageislun í berginu frá K_{40} , U_{238} og Th_{232} . Eftir því sem gammageislun er meiri því þróaðra er bergið, þ.e.a.s. heildarmagn SiO_2 í berginu er meira. Nifteindamælingin gefur til kynna poruhluta bergsins og víddarmælingin mælir vídd og getur gefið til kynna lagmót og sýnir skápa í holunni.

2.2 Jarðlög

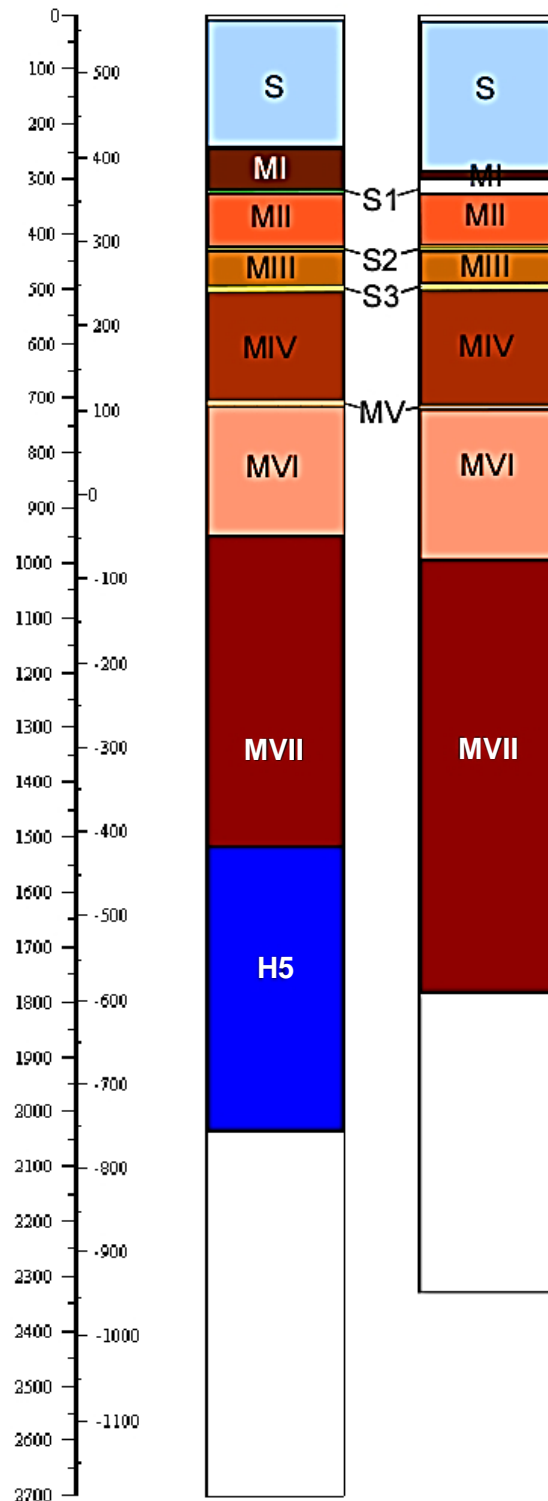
Hengill samanstendur að mestu leyti af móbergseiningum; túffi, breksíum og bólstrabergi sem hlaðist hafa upp við gos undir jökli. Á láglandari svæðum Hengils hafa svo hraun frá hlýskeyðum runnið. Basalt er langalgengasta bergtegundin, og þá ólivín-þóleítt, en þróaðra berg hefur þó verið greint, aðallega sem innskotaberg.

Móbergseiningarnar eru miskristallaðar, allt frá hreinu bólstrabergi þar sem aðeins sést stöku túffkorn yfir í hreint túff þar sem ekki ber á kristölluðum kornum svo neinu nemi. Einingarnar eru ýmist díflalausar eða með plagióklasdíflum í mismiklu magni. Í sumum einingum sjást að auki smáir ólivín- og pýroxendíflar og einnig voru greindir hópdíflar (*e. glomeroporphyritic*).

Stöku setlög eru greind í holunum og sjást þau á mörkum eininga. Þau eru í flestum tilfellum þunn og sjást aðeins í fáum sýnum. Þeim er lýst eftir bestu getu í jarðlagalýsingum í **viðauka B** líkt og öðrum jarðlögum í holunum.

Dýpi sem tiltekin eru í texta eru mælt dýpi (MD) nema annað sé tekið fram.

2.2.1 Jarðlög í holum HE-31 og HE-33 á Skarðsmýrarfjalli.



Mynd 2.4 Jarðlagasnið af HE-31 og HE-33 á SO-plani á suðvestanverðu Skarðsmýrarfjalli. Mismunandi myndanir táknaðar með mismunandi litum og skammstöfunum sem tilteknaðar eru í texta.

Jarðlög í holum HE-31 og HE-33 einkennast fyrst og fremst af mismunandi móbergsmýndunum. Erfitt getur reynst að greina milli mismunandi myndanna og líklegt að þær séu fleiri en hér eru taldar upp. Hver myndun getur t.a.m. samanstaðið af miskristölluðum einingum eftir mismunandi fösum í gosinu. Aðallega er stuðst við magn og ásýnd díla auk þess sem setlög geta markað skil milli myndana.

Jarðlagasnið fyrir HE-31 og HE-33 má sjá á mynd 2.4. Mismunandi myndanir eru táknaðar með mismunandi litum og skammstöfunum sem tilteknar eru í texta hér á eftir.

Farið er í gegnum sömu einingar í holum HE-31 og HE-33 utan hraunlagasyrpu sem finnst í botni HE-31, en holurnar eru staðsettar á sama teig og samræmi milli þeirra mikið, sér í lagi efst í holunum en minnkar þó eftir því sem neðar dregur í holunum, enda er fjarlægð milli HE-31 og HE-33 aðeins nokkrir metrar við holutoppa og þar til hallauppygging hefst á 321 m í holu HE-31 og 325 m í holu HE-33, en nær rúmlega 1000 m þar sem HE-33 er dýpst á 825 m u. s.

Gott samræmi er auk þess milli hola HE-31 og HE-33 og annarra hola á Skarðsmýrarfjalli, og ber þá helst að nefna holu HE-24 sem staðsett er á SN-teig, austan við holur HE-31 og HE-33 (*Mesfin, 2010*).

Nákvæmar jarðlagalýsingar og raundýpi mismunandi myndanna eru sem fyrr segir í **viðauka B**, en að neðan má sjá gróft yfirlit um jarðlög í holunum.

Tiltekin eru tvenn dýptarbil í lýsingum og á það fyrra við HE-31 og það seinna við HE-33. Dýptarbil sem tiltekin eru í texta eru mælt dýpi nema annað sé tekið fram.

Skarðsmýrarfjallsmyndun (S), 0-242 m/0-256 m:

Efst er borað í Skarðsmýrarfjallsmyndun sem er plagíóklasdílótt bólstrabergsmýndun með smáum ólivíndílum, og sjást plagíóklasdílar oft sem hópdílar (*e. glomeroporphyritic*).

Myndunin er glerríkari í efstu hundrað metrnum en þó er glermagn mismikið sem bendir til þess að farið sé í og úr bólstrum. Myndunin er um 250 m þykk. Í svarfi á 200-300 m dýpi í öðrum holum á Skarðsmýrarfjalli hefur verið greint allt að 100 m þykk (í holu HE-28), meðal-grófkorna, plagíóklasdílótt ólivín-þóleiít. Talið er að myndunin sé samaldra Skarðsmýrarfjallsmynduninni (*t.d. Mesfin, 2010*) og sé einhverskonar kvikupoki myndaður yfir gosrásinni vegna öflugs kvikustreymis undir íshellunni Þessa myndun er ekki að sjá í holum á SO-teignum, þar sem HE-31 og HE-33 eru ásamt holum HE-44 og HE-48.

Móbergsmýndun I (MI), 242-332 m/256-320 m:

Neðan Skarðsmýrarfjallsmyndunar er komið í aðra móbergsmýndun, móbergsmýndun I, sem er frábrugðin henni að því leyti að ólivíndílar eru horfnir og plagíóklasdílar sjást í minna mæli. Efsti hluti myndunarinnar í holu HE-31 samanstendur af glerjuðu basalti, en

magn glers eykst frá 290 m og komið er í hreint túff á 322 m dýpi. Efsti hluti myndunarinnar í holu HE-33 samanstendur af bólstrabergi með túfflinsum niður á um 280 m þegar komið er í hreint túff. Algjört skoltap varð á 286 m og fór svarf ekki að berast á nýjan leik fyrr en á 342 m dýpi.

Setlag 1 (S1), 332-336 m/320-326 m:

Í holu HE-31 markar setlag neðri mörk móbergsmýndunar I á 336 m dýpi. Um er að ræða græn-brúnan sand- eða eðjustein, lagskiptan og mjög sprunginn. Í HE-33 varð skoltap frá 286 m niður á 342 m. Á 346 m dýpi sjást þó setkorn svipuð þeim sem sjást í sýnum í holu HE-31. Auk þess virðist setlagið sjást sem skápur í víddarmælingum; á 332-336 m í HE-31 og á 320-326 m í HE-33 (sjá nánar á myndum í **viðauka B**) enda er það að öllum líkindum mýkra en móbergið í kring og skolast því auðveldlega út.

Móbergsmýndun II (MII), 336-428 m/326-428 m:

Undir setlaginu á um 336 m dýpi í HE-31, er komið í annað móberg, móbergsmýndun II. Efsti hluti hennar samanstendur aðallega af túffríkri breksíu og túffi þegar neðar dregur. Mýndunin er plagíóklasdílott og er efsti hluti myndunarinnar dílóttari og blöðróttari en þegar neðar dregur.

Setlag 2 (S2), 428-434 m/428-432 m:

Gráleitt, pýríríkt og mjög fínkorna setlag markar skil milli móbergsmýndana II og III á 424 m dýpi í HE-31 og 428 m dýpi í HE-33. Setkornin eru mjög sprungin og eru í meirihluta á 438 m í holu HE-31 en sjást sem dreif í nokkrum sýnum eftir það. Skápur sást í víddarmælingu á 428 m í HE-33, hugsanlega í tengslum við lagmót. Í áfangaskýrslu HE-31 kemur auk þess fram að á 428 m dýpi hafi víddarmælir farið í fullt útslag, og þar sé greinilega stór skápur. Engar mælingar eru til í HE-31 frá 428-727 m, þar sem allir mælar settust á þessu dýpi og ekki tókst að koma þeim neðar (*Helga M. Helgadóttir o.fl., 2007*).

Móbergsmýndun III (MIII), 434-488 m/432-492 m:

Neðan gráa, fínkorna setlagsins, á 434 m í HE-31 og 432 m í HE-33, er komið í aðra móbergsmýndun, móbergsmýndun III. Mýndunin er túffrík efst en verður kristallaðri þegar neðar dregur og er þá breksía ríkjandi, blanda af nokkuð frauðkenndu túffi og glerjuðu basalti. Mýndunin er að mestu dílalaus. Setdreif sést í svarfi, líklegast úr setlagi að ofan.

Setlag 3 (S3), 488-500 m/492-498 m:

Grágrænt, sprungið setlag, setlag 3, markar skilin milli móbergsmýndunar III og IV í HE-31. Það er greint í svarfi á bilinu 490-500 m í holu HE-31 en sést ekki í öðrum holum á SO-teig en þó á svipuðum slóðum í öðrum holum á fjallinu (*t.d. Mesfin, 2010*). Í holu HE-33 er svarf mjög fínt á þessu bili. Við borun seinni hluta 2. áfanga HE-33 sást skápur á

492-498 m dýpi, þar sem setlagið er líklega skorið og fór viðnám hækkandi neðan 500 m dýpis sem rennir frekari stöðum undir að þar sé komið í nýja myndun (*Christa M. Feucht o.fl., 2008*). Ummyndun eykst einnig á þessum slóðum, á svipuðu dýpi greinist kvars í fyrsta skipti og nokkru neðar, eða á um 520 m dýpi í HE-31 og um 550 m dýpi í HE-33 er komið í blandlagsbeltið.

Móbergsmýndun IV (MIV), 500-702 m/498-694 m:

Komið er í móbergsmýndun IV neðan setlagsins, á 500 m dýpi í HE-31 og 498 m dýpi í HE-33. Útfellingaríkt túff er ríkjandi efst í þessari myndun en einnig er farið gegnum breksúlög og kristallaðri einingar með bólstrabergseinkennum. Myndunin er dílalaus eða stakdílótt og sést oxun á stöku stað. Nokkuð ber á fínkorna, nokkuð jafnkorna, fersklegu og þóleiítlegu bergi í sýnunum, í mismiklu mæli þó. Þarna er líklega um þunn innskot að ræða, en þóleiítbergbrot eru í mestu magni á 546-554 m dýpi í holu HE-33 og 475-496 m og 602-610 m dýpi í holu HE-31.

Móbergsmýndun V (MV), 702-718 m/694-724 m:

Á 702 m dýpi í HE-31 og 694 m í HE-33 virðist komið í nýja myndun, móbergsmýndun V. Myndunin er dílalaus og einkennist af gráleitu túffi í miklum meirihluta, blönduðu fínkorna, dökku og þóleiítlegu basalti. Túffið er gjallkennt og sprungið.

Móbergsmýndun VI (MVI), 718-956 m/724-994 m:

Neðan móbergsmýndunar V, á 718 m dýpi í HE-31 og 724 m dýpi í HE-33, er komið í myndun sem einkennist að mestu leyti af bólstrabreksíu og bólstrabergi af ólívín-þóleiít samsetningu. Efsti hluti myndunarinnar er dílóttur en magn díla fer minnkandi eftir því sem neðar dregur.

Neðst í mynduninni er komið í nokkuð þykka einingu af kristölluðu, meðalkorna ólívín-þóleiíti sem við fyrstu sýn virðist vera innskot og sést á 922-954 m í HE-31 og 970-994 m í HE-33. Þessi eining sést einnig í öðrum holum á Skarðsmýrarfjalli; m. a. í HE-24 á SP-teig á 826-1058 m dýpi og í tveimur holum á SL-teig, í HE-49 á 674-842 m dýpi og í HE-28 á 680-826 m (*Mesfin, 2010; Sigurður S. Jónsson, 2010; Helga M. Helgadóttir 2009*).

Umfangið bendir því til þess að þarna sé um eitthvað annað og meira en innskot að ræða, hugsanlega kvikupoka á borð við þann í botni Skarðsmýrarfjallsmyndunar, myndaðan vegna öflugs kvikustreymis yfir gosrásinni sem myndar flæðieiningu og myndi því ef svo er teljast sem hluti þessarar myndunar.

Móbergsmýndun VII (MVII), 956-1512 m/994-1790:

Neðan móbergsmýndunar VI, á 956 m í HE-31 og 994 m í HE-33 er komið í mjög túffríka, dílalaus móbergsmýndun, móbergsmýndun VII. Innan myndunarinnar eru kristallaðri

einingar, bæði innskot og einnig ummyndað kristallað berg sem líklegast er hluti af móbergsmýnduninni sjálfri. Einingin er túffríkari efst en kristallaðri eftir því sem neðar dregur og flokkast þar sem túffrík breksía. Allt skol tapaðist í holu HE-33 á 1790 m dýpi. Þá var enn borað í móbergsmýndun VII, enda halli holunnar þá orðinn um 80°. Borun var hætt á 2325 m mældu dýpi.

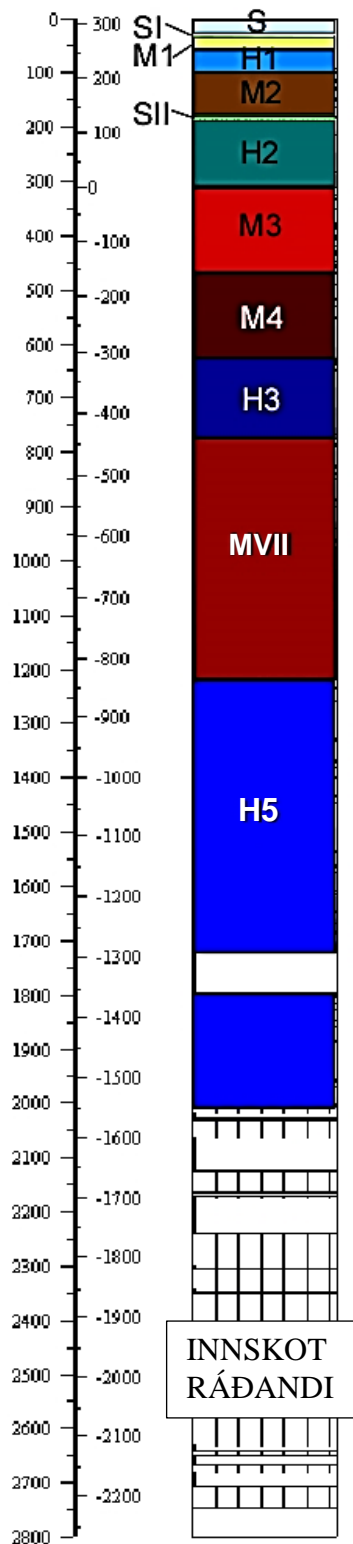
Hraunlagasyrpa I (HI), 1512-2034 m:

Neðan móbergsmýndunarinnar í HE-31, á 1512 m dýpi, er komið í hraunlagasyrpu I. Mýndunin er blanda af fínkorna kolummynduðu basalti og töluvert ummynduðu fín-til meðalkorna basalti, í mismunandi hlutföllum. Erfitt er að segja til um uppruna þess síðarnefnda, þ. e. hvort um er að ræða innskotaberg eða grófkristallaðri hraunlög, nema hvort tveggja sé.

Þá má telja líklegt að þarna sé komið í „botn“ Hengils, þ.e. hraunlagasyrpu frá því áður en eldvirkni hófst í sjálfum Hengli, sem talin er vera á um 900-1300 m u.s. Í niðurstöðum rannsókna Hjalta Franzsonar (1998) á Nesjavallasvæðinu er mýndunin talin vera um 300.000 ára, og er það lágmarksaldur. Nú er talið að aldur mýndunarinnar sé nær 400.000 árum. (*Hjalti Franzson o.fl., 2005*).

Algjört skoltap varð á 2034 m dýpi í holu HE-31 en hún var boruð niður á 2703 m dýpi.

2.2.2 Jarðlög í holu HE-46 við Kolviðarhól



Mynd 2.5 Jarðlagasnið af HE-46 á plani HE-08 við Kolviðarhól. Mismunandi myndanir táknaðar með mismunandi litum og skammstöfunum sem tilteknum eru í texta.

Hola HE-46 er staðsett á plani HE-08 í Sleggjubeinsdölum við Kolviðarhól. Jarðlagasnið fyrir HE-46 má sjá á mynd 2.5. Mismunandi myndanir eru táknaðar með mismunandi litum og skammstöfunum sem tilteknar eru í texta hér á eftir.

Farið er gegnum mismunandi móbergseiningar líkt og í holum HE-31 og HE-33 en auk þess hafa hraun frá hlýskeyðum runnið á þessu svæði líkt og á öðrum láglandri svæðum Hengils. Hraunlöggin eru öll með ólivín-þóleíftsamsetningu og eru þau sem greind eru í efri hluta holu HE-46 mjög glerjuð og kargakennð. Þau eru ýmist dílalaus eða plagíóklasdílótt og einnig sjást ólivín- og pýroxendílar í stöku einingum.

Nákvæmar jarðlagalýsingar og raundýpi mismunandi myndana eru sem fyrr segir í **viðauka B**.

Skarðsmýrarfjallsmyndun (S), 0-36 m:

Efst er borað í fersklegri ólivín-þóleíft móbergsmýrarfjallsmyndun. Myndunin er glerríkari efst en kristallaðri þegar neðar dregur, frá um 20 m dýpi og er þar borað í bólstrabergi.

Myndunin er áberandi plagíóklasdílótt auk stöku ólivíndíla og sjást dílar oft sem hópdílar (*e. glomeroporphyritic*). Einkenni myndunarinnar og staðsetning benda til þess að þarna sé borað í Skarðsmýrarfjallsmyndunina.

Setlag 1 (SI), 36-38 m:

Líkt og í HE-31 og HE-33 markar setlag 1 skilin milli Skarðsmýrarfjallsmyndunar og móbergsmýrarfjallsmyndunar I á 36 m dýpi. Setið er grunnborið settúff með stærri rúnnum kornum, bæði kristölluðum kornum og glerkornum.

Móbergseining (M1), 38-62 m:

Neðan setlagsins, á 38 m dýpi, er komið í þunna móbergseiningu sem einkennist af ísúrri breksíu. Breksían er blanda af frauðkenndu, gráleitu gleri blönduðu svörtum, dulkornóttum bergbrotum og ljósgráum fín-dulkornóttum bergbrotum.

Hraunlög 1 (H1), 62-98 m:

Komið er í nokkuð einsleit, fín- til meðalkorna ólivín-þóleíft hraunlög á 62 m, hraunlög I, H1. Myndunin er nánast dílalaus en mikið ber á plagíóklas í grunnmassa og oft má sjá votta fyrir flæðistrúktúr.

Móbergsmýrarfjallsmyndun 2 (M2), 98-178 m:

Á 98 m dýpi er komið í móbergsmýrarfjallsmyndun 2 sem samanstendur aðallega af dökkbrúnleitu og frauðkenndu túffi. Myndunin er stakdílótt og ber þá mest á plagíóklaslistum í mismiklu magni en einnig sjást smáir ólivíndílar.

Setlag 2 (S2), 178-182 m:

Við neðri mörk móbergsmýndunar 2 er komið í setlag. Um er að ræða lagskiptan sandstein og sést setlagið í víddarmælingu, enda er það mýkra en myndanirnar ofan og neðan og skolast því auðveldlega burt við borun og myndar skáp.

Hraunlög 2 (H2), 182-306 m:

Komið er í hraunlög II - H2 á 182 m dýpi. Þarna er líklegast um að ræða dyngjusyrpu kennda við Húsmúlann sem talin er vera um 100 þúsund ára gömul og elst jarðmyndana á yfirborði í vestanverðum Hengli en hún hverfur af yfirborði í stóru misgengi 200-300 m vestan við holuna (*Benedikt Steingrímsson o.fl., 1993; Bjarni Reykr Kristjánsson, 2003*). Um er að ræða tiltölulega einsleit, oxuð og kargakennd hraunlög, oft nokkuð blöðrótt. Plagíóklasdílur eru mjög áberandi en auk þess má sjá smáa pýroxen- og ólivíndíla. Plagíóklasarnir mynda hópdíla (*e. glomeroporphyritic*) og sjást bæði plagíóklashópdílar og plagíóklas-, ólivín og pýroxenhópdílar.

Móbergsmýndun 3 (M3), 306-472 m:

Neðan hraunlagasyrpu, á 306 m dýpi, er komið í stakdílóttu, túffríka móbergseiningu, móbergsmýndun 3. Efsti hluti myndunarinnar samanstendur af bólstrabreksíu; blöndu af kristölluðu ólivín þóleiíti eða þóleiíti og grænummynduðu túffi. Dílar eru fáir, en áberandi og sjást oft í þyrpingum (hópdílar). Frá um 330 m verður myndunin kristallaðri og flokkast á þessu dýptarbili sem bólstraberg. Á 349-355 m er meðalkorna innskot skorið. Það er jafnkorna og mjög plagíóklasríkt.

Móbergsmýndun 4 (M4), 472-628 m:

Á 472 m dýpi breytist ásýnd móbergsins þegar komið er úr hópdílóttu bólstrabergi í nánast dílalaus, mjög sprungna móbergseiningu, móbergsmýndun 4, sem samanstendur af túffi og breksúlögum. Efsti hluti myndunarinnar samanstendur af breksíu en komið er í túff á um 490 m.

Hraunlög III (H4), 628-766 m:

Komið er í hraunlagasyrpu á 628 m dýpi. Efst í mynduninni er um að ræða meðalkorna, oxuð og nokkuð glerrík ólivín-þóleiít hraun í ætt við þau sem oft sjást í dyngjusyrpum. Nokkuð ber á plagíóklasdílum og einnig sést votta fyrir ólivíndílum sem þó eru að fullu ummyndaðir í leir. Þegar neðar dregur í staflanum er borað í nokkur fínkornóttari hraunlög sem mögulega eru af þóleiít-samsetningu. Þarna er líklegast um að ræða sömu hraunlagasyrpu og kemur fyrir á svipuðu dýpi í holum KhG-1 og HE-8 (*Benedikt Steingrímsson o.fl., 1993; Bjarni Reykr Kristjánsson, 2003*). Myndunin er þar nefnd H4, og því er notast við sama auðkenni hér.

Móbergsmýndun 5 (MVII), 766-1222 m:

Á 766 m dýpi er komið í móbergsmýndun 5, dílalaus myndun með einkenni ólivín-þóleíts. Efri hluti hennar einkennist af mjög ummynduðu, dílalaus og þéttu túffi, en einnig eru þunnar breksíulinsur skornar. Á um 900 m dýpi eykst hlutur kristallaðra korna nokkuð og þar sem komið er í túffríka breksía. Aftur eykst hlutur túffs á um 940 m en á 980 m er komið í bólstrabreksíu eða bólstraberg. Fóðringardýpi fyrir vinnslufóðringu holunnar er á 1032 m dýpi en neðan þess er túff ráðandi á ný.

Hraunlög IV (H5), 1222-.,2744“ m:

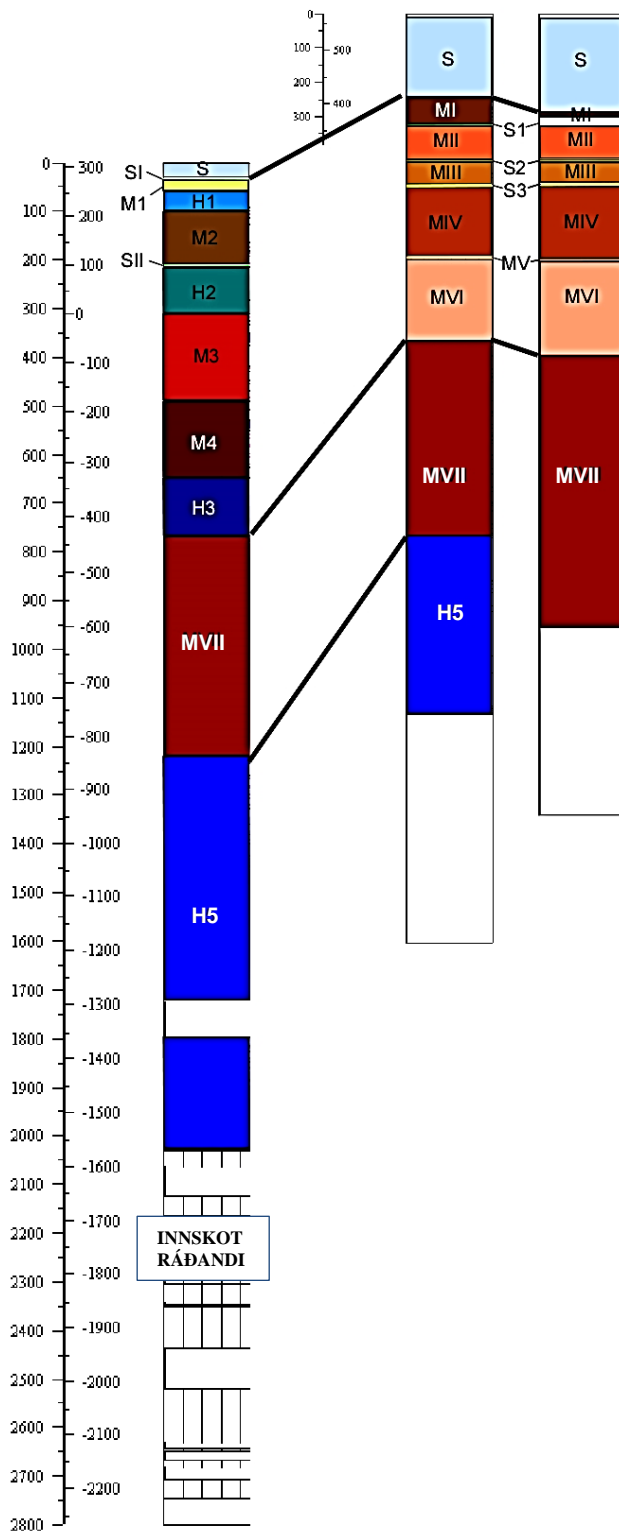
Komið er í kristallað, mjög ummyndað berg á 1222 m, líklegast hraunlög þó ekki sé loku fyrir það skotið að um bólstraberg sé að ræða. Svarfsýni á þessum slóðum eru mjög fínkorna. Hraunlögin eru fín- til meðalkorna og mjög ummynduð. Á um 1500 m dýpi eykst ummyndun töluvert og sést mikið af epidóti og wollastóníti á þeim slóðum. Bergið er almennt fínkristallað á þessu dýpi og allt niður á um 1800 m dýpi þar sem bergið verður aftur grófkristallaðra.

Þarna er líklega komið í „botn“ Hengils, líkt og í HE-31, þ.e.a.s. hraunlagasyrpu sem talin er vera frá þeim tíma áður en eldvirkni hófst í sjálfum Hengli (*Hjalti Franzson, 1998.*)

Á 2140-2164 m dýpi er nokkuð grófkristölluð myndun skorin, mjög plagíóklas- og pýroxenrík. Athygli vekur hversu ferskur plagíóklasinn er meðan pýroxen er nánast alltaf ummyndað í aktínólít. Þarna er mögulega um dólerítinnskot að ræða. Á 2352-2437 m er viðlíka myndun skorin, aftur á 2548-2652 m og frá 2640 m og niður í botn.

Svarfheimta á þessum slóðum var mjög gloppótt og bárust svarfsýni stopult frá tæplega 2200 m dýpi. Sýni bárust þó með hléum allt niður í botn holunnar á 2744 m.

Tengingar milli hola við vesturjaðar sigdældar Hengils



Mynd 2.6 Jarðlagamyndanir og tengingar í HE-46, HE-31 og HE-33. Mismunandi myndanir eru táknðar með mismunandi litum og skammstöfunum, en skýringar á þeim má finna í texta.

Tengingar milli hola HE-31, HE-33 og HE-46 eru sýndar á mynd 2.6.

Mjög gott samræmi er milli hola HE-31 og HE-33 enda eru þær boraðar af sama teig og farið er gegnum allar sömu myndanirnar, utan hraunlagasyrpannar í botni HE-31. Ástæða þess að myndunin kemur ekki fram í HE-33 er að öllum líkindum sú að HE-33 fer hún dýpst á tæplega 1400 m dýpi (um 800 m u.s.) en botn HE-31 er á tæplega 2300 m dýpi (um 1700 m u.s.).

Engar hraunlagasyrpur er að finna í holunum fyrr en komið er á um 1500 m mælt dýpi í HE-31, en líklega er þar eins og fyrr segir komið í hinn svokallaða „botn“ Hengils, hraunlagasyrpu sem talin er hafa myndast áður en eldvirkni hófst í sjálfum Hengli (*Hjalti Franzson, 1998*). Bendir það til þess að Skarðsmýrarfjallssvæðið hafi verið hálendi löngu áður en hið eiginlega Skarðsmýrarfjall hlóðst upp, jafnvel allt frá því að virkni hófst í Hengli.

Annað er uppi á teningunum í HE-46 en greindar voru fjórar hraunlagasyrpur í holunni. Hraunin hafa runnið á hlýskeyðum og milli þeirra eru móbergsmýndanir frá jökulskeyðum. Þau benda til þess að svæðið við Kolviðarhól í Sleggjubeinsdölum hafi, líkt og í dag, verið láglendra en Skarðsmýrarfjallssvæðið, og hafa hraunin að öllum líkindum runnið upp að þeim móbergshryggjum sem fyrir voru.

Séu fjarlægðir milli holuferla og dýptarbil skoðuð má leiða að því líkum að hraunlagasyrpan í botni HE-31 sé sú sama og hraunlagasyrpan í botni HE-46, enda er fjarlægð milli holanna um 400 m á því bili. Út frá því má draga þá ályktun að dýlalaus móbergseiningin ofan hennar, móbergsmýndun 5 sé sama myndun og sjá má í HE-31 og HE-33 og kallast þar móbergsmýndun VII.

Aðrar tengingar hafa ekki verið gerðar milli HE-31 og HE-33 á Skarðsmýrarfjalli og HE-46 við Kolviðarhól.

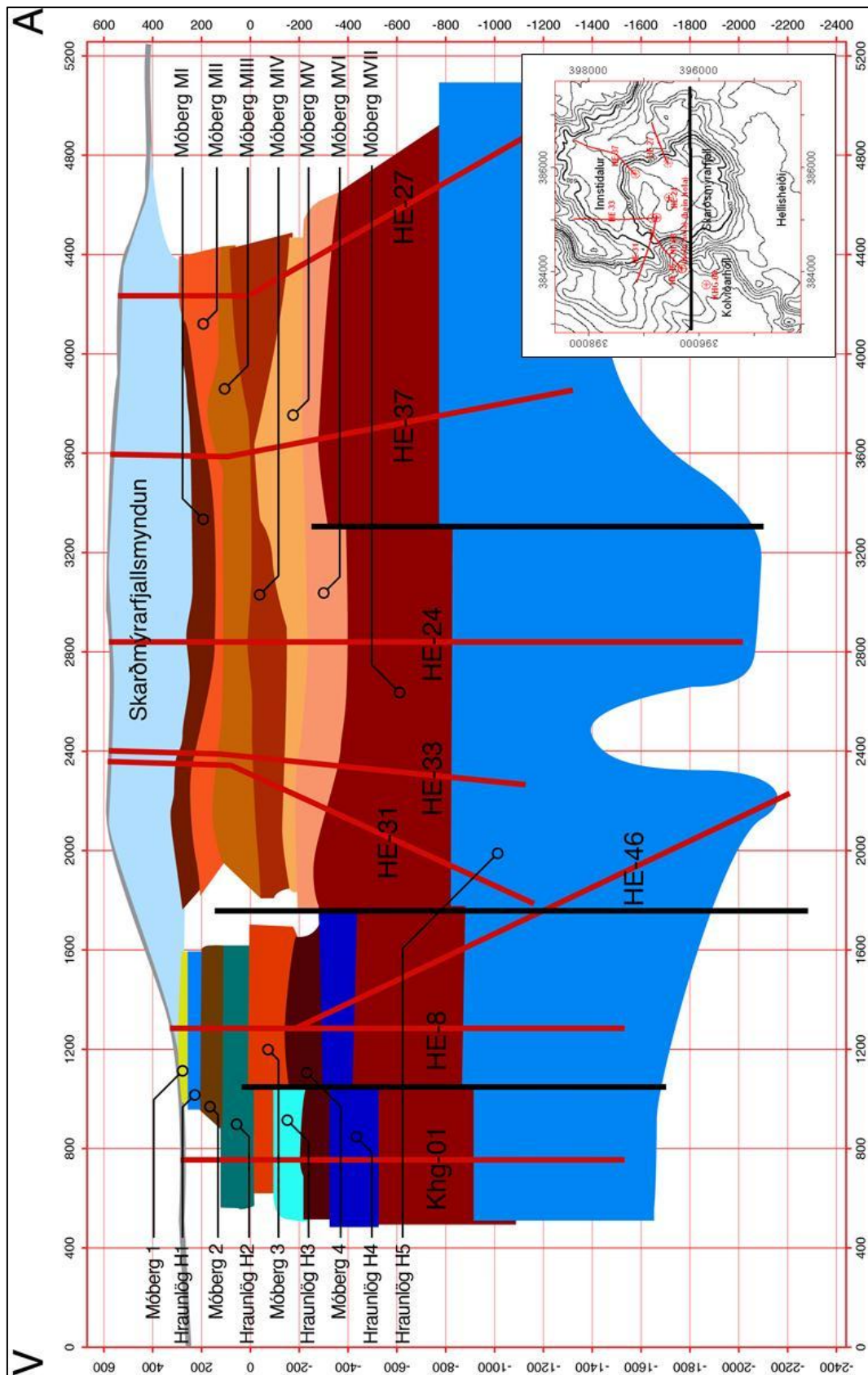
Tengingar milli HE-31, HE-33, HE-46 og nærliggjandi hola má sjá á

Mynd 2.7 mynd 2.7.

Hraunlagasyrpur eru táknaðar með bláum litum og móbergseiningar með brúnum litum, utan ísúra túfflagsins í HE-46 og HE-8 sem táknað er með gulum lit.

Gott samræmi virðist vera milli hola HE-31, HE-33 og annarra hola á Skarðsmýrarfjalli, sér í lagi HE-24 á næsta teig. Svo virðist sem farið sé gegnum allar sömu móbergsmýndanir í holunum þó hafa beri í huga að þær tengingar byggist aðallega á jarðlagalýsingum Kifloms Mesfins (2010) en ekki samanburði á svarfsýnum og/eða þunnisneiðum nema að litlu leyti.

Einnig virðist gott samræmi vera milli HE-46 og annarra hola á sama teig, HE-8 og HE-52 auk þess sem finna má sömu hraunlagasýrpur í Khg-1 og í HE-46, fyrir utan H3, sem ekki sést í holum á teig HE-46 (*Benedikt Steingrímsson o.fl., 1993*).



Mynd 2.7 Jarðlagasnið og tengingar í holum við Kolviðarhól og á Skarðsmýrarfjalli. Mismunandi myndanir táknaðar með mismunandi litum en lýsingar á þeim eru í texta.

2.3 Innskot

Innskot eru algeng neðan 800 m u. s. í borholum á Nesjavöllum og neðan 1600 m u. s. er innskotaberg orðið ráðandi (*Hjalti Franzson, 1998*).

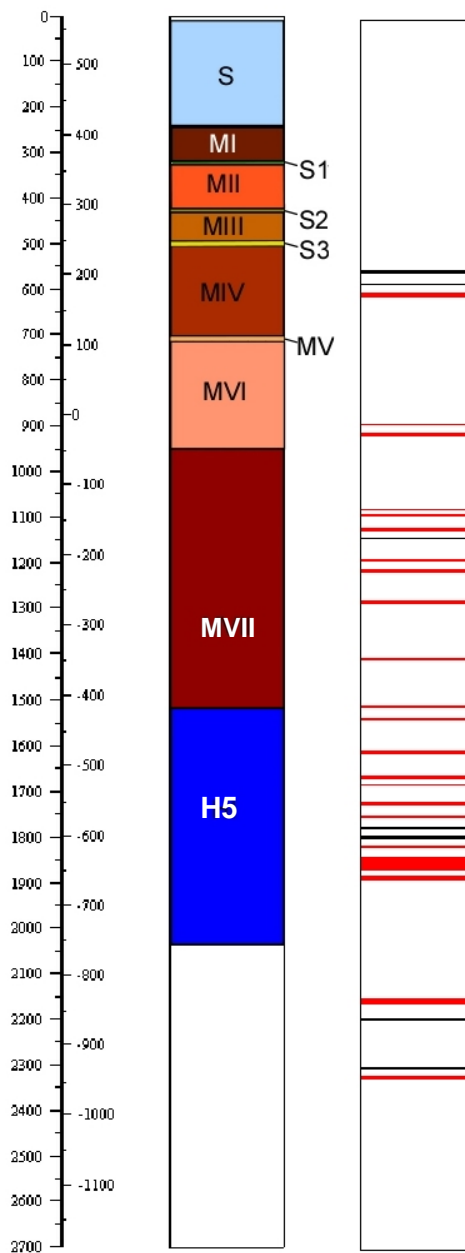
Í svarfi og þunnsneiðum þekkist innskotaberg á því að það er oftast þéttara og minna ummyndað en grannbergið og stundum má greina oxun á jöðrum þess.

Jarðlagamælingar eru oft notaðar við staðsetningu á innskotum. Þau hafa iðulega hærra viðnám og hærri nifteindasvörun en grannbergið sökum þess hve þétt og fersk þau eru. Þá má stundum greina þau í víddarmælingu auk þess sem hægt er að greina innskot af þróaðri samsetningu með hjálp gammamælinga.

Í borgögnum sjást innskot stundum sem lækkaður borhraði, sér í lagi eftir því sem dýpra er komið og ummyndun eykst (*Hjalti Franzson o.fl., 2005*).

Töflur yfir innskot í HE-31, HE-33 og HE-46, ásamt lýsingum, má sjá í **viðauka C**.

2.3.1 Innskot í HE-31



Mynd 2.8 Jarðlagasnið í HE-31 sýnt með hliðsjón af dreifingu innskota. Innskot táknuð með rauðu og möguleg innskot með svörtu.

Innskot í HE-31 ásamt jarðlagasniði má sjá á mynd 2.8 en nánar er fjallað um innskot í holunum í **viðauka C**.

Töluvert mörg innskot voru greind í holu HE-31, sér í lagi innskot af þróaðri samsetningu en það gæti tengst misgengjum sem holan sker við vesturjaðar sigdældar Hengils auk nálægðar hennar við Hengil sjálfan og Sleggju, sem er eini fundarstaður þróaðs bergs á yfirborði í Hengli (sjá kort á Mynd 1.2). Einnig voru óvenjumargar vatnsæðar greindar í holunni.

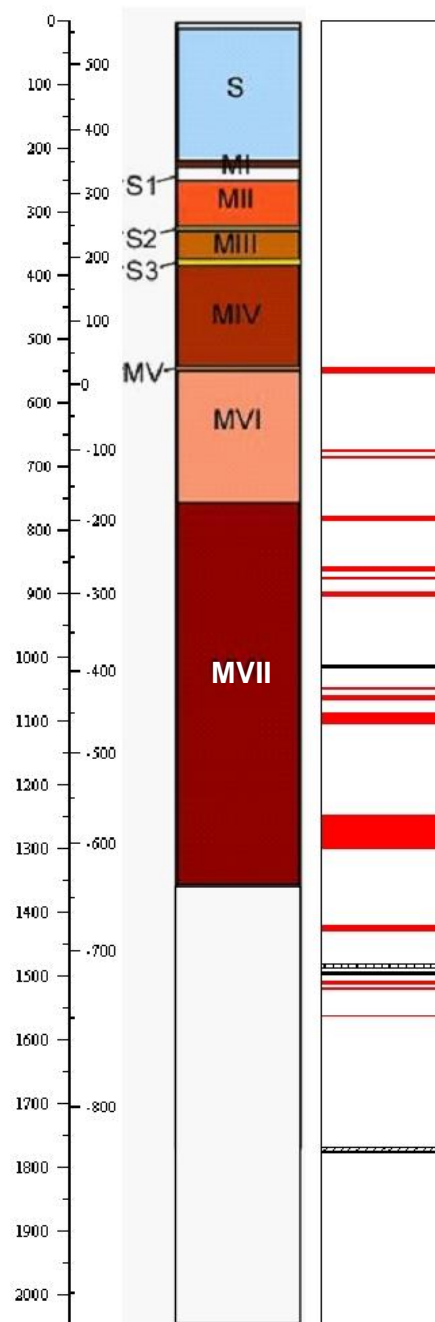
Á 550-600 m dýpi eru þrjú þunn innskot skorin og sjást þau öll í svarfi og það dýpsta einnig í þunnsneið. Um er að ræða jafnkorna, fínkorna þóleiít innskot. Bergið er þétt og fersklegt og auk þess dekkra en grannbergið. Á bilinu 888-912 m eru tvö þunn þóleiít innskot til viðbótar skorin og sjást þau bæði í svarfi og þunnsneið sem dökkt, fersklegt, fínkorna berg.

Eftir því sem neðar dró reyndist oft erfitt að staðsetja innskotin og neðan 1000 m var svarfið bæði mjög fínt og blöndun mikil. Þá var meira treyst á jarðlagamælingar svo sem mælingar á viðnámi, nifteindasvörun og gammageislun.

16 innskot af þróaðri samsetningu voru skorin með nokkurri vissu neðan 1100 m dýpis í holu HE-31 og þekktust þau aðallega á mikilli hækkun á gammagildum auk þess sem þróað berg sást nokkrum sinnum í þunnsneið. Það þekkist á ljósu yfirbragði og kvarsí í grunnmassa, auk þess sem nokkuð ber á málmsteindum og oft vottar fyrir flæðistrúktúr.

Auk innskota af þróaðri samsetningu var farið gegnum harðari einingar sem gætu bent til þess að innskot hafi verið skorin á 1076 m og 1138 m. Það er þó ekki loku fyrir það skotið að um kristallaðri kafla innan móbergseiningarinnar sé að ræða.

2.3.2 Innskot í HE-33



Mynd 2.9 Jarðlagasnið í HE-33 sýnt með hliðsjón af dreifingu innskota. Innskot táknuð með rauðu og möguleg innskot með svörtu.

Innskot í HE-33 ásamt jarðlagasniði má sjá á Mynd 2.9

Mynd 2.9, en nánar er fjallað um innskot í holunum í **viðauka C**.

Ekki voru jafnmörg innskot greind í holu HE-33 og í HE-31 á sama teig. Það skýrist að öllum líkindum af því að dýpsti hluti HE-33 er aðeins á tæplega 1400 m raundýpi og nær því ekki í mesta innskotabéttleikann, en í holum á Nesjavöllum eru innskot ráðandi í jarðlagastaflanum neðan 1600 m raundýpis (*Hjalti Franzson, 1988*).

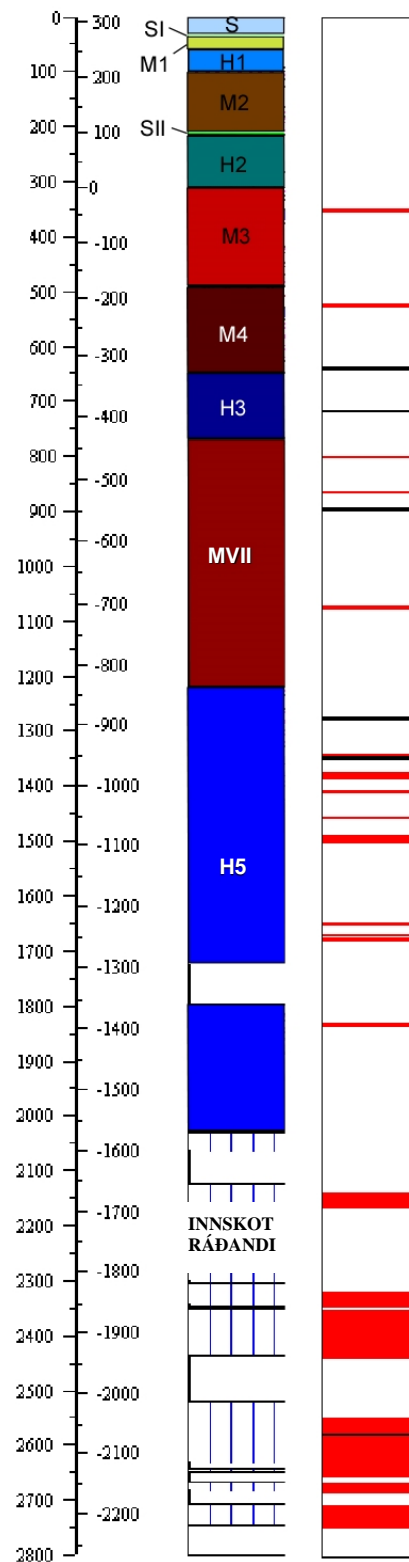
Þá gekk illa að framkvæma jarðlagamælingar efst í holunni og því eru aðeins til víddar- og jarðlagamælingar úr 1. og 2. Áfanga frá yfirborðsfóðringu niður á um 260 m og viðnámsmæling frá 400-620 m.

Nokkur þunn þóleítinnskot voru greind ofan 1000 m dýpis, en þau áttu það sammerkt að vera þétt, dökkleit, fín- til meðalkorna og ferskleg. Að auki var meðalkorna ólivín-þóleít innskot skorið á 858-863 m og sást það bæði í svarfi, þunnsneið og nifteindamælingu.

Nokkur innskot af þróaðri samsetningu voru greind í holunni og var það fyrsta staðsett á 1048 m dýpi, en flest á bilinu 1500-1600 m. Þau sáust fyrst og fremst sem toppar í gammamælingu þó oft hafi þau auk þess verið greind í þunnsneið og/eða svarfi.

Einnig voru nokkur basaltinnskot greind á þessum slóðum, en oft reyndist erfitt að greina þau nánar til tegundar, þ. e. hvort um þóleít eða ólivín-þóleít væri að ræða. Oftar en ekki voru þau staðsett með hjálp viðnáms- og nifteindamælinga.

2.3.3 Innskot í HE-46



Mynd 2.10 Jarðlagasnið í HE-46 sýnt með hliðsjón af dreifingu innskota. Innskot táknuð með rauðu og möguleg innskot með svörtu.

Innskot í HE-46 ásamt jarðlagasniði má sjá á mynd 2.10 en nánar er fjallað um innskot í holunum í **viðauka C**.

Í HE-46 voru tvö ólivín-þóleiít innskot greind nokkuð ofan 600 m dýpis, á 349-355 m dýpi annars vegar og 522-526 m dýpi hinsvegar. Það efra sást bæði í svarfi og í jarðlagamælingum sem hækkun í viðnáms- og nifteindagildum. Um er að ræða meðalkorna, plagíóklasríkt ólivín þóleiít. Hið neðra sást einnig í nifteindamælingu en þar var skorið meðalkorna, plagíóklasfíllott ólivín-þóleiít innskot, en einnig sást nokkuð af fersku gleri.

Nokkur þunn innskot til viðbótar voru líklega skorin ofan 1000 m. Á þessum slóðum var aðeins mælt viðnám og vídd og því eru ekki aðrar jarðlagamælingar að styðjast við.

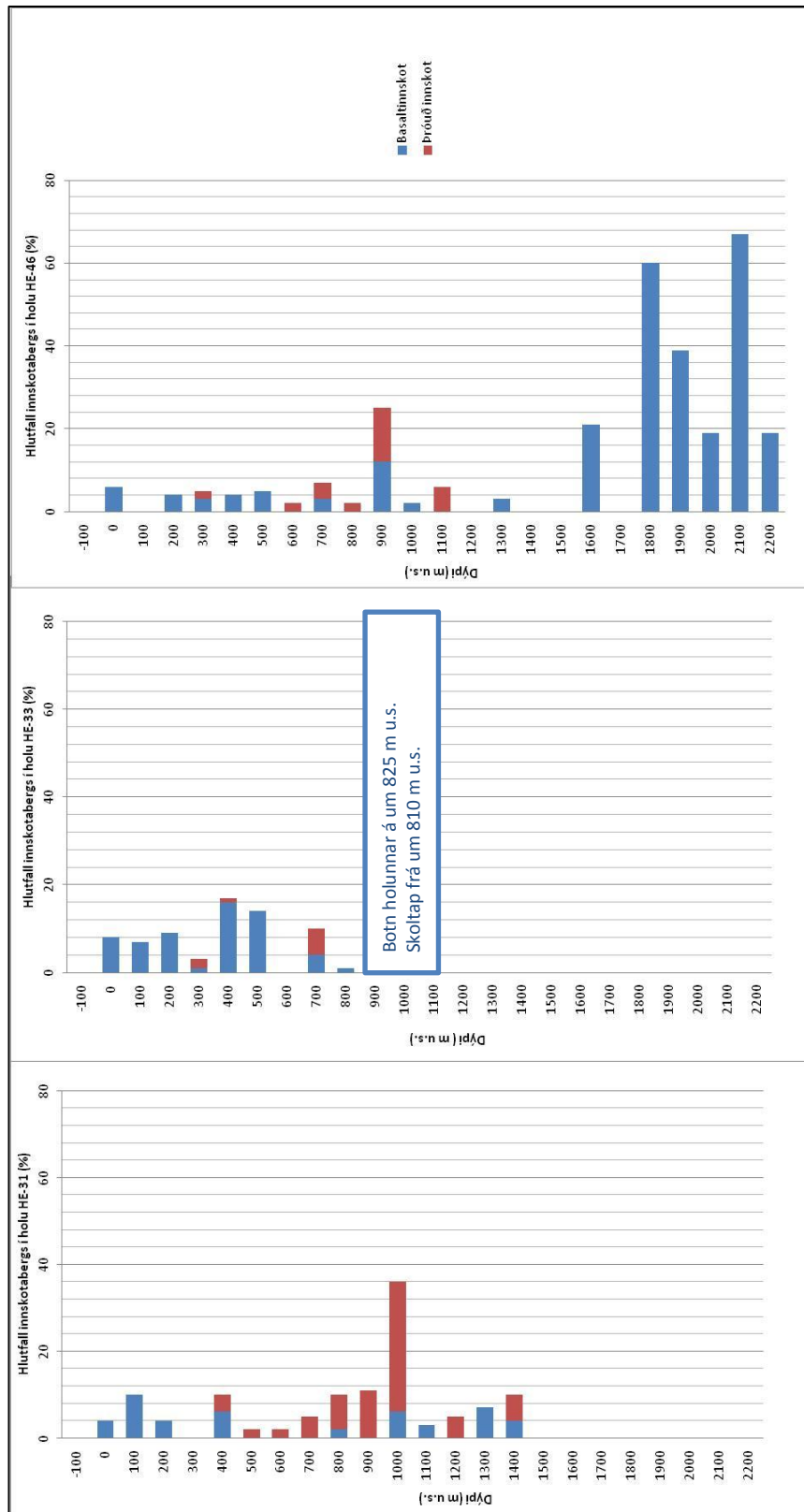
Nokkuð sást af fersku basalti á um 640 m dýpi en á svipuðum slóðum sést breyting í víddarmælingu, sem bendir til að líklega sé innskot skorið. Á 716 m dýpi sést nokkuð af meðalgrófu, ljósleitu, fersklegu bergi í svarfi. Einnig sést nokkur breyting í víddarmælingu á þessum slóðum. Dökkt, glerjað basalt sést í svarfi á 735 m dýpi en þar sést einnig nokkur breyting á viðnámi.

Á 798 m dýpi sjást ljós korn í svarfi sem líklegast eru af þróaðri samsetningu. Þunnsneið af sama dýptarbili staðfestir að þarna er um ísúrt berg að ræða og því líklegt að þunnt innskot sé skorið á þessum slóðum. Á 863 m dýpi sést toppur í viðnámi og á sömu slóðum sést dökkt, meðalkorna innskotaberg í svarfi. Annar slíkur toppur sést á 894 m, og einnig í víddarmælingu, en ekki varð vart við ferskara berg í sýnum. Líklegt er þó að þunnt innskot hafi verið skorið þó það hafi ekki skilað sér í sýnum.

Neðan 1000 m verða innskot tíðari, og sjást þó nokkur af þróaðri samsetningu auk þóleiítinnskota niður á um 1800 m dýpi. Flest eru þau þunn og eru oftast staðsett með hjálp jarðlagamælinga, sér í lagi nifteindamælinga og gammamælinga. Þá sjást þau oft í svarfi og/eða þunnsneiðum. Svarf er þó bæði fínt og mjög blandað frá um 1100 m dýpi.

Neðan 2000 m taka við þykk innskot sem líklega eru dólerít. Myndanirnar eru grófkorna, aðeins ber á málmum en fyrst og fremst sést mikið af plagíóklas og pýroxeni og vekur athygli hversu fersklegur plagíóklasinn er meðan pýroxen er að nánast fullu ummyndaður í aktinólít. Svipaðar myndanir má sjá í holu HE-08 á sama teig.

2.3.4 Innskotatiðni



Mynd 2.11 Innskotatiðni í holum HE-31, HE-33 og HE-46. Basaltinnskot táknud með bláu og þróuð innskot með rauðu.

Innskotatíðni í holum HE-31, HE-33 og HE-46 var metin sem hlutfall innskotabergs fyrir hvert hundrað metra dýptarbil í holunum og miðað var við raundýpi (metrar yfir eða undir sjávarmáli). Innskotatíðni í holunum er sýnd á mynd 2.11,

Á sama hátt var tíðni innskota í borholum á Nesjavöllum metin og þau flokkuð til berggerðar (*Hjalti Franzson, 1988*). Helstu niðurstöður þeirrar rannsóknar eru að ofan 700 m eru innskot mjög fátíð og engin innskot voru greind ofan 300 m dýpis. Á um 700-1500 m er innskotaberg um 20% af berglagastaflanum og neðan 1600 m er innskotaberg ráðandi í holunum. Frá 1600-2000 m er hlutur þeirra um 60% og neðan 2000 m um 80% berglagastaflans.

Árið 2003 gerðu Gunnar Gunnarsson og Bjarni Reyr Kristjánsson (*2003*) könnun á innskotapétteleika í fimm borholum á Hellsheiði og notuðu þeir sömu aðferð. Athuganir þeirra virðast vera nokkuð í samræmi við niðurstöður frá Nesjavöllum, nema hvað ísúr innskot virðast töluvert algengari í borholum á Nesjavöllum en á Hellsheiði. Þá var aðeins ein þeirra hola sem rannsóknin tók til boruð niður fyrir um 1500 m u.s., en mesti innskotapétteleikinn virðist sem fyrr segir vera neðan 1600 m u.s. í holum á Nesjavöllum.

Við mat á innskotatíðni skal hafa í huga að erfitt getur reynst að meta raunverulega þykkt innskota. Í rofnum berglagastafla er oft mikið um lagganga (*e. sills*) og þegar borað er gegnum laggang er lítill sem enginn munur á sýndarþykkt og raunþykkt. Hins vegar er sjaldnast borað þvert á innskot (*e. intrusion*) og því er ekki um raunþykkt að ræða. Þá skal hafa í huga að í skáholum getur oft reynst erfitt að greina þunn innskot þar sem þau eru skorin undir miklu horni og skila sér oft illa í svarfsýnum. Mat á innskotatíðni gefur því ákveðna hugmynd um tíðni innskota á ákveðnum dýptarbilum fremur en heildarþykkt innskota og gefur þannig möguleika á samanburði milli svæða.

Þau innskot sem greind voru í HE-31, HE-33 og HE-46 eru yfirleitt fínkristölluð og því í eðli sínu þunn. Í HE-46 eru þó nokkur þykk og grófkristallaðri innskot skorin í dýpri hlutum holunnar, þ.e. neðan 1800 m u.s., en HE-46 er jafnframt sú eina af þessum þremur holum sem boruð er niður fyrir 1400 m u.s. Það má því leiða að því líkum að holur HE-31 og HE-33 nái einfaldlega ekki niður á það dýpi þar sem innskotaberg er ríkjandi, þ.e.a.s. ef innskotatíðnin er að einhverju leyti í takt við það sem sést í holum á Nesjavöllum.

Innskot eru fyrst greind á bilinu 25 m y. s. til 50 m u. s. í öllum þremur holunum og er það töluvert grynna en í holum á Nesjavöllum og í þeim fimm holum sem könnun Gunnars og Bjarna Reys tók til. Það skýrist líklega að einhverju leyti af því að HE-31 og HE-33 eru staðsettar á SO-teig á Skarðsmýrarfjalli, sem er einn hæstu borteiganna á Hellsheiði í tæplega 600 m y.s.

Í holu HE-31 er innskotatíðni mest á bilinu 700-1000 m u. s. en neðan þess dýpis fer innskotum fækkandi. Holan er þó aðeins boruð niður á um 1400 m u.s., en sem fyrr segir er innskotatíðnin hvað mest neðan 1600 m u.s. í holum á Nesjavöllum. Innskotatíðnin er þó lægri á bilinu 700-1500 m u.s. í HE-31, en á því bili eru innskot um 20% staflans á Nesjavöllum, á meðan innskotatíðnin er oftast um eða undir 10% á þessu bili í HE-31 ef frá er talinn kafli á um 1000 m dýpi þar sem innskotaberg er tæplega 40% staflans. Einnig vekur athygli hversu lítil innskotabéttleikinn er í holu HE-31 miðað við hversu mörg innskot voru greind, en þetta getur stafað af því hversu þunn innskotin voru, sér í lagi innskot af þróaðri samsetningu. Töluvert mörg innskot úr þróðu bergi voru greind í holu HE-31 og er tíðni þeirra mest á bilinu 700-1000 m u.s.

Í holu HE-33 eru flest innskot greind á bilinu 400 til 700 m u. s. Innskotatíðni er sambærileg og í holu HE-31, enda er raundýpi HE-33 aðeins um 800 m u.s. Innskot úr þróðu bergi eru þó aðallega greind á 700 m u.s. Sé litið til dreifingarinnar í HE-31 er tíðni innskota úr þróðu bergi mest á bilinu 700-1000 m u.s. Þar sem HE-33 er aðeins boruð í um 800 m u.s. er sú tíðni þó í samræmi við HE-31. Innskot eru þó töluvert minna en 20% af heildarstaflanum á 700-800 m u.s.og því virðist innskotabéttleikinn einnig vera minni í HE-33 en í holum á Nesjavöllum.

Í holu HE-46 er innskotatíðnin sambærileg og í HE-31 og HE-33. Tíðni innskota úr þróðu bergi er mestur á 700 m u. s. og 1000 m u. s. líkt og í holu HE-31 en þó eru innskot úr þróðu bergi ekki jafnalgeng og í HE-31. Á bilinu 700-1500 m u.s. er innskotabéttleikinn langt undir 20%, t.a.m. eru engin innskot greind á bilinu 1200-1300 m u.s. og 1400-1600 m u.s. Þetta gæti þó skýrst að einhverju leyti af því að svarfsýni eru mjög léleg neðan við 1000 m mælt dýpi HE-46. Neðan 1800 m u.s. er innskotaberg meirihluti heildarstaflans, og á um 2100 m u.s. eru innskot orðin um 70% bergs í holunni. Vandræði við jafnvægisborun urðu þó til þess að skoltöp voru tíð á þessum slóðum og því vantar töluvert af svarfsýnum á þessu dýpi, auk þess sem jarðlagamælingar náð aðeins niður á tæplega 2000 m mælt dýpi. Því er ekki ólíklegt að innskot séu enn stærri hluti heildarstaflans á þessum slóðum.

Basaltinnskot eru greind frá 0 m u. s. Tveir toppar virðast vera í dreifingu þeirra, annars vegar á 0-500 m u. s. og hins vegar á 1600-2200 m u. s. í HE-46.

Þegar niðurstöður eru bornar saman við holur HE-3 til HE-7 (*Gunnar Gunnarsson & Bjarni Reykr Kristjánsson; 2003*) er ágætt samræmi við holu HE-46, en neðan 1700 m u.s. eru innskot ráðandi í holunum.

Innskot úr þróðu bergi eru greind á bilinu 400-1500 m u. s. en ofan og neðan þess dýptarbils finnast engin þróuð innskot. Athygli vekur að innskotabéttleiki innskota úr þróðu bergi er mestur á bilinu 700-1000 m u. s. í bæði HE-31 og HE-46, og á bilinu 700-

800 m u.s. í holu HE-33 en þróuð innskot virðast vera algengari í holunum en í holum HE-3 til 7 (*Gunnar Gunnarsson & Bjarni Reykr Kristjánsson; 2003*). Gögn úr fleiri holum þarf til að skoða þessa dreifingu betur en líklegt er að innskot úr þróuðu bergi séu algeng á þessum slóðum vegna nálægðar holanna við sjálfan Hengil, auk þess sem holunum er beint undir Sleggju, þar sem eina þróaða bergið á yfirborði á Hengilssvæðinu finnst. Ekki er útilokað að hér séu skornar aðfærsluæðar þróaða bergsins. Athyglisvert væri að skoða þetta samband betur.

2.4 Lekt

Vatnsæðar í holum HE-31, HE-33 og HE-46 voru greindar út frá hitamælingum sem framkvæmdar voru á meðan borun þeirra stóð og eftir að borun lauk.

Við mat á vatnsæðum er einnig tekið tillit til jarðalagamælinga á borð við nifteinda- og víddarmælinga auk skoltapsmælinga sem gerðar voru á meðan borun stóð. Auk þess getur aukin ummyndun og aukið magn útfellinga og sprungufyllinga gefið vísbendingu um vatnsæðar. Fæð vatnsæða í efstu 350-500 m (mælt dýpi) ber þó að taka með fyrirvara þar sem sá hluti er oftast boraður með leðju sem stíflar minni æðar svo þær koma að jafnaði ekki fram á hitamælingum.

Dýptarbil sem tiltekin eru í texta eru mælt dýpi, nema annað sé tekið fram. Ítarlegri úttekt á vatnsæðum má sjá í **viðauka D** og skýrslu um hitamælingar í HE-31, HE-33 og HE-46 í **viðauka E**.

2.4.1 Vatnsæðar í holu HE-31

Hitamælingar í HE-31 ásamt stærstu æðum eru sýndar á mynd 2.12. Þar sem hola HE-31 var jafnvægisboruð eru takmarkaðar upplýsingar til um skoltap á meðan borun stóð. Skoltapsmælingar voru ekki gerðar nema endrum og eins, t. d. þegar skipt var um borkrónu. Þrýstiföll á dælum geta þó gefið hugmynd um vatnsæðar en á rúmlega 2000 m dýpi varð erfitt að halda uppi þrýstingi og á 2034 m tapaðist allt skol úr holunni. Benti þetta til þess að æð hefði verið skorin, sem kom síðar enn betur í ljós í hitamælingu (*Steinþór Nielsson o.fl., 2007*).

Töflu yfir æðar í HE-31 má sjá í **viðauka D**.

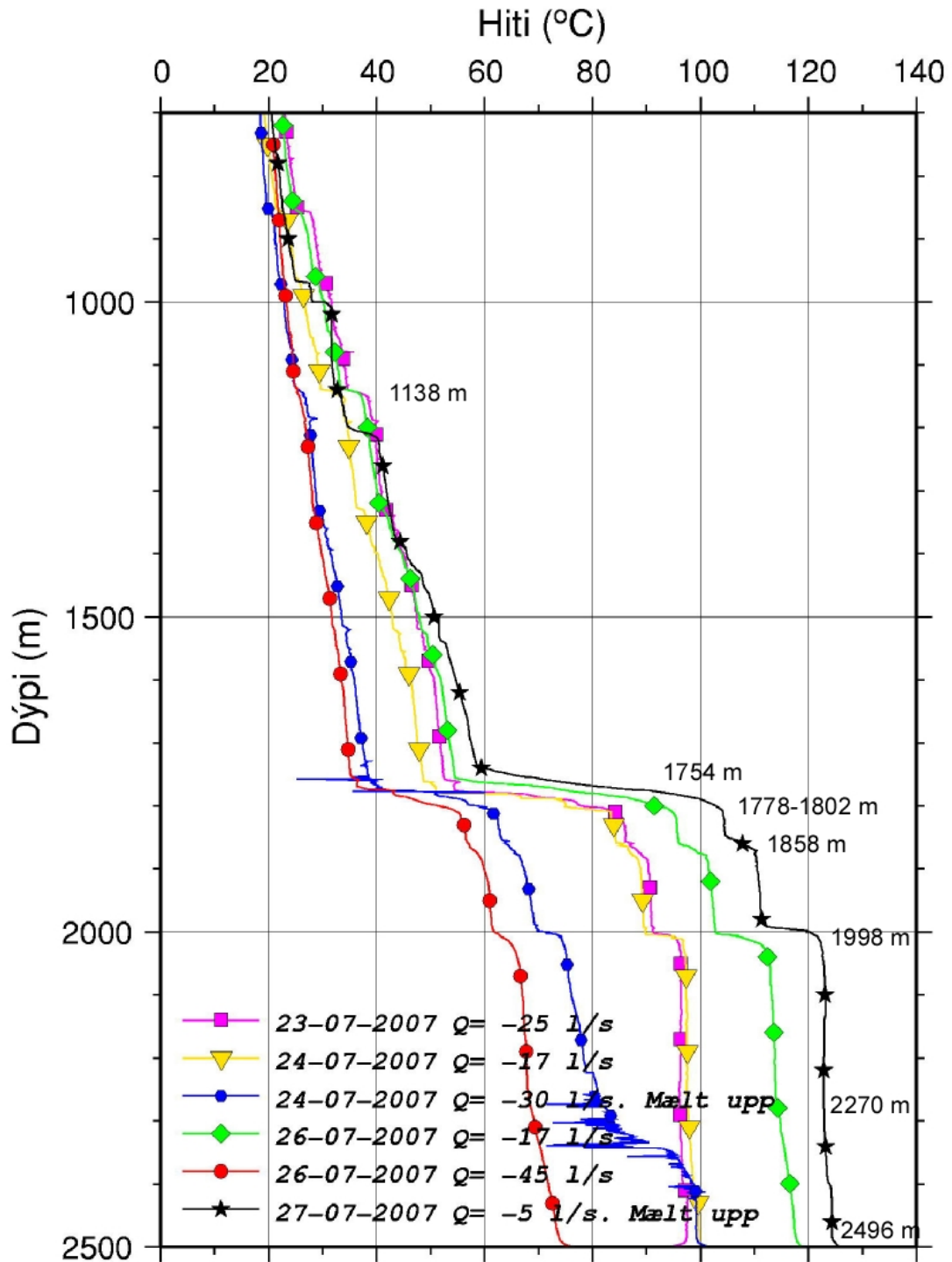
Vísbendingar eru um óvenjumargar stórar og meðalstórar æðar í holunni, en tæplega 30 æðar voru staðsettar. Þar af voru fimm æðar metnar sem stórar vatnsæðar auk þess sem jafnvel er talið að fleiri en ein stór æð sé á kaflanum frá 1778-1802 m.

Þessi mikla lekt gæti skýrst af staðsetningu HE-31, en hún sker stór misgengi við vesturjaðar sigdældar Hengils. Þrepapróf sem gert var til að kanna rennliseiginleika holunnar gaf ádælingarstuðulinn 26 (L/s)/bar, en algeng gildi eru 2-20 L/s.

Ádælingarstuðull er oft notaður til þess að fá gróft mat á tengingu holu við jarðhitageyminn og gefur ádælingarstuðull HE-31 til kynna að hægt sé að dæla 260 L/s á holuna við 10 bar þrýsting, þ.e.a.s að vatnsborð hækkar um 100 m við 260 L/s ádælingu. Það rennir enn frekari stoðum undir að holan sé mjög vel opin.

Þá voru óvenjumörg innskot greind í HE-31 en talið er að samband sé milli lektar og innskota eins og nánar er fjallað um í kafla 2.4.4.

Hellisheiði HE-31
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 2.12 Hitamælingar í holu HE-31. Dýptarbil stærstu æða merkt á mynd.

2.4.2 Vatnsæðar í holu HE-33

Hitamælingar í HE-33 ásamt stærstu æðum eru sýndar á mynd 2.13. HE-33 var líkt og HE-31 jafnvægisboruð og því liggja fyrir takmarkaðar upplýsingar um skoltap á meðan borun hennar stóð.

Einnig eru takmarkaðar upplýsingar til um æðar í botni HE-33. Þegar borun hennar lauk hafði, vegna mikils halla holunnar, aldrei tekist að koma hitamæli dýpra en á 1640 m, en mælt dýpi holunnar er 2325 m. Gera má ráð fyrir því að ein eða fleiri meðalstórar eða stórar æðar séu í botni en allt skolvatn tapaðist á 1570 m.

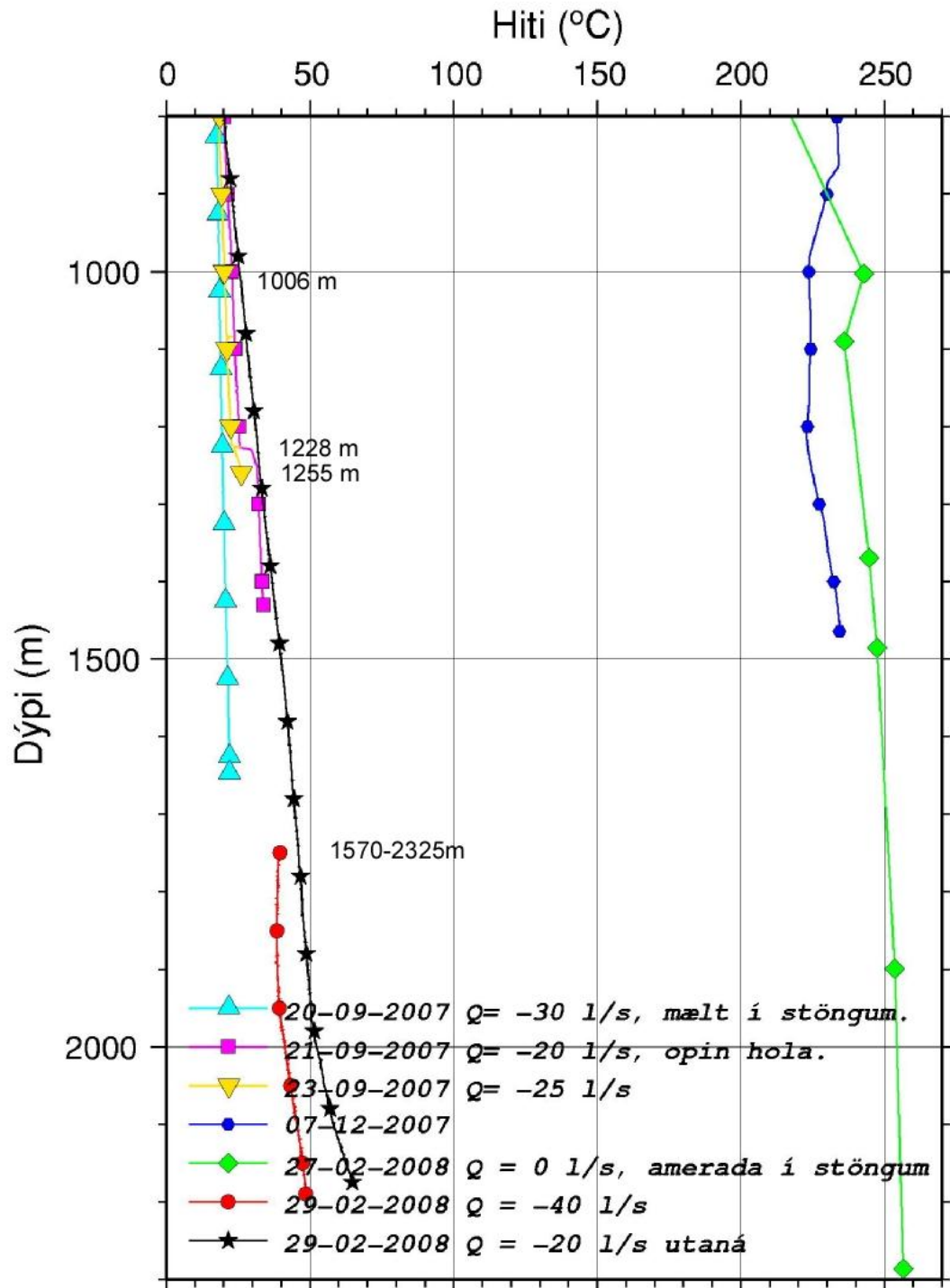
Töflu yfir æðar í HE-33 má sjá í **viðauka D**.

Tæplega 20 æðar voru staðsettar í holunni, þar af ein til tvær sem metnar voru stórar.

Prepapróf gaf til kynna að ádælingarstuðull holunnar sé um 7 (L/s)/bar, sem er ásættanlegt. Það er þó töluvert lægri stuðull en í holu HE-31 á sama teig, sem fékk ádælingarstuðul 26 (L/s)/bar, enda eru umtalsvert færri æðar skornar í HE-33 en í HE-31.

Í febrúar 2008 var gerð tilraun til að gírómæla holuna og var hún hitamæld í kjölfarið. Fór hitamælir þá dýpst á 2190 m en mælt var í streng með 20-40 l/s ádælingu innan strengs til að fleyta mælinum áfram. Erfitt er að meta nákvæma staðsetningu æða þegar mælt er inni í streng auk þess sem svo mikil ádæling hefur truflandi áhrif. Þó má sjá á þeirri mælingu æðakafla á 1700-1950 m.

Hellisheiði HE-33
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 2.13 Hitamælingar í holu HE-33. Dýptarbil stærstu æða merkt á mynd.

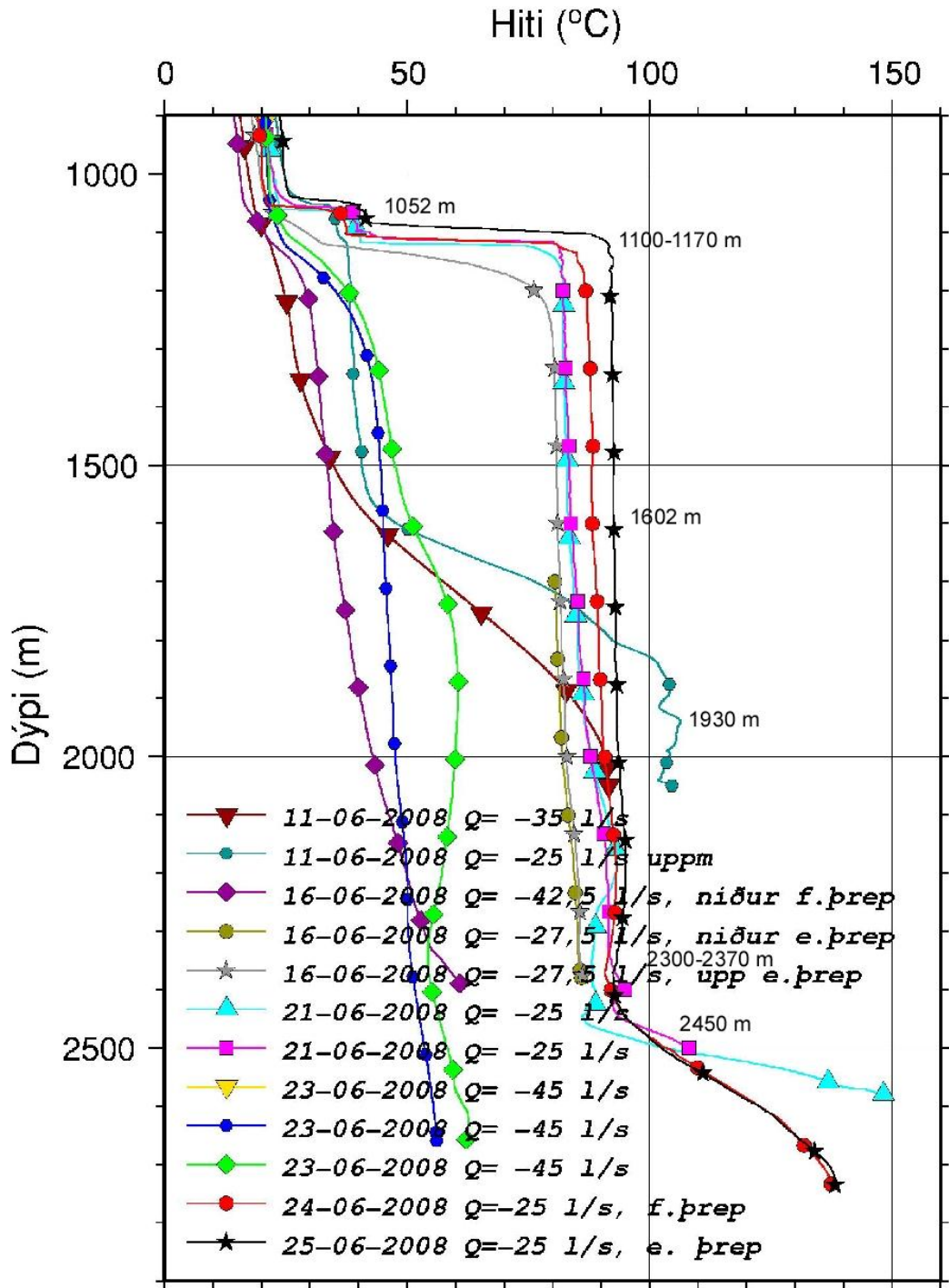
2.4.3 Vatnsæðar í holu HE-46

Hitamælingar í HE-46 ásamt stærstu æðum eru sýndar á mynd 2.14. HE-46 var jafnvægisboruð og því liggja fyrir takmarkaðar upplýsingar um skoltap á meðan borun hennar stóð. Töflu yfir æðar í HE-46 má sjá í **viðauka D**.

Töluvert margar æðar voru greindar í holunni, eða um 25, þar af þrjár sem metnar voru stórar. Þessi mikla lekt gæti skýrst af því að HE-46 sker, líkt og hola HE-31, stór misgengi við vesturjaðar sigdældar Hengils.

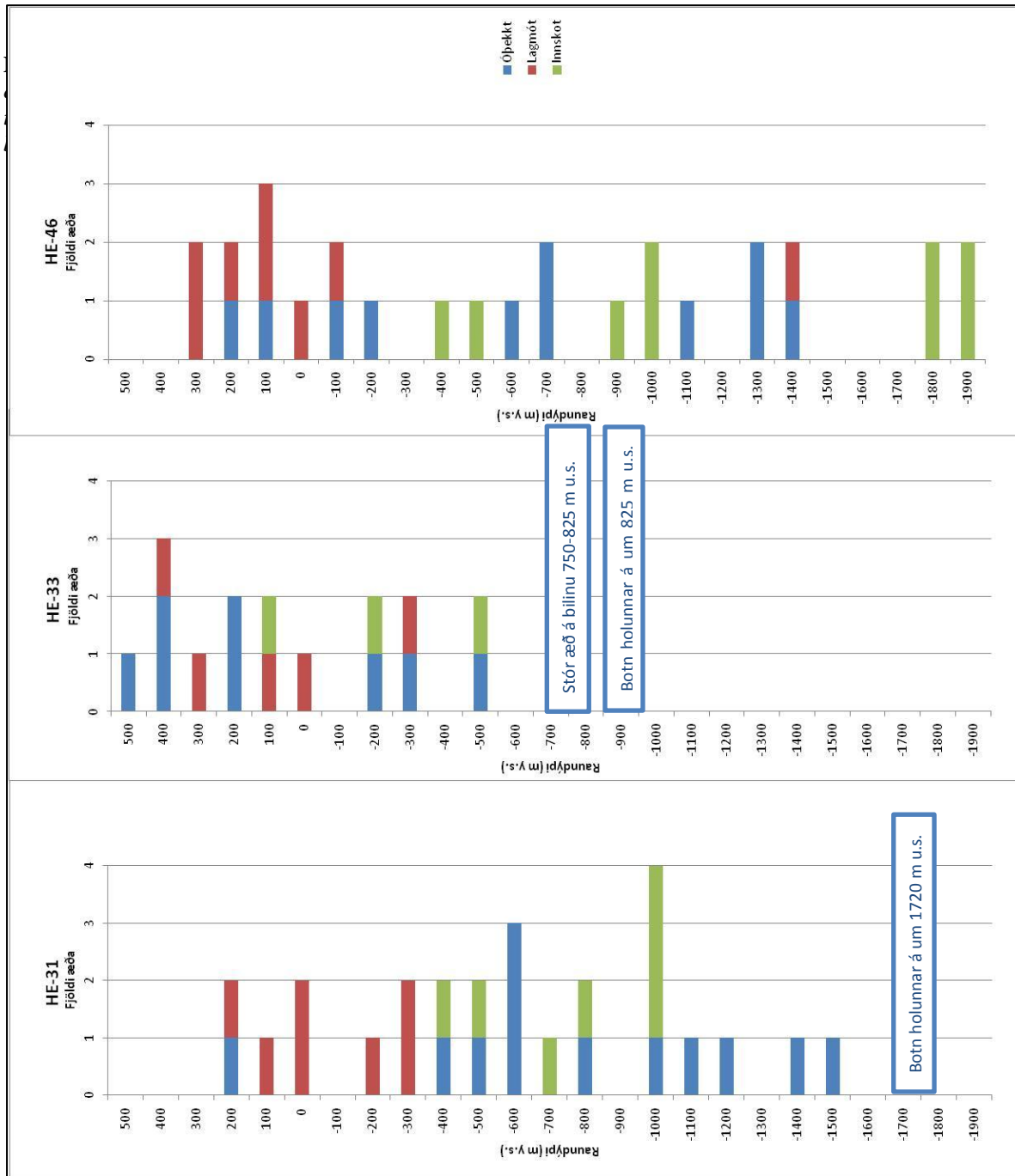
Prepapróf gaf ádælingarstuðullinn 13 (L/s)/bar. Það rennir enn frekari stoðum undir það að holan sé nokkuð vel opin.

Hellisheiði HE-46
Sleggjubeinsdalir
Arnessýsla



Mynd 2.14 Hitamælingar í holu HE-46. Dýptarbil stærstu æða merkt á mynd.

2.4.4 Stærð og dreifing vatnsæða og tengsl þeirra við jarðfræðilega þætti



Tengsl vatnsæða og jarðfræðilegra þátta eru ekki vel þekkt í íslenskum háhitakerfum. Þó eru í eldri athugunum sterkar vísbendingar um að vatnsæðar komi fram í tengslum við innskot og á jarðlagamótum (*Hjalti Franzson, 1987, 1995, 1998, 2004*).

Með því að kortleggja jarðlagastaflann í hverri holu og staðsetja vatnsæðar er hægt að skoða þessi tengsl, þ. e. hvort vatnsæðarnar séu staðsettar við innskot, við jarðlagamót eða hvort aðrir þættir skýri staðsetningu og stærð þeirra, t. d. tengsl þeirra við misgengi og sprungukerfi.

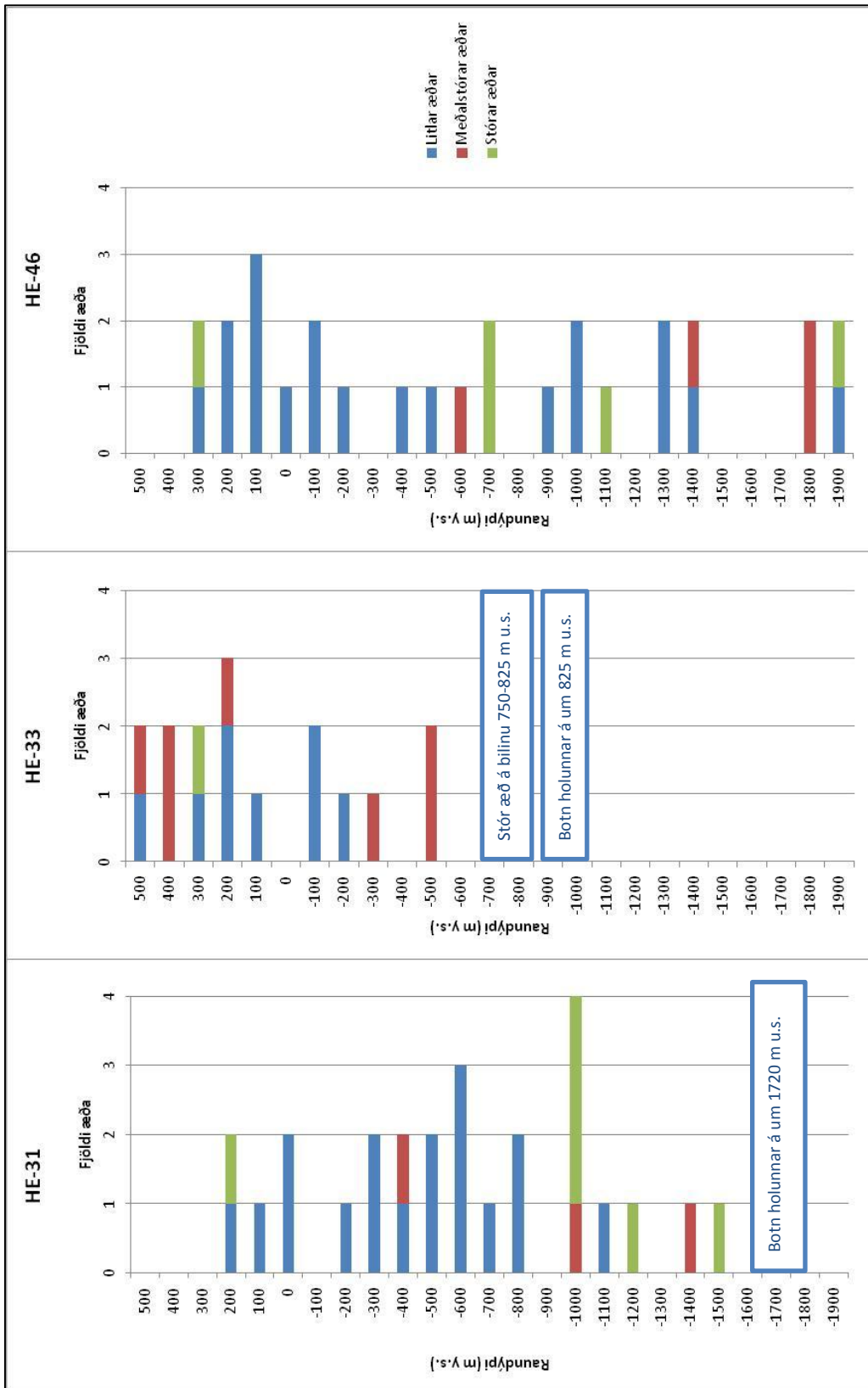
Samantekt á æðum í holum HE-31, HE-33 og HE-46 og tengslum þeirra við innskot og jarðlagamót má sjá á mynd 2.15.

Þó margar æðanna falli í hvorugan flokk, þ. e. virðast hvorki tengjast lagmótum né innskotum, benda niðurstöður til þess að æðar tengdar lagmótum séu ríkjandi í efri hluta holanna, þ. e. ofan 300 m u. s. Frá 400 m u. s. virðist lekt hinsvegar frekar tengjast innskotum. Aðrar æðar í holunum tengjast að öllum líkindum sprungusveimum og misgengjum. Gögn úr fleiri holum þarf til að skoða þetta samband betur.

Samantekt á stærð æða í HE-31, HE-33 og HE-46 má sjá á mynd 2.16.

Stórar æðar virðast koma fram á tveimur dýptarbilum í holunum; annars vegar fyrir ofan 200 m y.s. og á bilinu 700-1500 m u. s. Aðeins eru þó gögn úr einni holu neðan 1500 m.

Ofan 200 m y.s. má gera ráð fyrir að staflinn sé ekki jafnþéttur og þegar neðar dregur þar sem útfellingar hafa ekki náð að fylla holrúm og sprungur í staflanum. Neðan 700 m u.s. má gera ráð fyrir að stórar æðar tengist aukinni tíðni innskota. Aðrar ályktanir er erfitt að draga um dreifingu æða eftir stærð, auk þess sem gögn úr fleiri holum þarf til að spá frekar fyrir um þetta samband.



Mynd 2.16 Stærð og dreifing vatnsæða í HE-31, HE-33 og HE-46. Litlar æðar eru táknaðar með bláu, meðalstórar með rauðu og stórar með grænu.

2.5 Ummyndun

Frumsteindir bergs eru þær sem kristallast úr kviku þegar kvikan storknar. Þessar steindir komast úr jafnvægi við breyttar aðstæður, t.d. í jarðhitakerfum þar sem mikill hiti og vatnsstreymi veldur því að efnahvörf eiga sér stað milli jarðhitavökvans og bergsins. Frumsteindir brotna niður og mynda ummyndunarsteindir sem eru stöðugar við það ástand sem ríkir í jarðhitakerfinu.

Unnt er að greina þrjár megingerðir ummyndunar í staflanum (*Mehegan o.fl., 1982*):

1. Svæðisbundin ummyndun (*e. regional alteration*) hrauna og millilaga. Ummyndun hefst með veðrun á yfirborði og eykst niður á við. Fyrst fylla zeólítar holrými, þá taka leirsteindir yfirhöndina og loks klórít-epidótásýnd þar sem epidót sést í töluverðu magni ásamt klóríti og andradít granati í dýpstu sniðum.
2. Jarðhitaummyndun er keimlík dýpstu sniðum svæðisbundinnar ummyndunar, þar sem háhitaummyndunarsteindir (*e. high temperature alteration minerals*) á borð við epidót og klórít koma í stað zeólíta. Það gerist þó á minna dýpi við jarðhitaummyndun en svæðisbundna ummyndun. Jarðhitaummyndun einkennist auk þess af mjög staðbundinni ummyndun þar sem mjög ummyndað berg og berg sem aðeins er lítið ummyndað getur fundist á litlu svæði. (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1979*)
3. Ummyndun innskota er frábrugðin ummyndun jarðlagastaflans. Í ljósi þess að ummyndunin endurspeglar það umhverfi sem innskotið er í getur háhitaummyndun á innskotabergi átt sér stað án nokkurrar fyrri ummyndunarsögu. Við kortlagningu á jarðhitaummyndun í gabbróum á A-Grænlandi kom í ljós að háhitasteindir á borð við amfíból, epidót og albít voru algengastar meðan steindir á borð við serpentine og zeólíta fundust annað hvort í litlu mæli eða voru túlkaðar sem seinni tíma ummyndun, myndaðar undir lok kælingar gabbróanna (*Bird, 1988*). Ummyndun innskota er ekki skoðuð sérstaklega í þessum kafla en hún kemur nánar við sögu í kafla 3.

Ummyndunarsteindir endurspegla það hitastig sem var ríkjandi þegar þær mynduðust. Dreifing ummyndunarsteindanna gefur til kynna breytingar í jarðhitakerfinu, bæði með tilliti til efnasamsetningar og hita. Lekt, aldur jarðhitasvæðis og bergmyndana og efnasamsetning jarðhitavökvans eru allt þættir sem hafa áhrif á umfang ummyndunar og stig ummyndunar. Berghiti er þó sá þáttur sem hefur mest áhrif á ummyndunarstig bergsins (*Hrefna Kristmannsdóttir & Jens Tómasson, 1979*).

Ummyndunarsteindir sem greindar eru í sama sýni geta því hafa myndast á mismunandi tímaskiðum við mismunandi hitastig. Þar af leiðandi geta þær gefið mikilvægar upplýsingar um þróun jarðhitakerfisins í tímans rás (*Guðmundur Ómar Friðleifsson, 1983*).

Dreifing ummyndunarsteinda segir til um ummyndunarhita (tafla 2.1). Sé ummyndunarhiti borinn saman við núverandi berghita gefur það vísbendingu um þróun jarðhitakerfisins, þ.e. hvort svæði séu að hitna eða kólna eða hvort þau séu í jafnvægi (sjá nánar í kafla 2.5.3).

Mat á ummyndun bergs í holum HE-31 og HE-33 á Skarðsmýrarfjalli og HE-46 við Kolviðarhól hefur beinst að þremur þáttum:

1. Ummyndun frumsteinda og glers.
2. Mati á dreifingu hita í jarðhitakerfinu út frá dreifingu hitaháðra ummyndunarsteinda og samanburður ummyndunarhita við berghita.
3. Könnun á röðun útfellinga til að greina breytingar í jarðhitakerfinu og komast sem næst núverandi ummyndunarástandi.

Þá er gerð grein fyrir niðurstöðum vökvabólurannsókna sem gerðar voru í HE-46.

Hafa skal í huga að ummyndunarsteindirnar eru greindar í svarfi og þunnsneiðum og fer það eftir gæðum sýna hversu auðvelt reynist að greina steindir.

Þá voru aðeins framkvæmdar XRD-leirgreiningar á um 30 sýnum úr hverri holu, og jafnvel þó reynt sé að taka sem flest sýni þar sem mestar breytingar eru í ummyndunarsteindafylkjum eru skekkjumörk á dýptarbilum allnokkur, og getur skeikað tugum metra.

2.5.1 Ummyndun frumsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46

Helstu frumsteindir í basalti eru ólivín, plagíóklas, pýroxen og málmsteindir. Auk þess er gler algengt þar sem kvikan hefur snöggkólnað.

Gler er einna viðkvæmast fyrir ummyndun en viðkvæmust frumsteindanna er ólivín en það er sú steind sem kristallast við hæstan hita. Undir venjulegum kringumstæðum er plagíóklas næst í útfellingaröðinni og loks hefst ummyndun á pýroxen og málmsteindum.

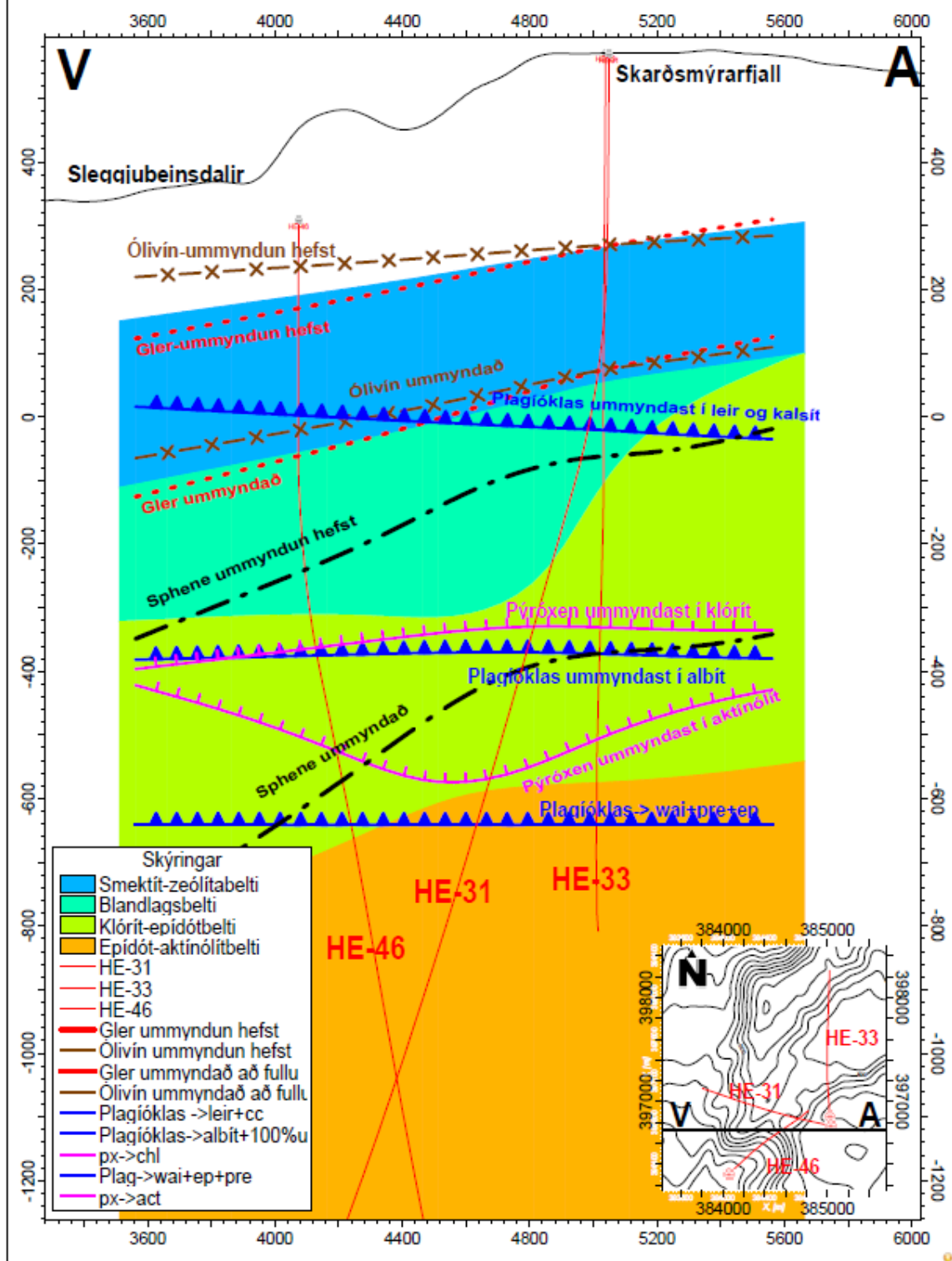
Ummyndun frumsteinda virðist að einhverju leyti í samræmi við ummyndunarbeltin, þ.e.a.s. smektít-zeólítabeltið, blandlagsbeltið, klórítbeltið, klórít-epidótbeltið og epidót-amfíbólbeltið, en þau eru nánar skilgreind í kafla 2.5.2.

Þess ber þó að geta að í HE-31, HE-33 og HE-46 er ekkert eiginlegt klórítbelti, þar sem klórít og epidót koma fram á svipuðum slóðum í öllum holunum, að undanskilinni HE-31 em epidót er greint á undan klóríti.

Mynd 2.17 sýnir ummyndun frumsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46 ásamt ummyndunarbeltunum. Þess ber þó að geta að hér er einungis átt við ummyndun frumsteinda í jarðlagastaflanum en ekki í innskotabergi þar sem óummyndaðar frumsteindir geta fundist þrátt fyrir hátt ummyndunarstig staflans sem umlykur innskotið.

Dýptarbil sem tekin eru fram í textanum eru mæld dýpi.

Ummyndun frumsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46



Mynd 2.17 Ummyndun frumsteinda í HE-31 (í miðju), HE-33 (hægra megin) og HE-46 (vinstra megin) ásamt ummyndunarbeltum. Skýringar og staðsetning þversniðs er merkt inn á mynd.

Ummyndun glers

Gler er ekki eiginleg steind, en það myndast þar sem kvikan hefur snöggkólnað og því ekki náð að kristallast, t. d. á jöðrum hraunlaga og við gos undir jökli eða í vatni. Gler ummyndast aðallega í leir, en auk þess í kalsít, zeólíta og kvars.

Í HE-31 og HE-33 hefst ummyndun á gleri þegar komið er smektít-zeólítabeltið á um 300 m dýpi og er leir algengasta ummyndunarsteind glersins. Á svipuðu dýpi sést einnig ummyndun glers í zeólíta, aðallega mesólít og skólesít. Gler er þó ekki að fullu ummyndað fyrr en komið er í blandlagsbeltið á um 520 m dýpi í HE-31 og um 550 m dýpi í HE-33. Þá fer að auki að bera meira á ummyndun glers í kalsít, en kalsít er í töluverðu magni á þeim slóðum. Á um 700 m dýpi sést svo ummyndun glers í kvars.

Ummyndun liggur töluvert grynnra í HE-46, en komið er í smektít-zeólítabeltið á um 90 m dýpi. Á um 160 m dýpi hefst ummyndun glers í leir og á um 200 m dýpi sést ummyndun þess í zeólíta svo sem kabasít, mesólít og skólesít. Á tæplega 400 m dýpi er komið í blandlagsbeltið og sjást þá, líkt og í holum HE-31 og HE-33, glerkorn sem eru að fullu ummynduð og á þeim slóðum er gler að auki ummyndað í kvars.

Blandlagsleir er talinn myndast við 200-230°C hita og virðist gler því geta haldist ferskt að einhverju leyti þar til því hitastigi er náð. Gler er þó að fullu ummyndað töluvert áður en komið er í klórítbeltið en klórít er talið myndast við 230°C (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1979*).

Þetta er í góðu samræmi við þær rannsóknir sem gerðar hafa verið á ummyndun í vinnsluholum á Nesjavöllum (*Hjalti Franzson, 1994*) en megin niðurstaða þeirra er sú að þó gler ummyndist að mestu leyti innan smektít-zeólítabeltisins, líkt og í holum HE-31, HE-33 og HE-46, en gler er þó ekki að fullu ummyndað fyrr en komið er í blandlagsbeltið.

Ummyndun ólivíns

Ólivín er fyrst af frumsteindum basalts til að ummyndast. Það sést bæði í grunnmassa og sem díll. Fyrstu merki ummyndunar á ólivíni er oft rauðleit iddingsít ummyndum á sprungum og jöðrum kristalla. Ólvín ummyndast aðallega í leir en einnig í kalsít.

Í holum HE-31 og HE-33 sést iddingsít ummyndun á jöðrum ólivín-kristalla þegar á um 70 m dýpi, töluvert áður en komið er í smektít-zeólítabeltið. Iddingsít er ummyndunar- eða veðrunarafbrigði ólivíns og er rauðleitt eða jafnvel svart á lit (*Kristján Sæmundsson & Einar Gunnlaugsson, 2002*). Á þessum slóðum eru einu ummyndunarsteindirnar kaldavatnsummyndun á borð við límónít og karbónathnúða. Ummyndun ólivíns í leir hefst þó ekki fyrr en komið er í smektít-zeólítabeltið á um 300 m dýpi. Þegar komið er í

blandlagsbeltið, á um 520 m dýpi í HE-31 og um 550 m dýpi í HE-33, er ólivín nánast að fullu ummyndað í leir og kalsít.

Í HE-46 sjást fyrstu merki um ummyndun á ólivíni þegar á um 80 m dýpi, þar sem kalsítummyndun á ólivíni sést, en komið er í smektít-zeólítabeltið litlu neðar, eða á um 90 m dýpi. Ólivín er svo að fullu ummyndað í leir og kalsít á um 350 m dýpi, en komið er í blandlagsbeltið á tæplega 400 m dýpi.

Í öllum þremur holunum virðist ólivín fyrst og fremst ummyndast innan smektít-zeólítabeltisins, þótt fyrstu merki ummyndunar sjáist nokkru áður. Ólivín er ummyndað að fullu þegar komið er í blandlagsbeltið, en blandlagsleir er sem fyrr segir talinn myndast við um 200-230°C (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1979*).

Ummyndun plagíóklasa

Plagíóklas er ein algengasta frumsteindin í basalti, bæði í grunnmassa og sem díll. Í þunnsneið þekkist það á nálar- eða listalaga kristöllum, ljósu eða hvítu yfirbragði, lágu risi og tvíburun. Algengast er að plagíóklas ummyndist yfir í albít, sem er natríumríkt afbrigði af plagíóklas, en einnig er leir- og kalsítummyndun algeng. Auk þess sést plagíóklas ummyndast í wairakít, prehnít og epidót.

Ummyndun plagíóklas í HE-31 og HE-33 hefst innan blandlagsbeltisins, á um 600 m dýpi, en komið er í blandlagsbeltið á um 520 m dýpi í HE-31 og um 550 m dýpi í HE-33. Fyrstu merki um ummyndun eru aðallega kalsít- og leirummyndun í sprungum. Á um 1000 m dýpi er plagíóklas nánast alveg ummyndaður, aðallega í albít og kalsít, en kalsít er mjög algengt á þessum slóðum bæði í HE-31 og HE-33. Á svipuðu dýpi er komið í klórít-epidótbeltið, en efri mörk beltisins eru á 900 m í HE-31 og 710 m í HE-33. Á um 1200 m dýpi er epidót og prehnít mjög algengt og sést það meðal annars sem ummyndun á plagíóklas auk wairakíts en á svipuðum slóðum er komið í epidót-aktinólítbeltið, eða á um 1200 m í HE-31 og á um 1100 m í HE-33.

Í HE-46 hefst plagíóklas-ummyndun á um 300 m dýpi, nokkru áður en komið er í blandlagsbeltið og þá aðallega sem kalsít-ummyndun. Þarna sést einnig ummyndun plagíóklasa í zeólíta, aðallega mesólít eða skólesít. Komið er í blandlagsbeltið á um 390 m dýpi og sést leirumyndun á sprungum plagíóklasa á tæplega 400 m dýpi. Á um 630 m dýpi er komið í klórít-epidótbeltið og á um 700 m dýpi er plagíóklas nánast alveg ummyndaður, aðallega í albít og kalsít. Á um 1000 m dýpi sést ummyndun plagíóklasa í wairakít og epidót en komið er í epidót-aktinólítbeltið á svipuðu dýpi, eða á tæplega 1100 m dýpi.

Í skýrslu um rannsókn á ummyndun frumsteinda í holum á Nesjavöllum er ummyndun plagíóklasa talin tengjast þremur tímaskeiðum (*Hjalti Franzson, 1994*). Það elsta er talið tengjast þeim tíma er zeólítavirkni var sem mest, þ.e.a.s. lághitaummyndun áður en komið er í hið eiginlega háhitakerfi. Á því tímaskeiði sést ummyndun plagíóklasa í zeólíta. Meginummyndunin er svo talin tengjast háhitavirkninni og eru efri mörk þeirrar ummyndunar mest áberandi í tengslum við leir/kvars/prehnít/wairakít-útfellingatímabilið. Fyrsta stig þeirrar ummyndunar er leirumyndun í sprungum plagíóklasa nokkuð ofan við eða nærri efri mörkum blandlagsbeltisins og síðan ummyndun plagíóklasa í albít sem fellur nokkuð vel saman við efri mörk klórítbeltisins. Þá verður innan klórít-epidót og epidót-aktinólítbeltisins vart við ummyndun plagíóklasa í sphene, wairakít og epidót.

Þriðja ummyndunartímabilið er svo kalsítummyndun á plagíóklösum sem talin er tengjast virkum vatnsæðum innan háhitakerfisins.

Þessar niðurstöður virðast í nokkuð góðu samræmi við niðurstöður úr holum HE-31, HE-33 og HE-46. Ekki varð þó vart við ummyndun plagíóklasa í zeólíta í holum HE-31 og HE-33 enda eru zeólítar ekki algengir í þeim holum. Í HE-46 sást hinsvegar ummyndun plagíóklasa í zeólíta innan smektít-zeólítbeltisins, sér í lagi í skólesít og mesólít.

Leirumyndun í sprungum plagíóklasa hefst nokkuð neðan við efri mörk blandlagsbeltisins í HE-31 og HE-33 en fellur vel saman við efri mörk þess í HE-46. Þá fellur ummyndun plagíóklasa í albít vel saman við efri mörk klórítbeltisins, eða í þessu tilviki klórít-epidótbeltisins, í öllum holunum. Ekki varð vart við sphene-ummyndun á plagíóklas í holunum, en plagíóklas sást bæði ummyndast í wairakít og epidót innan epidót-aktinólítbeltisins.

Ekki eru skýr merki um tengsl vatnsæða og kalsít-ummyndunar á plagíóklösum í HE-31 og HE-33, en mjög mikið kalsít er í báðum holunum auk þess sem lekt er töluverð í þeim báðum, sér í lagi í HE-31. Í HE-46 er kalsít-ummyndun á plagíóklas áberandi á kafla á 300-400 m dýpi, en á þeim slóðum eru tvær æðar skornar. Þá var áberandi kalsít-ummyndun á tæplega 800 m dýpi og var vatnsæð skorin rétt neðan þess.

Ummyndun pýroxen

Pýroxen er ein af frumsteindunum í basalti. Algengast er klínopýroxen, en það sést bæði í grunnmassa og sem dýlar. Pýroxen ummyndast bæði í klórít og aktinólít og er því ummyndun pýroxen nátengd ummyndunarbeltunum.

Ummyndun á pýroxen í klórít hefst á um 900 m dýpi í holu HE-31 og á um 950 m í HE-33 en á um á um 700 m dýpi í holu HE-46, og fellur það því ágætlega saman við efri mörk klórít-epidótbeltisins í öllum holunum.

Aktínólít er fyrst greint á um 1230 m í holu HE-31 og á tæplega 1100 m dýpi í HE-33 og HE-46, og markar það efri mörk epidót-amfíbólbeltisins.

Ummyndun málmsteinda

Málmsteindir sjást í grunnmassa basalts, en þó ekki í verulegu magni. Magn þeirra eykst þó í þróaðra (kísilríkara) bergi. Málmsteindir eru dökkar eða svartar að lit og ógegnsæjar bæði í einskautuðu og tvískautuðu ljósi í þunnsneið. Þær þekkjast bæði á litnum og kristalbyggingu. Málmsteindir eru oftast meðal síðustu steinda til að ummyndast og ummyndast þá aðallega yfir í sphene (títanítt).

Sphene-ummyndun hefst á um 650 m dýpi í holum HE-31 og HE-33 og á um 600 m dýpi í HE-46. Á um 1000 m dýpi eru málmsteindir að mestu leyti ummyndaðar í sphene í öllum þremur holunum, þó ferskari málmsteindir sjáist einnig í innskotabergi neðan þess dýpis.

Í holum á Nesjavöllum er sphene fyrst greint neðarlega í blandlagsbeltinu eða ofarlega í klórítbeltinu (*Hjalti Franzson, 1994*). Sphene-ummyndun á málmsteindum hefst nokkuð ofarlega í HE-31 og HE-33, eða á um 600 m dýpi, en komið er í blandlagsbeltið á rúmlega 500 m dýpi í báðum holum. Í HE-46 er sphene fyrst greint við mörk blandlags- og klórítbeltisins, en komið er í klórít-epidótbeltið á um 630 m dýpi og er það því í samræmi við það sem sést í holum á Nesjavöllum.

2.5.2 Dreifing ummyndunarsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46

Rannsóknir sem gerðar hafa verið á basaltummyndun á jarðhitasvæðum sýna röð ummyndunarsteindafylkja sem breytast með auknu dýpi og hita. Hrefna Kristmannsdóttir (1979) skilgreindi fjögur ummyndunarbelti í þessu samhengi:

- 1) **Smektít-zeólítabelti** – Efri mörk beltisins markast af myndun smektíts og lághitazeólíta á borð við thomsonít, kabasít, mesólít, skólesít og stilbít, en það eru allt zeólítar sem myndast við hita undir 120°C. Zeólítar eru natríum, kalíum og/eða kalsíum álsiliköt sem innihalda laust bundið vatn og myndast við lághitaummyndun. Við neðri mörk beltisins hverfa lághitazeólítar og aðrir zeólítar sem eru stöðugri við hita yfir 120°C fara að myndast, en það eru zeólítar á borð við mordenít og laumontít. Wairakít er eini zeólítinn sem myndast við hærri hita, eða um 200°C, og sést víða myndast á kostnað annarra zeólíta svo sem laumontíts. Kvars tekur að myndast við neðri mörk beltisins, en það er talið myndast við um 180°C.
- 2) **Blandlagsbelti** – Efri mörk beltisins liggja þar sem smektít fer að þróast í blandlagsleir, en það er talið gerast við um 200°C. Neðri mörk beltisins afmarkast af myndun klóríts, en það er talið gerast við um 230°C. Blandlagsbeltið liggur því á nokkuð afmörkuðu hitabili frá um 200-230°C.
- 3) **Klórít-epidótbelti** – Efri mörk beltisins liggja þar sem klórít og epidót fara að myndast, en það er talið gerast við um 230°C. Um miðbik beltisins verður epidót algengt og fallegir kristallar fara að myndast.
- 4) **Klórít-aktinólítbelti** – Efri mörk beltisins liggja þar sem aktinólít fer að myndast, en það er talið gerast við um 280°C. Innan beltisins eru plagíóklasar almennt ummyndaðir í albít.

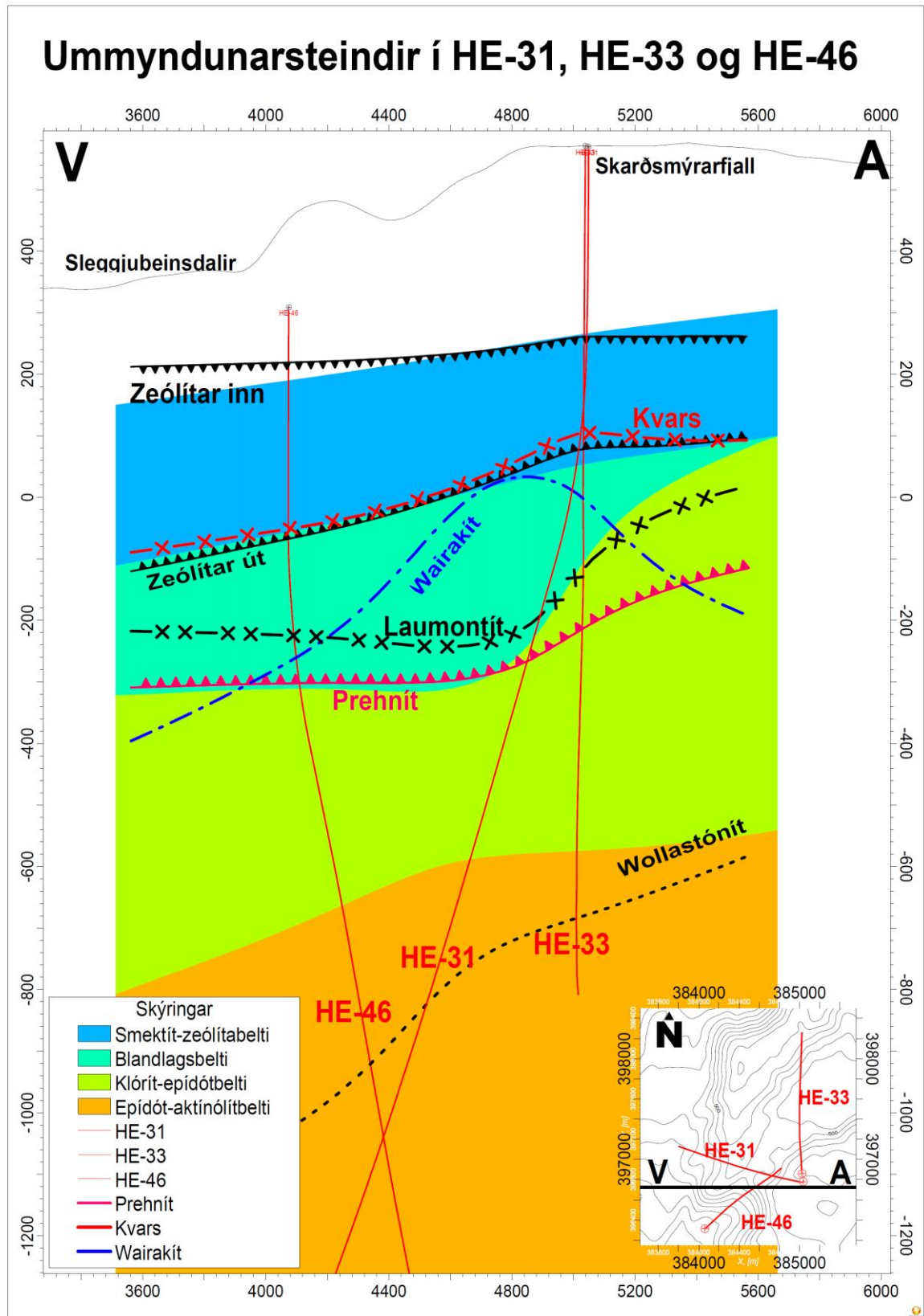
Rannsóknir Hjalta Franzsonar (1994, 2000) á ummyndun í jarðhitasvæðinu á Nesjavöllum sýndu að klórít er iðulega komið fram nokkuð fyrir en epidót, og skilgreindi hann því fimmta ummyndunarbeltið, **klórítbeltið**, neðan blandlagsbeltisins og liggja efri mörk þess þar sem klórít kemur fyrst fram og neðri mörk við innkomu epidóts. Hann nefnir svo klórít-aktinólítbeltið epidót-aktinólítbelti og er notast við þá flokkun hér.

Í HE-31 og HE-33 kemur klórít inn neðar en epidót og í HE-46 koma klórít og epidót inn á sömu slóðum. Því er klórítbeltið ekki skilgreint í þeim holum sem fjallað er um í þessari ritgerð.

Þversniðið á mynd 2.18 sýnir dreifingu helstu ummyndunarsteinda í holunum, dýptartölur eru raundýpi. Dreifingu ummyndunarsteinda í holunum ásamt jarðlögum og

ummyndunarbeltum í HE-31 má sjá á myndum 2.20 og 2.21, í HE-33 á mynd 2.22 og 2.23 og í HE-46 á myndum 2.24-2.26. Skýringar við jarðlagasnið og ummyndun er að finna á mynd 2.19.

Dýpi sem tiltekin eru í textanum eru mæld dýpi. Nánar er fjallað um myndun leirsteinda í ummyndunarbeltunum í kafla 3.



Mynd 2.18 Þversnið sem sýnir ummyndunarbelti og efri mörk nokkurra hitaháðra ummyndunarsteinda í HE-31, HE-33 og HE-46. Skýringar og staðsetning þversniðs er merkt mynd.

Fyrstu merki ummyndunar: Útfellingar í köldu grunnvatnskerfi

Fyrstu merki ummyndunar í HE-31, HE-33 og HE-46 eru límónít og karbónathnúðar sem fallið hafa út í köldu grunnvatnskerfi.

Límónít er rauðbrún eða gulbrún steind sem myndast við oxun járnríkra steinda (*Kristján Sæmundsson og Einar Gunnlaugsson, 2002*). Karbónat myndar hinsvegar gulleita eða rauðbrúna, geislótta hnúða. Hvort tveggja myndast sem yfirborðs- eða kaldavatnsummyndun og eru aðalummyndunarsteindirnar í efstu 300 m í HE-31 og HE-33 og efstu 100 m í HE-46.

Límónít er greint frá yfirborði í HE-31 og HE-33 og karbónathnúðar frá um 250 m dýpi. Hvort tveggja hverfur á um 340 m dýpi, á svipuðum slóðum og ópall/kalsedón byrjar að falla út. Límónít er einnig greint frá yfirborði í HE-46 og örla fer á karbónati strax á 50 m dýpi. Fyrstu zeólítarnir auk ópals/kalsedóns sjást á um 90 m dýpi. Komið er í smektít-zeólítabeltið á um 90 m dýpi, þegar smektít er fyrst greint, og hverfa karbónathnúðar fljótlega eftir það, eða á um 160 m dýpi. Límónít er þó greint reglulega allt niður á um 350 m dýpi.

Lághitaummyndun: Smektít-zeólítabeltið (<200°C)

Á um 300 m dýpi er komið í smektít-zeólítabeltið í holum HE-31 og HE-33 þegar smektít er fyrst greint í holunum (myndir 2.20 og 2.22). Smektít getur myndast við grunnvatnshita og allt upp í um 200°C, en þá þróast það yfir í blandlagsleir. Ítarlegar er fjallað um smektít og aðrar leirsteindir í 3. kafla þessarar ritgerðar.

Ópall/kalsedón er, sem fyrr segir, fyrst greint á um 340 m dýpi og rétt neðan við það eru fyrstu zeólítarnir greindir, sem er í samræmi við athuganir Hjalta Franzsonar (*1994*) og rannsóknir George Walkers (*1960*) á zeólítabeltum á Austurlandi.

Zeólítar mynda hvíta eða litlausa kristalla og eru þeir greindir sundur á kristalforminu. Fyrstu zeólítarnir sem greindir voru í HE-31 og HE-33 eru kabasít, analsím, thomsonít og heulandít. Nokkru neðar greindist svo skólesít eða mesólít. Skólesít þekkist á geislóttum nálum og mesólít á smágerðum geislaknippum en oft er erfitt að greina á milli þessara zeólíta og eru þeir því flokkaðir saman hér. Á sama hátt voru heulandít og stilbít flokkaðir saman.

Ummyndun liggur töluvert grynnra í HE-46 og er komið í smektít-zeólítabeltið þegar á um 90 m dýpi þegar fyrstu zeólítarnir eru greindir en það eru kabasít og thomsonít, auk þess sem smektít er fyrst greint á svipuðu dýpi (sjá mynd 2.24). Nokkru neðar, eða á um 200 m dýpi voru svo zeólítarnir analsím, heulandít/stilbít og skólesít/mesólít fyrst greindir.

Analísím greindist víða á um 170-290 m dýpi, en einnig í svarfgreiningu á 500-600 m dýpi. Erfitt er að greina á milli analsíms og wairakíts í víðsjá og leikur grunur á að um wairakít sé að ræða á 500-600 m dýpi, enda er það í samræmi við ummyndunarstigið á því dýptarbili, en þar er komið í kvars og blandlagsleir.

Ekki bar mikið á zeólítum í holunum en þeir voru þó heldur algengari í HE-46. Þá var laumontít aðeins grein að einhverju marki í HE-46.

Rannsóknir Hrefnu Kristmannsdóttur (1979) gefa til kynna að wairakít myndist í kjölfar laumontíts, sem er þá við neðri mörk smektít-zeólítabeltisins, og ætti því að vera ein af einkennissteindum blandlagsbeltisins og þar fyrir neðan.

Fyrstu merki háhitaummyndunar: Blandlagsbeltið (200-230°C)

Komið er í blandlagsbeltið á um 520 m dýpi í HE-31, á um 550 m dýpi í HE-33 og á tæplega 400 m dýpi í HE-46, þegar smektít fer að þróast yfir í blandlagsleir (*e. mixed layer clay, MLC*). Á sömu slóðum hverfa zeólítar og kvars er fyrst greint í öllum holunum, en kvars er talið myndast við minnst 180°C (sjá myndir 2.20, 2.22 og 2.24).

Blandlagsleir er nokkurs konar millistig milli smektíts og klóríts og myndast á þann hátt að einstaka klórítblöð fara að myndast inn á milli smektítlaga í leirnum. Klórítlögunum fjölgar svo á kostnað smektítlaganna eftir því sem neðar dregur í holunum og ummyndunarstig hækkar þar til smektítlögin hverfa nánast alveg og leirinn hefur að fullu þróast í klórít með aðeins lítils háttar klórítblöndun. Blandlagsleir er fyrst og fremst greindur með XRD en einnig í þunnsneiðum og er nokkuð gott samræmi milli þessara greininga í öllum holunum. Þar sem misræmi er milli greininga var XRD-greining látin ráða. Sem fyrr segir er ítarlega fjallað um leirsteindir í kafla 3.

Auk blandlagsleirs og kvars er wairakít (ummyndundarhiti 200°C) fyrst greint innan blandlagsbeltisins á um 600 m dýpi í HE-31, á um 660 m dýpi í HE-33 og á um 490 m í HE-46.

Háhitaummyndun: Klórít-epidótbeltið (230-280°C)

Klórít er fyrst greint á um 900 m dýpi í þunnsneið í HE-31 (mynd 2.20), með XRD-greiningu á um 710 m í HE-33 (mynd 2.22) og á um 640 m í HE-46 (mynd 2.24).

Epidót er einnig greint á þessu dýptarbili í HE-33 og HE-46, eða á 710 m og 630 m, en epidót er auðgreinanlegt á gulum eða gulgrænum lit. Það er hinsvegar fyrst greint nokkuð ofan við klórít (XRD) í HE-31, eða í víðsjárgreiningu á 832 m. Blandlagsleir er þó

greindur allt niður á 896 m dýpi með XRD og því er miðað við að komið sé í klórít-epidótbeltið á rúmlega 900 m dýpi í HE-31, en klórít er fyrst greint í þunnsneið á 918 m og á 944 m dýpi með XRD. Talið er að klórít byrji, líkt og epidót, að myndast við um 230°C, en í ljósi þess að klórít myndast yfirleitt ofar en epidót bendir það til þess að epidót myndist við heldur hærri hita.

Auk klóríts og epidóts er prehnít (ummyndunarhiti 240°C) greint á svipuðu dýptarbili, eða á 880 m dýpi í HE-31, um 750 m í HE-33 og um 620 m í HE-46.

Á þessum slóðum eru HE-31 og HE-33 óðum að fjarlægjast hvor aðra og munurinn milli hola eykst, en holurnar eru báðar stefnuboraðar og er HE-31 beint til vesturs en HE-33 til norðurs. Þá virðist ummyndun liggja heldur grynna í HE-33 en HE-31, t.a.m. munar 140 m á hvenær epidótvottur er fyrst greindur í holunum og 130 m munur á því hvenær prehnít er fyrst greint. Athygli vekur að ummyndun virðist einnig liggja grynna í holum HE-37 og HE-39 sem staðsettar eru á nyrsta borgteig Skarðsmýrarfjalls, austan við SO-teig, en þeim er beint inn undir Innstadal (*Mesfin, 2010*). Þetta gæti bent til þess að ummyndunin á þessum slóðum endurspegli ástand sem áður var ríkjandi og að norðan Skarðsmýrarfjalls sé gamalt uppstreymissvæði sem fari nú kólnandi.

Annað sem vekur athygli er að á um 600 m og allt niður á um 1000 m er laumontít greint í HE-46, en laumontít er talið myndast á bilinu 120-180°C. Líklegasta skýringin er sú að þarna sé um „gamla“ ummyndun að ræða sem varðveist hefur í þétu bergi, nefnilega zeólítaummyndun er myndaðist áður en staflinn á þessum slóðum varð fyrir háhitaummyndun.

Efri mörk þess svæðis þar sem laumontít er greint liggja einmitt við mörk þar sem komið er í þétt hraunlög. Neðan þeirra er svo bólstraberg og á 780-900 m dýpi er komið í túfflög. Að öllum líkindum liggur laumontítbélið innan hraunlagastaflans og jafnvel einnig innan bólstrabergsins. Þá er ekki ólíklegt að það molni úr laumontítbeltinu við borun og blandist sýnum neðan þess en laumontítkristallar eru mjög brothættir.

Háhitaummyndun: Epidót-aktinólítbélið (>280°C)

Aktinólít er greint með XRD, í svarfi og í þunnsneiðum. Aktinólít var greint í víðsjágreiningu á 1226 m dýpi í HE-31, en síðan ekki fyrr en á 1680 m þar sem það er greint í þunnsneið (sjá mynd 2.21). Í holu HE-33 greindist steindin í XRD á 1068 m dýpi í HE-33 og í þunnsneið á 1160 m (sjá mynd 2.23). Í HE-46 greindist aktinólít í XRD á 1088 m dýpi en í þunnsneið á um 1240 m dýpi (sjá mynd 2.25). Þó nokkurrar óvissu gæti í greiningunum á aktinólíti eru efri mörkin látin ráða beltaskiptingu óháð greiningaraðferð. Aktinólít er talið byrja að myndast við um 280°C og því miðast efri mörk epidót-

aktinólítbeltisins við það hitastig. Innan beltisins er berglagastaflinn orðinn mjög ummyndaður og frumsteindir í grunnmassa vel flestar ummyndaðar.

Auk aktinólíts sást töluvert af wollastóníti innan beltisins í holu HE-46, en það var fyrst greint á rúmlega 1300 m dýpi. Þá var wollastónít greint á 1130 m dýpi í HE-33 og á um 1380 m dýpi í HE-31. Wollastónít er talið myndast við minnst 270°C.

Önnur ummyndun: Kalsít og pýrít

Kalsít og pýrít tengjast hvorugt sérstöku hitastigi, en kalsít er þó óstöðugt við 270-300°C og hverfur þegar hiti fer yfir 300°C (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1979*). Báðar steindirnar eru algengar í öllum þremur holunum og er þeim hér gerð sérstök skil.

Kalsít er greint í sýnum bæði í HE-31 og HE-33 frá um 350 m dýpi og allt þar til svarf hætti að berast til yfirborðs á um 2034 m dýpi í HE-31 og 1792 m dýpi í HE-33.

Það er í miklu magni í nánast öllum sýnum í HE-31 og niður á um 1500 m dýpi í HE-33. Þá sést mjög ágeng kalsítummyndun á kafla á um 500-700 m og á um 1000 m dýpi í báðum holunum. Á þeim slóðum er bæði gler og plagíóklas að miklu leyti ummyndað í kalsít, sem virðist falla út hvar sem færi gefst.

Í HE-46 er kalsít fyrst greint á um 90 m dýpi og finnst í sýnum allt þar til svarf hætti að berast á 2744 m dýpi, þó magn þess fari minnkandi frá um 1600 m. Það er í miklu magni á um 200-300 m dýpi, á 780-920 m dýpi og á 1100-1500 m dýpi. Þá sést mjög ágeng kalsítummyndun í þunnsneiðum á 312 m, 620 m, 886 m, 1670 m og 1798 m.

Þetta bendir til þess að hiti í holunum fari ekki yfir 300°C.

Pýrít myndar teningslaga, gulleita kristalla með sterkum málmgljáa. Pýrít er fyrst greint í svarfi á um 300 m í holu HE-31 (sjá mynd 2.20) og 342 m í HE-33 (sjá mynd 2.22) og sést í mismiklu mæli í sýnum allt þar til svarf hætti að berast á 2034 m dýpi í HE-31 og 1792 m dýpi í HE-33.

Reynslan sýnir að samband virðist vera milli pýríts og lektar. Í HE-31 er allmikið pýrít greint á kafla frá 300-480 m, en á þeim slóðum eru þrjár vatnsæðar í holunni. Annar pýrítríkur kafla er á um 540-720 m. Í efri hluta hans eru greind þrjú innskot auk einnar vatnsæðar, en engin sérstök merki eru um lekt neðan þess. Þá varð vart við töluverða oxun á sömu slóðum. Loks er pýrít algengt á kafla á tæplega 900-1050 m dýpi, en tvær vatnsæðar eru greindar á þessum slóðum.

Í HE-33 er töluvert pýrít greint í sýnum frá um 800-900 m og er ein æð og tvö innskot greind á þessu dýptarbili. Annar pýrítríkuri kaflar er frá um 1000 m á rúmlega 1200 m dýpi, en fimm vatnsæðar auk fimm innskota eru á þessu bili.

Í HE-46 er pýrít fyrst greint á um 200 m dýpi (sjá mynd 2.24) og í mismiklu mæli allt niður á rúmlega 2000 m.

Á um 340-350 m sést aukning í pýríti, en á svipuðu dýptarbili finnst innskot. Þá eru pýrítríkari kaflar á um 1100-1150 m í tengslum við stóra æð, á um 1230-1250 m dýpi og á um 1380-1440 m dýpi, en á því dýptarbili er ein vatnsæð auk nokkurra innskota.


Pýrít virðist því ákjósanleg vísbending um lekt og er það í samræmi við fyrri athuganir.

Skýringar við jarðlagasnið og bergummyndun







Berggerðir

	Hraunlagakargi
	Basalt túff
	Basalt breksía
	Glerjað basalt
	Fin-meðalkorna basalt
	Meðal-grófkorna basalt
	Grófkorna basalt
	Ísúrt túff
	Ísúr breksía
	Ísúrt dul-meðalkorna berg
	Ísúrt grófkorna berg
	Súrt túff
	Súr breksía
	Súrt dul-meðalkorna berg
	Súrt grófkorna berg
	Jökulberg
	Eðjusteinn
	Sandsteinn
	Möl og steinar
	Svarf vantar

Innskot

	Innskot
	Hugsanlegt innskot




Ummyndunarbelti

	Ferskt belti
	Sme-zeol belti
	Blandlagsbelti
	Klórít belti
	Kló-epíd belti
	Epi d-amfí b belti

Ummyndunarstig

	Engin ummyndun
	Lítill ummyndun
	Meðal ummyndun
	Mikil ummyndun

Vatnsæðar

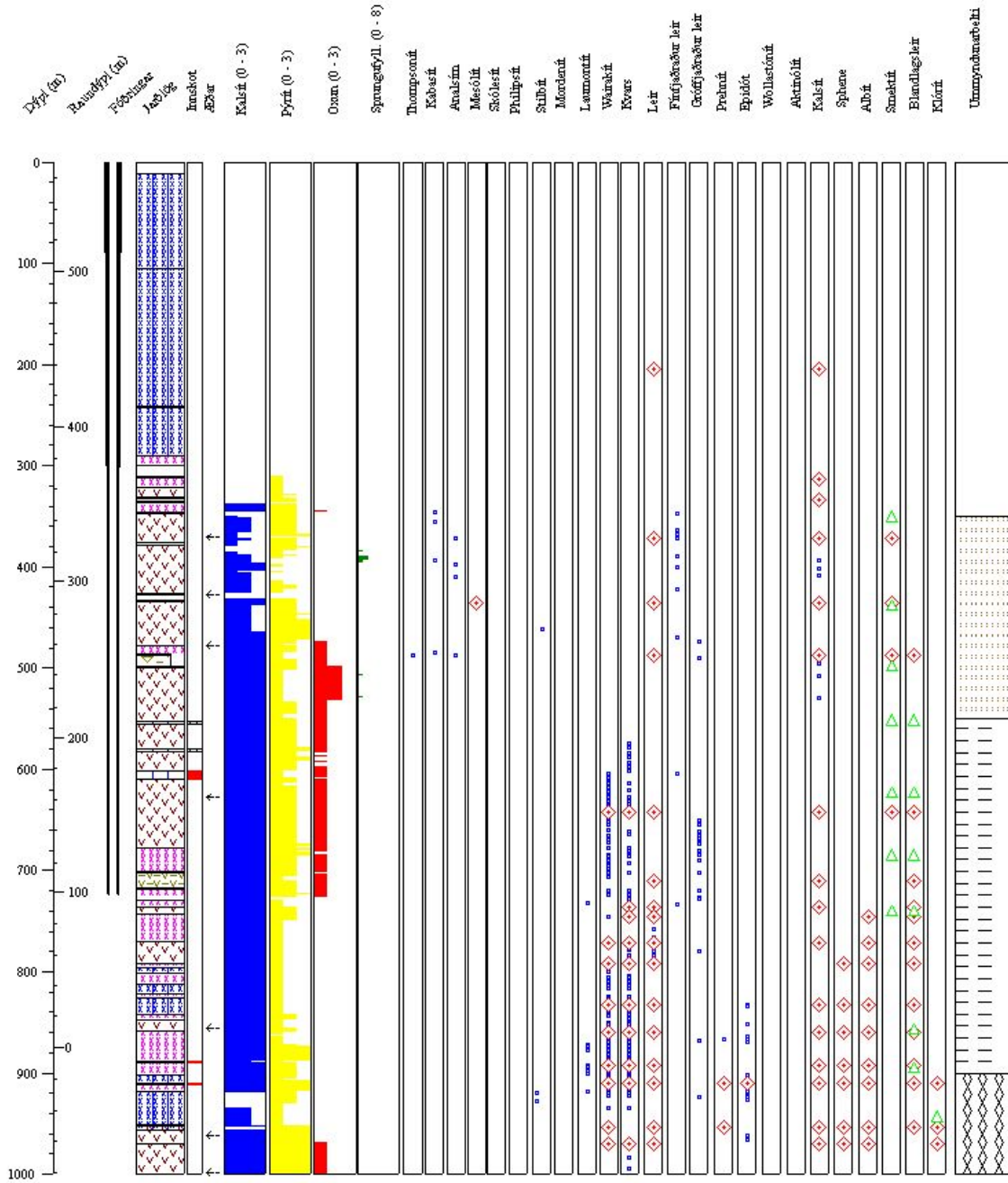
Sym. númer	
7	 Lítill æð
8	 Meðal æð
9	 Stór æð

Greining ummyndunarsteinda

Sym. númer	
	 Greining í viðsjá
	 Greining í bergfræðismásjá
	 XRD-greining

Mynd 2.19 Skýringar við dreifingu ummyndunarsteinda og jarðlagasnið.

Staður: Skarðsmýrarfjall Bor: Sleipnir/Óðinn Skolvöðvi: Vatn/loft/leðja Staðarnúmer: 95131
 Holunagn: HE-31 Dýptarbil: 0-1000 m Verkhlufti: Forb., 1., 2. og 3. áf Starfsmenn: SaOS

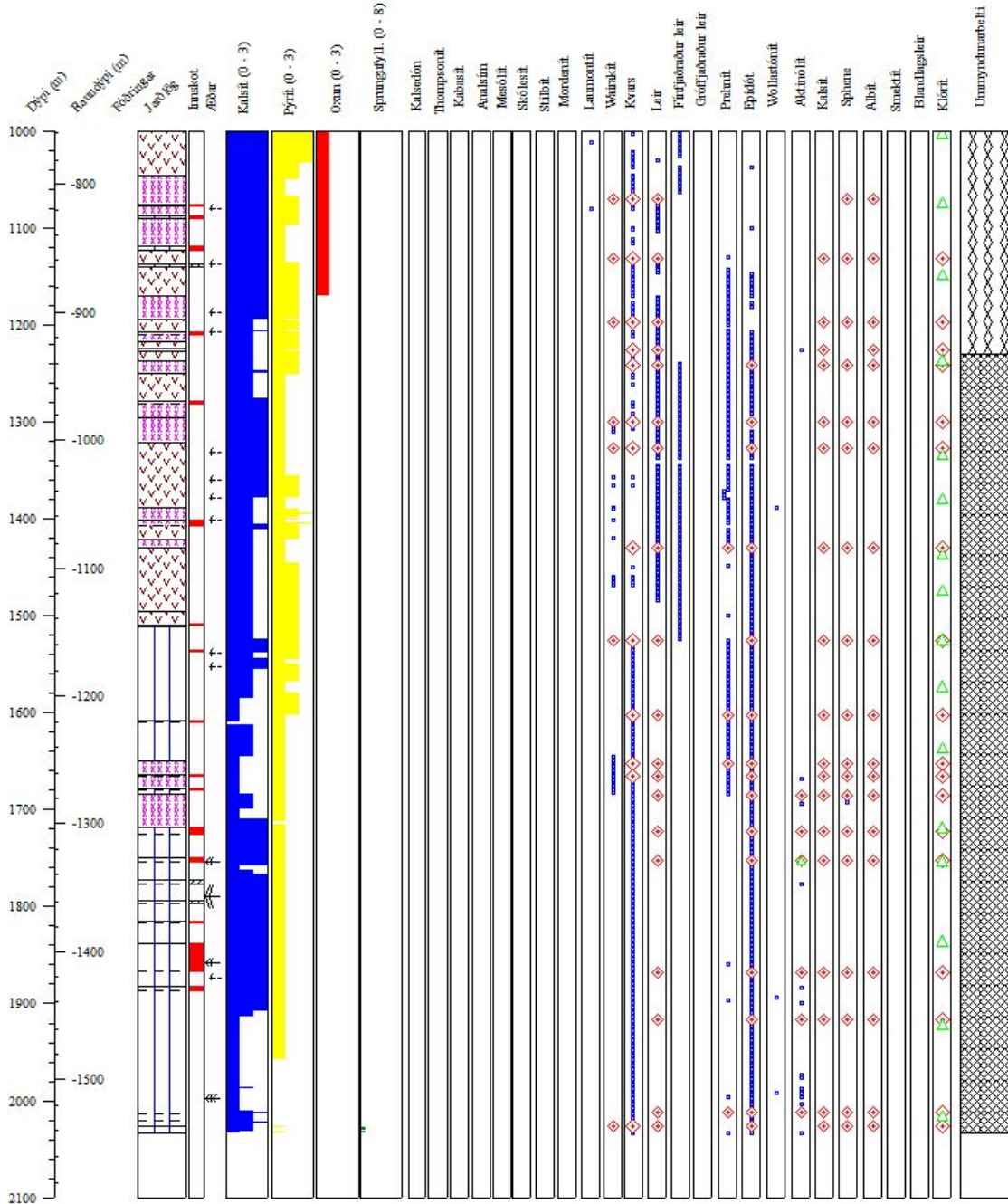


Mynd 2.20 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýrítis og oxunar í holu HE-31 frá 0-1000 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunnsneiðagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafn: HE-31

 Bor: Óðinn
 Dýptarbil: 1000-2100 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhliuti: 3. áfangi

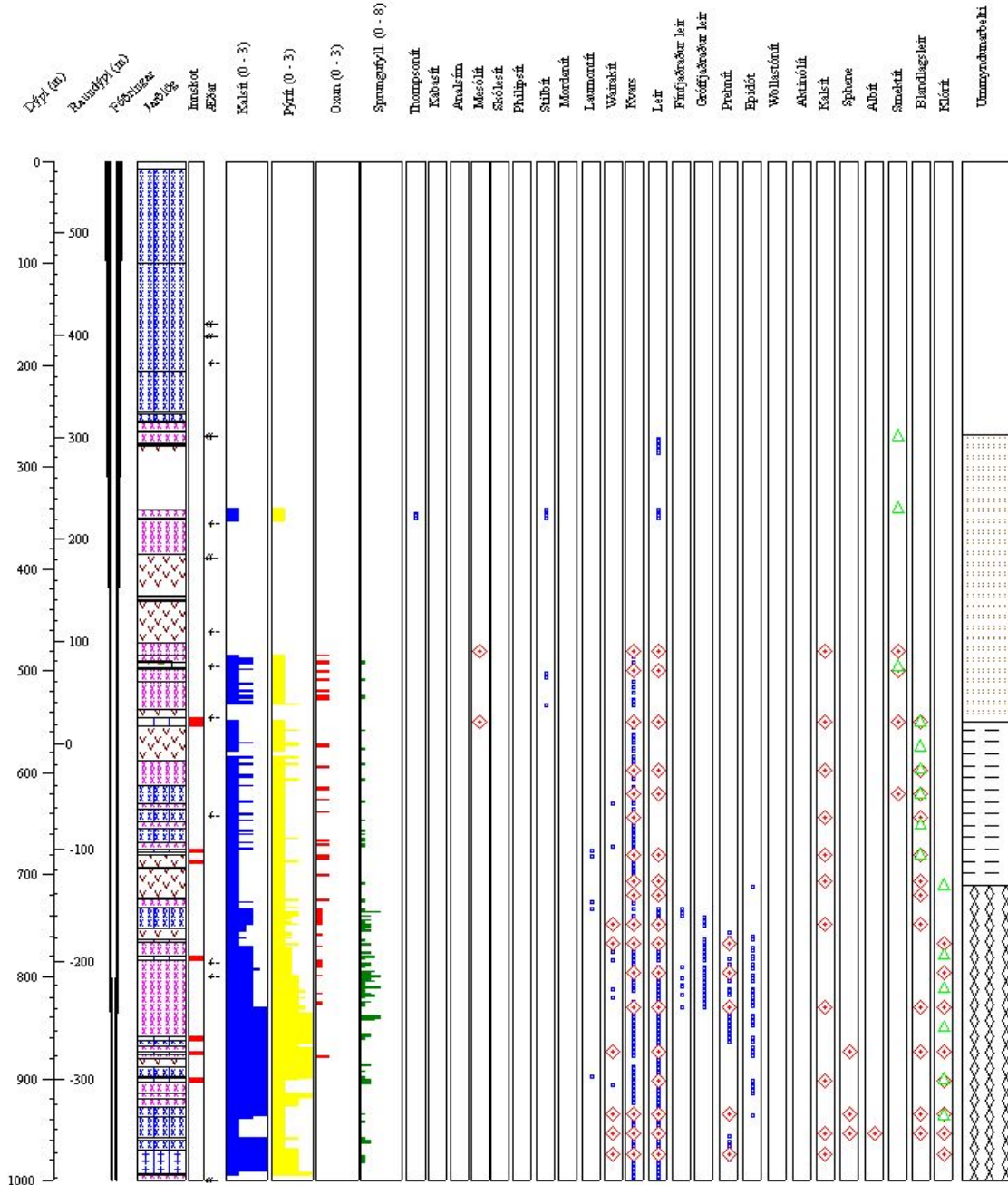
 Staðarnúmer: 95131
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 2.21 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýrítis og oxunar í holu HE-31 frá 1000-2100 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunn sneiðagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.

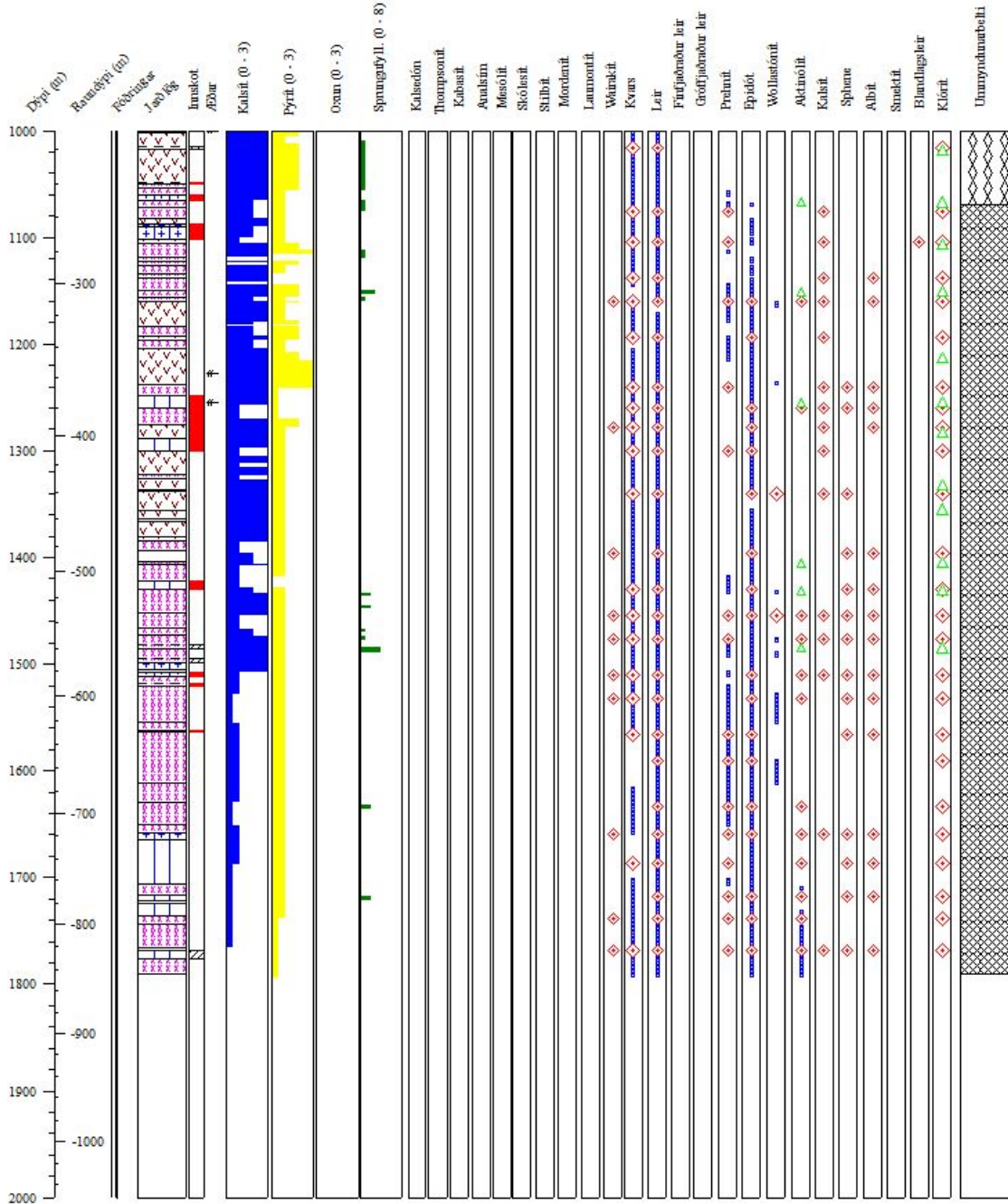
Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafn: HE-33

 Bor: Óðinn
 Dýptarbil: 0-1000 m

 Skolvökvi: Vatn/leðja
 Verkhlufti: Forb., 1., 2. og 3. áf

 Staðarnúmer: 95133
 Starfsmenn: SaOS


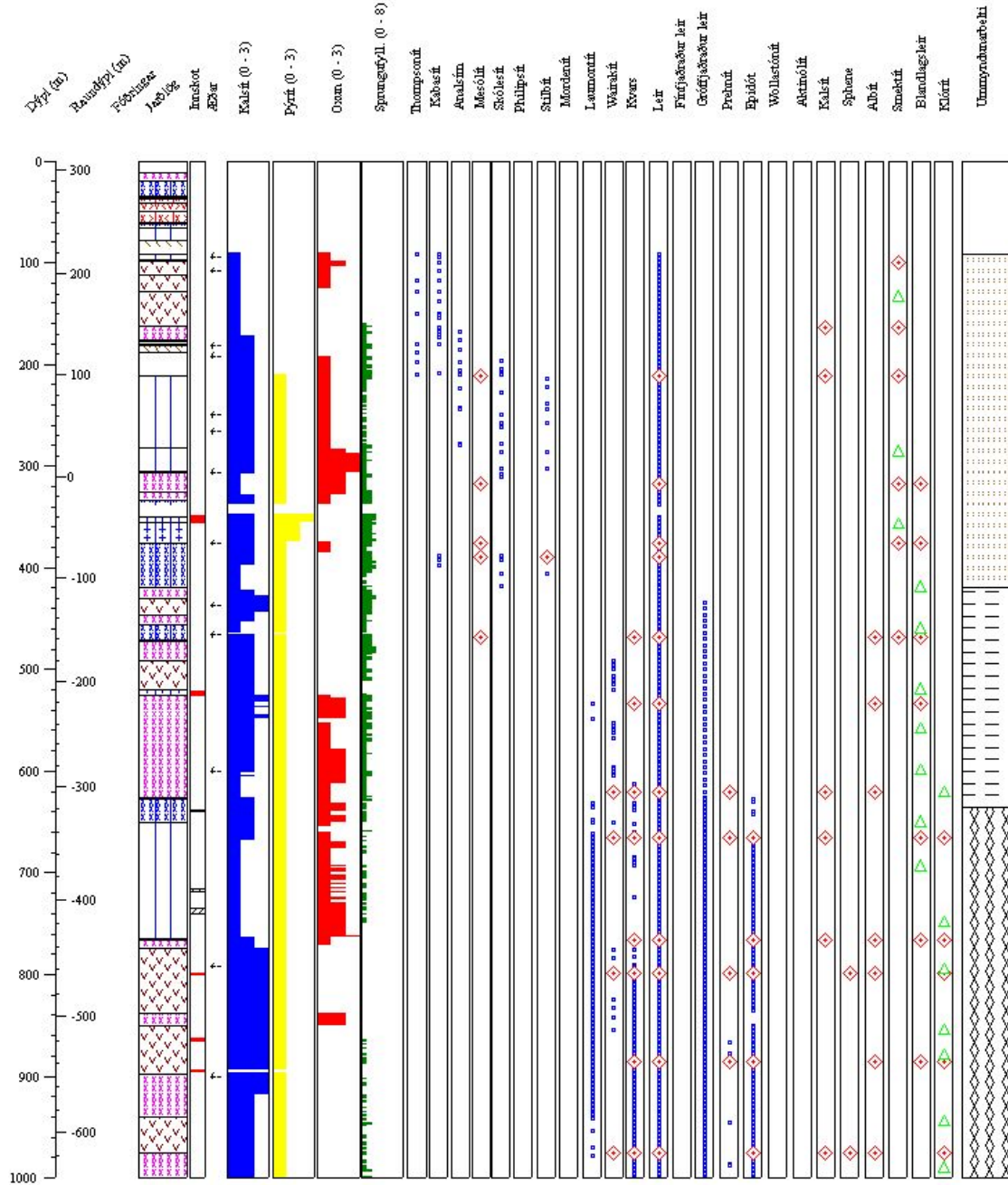
Mynd 2.22 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-33 frá 0-1000 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunnseidagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.



Mynd 2.23 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýrítis og oxunar í holu HE-33 frá 1000-2000 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunnisneiðagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.

Staður: Sleggjubeinsdalur
 Holungrn: HE-46

 Bor: Týr
 Dýptarbil: 0-1000 m

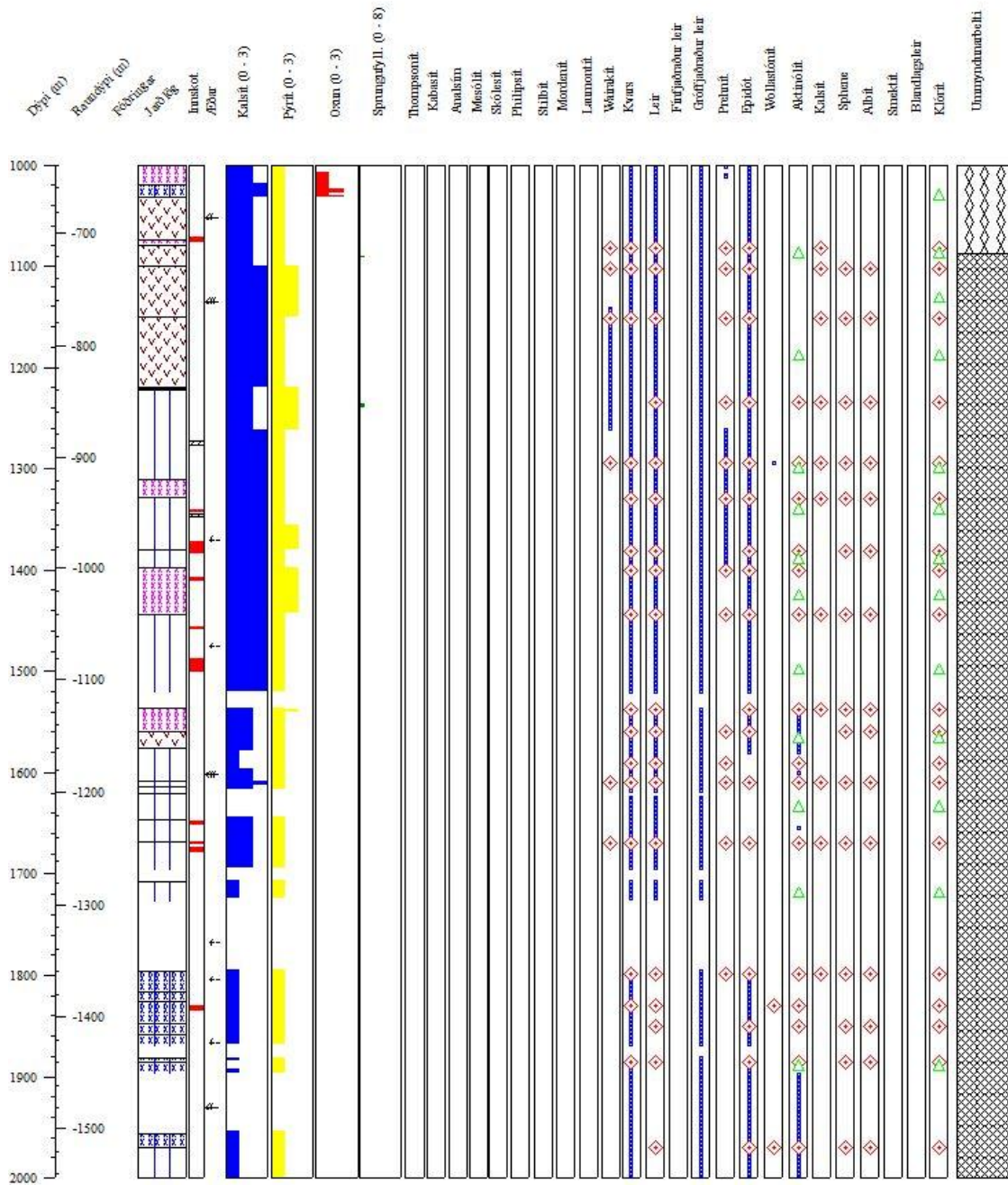
 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlufti: Forb., 1., 2. og 3. áf Starfsmern: SaOS


Mynd 2.24 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, þýrts og oxunar í holu HE-46 frá 0-1000 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunnsneidagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.

Staður: Sleggjubeinsdalur
 Holunafn: HE-46

 Bor: Týr
 Djúptarbil: 1000-2000 m

 Skoðvökví: Vatn/loft
 Verklutti: 3. áf

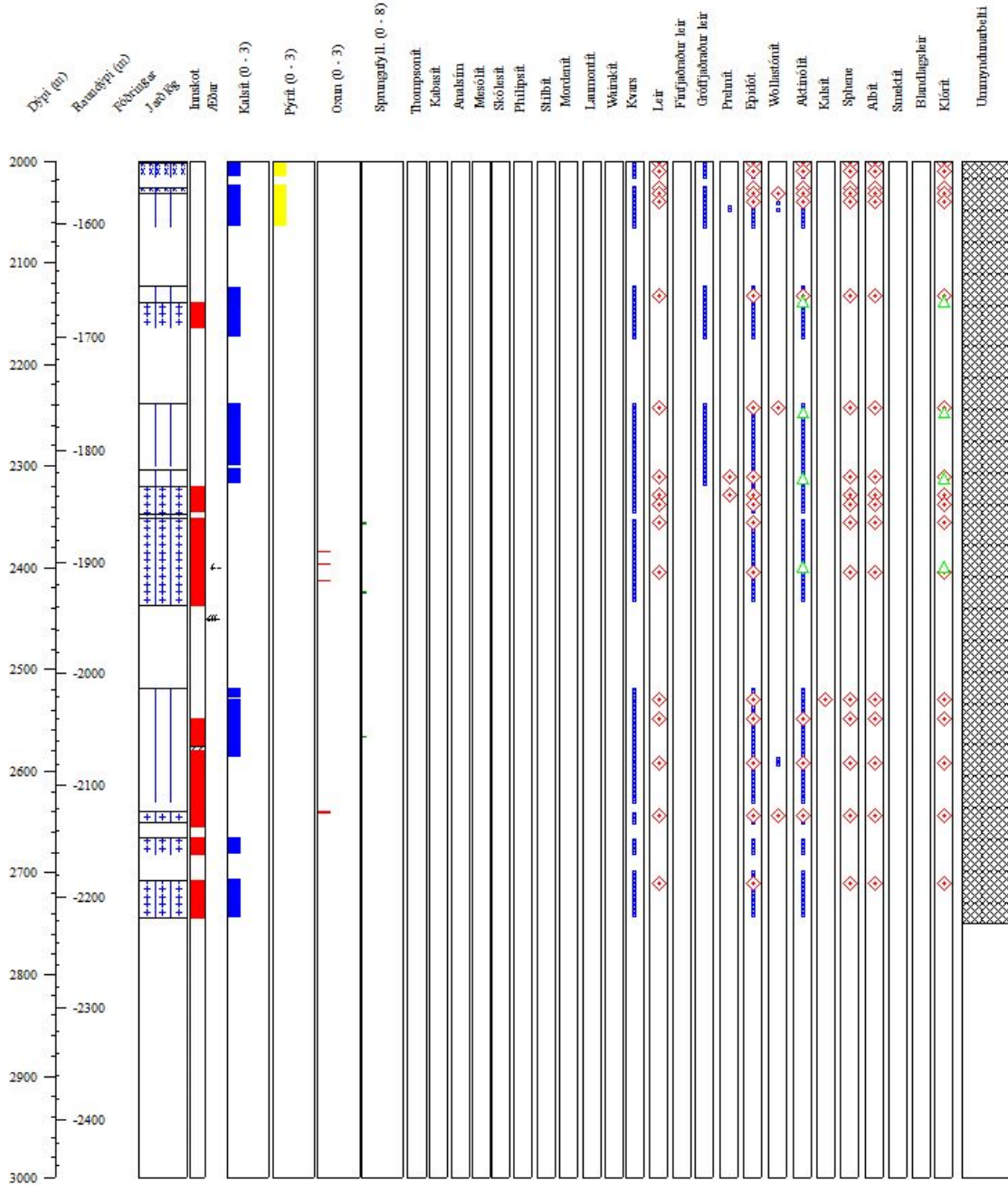
 Staðarnúmer: 95146
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 2.25 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýrítis og oxunar í holu HE-46 frá 1000-2000 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunnssneiðagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.

Staður: Sleggjubeyndalur
 Holunafn: HE-46

 Bor: Týr
 Dýptarbil: 2000-3000 m

 Skolvökví: Vatn/loft
 Verkhúti: 3. áf

 Staðarnúmer: 95146
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 2.26 Jarðlagasnið og dreifing ummyndunarsteinda auk afstæðs magns kalsíts, pýríts og oxunar í holu HE-46 frá 2000-3000 m (mælt dýpi). Bláir punktar tákna svarfgreiningu, rauðir tíglar þunnsneiðagreiningu og grænir þríhyrningar XRD-greiningu.

2.5.3 Ummyndunarhiti og berghiti í HE-31, HE-33 og HE-46

Tafla 2.1 Hitaháðar ummyndunarsteindir (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979; Hjalti Franzson, 1998).

Steind	Minnsti myndunarhiti (°C)	Mesti myndunarhiti (°C)
Zeólítar	40	120
Laumontít	120	180
Wairakit	200	
Smektít		<200
Blandlagsleir	200	230
Klórít	230	>300
Kalsít	50-100	280-300
Kvars	180	>300
Prehnít	240	>300
Epidót	230-250	>300
Wollastónít	270	>300
Aktinólít	280	>300

Eins og fyrr segir endurspeglar ummyndunarsteindir það hitastig sem var ríkjandi þegar þær mynduðust, svokallaðan ummyndunarhita. Séu neðri hitamörk myndunar steinda borin saman við núverandi berghita gefur það vísbendingu um þróun jarðhitakerfisins, þ.e. hvort svæði séu að hitna eða kólna eða hvort þau eru í jafnvægi.

Samanburður á ummyndunarhita og berghita í HE-31, HE-33 og HE-46 má sjá á mundum 2.28-2.30.

Mynd 2.27 sýnir berghitaferil ásamt ummyndunarhita í HE-31. Töluverð fylgni er milli berghita og ummyndunarhita niður á um 1200 m dýpi. Neðan þess er berghiti hinsvegar lægri en ummyndunarhiti, og koma bæði wollastónít og aktinólít fram á bili þar sem berghiti er töluvert lægri en það hitastig sem talið er að þær steindir falli út við. Nokkur hitnun virðist svo aftur verða neðan 2000 m, en stór æð var skorin á því bili. Hiti í botni holunnar er samkvæmt berghitaferli um 290°C, og er það í samræmi við ummyndunarhita holunnar. Kalsít finnst allt niður í botn holunnar sem bendir til þess að hiti fari ekki yfir 300°C.

Mynd 2.28 sýnir berghitaferil ásamt ummyndunarhita í HE-33. Hún sýnir líkt og í holu HE-31, töluverða fylgni milli ummyndunarhita og berghita niður á um 1000 m. Þar fyrir neðan er ummyndunarhiti hærri en berghiti sem bendir til kólnunar, en líkt og í HE-31 kemur bæði wollastónít og aktinólít fram á bili þar sem berghiti er lægri en ummyndunarhiti. Holan nær þó ekki nema á um 1400 m raundypi. „Öngullinn“ á enda berghitaferilsins er tilkominn vegna hins mikla halla holunnar, en hann fer yfir 100°. Eins og fyrr segir liggur ummyndun nokkuð grynna í HE-33 en HE-31. Það sama virðist vera uppá tengingunum í HE-37 og HE-39 á norðanverðu Skarðsmýrarfjalli en þeim er beint

undir Innstadal (*Mesfin, 2010*). Þetta gæti bent til þess að ummyndunin á þessum slóðum endurspegli ástand sem áður var ríkjandi og að jarðhitakerfið norðan Skarðsmýrarfjalls sem fari nú kólnandi.

Mynd 2.29 má sjá samanburð á ummyndunarhita og berghita í holu HE-46. Öfugt við holur HE-31 og HE-33 er ummyndunarhiti alltaf hærri en berghiti í HE-46. Bendir það til þess að kólnun eigi sér stað á þessum slóðum. Holan hitnar niður á um 1150 m dýpi, þar sem hiti fer lækkandi. Á svipuðum slóðum, eða á bilinu 1100-1170 m dýpi er æðakafli skorinn með áberandi innstreymi inn í holuna. Það bendir til þess að kólnun eigi sér stað vegna innstreymis úr æð eða æðum á þessu dýptarbili. Hiti fer lækkandi allt niður á um 1800 m dýpi, en þar hækkar hitinn á ný en nær þó ekki nema 270°C á botni holunnar á um 2600 m dýpi.

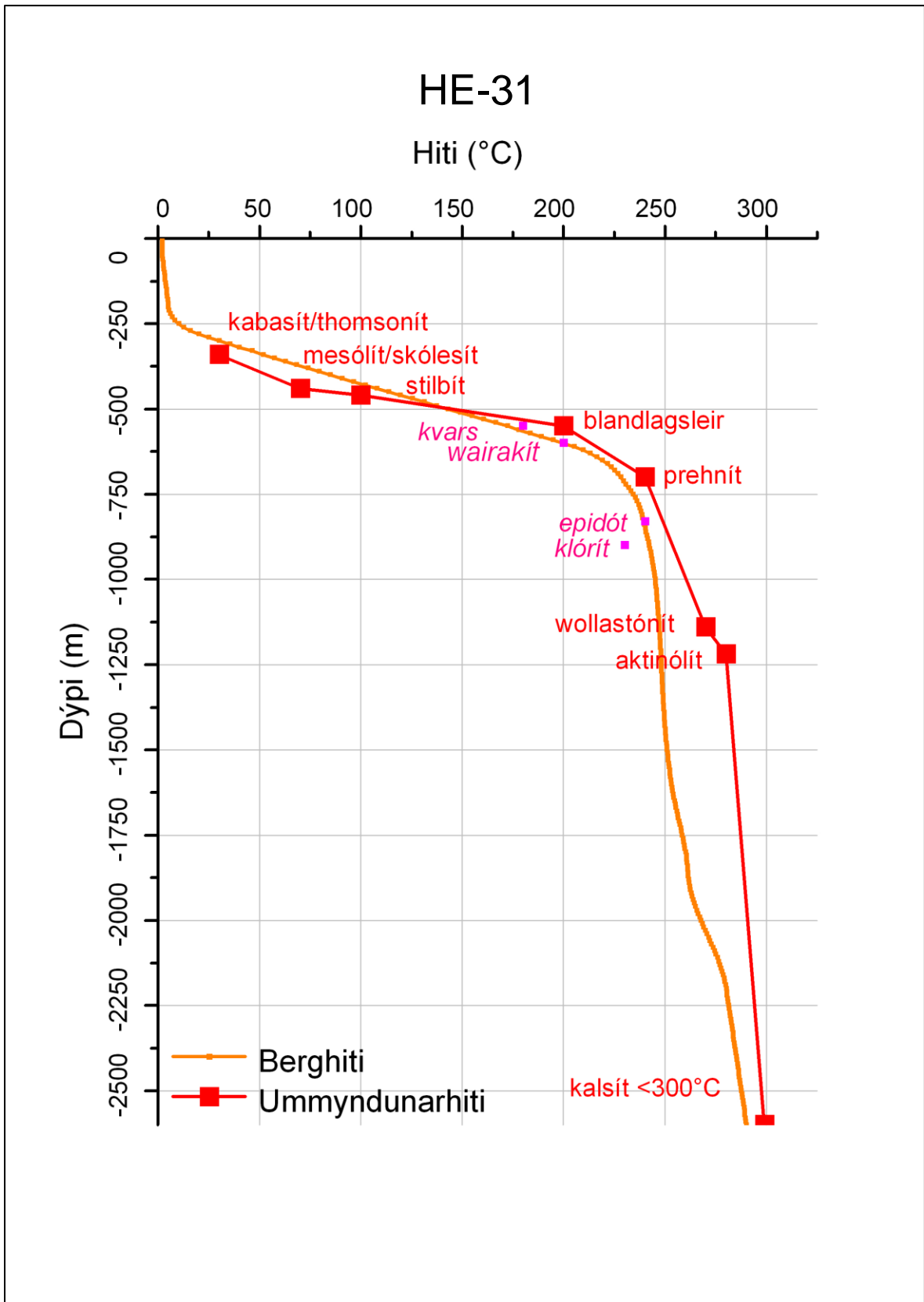
Í heildina séð virðist jarðhitasvæðið norðan Kolviðarhóls fara kólnandi.

Í HE-31 og HE-33 eru berghiti og ummyndunarhiti í jafnvægi allt niður á um 1200 m í HE-31 og 1000 m í HE-33. Bæði aktínólít og wollastónít er hinsvegar greint á dýptarbili þar sem berghiti er töluvert lægri en það hitastig sem steindirnar eru í jafnvægi við. Þetta er í samræmi við samanburð á berg- og ummyndunarhita í HE-24, sem staðsett er á borteig suðaustur af borteig HE-31 og HE-33, en þar er berg- og ummyndunarhiti í jafnvægi allt þar til komið er í epidót-aktínólítbeltið (*Mesfin, 2010*). HE-31 sker sig þó úr að því leyti að í botni holunnar, neðan 2000 m, ná ummyndunarhiti og berghiti aftur jafnvægi.

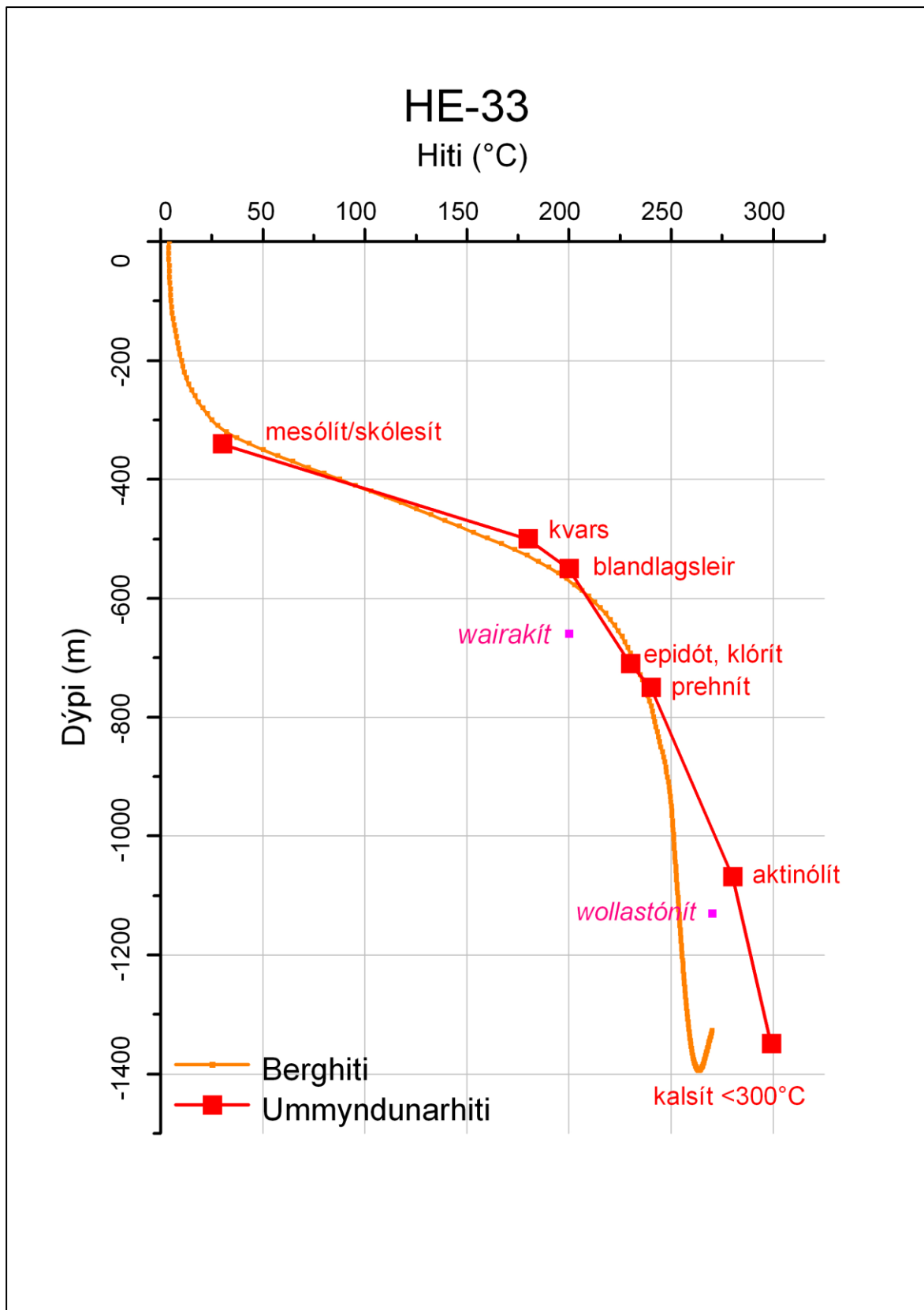
Kólnunin er meira áberandi í HE-46 við Kolviðarhól þar sem ummyndunarhiti er hærri en berghiti allt niður í botn holunnar. Þá er kæling í holunni frá 1150-1800 m. Ástæða þess hversu grunnt er niður á ummyndun í HE-46 tengist að öllum líkindum jarðhitavirkni undir jökulfargi, en vatnsþrýstingurinn undir farginu verður til þess að suðumarksferillinn rís nær yfirborði. Þetta sést m.a. í holum á Ölkelduhálsi (*Benedikt Steingrímsson o.fl., 1997*). Hiti í botni holunnar er 270°C, og er það 20°C kaldara en hiti í botni HE-31.

Mynd 2.30 sem sýnir niðurstöður samanburðar á berg- og ummyndunarhitaferlum.

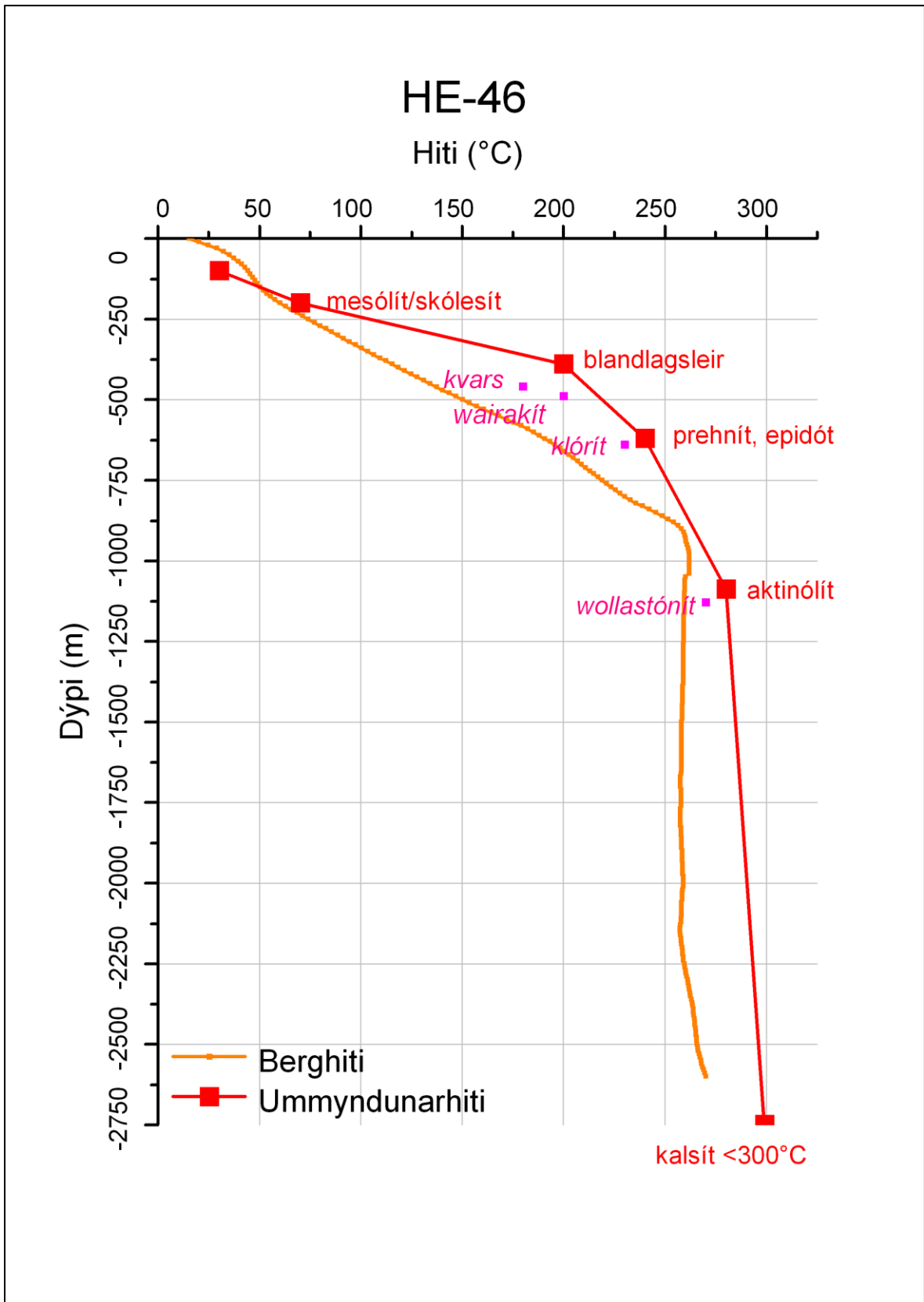
Misgengi sem merkt eru inn á myndina eru misgengi sem kortlögð hafa verið á yfirborði. Á myndinni sést glögglega kæling holanna innan sprungusveimsins sem tengist vesturjaðri sigdældarinnar. Hiti í botni HE-31 er hinsvegar 20°C hærri en í HE-46, auk þess sem ummyndunar- og berghitaferlar eru í jafnvægi neðan 2000 m í holunni. Gæti þetta bent til þess að holan nái inn á heitara svæði vestan megin í sprungusveimnum eða nokkru utan hans, en stór æð var skorin á 2000 m og einnig á 2270 og 2496 m dýpi.



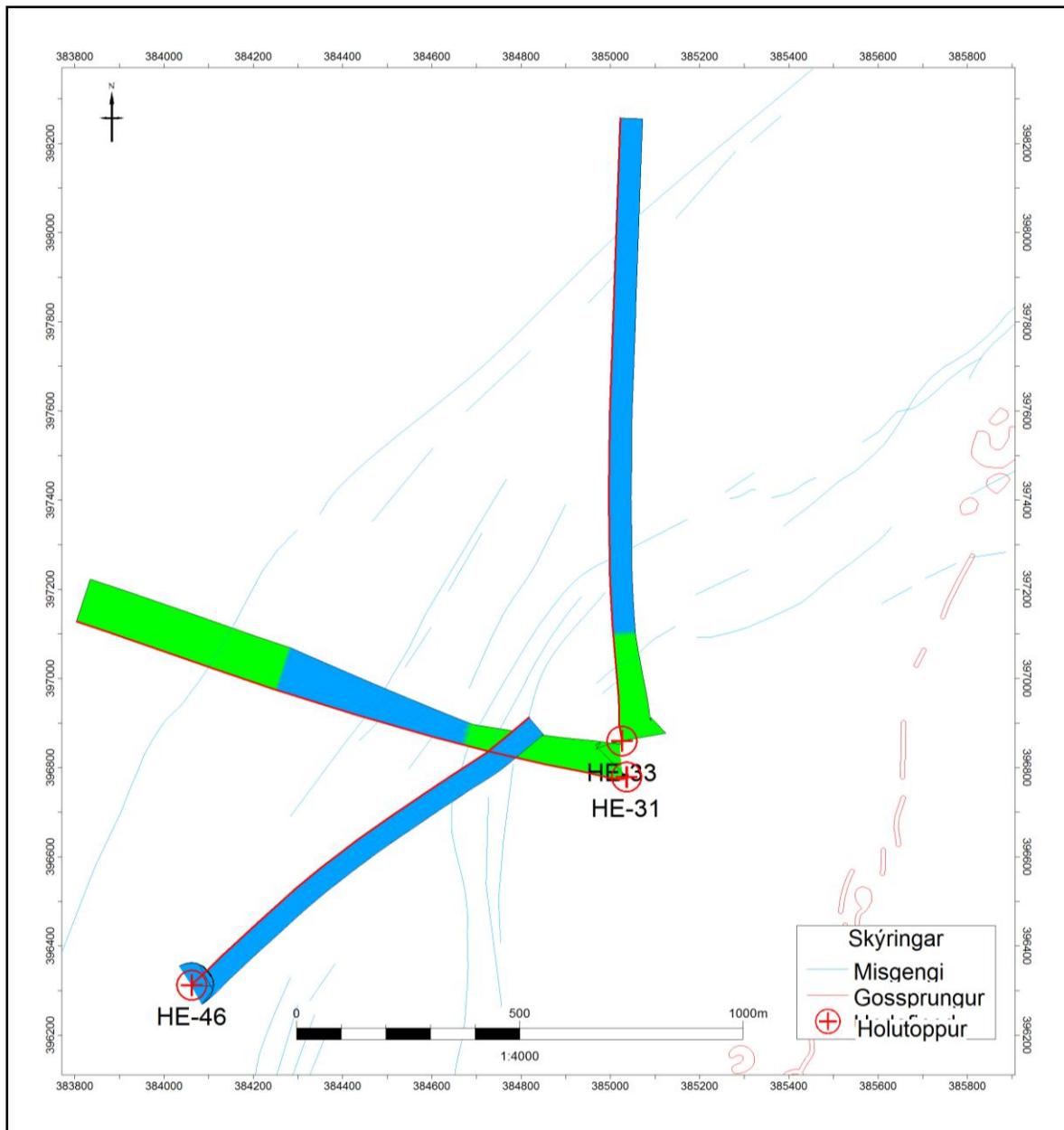
Mynd 2.27 Ummyndunarhitaferill (rauður) ásamt berghitaferli (appelsínugulur) í holu HE-31.



Mynd 2.28 Ummyndunarhitaferill (rauður) ásamt berghitaferli (appelsínugulur) í holu HE-33.



Mynd 2.29 Ummyndunarhitaferill (rauður) ásamt berghitaferli (appelsínugulur) í holu HE-46.



Mynd 2.30 Holuferlar HE-31, HE-33 og HE-46 ásamt niðurstöðum samanburðar á berg- og ummyndunarhita. Grønn táknar jafnvægi og blár kælingu.

2.5.4 Útfellingaraðir

Ummyndunarsteindir sem greindar eru í sama sýni eru oft myndaðir á mismunandi tímaskeiðum við mismunandi hitastig. Þær ummyndunarsteindir sem myndast í jarðhitakerfum geta þannig oft sagt sögu um það ástand sem ríkti þegar þær mynduðust.

Við breyttar aðstæður í jarðhitakerfinu falla út nýjar steindir sem eru stöðugar við hinar nýju aðstæður og yfirprenta oft þær ummyndunarsteindir sem fyrir eru í æðum og holrýmum. Með því að greina þessar útfellingaraðir, þ. e. í hvaða röð útfellingar hafa myndast, er hægt að fá vísbendingar um þróun jarðhitakerfisins í tímans rás.

Útfellingaraðir í HE-31 og HE-33 á Skarðsmýrarfjalli

Útfellingaraðir sem greindar voru í holum HE-31 og HE-33 má sjá í töflum 2.2-2.4.

Fyrstu útfellingaraðirnar sem sjást er kaldavatnsummyndun, þar sem kalsedón yfirprentar smektít (fínfjæðra leir). Á 436 m dýpi sést svo röðin smektít > kalsedón > skólesít/mesólít, þar sem fyrsta stig lághitaummyndunar tekur við af kaldara kerfi.

Á 548-550 m sést svo glögglega hvernig kerfið hefur hitnað þar sem kvars (180°C) yfirprentar smektít. Á sama dýpi sést kalsít yfirprenta kvars og gröffjæðra leir (blandlagsleir) yfirprenta fínfjæðra leir (smektít). Á um 600 m sést svo útfellingaröðin smektít > qz > blandlagsleir.

Á 750-800 m dýpi er komið í háhitaummyndun þar sem útfellingaröðin kvars > prehnít birtist. Óvíst er með tímasamband milli kaldvatns- og lághitaummyndunar og háhitaummyndunar, þ.e.a.s. ummyndun getur átt sér stað samtímis innan háhitakerfisins, í smektít-zeólítabeltinu og ofan þess. Því er þessum tímaskeiðum skipt upp í töflunni.

Tvær kynslóðir af kvarsí sjást í útfellingaröðunum, en sú síðari sést yfirprenta prehnít, gröffjæðra leir, wairakít og wollastónít. Kvars fellur út á bilinu $180\text{-}300^{\circ}\text{C}$ og getur því fallið út á fremur stóru hitabili.

Kalsít er talið óstöðugt við $270\text{-}300^{\circ}\text{C}$, en sést alla leið í botn og bendir yfirprentun þess á klóríti, epidóti og öðrum háhitasteindum til þess að kalsít hafi fallið út við kólnandi aðstæður í kerfinu. Yfirprentun kalsíts er líklegast næst því ástandi sem nú er ríkjandi í kerfinu líkt og samanburður ummyndunar- og berghitaferla bendir til (myndir 2.27 og 2.28). Frekari rannsóknir á borð við vökvabólurannsóknir ættu að öllum líkindum að gefa frekari vísbendingar um þróun jarðhitakerfisins á þessum slóðum í tímans rás, sérstaklega í dýpri hlutum holanna þar sem erfitt er að gera sér grein fyrir efri mörkum jarðhitakerfis.

Útfellingaraðir í HE-46 við Kolviðarhól

Útfellingaraðir í holu HE-46 má sjá í töflu 2.4 en þær eru af svipuðum toga og í holum HE-31 og HE-33.

Þær sýna hitnun kerfisins, þar sem zeólítar (lághituummyndun) yfirprenta kalsedón (kaldavatnsummyndun) og smektít. Háhituummyndun tekur svo við á 468 m dýpi, þar sem kvars yfirprentar zeólíta. Sem fyrr segir er óljóst með tímasambandið milli háhituummyndunar og kaldavatns- og lághituummyndunar og því er töflunni skipt upp.

Röðin kvars > wairakít > gróffjaðra leir > epidót á 766 m dýpi sýnir svo glögglega þegar komið er í háhitakerfið. Wairakít er talið myndast við 200°C og epidót við 230°-250°C. Klórít er einnig talið myndast við 230°C, en í ljósi þess að klórít myndast yfirleitt ofar en epidót bendir það til þess að epidót myndist e.t.v. við heldur hærri hita. Þá bendir þessi útfellingaröð til þess að klórít myndist áður en epidót byrjar að falla út, en epidót og klórít voru fyrst greind á mjög stuttu dýptarbili í HE-46.

Líkt og í holum HE-31 og HE-33 er yfirprentun kalsíts síðasta stigið í útfellingaröðunum, og líklega næst því ástandi sem nú er ríkjandi í kerfinu líkt og samanburður á berg- og ummyndunarhita bendir til.

Þá voru gerðar vökvabólurannsóknir á sex kalsítkristöllum í HE-46, en nánar er fjallað um þær í kafla 2.5.5.

Tafla 2.2 Útfellingaraðir í HE-31 og HE-33. Óvíst er með tímasamband milli lághita- og háhitaummyndunar og eru lághitaummyndunarraðir því merktar með bláu en háhitaummyndunarraðir með bleiku.

HE-	Dýpi (m)	Eldra										Ynggra
		fínfj. leir	chal	sco/mes	qz	wai	gróffj. leir	woll	qz	preh	gróffj. Leir	cc
31	372	fínfj. leir	chal									cc
31	436	fínfj. leir	chal	scol/mes								cc
33	480	fínfj. leir								cc		
31	488	fínfj. leir	chal	scol/mes								cc
33	500				qz					cc		
		fínfj. leir								cc		
31	548				qz							cc
		fínfj. leir			qz							
		fínfj. leir		scol/mes	qz							cc
33	550	fínfj. leir			qz							cc
		fínfj. leir					gróffj. leir					
33	598	fínfj. leir			qz		gróffj. leir					
		fínfj. leir			qz							cc
		fínfj. leir		sco/mes								
31	612				qz							cc
				scol/mes		wai						cc
33	620						gróffj. leir					cc
					qz							cc
		fínfj. leir					gróffj. leir					
							gróffj. leir	qz				
						wai	gróffj. leir					
31	642				qz		gróffj. leir					
		fínfj. leir				wai	gróffj. leir					
		fínfj. leir				wai						cc
					qz							cc
33	644						gróffj. leir	qz				cc
					qz	wai						
							gróffj. leir	qz				
							gróffj. leir					cc
33	680	fínfj. leir						qz				
		fínfj. leir					gróffj. leir	qz				
							gróffj. leir					cc
33	706						gróffj. leir	qz				
							gróffj. leir	qz				cc
31	710	fínfj. leir			qz		gróffj. leir					
					qz	wai						
					qz		gróffj. leir					cc
					qz							
					qz	wai						
33	720						gróffj. leir					cc
								qz				cc
							gróffj. leir	qz				cc
31	736				qz			woll				
							gróffj. leir		qz			
31	746						gróffj. leir					cc
					qz							cc
33	748						gróffj. leir			preh		
							gróffj. leir					cc
									preh			cc
								qz	preh			
31	772							qz	preh			
								qz				cc

Tafla 2.3 Útfellingaraðir í HE-31 og HE-33, framhald.

31	792						gróffj. leir			preh		
							gróffj. leir		qz			
								woll	qz			
33	796						gróffj. leir			preh		
							gróffj. leir		qz			
									qz	preh		
33	830								qz			cc
							gróffj. leir					cc
							gróffj. leir		qz			
31	832						gróffj. leir		qz			
							gróffj. leir					cc
31	860								qz			cc
							gróffj. leir		qz			
33	874						gróffj. leir					cc
							gróffj. leir		qz			
31	892						gróffj. leir		qz			
33	902								qz			cc
31	910				qz	wai						
							gróffj. leir					cc
33	934								qz			cc
							gróffj. leir					cc
							gróffj. leir		qz			
						wai				preh		
									qz			cc
33	954					wai	gróffj. leir					
31	954								qz			cc
							gróffj. leir		qz			
						wai						cc
31	970								qz			cc
							gróffj. leir		qz			
33	974								qz		gróffj. leir	
33	1048					wai						cc
									qz			cc
											gróffj. leir	cc
									qz		gróffj. leir	
31	1070								qz			cc
											gróffj. leir	cc
							gróffj. leir		qz			
							gróffj. leir		qz			cc
31	1132								qz			cc
		finfj. leir ->	chal ->	sco/mes ->	qz ->	wai ->	gróffj. leir ->	woll ->	qz ->	preh ->	gróffj. leir	cc

Tafla 2.4 Útfellingaraðir í HE-4. Óvíst er með tímasamband milli lághita- og háhitaummyndunar og eru lághitaummyndunarraðir því merktar með bláu en háhitaummyndunarraðir með bleiku.

Depth (m)	Earliest								Latest
	sme	chal	cab	sco/mes	qz	wai	gróffj. leir	ep	cc
164	sme								cc
	sme	chal							cc
	sme		cab						
212	sme		cab						cc
			cab						cc
312	sme	chal							
			cab						cc
376	sme	chal							
390	sme	chal							
			cab						cc
				sco/mes					cc
			cab	sco/mes					cc
468	sme								cc
	sme				qz				cc
	sme				qz				
							gróffj.leir		cc
534	sme				qz				
					qz				cc
	sme			sco/mes	qz				
620					qz		gróffj.leir		
666					qz				cc
					qz		gróffj.leir		
766					qz	wai			
					qz	wai	gróffj.leir	ep	
					qz	wai			
					qz		gróffj.leir		cc
					qz		gróffj.leir		
798								ep	cc
886					qz				cc
							gróffj.leir		cc
976						wai			cc
					qz	wai			cc
							gróffj.leir		cc
							gróffj.leir	ep	cc
							gróffj.leir	ep	
	sme ->	chal ->	cab ->	sco/mes ->	qz ->	wai ->	gróffj.leir ->	ep ->	cc

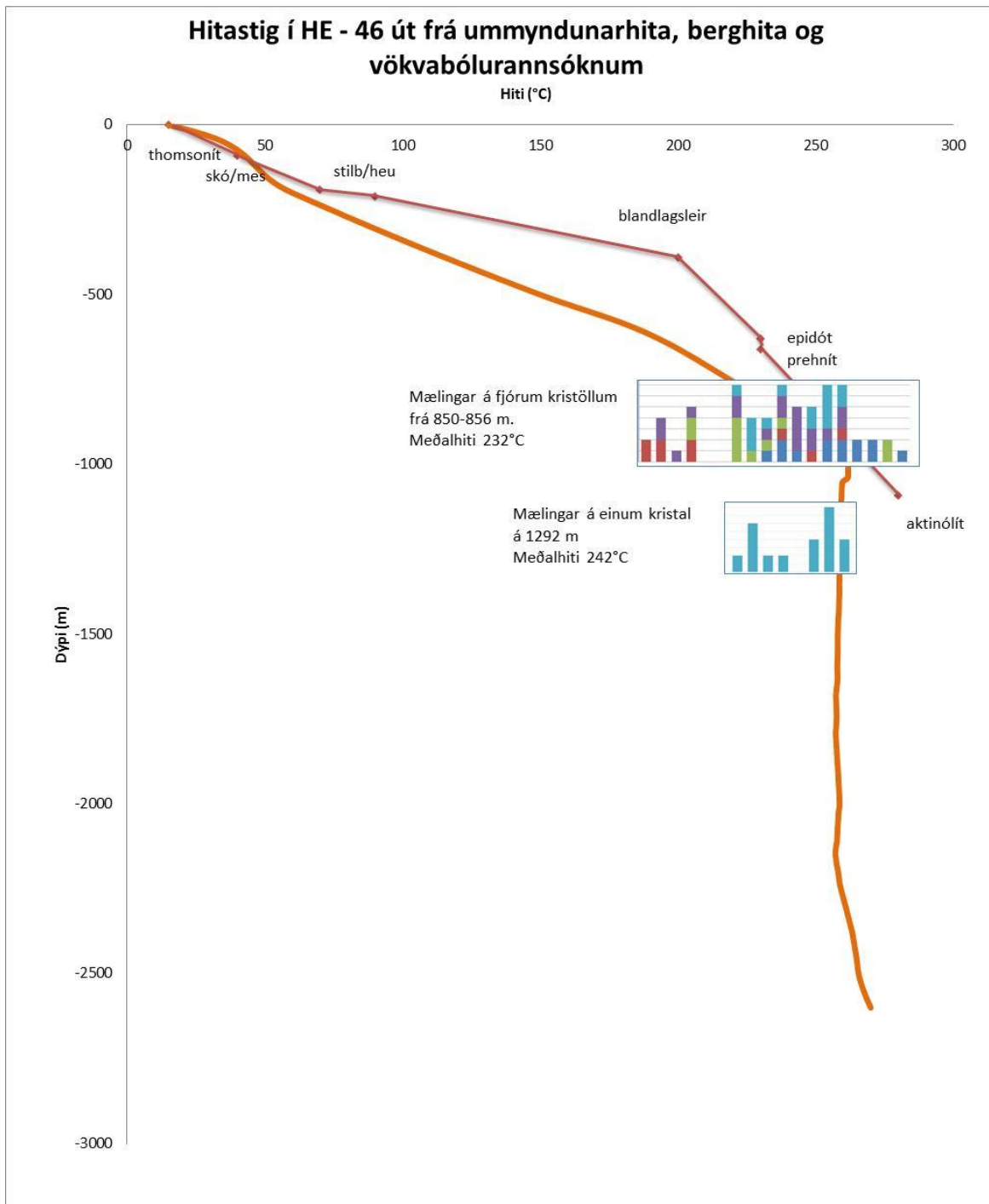
2.5.5 Vökvabólurannsóknir í holu HE-46

Vökvabólur myndast þegar gas eða vökvi lokast inni í kristöllum og endurspegla því það umhverfi sem ríkti þegar bólurnar urðu innlykta. Vökvabólurnar eru hitaðar upp þar til þær hverfa og á þann hátt er svo hægt, á grundvelli útfellinganna, að ákvarða „steingert“ hitastig á mismunandi svæðum í jarðhitakerfinu. Vökvabólur gefa þannig mikilvægar vísbendingar um þróun jarðhitakerfisins í tímans rás.

Gerður er greinamunur á vökvabólum sem myndast við kristöllum steindanna (*primary*) og vökvabólum sem myndast við ferli sem eiga sér stað eftir að steindin kristallast (*secondary*). Það getur t.d. gerst vegna spennu í berginu vegna hitabreytinga eða tektónískra atburða sem verða til þess að sprungur eða brot myndast í kristalnum, sem aftur verður til þess vökvi kemst á ný inn í kristallinn og nýjar vökvabólur geta myndast (*Roedder, 1984*). Gerðar voru vökvabólurannsóknir á alls 93 vökvabólum í fimm kristöllum af plötukalsíti í holu HE-46. Fjórir kristallanna voru teknir á dýptarbilinu 850-856 m (mælt dýpi) en einn kristall á 1292 m. Niðurstöður vökvabólurannsóknanna auk ummyndunar- og berghita í HE-46 má sjá á mynd 2.31. Hafa ber í huga að kalsít er ekki frumsteind, heldur ummyndunarsteind og tengist því myndun þess ákveðnu skeiði í þróun jarðhitakerfisins.

Niðurstöður vökvabólurannsókna á alls 65 vökvabólum í fimm kalsít-kristöllum af 850-856 m gáfu til kynna tvö hitabil, annað á 190-210°C með meðalhita um 200°C en hitt á 220-280°C með meðalhita um 240°C. Á svipuðum slóðum er epidót orðið algengt og fallegir kristallar farnir að myndast. Það bendir til ummyndunarhita á um 230-250°C. Berghiti á þessum slóðum er 245°C. Ummyndunar- og berghiti eru því í takt við síðarnefnda hitabilið en hið fyrrnefnda sýnir töluvert lægri hita. Niðurstöður vökvabólurannsókna á 28 vökvabólum úr plötukalsíti af 1292 m dýpi eru í samræmi við niðurstöður af 850-856 m dýpi og gáfu einnig til kynna tvö hitabil. Annað er á 220-240°C með meðalhitann 227°C og hitt á 245-260°C með meðalhitann 250°C. Ummyndunar- og berghitaferlar á þessum slóðum eru einnig í takt við síðarnefnt hitabil. Wollastónít (ummyndunarhiti 270°C) var fyrst greint á þessum slóðum og berghiti reyndist vera um 260°C.

Lægra hitabilið sem vökvabólurannsóknirnar gefa til kynna tengist að öllum líkindum tímaskeiði þegar jarðhitakerfið var að hitna upp. Eins og fyrr segir eru rannsóknirnar gerðar á plötukalsíti sem er ummyndunarsteind sem að öllum líkindum hefur myndast eftir að jarðhitavirkni hófst á svæðinu. Hærra hitabilið er hinsvegar nokkurn veginn í jafnvægi við þær aðstæður sem eru í kerfinu í dag. Ummyndunarhiti er þó nokkuð hærri en berghiti í holunni, sem bendir til þess að kerfið sé að kólna.



Mynd 2.31 Vökvabólurannsóknir á plötukalsíti í HE-46. Ummyndunarhitaferill er auðkenndur með rauðum lit en berghitaferill með appelsínugulum. Hitadreifing í vökvabólum er sýnd með stöplariti og meðalhiti merktur inn á mynd.

2.6 Samantekt

- Jarðlög í HE-31 og HE-33 samanstanda af móbergseiningum allt niður á um 1500 m mælt dýpi þar sem komið er í hraunlagasyrpu í HE-31. Bendir það til þess að Skarðsmýrarfjallssvæðið hafi verið hálendi löngu áður en hið eiginlega Skarðsmýrarfjall hlóðst upp, jafnvel allt frá því að virkni hófst í Hengli. Jarðlög í HE-46 samanstanda af hraunlagasyrpum og móbergseiningum. Hraunin hafa runnið á hlýskeiðum og milli þeirra eru móbergsmýndanir frá jökulskeiðum. Þau benda til þess að svæðið við Kolviðarhól í Sleggjubeinsdölum hafi, líkt og í dag, verið láglandra en Skarðsmýrarfjallssvæðið, og hafa hraunin að öllum líkindum runnið upp að þeim móbergshryggjum sem fyrir voru.
- Innskot eru fyrst greind á bilinu 25 m. y. s til 50 m u. s. í öllum holum. Basaltinnskot eru greind frá 0 m u. s. Tveir toppar virðast vera í dreifingu þeirra, annars vegar á 0-500 m u. s. og hins vegar á 1600-2200 m u. s. í HE-46. Þær niðurstöður samræmast ágætlega gögnum úr holum HE-3 til HE-7 (*Gunnar Gunnarsson & Bjarni Reykr Kristjánsson, 2003*), en neðan 1700 m u.s. eru innskot ráðandi í holunum.
- Innskot úr þróuðu bergi eru greind á bilinu 400-1500 m u. s. en ofan og neðan þess dýptarbils eru engin innskot úr þróuðu bergi greind. Þéttleiki innskota úr þróuðu bergi er mestur á bilinu 700-1000 m u. s. Ekki eru innskot af þróaðri samsetningu jafnalgeng í holum HE-3 til HE-7 (*Gunnar Gunnarsson & Bjarni Reykr Kristjánsson; 2003*). Líklegt er að innskot úr þróuðu bergi séu algeng á þessum slóðum vegna nálægðar holanna við sjálfan Hengil, auk þess sem holunum er beint undir Sleggju, þar sem eina þróaða bergið er á yfirborði á Hengilssvæðinu. Ekki er útilokað að hér séu skornar aðfærsluæðar þróaða bergsins.
- Með því að kortleggja jarðlagastaflann í hverri holu og staðsetja vatnsæðar er hægt að kanna hvort vatnsæðarnar séu staðsettar við innskot, við jarðlagamót eða hvort aðrir þættir skýri staðsetningu og stærð þeirra, t. d. tengsl þeirra við misgengi og sprungukerfi. Þó margar æðanna falli í hvorugan flokk, þ. e. virðist hvorki tengjast lagmótum né innskotum, benda niðurstöður til þess að æðar tengdar lagmótum sé ríkjandi í efri hluta holanna, þ. e. ofan 300 m u. s. Frá 400 m u. s. virðist lekt hinsvegar frekar tengjast innskotum. Aðrar æðar í holunum tengjast að öllum líkindum sprungusveimum og misgengjum.
- Stórar æðar virðast koma fram á tveimur dýptarbilum í holunum; annars vegar fyrir ofan 200 m y.s. og á bilinu 700-1200 m u. s. Ofan 200 m y.s. má gera ráð fyrir að staflinn sé ekki jafnþéttur og þegar neðar dregur þar sem útfellingar hafa ekki náð

að fylla holrúm og sprungur í staflanum. Neðan 700 m u.s. gæti fjöldi stórra æða tengst aukinni tíðni innskota.

- Komið er í smektít-zeólítabeltið á um 300 m dýpi í holum HE-31 og HE-33 en á um 100 m í holu HE-46. Blandlagsbeltið er greint á rúmlega 500 m dýpi í HE-31 og HE-33 en á tæplega 400 m dýpi í HE-46. Klórít-epidótblendið liggur á um 900 m dýpi í HE-31, á um 710 m dýpi í HE-33 og á rúmlega 600 m dýpi í HE-46. Aktínólít er svo greint á 1226 m dýpi í HE-31, á 1068 m dýpi í HE-33 og á 1088 m dýpi í HE-46.
- Ummyndun er mjög keimlík í efstu 500 m í HE-31 og HE-33 en munurinn virðist svo aukast þegar komið er í sjálft jarðhitakerfið. HE-33 er beint til norðurs (350°) en HE-31 til austurs (280°) en athygli vekur að ummyndun virðist einnig liggja grunnra í holum HE-37 og HE-39 sem staðsettar eru á nyrsta borteig Skarðsmýrarfjalls, austan við SO-teig, en þeim er beint inn undir Innstadal (*Mesfin, 2010*). Þetta gæti bent til þess að ummyndunin á þessum slóðum endurspegli ástand sem áður var ríkjandi og að norðan Skarðsmýrarfjalls sé gamalt uppstreymissvæði sem fari nú kólnandi.
- Ummyndun í holu HE-46 liggur mjög grunnt og t.a.m. er komið í smektít-zeólítabeltið á um 100 m dýpi. Ástæða þess tengist að öllum líkindum jarðhitavirkni undir jökulfargi, en vatnsþrýstingurinn undir farginu verður til þess að suðumarksferillinn rís nær yfirborði.
- Samanburður á ummyndunar- og berghita sýnir jafnvægi milli ferlanna allt niður á 1200 m í HE-31 og um 1000 m í HE-33. Neðan þess er berghiti lægri en ummyndunarhiti sem bendir til kælingar. Á 2000 m dýpi hitnar HE-31 hinsvegar og ná ummyndunar- og berghitaferlar aftur jafnvægi á þeim slóðum. Ummyndunarhiti er hærri en berghiti í HE-46 allt frá yfirborði og niður í botn holunnar, sem bendir til kælingar. Aktínólít og wollastónít eru úr jafnvægi við berghita í öllum holum, sem bendir til þess að steindirnar hafi fallið út í heitara kerfi.
- Í öllum holum sést kalsít sem síðasta steind í útfellingaröðum. Bendir það til þess að hiti á svæðinu fari ekki yfir 300°C.
- Vökvabólurannsóknir á 850 og 1200 m dýpi í HE-46 sýna tvö hitabil, annað lægra en hitt í jafnvægi við núverandi aðstæður. Hið fyrra bendir að öllum líkindum til hitnunar á svæðinu við myndun jarðhitakerfisins, en hið síðarnefnda endurspeglar núverandi ástand. Ummyndunarhiti er hinsvegar nokkru hærri en berghiti í holunni og bendir það til þess að svæðið á þessum slóðum fari kólnandi. Hafa ber í huga að allar vökvabólurnar eru í plötukalsít-kristöllum, en kalsít er ummyndunarsteind og tengist því myndun þess ákveðnu skeiði í þróun jarðhitakerfisins.

3 Myndun leirsteinda og oxun járns í borholum á Hellisheiði

Í jarðfræði hefur orðið leir tvær merkingar; í setlagافرæði merkir leir kornastærð undir 2 μm , óháð efnasamsetningu en í bergfræði merkir leir hins vegar leirsteindir, þ.e. hóp vatnaðra blaðsilikata, óháð kornastærð. Það vill þó svo til að merkingarnar skarast því leirsteindir eru oftast meginhluti efnis í kornastærðinni leir.

Leirsteindir myndast yfirleitt við veðrun og vötnun bergs eða jarðhitaummyndun (*Deer o.fl., 1992*). Þær flokkast til blaðsilikata og eru, með örfáum undantekningum, byggðar úr lögum úr tvenns konar einingum; annars vegar fjórflötungum sem tengjast saman á hornunum (tetrahedral-lög, sjá mynd 3.1), og hinsvegar átflötungum sem tengjast á hliðunum (oktahedral-lög, sjá mynd 3.2) (*Moore & Reynolds, 1997*).

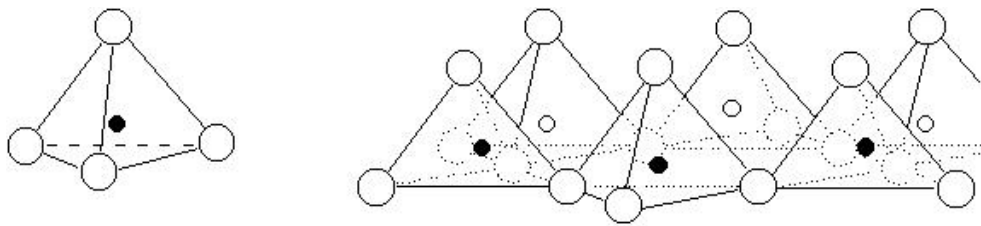
Kísill (Si^{4+}) er aðalkatjón tetrahedral-lagsins, en tetrahedral-sætin eru táknuð með T. Al^{3+} getur einnig bundist í hluta T-sætanna en einnig, Fe^{3+} í oxuðu og járnríku umhverfi. Tetrahedral-jónin binst súrefnisjónum í hlutföllunum T_2O_5 . Tetrahedral-lagið myndar þannig kísillag (*e. siloxane surface*) með mismikið af Al^{3+} eða Fe^{3+} en OH-jónir og jafnvel vatnssameindir bindast yfirborði laganna.

Oktahedral-lagið er myndað af tveimur lögum þar sem katjónir fylla átthyrningslaga sæti milli þéttra súrefnislaga. Katjónirnar eru oftast Mg^{2+} , Fe^{2+} eða Fe^{3+} og Al^{3+} . Í lagsilikötum eru oktahedral-lögin ýmist tríoktahedral með gibbsít-byggingu ($\text{Al}(\text{OH})_3$), þar sem hlutfallið milli katjóna og anjóna er einn á móti þremur eða díoktahedral með brúsít-byggingu ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), þar sem hlutfallið milli katjóna og anjóna er einn á móti tveimur (*Moore & Reynolds, 1997*).

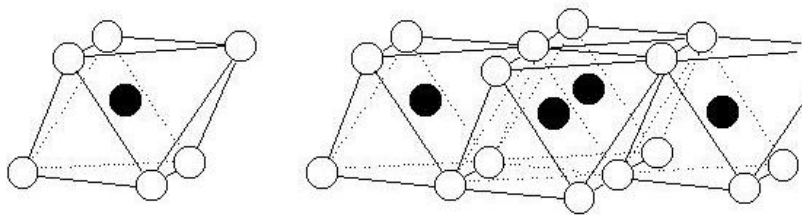
Leirsteindir eru flokkaðar í fjóra aðalhópa: kaólinít, illít, smektít og vermikúlít sem hafa einkennandi grunnbil (*e. basal spacing*) sem nemur u.þ.b. 7 Å, 10 Å, 15 Å og 14.5 Å. Klóríthópurinn er sjaldnast flokkaður sem eiginleg leirsteind, en byggingu klóríts má helst lýsa sem lögum af talki með millilögum af brúsíti (*Deer o.fl., 1992*). Í jarðhitaummyndun er klórít þó oftast flokkað sem leirsteind, enda er myndun klórít-smektít-blandleirs úr smektíti í samræmi við þá flokkun.

Í ummynduðu basalti úr jarðhitakerfum á Íslandi finnast nokkrar leirsteindir úr smektít-, klórít- og blandlagsleirshópunum. Leirsteindirnar eru með áþekka kristalbyggingu og þróast með dýpi frá tríoktahedral smektíti mynduðu í basalti við hita undir 200°C í klórít myndað við hitastig um 230°C (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1976; Hjalti Franzson, 1998*).

Til að kanna kristalgerð og efnasamsetningu leirsteinda úr jarðhitakerfinu á Hellsheiði voru greind 30 sýni af leir úr borsvarfi. Eins og fyrr segir skarast skilgreiningarnar á leir nokkuð þar sem leirsteindir eru oft meginhluti efnis í kornastærðinni leir. Það er því einfaldast að skilja jarðhitaleir frá öðrum steindum í borsvarfi með því að mynda grugglausn af leirnum úr grófmöluðu sýni og lágmarka þannig magn annarra steinda í grugglausninni. Gerð er grein fyrir þessu ferli auk annarra ferla er varða undirbúning leirsýnanna fyrir greiningu í **viðauka F**.

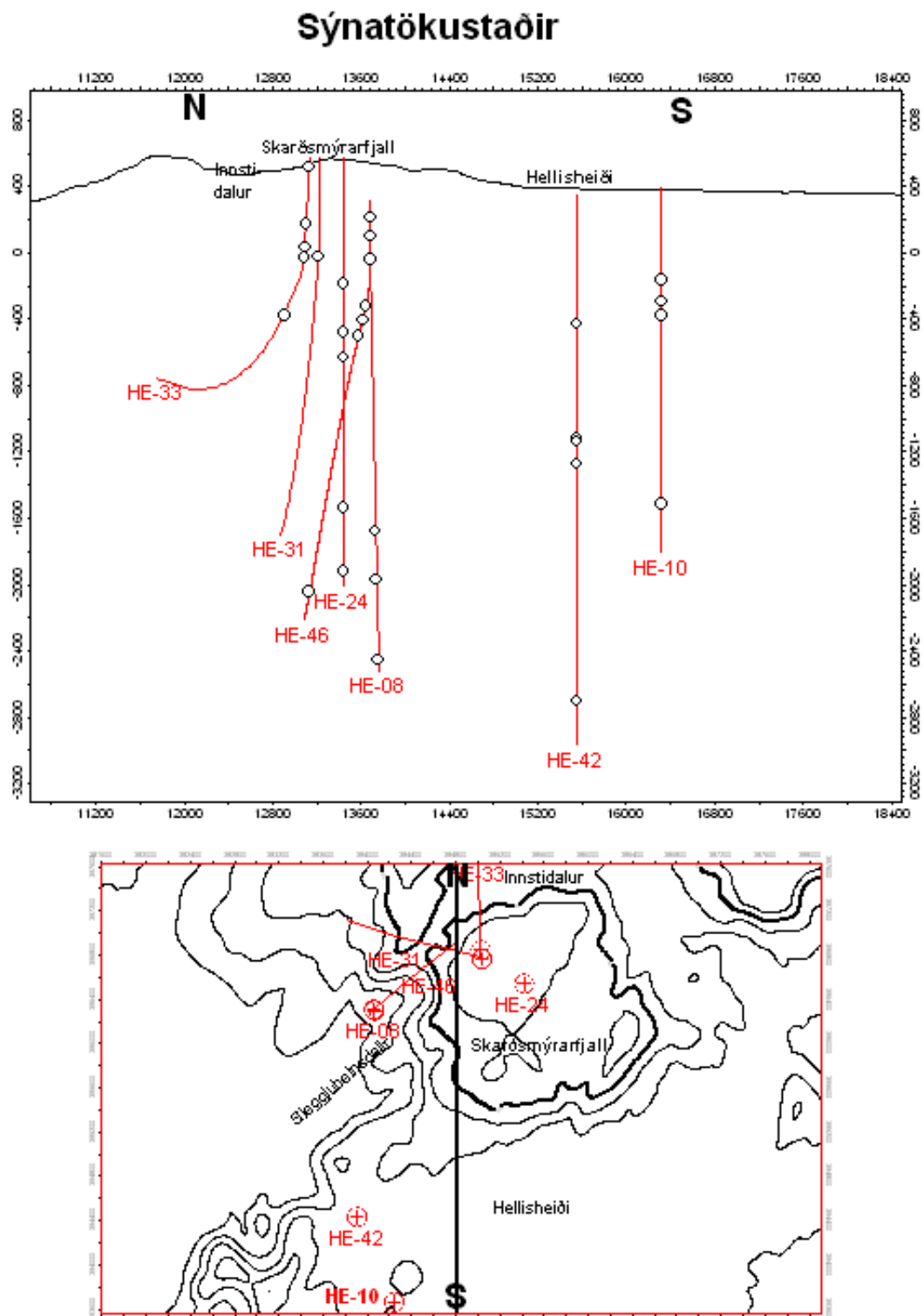


Mynd 3.1 Grunneiningar leirsteinda - bygging kísillags (tetrahedral). Kísiljónir táknaðar með svörtum lit og súrefnisjónir með hvítum. (Krauskopf og Bird, 1995).



Mynd 3.2 Grunneiningar leirsteinda - bygging gibbsítlags (oktahedral.) Ál/magnesíumjónir táknaðar með svörtum lit og súrefnisjónir með hvítum. (Krauskopf & Bird, 1995).

3.1 Sýnasafnið



Mynd 3.3 Þversnið af því svæði þar sem sýni voru tekin fyrir leirgreiningar. Nedri myndin sýnir staðsetningu þversniðsins. Punktar á holuferlum tákna sýnatökustaði.

Valin voru 30 svarfsýni úr borholum á Hellisheiði og eru þau merkt á þversnið á mynd 3.3 auk þeirra borhola sem sýnin voru tekin úr. Leitast var við að hafa sem mesta breidd innan sýnasafnsins svo það endurspegli sem best mismunandi jarðfræðifyrbrigði á Hengilssvæðinu og var sýnasafnið skilgreint m.a. með hliðsjón af þeirri kortlagningu sem gert er grein fyrir í kafla 2.

Sýni voru tekin á mismunandi dýptarbili úr móbergi, hraunlögum, þróuðu bergi, innskotum og göngum. Sýnin endurspeglar því bæði mismunandi berggerð en einnig mismunandi ummyndun á svæðinu. Ummyndun staflans og ummyndun á innskotum er t.a.m. af ólíkum toga, eins og lýst er í kafla 2.5. Þá er ummyndun glers í móbergi frábrugðin ummyndun hraunlaga þar sem sú ummyndun hefst fyrir og við lágan hita og þrýsting árum eða áratugum eftir gos (*Sveinn P. Jakobsson, 1978*).

Sýni voru valin úr holum HE-31, HE-33 og HE-46 (sjá mynd 3.3) en auk þess voru sýni valin úr fjórum öðrum borholum. HE-8 er á sama teig og HE-46 og er samræmi milli jarðlagasniða í holunum mjög gott. HE-24 er á næsta teig austan við HE-31 og HE-33 og er samræmi milli jarðlagasniðs úr henni og HE-31 og HE-33 einnig gott. Þá voru valdar tvær lóðréttar holur sunnan Skarðsmýrarfjalls og austan Kolviðarhóls til að auka breidd sýnasafnsins. Það eru holur HE-42 í Hellisskarði og HE-10 sunnan við Gígahnúk (mynd 3.3).

Sýnin eru skráð í töflu 3.1 auk þess sem tekið er fram úr hvers konar einingum mætti ætla að þau kæmu úr. Sýnin voru skoðuð í víðsjá og í þunnsneið þar sem því var við komið og auk þess var stuðst við jarðlagamælingar og borgögn til að staðsetja betur mismunandi einingar. Þó ber að ítreka að sýni eru tekin á tveggja metra fresti við háhitaboranir hér á landi og hvert sýni getur því innihaldið efni af a.m.k. tveggja metra bili, en nánar er fjallað um sýnatöku við háhitaboranir í kafla 2.1.1.

Tafla 3.1. Sýni valin fyrir greiningar á kristalgerð og efnasamsetningu leirsteinda

Sýni no.	HE-#	Dýpi (m)	Myndun
#01	46	640	Hraunlög H4
#02	42	1470	Innskot, þróað
#03	10	690	Móberg
#04	24	1052	Grunnir gangar
#05	24	2396	Innskot, þróað
#06	42	1624	Hraunlög
#07	24	757	Móberg
#08	46	734	Hraunlög H4
#09	46	846	Grunnir gangar
#10	8	2766	Innskot
#11	46	2556	Innskot
#12	8	2282	Innskot
#13	46	210	Hraunlög H2
#14	33	400	Móberg
#15	42	3055	Innskot
#16	46	352	Grunnir gangar
#17	10	562	Móberg
#18	46	96	Hraunlög H1
#19	24	1204	Móberg
#20	8	54	Ísúr breksía
#21	42	782	Hraunlög
#22	31	604	Grunnir gangar
#23	10	774	Grunnir gangar
#24	8	1990	Innskot, þróað
#25	33	996	Móberg
#26	33	601	Móberg
#27	33	540	Grunnir gangar
#28	24	2110	Hraunlög
#29	10	1914	Innskot, þróað
#30	42	1488	Hraunlög

3.2 XRD-greiningar á kristalgerð leirsteinda

XRD-greiningar eru notaðar við greiningu á kristalgerð leirsteinda, en kristalgerðin er undirstaða beltaskiptingar leirsteindanna í jarðhitakerfum, en nánar er fjallað um ummyndunarbeltin í kafla 2.5.

XRD-greiningar eru nokkrum annmörkum háðar sem hafa ber í huga. Í fyrsta lagi eru sýnin sjálf brígdul þar sem þau eru útbúin með kornastærðargreiningu en sem fyrr segir eru ekki öll korn af leirkornastærð leirsteindir auk þess sem nánast alltaf einhver korn slæðast með í sýnin sem eru stærri en leirkornastærð. Algengast er að feldspöt, kalsít, zeólítar, karbónöt, pýrít og járnnoxíð slæðist með. Þá er oft nauðsynlegt að styðja við niðurstöður XRD-greininga með öðrum rannsóknaraðferðum. Hér eru ICP-OES-greiningar á leirhlutanum hafðar til hliðsjónar, sér í lagi við greiningu á illíti.

Greining á kristalgerð leirsýnanna var framkvæmd samkvæmt forskrift frá US Geological Survey (*Poppe o.fl., 2001*), en gerð er nánari grein fyrir undirbúningi og framkvæmd á mælingu sýnanna í **viðaukum F og G**.

Fjórar mælingar voru framkvæmdar á hverju sýni þar sem grunnbil steindanna (d001) var mælt í sýnunum ómeðhöndluðum og þurrkuðum við stofuhita (OMH), eftir að þau höfðu verið hituð í 400°C, eftir að þau höfðu verið hituð í 550°C og loks eftir metnun þeirra í etýlen-glýkól eimi. Einnig voru gerðar mælingar á d060-kristalbilinu í leirsýnunum í þeim tilvikum þar sem sýni voru nægilega stór, til að kanna hvort leirsteindirnar væru díoktahedral eða tríoktahedral.

Niðurstöður XRD-greininga á leirsýnunum má sjá í töflu 3.2 og gefa þær í stórum dráttum til kynna hefðbundna beltaskiptingu leirsteindanna eins og þekkt er í háhitakerfum á Íslandi (*t.d. Hrefna Kristmannsdóttir; 1976, 1982*) og nánar er fjallað um í kafla 2.5.2.

Í efstu 550 m eru smektít og vermikúlít ríkjandi. Smektít er algengasta leirsteindin í basalti, en smektít er hópur dí- og tríoktahedral leirsteinda sem geta þanist út og dregist saman án þess að kristalbygging þeirra breytist varanlega (*Moore & Reynolds, 1997*). Smektít þekktist á grunnbili (d001) á um 14.5 Å sem þenst í 17 Å við metnun með etýlen-glýkóli og fellur svo niður í um 10 Å við afvötnun eftir hitun í um klukkustund við 400°C. Vermikúlít hagar sér á svipaðan hátt og smektít. Það er algengt innan smektítbeltisins en það er með hærri hleðslu á hvert lag (*e. layer charge*) en smektít og einkennist m.a. af því að það tekur aðeins eitt lag af etýlen-glýkóli í stað tveggja eins og smektít gerir (*Brindley & Brown, 1980*). Það þenst því minna en smektít við metnun í etýlen-glýkól, en fellur niður í um 10 Å

við hitun í um klukkustund við 400°C, líkt og smektít. Við yfirborðsveðrun myndast gjarnan tríoktahedral Mg-ríkt smektít; beidellít eða saponít, sem þróast svo í Mg-ríkt díoktahedral smektít, svokallað montmorillonít, þegar neðar dregur í staflanum og ummyndun eykst.

Smektít og vermikulít þróast í blandlagsleir við hærra ummyndunarstig þegar klórítlög fara að myndast inn á milli smektít- eða vermikulítlaganna sem fyrir eru. Blandlagsleir var greindur á bilinu 550-1050 m í sýnunum. Þrjár gerðir af blandlagsleir voru greindar. Í fyrsta lagi „high layer charge“-corrensít sem er klórít/smektít-blandlagsleir með reglulega uppröðun. Það einkennist af grunnbili (d001) á um 29 Å sem þenst í 31-32 Å við metnun í etýlen-glýkól en fellur í um 24 Å eða hverfur alveg við hitun í um klukkustund við 400°C. Í öðru lagi „low layer charge“-corrensít sem er klórít/vermikúlít sem einkennist af lítilli sem engri þenslu á ~29 Å bilinu við metnun í etýlen-glýkól. Í þriðja lagi greinist klórít/smektít eða klórít/vermikúlít blandlagsleir með óreglulega uppröðun (R0), en það einkennist af bæði klórít og smektít/vermikúlít grunnildum (d001) en engin bil koma fram í kringum 30 Å (*Moore & Reynolds, 1997*). Öll sýni sem unnt var að greina 060-bilið í eru tríoktahedral en díoktahedral-leirsteindir finnast að auki í tveimur sýnum.

Blandlagsleir þróast í klórít við hærra ummyndunarstig og var klórít greint frá um 750 m dýpi og er ríkjandi neðan 1050 m. Klórít einkennist á d001-toppi á 14 Å og d-002 toppi á um 7 Å. Það helst óbreytt við metnun í etýlen-glýkól og hitun við 400°C. Við hitun við 550°C vex 14 Å toppurinn meðan 7 Å toppurinn fellur saman eða helst óbreyttur. Klórít er oftast tríoktahedral, en getur þó einnig verið blandað, bæði díoktahedral og tríoktahedral.

Klórít getur haft mjög fjölbreytilega efnasamsetningu enda myndast það við hin ýmsu hita- og þrýstingsskilyrði í mismunandi bergtegundum, bæði sem veðrunarafurð, ummyndunarsteind og við myndbreytingu bergs. Þessi mikli fjölbreytileiki gerir það að verkum að rannsóknir á klóríti eru oft mjög flóknar, en þó hafa verið gerðar tilraunir til að skoða efnasamsetningu klóríts í bergfræðilega einsleitu umhverfi við mismunandi hitastig. Þá eru vísbendingar um að magn tetrahedral áls í klóríti aukist með hækkandi hita, m.a. hafa gögn sýnt hækkandi Al/Si-hlutfall frá kjarna að jaðri í klórítkristöllum úr sandsteinslögum á olíusvæðum við Norður-Noreg, þar sem hitastig er á bilinu 120-180°C (*Jahren, 1991*).

Illít er greint með klóríti í nokkrum sýnum frá um 1000 m og í einu sýni innan blandlagsbeltisins á 690 m. Efnafræðilega er illít nokkurs konar millistig milli smektíts og múskovíts, með meiri Si, Mg og H₂O en minna af tetrahedral Al og K milli laga en múskovít. Það einkennist af grunnbili (d001) á um 10 Å sem helst óbreytt við metnun í

ethelyne-glycol og hitun í um klukkustund við 400°C og 550°C. Illít er nánast alltaf díóktahedral.

Illít myndast við ummyndun þróaðs bergs í jarðhitakerfum og er talið myndast við um 160°C í háhitakerfum á Nýja Sjálandi (*Junfeng o.fl, 2000*), en myndun illíts og blandleirs með illítlögum hefur ekki verið tengt við ákveðið hitastig í háhitakerfum hér á landi. Myndun illíts virðist hinsvegar tengjast ísúrum innskotum í staflanum og komu þau tengsl t.d. sterkt fram í borholum á Nesjavöllum (*Hjalti Franzson, 1988*).

Tafla 3.2. Niðurstöður XRD-greininga á leirsýnum. Tafla sýnir grunnbil (d001) sýnanna og 060-kristalbilið þar sem það var greint auk flokkunar leirsteinda eftir kristalgerð.

#	Depth	Well No.	OMH	GLY	HIT 400°C	HIT 550°C	d060	ACT	comments
20	54	8	14,8	17,1	10,2		1,51		Montmorillonite
18	96	46	15,1	15,6	10,6		1,51		Vermiculite
13	210	46	17,3	15,1	10,3	10,3	1,51		Montmorillonite
16	352	46	14	16,7	10,2		1,53		Montmorillonite
14	400	33	14,5	16,9	10	10,1	1,52		Montmorillonite
27	540	33	14,8 12,9	14,8 12,9	10 9,2	10	1,53		MLC - S/V RO
17	562	10	14,9	17	10		1,54		Montmorillonite
26	601	33	30,6 14,5	30,6 14,5	13,6	13,9			MLC - corensite, V/C
22	604	31	14,1	16,7	10,3		1,53		Montmorillonite
1	640	46	30,6 14,6	32,6 14,6	26,6 14,6	26,6 14,6	9,7 7,2		MLC - corensite, S/C
3	690	10	14,7 9,6	14,6 9,6 7,3	14,6	14,3	9,6 7,2		Chlorite-illite
8	734	46	31 14,5	26,7 14,5	26,7 14,2	26,7 14,2	1,54 1,51 X		MLC - corensite, S/C
7	757	24	14,8	14,8 9,1	14,8	14,5	7,2 1,54		Chlorite
23	774	10	13,6	14,7	10	10	1,53		Vermiculite
21	782	42	14,5 29,4	30 15,8		12,8			MLC - corensite, V/C
9	846	46	14,8 12,7	7,2 35,5	14,9	14,9	9,9 7,3		MLC - S/V RO
25	996	33	14,7 10,6	14,7 10,6	14,7	14,7	1,54		Chlorite-illite
4	1052	24	31,3 14,8	32,4 14,7	14,7	14,6	7,2		MLC - corensite, S/C
19	1204	24	14,6	14,6	14,6	14,6	7,2 1,54 1,51 X		Chlorite
2	1470	42	14,6 10,3	14,6 10,3	14,7 10,3	14,5 10,2	9,6 7,2		Chlorite-illite
30	1488	42	14,7 10,2	14,5 10,2	14,6 10,2	14,4 10,2	9,5		Chlorite-illite
6	1624	42	14,6	14,6	14,8	14,9			Chlorite
29	1914	10	14,7	14,7	14,5	14,8	1,54 1,51 X		Chlorite
24	1990	8	14,6	14,6	14,6	14,6	1,54 1,51 X		Chlorite
28	2110	24	14,9 10,3	14,9 10,3	14,7	14,6	1,54	X	Chlorite-illite
12	2282	8	14,4	14,4	14,4	14,4	1,54 1,51 X		Chlorite
10	2466	8	14,5	14,5	14,5	14,5	1,54 1,51 X		Chlorite
5	2496	24	14,7	14,7	14,7	14,7	1,51		Chlorite
11	2766	8	14,5	14,5	14,5	14,5		X	Chlorite
15	3055	42	14,6 10,4	14,6 10,4	14,6 10	14,5	1,54		Chlorite-illite

Tafla 3.3. Yfirlit yfir kristalgerð leirsteinda, ummyndunarsteindir í sýnunum og myndanir sem sýnin eru úr.

Dýpi	HE-#	Myndun:	Ummyndunarsteindir	XRD:
54	8	Ísúr breksía	cc-pyr	Smektít
96	46	Hraunlög	cc	Smektít
210	46	Hraunlög	cc-cab-chal-scol/mes	Smektít
352	46	Gangur?	cc-chal-scol/mes-pyr	Smektít
400	33	Móberg	cc-chal-scol/mes-pyr	Smektít
540	33	Móberg	cc-scol/me-qz-pyr	MLC
562	10	Móberg	cc-scol/me-qz-wai-pyr	Smektít
601	33	Gangur?	cc-qz-pre	MLC
604	31	Gangur?	cc-qz-pre-wai	Smektít
640	46	Hraunlög	cc-qz-pre-wai	MLC
690	10	Móberg	cc-qz-pre-pyr	Klórít-illít
734	46	Hraunlög	cc-qz-pre-laum-epid	MLC
757	24	Móberg	cc-qz-wai	Klórít
774	10	Innskot	cc-qz-pre-pyr	Smektít
782	42	Hraunlög	cc-pyr	MLC
846	46	Gangur?	cc-qz-pre-laum	MLC
996	33	Móberg	cc-qz-wai	Klórít-illít
1052	24	Innskot/gangur	cc-qz-wai-pyr	MLC
1204	24	Móberg	pyr	Klórít
1470	42	Innskot	qz-py	Klórít-illít
1488	42	Hraunlög	qz-ep-py	Klórít-illít
1624	42	Hraunlög	qz-epid-amf-pyr	Klórít
1914	10	Innskot	cc-epid-woll-act-pyr	Klórít
1990	8	Móberg	cc-qz-pre-epid-woll-pyr	Klórít
2110	24	Hraunlög	cc-pre-epid-act	Klórít-illít
2282	8	Innskot	qz-epid-pre	Klórít
2496	24	Innskot	cc-qz-epid	Klórít
2556	46	Innskot	cc-qz-epid-act	Klórít
2766	8	Innskot	cc-epid-amf	Klórít
3055	42	Innskot?	qz-epid-py	Klórít-illít

3.3 Efnagreining á svarfsýnum og leirhluta þeirra

Leirsýni sem útbúin voru fyrir efnagreiningar með litrófsgreiningu (ICP-OES) eru í raun leirhluti heildarsýnisins, þ.e.a.s. sá hluti svarfsýnanna sem er af leir-kornastærð (< 2 µm), aðskilinn frá heildarsýninu með kornastærðargreiningu eins og lýst er í **viðauka F**.

Gerðar voru efnagreiningar á 28 af 30 leirsýnunum. Sýni #09 (46/846 m) og sýni #10 (8/2486 m) reyndust ekki nægilega stór til að unnt væri að efnagreina þau. Auk þess voru gerðar efnagreiningar á hliðstæðum svarfsýnum (heildarsýni) allra 30 sýnanna. Nánar er sagt frá undirbúningi og framkvæmd á efnagreiningum í **viðauka H**.

Efnagreiningar voru framkvæmdar með litrófsmælingu (ICP-OES) en auk þess var vatnsmagn sýnanna ákvarðað með glæðingu sýnanna við 700°C í tvær klukkustundir. Þá var tvígilt járn greint í leirsýnum með Wilson-títrun en fjallað er um aðferðina og framkvæmd hennar í **viðauka I**.

Niðurstöður efnagreininga á svarfsýnum ásamt niðurstöðum glæðingar má sjá í töflu 3.4. Niðurstöður efnagreininga á leirhluta svarfsýnanna auk niðurstöðum glæðingar og greiningar á %Fe(III) má sjá í töflu 3.5.

Tafla 3.4 Niðurstöður ICP-greininga og glæðingar á bergsýnum (svarf).

Sample	Depth	Well	ndSiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	Ba	Co	Cr	Cu	La	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr	H2O
B20	54	8	51,50	13,88	10,68	0,18	6,80	12,63	2,21	0,15	1,60	0,22	0,0053	0,0054	0,0229	0,0133	0,0009	0,0073	0,0047	0,0204	0,0379	0,0027	0,0090	0,0090	4,790
B18	96	46	52,51	12,36	12,46	0,23	5,98	10,02	2,97	0,80	2,11	0,41	0,0186	0,0058	0,0093	0,0169	0,0024	0,0059	0,0043	0,0217	0,0376	0,0062	0,0124	0,0265	0,340
B13	210	46	53,00	14,05	12,61	0,21	7,15	8,20	2,32	0,22	1,78	0,31	0,0081	0,0063	0,0146	0,0130	0,0012	0,0079	0,0041	0,0166	0,0332	0,0030	0,0100	0,0113	7,291
B16	352	46	49,21	13,25	12,11	0,20	8,76	11,84	1,89	0,23	1,98	0,34	0,0077	0,0065	0,0396	0,0120	0,0017	0,0161	0,0042	0,0211	0,0353	0,0030	0,0108	0,0123	1,150
B14	400	33	52,86	12,83	11,29	0,21	6,06	11,01	2,65	0,69	1,93	0,31	0,0167	0,0055	0,0129	0,0121	0,0021	0,0060	0,0043	0,0216	0,0347	0,0044	0,0100	0,0187	0,940
B27	540	33	50,69	13,57	11,95	0,22	6,48	12,04	2,64	0,19	1,82	0,25	0,0066	0,0071	0,0162	0,0170	0,0010	0,0110	0,0049	0,0211	0,0398	0,0033	0,0105	0,0097	0,710
B17	562	10	56,39	15,35	11,37	0,17	4,91	7,74	1,29	0,22	2,05	0,35	0,0068	0,0064	0,0255	0,0184	0,0013	0,0104	0,0040	0,0220	0,0304	0,0031	0,0104	0,0124	4,871
B22	604	31	50,91	14,92	10,21	0,18	6,24	13,87	1,76	0,15	1,43	0,20	0,0051	0,0053	0,0274	0,0133	0,0010	0,0079	0,0042	0,0200	0,0331	0,0025	0,0086	0,0083	5,231
B26	604	33	50,03	15,15	10,97	0,18	6,64	11,91	2,40	0,21	1,99	0,35	0,0087	0,0059	0,0250	0,0144	0,0018	0,0097	0,0043	0,0258	0,0302	0,0031	0,0099	0,0123	
B01	640	46	51,23	12,62	13,89	0,25	5,45	10,42	2,80	0,48	2,22	0,49	0,0141	0,0063	0,0107	0,0113	0,0027	0,0051	0,0039	0,0220	0,0357	0,0053	0,0111	0,0189	0,690
B03	690	10	48,77	16,80	9,72	0,18	6,47	14,72	1,54	0,14	1,41	0,14	0,0033	0,0049	0,0218	0,0076	0,0015	0,0092	0,0042	0,0203	0,0285	0,0019	0,0079	0,0079	0,690
B08	734	56	49,36	16,71	9,98	0,19	6,51	13,61	1,83	0,21	1,29	0,19	0,0055	0,0053	0,0153	0,0113	0,0010	0,0075	0,0041	0,0208	0,0291	0,0023	0,0088	0,0084	0,850
B07	757	24	47,98	15,91	13,04	0,25	6,16	11,80	1,55	0,18	2,49	0,48	0,0068	0,0066	0,0178	0,0165	0,0019	0,0076	0,0044	0,0222	0,0402	0,0044	0,0127	0,0156	7,949
B23	774	10	50,95	13,74	13,63	0,23	5,46	11,69	1,04	0,34	2,35	0,43	0,0150	0,0061	0,0186	0,0114	0,0018	0,0076	0,0039	0,0297	0,0382	0,0037	0,0106	0,0150	15,723
B21	782	42	48,97	17,87	8,19	0,15	6,95	14,51	1,58	0,41	1,06	0,18	0,0047	0,0050	0,0337	0,0091	0,0009	0,0092	0,0037	0,0217	0,0229	0,0017	0,0069	0,0072	0,780
B09	846	46	48,98	14,49	11,99	0,20	7,39	12,20	1,91	0,24	2,08	0,36	0,0057	0,0064	0,0263	0,0143	0,0014	0,0088	0,0042	0,0219	0,0372	0,0033	0,0107	0,0123	7,682
B25	996	33	49,83	15,14	12,37	0,22	7,64	10,79	1,27	0,41	1,86	0,31	0,0074	0,0063	0,0264	0,0140	0,0013	0,0110	0,0042	0,0191	0,0359	0,0032	0,0107	0,0116	13,451
B04	1052	24	47,53	12,85	22,08	0,30	4,00	8,39	1,88	0,30	2,13	0,36	0,0111	0,0079	0,0124	0,0217	0,0019	0,0106	0,0042	0,0211	0,0400	0,0035	0,0136	0,0145	10,149
B19	1204	24	49,90	13,36	12,52	0,25	5,09	13,37	2,41	0,28	2,18	0,49	0,0110	0,0059	0,0122	0,0078	0,0025	0,0056	0,0043	0,0263	0,0385	0,0045	0,0106	0,0169	1,580
B02	1470	42	55,12	14,90	11,89	0,20	3,94	8,01	2,54	0,89	1,92	0,42	0,0230	0,0052	0,0118	0,0097	0,0038	0,0054	0,0033	0,0198	0,0293	0,0075	0,0131	0,0323	5,131
B30	1488	42	49,91	14,90	9,56	0,20	7,70	13,80	1,80	0,21	1,54	0,23	0,0063	0,0058	0,0402	0,0118	0,0011	0,0108	0,0049	0,0189	0,0368	0,0025	0,0088	4,020	
B06	1624	42	49,92	14,00	13,66	0,19	5,74	10,59	2,47	0,27	2,53	0,45	0,0099	0,0068	0,0119	0,0159	0,0017	0,0064	0,0045	0,0272	0,0466	0,0039	0,0124	0,0155	
B29	1914	10	49,01	15,84	11,23	0,18	5,96	12,98	2,29	0,18	1,85	0,31	0,0055	0,0060	0,0161	0,0137	0,0014	0,0077	0,0042	0,0236	0,0361	0,0029	0,0104	0,0114	3,140
B24	1990	8	57,33	13,62	10,01	0,22	3,72	7,98	3,43	1,26	1,65	0,63	0,0298	0,0038	0,0078	0,0076	0,0041	0,0029	0,0029	0,0250	0,0176	0,0087	0,0138	0,0442	1,260
B28	2110	24	64,64	12,26	11,42	0,19	1,90	6,61	0,26	0,53	1,35	0,68	0,0254	0,0029	0,0044	0,0043	0,0052	0,0020	0,0024	0,0145	0,0068	0,0121	0,0154	0,0480	5,499
B12	2282	8	51,01	14,50	10,34	0,19	6,42	12,88	2,04	0,20	1,93	0,33	0,0062	0,0058	0,0259	0,0139	0,0013	0,0110	0,0042	0,0236	0,0383	0,0032	0,0101	0,0111	8,031
B05	2396	24	48,68	13,41	14,54	0,30	5,82	12,10	1,85	0,17	2,49	0,46	0,0061	0,0070	0,0127	0,0136	0,0019	0,0065	0,0045	0,0243	0,0473	0,0045	0,0135	0,0159	8,503
B10	2556	46	49,33	15,95	11,91	0,23	5,24	11,24	2,95	0,35	2,17	0,49	0,0138	0,0058	0,0106	0,0086	0,0021	0,0046	0,0038	0,0266	0,0335	0,0046	0,0108	0,0167	11,322
B11	2766	8	66,63	11,47	8,58	0,21	1,50	5,02	3,93	1,40	0,87	0,19	0,0374	0,0018	0,0050	0,0037	0,0052	0,0016	0,0020	0,0176	0,0063	0,0147	0,0132	0,0656	0,390
B15	3055	42	50,37	13,88	12,40	0,23	6,72	11,12	2,19	0,45	2,10	0,37	0,0123	0,0061	0,0165	0,0138	0,0018	0,0073	0,0042	0,0217	0,0375	0,0042	0,0114	0,0156	0,730

Tafla 3.5 Niðurstöður ICP-greininga, glæðingar og FeO-títrunar á leirsýnum.

Sample	Depth	Well no.	SiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	Ba	Co	Cr	Cu	La	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr	%Fe(III)	H2O	FeO ⁺	
L20	54	8	57,48	14,91	14,42	0,15	3,51	4,72	1,12	0,58	2,55	0,40	0,0183	0,0065	0,0115	0,0158	0,0032	0,0070	0,0039	0,0147	0,0320	0,0062	0,0157	0,0296	9,880606374	12,687	1,42456	
L18	96	46	58,97	7,61	23,18	0,09	2,15	2,87	1,73	0,30	2,55	0,31	0,0074	0,0101	0,0133	0,0568	0,0012	0,0167	0,0042	0,0108	0,0521	0,0014	0,0147	0,0234	2,00450784	11,888	0,46458	
L13	210	46	57,61	14,46	10,94	0,07	9,77	4,25	1,34	0,18	0,77	0,49	0,0030	0,0069	0,0096	0,0113	0,0016	0,0065	0,0048	0,0079	0,0306	0,0039	0,0089	0,0156	5,499657977	12,100	0,60172	
L16	352	46	50,32	12,80	15,91	0,12	10,76	6,20	1,71	0,23	1,41	0,37	0,0038	0,0081	0,0258	0,0125	0,0012	0,0148	0,0039	0,0148	0,0437	0,0026	0,0113	0,0122	15,85134332	11,411	2,52168	
L14	400	33	53,09	12,17	14,57	0,16	6,21	8,31	1,62	0,29	3,06	0,36	0,0074	0,0067	0,0152	0,0128	0,0017	0,0078	0,0044	0,0213	0,0508	0,0027	0,0132	0,0122	3,188085976	14,500	0,46458	
L27	540	33	50,12	14,74	18,06	0,17	7,17	4,03	2,60	0,15	2,43	0,36	0,0046	0,0085	0,0123	0,0127	0,0015	0,0078	0,0049	0,0188	0,0557	0,0031	0,0134	0,0215	15,48236962	10,200	2,79596	
L17	562	10	50,67	15,59	14,92	0,20	10,09	4,27	1,06	0,39	2,28	0,38	0,0035	0,0082	0,0324	0,0142	0,0013	0,0134	0,0053	0,0102	0,0492	0,0034	0,0134	0,0147	2,194396802	12,587	0,32744	
L22	604	31	57,77	14,28	14,97	0,15	3,46	4,73	1,01	0,57	2,50	0,39	0,0179	0,0069	0,0121	0,0158	0,0032	0,0079	0,0039	0,0144	0,0314	0,0062	0,0155	0,0295	9,51351312	13,013	1,42456	
L26	604	33	39,91	17,46	20,36	0,28	13,23	4,91	1,32	0,16	1,70	0,50	0,0024	0,0093	0,0373	0,0087	0,0013	0,0208	0,0044	0,0124	0,0506	0,0035	0,0192	0,0117	42,02653382	9,710	8,55584	
L01	640	46	38,27	18,59	22,38	0,33	11,88	5,23	1,81	0,12	0,76	0,49	0,0036	0,0113	0,0132	0,0060	0,0014	0,0176	0,0016	0,0135	0,0235	0,0033	0,0245	0,0065	40,68084895	9,300	9,1044	
L03	690	10	37,42	15,54	23,36	0,35	12,47	4,99	0,98	0,14	3,82	0,73	0,0030	0,0143	0,0274	0,0082	0,0024	0,0155	0,0074	0,0075	0,0656	0,0066	0,0189	0,0234	41,31578102	9,209	9,65296	
L08	734	56	39,79	17,81	20,30	0,38	12,87	5,42	2,09	0,14	0,68	0,40	0,0038	0,0122	0,0180	0,0075	0,0010	0,0227	0,0017	0,0131	0,0216	0,0025	0,0263	0,0066		10,400		
L07	757	24	47,76	14,20	17,75	0,27	9,37	7,15	0,51	0,91	1,40	0,45	0,0139	0,0105	0,0402	0,0212	0,0014	0,0207	0,0045	0,0272	0,0402	0,0022	0,0214	0,0126		9,199		
L23	774	10	51,47	15,80	14,35	0,27	4,47	6,55	3,29	1,36	1,29	0,97	0,0321	0,0046	0,0049	0,0045	0,0046	0,0045	0,0019	0,0234	0,0166	0,0097	0,0182	0,0487	2,282138592	10,090	0,32744	
L21	782	42	45,68	12,64	20,84	0,23	12,94	4,04	1,87	0,21	0,96	0,44	0,0040	0,0095	0,0134	0,0129	0,0016	0,0213	0,0019	0,0134	0,0360	0,0032	0,0200	0,0089	2,887472113	9,118	0,60172	
L09	846	46	45,91	12,08	19,02	0,19	12,95	3,97	3,95	0,19	1,05	0,54	0,0052	0,0102	0,0229	0,0149	0,0015	0,0205	0,0031	0,0183	0,0384	0,0035	0,0167	0,0133	26,96085518	9,600	5,12734	
L25	996	33	52,09	18,61	16,31	0,44	4,13	4,52	0,19	1,33	1,33	0,80	0,0611	0,0041	0,0067	0,0053	0,0057	0,0036	0,0039	0,0130	0,0139	0,0168	0,0424	0,0852	41,53938906	6,613	6,77302	
L04	1052	24	45,06	14,59	19,41	0,21	10,46	7,11	1,40	0,26	0,85	0,48	0,0069	0,0108	0,0249	0,0260	0,0012	0,0231	0,0019	0,0213	0,0205	0,0018	0,0218	0,0081		9,820		
L19	1204	24	42,07	13,45	22,31	0,37	10,79	6,50	1,58	0,19	1,69	0,90	0,0058	0,0102	0,0165	0,0077	0,0015	0,0141	0,0029	0,0097	0,0344	0,0044	0,0242	0,0253	51,26495101	4,995	11,43578	
L02	1470	42	51,48	13,31	14,46	0,21	8,17	6,73	2,42	1,17	1,12	0,77	0,0208	0,0100	0,0052	0,0255	0,0031	0,0135	0,0021	0,0186	0,0139	0,0065	0,0223	0,0177		5,644		
L30	1488	42	61,79	14,97	7,75	0,21	2,07	4,66	5,32	1,82	0,81	0,43	0,0494	0,0030	0,0038	0,0037	0,0064	0,0034	0,0015	0,0201	0,0081	0,0160	0,0160	0,0345	71,42263619	7,200	5,53876	
L06	1624	42	46,60	15,45	17,12	0,21	7,76	7,27	3,30	0,39	1,21	0,50	0,0119	0,0123	0,0085	0,0228	0,0013	0,0190	0,0022	0,0199	0,0302	0,0028	0,0157	0,0093		5,694		
L29	1914	10	48,66	9,46	19,82	0,19	9,94	7,25	3,03	0,21	0,60	0,69	0,0056	0,0109	0,0053	0,0183	0,0025	0,0170	0,0015	0,0194	0,0201	0,0052	0,0132	0,0188	59,77743373	2,700	11,8472	
L24	1990	8	46,63	14,68	17,05	0,23	9,30	7,17	2,14	0,64	1,24	0,73	0,0159	0,0102	0,0079	0,0355	0,0024	0,0152	0,0021	0,0205	0,0271	0,0039	0,0212	0,0127	38,92411414	3,900	6,63588	
L28	2110	24	41,80	16,94	20,36	0,30	8,97	7,00	2,26	0,29	1,23	0,69	0,0098	0,0116	0,0112	0,0156	0,0018	0,0151	0,0023	0,0175	0,0308	0,0041	0,0261	0,0228	48,7667182	6,600	9,92724	
L12	2282	8	49,72	13,29	12,48	0,21	8,19	12,48	1,86	0,26	1,01	0,35	0,0227	0,0066	0,0156	0,0087	0,0077	0,0111	0,0040	0,0182	0,0315	0,0024	0,0164	0,0100		6,074		
L05	2396	24	43,49	16,48	21,00	0,38	8,85	5,51	1,81	0,53	1,12	0,63	0,0124	0,0119	0,0097	0,0217	0,0022	0,0169	0,0016	0,0152	0,0376	0,0053	0,0291	0,0288	38,13199011	6,406	8,00728	
L10	2466	8																										
L11	2556	46																										
L15	3055	42	43,57	17,12	16,50	0,22	11,50	6,66	0,98	2,04	0,78	0,47	0,0137	0,0158	0,0106	0,0100	0,0015	0,0207	0,0009	0,0127	0,0327	0,0032	0,0151	0,0218	48,51764934	5,405	8,00728	

3.3.1 Vatnsmagn í berg- og leirsýnum og oxunarstig leirhlutans

Leirsteindir og zeólítar eru þær ummyndunarsteindir sem innihalda hvað mest vatn allra ummyndunarsteinda.

Til þess að ákvarða vatnsmagn í sýnunum voru berg- og leirsýni glædd við 700°C í tvær klukkustundir og eru niðurstöðurnar sýndar á mynd 3.4. Þar er að auki merkt úr hvers konar myndun bergsýnið er tekið. Glæðingin leiddi í ljós að vatnsinnihald virðist almennt minnka með auknu dýpi, bæði í leirsýnum og bergsýnum.

Vatnsinnihald er mest í bergsýnum úr móbergi, enda getur allt að 80-90% bergmassans í móbergi ummyndast í leir (*Hrefna Kristmannsdóttir, 1975*). Sýni úr móbergi í efstu 600 m staflans innihalda allt að 16% vatn og kristallað berg allt að 10%. Vatnsinnihaldið minnkar hinsvegar mjög snarpt niður á um 1000 m, en neðan þess er vatnsinnihald bergsýna undir 2%. Neðan 1500 m eru flest bergsýni úr innskotum og því vatnsinnihald lítið, enda innskot oft þétt og minna ummynduð en umhverfið eins og nánar er fjallað um í köflum 2.3 og 2.5.

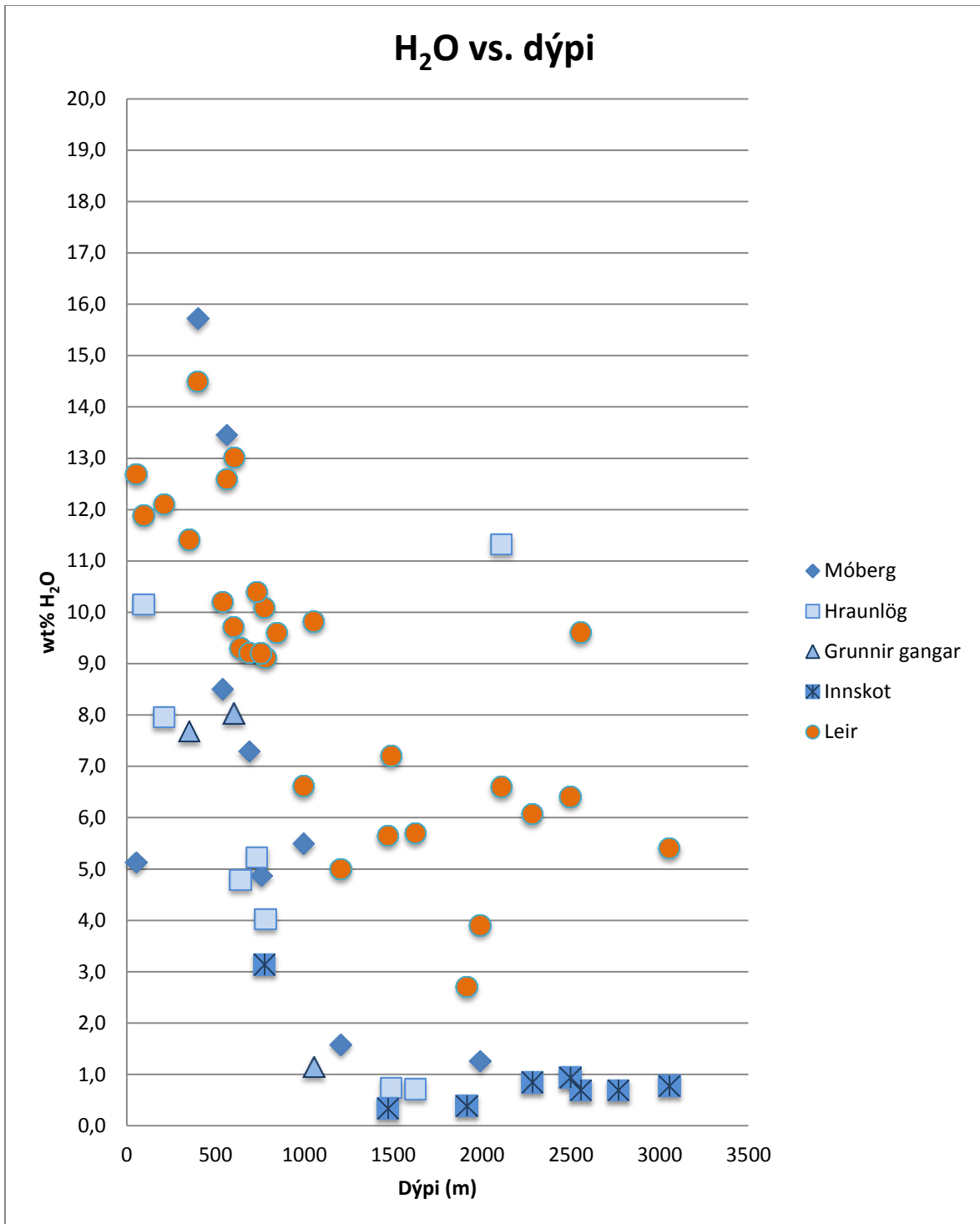
Glæðing á leirsýnum leiddi í ljós að hlutfall vatns er allt að 16% í sýnunum og að meðaltali um 9%. Í ljósi þess að leirsteindir eru algengustu ummyndunarsteindir sem myndast við ummyndun á basalti í jarðhitakerfum (*Hrefna Kristmannsdóttir; 1975*) auk þess sem þær innihalda hlutfallslega mest vatn af ummyndunarsteindum er glæðing á bergsýnum ágætis mælikvarði á magn leirs í sýnunum, og þar með vötnunar- og ummyndunarstig bergsins. Sé gengið út frá því að mestallt vatn í bergsýnunum sé bundið í leirsteindum er þannig hægt að meta gróflega hlutfall leirs í bergsýnum. Þó má gera ráð fyrir að einnig sé nokkuð magn vatns bundið í zeólíta innan smektít-zeólítabeltisins.

Vatnsinnihald leirsýna, flokkuðum eftir kristalgerð auk vatnsinnihalds bergsýna má sjá á mynd 3.5 en kristalgerð leirsýna er ákvörðuð með XRD-greiningu (tafla 3.2).

Magn vatns í leirsýnum er mest í sýnum sem innihalda smektít eða vermikúlít, enda binda þær leirsteindir vatn milli laga. Vatnsmagn fer svo lækkandi á blandlagssviðinu í átt að klórítssviðinu, þar sem smektít- eða vermikúlítlögum fer fækkandi þar til komið er í hreinna klórít. Á mynd 3.5 sést glögglega að vatnsmagn fer stöðugt lækkandi þar til komið er á klórítssviðið á um 1200 m dýpi.

Vatnsmagn í smektíti og vermikúlíti er á bilinu 11-15%, í blandlagsleir á bilinu 9-13% og í klóríti og klóríti-illíti á bilinu 3-10%. Blandlagsleirinn kemur fram á mjög vel skilgreindu dýptarbili, frá um 500-1000 m.

Samkvæmt þessum athugunum fer vatnsmagn minnkandi með auknu dýpi, bæði í bergstaflanum og í leirsteindum.



Mynd 3.4 Magn H₂O í berg- og leirsýnum. Bergsýni eru hér flokkuð eftir myndunum. Magn H₂O er reiknað sem massatap sýnanna vegna glæðingar.

Dreifing járns í ummyndunarsteindum er áhugaverð í ljósi þess að leirsteindir geta bæði tekið upp Fe(II) og Fe(III), en aðrar ummyndunarsteindir, svo sem epidót og andradít, taka upp Fe(III) sem aðalefni. Fe(III)-ríkt klórít inniheldur t.a.m. í sumum tilfellum minna vatn, sem bendir til oxunar þar sem oxun tvígilds járns felur í sér að OH- tapast (*Deer o.fl.*, 1992). Það eru því leirsteindirnar sem endurspeglar oxunarstig bergsins ásamt járnoxíðunum.

Við ákvörðun járninnihalds með ICP-OES er ekki gerður greinamunur á mismunandi oxunarstigi, þ.e. hvort um Fe(II) og Fe(III) er að ræða. Til þess að greina á milli Fe(II) og Fe(III) í sýnunum var því framkvæmd Wilson-títrun á þeim leirsýnum sem voru nægilega stór. Nánar er fjallað um þá greiningu í **viðauka I**.

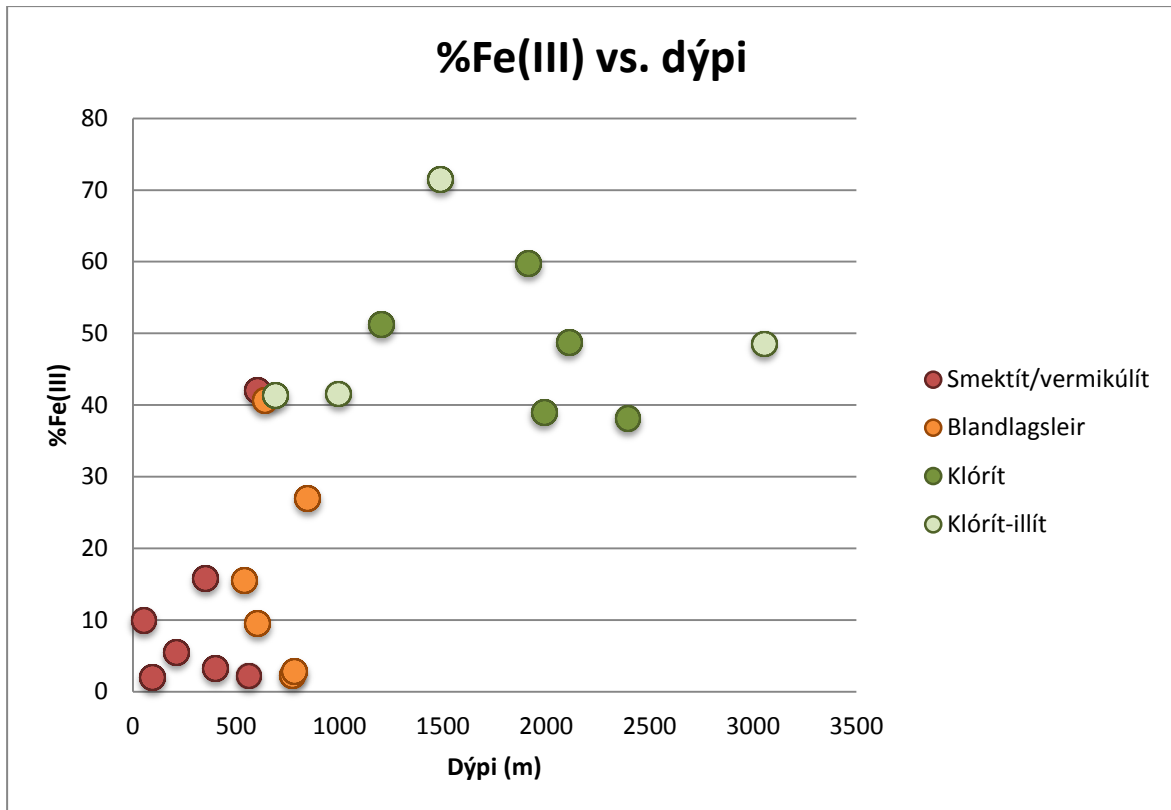
Magn Fe(III) í leirsýnunum ákvarðað með Wilson-títrun má sjá á mynd 3.6.

Niðurstöður benda til þess að magn Fe(III) í leirhlutanum aukist mjög með dýpi, og athygli vekur hversu hratt oxunarstig leirsins vex þegar komið er niður í klórít-epidótbeltið. Þetta gerist á sömu slóðum og myndun ummyndunarsteinda með þrígilt járn hefst að marki, einkum epidóts. Á sama dýptarbili lækkar vatnsmagn leirhlutans verulega.

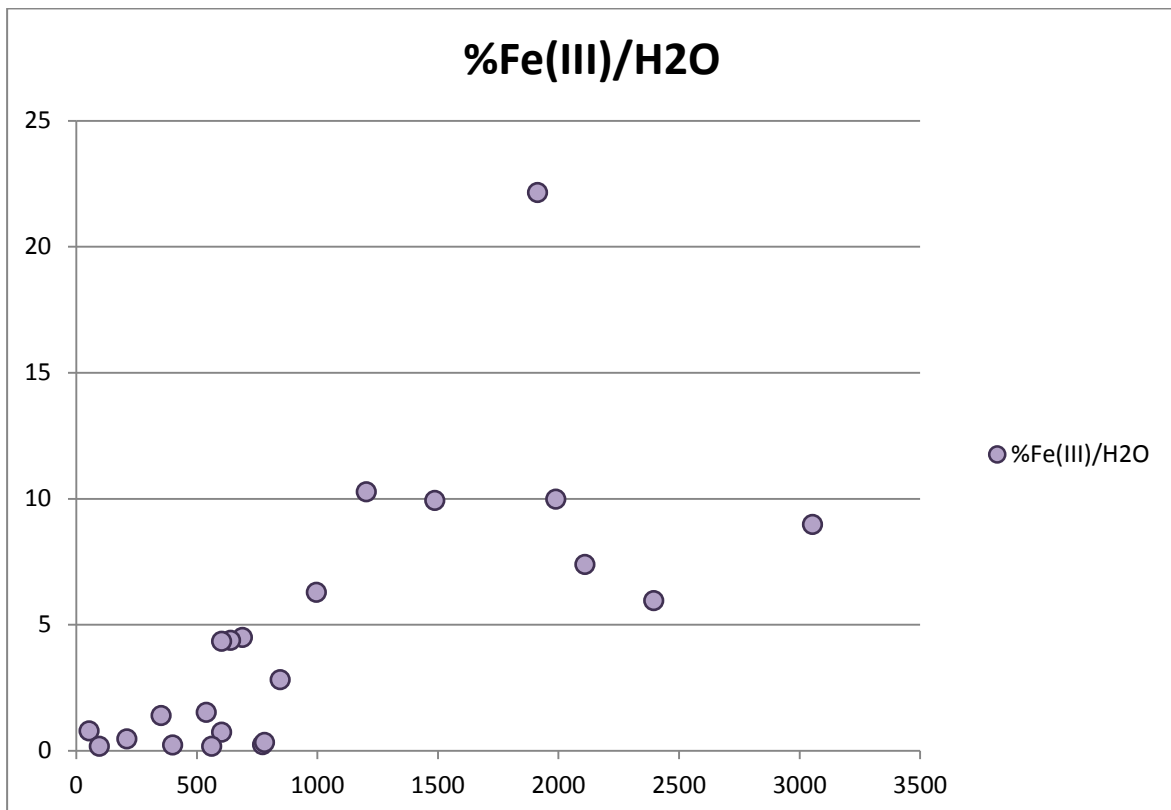
Það sem einkum einkennir leirhluta svarfsins er því vötnun og oxun en báðir þessir þættir eru megineinkenni jarðhitaummyndunar. Á mynd 3.7 er magn Fe(III) á móti vatnsinnihaldi ákvörðuðu með glæðingu sýnt sem fall af dýpi. Þar sést glögglega hvernig magnið helst lágt innan smektítbeltisins en hækkar umtalsvert þegar kemur í blandlagsbeltið og helst svo hátt innan klórítbeltisins.

Þessar niðurstöður benda til þess að hluti ummyndunarferlanna á mörkum blandlags- og klórítbeltanna sé nokkur afvötnun bergstaflans. Orsökina er að klórít tekur upp minna vatn en smektít og þótt myndun annarra vatnaðra steinda á borð við epidót með 1-2% H₂O aukist með vaxandi dýpi fer því fjarri að þær steindir taki upp allt það vatn sem blandlagsleirinn inniheldur umfram klórít. Á sömu slóðum hækkar hlutfall Fe(III). Þetta bendir til oxunar á Fe(II) í Fe(III) en við það losnar vatn. Afleiðingin er sú að vatnsmagn fer mjög minnkandi innan leirsteinda blandlagsbeltisins og að sama skapi eykst hlutur lausbundins vatns í staflanum. Þegar komið er í klórítbeltið helst vatnsmagn lágt og hlutur Fe(III) hár.

Þetta gæti átt þátt í þeim viðnámsbreytingum sem einkenna háhitakerfi á Íslandi og minnst er á í inngangskafli þessarar ritgerðar, þ.e.a.s. lágviðnámskápu sem umlykur háviðnámskjarna dýpra í jarðhitakerfinu (*t.d. Knútur Arnason o.fl.*, 2010). Orsök lágviðnámskápunnar gæti þá tengst lausbundnu vatni á mörkum blandlags- og klórítbeltanna, en viðnám er almennt lægra í vatni en bergi.



Mynd 3.6 %Fe(III) magn í leirsýnum ákvarðað með Wilson-títrun sýnt sem fall af dýpi. Mismunandi kristalgerð leirsýnanna táknuð með mismunandi litum.



Mynd 3.7 Hlutfall Fe(III)/H₂O í leirsýnum sýnt sem fall af dýpi. Bæði vötnun og oxun leirhlutans verður nokkuð stöðug neðan við 1000 m.

3.3.2 Samsetningarmunur borsvarfs og leirhluta þess

Í töflum 3.4-3.5 kemur fram samsetningarmunur leirhlutans og heildarsamsetningar borsvarfsins.

Borsvarfið endurspeglar bergfræðilega samsetningu svæðisins nokkuð vel með þeirri undantekningu að Na-innihald nokkurra sýna er vafalítið hlutfallslega lægra en í fersku gosbergi. Þetta er þá merki um mælanlega útskolun á Na þar sem ummyndun er mikil (*Steinþór Níelsson, 2011*).

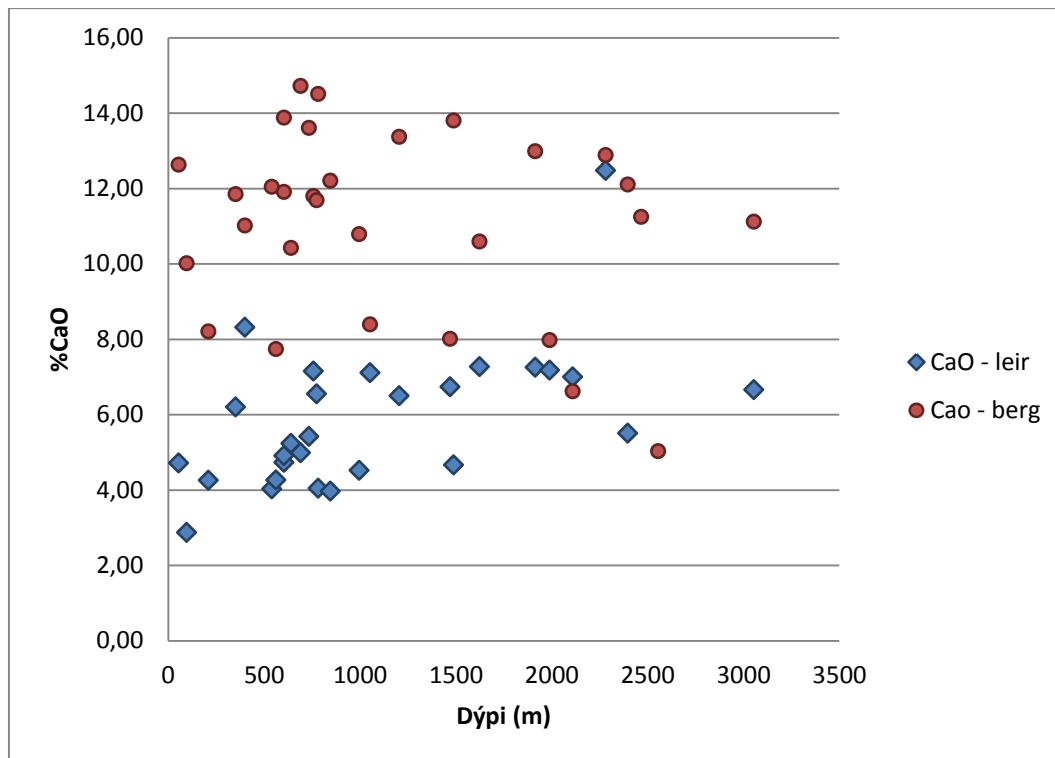
Ekki er að vænta algerrar samsvörunar milli borsvarfs og leirhlutans í hverju sýni. Þó leirhluti sýnisins samanstandi af ummyndunarsteindum, einkum leirsteindum, eru einnig ummyndunarsteindir í þeim hluta sýnisins sem ekki myndar grugglausn.

Dæmi um þetta er að Ca er marktækt lægra í leirhlutanum enda eru Ca-steindir svo sem epidót og jafnvel kalsít yfirleitt grófari í korninu en svo að þær myndi grugglausn með leirnum (sjá mynd 3.8

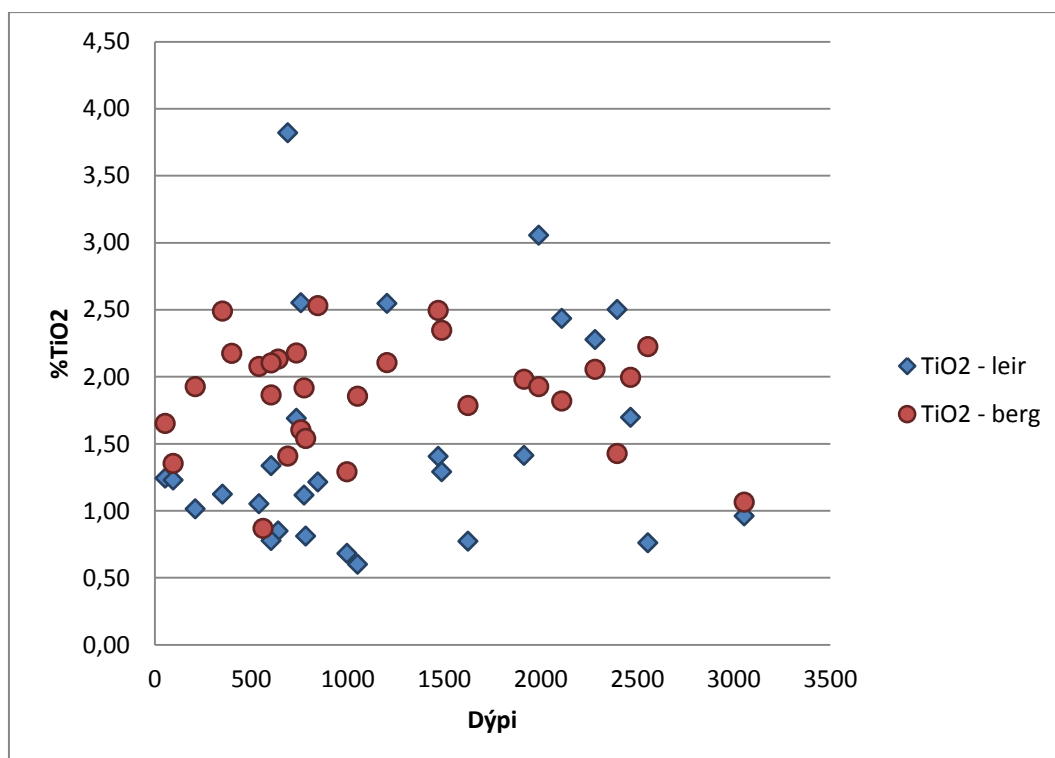
Mynd 3.8). Annað dæmi er magn TiO_2 , en títánómagnetít gosbergsins og ummyndunarsteindirnar títánómaghemít og sphené gruggast óverulega upp með leirsteindunum (sjá mynd 3.9).

Þau frumefni leirhlutans sem leirsteindir taka upp, t.d. með jónaskiptum eða myndun blandleirs endurspeglar hins vegar myndunarumhverfið. Dæmi um þetta er K, sem bæði smektít og klórít taka upp sem illít í blandleir (mynd 3.10). Ekki virðist algjört samræmi milli K-innihalds heildarsýnisins og leirhlutans. Sem dæmi má nefna sýni #15 af 3055 m dýpi, en þar myndast illít í ólivín-þóleífti.

Þetta bendir til þess að K í leirnum sé ekki eingöngu komið úr grannberginu, heldur aðflutt með jarðhitavökvanum. Það er í samræmi við niðurstöður Daniels Larsson (2002) í rannsókn hans á myndun albíts og K-feldspats í holu KhG-1 við Kolviðarhól. Þær bentu til þess að myndun albíts og K-feldspats tengdust efnaflutningi jarðhitavökvans fremur en efnasamsetningu grannbergsins.



Mynd 3.8 Magn CaO í svarfsýnum og leirhluta þeirra með vaxandi dýpi.



Mynd 3.9 Magn TiO₂ í svarfsýnum og leirhluta þeirra með vaxandi dýpi.

Tæplega er hægt að greina marktækan mun á magni aðalefna leirsteinda innan leirhlutans, en aðalefni leirsteinda eru auk vatns kísill (SiO_2), járn (FeO), magnesíum (MgO) og ál (Al_2O_3).

Niðurstöðurnar sýna að magn SiO_2 í bergsýnum er í kringum 50% óháð dýpi, með nokkrum undantekningum þar sem sýni úr þróuðu bergi koma fram. Þetta er í líkingu við það sem almennt sést á Hengilssvæðinu þar sem ólivín-þóleiít er í meirihluta auk nokkurs þóleiíts og innskota úr þróuðu bergi. Þá finnst þróað berg á yfirborði við Sleggju og er sýni úr ísúrri breksíu á um 50 m dýpi úr HE-8 við Kolviðarhól líklega tengt þeirri myndun. Magn SiO_2 í leirhlutanum virðist hinsvegar minnka með auknu dýpi. Í smektítbeltinu er magn SiO_2 um 50-60 %, innan blandlagsbeltisins að meðaltali um 46% og um 43% í klórítbeltinu. Þau sýni sem innihalda illít eru þó oftast kísilríkari, eða að meðaltali með um 50% SiO_2 . Almenn er magn Si í leirhlutanum hærra en í leirsteindum og staðfestir það að leirkornastærðin inniheldur að hluta aðrar og kísilríkari steindir. Almenn virðist þó kísilinnihald leirsins minnka með auknu dýpi, en engin fylgni virðist vera milli kísilinnihalds í bergsýnum og leirsýnum.

Á mynd 3.11 má greina meginlínurnar í upptöku FeO í leirsteindum. Dreifing járn í ummyndunarsteindum er sem fyrr segir áhugaverð í ljósi þess að leir getur tekið upp bæði Fe(II) og Fe(III) en aðrar ummyndunarsteindir taka upp Fe(III) sem aðalefni. Niðurstöður gefa til kynna að heildarjárn leirsteindanna sé svipað og yfirleitt hærra en í grannberginu. Aftur á móti er ekki marktækur munur milli járn magns í mismunandi leirsteindum.

Á mynd 3.12 má sjá magn MgO í berg- og leirsýnum sem fall af dýpi. MgO -magnið í bergsýnum breytist lítið með dýpi og er oftast á bilinu 5-8%, en þó nokkuð lægra í þróaðra bergi neðan 1000 m. MgO -magnið í leirsýnunum virðist hinsvegar aukast í átt að blandlagsbeltinu og helst svo nokkuð hátt innan klórítbeltisins, eða oftast á bilinu 8-11%.

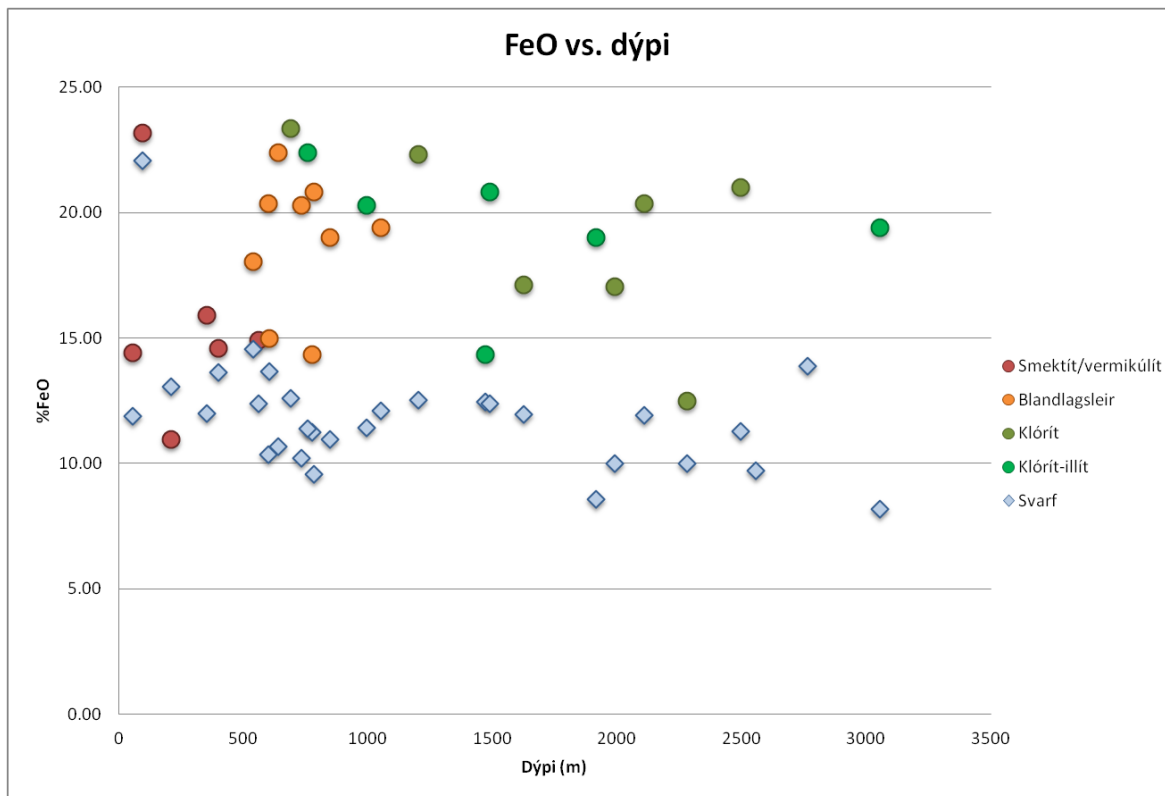
Magn Al_2O_3 í berg- og leirsýnum má sjá á mynd 3.13 Al_2O_3 magnið í bergsýnum er um 12-16%, óháð dýpi, ef frá eru taldir stöku toppar þar sem þróað berg á í hlut. Í leirsýnunum hagar Al sér líkt og Mg og eykst magn þess í átt að blandlagsbeltinu. Magn Al_2O_3 helst svo nokkuð hátt á klórítviðinu. Engin fylgni virðist vera milli álmagns í bergi og leirsýnum.

Almennt virðist ekki vera fylgni milli magns aðalefna leirsteindanna í leirsteindunum sjálfum og grannbergi þeirra, sem aftur bendir til þess að leirsteindir endurspegli frekar jarðhitavökvann og myndunarumhverfi sitt fremur en grannbergið sem það myndast í.

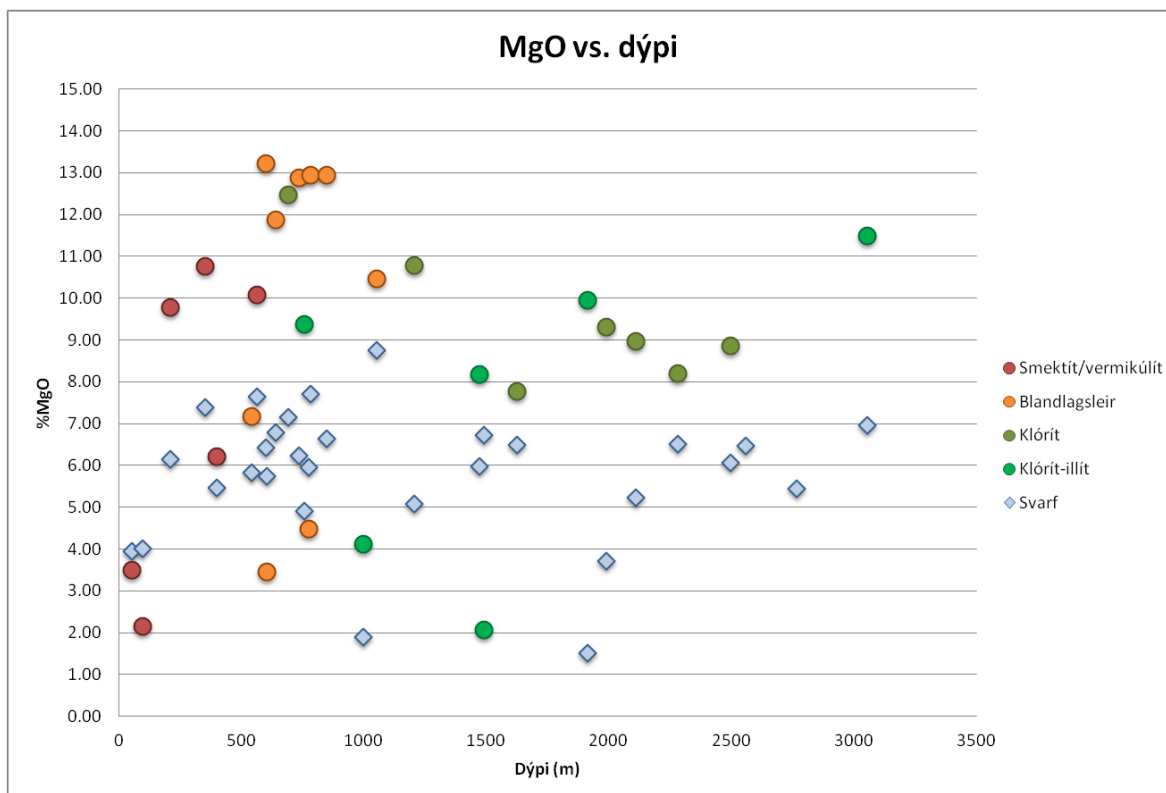
Sem fyrr segir eru vísbendingar um aukna staðgengni Al í kísilsæti við aukið dýpi og þar með hækkandi hita, m.a. hækkar hlutfall Al/Si frá kjarna að jaðri í klórít-kristöllum úr sandsteinslögum við Norður-Noreg þar sem hiti er um 120-180°C (*Jahren. J. S., 1991*).

Á mynd 3.14 er hlutfall Al/Si skoðað sem fall af dýpi. Almennt virðist hlutfall Al/Si fara hækkandi með dýpi, óháð kristalgerð leirsins, ef frá eru talin nokkur sýni innan blandlags-sviðsins þar sem þetta hlutfall er töluvert hærra.

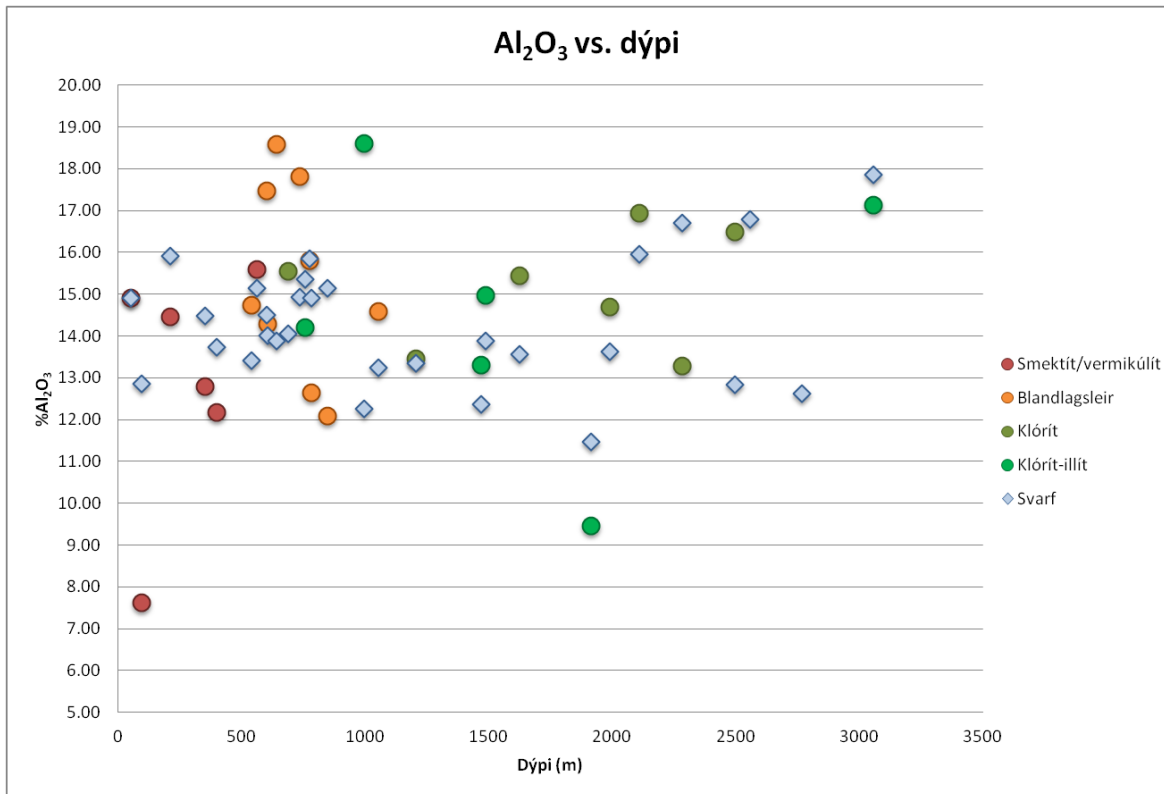
Innan klóríttsviðsins fer hlutfallið hækkandi með aukni dýpi sem bendir til þess að staðgengni áls í kísilsæti aukist með auknu dýpi og þ.a.l. hita. Frekari rannsóknir þarf til að spá frekar fyrir um þetta samband.



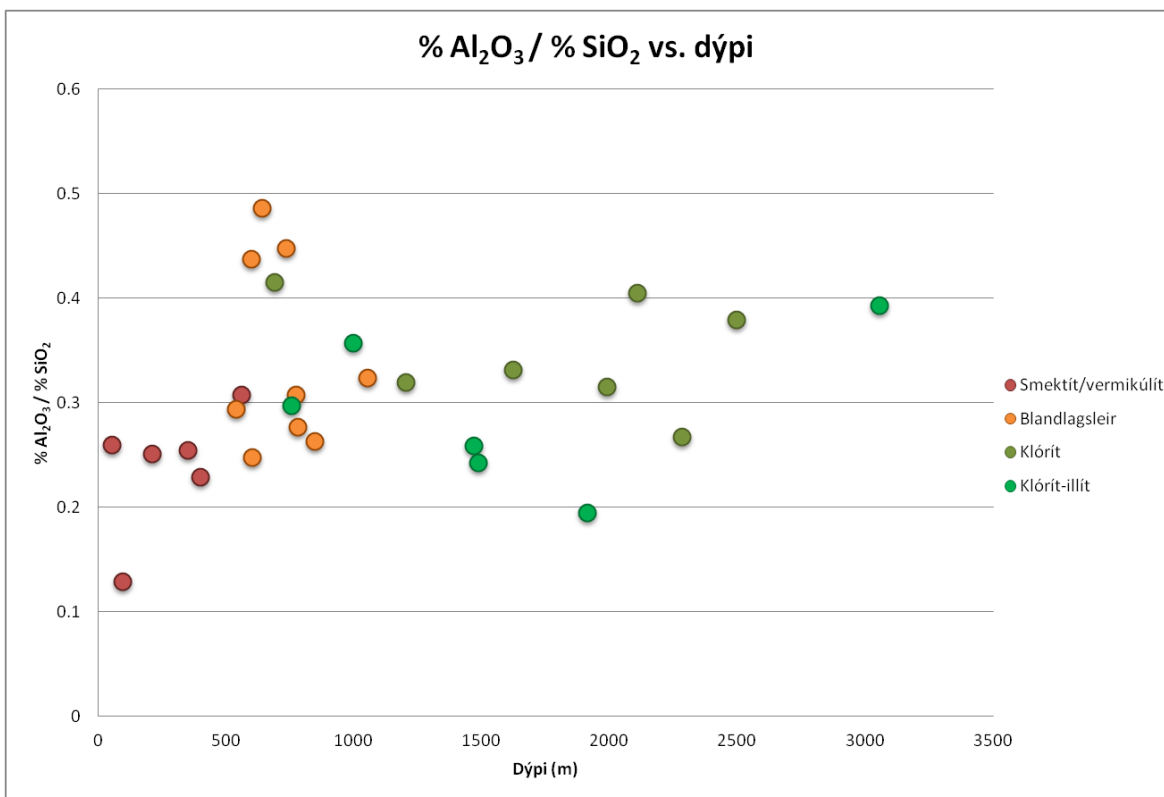
Mynd 3.11 Magn FeO í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.



Mynd 3.12 Magn MgO í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.



Mynd 3.13 Magn Al₂O₃ í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.



Mynd 3.14 Hlutfall Al₂O₃ og SiO₂ í berg- og leirsýnum ákvarðað með ICP-litrófsgreiningu.

3.4 Örgreiningar á leir

Í athugunum á kristalgerð og efnasamsetningu leirsteinda voru leirsteindir skilgreindar sem kornastærð, þ.e. korn minni en 2 μm í þvermál. Sýni voru útbúin með kornastærðargreiningu þar sem korn minni en 2 μm í þvermál voru aðskilin frá svarfsýnum.

Þó sýnin gefi vissulega ágæta heildarmynd af þeim leirsteindum sem er að finna eru sýnin nokkrum annmörkum háð. Efnagreiningar á sýnunum gefa aðeins heildarefnasamsetningu á öllum þeim leir sem kann að finnast í sýnunum, sem eins og fyrr segir, er tekið á a.m.k. tveggja metra dýptarbili. Sýnin geta því endurspeglad þann breytileika sem er að finna innan þess bils. Þá eru ekki öll korn minni en 2 μm í þvermál leir og algengt er að auk leirsteinda slæðist með steindir á borð við feldspöt, kalsít og zeólíta svo nokkrar séu nefndar.

Með því að framkvæma örgreiningar á leir er hægt að fá efnasamsetningu leirsins „in situ“, þ.e.a.s. á leirnum þar sem hann myndast í berginu. Örgreiningar á leir eru þó þeim annmörkum háðar að erfitt er að skyggja (pólara) leir svo vel sé. Því er erfitt að fá góðar örgreiningar á leir. Fjallað eru um framkvæmd örgreininganna í **viðauka j**.

Gerðar voru örgreiningar á fimm sýnum til að fá gleggri mynd af efnasamsetningu leirsteinda á Hellsheiði. Öll sýnin eru svarfsýni utan sýnis #01, þar sem heilt bergbrot var notað. Hvert sýni getur þannig endurspeglad leir á um tveggja metra dýptarbili.

Valin voru fimm sýni, eitt sýni af smektíti, tvö sýni úr blandlagsbeltinu og tvö klórí-illítsýni djúpt úr staflanum. Sýni voru m.a. valin með hliðsjón af sýnaundirbúningi fyrir ICP-greiningar, þ.e.a.s. leitast var við að velja sýni sem innihéldu mikinn leir.

Yfirlit yfir sýni sem valin voru fyrir örgreiningar, af hvaða dýptarbili þau eru tekin, úr hvers konar myndun og úr hvaða háhitaholu má sjá í töflu 3.6. Auk þess eru sýnin greind til kristalgerðar eftir niðurstöðum XRD-greininga á leirhluta þeirra (sjá kafla 3.2).

Tafla 3.6. Yfirlit yfir dýptarbil sem sýni eru tekin á, úr hvaða háhitaholu og úr hvers konar myndun. Einnig má sjá niðurstöður XRD-greininga á kristalgerð leirsteinda í leirhluta sýnanna.

#	Dýpi:	HE-#	XRD-greining:	Myndun:
1	3055 m	42	Klórít-illít	Innskot?
2	782 m	42	MLC, corrensite	Hraunlög
3	690 m	10	Klórí-illít	Móberg
4	640 m	46	MLC, corrensite	Hraunlög
5	210 m	46	Smektít	Hraunlög

Tafla 3.7. Niðurstöður örgreininga á leir.

Sýni:	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	SUM	Aths.	Sneið no.
Leir 210 m dýpi												
1200	35,37	0,21	16,16	14,65	0,05	12,01	3,73	0,07	0,03	82,28	Smektít	5
1179	35,89	0,11	20,39	18,89	0,09	7,36	2,65	0,19	0,02	85,59	Smektít	5
1180	36,94	0,19	20,50	18,50	0,10	6,22	3,06	0,21	0,03	85,75	Smektít	5
1203	40,69	0,00	23,09	16,94	0,21	7,01	2,40	0,31	0,05	90,70	Smektít	5
1205	33,31	0,05	24,16	16,48	0,21	5,59	2,17	0,49	0,13	82,57	Smektít	5
1183	33,86	0,13	24,16	14,95	0,06	13,66	2,31	0,35	0,02	89,49	Smektít	5
1206	37,66	0,01	24,38	16,50	0,14	7,94	2,38	0,39	0,04	89,44	Smektít	5
1187	30,17	0,00	25,23	14,56	0,29	9,65	2,34	0,39	0,19	82,81	Smektít	5
1215	37,75	0,00	27,37	14,19	-0,05	10,44	2,75	0,30	0,01	92,75	Smektít	5
1186	32,58	0,08	27,97	17,32	0,17	10,76	2,73	0,24	0,05	91,91	Smektít	5
Leir 640 m dýpi												
964	37,66	0,00	10,77	16,78	0,60	12,96	1,78	0,39	0,02	80,96	Corrensit	4
966	38,41	0,09	10,90	17,30	0,04	12,92	1,77	0,14	0,03	81,59	Corrensit	4
968	36,51	0,06	10,90	16,37	0,61	13,78	1,64	0,24	0,00	80,11	Corrensit	4
962	36,82	0,00	10,96	17,18	0,35	12,58	1,96	0,33	0,03	80,21	Corrensit	4
974	37,02	0,01	11,30	16,23	0,07	13,23	2,20	0,08	0,03	80,17	Corrensit	4
963	37,64	0,11	11,46	15,35	0,29	12,63	2,21	0,47	0,04	80,20	Corrensit	4
973	37,61	0,12	11,68	15,53	0,33	13,29	2,17	0,33	0,05	81,11	Corrensit	4
969	35,64	0,00	12,16	17,53	0,46	13,62	1,55	0,19	0,04	81,21	Corrensit	4
1021	37,93	0,00	12,46	15,53	1,84	10,12	1,94	0,51	0,07	80,40	Corrensit	4
1017	39,75	0,03	12,79	15,29	0,10	9,78	2,32	0,16	0,04	80,27	Corrensit	4
967	38,72	0,04	13,20	16,44	0,00	12,48	2,67	0,58	0,00	84,14	Corrensit	4
1032	37,75	0,00	13,45	17,49	0,28	11,03	2,16	0,43	0,00	82,59	Corrensit	4
1064	37,30	0,12	14,04	14,79	0,40	11,26	2,55	0,36	0,12	80,93	Corrensit	4
1063	37,87	0,15	14,65	14,42	0,18	11,56	2,16	0,31	0,00	81,30	Corrensit	4
1033	39,94	0,00	14,88	18,07	0,51	10,50	1,73	0,53	0,02	86,17	Corrensit	4
Leir 690 m dýpi												
848	20,09	0,08	16,20	14,66	3,28	17,55	0,90	0,11	4,70	77,56	Klórít-illít	3
790	21,15	0,43	15,76	15,75	0,30	17,39	0,69	0,01	4,50	75,98	Klórít-illít	3
775	19,84	0,09	13,12	15,31	12,34	15,47	0,74	-0,07	3,81	80,66	Klórít-illít	3
823	23,94	0,00	15,92	15,94	10,09	18,32	0,98	0,08	2,84	88,12	Klórít-illít	3
847	21,38	0,17	15,19	15,48	15,54	17,05	0,75	0,08	2,79	88,43	Klórít-illít	3
789	25,25	0,00	16,98	16,29	1,90	18,98	0,90	0,08	1,64	82,02	Klórít-illít	3
787	24,24	0,00	15,93	14,43	4,81	20,90	0,91	0,10	1,44	82,75	Klórít-illít	3
849	18,54	0,14	15,79	14,83	13,40	16,89	0,89	0,00	0,00	80,47	klórít	3
696	29,08	0,00	24,23	17,06	2,42	9,48	0,70	0,11	0,00	83,08	klórít	3
709	28,25	0,00	26,60	16,42	0,84	10,61	0,53	0,14	0,00	83,40	klórít	3
710	26,81	0,05	27,44	16,15	0,55	10,68	0,44	0,12	0,00	82,23	klórít	3
712	26,41	0,07	27,95	15,60	0,20	10,12	0,45	0,12	0,00	80,91	klórít	3
Leir 782 m dýpi												
373	32,86	0,34	7,81	13,31	0,11	15,71	0,20	0,30	5,11	75,75	Klórít-illít	2
377	34,63	0,45	6,31	12,98	0,05	15,50	0,24	0,27	5,32	75,77	Klórít-illít	2
374	33,43	0,49	8,00	12,72	0,20	15,08	0,28	0,63	5,68	76,50	Klórít-illít	2
592	37,37	0,30	18,06	17,95	0,59	15,75	0,58	0,55	0,00	91,13	Corrensit	2
546	33,36	0,31	18,24	15,59	0,73	8,42	0,50	0,15	0,04	77,33	Corrensit	2
586	34,82	0,87	18,71	14,91	0,27	14,39	0,61	0,13	0,00	84,71	Corrensit	2
578	32,26	0,21	19,80	15,50	0,18	11,12	0,39	0,13	0,00	79,59	Corrensit	2
569	35,40	0,32	19,92	17,29	0,40	12,75	0,52	0,35	0,05	87,02	Corrensit	2
568	36,36	0,14	20,43	18,28	0,61	13,05	0,70	0,18	0,03	89,78	Corrensit	2
570	36,51	0,50	20,55	17,82	0,19	13,47	0,53	0,22	0,00	89,79	Corrensit	2
584	30,19	0,96	20,86	17,63	0,51	11,71	1,06	0,13	0,00	83,04	Corrensit	2
579	36,34	0,21	21,08	18,64	0,37	12,63	0,50	0,44	0,05	90,26	Corrensit	2
564	35,93	0,21	21,15	17,40	0,12	14,71	0,45	0,25	0,01	90,24	Corrensit	2
565	35,83	0,27	21,53	16,59	0,40	15,48	0,58	0,26	0,00	90,94	Corrensit	2
577	32,47	0,13	21,80	16,49	0,19	13,24	0,58	0,18	0,00	85,07	Corrensit	2
582	33,74	0,25	21,83	17,06	0,70	13,51	0,71	0,34	0,01	88,16	Corrensit	2
567	36,10	0,36	21,87	18,01	0,46	13,48	0,66	0,23	0,02	91,19	Corrensit	2
581	34,89	0,24	21,92	18,81	0,25	13,08	0,41	0,29	0,00	89,87	Corrensit	2
566	34,46	0,15	22,06	16,21	0,09	14,47	0,50	0,26	0,01	88,20	Corrensit	2
589	35,88	0,81	22,33	17,07	0,13	14,76	0,59	0,13	0,04	91,75	Corrensit	2
574	36,92	0,37	22,82	16,26	0,08	15,73	0,50	0,25	0,00	92,93	Corrensit	2
576	36,23	0,32	23,39	15,85	0,25	14,59	0,49	0,23	0,00	91,35	Corrensit	2
588	35,02	0,31	25,82	15,86	0,53	13,90	0,59	0,17	0,03	92,23	Corrensit	2
Leir 3055 m dýpi												
1413	30,93	0,23	13,01	15,78	0,14	13,42	0,19	0,02	1,74	75,46	Klórít-illít	1
1432	29,00	0,28	13,86	15,62	0,27	14,31	0,28	0,05	1,86	75,52	Klórít-illít	1
1433	30,00	0,33	13,80	14,94	0,21	13,60	0,15	0,02	2,41	75,46	Klórít-illít	1
1415	34,27	0,47	10,16	14,64	0,35	11,62	1,06	0,17	3,58	76,31	Klórít-illít	1
84	38,02	0,69	9,93	12,63	-0,01	9,06	0,23	0,19	5,06	75,79	Klórít-illít	1

Sýnin sem greind voru í örgreini eru mjög mismikið ummynduð. Samkvæmt örgreiningu innihalda grynstu sýnin, auk leirsteinda, ferskar bergsteindir í meira mæli en þau dýpri, en frumsteindirnar pýroxen og plagióklas finnast í öllum sýnum. Ferskur ólivín er aftur á móti ekki til staðar. Öll sýnin innihalda auk þess kalsít, kvars og súlfíð. Sýni 1, 2 og 3 innihalda að auki sphene, albít, K-feldspat, títanomaghemít, wollastonít og epidót.

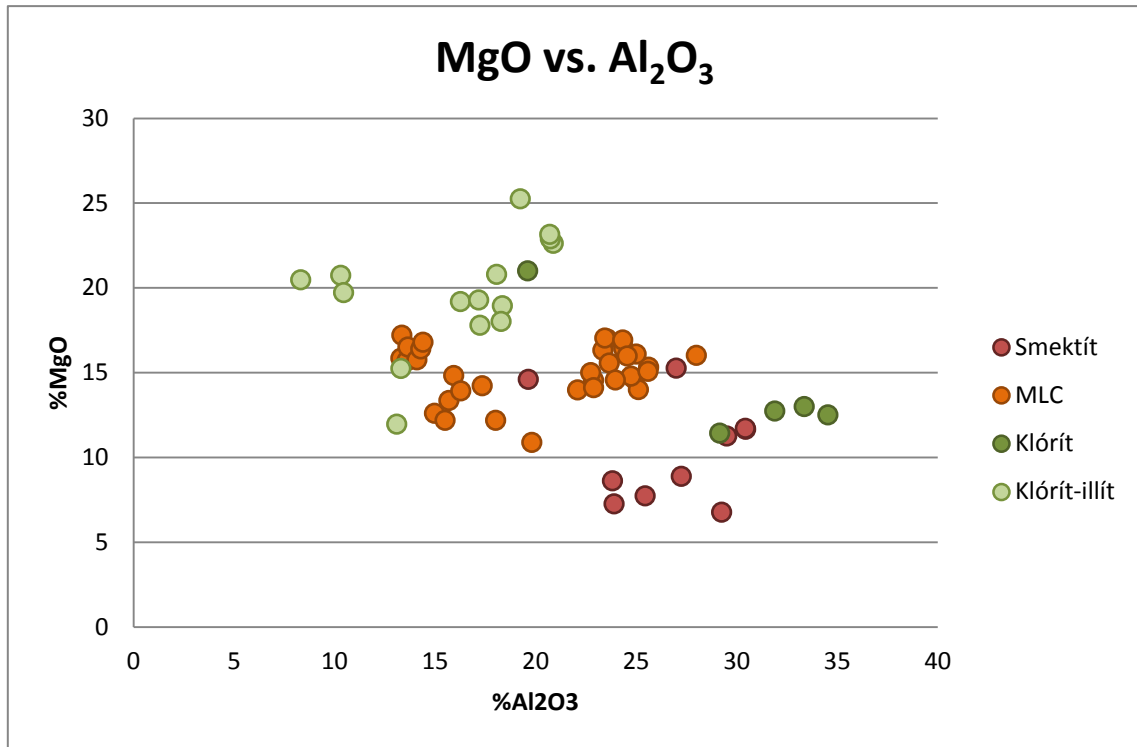
Grynstu sýnin, sýni 4 og 5, innihalda einsleitar leirsteindir, corrensít í sýni 4 og smektít í sýni 5. Sýni 3 inniheldur klórít-illít og corrensít en sýni 1 inniheldur einungis klórít-illít. Sýni 2 inniheldur bæði klórít og klórít-illít.

Þessar niðurstöður eru áhugaverðar að því leyti að þær sýna fram á að leirsteindir í einu sýni geta verið af mismunandi kristalgerð (mynd 3.15). Þetta sést glögglega bæði í svarfsýnum og ekki síst í þunnsneið. Það sem veldur í þessu tilviki er vafalítið tilvist þróaðs K-ríks bergs sem eykur líkurnar á myndun illíts. Eins og fyrir segir er lítill munur á smektíti og illíti annar en K-jónin í illítinu, en illít myndar blandleir með klóríti á sama hátt og smektít og vermikúlít. Langflest illít-sýni innihalda auk þess smektít- eða klórítlög (*Deer o.fl., 1992*).

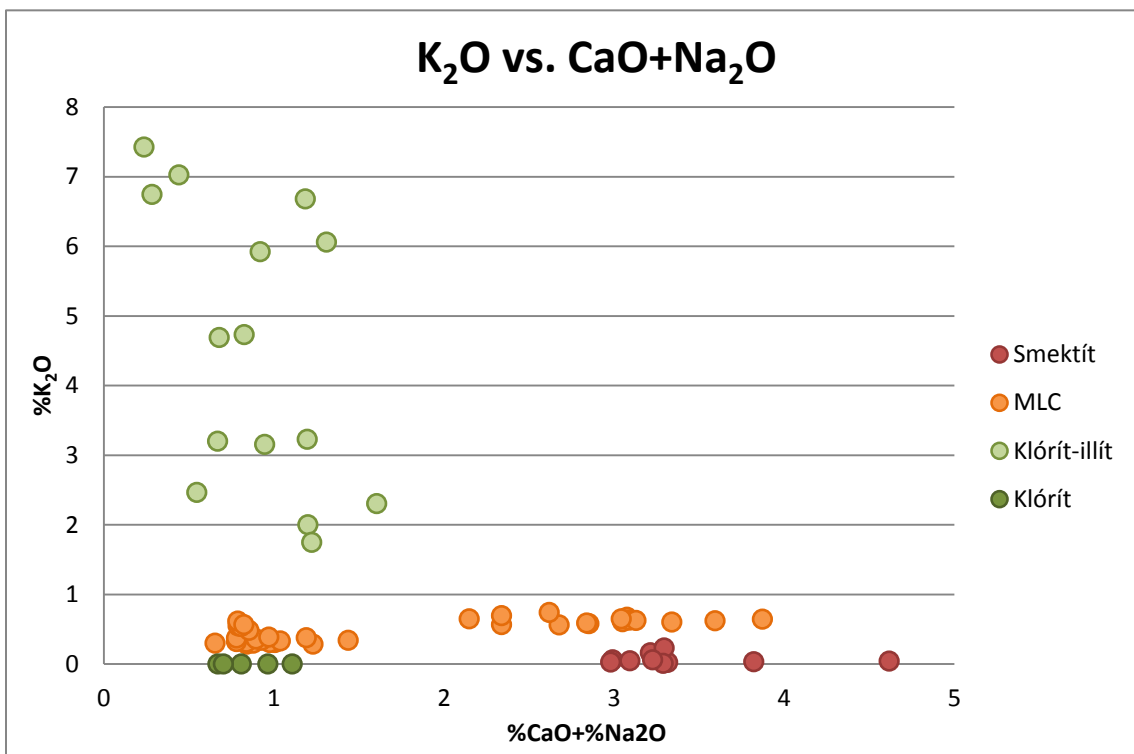
K-innihald illíts getur verið mjög breytilegt enda geta bæði Ca og Na staðgengið fyrir K (*Deer o.fl., 1992*). Þetta kemur greinilega fram í klórít-illít blandleirnum eins og mynd 3.16 gefur til kynna. Efnagreining á svarfsýnunum (tafla 3.4) bendir hinsvegar ekki til þess að mikið K sé í berginu. Rennir það stöðum undir það að K í leirnum sé komið annars staðar að og leirsteindirnar endurspegli því myndunarumhverfi sitt fremur en það berg sem þær myndast í og þ.a.l. jarðhitavökvann.

Athyglisvert er að Mn safnast í klórít-illít í sýni #3. Þetta sést glögglega á mynd 3.17. Það gæti bent til þess að Mn-ríkur Fe-ólivín úr súru bergi hafi brotnað niður í myndunarumhverfi leirsins. Á sömu mynd sést einnig munur milli klóríts og smektíts í CaO+Na₂O-magni, en hann skýrist aðallega af því að smektítið er Ca ríkara en klórítið. Of fáar greiningar eru þó af leirsteindum með mismunandi kristalgerð til þess að hægt sé að bera saman mismunandi hlutföll aðalefna.

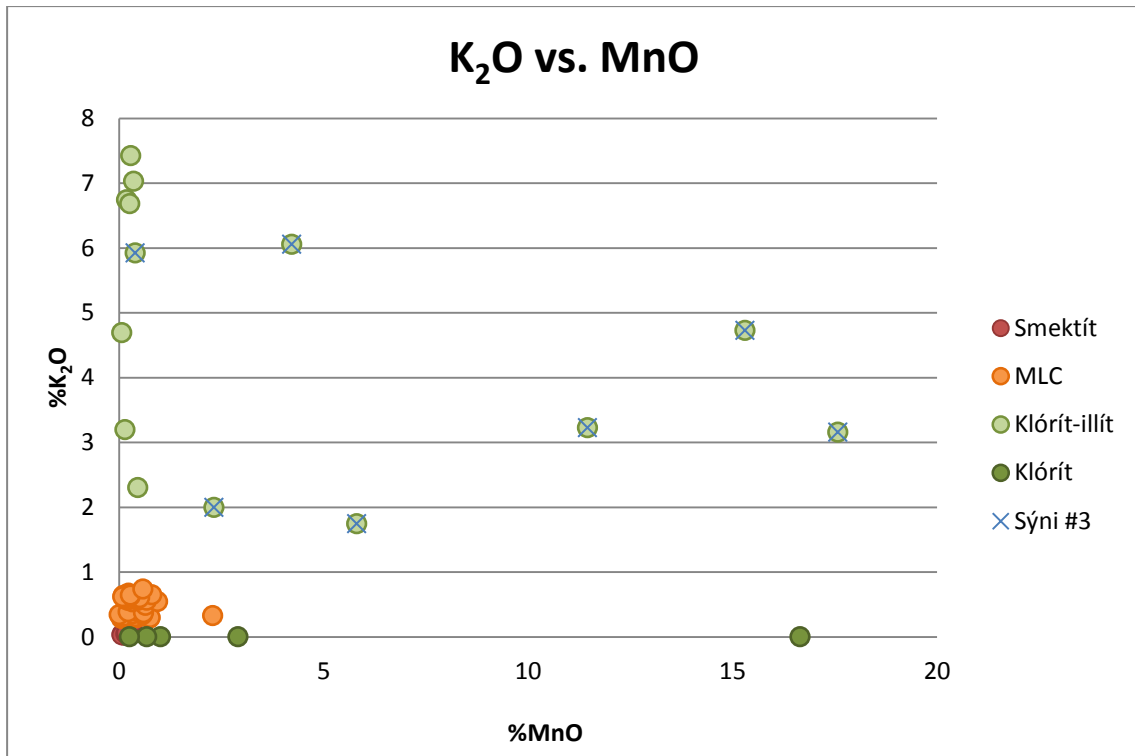
Á mynd 3.18 sést þó nokkuð glögglega að Fe-magn er svipað í öllum sýnum. Einnig benda niðurstöður til þess að magn Si fer minnkandi í átt að klórít-sviðinu, líkt og ICP-OES greiningar gáfu til kynna. Magn Al virðist að sama skapi aukast, eins og ICP-OES greiningar gáfu til kynna, ef frá eru taldar klórítgreiningar (mynd 3.15). Frekari gögn þarf til að spá betur fyrir um þetta samband.



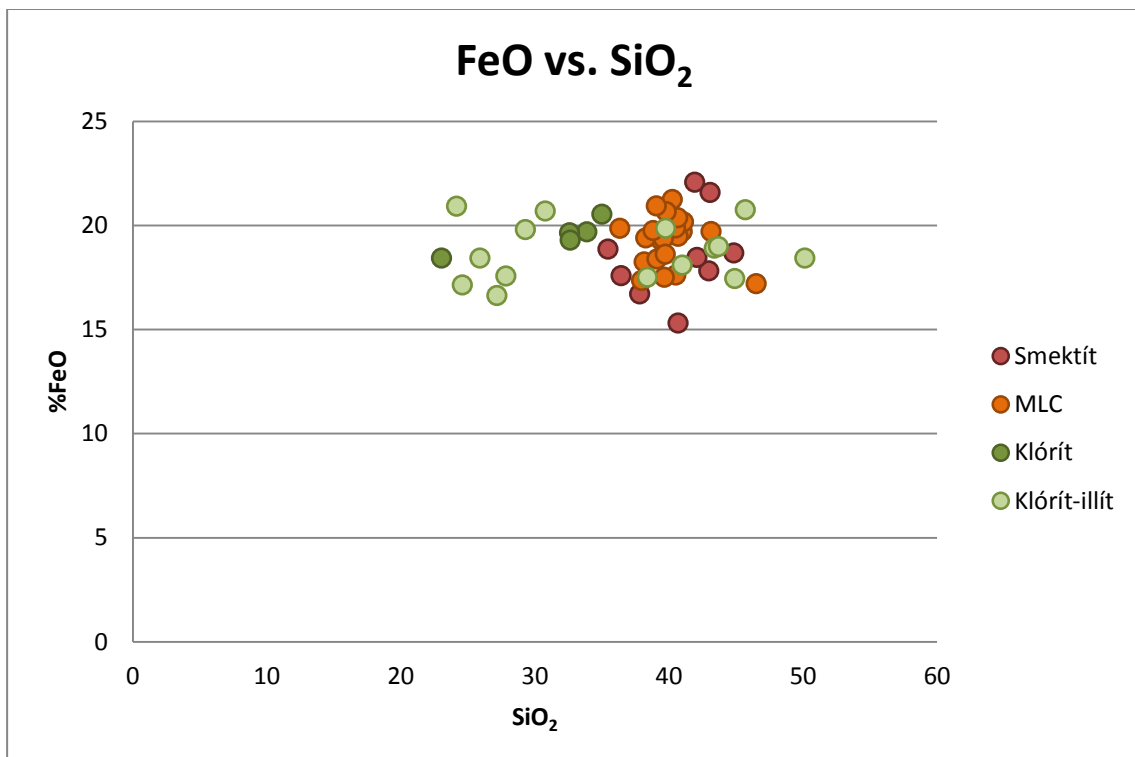
Mynd 3.15 Hlutfall MgO og Al₂O₃ í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð er táknud með mismunandi litum.



Mynd 3.16 Hlutfall K₂O og CaO+Na₂O í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð er táknud með mismunandi litum.



Mynd 3.17 Hlutfall K₂O og MnO í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð er táknud með mismunandi litum. Sýni #3 sem inniheldur Mn-ríkt illít er merkt með X-um.



Mynd 3.18 Hlutfall FeO og SiO₂ í leirsteindum. Mismunandi kristalgerð táknud með mismunandi litum.

3.5 Samantekt

- Valin voru 30 sýni úr átta háhitaholum á Helligheiði sem talin eru endurspegla bergfræðilegt umhverfi Hengils. Sýnin eru úr móbergi, hraunlögum, grunnum göngum, innskotum og þróuðu bergi.
- Gerðar voru XRD-greiningar á leirsýnunum. Smektít og vermikúlít voru greind niður á tæplega 600 m dýpi. Blandlagsleir var greindur frá 500-1100 m og voru þrjár gerðir blandlagsleirs greindar; low charge corrensít, high charge corrensít og smektít/vermikúlít:klórít með óreglulega uppröðun (*e. randomly stratified*). Á um 700 m var nánast hreint klórít fyrst greint og neðan 1200 m voru öll sýnin ýmist klórít eða klórít-illít.
- Það sem einkum einkennir leirhluta svarfsins er vötnun og oxun en báðir þessir þættir eru megineinkenni jarðhitaummyndunar. Niðurstöður benda til þess að magn þrígilds járn í leirhlutanum aukist mjög með dýpi. Á sama dýptarbili lækkar vatnsmagn leirhlutans verulega, sem rekja má til lægra vatnsinnihalds klóríts í samanburði við smektít/vermikúlít og blandlagsleir. Gæti þessi þróun átt þátt í að skýra þær viðnámsbreytingar sem einkenna íslensk háhitakerfi, þar sem lágviðnámskápa umlykur háviðnámskjarna dýpra í kerfinu.
- Ekki virðist algjört samræmi milli K-innihalds heildarsýnisins og leirhlutans og er illít t.a.m. greint í ólivín-þóleiíti. Þetta bendir til þess að K í leirnum sé ekki komið úr grannberginu, heldur aðflutt með jarðhitavökvanum.
- Það er tæplega hægt að greina marktækan samsetningarmun í aðalefnum leirsteinda innan leirhlutans. Þó virðist vera að hlutfall kísils fari lækkandi með auknu dýpi meðan hlutfall járn, magnesíum og áls fer vaxandi. Almennt virðist engin fylgni vera milli hlutfalls aðalefna leirsteindanna í leirhlutanum og grannbergi þess.
- Innan klórítviðsins fer Si/Al hlutfallið hækkandi með aukni dýpi sem bendir til þess að staðgengni áls í kísilsæti aukist með auknum dýpi og þ.a.l. hita. Frekari rannsóknir þarf til að spá fyrir um þetta samband.
- Niðurstöður örgreininga sýna fram á að leirsteindir í einu sýni geta verið af mismunandi kristalgerð. Það sem veldur í þessu tilviki er að öllum líkindum tilvist K-ríks bergs sem eykur líkurnar á myndun illíts, en illít myndar blandleir með klóríti á sama hátt og smektít og vermikúlít.

4 Umræða

Jarðfræði vesturjaðars sigdældar Hengils einkennist af móbergi, hraunlögum sem runnið hafa af hálendri stöðum á láglandri og innskotum, ýmist basaltinnskotum eða innskotum af þróaðri samsetningu. Þau síðastnefndu virðast vera nokkuð algengari en almennt á Hellisheiðinni (*t.d. Gunnar Gunnarsson og Bjarni Reykr Kristjánsson, 2003*) og gæti það tengst nálægð svæðisins við Hengil og Sleggju, en Sleggja er eini fundarstaður þróaðs bergs á yfirborði á Hellisheiði.

Innskot eru áberandi í holum HE-31, HE-33 og HE-46 neðan um 700 m u.s., en eru þó aðeins ríkjandi í jarðlagastaflanum í HE-46 neðan 1600 m, en það er eina af holunum sem nær svo djúpt. Ólivín-þóleiít er algengasta bergtegundin en auk þess er þóleiít nokkuð áberandi.

Nokkuð ítarlega hefur verið fjallað um ummyndun innan jarðlagastaflans í þessari ritgerð. Sú rannsókn á kristalgerð og efnasamsetningu leirsteinda í sýnunum sem greind voru í seinni hluta þessa verkefnis (kafla 3) leiðir í ljós megindrætti í ummyndunarferlunum sem reifuð eru í kafla 2, þ.e.a.s. vötnun frumsteinda og glers ásamt oxun járn.

Fyrstu merki ummyndunar er kaldavatnsummyndun; límónít og karbónathnúðar sem falla út í köldu grunnvatnskerfi. Komið er í lághituummyndun á um 100-300 m dýpi þegar ummyndun hefst á gleri og ólivíni. Ummyndunin einkennist af vötnun og eru helstu ummyndunarsteindir zeólítar, sem innihalda umtalsvert magn af vatni, og vatnsríkar leirsteindir á borð við smektít og vermikúlít. Það kemur glögg fram í þessu verkefni að vatnsinnihald ummyndunarsteindanna nær hámarki í smektít-zeólítabeltinu, eins og glæðing á leirhluta sýnanna gefur til kynna, og minnkar síðan niður á við.

Komið er í blandlagsbeltið á um 400-550 m dýpi og er þá gler og ólivín í staflanum nánast að fullu ummyndað og ummyndun plagíóklasa í kalsít og leir hafin. Helstu ummyndunarsteindirnar eru auk blandlagsleirs kvars og e.t.v. háhitazeólítar á borð við laumontít og wairakít. Vatnsinnihald lækkar umtalsvert eftir því sem neðar kemur í beltinu og hlutur klóríts eykst, enda smektít og blandlagsleir vatnsríkustu ummyndunarsteindirnar og ljóst að niðurbrot þeirra við hækkandi hita losar um vatn.

Að sama skapi eykst hlutfall Fe(III) hratt eftir því sem neðar dregur í staflann og hiti hækkar. Ummyndunarsteindir einkennast þá æ meir af Fe(III) en dæmi um slík ferli er oxun títánómagnetíts í títánómaghemít (*Sigurður Steinþórsson & Árný E.*

Sveinbjörnsdóttir, 1981) og loks myndun sphene. Sphene-myndun hefst um eða neðan við miðbik blandlagsbeltisins.

Þegar komið er í klórít-epidótbeltið eru Fe(III)-steindir á borð við epidót áberandi, auk klóríts þegar albítisering á plagíóklösum hefst og losar um Al og Ca. Albít er fyrst greint á mörkum blandlags- og klórít-epidót-beltisins.

Þessar niðurstöður benda því til að hluti ummyndunarferlanna á mörkum blandlags- og klórítbeltanna sé nokkur afvötnun bergstaflans, en leiða má líkum að því að afvötnun við myndun klóríts á kostnað vatnsríks smektíts í blandlagsleirnum viðhaldi óbundnu vatni í kerfinu. Orsökina er að klórít tekur upp minna vatn en smektít og þótt myndun annarra vatnaðra steinda á borð við epidót með 1-2% H₂O aukist með vaxandi dýpi fer því fjarri að þær steindir taki upp allt það vatn sem blandlagsleirinn inniheldur umfram klórít.

Ekki er óhugsandi að þetta sé þáttur í þeim viðnámsbreytingum sem einkenna háhitakerfi á Íslandi, þar sem lágviðnámskápa umlykur háviðnámskjarna dýpra í kerfinu (*t.d. Knútur Árnason, 2010*). Orsök lágviðnámskápunnar gæti þá tengst lausbundnu vatni á mörkum blandlags- og klórítbeltanna, en viðnám er almennt lægra í vatni en bergi.

Ekki er greinanlegur munur á kristalgerð eða efnasamsetningu leirsteinda úr gangbergi, hraunlögum eða móbergi. Þetta bendir eindregið til að ekki sé eðlismunur á myndun leirsteinda úr fersku bergi og myndun leirsteinda úr öðrum ummyndunarsteindum svo sem myndum klóríts úr smektíti. Þótt ætla mætti að leirsteindir, sem myndast í gangbergi á miklu dýpi, væru einsleitari en leirsteindir staflans virðist svo ekki vera.

Þá virðist ekki vera beint samband milli efnasamsetningar leirsins og grannbergsins. Þetta sést kannski gleggst þar sem illít kemur við sögu, en ekki virðist vera samband milli K-innihald grannbergsins og myndun illíts. Þetta bendir til þess að K í leirnum sé ekki komið úr grannberginu, heldur sé það aðflutt með jarðhitavökvanum.

Leirsteindir virðast því frekar endurspegla efnasamsetningu myndunarumhverfisins og efnaflutningi jarðhitavökvans fremur en efnasamsetningu grannbergsins sem leirsteindirnar myndast í.

Þetta er í er í samræmi við niðurstöður Daniels Larsson (*2002*) í rannsókn hans á myndun albíts og K-feldspats í holu KhG-1 við Kolviðarhól. Þær bentu til þess að myndun albíts og K-feldspats tengdust efnaflutningi jarðhitavökvans fremur en efnasamsetningu grannbergsins.

Heimildir

Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Einar Gunnlaugsson, Guðjón Guðmundsson, Hjálmar Eysteinnsson, Ómar Sigurðsson, 1993: *Kolviðarhóll, hola KhG-1: Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Lokaskýrsla.* Reykjavík: Orkustofnun OS-93007/JHD-03

Benedikt Steingrímsson & Valgarður Stefánsson, 1990: *Geothermal logging: An introduction to techniques and interpretation.* Reykjavík: Orkustofnun OS-80017/HD-09

Bjarni Reyr Kristjánsson, Sigvaldi Thordarson, Ívar Örn Benediktsson, Ómar Sigurðsson, Þorsteinn Egilson, Áspór Sigurðsson, 2003: *Hellisheiði - hola HE-8 : 2. áfangi : borun fyrir 9 5/8" vinnslufóðringu í 932 m dýpi.* Reykjavík. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR 2003/006

Bjarni Reyr Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson, Bjarni Richter, Peter E. Danielsen, Kjartan Birgisson, 2003: *Hellisheiði – hola HE-8: 1. áfangi: Borun fyrir 13 3/8" öryggisfóðringu í 400 m dýpi.* Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR 2003/005

Björn S. Harðarson, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Svanbjörg H. Haraldsdóttir, Hjalti Steinn Gunnarsson, 2010: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-49: Forborun, 1. og 2. áfangi: Borun fyrir yfirborðsfóðringu í 98 m, öryggisfóðringu í 273 m og vinnslufóðringu í 802 m dýpi.* Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR 2010/101

Brindley G. W. & Brown G, 1980: *Crystal structures of Clay minerals and their X-Ray Identification,* Mineralogical Society Monograph no. 5, 495 bls.

Christa Feucht, Sigurlaug María Hreinsdóttir og Hörður Tryggvason, 2010: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-44: 3. áfangi. Borun fyrir 9 5/8" leiðara frá 837 m í 2606 m dýpi.* Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR-2010/099

Christa Feucht, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Svanbjörg Helga Haraldsdóttir, Hörður Tryggvason, 2010: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-33: 3. áfangi: Borun 8 1/2" vinnsluhluta 835 m í 2325 m dýpi fyrir 7" leiðara.* Reykjavík: Íslenskar Orkurannsóknir. ÍSOR 2010/097

Christa Feucht, Theódóra Matthíasdóttir, Svanbjörg H. Haraldsdóttir, 2008: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-33: Forborun, 1. og 2. áfangi: Borun fyrir yfirborðsfóðringu í 101 m, öryggisfóðringu í 322 m og vinnslufóðringu í 420 og 835 m dýpi.* Reykjavík. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2008/045

Deer W.A., Howie R.A., Zussman, J., 1992: *An introduction to the rock forming minerals.* 2nd edition. England. 696 bls.

Dennis K. Bird, Craig E. Manning, Nicholas M. Rose, 1988: *Hydrothermal alteration of Tertiary layered gabbros, East Greenland.* American Journal of Science, Vol. 288, May 1988, bls. 405-457

- Exley, R. A., 1982: *Electron Microprobe studies of Iceland research Drilling Project High-Temperature Hydrothermal Alteration*. J. Geophys. Res, vol 87, no. B8, bls. 6547-6557
- Foulger, G.R. & Toomey, D.R., 1989: *Structure and evolution of the Hengill-Grensdalur volcanic complex, Iceland: Geology, geophysics, and seismic tomography*. J. of Geophys. Res., 94, bls. 17511-17522.
- Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1983: *Mineralogical evolution of a hydrothermal system*. Geothermal Resources Council Trans. 7, bls. 147-152
- Guðni Karl Rosenkjær, 2011: *EM methods in Geothermal Exploration: 1D and 3D inversion for a synthetic geothermal area and the Hengill geothermal area, SW-Iceland*. Meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 137 bls.
- Gunnar Böðvarsson, 1951: *Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði og nágrenni, árin 1947-1949. Seinni hluti*. Tímarit Verkfræðingafélags Íslands, 16: bls. 188-200
- Gunnar Gunnarsson & Bjarni Reyr Kristjánsson, 2003: *Mat á innskotabéttleika í neðri hluta holna HE-3 til HE-7 á Hellisheiði*. Reykjavík: Orkustofnun, OS-2003-022
- Helga Margrét Helgadóttir, 2011: *Berggrunnur og jarðhitaummyndun Gráuhnúkakerfis á sunnanverðu Hengilssvæði*. Meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 185 bls.
- Helga Margrét Helgadóttir, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Steinþór Níelsson, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Theódóra Matthíasdóttir, Björn S. Harðarson, Gunnlaugur M. Einarsson og Hjalti Franzson, 2010: *Geology and Hydrothermal Alteration in the Reservoir of the Hellisheiði High Temperature System, SW-Iceland*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. 10 bls.
- Helga Margrét Helgadóttir, Björn S. Harðarson, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, Sigurður Sveinn Jónsson, Svanbjörg H. Haraldsdóttir, Páll Jónsson, 2009: *Skarðsmýrarfjall - hola HE-49 :3. áfangi: Borun vinnsluhluta frá 800 m í 1454 m dýpi og fódrun með 7" leiðara*. Reykjavík. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2009/032
- Helga Margrét Helgadóttir, Steinþór Níelsson, Sigurður Sveinn Jónsson, Svanbjörg Helga Haraldsdóttir og Bjarni Kristinsson, 2007: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-31: Forborun, 1. og 2. áfangi: Borun fyrir 22 ½“ yfirborðsfóðringu í 92 m, 18 5/8“ öryggisfóðringu í 301 m og 13 3/8“ vinnslufóðringu í 727 m*. Reykjavík. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2007/036
- Hjalti Franzson, Knútur Árnason, Kristján Sæmundsson, Benedikt Steingrímsson, Björn S. Harðarson, Einar Gunnlaugsson, 2010: *The Hengill geothermal system, conceptual geological model*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. 9 bls.
- Hjalti Franzson, Bjarni Reyr Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson, Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, Benedikt Steingrímsson, Einar Gunnlaugsson, Gestur Gíslason, 2005: *The Hengill-Hellisheiði Geothermal Field. Development of a Conceptual Geothermal Model*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey 24-29. April 7 bls.

Hjalti Franzson , 2004: *The high-temperature geothermal system in Reykjanes. Geology and geothermal model.* Iceland GeoSurvey, ÍSOR-2004/012. Prepared for Suðurnes Regional Heating

Hjalti Franzson, 1998: *Reservoir Geology of the Nesjavellir High-Temperature Field in SW-Iceland.* Proceedings 19th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference, Manila, Philippines, March 5-6th 1998: bls. 13-20

Hjalti Franzson 1995: *Geological aspects of Svartsengi high-T field, Reykjanes Peninsula, Iceland.* Proc. of the 8th International Symposium on Water Rock Interaction Vladivostok, Russia, 15-19 August, bls. 671-674

Hjalti Franzson, 1994: *Nesjavellir: Þættir af ummyndun í jarðhitakerfi.* Reykjavík: Orkustofnun OS-94021/JHD-06

Hjalti Franzson, 1988: *Nesjavellir: Vatnsgegnð í jarðhitageymi.* Reykjavík: Orkustofnun OS-88046/JHD-09

Hjalti Franzson, 1987: *The Eldvörp High-Temperature Area, SW-Iceland. Geothermal Geology of the First Exploration Well.* In: Proceedings of the 9th New Zealand Geothermal Workshop, bls. 179-185

Hrefna Kristmannsdóttir, 1982: *Secondary Mineralization and Hydrothermal Alteration in the Reydarfjordur Drill Core, East Iceland.* Journal of Geophysical Research vol 87, no. B8, bls. 6525-6531

Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: *Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C.* International Clay Conference, 1978. Developments in sedimentology (27): bls. 259-267

Hrefna Kristmannsdóttir & Jens Tómasson, 1978: *Zeolite zones in geothermal areas in Iceland.* Natural Zeolites, Pergamon Press, Oxford and New York 1978, bls 277-284

Hrefna Kristmannsdóttir, 1976: *Types of Clay Minerals in Hydrothermally Altered Basaltic Rocks, Reykjanes, Iceland.* Jökull 26. ár: bls. 30-39

Hrefna Kristmannsdóttir & Jens Tómasson, 1976: *Nesjavellir – Hydrothermal alteration in a high-temperature area.* Proceedings International Symposium on Water-Rock Interaction: bls. 170-177

Hrefna Kristmannsdóttir 1975: *Clay minerals formed by hydrothermal alteration in Icelandic geothermal fields.* GFF, The transactions of the Geological Society Sweden. 97, bls. 289-292

Hulen J.B. & Sibbet B.S, 1981: *Interpretation of drill cuttings from geothermal wells.* Utah. Prepared for the department of energy, division of geothermal energy.

Jahren J.S., 1991: *Evidence of ostwald ripening related to recrystallization of diagenetic chlorites from reservoir rocks offshore norway.* Clay minerals, 26; bls. 169-178

Junfeng Ji & Patrick R. L. Browne, 2000: *Relationship between Illite crystallinity and temperature in active Geothermal systems of New Zealand*. Clays and Clay Minerals, Vol. 48, No. 1, bls. 139-144.

Knútur Árnason, Hjálmar Eysteinnsson og Gylfi Páll Hersir, 2010: *Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland*. Geothermics, 39 (1): bls. 13-34

Krauskopf K. B. & Bird D. K. 1995: *Introduction to Geochemistry, 3. útgáfa*. McGraw-Hill, 637 bls.

Kristján Sæmundsson, í útgáfu: *Freysteinn Sigmundsson, o.fl. (ritstj.), Náttúruvá á Íslandi – eldgosavá. Handrit til útgáfu*.

Kristján Sæmundsson, 2002: *Jarðfræði Þingvallavatns og vatnasvið þess. Þingvallavatn – Undraheimur í mótun*. Reykjavík, Mál og menning, bls. 40-63

Kristján Sæmundsson & Einar Gunnlaugsson, 2002: *Íslenska steinbókin*. Reykjavík, Mál og menning, 230 bls.

Kristján Sæmundsson, 1995: *Hengill jarðfræðikort (berggrunnur) 1:50 000*. Orkustofnun, Hitaveita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands

Mesfin, K.G, 2010: *Subsurface geology, hydrothermal alteration and geothermal model of Northern Skarðsmýrarfjall, Hellisheiði geothermal field, SW Iceland*. Meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 116 bls.

Mehegan, J.M., Robinson, P.T., Delaney, J.R, 1982: *Secondary Mineralization and Hydrothermal Alteration in the Reydarfjörður Drill Core, Eastern Iceland*. Journal of Geophysical Research, vol 87, no. B8, bls. 6511-6524

Moore, D. M. & Reynolds, R. C. Jr., 1997: *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford, Oxford University Press, 378 bls.

Larsson, D., Grönvold, K., Óskarsson, N. and Gunnlaugsson, E., 2002: *Hydrothermal alteration of plagioclase and growth of secondary feldspar in the Hengill Volcanic Centre, SW Iceland*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114: bls. 275-290

Lonker, S.W., Franzson H., Kristmannsdóttir, H. 1993: *Mineral-fluid interactions in the Reykjanes and Svartsengi geothermal systems, Iceland*. American Journal of Science, vol 293: bls. 605-670

Poppe, L.J., Paskevich, V. F., Hathaway, J.C., Blackwood, D.S., 2001: *A laboratory manual for X-ray powder diffraction*. U.S. Geological Survey Open File Report 01-041, U.S. Department of the Interior, USGS Woods Hole Science Center

Roedder, E., 1984: *Fluid inclusions, reviews in mineralogy, vol. 12*. USA, Mineral Society of America, 644 bls.

- Schiffman, P. and Fridleifsson, G.O., 1991: *The smectite-chlorite transition in drillhole NJ-15, Nesjavellir geothermal field, Iceland: XRD, BSE and electron microprobe investigations*. Journal of Metamorphic Geology, 9 (6): bls. 679-696
- Sigurður Steinþórsson & Árný E. Sveinbjörnsdóttir, 1981: *Opaque Minerals in Geothermal Wells no. 7, Krafla, Northern Iceland*. Journal of volcanology and Geothermal Research, 10: bls. 245-261
- Sigurður Sveinn Jónsson: Munnleg heimild, 2011.
- Sigurður Sveinn Jónsson, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Sigurjón Böðvar Þórarinnsson, 2010: *Skarðsmýrarfjall - hola HE-28 : 3. áfangi: Borun vinnsluhluta með 12 1/4" krónu frá 661 m í 1473 m dýpi*. Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR-2010/122
- Steinþór Níelsson, 2011: *Jarðfræði og ummyndun í jarðhitakerfinu við Hverahlíð á Hellisheiði*. Meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 130 bls.
- Steinþór Níelsson og Hjalti Franzson, 2010: *Geology and Hydrothermal Alteration of the Hverahlid HT-system, SW-Iceland*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. 5 bls.
- Steinþór Níelsson, 2010: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-48: 3. áfangi: Borun vinnsluhluta með 12 1/4" krónu fyrir 9 5/8" leiðara frá 837 m í 2288 m dýpi*. Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR-2010/112
- Steinþór Níelsson, Svabjörg Helga Haraldsdóttir, Anett Blischke, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, Snorri Guðbrandsson, Christa Feucht, Gunnlaugur M. Einarsson, Helga Margrét Helgadóttir, Hjalti Franzson, Egill Júlíusson, 2007: *Skarðsmýrarfjall – hola HE-31: 3. áfangi: Borun vinnsluhluta frá 727 m í 2703 m dýpi fyrir 9 5/8" leiðara*. Reykjavík. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2007/050
- Sveinn P. Jakobsson, 1978: *Environmental factors controlling the palagonitization of the Surtsey tephra, Iceland*. Bull. geol. soc. Denmark, vol 27, special issue bls. 91-105
- Theódóra Matthíasdóttir & Hörður Tryggvason, 2010: *Kolviðarhóll - hola HE-46: 3. áfangi: Borun vinnsluhluta frá 1032 , í 2744 m fyrir 9 5/8" leiðara*. Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR-2010/062
- Theódóra Matthíasdóttir & Hörður Tryggvason, 2010: *Kolviðarhóll - hola HE-46: Forborun, 1. og 2. áfangi : Borun fyrir yfirborðsfóðringu í 83, öryggisfóðringu í 338 m og vinnslufóðringu í 1032 m dýpi*. Reykjavík. Íslenskar Orkurannsóknir ÍSOR-2010/060
- Trausti Einarsson 1951: *Yfirlit yfir jarðfræði Hengilsvæðisins*. Tímarit VFÍ, bls. 49-60.
- Wada, S. I., Wada, K., 1977: *Density and structure of allophane*. Clay minerals 1977 12: 289-298.
- Walker, G. P. L., 1960: *Zeolite zones and dike distribution in relation to the structure of the basalts of eastern Iceland*. J. Geology 68, bls. 515-527

Viðaukar

Viðauki A – Hönnunarforsendur HE-31, HE-33 og HE-46, staðsetningar og fóðringadýpi.

Hola HE-31, hönnun og staðsetning

Hola HE-31 hefur staðarnúmer 95131 í gagnagrunni Orkustofnunar en hnit hennar samkvæmt landskerfi (ISN 93) eru:

$$X = 385036,59 \quad Y = 396779,94$$

Borplanið er í 570 m y.s.

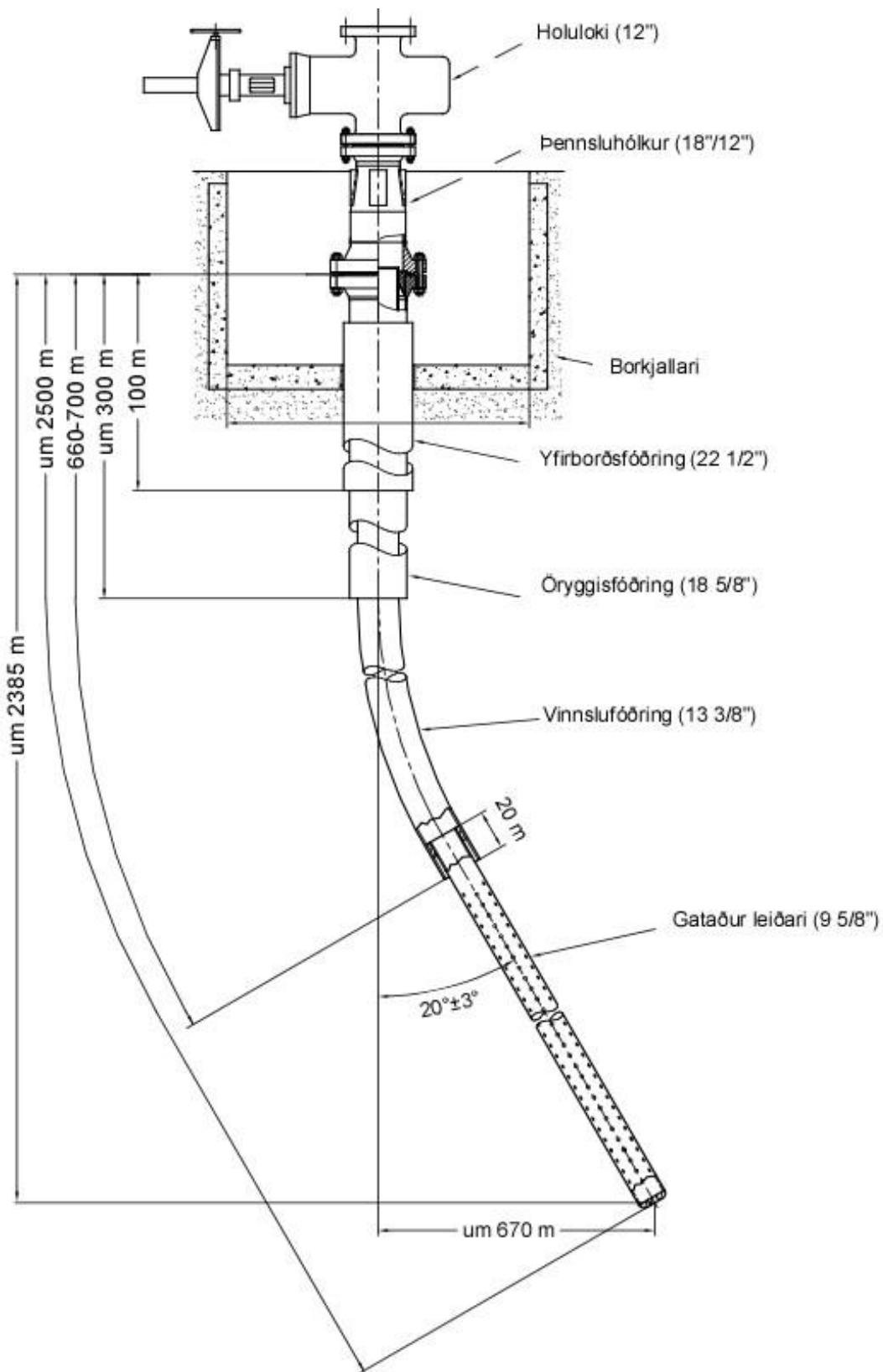
Borverkið skiptist í forborun og þrjá áfanga (tafla 8). Jarðborinn Sleipnir var notaður við forborun og borun 1. og 2. áfanga holu HE-31 í maí og júní 2007. Í forborun var notaður lofthamar og 26" borkróna. Hönnun holunnar er sýnd á mynd 1.

Miklir erfiðleikar voru við forborun holunnar og við borun fyrsta áfanga hennar vegna hrungjarnra jarðlaga. Það varð til þess að byrjað var upp á nýtt í 6 m fjarlægð frá fyrri holunni. Fyrri holan var þá kölluð HE-31a og sú seinni HE-31b í þessum áföngum, en frá og með 2. áfanga var hún nefnd HE-31. Fyrri holan fékk síðan númerið 95306 í gagnagrunni og nafnið HB-6 og er nú notuð sem grunn niðurrennslishola.

Holan er stefnuboruð og hófst hallauppygging um 20 m neðan öryggisfóðringarinnar og nam hún 2,5°/30 m þar til 30° halla var náð. Niðurstöður gýrómælingar frá 23. júlí 2007 má sjá í töflu 2.

Forborun holu HE-31b, þ.e. forborun seinni holunnar, náði niður á 92 m dýpi miðað við borpall Sleipnis, sem er í 5,8 m hæð yfir borplani. Í holuna var sett 22 ½" fóðring niður á 89 m dýpi. Fyrsti áfangi hennar var boraður með 21" krónu niður á 301 m dýpi, fóðrað með 18 ⅝" fóðringu, sem er öryggisfóðring holunnar, og var holuflansinn síðan soðinn á hana. Í 2. áfanga var skáborað með 17 ½" krónu og mótur niður á 727 m dýpi og byggður upp 30° halli í stefnu 280° og var því markmiði náð ofan 700 m dýpis. Annar áfangi holunnar var síðan fóðraður með 13 ⅜" vinnslufóðringu. Að þessu loknu var Sleipnir fluttur af holunni.

Þriðji áfangi var boraður með jarðbornum Óðni og var borað með 12 ¼" krónu niður á 2703 m dýpi m.v. borpall Óðins og er það vinnsluhluti holunnar. Fóðrað var með 9 ⅝" götuðum leiðara (tafla 1).



Mynd 1. Hönnun holu HE-31. (Dýptartölur eru mælt dýpi).

Tafla 8. Bordýpi, fódringadýpi og krónustærðir í holu HE-31. Dýpi miðast við borþall viðkomandi bors, Sleipnis 5,8 m y.j. og Óðins 7 m y.j.

Bor	Áfangi	Borkróna	Bordýpi	Hæð borþalls (m.y.j.)	Fódringadýpi	Þvermál fódringar
Sleipnir	Forborun a	26''	93 m	5,8 m	90 m	22 ½''
Sleipnir	Forborun b	26''	92 m	5,8 m	89 m	22 ½''
Sleipnir	1a. áfangi	21''	204 m	5,8 m		
Sleipnir	1b. áfangi	21''	301 m	5,8 m	295 m	18 ⅝''
Sleipnir	2. áfangi	17 ½''	727 m	5,8 m	724 m	13 ⅜''
Óðinn	3. áfangi	12 ¼''	2703 m	7,0 m	2692 m	9 ⅝''

Tafla 2. Halli og stefna holu HE-31 miðað við gýrómælingu þann 23. júlí 2007.

MD[m]	Inc	Azi	X	Y	Z	Dog Leg	X	Y	TVDSS
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	385037,000	396780,000	570,000
30	0,500	225,128	-0,157	-0,140	24,482	0,009	385036,910	396779,910	540,000
60	0,504	233,229	-0,333	-0,339	54,481	0,001	385036,710	396779,740	510,000
90	0,624	233,303	-0,505	-0,568	84,480	0,002	385036,470	396779,560	480,000
120	0,831	233,956	-0,707	-0,855	114,478	0,004	385036,170	396779,330	450,010
150	1,208	227,302	-1,068	-1,276	144,472	0,007	385035,760	396778,990	420,010
180	1,450	224,575	-1,550	-1,773	174,464	0,004	385035,260	396778,510	390,020
210	1,965	222,375	-2,217	-2,379	204,451	0,009	385034,650	396777,860	360,030
240	2,211	226,227	-2,991	-3,124	234,431	0,005	385033,880	396777,080	330,050
270	2,739	233,846	-3,832	-4,127	264,403	0,011	385032,880	396776,250	300,080
300	2,787	231,336	-4,707	-5,259	294,368	0,002	385031,740	396775,370	270,120
330	3,074	251,781	-5,471	-6,529	324,331	0,019	385030,400	396774,670	240,150
360	4,567	265,776	-5,768	-8,431	354,268	0,031	385028,450	396774,330	210,220
390	7,057	266,594	-5,963	-11,431	384,115	0,043	385025,420	396774,130	180,390
420	9,303	269,305	-6,152	-15,692	413,808	0,040	385021,150	396773,990	150,700
450	11,548	275,537	-5,883	-21,137	443,305	0,044	385015,740	396774,250	121,200
480	14,504	280,094	-4,951	-27,823	472,532	0,055	385009,050	396775,200	91,980
510	16,849	282,954	-3,347	-35,736	501,423	0,043	385001,120	396776,830	63,100
540	19,165	284,113	-1,182	-44,681	529,974	0,041	384992,100	396779,010	34,580
570	21,360	285,076	1,463	-54,724	558,117	0,039	384982,050	396781,630	6,440
600	23,851	284,533	4,449	-65,824	585,826	0,044	384970,900	396784,570	-21,250
630	25,877	282,604	7,473	-78,060	613,047	0,038	384958,640	396787,520	-48,470
660	27,863	280,260	10,165	-91,368	639,796	0,039	384945,360	396790,200	-75,220
690	29,721	279,866	12,684	-105,680	666,040	0,033	384931,130	396792,720	-101,510
720	30,213	280,428	15,302	-120,464	692,012	0,010	384916,380	396795,360	-127,500
750	30,197	281,042	18,112	-135,205	717,990	0,005	384901,550	396798,180	-153,430

780	30,181	281,135	21,012	-149,969	743,943	0,001	384886,750	396801,080	-179,360
810	29,994	281,790	23,987	-164,717	769,898	0,007	384872,010	396804,070	-205,320
840	30,045	282,000	27,073	-179,445	795,851	0,002	384857,320	396807,160	-231,290
870	29,995	282,755	30,250	-194,166	821,797	0,007	384842,660	396810,380	-257,270
900	30,258	282,436	33,489	-208,909	847,723	0,005	384827,970	396813,660	-283,210
930	30,319	282,832	36,810	-223,683	873,621	0,004	384813,200	396816,970	-309,120
960	30,443	283,018	40,185	-238,468	899,505	0,003	384798,420	396820,360	-335,000
990	30,385	283,138	43,627	-253,280	925,366	0,001	384783,620	396823,800	-360,870
1020	30,466	283,291	47,102	-268,094	951,221	0,002	384768,830	396827,270	-386,740
1050	30,646	283,407	50,609	-282,935	977,055	0,003	384753,990	396830,790	-412,570
1080	30,583	283,515	54,183	-297,757	1002,892	0,001	384739,140	396834,350	-438,390
1110	30,623	283,675	57,800	-312,610	1028,705	0,002	384724,290	396837,940	-464,210
1140	30,605	284,102	61,472	-327,484	1054,498	0,004	384709,460	396841,610	-490,030
1170	30,970	284,233	65,197	-342,405	1080,256	0,006	384694,570	396845,370	-515,800
1200	31,065	284,363	68,996	-357,363	1105,981	0,002	384679,590	396849,180	-541,510
1230	31,158	284,595	72,879	-372,346	1131,681	0,003	384664,580	396853,060	-567,200
1260	31,358	284,690	76,842	-387,386	1157,334	0,004	384649,520	396856,990	-592,840
1290	31,244	284,971	80,861	-402,435	1182,974	0,003	384634,460	396860,980	-618,480
1320	31,476	285,166	84,927	-417,523	1208,582	0,004	384619,380	396865,040	-644,100
1350	31,728	285,246	89,079	-432,685	1234,134	0,004	384604,210	396869,170	-669,650
1380	31,867	285,688	93,299	-447,931	1259,624	0,005	384588,970	396873,380	-695,140
1410	32,204	285,708	97,568	-463,252	1285,061	0,006	384573,650	396877,690	-720,580
1440	32,324	285,779	101,859	-478,611	1310,471	0,002	384558,240	396882,030	-745,940
1470	32,441	285,875	106,218	-494,060	1335,815	0,002	384542,780	396886,410	-771,280
1500	32,794	285,862	110,638	-509,644	1361,066	0,006	384527,230	396890,840	-796,550
1530	33,245	285,882	115,141	-525,368	1386,215	0,008	384511,500	396895,310	-821,700
1560	33,441	286,163	119,696	-541,177	1411,301	0,004	384495,660	396899,860	-846,760
1590	33,421	286,300	124,312	-557,042	1436,340	0,001	384479,790	396904,480	-871,800
1620	33,868	286,637	129,014	-573,006	1461,301	0,008	384463,850	396909,190	-896,770
1650	34,042	286,374	133,782	-589,057	1486,194	0,004	384447,780	396913,950	-921,660
1680	34,099	286,651	138,581	-605,175	1511,037	0,003	384431,670	396918,730	-946,510
1710	34,317	286,793	143,459	-621,321	1535,847	0,004	384415,520	396923,580	-971,320
1740	34,558	286,911	148,417	-637,532	1560,597	0,004	384399,280	396928,500	-996,060
1770	34,854	287,206	153,431	-653,847	1585,268	0,006	384382,950	396933,510	-1020,720
1800	35,089	287,303	158,531	-670,272	1609,850	0,004	384366,530	396938,610	-1045,310
1830	35,393	287,128	163,670	-686,792	1634,359	0,006	384349,990	396943,730	-1069,810
1860	35,483	287,169	168,824	-703,395	1658,808	0,002	384333,370	396948,860	-1094,250
1890	35,728	287,158	173,963	-720,109	1683,185	0,004	384316,680	396954,020	-1118,640
1920	36,241	287,308	179,191	-736,930	1707,468	0,009	384299,850	396959,240	-1142,920
1950	36,537	287,672	184,511	-753,888	1731,637	0,006	384282,870	396964,590	-1167,070
1980	36,822	287,995	189,979	-770,943	1755,705	0,006	384265,810	396970,080	-1191,130
2010	37,183	288,107	195,572	-788,128	1779,650	0,006	384248,650	396975,670	-1215,090
2040	37,646	288,264	201,280	-805,416	1803,494	0,008	384231,330	396981,360	-1238,910
2070	37,629	288,663	207,082	-822,798	1827,247	0,004	384213,950	396987,160	-1262,670
2100	38,168	288,742	212,990	-840,296	1850,889	0,009	384196,500	396993,070	-1286,340

2130	38,820	288,828	218,990	-857,980	1874,368	0,011	384178,820	396999,080	-1309,820
2160	39,001	289,282	225,141	-875,748	1897,743	0,006	384161,010	397005,230	-1333,170
2190	39,745	289,345	231,426	-893,739	1920,911	0,013	384143,050	397011,530	-1356,360
2220	40,429	289,496	237,846	-911,945	1943,876	0,012	384124,830	397017,950	-1379,310
2250	40,973	289,313	244,346	-930,360	1966,649	0,010	384106,380	397024,450	-1402,050
2280	41,487	289,397	250,917	-948,977	1989,237	0,009	384087,730	397031,000	-1424,610
2310	41,840	289,307	257,510	-967,776	2011,667	0,006	384068,910	397037,610	-1447,020
2340	42,548	289,347	264,120	-986,792	2033,910	0,012	384049,900	397044,280	-1469,250
2370	42,869	289,351	270,867	-1006,001	2055,944	0,006	384030,700	397051,020	-1491,300
2400	43,316	289,350	277,673	-1025,365	2077,823	0,008	384011,360	397057,810	-1513,200
2430	44,016	289,131	284,487	-1044,911	2099,538	0,012	383991,800	397064,640	-1534,900
2460	44,479	289,011	291,357	-1064,707	2121,005	0,008	383972,020	397071,480	-1556,390
2490	45,116	288,948	298,274	-1084,758	2142,221	0,011	383952,030	397078,350	-1577,680
2520	45,732	289,099	305,277	-1104,936	2163,287	0,011	383931,830	397085,320	-1598,740
2550	46,030	288,878	312,309	-1125,306	2184,158	0,006	383911,470	397092,330	-1619,620
2580	46,664	288,781	319,329	-1145,876	2204,836	0,011	383890,920	397099,330	-1640,330
2610	47,353	288,722	326,389	-1166,651	2225,295	0,012	383870,140	397106,390	-1660,790
2640	47,999	288,231	333,420	-1187,666	2245,516	0,013	383849,110	397113,410	-1680,980
2670	49,003	287,985	340,395	-1209,028	2265,391	0,018	383827,750	397120,400	-1700,860
2680	49,335	288,104	342,639	-1215,904	2271,684	0,006	383820,850	397122,640	-1707,130

Hola HE-33, hönnun og staðsetning

Hola HE-33 hefur staðarnúmer 95133 í gagnagrunni Orkustofnunnar. Hnit hennar samkvæmt landskerfi (ISN 93) eru:

$$X = 385037,09 \quad Y = 396863,78$$

Borplan holunnar stendur í um 570 m h.y.s.

Hönnun holunnar Holan er eftirfarandi:

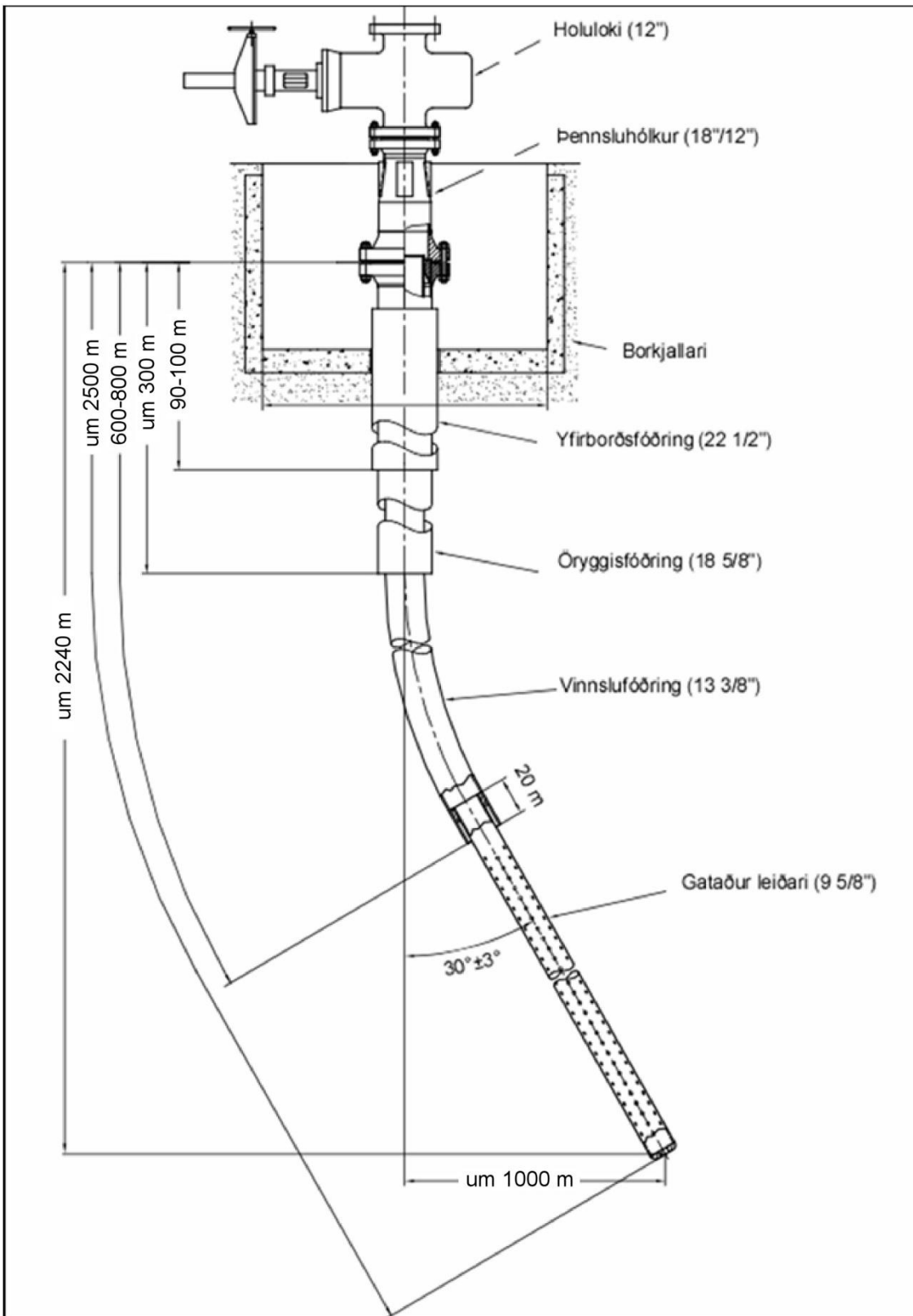
- 26” forborun niður í 90-100 m dýpi. Fóðrað með 22 ½” yfirborðsfóðringu.
- Borað með 21” krónu niður í 300 m dýpi og fóðrað með 18 ⅝” öryggisfóðringu.
- Borað með 17 ½” krónu niður í 700-900 m dýpi og fóðrað með 13 ⅜” fóðringu. Mat á ummyndun var notað sem viðmiðun við ákvörðun á vinnslufóðringardýpi.
- Vinnsluhluti var boraður með 12 ¼” krónu og fóðrað með 9 ⅝” leiðara. Dýpi holunnar miðast við um 2500 m mælt dýpi.

Borverkið skiptist í forborun og þrjú áfanga (tafla 3). Forborun og 1. og 2. áfangi var boraður með jarðbornum Sleipni. Yfirborðsfóðring var sett á 97,3 m dýpi og öryggisfóðring á 310,6 m dýpi. Borað var í 734 m en ekki gekk að setja niður 13 ⅜” vinnslufóðringu vegna fyrirstöðu í holunni. Þá var jarðborinn Óðinn fenginn á staðinn til rýmingar.

Óðinn boraði út úr sömu holu á 420 m dýpi. Settar voru niður tvær vinnslufóðringar með jarðbornum Óðni, annars vegar 13 ⅜” fóðring á 419,5 m dýpi og hins vegar 9 ⅝” fóðring á 835 m dýpi.

Borun 3. áfanga hófst þann 8. september og lauk 17. september í 2325 m. Hönnun holunnar gerði ráð fyrir halla uppbyggingu í 30° og þeim halla haldið til botns. Holan var gírómæld niður á 1595 m og var halli 66° þar. Holan var gírómæld aftur vorið 2008 og kom þá í ljós að hallinn hefur aukist áfram og var 103° í 2100 m mældu dýpi. Holan er eina hola á Hellisheiði þar sem raundýpi (1320 m) er minna en lárétt færsla (1375 m) holunnar og halli fer uppi í 100°.

Niðurstöður gírómælingar frá 29. febrúar 2008 má sjá í töflu 4.



Mynd 2. Hönnun holu HE-31. (Dýptartölur eru mælt dýpi).

Tafla 3. Bordýpi, fóðringadýpi og krónustærðir í holu HE-33. Dýpi miðast við borpall viðkomandi bors, Sleipnir 5,6 m y.j. og Óðinn 6,8 m y.j.

Bor	Áfangi	Borkróna	Bordýpi	Fóðringardýpi	Þvermál fóðringar
Sleipnir	Forborun	26"	101 m	97,3 m	22½"
Sleipnir	1. áfangi	21½"	333 m	310,6 m	18⅝"
Sleipnir	2. áfangi	17½"	734,2 m	mistókst	-
Óðinn	2. áfangi a	17½"	420 m	419,5 m	13⅝"
Óðinn	2. áfangi b	12¼"	835 m	835 m	9⅝"
Óðinn	3. áfangi	8 ½"	2325 m	802-2309,3 m	7"

Tafla 4. Halli og stefna holu HE-33, niðurstöður gýrómælingar frá 29. febrúar 2008.

Mælt dýpi (m)	Halli (°)	Stefna (°)	Lárétt fjarl. frá holutoppi (m)	Raundýpi (TVD)(m)	ISNET93 hnitakerfi		
					Austur (m)	Norður (m)	Hæð yfir sjó (m)
0	0	0	0	0	385026.2	396860.6	570.9
540	8.81	350.15	41.4	536.8	385019.1	396901.3	34.1
570	10.26	3.04	46.3	566.4	385018.9	396906.3	4.5
600	12.74	4.35	52.1	595.8	385019.3	396912.2	-24.8
630	15.85	1.73	59.4	624.9	385019.7	396919.6	-53.9
660	18.79	0.02	68.3	653.5	385019.8	396928.6	-82.5
690	21.24	358.09	78.5	681.7	385019.6	396938.8	-110.7
720	23.45	357.15	89.9	709.4	385019.1	396950.2	-138.5
750	26.28	354.26	102.5	736.6	385018.2	396962.8	-165.7
780	28.4	354.96	116.3	763.3	385016.9	396976.5	-192.3
810	30.1	354.96	130.9	789.4	385015.6	396991.1	-218.5
840	30.48	355.24	146.1	815.3	385014.3	397006.2	-244.4
870	31.37	354.46	161.5	841.1	385012.9	397021.5	-270.1
900	32.28	354.94	177.3	866.6	385011.4	397037.3	-295.6
930	33.48	354.18	193.6	891.8	385009.9	397053.5	-320.8
960	34.68	356.07	210.4	916.6	385008.5	397070.2	-345.7
990	35.52	354.38	227.6	941.1	385007	397087.4	-370.2
1020	36.82	355.69	245.3	965.4	385005.5	397105.1	-394.4
1050	38.21	355.95	263.6	989.1	385004.2	397123.3	-418.2
1080	39.51	356.1	282.4	1012.5	385002.9	397142.1	-441.6
1110	40.77	356.1	301.8	1035.4	385001.6	397161.4	-464.5
1140	41.6	356.94	321.5	1058	385000.4	397181.1	-487.1
1170	42.94	357.21	341.7	1080.2	384999.3	397201.2	-509.3
1200	44.21	358.3	362.3	1102	384998.5	397221.9	-531
1230	45.78	358.35	383.5	1123.2	384997.9	397243.1	-552.2
1260	47.24	359.83	405.3	1143.8	384997.6	397264.8	-572.9
1290	48.86	359.6	427.5	1163.9	384997.5	397287.1	-592.9
1320	50.34	359.19	450.3	1183.3	384997.2	397310	-612.4
1350	52.18	358.89	473.7	1202.1	384996.8	397333.4	-631.1
1380	53.86	358.83	497.6	1220.1	384996.3	397357.3	-649.2
1410	55.78	358.68	522.1	1237.4	384995.8	397381.9	-666.5
1440	57.37	359.31	547.2	1253.9	384995.4	397406.9	-683
1470	59.02	360	572.6	1269.7	384995.2	397432.4	-698.8

1500	61.08	0.65	598.6	1284.7	384995.4	397458.4	-713.8
1530	62.96	1.33	625	1298.8	384995.8	397484.9	-727.8
1560	64.66	0.15	651.9	1312	384996.2	397511.8	-741.1
1590	66.24	359.55	679.1	1324.5	384996.1	397539	-753.5
1620	68.23	1.02	706.8	1336.1	384996.2	397566.7	-765.1
1650	70.4	1.54	734.8	1346.7	384996.9	397594.8	-775.8
1680	72.64	1.88	763.1	1356.2	384997.7	397623.2	-785.2
1710	75.08	1.65	791.9	1364.5	384998.6	397652	-793.6
1740	77.14	2.43	820.9	1371.7	384999.6	397681.1	-800.8
1770	79.36	1.89	850.2	1377.8	385000.7	397710.4	-806.9
1800	80.99	2.21	879.7	1383	385001.8	397740	-812
1830	82.78	2.31	909.4	1387.2	385003	397769.6	-816.2
1860	84.89	1.76	939.1	1390.4	385004	397799.4	-819.5
1890	87.03	1.16	969	1392.5	385004.8	397829.4	-821.6
1920	89.32	1.46	999	1393.5	385005.5	397859.3	-822.5
1950	91.44	180.3	998.9	1393.3	385005.8	397859.3	-822.3
1980	93.54	177.35	969	1392	385006.4	397829.4	-821
2010	95.84	126.86	944.9	1389.5	385019	397805.5	-818.6
2040	98.22	178.91	921.1	1385.9	385031.2	397781.7	-814.9
2070	100.32	86.34	907.4	1381	385046.3	397767.8	-810.1
2100	102.74	66.86	915.1	1375	385074.4	397774.5	-804.1

Hola HE-46, hönnun og staðsetning

Hola HE-46 er staðsett í Sleggjubeinsdal á sama borteig og hola HE-8. Hnit holunnar eru:

$$X=384062,51 \quad Y=396313,10$$

Borstæðið er í 309,3 m y. s.

Holan er af víðari gerðinni og er hönnun hennar eftirfarandi:

- 26” forborun niður í 90-100 m dýpi. Fóðrað með 22 ½” yfirborðsfóðringu.
- Borað með 21” krónu niður í 300-350 m dýpi og fóðrað með 18 ⅝” öryggisfóðringu.
- Borað með 17 ½” krónu niður í 800-900 m dýpi og fóðrað með 13 ⅜” fóðringu. Mat á ummyndun notað sem viðmiðun við ákvörðun á vinnslufóðringardýpi.
- Vinnsluhluti boraður með 12 ¼” krónu og fóðrað með 9⅝” leiðara. Dýpi holunnar miðast við 2500 m mælt dýpi (2250 m raundýpi) og verður lárétt hliðrun þá um 980 m.

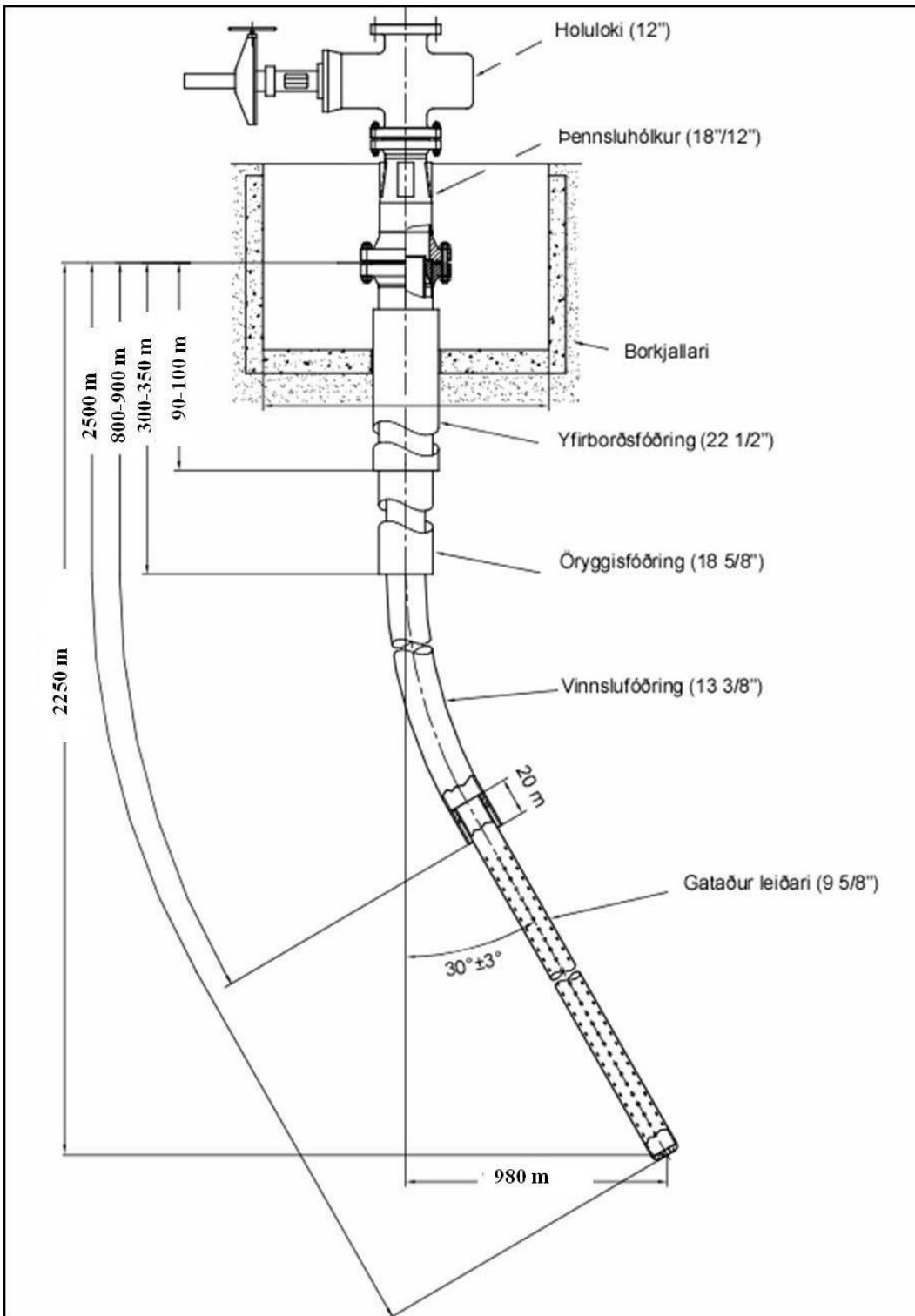
Holan er stefnuboruð og henni stefnt í N50°A. Hallaupbygging hefst um 20 m neðan öryggisfóðringar og nemur um 2,5°/30 m þar til um 30° halla er náð

Borverkið skiptist í forborun og þrjá áfanga. Jarðborinn Saga forboraði holuna niður á 83,5 m dýpi og fór yfirborðsfóðring í 83 m dýpi (tafla 5). Jarðborinn Týr boraði 1.-3. áfanga holunnar. Borað var í 338 m fyrir öryggisfóðringu og fór hún í tæplega 337 m. Vinnslufóðringardýpi var svo í 1032 m og fór fóðring í 1031,5 m. Vinnsluhlutinn holunnar var boraður í 2744 m og fór leiðari í 2728 m og er hengistykki í 968 m.

Niðurstöður úr gýrómælingu frá borlokum HE-46 má sjá í töflu 6.

Tafla 5. Bordýpi og dýpi yfirborðs-, öryggis- og vinnslufóðringar í holu HE-46.

Bor (hæð borpalls)	Áfangi	Borkróna	Bordýpi m.v. borpall	Fóðringardýpi m.v. borpall	Þvermál fóðringar
Saga (2 m y.j.)	Forborun	26”	83,5 m	83 m	22½”
Týr (7,6 m y.j.)	1. áfangi	21”	338 m	336,7 m	18⅝”
Týr (7,6 m y.j.)	2. áfangi	17 ½”	1032 m	1031,5 m	13⅜”
Týr (7,6 m y.j.)	3. áfangi	12 ¼”	2744 m	968-2728 m	9⅝”



Mynd 3. Hönnun holu HE-46.

Tafla 6 . Niðurstöður lokagírómælingar í HE-46.

Mælt dýpi (m)	Halli (°)	Stefna (°)	Lárétt fjarl. frá holutoppi (m)	Raundýpi (TVD)(m)	ISNET93 hnitakerfi		
					Austur (m)	Norður (m)	Hæð yfir sjó (m)
0	0,0	0	0	0	384062	396313	309
30	0,3	274	0	30	384062	396313	279
60	0,5	263	0	60	384062	396313	249
90	0,5	259	1	90	384062	396313	219
120	0,4	255	1	120	384061	396313	189
150	0,4	249	1	150	384061	396313	159
180	0,3	245	1	180	384061	396313	129
210	0,2	256	1	210	384061	396313	99
240	0,2	252	1	240	384061	396313	69
270	0,1	263	1	270	384061	396313	39
300	0,2	354	2	300	384061	396313	9
330	0,4	8	1	330	384061	396313	-21
360	0,4	15	1	360	384061	396313	-51
390	2,8	55	1	390	384061	396314	-81
420	6,0	52	2	420	384063	396315	-111
450	8,0	49	6	450	384066	396317	-140
480	10,0	49	11	479	384070	396321	-170
510	12,4	49	16	509	384074	396324	-199
540	14,8	47	23	538	384079	396329	-229
570	17,0	44	32	567	384085	396335	-257
600	19,0	44	41	595	384092	396341	-286
630	22,0	44	51	623	384099	396349	-314
660	24,0	44	63	651	384107	396357	-342
690	26,0	46	76	678	384116	396366	-369
720	28,9	46	90	705	384126	396376	-395
750	29,0	46	104	731	384136	396386	-422
780	29,4	46	119	757	384147	396396	-448
810	29,0	46	133	783	384158	396406	-474
840	29,0	47	148	810	384168	396416	-500
870	28,0	47	162	836	384179	396426	-527
900	28,0	47	176	862	384189	396436	-553
930	28,0	47	190	889	384199	396445	-580
960	28,0	48	204	915	384210	396455	-606
990	27,0	47	218	942	384220	396464	-633
1020	27,0	47	232	969	384230	396473	-659
1050	26,0	47	245	996	384240	396482	-686
1080	26,0	47	258	1023	384249	396491	-713
1110	25,0	47	271	1050	384259	396500	-740

1140	25,4	48	284	1077	384268	396509	-768
1170	25,0	49	297	1104	384278	396517	-795
1200	24,0	49	309	1131	384287	396526	-822
1230	24,0	49	322	1159	384296	396534	-849
1260	24,0	49	334	1186	384306	396542	-877
1290	24,0	50	346	1213	384315	396549	-904
1320	24,0	51	358	1241	384324	396557	-932
1350	24,5	51	370	1268	384334	396565	-959
1380	24,0	52	383	1296	384343	396573	-986
1410	24,0	52	395	1323	384353	396580	-1014
1440	24,0	52	407	1350	384363	396588	-1041
1470	24,0	51	419	1378	384372	396595	-1069
1500	24,0	52	431	1405	384382	396603	-1096
1530	25,0	53	444	1433	384392	396610	-1123
1560	25,3	53	456	1460	384402	396618	-1150
1590	25,0	53	469	1487	384412	396626	-1178
1620	25,9	52	482	1514	384422	396634	-1205
1650	25,0	53	495	1541	384432	396641	-1232
1680	25,0	54	508	1568	384443	396649	-1259
1710	25,0	54	520	1595	384453	396656	-1286
1740	25,0	55	533	1623	384463	396664	-1313
1770	25,0	55	545	1650	384474	396671	-1340
1800	25,0	55	558	1677	384484	396678	-1368
1830	25,0	55	571	1704	384494	396686	-1395
1860	25,0	56	583	1731	384505	396693	-1422
1890	24,0	55	596	1759	384515	396700	-1449
1920	25,0	56	608	1786	384525	396707	-1477
1950	25,0	55	621	1813	384536	396714	-1504
1980	25,0	55	633	1840	384546	396721	-1531
2010	25,0	55	646	1867	384557	396729	-1558
2040	25,0	54	658	1895	384567	396736	-1585
2070	25,0	55	671	1922	384577	396743	-1613
2100	26,0	57	684	1949	384588	396751	-1640
2130	26,0	56	697	1976	384599	396758	-1667
2160	25,0	57	710	2003	384610	396765	-1694
2190	25,0	56	722	2030	384620	396772	-1721
2220	25,0	55	735	2057	384631	396779	-1748
2250	25,0	55	748	2085	384641	396786	-1775
2280	25,0	58	760	2112	384652	396793	-1802
2310	25,0	58	773	2139	384662	396800	-1830
2340	25,0	58	786	2166	384673	396807	-1857
2370	25,0	57	798	2193	384684	396814	-1884
2400	25,0	56	811	2220	384694	396821	-1911

2430	24,0	54	823	2248	384705	396828	-1938
2460	24,0	52	835	2275	384714	396835	-1966
2490	24,0	50	848	2303	384724	396843	-1993
2520	24,1	50	860	2330	384733	396851	-2021

Viðauki B - Jarðlög í holum HE-31, HE-33 og HE-46

Í jarðlagalýsingum eru tiltekin tvönn dýptarbil og á það fyrri við um mælt dýpi (MD) en það seinna við raundýpi (metrar yfir og undir sjávarmáli). Jarðlögin eru dýptarleiðrétt með tilliti til þess tíma sem það tekur svarfsýnin að ná til yfirborðs. Fyrst og fremst er notast við jarðlagamælingar en einnig borgögn og útreikninga á taftíma svarfsins út frá þvermáli og dýpt holu, borhraða og ádælingu.

Dýptarbil sem tiltekin eru í texta eru mælt dýpi.

Jarðlög í HE-31 og HE-33

Skarðsmýrarfjallsmyndun

HE-31: 0-242 m/571-329 m y. s. - HE-33: 0-256 m/571-315 m y. s.

Myndunin er bólstrabergsmyndun af ólívín-þóleiít samsetningu, plagíóklasdílótt með smáum ólívíndílum. Myndunin er almennt glerríkari frá yfirborði og niður á um hundrað metra mælt dýpi, en kristallaðri þegar neðar dregur. Þó er glermagn mismikið innan einingarinnar sem bendir til þess að farið sé í og úr bólstrum. Myndunin er hrungjörn og hefur valdið ítrekuðum vandkvæðum í borun.

Bergið er smáblöðrótt og eru blöðrur allt að 25% af heildarásýnd bergsins efst í mynduninni en virðast almennt vera um 5-10%. Töluvert er af smáum plagíóklasnálum í grunnmassa sem sýna nokkurs konar frostrósakristöllun, sem er dæmigert einkenni á bólstrabergi. Í glerríkari hlutum myndunarinnar, bæði efst í einingunni en einnig milli bólstra, er grunnmassi oftast míkrokristallaður. Hvort tveggja bendir til hraðrar kælingar bólstrabergsins.

Textúr bergsins er subófitískur og í kristallaðri hlutum einingarinnar má glögglega sjá hvernig ágít umlykur að hluta plagíóklasnálur í grunnmassa. Kristöllun er mjög misjöfn, frá nánast hreinum glerkornum á snöggkældu ytra borði bólstranna, í meðalkorna kristallað berg í miðju þeirra þar sem bergið nær að kristallast nokkuð óáreitt.

Plagíóklasdílar eru oft fremur „kassalaga“, en einnig sjást listalaga dílar. Þeir eru oft í smærri kantinum en einnig finnast stórir dílar. Ólívíndílar eru bæði smáir og meðalstórir og sjást krómspínílinnlyksur í sumum þeirra. Hópdílar sjást, bæði plagíóklashópdílar og einnig ólívín- og plagíóklashópdílar, þar sem plagíóklasdílarirnir raðast kringum ólívíndíllana.

Bergið er mjög fersklegt og einungis sést smávægileg kaldavatnsummyndun; límónít niður á um 200 m dýpi en neðan þess má auk þess sjá karbónathnúðar. Við botn myndunarinnar fer að votta fyrir pýríti og kalsíti.

Í svarfi á 200-300 m mældu dýpi í öðrum holum á Skarðsmýrarfjalli hefur sést allt að 100 m þykk (í holu HE-28), meðal-grófkorna, plagíóklasdílótt ólívín-þóleiít, sem verður grófara eftir því sem

neðar dregur (*t.d. Sigurður Sveinn Jónsson o.fl., 2010*). Talið er að myndunin sé samaldra Skarðsmýrarfjallsmynduninni, og sé einhverskonar kvikupoki myndaður út frá gosrás í grenndinni vegna öflugs kvikustreymis undir íshellunni Þessa myndun er ekki að sjá í holum á SO-teignum.

Móbergsmýndun I

HE-31: 242-332 m/329-239 m y. s. - HE-33: 256-320 m/315-251 m y. s.

Komið er í aðra móbergsmýndun neðan Skarðsmýrarfjallsmyndunar sem er frábrugðin henni að því leyti að ólivíndílar eru horfnir og plagíóklasdílar sjást í minna mæli. Einingin er stak-plagíóklasdílótt.

Efsti hluti myndunarinnar í holu HE-31 samanstendur af glerjuðu basalti, en magn glers fer að aukast frá 290 m og komið er í hreint túff á 322 m dýpi.

Efsti hluti myndunarinnar í holu HE-33 samanstendur af bólstrabergi með túfflinsum niður á 280 m þegar komið er í hreint túff. Algjört skoltap varð á 286 m og fór svarf ekki að berast á nýjan leik fyrr en á 342 m dýpi.

Túffkornin eru ferskleg, blöðrótt og nánast hreint gler. Aðeins örlar á smektít- og kalsítummyndun á jöðrum. Oft má sjá plagíóklas- og pýroxenkristalla, auk þess sem örlar á smáum plagíóklasnálum.

Bólstrabergið er nokkuð miskristallað, allt frá fínkristölluðum, blöðróttum kornum í meðalkorna þéttara berg. Athygli vekur að svo virðist sem kristölluðu kornin séu ummyndaðri en glerið, en þar hefur töluverð kalsítummyndun átt sér stað á gleri og ólivíni.

Textúr bergsins er subófitískur og berggerðin er ólivín-þóleíft.

Setlag I

HE-31: 332-336 m/239-235 m y. s. – HE-33: 320-326 m/251-245 m y. s.

Í holu HE-31 markar grænt setlag neðri mörk móbergsmýndunar I. Um er að ræða græn-brúnan sand- eða eðjustein, lagskiptan og mjög sprunginn. Sprungufyllingar eru áberandi, og eru það aðallega kalsít og pýrít.

Set sést í svarfi í HE-31 en í holu HE-33 er skoltap frá 286 m niður á 342 m. Á 346 m dýpi sjást þó setkorn svipuð þeim í HE-31. Ekkert svarf barst á þessu dýptarbili í öðrum holum á teignum, en setlagið virðist þó sjást sem skápur í víddarmælingum; á 332-336 m í HE-31 og á 320-326 m í HE-33. Skápar sjást einnig í öðrum holum á sama teig; á 355-360 m í HE-44 og á 340-350 m í HE-48. (*Christa Feucht o. fl. 2010, Steinþór Níelsson o. fl. 2010*).

Móbergsmýndun II

HE-31: 336-428 m/235-144 m y. s. - HE-33: 326-428 m/245-143 m y. s.

Undir setlaginu er komið í aðra móbergsmýndun. Efsti hluti hennar samanstendur aðallega af túffríkri breksíu og túffi þegar neðar dregur. Mýndunin er plagíóklasdílótt og er efsti hluti myndunarinnar dílóttari og blöðróttari en þegar neðar dregur.

Í HE-31 er efsti hluti myndunarinnar blanda af frauðkenndu, glerjuðu basalti og túffi og eru þeir kaflar skilgreindir sem basaltbreksía. Neðan breksíunnar, frá 348 m mældu dýpi, er komið í nánast hreint túff. Skoltap var í holu HE-33 frá 286-342 m, en þegar svarf fór að berast á ný til yfirborðs var komið í breksíu, blöndu af glerjuðu basalti og túffi. Frá 386 m mældu dýpi er komið í nánast hreint túff.

Túffið er nokkuð þétt og samanstendur af smáum, samlímdum glerkornum. Enn vottar fyrir palagónítummyndun og eru þau korn dökkbrún, en þó er glerið sé að mestu ummyndað í leir sem gefur kornunum grænleitan blæ. Plagíóklasdílur eru oft stórir og óreglulegir að lögun. Bæði má sjá algjörlega anhedral kristalla og eins subhedral. Þeir eru oft sprungnir og brotnir, oft jafnvel „götóttir“ og í greinilegu ójafnvægi við kvikuna. Það sést bæði á lögun þeirra og ásýnd, og bendir til kvikublöndunar.

Í kristallaðri kornum ber á frostrósakristöllun á plagíóklasnálum, en einnig er gler áberandi.

Textúrinn virðist vera subófitískur og nokkuð ber á ólivíni í grunnmassa sem hvort tveggja bendir til að um ólivín-þóleiít sé að ræða.

Gler í blöðrum er nokkuð fersklegt en votta fer fyrir leir á um 350 m dýpi og zeólítum á svipuðum slóðum, auk þess sem nokkuð sést af pýríti og kalsíti.

Setlag 2

HE-31: 428-434m/144-138 m y. s. – HE-33: 428-432 m/143-139 m y. s.

Gráleitt, pýrítríkt og mjög fínkorna set markar skil milli móbergsmýndana II og III. Setkornin eru mjög sprungin og eru í meirihluta á 438 m í holu HE-31 en sjást sem dreif í nokkrum sýnum eftir það.

Í HE-33 sést set á bilinu 446-456 m. Svarf vantar á þessum slóðum í holum HE-44 og HE-48 sem staðsettar eru á sama teig. Skápur sást í víddarmælingu á 428 m í HE-33, hugsanlega í tengslum við lagmót. Í áfangaskýrslu HE-31 kemur auk þess fram að á 428 m dýpi hafi víddarmælir farið í fullt útslag, og þar sé greinilega stór skápur. Engar mælingar eru til í HE-31 frá 428-727 m, þar sem allir mælur settust á þessu dýpi og ekki tókst að koma þeim neðar (*Helga M. Helgadóttir o.fl. 2007*).

Móbergsmýndun III

HE-31: 434-488 m/144-83 m y. s. – HE-33: 432-492 m/139-80 m y. s.

Neðan gráa, fínkorna setlagsins er komið í aðra móbergsmýndun. Mýndunin er túffrík efst en verður kristallaðri þegar neðar dregur og er þá breksía ríkjandi, blanda af nokkuð frauðkenndu túffi og glerjuðu basalti. Mýndunin er að mestu dílalaus. Setdreif sést í svarfi, líklegast úr setlagi að ofan.

Í HE-31 er komið í breksíu á 478 m mældu dýpi en á 472 m mældu dýpi í holu HE-33.

Túffkornin eru smáblöðrótt og eru blöðrur að stórum hluta fylltar leir, kalsíti og zeólítum. Í sumum þeirra hefur plagíóklas í grunnmassa náð að kristallast að einhverju leyti en önnur eru hrein glerkorn. Breksían samanstendur af túffkornum og glerjuðu, kristölluðu basalti. Kristöllunin er mjög mismikil, allt frá fínkristölluðu bergi í meðalkorna. Textúr bergsins er subófitískur sem bendir, auk hlutfalls ólivíns í grunnmassa, til þess að mýndunin sé af ólivín-þóleiít samsetningu.

Almennt er bergið nokkuð fersklegt en ummyndun eykst þegar neðar dregur, en í svarfsýnum má sjá allt frá ferskum glerkornum til græn-hvítummyndaðra túffkorna. Einnig má sjá stöku oxað korn. Gler er að nokkru leyti ummyndað í leir og kalsít og ólivín í leir, en plagíóklas og pýroxen eru enn nokkuð ferskleg.

Ummyndunarsteindir eru aðallega leir, kalsít, pýrít og stöku zeólítar. Kvars sést í fyrsta sinn við botn myndunarinnar í HE-33 á um 480 m dýpi, en nokkru neðar í HE-31 eða á um 570 m.

Setlag 3

HE-31: 488-500 m/83-74 m y. s – HE-33: 492-498 m/80 -74 m y. s.

Undir breksíunni er komið grágrænt, sprungið setlag. Setið er mögulega jökulberg sem markar skil milli móbergsmýndunar III og IV.

Það sést á 490-500 m í holu HE-31 en sést ekki í öðrum holum á SO-teig en þó á svipuðum slóðum í öðrum holum á fjallinu. Í holu HE-33 er svarf mjög fínt á þessu bili. Við borun seinni hluta 2. áfanga HE-33 sást einnig skápur á 492-498 m dýpi, þar sem setlagið er líklega skorið og fór viðnám hækkandi neðan 500 m dýpis sem rennir frekari stoðum undir að þar sé komið í nýja myndun (*Christa M. Fecht o.fl., 2008*).

Móbergsmýndun IV

HE-31: 500-702 m/74 m y.s.-111 m u.s - HE-33: 498-694 m/74 m y. s.-116 m u.s.

Útfellingaríkt túff er ríkjandi efst í þessari myndun en einnig er farið gegnum breksíuleg og kristallaðri einingar með bólstrabergseinkennum. Mýndunin er dílalaus eða stakdílótt og sést oxun á stöku stað. Hún er töluvert sprungin og eru sprungufyllingar aðallega kalsít en einnig sést pýrít. Berggerðin er ólivín-þóleiít.

Í holu HE-31 samanstendur efsti hluti myndunarinnar af túffi en farið er í gegnum breksúlög frá 678 m. Myndunin virðist almennt kristallaðri í holu HE-33 og samanstendur efsti hluti myndunarinnar af breksú en túfflinsa er skorin á 554-588 m. Neðan túffsins er aftur komið í breksú og eru kristallaðri lög af glerjuðu basalti skorin á 612-630 m, 636-648 m og 654-668 m.

Myndunin er áberandi lekari en móbergsmýndanirnar ofan og neðan, en það sést á aukinni ummyndun og magni útfellinga. Hvort tveggja bendir til þess að vatn hafi auðveldlega náð að leika um bergið, enda túffið blöðrótt og gropið og því auðveldara fyrir vatnið að komast að því en ef um þétt, kristallað berg væri að ræða. Túffið er frauðkennt og blöðrótt og eru flest kornin hreint gler, en í stöku korni má sjá örla á plagíóklasnálum.

Breksúlögin eru fremur túffrík en innihalda þó einnig glerjað, kristallað basalt. Bergið er af ólivín-þóleítt samsetningu og er töluvert ummyndað. Kornin eru miskristölluð, allt frá því að vera að stórum hluta gler með smáum plagíóklasnálum í grunnmassa í að vera nokkuð jafnkristölluð og meðalkorna, allt eftir þeim aðstæðum sem þau hafa kristallast við.

Túffkornin eru græn- til hvítummynduð, að mestu í leir og kalsít sem sést í miklu mæli. Glerjuð korn eru dökkleit efst í einingunni en grænleitari eftir því sem neðar dregur og ummyndun eykst. Oxun sést á stöku stað. Leir er í þorum og gler og ólivín að fullu ummyndað í leir og kalsít. Plagíóklas er farinn að ummyndast á sprungum og jöðrum, aðallega í kalsít en auk þess að nokkru leyti í albít, og pýroxen aðeins farinn að láta á sjá á jöðrum. Auk þess er málmur arinn að ummyndast að nokkru leyti í sphene. Ummyndunarsteindir eru kvars, klórít, pýrít, mikið af kalsíti og mögulega laumontít. Auk þess sést wairakít og prehnít.

Nokkuð ber á fínkorna, nokkuð jafnkorna, fersklegu þóleífti í sýnum, í mismiklu mæli þó. Þarna er líklega um þunn innskot að ræða, en þóleíttbergbrot virðast í mestu magni á 546-554 m dýpi í holu HE-33 og 475-496 m og 602-610 m dýpi í holu HE-31.

Móbergsmýndun V

HE-31: 702-718 m/111-125 m u. s. - HE-33: 694-724 m/116-144 m u. s.

Komið er í mjög túffríka, nokkuð ummyndaða, móbergsmýndun. Myndunin er dílalaus og einkennist af gráleitu túffi í miklum meirihluta, blönduðu fínkorna, dökku og þóleíttlegu basalti. Túffið er gjallkennt og sprungið. Það er að nokkru leyti ummyndað, aðallega í kalsít en einnig í kvars og klórít. Kristölluð korn eru fín til meðalkorna, jafnkorna, dökkleit og líklegast af þóleítt-samsetningu. Bergið er nokkuð ummyndað. Kalsítummyndun á sprungum og albítisering er áberandi í plagíóklas í grunnmassa og pýroxen er farinn að láta á sjá.

Myndunin virðist töluvert gropin og ber magn ummyndunarsteinda þess merki, en töluvert er af kvars, pýrít, kalsíti og prehníti og einnig sést wairakít.

Móbergsmýndun VI

HE-31: 718-956m/125-331 m u. s. – HE-33: 724-994 m/144-375 m u. s.

Neðan móbergsmýndunar V er komið í aðra móbergsmýndun sem einkennist að mestu leyti af bólstrabreksíu og bólstrabergi af ólivín-þóleiít samsetningu. Efsti hluti myndunarinnar er dílóttur en magn díla fer minnkandi eftir því sem neðar dregur.

Í HE-31 ert túfflinsur skornar frá 736-743m og 772-792 m en neðan 792 m er borað í bólstrabergi og bólstrabreksíu, ef frá er talin túffeining á 848-858 m. Í HE-33 er túfflinsa skorin á 752-764 m og 880-888 m en annars er borað í bólstrabergi og bólstrabreksíu.

Bergið er mjög ummyndað á þessum slóðum. Plagíóklas er ummyndaður í albít og kalsít auk þess sem pýroxen er farið að láta á sjá og ber þá aðallega á ummyndun í leir. Málmur er ummyndaður í sphene. Mikið er um kalsít og pýrít en auk þess sést leir og kvars í miklu mæli auk epidóts, prehníts og wairakíts.

Neðst í mynduninni er komið í nokkuð þykka einingu af kristölluðu, meðalkorna ólivín-þóleiíti sem við fyrstu sýn virðist vera innskot og sést á 922-954 m í HE-31 og 970-994 m í HE-33. Þessi eining sést einnig í öðrum holum á Skarðsmýrarfjalli; m. a. í holu HE-24 á SP-teig á 826-1058 m dýpi, og í tveimur holum á SL-teig, í HE-28 á 680-826 m og í HE-49 á 674-842 m dýpi (*Mesfin, K., 2010, Sigurður S. Jónsson o. fl. 2010, Björn S. Harðarson o fl. 2010, Helga M. Helgadóttir 2009*). Umfang myndunarinnar bendir til þess að þarna sé um eitthvað annað og meira en innskot að ræða, hugsanlega kvikupoka á borð við þann í botni Skarðsmýrarfjallsmýndunar, myndaðan vegna öflugs kvikustreymis yfir gosrásinni sem myndar flæðieiningu, og myndi því ef svo er teljast sem hluti þessarar myndunar.

Móbergsmýndun VII

HE-31: 956-1512 m/325-806 m u. s. - HE-33: 994-„1790“ m/375-„812“ m u. s.

Neðan móbergsmýndunar VI er komið í mjög túffríka, dílalaus móbergsmýndun. Innan myndunarinnar eru kristallaðri einingar, bæði innskot og einnig ummyndað kristallað berg sem líklegast er hluti af móbergsmýnduninni sjálfri. Einingin er túffríkari efst en kristallaðri eftir því sem neðar dregur og flokkast þar sem túffrík breksía.

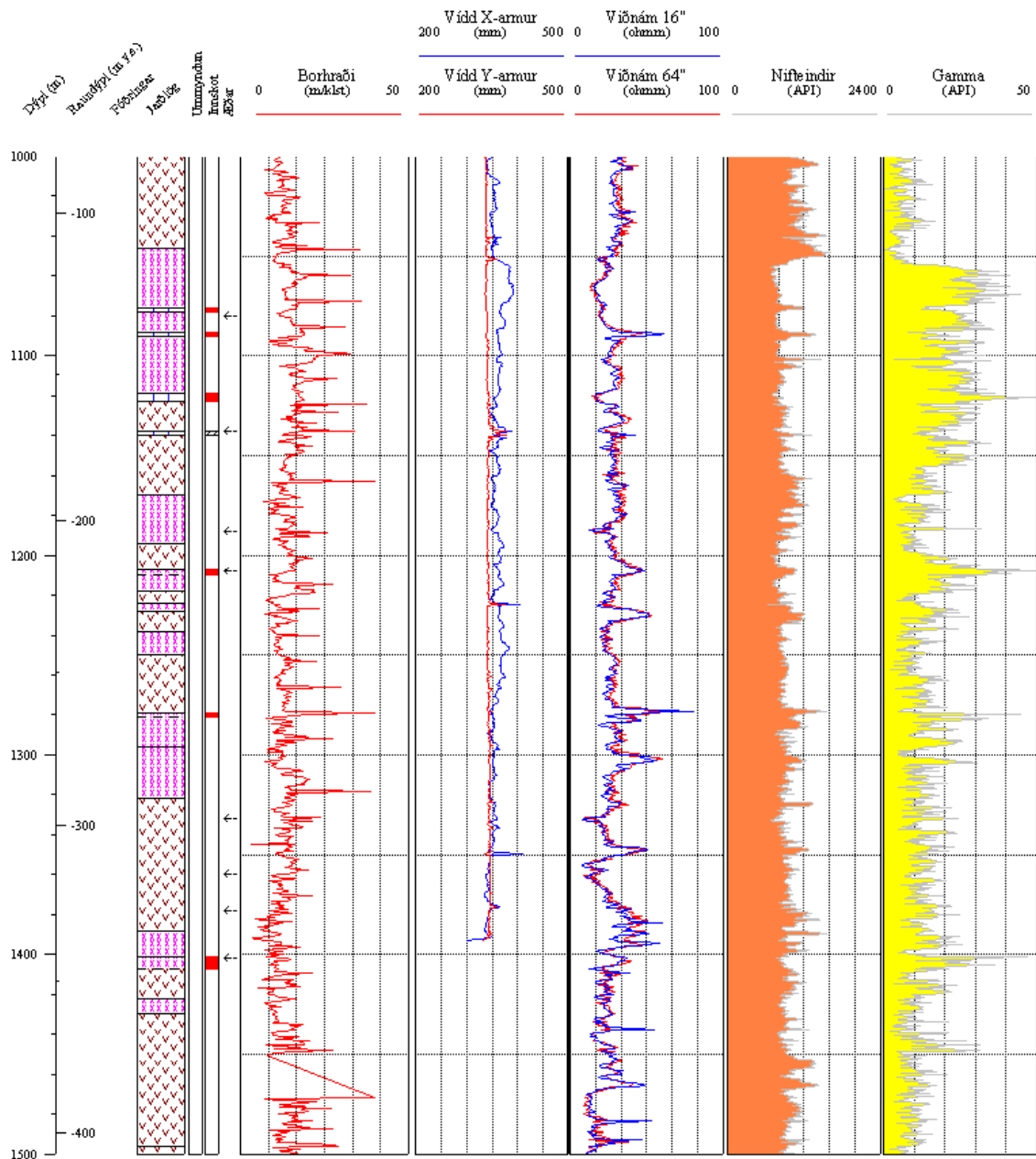
Á stöku stað eru þunn innskot af þróaðra bergi skorin, sér í lagi í holu HE-31, og sést það bæði í þunnsneið og svarfsýnum en einnig í jarðlagamælingum (sjá



HE-31 Skarðsmýrarfjall

janúar 2011

Staður: Skarðsmýrarfjall Bor: Sleipnir & Óðinn Skolvökví: Vatn & Loft Staðarnúmer: 95131
 Holunafn: HE-31 Djúptarbil: 1000-1500 m Verkluti: 3 áfangi Starfsmenn: SaOS



Mynd 4 fyrir HE-31 og Mynd 9 fyrir HE-33).

Túffið er nokkuð þétt, hvítummyndað og nánast hreint gler. Það er að mestu ummyndað í kalsít og kvars auk pýríts og leirs. Á um 1350 m í holu HE-31 og á um 1500 m í holu HE-33 eykst magn útfellinga og þar sjást túffkorn sem ummynduð eru í epidót.

Kristallaðri korn eru fín- til meðalkorna, nema innskot af þróaðri samsetningu sem eru oftast mjög fínkorna. Í kristallaðri kornum, sem að öllum líkindum eru hluti myndunarinnar, er plagíóklas

albítiseraður en einnig er mikil kalsítummyndun, m. a. á sprungum og rimum plagióklaskristallanna (aggressive calcite). Neðan 1350 m í HE-31 og neðan 1500 m í HE-33 sjást plagióklaskristallar í fremur glerríkum kornum sem ummyndaðir eru í epidót. Málmur er ummyndaður í sphene. Pýroxen er töluvert ummyndaður líka, aðallega í leir (klórít) en einnig sést aktinólít í nokkru magni. Töluvert sést af pýríti, en einnig ummyndunarsteindum á borð við prehnít, kvars, wairakít, epidót, aktinólít og klórít.

Innskot af þróaðri samsetningu í holu HE-31 voru skorin á 1122 m, 1188 m, 1208 m, 1278 m, 1402 m og 1504-1508 m, sem sjá má af gammamælingu á myndum



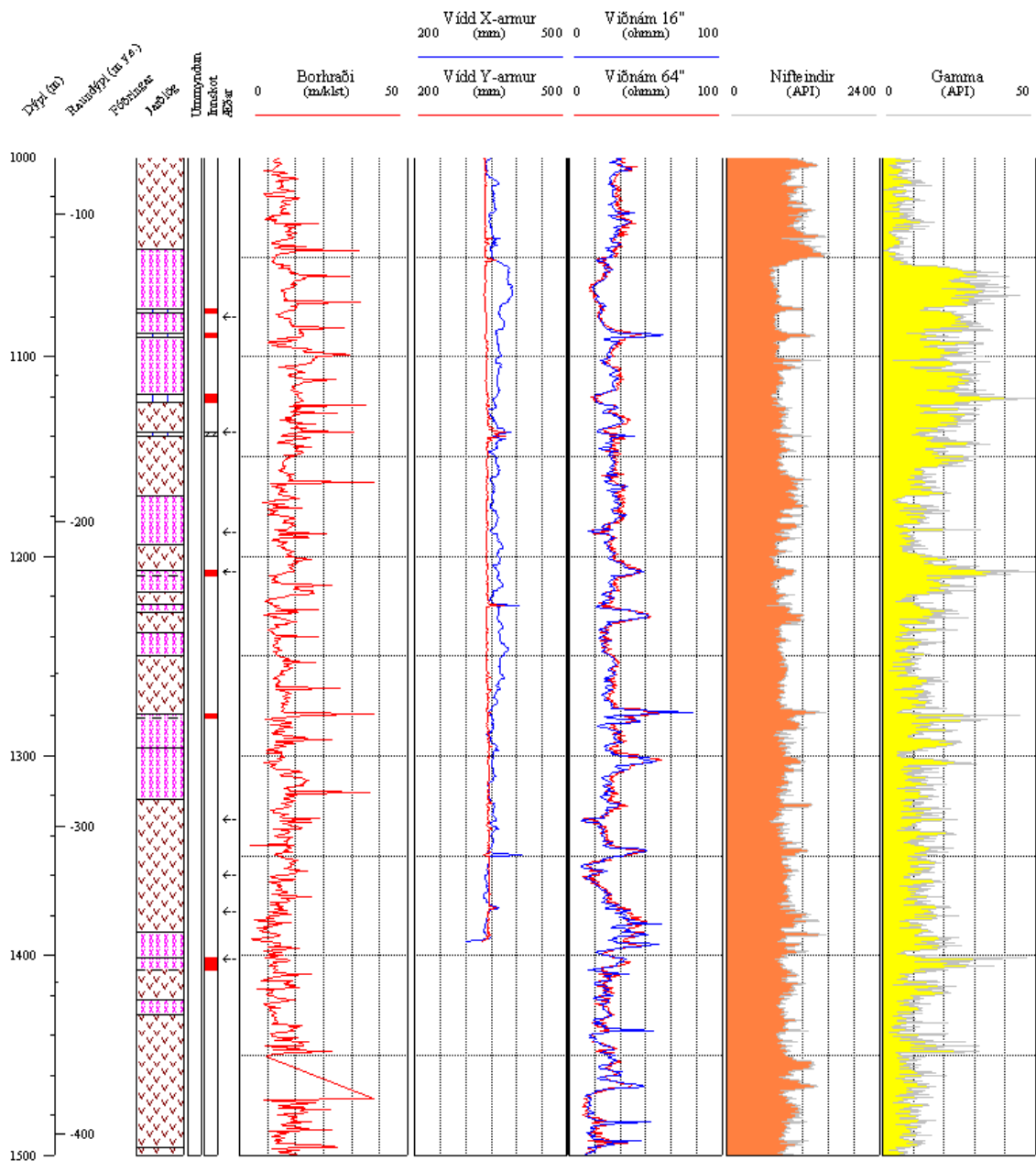
HE-31 Skarðsmýrarfjall

janúar 2011

Staður: Skarðsmýrarfjall
Holunafn: HE-31

Bor: Sleipnir & Óðinn Skolvöktvi: Vatn & Loft
Dýptarbil: 1000-1500 m Verkhlut: 3 áfangi

Staðarnúmer: 95131
Starfsmenn: SaOS



Mynd 4 og Mynd 5.

Auk þess voru basaltinnskot skorin á 1076 m 1088 m og 1138 m

Í HE-33 voru innskot af þróaðri samsetningu greind á 1048 m, 1496-1498 m og 1518 m og mögulega á 1562 m, og sjást þau í gammamælingu á Mynd 9 og **Error! Reference source not found.** Basaltinnskot voru greind á 1015 m, 1060-1065 m, 1088-1102, 1288-1300 m.

Allt skol tapaðist í holu HE-33 á 1790 m mældu dýpi. Þá var enn borað í móbergsmýndun VII, enda halli holunnar þá orðinn um 80°.

Hraunlagasyrpa I

HE-31: 1512-.,2034“ m/806-1233 m u. s.

Neðan móbergsmýndunarinnar er komið í hraunlagasyrpu í holu HE-31, líklegast af ólivín-þóleíft samsetningu. Mýndunin er blanda af fínkorna mjög ummynduðu basalti og töluvert ummynduðu fín-til meðalkorna basalti, í mismunandi hlutföllum. Erfitt er að segja til um uppruna þess síðarnefnda, þ. e. hvort um er að ræða innkotaberg eða grófkristallaðri hraunlög, nema hvort tveggja sé.

Fínkorna bergið er í meirihluta innan mýndunarinnar. Það er mjög ummyndað og töluvert málmríkt og er málmur ummyndaður í sphene. Plagíóklas er að mestu ummyndaður í albít en auk þess í klórít og kalsít.

Fín-meðalkorna bergið er mjög plagíóklas- og pýroxenríkt og er plagíóklas að mestu ummyndaður í albít en auk þess í kalsít og epidót. Pýroxen er að mestu ummyndaður í actinolít. Þetta berg er einkum áberandi efst í mýnduninni, niður á um 1650 m og er þá um 50% af sýnum. Neðan þess eykst magn útfellinga nokkuð og bergið er einnig ummyndaðra. Fín-meðalkorna bergið er um 20-30% af sýnunum niður á um 1900 m þar sem hlutfall þess eykst á ný, og er þá um 40%. Neðan þess og þar til svarf hætti að berast á 2034 m fer hlutur þess aftur minnkandi.

Einingin er nokkuð skorin af innkotum. Sjö innkot af þróaðri samsetningu eru að öllum líkindum skorin innan einingarnar; á 1608-1610 m, 1664-1666 m, 1678-1680 m, 1718-1726 m, 1750-1754 m, 1815-1817 m og 1838-1866 m (myndir Mynd 5 Mynd 6). Auk þess eru mögulega þrjú basaltinnskot skorin á 1772-1776 m, 1794-1796 m og 1882-1886 m.



Ummyndunarsteindir á þessum slóðum eru klórít, epidót, amfíból og stöku prehnít. Kalsít sést alltaf í einhverju magni. Einnig sáust apatítnálar á stöku stað, mögulega í tengslum við ísúr innskot.

Algjört skoltap varð á 2034 m dýpi í holu HE-31.





Berggerðir

	Hraunlagakargi
	Basalttúff
	Basaltbreksía
	Glerjað basalt
	Fín-meðalkorna basalt
	Meðal-grófkorna basalt
	Grófkorna basalt
	Ísúrt túff
	Ísúr breksía
	Ísúrt dul-meðalkorna berg
	Ísúrt grófkorna berg
	Súrt túff
	Súr breksía
	Súrt dul-meðalkorna berg
	Súrt grófkorna berg
	Jökulberg
	Eðjusteinn
	Sandsteinn
	Möl og steinar
	Svarf vantar




Innskot

	Innskot
	Hugsanlegt innskot

Ummyndunarstig

	Engin ummyndun
	Lítill ummyndun
	Meðal ummyndun
	Mikil ummyndun

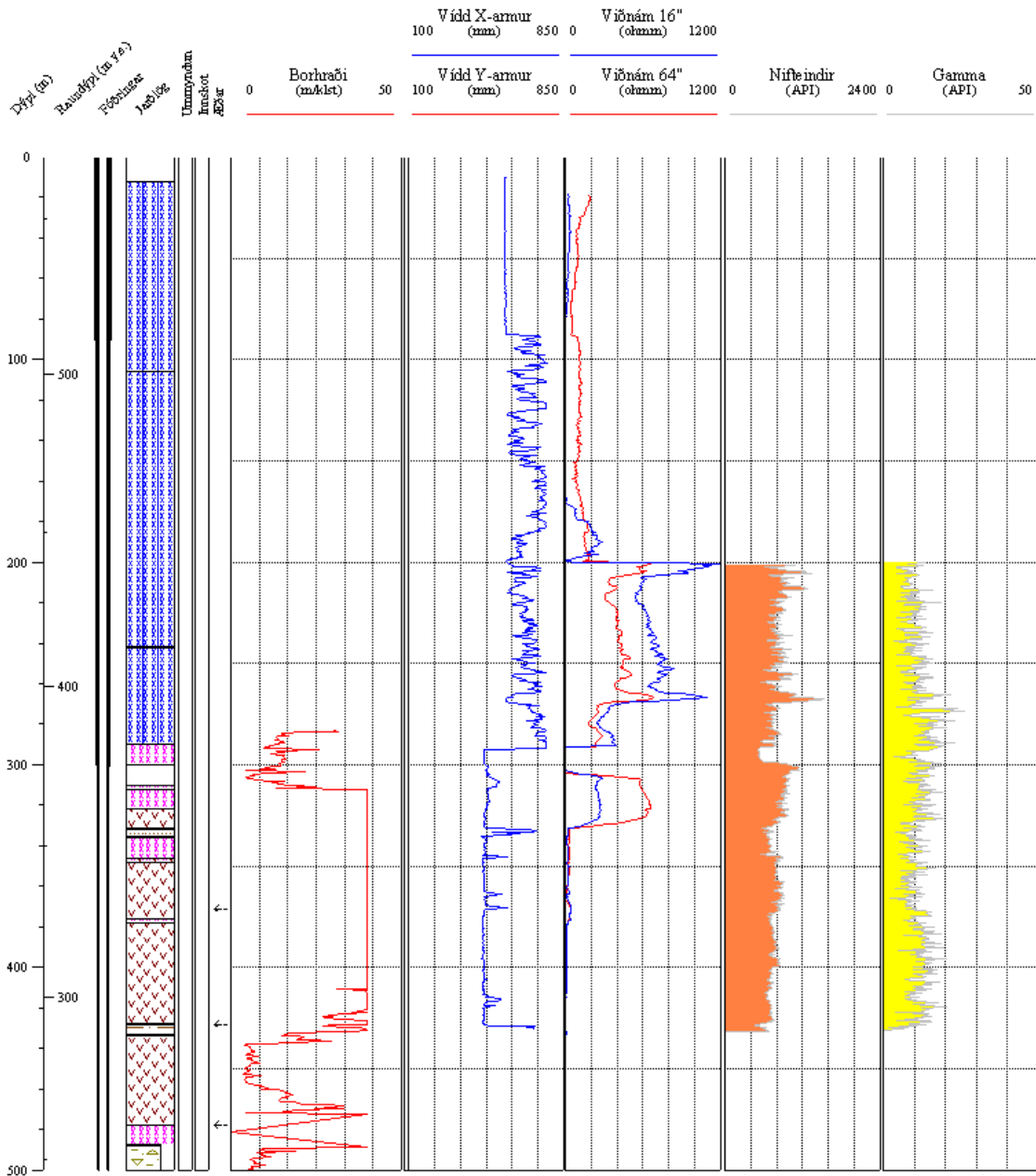
Vatnsæðar

	Lítill æð
	Meðal æð
	Stór æð

Mynd 1 Skýringar við jarðlagasnið.

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafni: HE-31

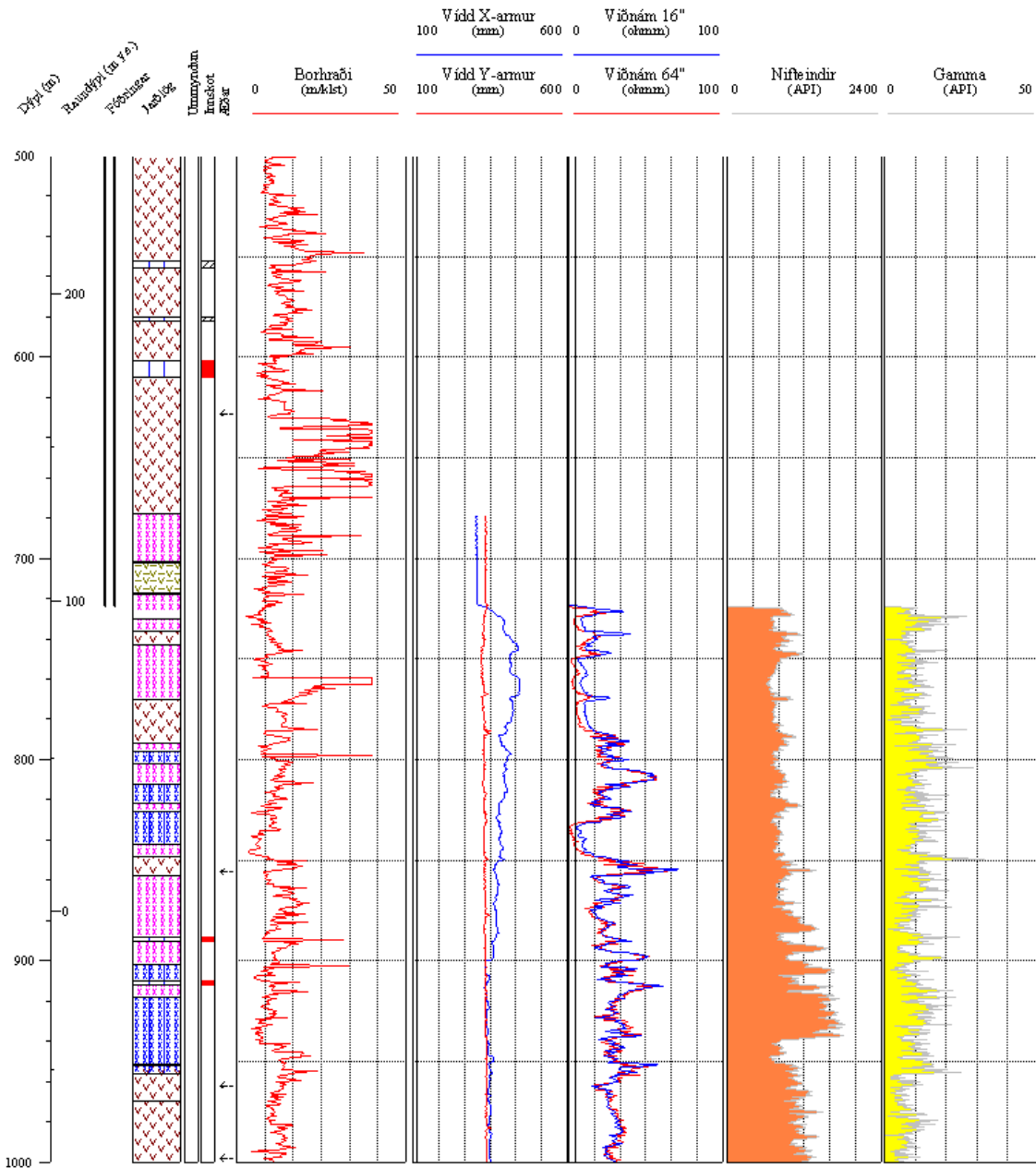
 Bor: Sleipnir & Óðinn
 Dýptarbil: 0-500 m
 Verkhúti: 3 áfangi

 Staðarnúmer: 95131
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 2 Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-31 frá 0-500 m mælt dýpi.

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafni: HE-31

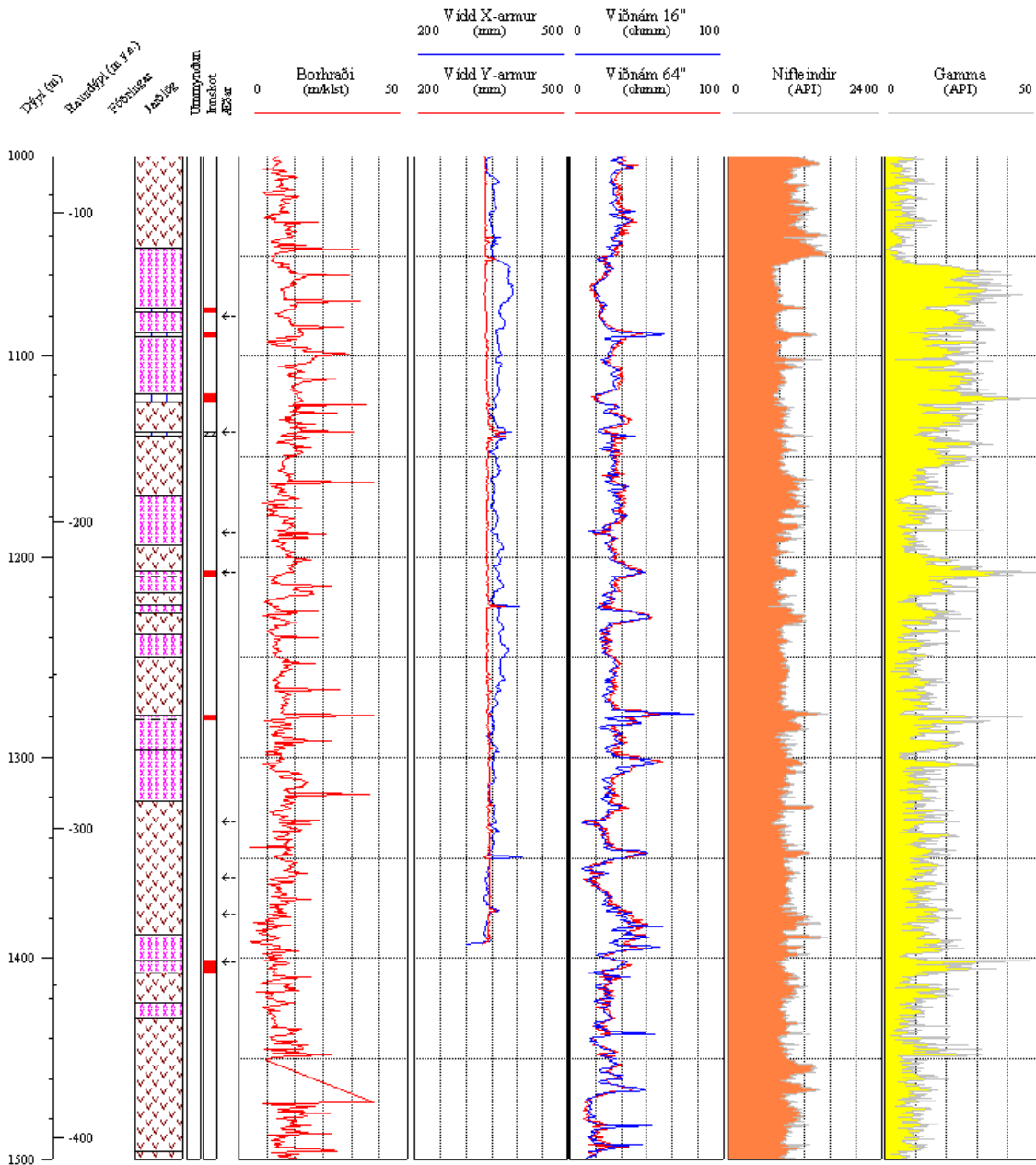
 Bor: Sleipnir & Óðinn
 Dýptarbil: 500-1000 m
 Verkhúfi: 3 áfangi

 Staðarnúmer: 95131
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 3. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-31, 500-1000 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafn: HE-31

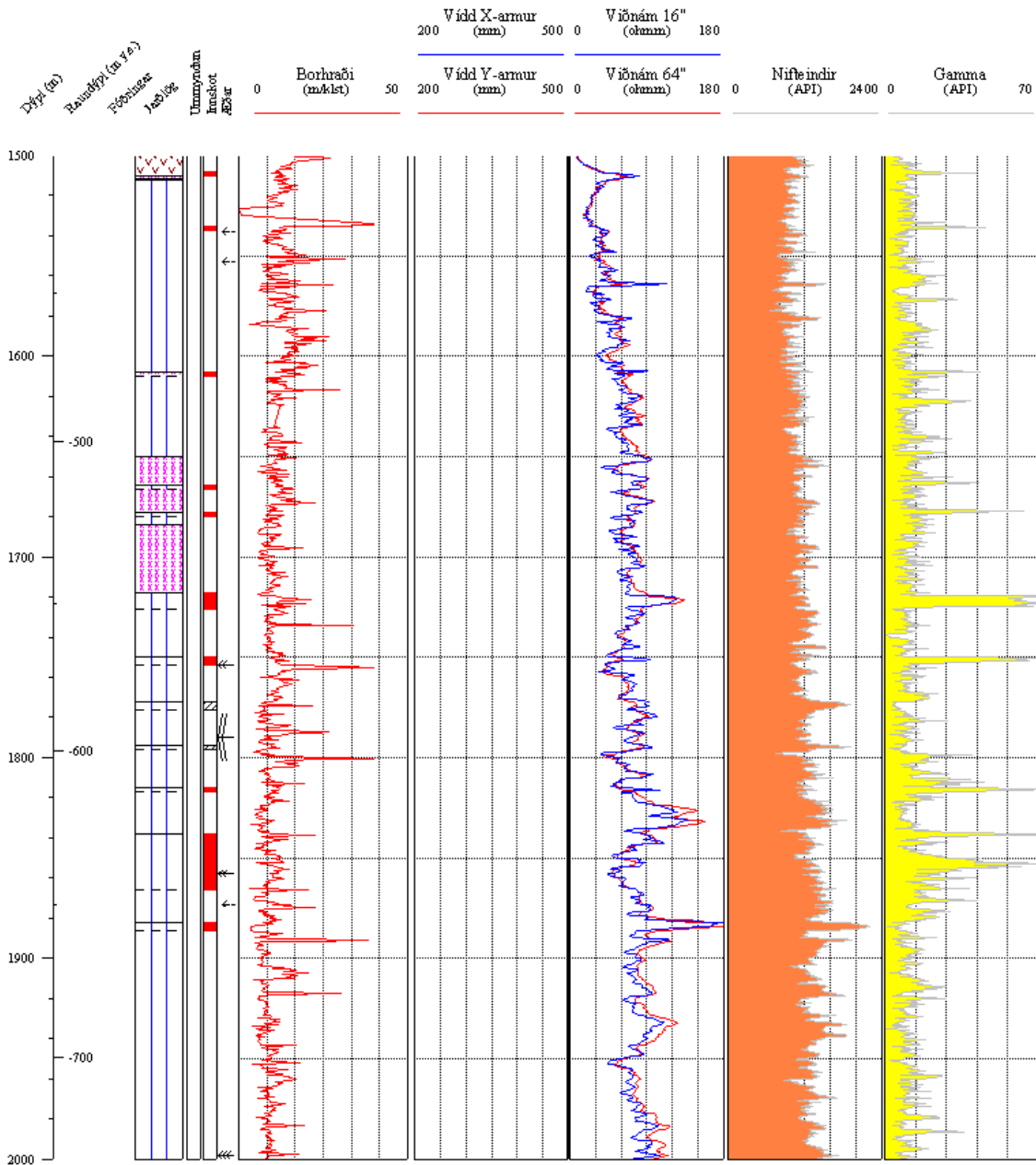
 Bor: Sleipnir & Óðinn Stolvökvi: Vatn & Loft
 Djúptarbil: 1000-1500 m Verklutfi: 3 áfangi

 Staðarnúmer: 95131
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 4. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-31, 1000-1500 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafni: HE-31

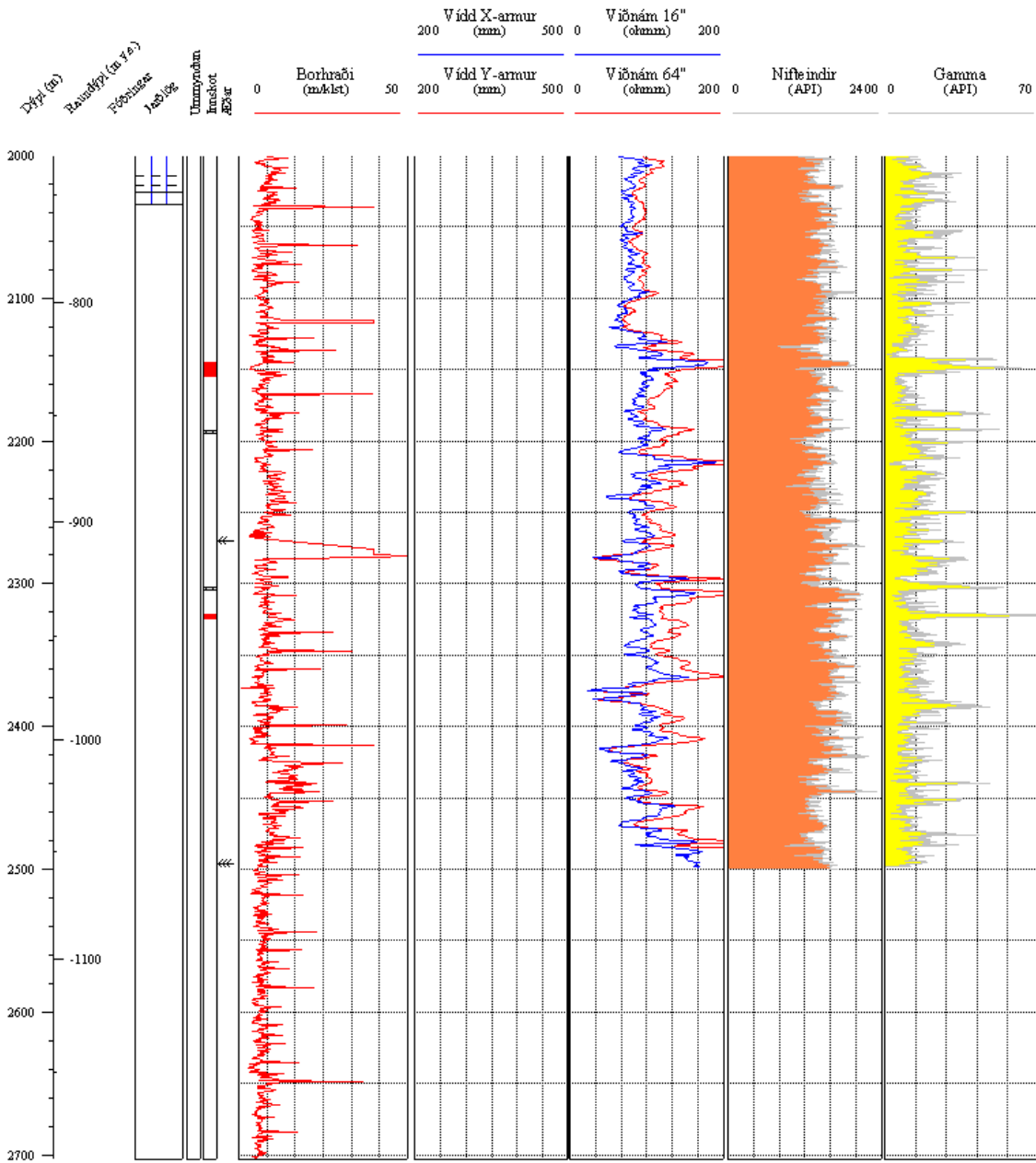
 Bor: Sleipnir & Óðinn
 Dýptarbil: 1500-2000 m
 Verklutfi: 3 áfangi

 Staðarnúmer: 95131
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 5. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-31, 1500-2000 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafni: HE-31

 Bor: Sleipnir & Óðinn
 Djúptarbil: 2000-2703 m
 Verkhúti: 3 áfangi

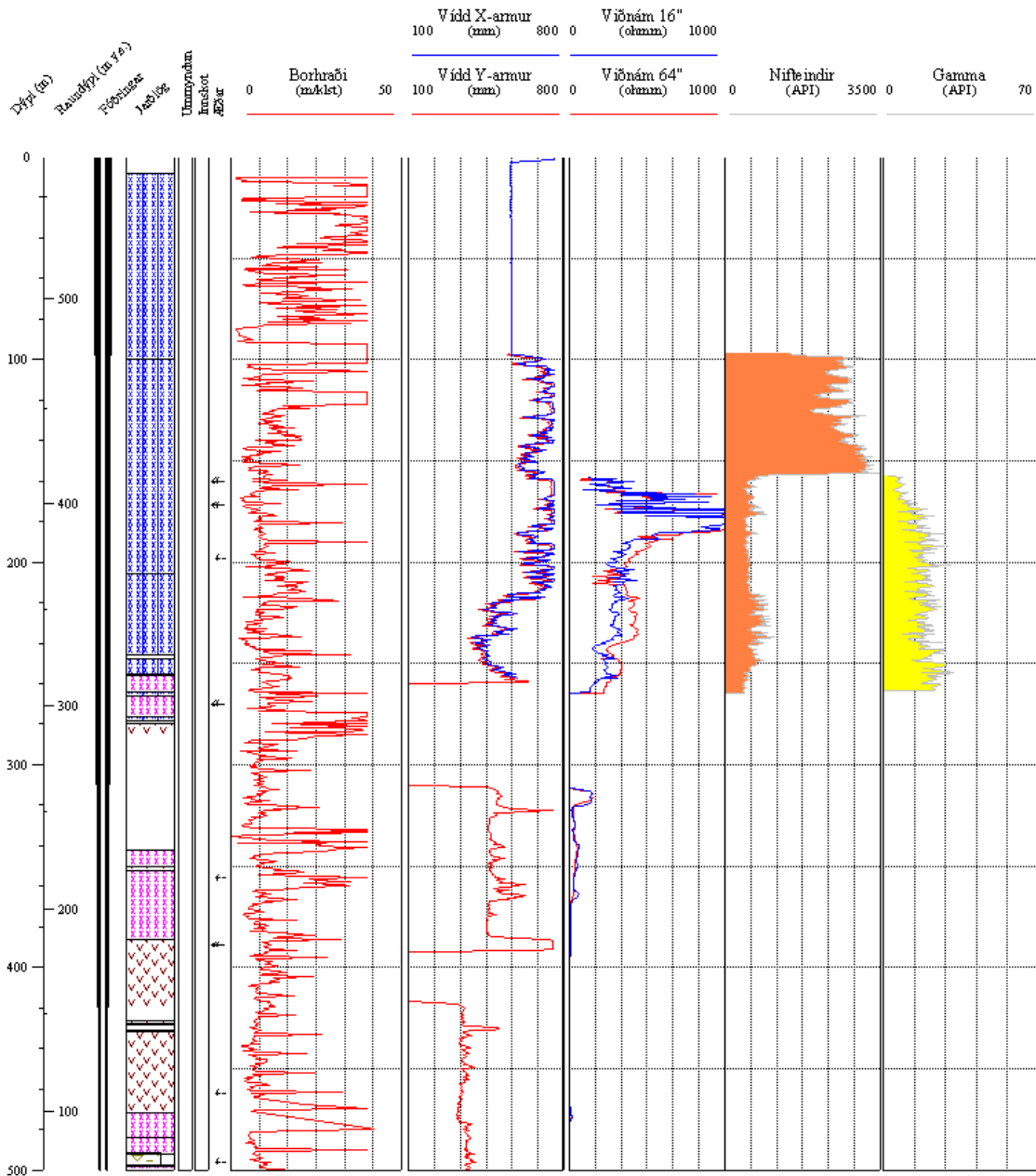
 Staðarnúmer: 95131
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 6. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-31, 2000-2703 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafn: HE-33

 Bor: Óðinn
 Djúptarbil: 0-500 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verklutli: 3. áfangi

 Staðarnúmer: 95133
 Starfsmenn: SaOS


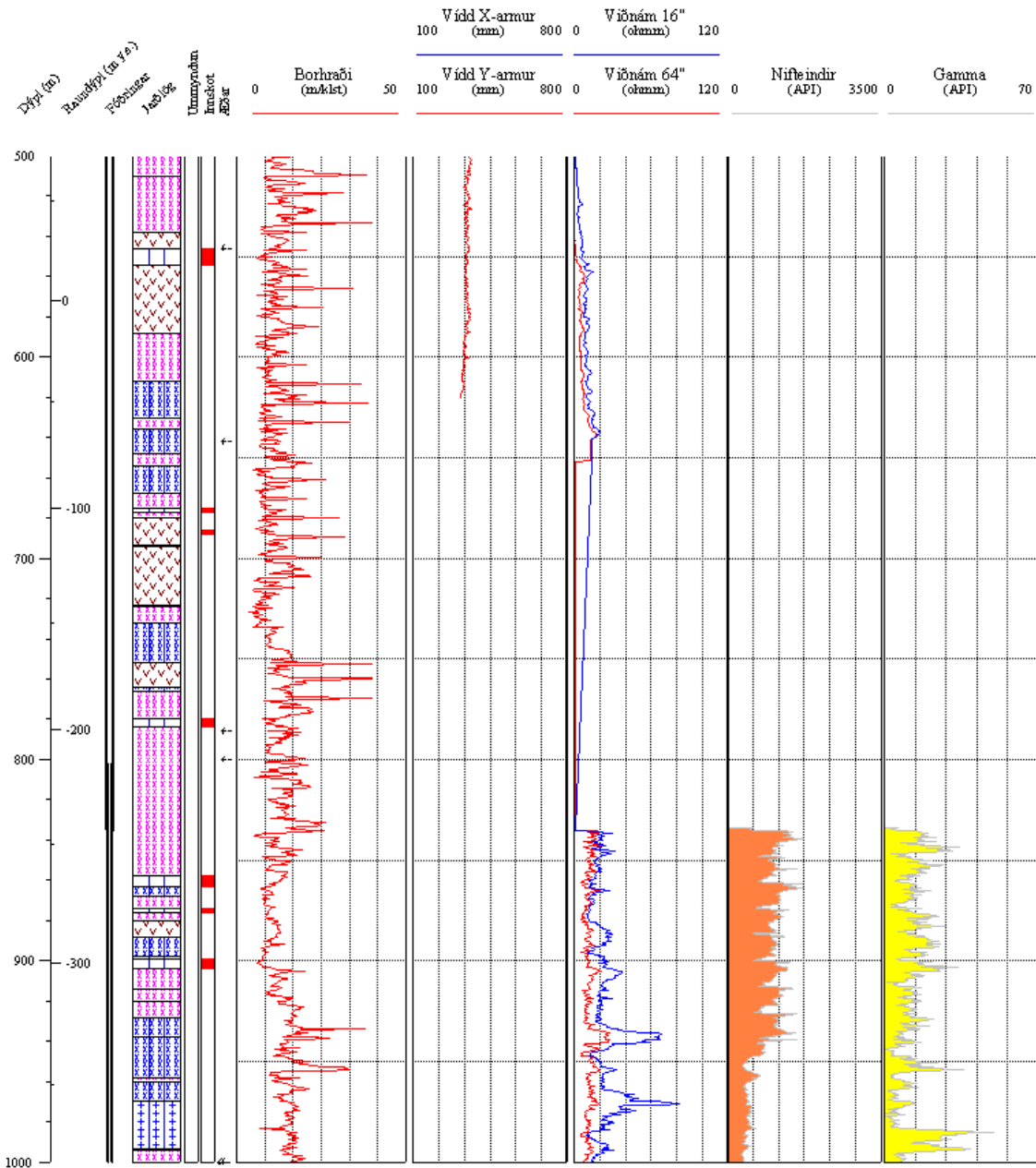
Mynd 7. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-33, 0-500 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
Holunafn: HE-33

Bor: Óðinn
Dýptarbil: 500-1000 m

Skolvökvi: Vatn/loft
Verkhúti: 3. áfangi

Staðarnúmer: 95133
Starfsmenn: SaOS



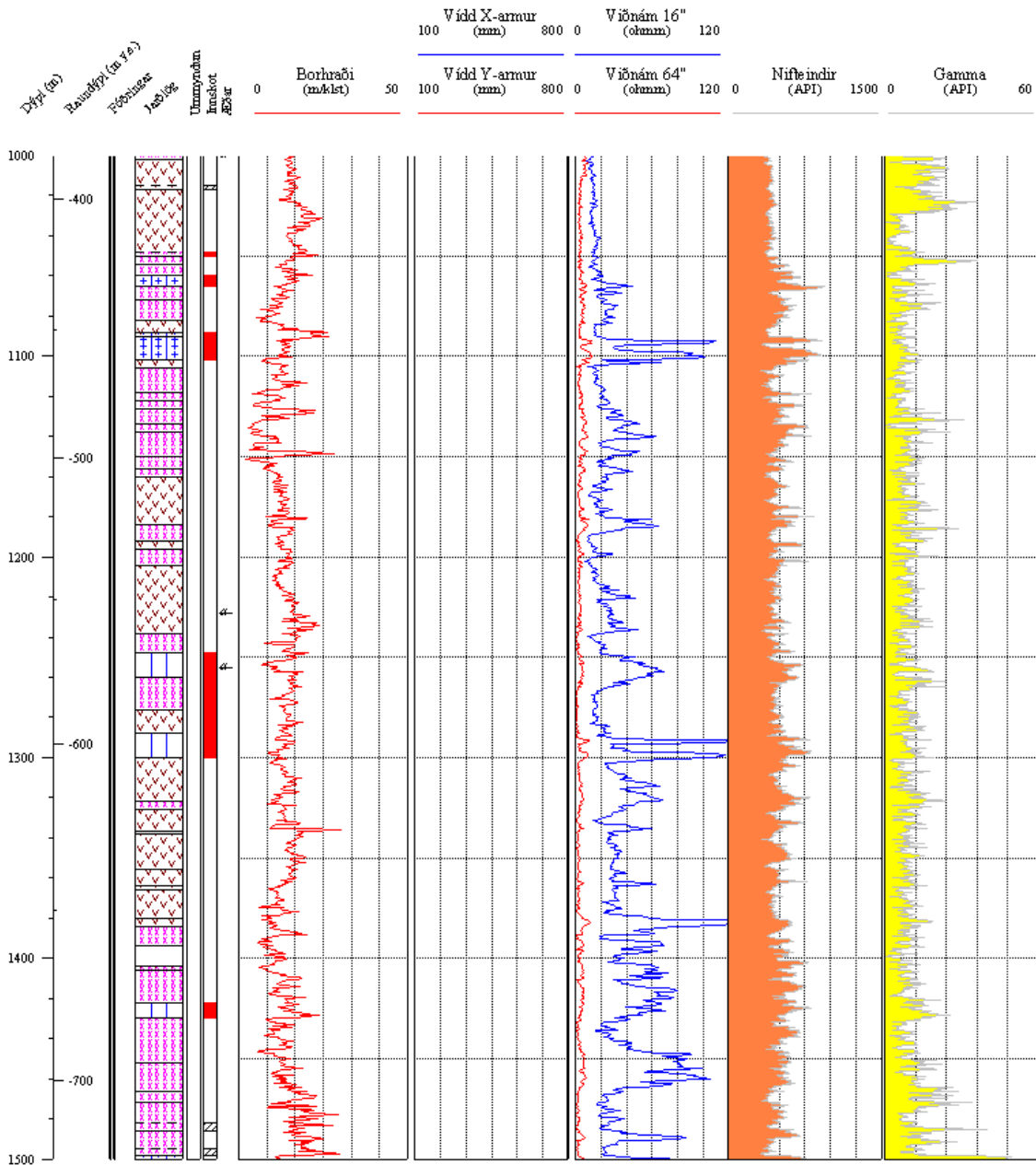
Mynd 8. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-33, 500-1000 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
Holunafn: HE-33

Bor: Óðinn
Dýptarbil: 1000-1500 m

Skolvökvi: Vatn/loft
Verkhlufti: 3. áfangi

Staðarnúmer: 95133
Starfsmenn: SaOS

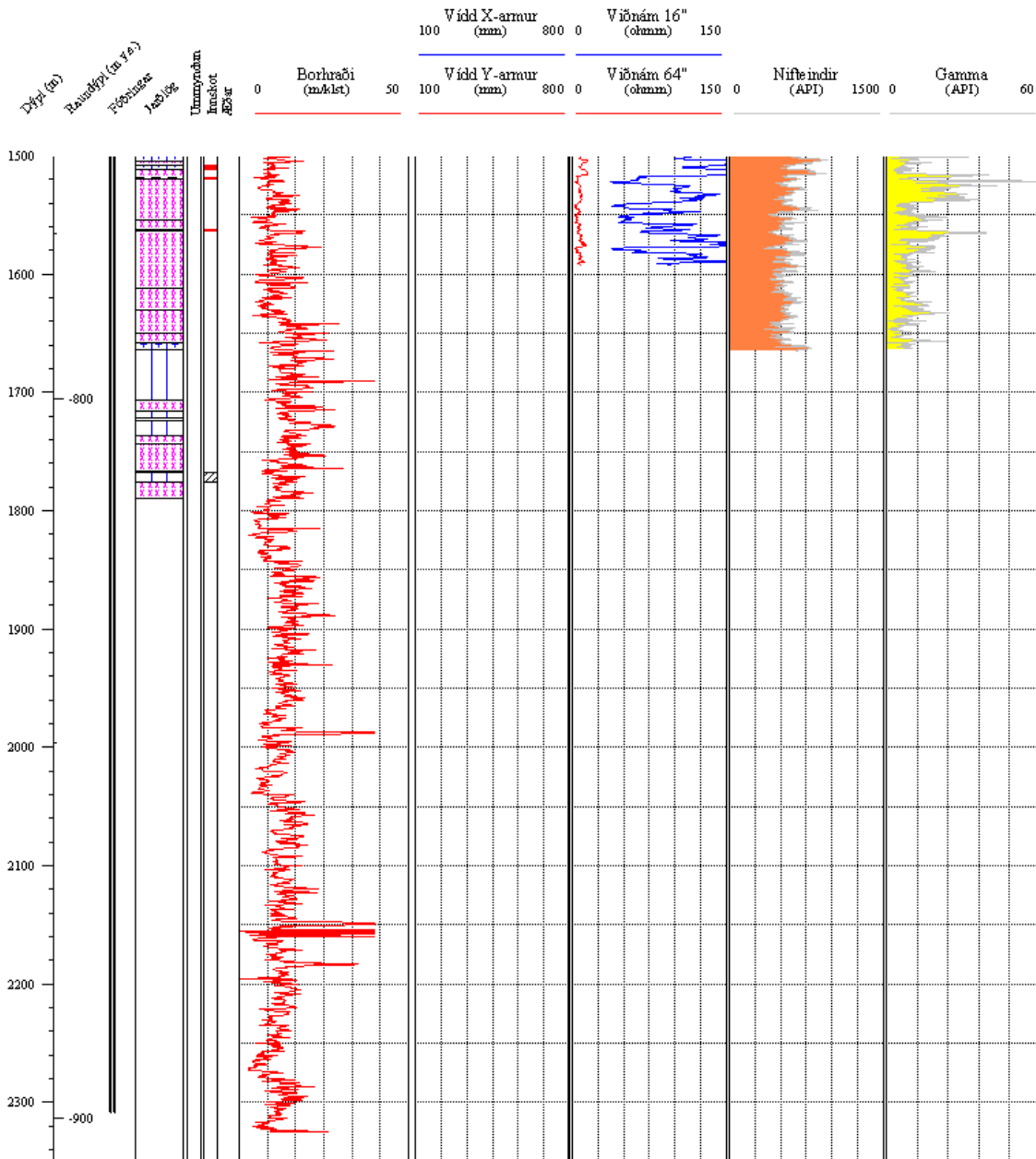


Mynd 9. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-33, 1000-1500 m mælt dýpi

Staður: Skarðsmýrarfjall
 Holunafni: HE-33

 Bor: Óðinn
 Djúptarbil: 1500-2325 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlufti: 3. áfangi

 Staðarnúmer: 95133
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 10. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-33, 1500-2325 m mælt dýpi

Jarðlög í HE-46

Skarðsmýrarfjallsmyndun

0-36 m/309-273 m y. s.

Efsta myndunin í HE-46 er ferskleg ólivín-þóleiít móbergsmýndun, sú sama og borað er í efst í HE-31 og HE-33, Skarðsmýrarfjallsmyndun. Myndunin er bólstrabergsmýndun, blanda af kristölluðu, blöðróttu, meðal-til fínkornóttu bergi og fersku gleri og er hún glerríkari efst en kristallaðri þegar neðar dregur, frá um 20 m dýpi. Myndunin er áberandi plagíóklasdílótt auk stöku ólivíndíla og sjást dílar oft sem hópdílar (*e. glomeroporphyritic*).

Frostrósakristöllun er áberandi. Plagíóklasdílarnir eru oft mjög stórir, og algengara er að sjá „kassalagaðri“ díla en listalaga, þó hvort tveggja sé til staðar. Bæði plagíóklas- og ólivíndílar eru í greinilegu ójafnvægi við kvikuna, en það sést á því að þeir eru sprungnir, étnir og subhedral eða jafnvel anhedral. Iddingsítummyndun sést á sprungum og rimum ólivínkristalla.

Ummyndun er nánast engin og lítið er um útfellingar, og eru holrými að mestu ófyllt en nokkuð ber þó á límóníti,

Setlag 1

36-38 m/273-271 m y. s.

Setlag markar skilin milli móbergsmýndunar I og II. Um er að ræða grunnborið settúff með stærri rúnnaðum kornum, bæði kristölluðum kornum og glerkornum.

Móbergsmýndun 1

38-62 m/271-247 m

Neðan setlagsins er komið í þunna móbergseiningu sem einkennist af ísúrri breksíu. Svarf er mjög blandað á þessum slóðum, bæði settúffi og bólstrabreksíu að ofan.

Breksían er blanda af frauðkenndu, gráleitu gleri blönduðu svörtum, dulkornóttum bergbrotum og ljósgráum fín-dulkornóttum bergbrotum. Ljósgráu kornin eru smáblöðrótt og eru blöðrur oft teygðar.

Smáir plagíóklas og pýroxendílar sjást í þunnsneið og er pýroxen nokkuð grænleitur og lithverfur, og því líklegast um ægirín-ágít að ræða. Kristölluð korn eru nokkuð fínkorna. Grunnmassi þeirra er mjög plagíóklasríkur og sýna plagíóklasnalar mjög greinilegan flæðistrúktúr.

Berg er nánast ekkert ummyndað, utan stöku glerkorn sem farið er að ummyndast í leir og kalsít. Breksían er verulega holufyllt, að mestu af kalsedón og leir (smektít).

Hraunlög I, H1

62-98 m/247-211 m y. s.

Neðan móbergsmyndunarinnar er komið í fín- til meðalkorna, nokkuð einsleit ólivín-þóleiít hraunlög á 62 m. Myndunin er nánast dílalaus en mikið ber á plagíóklas í grunnmassa og oft má sjá votta fyrir flæðistrúktúr. Á jöðrum myndunarinnar er borað í gjallkenndan og oxaðan hraunlagakarga en auk þess er borað gegnum nokkuð þykkt kargalag á um 80 m dýpi. Fóðringardýpi fyrir yfirborðsfóðringu holunnar liggur á 83,5 m dýpi í mynduninni.

Bergið er fersklegt að sjá, plagíóklas, pýroxen eða málmsteindir eru nánast alveg óummyndaðar, og er bergið töluvert málmríkt. Ólivín er nánast ferskt efst fyrir utan smektítlegan leir í sprungum, en er farið að láta á sjá neðst í mynduninni og er þá að talsverðu leyti ummyndað í leir og kalsít. Það sama má segja um glerkorn, sem eru nánast fersk efst í mynduninni að undanskilinni palagónítumyndun, en eru farin að ummyndast í leir og kalsít þegar botn myndunarinnar nálgast.

Ummyndunarsteindir eru kalsíthnúðar, límonít, ópall auk þess sem smektít skán sést í porum. Fyrstu zeólítarnir sjást á þessum slóðum, kabasít og thomsonít á um 90 m dýpi.

Móbergsmyndun 2

98-178 m/211-131 m y. s.

Á um 100 m dýpi er komið í móbergsmyndun sem samanstendur aðallega af dökkbrúnleitu og frauðkenndu túffi. Túffið er mjög ferskt niður á um 150 m dýpi þar sem ummyndun eykst nokkuð og túffið verður grænleitara. Myndunin er stakdílótt og ber þá mest á plagíóklaslistum í mismiklu mæli en einnig sjást smáir ólivíndílar.

Á 162 m dýpi kemur inn slangur af dökkleitu, kristölluðu, þóleiítlegu bergi og flokkast bergið þá til túffríkrar breksíu.

Gler er nokkuð palagoniserað og einnig er nokkur leir- og kalsítumyndun. Einingin er nokkuð sprungin og eru sprungufyllingar kalsít og smektít.

Ummyndunarsteindir eru aðallega smektít, límonít, kalsít og kalsedón en einnig zeólítar; efst kalsedón og thomsonít en einnig analsím, skólesít og mesólít þegar neðar dregur. Porur eru að mestu leyti fylltar, aðallega af leir og kalsíti en einnig má sjá kalsedón.

Setlag 2

178-182 m/131-127 m y. s.

Setlag markar neðri mörk móbergsmyndunar 2. Um er að ræða lagskiptan sand- og eðjustein, en bæði sjást mjög fínkorna setkorn og grófari.

Setlagið sést í víddarmælingu, enda er það mýkra en myndanirnar ofan og neðan og skolast því auðveldlega burt við borun og myndar skáp.

Hraunlög II, H2 – Húsmúli

182-306 m/131-3 m y. s.

Komið er í hraunlagasyrpu á 182 m dýpi, líklegast þá dyngjusyrpu sem kennd er við Húsmúlann. Hún er talin vera um hundrað þúsund ára gömul og elst jarðmyndana á yfirborði í vestanverðum Henglinum en hún hverfur af yfirborði í stóru misgengi vestan við holuna (*Benedikt Steingrímsson o. fl., 1993, Bjarni Reyr Kristjánsson, 2003*).

Um er að ræða tiltölulega einsleit, oxuð og kargakennd hraunlög, oft nokkuð blöðrótt.

Plagíóklasdílar eru mjög áberandi, misstórir og nokkuð sprungnir. Auk þess sjást smáir pýroxen- og ólivíndílar. Plagíóklasdílarnir mynda oft hópdíla (*e. glomeroporphyritic*) og sjást bæði plagíóklashópdílar og plagíóklas-, ólivín og pýroxenhópdílar.

Hraunlagasyrpan er glerríkari efst en kristallaðari þegar neðar dregur, frá um 210 m dýpi. Bergið er fín- til meðalkorna ólivín þóleiít.

Holrými eru að miklu leyti fyllt smektíti, kalsíti, kalsedón og zeólítum; skólesít, mesólít, stilbít, heulandít og analsím eru þar mest áberandi. Gler er nokkuð ummyndað í palagónít og smektít og má sjá iddingsít á rimum ólivínkristalla, en annars er ásýnd bergsins nokkuð ferskleg.

Móbergsmyndun 3

306-472 m/3 m y. s. -162 m u. s.

Neðan hraunlagasyrpu er komið í stakdílotta, túffríka móbergseiningu. Efsti hluti myndunarinnar samanstendur af bólstrabreksíu; blöndu af kristölluðu ólivín þóleiíti/þóleiíti og grænummynduðu túffi. Dílar eru fáir, en áberandi og sjást oft í þyrpingum (hópdílar).

Frá um 330 m verður myndunin kristallaðri og flokkast á þessu dýptarbili sem bólstraberg, og sést það glögglega í jarðlagamælingum sem hækkun í nifteindasvörun (**Error! Reference source not found.**). Fóðringardýpi fyrir öryggisfóðringu var ákvarðað á 338 m dýpi í holunni í nokkuð fersklegri bólstrabreksíu.

Á 349-355 m er meðalkorna innskot skorið. Það er jafnkorna og mjög plagíóklasríkt.

Neðan þess samanstendur myndunin af bólstrabergi eða bólstrabreksíu, fyrir utan kafla á 430-446 m dýpi þar sem túfflinsa er skorin.

Efst í mynduninni eru pýroxen og málmsteindir enn fersk. Gler og ólivín eru nánast að fullu ummynduð en plagíóklas byrjað að ummyndast bæði í kalsít og albít. Helstu ummyndunarsteindir

á þessum slóðum eru smektít, kalsít, pýrít og zeólítar. Frá um 420 m dýpi sést kvars sem sprungufylling.

Móbergsmýndun 4

472-628 m/162-312 m u. s.

Á 472 m dýpi breytist ásýnd móbergsins þegar komið er niður úr hópdlóttu bólstrabergi í nánast dílalausa, mjög sprungna móbergseiningu sem samanstendur túffi og breksíulögum. Efsti hluti myndunarinnar samanstendur af breksíu en komið er í túff á um 490 m.

Túff er ríkjandi niður á um 520 m en á 522-526 er meðalkorna, plagioklasríkt innskot skorið.

Neðan þess eru sýni töluvert blönduð innskotabergi en flokkast sem breksía niður í botn myndunarinnar á 628 m dýpi.

Móbergsmýndunin er töluvert sprungin, og ber mikið á sprungufyllingum neðan 400 m.

Ummyndun eykst töluvert innan myndunarinnar og á 470 m dýpi er komið í blandlagsleir. Sphenumyndun á málm er þá hafin auk þess sem pýroxen er að nokkru leyti farið að ummyndast í leir og kalsít.

Við botn myndunarinnar eru helstu ummyndunarsteindir blandlagsleir, töluvert kalsít og analsím.

Laumontít sést á 588 m dýpi, kvars á 534 m og wairakít frá 620 m auk prehnítvotts. Á 620 m dýpi er klórít fyrst greint í þunnsneið og á 628 m dýpi með XRD-greiningu.

Hraunlög III, H4

628-766 m/312-435 m u. s.

Komið er í hraunlagasyrpu á 628 m dýpi. Efst í mynduninni er um að ræða meðalkorna, oxuð og nokkuð glerrík ólivín-þóleiít hraun í ætt við þau sem oft sjást í dyngjusyrpum. Nokkuð ber á plagíóklasdílum og einnig sést votta fyrir ólivíndílum sem þó eru að fullu ummyndaðir í leir. Þegar neðar dregur í staflanum er borað í nokkur fínkornóttari hraunlög sem mögulega eru af þóleiít-samsetningu.

Þarna er líklegast um að ræða sömu hraunlagasyrpu og kemur fyrir á svipuðu dýpi í holum KhG-1 og HE-8 og kallast þar H4 (*Benedikt Steingrímsson. 1993, Bjarni Reyr Kristjánsson, 2003*).

Einingin er nokkuð ummynduð. Gler er að mestu ummyndað í leir, en einnig í kalsít og kvars.

Ólivín er nánast að fullu ummyndað í leir og plagíóklas nokkuð albítiseraður. Pýroxen og málmsteindir eru enn nokkuð fersk að sjá.

Töluvert er um útfellingar efst í staflanum og ber þá mest á epidóti (sést fyrst á 630 m), laumontíti, kvars og wairakíti en kalsít sést enn í nokkru magni og yfirprentar það oft epidótkristallana, sem eru frekar ljótir að sjá. Einingin er nokkuð sprungin og sést kalsít aðallega sem sprungufylling.

Töluvert er einnig um leir. Magn útfellinga minnkar þegar neðar dregur í staflanum.

Móbergsmyndun VII

766-1222 m/435-839 m u. s.

Á 766 m dýpi er komið í móbergseiningu. Um er að ræða dílalaus myndun með dæmigerð einkenni ólivín-þóleíts. Einingin er túffrík og einkennist af þéttu, ummynduðu túffi og breksúlögum.

Efri hluti myndunarinnar einkennist af mjög ummynduðu, dílalaus túffi en einnig eru þunnar breksúlinsur skornar. Á um 900 m dýpi eykst hlutur kristallaðra korna nokkuð og flokkast myndunin þá sem túffrík breksía. Aftur eykst hlutur túffs á um 940 m dýpi en á um 980 m er aftur komið í breksíu eða bólstraberg, en á þeim slóðum er fóðringardýpi fyrir vinnslufóðringu holunnar, á 1032 m dýpi.

Neðan hennar einkennist myndunin af þéttu, ummynduðu túffi. Á um 1070 m dýpi er túffið nokkuð blandað dökku, fínkorna basalti sem líklega er innskotaberg. Toppur í niftenda- og viðnámsmælingu styðja þá kenningu.

Á 1128 m sést toppur í gammamælingu sem bendir til þess að þunnt innskot með þróaðri samsetningu hafi verið skorið. Ekki varð þó vart við þróaðra berg í sýnum.

Hraunlög IV

1222-2744 m/839-2219 m u. s.

Komið er í kristallað, mjög ummyndað berg á 1222 m. Þarna er líklegast um hraunlög að ræða þó ekki sé loku fyrir það skotið að um bólstraberg sé að ræða. Svarfsýni á þessum slóðum eru mjög fínkorna.

Hraunlögin eru fín- til meðalkorna og kolummynduð. Á um 1500 m dýpi eykst ummyndun töluvert og sést mikið af epidóti og wollastóníti á þeim slóðum. Bergið er almennt fínkornóttara á þessu dýpi og allt niður á um 1800 m dýpi þar sem bergið verður aftur nokkuð grófara í korninu. Ummyndunarsteindir á þessum slóðum eru auk epidóts og wollastóníts kvars, klórít, aktinólít og prehnít auk þess sem kalsít er alltaf viðloðandi í einhverju magni.

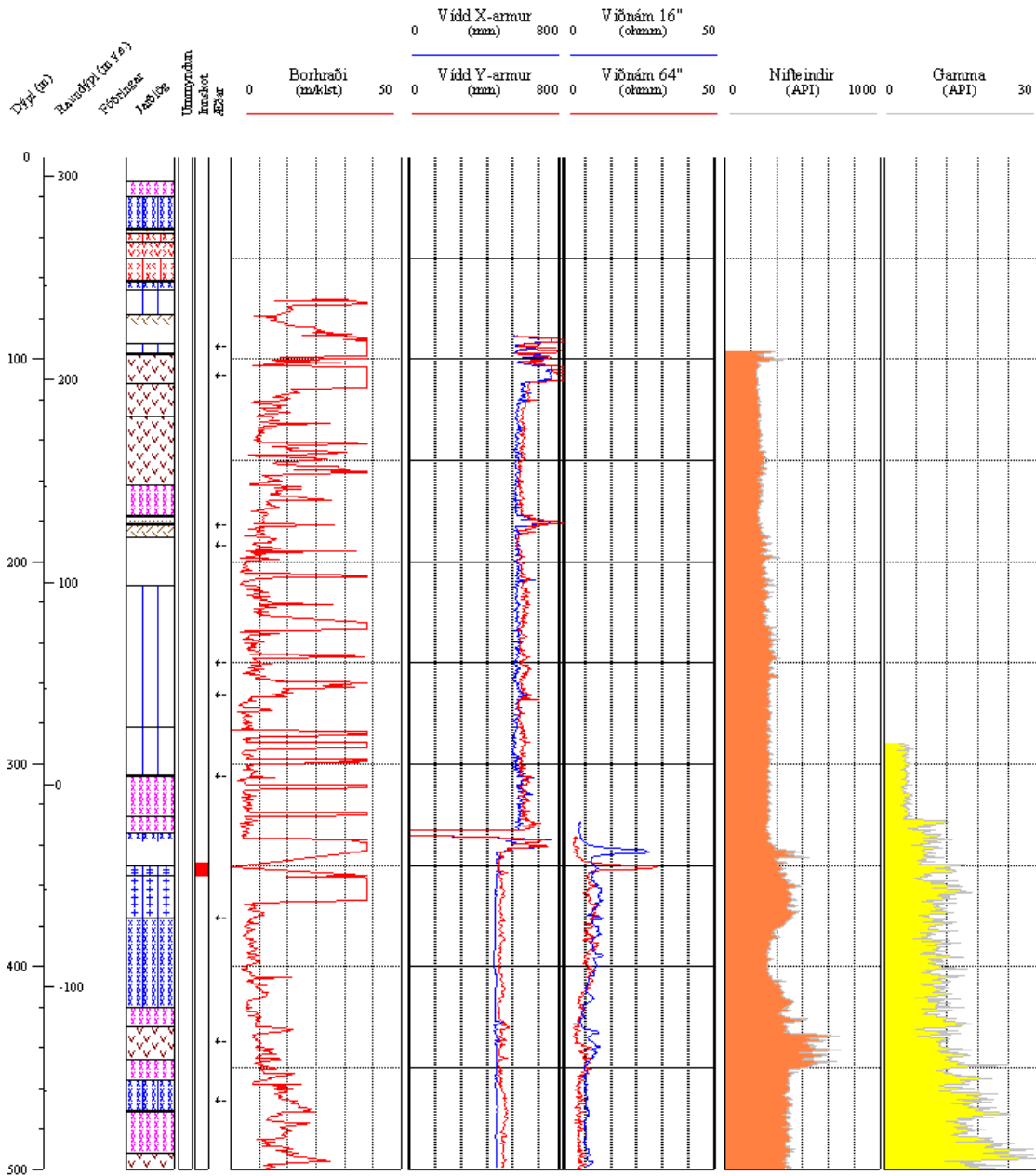
Á 2140-2164 m dýpi er nokkuð grófkornótt myndun skorin, mjög plagíóklas- og pýroxenrík. Athygli vekur hversu ferskur plagíóklasinn er meðan pýroxen er nánast alltaf ummyndað í actinólít. Þarna er mögulega um gabbróinnskot að ræða. Á 2352-2437 m er viðlíka myndun skorin, aftur á 2548-2652 m og frá 2640 m og niður í botn.

Svarfheimta á þessum slóðum var mjög gloppótt og bárust svarfsýni stopult frá tæplega 2200 m dýpi. Sýni bárust þó með hléum allt niður í botn holunnar á 2744 m.

Staður: Sleggjubeinsdalur
 Holunafni: HE-46

 Bor: Týr
 Djúptarbil: 0-500 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verklutfi: 3. áfangi

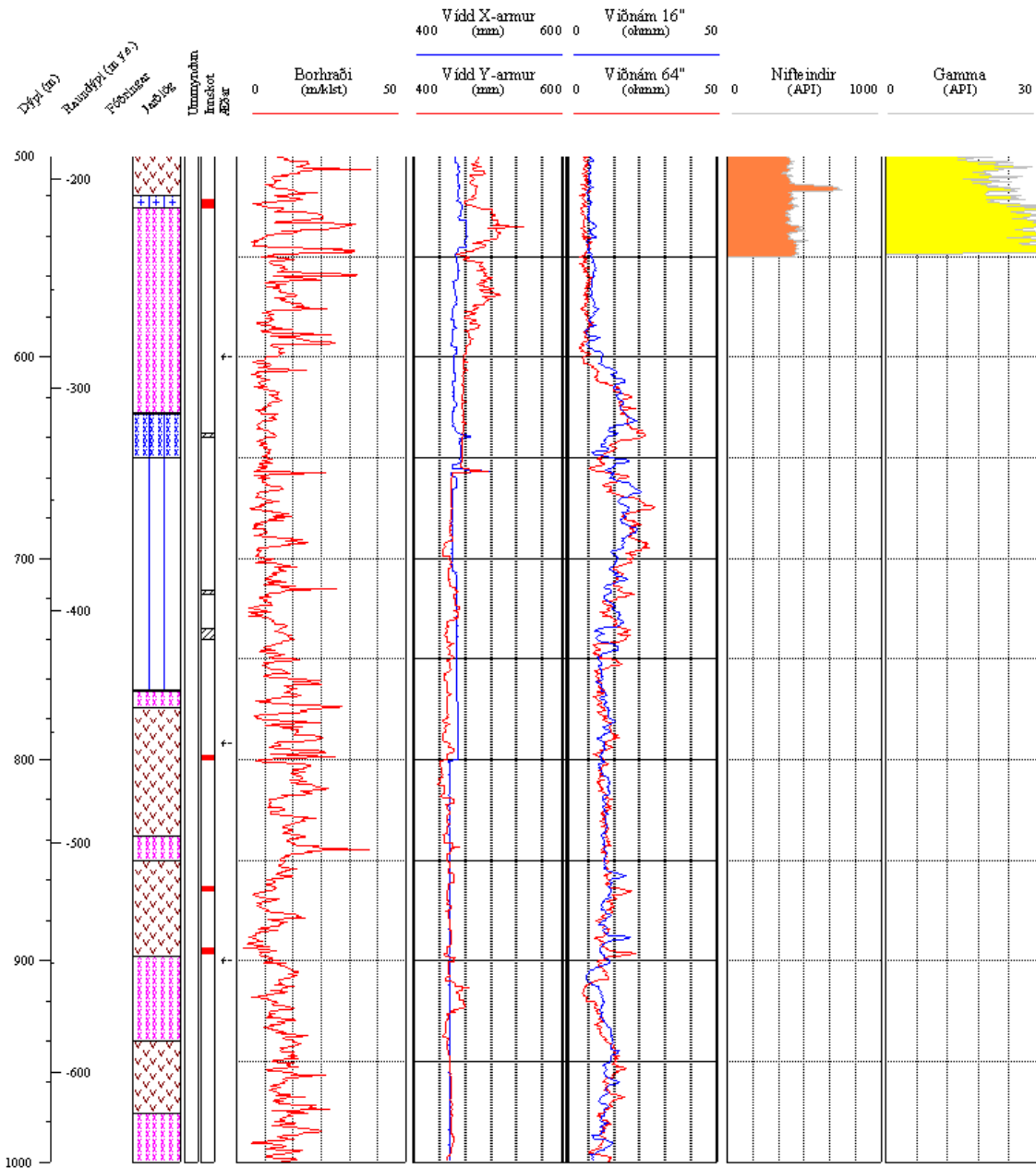
 Staðarnúmer: 95146
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 11. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-46 frá 0-500 m mælt dýpi

Staður: Sleggjubeinsdalur
 Holunafni: HE-46

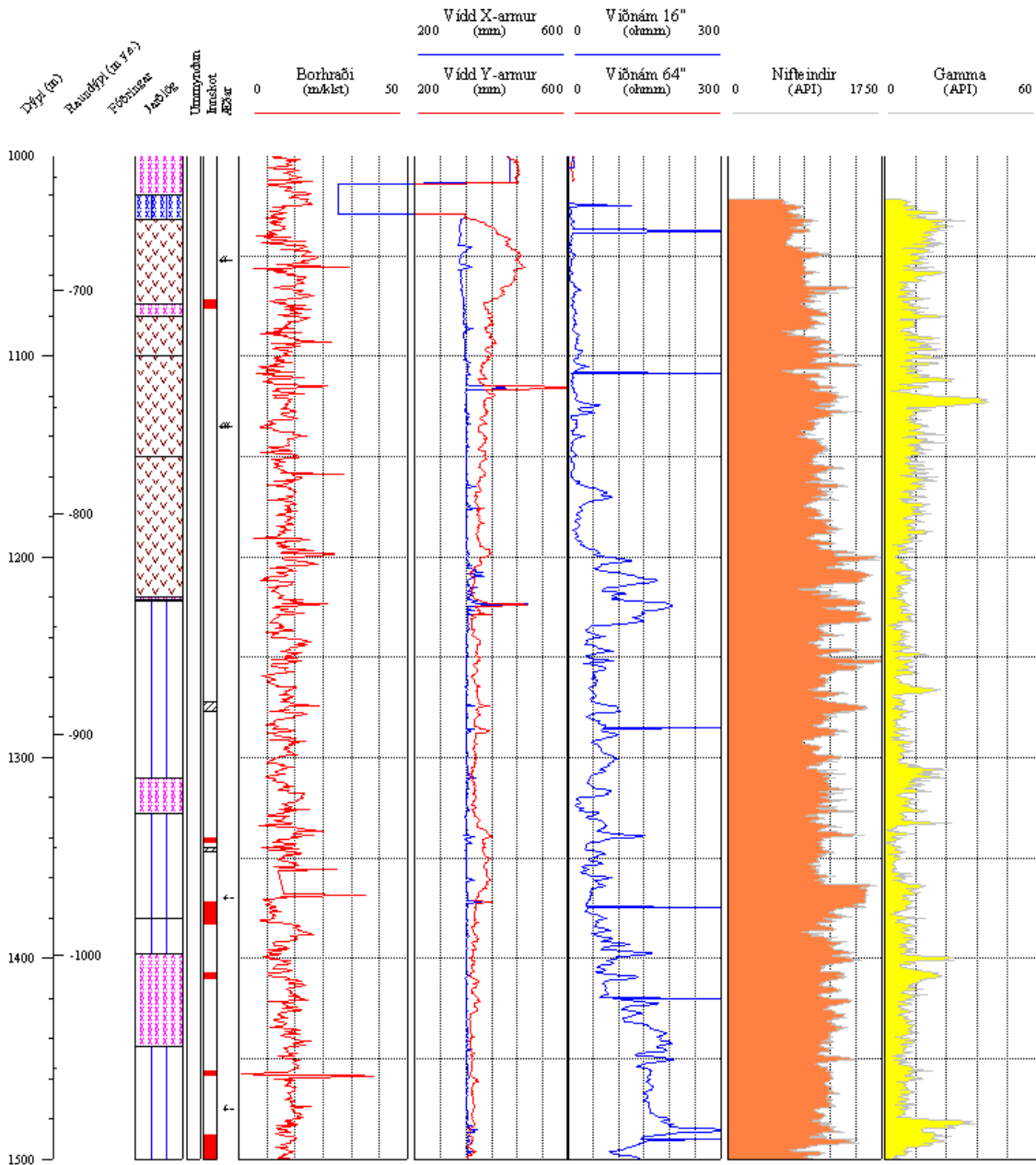
 Bor:Týr
 Djúptarbil: 500-1000 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlufti: 3. áfangi

 Staðarnúmer: 95146
 Starfsmenn: SaOS


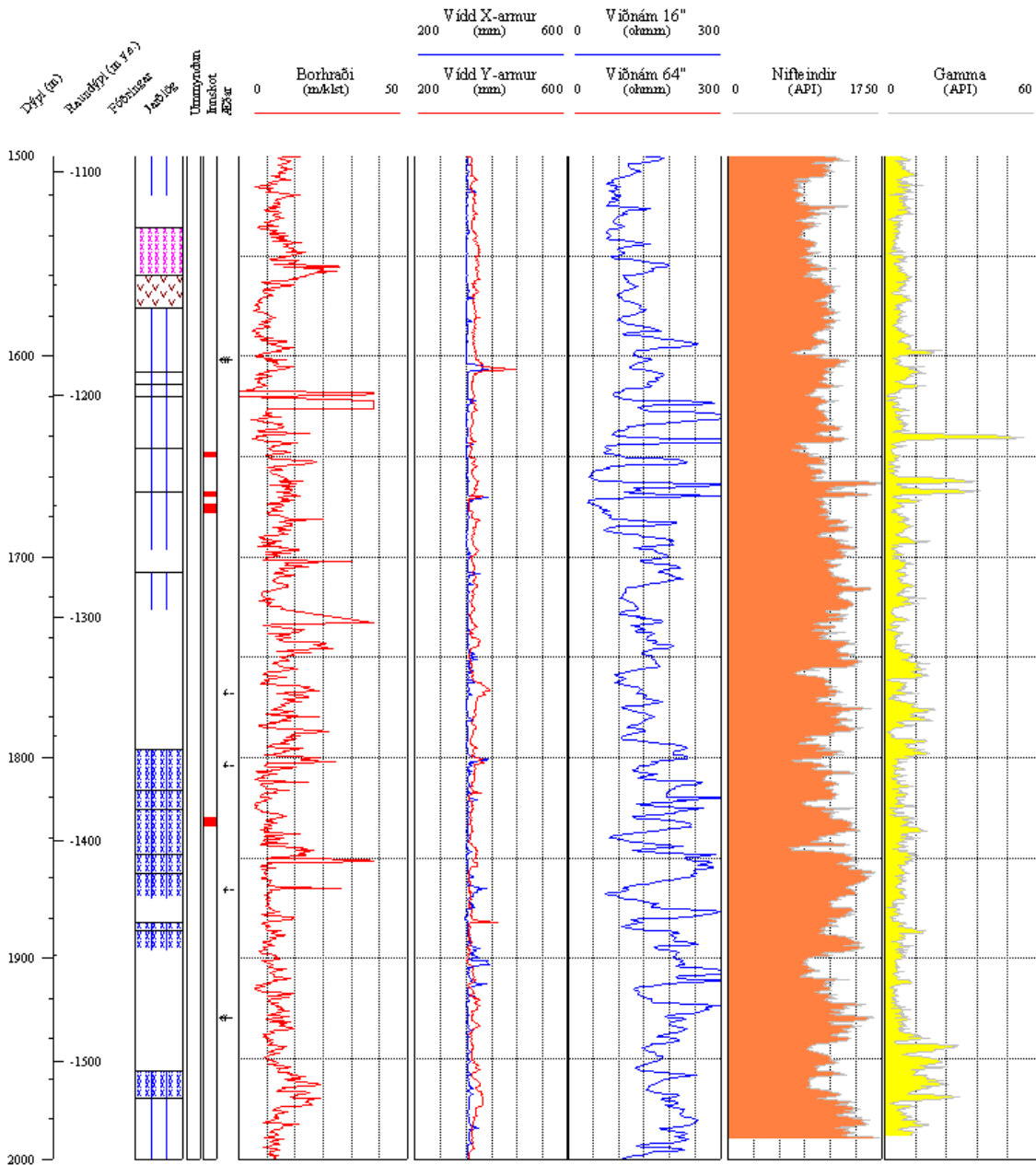
Mynd 12. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-46 frá 500-1000 m mælt dýpi.

Staður: Sleggjubeinsdalur Bor:Týr Skolvökvi: Vatn/loft Staðarnúmer: 95146
 Holunafni: HE-46 Djúptarbil: 1000-1500 m Verkhlufti: 3. áfangi Starfsmenn: SaOS



Mynd 13. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-46 frá 1000-1500 m mælt dýpi.

Staður: Sleggjubeinsdalur Bor:Týr Skolvökvi: Vatn/loft Staðarnúmer: 95146
 Holunafni: HE-46 Dýptarbil: 1500-2000 m Verkhlufti: 3. áfangi Starfsmenn: SaOS

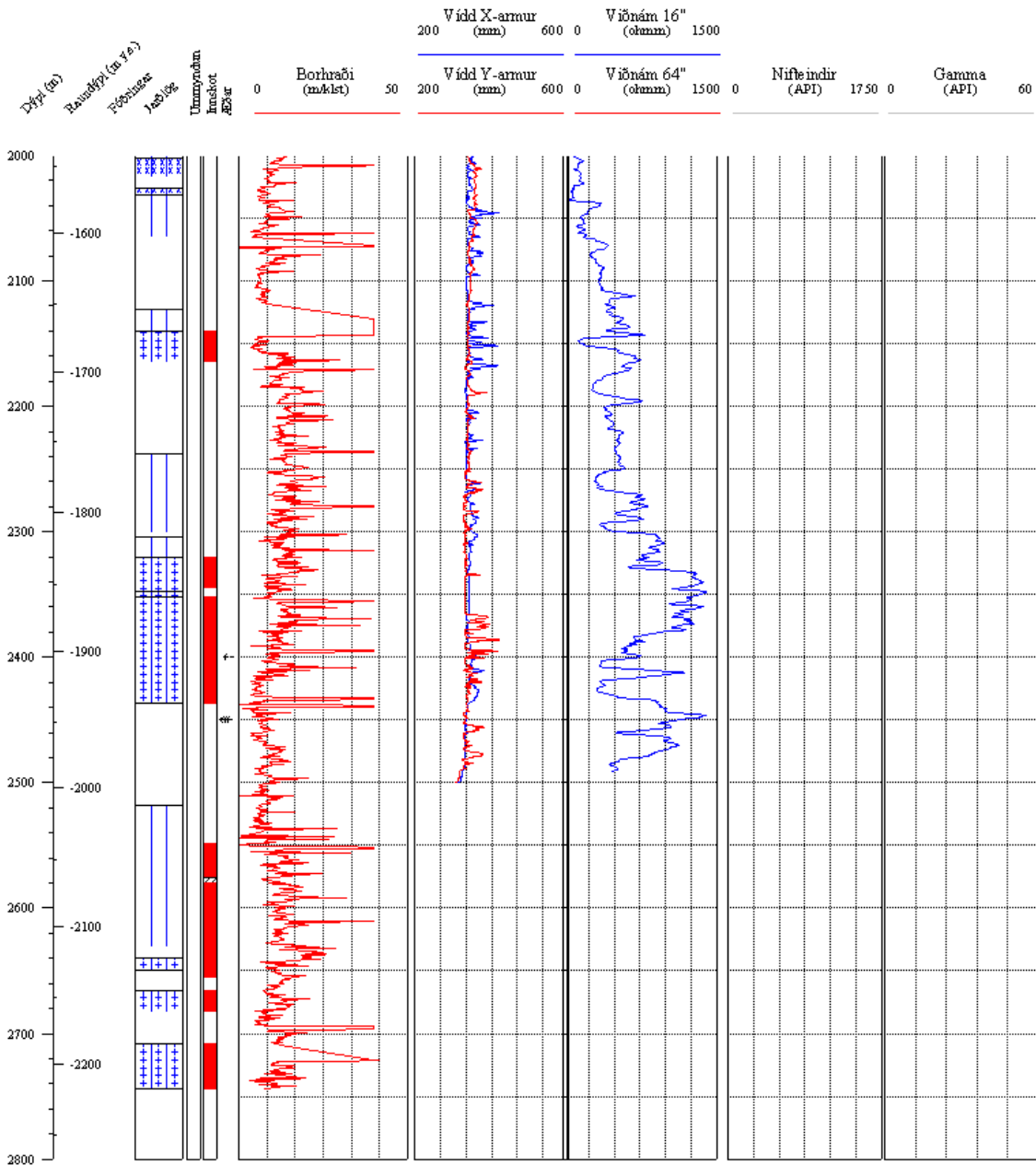


Mynd 14. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-46 frá 1500-2000 m mælt dýpi.

Staður: Sleggjubeinsdalur
 Holunafni: HE-46

 Bor: Týr
 Djúptarbil: 2000-2744 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlufti: 3. áfangi

 Staðarnúmer: 95146
 Starfsmenn: SaOS


Mynd 15. Jarðlög og jarðlagamælingar í HE-46 frá 2000-2744 m mælt dýpi.

Viðauki C – Innskot í HE-31, HE-33 og HE-46

Innskot af þrennum toga eru greind í holum HE-31, HE-33 og HE-46; þóleiít innskot, ólívín-þóleiít og innskot af þróaðri samsetningu. Innskot í HE-31 má sjá í töflu 2.8, innskot í HE-33 má sjá í töflu Mynd 2.9 og innskot í HE-46 í töflu 2.10.

Tafla 1. Innskot í HE-31.

Dýpi (MD)	Raundýpi (m u. s.)	Aths.	Gögn	Lýsing
552-556	24-20 m y. s.	Mögulega; þóleiít	Svarf, engar mælingar.	Þétt, dökkleitt, fínkorna berg.
580-582	2-4	Mögulega; þóleiít	Svarf, engar mælingar.	Þétt, dökkleitt, fínkorna berg.
602-610	22-30	þóleiít	Svarfgreining og þunnsneið	Þétt, dökkleitt, fínkorna berg.
888-890	272-274	þóleiít	Svarf og þunnsneið	Meðalkorna, þétt, fersklegt berg.
910-912	291-293	þóleiít	Svarf og þunnsneið	Fínkorna, jafnkorna þóleiít.
1076-1078	434-436	Basalt	Svarf, toppur í NN	Töluvert ferskara basalt í ummyndaðri breksíu
1088-1090	444-446	Basalt	Toppur í NN, gamma og viðnámi.	Töluvert ferskara basalt í ummyndaðri breksíu
1119-1123	471-475	Þróað	Myndarlegur toppur í gammamælingu, þunnsneið.	Sést ekki í svarfi en sést í þunnsneið. Ljóst, málríkt fínkorna berg.
1138-1140	487-489	Mögulega basalt	Sést í NN og viðnámsmælingu.	Sést ekki í þunnsneið, slæðingur í svarfi.
1207-1210	547-549	Þróað	Svarf. Toppur í gamma- og viðnámsmælingu	Sést í svarfi sem mjög ljóst berg.
1279-1281	608-610	Þróað	Svarf. Myndarlegir toppar í NN-, gamma og viðnámi.	Sést í svarfi sem mjög ljóst berg. Ísúrt bergbrot sést í þunnsneið á 1328 m.
1401-1407	712-717	Þróað	Myndarlegur toppur í gamma, toppur í viðnámi.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1508-1510	802-804	Þróað	Myndarlegur toppur í gamma og viðnámi.	Sést ekki í svarfi, en þróað berg sést í þunnsneið á 1526 m.
1535-1537	825-827	Þróað	Myndarlegur toppur í gamma. sést í viðnámi og NN að auki.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1563-1565	848-850	Basalt.	Myndarlegur toppur í viðnámi, toppur í NN.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.

1571-1573	855-857	Þróað	Toppur í viðnámi og gamma.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1608-1610	886-888	Þróað	Toppur í viðnámi og gamma. Sést í svarfi.	Ljóst, fínkorna, málmríkt berg í svarfi.
1664-1666	932-934	Þróað	Toppur í viðnámi og gamma.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1678-1680	944-946	Þróað	Mjög myndarlegur toppur í gamma, þunnsneið.	Ljóst, fínkorna berg sést í þunnsneið.
1718-1726	977-984	Þróað	Mjög stórir toppar í viðnámi og gamma, stærri en áður	Ljóst, fínkorna berg sést í svarfi.
1750-1754	1003-1009	Þróað	Mjög stórir toppar í viðnámi og gamma, stærri en áður. Sést í þunnsneið og svarfi.	Kristallað, ljóst, fínkorna berg.
1772-1776	1021-1025	Mögulega, basalt.	Sést í NN- og viðnámsmælingu.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1794-1796	1039-1041	Mögulega; basalt	Sést í NN- og viðnámsmælingu.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1815-1817	1057-1058	Þróað	Svarf, stórir toppar í gamma og viðnámi.	Fínkorna kristallað berg sést í svarfi.
1838-1866	1075-1098	Þróað	Sést í þunnsneið, gamma og viðnámsmælingu.	Ísúrt berg með apatíti.
1882-1886	1111-1114	Basalt	Toppur í gamma og viðnámi, sést í svarfi.	Þétt, fínkorna, kristallað berg.
2145-2155	1326-1332	Þróað	Jarðlagamælingar, gamma	Ekkert svarf
2193-2195	1358-1359	Mögulega; þróuð	Jarðlagamælingar, gamma	Ekkert svarf
2302-2304	1440-1442	Mögulega; þróuð	Jarðlagamælingar, gamma	Ekkert svarf
2322-2324	1455-1457	Þróað	Jarðlagamælingar, gamma	Ekkert svarf

Tafla 9. Innskot í holu HE-33.

Dýpi (MD)	Raundýpi	Aths.	Gögn	Lýsing
546-554	26-18 m y. s.	Þóleiit	Svarfgreining og þunnarneiðar	Ljósgrátt fín-meðalkorna þóleiit. Fersklegt og ríkt af plagióklas.
675-677	99-100	Þóleiit	Svarfgreining - HE-33 B	Dökkt, þétt og fersklegt þóleiit.
686-688	109-111	Þóleiit	Svarfgreining - HE-33 - sést í þunnarneið	Dökkt, fín-meðalkorna basalt. Ferskt og þétt þóleiit.
780-784	194-198	Þóleiit	Svarfgreining - HE-33 B, mögul í þunnarneið	Plagióklasdólótt, fín-meðalkorna basalt. Líklegast þóleiit.
858-863	262-266	Ólivín-þóleiit.	Sést í svarfi, þunnarneið og nifteindamælingu.	Fersklegt meðalkorna berg. Líklega ólivín-þóleiit.
874-876	275-277	Þóleiit	Þunnarneið.	Fínkorna, jafnkorna, fersklegt þóleiit.
899-904	297-301	Mögulegt; basalt.	Sést í svarfi og smá toppur í nifteindamælingu.	Meðalkorna, plagióklasdólótt berg. Líklega innskot.
1015-1017	392-394	Mögulegt; þróað	Þróað berg sést í þunnarneið en ekki í jarðlagamælingum.	Ljóst, málmríkt berg sést í þunnarneið, líklegast þróað.
1048-1050	419-420	Þróað	Toppur í gammamælingu. Kristallað berg sést í svarfi.	Ljóst, fínkorna, kristallað berg.
1060-1065	428-432	Basalt	Sést í svarfi, nifteinda- og viðnámsmælingu.	Fersklegt gangberg, meðalkorna basalt. Þétt.
1088-1102	450-460	Ólivín-þóleiit	Sést í svarfi, þunnarneið, nifteinda- og viðnámsmælingu.	Meðalkorna basalt, fersklegt og þétt.
1248-1260	567-575	Basalt	Sést í svarfi, þunnarneið, nifteinda- viðnáms og smá toppar í gammamælingu.	Fín-meðalkorn þétt basalt. Aðeins ummyndað en þó ekki jafnmikið og grannbergiðþ
1288-1300	594-601	Basalt	Sést í svarfi, þunnarneið, viðnáms- og nifteindamælingu.	Fín-meðalkorna basalt, dökkt, fersklegt og þétt. Töluvert málmríkt.
1422-1430	675-680	Basalt.	Sést í svarfi, þunnarneið og viðnáms- og nifteindamælingu.	Þétt, dulkorna, einsleitt innskotaberg.
1482-1486	707-709	Þróað	Toppur í gamma og nifteindamælingu.	Sést ekki í svarfi eða þunnarneið.
1495-1498	713-715	Þróað	Sést í gamma- og nifteindamælingu.	Sést ekki í svarfi eða þunnarneið.
1498-1505	715-718	Basalt	Sést í svarfi, þunnarneið, nifteinda- og viðnámsmælingu.	Meðalkorna basalt, nokkuð ummyndað en þó ferskara en grannberg. Stórir plagióklaskristallar.
1508-1512	720-721	Basalt.	Sést í svarfi, nifteinda- og viðnámsmælingu.	Nokkuð ummyndað, meðalkorna innskotaberg, Stórir plagiokaskrisstallar.
1518-1520	724-725	Þróað	Sést í gammamælingu.	Sést ekki í svarfi eða þunnarneið. Greinilegur toppur í gammamælingu.
1562-1564	744-745	Þróað	Sést í svarfi, þunnarneið og gammamælingu.	Ljóst, fínkorna berg, líklegast þróað.
1768-1776	809-810	Líklega; basalt	Sést í svarfi og þunnarneið. Mælingar til niður á 1660 m.	Fín-meðalkorna málmríkt berg. Svarf mjög blandað.

Tafla 10. Innskot í holu HE-46.

Dýpi (MD)	Raundýpi	Aths	Gögn	Lýsing
349-355	40-46	ólívín þóleiit	Svarf, þunnsneiðar og jarðlagamælingar	Meðalkorna, plagióklasríkt ól- þól
522-526	211-215	ólívín þóleiit	Svarf, þunnsneiðar og jarðlagamælingar	Meðalkorna, plagiokladíótt ól-þól
638-640	321-323	Mögulega; ól þól	Svarf, vídd	Fersklegt meðalkorna basalt
716-718	392-393	Mögulega; óþekkt	Svarf, jarðlagamælingar	Meðalkorna, ljóst, fersklegt berg
735-740	408-412	Mögulega; basalt	Svarf, jarðlagamælingar	Dökkt, glerjað basalt
798-800	463-465	Þróað	Svarf, þunnsneið	Ljós korn í svarfi, ljósleit, ilmenítrík korn í þunnsneið.
863-865	520-522	Basalt	Svarf, viðnámsmæling	Dökkt, meðalkorna innskotaberg.
894-897	547-550	Óþekkt	Viðnáms- og víddarmæling	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1072-1076	705-708	Basalt	Svarf, viðnáms- og nifteindarmæling (NN)	Dul-fínkorna, dökkt basalt.
1272-1277	886-890	Mögulega; þróað	Gamma- og nifteindamælingar.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1340-1342	947-949	Þróað	Gammamæling, smá toppur að auki í NN	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1345-1347	952-954	Mögulega; basalt	Nifteinda- og viðnámsmælingar. Smá toppur í gamma.	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1372-1383	976-986	Þóleiit	Svarf, þunnsneiðar og jarðlagamælingar	Dökkt, fín-meðalkorna basalt. Töluvert pýroxenríkt.
1407-1410	1008-1011	Þróað	Gammamæling, smá toppur í NN	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1456-1458	1053-1055	Þóleiit	Nifteindamæling, smá toppur í viðnámi	Slangur af dökku, fínkorna basalti.
1488-1500	1082-1093	Þróað	Gamma, nifteinda- og viðnámsmælingar	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið
1648-1650	1227-1228	Þróað	Gamma, nifteinda- og viðnámsmælingar	Óvenju stór toppur í gamma. Sést ekki í svarfi eða þunnsneið.
1668-1670	1245-1246	Þróað	Gamma, nifteinda- og viðnámsmælingar	Sést í þunnsneið; ljós, málmrík korn. Svarf mjög blandað.
1674-1678	1250-1254	Þróað	Gamma, nifteinda- og viðnámsmælingar	Sést ekki í svarfi eða þunnsneið
1830-1834	1391-1394	Þóleiit	Svarf, þunnsneið, smá toppar í NN, gamma og viðnámsmælingu.	Dökkt, fín-meðalkorna þóleiitlegt berg.
2140-2164	1671-1692	Gabbró?	Svarf. Gamma og NN-mælingar ekki til frá 2000 m, truflanir í viðnámsmælingu vegna hita. .	Mjög grófkorna, plagióklas- og pýroxenríkt, fersklegt. Gabbró?
2320-2344	1833-1855	Basalt.	Svarf, þunnsneiðar. Truflanir í viðnámsmælingu vegna hita.	Meðalkorna, málmríkt berg.
2352-2437	1862-1939	Gabbró?	Svarf, þunnsneiðar. Truflanir í viðnámsmælingu vegna hita.	Grófkorna, plagióklas- og pýroxenríkt. Gabbró?
2548-2576	2040-2066	Gabbró?	Svarf, þunnsneiðar. Víddar- og viðnámsmælingar ekki til frá 2520 m.	Grófkorna, plagióklas- og pýroxenríkt. Gabbró?
2576-2580	2066-2070	Mögulega, þóleiit	Svarf.	Dökkt, fínkorna, fersklegt berg sést í svarfi.
2580-2655	2070-2138	Gabbró?	Svarf, þunnsneiðar.	Grófkorna, plagióklas- og pýroxenríkt. Gabbró?
2666-2682	2148-2163	Gabbró?	Svarf, þunnsneiðar.	Grófkorna, plagióklas- og pýroxenríkt. Gabbró?
2708-2744	2186-2219	Gabbró?	Svarf, þunnsneiðar.	Grófkorna, plagióklas- og pýroxenríkt. Gabbró?

Viðauki D – Vatnsæðar í HE-31, HE-33 og HE-46

Tafla 1. Vatnsæðar í holu HE-31.

Dýpi æðar	Stærð æðar	Skoltap	Jarðlög og aths.
371 m 200 m y. s.	Stór	0,9 L/s í 351 m 3,6 í 379 m 16 L/s í 401 m.	Innan túffmyndunar. Dílótt, blöðrótt móbergstúff. Skápur, viðnám skiptir á svipuðu dýpi úr hærra í lægra viðnám, ekki greinilegt í NN, en lækkar og gamma hækkar svolítið fyrir neðan þetta dýpi.
428 m 144 m y. s.	Lítill	3,7 L/s í 424 m 23,8 L/s í 441 m.	Lagmót. Skápur, lágt viðnám, hátt NN. Svarf vantar frá 426-432 m en bæði ofan þess og neðan er borað í basalttúffi blönduðu seti, sem markar lagmót milli móbergsmýndanna.
478 m 95 m y. s.	Lítill	17 L/s á 720 m	Lagmót innan myndunar. Lagmót milli þétts basalttúffs (432-475 m) og basaltbreksíu (475-496 m) þar sem túffið er blandað fínkristölluðu, oxuðu basalti.
628 m 46 m u. s.	Lítill	17 L/s á 720 m	Lagmót. Dílalaut ólivín-þóleiit-túff og stakdílótt ól-þól breksía.
856 m 244 m u. s.	Lítill Sést ekki við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Lagmót Sést í jarðlagamælingum. Í víddarmælingu: útvöskuð neðan fóðringar niður á 900 m dýpi. Nifteindasvörunin er lág, en rétt við æðina er hágildi og reyndar líka í gammamælingunni, sem gætu verið áhrif af lofti sem kemur með vatninu úr æðinni. Viðnámið er nokkuð jafnt, um og innan við 30 Ωm, frá um 850 niður á um 1500 m dýpi
962 m 336 m u. s.	Lítill Sést ekki á hitamælingum frá 26. 07 (17 L/s og 45 L/s ádæling. Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Innskot. Túff blandað innskotaberg, fínkorna, jafnkorna. Ef vel er skoðað má sjá svolitla staðbundna lækkan í viðnámi.
998 m 368 m	Lítill Sést ekki við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan myndunar. Túff skorið innskotum. Á 952 m til 1053 dýpi hækkar nifteindasvörunin og gammagildin lækka.
1080 m 437 m u. s.	Lítill Sést ekki í síðustu mælingu áfangans né við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Innskot. Túff skorið innskotum. NN hækkar á 1074-1078 m dýpi og gamma hækkar einnig á svipuðu dýpi. Sennilega er þetta merki um áhrif frá lofti sem kemur með vatni úr æðinni.
1138 m 487 m u. s.	Meðal Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Toppur í viðnámi, vídd og NN

			Skápur. Borað í nánast hreinu túffi.
1188 m 530 m u. s.	Lítill Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Smá toppur í NN en annars lítið að sjá í mælingum og svarfi. Borað í nánast hreinu túffi. Fleiri sporöskjulaga skápar eða útvöskun eru neðan við 1125 m dýpi niður á um 1277 m dýpi. Aðeins ofar er svolítill hækkun í NN og gamma á um 2 m dýptarbili, og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða.
1208 m 547 m u. s.	Lítill Innstreymi í síðustu mælingu. Sést ekki við mikla ádælingu.	35 L/s frá 700 m	Innskot, mögulega þróað. Toppur í gamma. Örlítill hækkun í viðnámi og NN.
1332 m 653 m u. s.	Lítill. Sést ekki við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Aðeins ofar er svolítill hækkun í NN og gamma á um 2 m dýptarbili, og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða Túff: Mjög þykkt túfflag, mikið ummyndað með
1360 m 677 m u. s.	Lítill. Innstreymi í holu.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Sést sem skápur í víddarmælingu. Staðbundin lækkun í viðnámi. Túff: Mjög þykkt túfflag, mikið ummyndað með töluverðu af epidóti.
1378 m 693 m u. s.	Lítill Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Lítill skápur. Svólítill hækkun er í gamma á svipuðu dýpi, en NN-gildin sveiflast og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða. Túff: Mjög þykkt túfflag, mikið ummyndað með töluverðu af epidóti.
1402 m 713 m u. s.	Lítill. Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innskot, mögulega þróað. Sést sem toppur í gammamælingu. Ljós, kristölluð korn sjást í svarfi.
1538 m 827 m u. s.	Lítill Sést ekki í síðustu mælingu áfangans né við mikla ádælingu(45 L/s) Innstreymi.	35 L/s frá 1480 m	Innskot, mögulega þróað. Sést sem toppur í gammamælingu. Sést einnig sem breyting í viðnámi.
1553 m 840 m u. s.	Lítill Sést aðeins í hitamælingunum frá 23. og 24. 07 Innstreymi.	35 L/s frá 1480 m	Innan einingar. Svólítill hækkun er í gamma á svipuðu dýpi, en NN-gildin sveiflast og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða.
1754 m 1007 m u. s.	Stór. Innstreymi.	35 L/s frá 1630 m	Innskot, þróað berg. Í gammamælingunum koma fram toppar á 1675 m til 1875 m sem bendir til að þar séu ísúr eða súr innskot Fínkorna berg sést í svarfi. Ummyndun mikil og svarf mjög fínt.
1778-1802 m 1026-1046 m u. s.	Stórar	35 L/s frá 1630 m	Innan einingar. Mögulega hraunlagmót. Í gammamælingunum koma fram toppar á 1675 m til 1875 m sem bendir til að þar séu ísúr eða súr innskot.
1858 m 1092 m u. s.	Meðal. Innstreymi.	35 L/s frá 1630 m	Innskot, þróað berg Í gammamælingunum koma fram toppar á 1675 m

			til 1875 m sem bendir til að þar séu ísúr eða súr innkot. Fínkorna berg í svarfi, ummyndun mikil og svarf mjög fínt.
1873 m 1104 m u. s.	Lítill Sést ekki í hitamælingum frá 23. 07 og fyrri mælingu 24. 07. Gæti hafa opnast við ádælingu?	35 L/s frá 1630 m	Innskot. Toppur í gamma og NN. Fínkorna berg í svarfi, ummyndun mikil og svarf mjög fínt
1998 m 1205 m u. s.	Stór Innstreymi	2034 m – svarf hætti að koma upp 2095 m 45 L/s	Innan einingar. Örlítill lækkun í viðnámi og NN. En annars sést lítið í mælingum. Skoltap.
2270 m 1415 m u. s.	Meðal Sést aðeins í seinni mælingu 24. (30 L/s) og mælingum 26. (17 L/s, 45 L/s) Útstreymi	>45 L/s frá 2219 m	Mögulega innkot. Hækkun í gamma, lækkun í viðnámi og NN. 2034 m svarf hætti að koma upp. Algjört skoltap.
2496 m 1581 m u. s.	Stór Útstreymi.	>45 L/s frá 2490 m	Engar mælingar frá þessu dýpi. Algjört skoltap.

Tafla 2. Vatnsæðar í holu HE-33.

Dýpi	Stærð	Skoltap	Jarðlög og aths.
160 m 411 m y. s.	Meðal		Innan myndunar. Holan er útvöskuð frá 155-215 m. 80-254 m: Glerjað basalt. Móberg. Ólívínþóleið. Breytilegt hlutfall glers.
172 m 399 m y. s.	Meðal Innstreymi	-	Innan myndunar. Holan er útvöskuð frá 155-215 m. 80-254 m: Glerjað basalt. Móberg. Ólívínþóleið. Breytilegt hlutfall glers.
98 m 373 m y. s.	Lítill Innstreymi	-	Innan myndunar. Holan er útvöskuð frá 155-215 m. 80-254 m: Glerjað basalt. Móberg. Ólívínþóleið. Breytilegt hlutfall glers.
270 m 301 m y. s.	Meðal Millirennslí frá 198 m	-	Lagmót innan myndunar. Bólstraberg í túffbreksíu. Frá 241 niður á um 260 m dýpi er lægri nifteindasvörun en fyrir ofan og sennilega vaxandi vídd og skápur neðst.
356 m 215 m y. s.	Stór	>30 L/s	Lagmót. Skarðsmýrarfjallsmyndun og móbergsmýndun I
389 m 182 m y. s.	Meðal	>30 L/s frá 377 m eftir steypingu frá 354 m	Innan einingar. Æð á svipuðu dýpi í HE-31 (371 m)
462 m 110 m y. s.	Lítill	>1 L/s	Innan einingar. Túff.
496 m 76 m y. s.	Lítill	>1 L/s	Lagmót milli móbergs I (túffeining) og móbergs II (stakdílótt breksía)
546 m 26 m y. s.	Lítill	>1 L/s	
642 m 67 m u. s.	Lítill	>1 L/s	Lagmót innan einingar. Settúfflag í móbergi.
786 m 200 m u. s.	Lítill	>1 L/s	Lagmót innan einingar. Túff og kristallaðra berg, bólstrabreksía.
800 m 212 m u. s.	Lítill	>1 L/s	Innan einingar Mikið ummynduð breksía.
982 m 366 m u. s.	Lítill	Óvíst/lítið	Sést í víddarmælingu. Bólstraberg.
1006 m 385 m u. s.	Meðal	Óvíst/lítið	Lagmót innan einingar milli breksíu og túffs. Sést í víddarmælingu.
1228 m	Meðal	Óvíst/lítið	Innan túffeiningar.

553 m u. s.			Sést ekki í mælingum.
1255 m 571 m u. s.	Meðal	Óvíst/lítið	Lagmót, mögulega innskot? toppur í viðnámi og NN.
1570-2325 m 747-„825“	Meðal/stór	Algjört	Einhvers staða á þessu dýptarbili er þokkalega góð æð, ein eða fleiri, sem tóku við ádælingu.

Tafla 11. Vatnsæðar í holu HE-46.

Dýpi æðar	Stærð æðar	Hitamælingar	Jarðlög og aths.
94 m 215 m y. s.	Lítill	3/3	Lagmót innan einingar. Skápar sjást í víddarmælingu. Svarf barst ekki frá 83,5 m niður á 92 m. Frá 92-98 m er borað í hraunlögum.
108 m 201 m y. s.	Lítill	3/3 Sést sem kælipunktur í seinni mælingunni frá 15. 05	Lagmót innan einingar. Skápar sjást í víddarmælingu. Borað er í stakdílóttri breksíu og túffi.
182 m 127 m y. s.	Lítill	3/3 Sést sem kælipunktur í seinni mælingunni frá 15. 05	Lagmót. Skápar sjást í víddarmælingu. Lagmót milli túffmyndunar og hraunlagasyrpu.
192 m 117 m y. s.	Lítill	3/3	Innan einingar. Hraunlagakargi.
250 m 59 m y. s.	Lítill	3/3 Sést sem hallabreyting í hitamælingum frá 15. 05	Innan einingar. Borað í kargakenndum hraunlögum. Mögulega lagmót.
266 m 43 m y. s.	Lítill	3/3 Sést sem hallabreyting í hitamælingum frá 15. 05	Líklega lagmót. Enn borað í hraunlögum. Sést sem skápar í víddarmælingu.
306 m 3 m y. s.	Lítill	3/3	Lagmót. Hraunlagasyrpa og túffrík móbergsmýndun. Sést sem skápur í víddarmælingu.
376 m 67 m u. s.	Lítill	3/3	Lagmót. Innskot (350-376 m), meðalgróft þrídílótt berg sem skotist hefur inni túfflag. Túff afar bakað og berg sprungið.
437 m 127 m u. s.	Lítill	2/3	Lagmót innan einingar. Túfflínsa. Mörk milli túffs og kristallaðri hluta einingarinnar.
466 m 156 m u. s.	Lítill	2/3	Innan einingar. Bólstrabreksía. Svarf vantar, þetta sýni.
600 m 286 m u. s.	Lítill	3/3	Innan myndunar. Túffrík móbergsmýndun, sprungin. NN og gamma ekki til neðan 560
792 m 458 m u. s.	Lítill	1/2	Útfellingaríkt túff. Sést ekki í jarðlagamælingum. NN og gamma ekki til neðan 560 m.
900 m 552 m u. s.	Lítill	2/2	Lagmót innan einingar milli túffs og breksíu. Lækkun í viðnámi og smá skápur sjást í jarðlagamælingum.

			NN og gamma ekki til neðan 560 m
1052 m 687 m u. s.	Meðal. Innstreymi	12/12	Innan einingar. Ummyndun túffs eykst. Mikið af epidót.
1100-1170 m 730-793 m u. s.	Stór	kælipunktur í uppmælingu frá 23.06	Æðakafli með áberandi streymi inn í holuna.
1370 m 975 m u. s.	Lítill	8/12	Innan einingar. Túffrík breksía, mikið kalsít og epidót. Sést sem skápur og toppur í NN. .
1470-1480 m 1066-1075 m u. s.	Lítill	12/12	Æðakafli. Innan einingar. Engin merki í jarðlagamælingum.
1602 m 1185 m u. s.	Stór	12/12	Innan einingar. Sést sem skápur í víddarmælingu. Túfflinsa.
1768 m 1335 m u. s.	Lítill	12/12	Innan einingar. Sést í víddar- og NN-mælingu. Svarf vantar.
1804 m 1367 m u. s.	Lítill	12/12 Sést sem	Innan einingar. Sést í víddarmælingu. Útfellingaríkt túff.
1866 m 1423 m u. s.	Lítill	12/12	Nokkuð sést af fínkorna innskotabergi. Svarf vantar. Sést í víddar- og NN-mælingu
1930 m 1481 m u. s.	Meðal	12/12 Kælipunktur	Innan einingar. Svarf vantar. Sést í víddar- og viðnámsmælingu.
2300-2370 m 1815-1878 m u. s.	Meðal	8/8	2240-2344 m: Mjög ummyndað, fín- meðalkorna, grænleitt basalt Slæðingur af lítt ummynduðum, fínkorna basaltkornum, sem gætu verið ættuð úr þunnum kristölluðum æðum. Neðst í einingunni er basaltið ljóst og inn á milli má finna gulleit, nánast myndlaus korn. 2344-2352 m: Svarf vantar. 2352-2432 m: Grófkorna og nokkuð af meðalkorna, mikið ummynduðu basalti. Alls staðar finnast ljós, dulkorna korn.
2400 m 1906 m u. s.	Lítill	4/4	2352-2432 m dýpi: Grófkorna og nokkuð af meðalkorna, mikið ummynduðu basalti. Alls staðar finnast ljós, dulkorna korn. Á um 2400 m dýpi kemur inn töluvert af oxuðum kornum með kargalegs ásýnd. Á 2420 m dýpi verður bergið afar hart í borun.

2450 m 1951 m u. s.	Stór	4/4	Svarf vantar Engar jarðlagamælingar frá þessu dýpi.
------------------------	------	-----	--

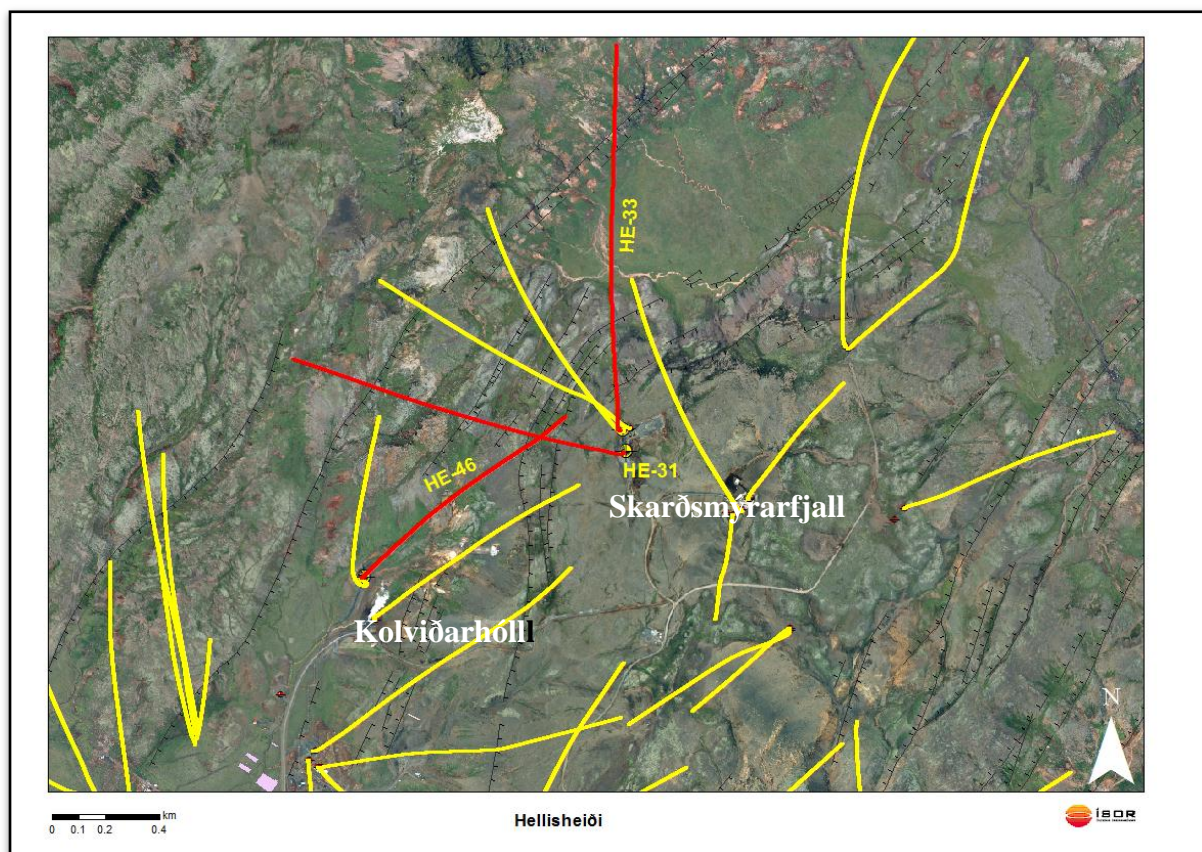
Viðauki E – Hitamælingar í HE-31, HE-33 og HE-46

Holur HE-31, HE-33 og HE-46 á Hellisheiði voru boraðar á tímabilinu maí 2007 til júní 2008. Holur HE-31 og HE-33 eru staðsettar á svokölluðu SO-plani á vestanverðu Skarðsmýrarfjalli. HE-31 var boruð niður á 2703 m og stefnt í vest-norðvestur (280°) og HE-33 niður á 2325 m og stefnt til norðurs (350°). Hóla HE-46 er staðsett á plani HE-08 í Sleggjubeinsdal. Holan var boruð niður á 2744 m og var henni stefnt til norðausturs (50°).

Holunum var öllum ætlað að kanna vesturjaðar sigdældar Hengilsins.

Hér er gerð grein fyrir hitamælingum í holunum og þeim vatnsæðum sem greindust í mælingunum auk samanburðar við jarðlagagreiningu og aðrar mælingar sem gerðar voru á meðan borun holanna stóð.

Staðsetning HE-31, HE-33 og HE-46 er sýnd á mynd 1.



Mynd 1. Staðsetning hola HE-31, HE-33 og HE-46 (rauðir ferlar) við vesturjaðar sigdældar Hengils.

1. áfangi HE-31a

Byrjað var að bora 1. áfanga HE-31 þann 21. maí 2007. Komið var í berg á 93 m dýpi og varð þá algjört tap í holunni. Borað var niður á 112 m en þá var ákveðið að taka upp og steypa í holuna. Borun hófst að nýju þann 23. maí en þegar komið var á 96 m dýpi opnaðist holan, allt skolvatn hvarf og berg hrundi á strenginn. Strengur losnaði þann 25. maí eftir miklar losunaraðgerðir og hófst borun á ný þann 26.

Þegar komið var niður á 101 m dýpi varð enn á ný skoltap í holunni. Komið var í berg á 112 m, enn í algjöru tapi en þrátt fyrir það var borað áfram og gelpilla sett niður með hverri stöng. Þegar komið var á 204 m dýpi hrundi skyndilega á krónuna og festist strengur við það. Eftir ítrekaðar losunartilraunir var ákveðið á fundi þann 31. maí að hætta við holuna og sprengja til að losa það sem hægt væri að losa. Sprengt var þann 1. júní og hófust flutningar á nýja holu, HE-31b, sama dag.

Engar hitamælingar voru gerðar við borun áfangans, en ljóst er að einhverjar æðar eru á bilinu 93-101 m.

1. áfangi HE-31b

1. áfangi HE-31b var boraður frá 92-301 m. Ein hitamæling var framkvæmd í áfanganum.

Hitamælt var við borlok 1. áfanga. Ólíkt 1. áfanga HE-31a varð ekkert skoltap við borun áfangans og eru engar æðar sjáanlegar á hitamælingunni. Vatnsborð er í 206 m, og sést það glögglega á mælingunni. Hitastigið ofan þess er nokkru hærra, en hitastig þegar komið er í vatnsborð er hiti um 4°C.

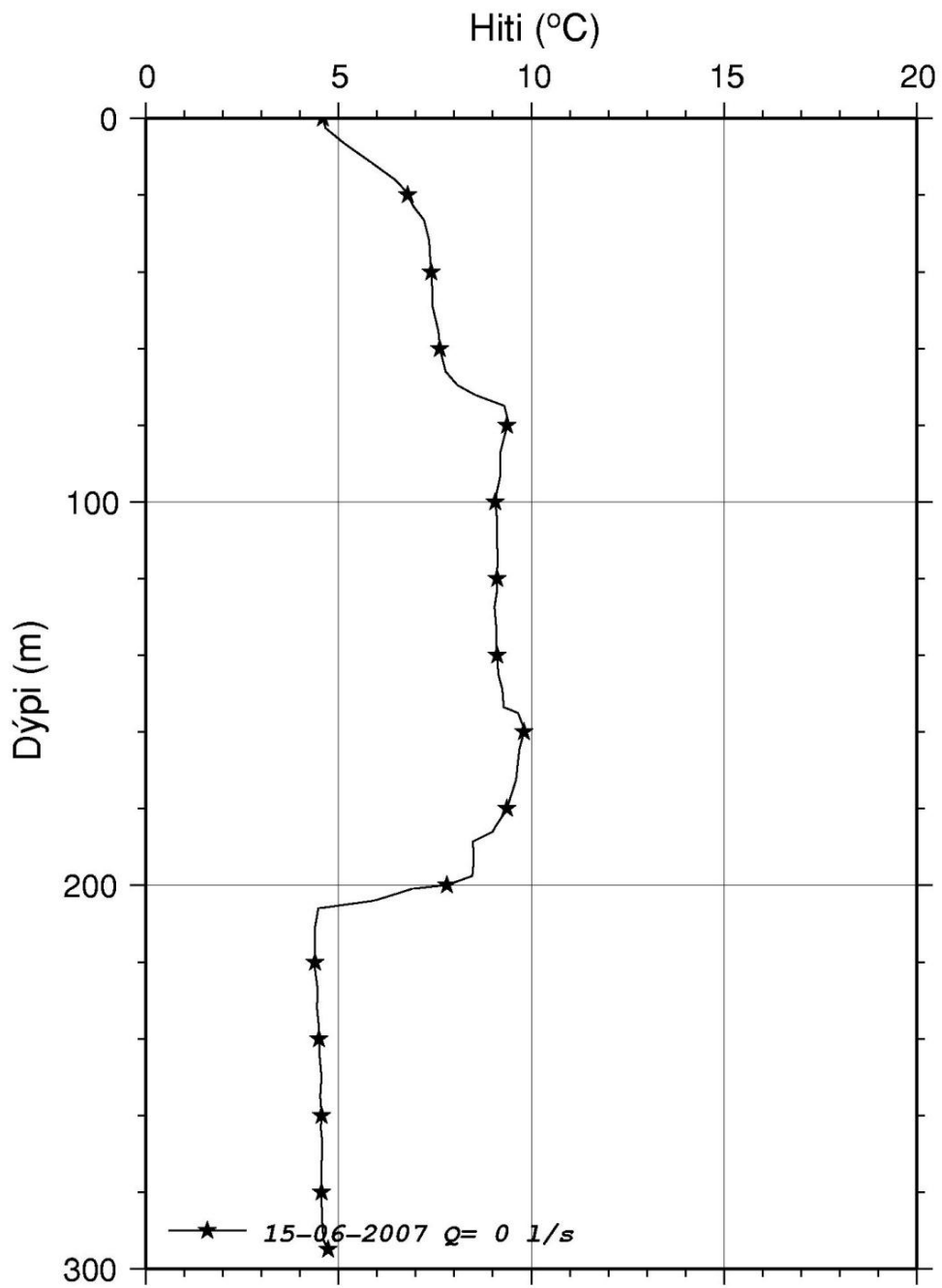
Víddarmæling sem gerð var í kjölfar borunar 1. áfanga gefur til kynna allmarga skápa, frá 153 m og niður á 187 m er holan t.a.m. mjög útvöskuð. Minna er um skápa neðan vatnsborðs.

Niðurstöður hitamælingar úr 1. áfanga HE-31 má sjá á mynd 2.

Tafla 1. *Hitamælingar í 1. áfanga holu HE-31.*

Hitamæling dags.	Dýpi (m)	Dýpi æðar	Stærð æðar	Skoltap	Jarðlög og aths.
15.06.2007	0-295	-	-	-	-

Hellisheiði HE-31
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 2. Hitamæling í 1. áfanga HE-31.

2. áfangi HE-31

2. áfangi HE-31 var boraður frá 301-727 m. Fjórar hitamælingar voru framkvæmdar í áfanganum. Fyrsta hitamælingin var framkvæmd í tengslum við gýrómælingu þann 23. júní við borlok 2. áfanga HE-31 á 727 m dýpi. Mælt var í stöngum og var 28 L/s dælt á holuna á meðan mælingu stóð en mælir settist á 628 m dýpi. Reynt var í annað sinn við hitamælingu þann 24. júlí í opinni holu með 15 L/s ádælingu. Þá vildi ekki betur til en svo að hitamælir settist í 428 m. Var holan rýmd í kjölfarið og þriðja tilraun til hitamælingar framkvæmd þann 25. júlí, og enn settist mælir í 428 m. Að þessu sinni var ádælingin 17 L/s.

Eftir að fóðrað hafði verið var hitamælt fyrir CBL-mælingu þann 27. júní niður á og sýndi sú mæling hnökra á 371 m, 428 m, 478 m og 628 m. Á 371 m má sjá upphitun en mælingin sýnir kælipunkta á 428 m, 478 m og 628 m sem gefa til kynna skápa.

Sé víddarmæling sem gerð var við lok áfangans skoðuð staðfestir hún stóran skáp á 428 m en víddarmælir settist þar og fór ekki neðar. Að auki sýnir mælingin skápa á 331-335 m, 346 m, 364 m og 371 m, 416 m og 419 m dýpi. Holan er því nokkuð ójöfn eftir borun 2. áfanga enda borað í mishörðum móbergseiningum.

Á öllum mælingum má sjá nokkuð glögglega að æð er skorin á 371 m dýpi. Á 351 m jókst skoltap úr 0,9 L/s á 379 m í 3,6 L/s, og á 401 m var skoltap komið í 16 L/s. Æðin er það afgerandi að í mælingum frá 24. og 25. júní fer allt vatn út á 401 m dýpi..

Hnókrar í mælingunni frá 23. júlí benda til þess að æð sé skorin á 428 m, þar sem mælir settist ítrekað. Skoltapsmæling bendir líka eindregið til þess að æð hafi verið skorin en skoltap eykst úr 3,66 L/s á 424 m í 23,8 L/s á 441 m. Á mælingunni frá 23. júlí má einnig sjá vísbendingar um æðar á 478 m og 628 m, en á þeim slóðum settist hitamælir í fyrstu hitamælingu áfangans. Engar skoltapsmælingar voru hinsvegar gerðar frá 441 m og þar til dýpi var orðið 720 m en þá var skoltap 17 L/s.

Niðurstöður hitamælinga má sjá á mynd 3.

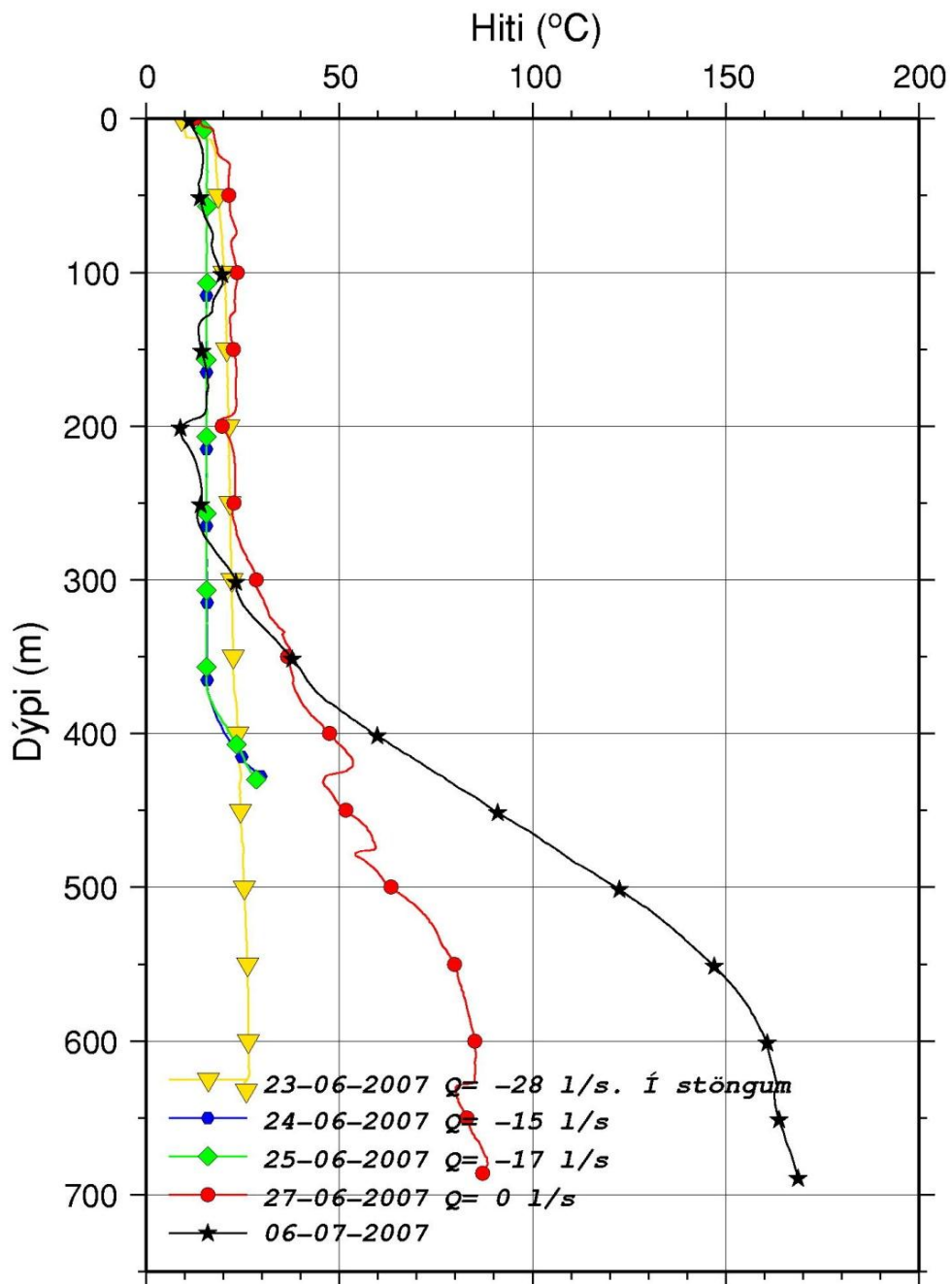
Tafla 2. Hitamælingar í 2. áfanga HE-31.

Hitamæling dags.	Dýpi (m)	Ádæling	Aths.
23.06.2007	0-632 m	28 L/s í stöngum	Mælir settist í 632 m
24.06.2007	0-428 m	15 L/s	Mælir settist í 428 m
25.06.2007	0-428 m	17 L/s	Mælir settist í 428 m
27.06.2007	0-686	0 L/s	Mælir settist í 686 m

Tafla 3. Vatnsæðar greindar í 2. áfanga HE-31 ásamt jarðlögum og athugasemdum.

Dýpi æðar	Stærð æðar	Skoltap	Jarðlög og aths.
371 m	Stór	0,9 L/s í 351 m 3,6 í 379 m 16 L/s í 401 m.	Innan túffmyndunar. Dílótt, blöðrótt móbergstúff. Skápur, viðnám skiptir á svipuðu dýpi úr herra í lægra viðnám, ekki greinilegt í NN, en lækkar og gamma hækkar svolítið fyrir neðan þetta dýpi.
428 m	Lítill	3,7 L/s í 424 m 23,8 L/s í 441 m.	Lagmót. Skápur, lágt viðnám, hátt NN. Svarf vantar frá 426-432 m en bæði ofan þess og neðan er borað í basalttúffi blönduðu seti, sem markar lagmót milli móbergsmýndanna.
478 m	Lítill	17 L/s á 720 m	Lagmót innan myndunar. Lagmót milli þétts basalttúffs (432-475 m) og basaltbreksíu (475-496 m) þar sem túffið er blandað fínkristölluðu, oxuðu basalti.
628 m	Lítill	17 L/s á 720 m	Lagmót. Dílalaust ólivín-þóleiit-túff og stakdílótt ól-þól breksía.

Hellisheiði HE-31 Skarðsmýrarfjall Árnessýsla



Mynd 3. Hitamælingar í 2. áfanga HE-31.

3. áfangi HE-31

Þriðji áfangi HE-31 var boraður niður á 2703 m dýpi og var hitamælt sex sinnum í áfanganum. Fyrsta hitamæling áfangans var framkvæmd þann 23. júlí vegna gýrósmælingar. Mælt var niður á 2650 m dýpi með 25 L/s ádælingu. Þann 24. júlí var svo hitamælt í tengslum við jarðlagamælingar niður á 2615 m dýpi og var mælt niður með 17 L/s ádælingu en svo var ádæling aukin í 30 L/s áður en mælt var upp. Þá var hitamælt í tengslum við þrepaprófun holunnar þann 26. og 27. júlí. Í fyrstu mælingunni var mælt niður á 2640 m dýpi með 17 L/s ádælingu. Þá var mælt frá 750 m niður á 2600 m með 45 L/s ádælingu. Loks var mælt upp frá 2600 m í 300 m með 5 L/s ádælingu.

Niðurstöður hitamælinganna má sjá á mynd 4. Mynd 5. Ekkert er rætt um mynd 6 sem sýnir eftirlitsmælingar og þá hve mikið holan hefur hitnað frá borlokum.

Vísbendingar eru um óvenjumargar æðar í 3. áfanga HE-33. Í hitamælingunni frá 23. júlí eru greindar æðar á 856 m, mögulega smáæð á 1080 m, 1138 m, 1538 m, stór æð og æðakafli á 1754 m, 1778 m-1802 m, æð á 1858 m, stór æð á 1998 m og stór æð 2496 m.

Í fyrri hitamælingunni frá 24. júlí þar sem ádæling var 17 L/s sáust sömu æðar og í mælingunni frá 23. júlí auk lítilla æða á 1332 m, 1378 m og 1873 m. Ástæða þess að svo margar æðar sjást í þeirri mælingu sem ekki sjást í mælingunni frá 23. júlí felst í mismikilli ádælingu. Einnig var mælt upp þann 24. júlí og þá með 30 L/s ádælingu og sáust allar sömu æðar í þeirri mælingu auk æða á 1873 m og 2270 m.

Þrjár hitamælingar voru svo gerðar í tengslum við þrepapróf. Sú fyrsta var gerð með 17 L/s ádælingu og sáust allar sömu æðar í þeirri mælingu og í hitamælingunni á undan utan æðar á 962 m og á 1208 m. Að auki sást æð á 1873 m. Önnur mæling var gerð samdægurs en ádæling var aukin í 45 L/s. Eins og búast má við var töluvert af litlum æðum sem ekki sáust á þessari mælingu, en þær æðar sem fram komu voru á 1138, 1360, 1378, 1402, 1754, 1778-1802, 1858, 1873, 1998, 2270 m og 2496 m. Síðasta mæling áfangans var framkvæmd þann 27.07 og að þessu sinni var ádælingin einungis 5 L/s. Þær æðar sem ekki sáust í þessari hitamælingu voru æðar á 1553 m og 2270 m dýpi. Athygli vekur að æð á 1208 m kemur best fram á þessari mælingu, sem greinilegt hitastökk í ferlinum, en æðin sést sem kælipunktur í mælingum frá 23., 24. og 26. júlí. Ástæða þess getur verið að skolvatn nær að streyma inn og kæla æðina í fyrri mælingum en þegar ádæling er minnkuð nær heitara vatn að streyma úr æðinni.

Hola HE-31 var jafnvægisboruð og því voru skoltapsmælingar ekki gerðar nema endrum og eins, t.d. þegar skipt var um borkrónu. Auk skoltapsmælinga er hægt að fá einhverja hugmynd um mögulegar vatnsæðar út frá því hvar þrýstiföll verða á dælum, en þegar komið var á rúmlega 2000 m mælt dýpi varð erfitt að halda uppi þrýstingi og á 2034 m tapaðist allt skol úr holunni. Benti þetta til þess að æð hefði verið skorin, sem kom enn betur í ljós í hitamælingu (*Steinþór Nielsson o.fl. 2007*).

Gert er grein fyrir æðum í 3. áfanga HE-31 í töflu 5 ásamt jarðlögum og jarðlagamælingum þar sem það á við. Á mynd 4 er sýnd staðsetning stærstu æða auk legu áætlaðra sprunguflata.

Tafla 4. Hitamælingar í 3. áfanga HE-31.

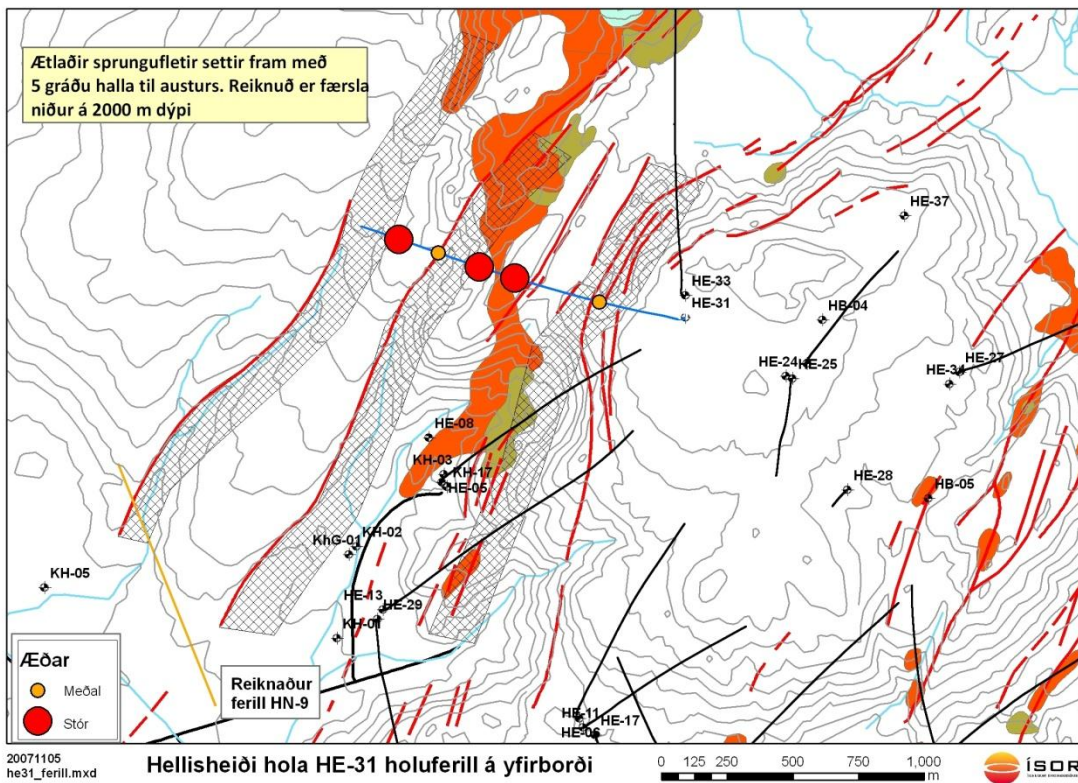
Dags.	Dýpi	Ádæling	Athugasemdir
23.7.2007	10-2650 m	25 L/s utan með	Hitamælt vegna gýrósmælingar
24.7.2007	0-2615 m	17 L/s	
24.7.2007	0-2615 m	30 L/s	Sama mæling en ádæling aukin; mælt hratt upp, smá truflanir á mælingunni
26.7.2007	0-2640 m	17 L/s	Hitamæling vegna þrepaprófs. Mælt í botn og svo híft í 2200 m f. þrepin
26.7.2007	2200-2200 m	45 L/s	Þrep úr 17 í 45 l/s
26.7.2007	750-2200 m	45 L/s	Mælt úr 2200 m í 2600, híft í 750 m, mælt niður í 2200, annað þrep
27.7.2007	2200-2200 m	5 L/s	Þrep úr 45 í 5 l/s
27.7.2007	0-2600 m	5 L/s	Mælt í 2600 frá 22

Tafla 5. Æðar greindar í 3. áfanga HE-31 ásamt jarðlögum og athugasemdum.

Dýpi æðar	Fjöldi hitam.	Stærð æðar	Skoltap	Jarðlög og aths.
856	5/6	Lítill Sést ekki við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Lagmót/innskot Sést í jarðlagamælingum. Í viddarmælingu: útvöskuð neðan fóðringar niður á 900 m dýpi. Nifteindasvörunin er lág, en rétt við æðina er hágildi og reyndar líka í gammamælingunni, sem gætu verið áhrif af lofti sem kemur með vatninu úr æðinni. Viðnámið er nokkuð jafnt, um og innan við 30 Ωm, frá um 850 niður á um 1500 m dýpi
962	4/6	Lítill Sést ekki á hitamælingum frá 26.07 (17 L/s og 45 L/s ádæling. Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Innskot. Túff blandað innskotaberg, fínkorna, jafnkorna. Ef vel er skoðað má sjá svolitla staðbundna lækku í viðnámi.
998	5/6	Lítill Sést ekki við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan myndunar. Túff skorið innskotum. Á 952 m til 1053 dýpi hækkar nifteindasvörunin og gammagildin lækka.
1080	4/6	Lítill Sést ekki í síðustu mælingu áfangans né við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Innskot. Túff skorið innskotum. NN hækkar á 1074-1078 m dýpi og gamma hækkar einnig á svipuðu dýpi. Sennilega er þetta merki um áhrif frá lofti sem kemur með vatni úr æðinni.
1138	6/6	Meðal Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Toppur í viðnámi, vídd og NN Skápur. Borað í nánast hreinu túffi.
1188	6/6	Lítill Innstreymi	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Smá toppur í NN en annars lítið að sjá í mælingum og svarfi. Borað í nánast hreinu túffi. Fleiri sporöskjulaga skápar eða

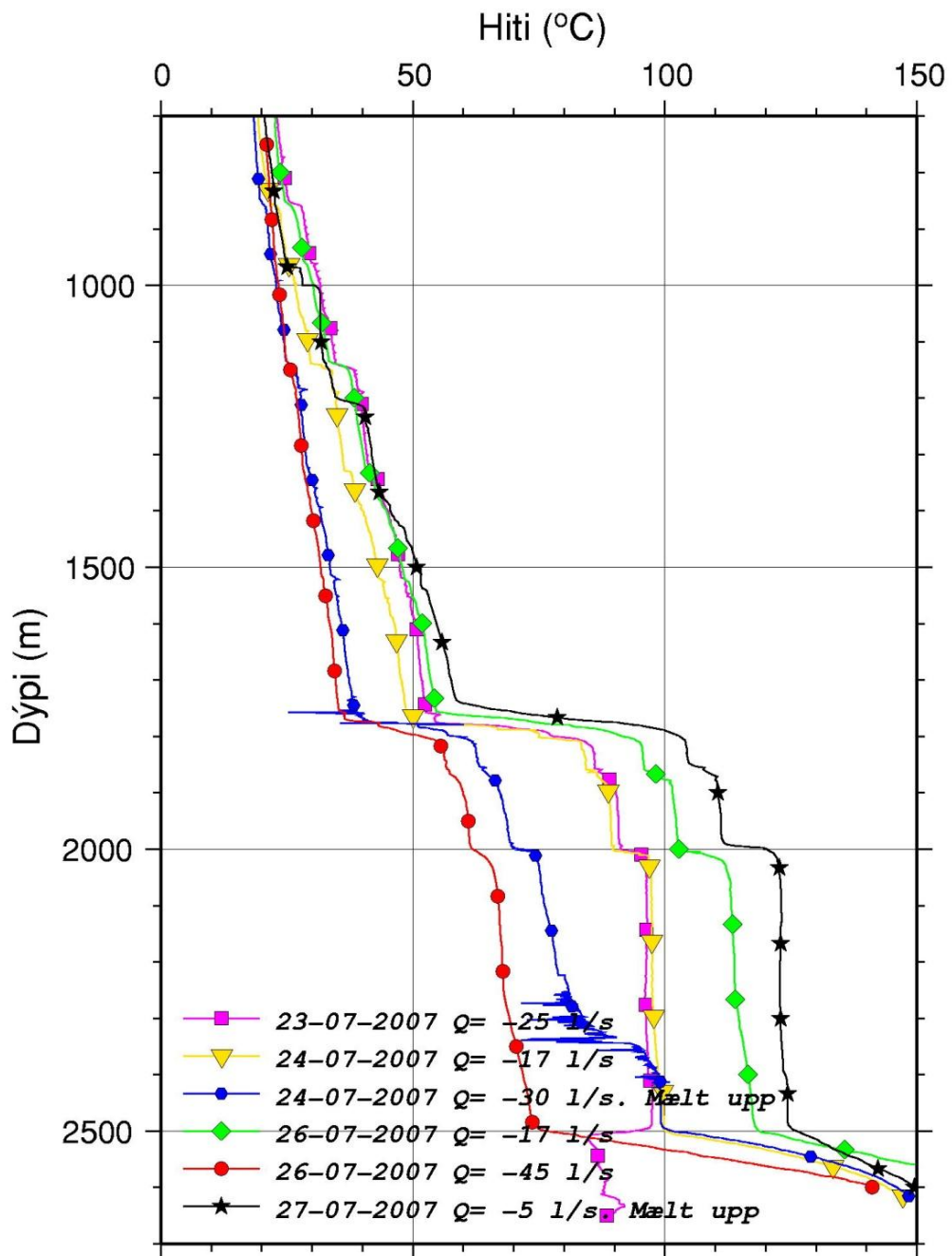
				útvöskun eru neðan við 1125 m dýpi niður á um 1277 m dýpi. Aðeins ofar er svolítill hækkun í NN og gamma á um 2 m dýptarbili, og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða.
1208	4/6	Lítill Innstreymi í síðustu mælingu. Sést ekki í mælingu frá 26.07 (17 L/s) né við mikla ádælingu (45 L/s)	35 L/s frá 700 m	Innskot, mögulega þróað. Toppur í gamma. Órlítill hækkun í viðnámi og NN.
1332	5/6	Lítill. Sést ekki við mikla ádælingu (45 L/s) Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Aðeins ofar er svolítill hækkun í NN og gamma á um 2 m dýptarbili, og gæti verið um áhrif lofts ú æðinni að ræða Túff: Mjög þykkt túfflag, mikið ummyndað með
1360	6/6	Lítill. Innstreymi í holu.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Sést sem skápur í víddarmælingu. Staðbundin lækkun í viðnámi. Túff: Mjög þykkt túfflag, mikið ummyndað með töluverðu af epidóti.
1378	6/6	Lítill Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innan einingar. Lítill skápur. Svólítill hækkun er í gamma á svipuðu dýpi, en NN-gildin sveiflast og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða. Túff: Mjög þykkt túfflag, mikið ummyndað með töluverðu af epidóti.
1402	6/6	Lítill. Innstreymi.	35 L/s frá 700 m	Innskot, mögulega þróað. Sést sem toppur í gammamælingu. Ljós, kristölluð korn sjást í svarfi.
1538	5/6	Lítill Sést ekki í síðustu mælingu áfangans né við mikla ádælingu(45 L/s) Innstreymi.	35 L/s frá 1480 m	Innskot, mögulega þróað. Sést sem toppur í gammamælingu. Sést einnig sem breyting í viðnámi.
1553	3/6	Lítill Sést aðeins í hitamælingunum frá 23. og 24. 07 Innstreymi.	35 L/s frá 1480 m	Innan einingar. Svólítill hækkun er í gamma á svipuðu dýpi, en NN-gildin sveiflast og gæti verið um áhrif lofts úr æðinni að ræða.
1754	6/6	Stór. Innstreymi.	35 L/s frá 1630 m	Innskot, þróað berg. Í gammamælingunum koma fram toppar á 1675 m til 1875 m sem bendir til að þar séu ísúr eða súr innskot Fínkorna berg sést í svarfi. Ummyndun mikil og svarf mjög fínt.
1778-1802	6/6	Stórar	35 L/s frá 1630 m	Innan einingar. Mögulega hraunlagmót. Í gammamælingunum koma fram toppar á 1675 m til 1875 m sem bendir til að þar séu ísúr eða súr innskot.
1858	6/6	Meðal. Innstreymi.	35 L/s frá 1630 m	Innskot, þróað berg Í gammamælingunum koma fram toppar á 1675 m til 1875 m sem bendir til að þar séu ísúr eða súr innskot. Fínkorna berg í svarfi, ummyndun mikil og svarf mjög fínt.
1873	4/6	Lítill Sést ekki í hitamælingum frá 23.07 og fyrri mælingu 24.07.	35 L/s frá 1630 m	Innskot. Toppur í gamma og NN. Fínkorna berg í svarfi, ummyndun

		Gæti hafa opnast við ádælingu?		mikil og svarf mjög fint
1998	6/6	Stór Innstreymi	2034 m – svarf hætti að koma upp 2095 m 45 L/s	Innan einingar. Örlítill lækkun í viðnámi og NN. En annars sést lítið í mælingum. Skoltap.
2270	3/6 Útstreymi.	Meðal Sést aðeins í seinni mælingu 24. (30 L/s) og mælingum 26. (17 L/s, 45 L/s) Útstreymi	>45 L/s frá 2219 m	Mögulega innskot. Hækkun í gamma, lækkun í viðnámi og NN. 2034 m svarf hætti að koma upp. Algjört skoltap.
2496	6/6 Útstreymi.	Stór Útstreymi.	>45 L/s frá 2490 m	Engar mælingar frá þessu dýpi. Algjört skoltap.



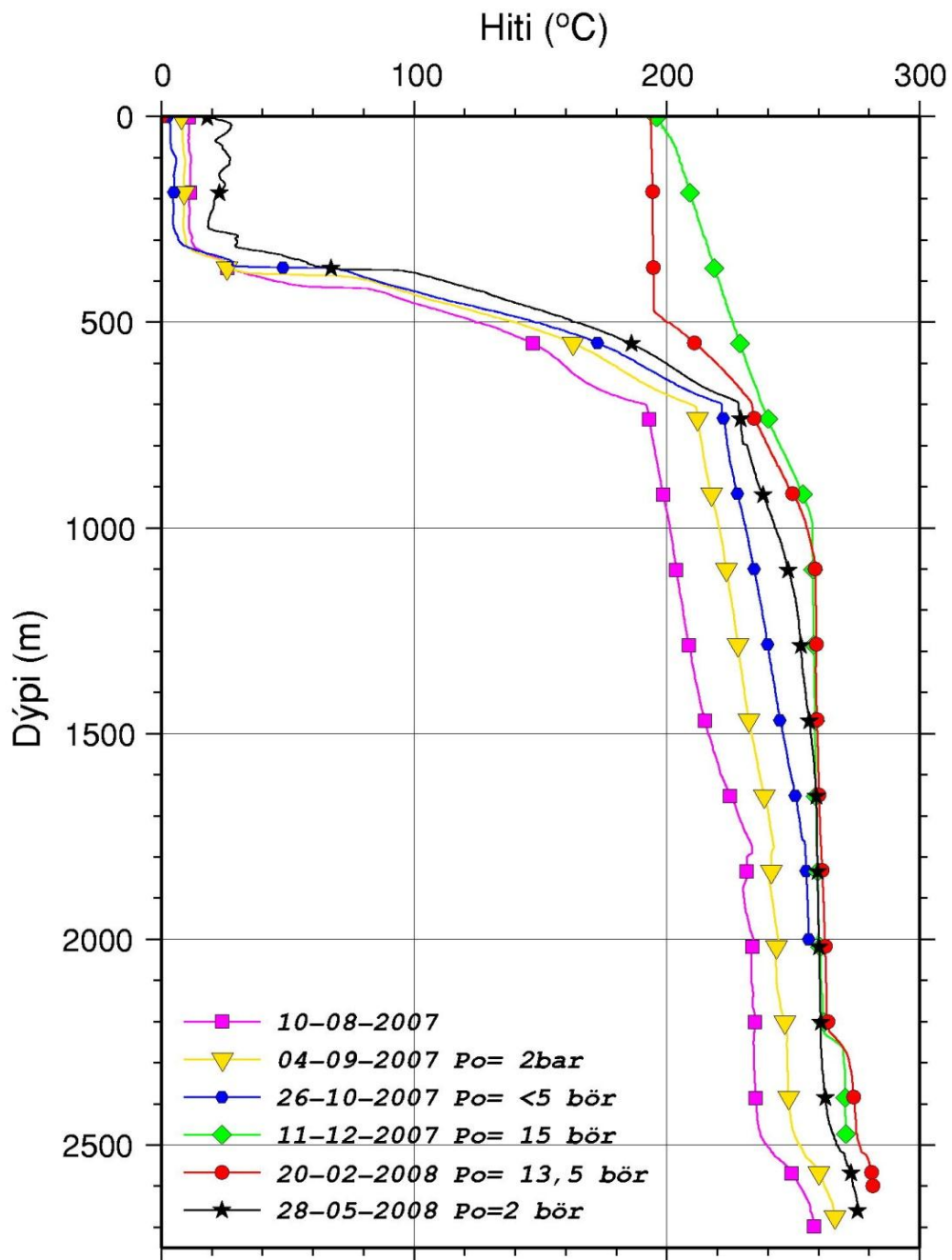
Mynd 4. Staðsetning og stærð æða í holu HE-31 ásamt legu áætlaðra sprunguflata.

Hellisheiði HE-31
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 5. Hitamælingar í 3. áfanga holu HE-31.

Hellisheiði HE-31 Skarðsmýrarfjall Árnessýsla



Mynd 6. Eftirlitsmælingar í holu HE-31.

1. áfangi HE-33

1. áfangi HE-33 var boraður frá 101-333 m og var ein hitamæling framkvæmd í áfanganum án ádælingar (mynd 7). Mælir settist í 263 m.

Mögulegar smáæðar má sjá á 160 m, 172 m og 198 m, en þær sjást sem hnökrar á ferlinum. Nær lóðréttur ferill gefur til kynna að millirennisli sér frá æð á 198 m niður á 270 m (tafla 7).

Litlar upplýsingar eru um skoltap í áfanganum enda var hann boraður með lofthamri niður á 244 m dýpi en síðan með hjólakrónu og lofti, og síðar leðju.

Borað var í Skarðsmýrarfjallsmýndun niður á 333 m dýpi þar sem fódrað var. Ekkert svarf kom upp frá 286 m og niður á fóðringardýpi.

Víddarmæling sem framkvæmd var við borlok 1. áfanga gaf til kynna að holan væri almennt víðari en sem svaraði þeim 21" sem borkrónan var í þvermál, enda er 1. áfangi holunnar eingöngu boraður í misþéttum móbergslögum. Holan er útvöskuð neðan yfirborðsfóðringar á 101 m dýpi og allt niður á 146 m dýpi og einnig frá 180-215 m. Neðan þess og niður á 264 m þar sem mælir settist opnuðust hinsvegar armur mælisins ekki að fullu og því erfitt að treysta þeim gögnum.

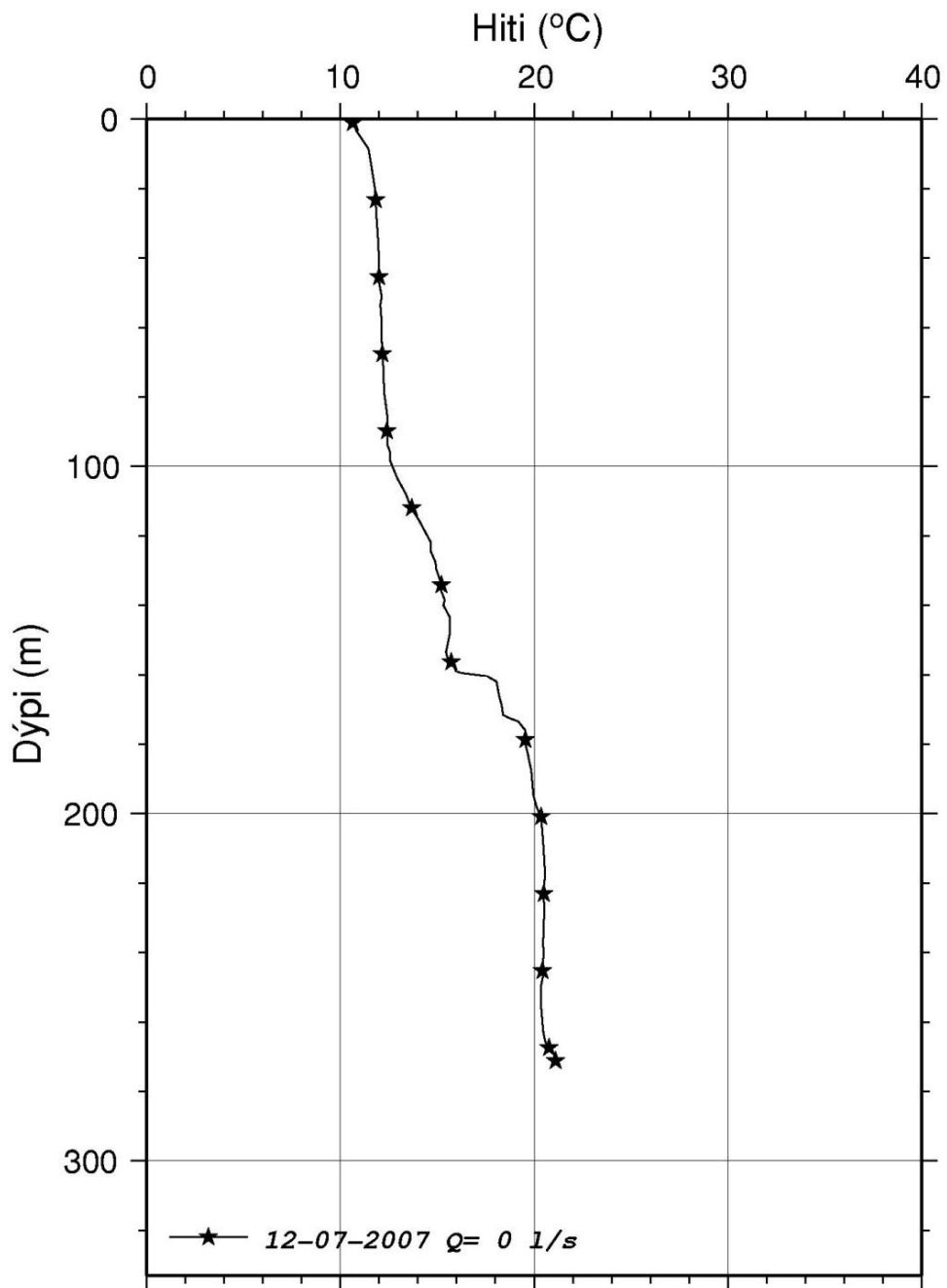
Tafla 6. Hitamælingar í 1. áfanga HE-33.

Dags.	Dýpi	Ádæling	Aths.
12.07.2007	0-263 m	0 L/s	Mælir settist í 283 m

Tafla 7. Æðar greindar í 1. áfanga HE-33 ásamt jarðlögum og athugasemdum.

Dýpi	Stærð		Skoltap	Jarðlög og aths.
160 m	Meðal	1/1		Innan myndunar. Holan er útvöskuð frá 155-215 m. 80-254 m: Glerjað basalt. Móberg. Ólivínþóleiit. Breytilegt hlutfall glers.
172 m	Meðal Innstreymi	1/1	-	Innan myndunar. Holan er útvöskuð frá 155-215 m. 80-254 m: Glerjað basalt. Móberg. Ólivínþóleiit. Breytilegt hlutfall glers.
198 m	Lítill Innstreymi	1/1	-	Innan myndunar. Holan er útvöskuð frá 155-215 m. 80-254 m: Glerjað basalt. Móberg. Ólivínþóleiit. Breytilegt hlutfall glers.
270 m	Meðal Millirennisli frá 198 m	1/1	-	Lagmót innan myndunar. Úr bólstrabergi í túffbreksíu. Frá 241 niður á um 260 m dýpi er lægri nifteindasvörun en fyrir ofan og sennilega vaxandi vídd og skápur neðst.

Hellisheiði HE-33
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 7. Hitamæling í 1. áfanga HE-33.

2. áfangi HE-33 – fyrri hluti

2. áfangi holu HE-33 var boraður frá 333-835 m, en fóðraður að auki á 420 m vegna ítrekaðs hruns í holunni. 2. áfanga holunnar er þ.a.l. skipt í tvennt, og sá jarðborinn Sleipnir um fyrri hlutann.

Í fyrri hluta 2. áfanga var hitamælt fjórum sinnum. Þrjár hitamælingar voru gerðar við borlok fyrri hlutans frá 23.-25. júlí en mælir settist ítrekað um og ofan við 400 m. Fyrri tvær mælingarnar voru gerðar með 30 L/s ádælingu, en ekkert af því skolvatni skilaði sér aftur til yfirborðs. Þriðja mælingin var framkvæmd án ádælingar.

Fjórða mælingin var gerð 19. ágúst eftir miklar hrakningar við borverk og mælingar og komst mælir sem fyrr ekki alla leið, eða aðeins niður á 390 m dýpi. Ádæling var 7 L/s.

Mælingarnar frá 23. og 24. júlí sýna mjög svipaða niðurstöðu, en þar sést hallabreyting á ferlinum á um 356 m dýpi. Holan var svo skoluð í sólarhring fyrir mælinguna þann 25. júlí en sú mæling sýnir kælingu þar sem hallabreytingin verður í mælingunum á undan, en mælingin er gerð án ádælingar. Styður þetta þá hugmynd að þar sé æð sem er lengur að jafna sig eftir undangengna ádælingu en bergið umhverfis.

Einnig má sjá hnökra á mælingum frá 23. og 24. júlí á um 389 m. Þetta er lokadýpi mælingarinnar frá 25. júlí en þar sést möguleg æð ekki svo glöggt, en sést á mælingunni frá 19. ágúst sem kælipunktur.

Nokkra aðra smáhnökra má að auki sjá ofan við æðina á 389 m á mælingunum frá 23. og 24. júlí en þeir sjást ekki á mælingunni frá 19. ágúst og eru að auki svo smáir að varla er hægt að lesa nokkuð í þá.

Svarf skilaði sér aðeins frá 342 m niður á 352 m en þar var borað í bólstrabreksíu, en hlutur túffs fór vaxandi eftir því sem neðar dregur.

Viddarmælingar voru ítrekað reyndar frá 19.-25. ágúst og sýndu þær allar mikinn skáp neðan 383 m, en þar settust allir mælar. Frá 366-384 m er holan slétt og þétt en neðan fóðringar á 311 m er holan útvöskuð, og er skápur á 311-325 m. Einnig sýndu mælingar skápa á 334-343 m, 350-358 m og 360-364 m. Skápar eru því í tengslum við báðar mögulegar æðar á 356 m og 389 m.

Niðurstöður hitamælinga í fyrri hluta 2. áfanga HE-33 má sjá á mynd 8.

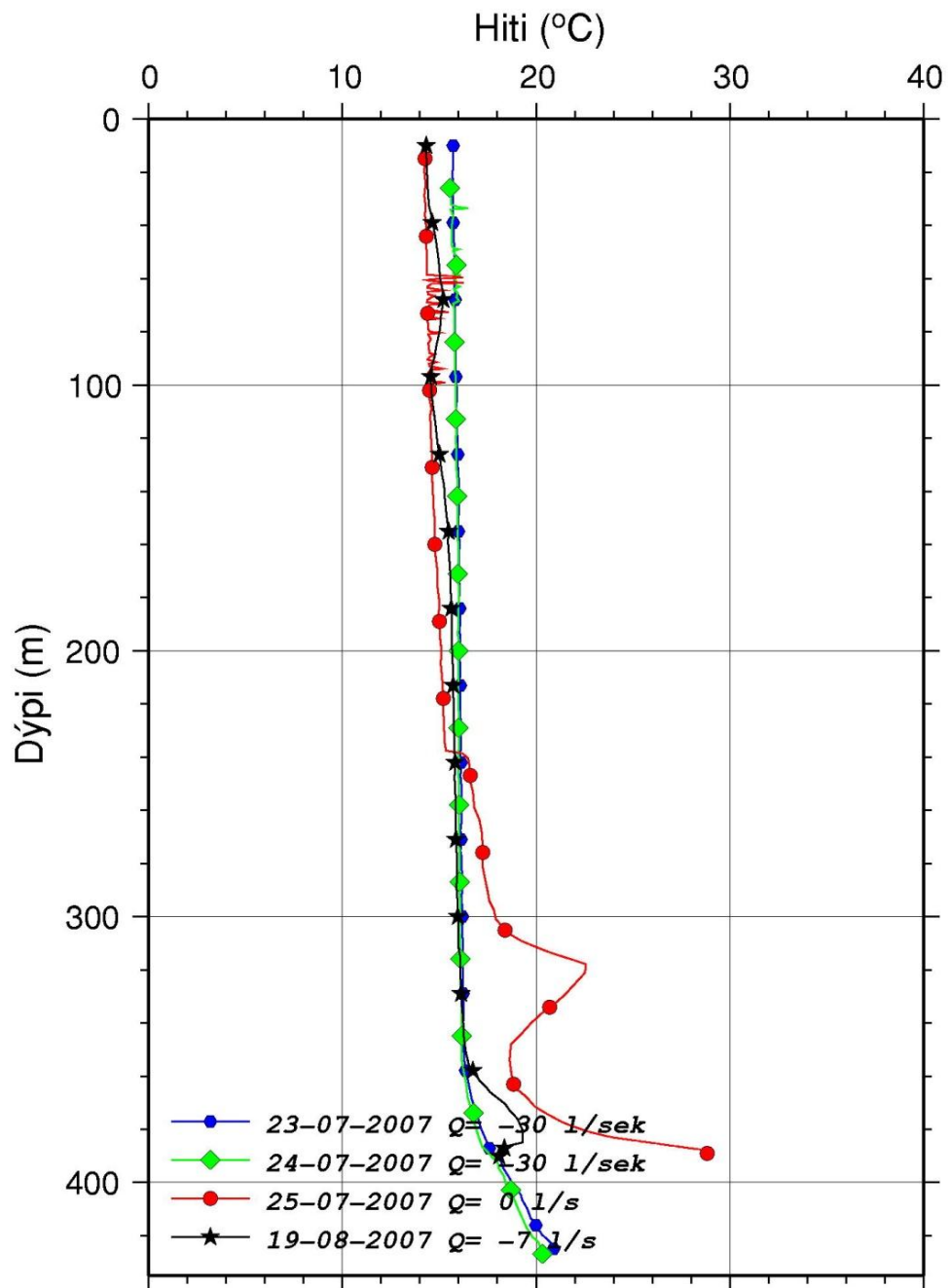
Tafla 8. *Hitamælingar í fyrri hluta 2. áfanga HE-33*

Dags.	Dýpi	Ádæling	Aths.
23.07.2007	0-425 m	30 L/s	Skoltap >30 L/s, mælir settist í 425 m
24.07.2007	25-427 m	30 L/s	Skoltap >30 L/s, mælir settist í 427 m
25.07.2007	10-389 m	0 L/s	Langur mælir notaður en settist í 389 m
19.08.2007	10-390 m	7 L/s	Langur mælir notaður en settist í 390 m

Tafla 9. *Æðar greindar í fyrri hluta 2. áfanga HE-33 ásamt jarðlögum og athugasemdum*

Dýpi	Stærð	Hitamælingar	Skoltap	Jarðlög og aths.
356 m	Stór	4/4	>30 L/s	Lagmót. Skarðsmýrarfjallsmyndun og móbergsmýndun I (stakdílótt túff)
389 m	Meðal	¾	>30 L/s frá 377 m eftir steypingu frá 354 m	Innan einingar. Æð á svipuðu dýpi í HE-31 (371 m)

Hellisheiði HE-33
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 8. Hitamælingar í fyrri hluta 2. áfanga HE-33.

2. áfangi HE-33 – seinni hluti

Í seinni hluta 2. áfanga HE-33 var hitamælt tvisvar sinnum, einu sinni að borun lokinni og einu sinni í tengslum við CBL-mælingu að fóðrun lokinni. Fyrri mælingin var framkvæmd þann 4. september og var mælt niður á 836 m dýpi, og var 12 L/s dælt á kæfistút (kill-line) á meðan mælingu stóð, en holan tók við 1 L/s.

Við mælinguna fór mælivírinn lengra út en sem svaraði dýpi holunnar, svo mæling virðist ná neðar en holubotn. Neðstu gildin eru því marklaus, enda greinilegt að mælir er sestur.

Ekki varð vart við neitt skoltap á meðan borun 2. áfanga hins síðari stóð og því ljóst að holan væri vel þétt á þessum slóðum og engar vísbendingar um stórar æðar. Smá hnökrar og hallbreytingar á hitaferlum bentu þó til að mögulega væru smáæðar í holunni. Á um 462 m eru hnökrar ásamt hallabreytingu sem benda til að smáæð sé skorin á þeim slóðum. Á 496 m dýpi virðist einnig smáæð vera skorin. Þessar tvær æðar eru greinilegustu æðarnar í áfanganum en að auki má sjá smávægilega hnökra á 546 m, 642 m, 786 m og á um 800 m dýpi (mynd 9).

Borað var að mestu í móbergi; aðallega basalttúffi og -breksíu í áfanganum. Víddarmælingin sýndi að holan er nokkuð útvöskuð neðan fóðringarenda á 419 m dýpi. Víður skápur kom fram í kringum 430 niður á 468 m dýpi og annar frá 480-510 m. Neðan þess er holan nokkuð slétt og jöfn.

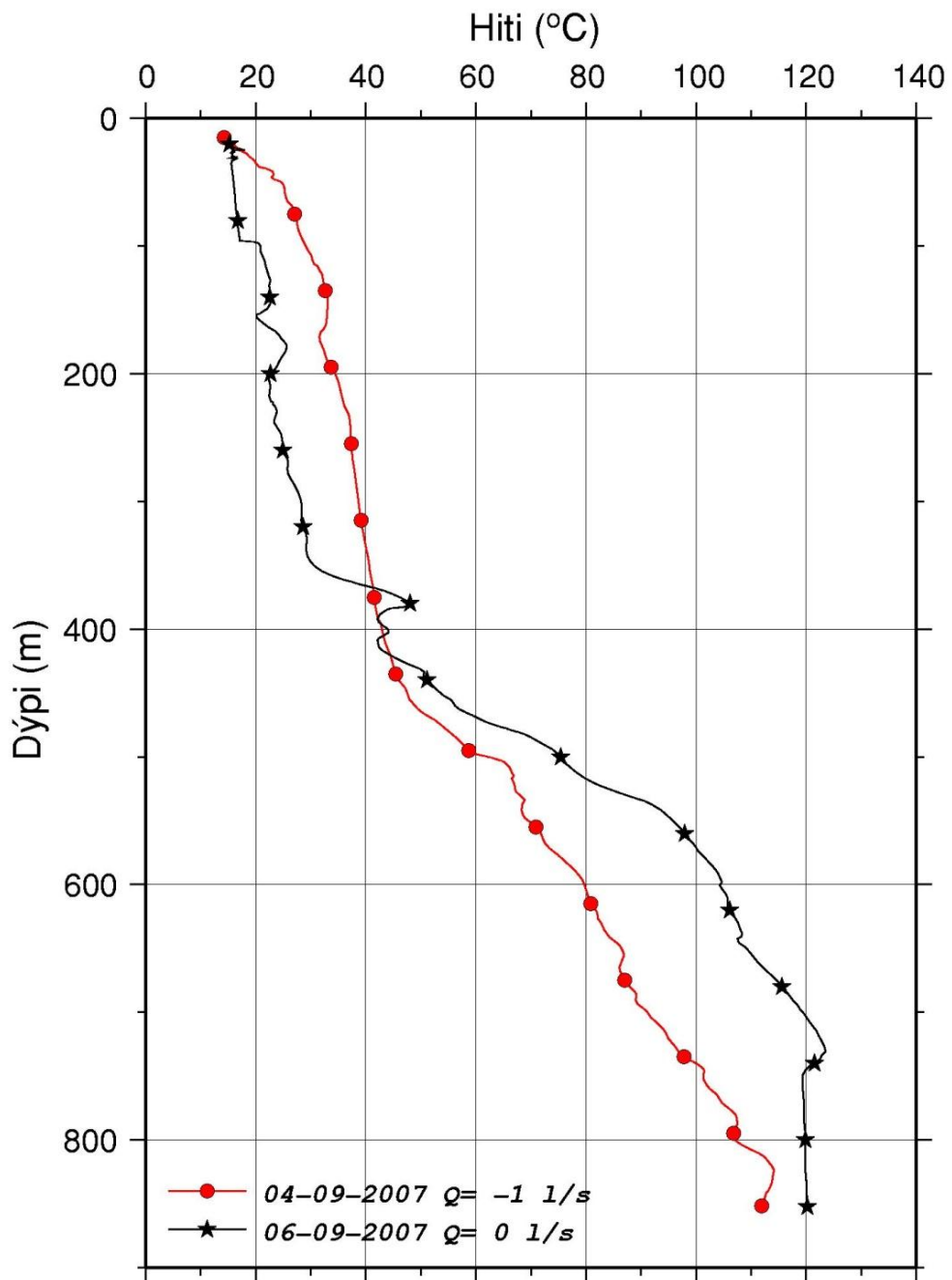
Tafla 10. Hitamælingar í seinni hluta 2. áfanga HE-33.

Dags.	Dýpi	Ádæling	Aths.
04.09.2007	10-835 m	12 L/s á kill line	Skoltap 1 L/s. Mælivír fór lengra út en sem nemur dýpi holunnar, neðstu gildi því marklaus.
06.09.2007	10-835 m	0 L/s	Mæling í tengslum við CBL-mælingu.

Tafla 11. Æðar greindar í seinni hluta 2. áfanga HE-33 ásamt jarðlögum og athugasemdum.

Dýpi	Stærð	Hitamælingar	Skoltap	Jarðlög og aths.
462 m	Lítil	2/2	>1 L/s	Innan einingar. Túff.
496 m	Lítil	2/2	>1 L/s	Lagmót milli móbergs I (túffeining) og móbergs II (stakdílótt breksía)
546 m	Lítil	2/2	>1 L/s	
642 m	Lítil	2/2	>1 L/s	Lagmót innan einingar. Settúfflag í móbergi.
786 m	Lítil	2/2	>1 L/s	Lagmót innan einingar. Túff og kristallaðra berg, bólstrabreksía.
800 m	Lítil	2/2	>1 L/s	Innan einingar Mikið ummynduð breksía.

Hellisheiði HE-33
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 9. Hitamælingar í seinni hluta 2. áfanga HE-33.

3. áfangi HE-33

Fjórum sinnum var hitamælt í 3. áfanga HE-33. Fyrsta mælingin var gerð í tengslum við gýrómælingu þann 12. september 2007, þegar holan var 1570 m djúp. Mælingin sýnir þrjár megin æðar, á 1006 m sést innstreymi og í 1228 m og 1255 m sést útstreymi.

Borun lauk þann 17. september 2007 á 2325 m dýpi og var næst hitamælt inn í mælistreng í tengslum við gamma- og nifteindamælingar auk gýrómælingar, en mælir komst aðeins niður á 1647 m dýpi. Eftir þessar mælingar var mælistrengur tekinn upp og hitamælt í opinni holu fyrir viðnámsmælingu. Líkt og áður komst mælir ekki í botn, en nú fór hann aðeins í 1430m m með 20 L/s ádælingu. Mælingin sýnir að á 1255 m mjög vel og er innstreymi við æðina. Engir stallar sjást ofar í mælingunni, m.a. sést æðin á 1006 m dýpi ekki og lítið sést af öðrum æðum. Það er því ljóst að það eru æðar neðan 1430 m sem taka við því vatni sem dælt var á holuna.

Að lokum var hitamælt í tengslum við þrepapróf og komst mælir nú í 1550 m. Ádælingin var 25 L/s og sést ekkert innstreymi á þeirri mælingu. Smá útslag á mæliferli á u.þ.b. 1400 m dýpi er líklegast truflun frá mælingabíl.

Algjört skoltap varð á 1570 m dýpi og því ljóst að neðan þess dýpis eru æðar sem taka við því sem dælt er á holuna.

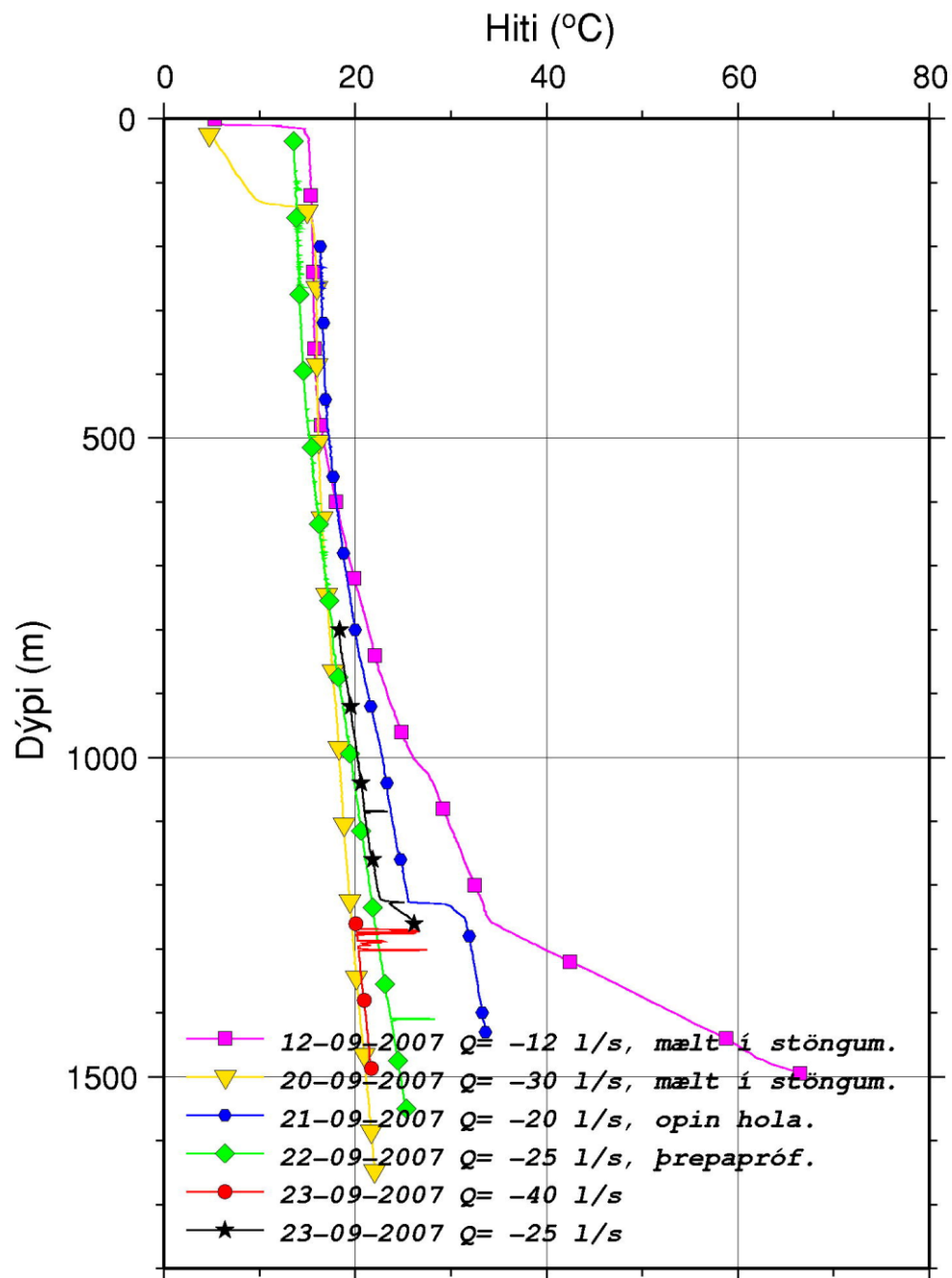
Tafla 12. Hitamælingar í 3. áfanga HE-33

Dags.	Dýpi	Ádæling	Athugasemdir
12.9.2007	0-1495 m	12,0 l/s	
20.9.2007	0-1647 m	0 l/s	Vegna jarðlagamælinga. Mælir stoppar í 1647 m.
21.9.2007	10-1430 m	20,0 l/s	Vegna jarðlagamælinga. Mælir stoppar í 1430 m
22.9.2007	35-1550 m	25,0 l/s	Þrepapróf. Mælir stoppar í 1550.
23.9.2007	1260-1487 m	40,0 l/s	Þrepapróf. Mæli slakað niður en stoppar í 1487 m.
23.9.2007	800-1260 m	25,0 l/s	Þrepapróf.

Tafla 13. *Æðar greindar í 3. áfanga HE-33 ásamt jarðlögum og athugasemdum*

Dýpi	Stærð	Skoltap	Jarðlög og aths.
982 m	Lítill	Óvíst/lítið	Sést í víddarmælingu. Bólstraberg.
1006 m	Meðal	Óvíst/lítið	Lagmót innan einingar milli breksíu og hreins túffs. Sést í víddarmælingu.
1228 m	Meðal	Óvíst/lítið	Innan einingar. Sést ekki í mælingum. Túff.
1255 m	Meðal	Óvíst/lítið	Lagmót, mögulega innskot? toppur í viðnámi og NN.
1570- 2325 m	Meðal/stór	Algjört	Einhvers staða á þessu dýptarbili er þokkalega góð æð, ein eða fleiri, sem tóku við ádælingu.

Hellisheiði HE-33
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 10. Hitamælingar í 3. áfanga HE-33.

Hitamæling í holu HE-33 í febrúar 2008

Í febrúarlök 2008 fór Sleipnir á holu HE-33 til að freista þess að gírómæla neðstu 700 m holunnar, en aldrei hafði náðst að mæla holuna neðan 1640 m. Holan var hitamæld í tengslum við mælinguna eins og venja er. Settur var niður aðeins þrengri strengur en vanalega og dæla átti vatni á eftir mælinum til að koma honum neðar.

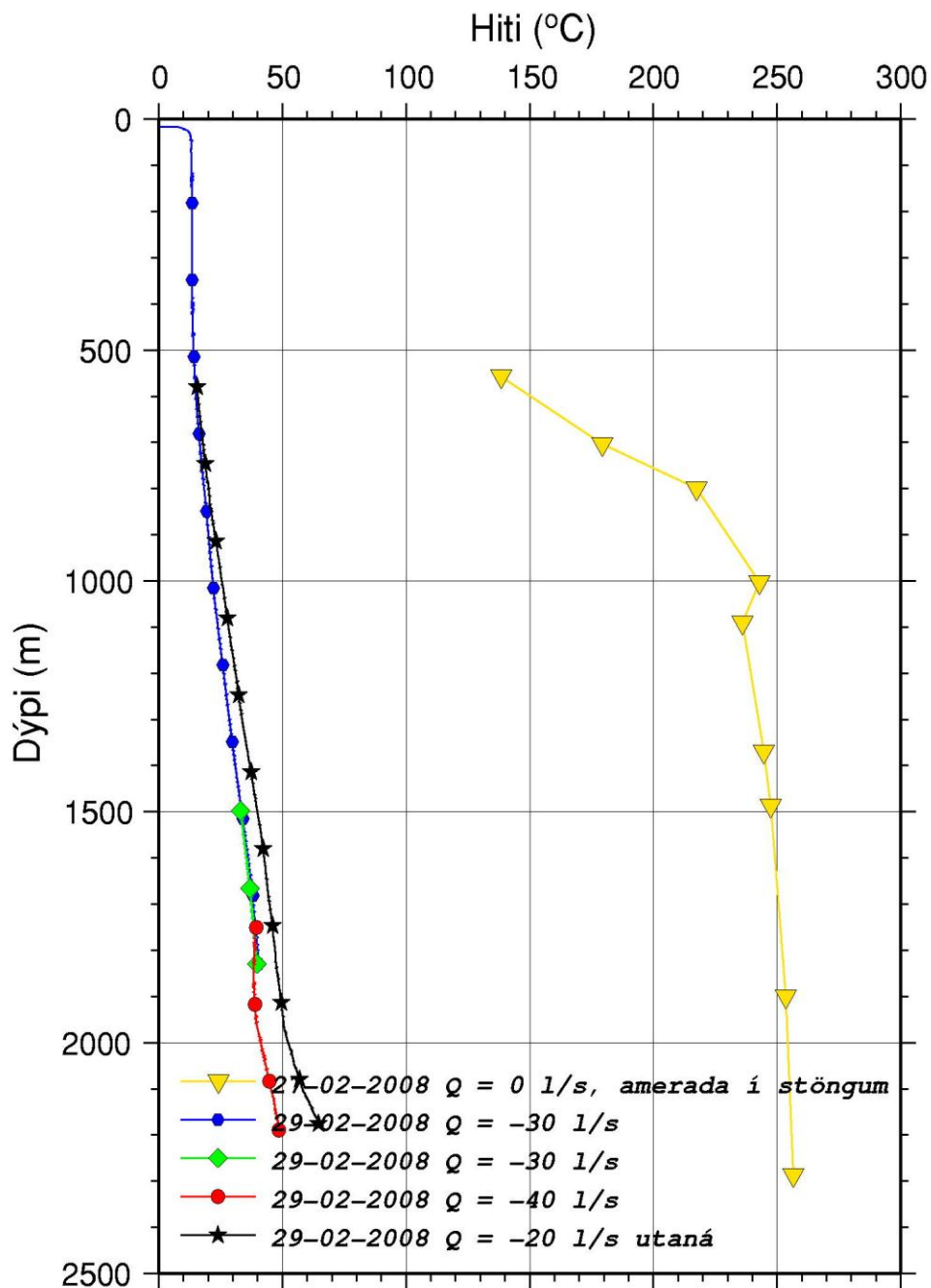
Byrjað var að hitamæla fyrir gírómælingu um tvöleytið aðfaranótt 29. febrúar. Byrjað var á því að mæla hita með 8-10 l/s ádælingu í streng og 20 l/s dælingu á kæfistút og stoppaði mælirinn þá í 1830 m dýpi. Mælirinn var þá hífður upp í 1500 m og reynt aftur með sömu ádælingu en hann stoppaði aftur á sama stað. Þá var mælir hífður í 1750 m og ádæling í streng aukin í 20 l/s og fór mælir við það í 2190 m og var það látið gott heita.

Sýnir mælingin æðakafli á bilinu 1750-2000 m (mynd 11) en þar sem mælingin er gerð í streng með mikilli ádælingu er erfitt að ráða í hvar æðarnar eru nákvæmlega staðsettar.

Tafla 14. Hitamælingar í febrúar 2008 í HE-33.

Dags.	Dýpi	Ádæling	Athugasemdir
29.2.2008	15-1830 m	Q = -30.0 l/s	Mælir stoppar í 1830 m
29.2.2008	1499-1830 m	Q = -30.0 l/s	Önnur tilraun. Mælir stoppar aftur í 1830 m.
29.2.2008	1750-2175 m	Q = -40.0 l/s	Mælir sest í 2175 m
29.2.2008	580-2175	Q = -20.0 l/s	Mælt niður.

Hellisheiði HE-33
Skarðsmýrarfjall
Árnessýsla



Mynd 11. Hitamælingar framkvæmdar í tengslum við halla og stefnumælingu 2008.

1. áfangi HE-46

1. áfangi boraður var boraður frá 83 m niður á 338 m dýpi en þrisvar var hitamælt í áfanganum. Fyrsta hitamæling áfangans var framkvæmd þann 11. maí við borlok 1.áfanga HE-46 með 13 L/s ádælingu á kill-line (mynd 13). Þann 15. maí var svo hitamælt án ádælingar í tengslum við CBL-mælingu og var mælt bæði niður og upp. Nokkur munur er á þessum tveimur mælingum. Munurinn getur falist í því að steypa hafi náð að harðna töluvert milli mælinga. Steypan gefur frá sér varma fyrst um sinn og er það sérstaklega greinilegt þar sem steyppt hefur verið upp í skápa. Þegar uppmælingin er hinsvegar gerð eru margir af þessum hita“púlsum“ horfnir.

Skoltap við borlok 1. áfanga á 338 m mældist 4 L/s. Það er því ljóst að ekki er um neinar stórar æðar að ræða í 1. áfanga. Mögulegar æðar sem greindar eru í áfanganum eru á 94 m, 108 m, 182m, 192 m, 266 m og 308 m. Skápar voru greindir á 90-100 m og á um 180 m auk smærri skápa neðar í holunni. Það er á sömu slóðum og æðar á 94 m, 108 m og 178 m dýpi.

Athygli vekur að á svipuðum slóðum og æðarnar á 108 m, 182 m og 192 m er misgengisbreksía greind í svargreiningu sem rennir stoðum undir að þar sé um æðar að ræða, mögulega tilkomnar vegna höggunar á svæðinu.

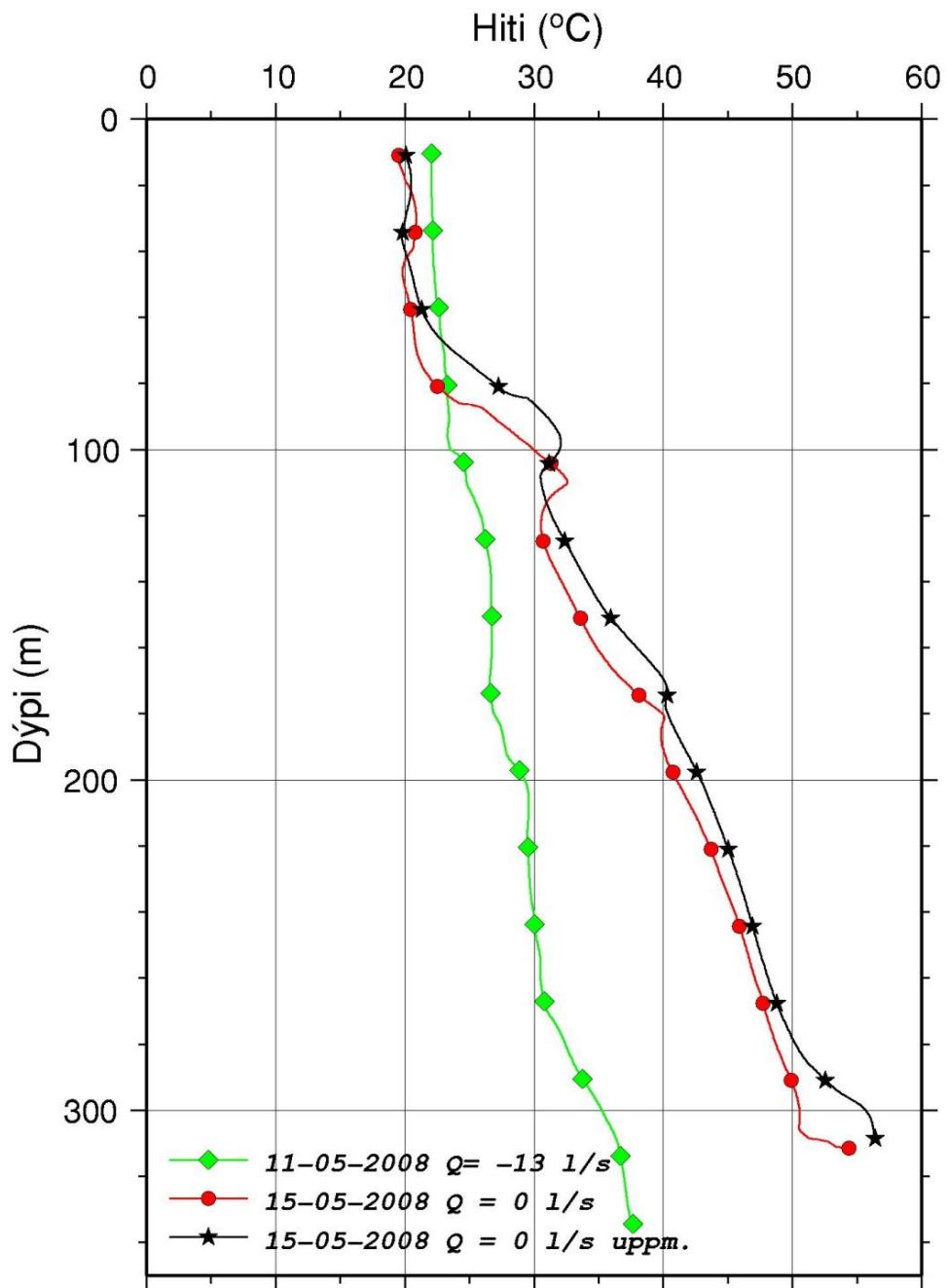
Tafla 15. *Hitamælingar í 1. áfanga holu HE-46.*

Hitamæling dags.	Dýpi (m)	Ádæling	Aths.
11.05.2008	10-334 m	0 L/s	Mælir settist í 632 m
15.05.2008	11-312 m	0 L/s	Mælir settist í 428 m
15.05.2008	11-309 m	0 L/s	Mælir settist í 428 m

Tafla 16. Hitamælingar í 1. áfanga holu HE-46.

Dýpi æðar	Stærð æðar	Hitamælingar	Jarðlög og aths.
94 m	Lítill	3/3	Innan einingar. Lagmót? Skápar sjást í víddarmælingu. Svarf barst ekki frá 83,5 m niður á 92 m. Frá 92-98 m er borað í hraunlögum.
108 m	Lítill	3/3 Sést sem kælipunktur í seinni mælingunni frá 15.05	Innan einingar. Skápar sjást í víddarmælingu. Borað er í stakdílóttu túffi.
182 m	Lítill	3/3 Sést sem kælipunktur í seinni mælingunni frá 15.05	Lagmót. Skápar sjást í víddarmælingu. Lagmót milli túffmyndunar og hraunlagasyrpu.
192 m	Lítill	3/3	Innan einingar. Hraunlagakargi.
250 m	Lítill	3/3 Sést sem hallabreyting í hitamælingum frá 15.05	Innan einingar. Borað í kargakenndum hraunlögum. Mögulega lagmót.
266 m	Lítill	3/3 Sést sem hallabreyting í hitamælingum frá 15.05	Líklega lagmót. Enn borað í hraunlögum. Sést sem skápir í víddarmælingu.
306 m	Lítill	3/3	Lagmót. Hraunlagasyrpa og túffrík móbergsmýndun. Sést sem skápur í víddarmælingu.

Hellisheiði HE-46 Sleggjubeinsdalir Arnessýsla



Mynd 13. Hitamælingar í 1. áfanga HE-46.

2. áfangi HE-46

Fjórar hitamælingar voru framkvæmdar í 2. áfanga HE-46 en áfanginn var boraður frá 338m niður á 1032 m dýpi. Fyrsta hitamæling áfangans var framkvæmd þann 24. maí að lokinni borun áfangans. Þrjár hitamælingar fylgdu svo í kjölfar steypingar vegna vandræða með steypuhörðnun (tafla 17).

Ekkert skoltap mældist við borun áfangans. Víddarmæling sýndi skáp neðan öryggisfóðringar, en fóðringarendi hennar er á 337 m dýpi.

Í ljósi þess að ekkert skoltap mældist við borun áfangans er ljóst að ekki er um neinar stórar æðar að ræða í áfanganum. Nokkrar mögulegar smáæðar voru þó greindar eftir fyrstu hitamælinguna og eru þær á 376, 437, 466, 600, 792 og 900 m. Ekkert er þó í öðrum mælingum sem styður þessa greiningu, en það getur þó stafað af smæð æðanna, séu þær yfirhöfuð til staðar.

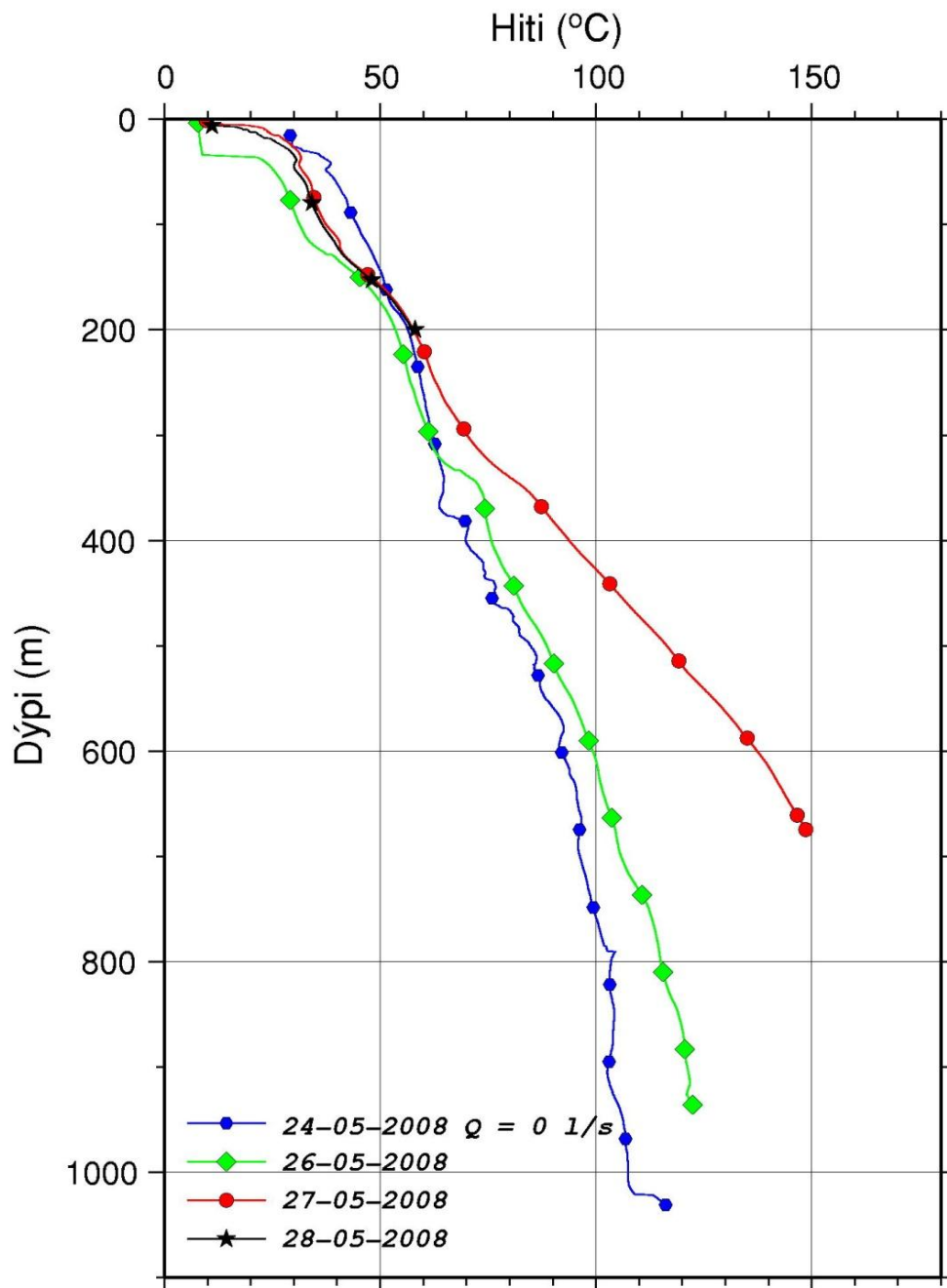
Tafla 17. Hitamælingar í 2. áfanga holu HE-46.

Hitamæling dags.	Dýpi (m)	Ádæling	Aths.
24.05.2008	15-1031 m	0 L/s	
26.05.2008	3-937 m	0 L/s	Fyrir CBL-mælingu
27.05.2008	1-675 m	0 L/s	Fyrir CBL-mælingu
28.05.2008	6-200 m	0 L/s	Fyrir CBL-mælingu

Tafla 18. Hitamælingar og jarðlagaskýringar í 2. áfanga holu HE-46.

Dýpi æðar	Stærð æðar	Hitamælingar	Jarðlög og aths.
376 m	Lítill	3/3	Lagmót. Innskot (350-376 m), meðalgróft þrídílótt berg sem skotist hefur inni túfflag. Túff afar bakað og berg sprungið.
437 m	Lítill	2/3	Lagmót innan einingar? Mörk milli túffs og kristallaðri hluta einingarinnar.
466 m	Lítill	2/3	Innan einingar. Bólstrabreksía. Svarf vantar, þetta sýni.
600 m	Lítill	3/3	Innan myndunar. Túffrík móbergsmýndun, sprungin. NN og gamma ekki til neðan 560
792	Lítill	½	Útfellingaríkt túff. Sést ekki í jarðlagamælingum. NN og gamma ekki til neðan 560 m.
900	Lítill	2/2	Lagmót innan einingar milli túffs og breksíu. Lækkun í viðnámi og smá skápur sjást í jarðlagamælingum. NN og gamma ekki til neðan 560 m

Hellisheiði HE-46 Sleggjubeinsdalir Arnessýsla



Mynd 14. Hitamælingar í 2. áfanga HE-46.

3. áfangi HE-46

Alls var hitamælt átta sinnum í 3. áfanga HE-46, en hann var boraður frá 1032 m niður á 2744 m dýpi (mynd 15).

Fjórum sinnum var hitamælt í tengslum við gýrómælingar í holunni. Þann 7. júní var mælt niður á 1611 m dýpi og var mælt bæði upp og niður með 25 L/s ádælingu. Aftur var gýrómælt þann 11. júní. Fyrst var mælt niður streng, 10 l/s var dælt á streng og 15 l/s um kill-line til að byrja með en sú dæling var aukin í 25 l/s þegar mælir var kominn á um 1250 m dýpi. Mismikil dæling á kill-line var sökum vatnsskorts í upphafi. Þegar hitamælir var kominn til botns var dæling tekin af streng, beðið var niðri í um 25 mínútur og síðan mælt upp. Næst var gýrómælt þann 21. júní og var þá hitamælt niður á 2580 m, og líkt og 7. júní var mælt upp og niður með 25 L/s ádælingu. Síðasta gýrómæling áfangans var svo framkvæmd 23. júní niður á 2660 m og var þá hitamælt upp og niður með 15 L/s ádælingu á streng og 25 L/s á kill-line en dæling var tekin af í 25 mínútur milli mælinga. Niðurstöður hitamælinga í tengslum við gýrómælinga í 3. áfanga HE-46 má sjá á mynd 15.

Tvö þrepapróf voru framkvæmd á holunni og var hitamælt í tengslum við þau bæði, það fyrra þann 16. júní og það síðara frá 24.-25. júní. Í því fyrra var hitamælt niður með 42,5 L/s ádælingu niður á 2391 m, síðan var ádæling minnkuð í 27,5 L/s og mælt niður frá 1700-2391 m og upp alla holuna aftur. Í því síðara var hitamælt bæði niður og upp með 25 L/s ádælingu. Niðurstöður hitamælinga í tengslum við þrepapróf í 3. áfanga HE-46 má sjá á mynd 16.

Gerð er grein fyrir hitamælingum í töflu 20 og þeim æðum sem greindar voru í áfanganum í töflu 20. Stærstu æðar voru greindar á 1052, 1100-1170, 1602, 1930, 2300-2370 og 2450 m.

Tafla 19. Hitamælingar í 3. áfanga HE-46.

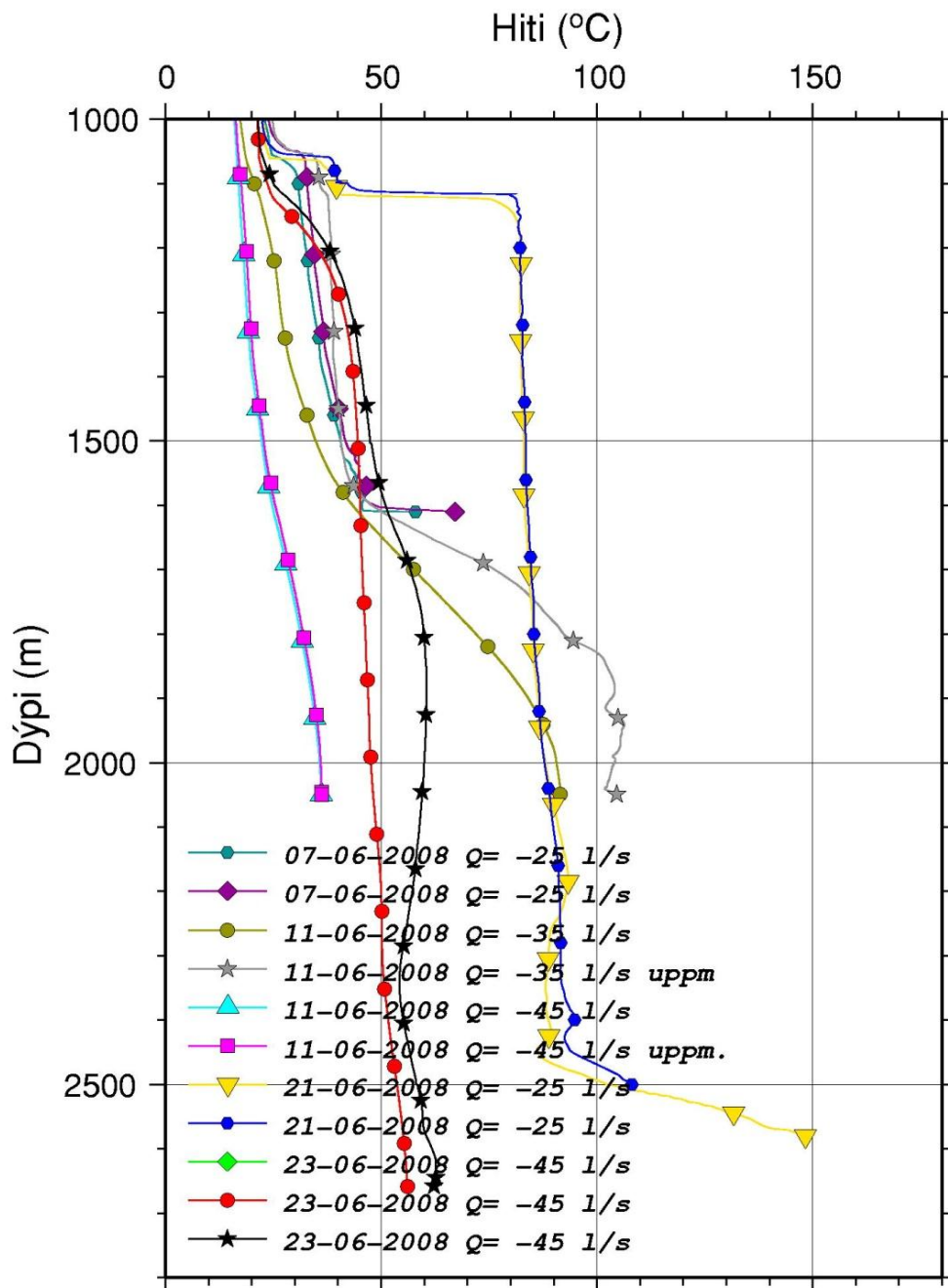
Dags.	Dýpi	Ádæling	Aths.
07.06.2008	20-1612 m	25 L/s	Upp- og niðurmæling vegna gýrómælingar
11.06.2008	20-2050 m	Ath.	Gýrómæling. Fyrst var mælt niður með 10 L/s ádælingu á streng og 15 L/s um kill-line. Dæling svo aukin í 25 L/s á 1250 m dýpi. Mismikil dæling á kill-line sökum vatnsskorts í upphafi. Þegar hitamælir var kominn til botns var dæling tekin af streng, beðið í 25 mínútur og síðan mælt upp
16.06.2008	0-2391 m	42,5 L/s	Í tengslum við stutt þrep. Niðurmæling fyrir þrepapróf.
16.06.2008	1700-2391 m	27,5 L/s	Niðurmæling eftir þrepapróf.
16.06.2008	2391-0 m	27,5 L/s	Uppmæling eftir þrepapróf.
21.06.2008	0-2580 m	25 L/s	Upp- og niðurmæling vegna gýrómælingar
23.06.2008	0-2660 m	40 L/s	Upp- og niðurmæling vegna gýrómælingar 15 L/ dælt á streng og 25 L/s á kill-line og dæling tekin af í 25 mínútur milli mælinga.
24.-25.06.2008	0-2735 m	25 L/s	Fyrir og eftir þrepapróf.

Tafla 20. Æðar greindar í 3. áfanga HE-46 ásamt jarðlögum og athugasemdum.

Dýpi	Stærð		Skoltap	Jarðlög og aths.
1052 m	Meðal. Innstreymi	12/12	-	Innan einingar. Ummyndun túffs eykst. Mikið af epidót.
1100-1170 m	Stór			Æðakafli með áberandi streymi inn í holuna.
1370 m	Lítill	8/12 Sést ekki í niðurmælingu 21.06, uppmælingu 16.06	Vart við skoltap.	Innan einingar. Túffrik breksía, mikið kalsít og epidót. Sést sem skápur og toppur í NN..

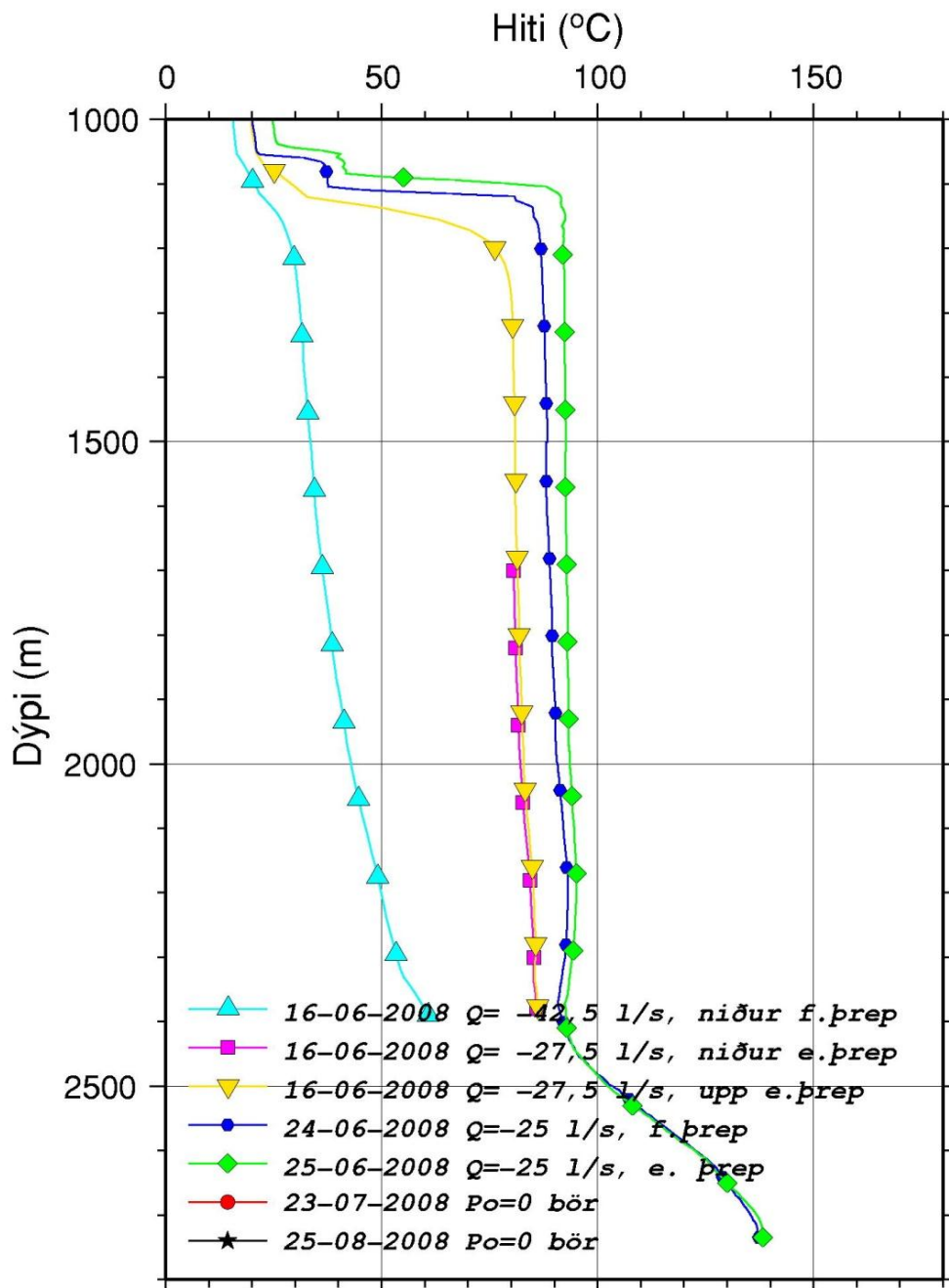
		og 23.06 og mælingu 25.06		
1470-1580 m	Lítill	12/12	Vart við skoltap	Æðakafli. Innan einingar. Engin merki í jarðlagamælingum.
1602 m	Stór	12/12	-	Innan einingar. Sést sem skápur í víddarmælingu. Túfflinsa.
1768 m	Lítill	12/12	Skoltap frá 1724-1796 m. Vatnsveita fór	Innan einingar. Sést í víddar- og NN-mælingu. Svarf vantar.
1804 m	Lítill	12/12 Sést sem kælipunktur í uppmælingu frá 23.06		Innan einingar. Sést í víddarmælingu. Útfellingaríkt túff.
1866 m	Lítill	12/12	Skoltap 1868-1882 m	Nokkuð sést af fínkorna innskotabergi. Svarf vantar. Sést í víddar- og NN-mælingu
1930 m	Meðal	12/12 Kælipunktur	Skoltap 1896-1956 m	Innan einingar. Svarf vantar. Sést í víddar- og viðnámsmælingu.
2300-2370 m	Meðal	8/8		<i>2240-2344 m:</i> Mjög ummyndað, fín-meðalkorna, grænleitt basalt. Kristallastærð basaltsins sveiflast innan einingarinnar, frá fín-meðalkorna. Mjög lítið er um kalsít. Slæðingur af lítt ummynduðum, fínkorna basaltkornum, sem gætu verið ættuð úr þunnum kristölluðum æðum. Neðst í einingunni er basaltið ljóst og inn á milli má finna gulleit, nánast myndlaus korn. <i>2344-2352 m:</i> Svarf vantar. <i>2352-2432 m:</i> Grófkorna og nokkuð af meðalkorna, mikið ummynduðu basalti. Alls staðar finnast ljós, dulkorna korn.
2400 m	Lítill	4/4		<i>2352-2432 m dýpi:</i> Grófkorna og nokkuð af meðalkorna, mikið ummynduðu basalti. Alls staðar finnast ljós, dulkorna korn. Á um 2400 m dýpi kemur inn töluvert af oxuðum kornum með kargalegs ásýnd. Á 2420 m dýpi verður bergið afar hart í borun.
2450 m	Stór	4/4	Skoltap á 2432-2518 m.	Svarf vantar Engar jarðlagamælingar frá þessu dýpi.

Hellisheiði HE-46
Sleggjubeinsdalir
Arnessýsla



Mynd 15. Hitamælingar í tengslum við gýrómælingar í 3. áfanga holu HE-46.

Hellisheiði HE-46
Sleggjubeinsdalir
Arnessýsla



Mynd 16. Hitamælingar í tengslum við þrepamælingar í 3. áfanga holu HE-46.

Viðauki F – Gerð leirsýna

Fyrsta skrefið við undirbúning á gerð leirsýna er að skilja leirsteindir úr borsvarfinu en til þess er notuð sökkhraðagreining.

Um 7,5 g af grófmöluðu borsvarfi er sett í 100 ml plastflösku með um 70-80 ml af eimuðu vatni. Sýnd er gruggað upp með hátíðnibylgjum (750W ultrasonic transducer) til að mynda grugglausn. Þá er því komið fyrir á hristara í um sólarhring áður en það er gruggað upp öðru sinni með hátíðnibylgjum til að sundra grófum leirflyksum í smærri agnir. Loks er vatnsborð flöskunnar stillt af við 90 ml, flaskan hrist og lögð til hliðar fyrir sökkhraðagreiningu.

Sökkhraði er gjarnan metinn út frá lögmáli Stokes, og var hér miðað við 5,4 klst:

$$v_s = 2gR^2(r_p - r_f)/9\mu$$

Þar sem:

v_s = sökkhraði (m/s)

g = þyngdarhröðunin 9,81 m/s²

r_p = eðlisþyngd sökkvandi korns (kg/m³)

r_f = eðlisþyngd vökvans kg/m³ (vatn = 1)

μ = seigja vökvans Ns/m² (vatn = 1)

Óvissan samfara ákvörðun sökkhraða við kornastærðargreiningu leirsteinda felst fyrst og fremst í mismunandi eðlisþyngd steindanna auk þess sem rakastig hefur mælanleg áhrif á þungann enda margar leirsteindir mjög rakadrægar. Gagnlegastar eru því mælingar sem byggja á því rúmtaki vatns sem þær ryðja frá sér eftir að þær eru fyllilega vatnaðar í grugglausn. Slíkar mælingar sýna eðlisþyngd leirsteinda frá 2,53 kg/m³ (halloysite) til 2,72 kg/m³ (montmorillonite) (*Wada & Wada, 1977*). Ætla má að járnríkari afbrigði geti verið þyngri. Þannig má telja nærri lagi að leir úr ummynduðu basalti sé á bilinu 2,7-2,8 kg/m³, og í þessu verkefni er miðað við eðlisþyngdina 2,8 kg/m³. Þá tekur lögmál Stokes til hnöttóttra (*e.spherical*) korna, sem leirsteindir eru ekki.

Í þessu verkefni er miðað við þá skilgreiningu að leir sé allt efni undir kornastærðinni 2 μ . Með þessu móti má gera ráð fyrir að meginuppistaða sýnis sé leir, en þó má gera ráð fyrir einhverri mengun frá öðrum steindum. Algengasta mengunin í sýnunum er af völdum feldspata, kvars og kalsíts en einnig pýríts, zeólíta og járnóxíða.

Öllu efni minna en 2 μ miðað við sökkhraðagreiningu var safnað í flösku og var grugglausnin notuð til að fella út leirsýni á glerplötur fyrir XRD-greiningu. Þá var grugglausnin þurrkuð og sýnið notað til efnagreininga, glæðingar, títrunar og XRD-greininga á 060-topp leirsteindanna.

Viðauki G – Framkvæmd XRD-greininga á leirsýnum

XRD-greiningar (*X-ray diffraction*) eru notaðar til að greina á milli mismunandi kristalgerða leirsteinda auk þess sem notast er við XRD-gögn við greiningu á amfíból.

Tvenns konar greiningar voru gerðar í tengslum við þessa rannsókn. Annars vegar voru gerðar staðalgreiningar á leirsteindum eins og útkast hefur hjá Rannsóknarsviði Orkustofnunar og síðar ÍSOR við háhitaboranir hér á landi. Þá voru gerðar nokkuð ítarlegri greiningar á völdum sýnum til að fá enn gleggri mynd af kristalgerð leirsteinda í jarðhitakerfi, en þær voru gerðar eftir forskrift frá US Geological Survey (hér eftir USGS) (*Poppe o.fl., 2001*).

Sýni voru og útbúin einsog lýst er í **viðauka F**, og voru tvö eintök útbúin af hverju sýni fyrir ítarlegri greiningarnar. XRD-greining var gerð á d001-topp leirsteindanna. Þrjár mælingar voru framkvæmdar á hverju sýni í staðalgreiningunum en þeirri fjórðu bætt við fyrir ítarlegri greiningar.

Fyrst var sýnið mælt eftir þurrkun við stofuhita, þá eftir metnun með ethelyne-glykól í a.m.k. 24 klst og loks við hitun við 550°C í um klukkustund en að auki var sýni hitað í 400°C í um klukkustund fyrir ítarlegri greiningar að forskrift USGS.

Þessar mælingar voru síðan skoðaðar saman og af hegðun leirsteindanna og breytingum sem á þeim verða er unnt að greina þann hóp sem leirinn heyrir til.

XRD-greiningar voru einnig gerðar á d060-topp leirsteindanna til að kanna hvort um di-oktahedral eða tri-oktahedral leir væri að ræða. Þar sem magn leirsins reyndist nægilegt var leirinn malaður og settur í PMMA-sýnahaldara en minni sýni voru útbúin á kvarsplötu með acetoni.

Fyrir greiningu á d001-toppi leirsteindanna var notast við hefðbundna mælingaruppsetningu sem vistuð er í keyrsluskrá hjá ÍSOR sem kallast *leir-a.dql*. Mælt er frá $2\Theta=2^{\circ}$ – 14° og á $0,02^{\circ}$ fresti er mælt í eina sekúndu. Hver mæling tekur um 20 mínútur.

Fyrir greiningu á d060-toppi leirsteindanna var notast við mælingaruppsetningu sem vistuð er í keyrsluskrá hjá ÍSOR sem kallast *leir060.dql*. Mælt er frá $2\Theta=59^{\circ}$ – 64° og á $0,01^{\circ}$ fresti er mælt í fimm sekúndur. Hver mæling tekur um 40 mínútur.

Geislinn er þrengdur með $0,5^{\circ}$ rauf (e. divergence slit, receiving slit). Niðurstöðurnar eru ómeðhöndlaðar að öðru leyti en því að truflanir (e. aberrant data) hafa verið síaðar frá.

Notaður var diffractometer frá Bruker í eigu ÍSOR, D8 Focus og notuð Cu α geislun á $1,54 \text{ \AA}$ bylgjulengd á 40 mA og 40 kV með 1° raufum og NaI sindurteljara (e. *scintillation counter*).

Viðauki H - Efnagreining berg- og leirsýna með ICP-OES

Efnagreining bergs og leirsteinda með ICP-OES (*Argon Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy*) er gerð á uppleystu bergi eða leir.

100 ± 1 mg af möluðu bergi/leir var vegið saman við 200 ± 2 mg af lithium metaborati (LiBO₂) í grafitdeiglu. Deiglan var því næst hituð í glæðiofni við 1000°C, brædd í um 30 mínútur og sýnið svo látið storkna í glerperlu. Glerperlan var síðan leyst upp á snúningsborði í blöndu af afjónuðu vatni, 5% saltpéturssýru (HNO₃), 1,33% saltsýru (HCl) og 1,33% af mettaðri oxalsýru (H₂C₂O₄). Eftir um fjórar klukkustundir er sýnið tilbúið til mælingar.

Mælingin var gerð á Spectro CIROS litrófsgreini Jarðvísindastofnunar HÍ. Þessi gerð tækja les af allar litrófslínur samtímis þannig að hlutföll hinna mældu efna eru greind með mikilli vissu. Það veltur síðan á stöðlun ásamt innvigtun og upplausn sýnisins hver summa aðalefnanna verður.

Staðlarnir sem notaðir voru eru innanhússtaðlar hjá Jarðvísindastofnun; A-THO, B-THO (sami staðall og alþjóðlega viðmiðunarsýnið BIR-1) og B-ALK en auk þess alþjóðlegu viðmiðunarsýnin BHVO-1, QLO-1 og RGM-1.

Keyrslustillingar tækisins eru skráðar í töflu 1.

Tafla 1. Keyrslustillingar fyrir efnagreiningar með ICP-OES

Nebulizer:	Cross-flow
Coolant flow:	14 L/min
Auxiliary flow:	0,6 L/min
Neubilizer flow:	0,85 L/min
Forward power:	1400 V
Counting time:	25 * 1 sec

Viðauki I – Títrun leirsýna, Wilson aðferðin

10 mg af leir var veginn inn í plastflösku, 200 μ l af ammonium vanadate lausn bætt úti ásamt 10 ml af flúórsýru. Flöskunni var þá lokað og leirinn látinn leysast upp í 24 klst.

Við uppleysingu leirsins losna Fe(II) jónir hans, sem eru undir eins oxaðar af vanadati í Fe(III) og vanadate-jónir afoxast við það í vanadyl. Umfram magn vanadads er svo ákvarðað með títrun.

Þegar leirinn var að fullu uppleystur var 3 ml af 10 M brennisteinssýru bætt úti ásamt 3 ml af bórsýru. Þá var tveimur dropum af litvísi bætt við og allri blöndunni hellt í teflonglas með segulhræru. Flaskan var svo skoluð með 5 ml af eimuðu vatni og vatninu bætt út í glasið.

Glasið var þá sett á vog og hún núllstillt. Segulhræran var sett af stað og jærnlausn bætt út í lausnina dropa fyrir dropa þar til slær yfir, þ.e.a.s. þegar allt umfram magn vanadads hefur afoxast í vanadyl og tvígilda jærnið í jærnlausninni oxast í þrígilt jærn. Við það breytist litur lausnarinnar úr fjólubláu í litlausan gráleitan.

Glasið var þá vegið á nýjan leik til að ákvarða magn jærnlausnar sem notað var við títrunina, en það endurspeglar þá það magn vanadads sem eftir var eftir að leirinn var leystur upp. Með því að draga það magn frá upphaflegu magni vanadads í lausninni fæst þá hlutur tvígilds jærns í leirnum.

Viðauki J – Örgreiningar

Örgreiningar voru gerðar með örgreini Jarðvísindastofnunar af gerðinni ARL-SEM-Q-30.

Við framkvæmd greininganna var hröðunarspenna geislans stillt á 10 kV og sýnastraumur stilltur á 20nA. Eftirfarandi staðlar voru notaðir:

VG-A99 fyrir Si, Mg og Na, Hornblende Kakanui fyrir Ti, Fe, Ca og K, Corundum fyrir Al og Ilmenite Sawyer fyrir Mn.

Viðauki K – Grein fyrir World Geothermal Congress(WGC) á Bali 2010

Geology and Hydrothermal Alteration in the Reservoir of the Hellisheiði High Temperature System, SW-Iceland

Helga Margrét Helgadóttir, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Steinþór Níelsson, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Theódóra Matthíasdóttir, Björn S. Harðarson, Gunnlaugur M. Einarsson and Hjalti Franzson

ISOR Iceland Geosurvey, 9 Grensásvegur, 108 Reykjavík, Iceland

helga.m.helgadóttir@isor.is

Keywords: Hellisheiði, Hverahlíð, geology, stratigraphy, aquifer, hydrothermal alteration, formation temperature.

1. ABSTRACT

The Hengill central volcano is situated in the Western Volcanic Zone in Iceland on a triple junction where two active rift zones meet a seismically active transform zone. The area is a high temperature geothermal field which Reykjavík Energy has been exploring and exploiting. Presently the drilling of well number 55 is taking place in the Hverahlíð field at the southeastern sector of the Hengill area. Aside from those the drilling of 12 reinjection wells has already taken place.

The dominant rock formation in the Hellisheiði field is hyaloclastite (tuffs, breccias and pillow lavas) formed sub-glacially. This is to be expected as the area is a part of the Hengill central volcano where sub-glacial rock formations pile up. Lava successions from interglacial periods flow to the lowlands and are therefore less common. Hverahlíð field is, however, different from the Hellisheiði field in respect of the build up of lavas since the dominant rock formation in Hverahlíð wells is lava series. This would suggest that Hverahlíð has been outside the domains of the Hengill central volcano.

Aquifers in 57 wells at Hellisheiði have been located using down-hole temperature logs. Aquifers in the wells were assessed and placed at 100 m depth intervals and normalised with respect to the number of wells reaching each depth interval showing that large aquifers are not found below 2000 m depth.

Hydrothermal alteration ranges from totally fresh rocks in the overlying cold groundwater system through zeolite assemblage and into high-temperature mineral assemblage including epidote, wollastonite and actinolite. The comparison of alteration and formation temperatures seems to indicate minor cooling at the western side of Skarðsmýrarfjall as well as a cooling front from the east between Skarðsmýrarfjall and Hverahlíð. The Gráuhnúkar area, at the south western sector of the Hellisheiði field seems to be heating up and the same can be said about a certain part of the Hverahlíð field. Formation temperature and hydrothermal alteration indicate three upflow zones beneath Gráuhnúkar, Reykjafell and Hverahlíð.

2. 1. INTRODUCTION

Iceland, being formed within the rifting environment of the Mid-Atlantic ridge, consists mostly of igneous rocks of which about 90% are basalts. Sedimentary rocks are less than 5% of the bedrock and are dominantly erosional from the volcanic succession. The Hengill central volcano sits in the middle of the Western Volcanic Zone in Iceland (figure 1). The volcano consists mainly of hyaloclastite formations, the products of sub-glacial eruptions. Occasionally they are

interrupted by lava successions which have flowed to the lowlands during interglacials.

The area is a triple junction where two active rift zones (the Reykjanes Peninsula Volcanic Zone and the Western Volcanic Zone) meet a seismically active transform zone (the South Iceland Seismic Zone). The Hellisheiði and Hverahlíð high-temperature fields are a part of a 110 km² low resistivity anomaly of the Hengill central volcano and situated in its southern sector.

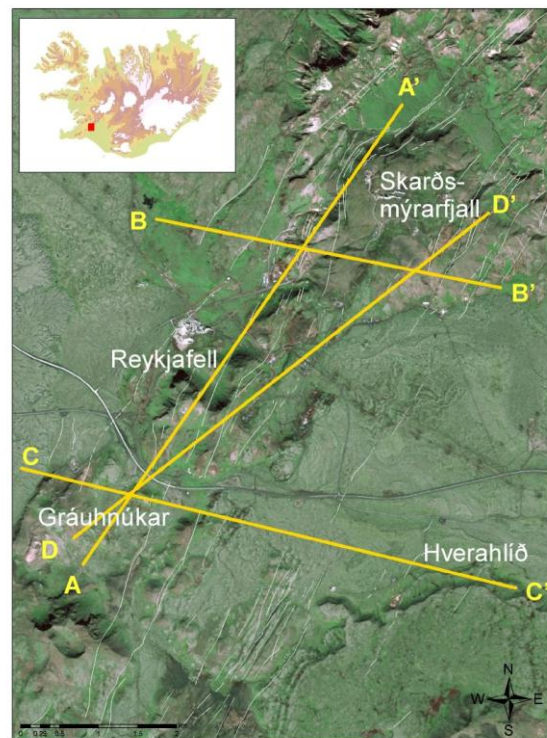


Figure 1: Location of Hellisheiði high-temperature field, with apparent faults and cross section lines.

The first exploration well of the Hellisheiði area was drilled in 1985 at Kolviðarhóll at the western boundary of the field. Since then a vigorous exploration and drilling of the field has taken place, especially in the last three years. More than fifty production and exploration wells (HE-wells) have been drilled to date as well as twelve reinjection wells (HN-wells). All of the wells have been drilled by Jarðboranir Ltd, the main drilling company in Iceland. The Hellisheiði power plant's current production capacity is 213 MWe but further power plants in the area are being constructed. The eventual production is estimated to be 300 MWe and 400 MWt (Harðarson et al. 2009). Presently the drilling of well HE-55 is taking place in the Hverahlíð field southeast of the Hellisheiði field but of the 55 production wells 46 have

been drilled in Hellisheiði and 5 in Hverahlíð. The depths of the wells range from around 800 m to more than 3000 m. Directional wells dominate in both Hellisheiði and Hverahlíð fields.

This paper is largely built on preliminary well data from specifically chosen wells from various areas within the southern part of the Hengill central volcano (Hellisheiði field and Hverahlíð field). The intense drilling of the last few years has given researchers limited time to explore in detail the data that has already piled up. Reykjavík Energy has, however, started off a number of studies in the area (e.g. Gunnlaugsson and Gíslason 2005, Franzson et al. 2005, Franzson et al. 2010, Harðarson et al. 2010 and Níelsson and Franzson 2010) and intends to continue this work in the near future. The geological data is primarily based on cutting analysis of samples taken at 2 m interval during drilling, temperature logs, XRD studies on clay in some of the wells, and geophysical borehole logs (resistivity, caliper, neutron-neutron, natural gamma). The data is used to determine rock formations, thermal alteration and permeability structures in the wells. The data has been integrated into a conceptual model of the reservoir using Petrel, a 3D reservoir engineering software.

Reservoir studies have shown that permeability in the upper part of boreholes in Iceland is mostly controlled by stratification boundaries. On the other hand, faults and fractures along intrusive boundaries seem to dominate the permeability in the lower part of the wells (Franzson et al., 2001). This will not be evaluated here as this has not been studied in any detail at this point.

3. 2. GEOLOGICAL STRUCTURES

The southern part of the Hengill area rises up to approximately 600 m elevation at Skarðsmýrarfjall (figure 1). A large geothermal high temperature anomaly has been proved to exist in the area by means of extensive geological mapping and geophysical exploration (e.g. Árnason and Magnússon 2001). The Hengill system is dominated by a NE-SW strike of major fractures and faults. In some places, however, the fractures are intersected by easterly striking features which may affect the permeability of the Hellisheiði field (Harðarson et al. 2007). Volcanic fissures of 5 and 2 thousand years seem to play an important role as major outflow zones in the field (e.g. Sæmundsson 1995, Björnsson 2004 and Franzson et al. 2005). These fissures have been one of the two main drilling targets in the Hellisheiði field. Large NE-SW fault structures at the

western boundary of the Hengill graben, with more than 250 m total throw (Franzson et al. 2005, Harðarson et al. 2009) have also been targeted as these serve as major feed zones of the hydrothermal system. In addition they have also been used as targets for the reinjection wells of the area.

4. 2.1 Volcanic succession

The cross sections presented here are located along the lines A-A', B-B', C-C' and D-D' (figure 1). The simplified volcanic successions are shown in figures 2-5. In short the area is mainly built up of hyaloclastite formations and the occasional lava series. Hyaloclastites are dominant and (as stated before) are formed in sub-glacial eruptions resulting in highlands. The fact that the area is dominantly made of hyaloclastites would suggest that the Hellisheiði field is within the Hengill central volcano where eruptions were most frequent, forming highlands during glacial (figures 2, 3 and 5). Lava series are, however, formed during interglacials, flowing downhill and accumulating in the surrounding lowlands (Franzson et al. 2005). Hverahlíð field is somewhat different to the rest of the area as the stratigraphy is dominantly built up of lava successions (figure 4). This would suggest that the Hverahlíð field was outside the main volcanism of the central volcano during glacials (Níelsson and Franzson 2010). The relation of the lava series in Hverahlíð to Gráuhnúkar area is not clear. The drilling of well HE-55, at the western sector of Hverahlíð, will hopefully answer some questions about the matter.

Postglacial volcanism includes the two volcanic fissures mentioned before (5 and 2 thousand years old) along with a fissure eruption of 9 thousand years. Postglacial lavas are shown in figures 2-5 as red manifestations at the surface. It is interesting to note that the postglacial lavas in Hverahlíð (figure 4) are considerably thicker than in other areas concerned.

The base of the Hengill central volcano is believed to be at about 900-1300 m b.s.l. (figures 2-5). A study from the Nesjavellir field (Franzson 1998) suggested that the age of the complex was around 300.000 years which seems to be an absolute minimum. The age has since then been suggested to be around 400,000 years (Franzson et al. 2005). The four lava series in cross-section B-B' (figure 4) can be viewed as representations of four interglacials which would also suggest the same age (given that interglacials occur every 100.000 years approximately).

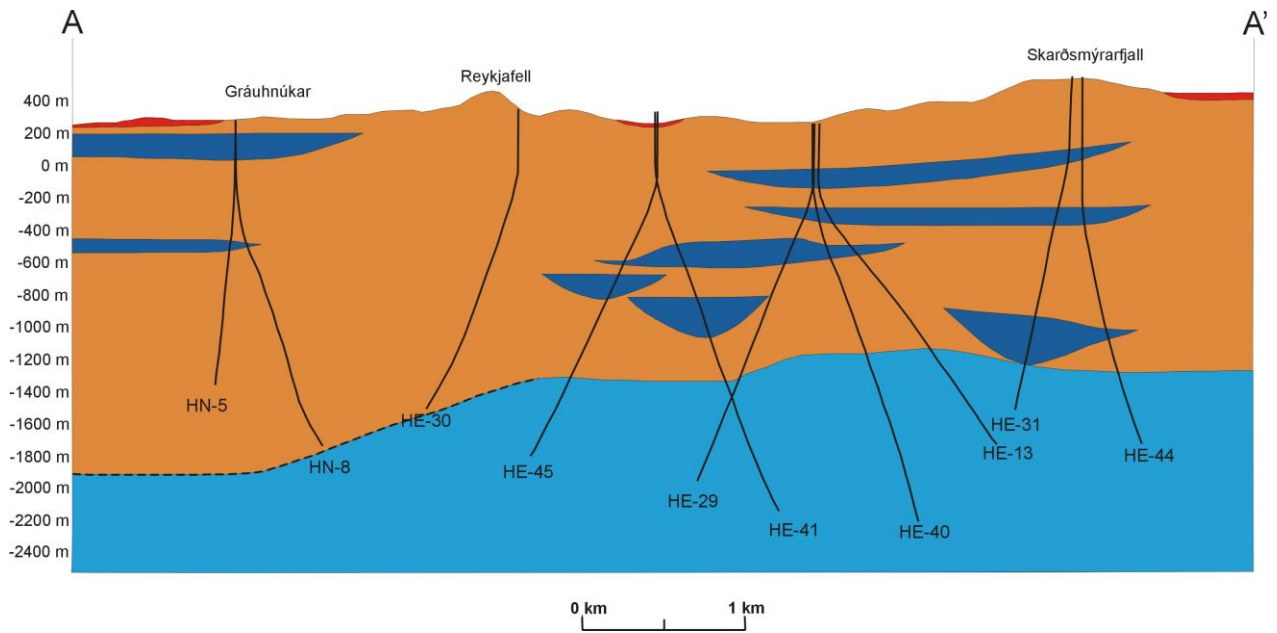


Figure 2: Geological cross section along line A-A'. Blue formations are interglacial lava series and the light blue formation is interpreted as the bottom of the Hengill central volcano. Red formations are postglacial lavas. Brown formations are hyaloclastite formations. Dotted, black line represents areas where no data is available.

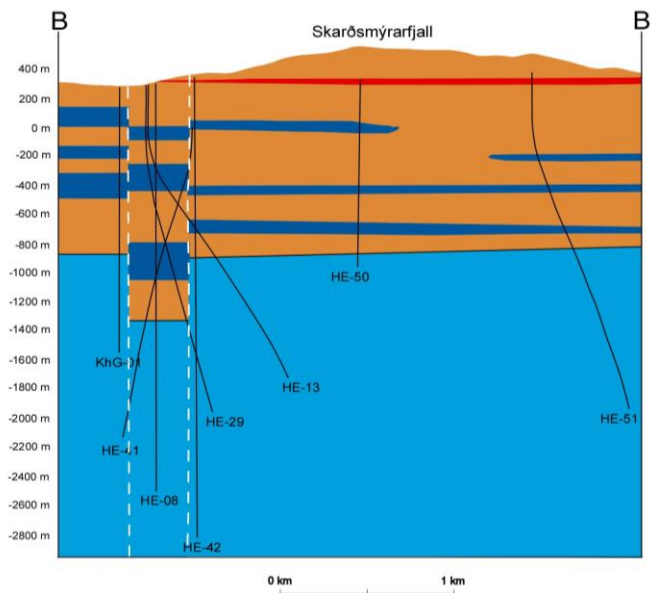


Figure 3: Geological cross section along line B-B'. Same legend as in figure 2.

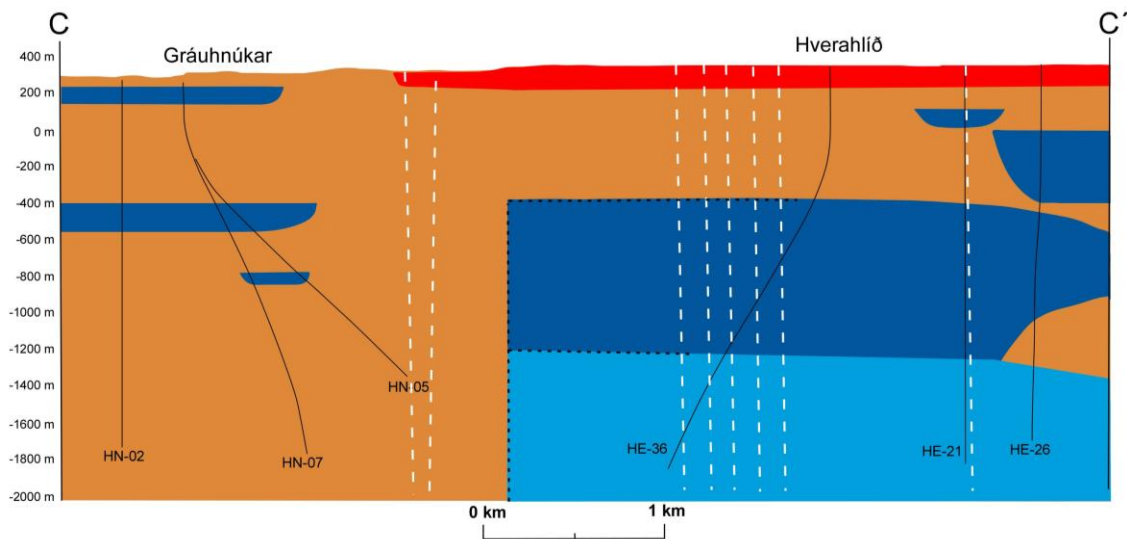


Figure 4: Geological cross section along line C-C'. Same legend as in figure 2.

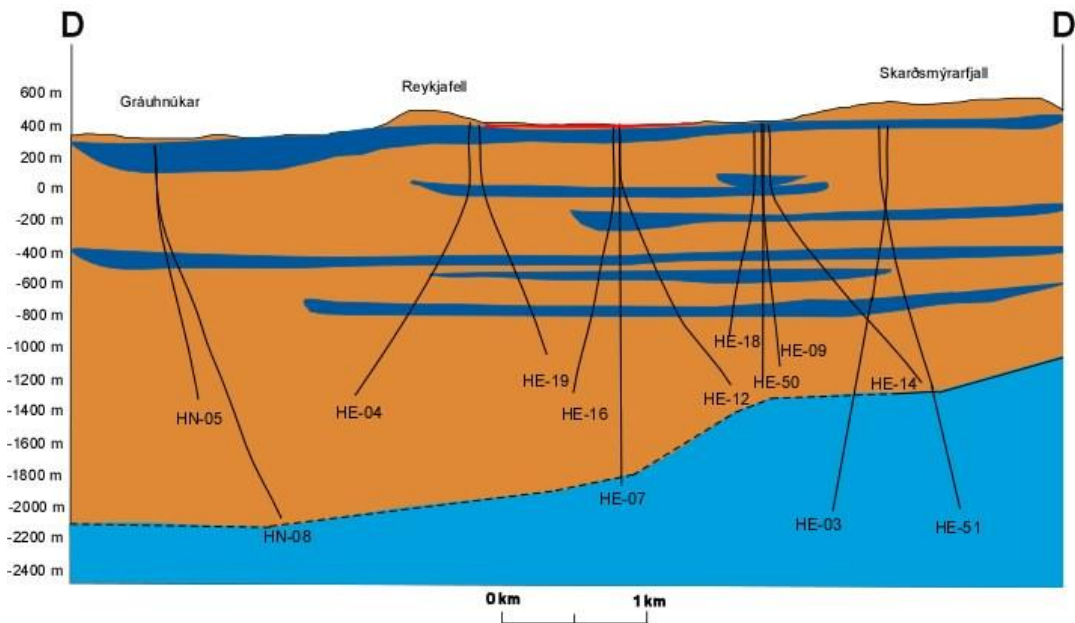


Figure 5: Geological cross section along line D-D'. Same legend as in figure 2.

5. 2.2 Faults

Faults in the area will not be discussed in this paper as their study has not finished. The geological cross section B-B' shows, however, the presence of a distinct graben through Reykjafell mountain with a total throw of up to 500 m (figure 3). In the figure this is simplified by showing two apparent faults on either side of the graben. The other cross sections do not show faults except in C-C' where possible faults are shown as white, dotted lines. According to Franzson et al. (2005, 2010) the fissure swarm of the Hengill area is a depression structure with major NE-SW faults in the western part with a total throw of more than 300 m. The faults in the eastern part are not as accurately located although it is assumed that a similar overall throw will be found, perhaps on a wider horizontal scale. This awaits future research as the total throw at the western

boundary of the Hengill central volcano seems to be more than stated above (Franzson et al. 2005).

6. 2.3 Aquifers

Feed points, or aquifers, in the wells can be located using temperature logs, circulation losses, hydrothermal alteration and other relevant drilling data.

However, data used in our analyses has been determined using only down-hole temperature logs. Aquifers in 57 wells were assessed and placed at 100 m depth intervals. It is problematic to predict the size of aquifers from temperature logs alone and consequently the aquifers have been given an arbitrary size: small, medium and large. Depth of the wells ranges from 800 – 2700 m b.s.l. and the number of wells found at 100 m depth intervals can be found in table 1.

Figure 6 shows a histogram with the number of aquifers in each 100 m interval as well as a normalized version of the same histogram (normalized with respect to the number of wells reaching each 100 metre interval). The plot reaches a maximum at around 400-600 m b.s.l. The production casing is normally down to 400 m depth and drilling mud is used down to that depth. The fewer feed points recorded in that depth interval may to some extent be related to that the mud clogs the permeability structures. The histograms show that the probability of finding any aquifers in the production part of the wells drops below 1500 m depth and no big aquifers are found below 2000 m. The rapidly decreasing number of wells below 2000 m depth increases the error margin of such a statement.

While temperature logs are the best way to find aquifers (feed points) not all aquifers appear on them. In each well a pivot point is found at a certain depth. Above that point water flows out of an aquifer into the well and below water flows from the well and into an aquifer. Around the pivot point water is neither flowing in nor out and therefore aquifers do not show on a temperature log. Using the methods described here makes it almost impossible to place the pivot point accurately in each well. Consequently it is difficult to evaluate what effects these “invisible” aquifers will have on the results shown in figure 6. From figure 6 it is apparent that the number of aquifers drops significantly at 1500 m. However, this drop is not caused by the pivot point in the wells, as these points have been estimated to be located higher up in the 57 wells. At this stage in our research the reason for this drop is obscure.

The relationship between geological factors and the number and size of aquifers is not very well understood and further analysis is needed in order to define this connection. For example, the stratigraphy, the number of intrusives, alteration and tectonics can all play an important role and these factors will be investigated in the research ahead. There are, however, indications of the largest aquifers being located in highly altered areas (Harðarson et al. 2009, Franzson et al. 2005). There are also strong indications of aquifers occurring in association with intrusions (e.g. Franzson, 1998). This awaits further investigation.

Table 1: Number of wells at 100 m depth intervals. This data was used to normalize the number of aquifers (feed points) in the wells.

Depth intervals	Number of wells
400 to 300 m	57
300 to 200 m	57
200 to 100 m	57
100 to 0 m	57
0 to -100 m	57
-100 to -200 m	57
-200 to -300 m	57
-300 to -400 m	57
-400 to -500 m	57
-500 to -600 m	57
-600 to -700 m	57
-700 to -800 m	57
-800 to -900 m	56
-900 to -1000 m	54
-1000 to -1100 m	51
-1100 to -1200 m	50
-1200 to -1300 m	48
-1300 to -1400 m	41
-1400 to -1500 m	35
-1500 to -1600 m	34
-1600 to -1700 m	29
-1700 to -1800 m	27
-1800 to -1900 m	19
-1900 to -2000 m	16
-2000 to -2100 m	13
-2100 to -2200 m	8
-2200 to -2300 m	5
-2300 to -2400 m	3
-2600 to -2700 m	1

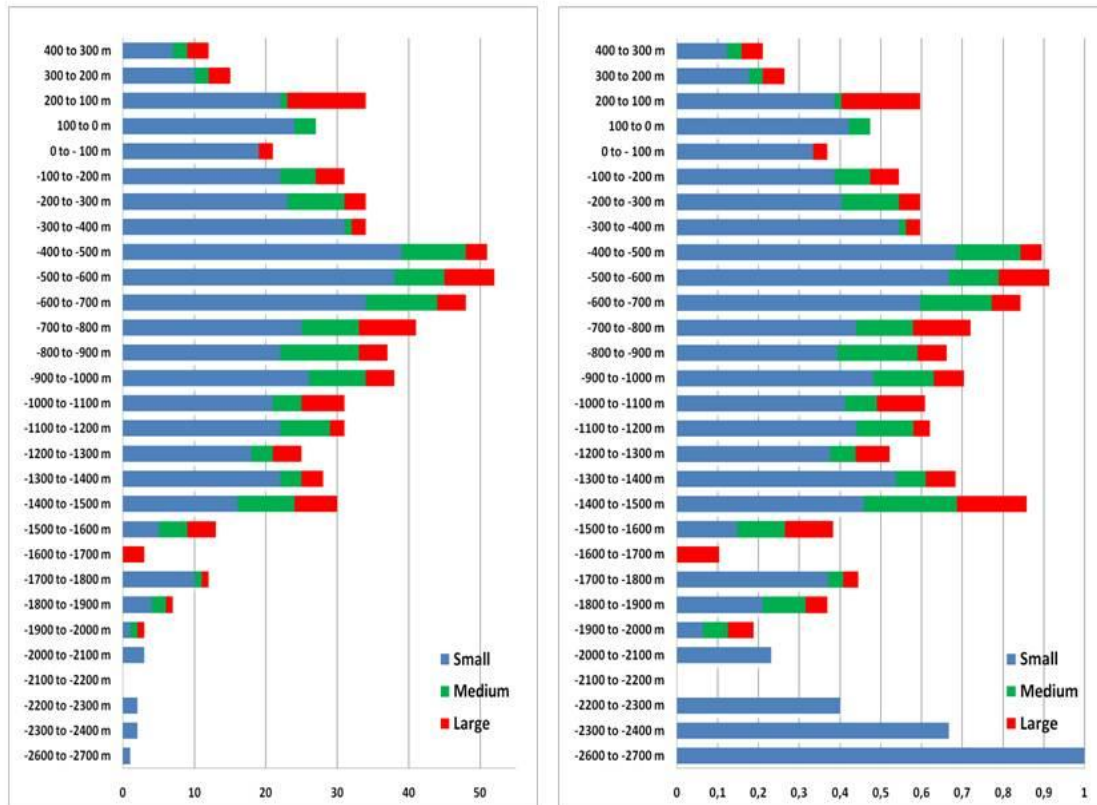


Figure 6: Aquifers at 100 m intervals in wells in Hellisheiði. The histogram to the right is normalized.

7. 3. HYDROTHERMAL ALTERATION AND TEMPERATURE DISTRIBUTION

Hydrothermal alteration has been studied in some detail in about half of the wells in the area and preliminary data is available in all of the other wells.

In general all the typical hydrothermal alteration zones are observed; from totally fresh rocks to the epidote-amphibole zone. Our main emphasis is to show the variation in depth of some of the temperature dependant minerals and to compare this alteration with the present formation temperatures in the system. The minerals used are quartz (>180°C), epidote (>230-250°C), wollastonite (>260°C) and amphibole (>280°C).

The topography of the hydrothermal system is shown in figures 7-10 where the formation temperature is pictured along with the contour lines of the first occurrence of quartz, epidote, wollastonite and amphibole in each of the cross sections. By comparing the formation temperature with the temperature dependant minerals we get a notion of whether the specific area is in equilibrium, cooling down or heating up.

The formation temperatures in the geothermal system of the Hellisheiði and Hverahlíð fields have been interpreted on grounds of well logging. The data has been imported into Petrel, a 3D software program, which produced the figures in question.

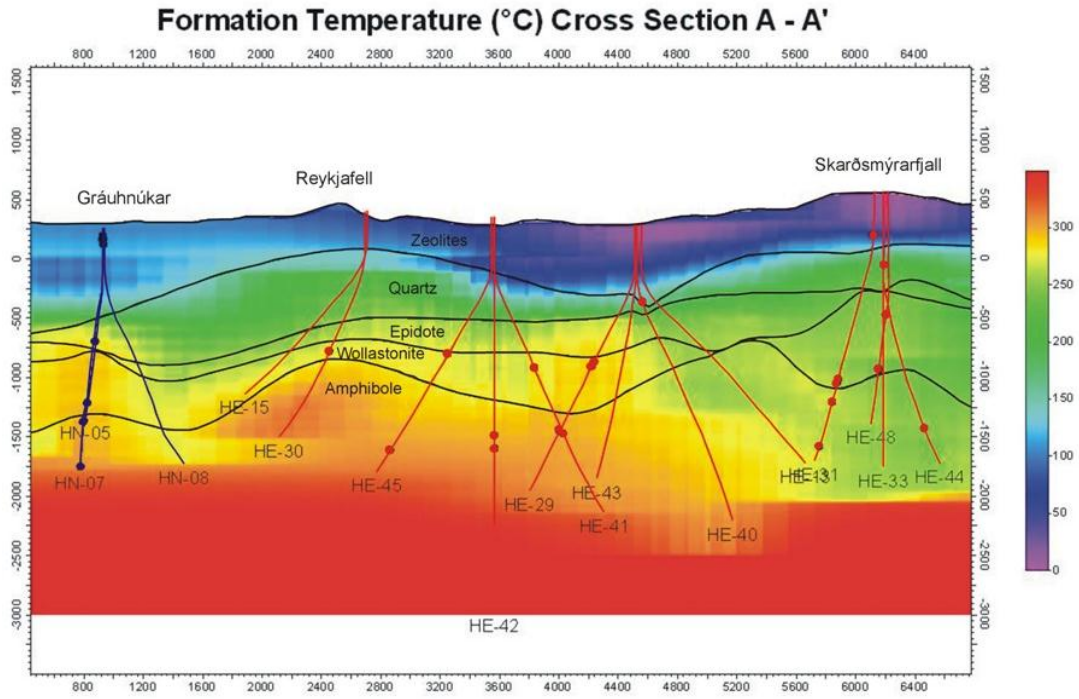


Figure 7: Cross section along line A-A' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals. Main aquifers are also shown.

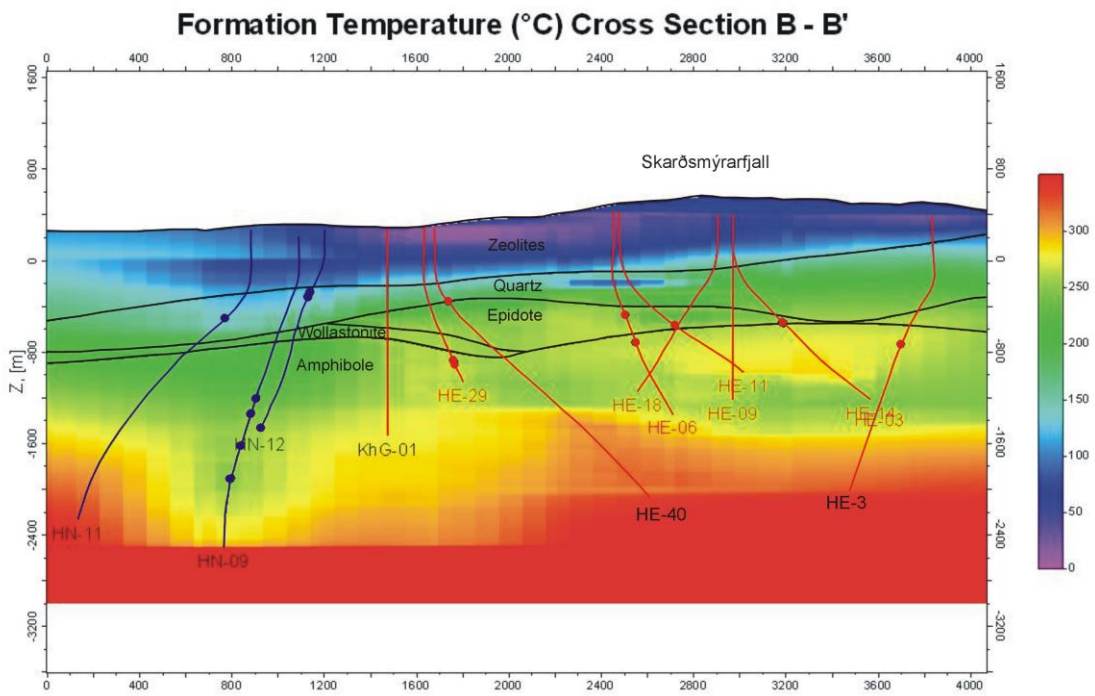


Figure 8: Cross section along line B-B' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals. Main aquifers are also shown.

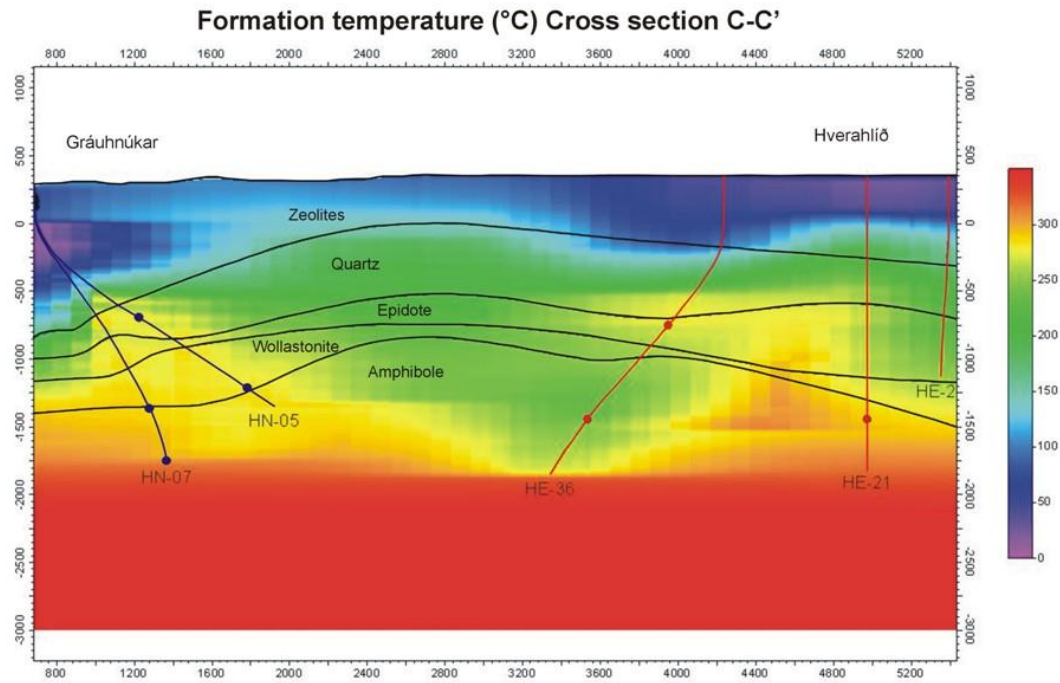


Figure 9: Cross section along line C-C' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals. Main aquifers are shown.

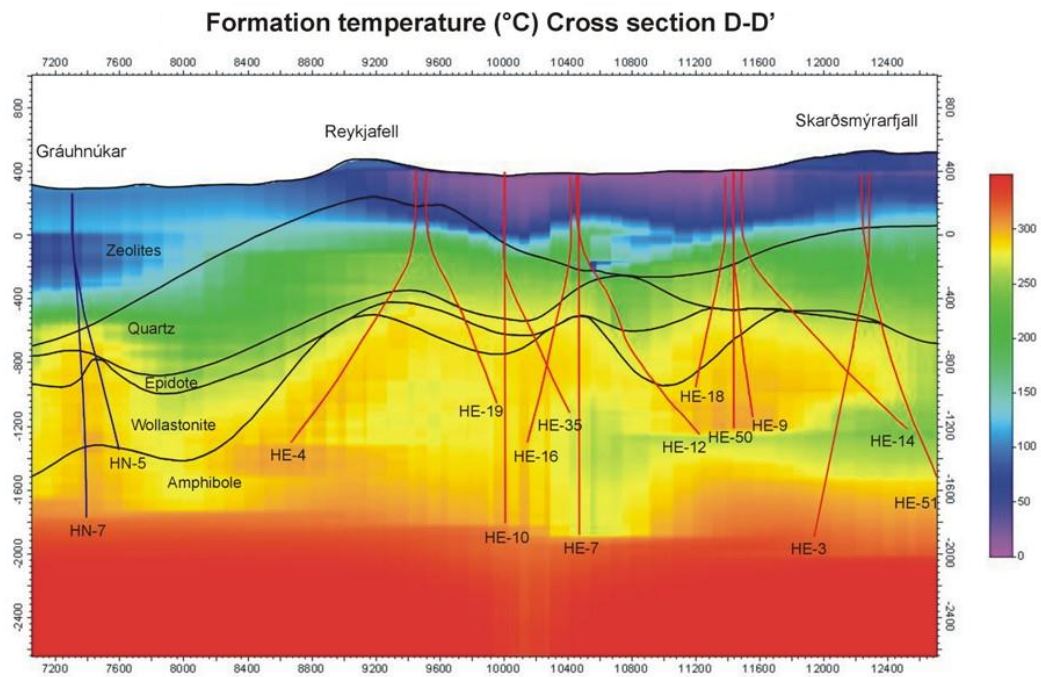


Figure 10: Cross section along line D-D' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals.

8.

9. 4. DISCUSSION

Much of the data is preliminary and must therefore be assessed as such. In 2005 the first step towards the making of a geothermal model of the Hellisheiði area was made (Franzson et. al. 2005). Since then a large number of wells has been drilled and the data available is still expanding.

10. 4.1 Geological relations

The Hellisheiði field is dominantly built up of hyaloclastites, formations of limited horizontal extent. In this paper no distinction is made between different hyaloclastite formations. Lava series can be used as marker horizons but in this case the connection made between lava series is preliminary. At this time thin sections have not been inspected to verify the connection. This will be done in some of the wells in near future. In cross section B-B' (figure 3) four lava series are found. The deepest one is considered to be the base of the Hengill central volcano and all of the lava series are believed to indicate inter-glacials (which occur approximately every 100.000 years). The age of the volcano is therefore considered to be 400.000 years old (as stated in Franzson 2005). The base is not found in all of the wells and the depth to it ranges from approximately 900 m b.s.l. to 1300 m b.s.l. (figures 2-5) which supports the belief that the volcano is older than 300.000 years.

Since the stratigraphy of the Hverahlíð wells is dominantly built up of lava successions it is suggested that the Hverahlíð field has not been a part of the Hengill central volcano. This may indicate a separate origin although it seems to be a part of the main fissure system of the Hengill area (Níelsson and Franzson 2010) and is therefore connected to the hydrothermal system. Further drilling is now ongoing in Hverahlíð which will hopefully give a more comprehensive idea of the extent of the field.

11. 4.2 Formation temperatures compared to alteration temperatures

The distribution of formation temperatures and hydrothermal alteration indicates three upflow zones within the Hellisheiði and Hverahlíð reservoirs. These are situated beneath Gráuhnúkar, Reykjafell and Hverahlíð (figures 7-10). Speculations of a separate upflow zone in Reykjafell were made in 2005 (Franzson et. al. 2005).

Figures 7-10 indicate an overall correlation between formation temperature and alteration temperature. The most apparent exception is the area west of Skarðsmýrarfjall (figure 7) where minor cooling seems to have taken place. This is also obvious in cross section B-B' (figure 8) where the alteration temperatures lie at a considerably higher level than the formation temperature would suggest. Figure 10 shows a cross section through Skarðsmýrarfjall, further to the east than figure 7, where the formation temperatures and the alteration temperatures seem to be in more concordance. This suggests that the south eastern part of Skarðsmýrarfjall could be in equilibrium. Places of apparent heating up are beneath Gráuhnúkar on the southwestern sector (at least at shallower levels) (figures 7, 9 and 10) and in Hverahlíð, between wells HE-36 and HE-21 at -400 to -800 m b.s.l. (figure 9).

In figure 11 the contour lines of quartz can be seen. Compared to figure 12, where the contour lines of 180°C formation temperature is shown, it seems there is a cooling

front on the western side of the field. The most apparent difference is evident in the western and northern part of the Skarðsmýrarfjall area, where quartz is considerably higher up than the equivalent formation temperature. This is interpreted as an area that has been cooling down; where formation temperatures used to be higher in the past. At the south eastern slopes of Skarðsmýrarfjall, the contour lines of quartz are, however, at a shallow depth and the formation temperature is in concordance with that. This fits nicely with the cross-sections in figures 7-10. The heating up of Gráuhnúkar and Hverahlíð is also noted when figures 11 and 12 are compared whereas a cooling front seems to invade from the east towards Reykjafell between Hverahlíð and Skarðsmýrarfjall.

The speculation of three separate upflow zones beneath Reykjafell, Gráuhnúkar and Hverahlíð therefore seem to be coherent with the results of the comparison between hydrothermal alteration and formation temperature.

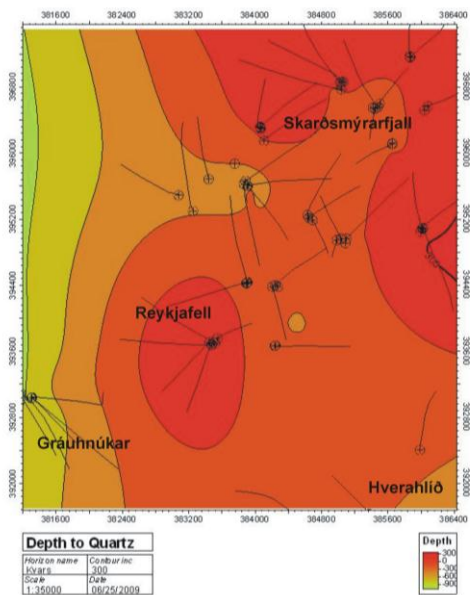


Figure 11: Depth to quartz.

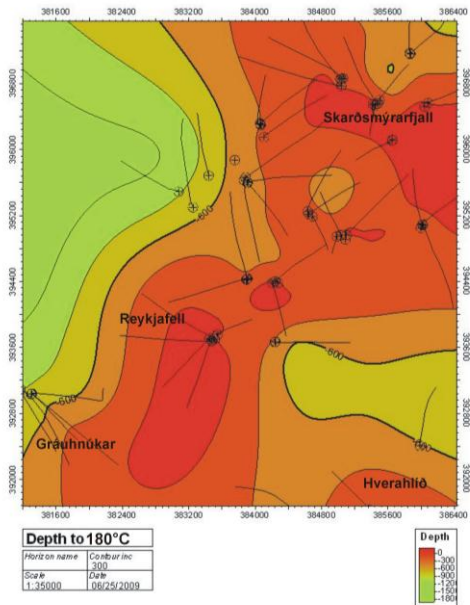


Figure 12: Depth to 180°C.

12. 5. CONCLUSIONS

The drilling of numerous exploration, production and reinjection wells in the Hellisheiði and Hverahlíð fields has produced a pile of data that still needs research. What has been revealed in this paper is this:

13. Approximately 0,4 m.y. age of the base of the Hengill volcano is accepted as four different lava successions seem to be found in one of the cross sections. This is believed to represent four interglacial lava series.
14. The Hellisheiði field is mainly built up of hyaloclastite successions, indicating a placement within the Hengill central volcano. The Hverahlíð field, on the other hand, shows the dominance of lava successions in the stratigraphy, which suggests that the area was not part of the Hengill central volcano but rather a part of the lowlands beside the volcano.
15. Results of the assessment of aquifers show that the probability of finding aquifers drops below 1500 m depth and no large aquifers are found below 2000 m depth. Factors that can affect the results of the temperature logs are the location of the pivot point in wells and the use of mud while drilling. Since the relationship between geological factors and the number and size of aquifers is poorly defined, research in this area will be continued.
16. Hydrothermal alteration compared to formation temperatures suggests some cooling at the western boundary of the Hellisheiði field as well as a cooling front from the east towards Reykjafell. Heating is suggested in Gráuhnúkar and Hverahlíð. Otherwise the field appears to be in equilibrium.
17. There seem to be at least 3 upflow zones in the area concerned; beneath Gráuhnúkar, Reykjafell and Hverahlíð.

18. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Reykjavík Energy for the permission to publish the data. Co-workers at ISOR are also thanked for the assistance in gathering data.

19. REFERENCES

- Árnason, K. and Magnússon, I.P.: Geothermal activity in the Hengill area. Results from resistivity mapping. *NEA report*, in Icelandic with English abstract, OS-2001/091, (2001), 250 p.
- Björnsson, G.: Reservoir conditions at 3-6 km depth in the Hellisheiði geothermal field, SW-Iceland, estimated by deep drilling, cold water injection and seismic monitoring. *Proceedings, Twenty Ninth Workshop on Geothermal Research in Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 26-28 (2004).
- Franzson, H.: Reservoir geology of the Nesjavellir high-temperature field in SW-Iceland. *Proceedings 19th Annual PNOG EDC Geothermal Conference*, Makati City, Philippines, March 5-6 (1998).
- Franzson, H., Kristjánsson, B.R., Gunnarsson, G., Björnsson, G., Hjartarson, A., Steingrímsson, B., Gunnlaugsson, E. and Gíslason, G.: The Hengill-Hellisheiði Geothermal Field. Development of a Conceptual Geothermal Model, *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 24-29 April (2005).
- Franzson, H., Árnason, K., Sæmundsson, K., Steingrímsson, B., Harðarson, B.S. and Gunnlaugsson, E.: The Hengill geothermal system, conceptual geological model. WGC, Bali, submitted (2010).
- Franzson, H., Guðlaugsson, S.P. and Friðleifsson, G.Ó.: Petrophysical Properties of Icelandic Rocks. *Proceedings of the 6th Nordic Symposium on Petrophysics, 15-16 May 2001, Trondheim, Norway* (2001).
- Gunnlaugsson, E. and Gíslason, G. Preparation for a New Power Plant in the Hengill Geothermal Area, Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 24-29 April (2005).
- Harðarson, B.S., Helgadóttir, H.M. and Franzson, H.: The Hellisheiði power plant. The injection area by Gráuhnúkar. In Icelandic, Report, ISOR-2007/001 (2007).
- Harðarson, B.S., Einarsson, G.M., Franzson, F., Helgadóttir, H.M., Árnason, K., Ágústsson, K., Gunnlaugsson, E. and Kristjánsson, B.R. Geothermal Reinjection at the Hengill Triple Junction, SW Iceland. WGC, Bali, submitted (2010).
- Harðarson, B.S., Einarsson, G.M., Franzson, H. and Gunnlaugsson, E.: Volcano-tectonic-geothermal interaction at the Hengill triple junction, SW Iceland. GRC 2009, Annual Meeting, October 4-7, (2009).
- Nielsson, S. and Franzson F.: Geology and Hydrothermal Alteration of the Hverahlid HT-system, SW-Iceland. WGC, Bali, submitted (2010).
- Sæmundsson, K.: Hengill Geological Map (bedrock) 1:50000. *National Energy Authority, Reykjavík Municipal Heating and Iceland Geodetic Survey*, (1995)

