



**Berggrunnur og jarðhitaummyndun
Gráuhnúkakerfis á sunnanverðu
Hengilssvæðinu**

Helga Margrét Helgadóttir



**Jarðvísindadeild
Háskóli Íslands
2011**

Berggrunnur og jarðhitaummyndun Gráuhnúkakerfis á sunnanverðu Hengilssvæði

Helga Margrét Helgadóttir

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

Leiðbeinendur
Hjalti Franzson
Sigurður Steinþórsson

Prófdómari
Árný Erla Sveinbjörnsdóttir

Jarðvísindadeild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, september 2011

Berggrunnur og jarðhitaummyndun Gráuhnúkakerfis á sunnanverðu Hengilssvæði
90 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í jarðfræði

Höfundarréttur © 2011 Helga Margrét Helgadóttir
Öll réttindi áskilin

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

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:

Helga Margrét Helgadóttir, 201, *Berggrunnur og jarðhitaummyndun Gráuhnúkakerfis á sunnanverðu Hengilssvæði*, meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 185 bls.

Reykjavík, september 2011

Hér með lýsi ég því yfir að ritgerð þessi er samín af mér og að hún hefur hvorki að hluta né í heild verið lögð fram áður til hærri prófgráðu.

Helga Margrét Helgadóttir

Útdráttur

Jarðhitakerfið við Gráuhnúka er við vesturjaðar sprungusveims Hengilsins. Jarðlög á svæðinu voru rannsökuð í borsvarfi þriggja hola, HN-2, HN-5 og HN-8. Þau einkennast annars vegar af móbergsmýndunum frá jökulskeiðum sem hlaðist hafa upp á upphleðslusvæði Hengilsins innan gosbeltisins og hins vegar af hraunlögum frá hlýskeiðum sem runnið hafa niður á láglandi utan upphleðslusvæðisins. Bergfræðilega er ólivín-þóleiit ríkjandi en einnig verður vart við þóleiit. Þróuð innskot finnast í litlum mæli. Mun grynna er á háhitaummyndun í holunum við Gráuhnúka (HN-8 og 5) en úti á sléttunni (HN-2) sem rakið er til áhrifa frá jarðhita tengdum Henglinum. Samanburður berghita og ummyndunarhita bendir til þess að sá hluti Gráuhnúkasvæðisins sé að hitna en kólnun kemur hins vegar greinilega fram utan sprungusveimsins í holu HN-2. Ofarlega í holunum tengjast æðar almennt jarðlagamótum en þegar neðar dregur tengjast æðarnar fremur innskotum. Borin voru saman ummyndunarferli ólivíns og pýroxens í hraunum og innskotum. Einkum kom fram afgerandi munur eftir myndunarstað á samsetningu aktínólíts sem er ummyndunarsteind eftir pýroxen. Talið er líklegt að það tengist minni oxun í innskotsberginu. Einnig er mögulegt að aktínólít myndist að nokkru leyti úr klóríti í hraunlögum sem hitnað hafa smám saman, en myndist hins vegar beint úr frumsteindinni í innskotum sem kólnað hafa niður í ríkjandi hita og taka þá ummyndun sem ríkir á viðkomandi dýpi án þess að ganga í gegnum sívaxandi ummyndun líkt og hraunlög.

Abstract

The geothermal system at Gráuhnúkar is located at the western rift margin of the Hengill fissure swarm. This is reflected in the stratigraphy of the area, studied in three wells: HN-2, HN-8, and HN-5. Hyaloclastite formations from past glaciations occupy the fissure swarm whereas lava flows from interglacials cover the lowlands to the west. Petrologically, olivine-tholeiite dominates in the area but tholeiites and more evolved intrusions have been noted. Temperature-dependent alteration minerals appear at shallower depth in the wells by the palagonite Gráuhnúkar than outside the fissure swarm, indicating connection to the geothermal activity inside the Hengill fissure swarm. Comparison of formation temperatures with the first appearance of temperature-dependent index minerals shows that this part of the Gráuhnúkar area is heating up while cooling has occurred outside of the system. Aquifers are commonly associated with stratigraphic boundaries in the shallower parts of the wells while connection to intrusives is the rule in the deeper parts. EMP analyses of the alteration of olivine and pyroxene suggest some differences between lava flows and intrusives. This is more pronounced in the pyroxene alteration, especially in different chemical composition of actinolite from intrusives and lava flows, respectively, which is attributed to less oxidation of the intrusives. More significant, however, may be the different modes of alteration: in the lavas with increasing temperature from pyroxene via chlorite, in the intrusives with decreasing temperature directly from the original pyroxene.

Ritgerð þessi er tileinkuð Ómari mínum og börnunum okkar þeim Kötlu, Erni og Heiði.

Efnisyfirlit

Myndir	xi
Töflur	xiv
Þakkir.....	xv
1 Inngangur	1
2 Aðferðir	5
3 Niðurstöður.....	7
3.1 Jarðlög og innskot	7
3.1.1 Jarðlagamyndanir í holu HN-2	9
3.1.2 Innskot í HN-2	22
3.1.3 Jarðlagamyndanir í holu HN-5	26
3.1.4 Innskot í holu HN-5	39
3.1.5 Jarðlagamyndanir í holu HN-8	43
3.1.6 Innskot í holu HN-8	57
3.2 Ummyndun.....	60
3.2.1 Bergummyndun.....	61
3.2.2 Dreifing ummyndunarsteinda	78
3.2.3 Ummyndunarraðir.....	87
3.2.4 Samanburður berghita og ummyndunarhita	93
3.3 Vatnsæðar	98
3.3.1 Æðar í holu HN-2	98
3.3.2 Æðar í holu HN-5	102
3.3.3 Æðar í holu HN-8	106
4 Umræður	110
4.1 Jarðlög.....	110
4.2 Ummyndun.....	114
4.3 Æðar.....	118
5 Ályktanir	120
6 Heimildir.....	121
Viðauki I: Staðarnúmer hola HN-2, HN-5 og HN-8 ásamt hnitum þeirra, bordýpi og dýpi á fóðringar.	125
Viðauki II: Töflur yfir ummyndun frumsteinda í HN-2, HN-5 og HN-8.	126
Viðauki III: Töflur með ummyndunarröðum úr holum HN-2, HN-5 og HN-8.	135

Viðauki IV: Töflur með tengslum hitamælinga við æðar, skoltaps-mælingar og hitamælingar í holum HN-2, HN-5 og HN-8.....	141
Viðauki V: Handrit að grein um ummyndun á ólivíni og pýroxeni í ólivín-þóleíti á Hellisheiði.	151
Viðauki VI: Grein um jarðhitarannsóknir á sunnanverðu Hengilssvæðinu fyrir WGC (World Geothermal Conference) á Bali, Indónesíu, 2010.	176

Myndir

Mynd 1. Staðsetning hola HN-2, HN-5 og HN-8.	2
Mynd 2. Skýringar við jarðlagasnið.	8
Mynd 3. Innskot á 1780 m dýpi í HN-2 sem virðist uppbrotið og kurlað að hluta.	15
Mynd 4. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 0–400 m.	16
Mynd 5. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 400–700 m.	17
Mynd 6. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 700–1000 m.	18
Mynd 7. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 1000–1300 m.	19
Mynd 8. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 1300–1600 m.	20
Mynd 9. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 1600–2001 m.	21
Mynd 10. Innskotabéttleiki í HN-2.	25
Mynd 11. Ummyndað gler og kristallað gler á 1200 m dýpi í HN-5.	29
Mynd 12. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 0–300 m dýpi í HN-5.	32
Mynd 13. Jarðlagasnið og jarðlagamælingar á 300–600 m dýpi í HN-5.	33
Mynd 14. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 600–800 m dýpi í HN-5.	34
Mynd 15. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 800–1100 m dýpi í HN-5.	35
Mynd 16. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1100–1400 m dýpi í HN-5.	36
Mynd 17. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1400–1700 m dýpi í HN-5.	37
Mynd 18. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1700–2076 m dýpi í HN-5.	38
Mynd 19. Innskotabéttleiki í holu HN-5.	42
Mynd 20. Rúnnaður plagíóklas dál á 756 m dýpi í HN-8. Breidd myndar er 1,25 mm.	45
Mynd 21. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 0–400 m dýpi í HN-8.	49
Mynd 22. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 400–700 m dýpi í HN-8.	50
Mynd 23. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 700–1000 m dýpi í HN-8.	51
Mynd 24. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1000–1300 m dýpi í HN-8.	52
Mynd 25. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 1300–1600 m dýpi í HN-8.	53
Mynd 26. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 1600–1900 m dýpi í HN-8.	54
Mynd 27. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 1900–2200 m dýpi í HN-8.	55
Mynd 28. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 2200–2580 m dýpi í HN-8.	56
Mynd 29. Innskotabéttleiki í holu HN-8.	60
Mynd 30. Skýringar við ummyndun.	61
Mynd 31. Ummyndað gler í 1450 m í HN-2.	63
Mynd 32. Glerkorn í HN-2 sem hefur ummyndast í kalsít.	63

Mynd 33. Ólivín ummyndað í leir í köntum og sprungum á 1324 m dýpi í HN-2.....	64
Mynd 34. Ólivín alveg ummyndað í leir á 1324 m dýpi í HN-2.....	65
Mynd 35. Ummyndað grænt fyrrverandi ólivín á 1522 m dýpi í HN-2.....	65
Mynd 36. Zeólítaummyndaður plagióklas dill í 990 m í HN-2.....	66
Mynd 37. Leir, albít og kalsít ummyndun á plagióklas dilum í 1450 m í HN-2.....	67
Mynd 38. Plagióklas sem hefur ummyndast í albít, epidót, prehnít og klórít. HN-2 í 1752 m.....	68
Mynd 39. Ummyndunarsprungur í pyroxen, líklega leir. HN-2 í 1752 m.....	68
Mynd 40. Ummyndun frumsteinda í holu HN-2 borin saman við áætlaðan berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul, slitin lína).....	70
Mynd 41. Ummyndunarblettir í pyroxen á 1232 m dýpi í HN-5. Breidd myndar er 0,5 mm.....	72
Mynd 42. Ummyndun frumsteinda í holu HN-5 borin saman við áætlaðan berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul slitin lína).	73
Mynd 43. Ummyndað ólivín (oxun, leir og kalsít) á 536 m dýpi.....	75
Mynd 44. Ummyndun frumsteinda í holu HN-8 borin saman við áætlaðan berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul, brotin lína).....	77
Mynd 45. Jarðlög, ummyndun og dreifing ummyndunarsteinda í holu HN-2.....	80
Mynd 46. Jarðlög, ummyndun og dreifing ummyndunarsteinda í holu HN-5.....	83
Mynd 47. Jarðlög, ummyndun og dreifing ummyndunarsteinda í holu HN-8.....	86
Mynd 48. Kvars að myndast í laumontíti á 1708 m dýpi í HN-2.....	89
Mynd 49. Sprungufylling – laumontít sprunga í annarri sprungufyllingu (plötukalsít o.fl.).....	90
Mynd 50. Útfelling á 1752 m dýpi í HN-2. Epidót á undan kalsíti sem fyllir upp í.....	90
Mynd 51. Ummyndunarröð á 754 m dýpi í HN-5.....	91
Mynd 52. Útfellingar í 1082 m í HN-5. Zeólítar sem hafa ummyndast í kvars.....	91
Mynd 53. Útfelling á 380 m dýpi í HN-8.....	92
Mynd 54. Ummyndunarröð á 636 m í HN-8.....	93
Mynd 55. Samanburður á áætluðum berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul, slitin lína) í holu HN-2.	95
Mynd 56. Samanburður á áætluðum berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul slitin lína) í holu HN-5.	96
Mynd 57. Samanburður áætlaðs berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul slitin lína) í HN-8.....	97
Mynd 58. Jarðlög og jarðlagamælingar í holu HN-2.....	101
Mynd 59. Jarðlög og jarðlagamælingar í 2. áfanga holu HN-5.....	104
Mynd 60. Jarðlög og jarðlagamælingar í 3. áfanga holu HN-5.....	105
Mynd 61. Jarðlagasnið og jarðlagamælingar á dýptarbili 0-965 m í holu HN-8.....	108
Mynd 62. Jarðlagasnið og jarðlagamælingar á dýptarbili 965-2580 m í holu HN-8.....	109
Mynd 63. Úrdráttur úr jarðfræðikorti af Hengilssvæði (Kristján Sæmundsson, 1995).....	110

Mynd 64. Þversnið af jarðlögum á Gráuhnúkasvæðinu..	113
Mynd 65. Ummýndunarþversnið á Gráuhnúkasvæðinu.....	115
Mynd 66. Þversnið af Gráuhnúkasvæðinu þar sem sýnd eru innskot og æðar.....	119
Mynd 67. Fjöldi æða eftir raundýpi í holum HN-2, HN-5 og HN-8 og tengsl þeirra við jarðfræði.	119
Mynd 68. Hitamælingar eftir borun 2. áfanga holu HN-2 (3-4) ásamt tveimur mælingum (1-2) sem gerðar voru síðar innan ífóðringu (á meðan borun 3. áfanga stóð).	142
Mynd 69. Hitamælingar í 3. áfanga holu HN-2 (sem náðu styttra en 1000 m) ásamt mælingum sem gerðar voru eftir borlok.....	143
Mynd 70. Hitamælingar að loknum 3. áfanga holu HN-2.....	144
Mynd 71. Hitamælingar fyrir ofan 1000 m í holu HN-5 vor og haust 2006.....	146
Mynd 72. Hitamælingar niður fyrir 1000 m í 3. áfanga og eftir borlok í HN-2.....	147
Mynd 73. Hitamælingar í 1. og 2. áfanga holu HN-8.....	149
Mynd 74. Hitamælingar í 3. áfanga holu HN-8.....	150

Töflur

Tafla 1. Yfirlit um innskot í holu HN-2.....	23
Tafla 2. Yfirlit um innskot í holu HN-5.....	40
Tafla 3. Yfirlit um innskot í holu HN-8.....	57
Tafla 4. Æðar í holu HN-2.....	99
Tafla 5. Æðar í holu HN-5. Hitamælingar sjást á myndum 70-71.	103
Tafla 6. Æðar í holu HN-8.....	106
Tafla 7. Bordýpi og dýpi á fóðringar í HN-2.....	125
Tafla 8. Bordýpi og dýpi á fóðringar í HN-5.	125
Tafla 9. Bordýpi og dýpi á fóðringar í HN-8.	125
Tafla 10. Ummyndun glers og ólivíns í þunnsneiðum úr HN-2.....	126
Tafla 11. Ummyndun á plagióklas og pýroxen í þunnsneiðum úr HN-2.....	127
Tafla 12. Ummyndun á málm í þunnsneiðum úr HN-2.	128
Tafla 13. Ummyndun glers og ólivíns í þunnsneiðum úr HN-5.....	129
Tafla 14. Ummyndun á plagióklas og pýroxen í þunnsneiðum úr HN-5.....	130
Tafla 15. Ummyndun á málmsteindum í þunnsneiðum úr HN-5.....	131
Tafla 16. Ummyndun glers og ólivíns í þunnsneiðum úr HN-8.....	132
Tafla 17. Ummyndun á plagióklas og pýroxen í þunnsneiðum úr HN-8.....	133
Tafla 18. Ummyndun á málm í þunnsneiðum úr HN-8.	134
Tafla 19. Ummyndunarraðir sem greindar eru í þunnsneiðum úr HN-2.....	135
Tafla 20. Ummyndunarraðir greindar í þunnsneiðum úr HN-5.....	137
Tafla 21. Ummyndunarraðir greindar í þunnsneiðum úr HN-8.....	139
Tafla 22. Skýringar á skammstöfunum í töflum yfir raðir ummyndunarsteinda.	140
Tafla 23. Æðar í holu HN-2 og tengsl þeirra við hitamælingar.....	141
Tafla 24. Skoltap í holu HN-2 í 2. og 3. áfanga.	141
Tafla 25. Æðar í holu HN-5 og tengsl þeirra við hitamælingar	145
Tafla 26. Skoltap í holu HN-5a.....	145
Tafla 27. Æðar í HN-8 og tengsl þeirra við hitamælingar á myndum 72 og 73.	148
Tafla 28. Skoltap í holu HN-8.	148

Þakkir

Sérstakar þakkir eru færðar Hjalta Franzsyni og Birni Harðarsyni á ÍSOR fyrir ómetanlegan stuðning og hjálp. Niels Óskarsson var mér mikil hjálparhella við úrvinnslu örgreininga og Karli Grönvold er einnig þakkað fyrir aðstoð við örgreini Háskóla Íslands og allar ráðleggingar. Ég vil líka þakka Sigurði Steinþórssyni fyrir fróðlegar umræður um efni tengt verkefninu og fyrir góða hjálp á lokasprettinum. Orkuveita Reykjavíkur, ÍSOR og jarðhitaklasinn GEORG styrktu þetta verkefni sérstaklega. Síðast en ekki síst þakka ég félögum mínum sem tengdust þessu verkefni, þeim Steinþóri Niélssyni, Söndru Ósk Snæbjörnsdóttur og Sveinborgu H. Gunnarsdóttur, fyrir alla þá hjálp og þann andlega stuðning sem þau veittu mér á þessari vegferð.

1 Inngangur

Á Hengilssvæðinu mætast þrjú ólík tectónísk belti: Vesturgosbeltið, Reykjanesgosbeltið og Suðurlandsbrotabeltið. Vesturgosbeltið nær frá Hengli norður í Langjökul og er hreinræktað rekkbelti þar sem sprungusveimar hafa sömu stefnu og rekkbeltið sjálft (SV-NA). Reykjanesgosbeltið liggur yfir Reykjaneskaga að Hengli og er það sniðrekkbelti þar sem sprungusveimar liggja skástígt miðað við stefnu beltisins (með u.þ.b. 35° horni). Suðurlandsbrotabeltið liggur svo til austurs frá Henglinum í átt að Heklu; það er þverbrotabelti þar sem meginsprungustefna er hornrétt á legu beltisins (Páll Einarsson, 2008). Þarna er um flóknar tectónískar aðstæður að ræða vegna ólíks eðlis jarðskorpuhreyfinga á þessum þremur svæðum og er Hengillinn því svokallaður þrípunktur („triple junction“).

Hellisheiði er eitt af háhitasvæðum Hengilsins, staðsett í suðvesturhluta hans. Yfirgripsmiklar rannsóknir fóru fram á Hengilssvæðinu á árunum 1947-1949 og var þá ekki talið að hitaveita í Vestur-Hengli yrði hagkvæm þar sem jarðhiti þess svæðis væri áberandi minni en hinna svæðanna (Gunnar Böðvarsson, 1951). Ekki var þó talið ráðlegt að útiloka möguleika Vestursvæðisins. Með frekari rannsóknum og breyttum aðstæðum hefur enda annað komið á daginn og er þar Hellisheiðarvirkjun sem gangsett var árið 2006. Framleiðslugeta virkjunarinnar er nú 213 MWe en ætlunin er að stækka hana síðar. Fyrsta rannsóknarholan á svæðinu var boruð árið 1985 við Kolviðarhól. Síðan þá hafa verið boraðar 57 háhitaholur, 17 niðurdælingarholur auk fjölda kaldavatns- og svelghola, en boranir náðu hámarki á árunum 2007-2008. Byrjað var að huga að hentugu niðurdælingarsvæði fyrir affallsvatn Hellisheiðarvirkjunar nokkru fyrr og var fyrsta niðurdælingarholan (HN-1) boruð árið 2004. Ekki reyndist unnt að nýta fyrstu holurnar sem boraðar voru í þessum tilgangi (Björn S. Harðarson o.fl., 2007), þar á meðal HN-2, en þegar byrjað var að bora ennþá nær vesturjaðri Hengilsins árið 2006 tókst að finna hentugt svæði til niðurdælingar. Þar eru holur HN-5 og HN-8 sem fjallað er um hér ásamt HN-2 (mynd 1).

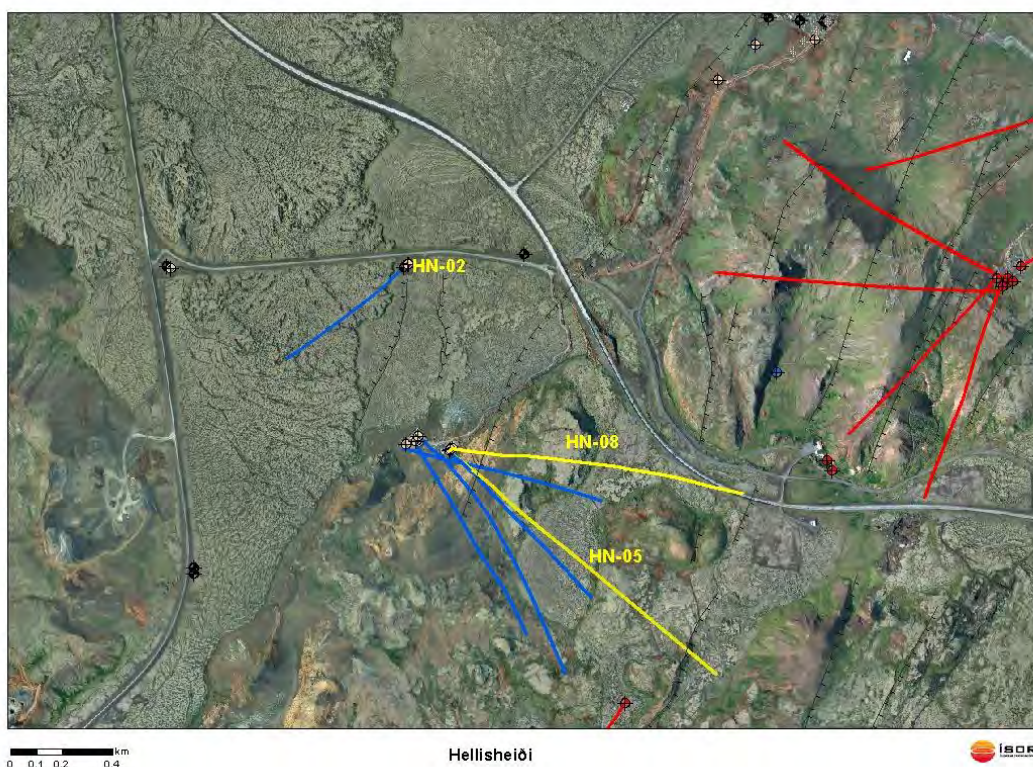
Þegar boranir við vesturjaðarinn hófust kom í ljós að mun meiri hiti var í botni þeirra en búist var við og eru nú uppi áætlanir um að nýta svæðið til orkunýtingar í stað þess að dæla þar niður affallsvatni frá Hellisheiðarvirkjun (t.d. Grímur Björnsson, 2007). Jarðhiti á Hengilssvæðinu tengist yfirleitt NA-SV-lægum sprungum en ýmislegt bendir til þess að þáttur austlægra og norðvestlægra brota eigi þátt í þeim jarðhita sem finnst á Gráuhnúkasvæðinu (Björn Harðarson o.fl., 2007). Þessi brot skera NA-SV-lægu sprungur Hengilskerfisins og samspil þeirra og þverbrotabeltisins á Suðurlandi virðist því jafnvel leiða af sér heitt og vel lekt jarðhitakerfi á um 1500-2000 m dýpi (Björn Harðarson o.fl., 2007; Grímur Björnsson, 2007). Einnig er talið að samspil þessara brota tengist jarðhitavirkni í Hverahlíð (t.d. Knútur Árnason og Ingvar Þór Magnússon, 2001).

Gráuhnúkar eru hluti af hnúkaþyrpingu sem liggur sunnan við Neðri Hveradalabrekku. Lagskipt móbergstúff er greinilegt sunnan við þjóðveg 1 þegar keyrt er að brekkunni og við það er niðurdælingarsvæðið staðsett. Einnig liggur móbergstúffið utan í Gráuhnúkunum sjálfum. Jarðhituummyndunar verður hvergi vart á yfirborði á þessu svæði (Kristján Sæmundsson o.fl., 1990). Á Gráuhnúkasvæðinu sjást á yfirborði aðallega móbergsmýndanir en ofan á sumum þeirra má sjá grágrýtishettu. Þessar myndanir eru sex talsins og af þeim eru Gráuhnúkarnir sjálfir líklegast sú elsta (Kristján Sæmundsson, 2010). Þeir eru mjög jökulsorfnir og að hluta til klæddir jökulbergi. Gráuhnúkamyndunin liggur í norð-norðaustlæga stefnu en í suðvestur frá henni er Stakihnúkur sem er úr pikriti (frumstæðu,

ólivínriku bergi). Rani úr þessu sama bergi liggur einnig í norðaustur, utan í Gráuhnúkum. Yngsta Hellsheiðarhraunið, um 2000 ára gamalt, liggur að svæðinu að norðan og austan og aðeins vestan til þar sem tunga úr Svínahraunsbruna eða Kristnitökuhrauni hefur ekki runnið yfir (Kristján Sæmundsson, 1995 og 2010).

Stór misgengi á Gráuhnúkasvæðinu eru ekki algeng en þó liggur Húsmúlamisgengið frá Sleggjubeinsdal, um Kolviðarhól og Litla Reykjafell og þaðan liggur það upp í vestanverða Gráuhnúka. Annað stórt misgengi, kennt við Búastein, nær suður yfir Reykjafell og í Stóra Meitil. Þessi NA-SV siggengi marka vesturjaðar sigdældar Hengilsins sem sjá má allt frá Þingvöllum (Kristján Sæmundsson, 1995).

Vorið 2005 hóf jarðborinn Sleipnir borun holu HN-2 nærri Suðurlandsvegi, um 1 km norðan við Þrengslavegamót (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009b). Holan reyndist lítt lek og því var þess freistað að fara nær vesturjaðri Hengilsins, nær Gráuhnúkum. Borun holu HN-5 hófst vorið 2006 og sá Sleipnir um verkið. Borun holunnar gekk brösuglega vegna endurtekinnna hruna á rúmlega 800 m dýpi og það fór svo að jarðborinn Geysir lauk við borun holunnar haustið 2006 (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009a). Við borun þessarar holu kom í ljós hversu heitt jarðhitasvæðið undir Gráuhnúkum er. Geysir boraði svo holu HN-8 snemmsumars árið 2007 (Björn S. Harðarson o.fl., 2010a og 2010b).



Mynd 1. Staðsetning hola HN-2, HN-5 og HN-8.

Unnið hefur verið að því í nokkurn tíma að útbúa jarðfræði- og jarðhitalíkan fyrir Hengilssvæðið. Jarðeðlisfræðilegar mælingar hafa verið gerðar á svæðinu og þær sem gefa hvað mestar upplýsingar eru viðnámsmælingar. Viðnám hefur verið tengt breytingum í jarðhitaummyndun (t.d. Knútur Árnason og Ingvar Þór Magnússon, 2001) þar sem lágt viðnám tengist smektít- og blandlagsmyndun (sem myndast við hita allt að 230°C) en hátt viðnám undir lágu viðnámi tengist klórítumyndun (myndast við hærri hita en 230°C). Viðnámsmælingarnar sýndu fremur öfluga og útbreidda jarðhitavirkni sem virðist tengjast mótum AV- og NS-lægra sprungukerfa.

Viðbendingar eru um að jarðhitakerfið hafi náð hámarki á síðasta jökulskeiði en að það hafi farið kólnandi síðan. Til þessa bendir jarðhitaummyndun á ákveðnum svæðum þar sem jarðhita gætur ekki í dag (Hjalti Franzson et al., 2010). Einnig er talið að þær gossprungur sem mynduðust á nútíma (2000 og 5000 ára) hafi opnað nýjar leiðir fyrir jarðhitavökvann og að jarðhitinn hafi því eflst á ákveðnum svæðum í kjölfarið. Þessi breyting sem orðið hefur á nútíma virðist ekki hafa náð að verða sýnileg í ummyndunarsteindum en sést þó nokkuð glögglega þegar borinn er saman berghiti og ummyndunarhiti í holum á svæðinu (Hjalti Franzson et al., 2005 og 2010).

Talið er að aldur eldstöðvarinnar sé um 300-400.000 ár (t.d. Hjalti Franzson et al., 2005 og 2010) og er hún að stórum hluta gerð úr móbergsmýndunum frá jökulskeiðum. Hraunlög má finna inn á milli móbergseininga. Þau eru í miklum minnihluta þar sem þau safnast fyrir á láglandi á hlýskeiðum og er því algengara að sjá þykkari hraunlagastafla utan vesturjaðars Hengilsins. Einnig má þó sjá þykka stafla í Hverahlíð (Steinþór Nielsson og Hjalti Franzson, 2010).

TEM- og MT-mælingar á Hengilssvæðinu hafa sýnt að á tveimur svæðum eru grunnstæð lágviðnámslög þar sem undir liggja háviðnámslög (Knútur Árnason et al., 2010). Grynri viðnámslög stjórna af ummyndunarsteindum (jarðlög með lágt viðnám einkennast af smektíti og blandlagsleir en jarðlög með hátt viðnám af klóríti) en ekki er jafn ljóst hvað stjórnar þeim dýpri. Sumir telja að þessi dýpri lágviðnámslög tengist bráð og jafnvel kvikuhólfum (t.d. Gylfi Páll Hersir o.fl., 1990) en aðrir telja engar sannanir vera fyrir langvarandi kvikuhólfi undir Hengli og ekki hefur orðið vart við deyfingu S-bylgna í tengslum við dýpra lágviðnámslagið (Knútur Árnason et al., 2010). Hvort sem tengingar kviku við djúpstætt lágviðnámslag eru réttar eða ekki, hafa verið færð rök fyrir því að kvikuhólf sé til staðar undir Hengli enda auki sú staðreynd að svæðið liggur á þrípunkti líkurnar á því að kvika rísi upp (t.d. Foulger, 1995). Í því sambandi má nefna að land reis nokkuð á árunum 1994-1998 austan við Hengilskerfið vegna innskotavirkni (t.d. Clifton o.fl., 2002). Einnig hefur komið fram sú tilgáta að lágviðnámslagið tengist því að jarðhitavökvinn nái yfirmarksaðstæðum („supercritical“) sem veldur svolitlum breytingum á poruhluta innan bergsins sem hefur aftur mikil áhrif á hraða jarðskjálftabylgna (Jousset o.fl., 2011).

Þessir dýpri leiðarar virðast tengjast innskotum og göngum (Knútur Árnason et al., 2010) og hafa dýpri holur á Hengilssvæðinu (sérstaklega á Nesjavöllum) sýnt að stór hluti bergs á meira en 2 km dýpi er innskotsberg (t.d. Hjalti Franzson, 1998). Þetta á einnig við á Hellisheiði en er þó nokkuð misjafnt eftir svæðum. Viðbendingar eru því um að eldstöðin sé minna þroskuð en t.d. Krafla, þar sem talið er að grunnstæð kvikuhólf séu til staðar (Páll Einarsson, 1978). Knútur og félagar (t.d. 2010) telja út frá sínum eigin rannsóknum og öðrum jarðeðlisfræðilegum rannsóknum að innskot á 3-6 km dýpi séu algengust undir Henglinum og einnig til suðausturs frá fjallinu. Þessi innskot eru þá ástæða jarðhitans sem finnst ofan þeirra en grynri innskot (gangar og sillur t.d. sem ná jafnvel upp í 1 km dýpi) hljóta einnig að gefa frá sér hita til jarðhitakerfisins (Stefán Arnórsson et al., 2008).

Með þessari ritgerð er haldið áfram því verki sem þegar hefur farið fram í tengslum við jarðfræði og ummyndun svæðisins og jafnframt víkkað út það svæði sem rannsakað hafði verið. Jarðlög Gráuhnúkasvæðisins eru tekin fyrir og greind í myndanir og tengd saman þar sem hægt er. Einnig er ummyndun bergsins og útfellingar skoðaðar sérstaklega til þess að hægt sé að fá mynd af jarðhitasögu svæðisins. Ummyndun er einnig borin saman við áætlaðan berghita á svæðinu til að áætla hvort svæðið sé að hitna upp eða ekki. Æðar í holunum eru staðsettar nákvæmlega og þær tengdar við jarðfræðina eftir fongum. Að auki er tæpt á niðurstöðum úr rannsókn sem gerð var á ummyndun á ólivíni og pýroxeni. Örgreiningar voru gerðar á efnasamsetningu frumsteindanna og ummyndunarafurða þeirra og má sjá umfjöllun um það í viðauka V auk þess sem gerð er grein fyrir niðurstöðum þeirra í kafla 4.2. Með öllu þessu má öðlast frekari skilning á eðli jarðhitasvæðisins og einnig útbúa grunn fyrir frekari rannsóknir og tengingar á Hellsheiðinni.

2 Aðferðir

Áður en hafist var handa við úrvinnslu þeirra gagna úr HN-2, HN-5 og HN-8, sem notuð voru í þessari rannsókn, hafði hefðbundin grunnvinna farið fram. Svarfsýni voru tekin á tveggja metra fresti af starfsmönnum boranna við borun holanna og var borsvarf ýmist greint samhliða borun á borstað eða á rannsóknarstofu Íslenskra Orkurannsóknna (ÍSOR) að Grensásvegi af jarðfræðingum stofnunarinnar. Viðsjá var notuð til að greina svarfið; jarðlög, ummyndun og merki um æðar og innskot. Auk viðsjárskoðunar voru jarðlagamælingar (víddar-, viðnáms-, nifteinda- og gammamælingar), hitamælingar og borgögn úr síritakerfi boranna helstu hjálpargögn sem notast var við til greininga.

Ítarlegri rannsókn á svæðinu og frekari úrvinnsla gagna fól í sér þunnsneiðagreiningu í bergsmásjá með gegnumfallandi ljósi og var það umfangsmesta verkefni úrvinnslunnar. Í skoðun þunnsneiða var hugað að berggerð, reynt að ákvarða poruhluta (sem getur verið erfitt þar sem oft er um mjög lítil svarfkorn að ræða), ummyndunarstig frumsteinda bergsins var ákvörðað sem og ummyndunarafurðir, þær ummyndunarsteindir sem sáust taldar upp og rýnt í myndunarröð þeirra til að fá betri mynd af sögu jarðhitans. Að auki var hugað að sprungufyllingum og gerð þeirra. Röntgengreiningar á leir voru framkvæmdar af starfsmanni ÍSOR og þær notaðar til að ákvarða ummyndunarstig bergsins. Rýnt var nánar í jarðlagamælingar og með þeirra hjálp, en þó aðallega á grundvelli þunnsneiðagreininga, var berginu skipt upp í einstakar myndanir. Þunnsneiðar úr nálægum holum voru einnig lauslega skoðaðar til að glöggva sig betur á jarðlögum svæðisins og að lokum var tengt á milli jarðlaga í holunum þremur.

Dýptartölur í holunum miðast allar við borþall boranna og eru upplýsingar um borana og bordýpi í viðauka I. Dýpi jarðlaganna hefur verið leiðrétt eftir bestu getu með tilliti til jarðlagamælinga og taftíma svarfsins. Borgögn úr holum HN-2 og HN-5 eru ekki nothæf eins og stendur og var því ekki hægt að nota upplýsingar þaðan til leiðréttinganna. Í þessum tveimur holum er því nánast eingöngu stuðst við jarðlagamælingar en þar sem þeirra naut ekki við, eða þar sem þær veittu ekki nægilega miklar upplýsingar, var jarðlögum hnikað upp á við um allt að 12 m (neðarlega í holunum). Jarðlagamælingar voru einnig helsta hjálpartæki leiðréttinganna í HN-8 en þar eru þó til borgögn og því hægt að styðjast við útreikninga á taftíma svarfsins út frá dælingu og borhraða.

Helstu mælingar sem gerðar eru í jarðhitaholum eru hitamælingar, víddarmælingar, viðnámsmælingar, gammamælingar (náttúrulegt gamma) og nifteindamælingar og geta allar þessar mælingar hjálpað til við greiningu jarðfræðilegra þátta (Valgarður Stefánsson og Benedikt Steingrímsson, 1980). Hitamælingar eru notaðar til að staðsetja æðar í holunni. Víddarmælingar gefa vísbendingar um útvöskuð svæði í holunni þar sem mýkri eða viðkvæmari bergmyndanir geta verið (t.d. sprungnar). Vegna þess munar sem er á rafleiðni mismunandi jarðlaga eru skil á milli jarðlagamyndana oft greinileg í viðnámsmælingum og þær eru því gagnlegar til að ákvarða lagmót þeirra jarðlagamyndana sem greindar hafa verið. Gammamælingar gefa vísbendingar um þróað berg þar sem magn geislavirkra ísótópa er meira í þróðu gosbergi en í frumstæðu. Svörun hækkar því meira eftir því sem gosberg er kísilríkara. Nifteindamælingar eru aftur á móti notaðar til að mæla hversu gropin jarðlögin eru. Magn vetnis stjórna því hversu mikið hægir á nifteindum og þar sem mest af því vetni sem finnst í jarðlögum er í vökvunum (þ.e. vatni í tilfelli jarðhitasvæða) þá er hægt að ákvarða poruhluta bergsins. Þessar mælingar er því gott að nota til að greina innskot, sem eru oftar en

ekki mun þéttari en grannbergið og geta því komið vel fram í mælingum. Niffeindirnar gera þó ekki greinarmun á vetni úr vatninu eða því sem bundið er í steindum. Þær gefa því einnig vísbendingar um ummyndað berg og jafnvel sprungin svæði sem rík eru af vötnuðum ummyndunarsteindum.

Berggreining byggð á svarfi úr borholum hefur ýmsa ókosti, miðað við t.d. kjarna, sem sjálfsagt er að minnast á. Blöndun á milli dýptarbila getur átt sér stað og er það sérstaklega vandamál þegar neðar dregur og svarfið verður finna og eftir að skoltap verður. Hvert sýni vísar til ákveðins dýptarbils í stað þess að hægt sé að sjá nákvæmlega af hvaða dýpi sýnið er. Ekki er hægt að útiloka að í sýninu séu svarfkorn af minna dýpi. Í flestum tilfellum er þó óhætt að treysta því að sýni séu af ákveðnu dýptarbili ef þau hafa verið vel valin og dýptarleiðrétt miðað við jarðlagamælingar og taftíma svarfsins. Einnig skiptir máli hvort um fingert eða grófgert svarf er að ræða en það grófgerðara er mun auðveldara að greina þar sem hægt er að sjá tengsl steindanna og þar með berggerð og ummyndunarsögu. Einnig er hægt að styðjast við nærliggjandi holur og eftir því sem upplýsingarnar eru meiri er þeim mun meiri ástæða til að treysta gögnunum.

Lokahnykkur rannsóknarinnar fólst í örgreiningum með ARL-SEMQ-30 rafendaörgreini Jarðvísindadeildar Háskóla Íslands, á pýroxeni og ólivíni í ólivín þóleitt hraunum og innskotum úr HN-2 en að auki voru greind sýni úr holum HE-8 í Sleggjubeinsdölum, HE-42 við Reykjafell og HE-25 á Skarðsmýrarfjalli þar sem finna mátti nokkuð gróft svarf með mun ummyndaðra bergi en í HN-2. Ætlunin var að glöggva sig á ummyndun þessara frumsteinda bergsins og sjá hvers konar efnahvörf færu fram. Leitast var við að safna bæði sýnum úr hraunlögum þar sem hægt væri að sjá hvernig ummyndun frumsteindanna breytist eftir því sem jarðlögin grafast dýpra og einnig úr innskotum þar sem ferskt berg tekur einungis þá ummyndun sem ríkir á viðkomandi dýpi (nema ef um mjög gamalt innskot er að ræða, þá hefur það grafist með staflanum eins og önnur jarðlög en eru þó ávallt yngri en grannbergið í kring). Útbúin voru póleruð sýni og rafendaogisla með 3 μ m þvermál beint á valda staði innan kristallanna og ummyndun á þeim í 20 sekúndur. Geislinn örvar frumefni viðkomandi steindar sem gefur þá frá sér einkennandi röntgenróf sem tvístrað er með athugunarkristöllum (TAP, PET, LIF). Styrkur bylgjulengdanna er svo borinn saman við staðla með þekkta samsetningu sem keyrðir eru í upphafi greininga og einnig eru nokkrir staðlar keyrðir reglulega á meðan mælingum stendur. Staðlar sem notaðir voru fyrir pýroxen mælingar eru þessir: kvars (Si), Rutile (Ti), Periclase (Mg), Corundum (Al), Diopside Chesterman (Si, Mg, Ca), Magnetite synth (Fe), Ilmenite Sawyer (Ti, Mn), Hematite (Fe), Chromite 396 (Cr), Hornblende Kakanui (Na, Al, Ti) og Grunerite (Fe). Staðlar fyrir ólivín mælingar voru: kvars (Si), rutile (Ti), periclase (Mg), Olivine San Carlos (Si, Mg), Fayalite Rockport (Mg), Olivine Springwater (Fe), Corundum (Al), Diopsige glass NASA (Mn, Ca, Ni), Magnetite synth (Fe), Ilmenite Sawyer (Ti) og Hematite (Fe). Við mælingu á ólivíni og ummyndun á því var notaður 25 kV og 20 nA straumur. Við greiningu pýroxens og tengdrar ummyndunar voru aðstæður eins nema stillt var á 15 kV í stað 25 kV. Um leið og greiningar voru gerðar voru einnig teknar BSE (Backscattered electron) myndir af sýnunum. Niðurstöður þessara rannsókna má sjá í Viðauka V en aðeins sé tæpt á þeim í kafla 4.2 í samantekt um ummyndun bergsins.

3 Niðurstöður

3.1 Jarðlög og innskot

Til þess að skipa jarðlögum holanna þriggja niður í jarðlagamyndanir var helst stuðst við þunnsneiðagreiningar í bergfræðismásjá og einnig við jarðlagamælingar, eins og áður hefur verið vikið að. Í þunnsneiðum var greint á milli móbergstúffs, móbergsbreksíu, bólstrabergs, hraunlaga, setlaga og innskota og einnig var lögð áhersla á að greina berggerð. Dílar reyndust mikilvægir í þessu samhengi og skiptu þeir miklu máli þegar greint var á milli myndana og þegar tengt var á milli holanna. Eftir því sem neðar dregur í holum HN-5 og HN-8 gerist svarfið mjög fingert og þá reynist erfitt að ákvarða hvort um einhverja díla sé að ræða í berginu. Óvissan eykst því niður á við, einnig vegna aukinnar ummyndunar á frumsteindum bergsins, og því má segja að skipting í jarðlagamyndanir neðarlega í þessum holum sé fremur lausleg.

Við greiningu í berggerðir var leitast við að skipta myndunum niður í hina ýmsu undirflokkka þóleiðtraðarinnar (t.d. Sveinn Jakobsson, 1983a, 1983b og et al., 2008). Í flestum tilfellum reyndist berg í þessum holum vera ólivín-þóleið og er það í samræmi við þær efnagreiningar sem gerðar hafa verið á svæðinu (Helgi A. Alfreðsson o.fl., 2008). Ólivín-þóleið einkennist af sub-ófitískum textúr þar sem málmsteindir myndast síðast og eru því fremur óreglulegar í laginu (anhedral) þar sem þær hafa fyllt upp í rými inni á milli vel formaðra kristalla. Ólivín finnst yfirleitt í einhverju magni í grunnmassa. Einnig er kristöllun bergsins fremur ójöfn og jafnvel loftrými og/eða gler inn á milli kristalla (sem gerir ólivín-þóleið nokkuð viðkvæmt fyrir ummyndun). Eitthvað er um þóleið á svæðinu en það einkennist af jafnari textúr og er málmur fyrri til að kristallast og því sjást kristallaform þeirra mun betur en í ólivín-þóleiði. Einnig eru málmsteindirnar oft smærri og fleiri og dreifast nokkuð jafnt. Ólivín finnst ekki í grunnmassa heldur eingöngu sem dílar. Almenn séð eru frumsteindir af sömu gerð af svipaðri stærð og einnig er bergið þéttara og minna um blöðrur og intergranular poruhluta en í ólivín-þóleiði (t.d. McBirney, 1993; Sveinn Jakobsson, 1983a). Lítið verður vart við þróað berg í þessum þremur holum en þó finnst það sem innskot á u.þ.b. 1360 og 1920 m dýpi í holu HN-8.

Í samantekt á innskotum í holunum var lögð mikil áhersla á jarðlagamælingar til þess að staðsetja innskot nákvæmlega og til að staðfesta eða hrekja grun um innskot samkvæmt svarfgreiningu. Í einhverjum tilfella reyndist ekki hægt að nýta jarðlagamælingar og þar hafa innskot verið staðsett á grundvelli svarfgreininga og þunnsneiða.

Í beinum holum eins og HN-2 er líklegt að innskota/ganga verði vart í svarfinu þar sem holurnar skera innskotin undir fremur hvössu horni, nema ef um innskotshleifa eða syllur er að ræða. Beinar holur geta jafnvel fylgt innskoti (gangi) eftir langa leið og jafnvel haldið holunni meðfram ganginum þar sem þeir eru oft harðari en grannbergið og því erfiðara að bora í gegnum þau. Hins vegar eru nokkrar líkur á því að innskot komi ekki eins skýrt fram í svarfi í stefnuboruðum holum eins og HN-5 og HN-8, sérstaklega ef um þunna ganga er að ræða, þar sem innskotin eru þá skorin nokkuð þvert og ef borun er hröð er ekki víst að svarfið skili sér með óyggjandi hætti. Þar þarf því að treysta meira á jarðlagamælingar og upplýsingar úr borun eins og borhraða. Innskot geta þó að sjálfsgöðu komið greinilega fram í svarfi og þá sérstaklega ef um stærri innskot er að ræða.
















Þrátt fyrir að innskotin sjálf komi e.t.v. ekki fram í svarfi geta verið önnur ummerki en sjálft bergið í sýninu. T.d. er ekki óalgengt að sjá nokkra oxun í kringum innskot og einnig svokallaða kontakt-ummyndun sem lýsir sér í útfellingu smárra málmsteinda eins og magnetíts.

Segja má að nokkurrar íhaldssemi hafi gætt þegar innskot voru ákvörðuð í holunum. Það er því ekki loku fyrir það skotið að innskot geti verið umfangsmeiri en þau eru talin hér. Ekki var talið nóg að innskot væri greint í svarfinu, heldur var meira traust lagt á jarðlagamælingar og þunnsneiðar.




Skýringar við jarðlagasnið er að finna á mynd 2.

Skýringar við jarðlagasnið



Berggerðir

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

Vatnsæðar

	Lítill æð
	Meðal æð
	Stór æð

Innskot

	Innskot
	Hugsanlegt innskot

Mynd 2. Skýringar við jarðlagasnið.

3.1.1 Jarðlagamyndanir í holu HN-2

Hola HN-2 var boruð sem niðurrennslishola en hefur ekki verið notuð sem slík þar sem lekt reyndist ekki nægileg. Henni hefur hins vegar verið ætlað það hlutverk í framtíðinni að taka við koltvísýringi frá Hellisheiðarvirkjun í CarbFix verkefni Orkuveitu Reykjavíkur, Háskóla Íslands, The Earth Institute við Columbia University og Centre National de la Recherche Scientifique í Frakklandi þar sem þess verður freistað að binda koltvísýring í berg með því að dæla niður koltvísýringsmettuðu vatni til að mynda kalsít í basaltinu (t.d. Matter et al., 2009). Holan stendur við mót gamla Þrengslavegar og Suðurlandsvegur, skammt frá Hellisheiðarvirkjun og aðeins vestan við Gráuhnúka þar sem núverandi niðurdælingarsvæði virkjunarinnar er staðsett (mynd 1). HN-2 er bein hola og er því gert ráð fyrir að raundýpi holunnar sé það sama og dýpi frá borpalli.

Jarðlög holunnar ásamt jarðlagamælingum má sjá á myndum 4-9.

Samtals voru greindar 39 þunnsneiðar úr holu HN-2 og fer lýsing jarðlagamyndana í holunni hér á eftir. Lýsingin er mikið til byggð á þunnsneiðagreiningunni og á grundvelli hennar hefur jarðlögum verið skipt upp í myndanir. Þar sem þunnsneiða naut ekki við eru lýsingar byggðar á svarfskoðun. Jarðlög sem talin eru tengjast yfir í holunnar við Gráuhnúka eru merktar sérstaklega.

- **Nútímahraun, 30-44 m dýpi:** Jafnkorna, finkorna basalt með interkristalporuhluta. Strjálir plagióklasdílar sjást einkum neðst í þessum stafla. Hér eru líklega tvö hraunlög, það efra á 30-34 m dýpi. Oxunarovottur er á mörkum hraunlaganna og einnig er bergið þar blöðrótt (efsti hluti neðra hraunlags). Ekki er til svarf ofan 30 m dýpis en gera má ráð fyrir að hraunlögin séu til staðar allt frá yfirborði og að Hellisheiðarhraun D (2000 ára) sé þá efst.
- **Túff, 44-48 m dýpi.** Frauðkennt túff með áberandi kísilútfellingum efst. Túffið virðist dílalaust og er nokkuð oxað efst, sem hefur væntanlega gerst þegar hraun rann yfir.
- **Gráuhnúka-hraunlagasyrpa I (G-H1), 48-134 m dýpi:** Ólívín-póleítt hraun (gæti þó mögulega verið bólstraberg) sem er ólívín dílótt og einnig sjást stöku plagióklas dílar. Misleit kristöllun er í berginu. Þunnsneið á 70 m dýpi sýnir yfirleitt vel kristallað berg en þó svolítið glerjað inn á milli. Bæði meðalkorna og dul- til finkorna. Ólívín dílar eru u.þ.b. 5% og plagióklas dílar um 1%. Svarfið sýnir nokkuð vel kristallað berg en þó sést glervottur annað slagið. Kristöllun er mjög misleit og nokkuð gróf. Þetta berg er talið líkjast því sem finnst í holu HN-1 (sem er nokkru sunnar) og var í svarfgreiningu túlkað sem bólstraberg frekar en hraun. Neðan 100 m sést annað slagið nokkuð af mjög fingerðu túffi.
- **Gráuhnúka-móbergsmýndun I (G-M2), 134-408 m dýpi:** Ólívín-póleítt móbergsmýndun, að mestu leyti túff og er myndunin svo til dílalaus. Túffið mjög frauðkennt efst en verður svo þéttara. Það er þó blandað frauðkenndu túffi allt niður á 204 m dýpi þar sem áberandi skil verða í ásynd bergsins. Þar breytist bergið úr frauðkennda túffinu í þétt, útfellingaríkt túff. Þetta er í samræmi við greiningu í HN-4, sem staðsett er á sama borplani, þar sem frauðkennt berg greindist frá 132 m dýpi. Á 336-360 m dýpi er bergið breksíukenndara og nokkuð magn er af hlutkristölluðu basalti. Að nokkrum hluta er bergið líklega nánast bólstraberg. Nokkuð útfellingaríkt túff verður svo aftur ráðandi þar til rétt í botninn þar sem bergið er nánast alkristallað

og er þar líklega um bólstraberg að ræða. Þunnarneiðagreiningar úr þessari myndun sýna dýlalaust túff í öllum tilvikum en nánari lýsing fer hér á eftir. Á 140 m dýpi er dýlalaust basalttúff þar sem örsmá glerkorn fylla upp í glufur inn á milli stærri glerkorna og inn í blöðrur. Bergið er mismikið blöðrótt, allt frá frauðkenndu og niður í stakblöðrótt. Kristölluð korn benda til ólivín-þóleíts. Á 164 m dýpi er að megninu til mjög blöðrótt og jafnvel frauðkennt, ljósbrúnt og dökkt gler (þar sem örkristöllun er hafin). Eitt og eitt korn er svolítið hlutkristallað (kristöllun er hafin í glerinu). Líklega er um ólivín þóleið að ræða. Í 220 m er ólivín-þóleið basalttúff, líklega dýlalaust (hröð og ójöfn kristöllun veldur því að svolítið virðist af stærri plagióklas og ólivín kristöllum). Einhver merki eru um að smá glerkorn fylli upp í glufur og blöðrur en þau eru ekki mikil. Á 300 m dýpi er basalttúff sem virðist ferskara en í 220 m. Túffið er minna blöðrótt en áður. Nánast dýlalaust berg. Í 332 m er berg sem er mjög svipað því sem er á 300 m. Basaltgler, með mikinn poruhluta á milli glerkorna (intergranular) og bendir kristallað korn til ólivín þóleíts samsetningar þar sem kristöllun virðist hafa verið fremur hröð. Síðasta þunnarneiðin í þessari myndun er frá 386 m dýpi og greinist þar basalttúff eða túffrík breksía. Sýnið er nokkuð blandaðra en þau fyrri og nokkuð er af hlutkristölluðu bergi inn á milli. Líklega er bergið dýlalaust þó plagióklas sé svolítið grófkristallaðri inn á milli en það tengist að öllum líkindum frostrósakristöllun ólivín-þóleíts (sub-ófitískur textúr).

Breytingar verða í jarðlagamælingum á u.þ.b. 400 m dýpi og verður nifteindamæling nokkru óreglulegri þar fyrir neðan en fyrir ofan. Einnig minnkar heldur API gildi gammamælingar á sama stað og því má telja nokkuð víst að þarna séu jarðmyndanaskil. Þetta má sjá á mynd 5.

- **Hraunlagasyrpa II (H2), 408-660 m dýpi:** Hér er um að ræða ólivín-þóleið sem er með stöku plagióklas og ólivín dýlum. Bergið virðist fremur jafnkorna en er engu að síður ólivín-þóleið þar sem greinilegt ólivín er í grunnmassa. Þunnarneiðagreining sýnir að í 420 m er fín- til meðalkorna ólivín þóleið sem er með stöku plagióklas dýlum og færri ólivín dýlum. Þar er eins og fín- og jafnkorna basaltið (sem er samt ólivín-þóleið) sé með plagióklas hóp dýlum. Þessir hópdílar eru það áberandi að þeir eru taldir hér sem dílar þó e.t.v. megi skýra þetta með hraðri kristöllun ólivín-þóleíts. Hins vegar er meðalkorna ólivín-þóleiðið með stöku plagióklas dýlum (sumir þeirra virðast vera hópdílar) og örfáum ummynduðum ólivín dýlum. Í 504 m er það sama uppi á teningnum og því örugglega um sömu myndun að ræða. Erfitt er að sjá hvort ummyndun í fínkorna hluta bergsins sé ólivín eða gler (í grunnmassanum). Í 582 m er eingöngu meðalkorna ólivín-þóleið og það virðist ólivínríkara en bergið í 504 og 420 m og því gæti mögulega verið komið í aðra myndun. Plagióklas hefur látið verulega á sjá og breytir því töluvert ásýnd bergsins. Plagióklas dílar eru til staðar en þeir eru ummyndaðir í zeólíta. Þeir virðast ekki vera hópdílar en e.t.v. sést í stöku ólivín dýl. Þar sem plagióklas dílar sjást enn og e.t.v. stöku ólivín dílar er ekki talin ástæða til að skipta þessari einingu formlega upp í minni einingar þrátt fyrir að hópdílar sjáist ekki í þunnarneiðinni í 582 m. Miðað við svarfgreiningu gætu hér verið um u.þ.b. 24 hraunlög og er líkast til um að ræða dyngjusyrpu.
- **Hraunlag III (H3), 660-674 m dýpi:** Greinileg breyting verður á svarfinu neðan 660 m. Þar verður basaltið meira áberandi jafnkorna og málmur virðist vera vel kantaður. Þetta berg nær niður í 674 m dýpi. Í þunnarneið í 662 m er um að ræða jafnkorna, fín-til meðalkorna ólivín-þóleið. Ólivín er greinilegt í grunnmassa og er oft ummyndað.

Bergið er þétt og einn og einn plagióklas díll sést (mjög fáir). Á þessu dýpi er greinileg hækkun í viðnáms- og nifteindamælingu og því er ekki loku fyrir það skotið að hér sé um innskot að ræða (mynd 5). Líklegra er þó að hækkunin verði vegna þéttleika bergsins. A.m.k. var ekkert annað sem benti til þess að um innskot væri að ræða, eins og aukin oxun eða kontakt-ummyndun eða óvenju ferskt berg. Þessi hækkun í gildum er á dýptarbili u.þ.b. 650-670 m. Þar sem ólivín dílar sjást ekki hér er talið að um aðra gerð bergs sé að ræða og einnig benda jarðlagamælingar til þess að hér sé önnur berggerð á ferðinni en í syrpu hér fyrir ofan (H2). Líklega eru hér tvö hraunlög.

- **Hraunlagasyrpa IV (H4), 674-772 m dýpi:** Hér virðist vera um dílalausán ólivín-þóleiit hraunlagastafla að ræða. Bergið er þó enn jafnkorna eins og fyrir ofan (H3) og því er mögulegt að um sömu syrpu sé að ræða. Ástæða þykir þó til að skipta staflanum upp þar sem jarðlagamælingar benda til breytinga og einnig eru vísbendingar um slíkt í holu HN-4 sem er á sama borteig og HN-2. Þar kemur fram móberg á 672-677 m raundýpi sem liggur á milli tveggja hraunlagamyndana (Sigurjón B. Þórarinsson o.fl., 2006), og þykir það styðja skilin sem gerð eru á milli H4 og H3. Í þunnsneið á 718 m dýpi er um að ræða glerjað basalt sem líklega er kargi. Bergið er jafnkorna en töluvert er af ummynduðu ólivíni og því greint sem dílalaust, jafnkorna ólivín-þóleiit.
- **Gráuhnúka-móberg IV (G-M4), 772-778 m dýpi:** Dílalaust ólivín-þóleiit túff, ekki mjög blöðrótt en þónokkur intergranular poruhluti. Engin seteinkenni sjást sem er undarlegt miðað við hversu þunnt þetta lag er. Í holu HN-4, sem er á sama borteig, finnst þunn túfflínsa á milli hraunlaga svoltið neðar (á um 800 m raundýpi).
- **Hraunlagasyrpa V (H5), 778-910 m dýpi:** Meðal- til grófkorna, dílalaust ólivín-þóleiit. Ólivín er nokkuð áberandi í 878 m miðað við þunnsneiðagreiningu. Þarna er blanda af þéttu og fremur jafnkorna bergi og meðalkorna ólivín-þóleiiti skv. svarfgreiningu. Í nifteinda- og viðnámsmælingum kemur fram greinileg hækkun í gildum á u.þ.b. 850-885 m dýpi (mynd 6). Á svipuðu dýpi er fremur þétt ólivín-þóleiit sem gæti kannski útskýrt þessa hækkun.
- **Móbergsmýndun I (M1), 910-945 m dýpi:** Dílalaust túff og breksía, djúpoxað í neðri hluta þar sem innskot blandast svarfinu. Einingin einkennist af dökkgrænu og þéttu túffi. Engin þunnsneið er til úr þessari myndun. Greinileg breyting verður í nifteindamælingu á u.þ.b. 908 m dýpi þar sem mæling verður mun tilþrífaminni fyrir neðan (mynd 6) og eru þar líklega skilin á milli hraunlagasyrpu fyrir ofan og túffsins.
- **Móbergsmýndun II (M2), 945-1124 m dýpi:** Hér efst sést til setkorna sem benda til skila milli jarðmyndana og einnig er bergið hér dílótt. Óvíst er um neðri mörk þessarar myndunar en talið er að skilin séu á u.þ.b. 1124 m dýpi þar sem ásýndarbreyting verður á berginu. Hér er um að ræða plagióklas dílótt túff (breksíukennt í kringum 1034 m og allra neðst í þessari myndun, neðan 1112 m). Bergið er mjög misummyndað og talið er að það sé vegna ummyndunaræða innan móbergsins. Þunnsneið í 952 m sýnir túff. Þar örlar á rúnnun í einhverjum kornum en öðrum ekki (setkennt túff að hluta og styður það efri mörkin á þessari myndun). Nokkuð stórir plagióklas dílar eru á stangli, stundum alveg stakir og jafnvel alveg ummyndaðir í zeólíta. Svoltið er af kristölluðu, meðalkorna ólivín-þóleiiti, sem virðist ekki dílótt.

Ekki er ólíklegt að það sé dreif af mögulegu innskoti sem staðsett er á 935-937 m dýpi. Í 990 m er basalttúff með stórum plagióklas dílum, dálítið mikill poruhluti er á milli glerkorna (intergranular). Þunnsneið á 1078 m sýnir meðalkorna og fremur blöðrótt gler. Kristölluð korn eru fremur ójafnkorna, ólivín er í grunnmassa og því greint sem ólivín þóleiit. Stöku plagióklas dílar sjást. Í 1096 m er bergið mjög svipað og í 1078; plagióklasdílótt (þó minni dílar en áður) basalttúff sem er svolítið blöðrótt.

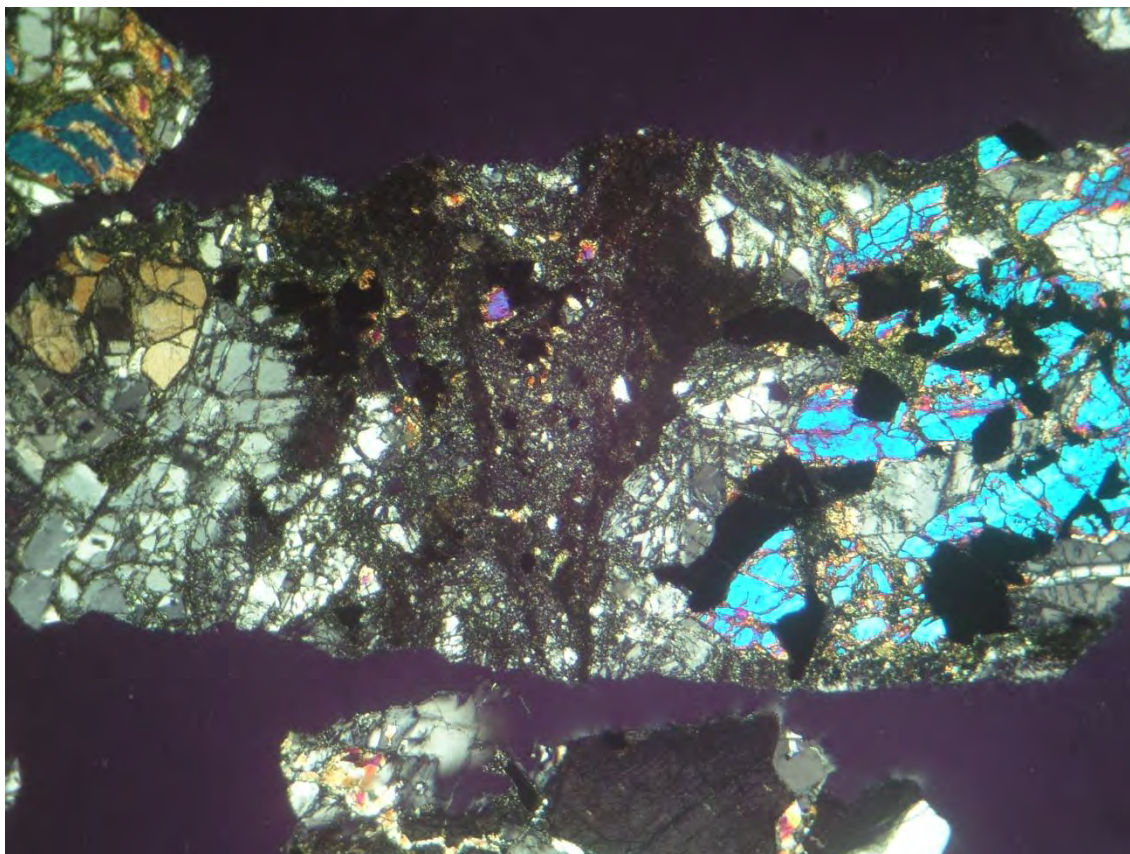
- **Móbergsmyndun III (M3), 1124-1186 m dýpi:** Hér verður nokkur ásýndarbreyting á berginu og eru því skil á milli myndana sett í 1124 m. Einnig virðist sem svoltil breyting verði í jarðlagamælingum á u.þ.b. 1120 m dýpi (mynd 7). Hér er um að ræða ólivín-þóleiit breksíu og bólstraberg og svolítið túff. Stakir pýroxen kristallar sjást greinilega en ekki er talið að um díla sé að ræða. Þessir kristallar sjást frekar ofan til en eru minna áberandi neðan 1154 m. Þetta er þó talin sama myndunin: dílalaus ólivín þóleiit móbergsmyndun. Þunnsneið á 1136 m dýpi sýnir blöndu af gleri, hlutkristölluðu gleri og fin- til meðalkorna ólivín-þóleiiti sem er þó fremur jafnkorna. Nokkuð sést af takkýlítísku gleri og einnig af pýroxen kristallabrotum.
- **Setlag 1 (S1), 1186-1188 m dýpi:** Lagskipt og finkorna túffríkt set þar sem stöku sinnum sjást brot úr undirliggjandi þóleiiti.
- **Hraunlag VI (H6) eða innskot, 1188-1202 m dýpi:** Þunnsneið af 1190 m sýnir þétt, finkorna og fremur jafnkorna basalt. Ólivín virðist ekki vera til staðar í grunnmassa og bergið er telst því vera þóleiit. Bergið er svolítið glerjað og hlutkristallað að hluta og er dílalaust. Einhverjar sprungur virðast hafa myndast í berginu og eru þær leirfylltar. Hins vegar virðist umhverfið fremur friðsælt, brotin eru t.d. mjög hrein. Set er til staðar efst í þessari myndun og finnast brot úr þóleiitinu í því. Líklegt er talið að einhverjar hreyfingar hafi átt sér stað en engu að síður fremur rólyndislegar. Hér er um mögulegt þóleiit innskot að ræða en ekki er loku fyrir það skotið að þetta sé hraunlag, þó bergið sé þétt. Ef um innskot er að ræða þá er ekki ólíklegt að bergið sé hluti af innskotasyrpu sem finnst hér fyrir neðan. Hins vegar þá er fremur undarlegt ef brot úr innskoti eru í setlagi hér fyrir ofan og því mælir það e.t.v. með því að hér sé um hraunlag að ræða. Greinileg hækkun er þó bæði í viðnámi og nifteindum á u.þ.b. 1185-1195 m dýpi sem bendir eindregið til þess að innskot sé á þessum slóðum (mynd 6).
- **Móbergsmyndun IV (M4), 1202-1392 m dýpi:** Á þessu dýpi er dílalaust móberg sem reglulega er skorið af innskoti sem er jafnkorna, finkorna og stak plagióklas dílótt ólivín-þóleiit (virðist hafa ólivín í grunnmassa). Neðri hluti þessa lags er talinn vera í kringum 1396 m dýpi þar sem setlag greinist í þunnsneið á 1398 m. Ekki er loku fyrir það skotið að það sé jafnvel lítið hraunlag á þessum slóðum þar sem nokkuð mikið virðist vera af þessu mjög finkorna og jafnkorna basalti. Ekki finnast dílar í þessu bergi og það virðist vera öðruvísi en innskotið sem kemur inn og út í jarðlagastaflanum hér fyrir ofan. Eins er bergið miklu ummyndaðra en það og sést nokkuð greinilega sem ljósgrænt svarf.
- **Setlag II (S2), 1392-1396 m dýpi:** Túffríkt set með nokkuð einsleitum, mjög fin- og jafnkorna basaltbrotum (þóleittlegum og mjög rúnnumum). Túffkorn eru ekki mikið rúnnum en það örlar þó á því. Þetta setlag hefur því varla borist mjög langt að.

- Móbergsmýndun V (M5), 1396-ca. 1500 m dýpi:** Hér er móbergsmýndun, aðallega túff og breksía, sem er stak-plagióklas dílött en óljóst er hvar mörk hennar eru nákvæmlega. Einhver meiri blöndun er þó í svarfinu á u.þ.b. 1500 m dýpi heldur en í kring og því hafa neðri skil myndunarinnar verið sett þar. Þunnsneið á 1398 m dýpi sýnir mjög fínkorna, alkristallað basalt sem blandað er glertúffi. Erfitt er að sjá berggerð en það virðist mjög þóleitt berg. Túffkorn og hlutkristölluð korn eru oxuð og ekki er ólíklegt að þóleitið sé innskot. Í þessu sýni sést einnig svolítið magn af setinu sem er skráð hér fyrir ofan. Fíngerðar sprungur sjást á stöku stað. Í 1450 m er einnig blanda af innskoti og grannbergi, miðlungs blöðróttu (nokkuð stórar blöðrur en fremur fáar). Að mestu leyti er um túff að ræða og það eru stórir plagióklas dílar í því. Enn sést í innskotið að ofan. Í 1488 m má finna fínkorna og jafnkorna basalt sem er nokkuð glerjað að hluta. Í bland við það eru túffkorn sem virðast stundum nokkuð lagskipt og með stöku stórum plagióklas dílum. Bergið er fremur jafnkorna en er engu að síður ólivín-þóleitt þar sem ólivín sést stundum í grunnmassa (ummyndað). Einhver kontakt-ummyndun sést. Neðst í þessari myndun er meðal- til grófkorna ólivín-þóleitt. Ekki er til þunnsneið úr því bergi og því ekki hægt að staðfesta að um sömu myndun sé að ræða og hér fyrir ofan. Hins vegar er ekki ólíklegt að hér sé um neðsta hluta þessarar móbergsmýndunar að ræða. Hvorki eru til nifteinda- né gammamælingar hér fyrir neðan og erfitt að styðjast við viðnámsmælingarnar einar og sér.
- Móbergsmýndun VI (M6), ca. 1500-1618 m dýpi:** Dilalaust móberg sem aðallega er túff og breksía. Í þunnsneið á 1522 m sést svolítið misleitt túff (misummyndað, mismikið blöðrótt, mismunandi kornastærð) blandað ólivín-þóleitt innskotsbergi. Greinileg kontaktummyndun er til staðar sem rennir stoðum undir það að innskot sé til staðar á þessu dýpi. Greinilegar tektónískar sprungur eru í innskotsberginu, kurlað berg í jaðrinum og svo sprungufylling. Rétt fyrir neðan, eða í 1564 m, er blanda af grænleitu og brúnleitu túffi, vel glerjuðu basalti og fínkristölluðu basalti. Um túffrika breksíu er að ræða og er berggerðin ólivín-þóleitt. Engir teljandi dílar eru sjáanlegir. Bergið er nokkuð mikið oxað. Þunnsneið á 1608 m dýpi er blanda af blöðróttu gleri, hlutkristölluðu og fínkristölluðu ólivín-þóleiti og er hér um breksíu að ræða. Plagióklas dílar sjást stöku sinnum og einnig sjást stöku ólivín dílar (jafnvel pýroxen líka). Kristallaði hlutinn er fremur þéttur en mun meiri poruhluti er í glerinu og hlutkristallaða berginu. Neðsti hlutinn gæti mögulega verið önnur myndun þar sem talið er að dílar sjáist.
- Hraunlög VII (H7), 1618-1634 m dýpi:** Í svarfgreiningu er bergið hér talið fínkorna og jafnkorna, ljóst þóleitt, fremur þétt og plagióklas og pýroxen dílött á 1622-1636 m dýpi, líka á 1612-1614 m dýpi.
- Setlag III (S3), 1634-1650 m dýpi:** Þunnsneið á 1650 m dýpi sýnir blöndu af gleri og samlímdum bergbrotum. Kristallaðir molar eru stundum rúnnaðir og er bergið oxað. Set að mestu leyti og eitthvað af berginu virðist vera þóleitt. Samkvæmt svarfgreiningu er hér um siltset að ræða með fremur misleitum molum. Setið er oxað og rúmmun sést á stöku stað. Talið er að þetta gæti verið jökulárset.
- Móbergsmýndun VII (M7), 1650-1700 m dýpi:** Hér er um dilalaust ljósgrænleitt túff að ræða. Þunnsneið af 1674 m dýpi sýnir berg sem er að meirihluta nokkuð blöðrótt gler, blandað fín- og jafnkorna ólivín-þóleiti. Þetta berg er allt öðruvísi ásýndar en bergið í 1608 m.

- **Hraunlagasyrpa VIII (H8), 1700-1742 m dýpi:** Hér er dýlalaust, jafnkorna og finkorna basalt, líklega þóleiit, skv. þunnsneið á 1708 m. Það örlar á svolitlu af glerjuðu basalti. Talið er að hér sé um hraunlög að ræða. Blandað samlímt túff sést á 1716-1722 m dýpi.
- **Móbergsmyndun VIII (M8) og innskot, 1747-2001 m dýpi:** Að mestu er hér meðal-til grófkorna ólivín-þóleiit innskot. Þunnsneið á 1752 m dýpi sýnir grófkornótt basalt, blandað finkorna. Bergið virðist oft brotið og kurlað, greinileg merki um tektóníska atburði. Eitthvað er af gleri inn á milli og vart verður við oxun frá 1748 m. Líklega er um innskot að ræða. Í þunnsneið á 1780 m dýpi er grófkornótt basalt eins og í 1752 m. Virðist uppbrotið og breksíulegt á köflum (tektónískt) eins og sjá má á mynd 3. Eitthvað gler er í bland sem virðist pyroxen dýlött. Þunnsneið á 1832 m dýpi sýnir grófkorna basalt þar sem aðallega sjást pyroxen og plagióklas. Bergið er blandað gleri sem er með nokkuð stórum plagióklas dílum (grannberg?). Svolítið sundur brotið. Mjög ferskt og hlýtur að vera dólerít innskot. Þunnsneið á 1876 m dýpi sýnir fin-til meðalkorna basalt sem er nokkuð glerjað á köflum. Ummyndaðra en í 1832 m. Þétt og líklega finkornóttari hluti innskots.

Ljóst og smáblöðrótt túff sést svo greinilega á 1914-1916 m dýpi en þar fyrir neðan er aftur komið í innskot. Þunnsneið úr því, á 1926 m dýpi sýnir meðal-til grófkorna ólivín-þóleiit. Nokkur korn eru mjög finkorna og málmrík með miklum plagióklas. Sum þeirra eru mjög þétt. E.t.v. er möguleiki á ísúru innskoti (eða þá að hér sé um að ræða jaðarinn á ólivín þóleiit innskotinu).

Líklega sést svo enn í sömu móbergsmyndun og fyrir ofan innskotið. Þunnsneið á 1968 m dýpi sýnir mjög finkorna túff sem er lagskipt að einhverju leyti. Það sést svoltið af fin- og hlutkristölluðu basalti í bland. Að mestu leyti er um túff að ræða á þessu dýptarbili, ljóst og þétt og finlagskipt á dýptarbili 1966-1978 m.

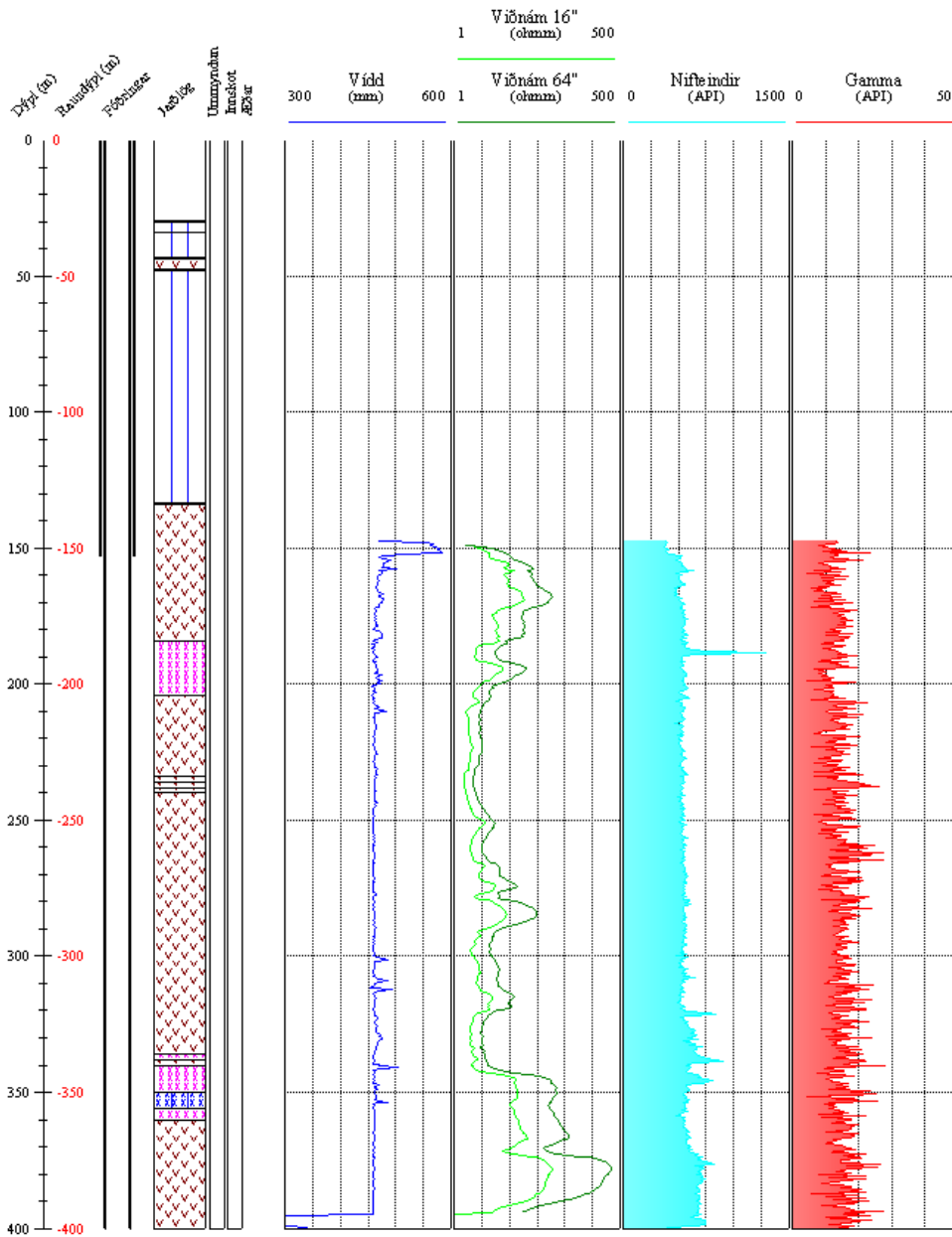


Mynd 3. *Innskot á 1780 m dýpi í HN-2 sem virðist uppbrotið og kurlað að hluta. Breidd myndar er 3 mm.*

Staður: Hellisheiði
 Holungr: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Dýptarbil: 0-400 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhúti: Öll holan

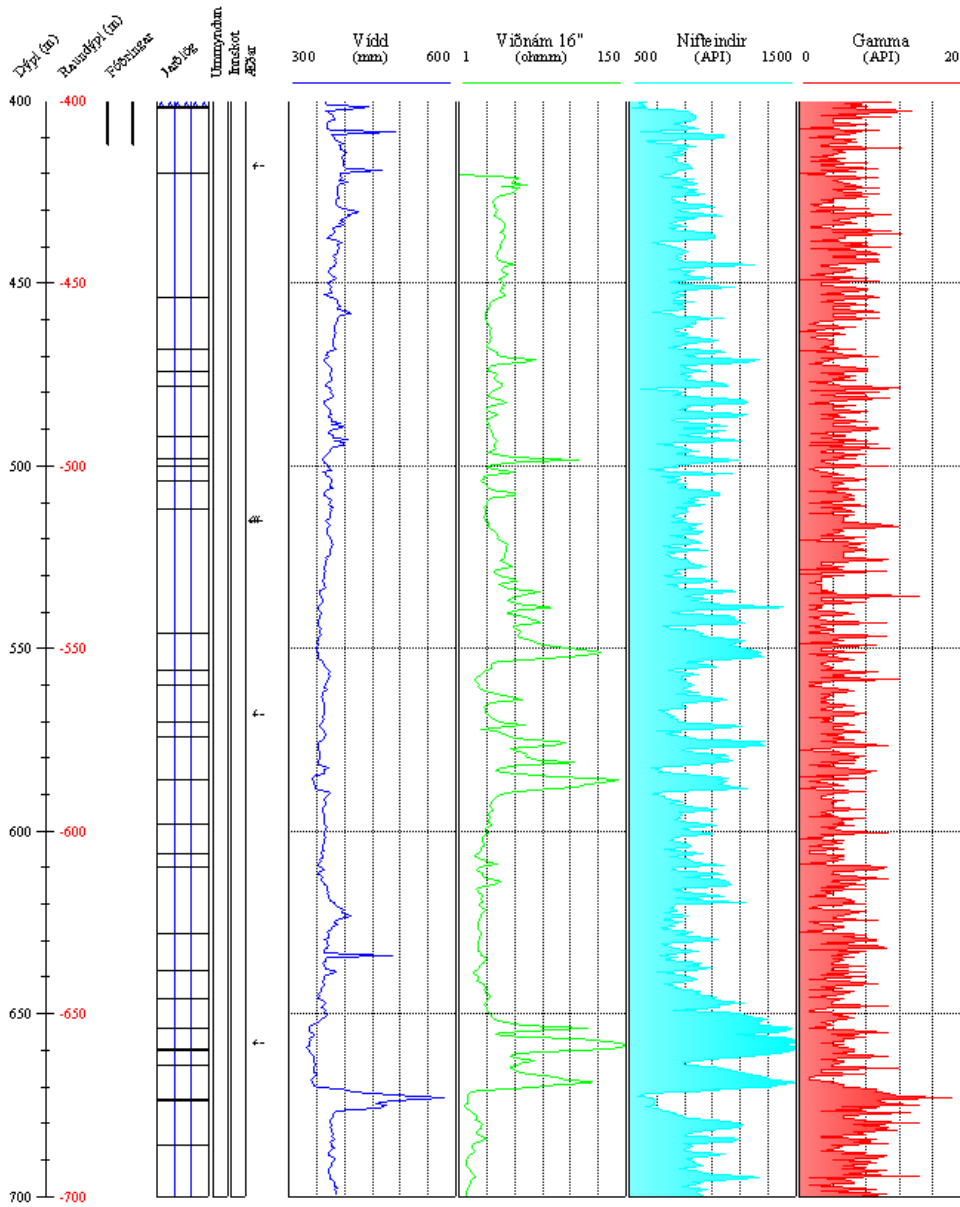
 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMM, HF


Mynd 4. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 0–400 m.

Staður: Hellisheiði
 Holungrn: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Dýptarbil: 400-700 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

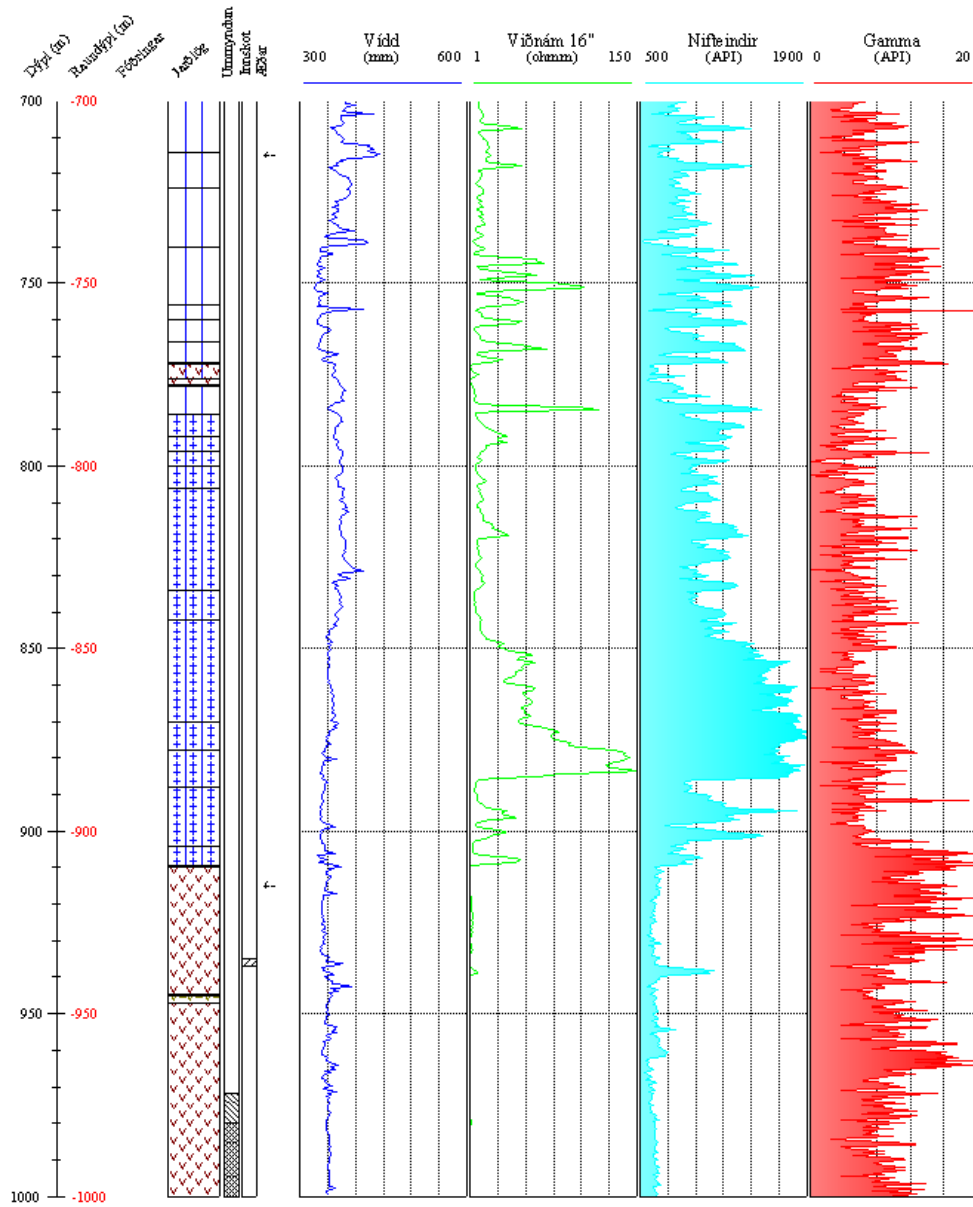
 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMMH, HF


Mynd 5. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 400–700 m.

Staður: Hellisheiði
 Holungraft: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Dýptarbil: 700-1000 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

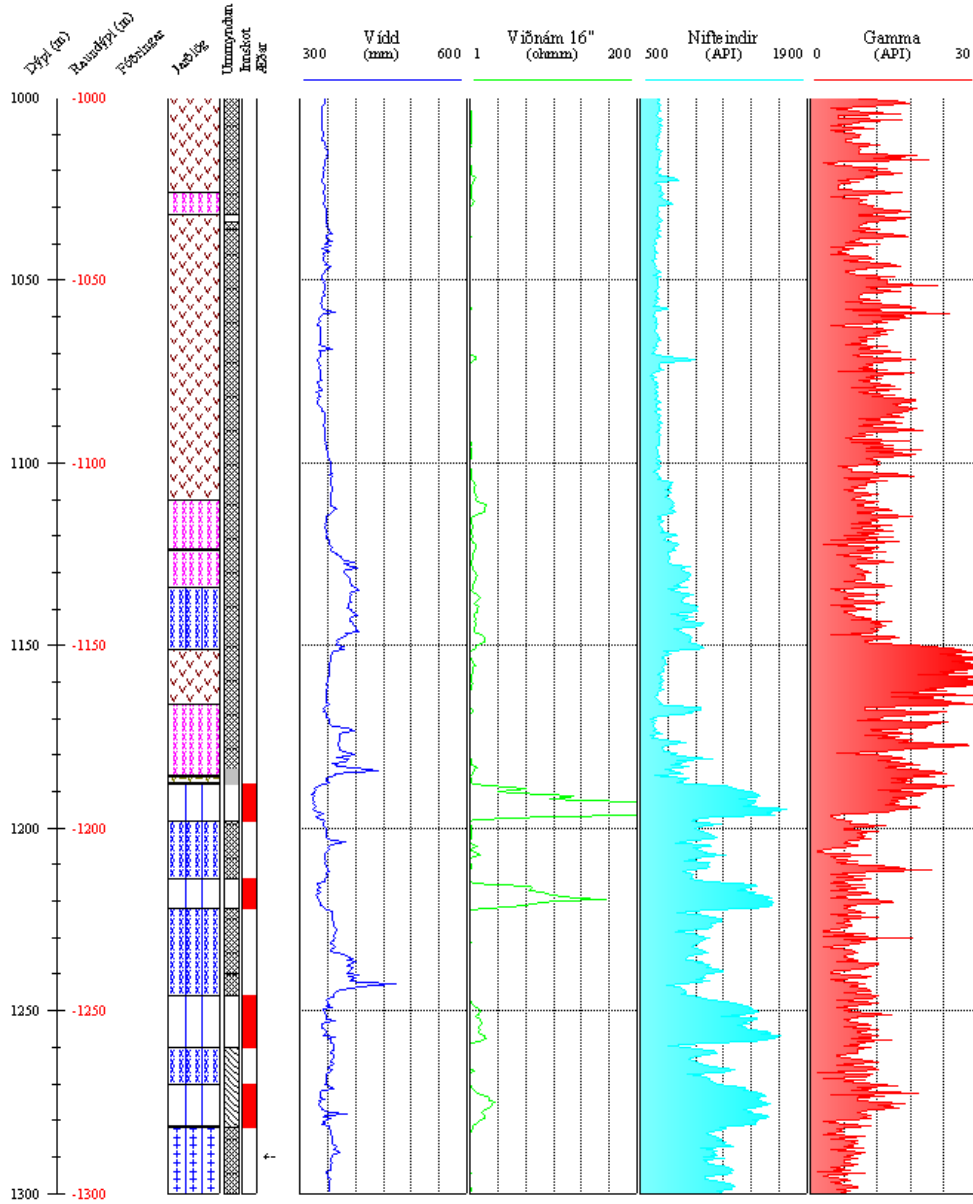
 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMM, HF


Mynd 6. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 700-1000 m.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Dýptarbil: 1000-1300m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhúti: Öll holan

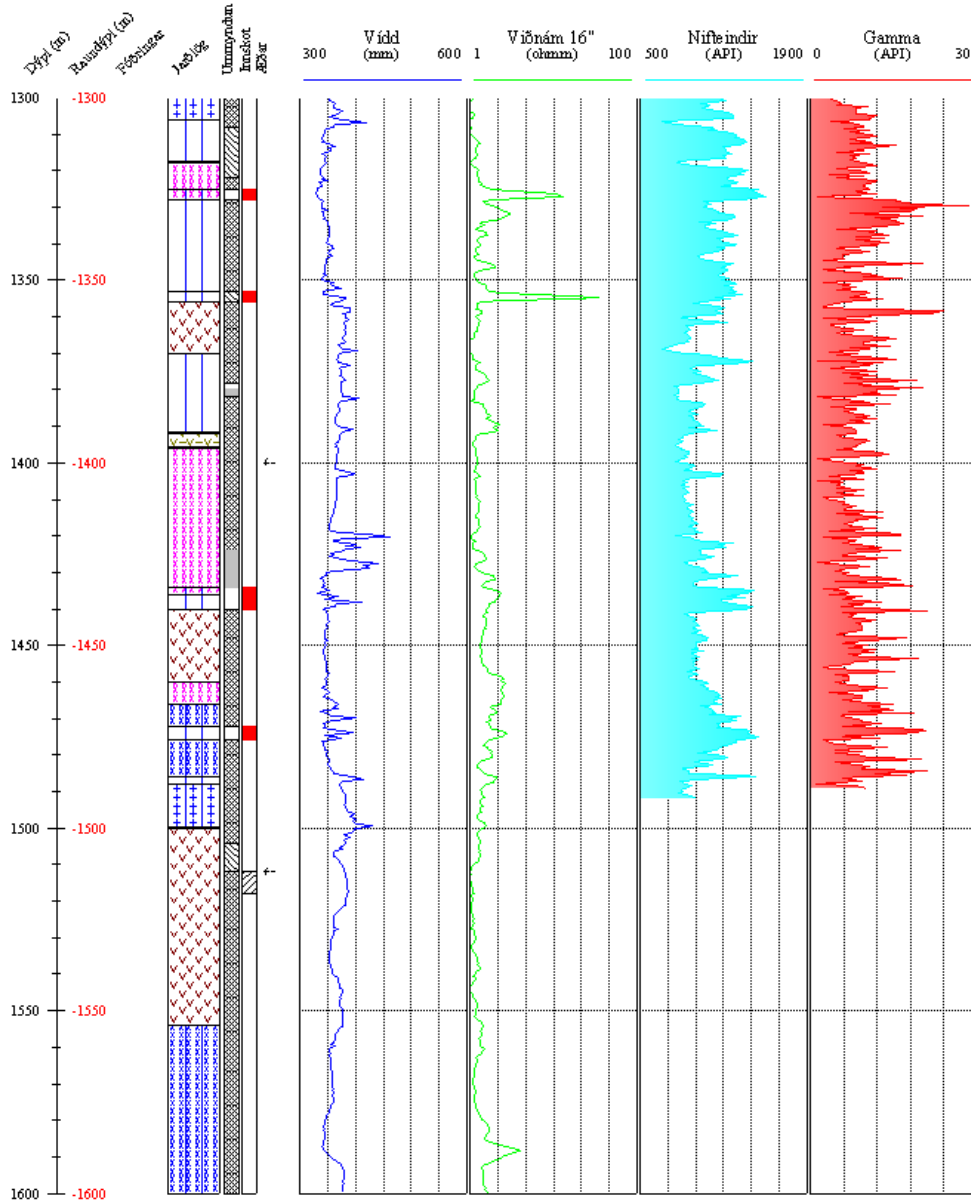
 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMMH, HF


Mynd 7. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 1000-1300 m.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Dýptarbíl: 1300-1600 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhliuti: Öll holan

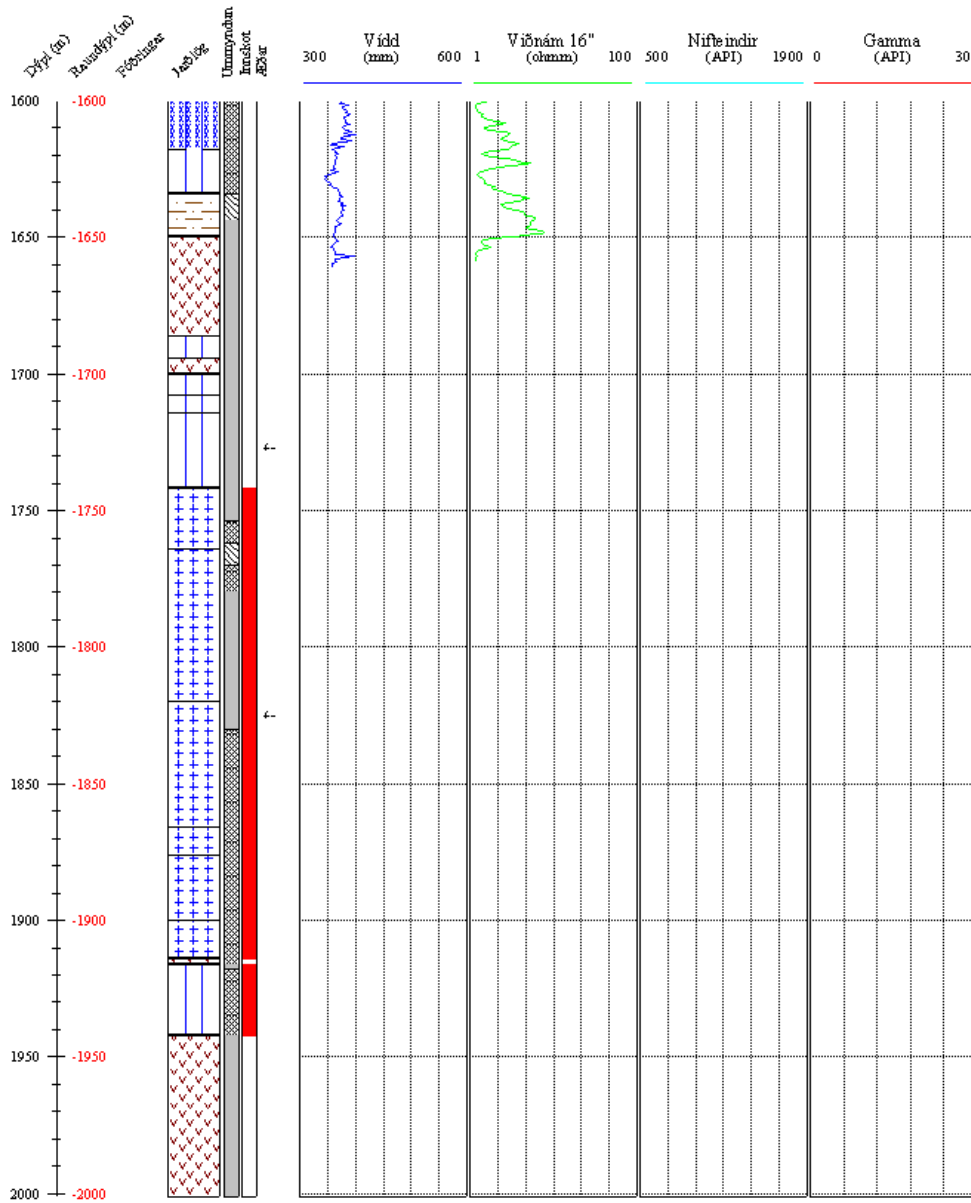
 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMM, HF


Mynd 8. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 1300-1600 m.

Staður: Hellisheiði
 Holungrað: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Dýptarbíl: 1600-2001 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlutí: Öll holan

 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMM, HF


Mynd 9. Jarðlagasnið HN-2 ásamt jarðlagamælingum á dýptarbilinu 1600-2001 m.

3.1.2 Innskot í HN-2

Innskotayfirlit má sjá í töflu 1. Þar er berggerð innskotanna lýst ásamt þeim einkennum sem oft fylgja innskotum. Þar má einnig sjá tengsl við jarðlagamælingar. Nokkur innskot eru skorin í holu HN-2 en mest áberandi er langur innskotakaffi neðarlega í holunni allt frá 1742 m og nánast samfleytt niður á 1942 m dýpi. Innskotunum er skipt niður en yfirleitt eru þetta meðal- til grófkorna ólivín-þóleiit innskot sem virðast dílalaus. Allt er þetta mjög svipað berg. Í einhverjum tilvikum eru innskotin mjög ummynduð en ummyndun er þó mismikil innan innskotastafans. Ef þetta berg er í raun og veru innskot má skýra ummyndunarmismuninn með sprungum sem ganga í gegnum innskotin og þar verður ummyndun mun meiri en í kring. Þetta sést nokkuð glögglega í þunnsneiðum úr þessum innskotafasa þar sem bergið er greinilega uppbrotið eins og sjá má á mynd 3. Í svarfgreiningu má sjá að innskotin eru finkorna til jaðrana og þannig má skipta þessum innskotum upp. Þau eru þá grófkornóttari í miðjunni. Ekki er víst að um sama innskot sé að ræða en það þykir þó nokkuð líklegt og eru þau því talin samkynja og lituð með ljósbláum lit í töflu 1. Holan hefur því líklega verið að fara inn og út úr innskotinu án þess þó að sýna mikið af grannberginu. Svo virðist sem innskotið sé ekki þunnt og er það mat byggt á því að bergið virðist fremur grófkornótt og einnig sést lítið í grannberg. Ómögulegt er þó að segja til um hversu þykkt innskotið er.

Ofar í holunni virðist svo sem farið sé út og inn úr sama innskotinu, allt frá 1188 m og niður á tæplega 1500 m. Þau innskot eru merkt með ljósgrænu í töflu 1. Þar er um að ræða finkorna ólivín-þóleiit, sem reyndar er mjög jafnkorna og á tíðum fremur þóleiitlegt. Engu að síður finnst ólivín í grunnmassa bergsins, mjög ummyndað, og því er ekki hægt að greina bergið sem þóleiit. Þar sem bergið er ekki grófkornótt þykir líklegt að um frekar þunnt innskot sé á ferðinni. Einnig þykir líklegt að um sama innskot sé að ræða þar sem sömu einkenni fylgja berginu samkvæmt þunnsneiðum og svarfgreiningu (tafla 1). Þar sem holan er bein er ekki útilokað að hún fylgi að einhverju leyti eftir innskoti sem verður á vegi hennar. Það sem einkennir innskotið er að bergið er þétt, jafnkorna, með ólivín í grunnmassa og ummyndað. Í einhverjum tilfellum sjást blöðrur í berginu og í fyrstu var talið að blöðrótt bergið væri hraunlög. Hins vegar geta innskot verið blöðrótt líkt og Walker tók eftir í rannsóknum sínum á Austfjörðum, þar sem gangar urðu blöðróttir á um 1 km dýpi og ofar (Walker, 1974). Það sem skýrir það að blöðrur sjást í einhverjum af þessum innskotum er því líklega það að þau hafa náð fremur nálægt yfirborði þar sem þrýstingur er minni og kvikan því farin að sleppa einhverju gasi. Þetta hljóta einnig að vera gömul innskot þar sem þau eru mjög ummynduð.

Í þunnsneið á 1926 m dýpi sjást einhver merki um mögulegt ísúrt innskot og er það eina merkið um þróað berg í holunni. Hins vegar eru engar jarðlagamælingar til af þessu dýpi og ekki hægt að staðfesta þennan grun að sinni. Einungis nokkur korn sýna þessi einkenni en einnig er mögulegt að um afar finkorna hluta ólivín þóleiit innskotsins sé að ræða. Þetta verður ekki staðfest nema með efnagreiningu ef hægt verður að ná þessum kornum úr svarfinu.

Samtals er því talið að um fimm innskot sé að ræða í holu HN-2 en ekki er útilokað að þau séu fleiri. Ekki er óalgengt að borað sé nokkuð lengi í gegnum innskot í beinum holum, þar sem þær fylgja stundum innskotum eftir. Raunþykkt þeirra þarf því ekki að vera jafn mikil og hún sýnist í svarfinu.

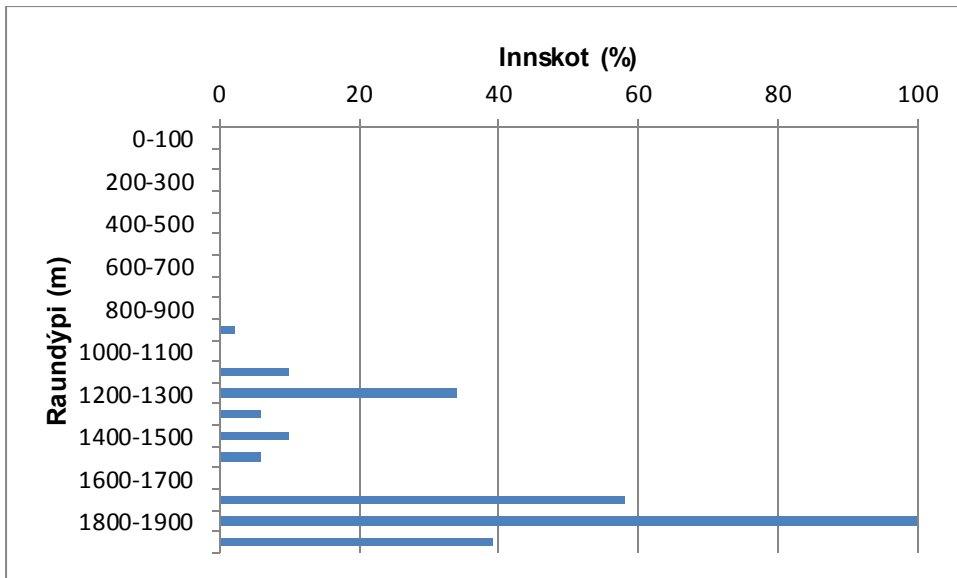
Innskotabéttleika í holunni má sjá á mynd 10. Þar má sjá að innskot verða verulega algeng neðst í holunni og nær þéttleikinn 100% á milli 1800 og 1900 m dýpis.

Tafla 1. Yfirlit um innskot í holu HN-2. Innskot sem talin eru vera samkynja eru lituð með sama lit. Dýptartölur í lýsingum á svarfi og þunnsneiðum eru óleiðréttar.

Dýpi (m)	Tegund	Svarfgreining	Þunnsneið	Mælingar
935-937	Mögulegt innskot	Á 936-938 m og aftur á 940-948 m sést fín- til grófkorna, þétt basaltinnskot sem er blandað túffi (grannberg).	Engin þunnsneið er af þessu svæði	Greinilegur toppur sést í nifteindum á þessu dýptarbili og örli tla hækkun má greina í viðnámsmælingum.
1188-1198	Ólivín þóleiit	Fínkorna basaltinnskot, eitthvað blöðrótt til jaðrana. Áberandi oxun er fyrir ofan innskotið og einnig í neðri hluta þess.	Þunnsneið í 1190 m sýnir þétt, fínkorna og fremur jafnkorna og dílalaust basalt, jafnvel talið þóleiit.	Sést í viðnámi og nifteindum sem á berandi toppar og staðsett eftir því.
1214-1222	Ólivín þóleiit	Í svarfgreiningu er talað um að aftur sé farið í sama innskotið. Oxun er greinileg í kring.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Hækkun í bæði viðnámi og nifteindum er á þessu dýptarbili.
1246-1260	Ólivín þóleiit	Svarfgreining sýnir að farið er aftur inn í sama innskot og hér fyrir ofan.	Þunnsneið í 1252 m sýnir jafnkorna ólivín-þóleiit, ummyndað en það virðast vera tvær gerðir af bergi, glerjað plagióklas dílótt basalt og svo þetta dílalausa, þetta, jafnkorna ólivín-þóleiit.	Hækkun í bæði viðnámi og nifteindum er á þessu dýptarbili. Hins vegar er hækkunin mun meira á berandi í nifteindum en í viðnámi.
1270-1282	Ólivín þóleiit	Svarfgreining sýnir sama innskot og fyrir ofan samfelt áfram. Oxun er greinileg fyrir neðan þetta innskot.	Þunnsneið í 1290 m sýnir fremur blandað svarf en þar sést enn í fínkorna, þétt basalt sem talið er vera innskot. Einnig sjást merki um kontaktummyndun og oxun sem bendir til þessa innskot sé hér.	Á þessu dýptarbili er hækkun í bæði nifteindum og viðnámi, en hækkunin er ekki mjög mikil enda virðist bergið vera þónokkuð ummyndað t.d. í þunnsneiðum.
1325-1328	Ólivín þóleiit	Fínkorna basaltinnskot, líklega það sama og áður.	Þunnsneiðar á 1324 og 1356 m sýna þetta innskot áfram, fínkorna, jafnkorna og þétt og það virðist vera ummyndað ólivín í grunnmassanum.	Á þessu dýpi er hækkun í bæði nifteindum og viðnámi en hún er ekki mjög mikil. Hins vegar er hækkunin samstíga og virðist passa við svarfgreininguna.
1353-1356	Ólivín þóleiit	Fínkorna basaltinnskot, líklega það sama og áður. Svólítil oxun er fyrir neðan þetta innskot.	Þunnsneiðar á 1324 og 1356 m sýna þetta innskot áfram, fínkorna, jafnkorna og þétt og það virðist vera ummyndað ólivín í grunnmassanum.	Á þessu dýpi er hækkun í bæði nifteindum og viðnámi en hún er ekki mjög mikil. Hins vegar er hækkunin samstíga og virðist passa við svarfgreininguna.
1434-1440	Ólivín þóleiit	Aftur sama innskotið. Oxun er greinileg í kring.	Þunnsneið á 1450 m dýpi sýnir að eitthvað af berginu er þétt og fínkorna basalt og líklega enn innskotið að ofan.	Staðsetning er á kvörðuð út frá nifteinda- og viðnámsmælingum þar sem útslag er.
1472-1476	Ólivín þóleiit	Í svarfgreiningu sést annað slagið í þetta sama innskot.	Þunnsneið af 1488 m sýnir fínkorna og jafnkorna basalt sem er nokkuð glerjað að hluta. Túffkorn eru inn á	Staðsetning er á kvörðuð út frá nifteindamælingu. Einnig eru toppar á 1482-1485 m og aðeins fyrir ofan 1470 m. Athuga það

			milli. Eitthvað af jafnkorna kornunum virðast vera hluti af móbergsmýnduninni og því er þetta örugglega ekki innskot. Ekki var tekin þunnsneið í innskotinu sjálfu.	betur.
~1516-1522	Mögulegt innskot – ólivín þóleiit	Vottur af innskoti sést í svafrinu frá u.þ.b. 1520 m.	Þunnsneið á 1522 m dýpi sýnir misleitt túff blandað ólivín þóleiit innskotsbergi. Einnig sést kontaktummyndun. Tektónísk sprunga er greinilega á svæðinu, kurlað bergi jaðrinum á sprungunni og svo sprungufylling.	Óljós staðsetning þar sem jarðla gamælingar ná ekki svona djúpt. Talið er að æð sé á þessum slóðum, eða á u.þ.b. 1505-1515 m dýpi og ekki er ólíklegt að hún tengist innskotinu/sprungunni.
1742-1764	Ólivín þóleiit	Meðal- til grófkorna ólivín-þóleiit, fremur ummyndað ofan til en verður ferskara að sjá þegar neðar dregur.	Þunnsneið á 1752 m dýpi sýnir grófkornótt ólivín-þóleiit, fersklegt og tektónísk áhrif eru greinileg þar sem hluti bergsins er uppbrotinn og kurlaður. Eitthvað sést af fínkorna bergi inn á milli og svolítið af gleri.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi.
1764-1820	Ólivín þóleiit	Allt að því hlutkristallað hér efst. Virðist það sama og fyrir ofan en meira ummyndað. Verður grófkornóttara neðan 1768 m. Aðeins neðar verður bergið ljósleitt af ummyndun. Nokkuð er af hlutkristölluðu bergi innan um (á 1776-1794 m) og talið að þar sé ólivín þóleiit bólstraberg á ferðinni (grannberg).	Þunnsneið á 1780 m dýpi sýnir grófkornótt ólivín-þóleiit, fersklegt og tektónísk áhrif eru greinileg þar sem hluti bergsins er uppbrotinn og kurlaður. Pyroxen dílótt gler er í grannbergi.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi.
1820-1866	Ólivín þóleiit	Fínkornótt berg efst en verður strax meðal- til grófkornótt. Bergið verður mun ferskara neðan 1826 m og er plagíóklas fremur tær miðað við dýpi (aðeins skýjaður). Pýroxen er stundum leirugur. Ekki er mikið af útfellingum.	Þunnsneið á 1832 m dýpi sýnir grófkornótt ólivín-þóleiit, mjög ferskt og tektónísk áhrif eru greinileg þar sem hluti bergsins er uppbrotinn og kurlaður. Blandað gleri með nokkuð stórum plagíóklas dílum sem gæti verið úr grannbergi.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi.
1866-1876	Ólivín þóleiit	Meira af fínkornóttu basalti er hér efst og eitthvað sést af hlutkristölluðu bergi. Bergið verður fljótlega meðal- til grófkornótt.	Þunnsneið í 1876 m sýnir fín-til meðalkorna basalt, nokkuð glerjað á köflum. Bergið er þétt og er líklega innskotsjaðar.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi.
1876-1900	Ólivín þóleiit	Fínkorna berg hér efst en verður strax meðal- til grófkornótt. Bergið er þétt en nokkuð um sprungu eins og áður.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi.

1900-1914	Ólivín þóleiit	Svipað og áður, meira fínkorna efst.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi.
1917-1942	Ólivín þóleiit	Í svarfinu er greint meðal- til grófkorna og þétt basalt sem verður aðeins fínkornóttara neðst og er þá með eka þóleiit kristöllum. Innskot.	Þunnsneið á 1926 m dýpi sýnir meðal- til grófkorna ólivín-þóleiit. Nokkur korn eru mjög fínkorna og málmrík með miklu af plagióklas, sum mjög þétt. Mögulegt er að þarna sé ísúrt innskot eða þá að hér sé jaðarinn á innskotinu.	Mælingar ná ekki þetta djúpt og því hefur ekki reynst mögulegt að staðsetja innskotið/innskotin ná kvæmlega. Þessi staðsetning er því einungis byggð á svafgreiningu sem hefur aðeins verið hniakað upp á við á þessu dýpi. Það er því heldur ekki hægt að staðfesta hér hvort að hluta til sé um þróað berg að ræða.



Mynd 10. Innskotapéttleiki í HN-2.

3.1.3 Jarðlagamyndanir í holu HN-5

Hola HN-5 er staðsett rétt norðan Gráuhnúka á Hellisheiði, á núverandi niðurdælingarsvæði Hellisheiðarvirkjunar (mynd 1). Holan var hönnuð sem niðurrennslishola fyrir affallsvatn frá virkjuninni en reyndist vera mjög heit (~300°C) og standa vonir til þess að í framtíðinni verði svæðið notað sem vinnslusvæði.

Mikil vandræði einkenndu borsögu holunnar og varð jarðborinn Sleipnir að yfirgefa hana ókláraða snemmsumars 2006 eftir miklar festur. Geysir kláraði svo að bora holuna haustið 2006 (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009a). Upplýsingar um bora og bordýpi má sjá í töflu 8.

Jarðlög holunnar ásamt jarðlagamælingum má sjá á myndum 12-18.

Samtals voru greindar 47 þunnsneiðar úr HN-5 og hér fyrir neðan er jarðlögum holunnar lýst. Dýpið er leiðrétt nema þar sem þunnsneiðar eru nefndar, þar er svarfgreiningardýpið nefnt. Þar má yfirleitt hnika dýpinu svolítið upp á við. Raundýpi (frá borpalli) jarðlaganna er sett í sviga fyrir aftan. Í 3. áfanga holunnar voru ekki gerðar viðnáms- og víddarmælingar og því eru aðeins sýndar nifteindamæling (nifteindir nær og fjær) og gammamæling á myndum 15-18. Þessar mælingar eru að auki með mæligildi CPS (counts per second) í stað API og eru því einungis afstæðar. Ekki er hægt að fullyrða um hversu þróað berg er út frá þessum mælingum þar sem raunveruleg gildi eru ekki til.

Þær myndanir sem taldar eru vera þær sömu og í holum HN-2 eða HN-8, sem er á sama borteig, fá G skeytt fyrir framan heitið í sviganum (t.d. G-M1).

- **Gráuhnúka-móbergsmýndun I (G-M1), 6-46 m dýpi (raundýpi: 6-46 m):** Settúff er efst í þessari myndun. Ferskt móberg, aðallega blöðrótt túff með staka, greinilega plagíóklas díla. Annað slagið sést í kristallað basalt inn á milli en ekki verður vart við díla í því bergi. Neðst í þessari myndun er túffið mjög blöðrótt og stak plagíóklasdílótt. Ekki er til þunnsneið úr þessari myndun og því er ekkert staðhæft um berggerð. Líklega er hér um að ræða túffið sem liggur í hlíðinni rétt austan við holuna.
- **Gráuhnúka-hraunlagasyrpa I (G-H1), 46-110 m dýpi (raundýpi: 46-110 m):** Ólivín þóleiit, fin- til meðalkorna. Nokkuð einsleitt og dílalaust berg. Þunnsneið á 56 m dýpi sýnir meðalkorna og dílalaust ólivín-þóleiit með ójafna kristöllum. Bergið er talið vera vel kristölluð hraunlög.
- **Gráuhnúka-hraunlagasyrpa II (G-H2) 110-208 m dýpi (raundýpi: 110-207 m):** Ólivín þóleiit, fin- til meðalkorna, einhver grunur er um ólivín díla. Þunnsneið á 186 m dýpi sýnir fin- til meðalkorna, ójafnkorna ólivín þóleiit eða ólivín basalt (ólivínríkt berg) og er bergið í þessu sýni mun ólivínríkara en í þunnsneið af 56 m dýpi. E.t.v. sést stöku ólivín díll og örfáir plagíóklas dílar.
- **Gráuhnúka-móbergsmýndun II (G-M2), 208-481 m dýpi (raundýpi: 207-463 m):** Dílalaust ólivín-þóleiit móberg þar sem skiptast á túff-, breksíu- og bólstrabergslög. Bergið er mjög blöðrótt niður á 308 m dýpi en þar verður það miklu þéttara. Þunnsneið á 264 m dýpi sýnir dílalaust, mjög blöðrótt og nánast kargalegt túff eða túffríka breksíu. Þunnsneið í 366 m sýnir aðallega gler en svolítið af hlutkristölluðu bergi. Glerið er samblímt með zeólítum og einhverju kalsíti. Lítið er af blöðrum.

Þunnarneið í 416 m sýnir túff eða túffríka breksíu þar sem um er að ræða gler og hlutkristallað gler. Glerið er lítið blöðrótt en mikill intergranular poruhluti er til staðar. Myndunin er aðskilin frá þeirri næstu með þunnu setlagi.

- **Setlag IV (S4), 481-482 m dýpi (raundýpi: 463-464 m):** Slæðingur af setkornum finnst á þessu dýpi og er þar um að ræða ljóst, finkorna og túffríkt set. Svölitið ber á agnarsmáum, oxuðum kornum í setinu.
- **Gráuhnúka-móbergsmýndun III (G-M3), 482-608 m dýpi (raundýpi: 464-568 m):** Ásýnd bergsins virðist breytast hér í grófkristallaðra og grófara basalt og einnig bendir setlagið hér fyrir ofan til þess að hér sé komin ný jarðlagamyndun. Líklega er hér um dílalaust bólstraberg að ræða frekar en hraun, allt frá hlutkristölluðu ólivín-þóleíti og upp í meðalkorna alkristallað berg. Ekki er mikið um gler en það sést þó alltaf inn á milli. Bergið virðist fremur þétt. Þunnarneið á 506 m dýpi sýnir glerjað meðalkristallað (allt niður í hlutkristallað) ólivín-þóleít sem er oxað að hluta. Bergið er dílalaust (þó gætu verið einhverjir míkro-plagióklasdílar). Þunnarneiðar í HN-7, sem er á sama borteig, eru með betra svarfi og er nánast dílalaus móbergsmýndun niður á u.þ.b. 580 m raundýpi og passar það vel við þessa myndun. Í þunnarneiðum úr HN-5 er um mjög fingert svarf að ræða og því erfitt að fullyrða um díla. Þunnarneið á 550 m sýnir glerjað basalt, allt frá glerjuðu og finkristölluðu upp í meðalkorna alkristallað basalt. Glerkorn sjást inn á milli og því talið að hér sé um ólivín-þóleít bólstraberg að ræða.
- **Hraunlög IX (H9), 608-620 m dýpi (raundýpi: 568-577 m):** Hér er vel kristallað, meðalkorna, nokkuð fersklegt basalt og ekki verður vart við gler. Ekki er til þunnarneið af þessu svæði og því ekki hægt að fullyrða hvort um ólivín-þóleít eða þóleít sé að ræða þó líklega þyki að hér sé ólivín-þóleít.
- **Móbergsmýndun IX (M9), 620-810 m dýpi (raundýpi: 577-710 m):** Hér er aðallega um ólivín-þóleít bólstraberg að ræða og er það mögulega plagióklas dílótt. Þunnarneið á 632 m sýnir glerjað basalt, hlutkristallað og upp í meðalkristallað basalt. Mjög lítið er af gleri en það örlar þó á því. Mikið er af pýroxen kristallabrotum en ekki hægt að fullyrða að það séu dílar. Erfitt er að segja hvort þetta sé bólstraberg eða hraunlag en greinandi hallast þó að því fyrrnefnda. Í þunnarneið á 754 m er oxað, glerjað basalt, allt frá hlutkristölluðu og upp í finkorna basalt sem líklega er ólivín-þóleít. Bergið er mjög málmríkt á köflum. Nokkuð er af pyroxen og plagióklas og minna af ólivín brotum. Í þunnarneið í 790 m sést glerjað basalt, hlutkristallað, finkorna og meðalkorna. Líklegast er að þetta sé bólstraberg og er það mjög oxað. Þunnarneið í 800 m sýnir glerjað, fin- til meðalkorna, mjög oxað basalt. Bergið er svipað og í 790 m en er þó aðeins meira kristallað. Plagióklas er mest áberandi og eitthvað er af mjög ummynduðu gleri.

Fyrir neðan 580 m raundýpi í HN-7 og allt niður á um 690 m raundýpi virðist vera móbergsmýndun með nokkuð miklu magni af plagióklas dílum, að einhverju leyti hópdílum. Þegar þunnarneiðarnar úr holunum tveimur eru bornar saman virðist sem um sama berg sé að ræða og einnig er raundýpi þessara myndana mjög svipað. Þar sem svarf úr HN-7 er töluvert betra á þessu dýpi en í HN-5 þykir öruggara að treysta á þunnarneiðar þaðan og er því talið að þessi myndun í HN-5 sé einnig plagióklas dílótt.

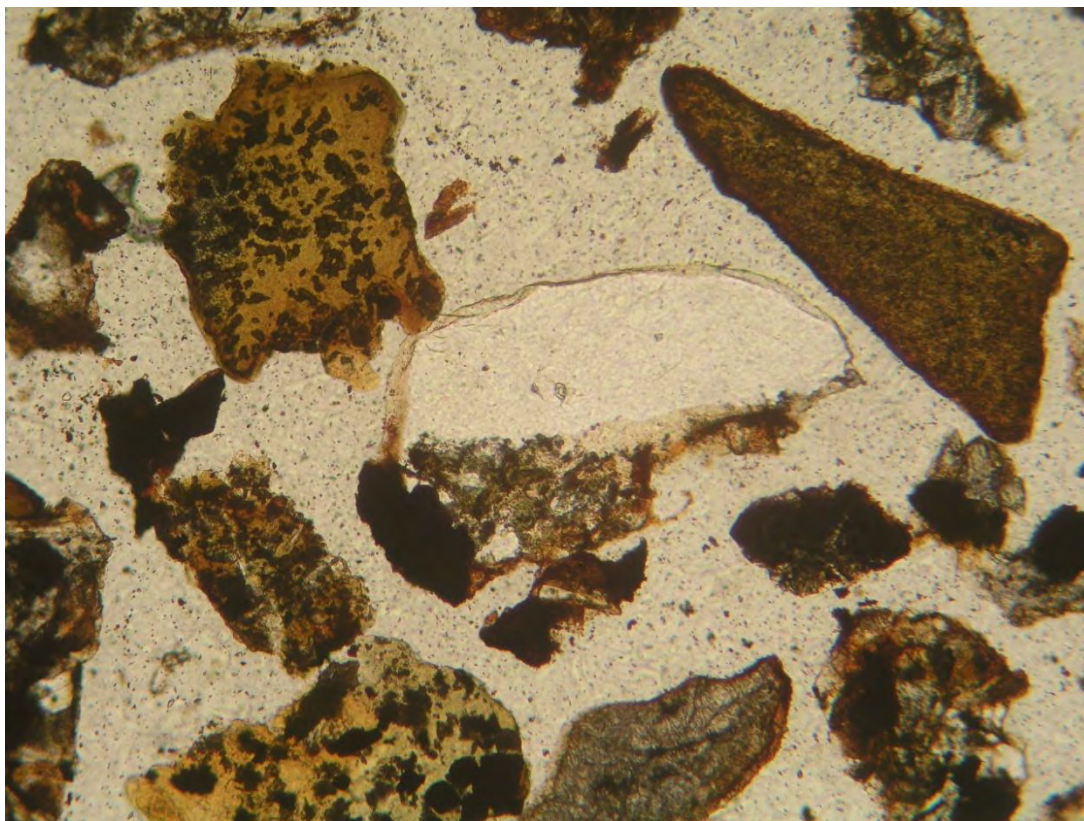
- **Hraunlagasyrpa X (H10), ca. 810-940 m dýpi (raundýpi: 710-798 m):** Líklega dílalaus ólivín-þóleít hraun. Þunnarneið í 834 m sýnir minna af hlutkristölluðu bergi

hér en í 790 og 800 m og er því talið að hér sé komið í hraunlög. Svoltil oxun sést. Bergið er ólivín þóleiit og virðist dílalaust. Plagióklas er þó áberandi í stærri brotum og einnig er nokkuð um ummyndað ólivín. Pýroxen er einnig áberandi sem kristallabrot. Nokkuð af gleri sést alltaf og erfitt að segja hvort um bólstraberg eða hraunlög er að ræða. Í svarfgreiningu er bergið talið dyngjusyrpa en þó eru lítil merki um karga. Litlu neðar, í 902 m, sýnir þunn sneið nokkuð oxað, fin- til meðalkorna ólivín-þóleiit. Svolítið sést af pýroxeni og plagióklas (stærri brot) og gler sést einnig annað slag.

Hraunlög á svipuðu dýpi í HN-7 virðast nokkuð jafnkorna en þau eru engu að síður nokkuð ólivínrik. Bergið þar er dílalaust. Svo virðist sem neðst í þessari myndun geti verið þóleittlegra berg og passar það einnig við neðsta hluta hraunlagasýrpunnar í HN-7.

Þunn sneið á 932 m dýpi sýnir að mestur hluti sýnisins er finkristallað, jafnkorna og þétt með miklu af euhedral málmsteindum. Ekkert ólivín sést í grunnmassa bergsins. Blandað þessu er grófkornóttara ólivín-þóleiit sem gæti þá verið berg að ofan. Mjög lítið er af hreinu gleri og hlutkristölluðu. Eitthvað er af „opaque“ kornum sem eru líkt og þökkuð með litlum málmsteindum. Þessi korn eru yfirleitt oxuð og gefa tilefni til þess að vera túlkuð sem kontakt-ummyndun en nifteindamælingar benda reyndar ekki til þess að innskot sé á þessu svæði, en það gæti verið aðeins fyrir neðan í u.þ.b. 950 m (mynd 15). Jarðlagamælingar sýna hækkuð í nifteindum í u.þ.b. 950 m og einnig sést hækkuð í gammamælingum sem gætu gefið til kynna þróaðra berg en ólivín-þóleiit.

- **Móbergsmýndun X (M10), 934-1234 m dýpi (raundýpi 798-987 m):** Í 970 m verða greinileg skil í svarfinu þar sem ummyndað túff kemur inn en fyrir ofan það virðist sem um glerjað ólivín þóleiit sé að ræða. Hér er því um að ræða dílalaus ólivín-þóleiit móbergsmýndun. Þunn sneið á 976 m dýpi sýnir mjög skærgrænt, svolítið blöðrótt basalttúff, blandað miklu af útfellingum. Í bland er einnig mjög oxað, dulkorna berg sem líkist þóleiiti og gæti þar verið á ferðinni innskot (sést í nifteinda- og gammamælingu á mynd 15). Þunn sneið í 1026 m sýnir skærgrænt basaltgler, nokkuð blöðrótt og hluti þess er mjög oxaður. Eitthvað er af hlutkristölluðum og finkristölluðum bergbrotum. Í 1038 m er bergið svipað og í 1026 en meira er af hreinu gleri (túff). Vel grænt gler og nokkuð blöðrótt. Svolítið er af hlutkristölluðum dökkum kornum og stakir plagióklas listar eru sjáanlegir. Í 1082 m er brúnt basaltgler, fremur blöðrótt og eitthvað er um staka plagióklas lista og í 1098 m er ljósbrúngrænt gler, nokkuð blöðrótt og einnig með stöku plagióklas listum. Þunn sneið á 1166 m sýnir túff, samlið og nokkuð blöðrótt glerkorn. Plagióklas listar eru þar svolítið algengari en áður. Einhverrar oxunar verður vart og nokkuð er af kristölluðu ólivín þóleiiti inn á milli. Þunn sneið í 1200 m sýnir ummyndað gler og eitthvað hlutkristallað berg inn á milli (mynd 11). Breksía sem virðist svolítið oxuð en málmflís um borðum er þar að einhverju leyti um að kenna. Þunn sneið í 1232 m er blanda af gleri, hlutkristölluðu basalti og vel kristölluðu ólivín þóleiiti, líklega breksía. Glerið er með stöku plagióklas listum ásamt pýroxeni og e.t.v. ummynduðu ólivíni. Ekki er loka fyrir það skotið að kristallaði hluti bergsins geti verið innskot.



Mynd 11. Ummyndað gler og kristallað gler á 1200 m dýpi í HN-5. Hvíta steindin fyrir miðju myndar er wairakít. Breidd myndar er 1,25 mm.

- Hraunlagasyrpa XI (H11), 1234-1270 m dýpi (raundýpi 987-1008 m):** Í þunnisneiðum virðist vera um nokkuð vel kristallað berg að ræða. Um er að ræða fín- til meðalkorna ólivín þóleiit sem virðist vera blöðrótt að einhverju leyti. Er það vísbending um að frekar sé um hraunlög að ræða heldur en innskot. Ekki er þó loku fyrir það skotið að innskot séu hér í grennd, stundum er mikil oxun en hún gæti einnig orsakast af oxun á járni úr bornum, en eitthvað er um slíkt á þessum slóðum. Í 1238 m er ekki mikið af hreinu gleri. Stór hluti virðist vera vel kristallað berg, ólivín-þóleiit, sem er ekki mjög ummyndað. Lítið er af útfellingum. Í 1254 m virðist um alkristallað berg að ræða en erfitt er að segja til um hvort um hraunlag eða innskot sé að ræða en niffeindamæling virðist þó ekki benda til þess að hér sé innskot (mynd 16). Bergið hér virðist að auki mjög líkt því sem er í 1238 m. Í 1270 m er einnig fín- til meðalkorna ólivín þóleiit sem er svolítið blöðrótt. Lítið af gleri. Þar sem bergið er blöðrótt eru e.t.v. meiri líkur á að hér sé um hraunlag að ræða frekar en innskot. Niffeindamæling sýnir nokkra hækkun á þessu dýpi (1234-1310 m) og passar það við að þéttara berg sé á þessu svæði (mynd 16). Efri mörk þessa kafla í mælingunni passar við innkomu hraunlaganna en ekki verður útskýrt hvers vegna hærri gildi mælast í niffeindum allt niður á 1310 m.
- Móbergsmýndun XII (M12), 1270-1344 m dýpi (raundýpi 1008-1053 m):** Dílalaust ólivín-þóleiit móberg, aðallega breksía og túff þó svolítið komi inn af glerjuðu basalti á u.þ.b. 1316 m dýpi. Í 1300 m sýnir þunnisneið túff, fínkorna og stakblöðrótt, dílalaust. Í 1352 m er oxað túff en oxunin gæti verið tilkomin vegna agna frá bornum en algengt er að sjá slíkt í svarfi holunnar. Glerið er blandað svolitlu af hlutkristölluðu

bergi. Það litla sem sést af hlutkristölluðu bergi virðist vera með ólivín-þóleiit kristöllum.

- **Móbergsmýndun XIII (M13), 1344-1640 m dýpi (raundýpi 1053-1244 m):** Hér er um jafnkorna og smákorna móbergsmýndun sem líklega er þóleiit. Í 1382 m er mun meira af hlutkristölluðu basalti en í 1352 m en einnig sést hreint gler. Líklega er þarna um breksíu að ræða. Kristallaði hluti bergsins er mjög finkorna og jafnkorna og líklega er hér þóleiit. Í 1430 m er einnig um smákristallað og jafnkorna basalt að ræða, breksíu. Stöku plagióklas listar sjást inn á milli en þeir eru litlir. 1446 m þunnsneiðin sýnir jafnkorna breksíu eða bólstraberg. Bergið er dílalaust en einstaka plagióklas listi er sjáanlegur. Sama er uppi á teningunum í 1500 og 1530 m þar sem meirihluti sýnisins er jafnkorna, svolítið glerjað og jafnkorna basalt, líklega þóleiit. Einstaka plagióklas listar sjást. Í 1540 m er jafnkorna breksía þar sem meira gler er til staðar. Plagióklas listar sjást annað slagið. Í 1574 m er áfram jafnkorna og finkorna basaltbreksía og það sama á við um 1592 m. Stöku plagióklas listar sjást alltaf. Í svarfgreiningu eru greind setkorn hér neðst í mynduninni í bland við breksíuna.
- **Móbergsmýndun XV (M15), 1640-1838 m dýpi (raundýpi 1244-1382 m):** Ólivín þóleiit móbergsmýndun er á þessu dýptarbili. Mikið til breksía og túff og svolítið ber á innskotum annað slagið. Í þunnsneið á 1650 m dýpi er eitthvað af jafnkorna basalti (jarðlögum er hnikað upp á við um u.þ.b. 10 m á þessu dýpi og því er þessi sneið líklegast rétt fyrir neðan jarðlagaskilin) en það örlar þó á ójafnkorna basalti. Hlutkristöllunin er grófari en áður og því er talið að hér sé komið í ólivín þóleiit móberg. Meirihluti bergsins er túff. Svarf er hér afar fínt og því er í raun erfitt að segja til um hvort dílar séu í berginu.

Innskot greinist í þunnsneið á 1680 m dýpi og það passar við svolittinn topp í nifteindamælingu í kringum 1670 m dýpi (mynd 17). Er þar um að ræða finkorna og jafnkorna basalt sem líklega er þóleiit. Bergið er þétt og fremur fersklegt að hluta en einnig er blandað berginu ummyndað jafnkorna basalt (málmurinn er alveg ummyndaður yfir í sphere í þeim kornum). E.t.v. er þetta ummyndaðri hluti sama innskots. Litlir plagióklas listar eru greinilegir í berginu. E.t.v. er hér um að ræða aðfærsluæð þóleiits móbergsins fyrir ofan. Blandað innskotinu er einnig greinilegt ólivín-þóleiit, ummyndað og fin- til meðalkorna. Er þar líklegast um grannbergið að ræða. Örfáir ummyndaðir ólivín-kristallar sjást (mjög fáir) sem gætu mögulega verið dílar. Þunnsneið í 1702 sýnir ólivín þóleiit blöndu af gleri, hlutkristölluðu og finkristölluðu – bólstrabergi. Hlutkristallaða bergið virðist vera fremur gróft, í takti við það alkristallaða. Í 1798 m er ólivín þóleiit breksía með töluverðu af gleri. Grófkornóttasta bergið er lítið ummyndað miðað við hitt og gæti verið frá innskoti komið. Í því er áberandi pýroxen sem er nánast alveg ferskt.

Í svarfgreiningu er talið er að hér neðst séu ólivín þóleiit hraun. Í þunnsneið í 1844 m (óleiðrétt) er erfitt að meta hvort um er að ræða hraunlag eða bólstraberg. Þar er um að ræða nokkuð af gleri og hlutkristölluðu ólivín þóleiiti og því er talið líklegra að hér sé bólstraberg. Einnig eru vel kristölluð korn inn á milli. Í svarfgreiningu eru greind ólivín þóleiit hraunlög á þessu dýpi en nokkuð vantar af svarfi hér á þessu dýpi.

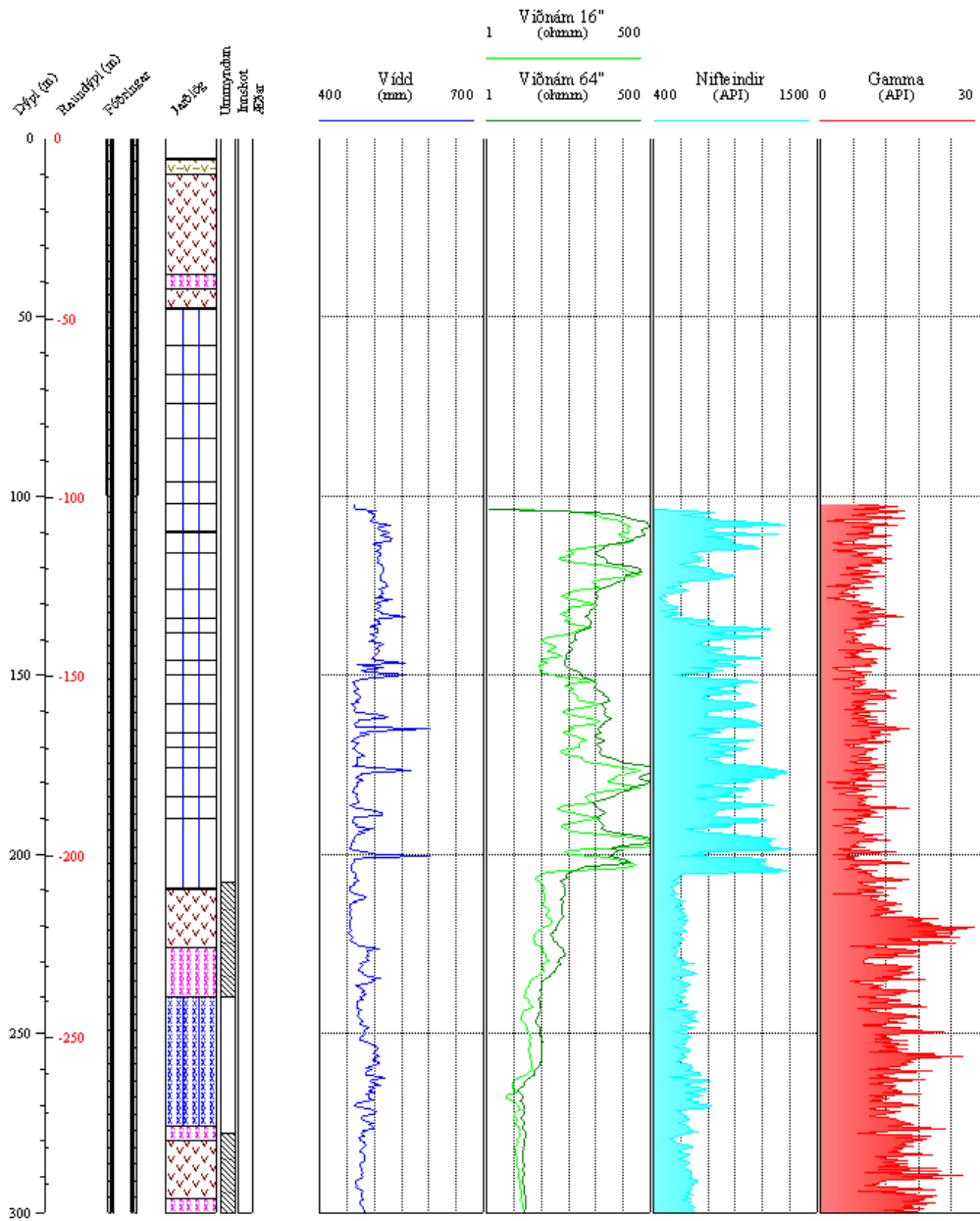
- **Gráuhnúka-móbergsmýndun V (G-M5), 1838-2076 m dýpi (raundýpi 1382-1564 m):** Móbergsmýndunin sem borað er í hér er ólivín þóleiit og er mikið til breksía eða glerjað basalt. Svarf vantar töluvert neðan 1920 m dýpis. Í 1878 m er glerjað basalt, blanda af ljósbrúnu gleri, hlut- og fin- til meðalkristölluðum kornum. Glerhluti er eins og lítil glerkorn hafa troðist inn í holými og límst saman þar og er túffið svolítið blöðrótt. Í 1902 m er um að ræða meðalkorna nokkuð fersklegt ólivín þóleiit í bland við meira ummyndaða ólivín-þóleiit breksíu (grannberg). Svólítið er af kontaktumyndun þar sem sést mikið af smágerðum málmum og einhverrar oxunar verður vart. Glerhluti er nokkuð blöðróttur. Í 1974 m er ólivín þóleiit bólstraberg en töluvert er af gleri (brúnu, rauðbrúnu og ljósbrúnu), lítið blöðróttu. Í 2014 m greinist ólivín þóleiit bólstrabreksía eða glerjað basalt.

Þunnarneið í 2028 m sýnir mjög fínkorna en allt upp í meðalkorna basalt sem líklega er ólivín þóleiit. Virðist nánast alkristallað en eitthvað sést þó af gleri. Ekki er ljóst hvort þetta er hraunlag, innskot eða bólstraberg. Einhver kontakt ummyndun er sjáanleg sem og nokkuð ferskir plagióklas og pýroxen kristallar og því ekki ólíklegt að innskotsslæðingur sé til staðar. Mögulegt að um innskotsdreif í bólstrabergi sé að ræða. Þunnarneið í 2058 m sýnir einnig nokkuð vel kristallað basalt (fin- til meðalkorna) sem líklega er ólivín þóleiit. Eitthvað er af gleri en það er ekki mikið. Erfitt er að segja til um hvort hér sé hraunlag eða bólstraberg en þó er talið líklegra að um hið síðarnefnda sé að ræða þar sem einhver korn virðast hlutkristölluð. Þónokkur oxun sést annað slagið. Ekki er þó lokað fyrir það skotið að hér neðst geti verið hraunlög. Spurning er þá hvort að um svokallaðan „botn“ Hellisheiðarmýndunar sé að ræða (t.d. Hjalti Franzson et al., 2005; Helga Margrét Helgadóttir et al., 2010 (grein í viðauka VI)).

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 0-300 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhliuti: Öll holan

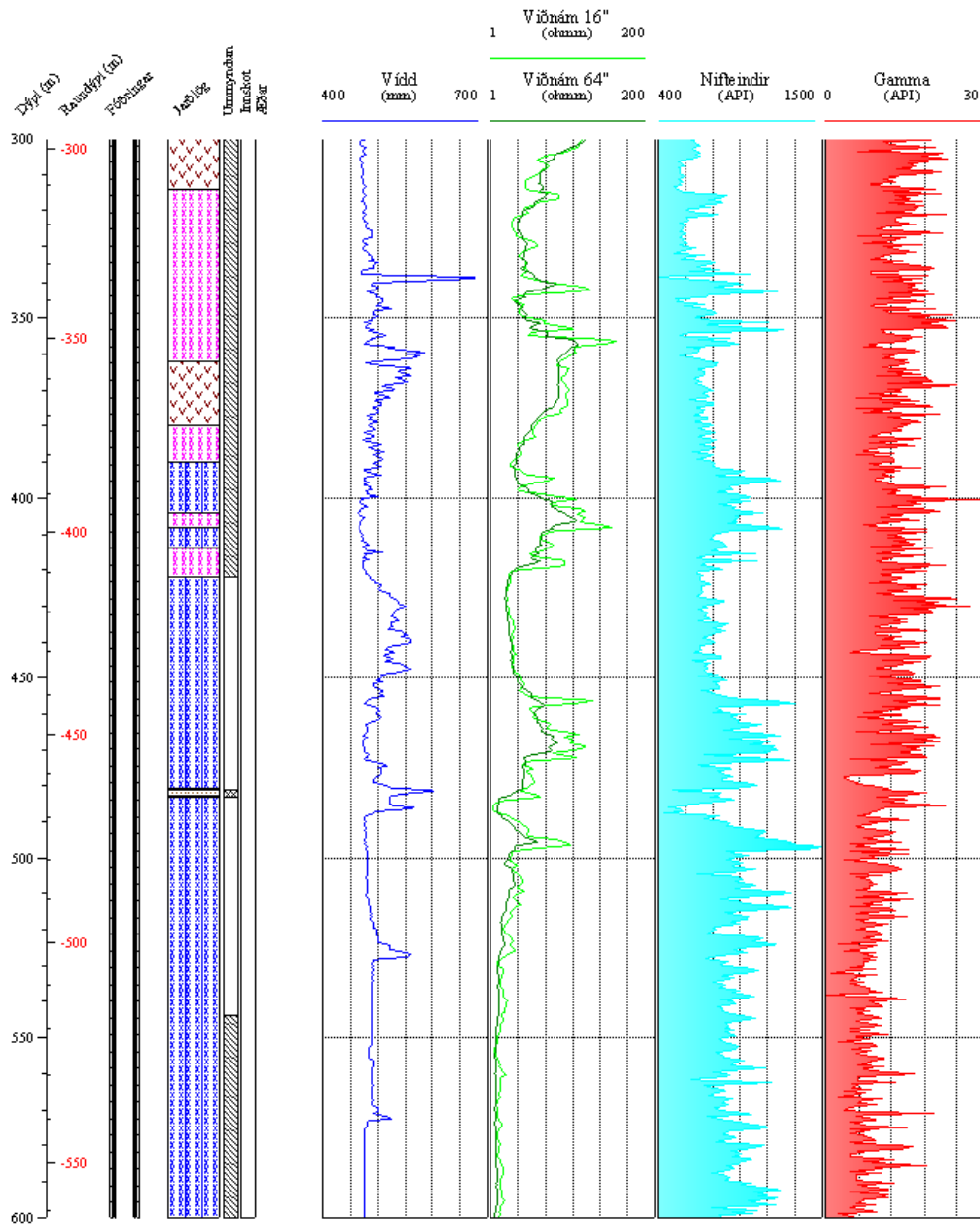
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM,BSH


Mynd 12. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 0-300 m dýpi í HN-5.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 300-600 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhliuti: Öll holan

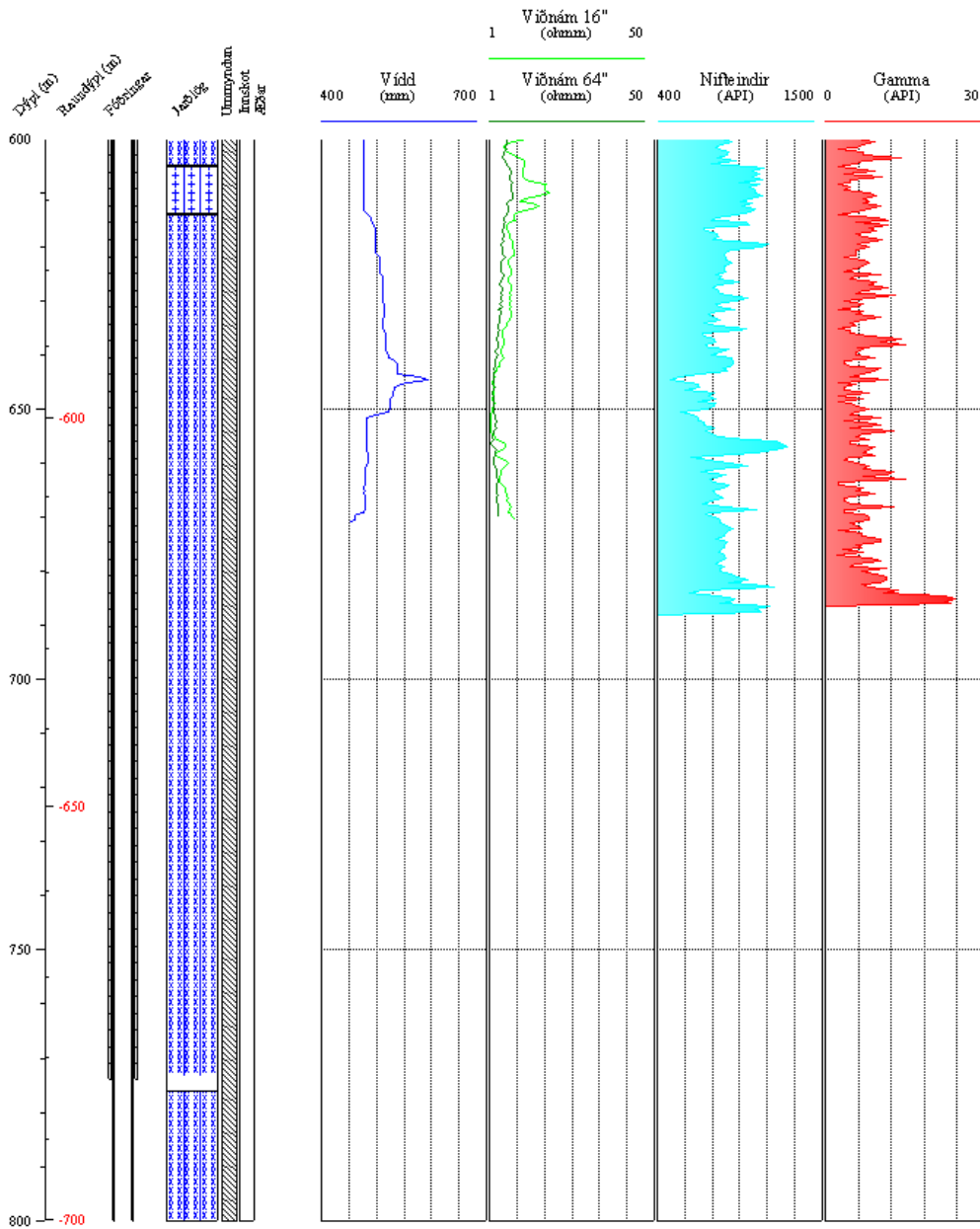
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMH


Mynd 13. Jarðlagasnið og jarðlagamælingar á 300-600 m dýpi í HN-5.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 600-800 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhliuti: Öll holan

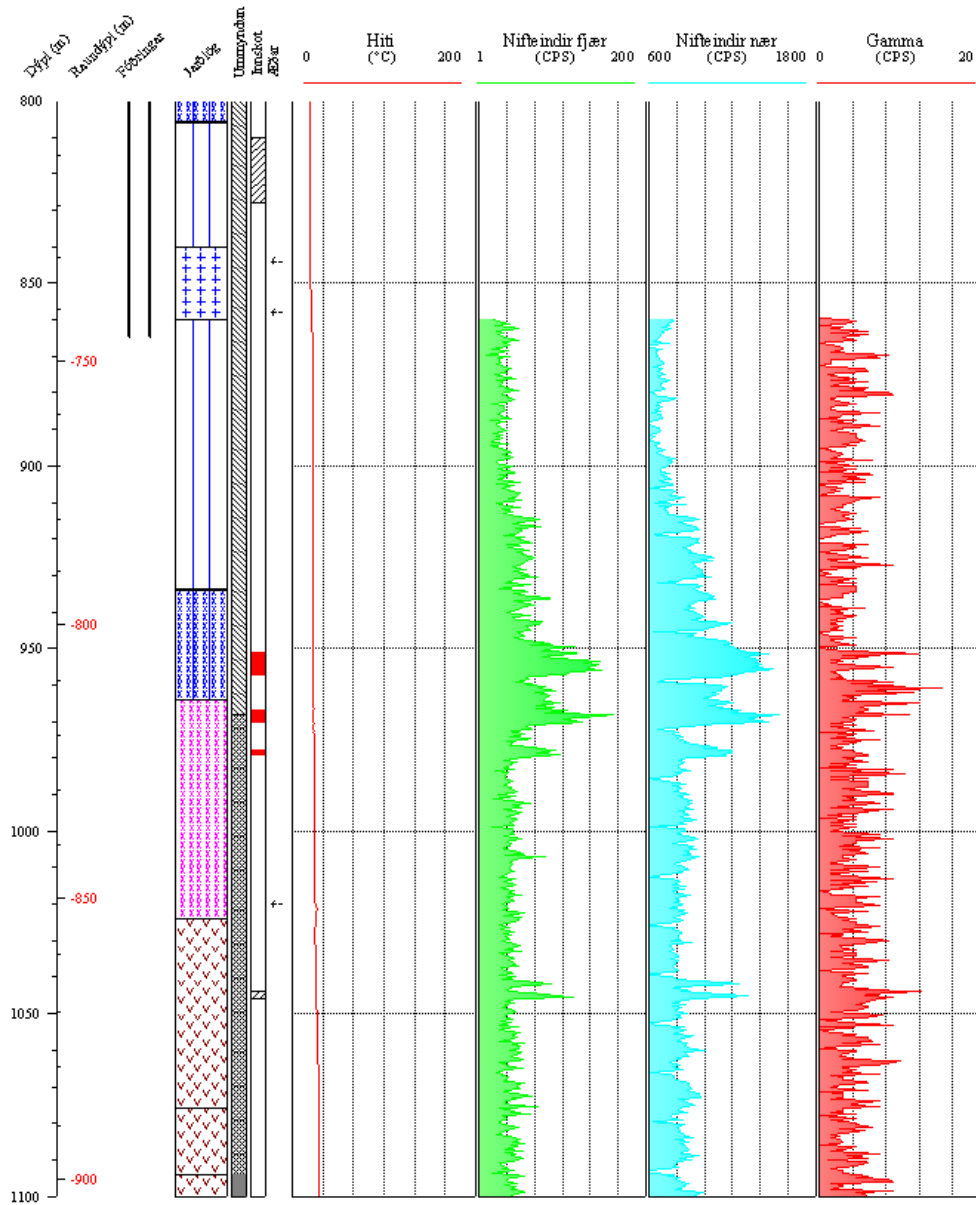
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 14. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 600-800 m dýpi í HN-5.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 800-1100 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhúti: Öll holan

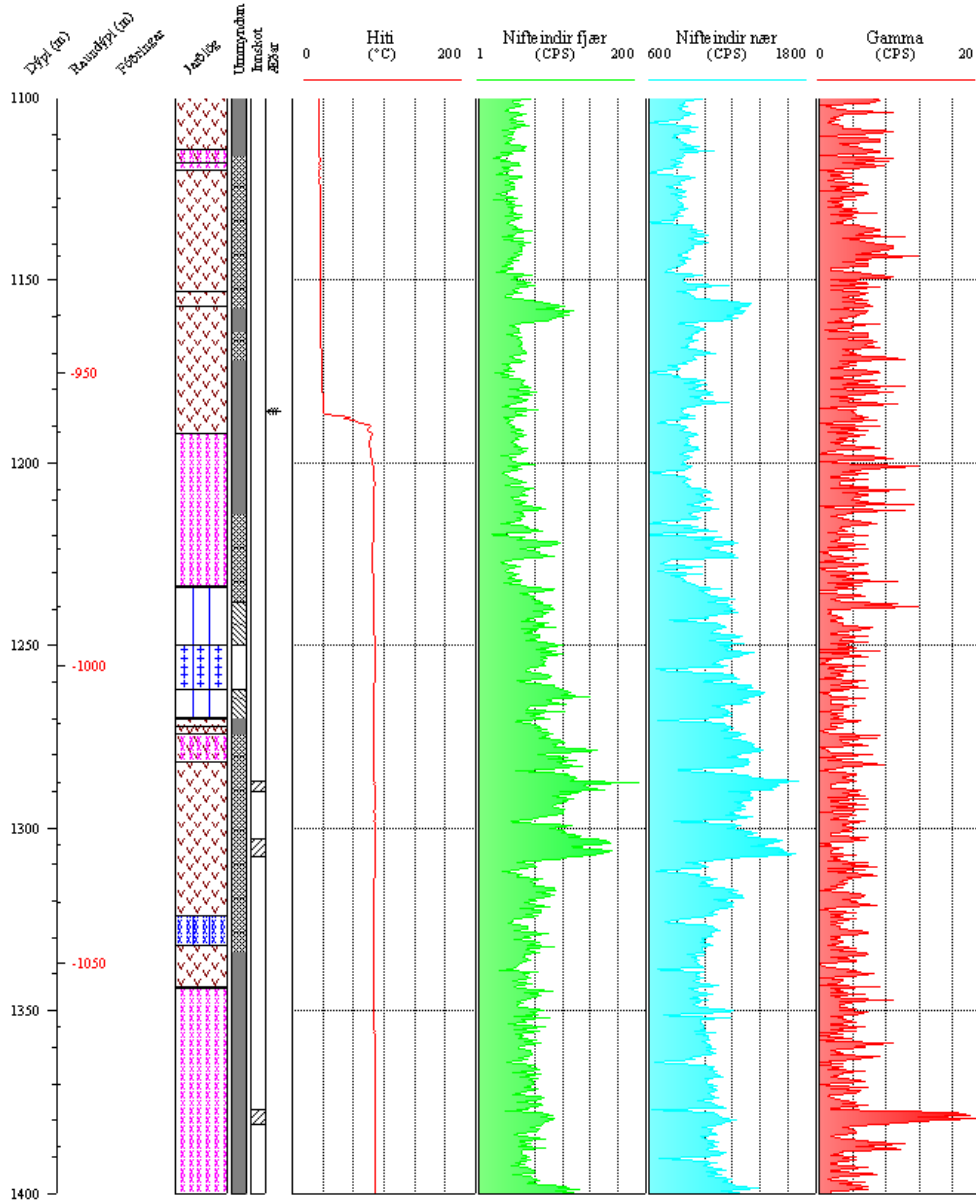
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 15. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 800-1100 m dýpi í HN-5. Ekki voru gerðar mælingar á viðnámi og vídd neðan 700 m.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Dýptarbil: 1100-1400 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlutí: Öll holan

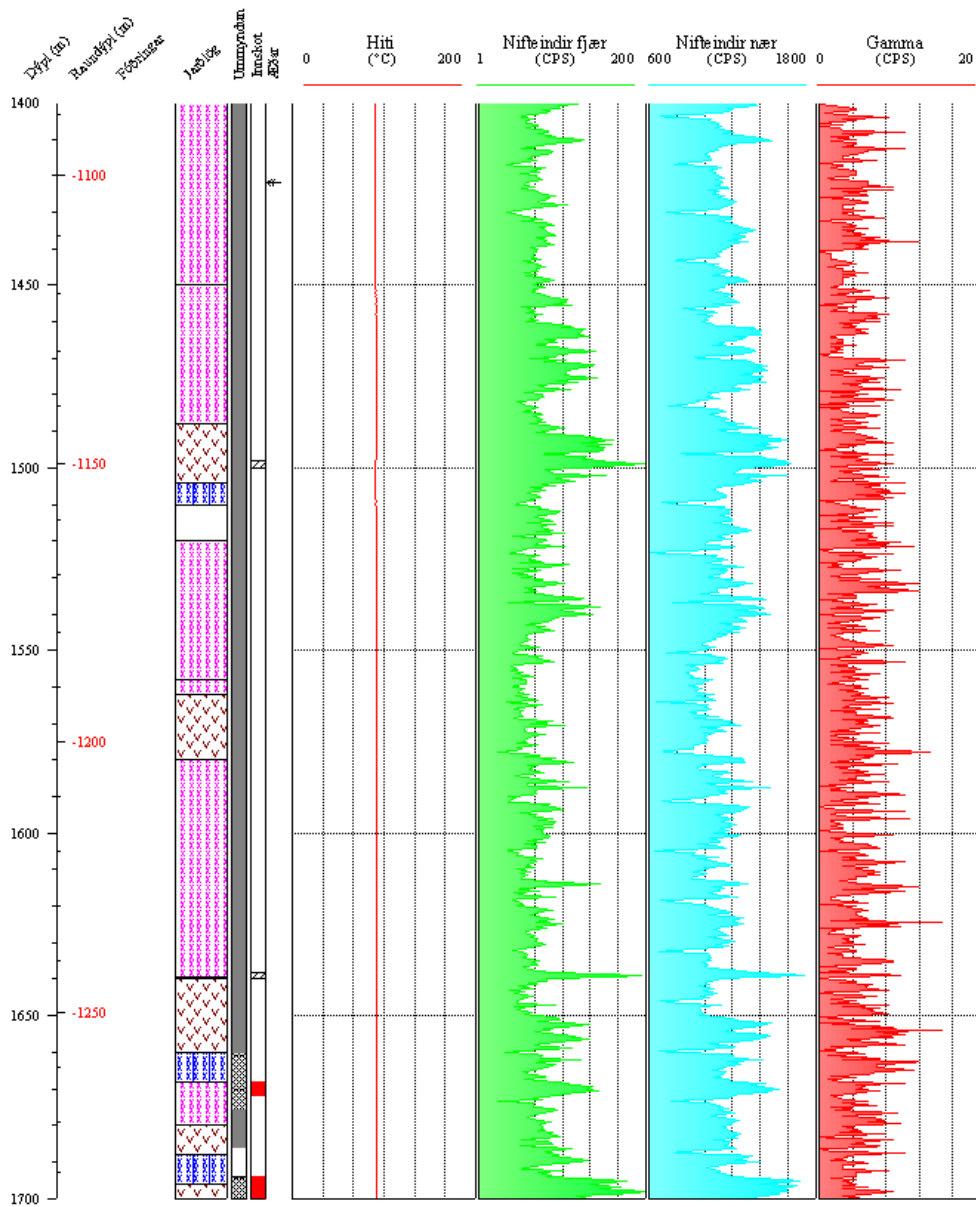
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 16. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1100-1400 m dýpi í HN-5.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Dýptarbíl: 1400-1700 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlutí: Öll holan

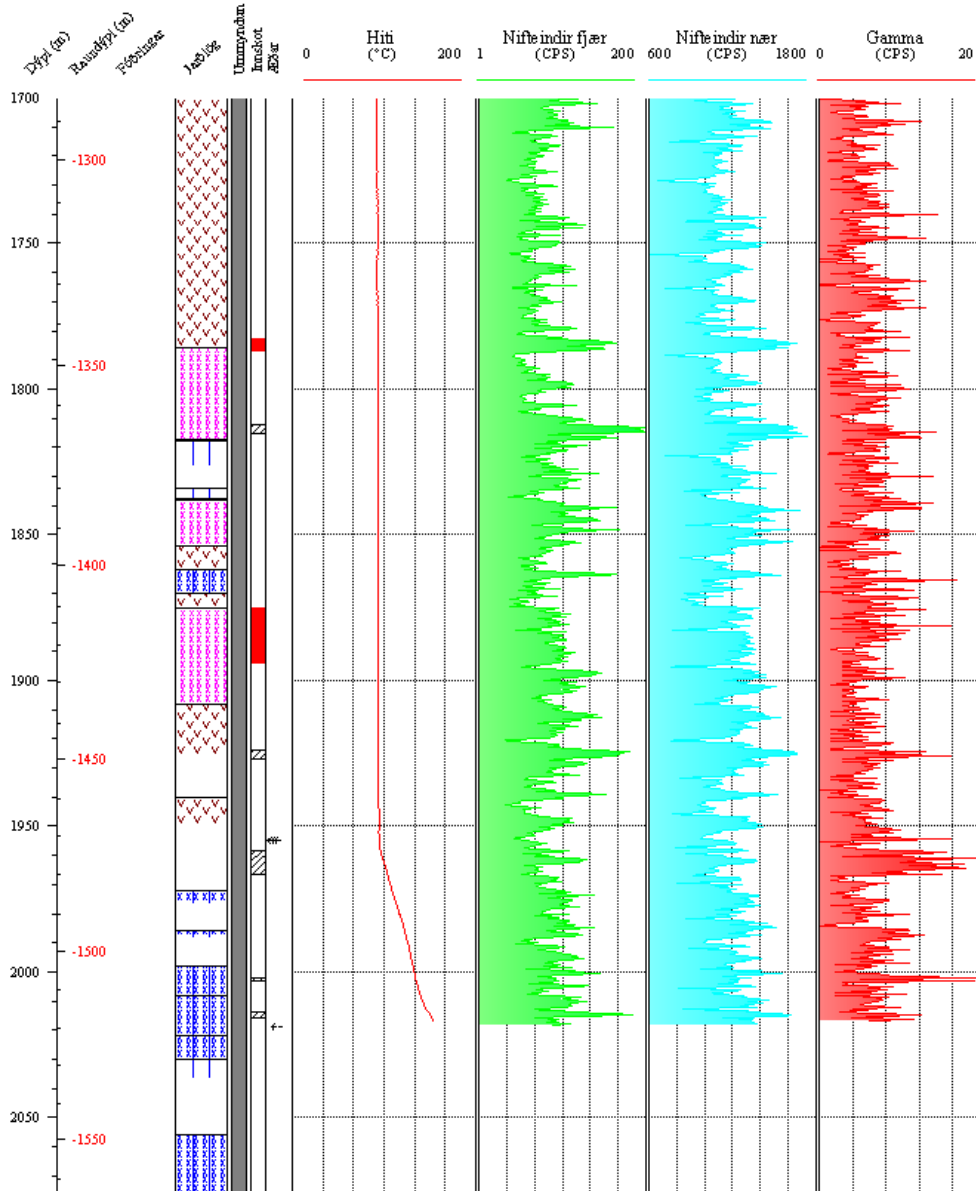
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 17. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1400-1700 m dýpi í HN-5.

Staður: Hellisheiði
 Holunagn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 1700-2076 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhlufti: Öll holan

 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 18. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1700-2076 m dýpi í HN-5.

3.1.4 Innskot í holu HN-5

Í töflu 2 má sjá yfirlit um innskot sem greindust í HN-5. Þau eru mun færri en í holu HN-2 og ákvarðast það að einhverju leyti af því að holan var stefnuboruð. Þegar stefnuborað er í gegnum jarðlögin er hætta á að þunn innskot komi ekki fram í svarfinu og verður þá að treysta meira á jarðlagamælingar og borgögn. Jarðlagamælingar vantar að hluta í holunni og einnig vantar alveg borgögn.

Hækkun í nifteindum er á 1157-1161 m dýpi (mynd 16) og þar er möguleiki að innskot finnist. Í svarfgreiningu virðist sem innskotsslæðingur finnist á 1164-1166 m dýpi en aðallega er það þó aðeins ofar (1146-1154 m), sem passar þá ekki við dýpið á nifteindahækkuninni (mynd 16). Þunnsneið á 1166 m dýpi sýnir blöndun með kristölluðu bergi og svolítill oxun sést einnig.

Nokkuð erfitt er að greina hvar innskot eru í holunni og í svarfgreiningu er mjög algengt að sjá ýjað að innskotum eða nálægð við þau, sérstaklega neðan 1000 m. Sú stefna var því tekin að leggja mesta áherslu á jarðlagamælingar sem eru þó svolítið gloppóttar í þessari holu. Nokkuð algengt er að sjá mikla oxun í svarfboxunum en oft er það mjög villandi, sérstaklega þegar neðar dregur, þar sem hún virðist oft vera seinni tíma atburður, jafnvel oxun á járnrusli úr bornum sem hefur náð að líma kornin saman í klessur. Sú afstaða var tekin að setja möguleg innskot þar sem mælingar gefa tilefni til þó að vísbendingar séu e.t.v. ekki í svarfinu sjálfu eða þunnsneiðum.

HN-5 er skáboruð hola, með upp undir 50° halla. Þessi mikli halli gerir það að verkum að merki um innskot geta orðið mjög lítil, sérstaklega þegar um þynnri innskot er að ræða þar sem stuttan tíma tekur að bora í gegnum þau, einkum ef borhraði er mikill. Þeim mun mikilvægari verða jarðlagamælingar í greiningu innskota en einnig er hægt að skima eftir öðrum einkennum innskota en fersku þéttu bergi, eins og oxun og kontakt ummyndun sem lýsir sér í nokkuð miklum, smágerðum magnetítútfeillingum.

Samtals greinast því 17 innskot í holu HN-5 en þau innskot sem talin eru samkynja eru lituð með sama lit í töflu 2.

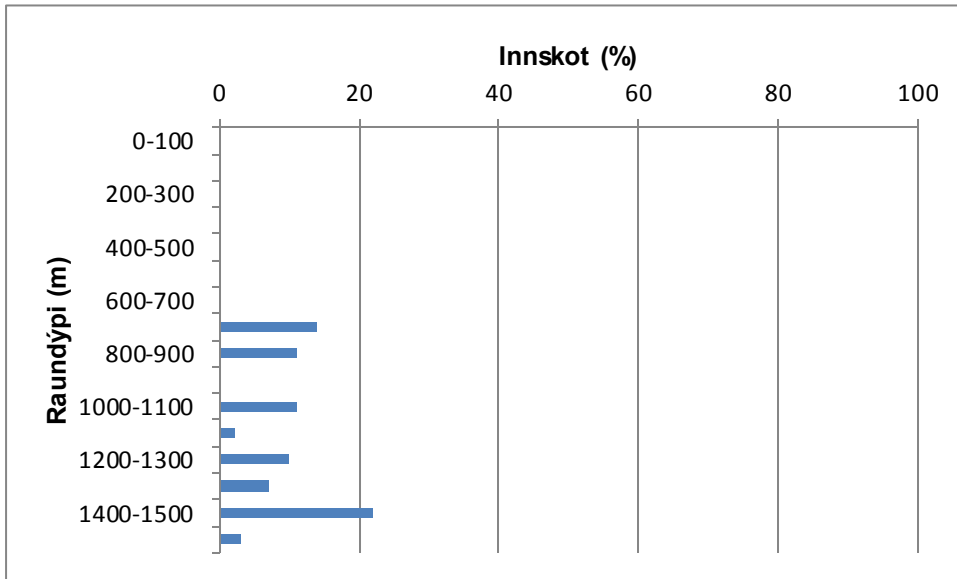
Innskotabéttleika í holu HN-5 má sjá á mynd 19. Þar sést að innskot ná aldrei meira en 22% af jarðlagastaflanum. Ekki er loku fyrir það skotið að innskot geti verið fleiri eða umfangsmeiri enda gætti svolíttillar íhaldssemi við ákvörðun þeirra. Innskot byrja fyrst að sjást á milli 700 og 900 m raundýpis og er þar líklega verið að bora í gegnum vesturjaðar sprungusveims Hengilsins.

Tafla 2. Yfirlit um innskot í holu HN-5. Jarðlagamælingar og jarðlög sem vitnað er í má sjá á myndum 12-18.

Dýpi (m)	Raundýpi (m)	Tegund	Svarfgreining	Punnsneið	Mælingar
810-828	706-720	Mögulegt innskot	Mikillar oxunar verður vart á dýptarbili 814-832 m og einnig mikið af málmoxíðum sem benda til kontaktummyndunar.	Engin þunnsneið er til af þessu dýpi	Engar mælingar eru til af þessu dýpi.
951-957	805-810	Mögulegt innskot, póleiift	Ekki er minnst á mögulegt innskot í svarfgreiningu og á þessum slóðum er greind bólstrabreksía eða túff. Oxun kemur einkum fram í kringum innskotin tvö sem eru hér næst fyrir neðan en hennar verður ekki mikið vart í kringum þetta innskot.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Sést í nifteindamælingu. Einnig sést smá hækkun í gamma sem styður það að hér sé aðeins þróaðra berg en ólivín-póleiift á ferðinni.
967-970	815-818	póleiift	Mjög oxuð og ummynduð túffrík breksía.	Í þunnsneið á 976 m dýpi er blandað túff og svo oxað, dul korna berg sem líkist póleiifti. Þetta berg gæti hugsanlega verið innskotsslæðingur.	Greinilegur toppur í nifteindamælingu og einnig sést svolítið hækkun í gamma.
978-979	822-823	Mögulegt innskot, óþekkt	Mjög oxuð og ummynduð breksía. Engin sérstök merki um innskot fyrir utan oxun bergsins.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Hér er aðeins minni toppur í nifteindamælingu en í innskotunum fyrir ofan en enginn toppur er hér í gammamælingu.
1044-1046	867-869	Mögulegt innskot, óþekkt	Á þessu dýpi greinist basalttúff, ummyndað og minna oxað en bergið sem er fyrir ofan. Ekki er talið að innskot sé nálægt fyrir en u.þ.b. 20 m neðar.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Nokkuð áberandi, tvöfaldir toppur í nifteindamælingu sem virðist vera eina vísbendingin um innskot á þessu dýpi.
1287-1290	1019-1022	Mögulegt innskot, líklega ólivín póleiift	Svarfið er á þessu dýpi að mestu ljósgrænt og hvítt túff en það er blandað fersklegu, fín- til meðalkorna basalti, líklega ólivín-póleiifti. Oxun er nokkuð áberandi allt frá 1278 og niður í 1334 m.	Þunnsneið á 1300 m dýpi (óleiðrétt) sýnir aðallega gler sem er svolítið oxað en ekki er mikið um kristallað berg.	Nokkuð áberandi hækkun í nifteindamælingu.
1303-1308	1030-1034	Mögulegt innskot, líklega ólivín póleiift	Svarfið er á þessu dýpi að mestu ljósgrænt og hvítt túff en það er blandað fersklegu, fín- til meðalkorna basalti, líklega ólivín-póleiifti. Oxun er nokkuð áberandi allt frá 1278 og niður í 1334 m.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Nokkuð áberandi hækkun í nifteindamælingu.
1377-1381	1074-1078	Mögulegt innskot, gæti verið e-ð þróað	Í svarfgreiningu sést hvítt og ljósgrænt túff og svolítið af hlutkristölluðu og fínkristölluðu bergi.	Þunnsneið af 1382 m (óleiðrétt dýpi) er líklega nokkru ofar en þetta dýpi. Þar sést svolítið af kristallabrotum (plag og px) en alls óvíst hvort þar sé um innskot að ræða.	Hækkun er hér í gamma en ekki er auðvelt að túlka þá hækkun þar sem taíningin er í CPS (counts per second). API gildi er því ekki þekkt og þessi toppur því bara afsæður.

1498-1500	1150-1152	Mögulegt innskot, óþekkt	Á þessu dýpi verður varð við oxun og svolítið meira af fínkorna, kristölluðu basalti í svarfinu. Svólítið er um sprungufyllingar þarna og einnig sést korn með greinilegu hniki (slickenside).	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Áberandi hækkun í nifteindum á 1498-1500 m dýpi
1638-1640	1242-1244	Mögulegt innskot, óþekkt	Í 1652 m er ljóst túff og er það nokkuð sprungið. Strax fyrir neðan er talið að gangur sé í grennd og að bergið sé nokkuð sprungið.	Þunnsneið er í 1650 m en þar sést blanda af gleri og hlutkristölluðu basalti. Engin sérstök merki eru um innskot enda gæti þetta verið aðeins fyrir ofan.	Mjög greinileg hækkun í nifteindum á þessu dýpi.
1668-1672	1262-1265	Þóleiift	Í svargreiningu er talið að fersklegt innskot sé á 1674-1686 m dýpi og að hugsanlega sé um þóleiift að ræða.	Þunnsneið á 1680 m bendir til þess að hér sé þóleiift innskot.	Nokkuð greinileg hækkun er á þessu dýpi í nifteindamælingu.
1694-1700	1281-1286	Þóleiift	Svargreining sýnir sama innskot og áður á 1696-1700 m dýpi.	Í þunnsneið á 1702 m sést glitta í fín- og jafnkorna, þétt þóleiift. Líklega það sama og á ca. 1668-1672 m dýpi.	Sést í nifteindamælingu.
1783-1787	1343-1347	Ólivín þóleiift	Innskot virðist vera í grennd en annars er túff og breksía.	Á 1798 m sést ummynduð breksía ásamt grófkornóttara basalti sem er minna ummyndað. Líklega ólivín-þóleiift.	Nokkuð áberandi toppur er í nifteindamælingu á þessu dýpi.
1812-1815	1364-1367	Mögulegt innskot, óþekkt	Bólstrabreksía, jafnvel innskot í grennd.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Nokkuð áberandi toppur er í nifteindamælingu.
1875-1894	1410-1424	Ólivín-þóleiift	Í svarfinu er greint ummyndað og meðalgróft ólivín-þóleiift á þessu dýpi. Talið er að um innskot sé að ræða.	Í þunnsneið á 1902 m (óleiðrétt dýpi) sést meðalkorna og nokkuð fersklegt ólivín-þóleiift. Einnig verður varð við svolitla oxun og vott af kontakt-ummyndun	Ekki áberandi í nifteindamælingu en þó virðist vera einhver massía 1875-1894 m sem virðist nokkuð jafn. Þetta er þó ekki áberandi toppur en er aðeins jafnara en í kring.
1924-1927	1448-1450	Mögulegt innskot, óþekkt	Svarf vantar á þessu dýpi en möguleiki að hér sé túff.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Nokkuð áferandi toppur er í nifteindamælingum á þessu dýpi.
1958-1966	1474-1480	Mögulegt innskot, gæti verið þróað	Svarf vantar hér en þó gæti mögulega verið bólstramyndun, nánast ekkert kalsít er til staðar.	Þunnsneið á 1974 m dýpi (óleiðrétt) sýnir ólivín-þóleiift bólstraberg en mögulegt er að dreif af innskoti sjáist (einhver oxun er til staðar sem og svolítið ferskari stærri kristallabrot).	Toppur er í gammamælingu á þessu dýpi en erfitt er að túlka hversu þróað bergið er á þessum slóðum þar sem API gildi eru ekki þekkt (mælingin var gerð í CPS – counts per second).
2002-2003	1507-1508	Mögulegt innskot, gæti verið þróað	Ljóst túff en hér er aukíð magn oxaðra bergkorna.	Þunnsneið af 2014 m dýpi (óleiðrétt) sýnir svolitla oxun og einhver merki um kontaktumyndun á nokkrum kornum. Annars er hér glerjað ólivín-þóleiift.	Toppur er í gammamælingu á þessu dýpi en ekki er hægt að segja til um hvort um þróað berg sé að ræða þar sem mæling var mæld í CPS (counts per second). API gildi eru því ekki þekkt.

2014-2016	1516-1518	Mögulegt innskot, óþekkt	Svarf á þessu dýpi sýnir oxaðan salla, svolítið glerjað basalt.	Þunnsneið af 2028 m (óleiðrétt dýpi) sýnir nokkuð vel kristallað basalt, ólivín þóleiit sem virðist samt vera svolítið glerjað. Einnhver kontaktmyndun er sjáanleg og nokkuð ferskir plagióklas og pyroxen kristallar á stangli sem gætu e.t.v. verið úr innskoti.	Toppur sést í nifteindamælingum og lítil æð er nokkru neðar, á 2019 m.
-----------	-----------	--------------------------	---	--	--



Mynd 19. Innskotapéttleiki í holu HN-5.

3.1.5 Jarðlagamyndanir í holu HN-8

Hola HN-8 var boruð snemmsumars árið 2007 af jarðbornum Geysi og er staðsett á sama borteig og HN-5 rétt norðan við Gráuhnúka (mynd 1).

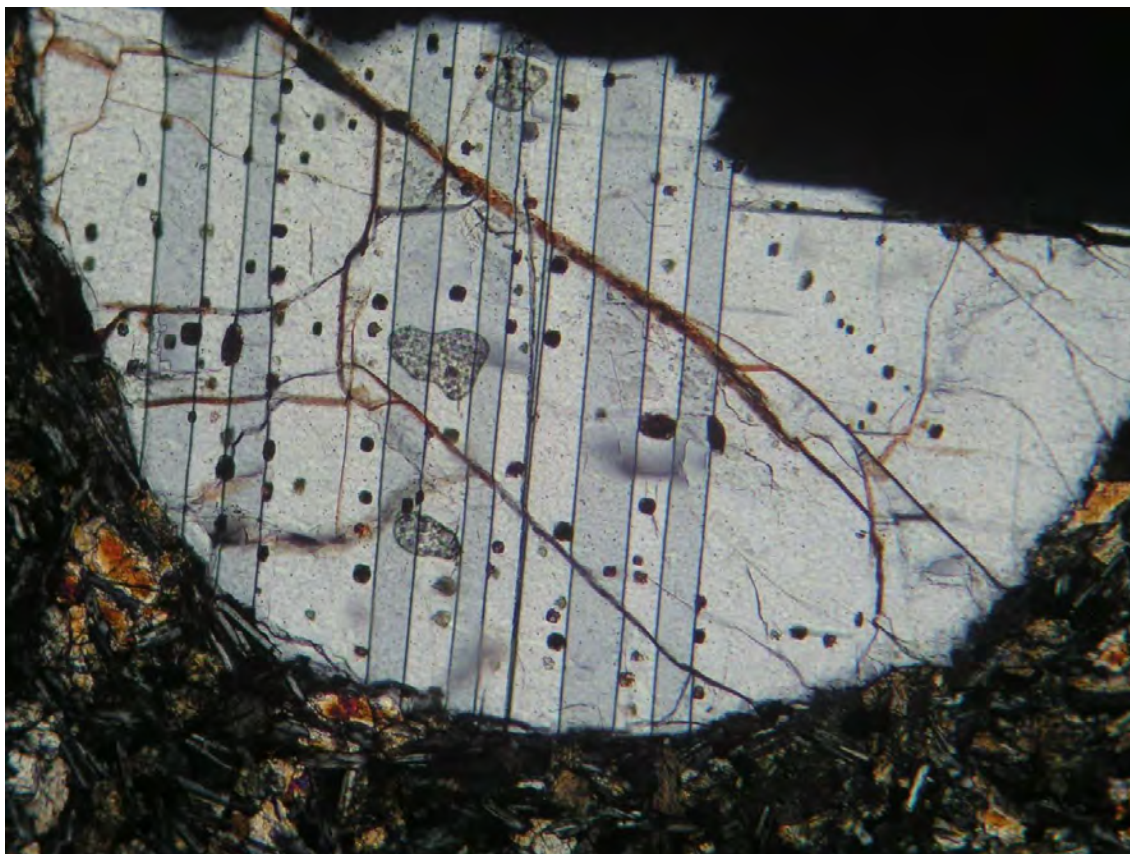
Jarðlagamyndanir ásamt jarðlagamælingum má sjá á myndum 21-28.

Samtals voru greindar 30 þunnsneiðar úr HN-8 og hefðu þær þurft að vera nokkuð fleiri til að fá betri mynd af jarðlögum holunnar, sérstaklega í neðri hluta hennar þar sem erfitt hefur reynst að skipta þeim jarðlögum upp í myndanir. Svarf í neðri hluta holunnar er mjög fingert og jók það einnig á erfiðleikana.

Jarðlagamyndunum holunnar er lýst hér fyrir neðan og er reynt að nefna myndanirnar nöfnum sem tengja þær við myndanir í HN-5 (dæmi: G-M1 er móbergsmýndun sem kemur fyrir í báðum holunum, HN-8 og HN-5). Eins og í HN-5 hefur dýpi jarðlaga verið leiðrétt og sjá má raundýpisgildi í sviga á eftir. Það breytist svo þegar neðar dregur enda stefna holunnar í nokkuð ólíkar áttir, HN-8 liggur í austur en HN-5 í suðaustur (mynd 1). Þar sem holunnar eru á sama borteig eru jarðlög nánast þau sömu ofan til í holunum. Þær myndanir sem ekki hafa G á undan heiti sínu eru taldar óskyldar þeim sem eru í HN-5.

- **Gráuhnúka-móbergsmýndun I (G-M1), 2-46 m dýpi (raundýpi 2-46 m):** Efst er fremur ummyndað túff en slangur er þó af fersku gleri. Nokkuð virðist vera af plagióklas kristöllum í svarfinu. Í miðju myndunarinnar er ólivín-þóleiit bólstrabreksía en túff tekur aftur við á 26 m dýpi. Fremur oxuð bólstrabreksía er svo hér neðst. Engin þunnsneið er til úr þessari myndun en miðað við HN-5 þá passar að hér sé plagióklas dílótt ólivín-þóleiit móbergsmýndun.
- **Gráuhnúka-hraunlagasyrpa I (G-H1), 46-110 m dýpi (raundýpi 46-110 m):** Engar þunnsneiðar eru til úr þessari syrpu en þar sem holan er á sama borteig og HN-5 má ætla að hér sé sama hraunlagasyrpa og finnst þar. Er hér um að ræða fin- til meðalkorna ólivín-þóleiit, nánast dílalaust, þó að stöku sinnum sjáist svolítið grófari plagióklas kristöllum.
- **Gráuhnúka-hraunlagasyrpa II (G-H2), 110-206 m dýpi (raundýpi 110-205 m):** Ólivín-þóleiit, fin- til meðalkorna og jafnvel stöku ólivín dílar. Neðst í þessari syrpu, á 220 m dýpi, er skv. þunnsneið um ólivín-þóleiit að ræða þar sem mjög áberandi ólivín er í sumum kornum en öðrum ekki. Lítið er af stórum plagióklas kristöllum. Þessi syrpa tengist hraunlögum í HN-5 enda á sama borteig. Svarf vantar hins vegar í þessari holu á 104-144 m dýpi og því eru syrpuskilin á 110 m dýpi einungis ákvörðuð út frá jarðlögum í HN-5.
- **Gráuhnúka-móbergsmýndun II (G-M2), 206-468 m dýpi (raundýpi 205-466 m):** Hér skiptast á túff, breksía og bólstrabergslög og virðist um dílalaust, ólivín-þóleiit móberg að ræða. Einhver merki eru um tilfærslu túffs hér efst, þar sem korn virðast stundum svolítið rúnnað. Þunnsneið á 220 m dýpi sýnir túff með stöku bergbrotum. Túff sem er eins og límt saman með örsmáum glerkornum. Uppundir 30% af berginu er hlutkristallað og finkristallað ólivín-þóleiit. Túffið virðist stundum svolítið rúnnað, óljóst er hvort það er vegna ummyndunar eða hvort það hafi færst eitthvað til. Þunnsneið á 380 m dýpi sýnir gler og hlutkristallað gler, túff eða túffrika breksíu. Alveg dílalaust berg með ólivín þóleiit kristöllum.

- Gráuhnúka-móbergsmýndun III (G-M3), 468-745 m dýpi (raundýpi 466-718 m):**
Ólivín-þóleiit. Nokkuð magn er af ólivíni í grunnmassa, jafnvel ferskt á stundum. Ólivín er einnig nokkuð áberandi í HN-5 á 506 m dýpi. Þunnarneið í 536 m sýnir misvel kristallað ólivín þóleiit. Allt frá hlutkristölluðu og upp í meðalkorna basalt sem líklega er bólstraberg. Einhver stærri plagióklas kristallabrot finnast en þau eru mjög fá og því telst þetta berg dílalaust. Hins vegar eru stöku plagióklas hópdílar í fínkornóttasta hlutanum sem eru nokkuð áberandi. Í HN-5 endar þessi móbergsmýndun á 568 m raundýpi þar sem hraunlög taka við. Gler hættir nánast að sjást í svarfinu á 564 m dýpi í HN-8 en erfitt er að segja til um hvort þar sé um bólstraberg eða hraunlög að ræða. Oxun er nokkuð jöfn og tengist hún aðallega ólivíni. Ekki verður heldur vart við lagmót í berginu og því er talið líklegt að þetta sé bólstraberg. Í þunnarneið í 636 m er ólivínríkt bólstraberg, mikið ólivín er í sumum kornum en í öðrum er það minna áberandi. Berginu svipar þar mjög til bergsins í kringum 600 m og því erfitt að réttlæta það að skipta þessari myndun í tvennt. Það örlar á gleri með ólivín kristöllum. Líklegast er bergið dílalaust þó einhver merki séu um litla plagióklas hópdíla og einhverja ummyndaða ólivín díla (litla) – en e.t.v. er þetta einungis vegna misleitrar kristöllumar ólivín-þóleiits. Í 720 m virðist vera sama berg og í 636 m, ólivín ríkt ólivín-þóleiit bólstraberg, dílalaust og svolítið oxað.
- Gráuhnúka-móbergsmýndun IV (G-M4), 745-896 m dýpi (raundýpi 718-836 m):**
Ólivínríkt, jafnkorna ólivín-þóleiit, svolítið oxað hér og þar. Virðist enn ólivín ríkara en bergið fyrir ofan, en ólivín er að miklu leyti ummyndað. Bólstraberg, breksía og túfflög en oft nokkuð vel kristallað berg. Hér eru áberandi rúnnaðir og uppéttnir plagióklas dílar (mynd 20) en þeir eru fremur fáir. Þessir dílar bera þess merki að hafa verið í ójafnvægi við kvíkuna. Einn og einn pýroxen díll sést einnig (líka uppétinn). Sérstaklega er þetta áberandi ofan til en verður minna áberandi þegar neðar dregur. Aðrir dílar eru varla til staðar. Í 756 m er ólivínríkt ólivín-þóleiit bólstraberg en bergið er þó fremur fínkorna og jafnkorna. Mikið er af ummynduðu ólivíni í grunnmassa. Fíngerði hluti bergsins er mjög leirummyndaður. Eitthvað er af grófkornóttara bergi inn á milli sem virðist vera sama myndun og það fínkorna. Svöltil oxun er hér og þar. Sjá má plagióklas sveipi í sumum kornum. Mjög sérstakir rúnnaðir plagióklas dílar og einn rúnnaður pýroxen díll (mjög fáir slíkir dílar). Einnig sést svolítið af plagióklas hópdílum í fínkornóttustu kornunum. Í 768 m virðist vera sama berg nema enn fínkornóttara. Rúnnaðir plagióklas dílar eru enn til staðar en mjög fáir og frekar litlir. Bergið er jafnkorna en samt greinilega ólivín-þóleiit eða ólivín basalt. Mikið magn er af ummynduðu ólivíni. Svöltil oxun er á stöku stað. Mikil leirumyndun er í sumum kornum. „Skeletal“ plagióklas sést stöku sinnum. Þunnarneið í 800 m sýnir blöndu af fremur fínkorna glertúffi og fínkorna ólivín þóleiiti. Málmur er fremur ójafnt dreifður og virðist kristallast í seinna fallinu. Nokkuð er af ummynduðu ólivíni í grunnmassa, stundum mikið. Virðist svipað berginu í 768 m en e.t.v. enn fínkornóttara og blandað túffi. Aðeins einn plagióklas díll sést sem gæti verið uppétinn, einnig sést pýroxen díll í glerinu sem virðist uppétinn. Fínkorna bergið er þóleiitlega kristallað við fyrstu sýn en er þó fremur ólivín ríkt. Eitthvað er af hlutkristölluðu bergi og bergið er svolítið oxað að litlum hluta.



Mynd 20. Rúnnaður plagióklas díll á 756 m dýpi í HN-8. Breidd myndar er 1,25 mm.

Í 834 m er minna gler en í sneiðinni á undan en enn er þó nokkuð af hreinu gleri til staðar og líklega er þetta bólstraberg. Eitthvað er af grófkornóttu bergi með fersku ólivíni en það virðist vera hluti af finkornóttari mynduninni. Það örklar á plagióklas dílum sem virðast ekki hafa verið í jafnvægi við kvikuna en ekki eru þeir jafn stórir og rúnnaðir eins og fyrir ofan. Munurinn á finkornóttasta berginu og því sem er örlítið grófkornóttara er sá að málmsteindir eru meira áberandi í því finkornóttasta og mjög áberandi straumflögun er stundum í plagióklas kristöllum. Virðist mismikið ummyndað en þó sjást leirummyndaðar skellur annað slagið. Í 892 m er blanda af blöðróttu túffi og hlutkristölluðu og finkristölluðu ólivín-þóleíti og er um túffrika breksíu að ræða. Ólivín er í grunnmassa og einn rúnnaður plagióklas díll. Plagióklas og ólivín kristallar sjást í túffinu, ferskt ólivín sést einnig og eru það oft „skeletal“ kristallar sem bendir til hraðrar kristöllumar. Eitthvað sést af ólivínrikara berginu sem virðist svolítið ólíkt en hlýtur að vera hluti af sömu myndun þar sem blanda af þessu bergi sést í nánast öllum þunnsneiðunum. Ummyndun bergsins virðist hafa eitthvað með þennan mun að gera, þetta berg sem virðist ólivínrikara er bara leirummyndaðra heldur en hinn hluti bergsins. Báðar þessar gerðir eru fin- og jafnkorna en engu að síður ólivínríkar. Það berg sem er grófkornóttara er líka ólivínríkt.

- **Móbergsmýndun XI (M11), 896-1288 m dýpi (raundýpi: 836-1150 m):** Hér er berg sem er í sjálfu sér ekki svo ólíkt því sem er hér fyrir ofan. Hins vegar virðist verða ásýndarbreyting þrátt fyrir að enn sé um jafnkorna basalt að ræða. Breksía er mjög algeng innan þessarar myndunar en það skiptast þó á túfflög, breksía og bólstraberg. Í þunnsneið í 946 m verður smávægileg ásýndarbreyting og ekkert sést til uppétinna plagióklas díla. Um er að ræða ólivín þóleít breksíu og svo virðist sem kristöllumin sé

„lausari“ en fyrir ofan. Hins vegar er um frekar jafnkorna berg að ræða (það er ekki sub-ófitískt) en það er miklu meira glerjað. Það sama er uppi á teningunum í sneið 1066 og 1122 m en bergið verður mun glerjaðra. Ólivín-þóleiit en fremur jafnkorna.

- **Móbergsmyndun XIV (M14), 1288-1552 m dýpi (raundýpi: 1150-1366 m):** Stak plagióklas dílótt ólivín-þóleiit móbergsmyndun, mikið til breksía en þó er glerjað basalt inn á milli. Lítið er af túffi í þessari myndun. Þunnsneið á 1318 m dýpi sýnir finkorna, nánast glerjað, jafnkorna berg með mjög jafnt dreifðum og smáum málmkornum. Einnig sjást fin- til meðalkorna alkristölluð korn sem eru nokkuð ójafnkorna. Hér virðist vera nokkuð af þóleiiti og ekki er loku fyrir það skotið að þar geti verið innskotsslæðingur á ferð. Örfáir plagióklas dílar sjást. Þunnsneið á 1392 m dýpi sýnir svipað berg og í 1318 m en þarna er þó meira gler og meira af útfellingum. Stöku plagióklas dílar sjást en þeir eru örfáir (sumir rúnnaðir í glerinu). Finkorna og jafnkorna breksía. Þunnsneið í 1478 sýnir mikið gler sem stundum er blöðrótt. Glerið er blandað einhverju af kristölluðu basalti, mjög finkorna yfirleitt með smágerðum vel dreifðum málm. Erfitt er að greina textúr en þetta virðist þó vera ólivín þóleiit (málmur virðist ekki vera „euhedral“). Í 1520 m er blanda af gleri, hlutkristölluðu basalti og finkristölluðu basalti (breksía). Stöku plagióklas dílar sjást og er það líklegast eins og í síðustu sneiðum (stak plagióklas dílótt ólivín-þóleiit). Svólítið ber á kornum með miklu af ljósum steindum og smágerðum, dreifðum málmsteindum (hér gæti mögulega verið að nálgast ísúrt innskot). Óljóst er hvar neðri hluti þessarar myndunar endar nákvæmlega en ákveðið var að setja skilin í 1552 m dýpi. Þau eru þannig talin vera einhvers staðar á milli 1520 og 1570 m þunnsneiðanna.
- **Gráuhnúka-móbergsmyndun VII (G-M5), 1552-1904 m dýpi (raundýpi: 1366-1660 m):** Dílalaust móberg, ólivín-þóleiit. Þunnsneið á 1570 m sýnir mikið af kornum með mjög miklu magni af plagióklas með sterka straumflögun. Mikið er af smágerðum málm og er hér um ummyndað, finkorna, þétt og ísúrt berg að ræða, að öllum líkindum innskot. Útslag er í gammamælingu á u.þ.b. 1540-1550 m dýpi eins og sést á mynd 25. Grannberg er nokkuð greinilegt í þessari sneið og virðist þar vera um ummyndað, dílalaust ólivín-þóleiit að ræða með svólítu af gleri. Er þar um breksíu eða bólstrabreksíu að ræða.

Þunnsneið á 1602 m sýnir fin- til meðalkorna basalt sem virðist hafa sub-ófitískan textúr (ólivín-þóleiit). Mun minna er af útfellingum en áður og gefur það til kynna þéttara berg. Einnig virðist það ferskara svo líklega er um innskot að ræða. Svólítil oxun er greinileg og svo virðist sem einhver kontaktummyndun hafi átt sér stað (mikið af smágerðum málmsteindum). Finkornotta basaltið virðist það sama og það grófkornóttara, meira ummyndað en ekki mjög. Líklega er þar um finkornóttari hluta innskots að ræða. Bergið er eitthvað blandað breksíu að ofan og einnig er svólítið um þróaðri korn, sem eru með svólítið klessulegri plagióklas heldur en í ísúra berginu á 1570 m (virðist svólítið þróaðra en það). Þetta eru aðeins örfá korn. Óljóst er um umfang þessa innskots þar sem jarðlagamælingar sýna lítil ummerki um innskot.

Í 1674 m sést enn í innskotið að ofan, ólivín-þóleiit, sem er fin- til meðalkorna og það meðalkorna er nokkuð ferskt, jafnvel mjög ferskt (pýroxen). Þónokkuð er af ummyndaðra basalti, eitthvað svólítið af kornum með euhedral smáum málmkristöllum. Yfirleitt eru kornin þó ólivín-þóleiit leg. Erfitt er að sjá hvort um sömu myndun er að ræða en það er líklegt að hér sjáist enn í innskotið. Einnig sést

breksía eða glerjað basalt, en þónokkuð er af hlutkristölluðum kornum. Einingin virðist dílalaus og gæti því mögulega verið sú sama og sést í þunnsneið á 1570 m dýpi.

Þunnsneið á 1780 m sýnir sub-ófitískt basalt – ólivín-þóleiit. Allt frá glerjuðu og upp í nánast grófkorna kristallað, dílalaust ólivín-þóleiit. Hér virðist vera sama myndunin og líklegast að um bólstraberg sé að ræða. Grófkristallaðasti hlutinn er fremur lítið ummyndaður og eitthvað er af gleri inn á milli. Bergið sem er tiltölulega finkornótt er einnig nokkuð jafnkorna.

- **Hraunlagasyrpa XII (H12), 1904-1980 m dýpi (raundýpi: 1660-1724 m):** Hér er ekki alveg ljóst hvort um er að ræða bólstraberg eða hraun. Ekki er heldur loka fyrir það skotið að innskot sé einhver hluti af þessari myndun en innskot voru staðsett með tilliti til viðnámsmælinga og gammamælinga á þessu dýpi (mynd 27). Þunnsneið á 1918 m dýpi sýnir allt frá finkorna og jafnvel glerjuðu basalti (ólivín-þóleiiti) og upp í meðalkorna ólivín-þóleiit. Eitt og eitt glerkorn finnst, sum þeirra svört, inn á milli og eitthvað hlutkristallað. Miklu meiri ummyndun er í finkornóttari hlutanum. Plagióklas er nokkuð ferskur og gæti þar verið innskotsdreif eða minna ummyndaður hluti bergsins. Þunnsneið í 1972 m er mjög svipuð og í 1918 m, allt frá finkorna, stundum glerjuðu ólivín-þóleiiti og upp í meðalkorna. Mun minna er þó af stærri plagióklas kristöllum en í 1918 m. Sub-ófitískt. Lítið er af útfellingum og því talið að bergið sé fremur þétt. E.t.v. er þó um innskot að ræða að einhverju leyti, þar sem svarfið virðist aðeins minna ummyndað á þessum slóðum en í kring.
- **Móbergsmýndun XVI (M16), 1980-xxxx m dýpi (raundýpi: 1724-xxxx m):** Hér efst kemur inn nokkuð af túffi, bergið virðist vera basaltbreksía og útfellingar aukast. Þunnsneið á 2006 m dýpi sýnir kontaktumyndun á einhverjum kornum (ógagnsæ en samt mjög ógreinileg). Hér er blanda af hlutkristölluðu og allt upp í meðalkristallað basalt. Líklega ólivín-þóleiit með sub-ófitískan textúr. Frekar mikið pýroxen er til staðar. Hér gæti verið blanda af innskoti og glerjuðu basalti eða hugsanlega ein myndun. Nifteindamæling sýnir að innskot gæti verið á 2002-2013 m dýpi (mynd 27) og því gæti verið um efri mörk innskots að ræða í þessari þunnsneið eða að innskot sé nærri.

Hér neðst er svarf afskaplega fingert og oft á tíðum erfitt að greina berggerð. Því er ekki reynt að skipta jarðlögum upp neðan 1980 m dýpis. Ýmislegt bendir til þess að bergið sé að mestu leyti móbergsmýndanir en útilokað er að greina hvort um mismunandi mýndanir er að ræða og inn á milli gætu einnig verið hraunlög. Þunnsneiðar í holunni eru einnig fremur fáar og langt á milli þeirra en þær eru mikilvægastu gögnin til þess að greina á milli jarðlagamyndana.

Í svarfgreiningu kemur fram fin- til meðalkorna og þétt basalt allt frá 2022 m og niður í 2146 m og er þar talið vera innskot. Engin þunnsneið er til af þessu svæði og jarðlagamælingar af þessu svæði sýna lítið. Nifteindamæling sýnir almennt séð há gildi og engir áberandi toppar eru eða ákveðin skipti í mælingu. Toppur er í viðnámsmælingu á 2105-2120 m dýpi og út frá því er sett mögulegt innskot á því dýptarbili (mynd 27). Hins vegar er mögulegt að hér nái innskot yfir mest allt þetta dýpi en erfitt er að fullyrða það þar sem þunnsneiðar eru ekki til staðar og takmarkað gagn er af jarðlagamælingum. Þetta gæti því allt eins verið glerjað basalt eða hraun þar sem bergið virðist að mestu leyti vera mikið ummyndað.

Þunnsneið á 2182 m dýpi sýnir þónokkuð magn af dökkbrúnu gleri með stöku plagióklas kristöllum. Einnig er nokkuð magn af hlutkristölluðum eða kontaktumynduðum kornum, dökkum og óljósum og gæti þar verið vísbending um innskot í grennd en einnig getur verið að svarf á þessu dýpi sé orðið verulega blandað. Það eru a.m.k. ekki miklar vísbendingar um innskot í jarðlagamælingum eins og sést á mynd 27. Blandað við þetta er fin- til meðalkorna basalt. Þónokkuð er af útfellingum og bergið er fremur breksúlegt og líklegt að enn séum við í sömu móbergsmýnduninni og fyrir ofan ætlað innskot.

Þunnsneið á 2206 m dýpi sýnir fin- og allt upp í meðal- eða grófkristallað basalt. Mikið er af pyroxen og plagióklas. Plagióklas er nokkuð mikið ummyndaður. Eitt og eitt glerkorn er til staðar og bergið virðist vera af ólivín-þóleiit gerð. Ekki er mjög mikið af útfellingum sem bendir til þess að bergið sé fremur þétt. Örlítill hækkun er í gammamælingu á þessu dýpi (þegar dýpið á þunnsneiðinni hefur verið leiðrétt í u.þ.b. 2196 m) og má sjá það neðst á mynd 27. Það bendir til þess að líklega sé hér um innskot að ræða.

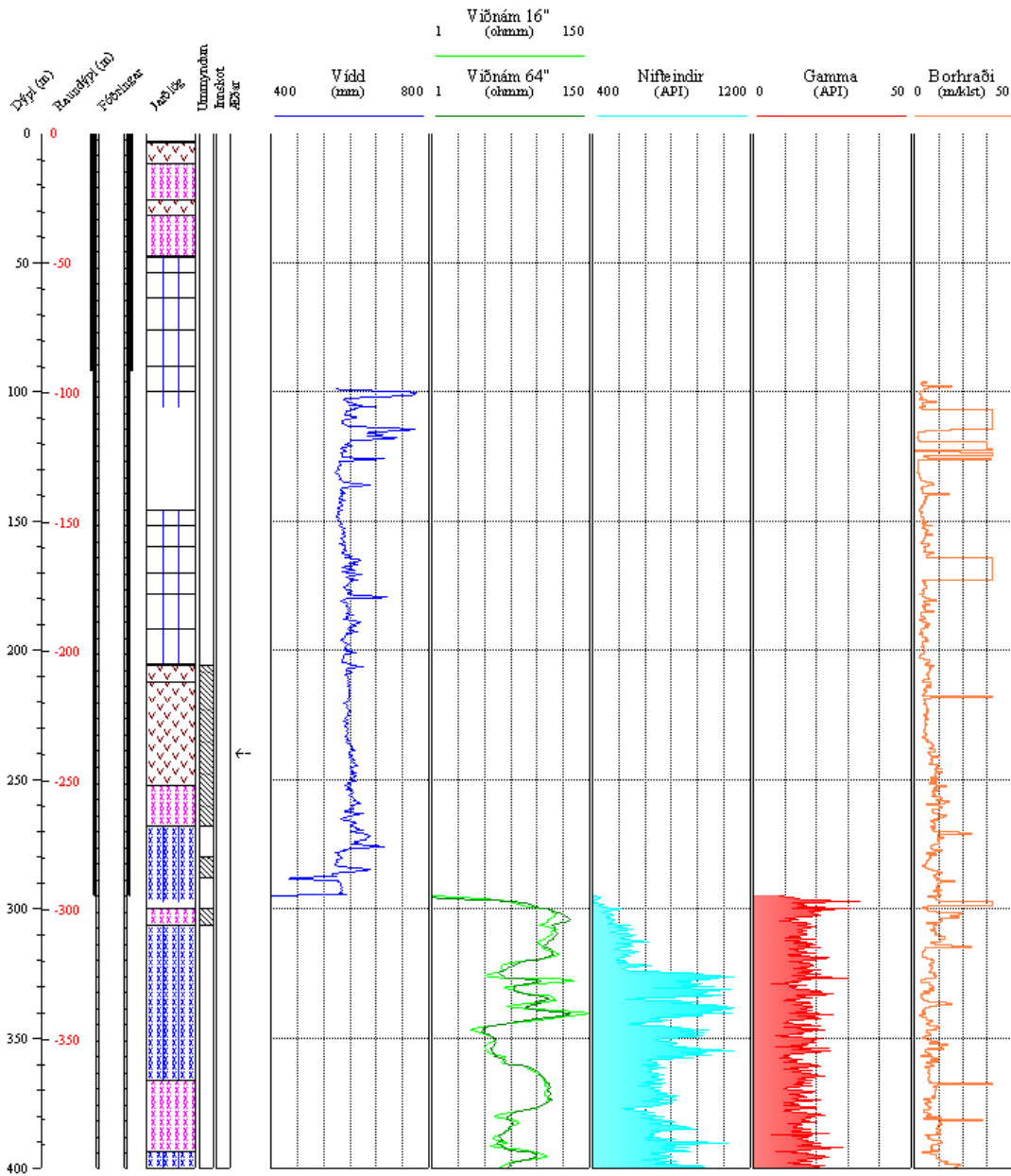
Þunnsneið á 2396 m sýnir allt frá hlutkristölluðu og upp í fin- til meðalkorna basalt. Gæti verið blanda af innskoti og glerjuðu basalti. Mjög mismikið ummyndað berg sem bendir til þess að hér sé um að ræða blandað svarf. Svolítill toppur er í viðnámsmælingu í kringum þetta dýpi (mynd 28).

Þunnsneið á 2504 m sýnir mjög miskristallað berg, allt frá finkornóttu og upp í grófkornótt ólivín-þóleiit. Líklega er ferskari hluti bergsins innskotsslæðingur. Hitt er fremur mikið ummyndað og er ekki hluti af sömu myndun, sá hluti er frekar finkorna. Líklegast er bergið svolítið glerjað en það er þó erfitt að segja til um það – hraunlög eða bólstraberg. Þónokkuð sést af pyroxen og plagióklas kristöllum.

Staður: Hellisheiði
 Holungrað: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 0-400 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

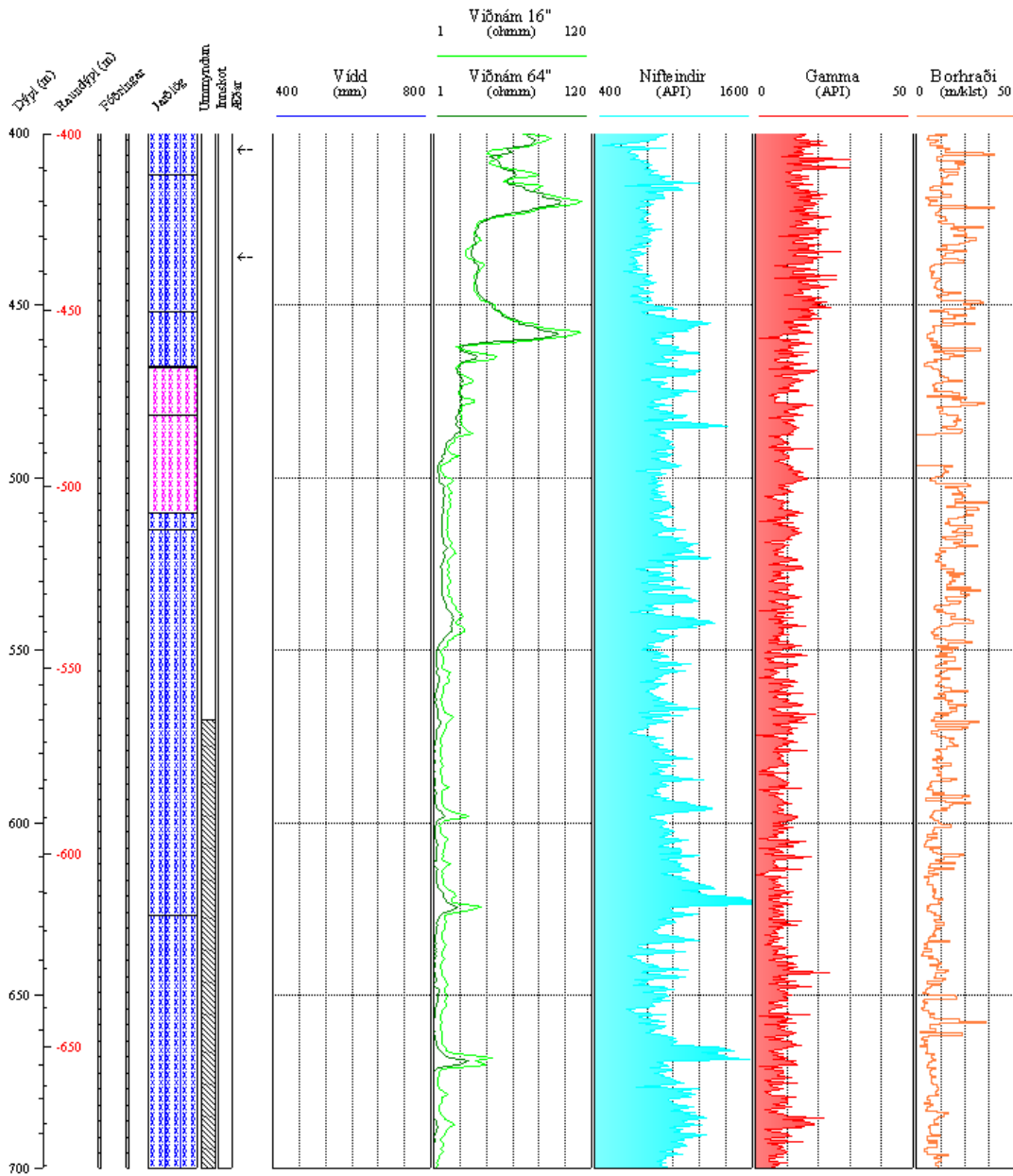
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM,BSH,SN,HAA


Mynd 21. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 0-400 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holungr: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 400-700 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhliuti: Öll holan

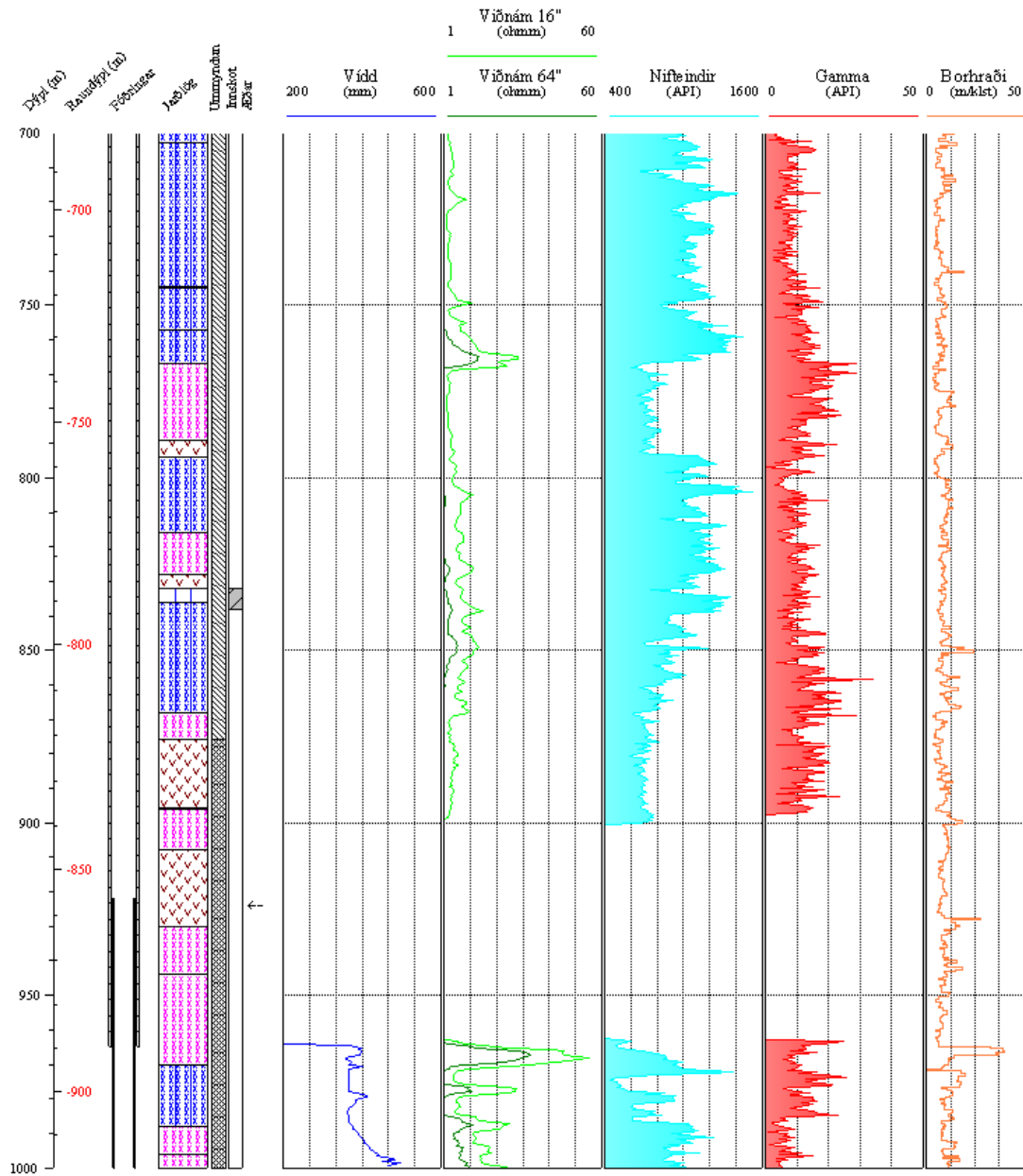
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM,BSH,SN,HAA


Mynd 22. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 400-700 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 700-1000 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhliuti: Öll holan

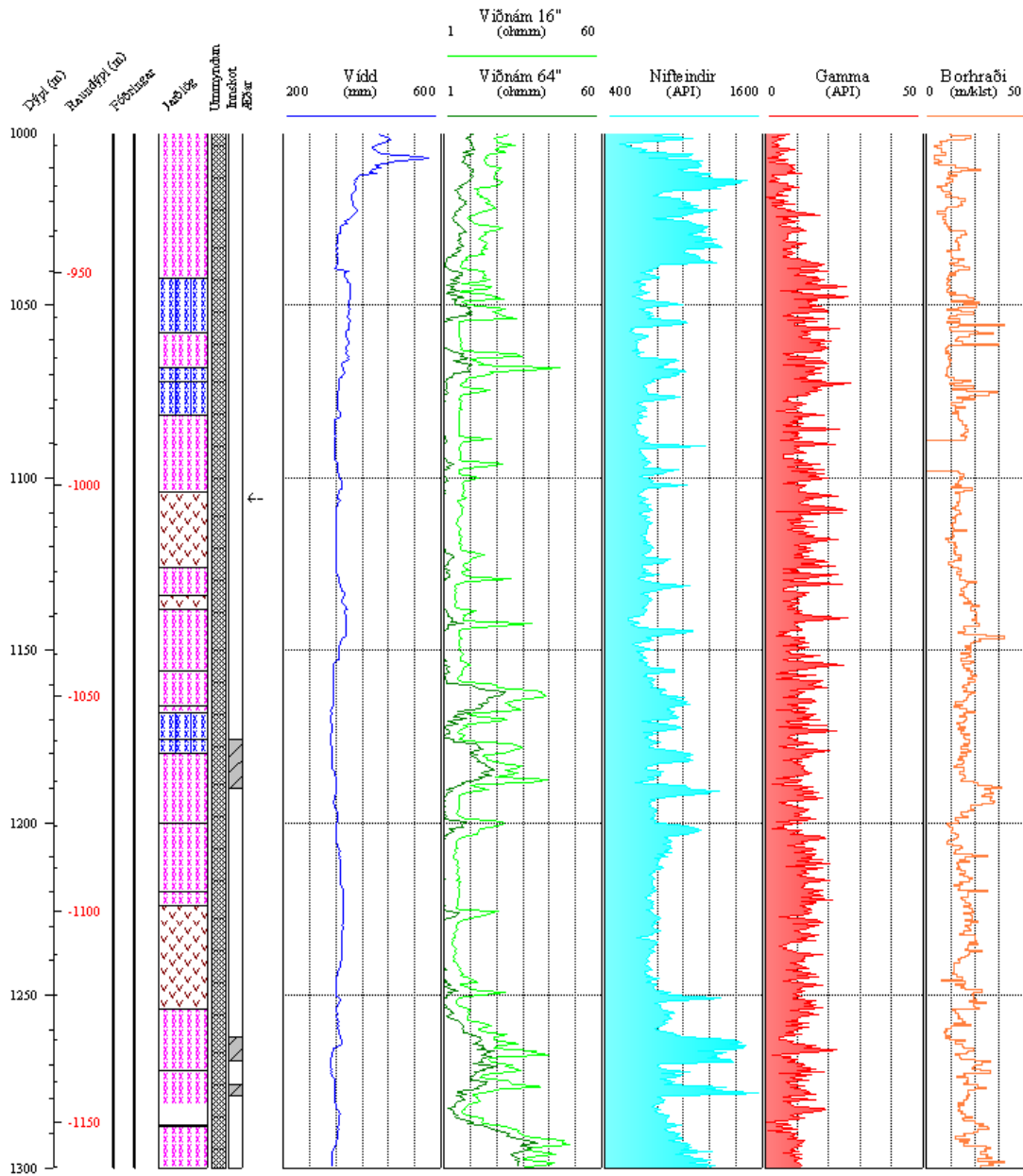
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMH,BSH,SN,HAA


Mynd 23. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 700-1000 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 1000-1300 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhliuti: Öll holan

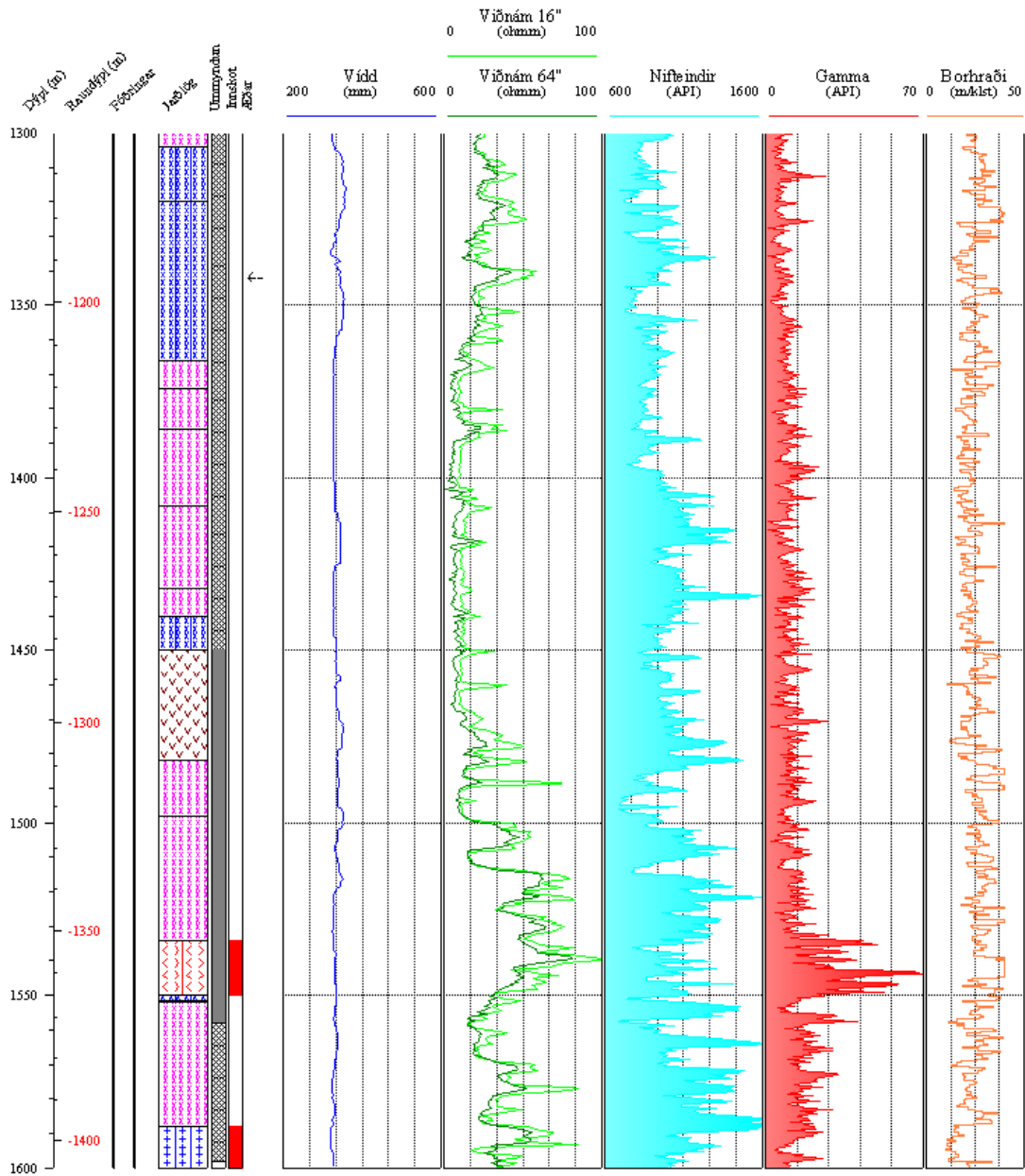
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMH,BSH,SN,HAA


Mynd 24. Jarðlagasnið ásamt jarðlagamælingum á 1000-1300 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Dýptarbíl: 1300-1600 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

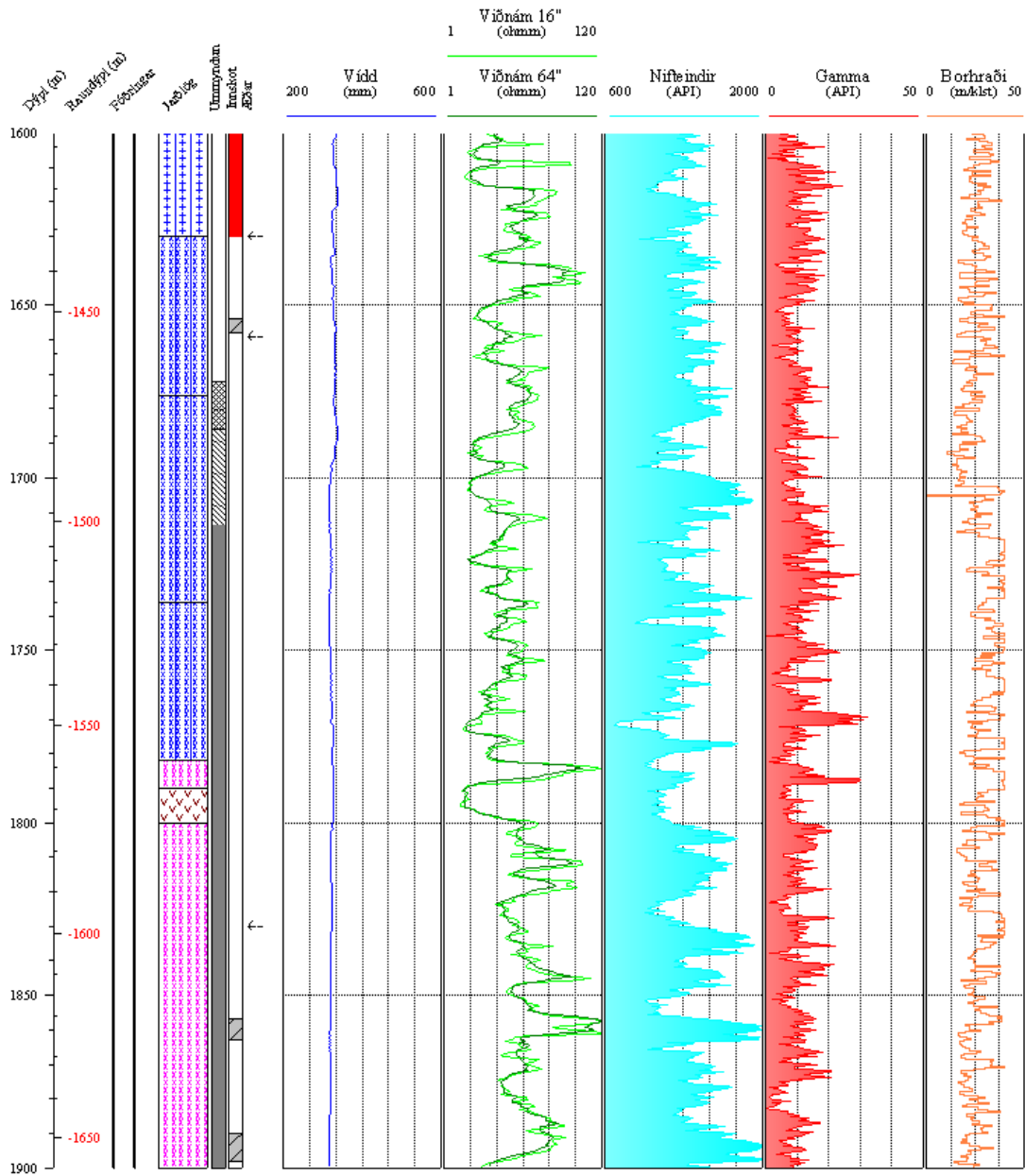
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMH


Mynd 25. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 1300-1600 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 1600-1900 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

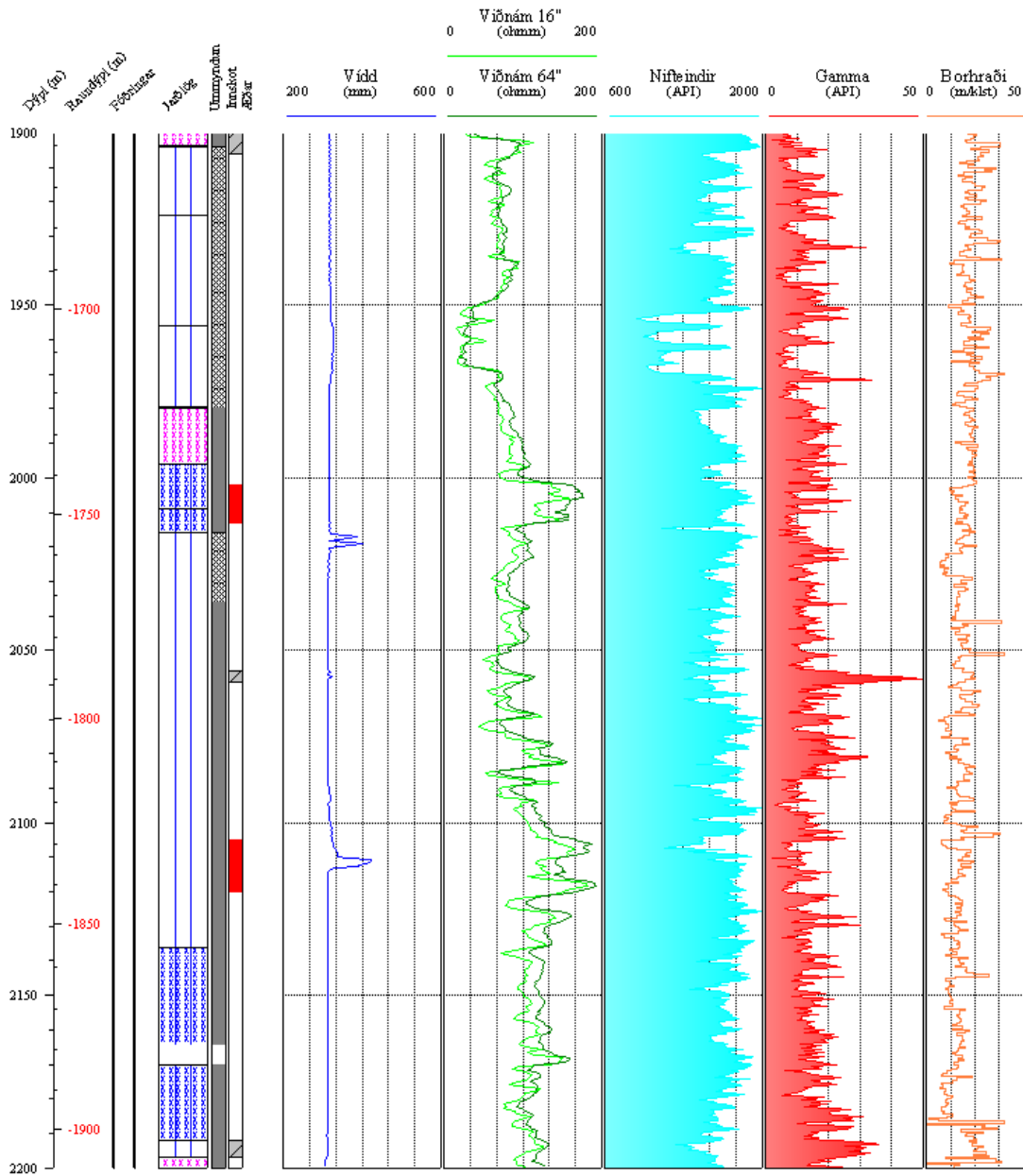
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM,BSH,SN,HAA


Mynd 26. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 1600-1900 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 1900-2200 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

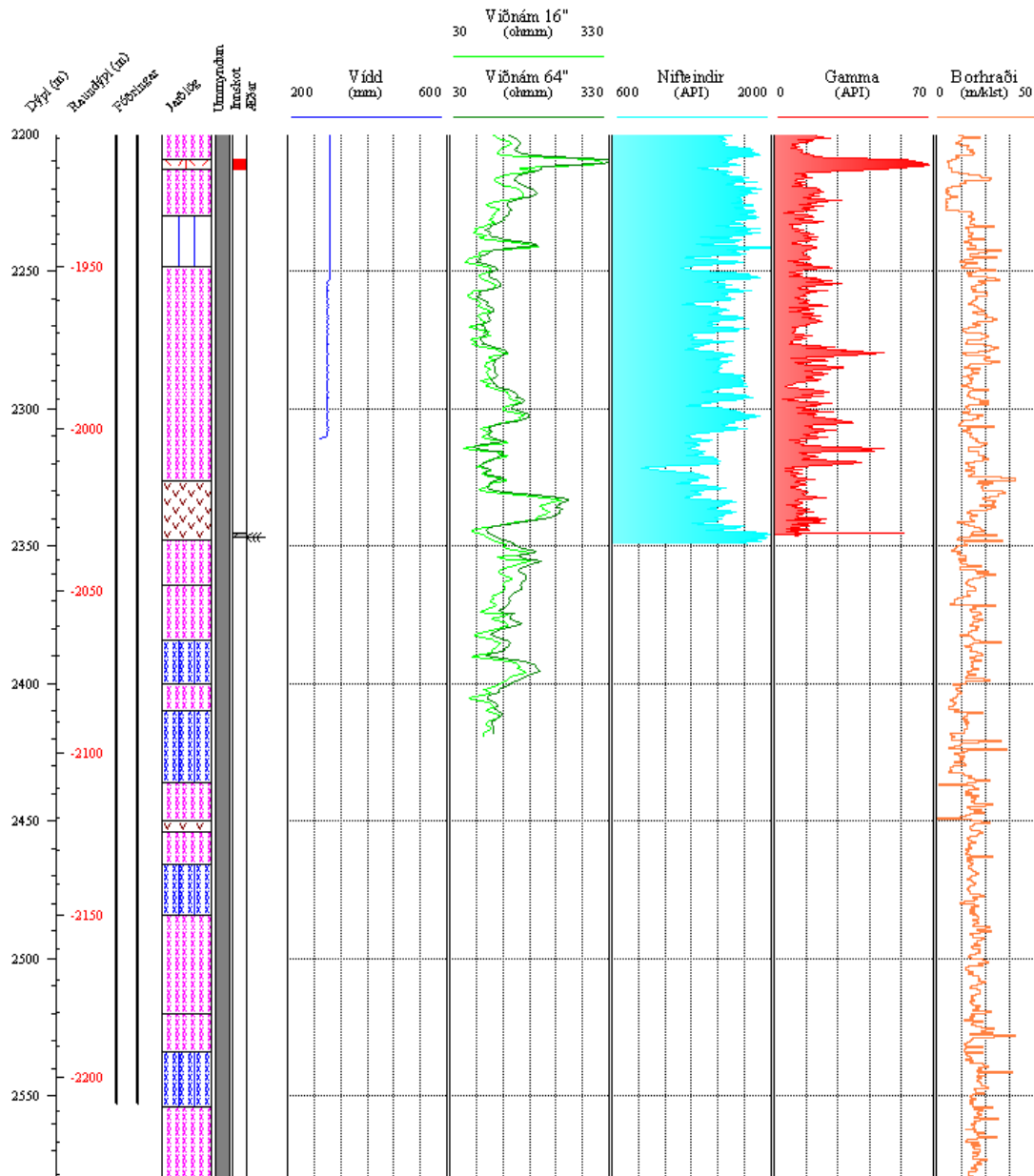
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM


Mynd 27. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 1900-2200 m dýpi í HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 1900-2200 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM,BSH,SN,HAA


Mynd 28. Jarðlög ásamt jarðlagamælingum á 2200-2580 m dýpi í HN-8.

3.1.6 Innskot í holu HN-8

Í töflu 3 má sjá þau innskot sem greind voru í holu HN-8.

Samtals greindust 16 innskot í holu HN-8. Hóla HN-8 er þó umtalsvert lengri og nær dýpra en hola HN-5 og ekki er ólíklegt að fleiri og umfangsmeiri innskot skeri holuna en fram koma hér. Ekki hefur verið lagt mat á hvort innskot í þessum tveimur holum tengist á einhvern hátt en þó þykja nokkrar líkur á að einhver þessara innskota séu þau sömu í báðum holunum. Þar sem borað er nokkuð þvert á ríkjandi sprungustefnu og stefnu misgengja á þessu svæði er ekki ólíklegt að farið sé í gegnum sömu innskotin.

Mjög lítið samræmi er á milli nifteinda- og viðnámsmælinga þegar neðar dregur í holunni og því er óvissan um innskot fremur mikil. Svarf er einnig mjög fingert þegar neðar dregur og erfitt að greina. Á tæplega 1600 m og næstum alveg niður í 1700 m mælt dýpi virðist vera mikil blöndun og innskotalagt berg sést á mörgum stöðum. Jarðlagamælingar hjálpa ekki mikið til á þessum slóðum og því er nokkur óvissa í staðsetningu innskotanna.

Fyrir neðan 2420 m eru engar jarðlagamælingar til og því erfitt að fullyrða um tíðni innskota. Ekki verður sérstaklega vart við innskot í svarfgreiningu en í þunnsneiðum er ekki talið ólíklegt að innskotsslæðingur sé til staðar þar sem grófkornóttasta bergið virðist vera nokkuð fersklegt í þunnsneið á 2504 m. Ekki er loku fyrir það skotið að neðsti hluti holunnar geti verið með mun meira af innskotum en fram kemur hér.

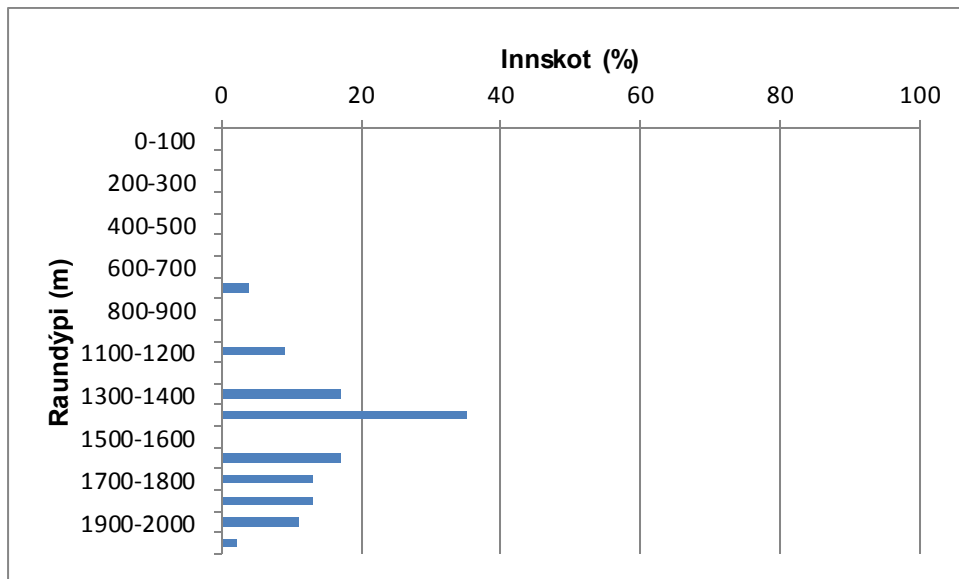
Á mynd 29 má sjá innskotapéttleika í HN-8. Eins og í HN-5 fer fyrst að bera á innskotum á milli 700 og 800 m raundýpis og er það um það bil á þeim slóðum sem farið er í gegnum vesturjaðar Hengilskerfisins. Annars verður þéttleikinn aldrei meiri en 35% og er það á milli 1400 og 1500 m raundýpis. Taka verður með í reikninginn þá íhaldssemi sem gætti við greiningu innskota og ekki þykir ólíklegt að innskot séu umfangsmeiri en hér er gefið til kynna.

Tafla 3. Yfirlit um innskot í holu HN-8.

Dýpi (m)	Raundýpi (m)	Tegund	Svarfgreining	Þunnsneið	Mælingar
832-836	787-791	Ólivín-þóleiít-mögulegt innskot	Greint í svarfi sem kristallað ólivín-þóleiít. Minni ummyndun og lítið er af útfellingum. Talið vera kvikuæð í staflanum.	Þunnsneið á 834 m sýnir svolítið affersklegu bergi sem gæti verið innskot en erfitt er að fullyrða það.	Nifteindamæling á þessu dýpi sýnir toppa á 832-838 m. Ekki mjög sannfærandi toppar
1176-1190	1060-1072	Óþekkt-mögulegt innskot	Fínkorna basalt, frekar ferskt. Fáar og smáar útfellingar svo að bergið er líklegast þétt.	Brúnt, rauðbrúnt og allt að því svart gler (stöku plagióklaslistar í glerinu). Blandað glerinu er fínkristallað og hlutkristallað basalt og kristallaða bergið virðist vera nokkuð ummyndað. Hins vegar eru stærri kristallar (aðallega pyroxen) sem eru ferskir - þar gæti innskot verið á ferð.	Jarðlagamælingar á þessu svæði eru með einhverjum toppum (nifteindir og viðnám) en erfitt er að segja til um hvort þar sé um að ræða innskot eða einfaldlega kristallaðra berg.

1262-1269	1129-1135	Mögulegt innskot, óþekkt	Á þessu dýpi er greind breksía, fremur túffrík	Engin þunnsneið er til af þessu dýpi.	Nokkuð áberandi hækkun í nifteindamælingu er á þessu dýpi en hækkun í viðnámi er greinileg en dreifist aðeins öðruvísi.
1276-1279	1140-1143	Mögulegt innskot, óþekkt	Hér er greind breksía, svolítið meira af glerjuðu basalti en fyrir ofan.	Engin þunnsneið er til af þessu svæði.	Nokkuð áberandi hækkun í nifteindamælingu er á þessu dýpi en hækkun í viðnámi er greinileg en dreifist aðeins öðruvísi.
1534-1550	1352-1366	Þróað-ísúrt	Þróað innskot, að megninu til ljósleit, kristölluð korn.	Þunnsneið á 1570 m sýnir mikið af kornum með mjög miklu magni af plagíóklas með sterka straumflögun. Mikið er af smágerðum málmum og er hér um ummyndað, fínkorna, þétt og ísúrt berg að ræða, að öllum líkindum innskot.	Gammamæling sýnir greinilega toppa á þessu dýpi og styður það þunnsneiða- og svargreiningu á þessum sýnum. Viðnámstoppur er á 1540 m en engin sérstök merki eru um innskot í nifteindamælingu.
1588-1630	1397-1432	Ólivín-þóleiit	Meðalkorna ólivín-þóleiitlegt basaltinnskot. Ólivín er tiltölulega fersklegt. Útfellingar eru fáar og túffar að blandast berginu meira eftir 1640 m.	Þunnsneið á 1602 m sýnir fín-til meðalkorna ólivín-þóleiit. Þéttara berg en áður og virðist ferskara. Svöltil oxun er greinileg og einhver kontakt-ummyndun.	Ekkert sérstakt bendir til innskots í mælingunum og því er erfitt að staðsetja innskotið nákvæmlega.
1654-1658	1452-1455	Ólivín-þóleiit, mögulegt innskot	Í svarfinu sést svolítið af fersklegum, meðalkorna basalkornum, líklega ólivín-þóleiiti.	Þunnsneið í 1674 m (sem er líklega rétt fyrir neðan þetta dýpi miðað við leiðréttingu sem gerð var) sýnir að hluta til innskotið og virðist það vera það sama og í 1602 m.	Þónokkur toppur er í viðnámsmælingum í u.þ.b. þessu dýpi en ekkert sérstakt sést í nifteindamælingu
1857-1863	1620-1625	Mögulegt innskot, óþekkt.	Ekki verður vart við innskot í svarfgreiningu og er þarna greind breksía, blanda af mjög ummynduðu glerjuðu basalti og túffi.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Toppa eru í viðnáms- og nifteindamælingu í kringum 1860 m dýpi.
1890-1898	1649-1656	Mögulegt innskot, óþekkt	Ekki verður vart við innskotsberg í svarfinu fyrr en á 1916 m dýpi (u.þ.b. 1906 m leiðrétt dýpi). Þar virðist bergið vera fremur þétt, fín-til meðalkorna basalt sem er þó nokkuð ummyndað. Talið er hugsanlegt að þar sé um innskot að ræða.	Þunnsneið á 1918 sýnir nokkuð þétt berg (lítið af útfellingum), fín-til meðalkristallað ólivín-þóleiit (jafnvel glerjað á stundum). Fíngerðasti hlutinn virðist mun meira ummyndaður en sá grófgerðasti, spurning hvort þetta sé innskot í bólstrabergsstafla.	Nokkuð greinilegur toppur er í nifteindamælingu á 1890-1898 m dýpi. Óljósari toppar eru einnig í tæplega og rúmlega 2000 m, en þeir skera sig ekki jafn mikið úr og toppurinn í 1860 m.
1900-1906	1658-1663	Ólivín-þóleiit-mögulegt innskot	Ekki verður vart við innskotsberg í svarfinu fyrr en á 1916 m dýpi (u.þ.b. 1906 m leiðrétt dýpi). Þar virðist bergið vera fremur þétt, fín-til meðalkorna basalt sem er þó nokkuð ummyndað. Talið er hugsanlegt að þar sé um innskot að ræða.	Þunnsneið á 1918 sýnir nokkuð þétt berg (lítið af útfellingum), fín-til meðalkristallað ólivín-þóleiit (jafnvel glerjað á stundum). Fíngerðasti hlutinn virðist mun meira ummyndaður en sá grófgerðasti, spurning hvort þetta sé innskot í bólstrabergsstafla.	Óljósari toppar eru einnig í tæplega og rúmlega 2000 m, en þeir skera sig ekki jafn mikið úr og toppurinn í 1860 m.

2002-2013	1742-1752	Ólivín-þóleiít	Þétt, fín-til meðalkorna basalt, magn útfellinga minnkar nokkuð.	Þunnsneið á 2006 m dýpi sýnir blöndu af hlutkrystölluðu og upp í meðalkristallað basalt, líklega ólivín-þóleiít. Einhver kontakt-ummyndun sést. Gæti verið blanda af innskoti og glerjuðu basalti.	Viðnámsmæling sýnir greinilegan topp á þessu dýpi en nifteindamæling er ekki með neina afgerandi toppa.
2056-2059	1787-1790	Mögulegt innskot, óþekkt	Í svargreiningu er talið að hér sé jafnvel innskot, en einnig er mögulegt að þetta sé hraunlagastafli.	Ekki er til þunnsneið á þessu dýpi.	Hér hækka gamma skyndilega upp í u.þ.b. 50 API. Ekki er þá um mjög þróað berg að ræða. Þetta er eina vísbendingin um þróaðra innskot á þessu dýpi.
2105-2120	1829-1842	Ólivín-þóleiít	Í svargreiningu er greint fín-til meðalkorna og þétt basalt allt frá 2022 m og niður í 2174 m.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Erfitt er að segja til um hvort hér sé innskot eða ekki þar sem mælingar eru frekar grófar hér en toppar eru þó í viðnámsmælingu. Hins vegar er ekkert sem bendir til innskots í nifteindamælingunni.
2192-2197	1902-1906	Ólivín-þóleiít, mögulega innskot	Svargreining sýnir kristallað ólivín-þóleiít sem talið er geta verið gangur.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Hækkun er í gamma á þessu dýpi, eins og smá stafli, og er innskotið miðað við það. Ekki kemur fram hækkun í nifteindum eða viðnámi á þessu sama dýpi.
2210-2218	1918-1925	Þróað	Í svargreiningu verður ekki vart við þetta þróaða innskot en á þessu dýpi er greind breksía og túff, en tekið fram að svarið sé mjög blandað	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Greinilegur toppur er í viðnámi og gamma á þessu dýpi og því verður að teljast fremur líklegt að hér sé um innskot að ræða og mjög líklega ísúrt.
2345-2347	2032-2034	Mögulegt innskot, óþekkt	Í svargreiningu verður ekki vart við þetta innskot en á þessu dýpi er greind breksía og túff, en tekið fram að svarið sé mjög blandað. Á þessu dýpi er einnig aðalæð holunnar.	Ekki er til þunnsneið af þessu dýpi.	Greinilegur toppur er í gamma á þessu dýpi (skýst upp í 60 API í 2345 m) og einnig er greinilegur toppur í nifteindamælingu. Hér er því talið að um innskot sé að ræða þó það komi ekki fram í svarið. Viðnámsmælingin er hins vegar öfug, þ.e. í mikilli lægð ákkúrat þar sem þessi toppur er.









Mynd 29. Innskotapéttleiki í holu HN-8.

3.2 Ummyndun



Í greiningu svarfs á borstað er fylgst vel með dreifingu ummyndunarsteinda og hún skráð skilmerkilega. Einnig er ummyndun bergsins sjálfs metin eftir bestu getu. Tækifæri gefst til þess að kortleggja þetta enn betur með þunnsneiðagreiningu og röntgengreiningum (XRD) á leir. Þannig er hægt að leggja enn betra mat á dreifingu ummyndunarsteinda og átta sig betur á fyrstu innkomu hitaháðra steinda. Það sem skiptir einnig miklu máli er að mun auðveldara er að átta sig á ummyndun frumsteinda bergsins við skoðun þunnsneiða í bergsmásjá en í svarfskoðun í víðsjá. Ummyndun frumsteinda er metin á bilinu 0-4. Röntgengreining leirs gefur að auki meiri upplýsingar um gerð leirsins og í hvers konar ummyndunarbelti berglögin eru. Í þunnsneiðum er einnig reynt að leggja mat á röð ummyndunarsteinda þar sem hún getur sagt okkur margt um þróun jarðhitakerfisins í gegnum tíðina. Í köflunum hér á eftir verður fjallað um ummyndun í holunum og sjá má skýringar við ummyndun á mynd 30.

Skýringar við bergummyndun og ummyndunarsteindir

Ummyndunarbelti

	Ferskt beltí
	Sme-zeol beltí
	Blandlagsbeltí
	Klórít beltí
	Kló-epid beltí
	Epid-amfíb beltí

Ummyndunarstig

	Engin ummyndun
	Lítill ummyndun
	Meðal ummyndun
	Mikil ummyndun

Greining ummyndunarsteinda

- Greining í víðsjá
- ◊ Greining í bergfræðismásjá
- Röntngengreining

Mynd 30. Skýringar við ummyndun.

3.2.1 Bergummyndun

Þegar lagt er mat á ummyndun bergs í þunnisneiðaskoðun eru frumþættir bergsins skoðaðar og athugað hversu langt ummyndun er komin og hvaða ummyndunarsteind er komin í staðinn. Frumþættir sem lagt hefur verið mat á eru gler, ólívín, plagióklas, pýroxen og málmsteindir.

Þar sem gler er mjög algengt í íslensku bergi, og þá sér í lagi í núverandi gosbelti, er nauðsynlegt að skoða hvernig það ummyndast. Fyrsta ummyndun á gleri (t.d. í móbergstúffi) er yfirleitt sú að palagónítrími myndast eftir jaðri allra korna. Megin breytingin sem það hefur í för með sér er að glerið vatnast, þó einhverjir aðrir efnaflutningar eigi sér stað líka. Efnaflutningar sem verða í palagónítiseringu eru þeir að hlutfall SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , K_2O og Na_2O minnkar miðað við glerið en FeO , TiO_2 og H_2O magn eykst, sér í lagi magn H_2O (Stroncik og Schmincke, 2001). Ummerkin um palagónít haldast oft ótrúlega lengi niður í jarðhitakerfið þar sem oft má greina rönd meðfram brúnum glerkornanna þrátt fyrir að palagónítið sé alveg ummyndað yfir í leir (mynd 31). Svo virðist sem palagónítið hafi verndandi áhrif á glerið áður en jarðhitaummyndunar fer að gæta (Helga Margrét Helgadóttir, 2006). Greinileg merki um sprungur í gegnum palagónítríma glerkorna og frekari

palagónísing þar fyrir innan (kúlulaga palagónít) þykir vísbending um verndun þess og einnig það að ummyndun fyrir innan palagónítið virðist ekki fara af stað fyrir en palagónítið hefur umbreytt í leirkristalla.

Ólivín er einnig viðkvæmt fyrir ummyndun og fljótlega í lághitnum hefur myndast leir meðfram köntum kristallanna og einnig í sprungum. Svo virðist sem ólivín ummyndist nokkuð skyndilega en inn á milli má oft sjá einn og einn lítið ummyndaðan kristal þrátt fyrir að mest allt ólivín virðist horfið. Þegar ofan í eiginlegt jarðhitakerfi er komið hefur ólivín ummyndast að fullu.

Plagióklas ummyndast oft nokkuð fljótt og á það sérstaklega við um díla. Þeir verða t.d. zeólítum auðveldlega að bráð í lághitakerfinu. Nokkuð auðvelt er að greina ummyndun í plagióklas, oft byrjar hún með leirsprungum en smám saman leysist plagióklasinn upp (Larsson, 2002) og í staðinn fellur út albit. Einnig má sjá ummyndunarsteindir eins og epidót, kvars og prehnít koma í staðinn.

Í þunnsneiðum er erfiðara að fylgjast með ummyndun á pýroxen heldur en á öðrum steindum. Í flestum tilfellum virðist fyrsta ummyndun lýsa sér sem ljósir kantar í tvískautuðu ljósi en í einhverjum tilvikum er eins og kristallinn verði óhreinn, eða sprunginn.

Fyrsta ummyndun á málmsteindum er ekki áberandi þar sem þær eru oft smágerðar. Hins vegar byrjar ummyndun þannig að kantar verða óreglulegri og ljós kemst í gegnum þá. Yfirleitt er um sphene-ummyndun að ræða sem smám saman verður yfirgrípsmeiri.

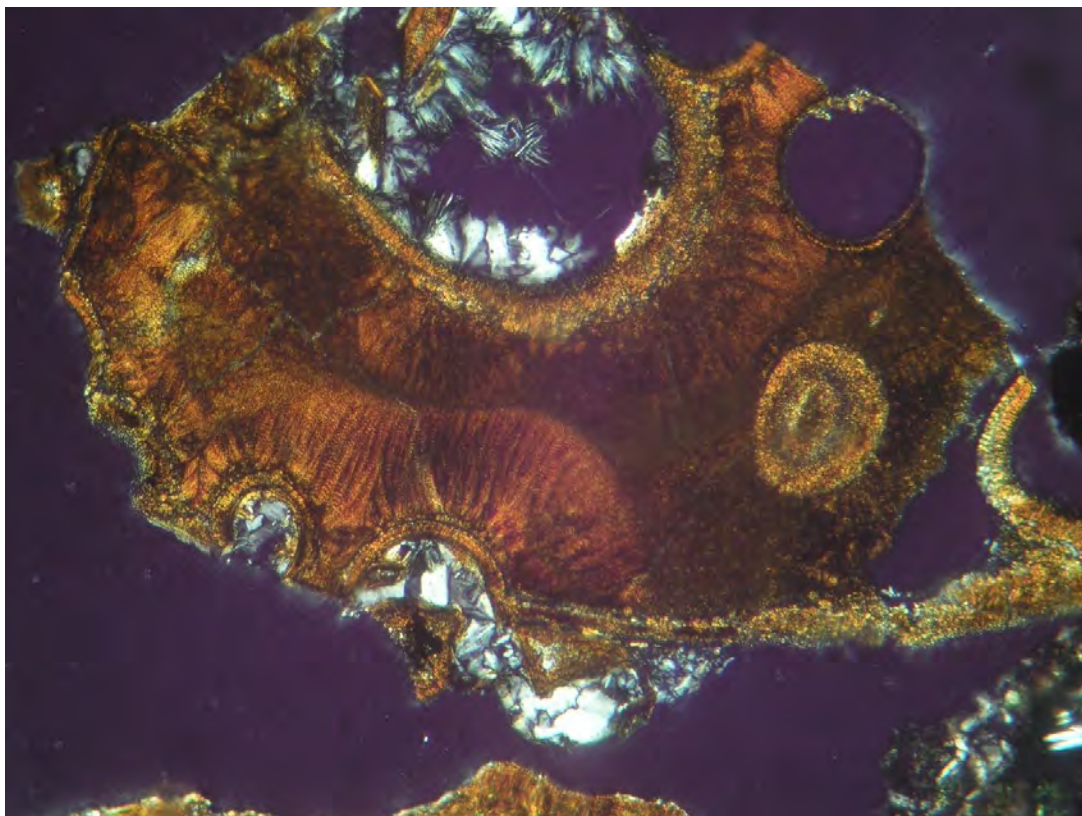
3.2.1.1 Bergumyndun í HN-2

Hola HN-2 liggur fyrir vestan sigdæld Hengilsins og er því ekki jafn mörkuð af ummyndun og hinar holurnar tvær. Engu að síður er töluverð ummyndun í holunni og greinileg merki eru um nokkuð háan hita sem einhvern tíma hefur leikið um berglögin.

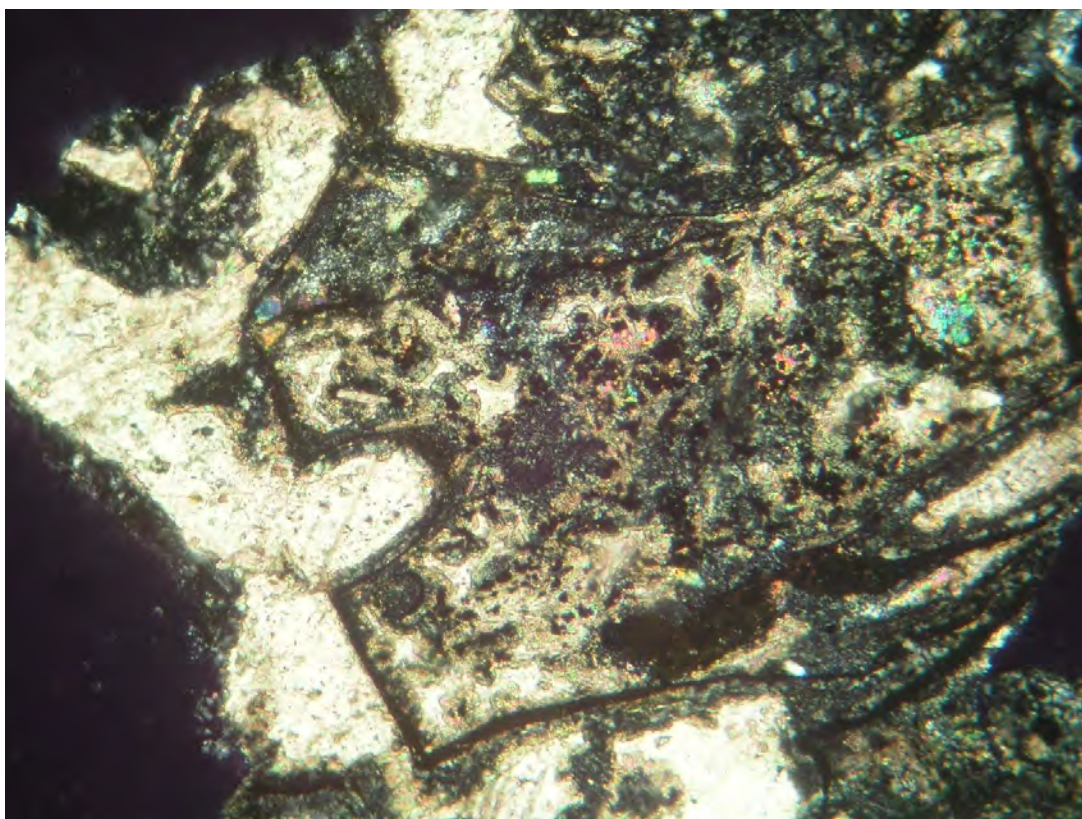
Á mynd 40 og í töflum 10, 11 og 12 í viðauka II má sjá yfirlit um ummyndun þeirra.

Gler: Fyrstu merki um leirumyndun á gleri í holu HN-2 má sjá í þunnsneið á 70 m dýpi en þar er ysta lag-palagónítið orðið að leir. Leirumyndun glersins hefst því frekar snemma en fyrsta leirumyndun verður greinilega á palagónítinu sjálfu en ekki í glerinu. Í holu HN-2 má finna eitthvað af fersku gleri niður á u.þ.b. 780 m þar sem vottar fyrir ferskum glerkjörnum í stærri glerkornum. Hins vegar virðist ferskt gler þó að mestu horfið á u.þ.b. 420 m dýpi þar sem hraunlög er að finna, en þar er allt „interstitial“ gler orðið að leir. Dæmi um alummyndað gler er sýnt á mynd 31.

Algengast er að glerið ummyndist í leir en þó verður einnig vart við aðra ummyndun á því. Dæmi eru um að í holunni ummyndist glerið einnig í zeólíta og eitt tilfelli sýnir kalsít ummyndun á gleri eins og sjá má á mynd 32. Neðar í holunni má svo sjá ummyndunarsteindir eins og wairakít, kvars og klórít í glerinu (tafla 10).



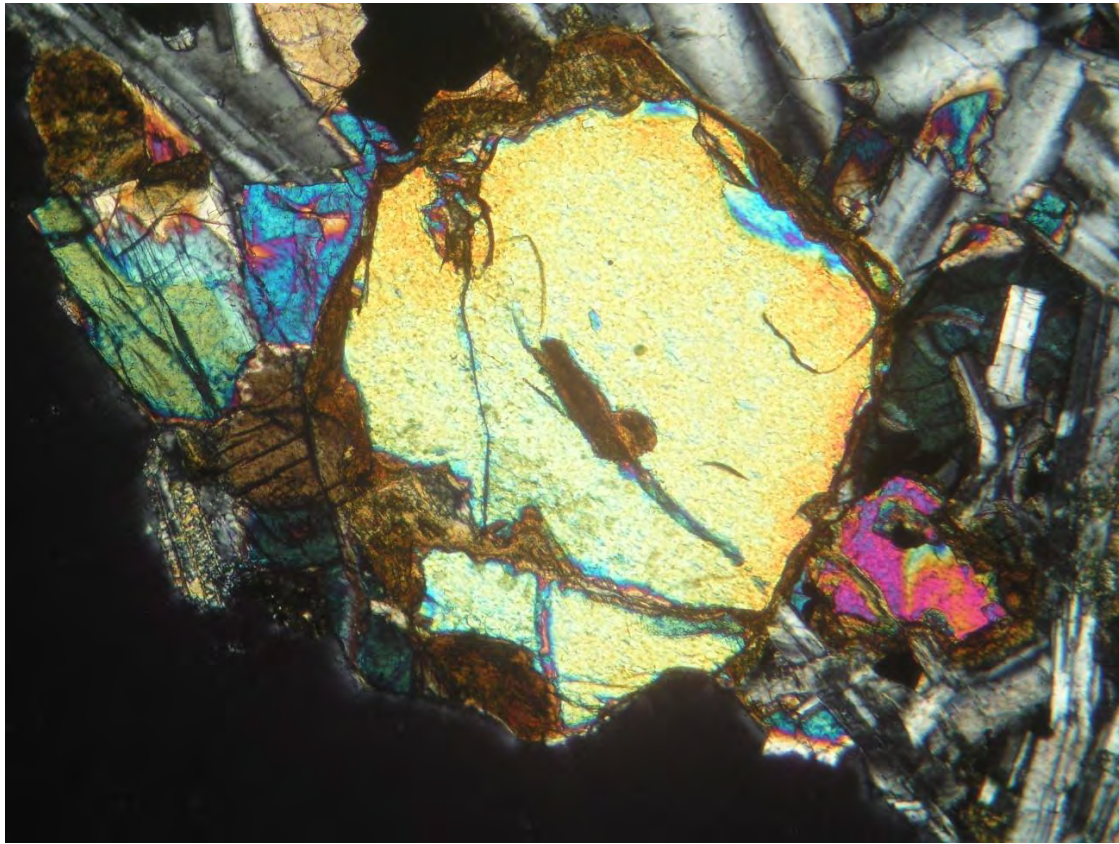
Mynd 31. Ummyndað gler í 1450 m í HN-2. Þarna má sjá leifar af palagónitrima meðfram köntum glersins en hann hefur nú ummyndast í leir. Fyrir innan hann er svo smektít-ummyndað gler. Breidd myndar er 3 mm.



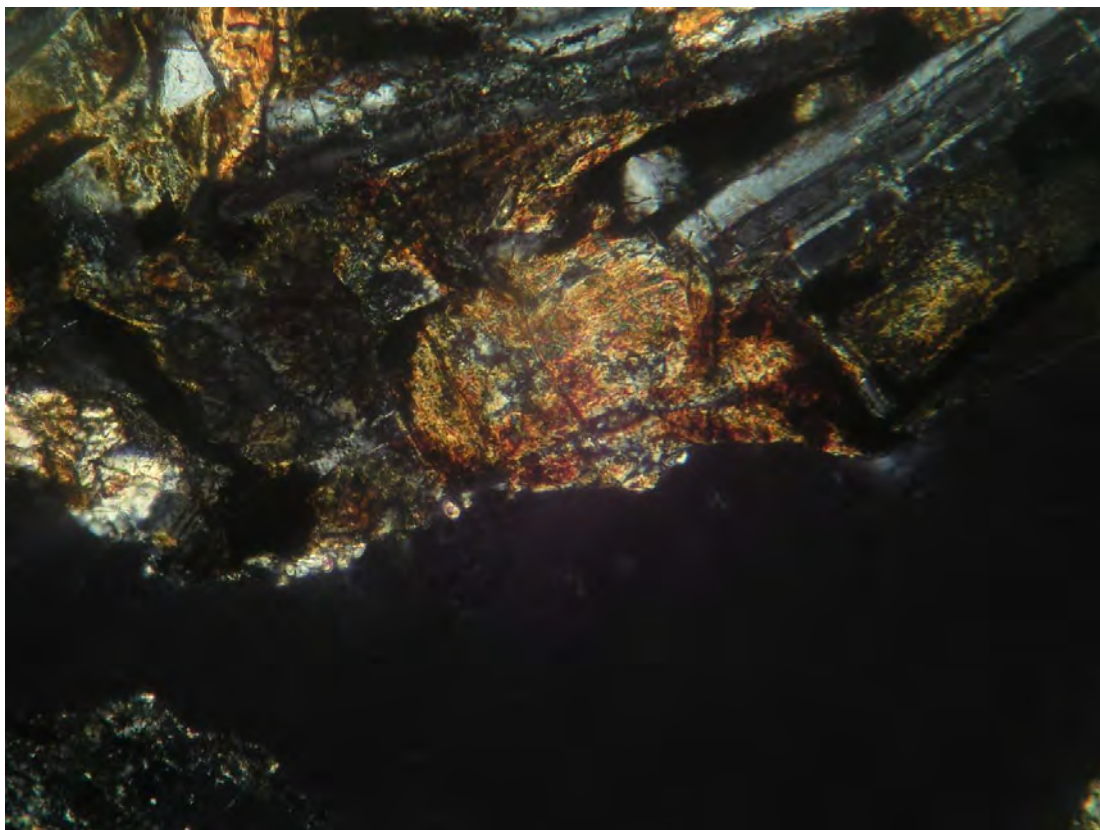
Mynd 32. Glerkorn í HN-2 sem hefur ummyndast í kalsít. Breidd myndar er 3 mm.

Ólivín: Samkvæmt þunnsneiðaskoðun virðist ólivín vera alveg ummyndað á 1096 m dýpi en þar fyrir neðan verður það fersklegra aftur (þunnsneið á 1136 m dýpi). Í 1190 m er ólivín hins vegar alveg ummyndað og allt niður í 1324 m þar sem svolítið sést inn á milli af ólivíni sem er rétt farið að ummyndast (mynd 33). Þar fyrir neðan er ólivín alveg ummyndað.

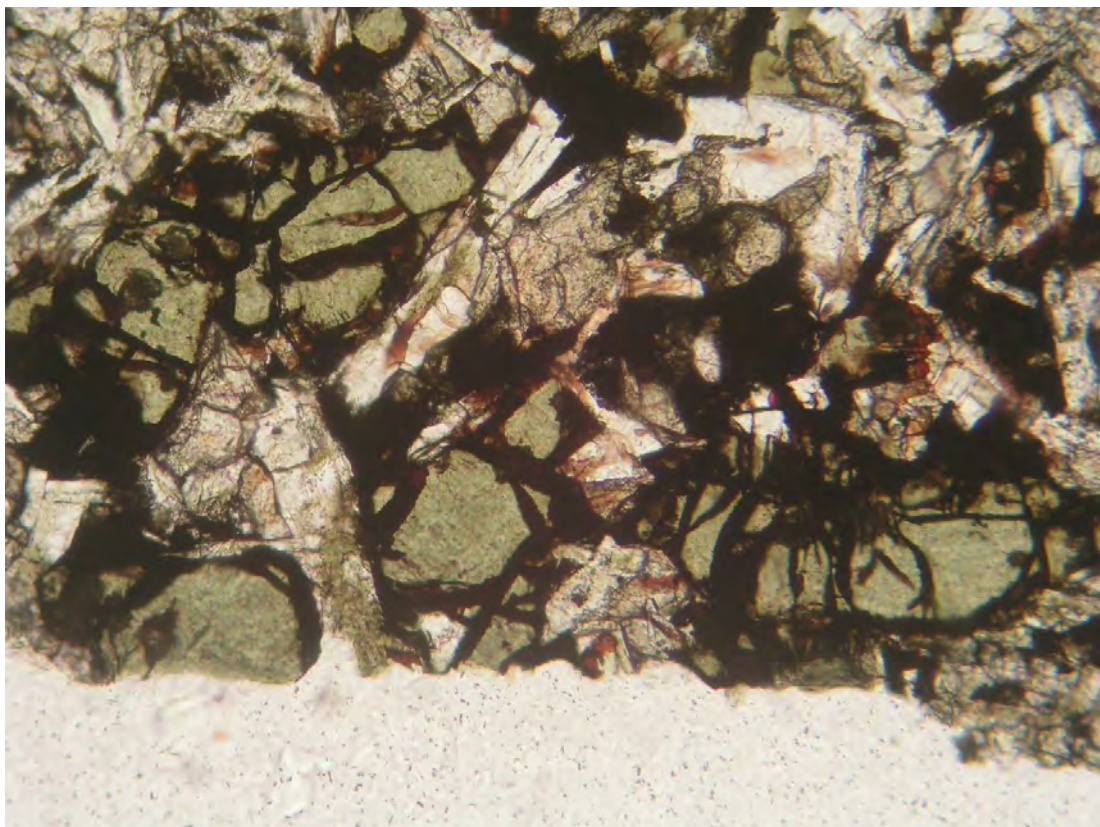
Algengast er að ólivín ummyndist í leir. Einstaka dæmi eru um að ólivín finnist ummyndað í kalsít (t.d. í þunnsneið af 1522 m dýpi og einnig á 1450 m dýpi). Stundum er leirinn hápleókróískur og fremur litfagur, virðist vera blandlag (t.d. í 1450 m), en ofar í holunni er leirinn smektítlegri. Fyrstu merki um ummyndun á ólivíni eru yfirleitt brúnar sprungur og brúnir kantar en þar er líklegast um leirumyndun að ræða (mynd 33). Í raun er erfitt að sjá nokkra stigmögnun á ummyndun ólivíns. Algengast er að það sjáist ummyndun í sprungum og köntum en skyndilega eru kristallarnir alveg ummyndaðir (myndir 34 og 35).



Mynd 33. Ólivín ummyndað í leir í köntum og sprungum á 1324 m dýpi í HN-2. Breidd myndar er 1,25 mm.



Mynd 34. Ólivín alveg ummyndað í leir á 1324 m dýpi í HN-2. Breidd myndar er 1,25 mm.

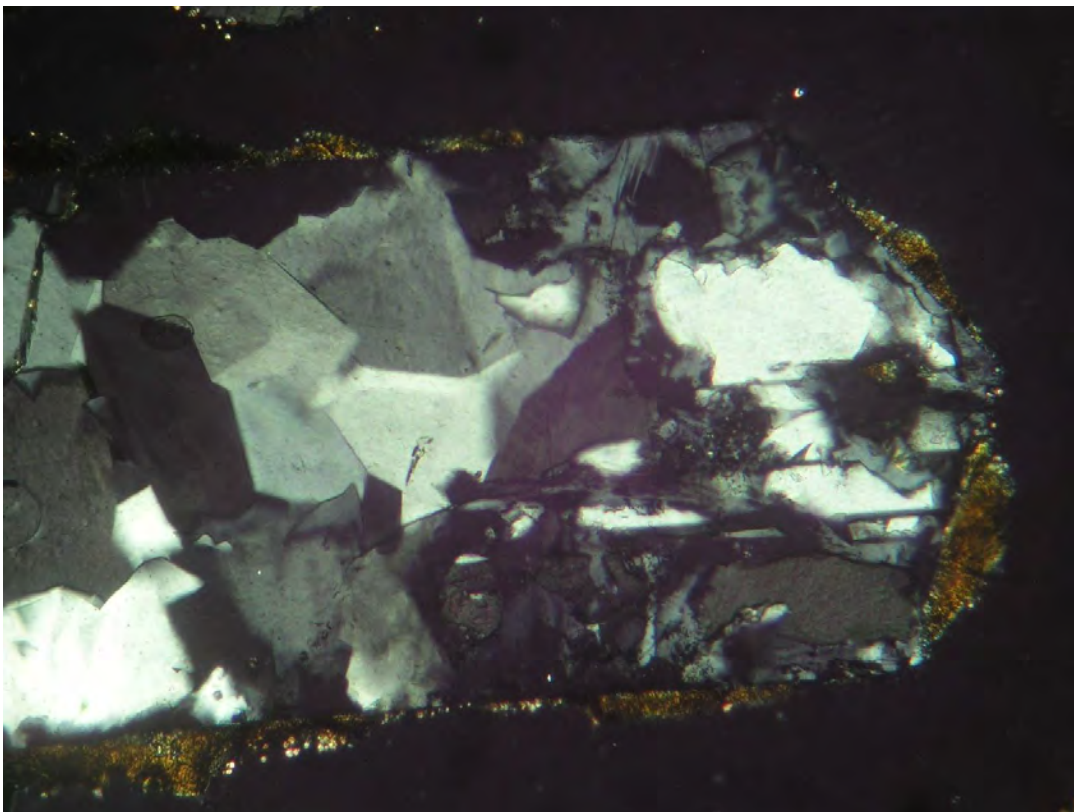


Mynd 35. Ummyndað grænt fyrrverandi ólivín á 1522 m dýpi í HN-2. Breidd myndar er 1,25 mm.

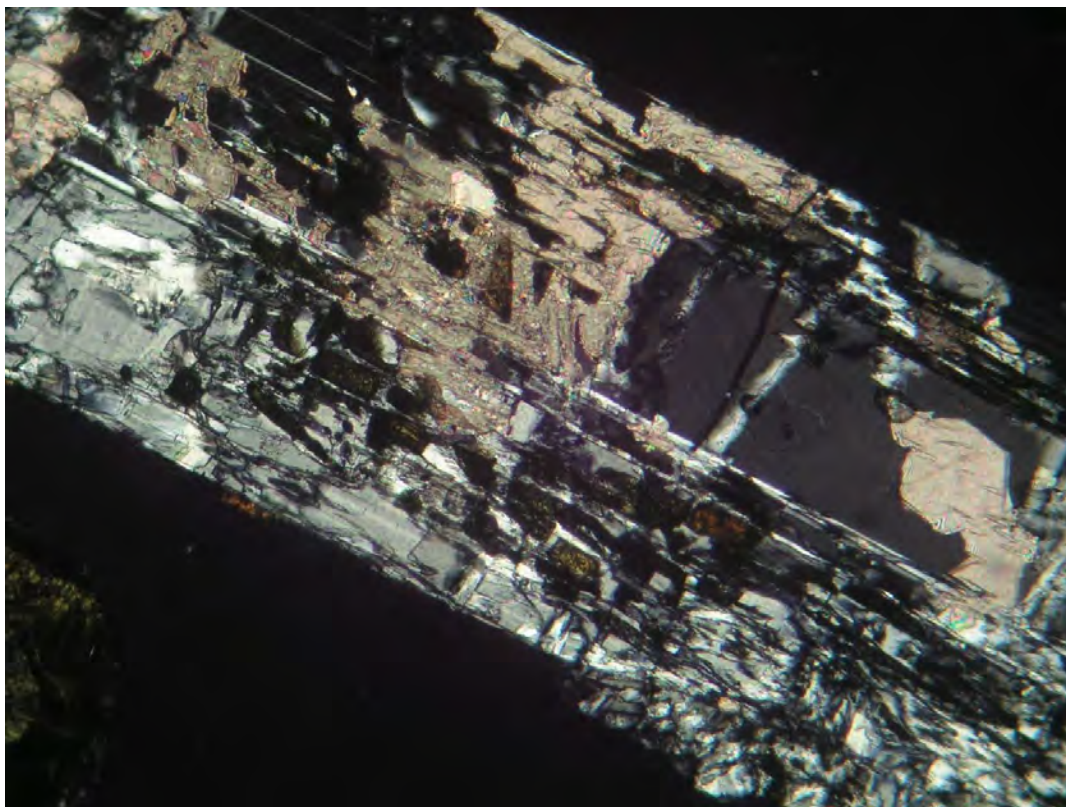
Plagióklas: Ekki ber á ummyndun á plagióklas fyrr en í 582 m þar sem plagióklas dílar og einhverjir plagióklasir í grunnmassa eru verulega zeólíta-ummyndaðir. Þar virðist um staðbundna ummyndun að ræða því plagióklas verður aftur ferskur þar fyrir neðan þó einstaka leirsprungur sjáist þó á 662 m dýpi. Á 878 m örlar á leirumyndun í sprungum í plagióklasnum og þar fyrir neðan virðist ummyndun vera hafin. Sérstaklega er áberandi að dílar virðast oft verða zeólíta-ummyndaðir (t.d. í 952 m, 990 m, 1078 m og 1096 m) eins og sjá má á mynd 36. Ummyndun virðist svo minnka lítillega í kringum 1190 m en þar er líklegast um innskot að ræða og því fremur fersklegt berg.

Dílar eru yfirleitt meira ummyndaðir en kristallar í grunnmassa. Í 1252 m eru einhverjir plagióklasir ummyndaðir í zeólíta og einnig í kvars. Zeólítaummyndun er einnig greinileg í 1324 m.

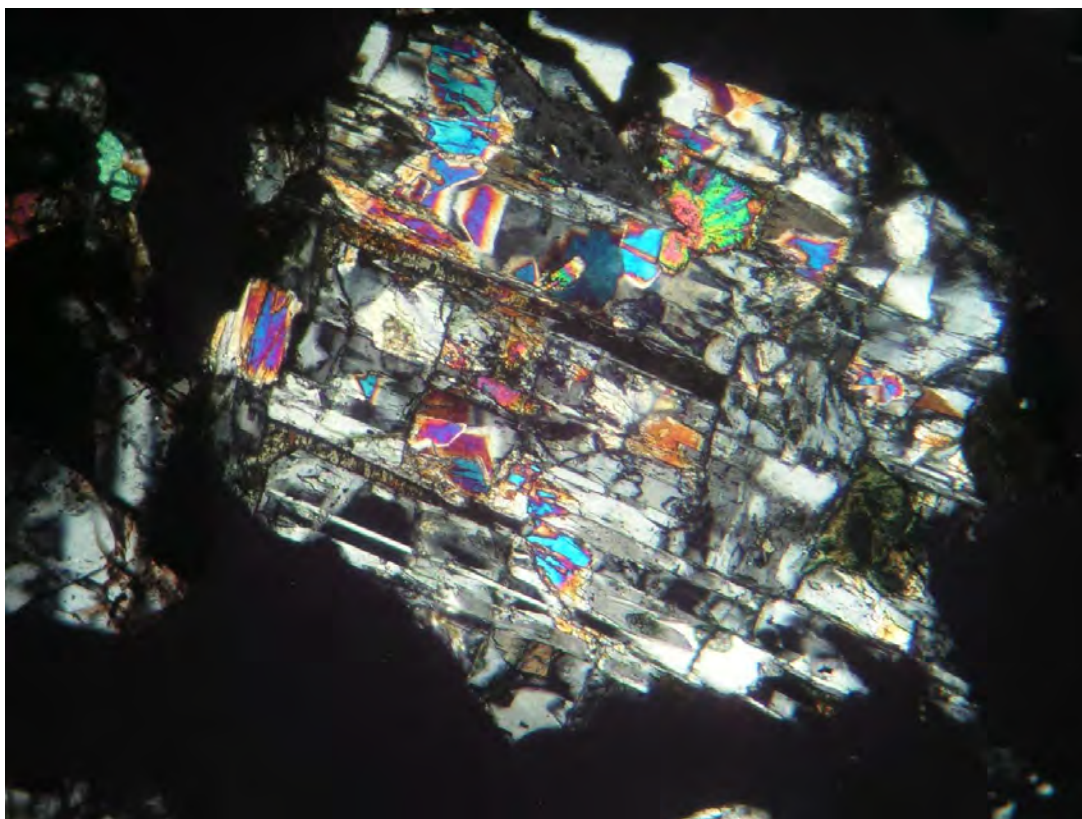
Í 1398 m er plagióklas nánast að fullu ummyndaður í albít og í þunnsneiðum þar fyrir neðan er albítisering komin vel á veg, mismikið þó (t.d. mynd 37 þar sem einnig má sjá kalsítummyndun). Leirsprungur sjást alltaf og í 1650 m hefur orðið epidót ummyndun á plagióklas. Í 1752 m hefur plagióklas ummyndast í epidót, prehnít, klórít og albít (mynd 38) og í 1780 má sjá epidót sprungur, eitthvað albít, kalsít og epidót en í þeirri sneið er plagióklas þó stundum mjög fersklegur. Í 1832 m er mjög mismikil ummyndun, allt frá svolitlum leirsprungum og upp í kvars. Algengt er að plagióklasinn sé mismikið ummyndaður innan sama sýnis. Í 1926 m virðist hann ekki mikið ummyndaður en þar er aðallega um leirsprungur að ræða. Þar fyrir neðan er plagióklasinn nánast orðinn að albíti.



Mynd 36. Zeólítaummyndaður plagióklas dill í 990 m í HN-2. Breidd myndar er 1,25 mm

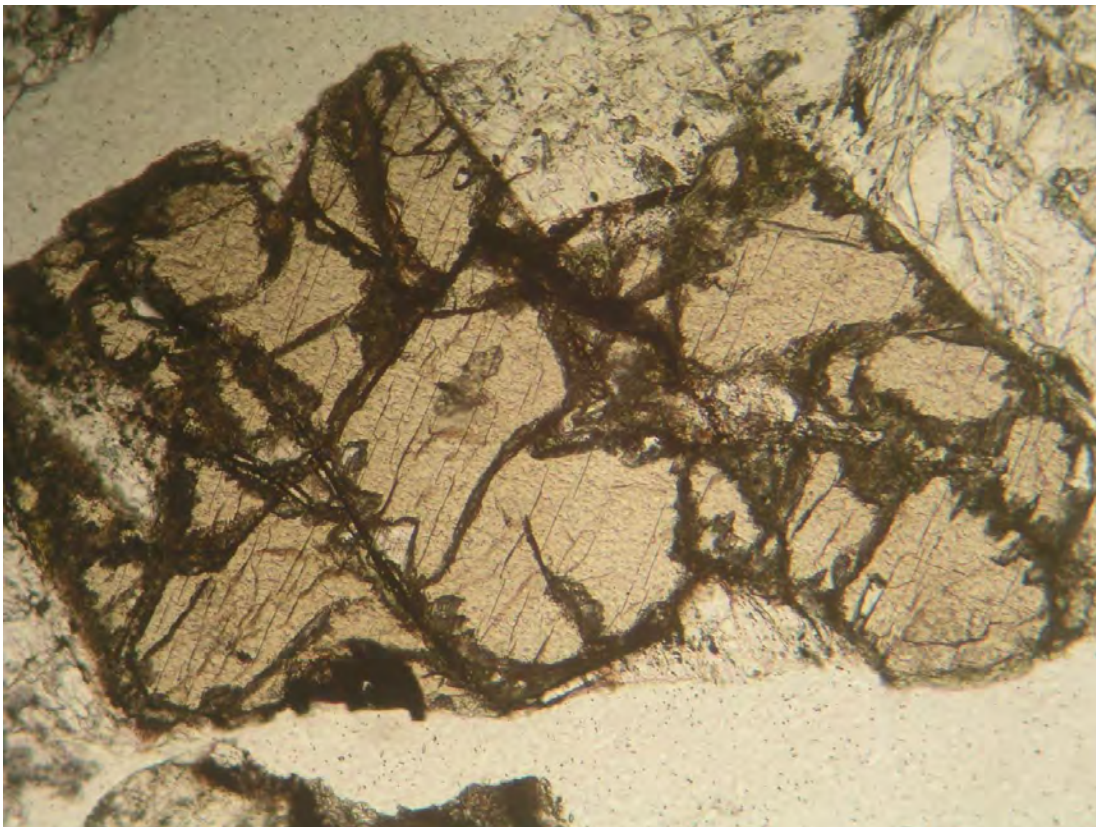


Mynd 37. Leir, albít og kalsít ummyndun á plagióklas dílum í 1450 m í HN-2. Breidd myndar er 3 mm.



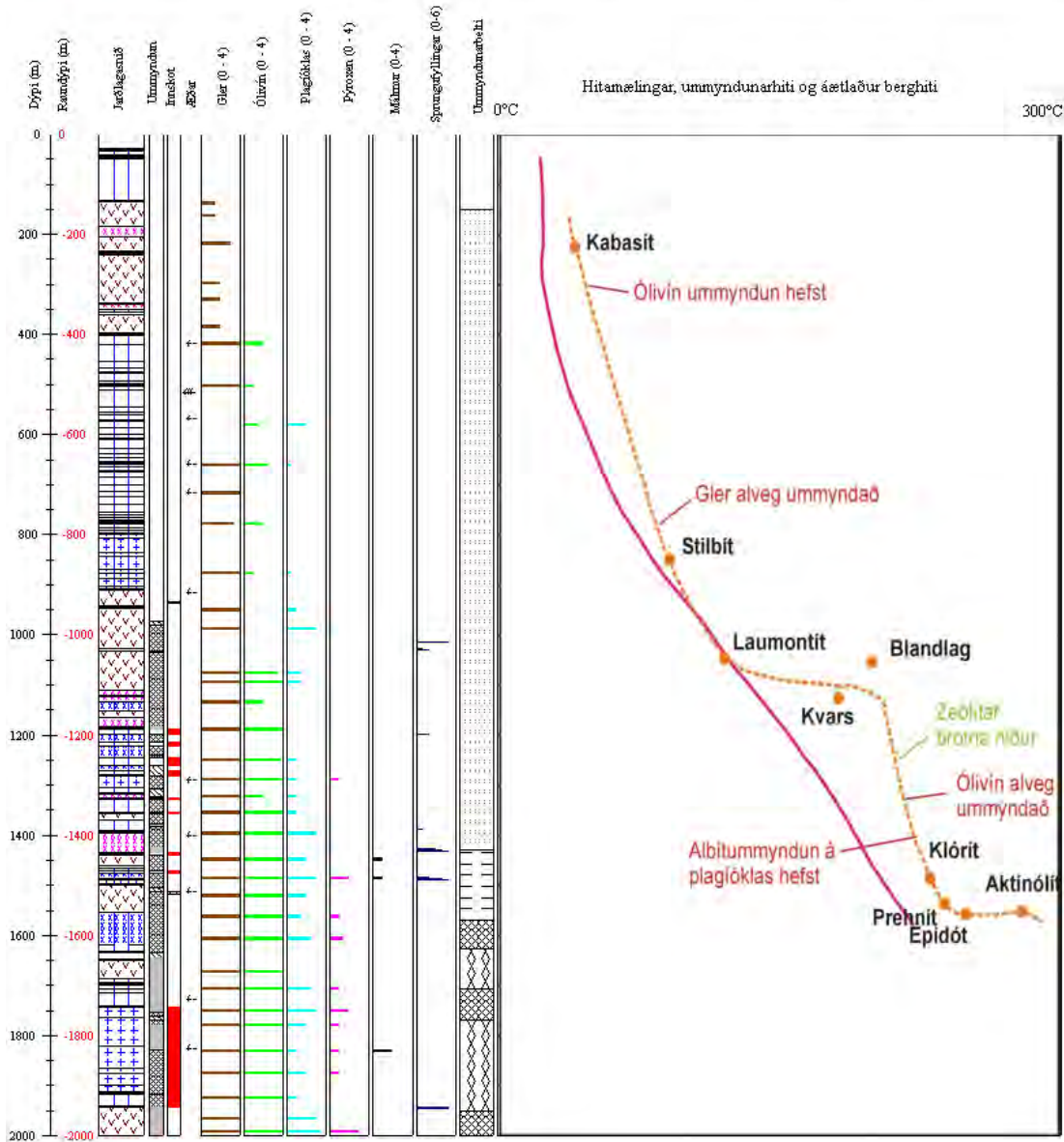
Mynd 38. *Plagióklas sem hefur ummyndast í albít, epidót, prehnít og klórít. HN-2 í 1752 m. Breidd myndar er 1,25 mm.*

Pýroxen: Í þessari holu virðist pýroxen taka mun seinna við sér í ummyndun heldur en plagióklas. Fyrstu merki ummyndunar eru í þunnsneið á 1290 m dýpi þar sem er eins og komnar séu svoltið af leirsprungum. Í þunnsneiðum þar fyrir neðan er ekki talið að nein ummyndun sé á pýroxen fyrr en á 1488 m dýpi þar sem leirsprungur eru taldar hafa myndast. Ef eitthvað sést er þetta sú ummyndun sem er tekið eftir, þ.e. einhverjar leirsprungur (mynd 39). Í 1708 m virðist pýroxen mun minna ummyndaður en plagióklas í grófkornóttari hluta bergsins en vel ummyndaður í þeim finkornóttari. Í 1780 m fer að bera svoltið á mikið ummynduðu pýroxeni með lithverfri og þráðóttri ummyndun (amfiból) en í þunnsneiðunum fyrir neðan er ummyndun fremur misjöfn, allt frá einni og einni leirsprungu og upp í mikið ummyndað pýroxen. Í 1994 m er pýroxen orðinn mikið ummyndaður. Amfiból er hvergi áberandi en finnst þó í leirgreiningum, sérstaklega neðan 1724 m.



Mynd 39. *Ummyndunarsprungur í pýroxen, líklega leir. HN-2 í 1752 m. Breidd myndar er 1,25 mm.*

Málmur: Samkvæmt þunnsneiðaskoðun sést engin ummyndun á málmsteindum fyrr en í 1450 m þar sem svoltið af spheni er farið að myndast í köntum málmsteindanna. Ekkert verður vart við ummyndun þeirra aftur fyrr en í 1832 m þar sem eitt og eitt málmkorn er alveg ummyndað en önnur fersk.



Mynd 40. Ummyndun frumsteinda í holu HN-2 borin saman við áætlaðan berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul, slitin lína).

3.2.1.2 Bergummyndun í holu HN-5

Í töflum 13, 14 og 15 í viðauka II og á mynd 42 má sjá hvernig frumsteindir í holu HN-5 ummyndast.

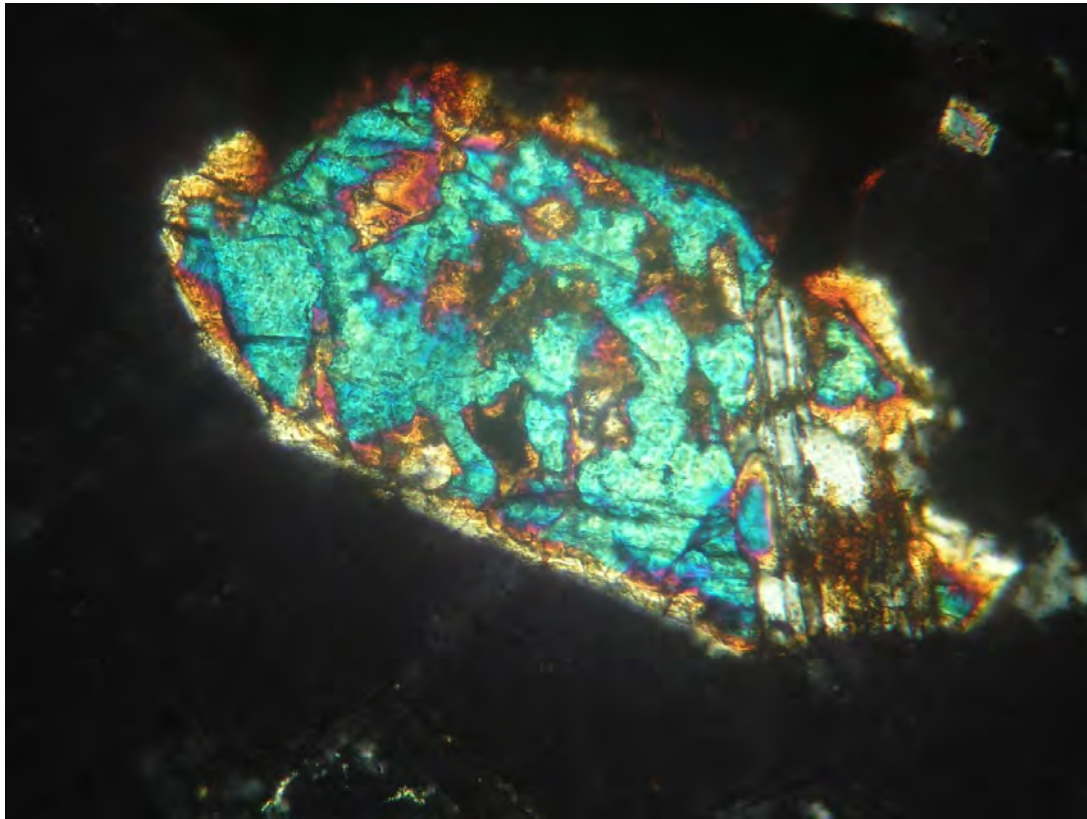
Gler: Lítið finnst af gleri í fyrstu þunnsneiðunum í HN-5. Í 264 m er gler hins vegar nánast alveg ferskt, aðeins örþunn palagónitrönd meðfram köntum. Í næstu sneið á 366 m er palagónítisering komin nokkuð á veg og er palagónítið að miklu leyti orðið að leir. Mikið er þó eftir af fersku gleri enn sem komið er. Svo virðist sem ummyndun á gleri fari nokkuð hratt vaxandi neðan 400 m en í 466 m er interstitial gler alveg ummyndað en glerkorn og hlutkristallað gler er palagónítiserað allt að 30%. Í sumum tilfellum er ummyndun á gleri komin í zeólíta (og leir). Í 506 m er mikið eftir af fersku gleri en í 550 m er gler alveg ummyndað í smektít og er horfið í ummyndun þar fyrir neðan. Í flestum tilfellum ummyndast glerið yfir í smektít en í einstaka sýnum sjást zeólítar einnig. Í 1098 m má sjá kvarsummyndun á glerinu og einnig má annað slagið sjá kalsít (1166, 1232 m t.d.). Í 1702 m virðist sem glerummyndun sé komin í klórít en litlu neðar í 1844 m er glerið dökkbrúnt og frekar smektítlegt. Það sama á við um mikið af glerinu alveg niður á 1902 m. Í 2014 m má sjá epidót ummyndun á glerinu.

Ólivín: Strax í 56 m örlar á umyndun á ólivíni sem virðist vera lítillaga ummyndað í sprungum (mjög lítið þó) og einnig sést svoltil ummyndun (oxun) í 186 m. Ólivín er hins vegar ekkert ummyndað í 264 m og óvíst með ummyndun á því þar til í 506 m þar sem ólivín er fremur fersklegt í stærri kristöllum en annars virðist það horfið. Ummyndun virðist svo aukast smám saman allt niður í 790 m þar sem allt ólivín er ummyndað. Litlu neðar, eða í 800 m er eitthvað svolítið eftir af fersku ólivíni og enn glittir í ferska kjarna þar fyrir neðan. Frá 930-1166 m sést ekkert ólivín í sneiðunum og ekki er ljóst hvort það er af því að það er alveg ummyndað eða hvort það er hreinlega ekki til staðar (eða erfitt að finna það). Í þunnsneið á 1200 m dýpi finnst hins vegar alveg ummyndað ólivín og eftir það sést ekkert af fersku ólivíni.

Plagióklas: Ummyndun á plagióklas sést ekki fyrr en í þunnsneið á 506 m dýpi þar sem greinilegar leirsprungur eru komnar í kristallana. Í 550 m eru dýlar farnir að ummyndast, í zeólíta og leirsprungur. Leirsprungur sjást í plagióklas þar fyrir neðan og helst það þannig allt niður í 1026 m þar sem dýlar virðast á góðri leið með að hverfa í albít. Í 1038 m sést illa í kristallana þar sem hlutkristölluðu kornin eru mjög „skítug“. Leirsprungur halda svo áfram að herja á plagióklasinn en albítisering lætur aftur á sér kræla í 1200 m og virðist plagióklasinn halda sér samt nokkuð ferskum (með leirsprungum og einhverri albítiseringu) allt niður í 1574 m þar sem hann er albítiseraður að miklu leyti og helst þannig allt niður í 1680 m þar sem hann er nokkuð ferskur, enda um líklegt innskot að ræða. Á sama stað er þó pyroxen tiltölulega mikið ummyndaður. Epidót ummyndun sést í 1798 m og í 1902 m hefur plagióklasinn ummyndast í leir, prehnít, albít, epidót og klórít. Annars er albítummyndun ráðandi.

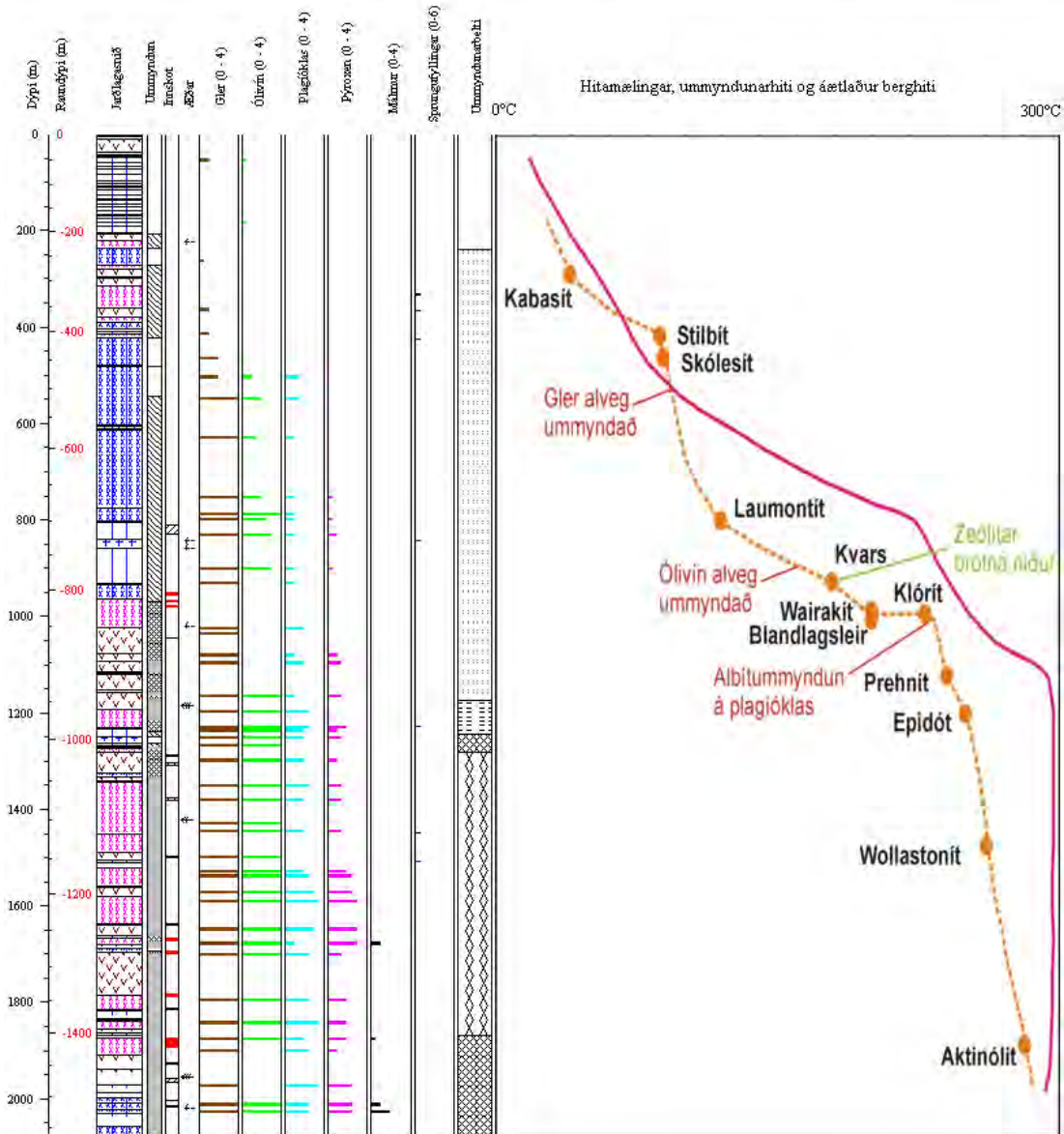
Pýroxen: Í 754 m örlar á svolitilli ummyndun í sprungum og köntum á pýroxen. Ummyndunin er svolítið óljós og e.t.v. þarf að skoða þetta betur en svolitil óvissa ríkir um þetta allt niður í 1098 m þegar pýroxen virðist svolítið sprunginn og farninn að ummyndast meðfram köntum. Í 1166 m virðist sem slokkun sé ójöfn og pýroxeninn er svolítið „skítugur“. Í 1232 og 1238 m eru einhvers konar blettir í pýroxeninum sem virðist vera leir (sjá mynd 41). Í 1680 m verður hins vegar vart við amfiból ummyndun á pýroxen en hún sést ekki í næstu sneiðum á eftir og verður hennar ekki vart aftur fyrr en í 1974 m þar sem amfiból

ummyndun sést á mörgum kristöllum. Neðarlega í holunni, þar sem amfiból hefur ekki fundist, verður pýroxen ljós í köntunum. Það örlar á amfiból ummyndun í 2014 m og einnig í 2028 m.



Mynd 41. Ummyndunarblettir í pýroxen á 1232 m dýpi í HN-5. Breidd myndar er 0,5 mm.

Málmur: Ummyndun á málmum kemur fyrst fram í 1680 m. Þar má sjá að í einhverjum tilvikum eru málmsteindir með óreglulega kanta sem hafa umbreytst í sphené en einhver hluti bergsins virðist einnig vera með alveg ummyndaðar málmsteindir sem eru horfnar í sphené. Ekki sést nein ummyndun á málmsteindum aftur fyrr en í 1878 m þar sem talið er að málmur sé farinn að ummyndast. Í 2014 m eru svo málmsteindir með ljósbrúnum köntum í mikilli stækkun (líklega sphené) og í 2028 m er hann mikið til ummyndaður.



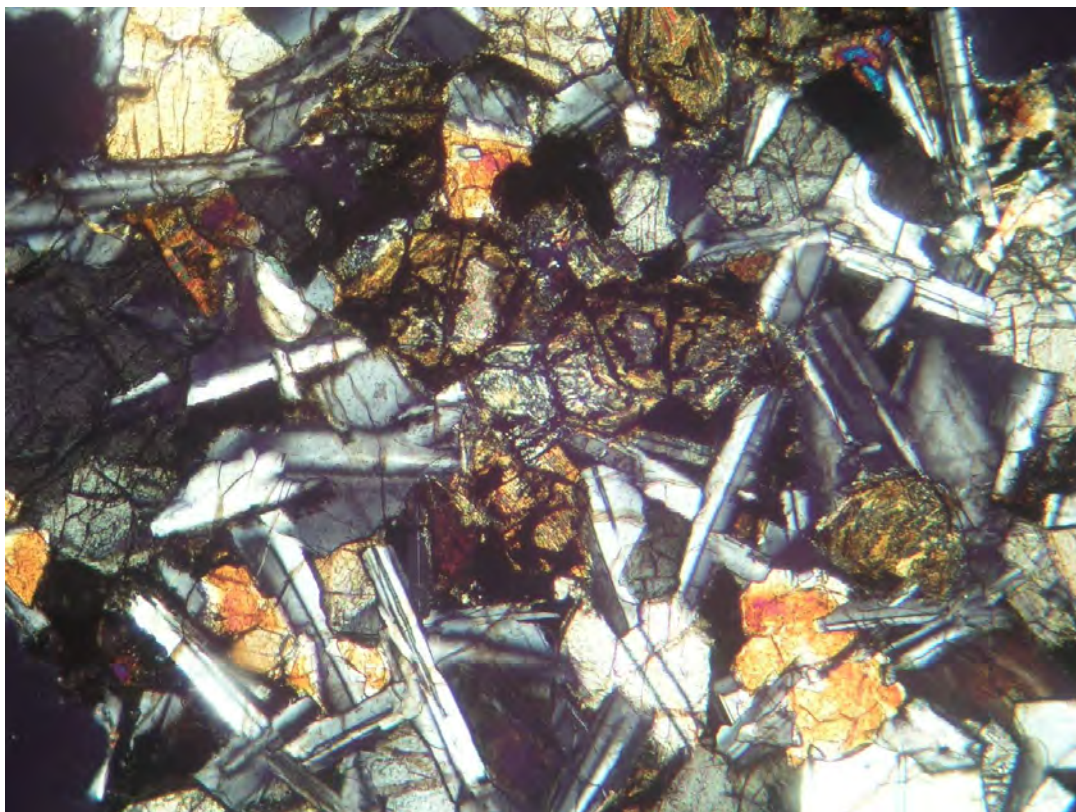
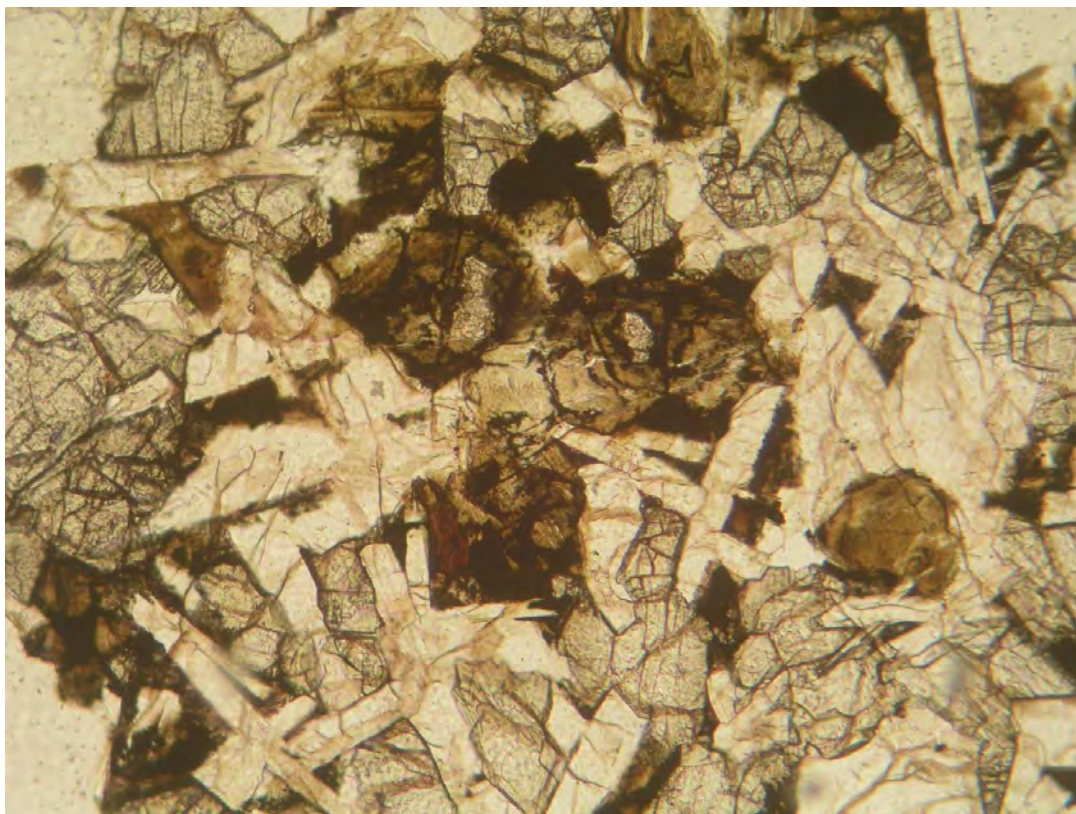
Mynd 42. Ummyndun frumsteinda í holu HN-5 borin saman við áætlaðan berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul slitin lína).

3.2.1.3 Bergummyndun í holu HN-8

Í töflum 16, 17 og 18 í viðauka II og á mynd 44 má sjá hvernig frumsteindir ummyndast í HN-8.

Gler: Fyrsta þunnarneiðin í HN-8 er á 200 m dýpi og er þar lítið gler að sjá. Svo virðist samt sem glerið í berginu sjálfu sé alveg ummyndað en erfitt er að leggja mat á ummyndunina í hlutkristallaða berginu. Litlu neðar, eða í 220 m, eru smæstu glerkornin alveg ummyndað en þau stærri sýna mismikla ummyndun. Um er að ræða palagónítiseringu sem er þó í flestum tilvikum orðið að leir. Í 380 m virðist gler nokkuð lítið ummyndað eða upp undir 30%. Þar hefur glerið umbreytt í palagónít sem er í flestum tilvikum orðið að leir. Í 536 m er gler alveg horfið og þar fyrir neðan virðist allt gler ummyndað. Niður á 800 m er að mestu um smektít að ræða en í 800 m hefur glerið að einhverju leyti ummyndast í zeólíta. Litlu neðar, á 834 m dýpi, hefur hluti þess einnig umbreytt í kalsít. Í 1478 m er gler orðið að klóríti og jafnvel finnst eitthvað af spheni. Í 2182 m virðist glerið ekki jafn ummyndað og áður, þ.e. það er ekki komið í klórít og virðist ekki hafa lent í miklum hita.

Ólivín: Í 200 m er svolítill oxun á ólivín í sprungum og köntum, en minni kristallar eru meira oxaðir. Í 380 m sést lítið af ólivíni en það virðist vera nokkuð ferskt. Hins vegar er allt ólivín ummyndað í 536 m (mynd 43). Í 636 m er ummyndun mismikil, allt frá lítilli ummyndun og upp í alummyndað og það á einnig við um sýnin fyrir neðan. Þótt ummyndun aukist jafnt og þétt þá finnst oft fersklegt ólivín inn á milli niður í 1122 m þar sem allt ólivín er ummyndað. Hins vegar er oft um fersklegt ólivín að ræða í grófkornóttasta hluta sýnanna með einni undantekningu þó, sem er á 892 m þar sem ólivín er alveg ummyndað í kristallaða hluta sýnisins en er nánast ferskt í túffhlutanum. Yfirleitt ummyndast ólivín í fyrstu með oxun og leirumyndun meðfram sprungum og köntum. Leirumyndun virðist vera ráðandi en spurning hvers konar leir þetta er, oft er hann bjartur og pleókróískur (e.t.v. blandlagsleir) en stundum smektítlegri.

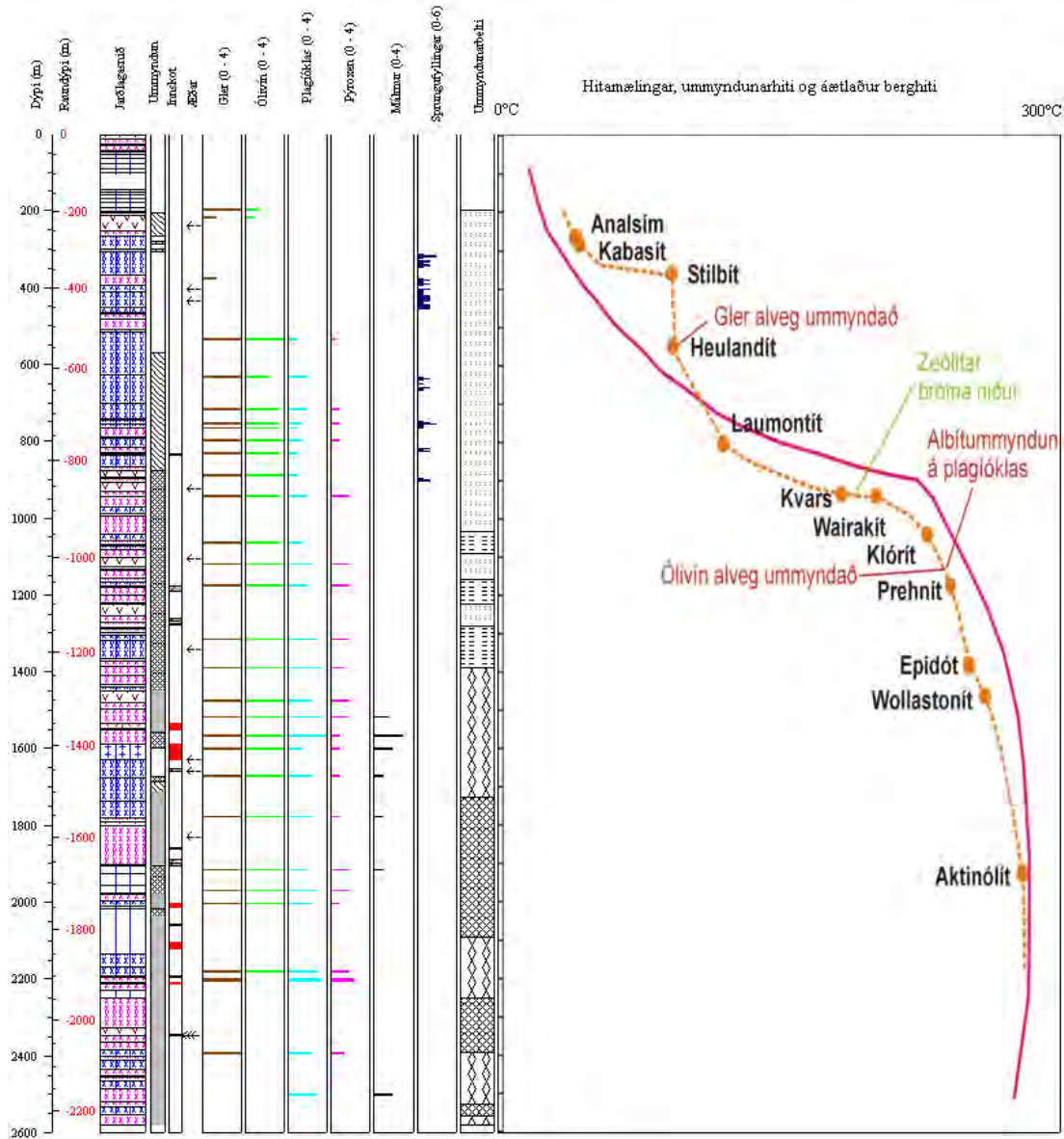


Mynd 43. Ummyndað ólivín (oxun, leir og kalsít) á 536 m dýpi. Efri myndin er tekin með einskautuðu ljósi en sú neðri með tvískautuðu. Breidd mynda er 1,25 mm.

Plagióklas: Á 536 m dýpi sjást fyrstu merki ummyndunar á plagióklas í formi leirsprungna. Ummyndun eykst svo þegar neðar dregur og í 636 m er ummyndun fremur misleit, allt frá einhverjum leirsprungum og upp í næstum alummyndaðan plagióklas, líklega leirummyndaður (gráleitt í tvískautuðu ljósi og smábert). Dílar á því dýpi sýna fremur óreglulega slokknun. Það sama má segja um sýni frá 720 m en fyrir neðan það virðist ummyndun minnka aðeins aftur. Á 800 m eru einhverjir dílar með leirsprungum og zeólítum en annars eru leirsprungur ráðandi framan af. Svo virðist sem albitummyndunar verði ekki vart fyrr en á 1122 m dýpi. Mikillar ummyndunar verður svo vart í 1318 m þar sem plagióklas virðist nánast alveg ummyndaður (sérstaklega minni kristallar). Í 1392 m sést epidót, wairakít, albit og klórít ummyndun á plagióklas og í 1478 m hefur ummyndun orðið í prehnít, albit og kalsít og er plagióklas þá að mestu leyti horfinn. Ummyndun minnkar svo aftur neðan 1570 m en þar eru líka einhver innskot á ferðinni. Þó er innskotum ekki alltaf um að kenna en svo virðist sem plagióklas hverfi aldrei alveg í holunni, miðað við þunnsneiðaskoðunina.

Pýroxen: Fyrst verður vart við ummyndun á pýroxen í 536 m þar sem talið er að leirumyndun sé til staðar. Í 720 m verður einnig vart við einhverja ummyndun en óljóst er hvað það er sem myndast. Litlu neðar, eða í 756 m, er erfitt að sjá ummyndun á pýroxen en þó er talið að einhvers konar ummyndun sé hafin. Hennar verður þó varla vart þar fyrir neðan þar til í 946 m þegar óþekkt ummyndun virðist farið að láta á sér kræla. Í þunnsneið á 1066 m dýpi verður ekki vart við ummyndun á pýroxen en í 1122, 1178 og 1318 m virðist hann svolítið „óhrein“. Í 1392 m virðast kantar pýroxen kristallanna heldur óljósari en áður. Í 1478 m er mismikil ummyndun á pýroxen og í sumum kornum virðist sem frumsteindin sé orðin að amfibóli. Í 1520 m eru ljósir kantar á pýroxeni og einnig í 1570 m en ekki verður vart við neitt amfiból í þeim sneiðum og er það svo niður á 1780 m. Næsta þunnsneið á eftir er í 1918 m og þar eru kantar pýroxens orðnir ljósir og svolítið óreglulegir. Amfiból ummyndun er þar hafin í mörgum tilvikum en í næstu sneiðum fyrir neðan verður hennar ekki vart (1972 og 2006 m) en þar eru kantar pýroxens orðnir ljósir. Amfibóls verður aftur vart í 2182 m og virðist vera til staðar í þeim sýnum sem á eftir koma.

Málmur: Fyrst verður vart við ummyndun á málmsteindum í 1520 m þar sem sphené ummyndun er hafin og í einhverjum tilfellum eru málmsteindir alveg horfnar. Í 1570 m virðast málmsteindir mikið ummyndaðar, bæði í ísúra berginu og í basaltinu (þó meira í ísúra berginu). Á 1602 m eru lítil málmkorn oft alveg farið í sphené en þau stærri eru enn mikið til fersk. Þar fyrir neðan virðist ummyndun á málmsteindum fara minnkandi og kantar þeirra eru óljósir í 1674, 1780 og 1918 m. Eftir það verður ekki vart við ummyndun málmsteinsins fyrr en á 2504 m dýpi þar sem kantar málmkristalla eru farnir að hleypa ljósi í gegn.


Mynd

44. Ummýndun frumsteinda í holu HN-8 borin saman við áætlaðan berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul, brotin lína).

3.2.2 Dreifing ummyndunarsteinda

Almennt séð er ummyndun mest og ummyndunarsteindir flestar þar sem jarðlög hafa verið gropin og/eða sprungin; þar sem vatn hefur náð að flæða nokkuð auðveldlega um bergið og leysa upp efni úr frumsteindum þess. Í efri hluta holanna má segja að algengast sé að ummyndunarsteindir falli út í holrými bergsins án þess að mikið sjái á frumsteindum þess. Undantekning frá því er að sjálfsögðu gler en ummyndun þess hefst tiltölulega fljótt eins og áður hefur komið fram. Neðar í holunum er algengara að frumsteindir bergsins séu að leysast upp, ásamt ummyndunarsteindum sem myndast höfðu áður, og aðrar ummyndunarsteindir komi í stað þeirra. Þó má einnig sjá ummyndunarsteindir sem myndast hafa í sprungum.

Nokkrar ummyndunarsteindir myndast við ákveðið hitastig og eru þær því notaðar sem vísbending um þann hita sem jarðlögin hafa á einhverjum tímamarki náð. Hitatölur sem miðað er við eru niðurstöður rannsókna sem farið hafa fram á Íslandi frá því um 1970 (t.d. Hrefna Kristmannsdóttir, 1979; Schiffman et al., 1991; Hjalti Franzson, 1998).

3.2.2.1 HOLA HN-2

Á mynd 45 má sjá hvernig ummyndunarsteindir dreifast í holu HN-2. Gerður er greinarmunur á greiningu í þunnsneið og greiningu í svarfi en oftast er nokkuð gott samræmi á milli fyrstu greininga. Greinileg undantekning á því er þó í tilfellum prehníts og wairakíts en það er mun auðveldara að sjá í þunnsneið heldur en í svarfinu sjálfu. Það kemur því mun fyrr fram í þunnsneiðum en í svarfgreiningu. Á myndinni má einnig sjá röntgengreiningar á leir og amfibóli sem gerðar voru í holunni. Þar má sjá að í sýnum allt niður á 1374 m dýpi er smektít ráðandi. Í sýni frá 1484 og 1538 m dýpi sést blandlagsleir. Í sýni af 1604 m dýpi er greint klórít ásamt amfibóli. Ummyndun minnkar svo aftur þar fyrir neðan og í 1660 m dýpi er blandlagsleir greindur. Hann finnst allt niður á 1726 m dýpi. Frá 1808 m og niður á 1996 m dýpi er klórít greint. Þetta er í nokkru ósamræmi við þunnsneiðagreiningu (mynd 45) en þar má sjá að blandlagsleir virðist koma þónokkuð fyrr inn (í u.þ.b. 1150 m). Klórít virðist koma inn í rúmlega 1500 m og finnst samhliða blandlagsleir alveg niður á rúmlega 1700 m dýpi þar sem blandlag hverfur aftur. Blandlagsleirinn skýtur svo upp kollinum aftur (með klóríti) í sneiðum á 1832 m dýpi og svo er svolítil blandlagskarakter á leirnum á 1968 m (mjög líthverft og nokkuð ójafnt ris í einskautuðu ljósi). Neðsti hlutinn er því í sjálfu sér í ágætis samræmi við leirgreiningarnar þar sem bæði blandlags og klórít toppar finnst.

Kalsít (CaCO_3) finnst niður alla holuna en þó eru fyrstu merki þess fremur neðarlega (mynd 45). Fyrsta greining þess er á um 500 m dýpi, og eykst magn þess verulega neðan u.þ.b. 900 m og þá sérstaklega þegar nálgast 1400 m dýpi. **Aragónít** (CaCO_3) og „dogtooth“ kalsít finnst niður á tæplega 500 m dýpi og karbónathnúðar sjást í þunnsneiðum á um 200 og 500 m dýpi.

Kísilsteindir (SiO_2) eru hitaháðar og talið er að **ópall** myndist við minna en 120°C , **kalsedón** við $120\text{--}180^\circ\text{C}$ og við 180°C og hærri hita myndast **kvars**. Ópall, sem er alveg myndlaus, finnst niður á rúmlega 300 m dýpi miðað við þunnsneiðar. Kalsedón, sem finnst yfirleitt sem lagskipt, bláleit skán, sést í svarfinu frá u.þ.b. 500 m og sést alveg niður á um 1700 m dýpi. Við hærri hita sést að kalsedón breytist yfir í kvars en það heldur engu að síður lagskiptum eiginleikum sínum. Ekki verður vart við kalsedón svo djúpt í þunnsneiðum en þar hættir það að sjást í tæplega 1400 m. Kvars sést í fyrsta sinn á 1252 m dýpi í þunnsneið en fannst ekki í svarfinu fyrr en á 1354 m.

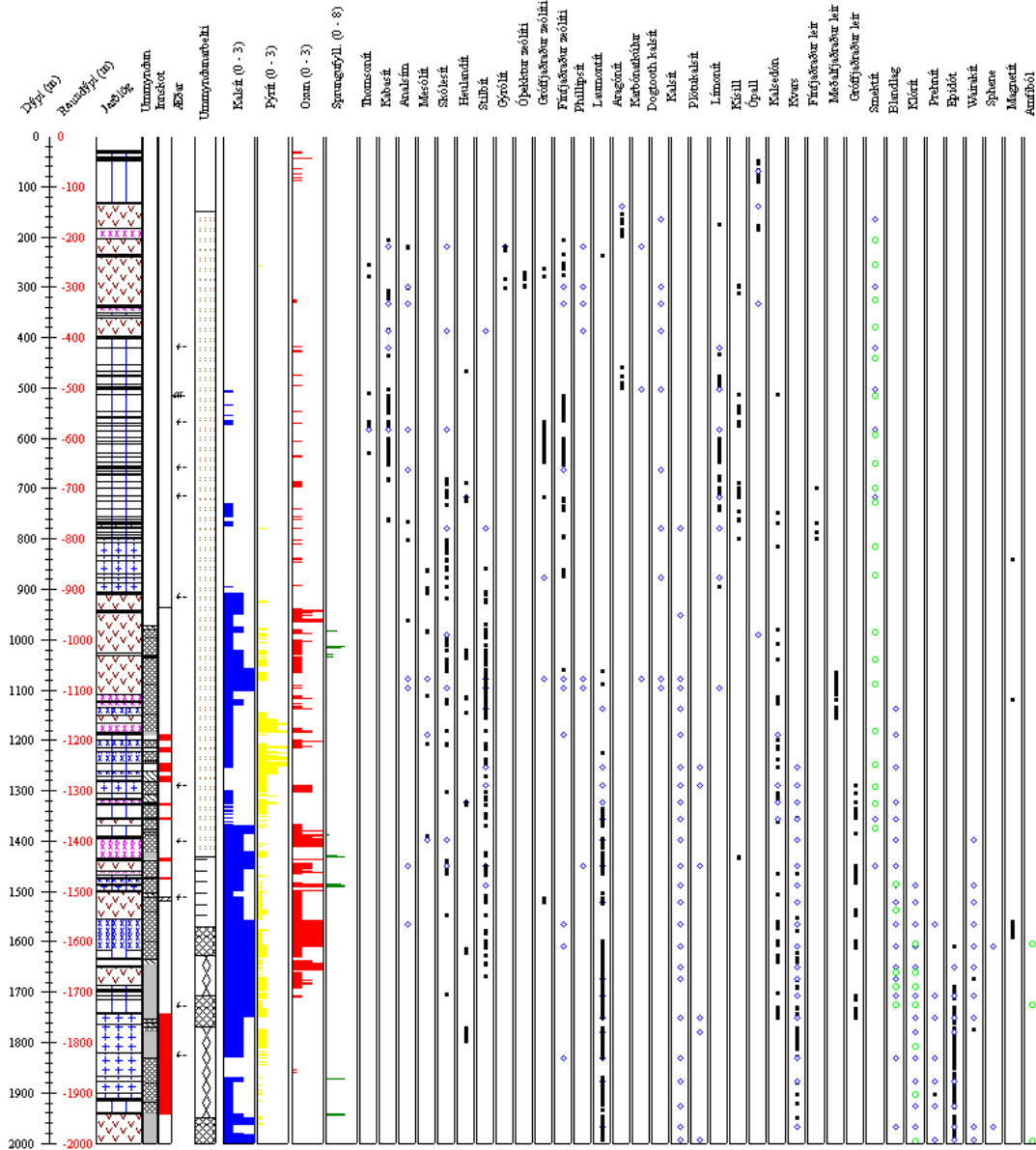
Zeólítar eru algengir ofan til í holunni að undanskildu wairakíti sem myndast við mun hærra hita en aðrir og finnst það því djúpt í holunni ásamt öðrum háhitasteindum. Algengir zeólítar í holu HN-2 eru **thomsonít**, **kabasít**, **analsím**, **stilbít/heulandít** og **mesólít/skólesít** og finnst þeir langt niður eftir holunna, stilbít allt niður á um 1800 m. Þeir eru hins vegar ekki stöðugir fyrir neðan u.þ.b. 1000 m þar sem kvars og wairakít virðast taka yfir að nokkru leyti. **Laumontít** sést í fyrsta sinn í 1062 m í svarfi en það myndast við hitastig meira en 120°C. Það finnst þó ekki í neinu magni fyrr en á um 1330 m dýpi og sést þá í svarfinu niður alla holuna.

Wairakít ($\text{KAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sést fyrst á 1674 m dýpi og verður fljótlega nokkuð algengt. **Prehnít** ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) (240°C) sést fyrst í svarfgreiningu á 1900 m dýpi. Mun auðveldara er að greina prehnít í þunnsneiðum en í víðsjárgreiningum og kemur það því mun fyrir fram í þeim, eða á 1564 m dýpi. **Epidót** ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{OH})(\text{SiO}_4)_3$) sést í einu svarfsýni á 1608 m dýpi en það er talið myndast við 230-250°C. Það sést fyrst í þunnsneið litlu neðar á 1650 m dýpi og er orðið algengt á um 1690 m dýpi.

Wollastonít (CaSiO_3) finnst ekki í holunni og **aktinólít** ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{+2})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$) finnst einungis í leirgreiningum í þremur sýnum á 1604 m, 1726 m og 1996 m dýpi.

Leir er greindur í leirskán, finfjaðra og gróffjaðra leir í svarfgreiningu en í þunnsneiðum og röntngreiningum er greint á milli smektíts, blandlagsleirs og klóríts. Nokkuð gott samræmi er á milli þunnsneiða og röntgen leirgreininga fyrir utan greiningu á blandlagi. **Smektít** greinist á u.þ.b. 200-1450 m dýpi. **Blandlagseinkenni** sjást í þunnsneiðum allt frá 1324 m en í röntngreiningu er blandlag ekki greint fyrr en á rúmlega 1400 m dýpi. **Klórít** finnst frá u.þ.b. 1400 m og allt niður á botn en blandlag greinist einnig niður á 1726 m dýpi samkvæmt röntngreiningu en sést í þunnsneiðum annað slagð niður á u.þ.b. 1970 m dýpi.

Pýrít sést fyrst í holunni á u.þ.b. 780 m dýpi en þess verður ekki aftur vart fyrr en á 926 m dýpi og sést það þá í nokkru magni nánast niður á botn. Mest er af pýríti á u.þ.b. 1160-1270 dýpi. Talið er að mikið magn af pýríti gefi vísbendingar um góða lekt í jarðlögunum (t.d. Ásgrímur Guðmundsson, 2005) en ekki verður séð að það eigi við í tilviki þessarar holu þar sem engin æð finnst á því dýptarbili.



Mynd 45. Jarðlög, ummyndun og dreifing ummyndunarsteinda í holu HN-2. Svartir kassar merkja greiningu í svarfi, bláir tíglar merkja greiningu í þunnsneiðaskoðun og grænir hringir merkja greiningu í XRD.

3.2.2.2 Hola HN-5

Dreifingu ummyndunarsteinda í holu HN-5 má sjá á mynd 46. Þar má sjá greiningar sem gerðar voru í svarfi, í þunnsneiðum og einnig eru sýndar röntngreiningar á leir og amfibóli.

Kalsít (CaCO_3) finnst að einhverju leyti niður alla holuna en lítið finnst af því neðan um 1900 m. Í þunnsneiðum finnst kalsít þó nánast niður í botn en þó í afar litlu magni neðan 1900 m. Kalsít er mest áberandi í holunni á milli 1100 og 1620 m en einnig er mikið magn á tæplega 900 m dýpi. **Aragónít** (CaCO_3) og „dogtooth“ kalsít finnst niður á rúmlega 400 m dýpi en er þó að mestu horfið neðan 334 m miðað við svarfgreiningu.

Ekki verður vart við **ópal** í HN-5. **Kalsedón** finnst í svarfinu allt frá rúmlega 300 m og niður á um 1100 m. Í þunnsneiðum sést kalsedón aðeins einu sinni á 902 m dýpi. **Kvars** sést í fyrsta sinn í þunnsneið á u.þ.b. 976 m dýpi en aðeins neðar í svarfgreiningu, eða á 1028 m.

Zeólítar eru algengir ofan til í holunni. Algengir zeólítar í holu HN-5 eru **thomsonít**, **kabasít**, **analsím**, **stilbít/heulandít** og **mesólít/skólesít** og eru þeir stöðugir niður á um 940 m mælt dýpi. Litlu neðar sést **laumontít** í fyrsta sinn (972 m) en það myndast við hitastig meira en 120°C . Það sést þó ekki oft eins og sjá má á mynd 46. Ummyndunarhiti virðist svo fara fremur hratt vaxandi þar sem kvars birtist á um það bil sama dýpi miðað við þunnsneiðagreiningu.

Wairakít ($\text{KAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sést fyrst á 1028 m í svarfi og er þar gott samræmi á milli svarf- og þunnsneiðagreininga. Hins vegar greinist wairakít ekki í svarfgreiningu neðan rúmlega 1300 m en í þunnsneiðum sést það nánast samfellt niður á botn. **Prehnít** ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) (240°C) sést fyrst í þunnsneið á 1166 m dýpi. Mun auðveldara er að greina prehnít í þunnsneiðum en í viðsjágreiningum en í þeim síðarnefndu fannst prehnít fyrst á 1240 m dýpi. **Epidót** ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{OH})(\text{SiO}_4)_3$) finnst fyrst á 1240 m dýpi en það er talið myndast við $230\text{--}250^\circ\text{C}$. Þunnsneiðagreining sýnir ekki epidót fyrr en á 1430 m dýpi en óhætt má telja að svarfgreining sé rétt þar sem hinn gulgræni litur epidóts er mjög einkennandi og auðvelt að greina í svarfi. Miðað við þær athuganir sem gerðar eru í þessum þremur holum þykir líklegra að ummyndunarhiti epidóts sé nær 250°C en 230°C þar sem það passar mun betur við ummyndunarhitaferil holanna (sjá t.d. mynd 56).

Wollastonít (CaSiO_3) er fyrst greint á 1254 m dýpi í svarfi en það finnst svo varla aftur fyrr en á rúmlega 1400 m dýpi. Í þunnsneiðum greindist wollastonít ekki fyrr en í rúmlega 1700 m dýpi enda er oft nokkuð erfitt að koma auga á fingerðar nálar þess í þunnsneiðum. **Aktínólít** ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{+2})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$) finnst ekki fyrr en nærri botni í þunnsneiðagreiningu en í svarfgreiningu er talið að það sé algengt frá um 1550 m. Röntngreining staðfestir það ekki og því er líklegast um einhvers konar ofúlkun að ræða. Röntngreining sýnir hins vegar amfiból fremur ofarlega í holunni, í einu sýni, á 1256 m dýpi en engin merki um aktínólít finnast þar í svarfi eða þunnsneiðum. Ekki greinist það aftur í röntgentækinu fyrr en á 1884 m dýpi og sést þá í öllum sýnum til botns. Það sést einungis sem ummyndun á pýroxen. **Hornblendi** greinist í einu þunnsneiðasýni á 2028 m dýpi. Ekki er vitað á þessari stundu hvort um ummyndun er að ræða.

Leir er greindur í leirskán, finfjaðra og gróffjaðra leir í svarfgreiningu en í þunnsneiðum og röntngreiningum er greint á milli smektíts, blandlagsleirs og klóríts. **Smektít** er greint mun ofar í leirgreiningu (320 m) en í þunnsneiðum (754 m) en í svarfgreiningu er greindur finfjaðraður leir allt frá 248 m dýpi. Svipað er uppi á teningunum í greiningu klóríts þar sem

röntgengreining finnur klórít á 1030 m dýpi og í flestum sýnum þar fyrir neðan á meðan klórít greinist ekki í þunnsneiðum fyrir en í 1574 m. **Blandlag** finnst í þunnsneiðum og leirgreiningum frá 1080 m en í þunnsneiðum finnst það allt niður á um 1800 m dýpi. Leirgreiningar sýna hins vegar blandlag niður á um 1460 m. Ekki er ljóst hvers vegna þessi munur er.

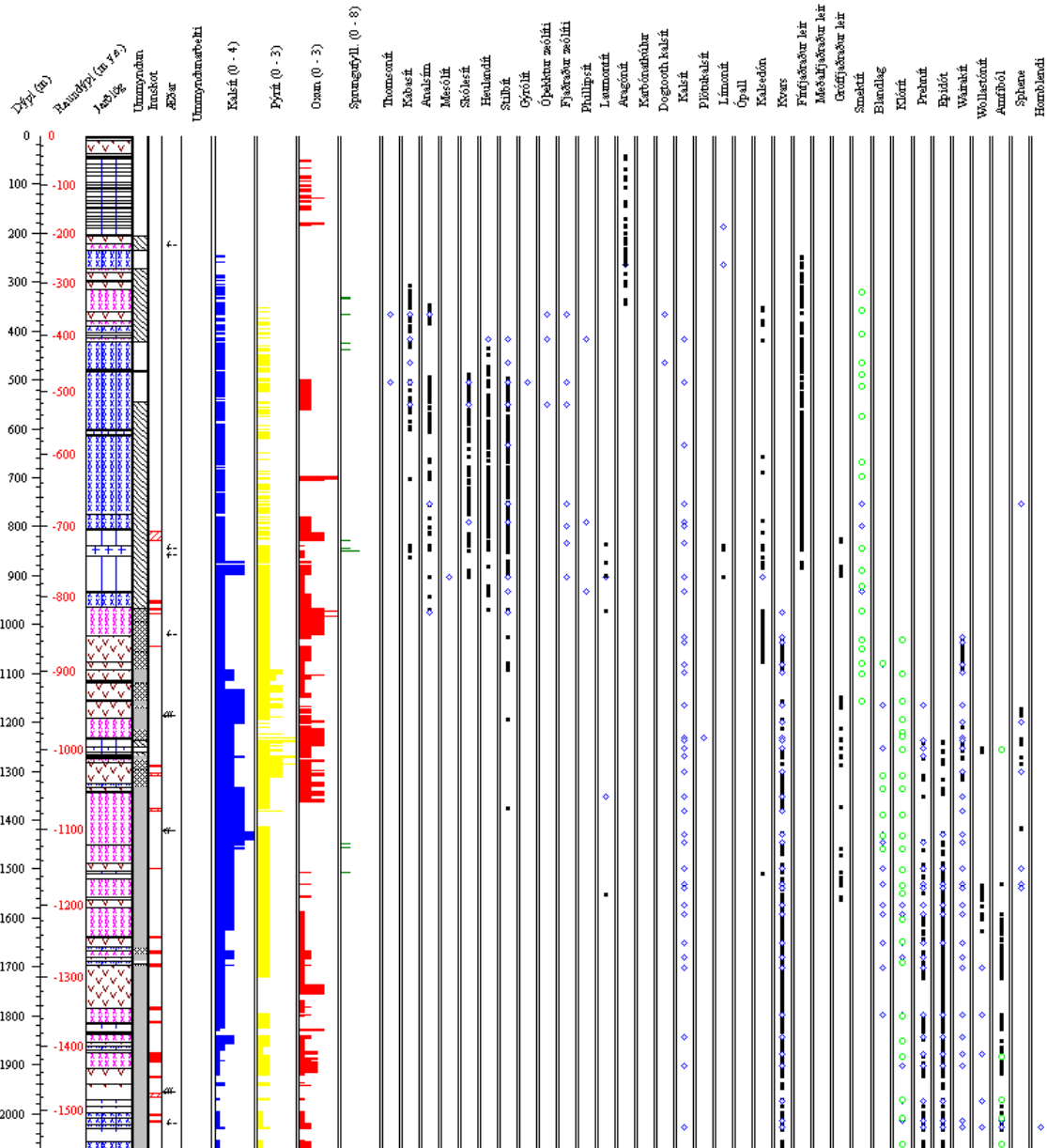
Pýrít sást fyrst á 354 m dýpi. Magn þess er mest á u.þ.b. 1100-1300 m dýpi (ein af stærstu æðum holunnar er á um 1185 m dýpi, sjá kafla 3.3.2) en það finnst í einhverju magni allt niður á botn holunnar. Undantekningin er þó á rúmlega 1700 m mældu dýpi og niður á um 1800 m þar sem ekki verður vart við pýrít.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Dýptarbil: 0-2076 m

 Staðarnúmer: 96595
 Verklut: Öll holan

Starfsmenn: HMM



Mynd 46. Jarðlög, ummyndun og dreifing ummyndunarsteinda í holu HN-5. Svartir kassar merkja greiningu í svarfi, bláir tíglar merkja greiningu í þunnarneiðaskoðun og grænir hringir merkja röntgengreiningu.

3.2.2.3 Hóla HN-8

Dreifing ummyndunarsteinda í hólunni HN-8 er sýnd á mynd 47. Þar má sjá greiningar sem gerðar voru í svarfi og þunnsneiðum ásamt röntngreiningum. Yfirleitt er ágætis samræmi á milli greininga, þó með nokkrum undantekningum. Auðveldara er t.d. að greina prehnít og wairakít í þunnsneiðum en í svarfgreiningu og sést það nokkuð vel á mynd 47 þar sem prehnít greinist nokkru fyrr í þunnsneiðum en í svarfi og wairakít greinist mun lengra niður en í svarfgreiningu.

Röntngreining á leir sýnir að amfiból finnst í sýni á 1068 m en engin önnur merki voru um slíkt, hvorki í svarfinu né í þunnsneiðum.

Kalsít (CaCO_3) finnst að einhverju leyti niður alla hóluna þó lítið finnst af því neðan tæplega 1800 m. Ekkert kalsít finnst í þunnsneiðum neðan 2206 m. **Aragónít** (CaCO_3) og „dogtooth“ kalsít finnst á stangli frá um 220 m og allt niður á u.þ.b. 850 m dýpi.

Ekki verður mikið vart við **ópal** í HN-8 en það finnst þó í einni þunnsneið á 892 m dýpi. Það er nokkuð mikið dýpi og ekki er ólíklegt að steindin hafi í raun þegar breyst í kalsedón þar sem ummyndunarhiti á þessu svæði er nærri því að vera 180°C . **Kalsedón** finnst nokkuð ofarlega í einni þunnsneið en í svarfinu er það algengt frá u.þ.b. 700 m og niður á tæplega 1000 m dýpi. Ekki verður vart við kalsedón svo djúpt í þunnsneiðum. **Kvars** sést í fyrsta sinn á u.þ.b. 946 m dýpi og eru þunnsneiðar og svarfgreining samhljóma.

Zeólítar eru algengir ofan til í hólunni að undanskildu wairakíti sem myndast við mun hærri hita en aðrir og finnst það því djúpt í hólunni ásamt öðrum háhitasteindum. Algengir zeólítar í hólunni HN-8 eru **thomsonít**, **kabasít**, **ansalím**, **stilbít/heulandít** og **mesólít/skólesít** og eru þeir stöðugir niður á rúmlega 900 m. Litlu ofar sést **laumontít** í fyrsta sinn en það myndast við hitastig meira en 120°C . Ummyndunarhiti virðist svo fara fremur hratt vaxandi þar sem kvars birtist rétt fyrir neðan, á 946 m dýpi.

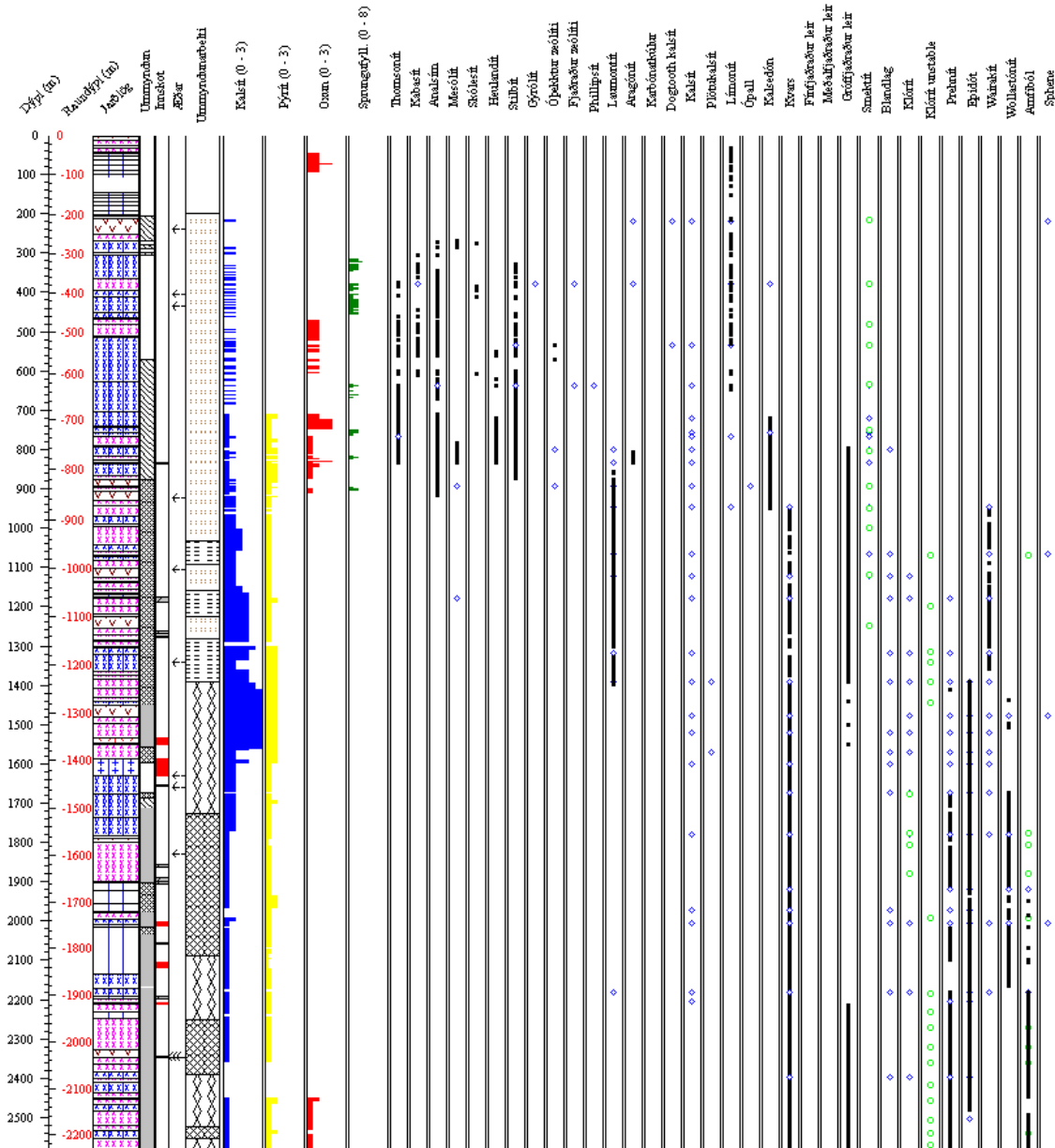
Wairakít ($\text{KAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sést fyrst á u.þ.b. sama dýpi og kvars og **prehnít** ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) (240°C) sést fyrst í þunnsneið á 1178 m dýpi. Mun auðveldara er að greina prehnít í þunnsneiðum en í viðsjágreiningum og kemur það því mun fyrr fram í þeim. **Epidót** ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{OH})(\text{SiO}_4)_3$) birtist svo á tæplega 1400 m dýpi en það er talið myndast við $230\text{--}250^\circ\text{C}$. Miðað við þær athuganir sem gerðar eru í þessum þremur holum þykir líklegra að ummyndunarhiti epidóts sé nærri 250°C en 230°C eins og ummyndunarhitaferlar holanna gefa til kynna (mynd 57). **Prehnít** kemur fram nokkru ofar og þar sem það er talið myndast við 240°C er sú ályktun dregin hér að 250°C þurfi til að epidót myndist (mynd 57).

Wollastonít (CaSiO_3) er fyrst greint á 1438 m dýpi en þar finnst það ekki í neinu magni fyrr en á tæplega 1700 m dýpi. **Aktinólít** ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{+2})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$) finnst fyrst á 1778 m dýpi í leirgreiningu en nokkru neðar er það einnig greint í þunnsneiðum og svarfi. Eins og áður er sagt er það einnig greint í 1068 m dýpi í leirgreiningum en það finnst ekki aftur fyrr en á 1778 m.

Leir er greindur í leirskán, finfjaðra og gróffjaðra leir í svarfgreiningu en í þunnsneiðum og röntngreiningum er greint á milli smektíts, blandlagsleirs og klóríts. **Smektít** er greint mun ofar í leirgreiningu (200 m) en í þunnsneiðum (536 m) en gott samræmi er á milli þunnsneiða

og leirgreininga þegar kemur að **klóríti** (1136/1068 m). Klórít virðist þó vera af tveimur gerðum miðað við röntgengreiningar, klórít og óstöðugt klórít. Gerður er greinarmunur á þessum tegundum á mynd 47. **Blandlag** finnst hins vegar ekki í leirgreiningum þrátt fyrir að vera greint í þunnsneiðum allt frá 800 m og alltaf annað slagið niður á botn holunnar. Ekki er ljóst hvers vegna þessi munur er.

Það er fyrst á rúmlega 700 m dýpi sem **pýrít** greinist fyrst. Það finnst allt niður á botn nema á u.þ.b. 2350-2450 m mældu dýpi þar sem þess verður ekki vart. Það er þó aldrei neitt verulegt magn af pýríti í holunni.



Mynd 47. Jarðlög, ummyndun og dreifing ummyndunarsteinda í holu HN-8. Svartir kassar merkja greiningu í svarfi, bláir tíglar merkja greiningu í þunnsneiðaskoðun og grænir hringir merkja röntgengreiningu.

3.2.3 Ummyndunarraðir

Í viðauka III má sjá töflur með yfirliti um ummyndunarraðir í holunum. Í töflu 19 í viðauka III má sjá yfirlit um ummyndunarraðir í holu HN-2. Hægt er að sjá fyrir sér nokkuð greinilegar ummyndunarraðir og er líklega hægt að skipta þeim í tvo hluta. Sá fyrri á við kerfi sem hefur í raun aðeins séð lághita en sá síðari á við nokkuð umfangsmikla jarðhitaummyndun. Fyrri stigið einkennist af útfellingum sem smám saman verða fleiri og röð þeirra er nokkuð greinileg þar sem þær myndast hver á eftir annarri og fylla upp í holrými jarðlaganna. Seinna stigið má segja að einkennist af niðurbroti á ummyndunarsteindum fyrra stigs og því getur verið nokkuð flókið að ráða fram úr röðinni, sérstaklega á greinilegum umbrotatímum. Að niðurbroti fyrri ummyndunarsteinda loknu verður röð ummyndunarsteinda nokkuð afgerandi.

Hér má sjá líklegar ummyndunarraðir á fyrra og seinna ummyndunarhluta í holu HN-2:

1. smektít > zeólítar > karbónathnúðar/stönglar > zeólítar > laumontít/gróffjaðraður leir > kalsít
2. kvars/gróffjaðraður leir > wairakít > epidót > wollastonít > prehnít > kalsít

Röð zeólíta virðist nokkuð ruglingsleg og ekki er að sjá að einhver skynsamleg röð sé til staðar miðað við þær athuganir sem gerðar voru (sjá töflu 19 í viðauka III). Analsím, sem myndast við einna lægst hitastig af zeólítunum, virðist stundum koma inn síðar en t.d. stilbít en í mörgum tilvikum má þó sjá að það kemur á undan. Svo virðist sem karbónathnúðar og karbónatstönglar (t.d. aragónít og „dogtooth“-kalsít) komi á eftir lághita-zeólítum að einhverju leyti. Þetta er athyglisvert fyrir þær sakir að vitað er að karbónathnúðar og aragónít myndast í köldu grunnvatni. Þar sem þessi „sneymbúna“ zeólítamyndun kemur fram í móbergsm myndun eru nokkuð góðar líkur á því að hún sé því hluti af palagónitseringu bergsins. Sú hugmynd er í samræmi við það að myndun zeólíta sé einn hluti palagónitseringar móbergs (Pauly, pers. comm.) sem á sér þá e.t.v. stað við kólnun í kjölfar myndunar móbergsins. Annað skeið lághita-zeólíta sést svo á eftir karbónatinu (grunnvatnsummyndun), svo koma fram laumontít og gróffjaðraður leir (óvisst hvort kemur á undan), en kalsít fyllir svo yfirleitt upp í.

Þegar lengra er komið ofan í kerfið, á u.þ.b. 1250 m dýpi, fara zeólítar að brotna niður og verða óstöðugir. Þeir ummyndast þá í kvars (einstaka sinnum í wairakít) og leir fær þá einnig tækifæri til að troða sér inn í kristalgrindina og ruglar það greinanda oft í ríminu þar sem óljóst er hvar leirinn kemur inn. Á u.þ.b. 1300-1650 m dýpi er röðin oft svolítið ruglingsleg, leir þvælist um á milli í kalsíti o.s.frv. og er það líkast til vegna niðurbrots ummyndunarsteinda eins og zeólíta. Þá fær leirinn tækifæri til að troða sér inn á milli. Wairakít virðist vera seinna á ferðinni en kvars. Í 1522 m kemur fram ágengt kalsít (líkt og á mynd 32) sem líklegast er samfasa skítugu kalsíti í tektónískum sprungum. Í 1564 m eru steindir að brotna niður og aðrar að koma í staðinn. Þar er því erfitt að fullyrða um röð. Í 1608 m er einnig umbrotatími og því einnig erfitt að greina röðina þar. Þar fyrir neðan virðist sem umbrotatíma sé lokið og uppleysingu steinda úr fyrra ummyndunarstigi sé lokið og aðrar steindar komnar í stað þeirra. Epidót kemur nokkuð greinilega inn á eftir wairakíti en nokkuð óljóst er hvort wollastonít komi þar á eftir eða hvort það er prehnít. Kalsít hefur svo aftur lagst yfir allt saman.

Í fyrstu var talið að laumontít yfirprentun hefði orðið í holunni en miðað við það sem fram kemur í þunnsneiðaskoðun er nokkuð greinilegt að laumontít myndast á undan

háhitasteindum eins og kvarsí. Þetta sést greinilega á mynd 48 þar sem útlínur og kjarni kvarskrystals sjást greinilega í laumontíti en fyrir innan útlínur kvarsins glittir enn í laumontít. Oft er þó erfitt að greina hvort laumontít eða kvars kemur á undan og ekki er loku fyrir það skotið að síðari tíma laumontít hafi myndast. Merki um slíkt sáust mögulega á 1708 m dýpi.

Dæmi um ummyndunarraðir í holunni má sjá á myndum 49 og 50.

Ummyndunarraðir í holum HN-5 og HN-8 virðast ekki svo ólíkar þeim röðum sem sjást í holu HN-2 þrátt fyrir að þar sé mun meiri jarðhiti. Mun færri ummyndunarraðir voru þó greindar í þessum tveimur holum en í HN-2 þar sem svarf í þeim er mun fingerðara en í HN-2. Eini merkjanlegi munurinn er sá að uppleysing ummyndunarsteinda fyrri hluta (lághita-zeólíta) verður nokkru ofar, eða á milli 800 og 900 m raundýpis. Tímabil ummyndunar eru einnig a.m.k. tvö þar sem seinna tímabilið einkennist af uppleysingu eldri ummyndunarsteinda.

Í töflu 20 í viðauka III má sjá þær ummyndunarraðir sem greindust í holu HN-5. Út frá þeim má sjá að líklega eru ummyndunarraðir í holunni eftirfarandi:

1. smektít > zeólítar > kalsedón/kalsít/pýrít
2. wairakít > kvars/leir > epidót/wollastonít > prehnít > kalsít.

Leir virðist vera fyrsta ummyndunarsteindin sem myndast í holu HN-5. Á eftir fylgja zeólítar en þeir eru í mörgum tilfellum ekki greindir til tegundar. Í grófum dráttum er þó talið að þeir myndi eftirfarandi röð: analím/kabasít > finfjaðraður zeólíti > stílbít > skólesít. Þessi röð er í góðu samræmi við það að þeir zeólítar sem myndast við lægstan hita komi fyrst fram en þeir sem myndast við hærri hita komi síðar.

Það sem markverðast er í þessum ummyndunarröðum er að á 800-900 m raundýpi eru zeólítar að brotna niður og í staðinn myndast wairakít og kvars. Í þessari holu er algengara að wairakít yfirtaki zeólíta en sást í holu HN-2. Stundum má sjá leir inn á milli. Á þessum umbrotatíma er oft erfitt að greina raðir ummyndunarsteinda þar sem nýjar steindir myndast inn á milli og í þeim eldri.

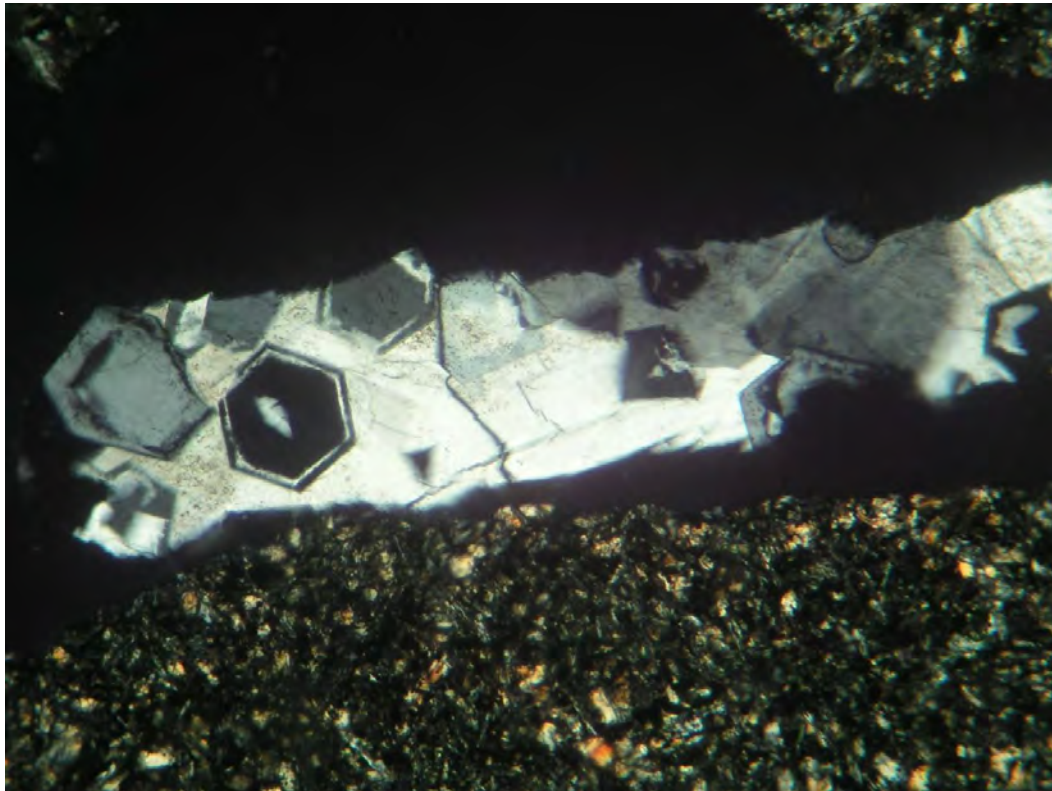
Dæmi um ummyndunarraðir í holu HN-5 má sjá á myndum 51 og 52.

Ummyndunarraðir í holu HN-8 má sjá í töflu 21 í viðauka III. Zeólítar brotna niður á u.þ.b. sama raundýpi og í HN-5 þar sem kvars virðist myndast í staðinn (og að einhverju leyti wairakít) og því er líklegast um mjög svipað ferli að ræða í þessum tveimur holum, enda liggja þær nærri hvorri annarri. Röð leirs virðist vera nokkuð skýrari í athugunum í holu HN-8 og svo virðist sem finfjaðraður leir komi inn áður en zeólítar myndast. Gróffjaðraður leir myndast á svipuðum tíma og kvars og erfitt að segja til um hvort kemur á undan. Samkvæmt þeim röðum sem sáust í þunnsneiðum í holunni eru þessar raðir taldar líklegar:

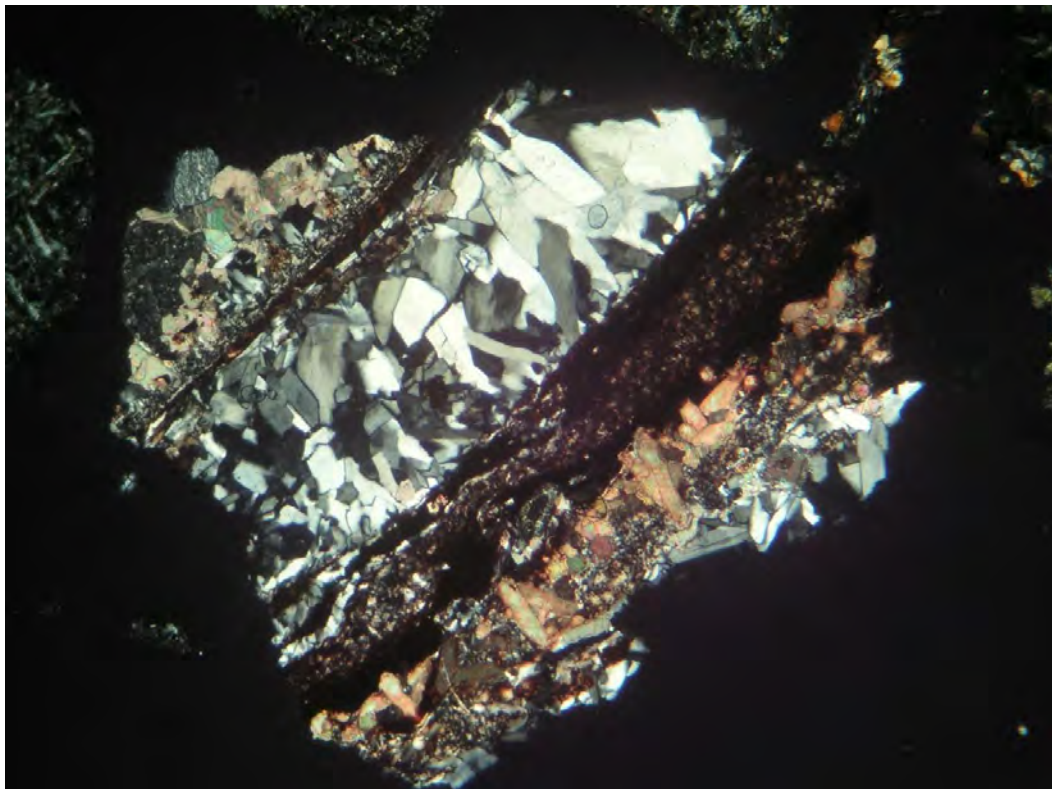
1. leirskán > karbónatstönglar > kalsedón > finfj. leir > zeólítar > laumontít
2. gróffj. leir > kvars > wairakít/prehnít/epidót > wollastonít > kalsít

Í seinni hluta ummyndunar er óljóst hver röðin er á wairakíti, prehníti og epidóti þar sem ekki varð vart við raðir þar sem allar þessar steindir komu fyrir. Ef einhver líkindi eru með ummynduninni í HN-5 þegar dýpra er komið í holurnar er líklegt að epidót myndist á undan prehníti, en ekki er þó hægt að fullyrða það.

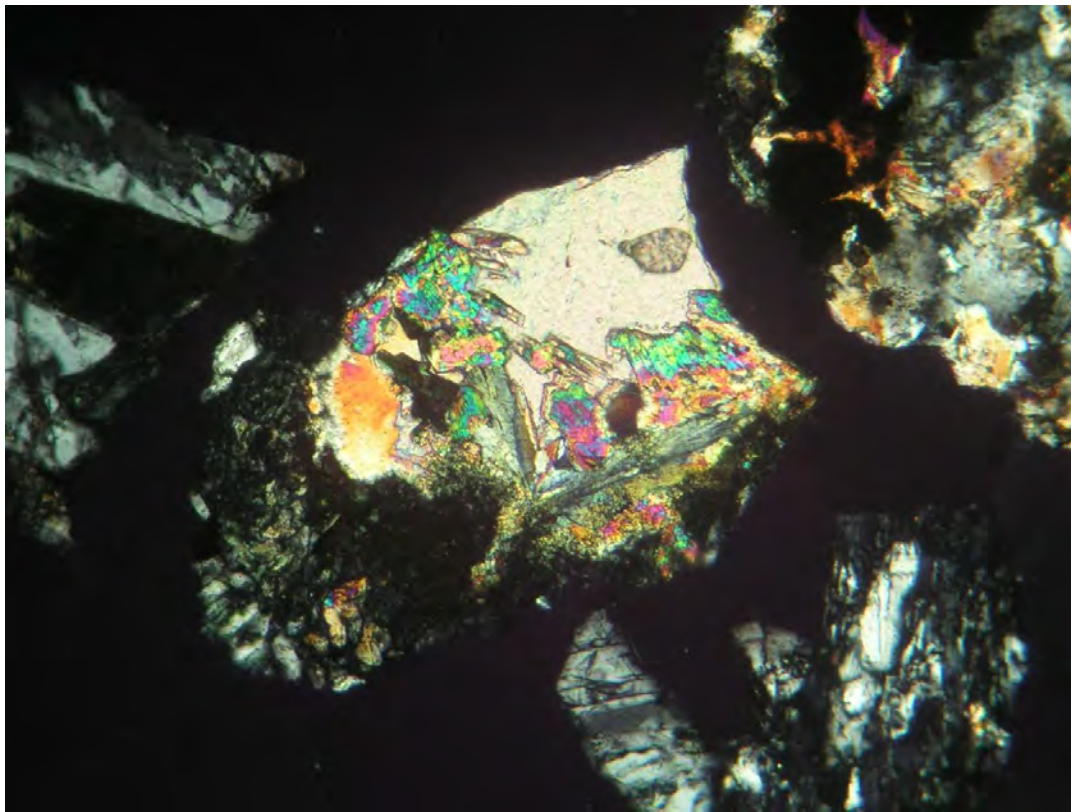
Dæmi um ummyndunarraðir í holu HN-8 má sjá á myndum 53 og 54.



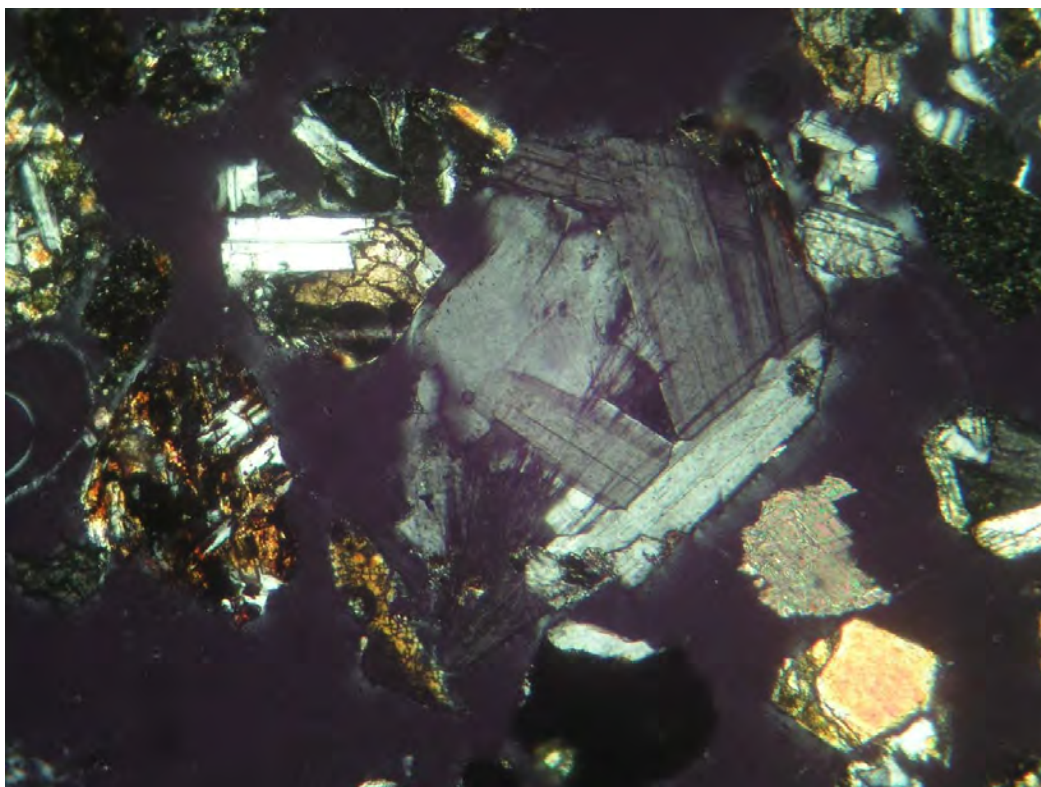
Mynd 48. *Kvars að myndast í laumontíti á 1708 m dýpi í HN-2. Hér sést glögglega að laumontít er á undan kvasi og virðist ekki yfirprenta háhitasteindir í holunni. Breidd myndar er 3 mm.*



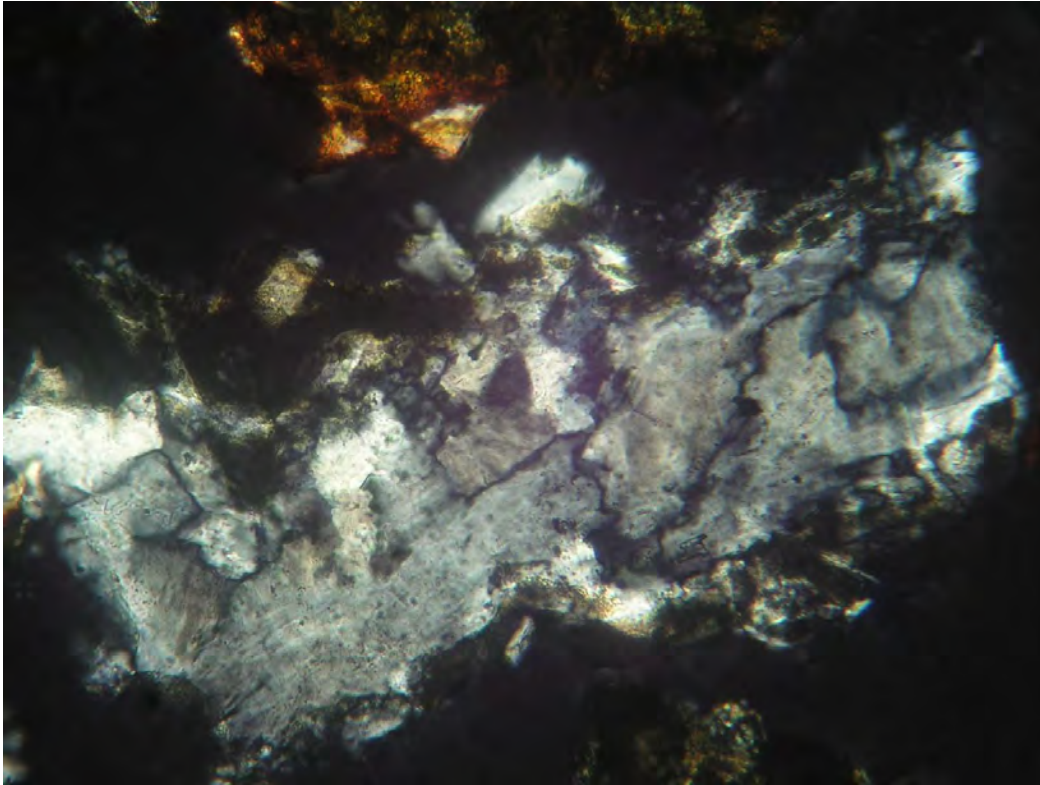
Mynd 49. Sprungufylling – laumontít sprunga í annarri sprungufyllingu (plötukalsít o.fl.). HN-2 á 1708 m dýpi. Breidd myndar er 3 mm.



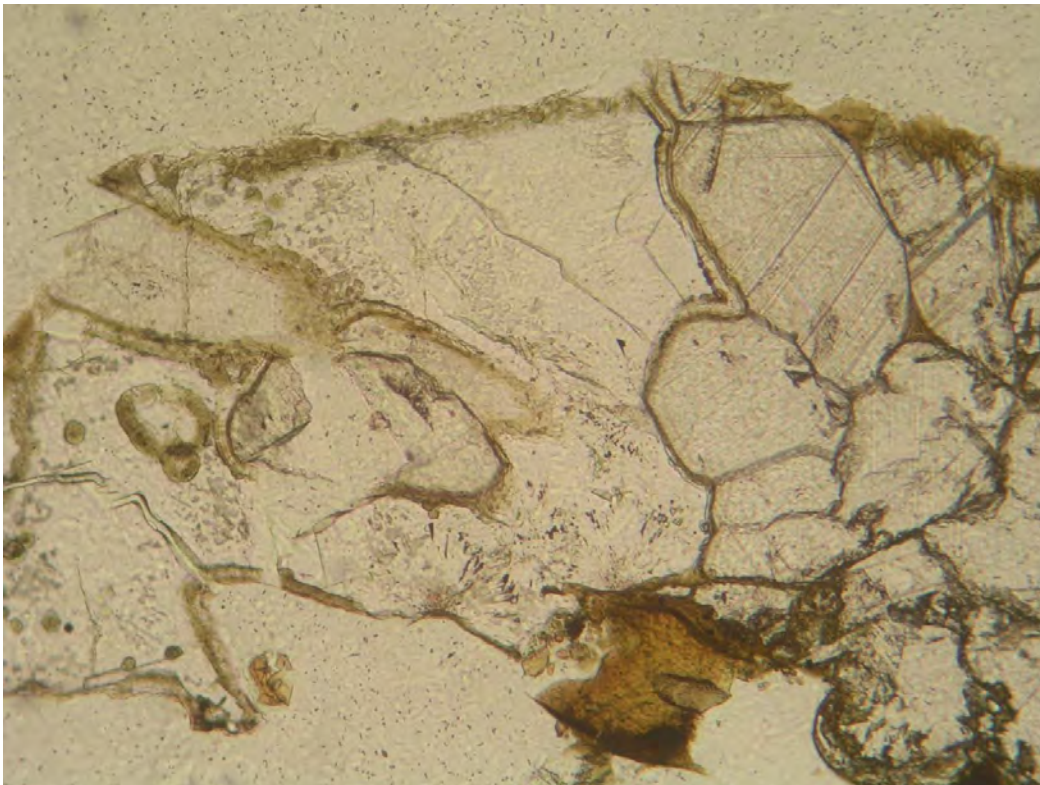
Mynd 50. Útfelling á 1752 m dýpi í HN-2. Epidót á undan kalsíti sem fyllir upp í. Breidd myndar er 1,25 mm.



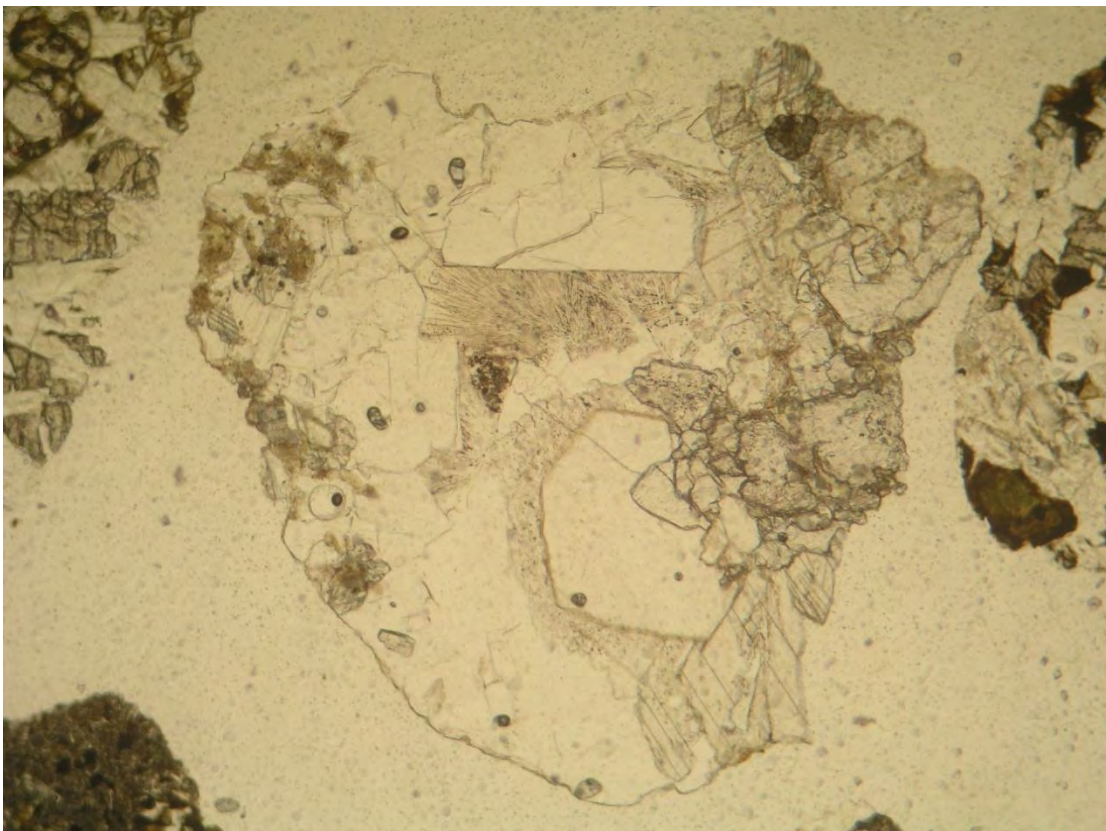
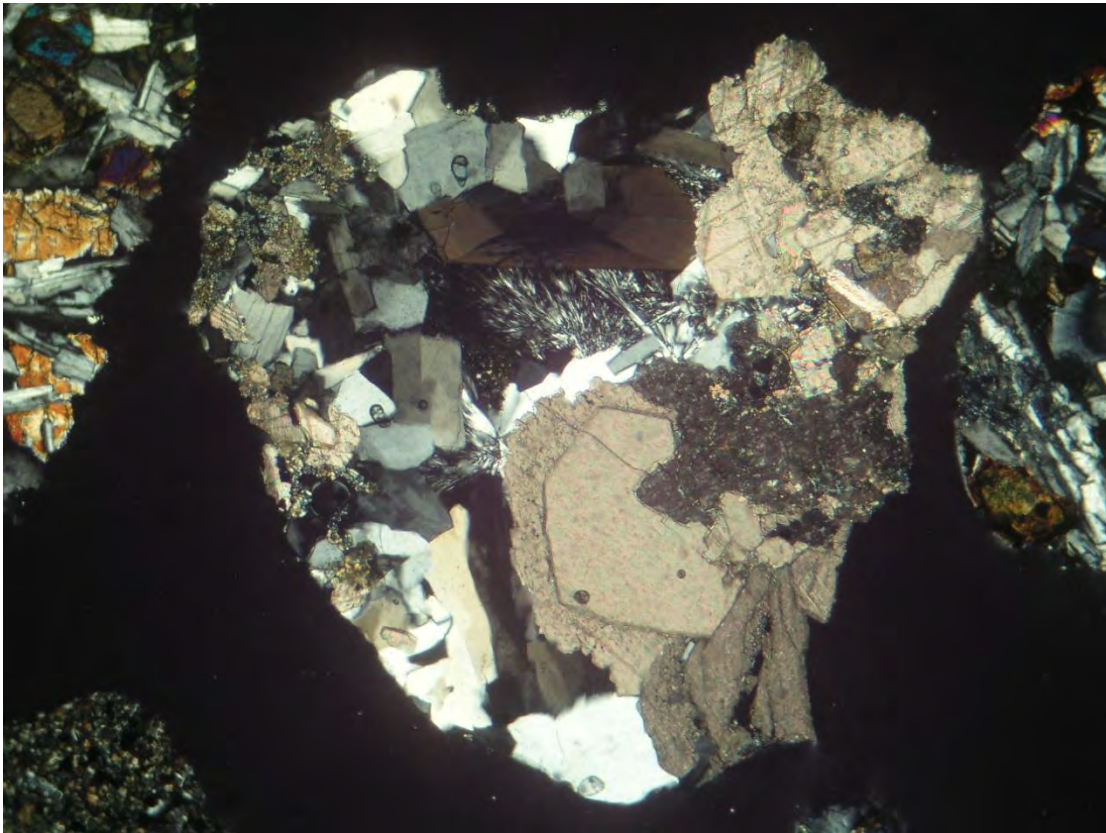
Mynd 51. Ummyndunarröð á 754 m dýpi í HN-5. Fjaðraður zeólíti > stilbít. Leifarnar af fjöðruðum zeólítanum sjást sem óljósar nalar í stilbítinu. Breidd myndar er 1,25 mm.



Mynd 52. Útfellingar í 1082 m í HN-5. Zeólítar sem hafa ummyndast í kvars. Breidd myndar er 0,5 mm.



Mynd 53. Útfelling á 380 m dýpi í HN-8. Karbónat stönglar > leirrönd > kalsedón-rönd > fínjaðra zeólíti > kabasít. Breidd myndar er 1,25 mm.



Mynd 54. Ummyndunarröð á 636 m í HN-8. Karbónat > dogtooth kalsít > kalsít > stilbít > philipsít > finfjaðraður zeólíti. Efri myndin er tekin í tvískautuðu ljósi en sú neðri í einskautuðu. Breidd mynda er 3 mm.

3.2.4 Samanburður berghita og ummyndunarhita

Tengsl milli hitastigs og ummyndunarbelta og ummyndunarsteinda í bergi hafa verið rannsökuð í tugi ára (t.d. Hrefna Kristmannsdóttir, 1979 og 1982; Hjalti Franzson, 2008; Schiffman o.fl., 1991). Þessi tengsl sem ákvörðuð hafa verið eiga þó aðeins við þóleisku bergröðina og ákveðna gerð vatns. Að auki er gert ráð fyrir að nánast ríki jafnvægisáðstæður og nægilega hár hitastigull til þess að hægt sé að útiloka þrýstingsáhrif (Hrefna Kristmannsdóttir, 1982).

Ekki er vitað hversu langan tíma það tekur fyrir ummyndunarsteindir að aðlagast ríkjandi berghita en að einhverju leyti fer það eftir lekt (aðgangi vatns að berginu). Því er erfitt að segja til um hversu gömul ummyndunin er, og ekki er ólíklegt að eftir því sem berglög verða þéttari vegna ummyndunar þá eigi ummyndunarsteindir erfiðara með að aðlagast nýjum hitaskilyrðum vegna minna aðgengis vatns. Einnig virðist svolítill breytileiki í því við hvaða hitastig sumrar steindirnar myndast, t.d. er stundum merkjanlegur munur á fyrstu innkomu steindar og því þegar hún verður skyndilega grasserandi. Dæmi um þetta er epidót sem getur myndast við allt niður í 220°C þó það verði oft ekki algengt fyrr en þegar hiti er orðinn hærri en 250°C (t.d. Bird og Spieler, 2004). Í þessari rannsókn virðist sem að í flestum tilfellum passi fyrsta innkoma epidóts við u.þ.b. 250°C ef ummyndunarferill er dreginn í gegnum þær ummyndunarsteindir sem myndast í kringum þetta hitastig. Talið er að prehnít myndist t.d. við 240°C en epidót virðist alltaf koma inn seinna en það í þessum holum.

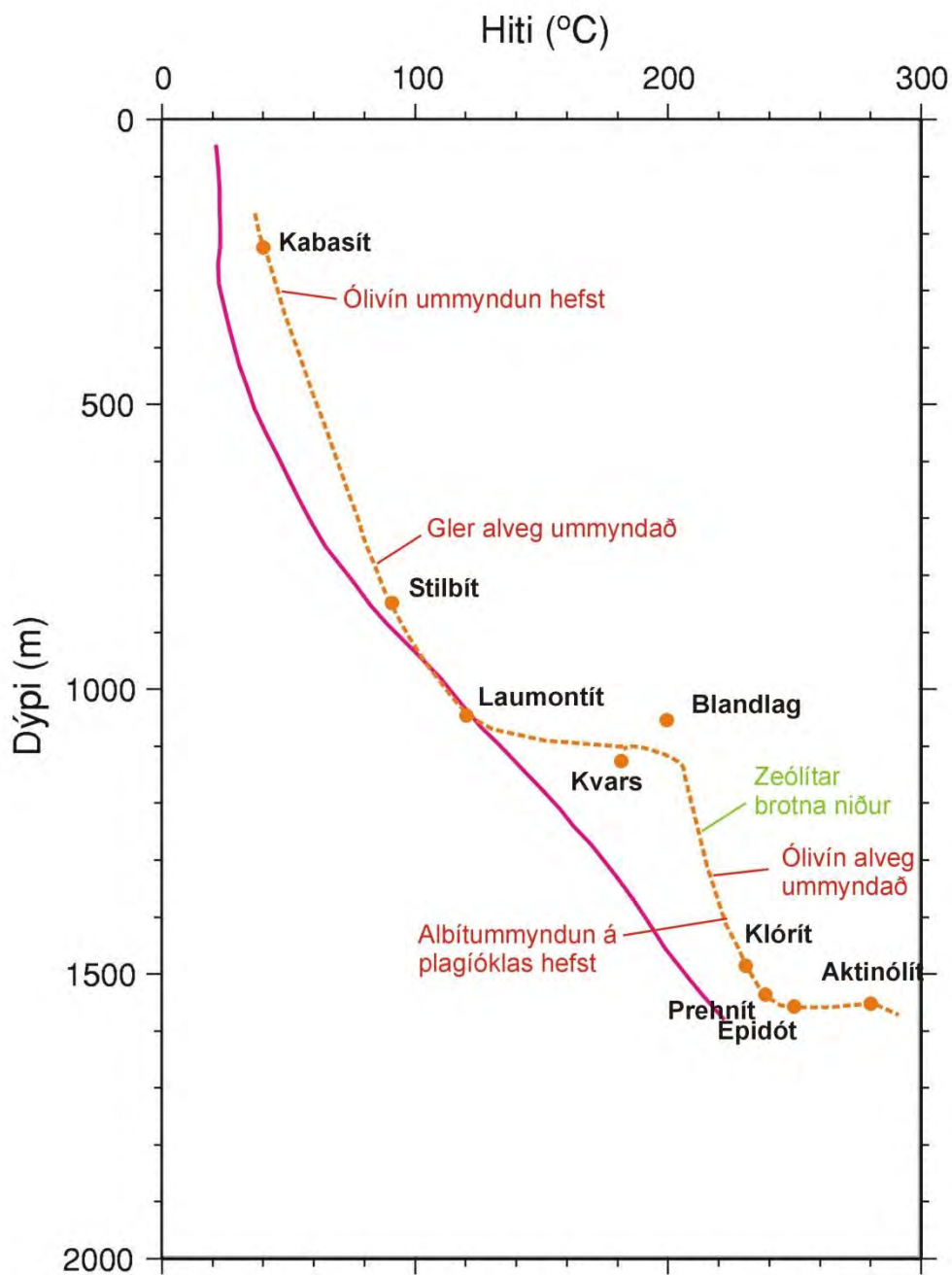
Í stórum dráttum er ummyndunarhiti í holu HN-2 nokkuð hærri en berghiti eins og sjá má á mynd 55. Undantekning er greining á laumontíti en ekki er ljóst hvers vegna það frávik kemur fram. Þessi samanburður bendir til þess að kólnun hafi átt sér stað í HN-2 og er það í samræmi við það að holan er nokkuð fyrir utan sigdæld Hengilsins og hefur færst fjær henni með tímanum. Þess má þó geta að við örvun í borlok holunnar var settur pakkari í hana. Hann festist í holunni og situr þar enn á um 972 m dýpi (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009). Það náðist því aldrei að mæla hita neðan þess dýpis í holunni eftir að holan hitnaði upp og því er berghitaferill þar ónákvæmur.

Þegar bornir eru saman áætlaður berghiti í holu HN-5 og ummyndunarhitaferill sést að ummyndun hefur ekki náð núverandi berghita (mynd 56). Ekki er vitað hversu langan tíma tekur fyrir ummyndun að bregðast við hitahækkunum en nokkuð ljóst má vera að hér hefur orðið hitahækkun tiltölulega nýlega (á jarðfræðilegum mælikvarða). Því er talið að svæðið í kringum holu HN-5 sé að hitna, þ.e. að jarðhitinn sé líklega fremur nýlegur. Gæti þetta bent til þess að uppstreymi í jarðhitakerfinu eigi sér stað á þessum slóðum. Klórítíð virðist vera fljótast að bregðast við auknum hita og því er ummyndunarferillinn nær berghitanum en þar sem aðrar ummyndunarsteindir eru. Þó verður að hafa í huga að við borun HN-5 urðu til tvær holur niður á rúmlega 1300 m dýpi (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009a). Millirennslu á milli þessara hola gæti mögulega hafa aukið hitann í efri hluta holunnar en eftir stendur að berghiti fyrir neðan það dýpi er engu að síður nokkuð hærri en ummyndunarhiti.

Þegar áætlaður berghiti í holu HN-8 er borinn saman við ummyndunarhita má sjá að ekki munar miklu þarna á milli (mynd 57). Þó er ummyndunarhiti aðeins lægri en berghiti sem bendir til þess að ummyndun hafi ekki alveg náð marki berghitans. Þetta bendir aftur til þess

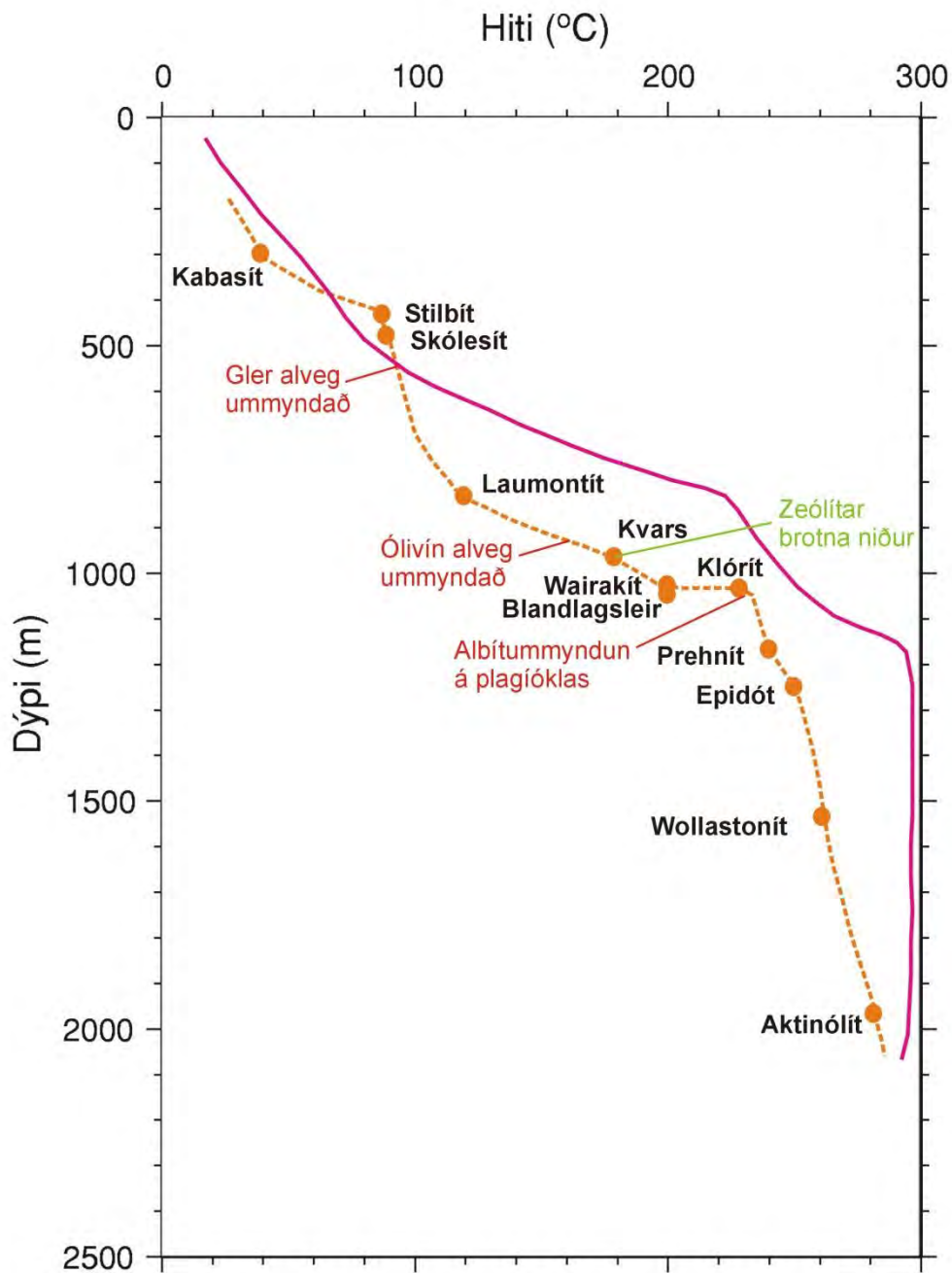
að núverandi berghiti í holunni sé fremur nýtilkominn (ekki er hægt að fullyrða um hversu nýlegur hann er) þar sem ummyndun hefur ekki alveg náð að aðlagast berghitanum. Þó virðist sem svæðið í kringum holu HN-5 sé í enn meiri upphitnun en svölítið norðar þar sem HN-8 liggur.

Hellisheiði HN-02 Svínahraunsbruni Árnessýsla



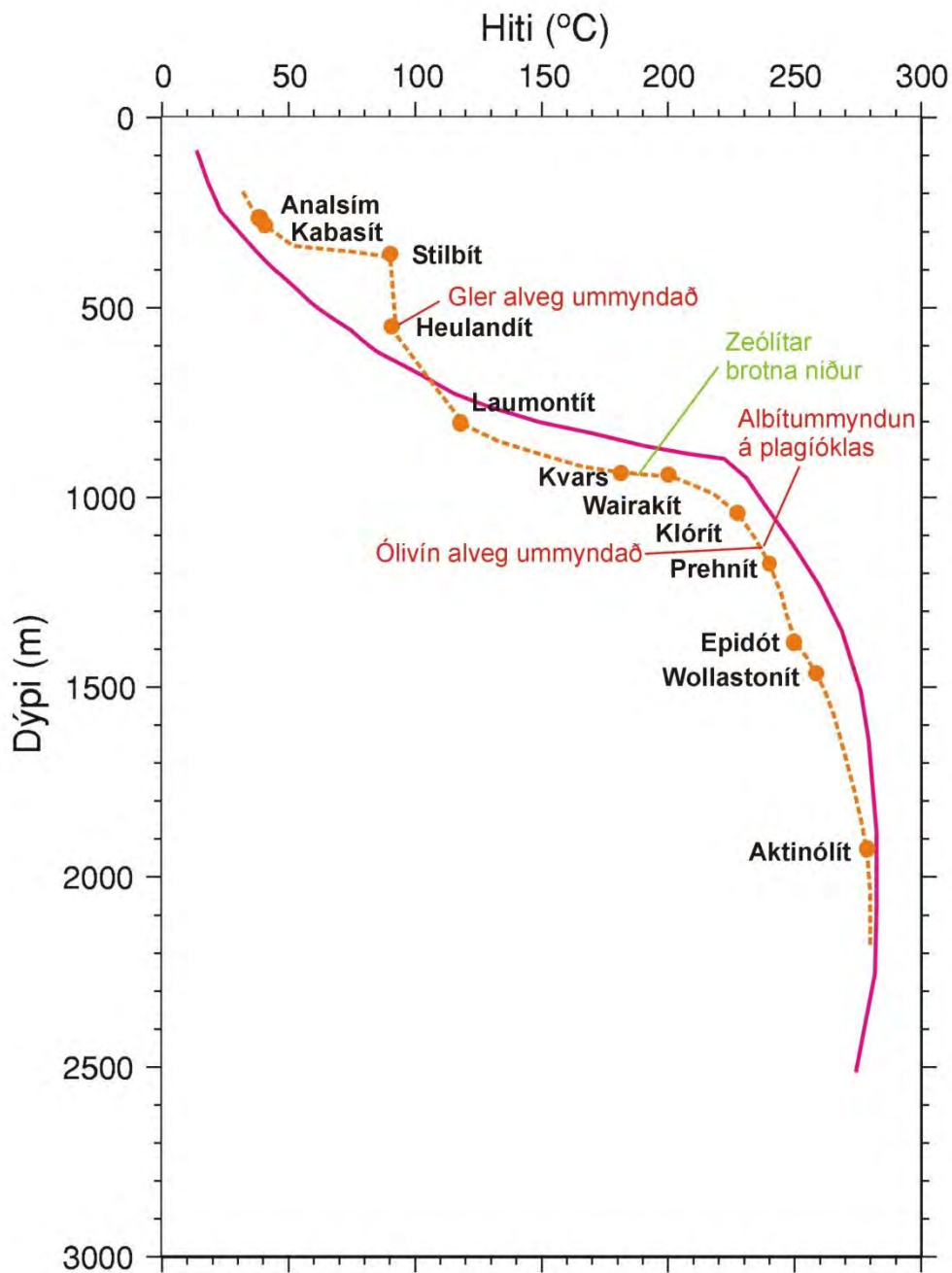
Mynd 55. Samanburður á áætluðum berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul, slitin lína) í holu HN-2.

Hellisheiði HN-05 Árnessýsla



Mynd 56. Samanburður á áætluðum berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul slitin lína) í holu HN-5.

Hellisheiði HN-08 Við Gráuhnúka Árnessýsla



Mynd 57. Samanburður áætlaðs berghita (bleik lína) og ummyndunarhita (appelsínugul slitin lína) í HN-8.

3.3 Vatnsæðar

Í mati á æðum er aðallega stuðst við hitamælingar úr viðkomandi holum. Hitamælingar voru skoðaðar í mikilli upplausn svo hægt væri að meta með nokkurri nákvæmni hvar æðar eru staðsettar. Myndir í þessari skýrslu eru þó í mun minni upplausn. Aðrar vísbendingar sem notaðar voru eru viddarmælingar (þar sem athugað var hvort skápar færu saman við mögulegar æðar eða kælipunkta), jarðlög (vísbendingar um veikleika, sprungufyllingar eða innskot) og skoltapsmælingar. Þrýstimælingar geta einnig verið gagnlegar til þess að staðsetja helstu æð holu þar sem skoðuð er staðsetning vendiþrýstings (pivot punkts), en þar nærri ætti stærsta æð viðkomandi holu að vera staðsett. Því miður eru ekki alltaf til þrýstimælingar sem sýna þennan vendipunkt og ekki var hægt að nota þrýstimælingar í tilfellum þessara hola.

Almennt séð má segja að æðar sé hægt að tengja jarðlagamótum ofan til í holunum en þegar neðar dregur eru þónokkur dæmi um að æðar tengist innskotum.

3.3.1 Æðar í holu HN-2

Hola HN-2 reyndist mjög þétt í borun (sjá töflu 24) og reyndist því ekki hæf til niðurrennslis. Engu að síður má sjá vísbendingar um litlar æðar eða lek svæði í holunni en yfirlit um æðarnar og tengsl þeirra við jarðfræði og jarðlagamælingar má sjá í töflu 4.

Hitamælingar eftir annan áfanga borverksins má sjá á mynd 68. Síðari mælingin var framkvæmd um sólarhring eftir steypingu vinnslufóðringar og stafa hnökrar í mælingunni því að einhverju leyti af hörðnun steypunnar. Í fyrri mælingu sést að vatnsborð í holunni er á um 92 m dýpi en annars er lítið að sjá í hitamælingunni. Þó er kælipunktur í 159 m og gæti þar verið um einhvern veikleika að ræða. Samkvæmt viddarmælingu sem gerð var í lok 1. áfanga reyndist skápur vera rétt neðan öryggisfóðringar sem staðsett er í 147,5 m dýpi (tafla 7). Skápurinn nær niður í um 153 m (mynd 58), sem er bordýpi 1. áfanga, og því virðist kælingin vera aðeins fyrir neðan hann. Gögn hafa hins vegar ekki verið dýptarleidrét og því má búast við einhverri skekkju í dýpi. Skoltap var vart merkjanlegt í öðrum og þriðja áfanga holunnar en í fyrsta áfanga tapaðist skol reglulega niður í 32 m og algjört skoltap varð í 33 m, 72 m og aftur í 99 m (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009b).

Stærsta æð holunnar virðist vera í kringum 515-568 m dýpi þar sem ádælingarvatn fer að mestu út (sjá myndir 69 og 70). Þó er erfitt að segja nákvæmlega til um hvar meginæðin er og því líklegast um æðakafli að ræða. Í mælingu þann 17. maí, þar sem dælt er 56 l/s, fer nánast allt vatn út á u.þ.b. 568 m dýpi og því er talið að æðar nái niður á það dýpi. Þar fyrir neðan eru ekki áberandi merki um æðar. Þó eru hnökrar eða hallabreytingar í mælingum í kringum 658 m, 717 m, 907 m, 1290 m, 1408 m, á milli 1492 og 1515 m, 1727 m og 1825 m (myndir 69 og 70). Jarðlög holunnar og æðar ásamt jarðlagmælingum má sjá á mynd 58.

Tafla 4. Æðar í holu HN-2.

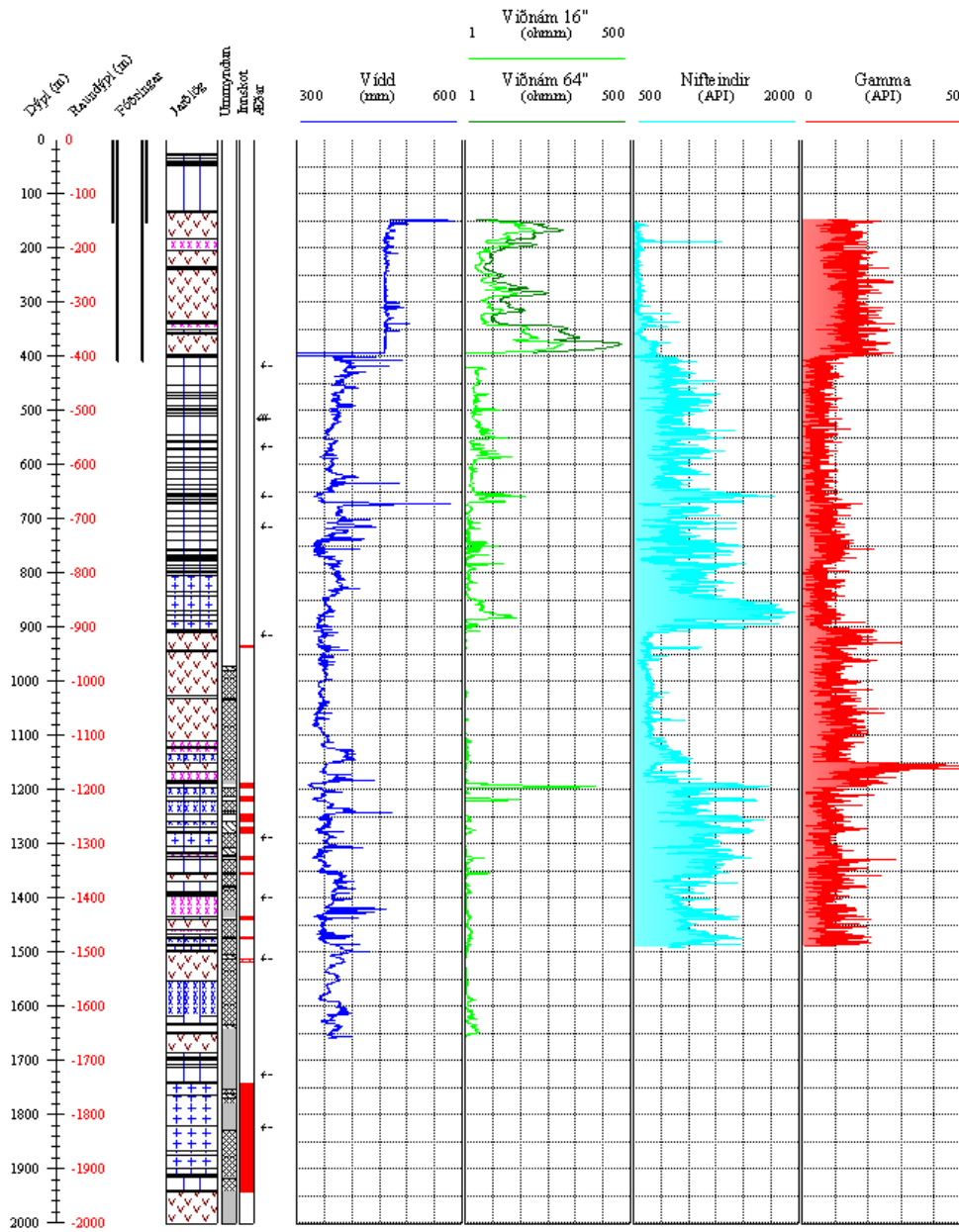
Dýpi [m]	Stærð æðar	Skoltap [l/s]	Athugasemdir um hitamælingar	Athugasemdir um jarðlagamælingar	Athugasemdir um jarðlög
418	Lítil/út úr holu	1,25	Sést í 12, 17 og 18. Örlítil hallabreyting í 12 en sést betur í hinum.	Merki um svólíttinskáp eru á þessu dýpi í víddarmælingu.	Hér eru ólivín-þóleiit hraunlög og eru hraunlagamót því líklegur orsakavaldur.
515-568	Meðal/út úr holu	Fer úr 1,25 í 4,16 á milli 532 m og 562 m.	Sést í mælingum 7, 13-14 og 17-20. Nokkuð áberandi hitnun. Í mælingum 17 og 18 var dælt á holuna 56 l/s og virðist mest af því vatni fara út á þessu dýptarbili.	Engin merki eru um skáp á þessu svæði. Viðnám er í herra lagi sem merkir að ummyndun er lítil en ekkert er að sjá í nifteinda- og gammamælingunum.	Jarðlög á þessu svæði eru að mestu ólivín-þóleiit hraunlög. Hér virðist lektin tengjast lagmótum hraunlaga því engar sérstakar vísbendingar voru um sprungur, innskot eða eitthvað slíkt.
658	Lítil/út úr holu	Fer úr 1,07 í 616 m í 2,97 í 666 m.	Kælipunktur í mælingum 7-9.	Víddarmæling sýnir merki um skáp á 620-640 m og á 670-676 m. Hækkun er í bæði viðnámi og nifteindum á u.þ.b. 650-670 m dýpi (bendir til fersklegra og þéttara bergs).	Á þessu dýpi eru ólivínþóleiit hraunlög með nokkuð greinilegri skiptingu á milli laga (oxað og fínkorna berg). Holými virðist að mestu fyllt með dökkri leirskán, fínfjæðra zeólítum og kabasíti. Ekkert hér bendir til sérstakrar lektar nema e.t.v. lagmót hrauna enda er líklega um kælipunkt að ræða vegna skáps. Þunnarneið á 662 m dýpi sýnir þétt ólivínþóleiit en ekki er talið að þar sé um innskot að ræða.
715	Lítil/út úr holu	2,5	Kælipunktur í mælingum 6 og 12-20. Svólítil hallabreyting sést í mælingum 5 og 7.	Svólítið útslag er í víddarmælingu á þessu dýpi og því gæti kælingin orsakast af litlum skáp á þessu dýpi.	Fín- til meðalkorna basalthraun eru á þessu svæði og gæti veikleiki orsakast af lagmótum hrauna.
915	Lítil/út úr holu	2,1	Kælipunktur í mælingum 7 og 12-20 en hærri hiti í mælingu númer 6 og svólítil hallabreyting í mælingu 5.	Viðnáms- og nifteindamælingar sýna að gildi lækka skyndilega á um 910 m dýpi þar sem túffið kemur inn.	Veikleiki í berginu hér gæti tengst lagmótum útfellingaríkra ólivínþóleiit hraunlaga og grænleits þéttis túffs sem kemur inn á 910 m dýpi.
1290	Lítil/út úr holu	Fer úr 2,5 í 1279 m í 4,17 í 1313 m.	Mæling 12 sýnir hallabreytingu á þessu dýpi. Sú hitamæling er reyndar mjög óregluleg og bendir það til þessað vatnið sé ekki á mikilli hreyfingu, m.ö.o. að hola sé þétt.	Svólítil hækkun er í viðnáms-, nifteinda- og gammamælingu rétt fyrir ofan þetta dýpi sem sýnir líklega innskot.	Fínkorna og jafnkorna ólivínþóleiit innskot er talið vera á 1270-1282 m miðað við jarðlagamælingar og kvars sést þar fyrst. Þetta er svólítu ofar en þessi meinta æð. Tengslin gætu því jafnvel verið við hraunlagaskil þar sem hraunlagasyrpa tekur við þar fyrir neðan.
1400	Lítil/út úr holu	3,8-4,1	Hallabreyting (svólítil hitnun) í mælingum 12-20. Breytingin verður örlítið ofar í mælingu 16.	Svólítil toppur er í nifteindamælingu á 1400-1403 m dýpi.	Í svargreiningu er greint túffen alltaf sést annað slagið slæðingur af sama innskoti. Engin þunnarneið er til af þessu svæði.
1512	Lítil/út úr holu	4,17 í 1462 m, 2,08 í 1545 m.	Sést í mælingum 12-14 sem staðbundin hækkun í hita (kólnarstrax aftur fyrir neðan).	Svólítið útslag er í víddarmælingu á þessu dýpi, e.t.v. er lítilskápur þessu dýpi. Aðrar mælingar ná ekki svona djúpt og því er ekki hægt að staðfesta innskot á þessu dýpi með þeim.	Vottur af innskoti sést alltaf annað slagið í svarfínu frá u.þ.b. þessu dýpi og í þunnarneið eru greinileg merki um tektoníska atburði, brotið og kurlað berg og sprungufyllingar. Um er að ræða svólítið misleitt túff blandað innskotsbergi.

1727	Lítill/út úr holu	2,9	Sést í mælingu 12 sem hallabreyting (hitnun). Mikill fyrirvari hér vegna óreglu í mælingu (þétt).	Víðnámsmæling endar á u.þ.b. hér en hún hækkar nokkuð á þessu dýpi.	Frá u.þ.b. 1740 m er greint grófkornótt óli víni þóleift innskot og sýna þunnsneiðar af þessu dýpi innskot og tektónísk áhrif með uppbrotinu og kurluðu bergi. Jarðlög hafa verið leiðrétt upp að vissu marki en þar sem borgögn eru ekki aðgengileg er ekki hægt að staðhæfa nákvæmlega hvar innskotin byrja.
1825	Lítill/út úr holu	4,2-7,1	Hallabreyting í mælingu 12 (mikil óregla í mælingu vegna þéttleika holu).	Jarðlaga- og víddarmælingar ná ekki svona djúpt.	Á þessu svæði eru innskot greind í svæfinu og í þunnsneið á 1832 m dýpi (óleiðrétt) er það staðfest. Bergið er þar svolítið sundurbrotið. Þessi æð gæti því mögulega verið á mörkum tveggja innskota en innskotakafli er alveg frá u.þ.b. 1740 m og niður á 1920 m dýpi (m.v. svarfið, ekki hægt að leiðrétta almennilega vegna skorts á mælingum og borgögnum).

Staður: Hellisheiði
 Holungrað: HN-2

 Bor: Sleipnir
 Djúptarbil: 0-2001 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlutí: Öll holan

 Staðarnúmer: 96592
 Starfsmenn: HMM, HF


Mynd 58. Jarðlög og jarðlagamælingar í holu HN-2.

3.3.2 Æðar í holu HN-5

Hitamæling sem gerð var eftir 1. áfanga holunnar ákvarðast fyrst og fremst af leðjuhita og því er lítið á mælingunni að græða. Leðjuhitinn er hærri en hitinn ætti annars að vera þar sem leðjan sem notuð er við borun hitnar vegna viðnáms og hita í botni en sama leðjan hringsólar í holunni á meðan borun stendur. Í 2. áfanga var holan nánast þétt (tafla 26). Þó varð skoltap á dýptarbili 552-591 m (11 l/s) en þess verður ekki vart í hitamælingum og er því ekki talið að um eiginlega æð sé að ræða.

Í vinnsluhluta holunnar eru hins vegar nokkrar æðar og eru þær taldar upp í töflu 5. Miðað við hitamælingar virðast æðar í 1185-1187 m (gefur inn í holu) og 1955 m (rennur út úr holu) vera mest áberandi og er þar millirennslí (mynd 72). Smærri æðar virðast svo vera á 844 og 858 m dýpi (svolítill æðakaffi), 1020, 1422 og 2019 m. Í hitamælingum í tengslum við festu virtist sem innstreymi væri í holuna á um 848 m dýpi og einnig mældist 17 bara yfirþrýstingur í holunni. Þar sem sú æð er ekki yfirþrýst af náttúrunnar hendi var talið að dælingarvatnið hafi þrýst sér út í bergið vegna stíflunnar og að það hafi komið aftur inn í holuna út um æðina í 848 m. Samanburður á mælingum sýndi að neðri mörk æðarinnar sem olli uppstreymi er á um 860 m dýpi (Helga Margrét Helgadóttir, 2009a).

Hins vegar gæti æðin í 1420 m (mynd 72) reynst vera besta æð holunnar þar sem hún gæti verið nálægt pivot punktinum (hiti hækkar lítið vegna þess að æðin sér lítinn þrýstimum). Millirennslíð veldur því að æðin hálf hverfur vegna rennslins. Erfitt að segja hvort æðarnar í 1185-1187 m og 1955 m eru stórar þar sem við vitum ekki hvar jafnvægispunkturinn er. Þar sem þær eru fremur áberandi í hitamælingunum er talið að þær hljóti að vera a.m.k. meðalstórar. Í 1187 m fór hiti í 180°C og holan gaus (Helga Margrét Helgadóttir o.fl, 2009a). Það er því líklegt að þar hafi komið inn þónokkuð magn af heitu vatni úr æðinni þar.

Í einni upphitunarmælingu (mæling númer 15 á mynd 72) sést að hiti lækkar nokkuð á milli 1500 og 1600 m. Möguleiki er að þarna sé æð en erfitt er að fullyrða um það. Viðsnúningur virðist vera í holunni í botni þar sem upphitunarmælingar (15-17 á mynd 72) sýna allar að hiti lækkar nokkuð við botn holunnar. Óljóst er hvort þessi hitalækkun er vegna lækkunar í berghita eða hvort um truflun sé að ræða innan holunnar.

Yfirlit um æðar í holunni er í töflu 5 ásamt tengslum þeirra við hitamælingar, jarðlög og jarðlagamælingar. Í töflu 25 má sjá yfirlit um númer hitamælinga og tengsl þeirra við æðarnar. Á myndum 59 og 60 má sjá jarðlög holunnar ásamt jarðlagamælingum.

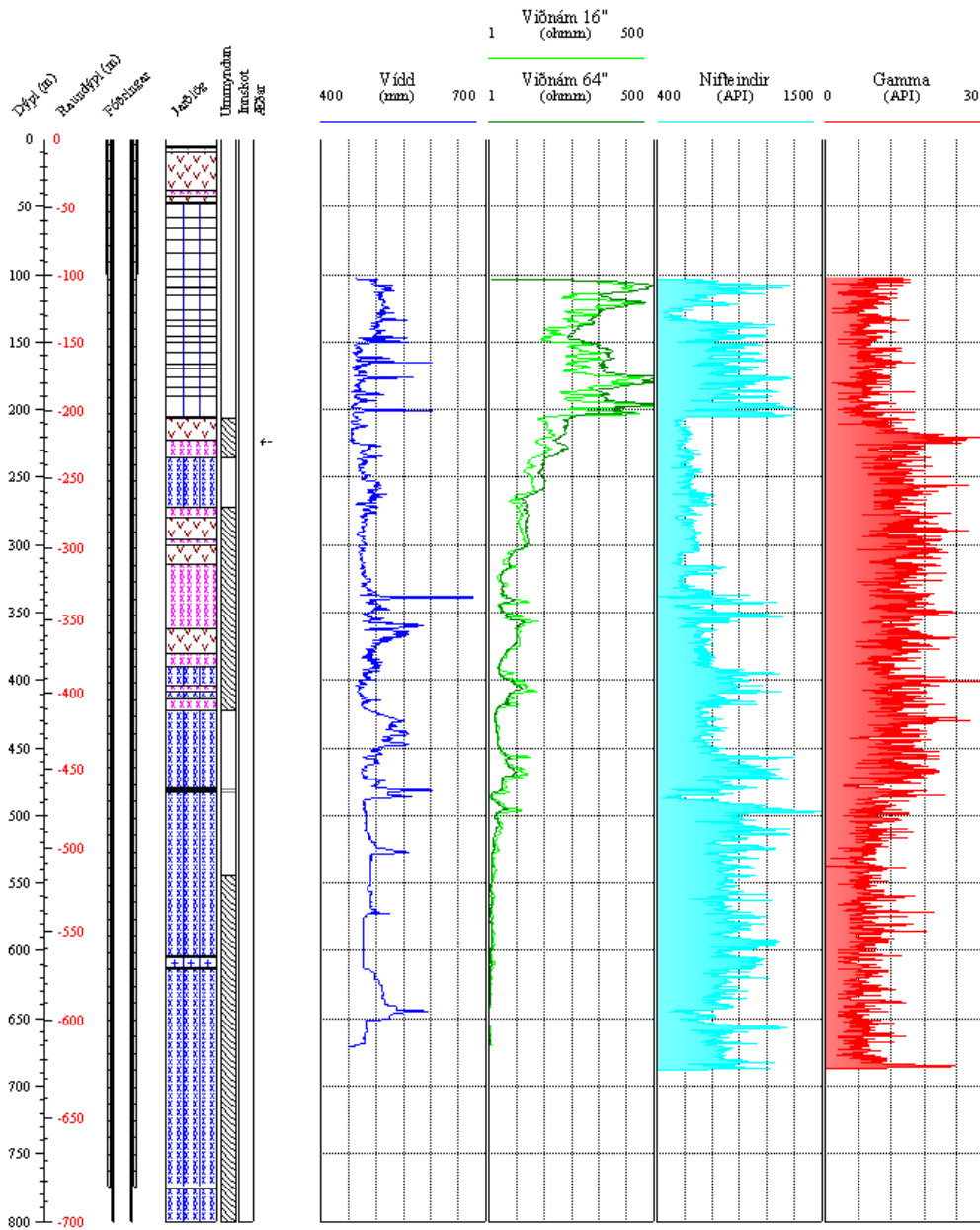
Tafla 5. Aðar í holu HN-5. Hitamælingar sjást á myndum 71-72.

Dýpi [m]	Raun-dýpi [m]	Stærð æðar	Skoltap	Athugasemdir um hitamælingar	Athugasemdir um jarðlagamælingar	Athugasemdir um jarðlög
224	224	Lítill	Úr 1 l/s í 220 í 4,5 l/s í 270.	Sést í mælingu 2.	Ekki eru til jarðlagamælingar af þessu dýpi.	Hér eru lítið ummyndað túff og breksía.
844	732	Lítill	Mældist 2 l/s í 816 m.	Sést í mælingum 13-17.	Ekki eru til jarðlagamælingar af þessu dýpi.	Á þessu dýpi var vandamálakafli holunnar þar sem hrundi aftur og aftur. Einhver merki þess sjást í svarfinu, þ.á.m. skriðfletir í leir en annars er hér ólivín þóleiit hraunlagasyrpa sem virðist dílalaus og nokkuð ferskleg og fremur grófkorna á þessu dýpi. Frekar ólivínríkt berg. Nokkuð er um sprungufyllingar í kringum þetta dýpi og eru það aðallega zeólítar.
858	742	Lítill	Mældist 2 l/s í 816 m.	Brot í hitamælingum 10-12.	Ekki eru til jarðlagamælingar af þessu dýpi en þær koma inn rétt fyrir neðan og sýna ekkert markvert.	Ólivín-þóleiit hraunlagasyrpa sem hér er nokkuð grófkorna. Virðist fremur ferskleg og ólivínrík. Hnik kemur fram í leir svolítið fyrir ofan þennan stað og einnig eru sprungufyllingar rétt fyrir ofan.
1020	852	Lítill	-	Lítið stökk í hitamælingu 10, 11 og 13.	Ekkert markvert sést í mælingum á þessu dýpi en nokkru fyrir neðan eru toppar í nifteinda- og gammamælingum.	Mikið ummyndað túff og túffrík breksía. Hér er eins og skiptist á linsur af túffi og breksíu.
1185-1187	955-957	Stór	Í borun rauk hiti upp í 180°C og holan fór í gos þegar dýpið var 1187 m.	Æð þessi er mjög áberandi í hitamælingum 10 og 11.	Ekkert sérstakt kemur fram í mælingum á þessu dýpi en mjög líttill toppur er reyndar í nifteindamælingu örlitlu ofar, eða í um 1184 m.	Á þessu dýpi er ljósgrænt og hvítt túff og breksía og einhverrar oxunar verður var. Þýrít eykst svolítið á þessu dýpi. Þunnneið af 1200 m (óleiðrétt dýpi) sýnir breksíu, nokkuð túffríka og oxaða að einhverju leyti. Oxunin er þó svolítið óljós þar sem mikið af drasli virðist vera úr bornum á þessu dýpi og því mikið af seinni tíma oxun. Engin sérstök merki eru um innskot.
1422	1102	Meðal?	-	Svolítið stökk er í mælingum 10, 16 og 17.	Nifteindamæling er ósköp svipuð því sem hún er í kring á þessu dýpi. Toppur kemur fram í mælingu nokkru ofar, eða í u.þb. 1408 m.	Mikið ummyndað túff og mikið af útfellingum eru í kringum þetta dýpi. Aðeins fyrir neðan þetta dýpi sést svolítið hnik í einhverjum kornum. Mikið af útfellingum er á þessu svæði.
1955	1472	Stór	Skol tapaðist alveg annað slagið	Svolítið kæling í hitamælingum 10, 11, 16 og 17.	Svolítið breiður toppur er í nifteindamælingu rétt fyrir ofan þetta dýpi en margir slíkir toppar eru á þessum slóðum. Svoltill toppur er í gammamælingu á þessu dýpi (enn áberandi toppur í rúmlega 1960 m). E.t.v. er það merki um innskot á þessu svæði en svarf vantar mikið til.	Svarf vantar á dýptarbili 1950-1972 og ekki er ólíklegt að þar gæti leynst einhver vísbinding um æð, en skoltapið eitt og sér er kannski ákveðin vísbinding. Fyrir ofan er túffmyndun en fyrir neðan eru bólstrar. Nær ekkert kalsít er í þessum sínum en það eykst aftur svolítið neðar. Mögulegt er að dreifa af innskoti sé í svarfinu þar sem það hefur náð yfirborði.
2019	1520	Lítill	Skol tapaðist alveg annað slagið	Kemur fram í mælingum 10, 16 og 17.	Engin frávik eru í mælingum á þessu dýpi.	Bólstraberg er á þessu dýpi en í þunnneið á 2028 m dýpi er talið að innskotsdreifséjafnvel blönduð berginu. Einhver kontaktmyndun er sjáanleg og nokkuð er af ferskum plagíóklas og pyroxen kristöllum.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 0-800 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhliuti: Öll holan

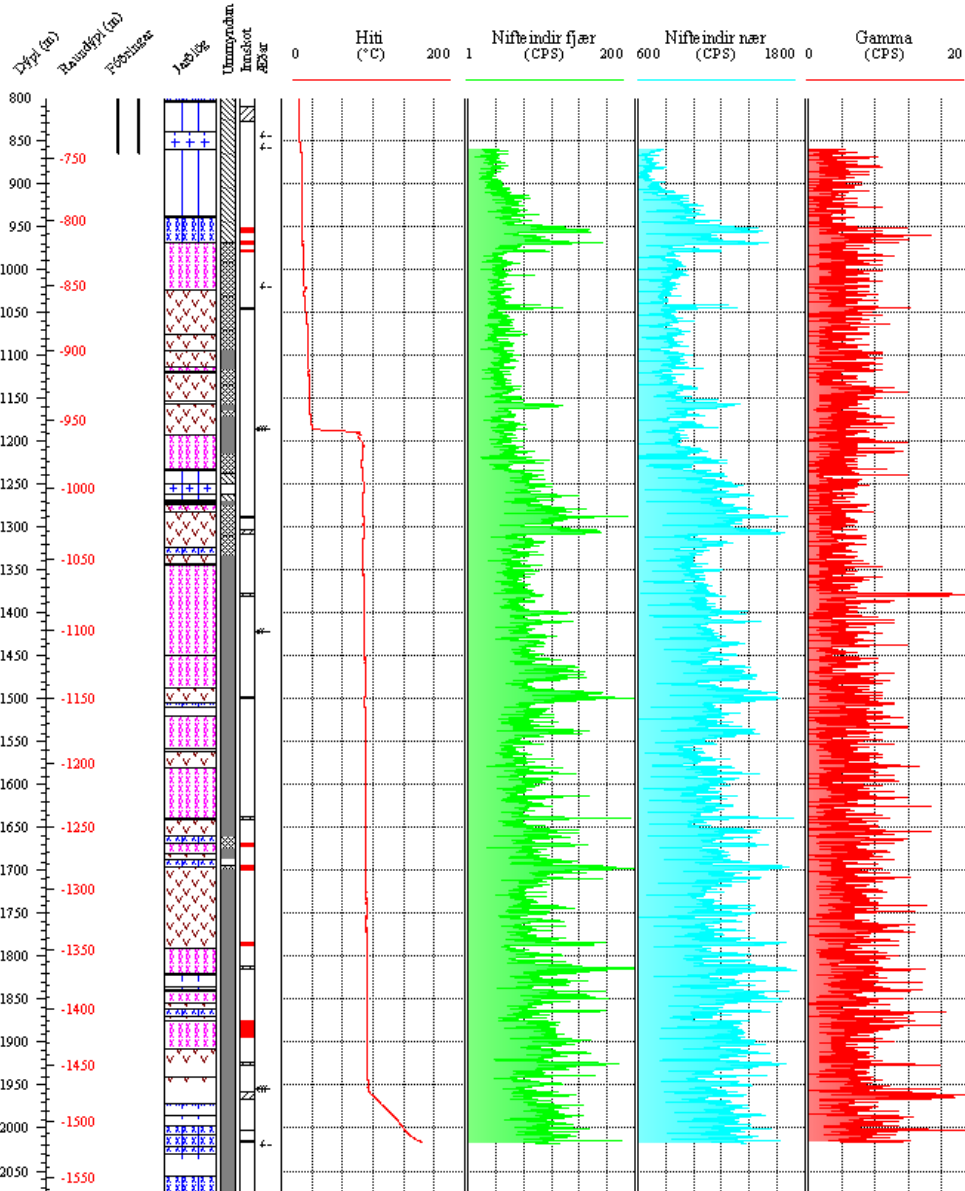
 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 59. Jarðlög og jarðlagamælingar í 2. áfanga holu HN-5.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-5

 Bor: Geysir
 Djúptarbil: 800-2076 m

 Skolvökvi: Vatn/loft
 Verkhúti: Öll holan

 Staðarnúmer: 96595
 Starfsmenn: HMM


Mynd 60. Jarðlög og jarðlagamælingar í 3. áfanga holu HN-5.

3.3.3 Æðar í holu HN-8

Skoltap varð á 102 m dýpi í holu HN-8 og kom skol ekki aftur upp fyrr en á 143 m dýpi. Hitamæling frá lokum 1. áfanga (mæling 1 á mynd 73) sýnir smávægilega kælingu á u.þ.b. 110 m dýpi en hún er líklega vegna áhrifa grunnvatnsstreymis á heita leðju innan öryggisföðringarinnar (Björn S. Harðarson o.fl., 2010a). Grunnvatnskerfið liggur niður á rúmlega 200 m dýpi. Á 240 m dýpi virðist leka svólítið inn í holuna og í töflu 6 má sjá nánari umfjöllun um þá æð. Í 2. áfanga varð mjög lítið skoltap, mest 2 l/s (tafla 28). Hitahækkun sést hins vegar greinilega á um 405 og 436 m dýpi og er talið að þar séu litlar æðar (tafla 6).

Skoltap mældist lítið framan af við borun 3. áfanga holunnar og varð ekki verulegt fyrr en neðan 2400 m (Björn S. Harðarson o.fl, 2010b). Þrátt fyrir að helsta æð holunnar sé á 2347 m dýpi kom verulegt skoltap ekki fram fyrr en á milli 2400 og 2428 m en þá varð 24,1 l/s skoltap (tafla 28). Hitamælingar sýna engu að síður að nokkrar æðar eru fyrir ofan aðalæðina. Merki eru um tíu æðar og teljast þær allar litlar nema neðsta æðin í 2347 m sem telst stór. Yfirlit um æðarnar er í töflu 6 ásamt tengslum þeirra við hitamælingar, jarðlög og jarðlagamælingar. Tafla 27 sýnir fjölda hitamælinga sem hver æð sést í. Á myndum 61 og 62 má svo sjá jarðlög holunnar ásamt jarðlagamælingum.

Tafla 6. Æðar í holu HN-8.

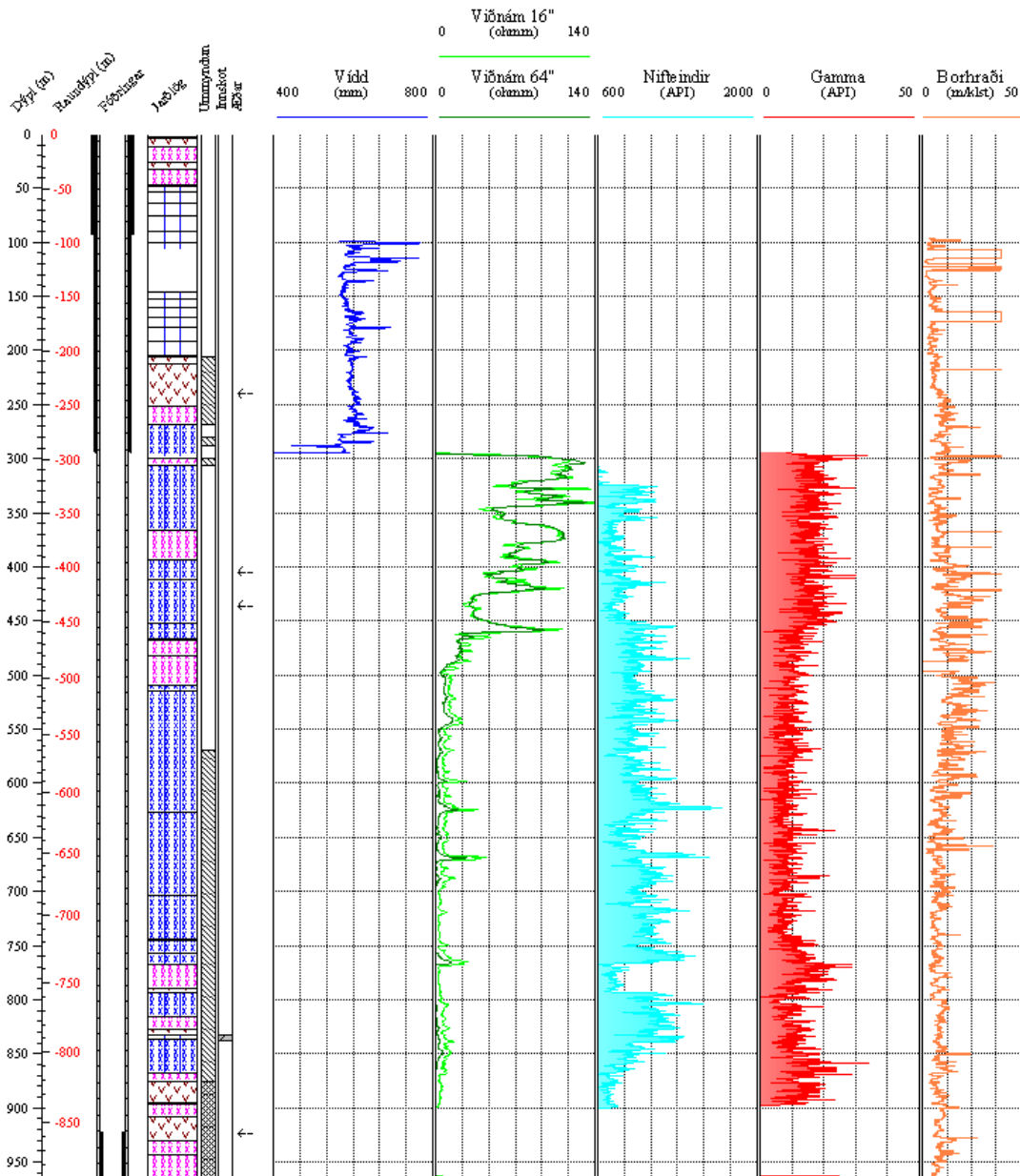
Dýpi [m]	Raun-dýpi [m]	Stærð æðar	Skoltap [l/s]	Athugasemdir um hitamælingar	Athugasemdir um jarðlagamælingar	Athugasemdir um jarðlög
240	240	Lítill	-	Sést í mælingu 1 sem svólítil kælipunktur.	Svólítil hækkun er í gammamælingu í u.þ.b. 200 m, líklega vegna aukinnar ummyndunar. Nifteindamæling sýnir fremur lág gildi og bendir það til þess að um fremur gropið berg sé að ræða.	Á þessu dýpi er um að ræða grænt túff sem oft er blöðrótt. Ferskt gler sést af og til og vottur af kalsíti og myndlausum kísli.
405	405	Lítill	-	Hita toppur er í mælingu 4 en einnig sést hún í 2 og 3.	Smá hækkun er í nifteindamælingu í kringum 400 m. Skolþrýstingur lækkaði lítillega á þessu dýpi.	Hér er bólstrabreksía eða bólstraberg og nokkuð er um sprungufyllingar.
436	434	Lítill	2	Sést í mælingum 2 og 5. Mæling 5 var gerð samhliða CBL mælingu og hnökrar eru að miklu leyti tengdir hörðnun steypu.	Víddarmælingu vantar á þessu dýpi. Þínulítið útslag er í bæði nifteinda- og gammamælingu á u.þ.b. þessu dýpi.	Sprungin ólivín-þóleítt breksía er á þessu dýpi. Aukning er í þýríti og kalsíti og aðeins verður vart við sprungufyllingar.
924	858	Lítill	2,0-2,9	Sést í mælingum 7, 9, 11 og 12. Hiti hækkar skarpt frá máð þessu dýpi í 11 og 12. Svólítil hitahækkun í 7 en skarpari í 9.	Hér vantar víddarmælingu og einnig vantar inn í viðnámsmælingu. Nifteindamæling sýnir lág gildi á þessu svæði sem ætti að benda til gropins bergs.	Grænt túff og ólivín-basalt breksía. Magnlaumontíts eykst niður á við. Kvarsi sprungum má sjá á þessu dýpi.
1106	1004	Lítill	2,0-2,9	Sést í mælingum 9, 11 og 12 en mæling 9 er mjög óregluleg neðan þessa dýpis (þétt hola?)	Víddarmæling sýnir að holan er fremur slétt á þessu dýpi. Nifteindamæling sýnir einstaka útslag og gammagildi eru fremur lág.	Hér eru breksía og grænt túff. Laumontít og gröffjaðraður leir eru helstu ummyndunarsteindir ásamt stöku kvars kristöllum.

1340-1344	1194-1198	Lítill	2,9?	Brot í mælingum 7 og 8.	Svolítill toppur er í viðnámi á þessu dýpi en toppur í nifteindum kemur fram aðeins ofar.	Bólstraberg og bólstrabreksía sjást á þessu dýpi en ekkert sérstakt sem bendir til æðar.
1630	1433	Lítill	2,9	Svolítill hitalækkun í mælingu 7.	Viðnám í hærri kantinum, einnig nifteindamæling. Gammagildi eru lág og holan virðist fremur slétt á þessu dýpi.	Meðalkorna ólivín-þóleiit basaltinnskot er hér. Ólivínið er tiltölulega fersklegt á sýndar. Fínkornóttara og ummyndaðra berg ásamt túffi fer að koma inn í meira mæli um og eftir 1630 m. Æð tengist þá e.t.v. jaðri innskots.
1659	1456	Lítill	2,9	Kælipunktur í mælingu 9.	Viðnám í hærri kantinum, einnig nifteindamæling. Gammagildi eru lág og holan virðist fremur slétt á þessu dýpi.	Meðalkorna ólivín-þóleiitlegt basalt, mögulegt innskot er á 1654-1658 m dýpi. Ólivínið er tiltölulega fersklegt á sýndar. Æð tengist e.t.v. jaðri innskots.
1830	1598	Lítill	2,9	Kælipunktar í mælingum 9, 11 og 12. Sést jafnvel líka í mælingu 7.	Útslag er nokkuð greinilegt í nifteindamælingunni en þó eru hæstu gildi almennt séð ekki hærri á þessu dýpi. Viðnámsmæling sýnir hægt vaxandi gildi og gammamæling er fremur lág.	1804-1810 m: Hvítt og mjög soðið túff. 1810-1914 m: Breksía; blanda af túffi og gleirjuðu basalti.
2347	2033	Stór	4,48-5,17	Sést í mælingum 6-12. Nokkuð skörp hitalækkun er í öllum þessum mælingum nema 11 og 12 þar sem fram kemur hitalækkun	Nifteinda- og gammamælingar ná ekki neðar en u.þ.b. 2350 m. Svo virðist sem útslag sé þó í báðum þessum mælingum á u.þ.b. því dýpi. Svólítið útslag sést líka í viðnámsmælingu en víddarmæling nær ekki svona langt niður.	Túff er yfirgnæfandi hér en á u.þ.b. þessu dýpi verður svafríð þó nokkuð blandaðra og breksíulegra. Vísbendingar eru um mögulegt innskot á þessu dýpi og er það á kvarðað út frá jarlagamælingum.
2428	2100	Lítill	24,14	Sést greinilega í mælingu 12 þar sem fram kemur skörp hitalækkun.	Engar mælingar ná niður á þetta dýpi.	Hér er bólstraberg og basaltbreksía litlu neðar.

Staður: Hellisheiði
 Holungrað: HN-8

 Bor: Geysir
 Dýptarbil: 0-965 m

 Skolvökvi: Vatn
 Verkhlufti: Öll holan

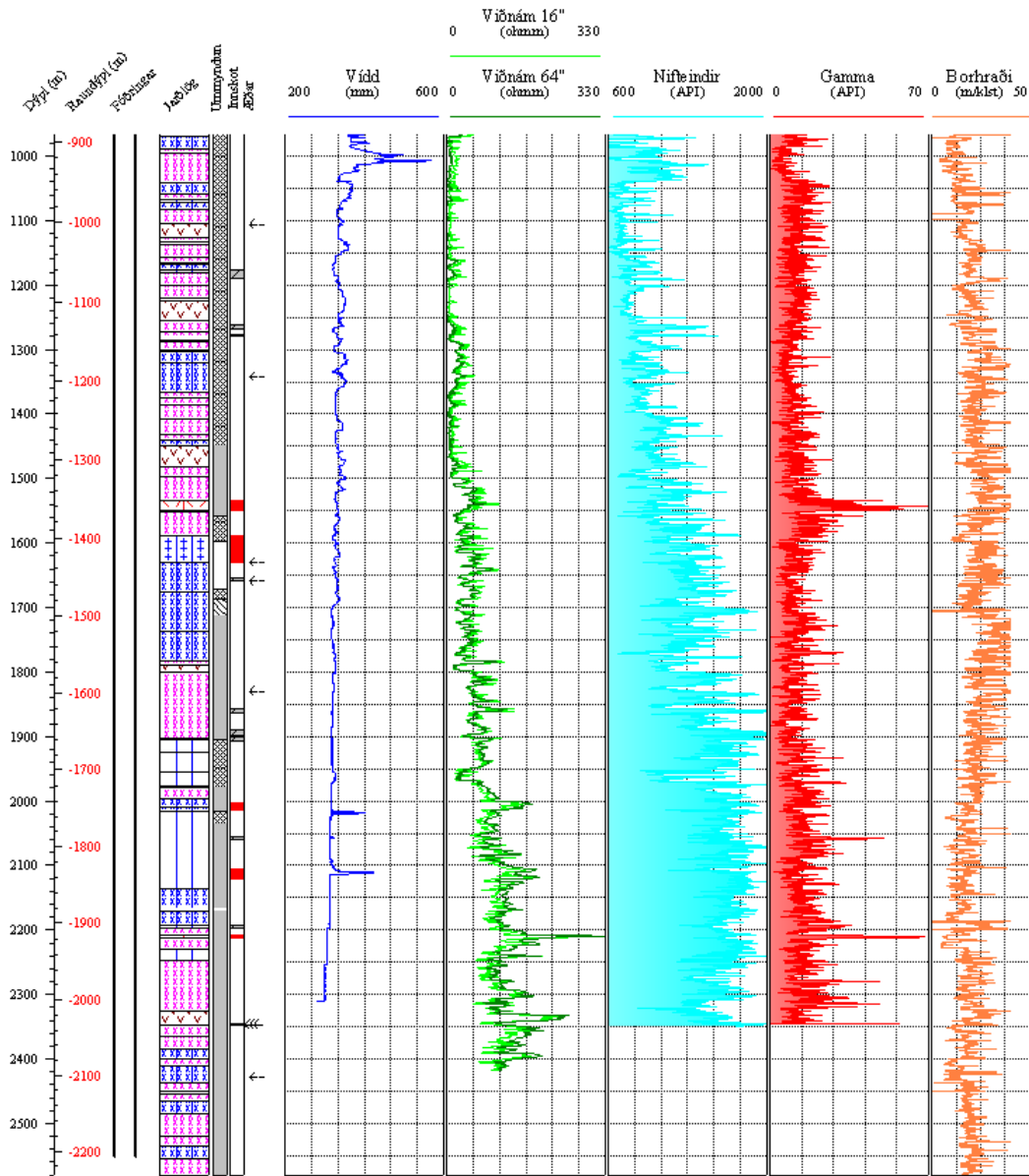
 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM


Mynd 61. Jarðlagasnið og jarðlagamælingar á dýptarbili 0-965 m í holu HN-8.

Staður: Hellisheiði
 Holunafn: HN-8

 Bor: Geysir
 Dýptarbíl: 0-2580 m

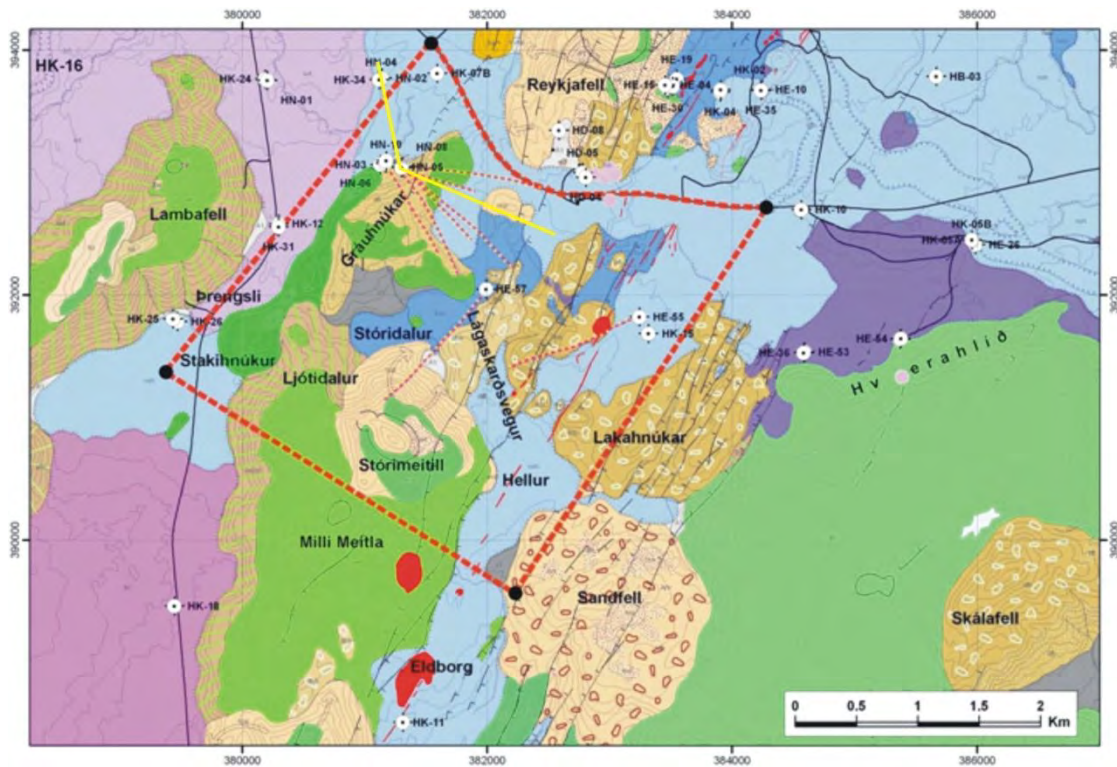
 Skolvökvi: Vatn
 Verkhliuti: Óil holan

 Staðarnúmer: 96598
 Starfsmenn: HMM


Mynd 62. Jarðlagasnið og jarðlagamælingar á dýptarbíli 965-2580 m í holu HN-8.

4 Umræður

Staðsetningu þversniðs, sem miðað er við á myndum 64, 65 og 66, má sjá merкта með gulri línu á mynd 1. Farið er í gegnum holu HN-2 í stefnu SSA í átt að holum HN-5 og HN-8. Þar er sniðið látið beygja í stefnu ASA og er það haft mitt á milli legu holanna. Vegna þessa má segja að hola HN-5 stefni örlítið út úr tvívíðu sniðinu á meðan hola HN-8 stefnir örlítið inn í það. Þau þversnið sem sjá má í köflunum á eftir eru jarðlagasnið, ummyndunarsnið og að síðustu þversnið þar sem merkt eru inn æðar í holunum ásamt innskotum.



Mynd 63. Úrdráttur úr jarðfræðikorti af Hengillssvæði (Kristján Sæmundsson, 1995). Litirnir merkja: grænt = grágrýti, brúnt = móberg, fjólublátt og blátt = hraun, grátt = framburður, rautt = gossprungur og gígar, svart = gjár og misgengi. Rauð brotalína merkir afmörkun Gráuhnúkasvæðisins. Borholur eru sýndar með stefnu. HE = djúpar vinnsluholur, HN = djúpar niðurdælingarholur, HK = grunnar rannsóknarholur. (Kristján Sæmundsson, 2010).

4.1 Jarðlög

Vestan og norðvestan við Gráuhnúka er nútímahraun á yfirborði sem er yngsta Helligheiðarhraunið (D), um 2000 ára gamalt (Kristján Sæmundsson, 2010). Hraun þetta má sjá á mynd 63 og er það ljósbítt að lit. Þetta er hraunið sem er efst í holu HN-2 og er þar jafnkorna, finkorna basalt. Hraunlagastafinn sem er þar fyrir neðan er jafnkorna, finkorna ólívín-þóleiit og nokkuð sést af plagióklasdílum neðst. Hraunið sést ekki í holum HN-5 og HN-8 þar sem Gráuhnúkamyndunin (G-M1) er þar á yfirborði og liggur Helligheiðarhraunið upp að þeirri myndun austan og norðan til og einnig aðeins vestan megin. Fyrir neðan þessar myndanir, á u.þ.b. 45 m dýpi, er ólívín-þóleiit hraunlagasyrpa (G-H1) sem sést í öllum

holunum og er hún um 65-80 m þykk. Myndunin er að einhverju leyti dílalaus í holum HN-5 og HN-8, en þó verður vart við plagióklas- og ólivíndíla inn á milli. Í HN-2 verður vart við einhverja ólivíndíla og eins sjást stakir plagióklasdílar. Því er talið að þessi myndun sé stak ólivín- og plagióklasdílótt.

Annars konar hraunlagasyrpa finnst strax fyrir neðan í holum HN-5 og HN-8 og virðist þar vera um ólivínríkara berg að ræða og jafnvel ólivín dílótt. Þessi myndun nær niður á rúmlega 460 m raundypi og er hér nefnd G-H2.

Myndun G-M2 finnst í öllum holunum en liggur nokkuð ofar í HN-2 (134-408 m raundypi) en í hinum holunum (u.þ.b. 208-460 m raundypi). Þessi myndun er mjög túffrik og blöðrótt ofan til (jafnvel frauðkennd) en verður þéttari þegar neðar dregur. Um er að ræða dílalaust móberg, aðallega túff, sem verður stundum breksíukenndara og bólstraberg sést einnig annað slagð.

Fyrir neðan þessa miklu móbergsmýndun er nokkuð þykkur hraunlagastafi í HN-2 en í HN-5 og HN-8 taka við eldri móbergsmýndanir. Þessi munur sýnir með nokkuð óyggjandi hætti að HN-2 er utan við upphleðslusvæði Hengilsins. Hraun hafa runnið frá hálendinu og niður á láglendið og safnast þar upp fyrir utan upphleðslusvæðið. Þessum hraunlagastafla í HN-2 má skipta upp í nokkrar mýndanir. Sú efsta (H2) er nokkuð þykk (408-660 m raundypi) og er hún fremur jafnkorna ólivín-þóleiit með stöku plagióklas- og ólivíndílum. Einstaka plagióklas hópdílar sjást og eru þeir meira áberandi í finkornóttari hluta bergsins. Þunn syrpa (H3) hefur svo verið greind á grundvelli jarðlagamælinga þar fyrir neðan, en þar kemur fram hækkun í viðnáms- og nifteindamælingum. Þessi hækkun virðist tilkomin vegna þéttleika bergsins en basaltið er áberandi jafnkorna hér og einnig þétt. Engu að síður virðist um ólivín-þóleiit að ræða (ólivín sést í grunnmassa) og stakir plagióklasdílar sjást. Á 674-772 m raundypi kemur inn dílalaust ólivín-þóleiit (H4) sem er þó enn jafnkorna. Ástæða þótti til að skipta staflanum upp vegna jarðlagamælinganna en einnig út frá vísbendingum úr holu HN-4, sem staðsett er á sama borplani, þar sem móberg finnst á svipuðu dýpi á milli hraunlagastafla. Um 6 m þykk dílalaus og túffrik móbergsmýndun (G-M4) kemur svo fram þar fyrir neðan áður en næsti hraunlagastafi tekur við og er sú myndun tengd við G-M4 í HN-8 eins og sjá má á þversniði á mynd 64. Þessi tenging er einungis ágiskun þar sem lítið af gögnum er til staðar til að byggja á. Ekki er auðvelt að greina þessa þunnu myndun til bergtegundar þar sem einungis túff sést en engin seteinkenni eru sjáanleg. Myndunin er því tengd yfir í holu HN-8 á grundvelli svipaðs dýpis. Hraunlagasyrpan þar fyrir neðan (H5) sýnir bæði þétt og fremur jafnkorna basalt og einnig meðalkorna ólivín-þóleiit. Myndunin er dílalaus og að mestu meðal- til grófkorna ólivín-þóleiit. Neðan hraunlagamýndananna í HN-2 eru að miklu leyti móbergsmýndanir og sýna þær að þessi hluti svæðisins hafi verið innan virks upphleðslusvæðis. Líkur má leiða að því að svæðið hafi verið innan Hengilssigdældarinnar en hafi svo smám saman rekið út fyrir.

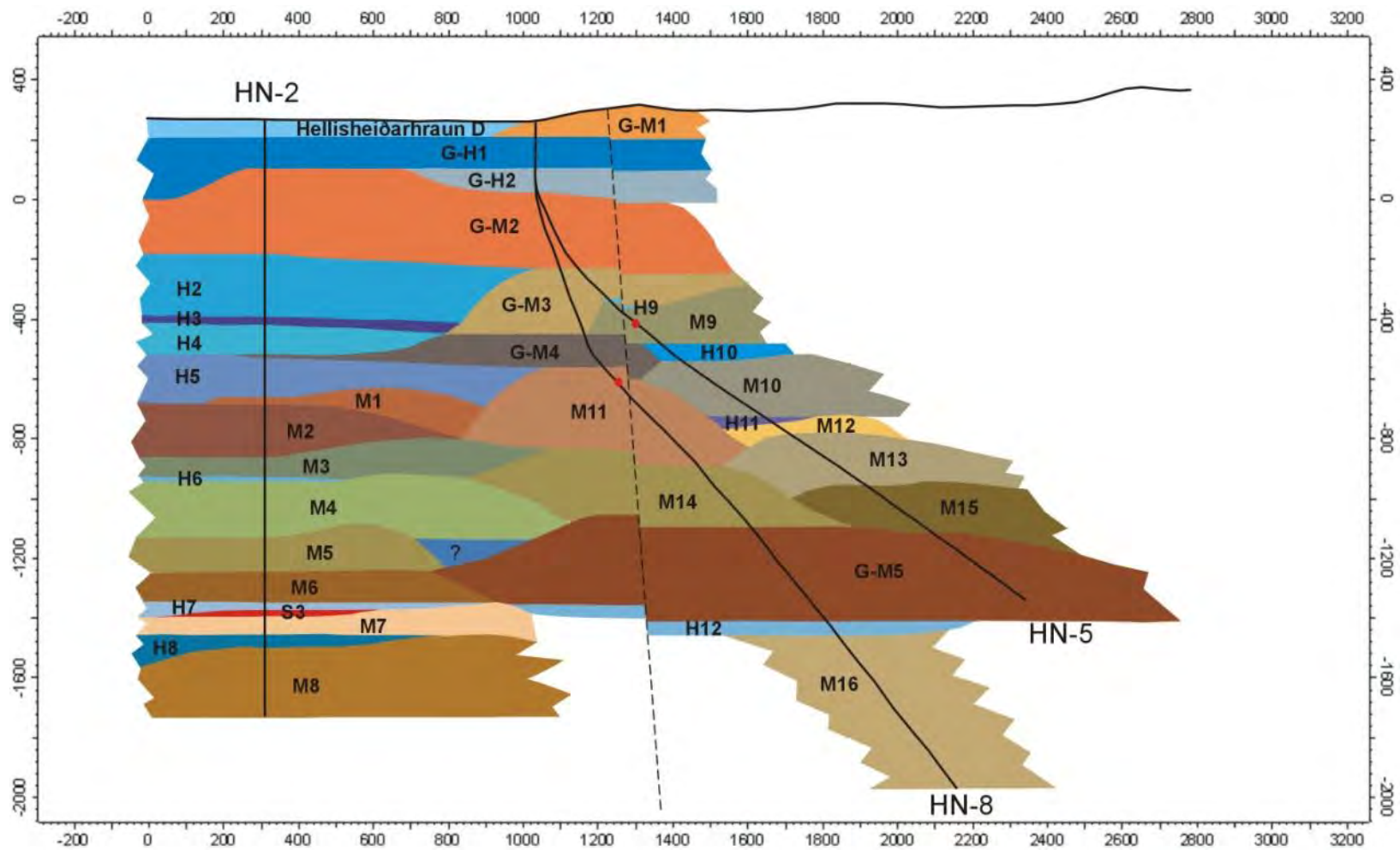
Á sama dýpi og hraunlagastafinn er í HN-2 eru nokkrar móbergsmýndanir í HN-5 og HN-8 og sést þar glögglega munurinn á myndunum innan við vesturjaðar sigdældarinnar og þeirra jarðlaga sem eru úti á sléttunni þar sem HN-2 er staðsett (mynd 64). Hægt er að tengja eina þeirra (G-M3) við báðar holurnar og er komið í hana á u.þ.b. 465 m raundypi þar sem myndun G-M2 endar. Er þar um að ræða dílalaust bólstraberg sem virðist fremur þétt. Bergið er allt frá hlutkristölluðu og upp í meðalkorna ólivín-þóleiit sem virðist fremur ólivínríkt. Stöku plagióklas hópdíla verður vart í finkornóttasta hlutanum en óvíst er hvort um eiginlega díla er að ræða þar sem kristöllum ólivín-þóleiits er fremur ójöfn og kristallar því nokkuð misstórir. Þessi myndun er mun þykkri í HN-8 en í HN-5 en það er hægt að útskýra með því að á þessu

dýpi eru holurnar farnar að fjarlægjast hvor aðra nokkuð, HN-8 beinist í aust-norðaustur en HN-5 í aust-suðaustur.

Aðrar myndanir tengjast ekki í holunum fyrr en á u.þ.b. 1550 m raundýpi þar sem dílalaus ólivín-þóleítt móbergsmýndun finnst bæði í holum HN-8 og HN-5. Þar sem myndanirnar eru á svipuðu dýpi í holunum tveimur var tekin sú ákvörðun að tengja þarna á milli. Breksíu- og bólstrabergslög virðast skiptast þarna á og er myndunin fremur þykk (miðað við holu HN-8 er hún um 350 m þykk en botninn á holu HN-5 endar í þessu bergi). Tekið skal fram að á þessu dýpi er svarf orðið mjög lélegt og því erfitt að fullyrða um díla.

Fyrir ofan þessa myndun má sjá nokkrar móbergsmýndanir í holum HN-5 og HN-5 og þrjú þunn hraunlög eru talin finnast í holu HN-2 sem benda e.t.v. til ísminni tímabíla í sögu Hengilsins (hlýskeyða). Það er þó ekkert sem segir að móbergshöfll geti ekki myndast á hlýskeyðum eins og dæmin sanna. Meira en helmingur sögulegra eldgosa á Íslandi hafa orðið innan jökla, sérstaklega í austur-gosbeltinu (Guðrún Larsen og Jón Eiríksson, 2008).

Þar sem hraunlagastafla kemur ekki greinilega fram í botni Gráuhnúkaholanna er e.t.v. erfitt að gera sér grein fyrir hvort einhvers staðar komi fram upphaf Hengils-eldstöðvarinnar í jarðlagastaflanum. Norðar á Hellisheiði (t.d. á Skarðsmýrarfjalli) hafa fundist þykkir hraunlagastaflar í botni (t.d. Hjalti Franzson o.fl., 2005) sem taldir eru tilheyra öðru eldstöðvakerfi, líklega Hveragerðiseldstöðinni sem nú er óvirk (Axel Björnsson et al., 1974). Þessi mörk eru talin vera á u.þ.b. 400 m u.s. á Nesjavöllum og á 900-1000 m u.s. í miðju Hellisheiðarsvæðisins og benda til þess að aldur eldstöðvarinnar sé um 300-400.000 ár (t.d. Hjalti Franzson 1998; Hjalti Franzson et al. 2005 og 2010; Helga Margrét Helgadóttir et al., 2010 (sú grein er einnig í viðauka VI)). Mögulegt er að hraunlög komi fram neðst í holu HN-8 en þar er svarf mjög fingert og erfitt að greina hvort um hraunlög eða bólstraberg sé að ræða. Þunnsneið á 2504 m mældu dýpi (u.þ.b. 1900 m u.s.) sýnir berg sem er líklega glerjað en þó er ekki útilokað að þar sé um hraunlög að ræða. Hins vegar er þetta ótrúlega djúpt miðað við hvar Hengilseldstöðin er talin byrja í staflanum norðar á Hellisheiði og ekki líklegt að tengsl séu þarna á milli.



Mynd 64. Þversnið af jarðlögum á Gráuhnúkasvæðinu. Rauðir deplar í holum HN-5 og HN-8 eru staðsettir u.þ.b. þar sem holurnar skera misgengið á myndinni.

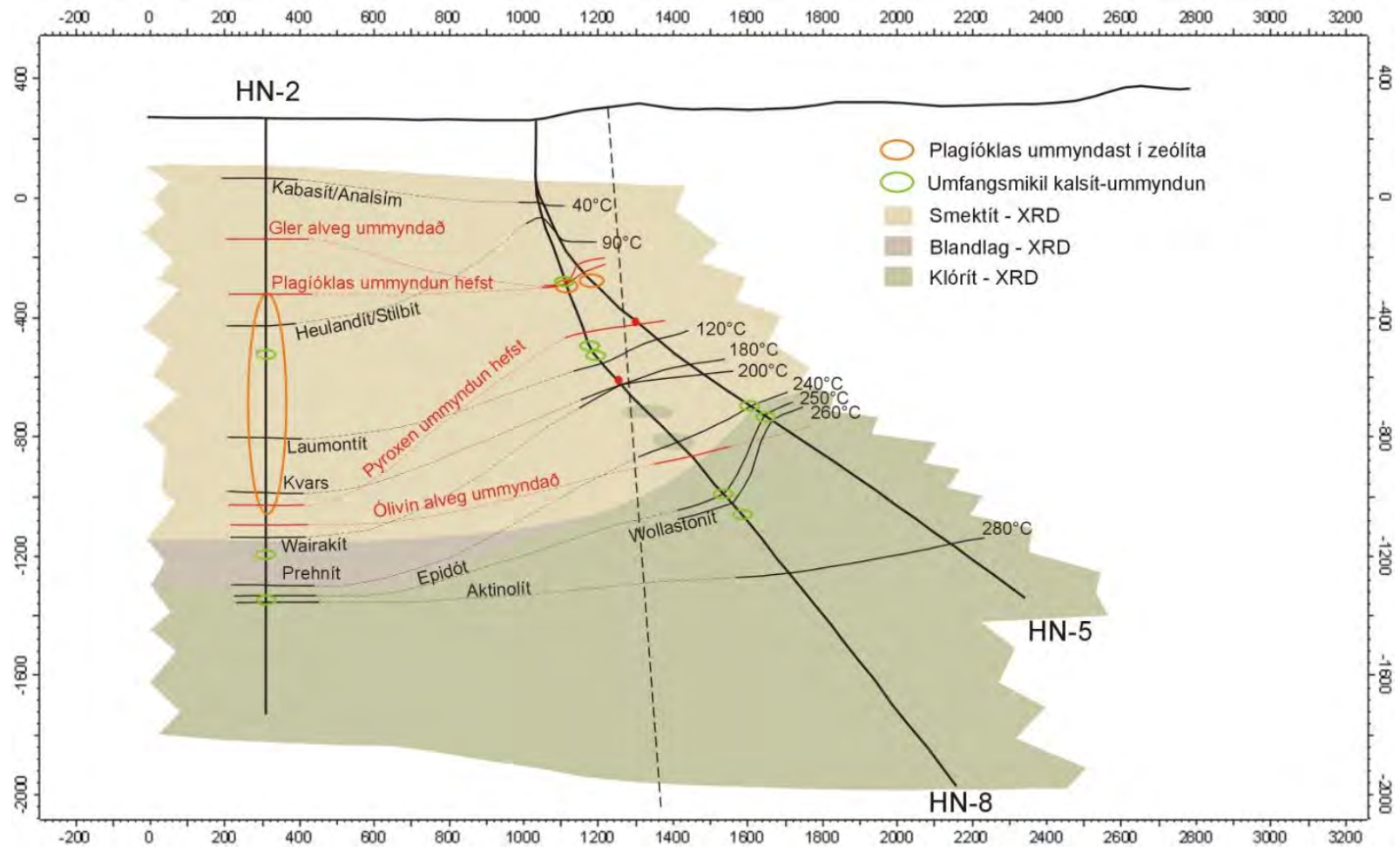
4.2 Ummyndun

Ef miðað er við þunnsneiðagreiningar þá er ólivín á Gráuhnúkasvæðinu í flestum tilfellum alveg ummyndað í leir í smektít-zeólíta beltinu. Einhver merki eru þó um ferskt ólivín alla leið niður í blandlagsbeltið en þau eru minniháttar. Gler er einnig alveg ummyndað í leir ofarlega í smektít-zeólítabeltinu. Fyrstu merki plagióklas ummyndunar verða í smektít beltinu. Yfirleitt má þá sjá leirsprungur eða þá að zeólítar hafa myndast í stað frumsteindarinnar. Ummyndun eykst almennt séð í blandlagsbeltinu og/eða klórít beltinu og þar hefst oftast albítisering plagióklaskristalla. Epidót, wairakít og prehnít ummyndunar verður einnig vart þegar holurnar hafa náð í klórít-epidót eða epidót-amfiból beltíð. Fyrstu merki ummyndunar á pýroxen sjást jafnvel í smektít-zeólíta beltinu en þau eru fá og mjög lítil. Ummyndun á pýroxen hefst yfirleitt í blandlagsbeltinu eða klórítbeltinu þar sem leirumyndun virðist ráðandi. Víðtæk aktínólít ummyndun verður ekki fyrir en í epidót-aktínólít beltinu en pýroxen virðist þó ekki ummyndast mjög auðveldlega. Fyrstu merki um ummyndun á málmsteindum sjást í blandlagsbeltinu en ummyndun eykst í klórít-epidót og epidót-amfiból beltunum.

Á mynd 65 má sjá ummyndunarþversnið holanna. Ummyndunarhitalínur grynnka til austurs frá HN-2 og það verulega þegar holur HN-5 og HN-8 fara í gegnum vesturjaðar gosbeltisins og inn í jarðhitakerfi Hengilsins eins og glögggt má sjá á myndinni. Engin áberandi regla er í umfangsmikilli kalsít-ummyndun, þar sem bergið sjálft verður fyrir kalsítummyndun (frumsteindir eða gler). Hins vegar er athyglisvert að þessi tegund ummyndunar virðist falla vel saman við upphaf epidót ummyndunar í öllum þremur holunum og er það eina reglan sem komið verður auga á. Einnig er athyglisvert hversu útbreidd ummyndun plagióklas-kristalla í zeólíta er í holu HN-2. Þessarar ummyndunar verður varla vart í holum HN-5 og HN-8, en þó sést þetta í sitthvoru sýninu á u.þ.b. sama dýpi í þeim holum. Þetta er freistandi að túlka sem mismun á ummyndun í lághita- og háhitakerfum.

Myndrænt séð virðist munur á því hvenær ólivín er orðið alveg ummyndað ósköp lítill innan jarðhitakerfisins og utan þess. Hins vegar er ekki alveg að marka þetta þar sem ólivín er nánast alveg ummyndað allt frá um 716 m dýpi í holu HN-8 og í holu HN-5 sést ekki greinilega til fersks ólivíns á u.þ.b. 900-1162 m dýpi. Ummyndun á ólivíni var langt komin á u.þ.b. 900 m og því er svolítið óljóst hvenær það er alveg ummyndað. Því skal þessari línu tekið með fyrirvara.

Áberandi er hversu bratt er á klórít ummyndun þegar komið er inn fyrir vesturjaðar sigdældarinnar. Þar má sjá að samfellt klórít byrjar hæst í holu HN-5 á u.þ.b. 950 m raundypi (um 670 m u.s.) en það verður ekki samfellt í HN-8 fyrir en neðan við 1147 m raundypi (886 m u.s.). Hins vegar eru tveir klórít „blettir“ fyrir ofan það dýpi í HN-8 og er sá efri á svipuðu raundypi og í HN-5. Líklegt er að þarna sé leirumyndun að bregðast hraðar við hitanum en aðrar ummyndunarsteindir og er það í samræmi við aðrar rannsóknir (t.d. Hrefna Kristmannsdóttir, 1979).



Mynd 65. Ummyndunarþversnið á Gráuhnúkasvæðinu.

Þegar bornar eru saman greiningar á leir í XRD og því sem greint er í þunnsneiðaskoðun kemur í ljós svolítill munur. Ágætis samræmi er á milli greininga í HN-2. Þar er reyndar greindur blandlagsleir í 1324 m sem er nokkru ofar en í röntngreiningunum þar sem það greinist fyrst í u.þ.b. 1430 m (Sigurður Sveinn Jónsson o.fl., 2009). Klórít kemur inn á mjög svipuðum slóðum í HN-2, á um 1570 m dýpi (mynd 65).

Blandlagsleir finnst í þunnsneiðum á um 975 m raundýpi í HN-8 og finnst svo með klóríti allt frá 1015 m raundýpi og mjög reglulega niður á 1470 m. Einnig sést aftur til blandlagsleirs í þunnsneið á u.þ.b. 1720 m raundýpi. Í röntngreiningum finnst blandlagsleir ásamt klóríti á um 1150-1280 m raundýpi og svo aftur á u.þ.b. 1515-1600 m. Greiningar í þunnsneiðum eru ekki sýndar á ummyndunarþversniðinu (mynd 65). Í röntngreiningu finnst klórít fyrst í holunni á um 950 m dýpi, nokkru ofar en klórít greinist fyrst í þunnsneiðum. Hægt er að útskýra þetta með því að um mismunandi sýni er að ræða, þ.e. sama sýnið fer yfirleitt ekki bæði í röntngreiningu og í þunnsneiðagerð og ekki er loku fyrir það skotið að þegar umbreyting verður frá smektíti yfir í blandlag og alla leið í klórít þá sé svolítið mismunandi milli sýna hvort umræddar leirsteindir finnist. Einnig getur þetta stafað af því að í þunnsneiðaskoðun beinist athyglin frekar að leir sem er í holufyllingum en þeim sem er í berginu sjálfu. Í röntngreiningum er miðað við heildina. Miðað við röntngreiningar þá er klórít á tveimur aðgreindum stöðum áður en hann greinist samfellt niður holuna. Þessir „blettir“ eru á 944-994 m og 1048-1100 m raundýpi frá yfirborði. Fyrir neðan 1147 m raundýpi greinist klórít samfellt niður. Í þunnsneiðum finnst klórítið hins vegar samfellt í þunnsneiðunum allt frá um 1015 m raundýpi eða meira en 100 m ofar.

Í HN-5 finnst blandlagsleir ásamt klóríti á tæplega 1000 m raundýpi og niður á rúmlega 1100 m. Talið er að þar sé á ferðinni klórít með sterkum blandlagseinkennum (Sigurður Sveinn Jónsson o.fl., 2006). Í þunnsneiðaskoðun varð hans einnig vart á rétt tæplega 1000 m raundýpi en svo ekki aftur fyrr en á rúmlega 1100 m raundýpi. Eftir það sést hann allt niður á um 1350 m raundýpi en á um 1175 m raundýpi greinist öruggt klórít í fyrsta sinn í þunnsneiðum. Klóríteinkenni á leirnum fóru þó að sjást aðeins ofar (minni lithverfni og ekki eins bjartir litir í tvískautuðu ljósi). Klórít greinist hins vegar í röntngreiningu mun ofar, eða á 950 m raundýpi og finnst þar samfellt niður holuna. Fróðlegt væri að skoða þetta ósamræmi og ástæður þess betur.

Athyglisvert er að í öllum holunum er fyrsta innkoma epidóts neðar en innkoma prehníts. Þetta er ekki í samræmi við athuganir á ummyndunarröðum þar sem flest bendir til þess að prehnít myndist á eftir epidóti (bæði í HN-5 og HN-2, í HN-8 er þetta óljóst). Ekki er ljóst hver ástæða þessa gæti verið en ekki er útilokað að greining á ummyndunarröðum hafi að einhverju leyti verið röng. Tilhneyging er að meta þá kristalla sem hafa áberandi kristallögun sem undanfara þess sem umlykur þá en til eru dæmi þess að hið öfuga gildi (t.d. að kvars með mjög áberandi kristallögun myndist í laumontíti, sem þá umlykur það).

Talið er að jarðhitakerfi á Íslandi hafi almennt séð náð mun ofar í jarðlagastaflanum á síðasta jökulskeiði en þau gera í dag. Að einhverju leyti gæti þetta verið vegna hærri grunnvatnsstöðu á jökulskeiðum en einnig gæti verið að sprungukerfi hafi verið ólík því sem þau eru í dag. Einnig verður þrýstifall þegar jökull hverfur og það getur einnig haft áhrif. Ástæða þess að berghiti mælist hærri í Gráuhnúkum en ummyndunarhiti gæti verið vegna þess að sprungukerfi séu ekki jafn stór og norðar á vesturjaðri gosbeltisins. Því hefur grunnvatn e.t.v. ekki náð að kæla þann jarðhita sem myndaðist á síðasta jökulskeiði og hann hefur því varðveist betur en á mörgum öðrum stöðum. Ekki er vitað hversu langa tíma það tekur ummyndunarsteindir að ná jafnvægi við ríkjandi berghita en ef við gerum ráð fyrir að þetta

geti verið raunin tekur það meira en tíuþúsund ár. Það er þá í samræmi við þá skoðun að ummyndun á Hellisheiði hafi enn ekki náð þeim aukna hita sem varð við gosvirknina fyrir 2000 og 5000 árum síðan (Hjalti Franzson et al., 2010). Hraði ummyndunarferlisins er þó háð mörgum þáttum eins og hitastigi, efnafræði, berggerð og uppbyggingu bergsins (tektóník) (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979) og það skiptir því máli hvort um t.d. túff eða hraunlög er að ræða þegar hraði ummyndunar er annars vegar. Flæði vatns um bergið skiptir einnig gríðarmiklu máli.

Samanburður berghita og ummyndunarhita bendir til þess að upphitun eigi sér stað í Gráuhnúkum en kólnun hefur greinilega orðið fyrir utan vesturjaðar gosbeltisins, í HN-2. Ekki er unnt að staðhæfa hvort um sérstakt uppstreymi jarðhita er að ræða eða hvort það tengist t.d. ætluðu uppstreymi í Stóra-Reykjafelli (Hjalti Franzson o.fl., 2005). Miðað við rannsóknir á viðnámi á Hengilssvæðinu má leiða líkum að því að jarðhiti í Hverahlíð teygi sig í vestur og inn í sprungusvæðið norðaustan við Stóra-Meiti (mynd 63) (Knútur Árnason og Ingvar Þór Magnússon, 2001). Fróðlegt verður að rannsaka í framtíðinni hvort uppstreymi á sér stað undir Gráuhnúkum, eða hvort það tengist uppstreymi í Stóra-Reykjafelli eða Hverahlíð þar sem litlar vísbendingar eru um það útfrá jarðeðlisfræðilegum mælingum sem hingað til hafa verið gerðar.

Varðandi ummyndunarraðir þá er ekki hægt að segja að einhver endanleg niðurstaða hafi fengist í jarðhitasögu svæðisins útfrá þeim. Zeólítar virðast ekki vera með mjög ákveðna röðun og er það e.t.v. í samræmi við það að á háhitasvæðum séu zeólítabeltin ekki mjög afgerandi vegna bratts hitastiguls (Hrefna Kristmannsdóttir og Jens Tómasson, 1976). Ekki er ólíklegt að hitastig sé fremur breytilegt í efsta hluta jarðhitakerfisins og þar sem zeólítar virðast ná nokkuð auðveldlega jafnvægi við jarðhitavökvann (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979) er ekki loku fyrir það skotið að röð þeirra verði fremur ruglingsleg á háhitasvæðum ólíkt því sem tíðkast á lághitasvæðum.

Á því stigi sem einkennist af lághituummyndun í HN-2 má þó sjá að zeólítar myndast snemma, á undan karbónathnúðum og karbónatstönglum (aragóníti). Líklega er þar um hluta af palagónítiseringu glers að ræða en einhverjir telja að myndun zeólíta geti einnig verið hluti af því ferli (Bruce D. Pauly, munnleg heimild, ágúst 2011). Ekki er ólíklegt að það ferli tengist kólnun móbergsins eftir myndun þess (ef vatn er til staðar). Í kjölfarið á myndun þessara fyrri zeólíta fara að myndast karbónathnúðar og aragónít í grunnvatnskerfinu og þegar hiti hækkar aðeins eftir því sem bergið grefst dýpra fara zeólítar að myndast aftur. Þegar komið er inn í jarðhitakerfi má segja að ferli númer þrjú fari í gang þar sem niðurbrot lághitasteindanna hefst og í stað þeirra myndast háhitasteindirnar hver af annarri eftir því sem hiti hækkar. Til þess að enn gleggri mynd verði til af ummyndunarsögu svæðisins væri gott að rannsaka vökvabólur á svæðinu.

Ákveðið var í upphafi þessarar rannsóknar að dýpka úrvinnslu á vissum þáttum hennar enn frekar. Í þessu tilfalli var ákveðið að skoða betur ummyndun á Fe-Mg frumsteindum ólivín-þóleiíts (ólivíni og pýroxen). Ummyndun á plagióklas á Hengilssvæðinu hefur þegar verið ítarlega rannsökuð (Larsson o.fl., 2001) og því þótti tilvalið að bæta við rannsóknum á þessum tveimur steindum þó ekki hafi hún orðið jafn umfangsmikil og rannsókn Larsson og féлага.

Í þessari rannsókn, sem gerð var með örgreiningum við Háskóla Íslands, kom í ljós að ummyndun sem greind var í frumsteindunum ólivíni og pýroxeni í bergsmásjá er í góðu samræmi við þær greiningar. Helstu niðurstöður rannsóknarinnar eru þær að frumsteindirnar

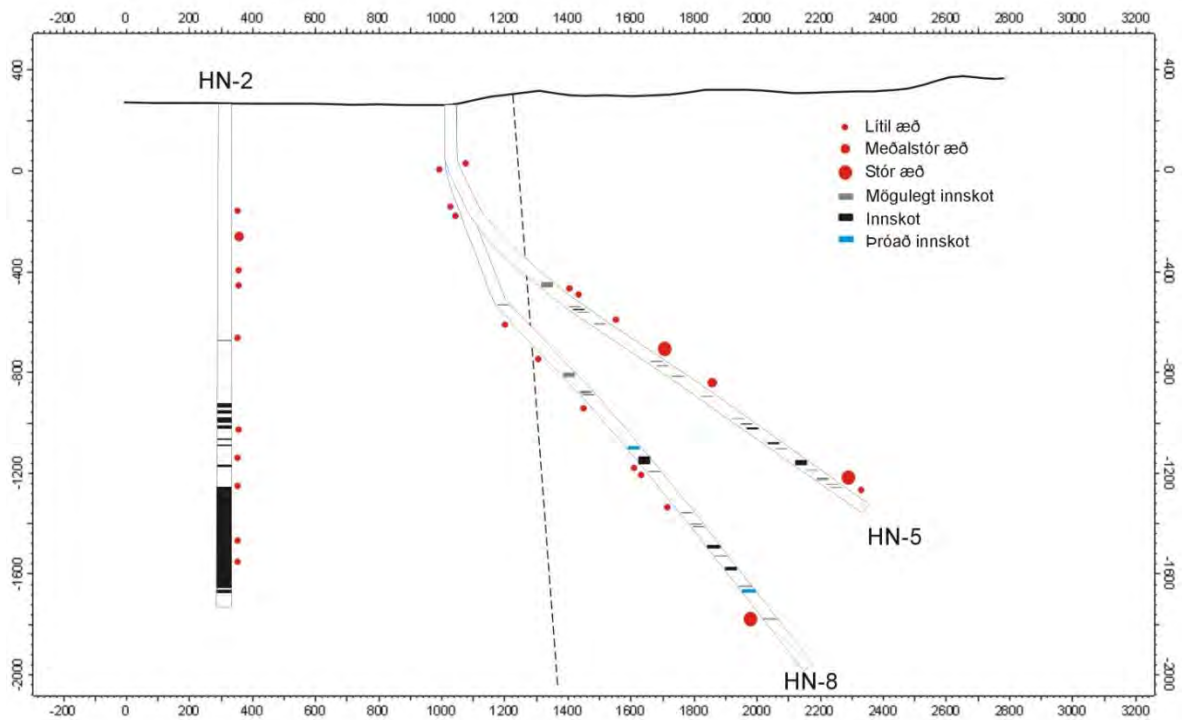
virðast leysast upp áður en ummyndunarsteindin fellur út í staðinn (uppleysni-útfellingar hvörf). Deuterískar ummyndunar verður vart í ólivíni í annars óummynduðu hraunlagi á 128-130 m dýpi í HN-2. Þar hafa ólivín kristallar fellt út Fe-oxíð við kólnun bergsins við oxandi aðstæður og háan hita. Iddingsít er algeng ummyndun á ólivíni og er lýst sem blöndu af goethíti, lag-sílikötum og smektíti (t.d. Baker og Haggerty, 1967). Ekki verður vart við iddingsít í örgreiningunum sjálfum en í smektítumyndun á „backscatter“ myndum má sjá veik merki þess að Fe-oxíð sé innan um í smektítinu. Að síðustu mátti sjá að þriggilt Fe hverfur úr iddingsítinu og eftir verður ólivín sem hefur alveg ummyndast í smektít (pseudomorph). Þegar ummyndun eykst umbreytist smektítið í klórít. Pýroxen virðist hins vegar vera stöðugt þar til í klórít-epidót beltinu þar sem klórít kemur í stað frumsteindarinnar. Þegar í epidót-aktinólít beltinu er komið á sér stað ummyndun í aktinólít sem smám saman tekur yfir frumsteindina með auknu ummyndunarstigi. Svo virðist einnig sem að nokkuð afgerandi munur sé á samsetningu aktinólíts eftir því hvort það hefur myndast úr pýroxeni úr innskotum eða úr hraunlagastafla. Talið er að þennan mun megi að einhverju leyti rekja til minni oxunar innskotsbergsins en sá möguleiki er einnig til staðar að sívaxandi ummyndun hraunlagastaflans eftir því sem hann grefst dýpra verði til þess að aktinólít myndist jafnvel úr klóríti, en myndist hins vegar beint úr frumsteindinni í innskotum sem kólna niður í ríkjandi hita og taka þá ummyndun sem ríkir á viðkomandi dýpi. Frekari upplýsingar um þessa rannsókn má sjá í viðauka V.

4.3 Æðar

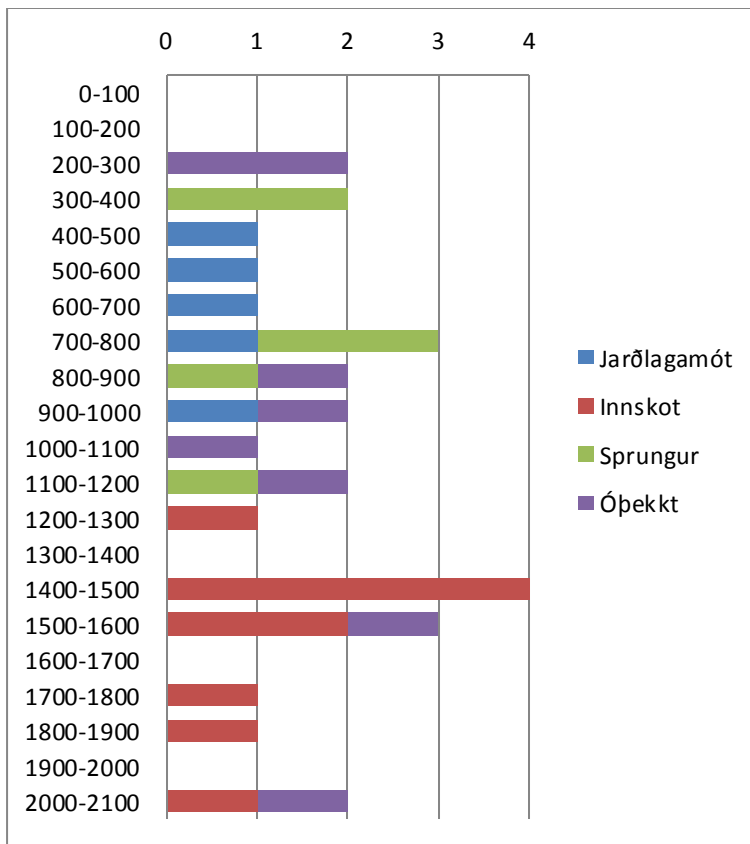
Eins og áður hefur komið fram þá má oft tengja æðar sem finnast ofarlega í holum við jarðlagamót. Þetta er algengt að sjá á jarðhitasvæðum (t.d. Hjalti Franzson et al., 1986). Þegar neðar dregur er líklegra að æðarnar tengist innskotum og á mynd 66 má sjá staðsetningu æða og innskota í holunum þremur. Á mynd 67 má sjá hvernig tengsl æða í holunum skiptast á milli jarðfræðilegra þátta. Þar sem tengsl eru óþekkt hafa ekki fundist neinar vísbendingar um lekt í svarfinu. Einnig er nokkuð algengt að vísbendingar um sprungur tengist innskotum.

Ekki er að sjá að Húsmúlamisgengið sé sérstaklega lekt á þessum slóðum en í holu HN-8 er þó ein æð sem gæti tengst misgenginu. Í HN-2 eru engar stórar æðar en neðst í holunni má sjá að einhver leki tengist innskotum sem eru algeng þar. Neðarlega í holum HN-5 og HN-8 má sjá að flestar æðarnar virðast vera í nánd við innskot en það er þó ekki algilt.

Eftir því hefur verið tekið að stærri æðar tengist oft hæstum hita í holunum (t.d. Björn S. Harðarson, 2010c; Hjalti Franzson et al., 2005). Þó virðist oft sem mestur leki við vesturjaðar Hengilsins tengist misgengjum (Björn S. Harðarson o.fl., 2009) og er það í samræmi við þá skoðun að sterkasti áhrifavaldur lektar séu lóðréttar sprungur og misgengi (t.d. Stefán Arnórsson, 1995). Þetta er ekki áberandi í holum HN-5 og HN-8 og teljast æðar sem eru nærri misgenginu á mynd 66 vera litlar. Ekki er vitað hvort misgengi tengist stærstu æðunum í holunum en það telst a.m.k. ólíklegt að þær tengist sama misgengi (ef eitthvað er) þar sem staðsetning þeirra passar illa saman. Þar sem lítið er af áberandi leiðarlögum eins og hraunlögum í neðri hluta holanna er erfitt að bera kennsl á misgengi og ekki verður vart við misgengi á yfirborði önnur en það sem fram kemur á þversniðinu á mynd 66 auk sprungna sem sjást á yfirborði nærri botni Gráuhnúkaholanna og enn austar (mynd 63).



Mynd 66. Þversnið af Gráuhnúkasvæðinu þar sem sýnd eru innskot og æðar. Í skáboruðu holunum er miðja æðapunkta sá punktur sem miðað er við. Því þarf að nota lárétt strik til að athuga hvort æðar tengist innskotum.



Mynd 67. Fjöldi æða eftir raundýpi í holum HN-2, HN-5 og HN-8 og tengsl þeirra við jarðfræði.

5 Ályktanir

1. Jarðlög á Gráuhnúkasvæðinu sýna annars vegar upphleðslujarðlög gosbeltisins (Hengils-eldstöðvarinnar) sem einkennist af fjölmörgum móbergsmyndunum (HN-5 og HN-8) og hins vegar svæði sem rekið hefur út úr gosbeltinu og hefur verið láglendi í einhvern tíma (einkennist af hraunlögum sem runnið hafa niður á láglendi – HN-2).
2. Berggerð á svæðinu er að langmestu leyti ólívín-þóleiit en þó má finna svolítið af þóleiiti og einnig finnst einstaka þróað innskot sem bendir til tengsla við megineldstöð.
3. Ekki er hægt að fullyrða hvar Hengilseldstöðin byrjar í jarðlagastaflanum þar sem hraunlagastafla finnst ekki í botni HN-5 og HN-8.
4. Dýpi á hitaháðar ummyndunarsteindir og ummyndun frumsteinda bergsins er almennt séð mun minna í HN-5 og HN-8 en í HN-2 og sýnir það að fyrrnefndar holur eru komnar inn fyrir áhrifasvæði jarðhitans í Hengli.
5. Samanburður ummyndunarhita og berghita bendir til þess að svæðið í kringum HN-2 hafi orðið fyrir kólnun. Víðfeðm ummyndun plagióklass í zeólíta í HN-2 þykir einnig styðja það að í dag sé í raun um lághitakerfi að ræða og hola sé því fyrir utan gosbeltið. Þetta virðist ekki gerast í holum þar sem háhitakerfi er. Hins vegar eru vísbendingar um hitnun í holunum við Gráuhnúka og þá sérstaklega í HN-5. Ekki er ljóst hvaðan sá hiti kemur eða hvort Gráuhnúkasvæðið sé t.d. tengt ætluðu uppstreymi í Stóra-Reykjafelli.
6. Ummyndunarröð í holu HN-2 hefur leitt í ljós að zeólítar hafa myndast áður en grunnvatnsummyndun hefur átt sér stað (karbónathnúðar og aragónít). Þetta þykir nokkuð eindregin vísbending þess að zeólítar myndast í tengslum við palagónitiseringu móbergs, þ.e. við kólnun móbergsmyndunarinnar eftir gos. Þegar grunnvatn kemst svo í tæri við bergið myndast ummyndunarsteindir eins og karbónathnúðar og aragónít. Eftir því sem bergið grefst dýpra (og þetta á einnig við um holur HN-5 og HN-8) myndast lághitasteindir eins og zeólítar og kalsít leggst svo yfir og fyllir upp í porur og sprungur. Þegar hiti nálgast 180°C fara zeólítar að brotna niður og leir, kvars og wairakít myndast í stað þeirra. Þegar niðurbroti þeirra er alveg lokið fara aðrar háhitasteindir smám saman að myndast (epidót, prehnít, wollastonít) og kalsít leggst að lokum yfir allt.
7. Algengt er að æðar í holunum tengist jarðlagamótum ofan til í holunum en þegar neðar dregur tengjast æðar frekar innskotum.

6 Heimildir

Axel Björnsson, Jens Tómasson og Kristján Sæmundsson, 1974. Hengilssvæðið, staða jarðhitarannsóknna vorið 1974. Orkustofnun, OS JHD 7415. 9 s.

Ásgrímur Guðmundsson, 2005. Geothermal Data Collection and Consultancy at Drill Site. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey. 6 s.

Baker, Ian and Haggerty, Stephen E., 1967. The Alteration of Olivine in Basaltic and Associated Lavas. Part II: Intermediate and Low Temperature Alteration. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 16: 258-273.

Bird, Dennis K. and Abigail R. Spieler, 2004. Epidote in Geothermal Systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 56, Epidotes: 235-300.

Björn S. Harðarson, Helga M. Helgadóttir og Hjalti Franzson, 2007. Hellsheiðarvirkjun. Niðurrenslissvæðið við Gráuhnúka. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2007/001. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. 29 s.

Björn S. Harðarson, Guðmundur H. Guðfinnsson, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir og Hörður Tryggvason, 2010a. Hellsheiði – Hola HN-8. Borun fyrir 22½" yfirborðsföðringu í 99 m, 18⅝" öryggisföðringu í 297 m og 13⅜" vinnsluföðringu í 965 m dýpi. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/104. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. 42 s + viðauki.

Björn S. Harðarson, Steinþór Nielsson, Guðmundur H. Guðfinnsson og Hörður Tryggvason, 2010b. Hellsheiði – Hola HN-8. 3. áfangi: Borun vinnsluhluta frá 965 m í 2580 m dýpi fyrir 9⅝" leiðara. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/105. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. 46 s + viðauki.

Björn S. Harðarson, Gunnlaugur M. Einarsson, Bjarni R. Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson, Helga M. Helgadóttir, Hjalti Franzson, Knútur Árnason, Kristján Ágústsson og Einar Gunnlaugsson, 2010c. Geothermal Reinjection at the Hengill Triple Junction, SW Iceland. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. 7 s.

Clifton, Amy E., Sigmundsson, F., Feigl, K.L., Guðmundsson, G. and Árnadóttir, Th., 2002. Surface effects of faulting and deformation resulting from magma accumulation at the Hengill triple junction, SW Iceland, 1994-1998. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115: 233-255.

Foulger, G.R., 1995. The Hengill geothermal area, Iceland: Variation of temperature gradients deduced from the maximum depth of seismogenesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 65: 119-133.

Gunnar Böðvarsson, 1951. Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði og nágrenni, árin 1947-1949. Fyrri hluti. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, 1: 1-48.

Grímur Björnsson, 2007. Endurskoðað hugmyndalíkan af jarðhitakerfum í Hengli og einfalt mat á vinnslugetu nýrra borsvæða. Orkuveita Reykjavíkur, OR-2007-3. 65 s.

Guðrún Larsen og Jón Eiríksson, 2008. Holocene tephra archives and tephrochronology in Iceland – a brief overview. *Jökull*, 58: 229-250.

Gylfi Páll Hersir, Grímur Björnsson og Axel Björnsson, 1990. Eldstöðvar og jarðhiti á Hengilssvæði. Jarðeðlisfræðileg könnun. Orkustofnun OS-90031/JHD-06. 90 s.

Helga Margrét Helgadóttir, 2006. Formation of Palagonite. Petrographical Analysis of Hyaloclastite Tuffs from the Western Volcanic Zone in Iceland. B.Sc. Thesis. University of Iceland. 46 s.

Helga Margrét Helgadóttir, Björn S. Harðarson, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson, Benedikt Steingrímsson og Peter E. Danielsen, 2009a. Hellisheiði – Hola HN-5. 1., 2. og 3. áfangi: Borun fyrir öryggisföðringu í 100 m, vinnsluföðringu í 774 m og vinnsluhluta í 2076 m dýpi. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2009/023. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. 150 s + viðauki 3.

Helga Margrét Helgadóttir, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson og Ragnar K. Ásmundsson, 2009b. Hellisheiði – Hola HN-2. 1., 2., og 3. áfangi: Borun fyrir öryggisföðringu í 153 m, vinnsluföðringu í 403 m og vinnsluhluta í 2001 m dýpi. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2009/031. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. 51 s.

Helga Margrét Helgadóttir, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Steinþór Nielsson, 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 s.

Helgi A. Alfreðsson, Björn S. Harðarson, Hjalti Franzson og Sigurður R. Gíslason, 2008. CO₂ sequestration in basaltic rock at the Hellisheiði site in SW Iceland: stratigraphy and chemical composition of the rocks at the injection site. *Mineralogical Magazine*, 72 (1), 5 s.

Hjalti Franzson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson og Jens Tómasson, 1986. Nesjavellir high-temperature field in SW-Iceland – reservoir geology. Í Proceedings 5th International Symposium on Water-Rock Interaction: 210-213.

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: 13-20.

Hjalti Franzson, Bjarni Reyr Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson, Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, Benedikt Steingrímsson, Einar Gunnlaugsson og 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 s.

Hjalti Franzson, Robert Zierenberg og Peter Schiffman, 2008. "Chemical transport in geothermal systems in Iceland. Evidence from hydrothermal alteration". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 173, 217-229.

Hjalti Franzson, Knútur Árnason, Kristján Sæmundsson, Benedikt Steingrímsson, Björn S. Harðarson og Einar Gunnlaugsson, 2010. The Hengill geothermal system, conceptual geological model. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. 9 s.

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

Hrefna Kristmannsdóttir, 1979. "Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C." Developments in sedimentology (27): 259-267.

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

Jousset, P., Haberland C., Bauer, K. and Arnason, K., 2011. Hengill geothermal volcanic complex (Iceland) characterized by integrated geophysical observations. Geothermics, 40 (1): 1-24.

Knútur Árnason og Ingvar Þór Magnússon, 2001. Jarðhiti við Hengil og á Hellsheiði. Niðurstöður viðnámsmælinga. Orkustofnun, OS-2001/091. 250 s.

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): 13-34.

Kristján Sæmundsson, Snorri Páll Snorrason og Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1990. Skýrsla um jarðfræðikort af suðurhluta Hengilssvæðis milli Hengladala og Krossfjalla (Jarðfræðikort og jarðhitakort í handriti). Orkustofnun, OS-90008/JHD-02 B. 16 s.

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

Kristján Sæmundsson, 2010. Gráuhnúkar. Jarðfræðiyfirlit og helstu jarðfræðiminjar á virkjunarsvæði. Íslenskar Orkurannsóknir. Greinargerð. ÍSOR-10035. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur.

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: 275-290.

Matter, M.J., Broecker, W.S., Stute, M., S.R. Gislason, S.R., Oelkers, E.H. , A. Stefánsson, Wolff-Boenisch A.D., , E. Gunnlaugsson, E., Axelssone, G. and Björnsson, G., 2009. Permanent Carbon Dioxide Storage into Basalt: The CarbFix Pilot Project, Iceland, *Energy Procedia*, 1: 3641–3646.

McBirney, A.R., 1993. Igneous Petrology. Second Edition. Jones and Bartlett Publishers. 508 s.

Pauly, Bruce D. Munnlegar upplýsingar 2011.

Páll Einarsson, 1978. S-wave shadows in the Krafla caldera in NE-Iceland, evidence for a magma chamber in the crust. *Bull. Volcanol.*, 41: 187-195.

Páll Einarsson, 2008. Plate boundaries, rifts and transforms in Iceland. *Jökull*, 58: 35-58.

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): 679-696.

Sigurjón Böðvar Þórarinnsson, Helga Margrét Helgadóttir, Hjalti Franzson, Björn S. Harðarson, Arnar Hjartarson, Ragnar K. Ásmundsson og Guðmundur Sigurðsson, 2006. Hellsheiði – Hóla HN-4. 1.-3. áfangi: Borun fyrir 18⁵/₈" öryggisfóðringu í 105 m, 13³/₈" vinnslufóðringu í 400 m og 12¹/₄" vinnsluhluta í 1204 m dýpi. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2006/055. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. 77 s.

Sigurður Sveinn Jónsson og Steinþór Niélsson, 2006. XRD-greining á leirsteindum úr holum HN-03, HN-05, HN-06 og HN-07 á Hellsheiði. Greinargerð. ÍSOR-06240. 47 s.

Sigurður Sveinn Jónsson og Steinþór Niélsson, 2009. XRD-greining á leirsteindum úr holu HN-02 við Gráuhnúka. Greinargerð. ÍSOR-09006. 11 s.

Stefán Arnórsson, 1995. Geothermal systems in Iceland: structure and conceptual models – I. High-temperature areas. *Geothermics*, 24: 561-602.

Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson, 2008. Geothermal systems in Iceland. *Jökull*, 58: 269-302.

Steinþór Niélsson og Hjalti Franzson, 2010. Geology and Hydrothermal Alteration of the Hverahlid HT-system, SW-Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*. 5 s.

Stroncik, N.A. and Schmincke, H.-U., 2002. Palagonite – a review. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 91: 680-697

Sveinn P. Jakobsson, 1983a. Íslenskar bergtegundir 2. Ólívínþóleiit. *Náttúrufræðingurinn*, 53 (1.-2. hefti): 13-18.

Sveinn P. Jakobsson, 1983b. Íslenskar bergtegundir 3. Þóleiit. *Náttúrufræðingurinn*, 53 (1.-2. hefti): 53-59.

Sveinn P. Jakobsson, Kristján Jónasson og Ingvar A. Sigurðsson, 2008. The three igneous rock series of Iceland. *Jökull*, 58: 117-138.

Valgarður Stefánsson og Benedikt Steingrímsson, 1990. Geothermal logging I. An introduction to techniques and interpretation. Report. OS-80017/JHD-09. Third edition. 110 s.

Walker, G.L., 1974. The structure of eastern Iceland. Í: *Geodynamics of Iceland and the North Atlantic area*. p. 177-188. Kristjánsson, L., D. Reidel, Dordrecht.

Viðauki I: Staðarnúmer hola HN-2, HN-5 og HN-8 ásamt hnitum þeirra, bordýpi og dýpi á fóðringar.

Staðarnúmer HN-2 í gagnagrunni Íslenskra orkurannsókna er 96592 og hnit hennar samkvæmt landskerfi (ISN93) eru:

$$X=381140,15 \text{ E} \quad Y=393771,34 \text{ N} \quad Z=265,52 \text{ m y.s.}$$

Tafla 7. Bordýpi og dýpi á fóðringar í HN-2 (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009b).

Bor (hæð borpalls)	Áfangi	Borkróna	Bordýpi m.v. drifborð	Fóðringadýpi m.v. drifborð	Þvermál fóðringar
Sleipnir (5,8 m y.j.)	1. áfangi	21"	153	147,5	18 $\frac{3}{8}$ "
Sleipnir (5,8 m y.j.)	2. áfangi	17 $\frac{1}{2}$ "	403	399,25	13 $\frac{3}{8}$ "
Sleipnir (5,8 m y.j.)	3. áfangi	12 $\frac{1}{4}$ "	2001	-	-

Staðarnúmer HN-5 í gagnagrunni Íslenskra orkurannsókna er 96595 og hnit hennar samkvæmt landskerfi (ISN93) eru:

$$X=381303,95 \text{ E} \quad Y=393044,76 \text{ N} \quad Z=261 \text{ m y.s.}$$

Tafla 8. Bordýpi og dýpi á fóðringar í HN-5 (Helga Margrét Helgadóttir o.fl., 2009a).

Bor (hæð borpalls)	Áfangi	Borkróna	Bordýpi m.v. drifborð	Fóðringadýpi m.v. drifborð	Þvermál fóðringar
Sleipnir (5,8 m y.j.)	1. áfangi	21"	100 m	100 m	18 $\frac{3}{8}$ "
Sleipnir (5,8 m y.j.)	2. áfangi	17 $\frac{1}{2}$ "	774 m	772 m	13 $\frac{3}{8}$ "
Geysir (6,7 m y.j.)	3. áfangi (hreinsun)	12 $\frac{1}{4}$ "	867,4	860	9 $\frac{5}{8}$ "
Geysir (6,7 m y.j.)	3. áfangi	8 $\frac{1}{2}$ "	2075 m	-	-

Staðarnúmer HN-8 í gagnagrunni Íslenskra orkurannsókna er 96598 og hnit hennar samkvæmt landskerfi (ISN93) eru:

$$X= 381291,71 \text{ E} \quad Y= 393052,12 \text{ N} \quad Z=261 \text{ m y.s.}$$

Tafla 9. Bordýpi og dýpi á fóðringar í HN-8 (Björn S. Harðarson o.fl., 2010a og 2010b).

Bor (hæð borpalls)	Áfangi	Borkróna	Bordýpi m.v. drifborð	Fóðringadýpi m.v. drifborð	Þvermál fóðringar
Saga (3 m y.j.)	Forborun	26"	96 m	94 m	22 $\frac{1}{2}$ "
Geysir (6,7 m y.j.)	1. áfangi	21"	297 m	295 m	18 $\frac{3}{8}$ "
Geysir (6,7 m y.j.)	2. áfangi	17 $\frac{1}{2}$ "	965 m	964,5 m	13 $\frac{3}{8}$ "
Geysir (6,7 m y.j.)	3. áfangi	12 $\frac{1}{4}$ "	2580 m	2552,8 m	9 $\frac{5}{8}$ "

Viðauki II: Tölur yfir ummyndun frumsteinda í HN-2, HN-5 og HN-8.

Tafla 10. Ummyndun glers og ólivíns í þunnsneiðum úr HN-2.

Dýpi (m)	Gler	Ummyndunarsteindir						Ólivín	Ummyndunarsteindir		
	Ummyndun (0-4)	palagónít	leir	cc	zeólítar	qz	wai	Ummyndun (0-4)	leir	cc	óþekkt
140	1.5	X	X					0			
164	1.5	(X)	X					0			
220	3		X					0			
300	2		X					0			
332	2		X					0	X		
386	2		X					0			
420	4		X					2	X		
504	4		X					1	X		
582								1.5	X		
662	4		X					2.5	X		
718	4		X					2	X		
780	3.5		X	X				2	X		
878	4							1			
952	4		X								
990	4		X		X						
1078	4		X		X			3.5	X		
1096	4		X					4	X		
1136	4		X		X			2	X		
1190	4		X					4	X		
1252	4		X					3.9	X		
1290	4		X					4	X		
1324	4		X					2	X		
1356	4		X					4	X		
1398	4		X					4	X		
1450	4		X	X	X			4	X	X	
1488	4		X					4	X		
1522	4		X					4	X		
1564	4		X			X		4	X		
1608	4		X			X	X	4	X		
1650	4		X								
1674	4		X					4	X		
1708	4		X					4	X		
1752	4		X					4	X		
1780	4		X					4	X		
1832	4		X					4	X		
1876	4		X					4	X		
1926	4		X					4	X		X
1968	4		X								
1994	4		X					4	X		

Tafla 11. Ummyndun á plagióklas og pýroxen í þunnsneiðum úr HN-2.

Dýpi (m)	Plagióklas	Ummyndunarsteindir							Pýroxen	Ummyndunarsteindir			
	Ummyndun (0-4)	zeólítar	leir	qz	laum	albit	cc	ep	pre	Ummyndun (0-4)	leir	óþekkt	amfiból
140	0									0			
164	0									0			
220	0									0			
300	0									0			
332	0									0			
386	0									0			
420	0									0			
504	0									0			
582	2	X								0			
662	0.5	X	X							0			
718	0									0			
780	0									0			
878	0.5		X							0			
952	1	X	X							0			
990	3	X								0			
1078	1.5	X	X							0			
1096	1.5	X	X							0			
1136										0			
1190	0									0			
1252	1	X	X	X						0			
1290	1		X							1			
1324	1	X			X					0			
1356	1		X							0			
1398	3					X				0			
1450	2					X	X			0			
1488	3		X			X				2	X		
1522	2		X			X				0			
1564	1.5		X			X				1	X		
1608	2.5		X			X	X			1.5	X		
1650	2							X					
1674	0									0			
1708	2.5					X				1		X	
1752	3		X			X		X	X	2	X		
1780	2					X	X	X		2	X		X
1832	2		X	X						1	X	X	
1876	2		X			X				1	X		
1926	1		X										
1968	3					X							
1994	3.5					X				3		X	

Tafla 12. *Ummyndun á málmum í þunnsneiðum úr HN-2.*

Dýpi (m)	Málmur	Ummyndunarsteindir
	Ummyndun (0-4)	Sphene
140	0	
164	0	
220	0	
300	0	
332	0	
386	0	
420	0	
504	0	
582	0	
662	0	
718	0	
780	0	
878	0	
952	0	
990	0	
1078	0	
1096	0	
1136	0	
1190	0	
1252	0	
1290	0	
1324	0	
1356	0	
1398	0	
1450	1	X
1488	1	X
1522	0	
1564	0	
1608	0	
1650		
1674	0	
1708	0	
1752	0	
1780	0	
1832	2	X
1876	0	
1926	0	
1968	0	
1994	0	

Tafla 13. Ummyndun glers og ólivíns í þunnsneiðum úr HN-5. Svigi um X merkir að merki um palagónít hafi fundist en líklega sé það þegar ummyndað í leir.

Dýpi (m)	Gler	Ummyndunarsteindir						Ólivín	Ummyndunarsteindir	
	Ummyndun (0-4)	palagónít	leir	cc	zeólítar	qz	ep	Ummyndun (0-4)	leir	oxun
56	1		X					0.5	X	
186								0.5		X
264	0.5	X	X					0		
366	1	(X)	X							
416	1		X					0		
466	2	(X)	X		X					
506	2	(X)	X					1	X	
550	4		X					2	X	
632	4		X					1.5	X	
754	4		X					2	X	
790	4		X					4	X	
800	4		X					2.5	X	
834	4		X					3	X	X
902	4		X					3	X	
932	4		X							
976										
1026	4		X							
1038	4		X							
1082	4		X							
1098	4		X			X				
1166	4		X	X						
1200	4		X					4	X	
1232	4		X	X				4	X	
1238	4		X					4	X	
1254	4		X					4	X	
1270	4		X					4	X	
1300	4		X							
1352	4		X					4	X	
1382	4		X					4	X	
1430	4		X					4	X	
1446	4		X					4	X	
1500	4		X					4	X	
1530	4		X					4	X	
1540	4		X					4	X	
1574	4		X					4	X	
1592	4		X					4	X	
1650	4		X					4	X	
1680	4		X					4	X	
1702	4		X					4	X	
1798	4		X					4	X	
1844	4		X					4	X	
1878	4		X					4	X	
1902	4		X							
1974	4		X							
2014	4		X				X	4	X	
2028	4		X					4	X	
2058	4		X					4	X	

Tafla 14. Ummyndun á plagióklas og pýroxen í þunnsneiðum úr HN-5.

Dýpi (m)	Plagióklas	Ummyndunarsteindir					Pýroxen	Ummyndunarsteindir		
	Ummyndun (0-4)	zeólítar	leir	albít	cc	ep	Ummyndun (0-4)	leir	óþekkt	amfiból
56	0						0			
186	0						0			
264	0						0			
366	0						0			
416	0						0			
466	0						0			
506	1.5		X				0			
550	1.5	X	X				0			
632	1		X				0			
754	1		X				0.5	X		
790	1		X				0			
800	1		X				0.5	X		
834	1		X				1	X		
902	1		X				0.5	X		
932	1		X							
976										
1026	2			X						
1038										
1082	1		X				1	X		
1098	2		X				1.5	X		
1166	1		X				1.5	X		
1200	2.5		X							
1232	2.5		X	X			2	X		
1238	2		X	X			1	X		
1254	2		X	X			1.5	X		
1270										
1300	2		X				1	X		
1352	2.5		X				1.5	X		
1382	2		X				1.5	X		
1430										
1446	2		X	X			1.5			
1500										
1530	2		X				2		X	
1540	2.5		X	X			2.5		X	
1574	3		X	X			2.5		X	
1592	3.5			X			3		X	
1650	3			X			3		X	
1680	1		X				3			X
1702	2.5		X	X			1.5		X	
1798	2.5		X			X	2		X	
1844	3.5			X			2		X	
1878	2		X	X			2		X	
1902	2.5		X	X		X	1		X	
1974	3.5			X			2.5			X
2014	2.5		X	X			2.5		X	X
2028	2.5		X	X			2.5			X
2058	2.5		X	X			3		X	X

Tafla 15. *Ummyndun á málmsteindum í þunnsneiðum úr HN-5.*

Dýpi (m)	Málmur	Ummyndunarsteindir
	Ummyndun (0-4)	sphene
56	0	
186	0	
264	0	
366	0	
416	0	
466	0	
506	0	
550	0	
632	0	
754	0	
790	0	
800	0	
834	0	
902	0	
932		
976		
1026		
1038		
1082	0	
1098	0	
1166	0	
1200		
1232	0	
1238	0	
1254	0	
1270		
1300	0	
1352	0	
1382	0	
1430		
1446	0	
1500		
1530	0	
1540	0	
1574	0	
1592	0	
1650	0	
1680	1	X
1702	0	
1798	0	
1844	0	
1878	0.5	X
1902	0	
1974	0	
2014	1	X
2028	2	X
2058	2.5	X

Tafla 16. Ummyndun glers og ólivíns í þunnsneiðum úr HN-8.

Dýpi (m)	Gler	Ummyndunarsteindir						Ólivín	Ummyndunarsteindir		
	Ummyndun (0-4)	palagónít	leir	cc	zeólítar	qz	sphene	Ummyndun (0-4)	leir	oxun	cc
200	4		X					1.5		X	
220	1.5	(X)	X					1		X	
380	1.5	(X)	X					0			
536	4		X					4	X		X
636	4		X					2.5	X	X	
720	4		X					3.5	X		
756	4		X					3.5	X		
768	4		X					3.5	X		X
800	4		X		X			4	X		
834	4		X	X				3.5	X		
892	4	(X)	X					4	X		
946	4		X					3.5	X		
1066	4		X					3.5	X		
1122	4		X					4	X		
1178	4		X					4	X		
1318	4		X					4	X		
1392	4		X	X				4	X		
1478	4		X				X	4	X		
1520	4		X					4	X		
1570	4		X					4	X		
1602	4		X					4	X		
1674	4		X					4	X		
1780	4		X					4	X		
1918	4		X					4	X		
1972	4		X					4	X		
2006	4		X					4	X		
2182	4		X								
2206	4		X								
2396	4		X								
2504											

Tafla 17. Ummyndun á plagióklas og pýroxen í þunnsneiðum úr HN-8.

Dýpi (m)	Plagióklas Ummyndun (0-4)	Ummyndunarsteindir							Pýroxen Ummyndun (0-4)	Ummyndunarsteindir		
		zeólítar	leir	albít	wai	ep	pre	cc		leir	óþekkt	amfiból
200	0								0			
220	0								0			
380	0								0			
536	1		X						0.5	X		
636	2		X						0			
720	2		X	(X)					1		X	
756	1.5		X						1		X	
768	1		X						0			
800	1.5	X	X						1			
834	1		X						0			
892	1		X						0			
946	2		X						2		X	
1066	1.5		X						0			
1122	2.5		X	X					2	X		
1178	2		X	X					2	X		
1318	3		X	X					2	X		
1392	3.5		X	X	X	X			1.5		X	
1478	3			X			X	X	2			(X)
1520	3.5		X	X		X	X		2		X	
1570	4		X	X					1		X	
1602	1.5		X	X					1		X	
1674	2.5		X	X					1		X	
1780	2.5		X	X			X		1		X	
1918	2		X	X					2			X
1972	3			X					2		X	
2006	2.5			X		X		X	1		X	
2182	3			X					2			X
2206	3.5		X	X		X			2.5			X
2396	2.5			X		X			1.5			X
2504	3		X	X		X						

Tafla 18. *Ummyndun á málmi í þunnsneiðum úr HN-8.*

Dýpi (m)	Málmur Ummyndun (0-4)	Ummyndunarsteindir sphene
200	0	
220	0	
380	0	
536	0	
636	0	
720	0	
756	0	
768	0	
800	0	
834	0	
892	0	
946	0	
1066	0	
1122	0	
1178	0	
1318	0	
1392	0	
1478	0	
1520	1.5	X
1570	3	X
1602	2	X
1674	1	X
1780	1	X
1918	1	X
1972	0	
2006	0	
2182	0	
2206	0	
2396	0	
2504	2	X

Viðauki III: Töflur með ummyndunarröðum úr holum HN-2, HN-5 og HN-8.

Tafla 19. Ummyndunarraðir sem greindar eru í þunnsneiðum úr HN-2.

HN-2														
Dýpi (m)	Elst												Yngst	
	ópall	sme	zeólítar	karbónat	zeólítar	gf leir	laum	cc	qz	wai	ep	wo	preh	cc
220		sme	kab->fj z fj z	karb.hn. karb.hn.	fj z kab skól?	(kísill)								
300		sme		karb	phil? ff z -> phil zeólíti									
332		leir	zeólíti	karb	analsím			cc						
386		sme sme	phil->kab zeólíti	karb karb.st. karb.st. karb	phil->kab fj z analsím									
420														
504		sme		karb										
582					kab->fj z									
662		ff sme			anal->mes									
718														
780	límonít			karb.st.	zeólítar fj z->fj z	gf sme gf sme								
990					ff z->anal->stil									
1078				karb dogtooth-cc	phil/stilb->anal ff z->anal->stil ff z->anal->stil->skól analsím ff z->anal->stil->phil ff z->gf z			cc						
1096				karb karb cc	ff z->phil ff z->stil->anal anal									
1136		sme		cc	zeólítar stil stil			cc cc						

					stil		laum	cc						
1190		ff leir ff sme			anal->ff z mesólít			cc cc						
	kals								qz					
1252					<u>ff z</u> ff z->stil				qz					
1290				(py)	stilbít			cc	kals->qz					
1324	kals				gf z- >mes/mord mes->stil	gf leir	laum laum	cc	gf leir/qz qz					
1356					fj z		<u>laum</u>		kals->qz qz					
1398					<u>gf z</u>	(gf leir)		MLC aggr. cc	kals->qz qz					
1450					thom- >skól/mes <u>fj z</u> <u>stil</u> <u>ff z</u> <u>gf z</u> kab <u>stilbít</u>	(leir)	laum	cc cc cc	(smektít) qz qz qz qz qz qz qz/leir					cc
1522	kals/ópall kísill				<u>ff z->stil</u> <u>fj z->anal</u>				qz qz qz qz	wai wai wai				cc
1564										wai				cc
1608					<u>ff z</u> ff z		<u>laum</u>		qz qz		wai/klórít			
1650									qz	wai				cc/klórít?
1674								cc	qz					ff MLC
1708							laum laum laum laum laum		qz	wai	ep ep ep		preh preh	cc

1752					ff z->anal				qz		ep ep		preh cc
1780			pl cc			laum	klórít				ep		preh cc
1832						laum		qz					
1876						laum laum laum		qz			ep ep ep		cc (tágótt) cc preh preh cc preh
1926							(gf klórít)				ep		
1968			pl cc	fj z	leir	laum	(ff klórít)	qz	wai				cc cc cc
1994			pl cc pl cc					qz qz	wai wai	ep ep		preh preh	cc cc cc

Tafla 20. Ummyndunarraðir greindar í þunnsneiðum úr HN-5.

HN-5									
Dýpi (m)	Elst			Yngst					
	sme	zeólítar	kalsedón	cc/py	wai	qz	ep/wo	prehnít	cc
186	leir	zeólítar							
366		zeólíti							
416		stil/heu							
466	smektít smektít	phillipsít		cc cc					
506		zeólítar							
550	(cc) (cc)	stil/kab							
754		stil->skól							
790		kab->ff z							
800		zeólítar->fj z	e-ð myndlaust	cc					
834		analsím							
902		ff z->stil/kab							
		ff z->stilb phil/stilb							
		ff zeólíti	kalsedón						

932	smektít	ff zeólíti		cc					
976		an->stilb/laum?							
1026		zeólíti			wai	qz			
		zeólíti			wai				
1038		zeólíti				qz			
				cc	wai				
				py	wai				
1082		ff zeólíti				qz			cc
	gf smektít				wai				
		ff zeólíti		cc		qz			
		ff zeólíti				qz			
		ff zeólíti		cc					
1098				cc/py	wai				
1166						qz	py		
1200									
1232					wai	qz			
				py		qz			
				cc	wai				
				cc		qz			cc?
1238					wai	qz			
				py		qz			
1254					wai				cc (tágótt)
1300					wai				cc
				py	wai				
1352					wai				cc
1382					wai				cc
						qz			cc
1430						qz			cc
1446						qz		prehnít	cc
				py		qz			
	ff MLC				wai				cc
					wai			prehnít	
1500						qz	(ff MLC)		
					wai				cc
1540						qz			cc
1574						qz		prehnít	
					ep	qz			
1650					wai		ep (MLC)		
						qz	ep	prehnít	
1680				py					cc
1702						qz			cc
				py		qz			
1798							ep	prehnít	
							ep	wai	
1844						qz			cc
1878					wai			prehnít	
							ep	prehnít	
1974							ep	prehnít	
							wo	prehnít	

2014	gf smektít					qz							
2028						qz	ep		qz				

Tafla 21. Ummyndunarraðir greindar í þunnsneiðum úr HN-8.

HN-8														
Dýpi (m)	Elst												Yngst	
	leirskán	lím	karbónat	kals	ff leir	zeólítar	laum	gf leir	qz	wai	pre	ep	wo	cc
380	leirskán				ff sme	kab->skól gýr->kab								
	leirskán		karbónat		ff z->kab									
	leirskán		karb.st.	kals	ff z->kab									
536	leirskán				ff sme									
	leirskán	lím			ff sme									
					ff leir	stilbít phil/stil- >ff z								
636			karbónat			anals->gf z								
720														
756														
768					ff sme	thomsonít?								
800														
834														
892					ff sme	kabasít?								
946						ff zeólíti	laum		qz					
							laum		qz	wai				
1066							laum		qz/wai					cc
							laum							cc
						skól				wai				
1122									qz					cc
	amorph leir				ff+gf sme			gf smektít						
1318							laum		qz					cc
							laum		qz		pre		py	cc
1392										wai	pre			cc
										wai				cc
										wai				cc
1780					ff leir			klórít	qz			ep		
								klórít/MLC	qz			ep	wo	
1918								wo	qz			ep		cc

1972								gfMLC	qz				cc	
2006								gf MLC/klórít			wo	ep	qz	cc

Tafla 22. Skýringar á skammstöfunum í töflum yfir raðir ummyndunarsteinda.

skammstöfun	þýðing
ff	fínfjaðra
gf	gróffjaðra
fj	fjaðrað
sme	smektít
kals	kalsedón
z	zeólíti
pl cc	plötu-kalsít
cc	kalsít
karb.hn.	karbónat-hnúðar
karb.st.	karbónat- stönglar
anal	analsím
kab	kabasít
mes	mesólít
skól	skólesít
mord	mordenít
phil	phillipsít
laum	laumontít
qz	kvars
wai	wairakít
preh	prehnít
ep	epidót
wo	wollastonít
MLC	blandlagsleir
py	pýrít
lím	límonít

Viðauki IV: Töflur með tengslum hitamælinga við æðar, skoltaps-mælingar og hitamælingar í holum HN-2, HN-5 og HN-8.

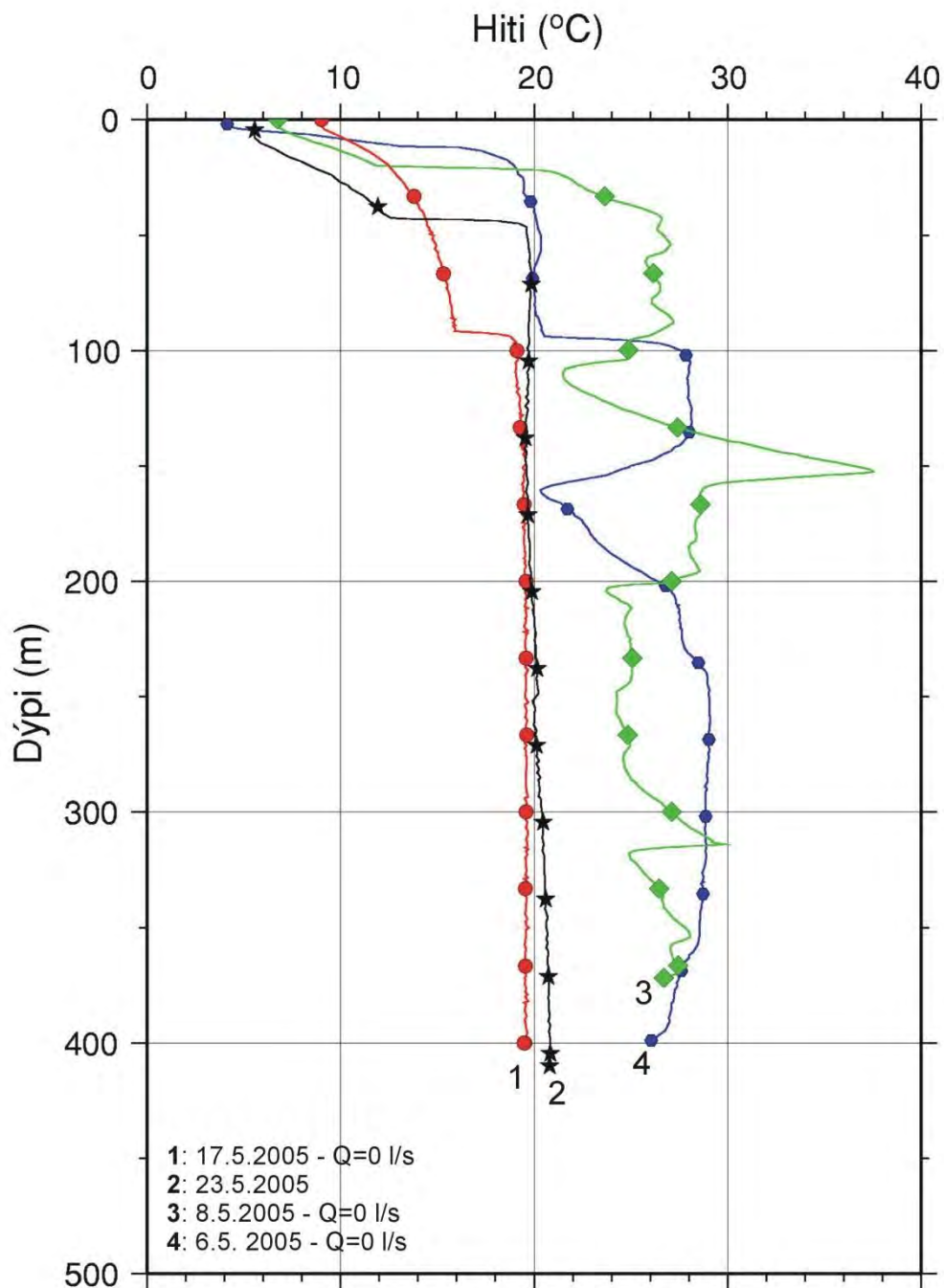
Tafla 23. Æðar í holu HN-2 og tengsl þeirra við hitamælingar. Gráir fletir tákna að mæling hafi ekki náð yfir viðkomandi dýpi. Númer eiga við mælingar á myndum 68, 69 og 70.

Dýpi [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
418												X				X	X			
~ 512-568							X						X	X			X	X	X	X
658							X	X	X											
715					X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X
915					X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X
1290												X								
1400												X	X	X	X	X	X	X	X	X
1512												X	X	X						
1727												X								
1825												X								

Tafla 24. Skoltap í holu HN-2 í 2. og 3. áfanga.

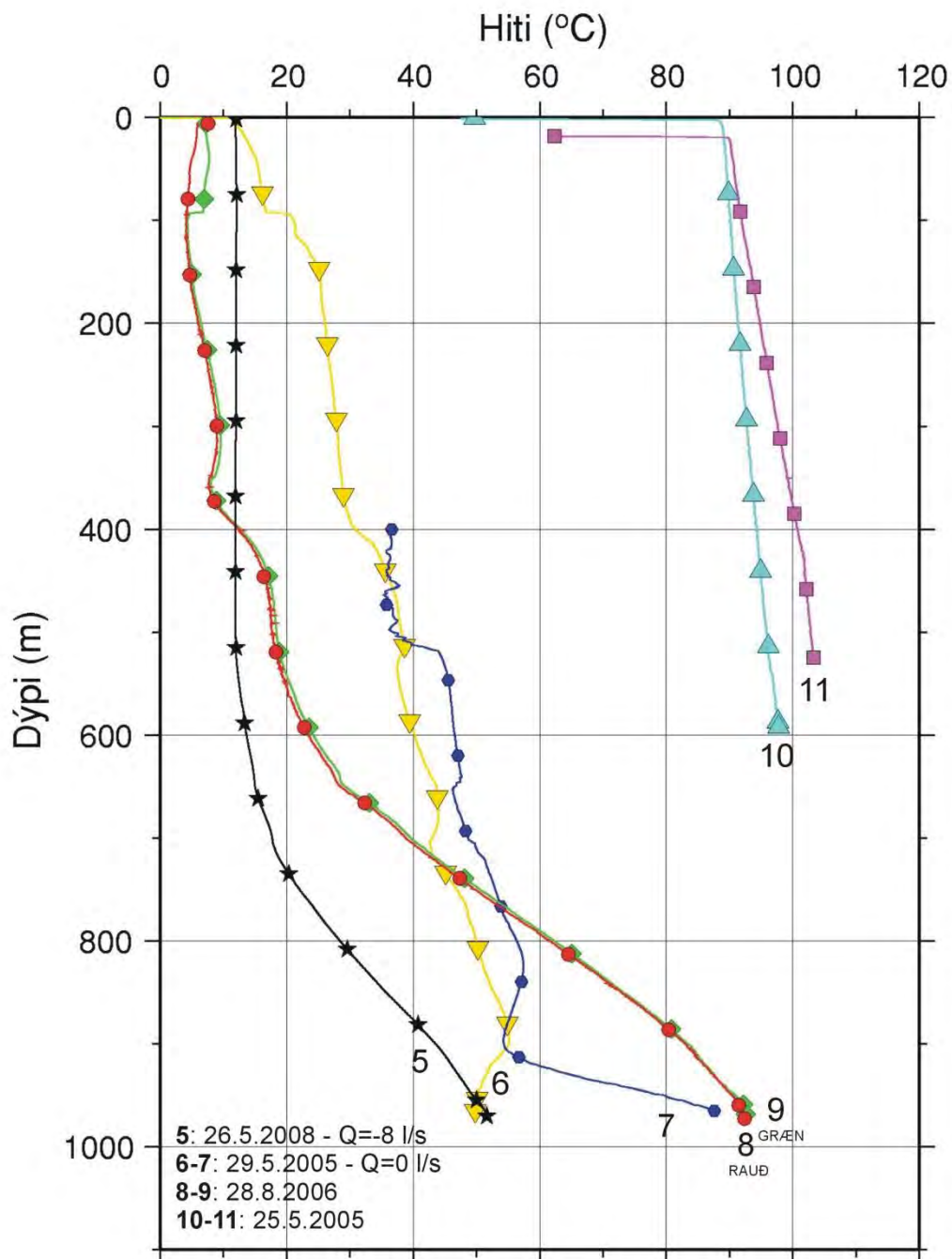
HN-2			
Dýpi (m)	Skoltap (l/s)	Dýpi (m)	Skoltap (l/s)
251	1,25	1279	2,5
423	1,25	1313	4,17
474	1,25	1354	4,07
532	1,25	1386	3,76
562	4,17	1410	4,07
616	1,07	1438	3,33
666	2,92	1462	4,17
716	2,5	1545	2,08
764	2,5	1569	3
804	2,5	1596	2,08
860	1,6	1647	2,5
882	1,6	1680	3
911	2,08	1715	2,92
940	2,08	1740	3
976	4,17	1780	2,5
1029	5,42	1790	4,17
1092	3,33	1835	7,08
1132	2,5	1863	4,17
1168	1,67	1888	2,5
1197	3,13	1928	3,33
1226	4,07	1958	3,33

Hellisheiði HN-02
Svínahraunsbruni
Árnessýsla



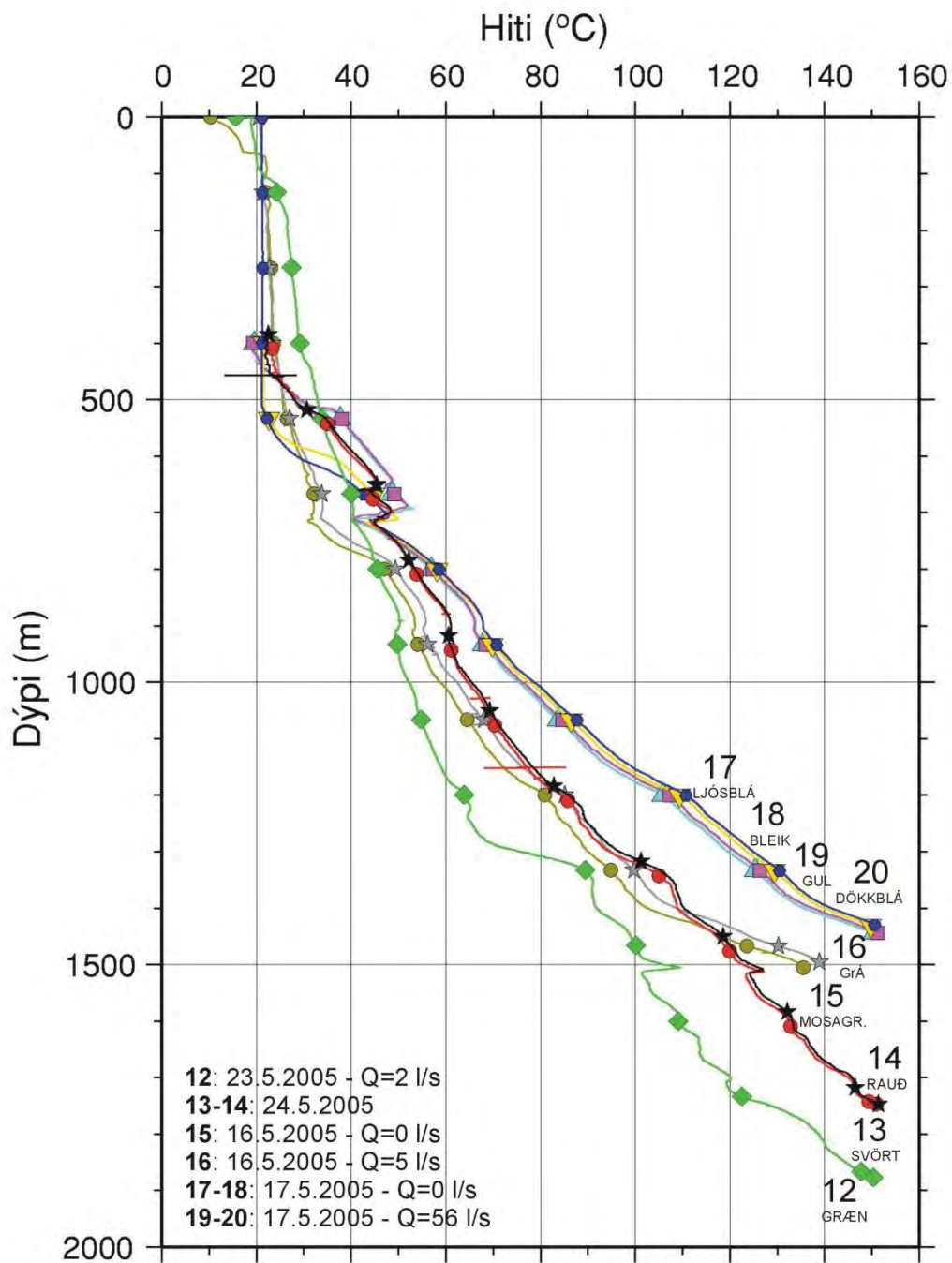
Mynd 68. Hitamælingar eftir borun 2. áfanga holu HN-2 (3-4) ásamt tveimur mælingum (1-2) sem gerðar voru síðar innan í fóðringu (á meðan borun 3. áfanga stóð).

Hellisheiði HN-02
Svínahraunsbruni
Árnessýsla



Mynd 69. Hitamælingar í 3. áfanga holu HN-2 (sem náðu styttra en 1000 m) ásamt mælingum sem gerðar voru eftir borlok.

Hellisheiði HN-02 Svínahraunsbruni Árnessýsla



Mynd 70. Hitamælingar að loknum 3. áfanga holu HN-2.

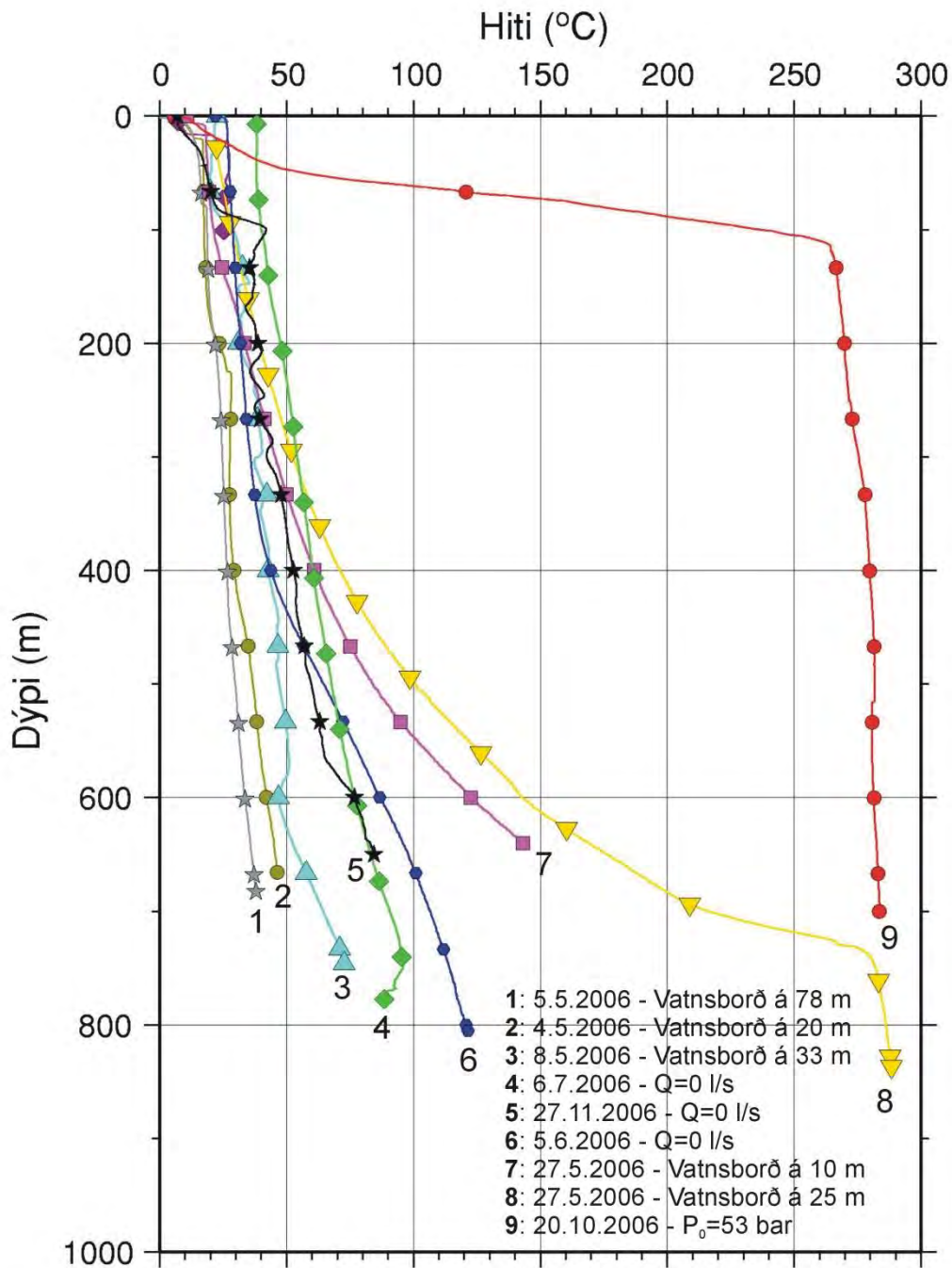
Tafla 25. *Æðar í holu HN-5 og tengsl þeirra við hitamælingar . Gráir fletir tákna að mæling hafi ekki náð yfir viðkomandi dýpi. Númer eiga við mælingar á myndum 68, 69 og 70.*

Dýpi [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
224		X															
844													X	X	X	X	X
858										X	X	X					
1020										X	X		X				
1185-1187										X	X					X	X
1422										X						X	X
1955										X	X					X	X
2019										X						X	X

Tafla 26. *Skoltap í holu HN-5a. Skoltap var ekki mælt í síðasta hluta borverksins sem Geysir boraði þar sem jafnvægisborun var notuð.*

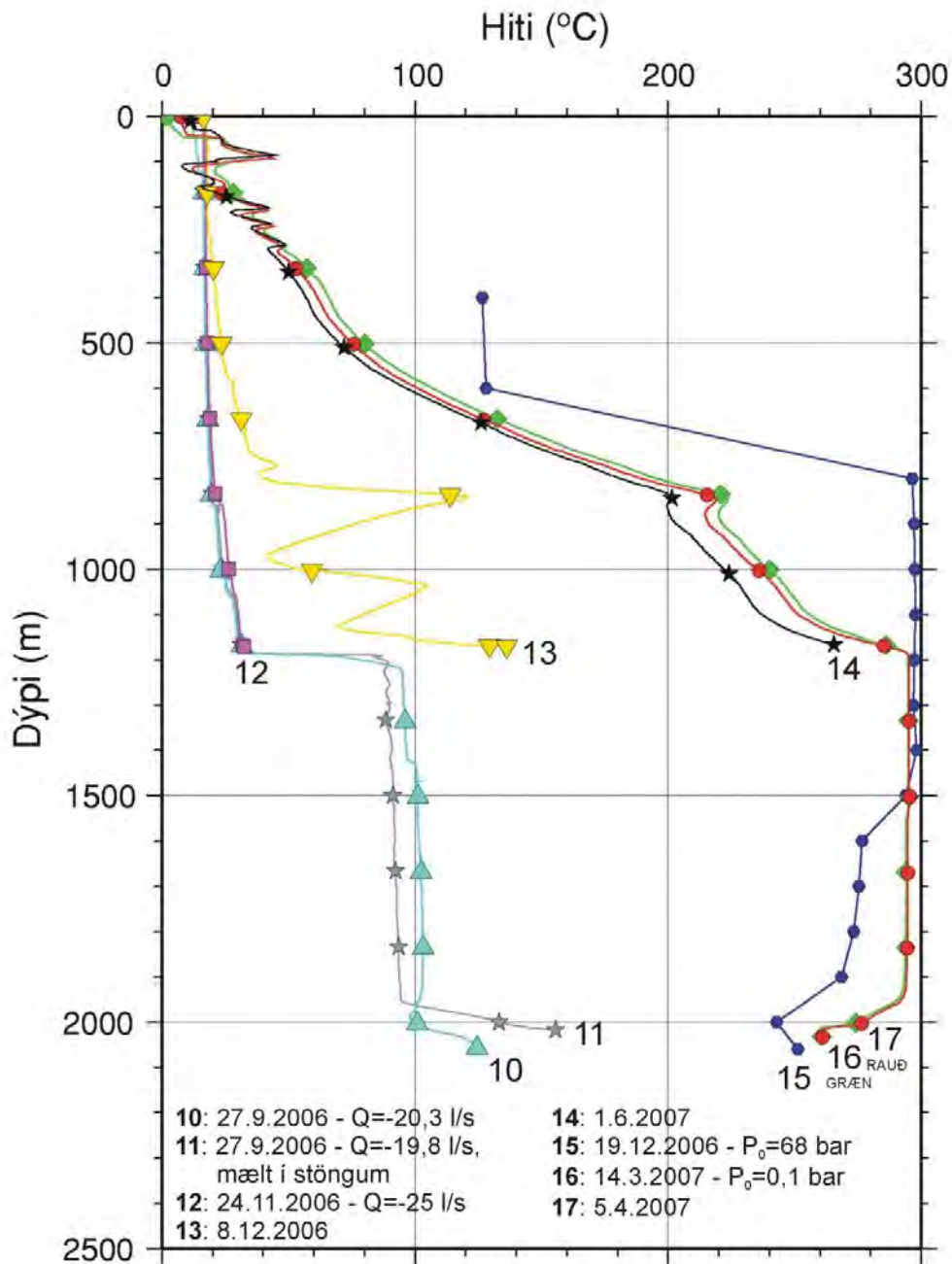
HN-5a			
Dýpi (m)	Skoltap (l/s)	Dýpi (m)	Skoltap (l/s)
52	1,5	391	2
57	1,9	397	3,5
62	1,88	422	1
68	2,75	440	1,8
77	1,83	466	0
81	1	485	1,8
86	2	490	4,58
91	0	511	3,66
100	2,7	527	1,83
110	2,5	552	2,7
128	2	591	11
141	6,4	731	8,25
152	0	751	5,5
176	4,6	816	2,00
183	5,5	998	1,00
220	1	1038	2,80
270	4,5	1122	7,80
297	1,8	1160	2,50
316	2,7	1230	9,71
343	2,7	1246	3,76
361	2	1270	1,25

Hellisheiði HN-05 Árnessýsla



Mynd 71. Hitamælingar fyrir ofan 1000 m í holu HN-5 vor og haust 2006.

Hellisheiði HN-05
Árnessýsla



Mynd 72. Hitamælingar niður fyrir 1000 m í 3. áfanga og eftir borlok í HN-2.

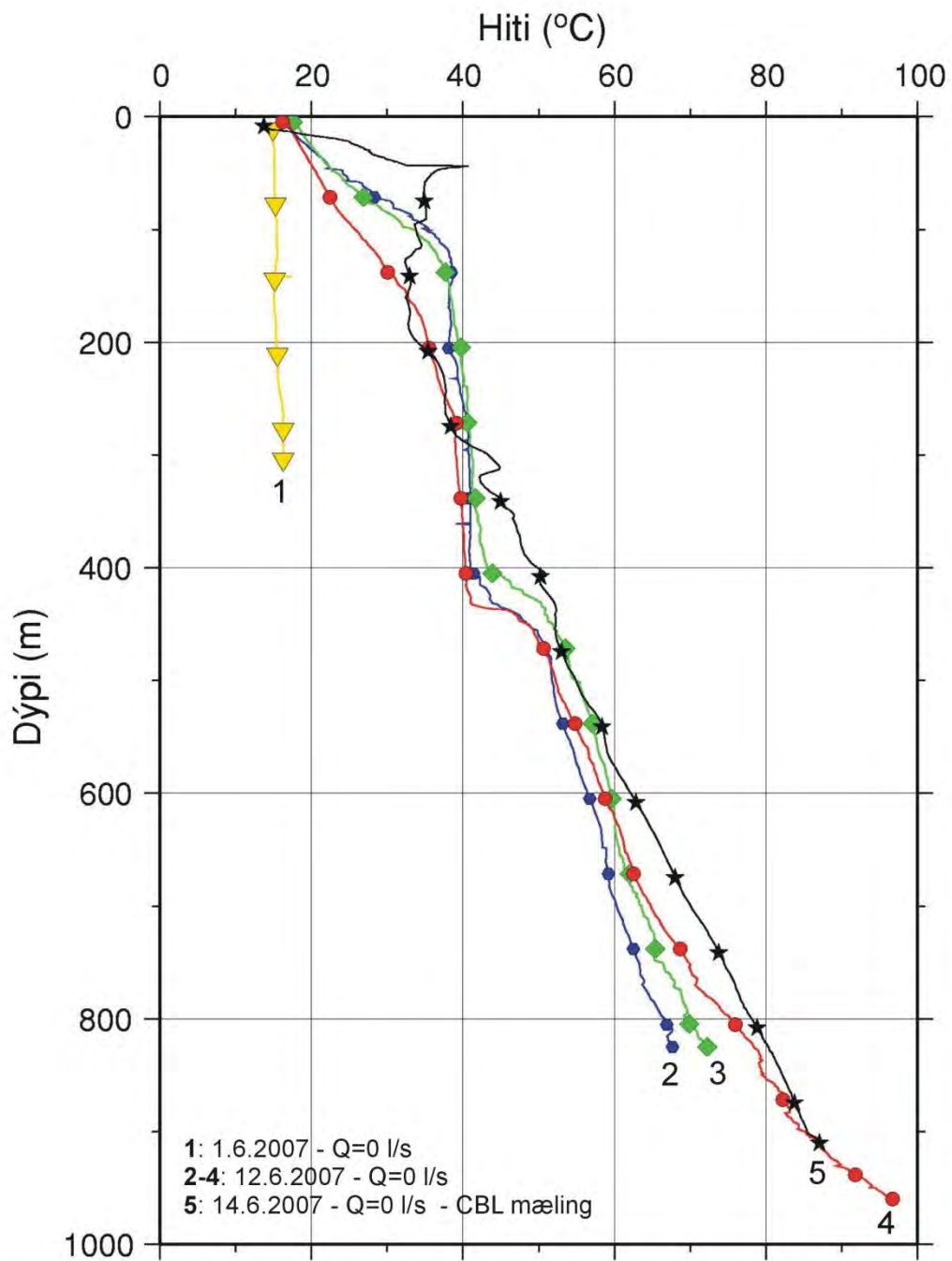
Tafla 27. *Æðar í HN-8 og tengsl þeirra við hitamælingar á myndum 73 og 74.*

Dýpi [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
240	X											
405		X	X	X								
436		X			X							
924							X		X		X	X
1106									X		X	X
1340-1344							X	X				
1630							X					
1659									X			
1830									X		X	X
2347						X	X	X	X	X	X	X

Tafla 28. *Skoltap í holu HN-8.*

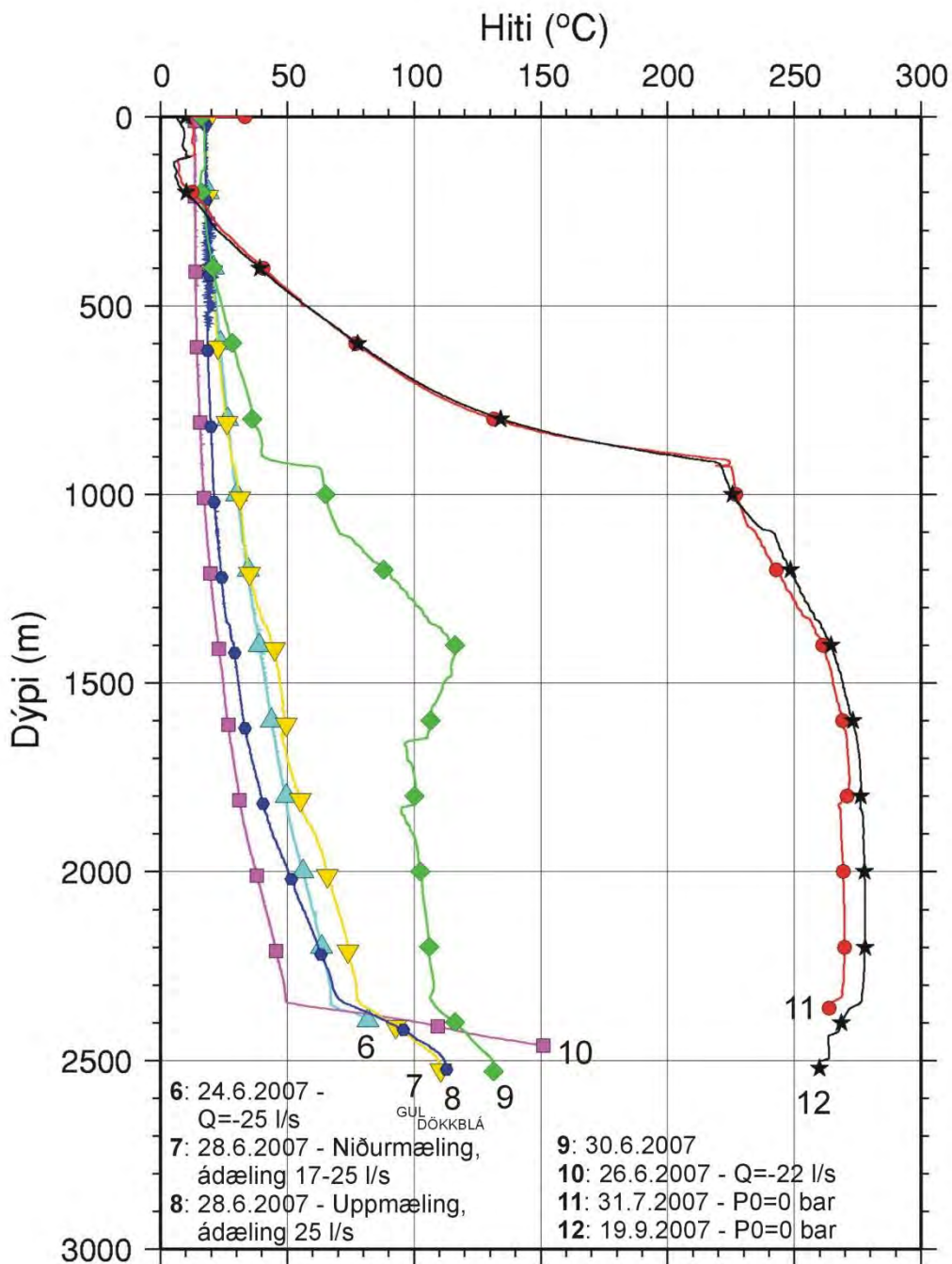
HN-8	
Dýpi (m)	Skoltap (l/s)
102-143	Algjört
446	2,00
534	2,00
832	2,00
1115	2,90
1995	2,80
2124	2,80
2146	6,90
2218	6,90
2257	3,45
2299	4,83
2345	4,48
2400	5,17
2428	24,14
2449	13,80
2518	6,90

Hellisheiði HN-08 Við Gráuhnúka Árnessýsla



Mynd 73. Hitamælingar í 1. og 2. áfanga holu HN-8.

Hellisheiði HN-08
Við Gráuhnúka
Árnessýsla



Mynd 74. Hitamælingar í 3. áfanga holu HN-8.

Viðauki V: Handrit að grein um ummyndun á ólivíni og pýroxeni í ólivín-þóleíti á Hellisheiði.

Hydrothermal dissolution of olivine and pyroxene in the Hellisheiði geothermal field, SW-Iceland.

Helga Margrét Helgadóttir

Introduction

During the past few years, extensive drilling at the Hellisheiði geothermal field within the Hengill volcanic complex in SW-Iceland (Fig. 1) has yielded vast amounts of data on hydrothermal alteration and alteration zones of a 2-3 km deep section through an active rift-zone. Although chemically dominated by monotonous olivine tholeiite basalt the rift-zone crust is composed of three lithofacies; lavas, hyaloclastite formations and dyke-intrusions. A simplified stratigraphical succession of these lithofacies may be outlined such: hyaloclastite ridges at the surface surrounded by Holocene lavas in turn underlain by hyaloclastites from former glaciations as well as basaltic lava sequences from interglacials mingled in between. There are indications that the geothermal wells in the Hengill area may reveal lavas that have been exposed to over 200 kyrs of prograde hydrothermal alteration and possibly up to 300-400 kyrs (e.g. Franzson et al., 2010). The glassy basalts of the hyaloclastite ridges are generally more altered than basaltic lavas at the same level. The basaltic dykes and occasional sills or minor intrusions are the least altered lithofacies, probably due to lower porosity in addition to generally shorter residence time (e.g. Franzson, 1994, 1998).

Alteration zones within the Hengill volcanic centre are as follows: zeolite-smectite zone (<200°C), mixed-layer-smectite zone (~200-230°C), chlorite zone (~230-240°C), chlorite-epidote zone (~240-280°C) and epidote-actinolite zone (>280°C). The depth and thickness of the alteration zones varies across the rift-zone section. There is no doubt that the Hengill area has been formed by several volcanic cycles from various spreading epochs of the rift-zone. Olivine tholeiite lavas from large lava shields are the most prominent lava flows and voluminous hyaloclastite ridges, also mostly of olivine tholeiite composition, dominate the hyaloclastite formation. Superimposed on the regionally produced olivine tholeiite, smaller eruptions from within the Hengill volcanic centre mingle with the most prominent formations. Even though olivine tholeiite is the most common rock type found in the Hengill system, rocks such as picrite and rhyolite are also observed in small volumes both on the surface and as intrusives in drill holes (e.g. Sæmundsson, 1995; Alfreðsson, 2008; Níelsson, 2011). An inevitable result of spreading epochs within the rift-zone is the formation of dyke swarms which influence the thermal structure of the rift-zone crust. The prevailing regional alteration

zones may therefore have been affected by alternating short-lived thermal episodes. This has resulted in different depth of zone-boundaries across the rift-zone as well as different thickness of the zones (Fig. 2).

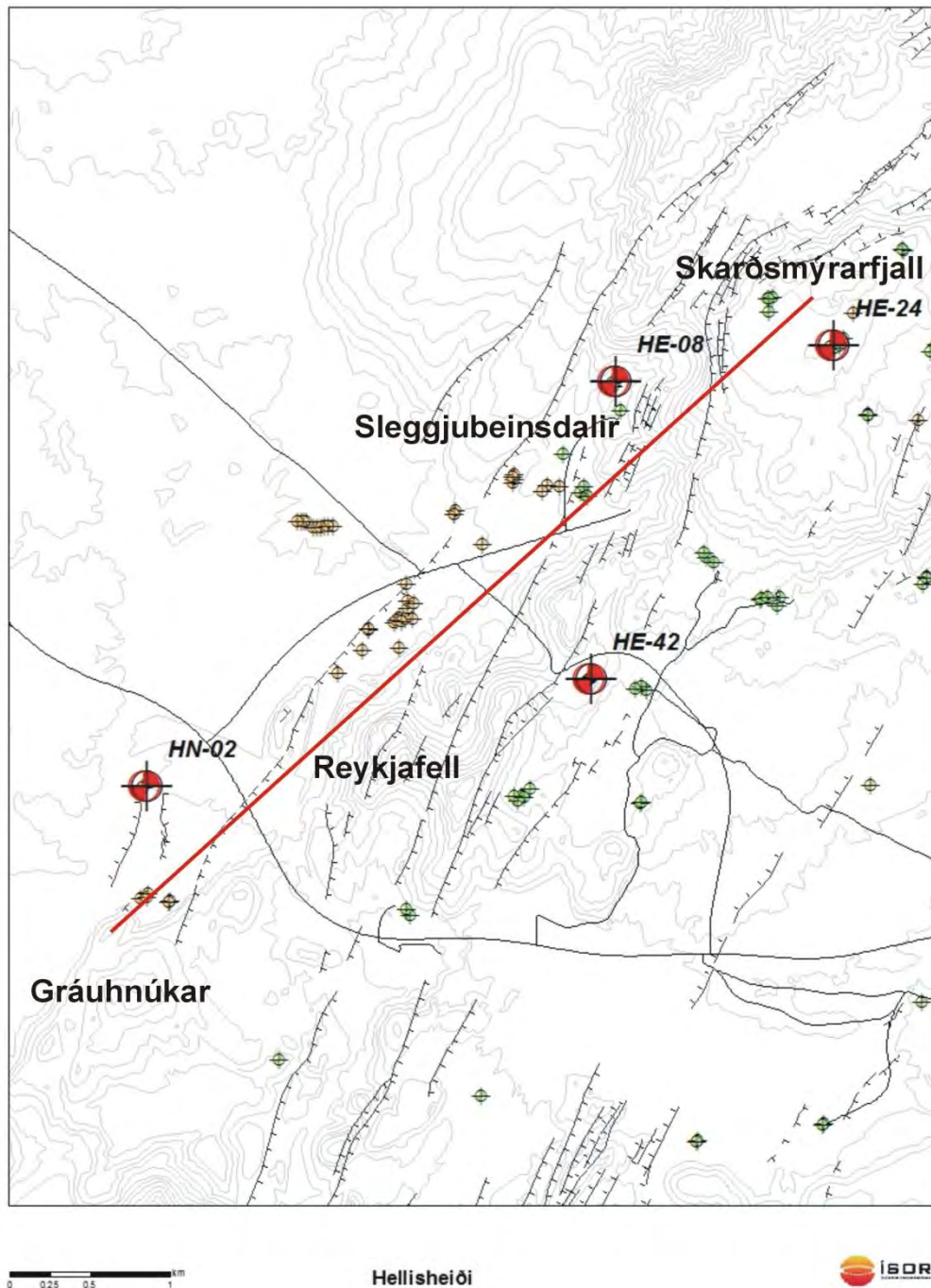


Figure 1. Hellisheiði geothermal field. Sampled wells are shown in red. The cross-section in figure 2 is indicated with a red line. Green dots represent the well-tops of production or exploration wells and the yellow dots represent reinjection wells.

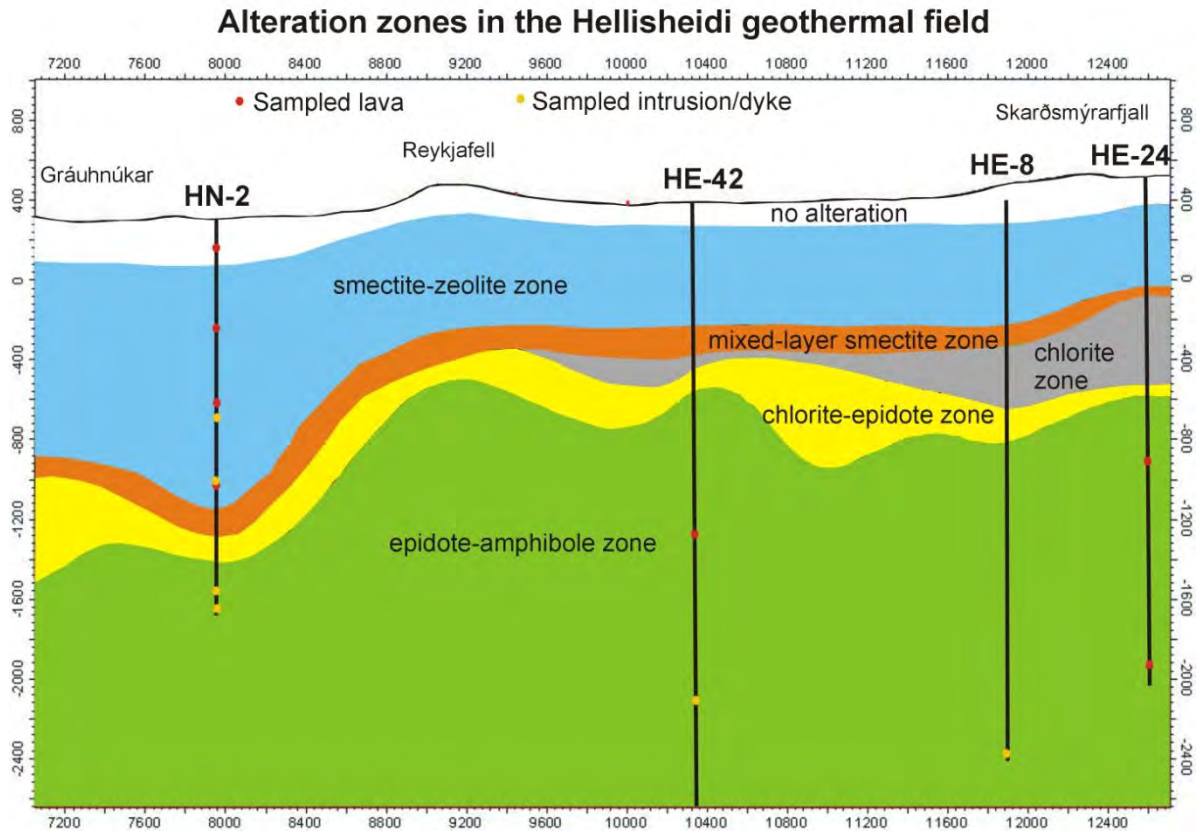


Figure 2. Alteration zones in the Hellisheidi geothermal field.

At all depths in the wells the extent of alteration is clearly recorded in the degree of alteration of the primary minerals of the basalt. Olivine tholeiites usually have simple mineralogy characterised by the early formation of olivine followed by the crystallisation of olivine and plagioclase and then the formation of clinopyroxene which dominates the groundmass together with olivine, plagioclase and titanomagnetite (e.g. Jakobsson, 1983). This leads to the characteristic ophitic to sub-ophitic textures of olivine tholeiites.

One approach estimating the degree of alteration is to focus on the alteration of the primary phases. This approach is different from defining the entire assembly of alteration minerals. If retrograde alteration has occurred the primary minerals and their reaction products are likely to reveal the maximum degree of alteration whereas the entire secondary mineral assemblage may also show phases characteristic of lower temperatures. This study involves characterising the primary olivine and clinopyroxene in the Hellisheidi geothermal wells and their subsequent alteration. Hydrothermal alteration of plagioclase in the Hengill area has already been studied in detail by Larsson et al. (2002). The samples examined were from well NG-7 at the Nesjavellir geothermal field, NE of the Hengill volcano (representing the rift zone itself), and from well KhG-1 near Sleggjubeinsdalir (Fig. 1), located at the western flank of

the Hengill fissure swarm (representing altered basaltic crust in an early-retrograde state). The main conclusion of that study was that secondary feldspars (Na- and K-feldspars) were formed by dissolution / precipitation reactions in and around plagioclase. Alteration of primary minerals in basalt in the area has also been studied through petrographic analysis (e.g. Franzson, 1994). The alteration of olivine and pyroxene is the main focus of this study with the aim to recognise the igneous olivine and clinopyroxene and determine their alteration products within different alteration zones. On the one hand the alteration of these primary minerals in olivine-tholeiite lava flows is examined to determine whether progressive alteration is discernible. All subsurface lava flows have gradually been buried beneath younger formations and have been altered accordingly. Chemical weathering at the surface is gradually followed by geothermal alteration as temperatures rise with increased burial depth. The question is whether this is noticeable in the alteration of the primary minerals. On the other hand the somewhat different geothermal alteration of dykes and intrusions is addressed. Fresh intrusive rocks cool down to the prevailing temperature conditions in their surroundings and start to alter accordingly. The fresh intrusions should therefore record the primary alteration of the current active heat source. Deuteric alteration may, however, complicate the matter in both cases.

Petrographic analyses of the alteration of primary minerals in the Hellisheiði field have already been done (e.g. Helgadóttir, 2011). According to thin section studies olivine is, in most cases, completely altered to clay in the smectite-zeolite zone. Some indications of fresh olivine do occur all the way down to the mixed-layer clay zone but these are minor and usually contributed to intrusions or dykes. The first signs of the alteration of pyroxene may be noted as shallow as in the smectite-zeolite zone but these signs are few. The alteration usually starts in the mixed-layer clay or chlorite zone where clay alteration of the pyroxene seems to occur. Extensive alteration of pyroxene to actinolite does not occur until the epidote-actinolite zone (as the name implies) but pyroxene seems to be rather resistive towards alteration.

Geological settings

The Hengill volcanic complex is located at a triple junction where the active rift zones of the Reykjanes Peninsula and the Western Volcanic Zone meet the South Iceland Seismic Zone, a seismically active transform zone. About 10 km wide NE-SW trending graben runs across the area, parallel to the hyaloclastite ridges of the area and the most prominent tectonic faults. The Hengill area is built up of volcanic rocks of late Quaternary and postglacial age (e.g.

Sæmundsson, 1967). The majority of rock formations in the area are hyaloclastite formations (tuffs, breccias and pillow lavas) that formed sub-glacially. Basalt lava flows from interglacial periods and from the Holocene occupy the lowlands and are therefore less common in the volcanic centre. Some primitive rocks, like picrites, can be found in the Hengill system, as well as intermediate rocks and rhyolites, the latter two mostly as intrusives. Whole-rock chemical analyses from several locations in the Hengill area, however, indicate that the majority of the rocks are of olivine-tholeiite composition (e.g. Larson et al., 2002; Alfredsson et al., 2008; Nielsson, 2011). This study is focused on the Hellisheiði high-temperature field, in the southwestern part of the Hengill geothermal area. Part of the study area is in a retrograde state with regards to geothermal activity, located just outside the western rift margin of the Hengill volcanic complex (well HN-2 in Fig. 1).

Sampling and methods

An advantage of using drill cuttings for examination of mineral assemblages is that the cuttings comprise a significant sampling of all there is to be found at a certain depth range. On the other hand the disadvantage of using drill cuttings is the difficulty in studying textural relationships between coexisting phases, especially if the cuttings are very fine-grained. Furthermore, each sample of the drill cuttings represents limited depth range instead of exact horizons. The presence of minerals derived from shallower depths can, for example, not be ruled out because of mixing within the well during drilling. The drilling process can also be somewhat destructive to the more delicate secondary minerals. These disadvantages are, however, less critical in the study of singular primary minerals since their reaction products, contained in veins and altered margins, remain in situ. Furthermore, if the samples have been carefully selected and the depth corrected (with regards to the delay of the cuttings reaching the surface and the geophysical logs), it is safe to assume that the samples represent given depths. The data can therefore be considered to show real assemblages at specific depths, especially from the upper part of the wells. In this study it was possible to sample from rather coarse cuttings which simplifies the determination of the types.

The samples in this study consist of olivine tholeiite lava flows (in one case possible glassy basalt or pillow lava) on the one hand and of olivine tholeiite intrusions or dykes on the other. The aim of such a sample collection is to make it possible to examine the progressive alteration of the primary minerals which are buried deeper with time, experiencing increasing alteration. The alteration of intrusions or dykes involves a different process where fresh

primary minerals usually experience the influence of the alteration zone in which they are emplaced without going through progressive alteration.

Most of the samples were picked from HN-2, west of the Gráuhnúkar area, a well situated just outside the western rim of the Hengill volcanic complex (Figs. 1 and 2). This would represent altered basaltic crust in a retrograde state since the formation temperatures of the well are slightly lower than the temperatures indicated by thermally dependent secondary minerals. This well does not have any deep lava flows so samples were also gathered from wells HE-8 in Sleggjubeinsdalir, HE-24 in Skarðsmýrarfjall and HE-42 in Stóra-Reykjafell (Figs. 1 and 2). Polished sections of the selected samples were prepared for the ARL-SEMQ-30 electron microprobe at the University of Iceland. Analysis of the selected olivines were run at 25 kV accelerating voltage and 20 nA sample current for 20 seconds whereas the pyroxene samples were run at 15 kV. The diameter of the electron beam was set at 3 μm in both cases. The minerals were analysed by point analyses. The standards used for the olivine analyses were the following: quartz (Si), titanium (Ti), periclase (Mg), Olivine San Carlos (Si,Mg), Fayalite Rockport (Mg), Olivine Springwater (Fe), Corundum (Al), Diopsige glass NASA (Mn,Ca,Ni), Magnetite synth (Fe), Ilmenite Sawyer (Ti) and Hematite (Fe). When pyroxene was analysed the following standards were used: quartz (Si), rutile (Ti), periclase (Mg), Corundum (Al), Diopside Chesterman (Si,Mg,Ca), Magnetite synth (Fe), Ilmenite Sawyer (Ti, Mn), Hematite (Fe), Chromite 396 (Cr), Hornblende Kakanui (Na,Al,Ti) and Grunerite (Fe). Simultaneously backscattered electron images were acquired.

Results

Alteration of Olivine

A total of 77 analyses of fresh olivines were produced from three different samples (lava flows at 128 m, 876 m and 880 m from HN-2). The composition of these olivines varies significantly from being Fo_{53} to Fo_{78} . The main reason for the variability is due to zoned olivine crystals in the lava flow at 128 m depth. The olivine crystals at 876 m and 880 m range from Fo_{61} to Fo_{70} . Representative analyses of primary olivines are shown in Table 1. In all other samples olivine has been completely replaced by alteration minerals such as smectite and chlorite.

Table 1. Representative olivine analyses.

Lava flows:				
	128 m (HN-2)	128 m (HN-2)	876 m (HN-2)	880 m (HN-2)
	- olivine core	- olivine edge		
Analyses as oxides, wt%				
SiO ₂	38.22	34.25	36.56	36.96
FeO	19.25	37.44	31.38	31
MnO	0.29	0.53	0.47	0.47
MgO	38.8	25.41	30.93	31.31
CaO	0.33	0.33	0.25	0.2
NiO	0.16	0.07	0.12	0.13
Al ₂ O ₃	0.25	0.3	0.3	0.28
TiO ₂	0	0.02	0	0.03
Total	97.3	98.35	100.01	100.38
Number of ions on the basis of 4 Oxygens				
Si	1.01	0.98	1.00	1.00
Fe	0.42	0.90	0.72	0.70
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.53	1.09	1.26	1.26
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00
	FO ₇₈	FO ₅₅	FO ₆₄	FO ₆₄

In Figure 3 a typical deuteric alteration of olivine is seen in a sample from fresh olivine-tholeiite lava. At oxidising conditions, cooling olivine crystals exsolve Fe-oxides at high temperatures (Baker and Haggerty, 1967) and this seems to be the case in Fig. 3 where olivine is otherwise almost completely unaltered. Iddingsite, a common alteration product of olivines, is the name used for the reddish brown alteration product of olivine. The iddingsite often forms narrow rinds on the fresh olivines and also penetrates the characteristic fractures. Iddingsite forms at oxidising conditions, at low temperatures of the zeolite zone where the dissolution of silica, alumina and alkalis sets in. It is a mixture of goethite, layered phyllosilicates and smectite (e.g. Brown and Stephen, 1959; Baker and Haggerty, 1967). The samples from this study do not show any clear signs of iddingsite (i.e. the mixture with goethite). However, the existence of goethite in the smectite mass cannot be ruled out as there may be indications of Fe-rich minerals seen as vague light spots in backscattered images of samples of lava flows from the smectite-zeolite zone (Figs. 4 and 5).

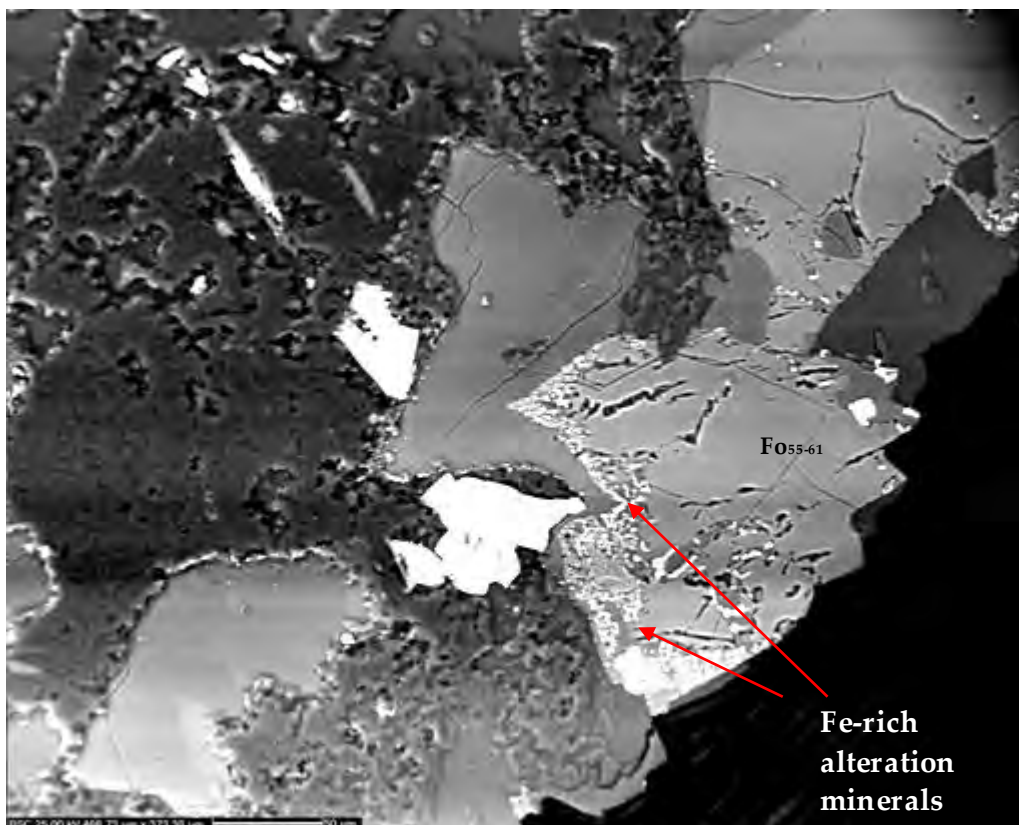


Figure 3. Olivine (FO₅₅₋₆₁) from 128-130 m in HN-2 showing Fe-rich alteration minerals from deuteric alteration along the rims. The figure is approximately 480 μm wide. Backscattered image.

There is evidence that hydrothermal alteration of basalts involves predominantly oxidation and hydration of primary phases such as olivine, feldspar, clinopyroxene and titanomagnetite (Steinþórsson and Sveinbjörnsdóttir, 1981). Early alteration of olivine resulting in the formation of iddingsite indicates oxidising conditions where the mobility of ferric iron (Fe^{3+}) within the rock is limited. At higher temperatures ferric iron seems to be removed from the dissolution margins of the olivines leaving almost pure smectite replacement of the olivine (as seen in Figs. 4 and 5).

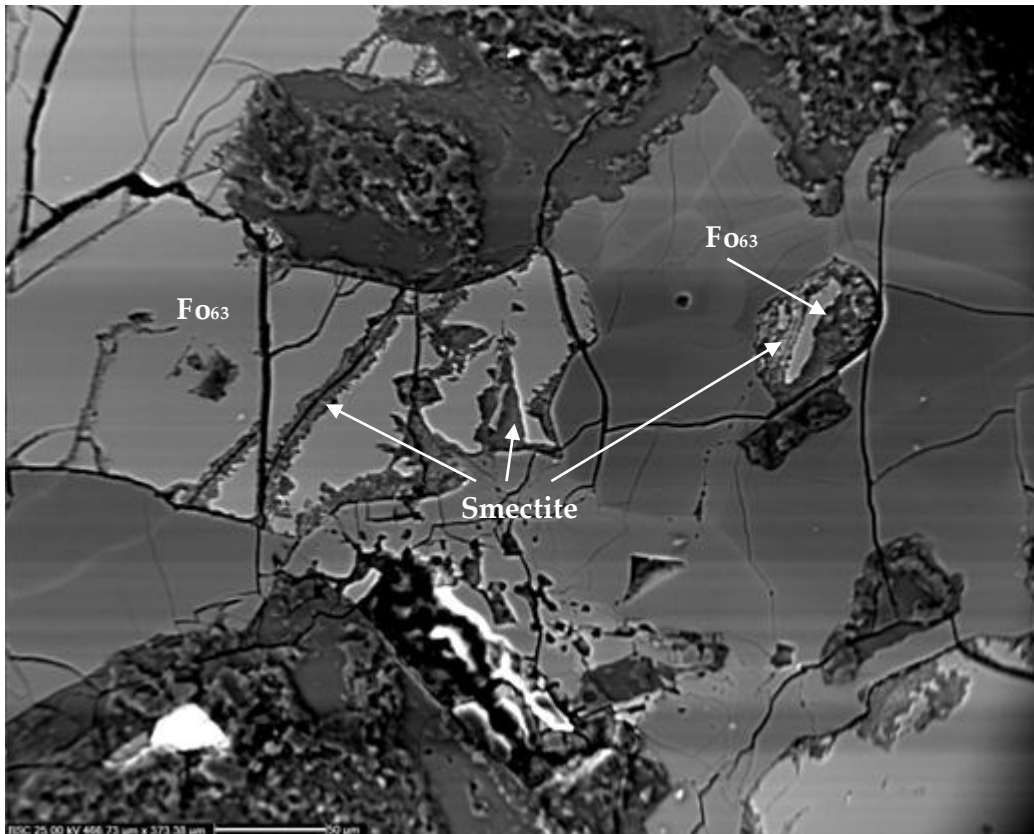


Figure 4. Olivine from 876 m in HN-2 (smectite-zeolite zone) which has been altered to smectite along cleavages and edges. The figure is approximately 480 μm wide. Backscattered image.

This pervasive smectite replacement, illustrated at various degrees in figures 4, 5 and 6, does not indicate a lower degree of oxidation since Fe-oxides remain as stable phases in the secondary assemblage. This is clearly illustrated in Fig. 6 where a smectite pseudomorph of olivine shows Fe-oxide accumulation along fracture surfaces.

Figures 7 and 8, where Al_2O_3 is plotted against SiO_2 and iron calculated as wt% FeO, illustrate that there does not seem to be a notable difference between smectites in intrusives compared to lava flows.

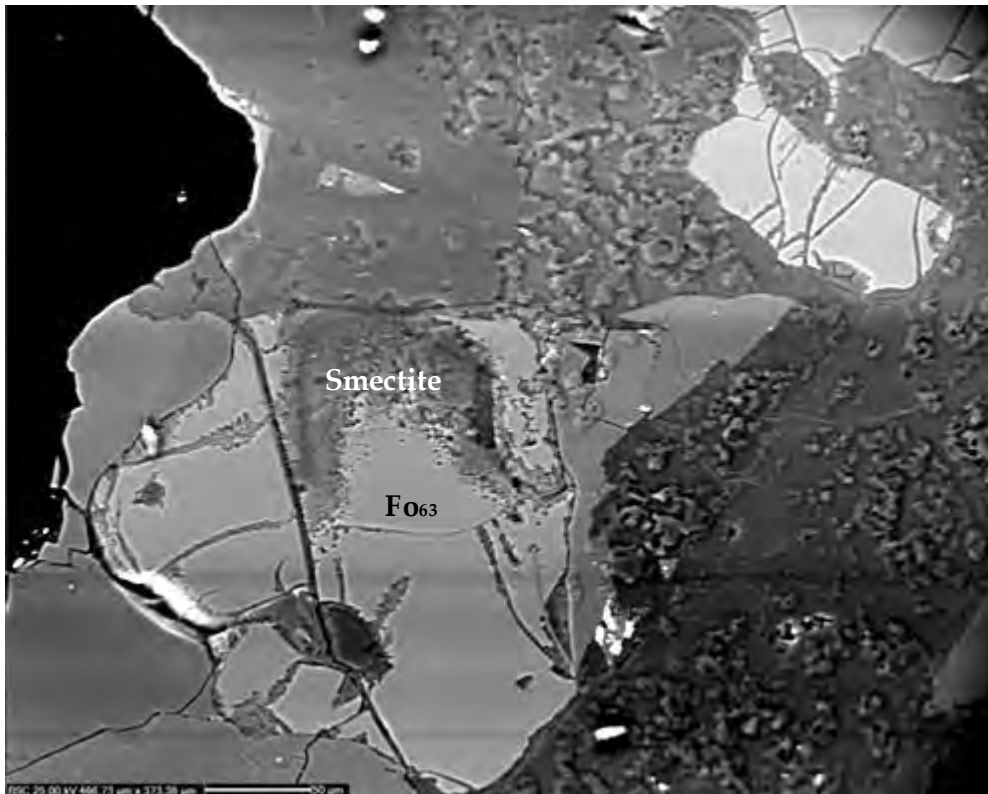


Figure 5. Olivine from 876 m in HN-2. Smectite has replaced olivine along edges and fractures. The figure is approximately 480 μm wide. Backscattered image.

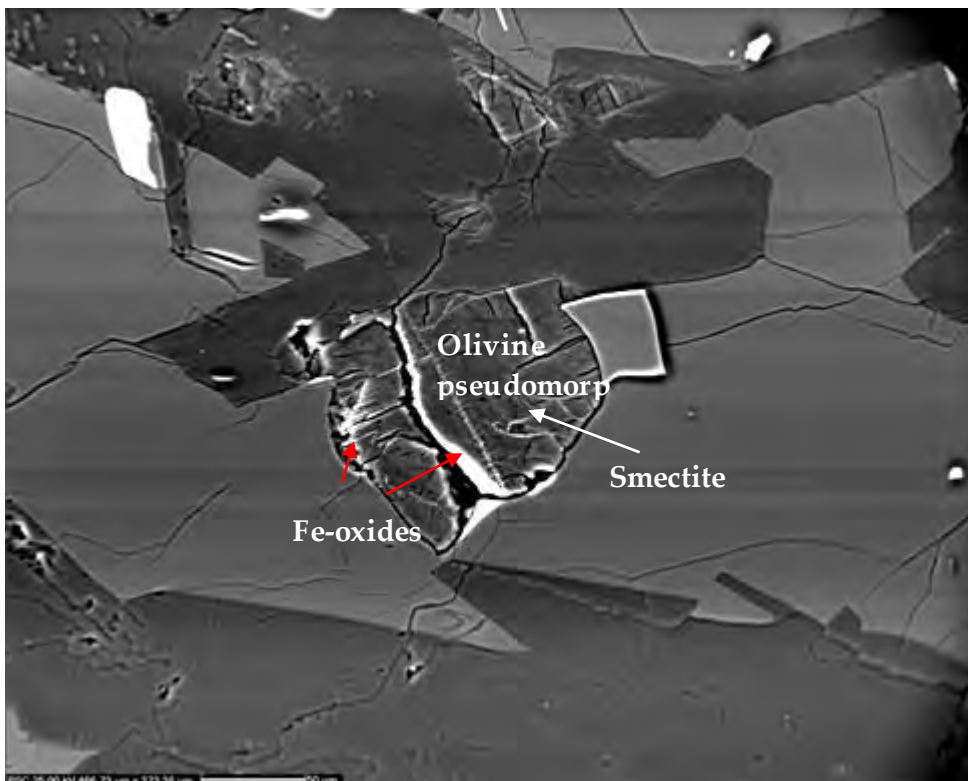


Figure 6. Olivine pseudomorph (replaced with smectite and Fe-oxide) from a lava flow at 1294 m in HN-2 (smectite-zeolite facies). The figure is approximately 480 μm wide. Backscattered image.

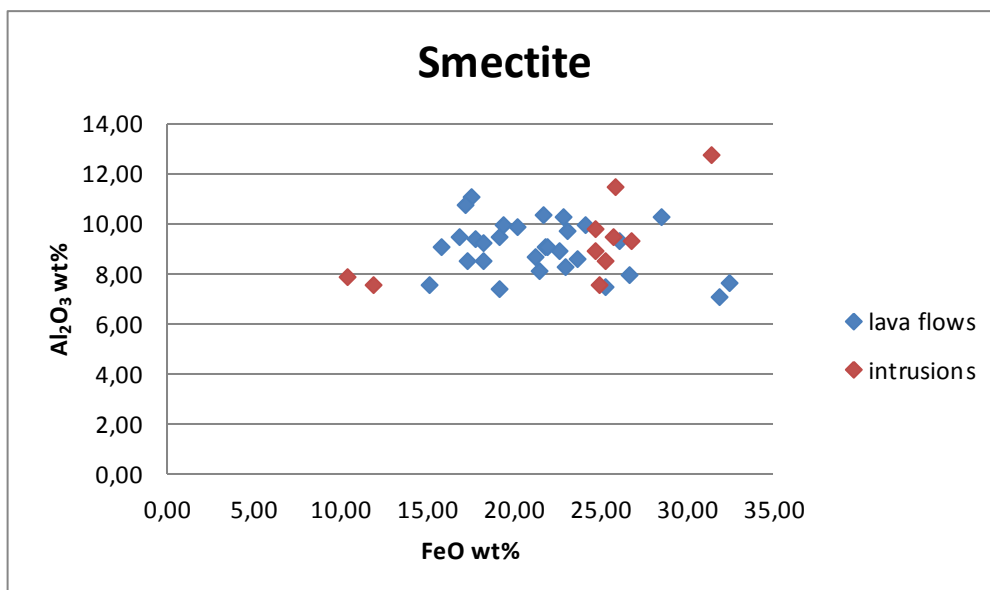


Figure 7. Al₂O₃ (wt%) of smectites plotted against wt% FeO (total iron calculated as FeO).

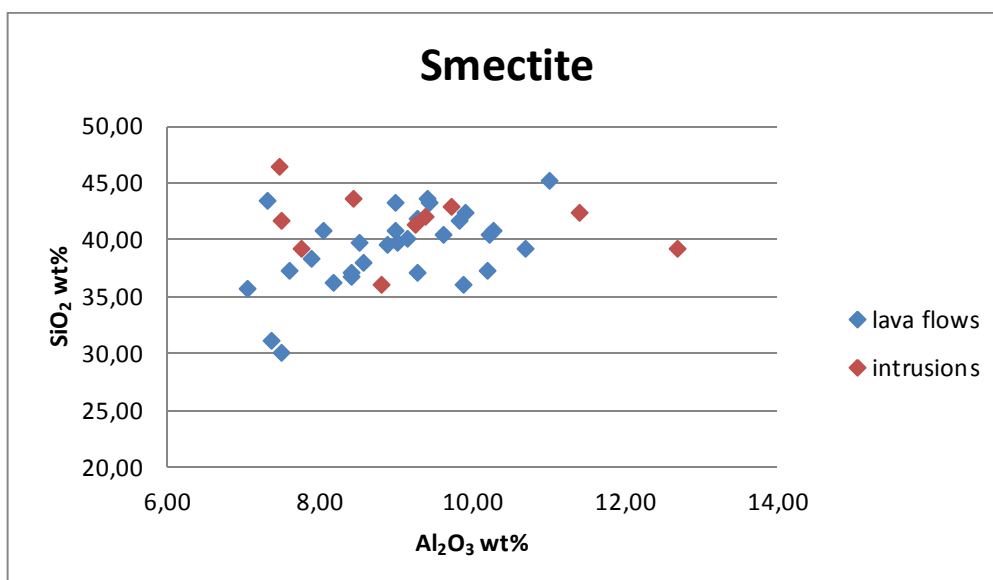


Figure 8. SiO₂ (wt%) of smectites plotted against wt%Al₂O₃.

Alteration of Pyroxene

Augite tends to alter along rims and along fractures and cleavage planes of the crystal, indicating a crystallographic control on the alteration reaction (Spilde et al., 1993). Indications of this can be seen in Fig. 12. It has been suggested that augite minerals are stable at temperatures between 50°C and 150°C. At higher temperatures they start to become more sensitive towards alteration (Stefánsson et al., 2001). This is illustrated by the fact that pyroxene does not seem to alter to any significant extent until in the chlorite-epidote zone.

The primary pyroxene samples analysed come from variable depths and alteration zones (selected samples can be seen in Tables 2 and 3). Only one of the selected spots for sampling (at 2502-2508 m in HE-8) shows extensive alteration of the clinopyroxene to ferro-actinolite (and titanite and chlorite in minor amounts) (Fig. 13). The alteration degree of clinopyroxenes is much lower in all of the other samples.

Table 2. Representative clinopyroxene analyses (from lava flows).

Lava flows:						
	504 m (HN-2)	876 m (HN-2)	880 m (HN-2)	1294 m (HN-2)	1480 m (HE-24)	1608 m (HE-42)
	sme-zeol zone	sme-zeol zone	sme-zeol zone	sme-zeol zone	chl-ep zone	ep-amph zone
Analyses as oxides, wt%						
SiO ₂	51.06	53.16	52.04	51.38	48.87	49.53
TiO ₂	1.07	0.87	1.01	0.93	1.6	1.47
Al ₂ O ₃	1.5	2.54	1.87	2.19	5.55	4.69
FeO	15.47	7.48	11.62	18.4	9.85	13.17
MnO	0.34	0.33	0.56	0.42	0.43	0.4
MgO	13.22	13.9	15.63	11.71	13.63	11.84
CaO	16.09	20.9	17.7	14.98	19.58	18.65
Na ₂ O	0.26	0.27	0.32	0.37	0.27	0.01
Cr ₂ O ₃	0.04	0.12	0.06	0	0.18	0
Total	99.05	99.57	100.81	100.38	99.96	99.76
Structural formula based on 6 Oxygens						
Si	1.95	1.97	1.93	1.96	1.83	1.87
Al	0.07	0.11	0.08	0.10	0.24	0.21
Al (IV)	0.05	0.03	0.07	0.04	0.17	0.13
Al (VI)	0.02	0.08	0.01	0.05	0.07	0.08
Ti	0.03	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04
Fe	0.49	0.23	0.36	0.59	0.31	0.42
Mn	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Mg	0.75	0.77	0.86	0.66	0.76	0.67
Ca	0.66	0.83	0.70	0.61	0.79	0.76
Na	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
M1	1.31	1.11	1.28	1.34	1.21	1.22
M2	0.68	0.85	0.73	0.64	0.80	0.76
	En ₃₉ Fs ₂₆ Wo ₃₅	En ₄₂ Fs ₁₃ Wo ₄₅	En ₄₅ Fs ₁₉ Wo ₃₆	En ₃₆ Fs ₃₁ Wo ₃₃	En ₄₁ Fs ₁₇ Wo ₄₂	En ₃₆ Fs ₂₃ Wo ₄₁
	augite	hedenbergite	augite	augite	augite	augite

Table 3. Representative pyroxene analyses (from intrusions).

Intrusions:												
	1284 m 944 m (HN-2)	1776 m (HN-2)	1782 m (HE-24)	1836 m (HN-2)	1928 m (HN-2)	2536 m (HE-42)	2536 m (HE-42)	2600 m (HE-8)	3055 m (HE-42)	3055 m (HE-42)	3055 m (HE-42)	
	sme-zeol zone	sme-zeol zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	ep-amph zone	
Analyses as oxides, wt%												
SiO ₂	49.74	51.96	53.07	48.56	50.58	52.3	50.85	49.86	49.18	50.18	49.45	53.83
TiO ₂	1.03	0.87	1.32	2.12	0.9	0.89	0.65	0.8	1.57	0.89	0.97	0.5
Al ₂ O ₃	3.08	2.82	2.29	5.4	1.56	1.36	3.83	5.5	5.46	1.97	2.64	2.35
FeO	16.06	9.33	12.08	10.58	19.56	13.72	8	5.6	10.7	13.57	16.33	6.97
MnO	0.56	0.34	0.33	0.27	0.57	0.46	0.36	0.3	0.36	0.71	0.91	0.35
MgO	11.64	14.41	11.34	12.07	9.93	13.6	15.57	15.47	12.26	14.65	11.42	16.84
CaO	17.6	20.21	19.61	20.75	16.35	16.84	20.38	21.1	20.53	17.67	18.06	19.38
Na ₂ O	0.12	0.36	0.3	0.14	0.3	0.29	0.22	0.2	0.41	0.24	0.27	0.13
Cr ₂ O ₃	0	0	0.03	0.08	0	0.01	0.08	1.08	0.09	0.02	0	0.03
Total	99.83	100.3	100.37	99.97	99.75	99.47	99.94	99.91	100.56	99.9	100.05	100.38
Structural formula based on 6 Oxygens												
Si	1.90	1.93	1.98	1.83	1.96	1.98	1.89	1.84	1.84	1.90	1.90	1.96
Al	0.14	0.12	0.10	0.24	0.07	0.06	0.17	0.24	0.24	0.09	0.12	0.10
Al (IV)	0.10	0.07	0.02	0.17	0.04	0.02	0.11	0.16	0.16	0.10	0.10	0.04
Al (VI)	0.04	0.05	0.08	0.07	0.03	0.04	0.05	0.08	0.08	-0.01	0.02	0.06
Ti	0.03	0.02	0.04	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01
Fe	0.51	0.29	0.38	0.33	0.63	0.43	0.25	0.17	0.33	0.43	0.52	0.21
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01
Mg	0.66	0.80	0.63	0.68	0.57	0.77	0.86	0.85	0.68	0.83	0.65	0.91
Ca	0.72	0.80	0.78	0.84	0.68	0.68	0.81	0.83	0.82	0.72	0.74	0.76
Na	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
M1	1.27	1.17	1.14	1.15	1.29	1.28	1.19	1.16	1.16	1.30	1.26	1.21
M2	0.73	0.83	0.81	0.85	0.70	0.70	0.83	0.85	0.85	0.74	0.76	0.77
	En ₃₅ Fs ₂₇ Wo ₃₈	En ₄₂ Fs ₁₅ Wo ₄₃	En ₃₅ Fs ₂₁ Wo ₄₄	En ₃₇ Fs ₁₈ Wo ₄₅	En ₃₀ Fs ₃₄ Wo ₃₆	En ₄₁ Fs ₂₃ Wo ₃₆	En ₄₅ Fs ₁₃ Wo ₄₂	En ₄₆ Fs ₉ Wo ₄₅	En ₃₇ Fs ₁₈ Wo ₄₅	En ₄₂ Fs ₂₂ Wo ₃₆	En ₃₄ Fs ₂₇ Wo ₃₉	En ₄₉ Fs ₁₁ Wo ₄₀
	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite

The pyroxene composition ranges from $Wo_{28}Fs_{39}En_{33}$ to $Wo_{48}Fs_{34}En_{18}$ (Fig. 9). It should be noted that a few samples border on being of diopside composition and at least two are within the hedenbergite composition. Diopside can occur in picrites as a primary mineral and compositions between diopside and hedenbergite are also known to occur in basic igneous rocks when the higher grades of the amphibolites facies have been reached (Deer et al., 1992). They are, however, particularly common in alkali olivine basalts. The samples with this composition come from 876 m and 1776 m in HN-2 (smectite-zeolite zone and epidote-amphibole zone) and from 1780-1786 m in HE-24 (epidote-amphibole zone). Some of the variability in the composition of the clinopyroxene can probably be attributed to compositional zoning as well as fine-grained secondary minerals in the primary one, especially in the epidote-amphibole zone. This can also explain lower Ca content and lower oxide totals in some cases (Lonker et al., 1993).

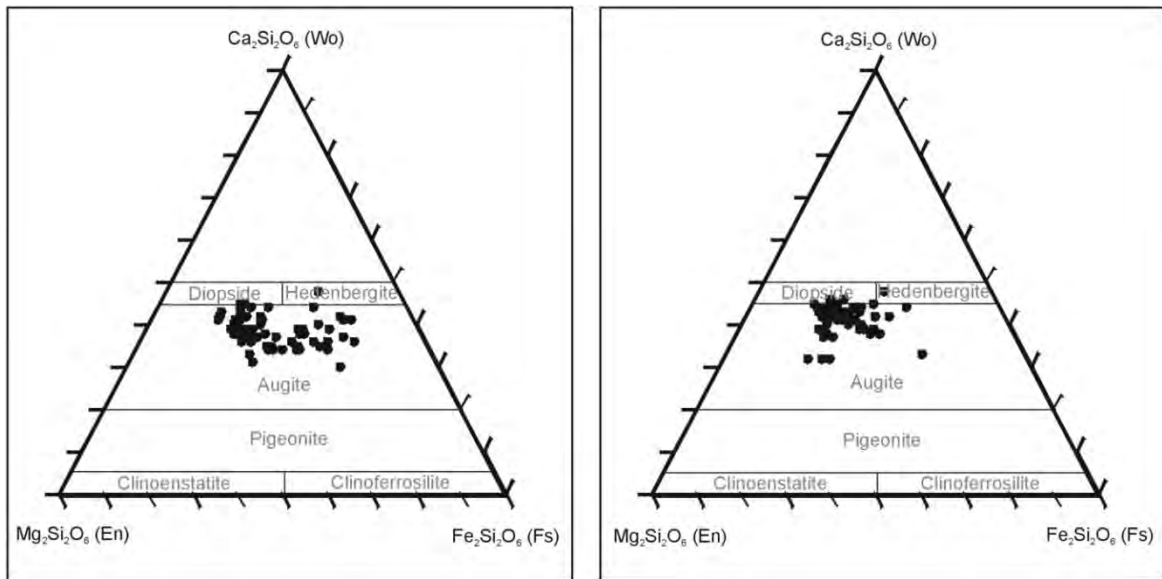


Figure 9. Pyroxene composition. Pyroxenes from intrusions are on the left whereas pyroxenes from lava flows are on the right.

When compared to pyroxene analyses from the high-temperature field at Reykjanes (Marks et al., 2010, 2011) it is interesting to note that the amount of Ti in the clinopyroxenes in the Hellisheiði field is somewhat higher (Fig. 10), the majority of the samples being titaniferous augite and titanaugite (Deer et al., 1997). The reason for this lies probably in the difference in evolution of the basalts. While the Reykjanes olivine tholeiites belong to relatively high MgO basalts (e.g. Jakobsson et al., 1978) the Hellisheiði rock suite contains more evolved basalts belonging to the Hengill volcanic centre. This is illustrated by the fact that olivine phenocrysts from Reykjanes have a composition of Fo₇₃ to Fo₉₀ (e.g. Jakobsson et al., 1978) whereas the olivines from this study are considerably lower in MgO content (Table 1). Sub-calcic titaniferous augite is the dominating late-forming pyroxene in slightly evolved tholeiites where MgO is about and below 6 wt% (Niels Óskarsson, personal communication, September, 2011).

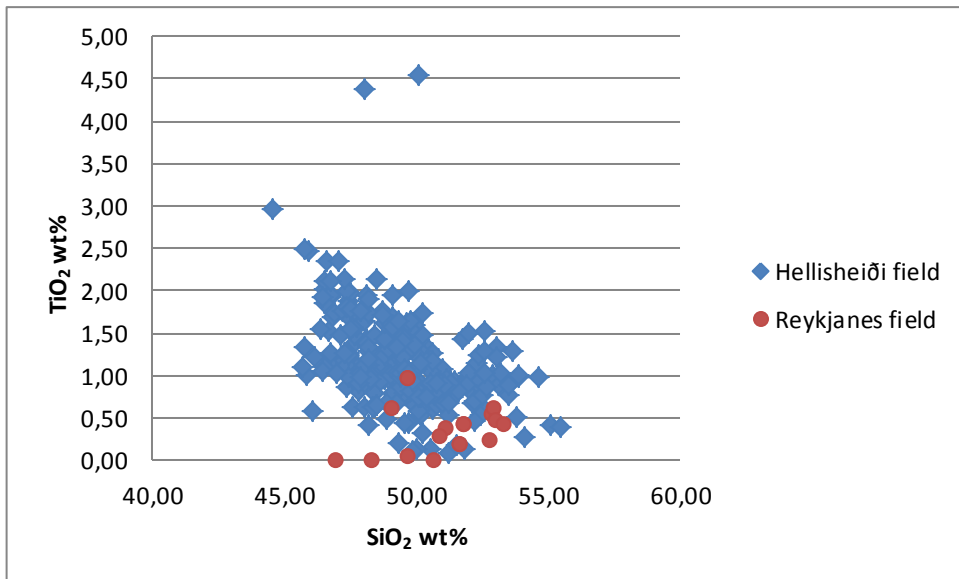


Figure 10. Comparison between wt% TiO₂ in pyroxenes in the Hellisheiði field and the Reykjanes field (from Marks et al., 2010 and 2011).

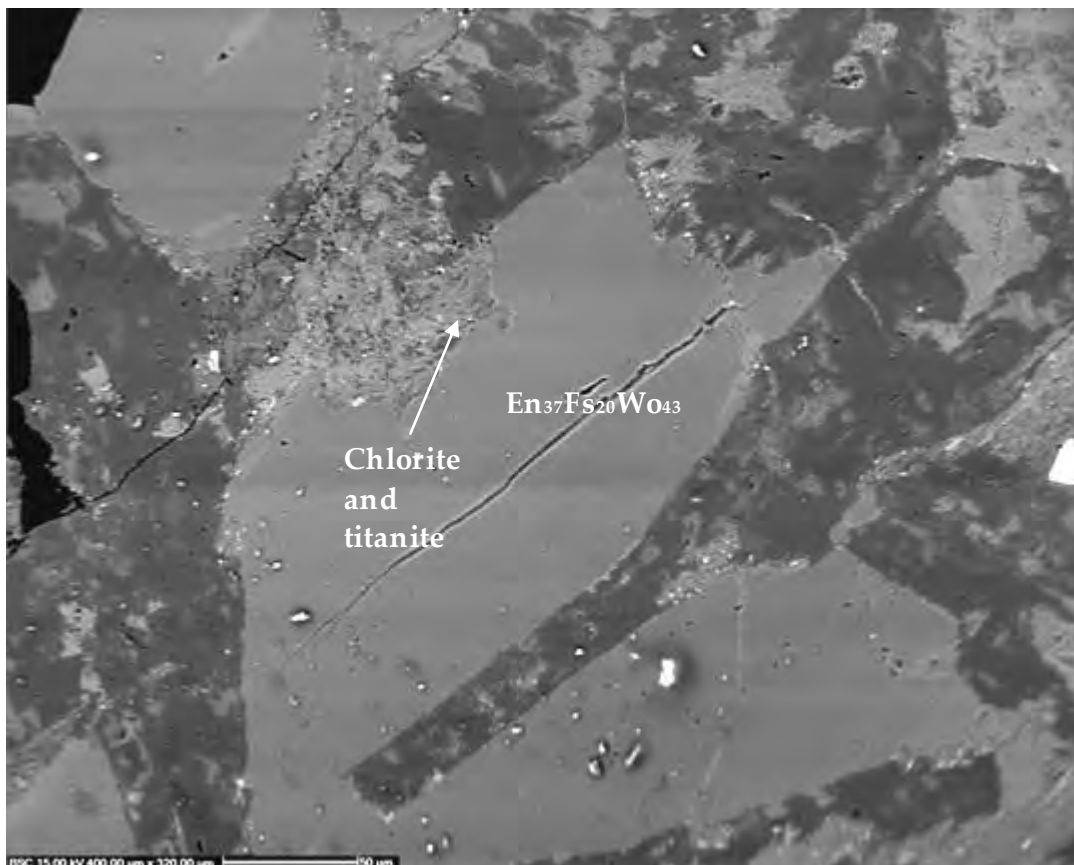


Figure 11. Sample from an intrusion at 1780-1786 m in HE-24. Alteration minerals replacing the augite are titanite and chlorite. Epidote-amphibole facies. The figure is approximately 480 μm wide. Backscattered image.

The alteration mineral replacing primary clinopyroxene is primarily chlorite in the chlorite-epidote facies. Titanite is also noted in one sample in the chlorite-epidote zone (lava flow at 1602 m in HE-42), but otherwise it is more common in the epidote-amphibole zone (Fig. 11). When the epidote-amphibole zone has been reached, actinolite and ferro-actinolite are the chief alteration minerals replacing augite (Fig. 13).

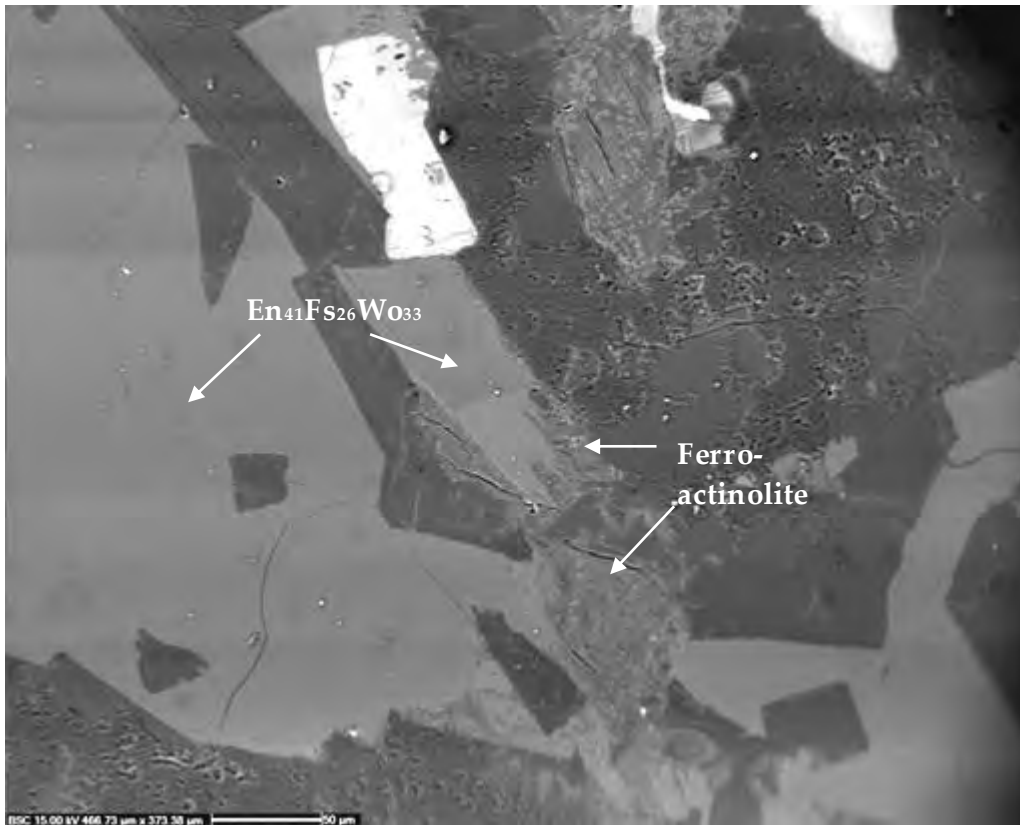


Figure 12. Sample from an intrusion at 1928 m in HN-2. Ferro-actinolite replacing augite along some of the edges and along the cleavage plains. Backscattered image.

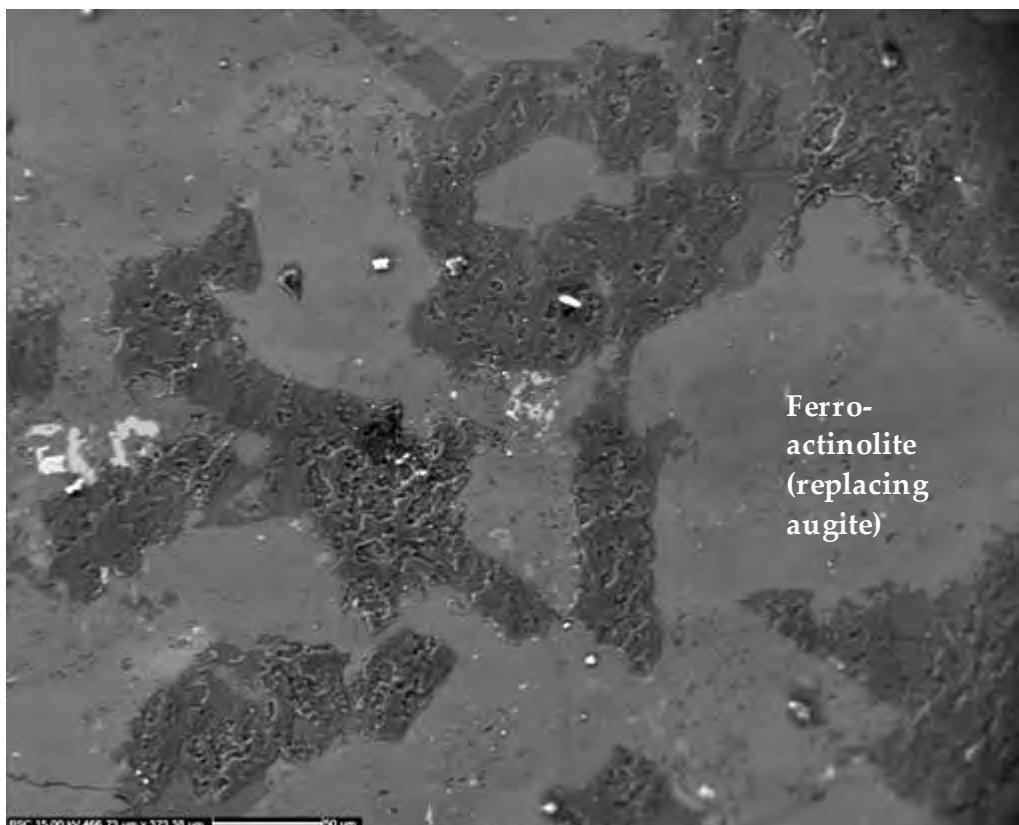


Figure 13. Ferro-actinolite replacing augite in a lava flow at 2502 m in HE-8. The figure is approximately 480 μm wide. Backscattered image.

Chlorite

Typical examples of chlorites which have replaced clinopyroxene can be seen in Table 4. Chlorite seems to have lower Si-content in the lava flows than in the intrusions (Fig. 14). This correlates well with previous studies that indicate that chlorite grains in more permeable formations show lower Si-contents compared to chlorite in less permeable formations (e.g. Lonker et al., 1993). Generally, intrusions are much less permeable than lava flows which commonly also have higher proportion of vesicles. Some of the samples shown in Fig. 14 generally have rather high SiO_2 contents. This is believed to be caused by interstitial SiO_2 (perhaps originating from the dissolution of plagioclase), which can easily reside in between the chlorites.

Table 4. Representative chlorite analyses.

	Lava flows			Intrusions						
	2506 m (HE-8)	1602 m (HE42)	1480 m (HE-24)	1776 m (HN-2)	1784 m (HE-24)	1834 m (HN-2)	1928 m (HN-2)	2598 m (HE-8)	2538 m (HE-42)	3055 m (HE-42)
Analysis as oxides, wt%										
SiO ₂	30.69	28.44	28.71	30.82	31.4	29.35	29.23	27.96	30.32	37.24
TiO ₂	0.07	0.08	0.01	0.05	0	0	0.04	0.03	0.15	0.05
Al ₂ O ₃	18.6	16.78	21.47	18.35	18.45	16.23	13.8	20.32	17.54	12.83
FeO	22.58	32.42	25.34	34.01	23.37	27.3	29.97	26.57	22.51	18.39
MnO	0.18	0.28	0.57	0.33	0.2	0.34	0.17	0.5	0.28	0.42
MgO	14.91	11	13.72	7.02	15.69	13.83	11.63	12.55	17.68	19.06
CaO	0.19	0.3	0.23	0.47	0.21	0.44	0.44	0.36	0.36	1.45
Na ₂ O	0	0	0	0.39	0	0.3	0.24	0.02	0.06	0.49
Cr ₂ O ₃	0	0	0.01	0	0.03	0	0	0.08	0	0
Total	87.22	89.3	90.06	91.44	89.35	87.79	85.52	88.39	88.9	89.93
Number of Cations based on 28 Oxygens										
Si	6.33	6.09	5.83	6.43	6.34	6.23	6.49	5.85	6.16	7.27
Al	4.52	4.24	5.14	4.51	4.39	4.06	3.61	5.01	4.20	2.95
Al (IV)	1.67	1.91	2.17	1.57	1.66	1.77	1.51	2.15	1.84	0.73
Al (VI)	2.85	2.33	2.98	2.94	2.72	2.29	2.10	2.87	2.37	2.22
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01
Fe	3.89	5.81	4.31	5.93	3.94	4.85	5.56	4.65	3.83	3.00
Mn	0.03	0.05	0.10	0.06	0.03	0.06	0.03	0.09	0.05	0.07
Mg	4.58	3.51	4.16	2.18	4.72	4.38	3.85	3.92	5.36	5.55
Ca	0.04	0.07	0.05	0.11	0.05	0.10	0.10	0.08	0.08	0.30
Na	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.12	0.10	0.01	0.02	0.19
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Si+Al(IV)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
M1	11.40	11.78	11.59	11.39	11.47	11.80	11.75	11.63	11.72	11.34

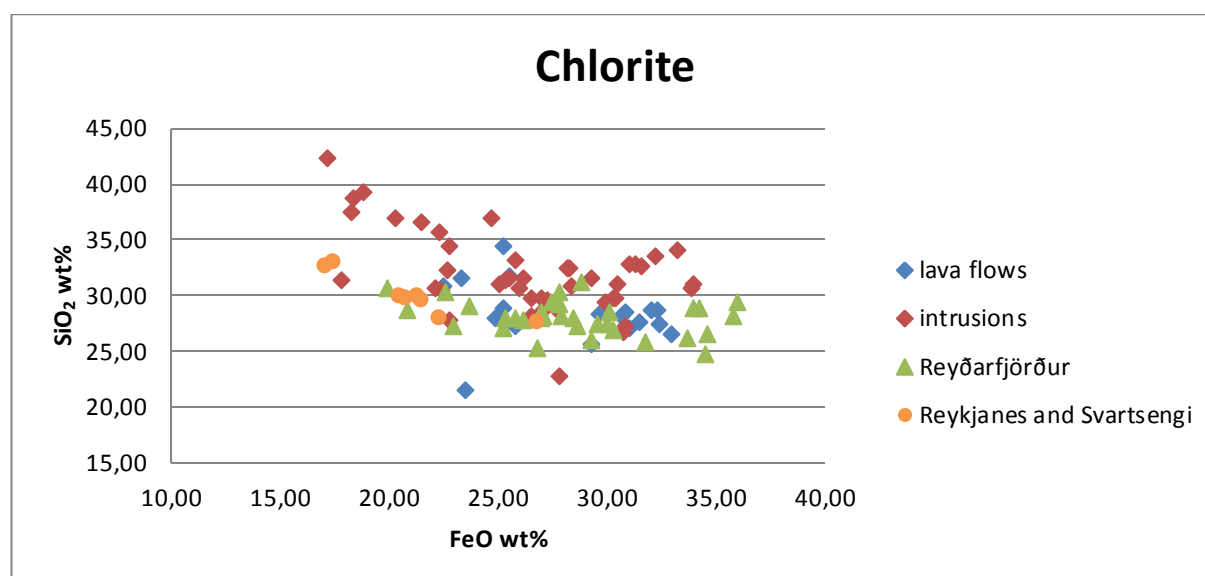


Figure 14. Wt% SiO₂ plotted against Wt% FeO (total Fe, calculated as FeO) in chlorites from lava flows and intrusions.

In Figure 14, wt% SiO₂ is plotted against wt% FeO (total iron calculated as FeO) for the chlorites in the Hellisheiði field and compared to chlorites from core samples of Tertiary age from Reyðarfjörður (data from Exley, 1982, Mehegan et al., 1982) and to chlorites from Reykjanes/Svartsengi (data from Lonker et al., 1993). The difference between the Hellisheiði data and data from Reykjanes/Svartsengi and Reyðarfjörður is that the chlorites in the Hellisheiði field are mostly formed by alteration of pyroxene although an occasional chlorite mineral can be attributed to fractures in the primary mineral. The chlorites from the other sites originate from variable sources such as vesicles and olivines. The most notable difference in Fig.14 is the amount of silica, which is considerably higher in some of the chlorites replacing clinopyroxene in the intrusives in the Hellisheiði field. Otherwise the chlorites from the lava flows as well as from some of the intrusives correlate well with the Reyðarfjörður and the Reykjanes/Svartsengi data.

Titanite

Titanite is found as an alteration mineral replacing clinopyroxene in numerous samples. It has been noted that titanite often occurs as fine-grained crystals that form discontinuous rims around minerals replaced by chlorite (Marks et al., 2010). This observation relates to the fact that the most abundant occurrence of titanomagnetite in olivine tholeiite is on grain boundaries of the major silicate phases. This illustrates the enrichment of titanium in the magma during the final stages of lava crystallisation. There are, however, indications that titanium is somewhat mobile during hydrothermal alteration as indicated by the observation that titanite replaces all of the primary minerals of basalts except olivine (i.e. clinopyroxene, plagioclase, Fe-Ti oxides and glass) (e.g. Lonker et al., 1993).

Amphibole

In the epidote-amphibole facies actinolite and ferro-actinolite start to replace primary clinopyroxenes. Representative amphibole compositions are shown in Table 5.

Table 5. Representative amphibole analyses.

	Intrusions:				Lava flows:			
	1776 m (HN-2)	1836 m (HN-2)	1928 m (HN-2)	2600 m (HE-8)	3055 m (HE-42)	1602 m (HE-42)	2506 m (HE-8)	
Analyses as oxides, wt%								
SiO ₂	49.7	48.2	49.9	48.16	53.31	52.34	44.27	
TiO ₂	0.02	0.05	0.1	0.39	0.22	0.6	0.88	
Al ₂ O ₃	5.5	4.95	3.27	5.48	4.51	5.8	10.61	
FeO	23.92	24.1	24.55	20.31	15.59	22.12	18.54	
MnO	0.59	0.27	0.4	0.37	0.64	0.66	0.28	
MgO	7.02	7.31	7.44	9.3	12.65	7.84	10.4	
CaO	10.81	10.61	11.09	11.77	11.29	10.76	10.79	
Na ₂ O	0.19	0.13	0.09	0.37	0.56	1	0.99	
Cr ₂ O ₃	0.06	0.07	0	0	0	0.01	0.07	
Total	97.81	95.69	96.84	96.15	98.77	101.13	96.83	
Number of cations based on 23 Oxygens								
Si	7.52	7.49	7.67	7.35	7.66	7.57	6.68	
Al	0.98	0.91	0.59	0.99	0.76	0.99	1.89	
Al (IV)	0.48	0.51	0.33	0.65	0.34	0.43	1.32	
Al (VI)	0.50	0.39	0.26	0.33	0.43	0.56	0.56	
Ti	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.07	0.10	
Fe	3.03	3.13	3.16	2.59	1.87	2.67	2.34	
Mn	0.08	0.04	0.05	0.05	0.08	0.08	0.04	
Mg	1.58	1.69	1.70	2.12	2.71	1.69	2.34	
Ca	1.75	1.77	1.83	1.92	1.74	1.67	1.74	
Na	0.06	0.04	0.03	0.11	0.16	0.28	0.29	
Cr	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
Si+Al (IV)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	
M1	5.20	5.27	5.18	5.13	5.11	5.07	5.39	
M2	1.81	1.80	1.85	2.03	1.90	1.95	2.03	

In Figure 15 wt% SiO₂ is plotted against wt% FeO from the amphiboles in lava flows compared to amphiboles from intrusions. A notable difference is observed in the range of FeO content, showing greater variation in the intrusions (ca. 15-27 wt%) compared to the lava flows (ca. 15-20 wt%). This is probably caused by the different oxidation state of the intrusions as compared to the relatively older lava pile. There is ample evidence that the oxidation of the rift-zone crust mainly takes place within its upper levels where oxygen-rich water has access to the strata. It may be argued that a basaltic intrusion at depth solidifies at less oxidised conditions. Accordingly its Fe₂O₃/FeO ratio is low as compared to the more oxidised surroundings of the intrusion. This higher relative abundance of FeO within the intrusion favours the formation of more FeO-rich actinolite.

An even greater difference is seen when FeO (total iron calculated as FeO) is plotted against Al₂O₃ where two distinct groups of actinolites seem to form (Fig. 16). The amphiboles found in the lava flows have higher wt% Al₂O₃ and lower wt% FeO at the same FeO concentrations

(with a few minor exceptions). During the primary alteration of an intrusion in the epidote-actinolite zone the plagioclase is probably the only Al-source. Dissolution of plagioclase and the formation of albite and K-feldspar releases the anorthite component of the plagioclase (Ca and Al) and therefore aluminous epidote could be formed as a replacement mineral. The observed growth of Fe-poor epidote as a replacement mineral of plagioclase indicates that Al is preferentially taken up by the epidote. At the same time the abundance of FeO in the unoxidized intrusion is high as compared to the lava pile (Figs. 15 and 16). Al-poor actinolite and Al-rich epidote pairs can, accordingly, be taken as an indication of primary alteration of intrusive rock in the epidote-actinolite zone. The few epidotes recognised in this study were found in an intrusion at 1826 m in HN-2, along with Al-poor ferro-actinolite.

More significant, however, may be the different modes of alteration of lava flows compared to intrusives. The progressive alteration of lava flows may lead to Al-rich actinolite forming from an already chlorite altered clinopyroxene in contrast to intrusives where prevailing temperatures of the surrounding country rock lead to actinolite forming directly from the original pyroxene.

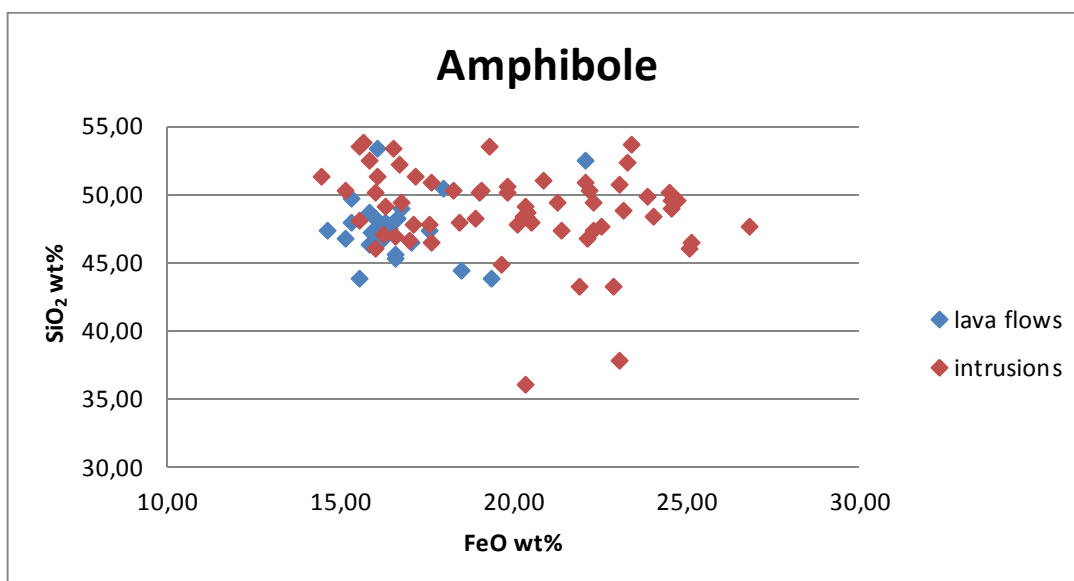


Figure 15. Amphibole alteration of clinopyroxene, wt% SiO₂ plotted against iron as wt% FeO.

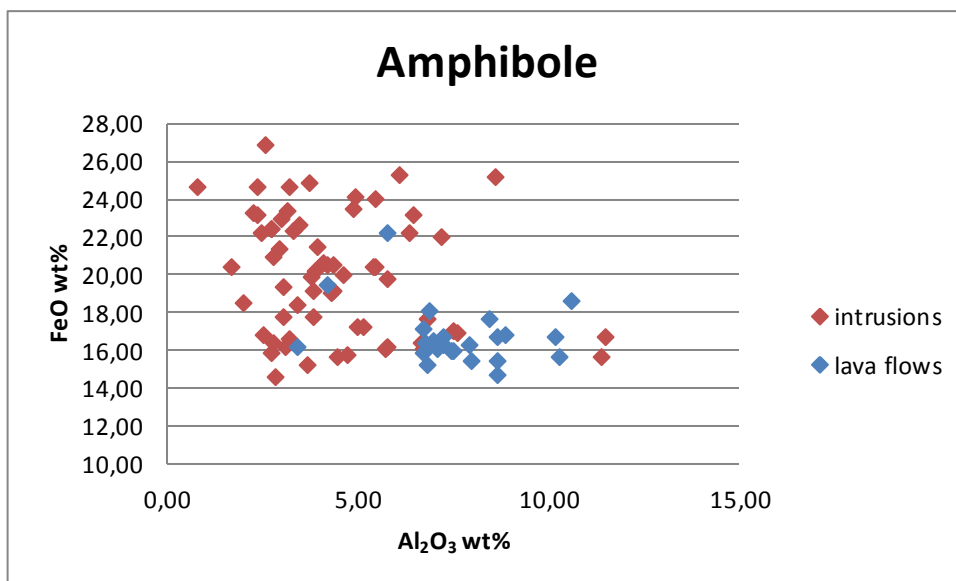


Figure 16. Amphibole alteration of clinopyroxene, iron as wt% FeO plotted against wt% Al₂O₃.

Conclusions

Geothermal alteration of primary olivine and pyroxene in olivine tholeiite is dominated by dissolution / precipitation reactions. This is consistent with a previous study of plagioclase in the Hengill area (Larsson et al., 2002).

Iddingsite, as such, is not recognised in the microprobe analyses where smectite has replaced olivine (i.e. no goethite is recognised). However, vague light spots imbedded in smectite in backscattered images indicate the existence of Fe-oxides in the smectite mass. As temperatures rise iron seems to be partly removed from the mass leaving smectite pseudomorphs of olivine with Fe-oxides accumulated along fracture surfaces. As alteration increases these pseudomorphs are transformed to chlorite.

Clinopyroxene remains stable into the chlorite-epidote zone where it is replaced by chlorite in situ. In the epidote-actinolite zone clinopyroxene is transformed into actinolite in situ.

There is a significant difference in the composition of actinolite that forms from clinopyroxene within intrusions when compared to actionolite from the lava pile. The difference is attributed to the less oxidised intrusive rock although the possibility of progressive alteration in the lava pile may not be excluded (i.e. actinolite may also form from chlorite in the lava pile in contrast to forming directly from pyroxene in the intrusives).

There is also a notable difference in the amount of SiO₂ in chlorites from intrusions when compared to chlorites from lava flows where it seems significantly lower. This is believed to stem from less permeability in the intrusives.

Acknowledgements

Niels Óskarsson at the University of Iceland, Institute of Earth Sciences is thanked for his assistance and helpful discussions during the process of this study. Dr. Karl Grönvold, also at the University of Iceland, Institute of Earth Sciences, deserves gratitude for his patience and guidance during the microprobe analyses. Sigurður Steinþórsson was of invaluable assistance in setting my mind straight. Björn S. Harðarson and Hjalti Franzson at ÍSOR are thanked for their comments. GEORG, Geothermal Research Group, is also thanked, having funded a part of the study. Reykjavík Energy readily allowed me to use their data for which it deserves gratitude.

References

- Alfredsson, H.A., Hardarson, B.S., Franzson, H. and Gislason, S.R., 2008. CO₂ sequestration in basaltic rock at the Hellisheiði site in SW Iceland: stratigraphy and chemical composition of the rocks at the injection site. *Mineralogical Magazine*, vol. 72 (1), pp. 1-5.
- Baker, Ian and Haggerty, Stephen E., 1967. The Alteration of Olivine in Basaltic and Associated Lavas. Part II: Intermediate and Low Temperature Alteration. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 16, pp. 258-273.
- Brown, G., and Stephen, I., 1959. Structural study of iddingsite from New South Wales, Australia. *Am. Mineralogist*, v. 44, pp. 251-260.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Second edition. Pearson Education Limited.
- Franzson, H., 1994. Nesjavellir. Alteration in a geothermal system. Orkustofnun report OS94021/JHD-06, 53 p. (In Icelandic).
- Franzson, H., 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, pp. 13-20.
- Franzson, H., Árnason, K., Sæmundsson, K., Steingrímsson, B., Harðarson, B.S. and Gunnlaugsson, E., 2010. The Hengill geothermal system, conceptual geological model. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 9 p.
- Helgadóttir, H.M., 2011. The Gráuhnúkar geothermal system, Hellisheiði: Geology and hydrothermal alteration. M.Sc. thesis. University of Iceland, 186 p.
- Jakobsson, S., 1983. Icelandic rock types 2. Olivine-tholeiite. *Náttúrufræðingurinn*, 53, pp. 13-18. (In Icelandic).

- Larsson, D., Grönvold K., Oskarsson, 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*, vol. 114, pp. 275-290.
- Lonker, S.W., Franzson, H. and Kristmannsdóttir H., 1993. Mineral-fluid interactions in the Reykjanes and Svartsengi geothermal systems, Iceland. *American Journal of Science*, vol. 293, pp. 605-670.
- Marks, N., Schiffman, P., Zierenberg, R.A., Franzson, H. and Fridleifsson, G.Ó., 2010. Hydrothermal alteration in the Reykjanes geothermal system: Insights from Iceland deep drilling program well RN-17. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 189, pp. 172-190.
- Marks, N., Schiffman, P. and Zierenberg R.A., 2011. High-grade contact metamorphism in the Reykjanes geothermal system: Implications for fluid-rock interactions at mid-oceanic ridge spreading centers. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 12: 25 pp.
- Nielsson, Steinþór, 2011. Geology and alteration in the Hverahlíð geothermal system in Hellisheiði. M.Sc. thesis. University of Iceland. 208 p. (In Icelandic).
- Spilde, M.N., Brearley, A.J. and Papike, J.J., 1993. Alteration of plagioclase and pyroxene phenocrysts in a fissure fumarole, Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska. *American Mineralogist*, vol. 78, pp. 1066-1081.
- Stefánsson, A., Gíslason, S.R. and Arnórsson, S., 2001. Dissolution of primary minerals in natural waters. II. Mineral saturation state. *Chemical Geology*, 172: 251-276.
- Steinþórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E., 1981. Opaque minerals in geothermal well no. 7, Krafla, Northern Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 10, 245-261.
- Sæmundsson, K., 1967. Vulkanismus und Tektonik des Hengill-Gebietes. *Acta nat. Isl.* II, no. 7, 101 p.
- Sæmundsson, K., 1995. Geological map of the Hengill area 1:50,000. Orkustofnun, Reykjavík.

Viðauki VI: Grein um jarðhitarannsóknir á sunnanverðu Hengilssvæðinu fyrir WGC (World Geothermal Conference) á Bali, Indónesíu, 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.helgadottir@isor.is

Keywords: Hellisheiði, Hverahlíð, geology, stratigraphy, aquifer, hydrothermal alteration, formation temperature.

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.

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.

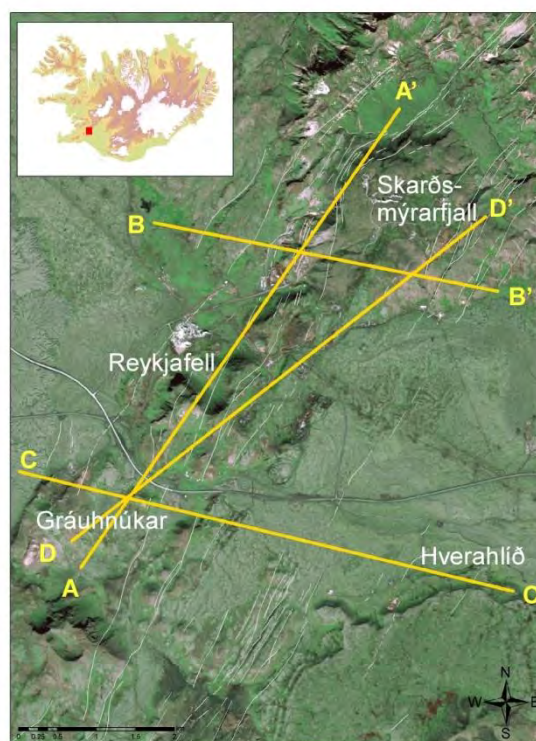


Figure 1: Location of Hellisheiði high-temperature field, with apparent faults and cross section lines.

The first exploration well of the Hellisheiði area was drilled in 1985 at Kolviðarhöll 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. Reykjavik 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 Nielsson 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.

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.

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 inter-glacials, 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 (Nielsson 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 inter-glacials which would also suggest the same age (given that inter-glacials occur every 100,000 years approximately).

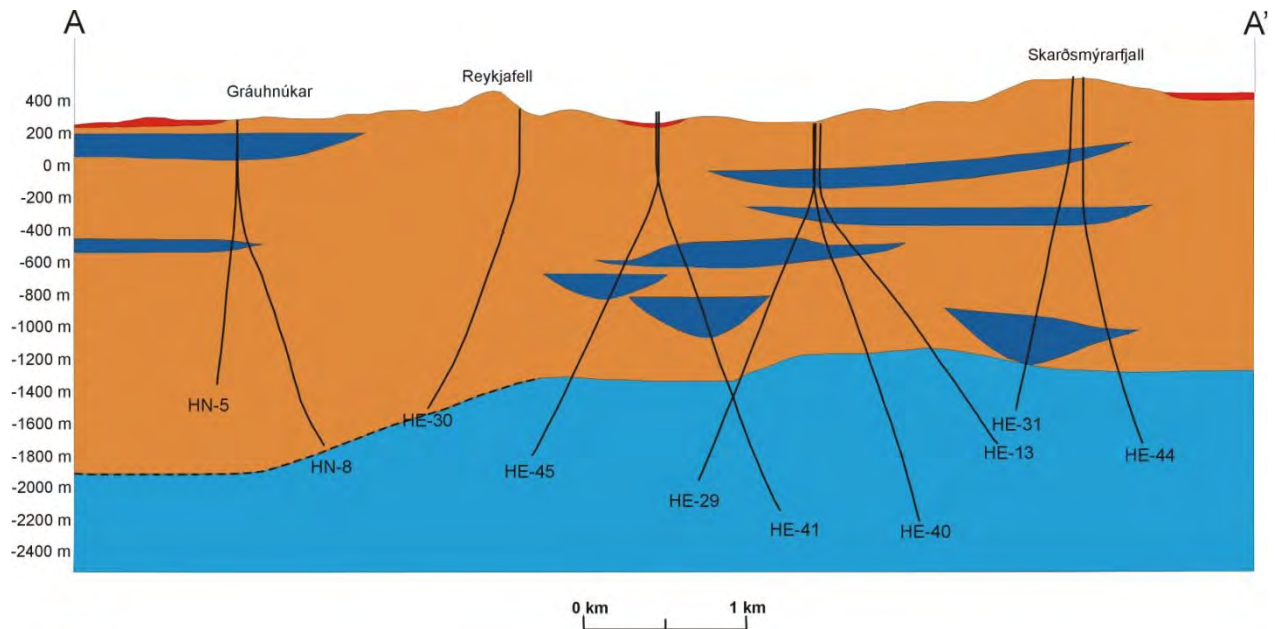


Figure 2: Geological cross section along line A-A'. Blue formations are interglacial lava series and the light blue formation is interpreted as the bottom of the Hengill central volcano. Red formations are postglacial lavas. Brown formations are hyaloclastite formations. Dotted, black line represents areas where no data is available.

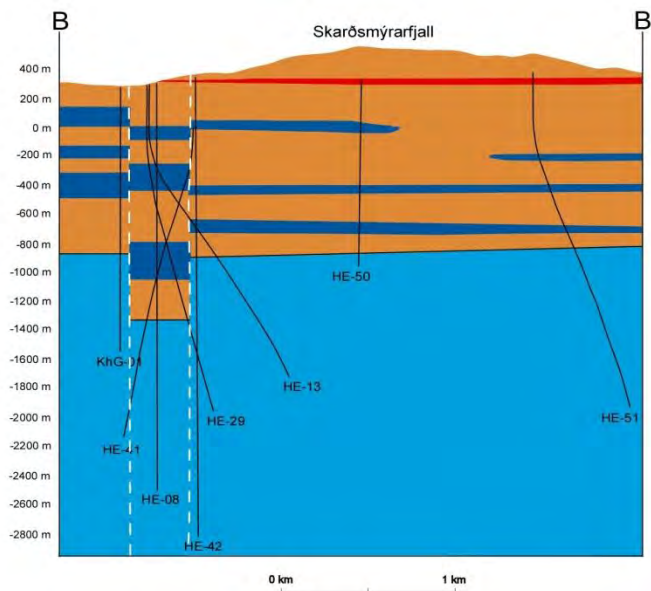


Figure 3: Geological cross section along line B-B'. Same legend as in figure 2.

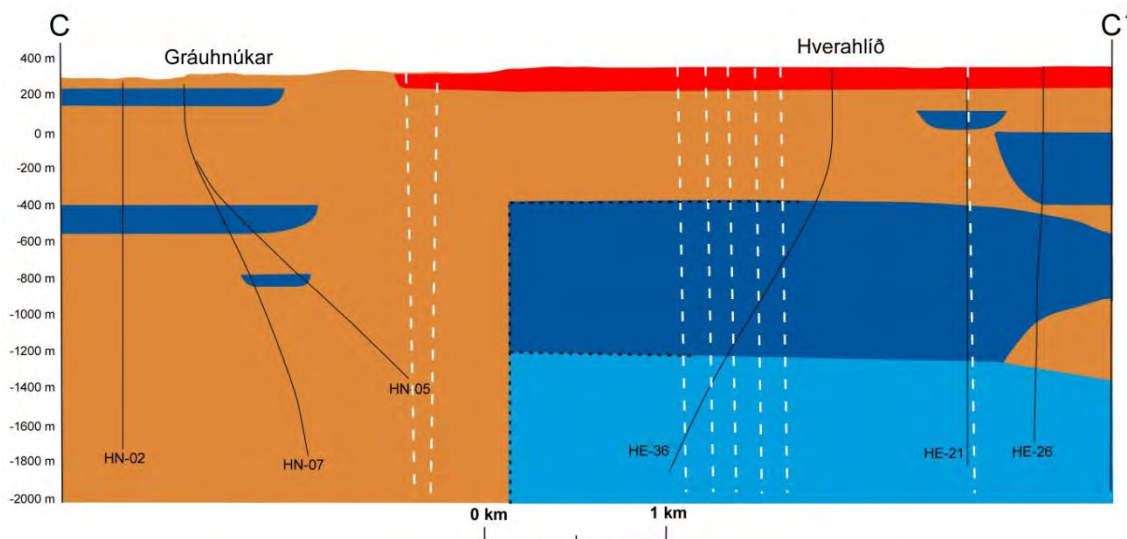


Figure 4: Geological cross section along line C-C'. Same legend as in figure 2.

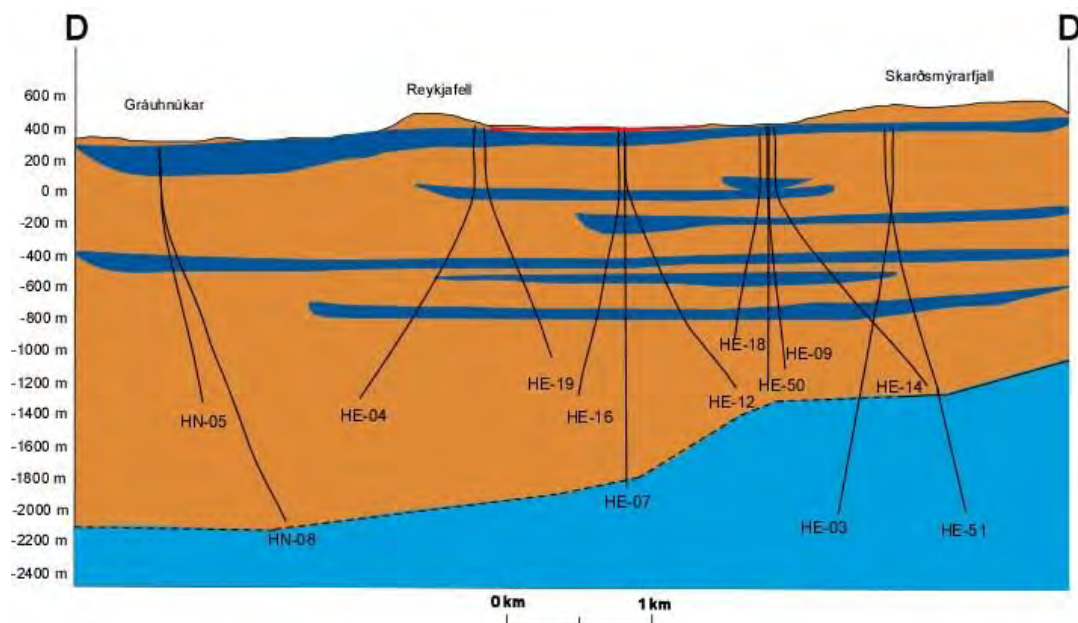


Figure 5: Geological cross section along line D-D'. Same legend as in figure 2.

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).

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

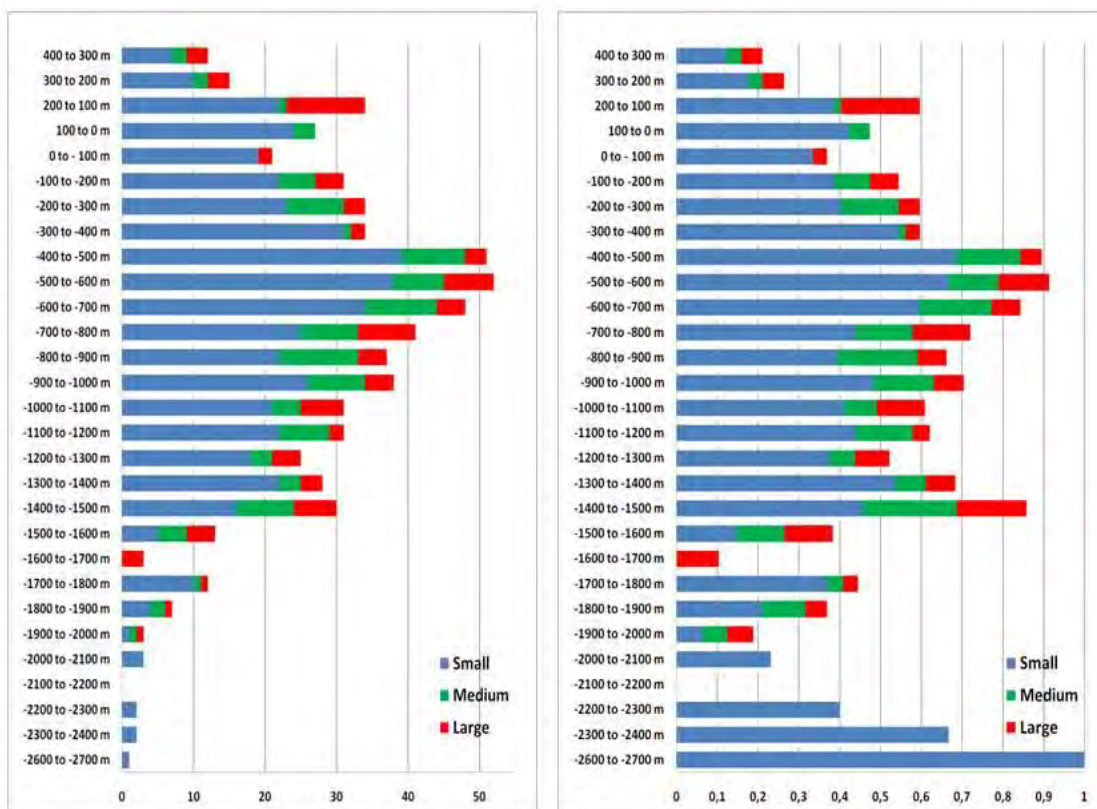


Figure 6: Aquifers at 100 m intervals in wells in Hellisheiði. The histogram to the right is normalized.

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.

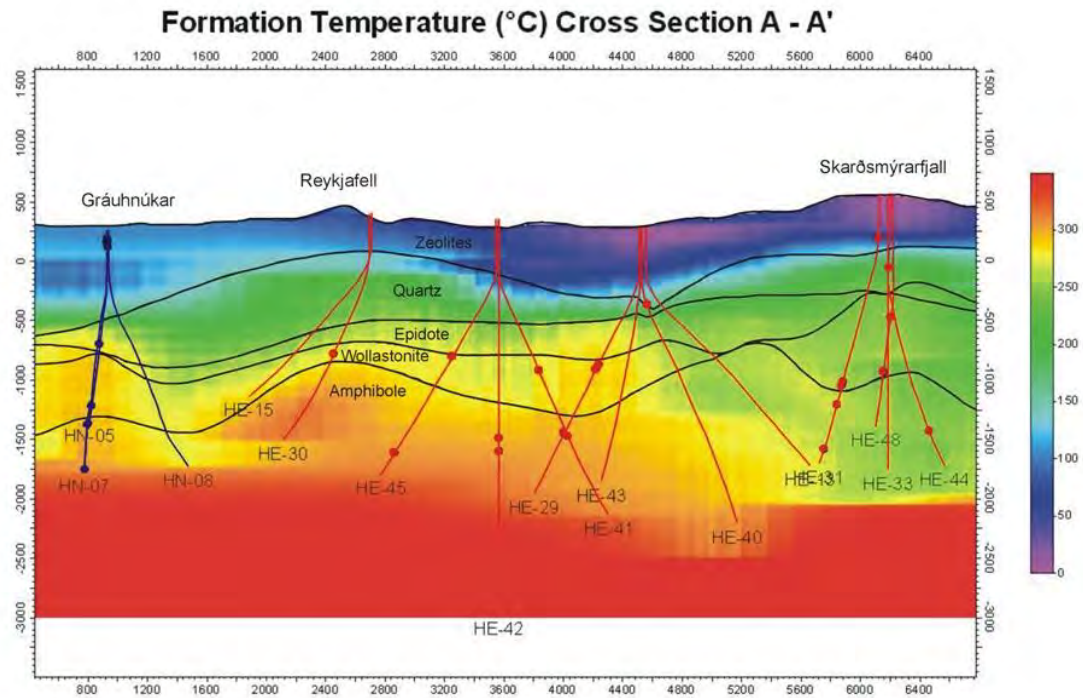


Figure 7: Cross section along line A-A' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals. Main aquifers are also shown.

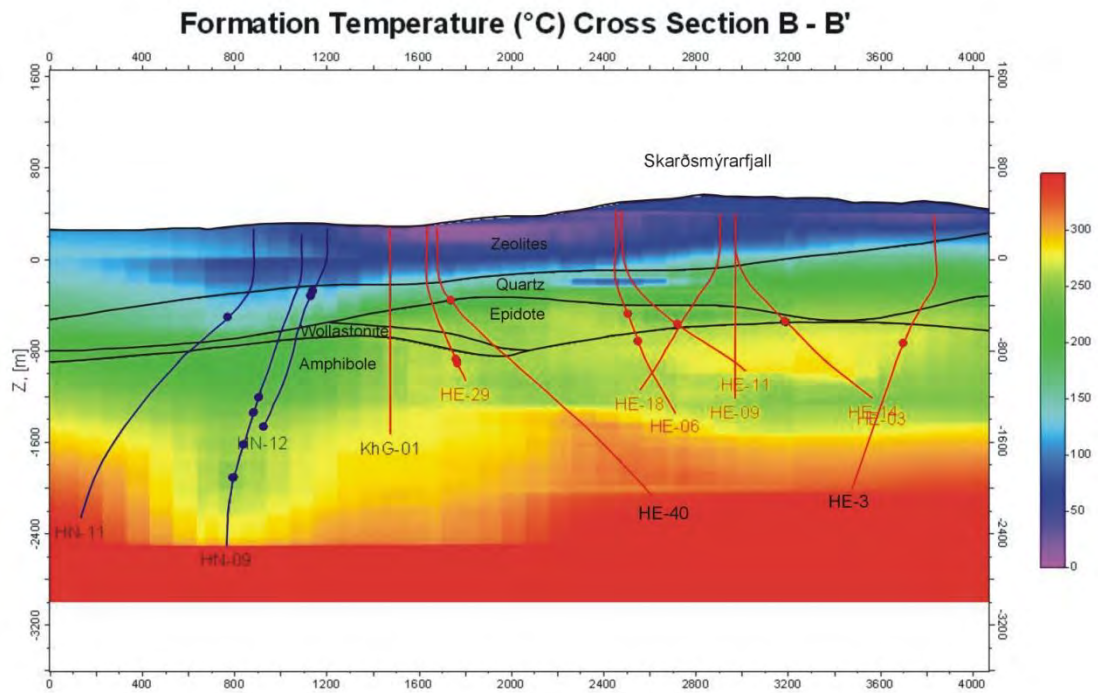


Figure 8: Cross section along line B-B' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals. Main aquifers are also shown.

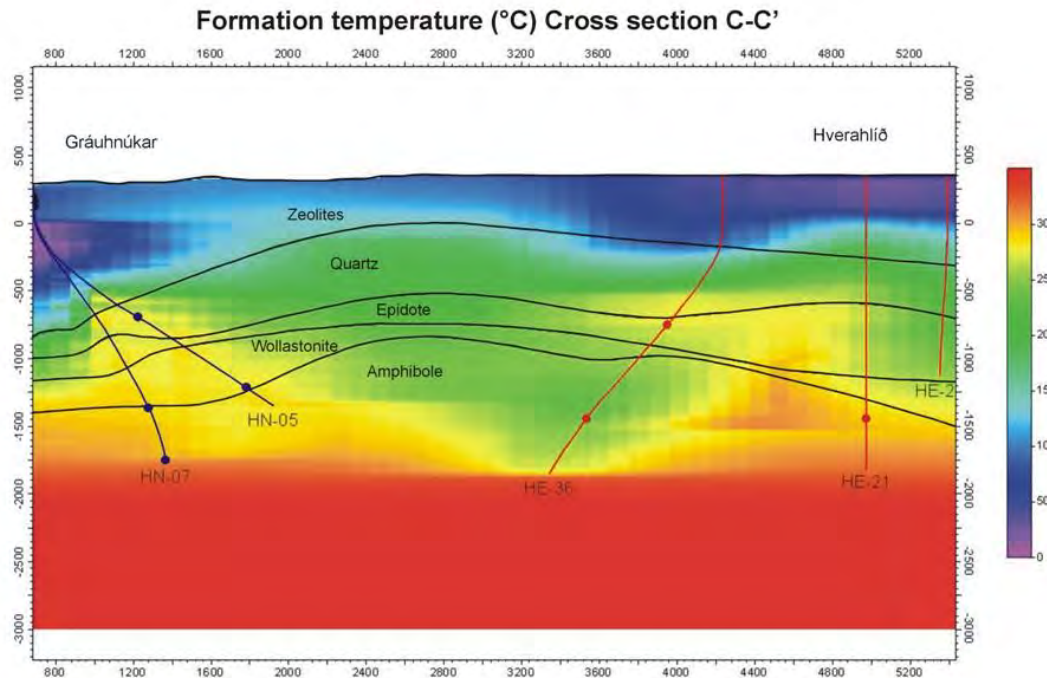


Figure 9: Cross section along line C-C' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals. Main aquifers are shown.

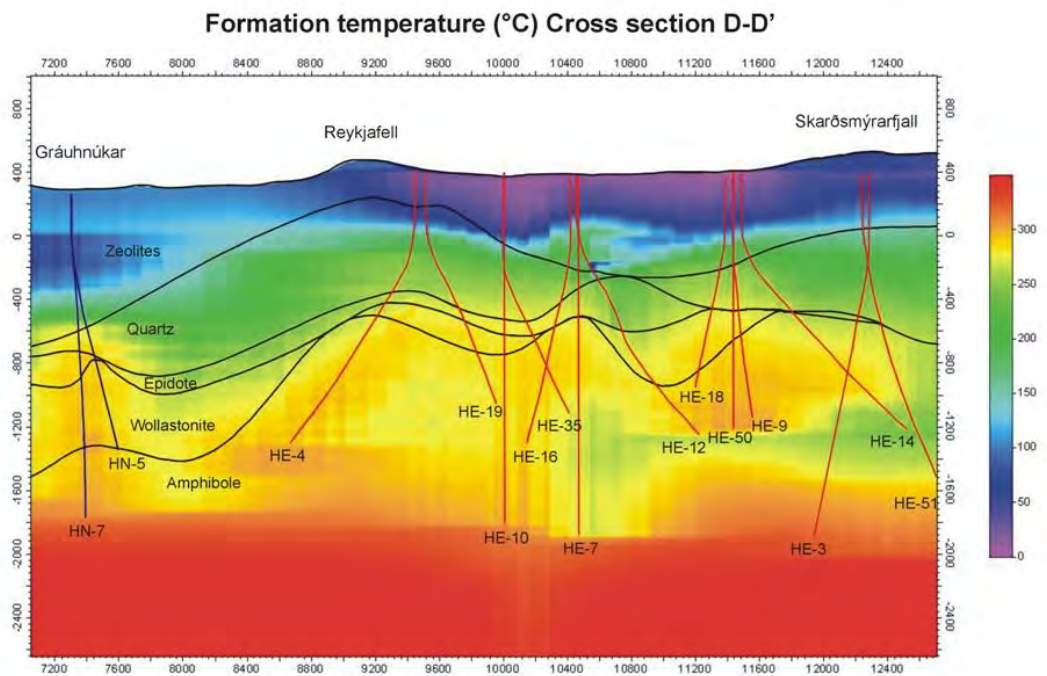


Figure 10: Cross section along line D-D' showing formation temperatures along with the upper limit of common temperature dependent alteration minerals.

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.

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 (Nielsen 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.

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.

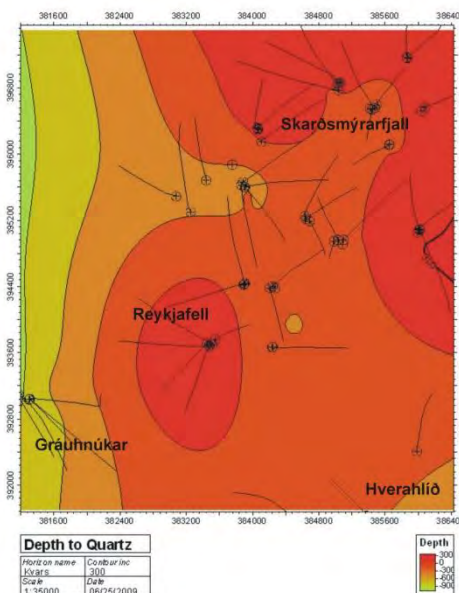


Figure 11: Depth to quartz.

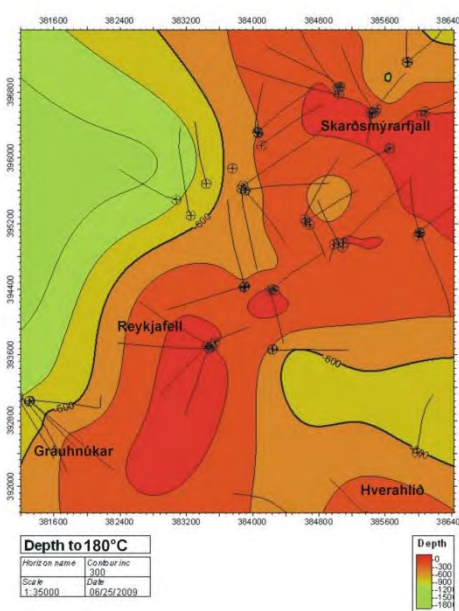


Figure 12: Depth to 180°C.

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:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. There seem to be at least 3 upflow zones in the area concerned; beneath Gráuhnúkar, Reykjafell and Hverahlíð.

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.

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 PNOC 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)

