



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

ELDVÖRP, HOLA EG-2

Jarðfræðirannsóknir

Hjalti Franzson

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

OS-96030/JHD-05

Júní 1996



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 222

ELDVÖRP, HOLA EG-2

Jarðfræðirannsóknir

Hjalti Franzson

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

OS-96030/JHD-05

Júní 1996

ISBN 9979-827-73-4

ÁGRIP

Hola EG-2 er fyrsta rannsóknarholan sem boruð hefur verið í háhitavæði Eldvarpa og jafnframt sú eina til þessa. Hún var boruð á tímabilinu 9. febrúar til 7. apríl 1983 og varð 1265 m djúp. Þessi skýrsla fjallar í meginþráttum um þann jarðfræðilega þátt rannsókna á jarðhitakerfi Eldvarpasvæðisins, sem gögn úr holu EG-2 veita. Berglögum holunnar er skipt í two hópa; upphleðslumyndanir og innskotsmyndanir. Þær fyrnlefndu eru hraunlagamyndanir að-skildar af þykkum móbergsmýndunum. Móbergsmýndanir gefa vísbendingu um ísaldir liðinna tíma og má ætla út frá tímaskala ísaldamenja að jarðlög í botni holunnar sé um 0,7 milljón ára, en yngjast jafnt og þétt upp til yfirborðs. Um fjórðungur berglaga í holunni er innskotsberg. Talið er næsta öruggt að holan þræði eftir tveimur lóðréttum berggöngum sem líklega eru báðir yngri en frá lokum síðasta ísaldarskeiðs (< 12.000 ára). Sá eldri er talinn gosrás dyngju en sá yngri er líklega gosrás Eldvarpahraunsins (frá 13. öld). Ummýndun sem fingraför hita og vatnsgæfni benda til að þessi tvö lóðréttu inniskot séu ráðandi uppstreymisrásir jarðhitavatnsins, enda er meirihlut vatnsæða tengdur þeim og sérstaklega þá jöðrunum. Athugun á ummýndun bendir til að núverandi hiti sé ívið lægri neðan um 900 m dýpis en ummýndunarhiti segir til um. Athugun á vökvainnlyksum í kvarsútfellingum gefur til kynna að hiti neðan 600 m dýpis hafi verið 20-40°C hærri á eldra jarðhitaskeiði. Braðslumark vökva í innlyksum í kvarsi bendir til að selta jarðhitavökva hafi verið mjög breytileg á líftíma jarðhitakerfisins, en það eru svipaðar niðurstöður og fengist hafa úr samskonar athugun í Svartsengi.

EFNISYFIRLIT

Bls.

ÁGRIP	3
1. INNGANGUR	7
2. YFIRBORÐSRANNSÓKNIR, ÁGRIP	7
3. ÁGRIP BORSÖGU	9
4. JARÐLAGAÑSKIPAN	12
4.1 Greiningarlykill	12
4.2 Upphleðslumyndanir	13
4.3 Innskotamyndanir	22
4.4 Samanburður við jarðlagastafla Svartsengis	24
5. UMMYNDUN	25
5.1 Greiningaraðferðir	25
5.2 Ummydun frumhluta bergs	25
5.3 Dreifing ummyndunarsteinda	29
5.4 Ummyndunarbelti	35
5.5 Sprungufyllingar	36
5.6 Röðun ummyndunarsteinda	38
5.7 Vökvainnlyksur	41
6. VATNSÆÐAR	44
7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR	46
8. HEIMILDIR	48
VIÐAUÐI I: Upplýsingar um vatnsæðar	51
VIÐAUÐI II: Grein um Eldvörp, flutt á jarðhitaráðstefnu á Nýja-Sjálandi 1987	57
TÖFLUR	
1. Greiningaraðferðir ummyndunarsteinda	26
2. Skipting vatnsæða í stærðarflokka, og jarðfræðileg skipting	45
3. Samanburður á stærð vatnsæða og jarðfræðilegri legu	46

MYNDIR

	Bls.
1. Kort af yfirborðsjarðfræði og líklegu hitaástandi á 600 m dýpi undir yfirborði	8
2. Helstu atriði borverks	10
3. Frágangur holu	11
4. Jarðlagaskipan	15
5. Bergfræðileg skipting og hitaummyndun innskota	22
6. Einfölduð mynd af hitaummyndun grannbergs við innskotsjaðar	23
7. Samanburður á upphleðslumyndunum í Eldvörpum og Svartsengi	24
8. Ummyndun frumhluta bergs	27
9. Dreifing ummyndunarsteinda	30
10. Sundurgreining karbónata, anhýdríts og sprungufyllinga. Magndreifing pýríts og epidóts og fylling holrýma	31
11. Einfaldað riss af "tágkenndu" karbónati	32
12. Beltaskipting ummyndunar	35
13. Tíðni sprungufyllinga á móti fjölda steinda í hverri sprungu	36
14. Einfaldaður þverskurður útfellinga í holrýmum berglaga	37
15. Tíðni útfellingategunda í holrýmum	38
16. Líkleg tímaröðun útfellinga	40
17. Mælingar á hita (Th) í vökvainnlyksum	42
18. Mælingar á bræðsluhita (Tm) í vökvainnlyksum	43
19. Skematískt jarðfræðilíkan af jarðhitakerfinu í Eldvörpum	47

1. INNGANGUR

Skýrsla þessi fjallar í meginatriðum um þær jarðfræðirannsóknir sem tengjast borun fyrstu rannsóknarholunnar, holu EG-2, í jarðhitakerfi Eldvarpa og er hú samin með það að markmiði að leggja jarðfræðilegt mat á gerð jarðhitageymisins, sem kenndur er við Eldvörp.

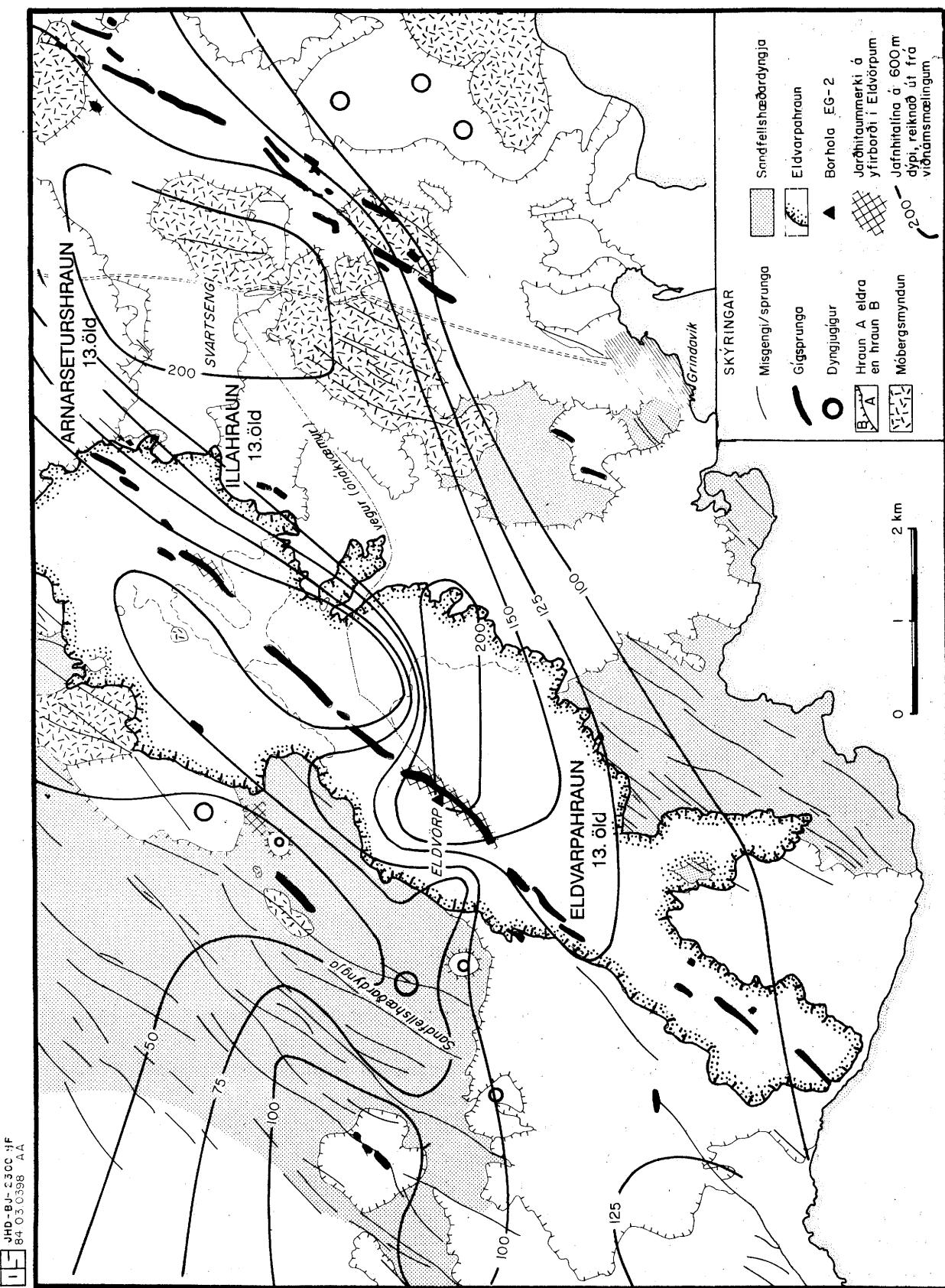
Efni skýrslunnar er skipt niður í eftirfarandi hluta: Í öðrum kafla er gerð grein fyrir helstu niðurstöðum yfirborðsrannsókna (jarðfræði, viðnámsmælingar) og í þriðja kafla er örstutt ágrip borsögu. Fjórði kafli fjallar um berglög holunnar, annars vegar upphleðslumyndanir (hraunlaga- og móbergsmyndanir) og hins vegar innskotsberg. Samanburður er gerður við jarðög í Svartsengi. Í fimmtra kafla er ýtarlega fjallað um jarðhitaummyndun berglaga í holunni. Þær rannsóknir gefa margvíslegar upplýsingar. Auk þess að veita upplýsingar um núverandi hitaástand, þá er unnt, á grundvelli röðunar steinda (útfellinga) í blöðrum og sprungum berglaga að rekja helstu atriði þróunar jarðhitakerfisins í næsta nágrenni holunnar. Í sjötta kafla er vatnsæðum lýst. Reynt er að meta hverja vatnsæð fyrir sig á grundvelli mismunandi gagna, svo sem með hita- og skoltapsmælingum, ummyndunar- og jarðlagagreiningum, en einnig er höfð hliðsjón af jarðeðlisfræðilegum mælingum á holuveggjum.

Í sjóunda kafla eru niðurstöður dregnar saman og tilraun gerð til að búa til jarðfræðilegt líkan af jarðhitasvæðinu í Eldvörpum. Taka skal fram að slíku jarðhitalíkani er þróngur stakkur skorinn þar eð gógnin takmarkast að miklu leyti við eina borholu, og niðurstöðurnar verða því að túlkast sem fyrsta nálgun.

Margir aðilar, auk höfundar, hafa sinnt söfnun þeirra gagna sem sjá dagsins ljós í þessari skýrslu. Má þar til nefna höfunda áfangaskýrslunnar frá 1983, þ.e. þau Benedikt Steingrímsson, Svanbjörgu H. Haraldsdóttur, Þorstein Thorsteinsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmund Ó. Friðleifsson, Héðin Ágústsson og Sverri Þórhallsson, en einnig hafa Hildigunnur Þorsteinsdóttir, Benný Baldursdóttir, Gyðríður Jónsdóttir og Auður Ágústdóttir unnið að einstökum þáttum í þessari rannsókn. Höfundur þakkar þeim öllum framlag þeirra og áhuga á þessu verki.

2. YFIRBORÐSRANNSÓKNIR, ÁGRIP

Gossaga Reykjanesskaga á nútíma hefur verið gerð nokkuð ítarleg skil (t.d. Jón Jónsson, 1973, 1978; Haukur Jóhannesson 1989; Sigmundur Einarsson og Haukur Jóhannesson 1989; Magnús Sigurgeirsson 1995a, 1995b; Kristján Sæmundsson 1995). Á Eldvarpasvæðinu koma aðallega fyrir hraungos frá tveimur tímaskeiðum. Það fyrra er gos úr svonefndri Sandfellshæðardyngju sem nú er talin hafa hlaðist upp nærri lokum síðasta jökluskeiðs, eða fyrir um 12.500 árum. Miðja þeirrar dyngju er um 2 km vestan Eldvarpaholunnar. Hraunið í Eldvörpum, eins og það er merkt á kortinu á mynd 1, er runnið að mestu úr um 10 km langri og sundurslitinni gossprungu með NA-SV stefnu. Fyrri rannsóknir bentu til að hraunið hafi runnið fyrir 2150 +/- 65 árum síðan (Jón Jónsson 1983), en síðari rannsóknir (Haukur Jóhannesson 1989; Sigmundur Einarsson og Haukur Jóhannesson 1989; Magnús Sigurgeirsson 1995a, 1995b) gefa ótvíraett til kynna að það sé eitt sex hrauna, runnið í svonefndum Reykjaneseldum sem tímasett hafa verið á tímabilinu 1211-1240 e.K. Önnur hraun frá þessum eldum eru t.d. Illahraun og Arnarseturshraun.



Mynd 1. Kort af yfirborðsjarðfræði og líklegu hitaástandi á 600 m dýpi undir yfirborði.

Gosrásir, svo og sprungur og misgengi eru lóðréttir fletir í berggrunni, sem auka lekt hans, og geta því haft afgerandi áhrif á vatnskerfi í berggrunninum, eins og sýnt hefur verið fram á í streymi kalds grunnvatns á Reykjanesskaga (Jón Ingimarsson og Jónas Elíasson 1980). Gera má ráð fyrir að áhrifin séu mest fyrst, en smáminnki síðan vegna útfellinga sem smáþrengja að vatnsleiðurum og jafnvel loka þeim. Af þeim ástæðum er mikilvægt í jarðfræðikortlagningu á yfirborði í jarðhitaleit að rekja atburðarásina af sem mestri nákvæmni.

Jarðhitaummerki á yfirborði finnast á tveimur stöðum á Eldvarpasvæðinu, í báðum tilvikum tengdir lóðréttir gosrás Eldvarpa (mynd 1). Innan þess syðra, sem er öllu meira áberandi, er virkur jarðhiti, og var holan staðsett þar. Eins og sést á mynd 1 eru jarðhitaútfellingar (ópal skv. 6 röntgengreiningum) algengar á um það bil 1 km löngum kafla á gossprungunni. Um 3 km norðar hafa fundist áberandi jarðhitaútfellingar við einn Eldvarpagíganna, en virkur jarðhiti er þar ekki sjáanlegur. Á mynd 1 er einnig sýnd túlkun yfirgrípsmikilla viðnámsmælinga (Lúðvík S. Georgsson og Helga Tulinius 1983), þar sem reynt hefur verið, á grundvelli þeirra mælinga, að meta hitaástand á um 600 m dýpi í berggrunninum. Niðurstöðurnar benda til, að fylgni sé á milli háhitakerfanna annars vegar og skjálftarennunnar á Reykjanesskaga og NA-SV-stefnu brotabelta. Augljóst virðist að sprungur og gangar Eldvarpagossins hafi veruleg áhrif á hitaástandið a.m.k. í efri hluta skorunnar þar sem áberandi kuldatunga einkennir norðurhluta Eldvarpa en áberandi hitapunktur þar sem jarðhiti er á yfirborði. Einnig virðist einhver hitatunga leita suður með gosrásinni austan megin. Nánar verður fjallað um þennan þátt í kafla 7.

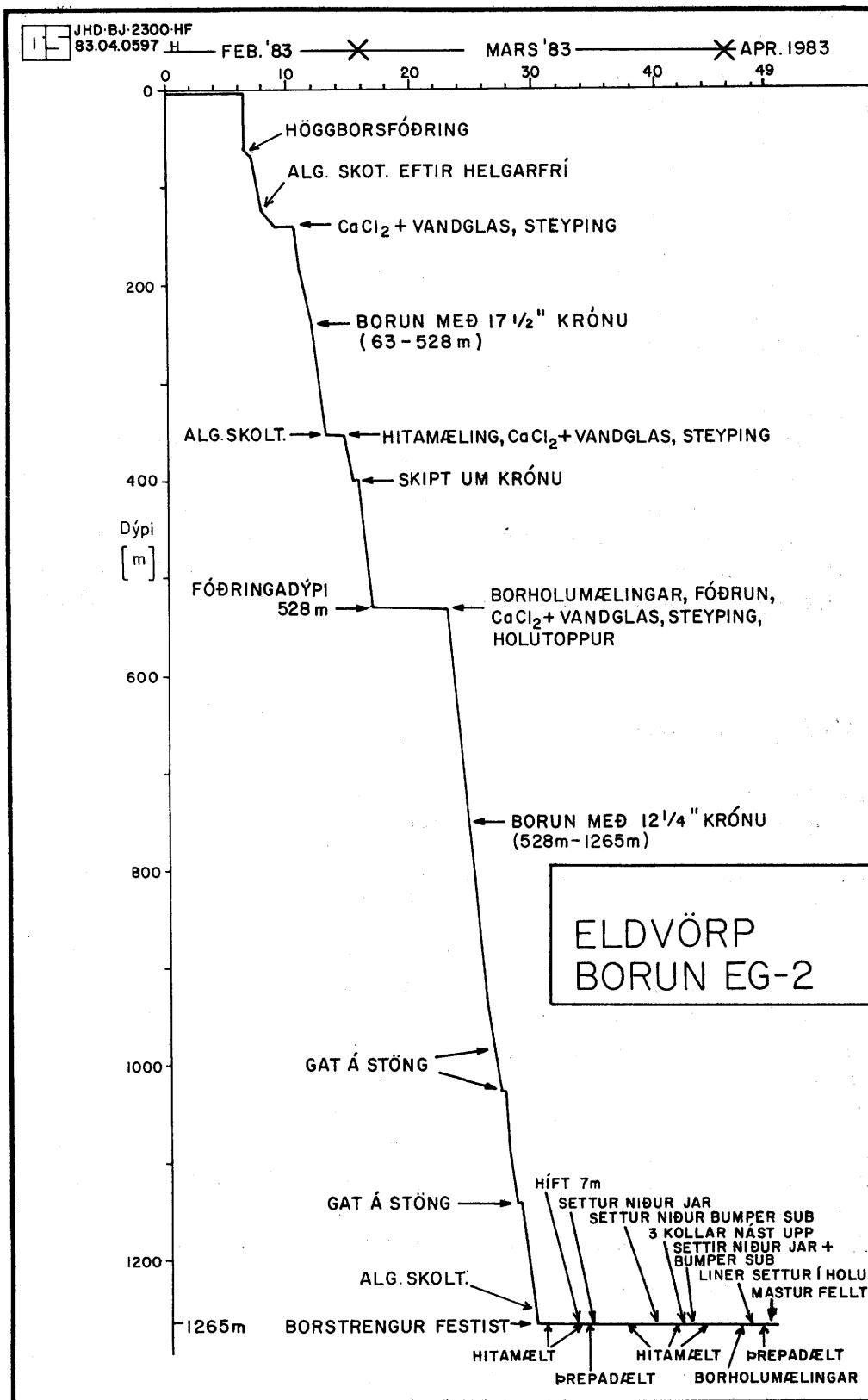
3. ÁGRIP BORSÖGU

Í áfangaskýrslunni "Borun holu EG-2, Eldvörpum" (Benedikt Steingrímsson o.fl. 1983) er borverki ýtarlega lýst. Í þessari skýrslu verður aðeins gefið örstutt yfirlit yfir borsöguna.

Borverkið hófst 9. febrúar 1983, með flutningi bors og uppsetningu, og byrjaði borun á áttunda verkdegi. Borverki lauk 7. apríl og varð holan 1265 m djúp.

Mynd 2 sýnir helstu áfanga verksins og þau meginatriði sem áhrif höfðu á gang þess. Allar dýptartölur eru miðaðar við drifborð Gufubors sem er um 2,5 m ofan við kjallarabrun og 4,9 m ofan við aðalflans (kraga). Borun holunnar gekk fremur áfallalaust fyrir sig niður undir 1265 m dýpi. Í 1251 m varð algjört skoltap sem leiddi til mikils botnfallaust við áframhaldandi borun. Er borað hafði verið í 1265 m dýpi og vatnsborð (í fullri dælingu) í holunni komið til yfirborðs, kom skoltap á ný í holuna og leiddi það til festu borstrengs. Losunaraðgerðir, svo sem með ásláttartólunum "jar" og "bumper sub", reyndust hallditlar. Einnig reyndist erfitt að eiga við holuna vegna innstreymis úr vatnsæðum á milli 535-575 m dýpis, sem orsakaði sterkt niðurstreymi í holunni og tóku vatn í æðnum strax að sjóða við minnkun ádælingar. Kom síðarnefnda atriðið í veg fyrir að unnt yrði að bora út úr holunni rétt ofan við festustaðinn.

Á mynd 3 er sýndur frágangur holu og halli hennar.



Mynd 2. Hola EG-2. Helstu atriði borverks.

JHD-BJ-2300 HF
84.01.0137 AA

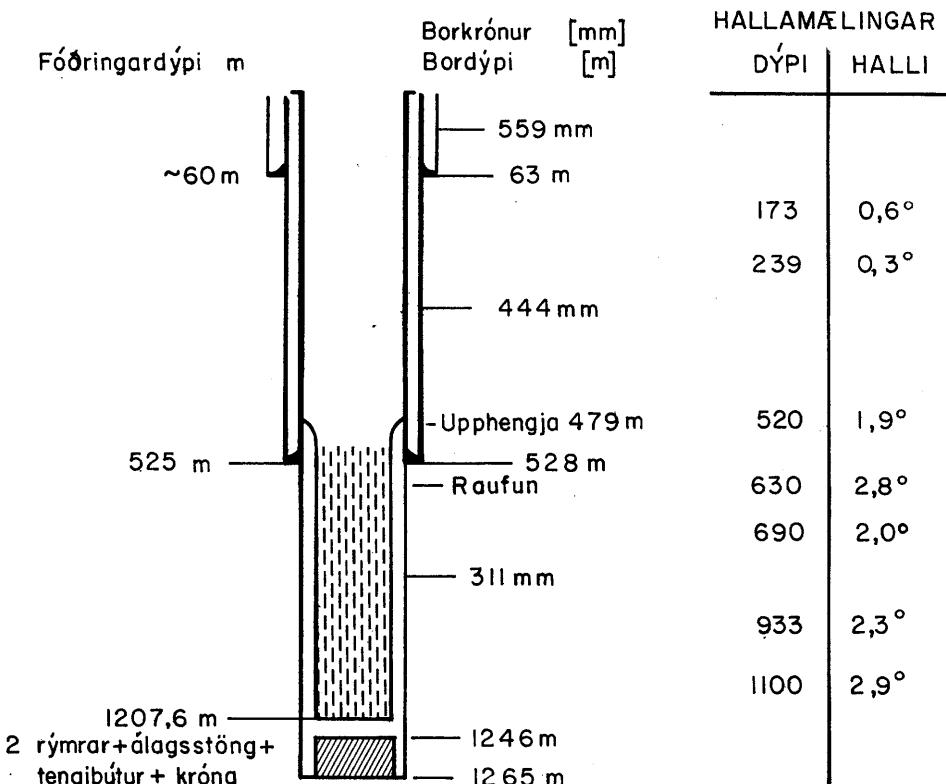
ELDVÖRP HOLA EG-2
Frágangur holu og halli

FJARLÆGGDIR: Drifborð - kjallarabrun 2,5 m, kjallarabrun-kragi 2,4 m

HÖGGBORSFÓÐRING: API 18 $\frac{5}{8}$ " (473 mm), J-55 84,5 lbs/ft

ÖRYGGIS-/VINNSLUFÓÐRING: API 13 $\frac{3}{8}$ " (324 mm), J-55, 68 lbs/ft.

LEIÐARI: API 9 $\frac{5}{8}$ " (244 mm), J-55, 47 lbs/ft



Mynd 3. Frágangur holu EG-2.

4. JARÐLAGASKIPAN

4.1 Greiningarlykill

Jarðlagagreining er byggð á svarfsýnum sem tekin voru á 2 m fresti niður holuna. Auk greiningar í svarfsmásjá (binocular stereomicroscope) voru gerðar 105 þunnsneiðar (greiningar í bergfræðismásjá) meðal annars til frekari ákvörðunar á bergerð. Við nákvæma staðsetningu jarðlaga í holunni var höfð hliðsjón af borhraða, skolhraða og jarðeðlisfræðilegum mælingum, en þær síðastnefndu geta stundum veitt ákveðnar upplýsingar um bergerð.

Í eftirfarandi lýsingu er reynt að greina á milli tveggja berghópa; annars vegar upphleðslumyndana (bergkvika sem storknað hefur á yfirborði) og hins vegar innskotsmyndana (bergkvika storknuð undir yfirborði). Þeim fyrnrefnda er síðan enn frekar skipt í hraunlög (runnin á hlýskeiðum) og móberg (yfirleitt mynduð við gos undir jöklum ísalda).

Einkenni **hraunlags** er einkum kargi í efri hluta en þéttari og betur kristallaður mið- og neðri hluti. Þessi einkenni endurspeglast einnig oft í breytingum í borhraða, og borholumælingum (vídd, viðnám, nefrónudreifing). Lagskil milli hraunlaga eru talin liggja lárétt í jarðlagastaflanum.

Móberg einkennist mest af tiltölulega miklu magni glers í bergeninu. Móbergi er skipt í þrjá undirflokk; **móbergstúff**, þar sem yfirgnæfandi hluti bergsins er ókristallað gler, **basaltbreksíu**, sem hefur að geyma nokkuð magn hlutkristallaðs glers og fínkristallaðs basalts, en í **glerjuðu basalti** er meirihluti bergsins hlutkristallað basalt. Þessi skipting er einnig einkennandi í rofnum móbergsmýndunum, þar sem glerjaða basaltið er að líkendum það sem kallað er bólstraberg eða bólstrabreksía. Lagskipting innan móbergsmýndunar getur verið mjög óreglugleg vegna breytilegra aðstæðna samfara upphleðslu þess. Efri-mörk móbergsmýndana eru yfirleitt mjög óreglugleg, sem augljóst ætti að vera ef menn horfa til nærliggjandi fjalla á Svartsengis-Eldvarpasvæðinu. Neðri mörkin eru hins vegar talin lárétt þar sem þau liggja ofan á hraunlagastafla. Þau hafa reynst notadrjúg til að tengja jarðlöög á milli borholna.

Inniskot eru nokkuð frábrugðin hraunlögum. Glögg efri skil eru jafnan gott einkenni þeirra svo og lágor poruhluti bergsins, sem oft veldur því, að þau hafa ummyndast minna en grannbergið (sem og, að inniskot eru yngri). Borhraði er yfirleitt fremur jafn og oft lágor. Viðnám og nefrónudreifing eru, vegna ofangreindra einkenna, fremur há. Samkvæmt jarðfræðikortlagningu í rofnum móbergsmýndunum á yfirborði eru þéttir basalteitlar tíðir (basalteitlar eru óregluglega löguð inniskot samtíma móbergsmýnduninni). Erfitt er stundum að skera úr því í svarfgreiningu, hvort um slíka samtíma basalteitla er að ræða eða yngri inniskot, óskyld móberginu. Eru því þétt basaltilög innan móbergsmýndana túlkud sem hluti þeirra, nema önnur gögn bendir til hins gagnstæða. Auk ofangreindrar flokkunar er í mörgum tilfella unnt að sundurgreina basalt á grundvelli kristöllunar í tvær tegundir; annars vegar **ólivín-þóleiít** og hins vegar **þóleiít**.

Það sem helst einkennir ólivín-þóleiít er fremur gróf kristöllun, "sub-ófetískur textúr" og síð-kristöllun (interstitial crystallization) magnetíts og áberandi mikið af ólivíni. Þóleiítið hefur fremur jafnkorna (equigranular) textúr og magnetít sýnir fremur teningsлага útlínur sem bendir til að það hafi kristallast fremur snemma.

Í hnottskurn miðar nákvæm jarðlagagreining að því að leiða getum að hvaða jarðfræðilegar aðstæður stjórni streymi jarðhitavökvars.

4.2 Upphleðslumyndanir

Jarðlagaskipan EG-2 er sýnd á mynd 4. Á þeirri mynd eru upphleðslumyndanirnar greindar frá innskotsberginu. Jarðlögum er skipt niður í 8 myndanir:

Hraunlagamyndun 1	(5 - 98 m)
Móbergsmyndun 1	(98 - ca. 160 m)
Hraunlagamyndun 2	(ca. 160 - 477 m)
Móbergsmyndun 2	(477 - ca. 605 m)
Hraunlagamyndun 3	(ca. 605 - 870 m)
Móbergsmyndun 3	(870 - 925 m)
Hraunlagamyndun 4	(925 - 1201 m)
Móbergsmyndun 4	(1201 - ca. 1240 m)

Hraunlagamyndun 1 (5-98 m)

Pessi hraunlagamyndun er tvískipt:

- Í efri hlutanum fjögur ferskleg þóleiít hraun og ná þau niður á 30 m dýpi, öll mjög einsleit og eru talin hluti af Eldvarpahrauninu.
- Í neðri hluta eru ferskleg ólivínþóleiít hraunlög frá 30 m dýpi niður á 98 m. Öll eru hraunlögini mjög blöðrott. Hraunlögini í efri hlutanum eru tiltölulega vel afmörkuð, en í neðri hlutanum verða skilin á milli þeirra ógleggri, og er sennilegt, að á því dýptarbili sé um að ræða þunnar flæðieiningar, sem algengt er að sjá í rofnum dyngjum. Að minnsta kosti efri hluti þessara ólivín-þóleiít hraunlaga telst til Sandfellshæðardyngju.

Móbergsmyndun 1 (98 - ca. 160 m)

Efstu sjö metrar þessa móbergs virðist vera af þóleiít samsetningu en ólivín-þóleiít samsetning er einhlýt þaðan og niður á 123 m. Vegna skoltaps vantar svarf á dýptarbilinu 123-140 m, en gera má ráð fyrir að þar sé sams konar berg. Neðan þess er borað í gegnum um 5 m þykkt fint móbergssset með háum borhraða en síðan kemur á ný í basaltbreksíu. Neðri mörk móbergsins eru fremur óglögg vegna innskots sem borað er í á um 160 m, en grunur leikur á að basaltið rétt við efri mörk innskotsins geti verið efri mörk hraunlagamyndunar 2.

Hraunlagamyndun 2 (ca. 160-475 m)

Eins og síðar mun um fjallað er talið næsta öruggt, að holan skeri einn eða fleiri nær lóðréttu bergganga. Innan þessa dýptarbils sker hún berggang á samtals um 300 m bili, og sést því ekki hvers lags upphleðsluberg er ríkjandi þar. Á þeim 5 stöðum sem borast út úr innskotinu á dýptarbilinu frá 160 m niður á 400 m er grannbergið undantekningalaust hraunlög, og er það forsendan fyrir því, að á þessu dýptarbili séu hraunlög talin ráðandi.

Neðan 400 m greinast 4 þóleiit hraunlög og um 18 m þykkt fínkorna móbergssset. Við neðri mörk setsins er um 2 m þykkt móbergstúff án seteinkenna að því er best verður séð. Á þessu um 300 m löngu dýptarbili er hlutur upphleðslubergs aðeins um 100 m, hinn hlutinn telst vera innskot.

Móbergsmyndun 2 (476- ca. 604 m)

Þessi tæplega 130 m þykka móbergsmyndun er af ólivínþóleiít samsetningu. Kristöllun í móberginu er breytileg allt frá glerríku túffi yfir í glerjað basalt. Móbergið er víða lagskipt. Neðarlega í móberginu kemur í innskot, sem er yngra en myndunin. Neðri mörk myndunarinnar eru fremur óljós vegna áðurnefnds innskots.

Hraunlagamyndun 3 (ca. 605-870 m)

Frá um 630 m niður á um 760 m dýpi voru greind 10 fínkorna þóleiít hraunlög og er meðalþykkt þeirra tæpir 11 m. Frá 762-776 m eru tvö áberandi smádíflótt (plagíóklas) hraunlög, en neðan þeirra tekur við um 16 m þykkt móbergslag. Móbergslagið er þrískipt, í efri og neðri hluta er basaltrík breksía aðskilin af um 5 m þykku móbergstúffi með ótvíræðum seteinkennum. Athyglisvert er að efri hluti setlagsins hefur áberandi háa svörun í náttúrulegri gamma geislun. Í neðri hluta hraunlagamyndunar 3, þ.e. neðan 796 m, eru 6 hraunlög og er meðalþykkt þeirra rúmlega 6 m. Þótt basaltgerð hraunlaganna í þessum hluta sé fremur óræð, þá telst hún á heildina litið basískari en þóleiít hraunin í efri hlutanum. Aðeins eitt hraunlag (840-860 m dýpi) er örugglega ólivínþóleiít. Tvö millilög koma fyrir í þessum hluta; um 2 m þykkt túffset og litlu neðar 10 m þykkt lagskipt móbergsbreksía.

Vert er að benda á að dílóttu hraunlöggin tvö og setlagið um miðbik hraunlagamyndunar 3 auk tilhneygingar til basískari hraunlaga í neðri hluta myndunarinnar gætu reynst heppileg leiðarlög til tengingar við jarðlög í væntanlegum holum sem boraðar yrðu í nágrenninu.

Móbergsmyndun 3 (870-925 m)

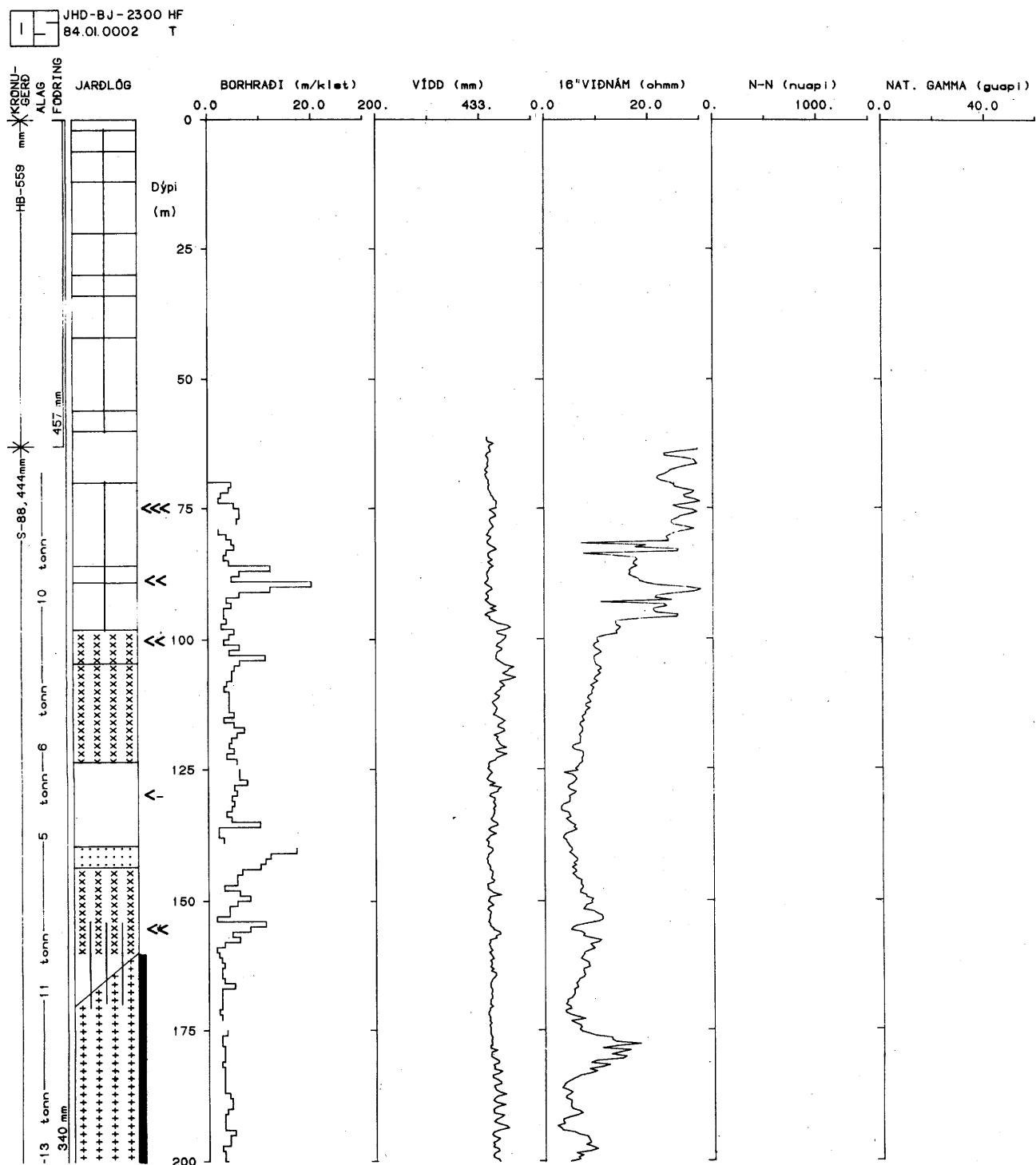
Niður á um 895 m er móbergsbreksía ráðandi. Grófkorna ólivínþóleiít basaltlagið á 895-907 m dýpi er smáblöðrótt og því líklegt að það sé basalteitill myndaður á sama tíma og móbergið. Neðan basaltlagsins er móbergið betur kristallað (basaltbreksía) og lagskipting meira áberandi. Í neðstu 10 m myndunarinnar ber nokkuð á stórum plagíóklas dílum. Þótt móbergið sé talið ein myndun þá gæti það verið samsett úr fleiri en einu gosi undir jökli, t.d. kemur fram ákveðin breyting á náttúrulegu gamma á um 880 m dýpi sem mögulega gæti bent til mismunandi efnasamsetningar bergsins (m.t.t. K og Th), svo og einnig á um 10 m bili neðan grófkorna basaltlagsins en þar er náttúruleg gammageislun mun meiri.

Hraunlagamyndun 4 (925-1201 m)

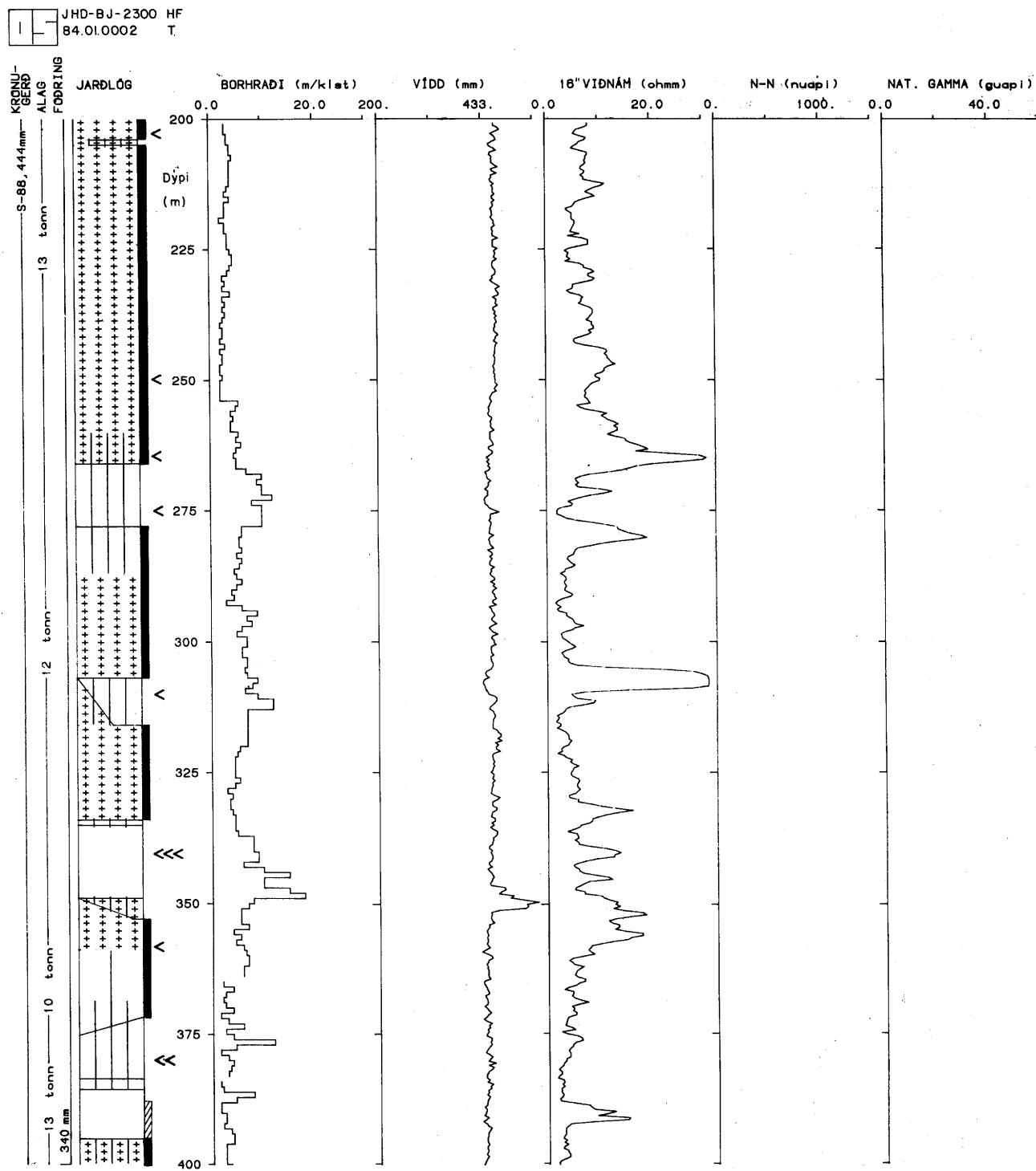
Innan þessa um 276 m langa dýptarbils koma fyrir að minnsta kosti 22 hraunlög. Þiu þeirra eru af þóleiít samsetningu, tvö ólivínþóleiít, en þau sem eftir eru höfðu ekki nein einhlít einkenni, og ber að líta á þau sem millistig milli þessara basalttegunda. Meðalþykkt allra þessara hraunlaga reyndist rúmlega 10 m. Fjögur túffkennd millilög koma fyrir; það efsta um 3 m þykkt (980 m dýpi), það næsta 8 m (1000 m), það þriðja um 1 m þykkt (1070 m) og það neðsta 5 m þykkt (1180 m dýpi).

Móbergsmyndun 4 (1201-1241 m)

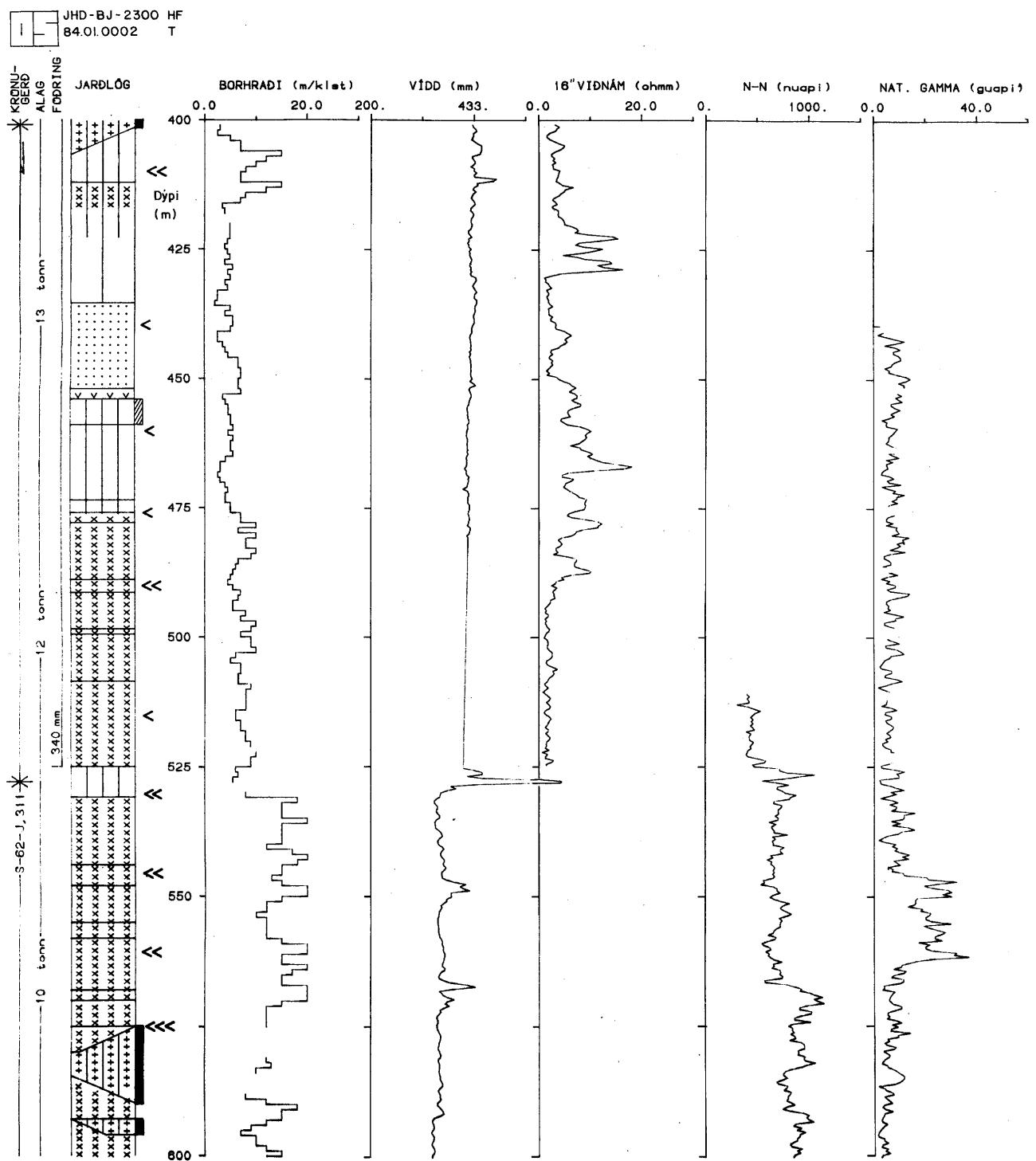
Aðeing tæpur helmingur þessa dýptarbils telst til myndunarinnar þar sem innskot fleygar það í two hluta. Móbergið er sérlega túffkennt í efri hlutanum en í neðri hlutanum hefur það náð að hlutkristallast og því nefnd þar basaltbreksía. Frá 1241 m til botns holunnar eru hvorki til svarfsýni né mælingar og því ógerlegt að geta sér til um jarðlög.



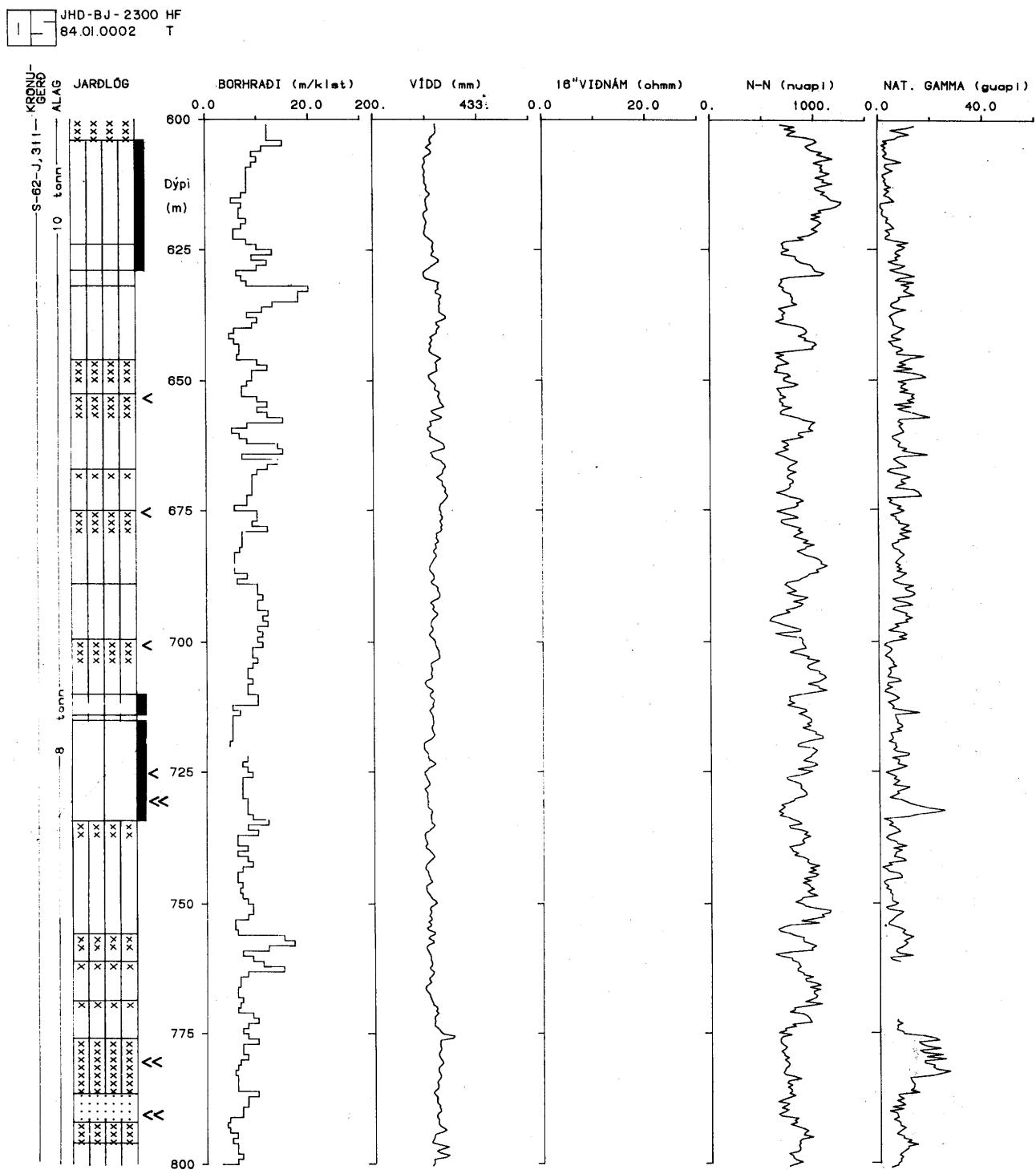
Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2.



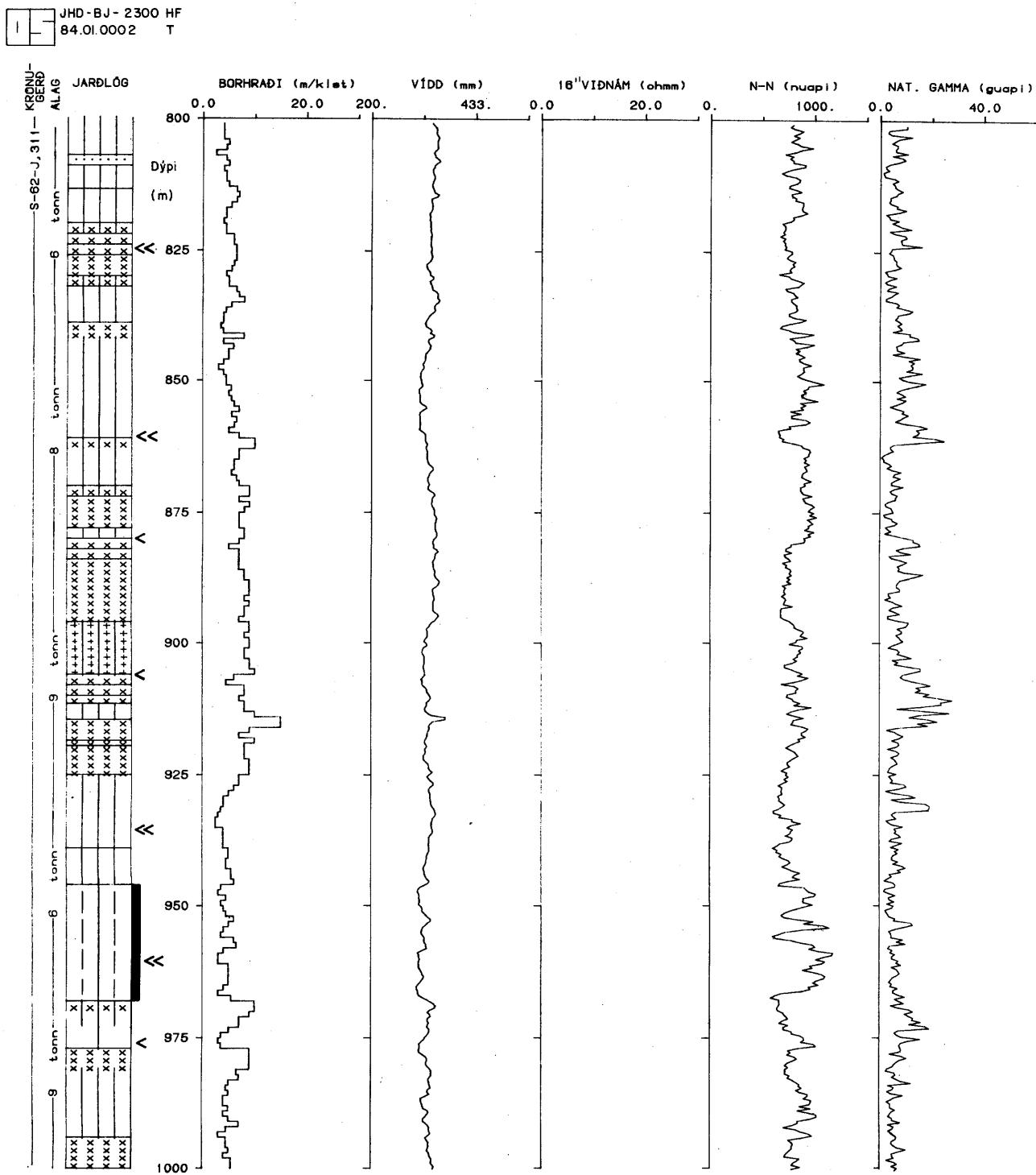
Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2 (frh.).



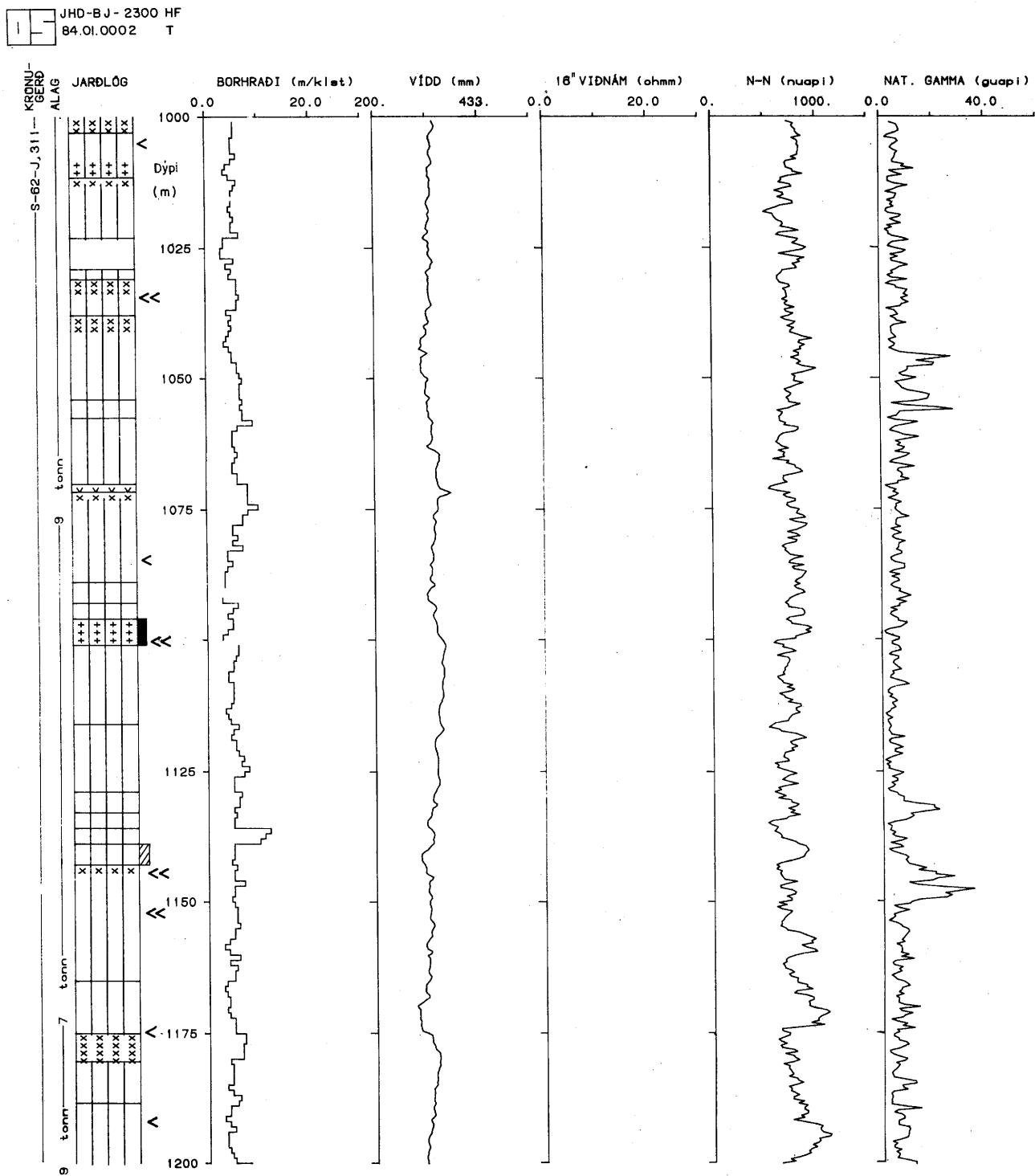
Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2 (frh.).



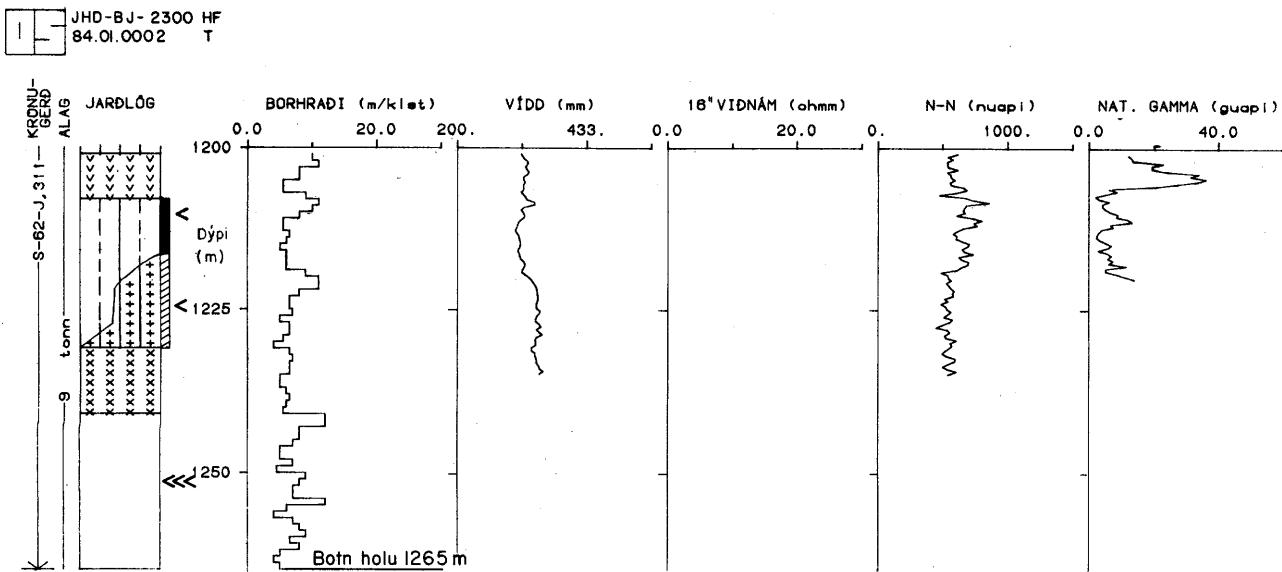
Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2 (frh.).



Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2 (frh.).



Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2 (frh.).



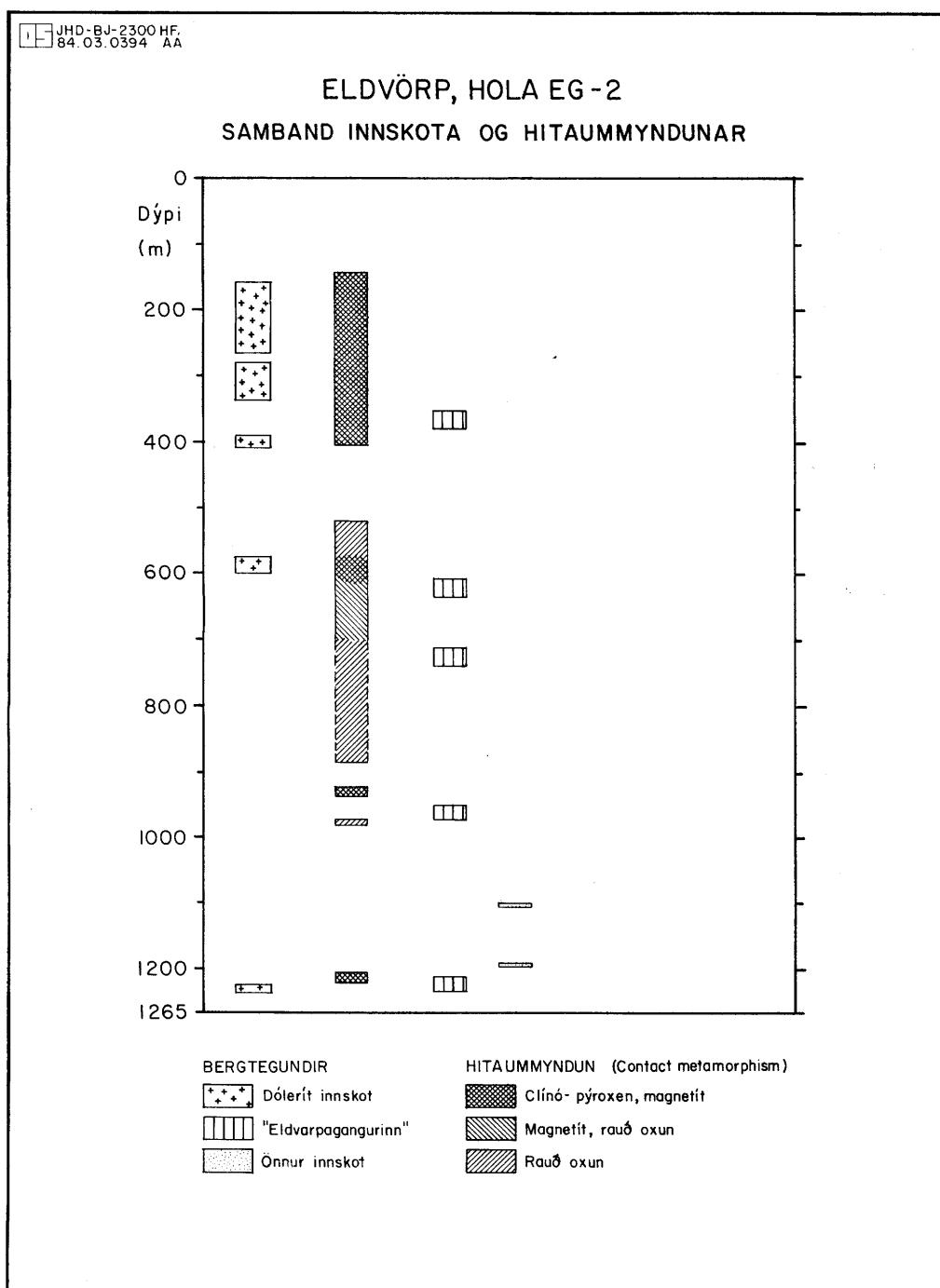
Skýringar við jarðlagasnið:

	Feraklegt fin-meðalkorna basalt		Basaltírik brekka		Óruggt innskot
	Ummynndað fin-meðalkorna basalt		Tüff		Líklegt innskot
	Ummynndað meðal-grófkorna basalt		Finkornótt set		<<< Stór æð
	Dólerít innskot		Svarf vantar		<< Smá til meðalstór æð
	Ummynndað glerjað basalt				< Óviss eða mjög smá æð

Mynd 4. Jarðlagaskipan í EG-2 (frh.).

4.3 Innskotamyndanir

Á jarðlagasniði (mynd 4) eru innskot merkt sérstaklega. Um fjórðungur berglaga sem holan sker teljast í þessum hópi, og eru þau langalgengust ofan 400 m dýpis. Á grundvelli bergfræði og ummyndunar er unnt að skipta þeim í þrjá hópa, og er sú skipting sýnd á mynd 5.

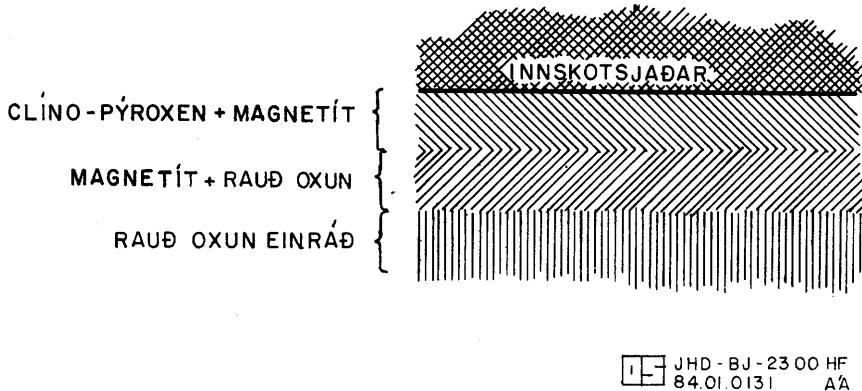


Mynd 5. Bergfræðileg skipting og hitaummyndun innskota í EG-2.

Dólerít

Megineinkenni eru þau að bergið er mjög grófkorna, allt frá dóleríti yfir í það að mega kallast gabbró. Efnasamsetning á grundvelli þunnsneiðagreininga bendir til að bergið sé einkennandi ólivínþóleit samsetning. Þriðja einkennið er mjög áberandi ummyndun bergsins sem er sérkennilegt þar sem slíkt berg er að jafnaði, vegna þéttleika, síst til þess fallið að ummyndast. Jafnframt því kemur fram mjög greinileg og óvenjulega sterk áhrif hita við jaðra þessa inn-skotsbergs eins og sýnt er skematískt á mynd 6. Þessi hitaummyndun (contact metamorphism) gefur til kynna streymi kviku eftir kvikurás í lengri tíma (mjög líklega þá kvikurás sem virk hefur verið í myndun dyngju). Þessi hitaummyndun er tekin sem merki um nærveru innskotsins og er því unnt að gera því skóna að borholan fylgi sama innskoti eða rétt utan við jaðar þess allt frá 140-430 m og svo frá um 520 m niður undir 1000 m dýpi (sbr. mynd 6). Vottur hitaummyndunar finnst einnig rétt neðan 1200 m og er það, ásamt tilveru dóleríts á því dýpi, talið merki um að borholan hafi skorið innskotið á ný.

Þetta innskot sker mjög líklega móbergslagið, sem liggar á 100-160 m dýpi, þar sem greinileg merki sömu hitaummyndunar sjást í því og er því yngra en það lag. Það er einnig örugglega talið vera lóðrétt gosrás fyrir dyngjuhraun ofan þessa móbergslags. Sú dyngja ætti þá líklegast að vera eldri en Sandfellshæðardyngjan. Móbergslagið fyrrnefnda er svæðisbundið (regionalt) þar sem það finnst bæði í Svartsengi og Eldvörpum (sbr. mynd 7) og er þetta lag talið vera myndað á síðasta jökluskeiði ísaldar. Gosrásin er því yngri en lok síðasta jökluskeiðs en líklegast eldri en Sandfellshæðardyngjan.



Mynd 6. Einfolduð mynd af hitaummyndun grannbergs við innskotsjaðar.

Póleitinnskot

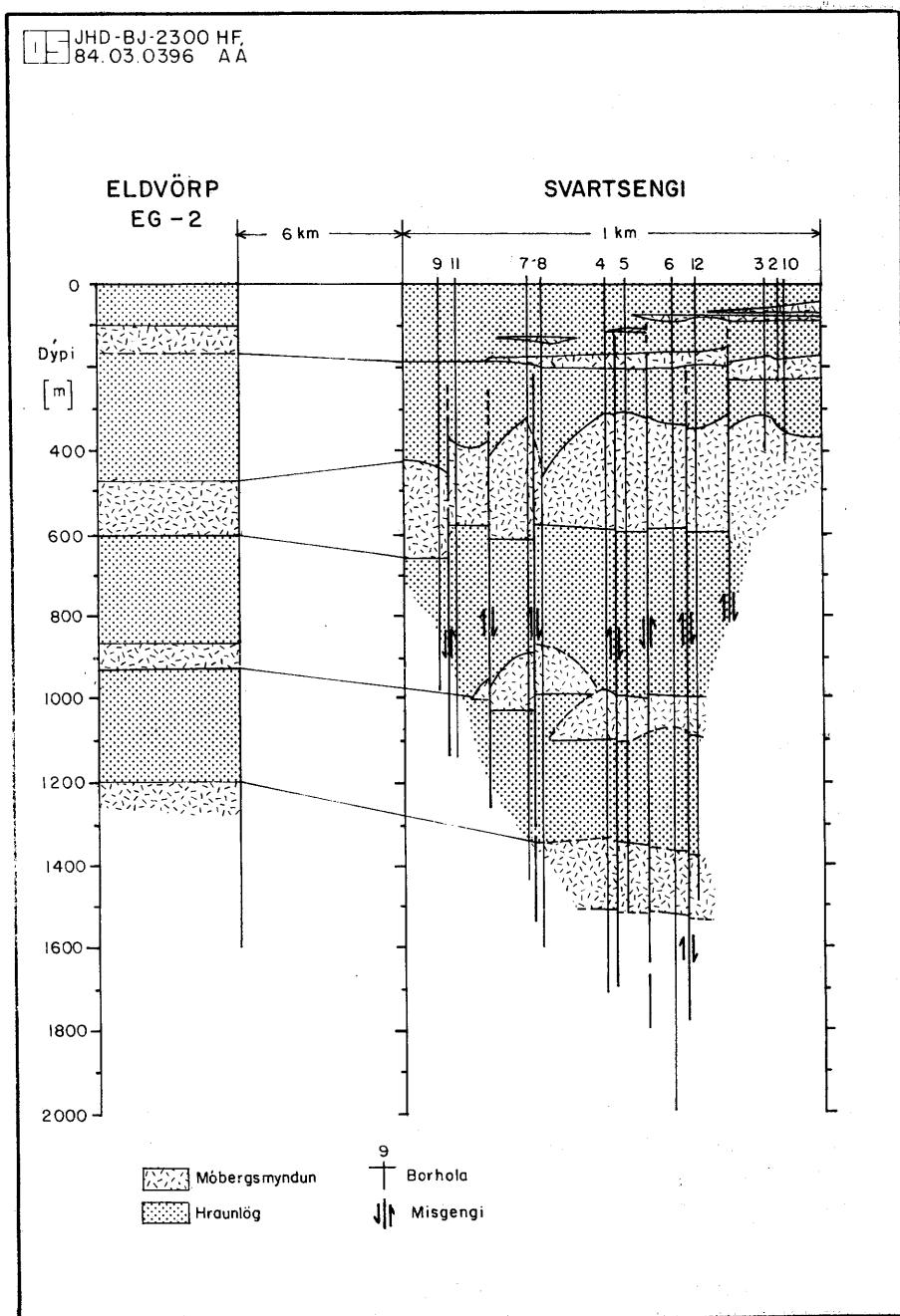
Þetta berg kemur fyrir á fimm stöðum í holunni (sbr mynd 5). Það er bergfræðilega mjög svipað og Eldvarpahraunið (sbr. Jón Jónsson 1978), þ.e. jafnkorna (equigranular) fínkristallað þóleit með þó nokkuð af litlum ólivínkristóllum í grunnmassanum. Bergið er yfirleitt fersklegt, og munar mikið þar á og í áðurnefndum dólerítgangi. Þótt hitaummyndun sé mun meira áberandi við jaðra dólerítinnskotsins vottar fyrir henni við jaðra þessa innskots einnig. Talið er nokkuð öruggt að þetta innskot sé gosrás Eldvarpahraunsins. Verður vísað til þessa innskots frá fyrri hluta 13. aldar sem "Eldvarpagangsins" hér á eftir.

Önnur innskot

Í þessum hópi eru tvö óveruleg innskotslög. Það eftir er 5 m grófkorna ólivínþóleiit við 1100 m dýpi, en það neðra er um 4 m þykkt þóleiútlag og að líkendum innskot.

4.4 Samanburður við jarðlagastafla Svartsengis

Á mynd 7 er sýnd jarðlagaskipan upphleðslumyndana í Svartsengi (Hjalti Franzson 1983b) og líkleg tenging þeirra við sambærilegar myndanir í Eldvarpaholunni. Eins og myndin ber með sér er jarðlagatenging milli þessara svæða viðunandi.



Eins og áður segir urðu móbergsmýndanir til við gos undir jöklum ísaldar, en hraunlögin runnu á hlýskeiðum. Á þann hátt er unnt að skipta berglagastafla borholnanna í Svartsengi og Eldvörpum í ákveðin tímaskeið, þ.e. jökulskeið, þar sem móbergsmýndanir eru ríkjandi, og hlýskeið, þar sem hraunlög eru ráðandi. Samkvæmt þeim tímakvarða, sem reynt hefur verið að tengja við jökul- og hlýskeið ísaldar (Kristinn J. Albertsson 1976), má ætla að berglagastaflinn í borholum þessara tveggja svæða spanni tímabilið frá nútíma til allt að um 0,7 milljóna ára í neðsta hluta holnanna.

Samanburður á innskotabéttileika á milli þessara tveggja svæða er enn sem komið er óraun-hæfur, þar sem aðeins hefur verið boruð ein hola í Eldvörpum.

5. UMMYNDUN

5.1 Greiningaraðferðir

Þegar jarðhitavatn leikur um berg hvarfast það við bergið sem við það tekur að ummyndast. Hraði ummyndunar svo og ummyndunarstig ræðst af mörgum samverkandi aðstæðum, og þar eru hitastig og vatnsleiðni mest ráðandi.

Ummundunarrannsóknir á háhitasvæðum gefa margs konar upplýsingar. Gerðir ummyndunarsteinda gefa vísbendingu um hita sem nú ríkir eða hefur ríkt í jarðhitakerfinu, og stöku steindir geta gefið vísbendingu um efnasamsetningu jarðhitavökvans. Magn myndbreytingar getur sagt til um vatnsgæfni jarðlaga og legu vatnsæða.

Ummundunarsteindir eru mjög breytilegar hvað snertir kristalgerð, lit og í hvers konar umhverfi þær myndast. Af þeim sökum er mjög mismunandi hve auðvelt er að greina þær. Þrjár rannsóknaraðferðir voru notaðar til þess að fá sem besta heildarmynd af ummyndunarmynstrinu. Er þar fyrst að nefna svarfgreiningu með stereósmásjá (svarfsmásjá) þar sem hvert sýni var athugað. Í annan stað voru 111 þunnsneiðar af sýnum af svarfi skoðaðar í bergfræðismásjá, og í þriðja lagi voru ákveðnar steindir greindar með röntgen diffraksjón (XRD), og var þar um tvønns konar greiningar að ræða, annars vegar á 82 sýnum af leirsteindum og hins vegar á 20 sýnum af öðrum steindum.

Líta má á ummyndun frá tveimur sjónarhornum; annars vegar sem áhrif jarðhitans á bergið sjálft, svo sem á gler, ólivín, pýroxen og plagióklas, og hins vegar hvaða steindir og hve mikil af þeim jarðhitavökvinn hefur myndað.

Í töflu 1 er sýnt hvaða greiningaraðferðir komu helst að notum við mat á dreifingu einstakra ummyndunarsteinda.

Með athugunum á röðun ummyndunarsteinda í blöðrum og sprungum bergлага er unnt í grófum dráttum að gera sér í hugarlund þróun jarðhitakerfisins með tíma, svo og hvort núverandi aðstæður í jarðhitakerfinu séu í jafnvægi við ríkjandi ummyndunarmynstur.

5.2 Ummundun frumhluta bergs

Á mynd 8 er sýnt ummyndunarstig glers og frumsteindanna ólivíns, pýroxens og plagióklas í þeim jarðögum sem holan sker, og er myndin byggð á gögnum úr greiningum í bergfræðismásjá (þunnsneiðar). Samræmi er á milli þess sem í svarfgreiningu er kallað ummyndað og þess, að plagióklas og pýroxen eru teknir að brotna niður í ummyndunarsteindir.

Tafla 1. Aðferðir notaðar við greiningar á ummyndunarsteindum.

Steindir	Svarf-greining	Punnsneiða-greining	Röntgen-greining	Saltsýra
Karbónöt				
Kalsít	(X)	X	X	X
"Tága"-kalsít	X	X		X
Aragónít	X	X	X	X
Kalsedón	X	(X)		
Kvars	X	X		
Anal sím/Wairakít	X	X	X	
Anhýdrít	(X)	X	X	
Albít		X		
Prenít	(X)	X		
Epidót	X	X		
Sphen	(X)	X		
Wollastonít	X	(X)		
Amfiból		X	X	
Granat	X	X		
Pýrit	X	X		
Smektít	(X)	(X)		X
Blandlagsleirsteindir	(X)	(X)		X
Svellandi klórít	(X)	(X)		X
Klórít	X	X	X	
Illít		(X)	X	
Clínó-Pýroxen	X	X		
Magnetít	X	X		
Oxaður málmur	X	X		

Á mynd 8 eru einnig gefnar til kynna helstu steindir sem mynduðust á kostnað viðkomandi frumhluta bergsins.

Gler.

Gler er ferskt ofan 70 m dýpis, en hefur algerlega brotnað niður í ummyndunarsteindir neðan þess dýpis og alveg horfið, nema á um 150 m, 450 og um 520 m dýpi, þar sem dreif af ferskum glerkornum finnst. Ráðandi ummyndunarsteind glersins er leir, en einnig ummyndast glerið yfir í kalsít. Kalsítummyndun glersins er einna mest áberandi innan móbergsmýndunarinnar milli 460-575 m, en þess ber einnig að gæta að vatnsæðar fram með innskoti (lóðréttu) koma fyrir á því dýptarbili. Á þremur stöðum öðrum þar fyrir neðan, þ.e. á 790 m, 860 m og svo á 1235 m dýpi, fellur mjög vel saman myndun kalsíts í stað glers og staðsetning vatnsæða í holunni. Viða þar sem kalsít sprungufyllingar sjást í þunnsneiðum má og greina kalsítummyndun frumsteinda við æðaveggina.

Oxun á gleri sést á a.m.k. tveimur stöðum nærrí jöðrum innskota og er talið, að um sé að ræða hitaummyndun (contact metamorphism) frá þeim tíma er innskotíð var glóandi hraunkvika (sjá nánar kafla 5.3).

ELDVÖRP, HOLA EG-2
UMMYNDUN FRUMHLUTA BERGS

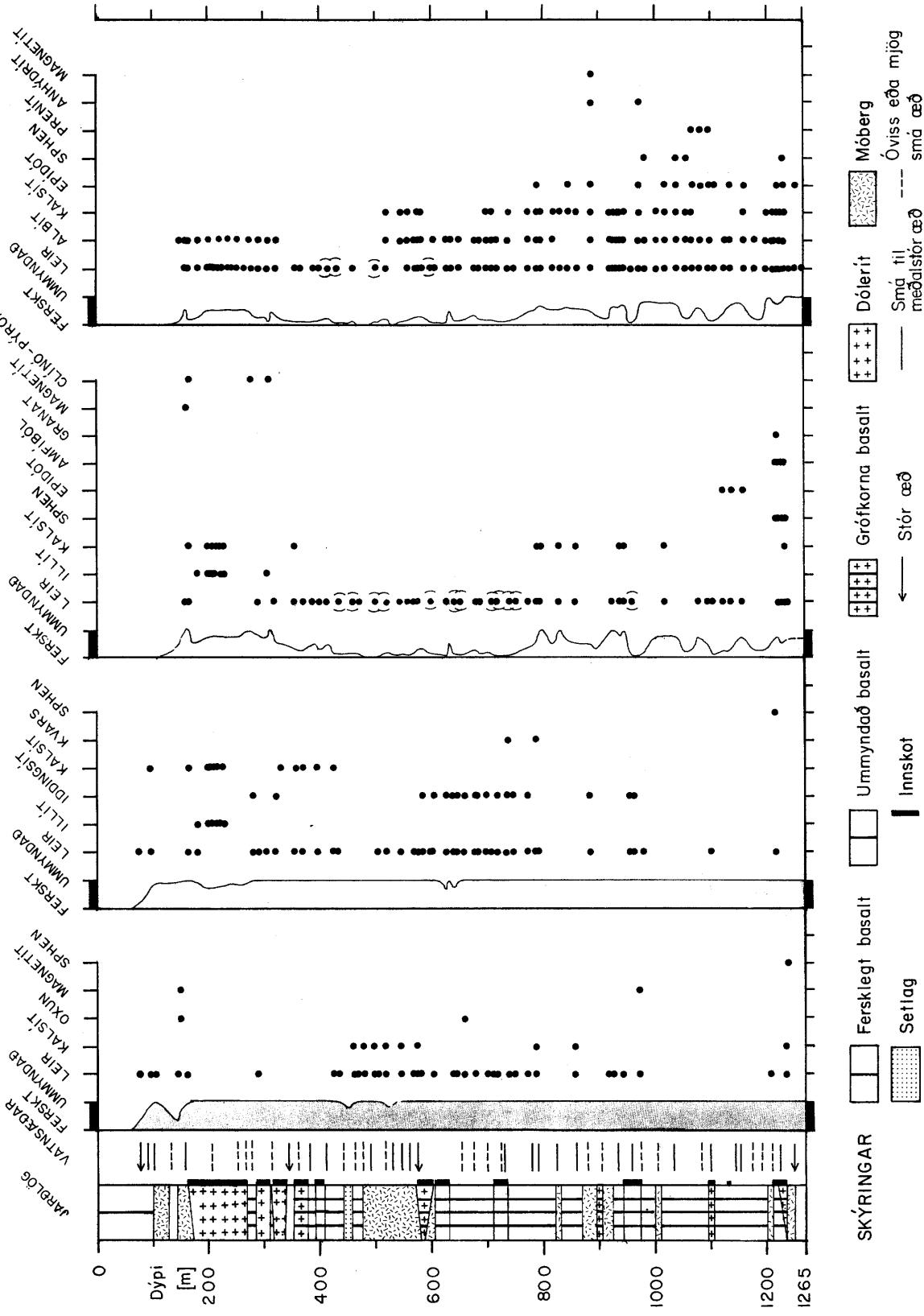
PLAGIÖKLAS

PÝROXEN

ÓLIVÍN

GLER

JHD-BI-2300 HF
84.02.0146 AA



Mynd 8. Ummynndun frumhluta bergs

Ólivín.

Ólivín er, líkt og glerið, ferskt niður á um 70 m dýpi, en neðan þess hefur það alveg ummyndast nema um miðbik innskotsins á 170-270 m dýpi, svo og innan innskots rétt neðan 600 m dýpis. Einna algengast er að ólivínið ummyndist í leir. Rauðleit oxun ólivínsins, sem líklegast telst vera iddingsít, er sérlega áberandi við jaðra Eldvarpagangsins og kann að tengjast hitaummyndun (contact metamorphism). Ummyndun þess yfir í illít eða talk er áberandi innan innskotsins á 200-240 m dýpi. Ummyndun ólivíns í kalsít sést víða ofan um 430 m dýpis og er líklega tengt jarðhitauppstreyminu við innskotið.

Aðeins á tveimur stöðum sést kvars í stað ólivíns, en það er á 730 og 790 m dýpi við virkar vatnsæðar. Á um 1210 m dýpi sést ummyndun ólivíns yfir í sphén.

Pýroxen.

Eins og sést á mynd 8 hefur pýroxen mun meira viðnám gegn jarðhitaummyndun en gler og ólivín. Ummyndun hans er einna mest á tveim dýptarbilum í holunni. Er það efra á milli 150-430 m en síðan ummyndun stendur í beinum tengslum við jarðhitauppstreymi innan og við jaðra innskotsins á þessu dýptarbili. Það neðra er neðan um 770 m. Ummyndun pýroxens er gjarnan yfir í leir sem gerir kristallana hálfgegnsæja (cloudy). Möguleg illítummyndun pýroxensins er, líkt og gerist með ólivín, algeng á milli 175-230 m svo og á einum stað á um 300 m, í öllum tilvikum innan innskotsins.

Kalsítummyndunar verður vart á milli 160 og 360 m og svo neðan 780 m. Mjög greinilegt samband er á milli þessarar kalsítummyndunar pýroxens og staðsetningar virkra vatnsæða í holunni að undanteknu dýptarbilinu 200-230 m þar sem sambandið er óljóst.

Við jaðra innskotsins í efri hluta holunnar verður vart hitaummyndunar pýroxens. Meginbreytin er síðan að hann verður mjög gulleitur í ásýnd, sem túlkað er að hann sé orðinn járnrikari. Ummyndunar yfir í epidót varð aðeins vart á milli 1110 og 1150 m. Ummyndun yfir í granat, amfiból og sphén finnst aðeins á dýptarbilinu 1210-1230 m, og má vera að síðan ummyndun standi í tengslum við nærveru innskotsbergs á þessu dýpi.

Plagióklas.

Stöðugleiki plagióklasa í jarðhitakerfi er nokkuð svipaður og pýroxens, eins og best sést á samanburði á magni ummyndunar á mynd 8. Hann telst ferskur niður á um 150 m dýpi, allt að hálfu leyti ummyndaður í og við jaðra innskotsins innan 150-320 m dýpis. Niður á um 760 m er ummyndun hans fremur lítil en þaðan og niður í botn holunnar er ummyndun hans um það bil hálfnuð. Ummyndun plagióklasa er þó hvergi algjör nema ef vera skyldi í neðstu 50 m holunnar.

Ummyndun plagióklasa í leir er algengust og finnst nær alls staðar neðan 150 m. Albít greindist á milli 150 og 180 m og 280-320 m, í báðum tilfellum nærri jöðrum innskots. Albítummyndun kemur síðan aftur fram neðan 520 m allt niður á botn holunnar. Kalsítummyndunin frá 520-580 m tengist auðsjáanlega þeim vatnsæðum sem þar koma inn í holuna. Slíkt samband gæti einnig verið til staðar neðan 700 m, t.d. fer kalsítummyndun pýroxens og plagióklas þar saman. Þó virðist kalsítummyndun plagióklasa í neðri hluta holunnar vera algengari en í pýroxeni. Epidótummyndun plagióklasa verður aðeins vart neðan 790 m. Sphén finnst á fjórum stöðum neðan 970 m dýpis í tveimur tilvika við jaðra innskots. Prenít finnst aðeins á þrem stöðum á milli 1060-1090 m dýpis. Anhydritummyndun greindist á tveimur stöðum, annars vegar á 880 m við jaðra innskots þar sem magnetít fannst einnig innan plagióklasa, og svo á um 960 m dýpi nærrí ytri mörkum innskots.

Þau atriði, sem í fljótu bragði virðast athyglisverðust varðandi ummyndun frumhluta bergsins eru:

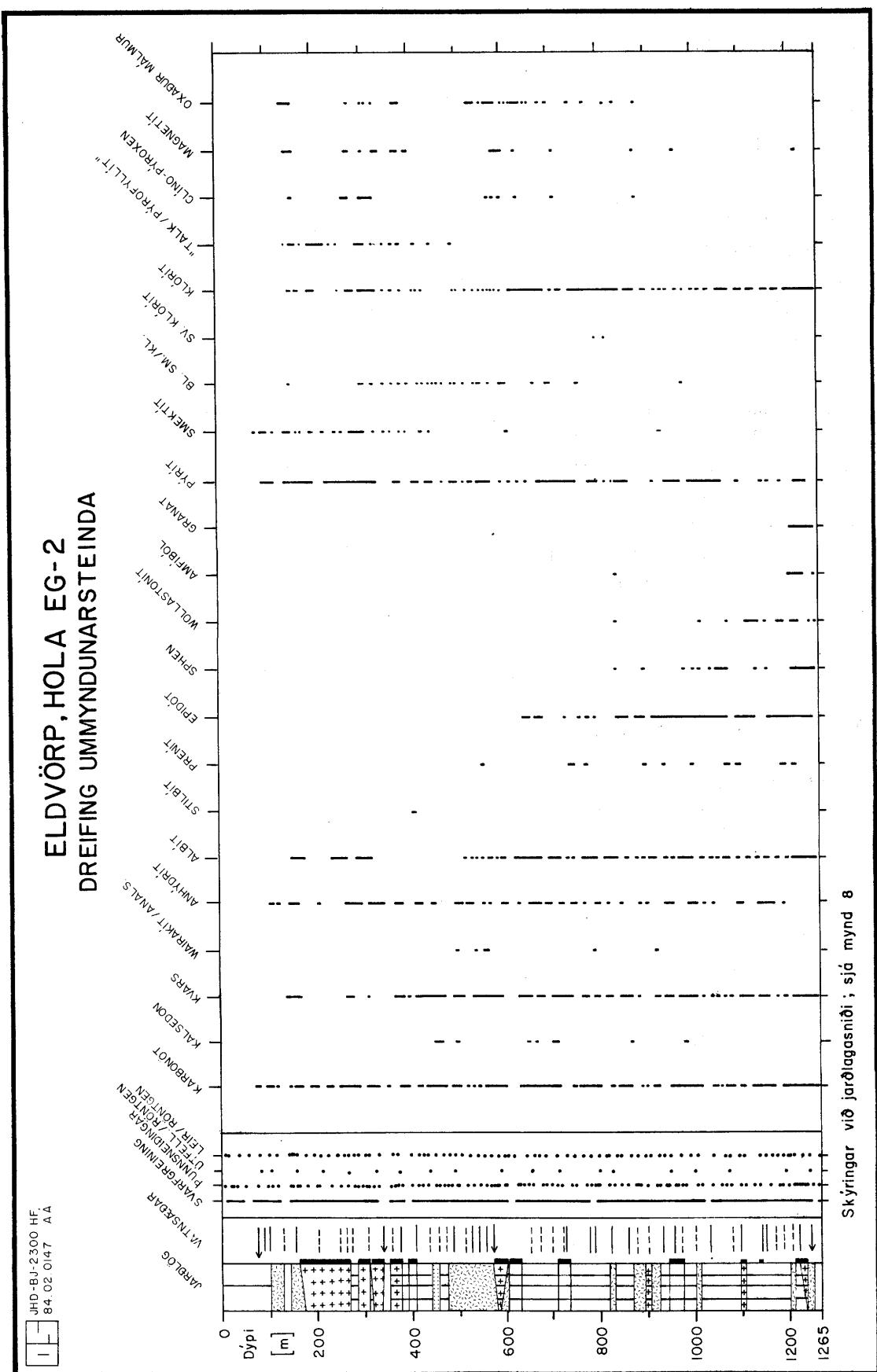
- a) Holan sker tvö beltí þar sem ummyndun er á tiltölulega háu stigi; það eftir fylgir náið inn-skotsbergi, sem borað er í gegnum á dýptarbilinu frá um 180 m niður fyrir 320 m, en það neðra tekur við neðan um 760 m.
- b) Glögg merki finnast um hitaummyndun (contact metamorphism) við jaðra inn-skots (magnetít, clínó-pýroxen, oxaður málmur). Sú vitneskja bendir á nokkuð eindreginn hátt á, að holan liggi innan eða mjög nærri jaðri sama inn-skots á a.m.k. 800 m dýptarbili í holunni. Eins og fjallað er um í kafla 6 er þetta inn-skot ein af meginstofnæðum jarðhita-vökvars.
- c) Dreifing kalsítummyndunar er nokkuð breytileg. Sem ummyndun glers og ólivíns er hún yfirleitt ofan 600 m dýpis og tengist þar ummyndun virkra vatnsæða í holunni. Kalsítummyndun plagíóklasa og að nokkru leyi pýroxens tengist jarðlögum þar sem virkar vatnsæðar koma helst fram og þar sem ummyndun er mikil og þá heldur meiri í neðri hluta holunnar, sérstaklega hvað varðar plagíóklasa. Sennileg skýring á þessari ólíku dreifingu há-hitaummyndunar í gleri og ólivíni annars vegar og pýroxens og plagíóklasa hins vegar gæti verið sú, að ummyndun fyrri hópsins fer fram á tíma lítillar kalsítvirkni, en seinni hópurinn, sem á þessum tíma er enn ekki fullummyndaður, er móttækilegur til slíkrar ummyndunar. Þetta gæti bent til að kalsítummyndun (virkni) sé(u) atburður(ir) sem teljist til yngri ummyndunarkynslóða. Þessi skýring, að meiri kalsítummyndunar gæti við virkar vatnsæðar, bendir til að kalsítíð hafi myndast í því jarðhitakerfi sem nú er virkt.

5.3 Dreifing ummyndunarsteinda

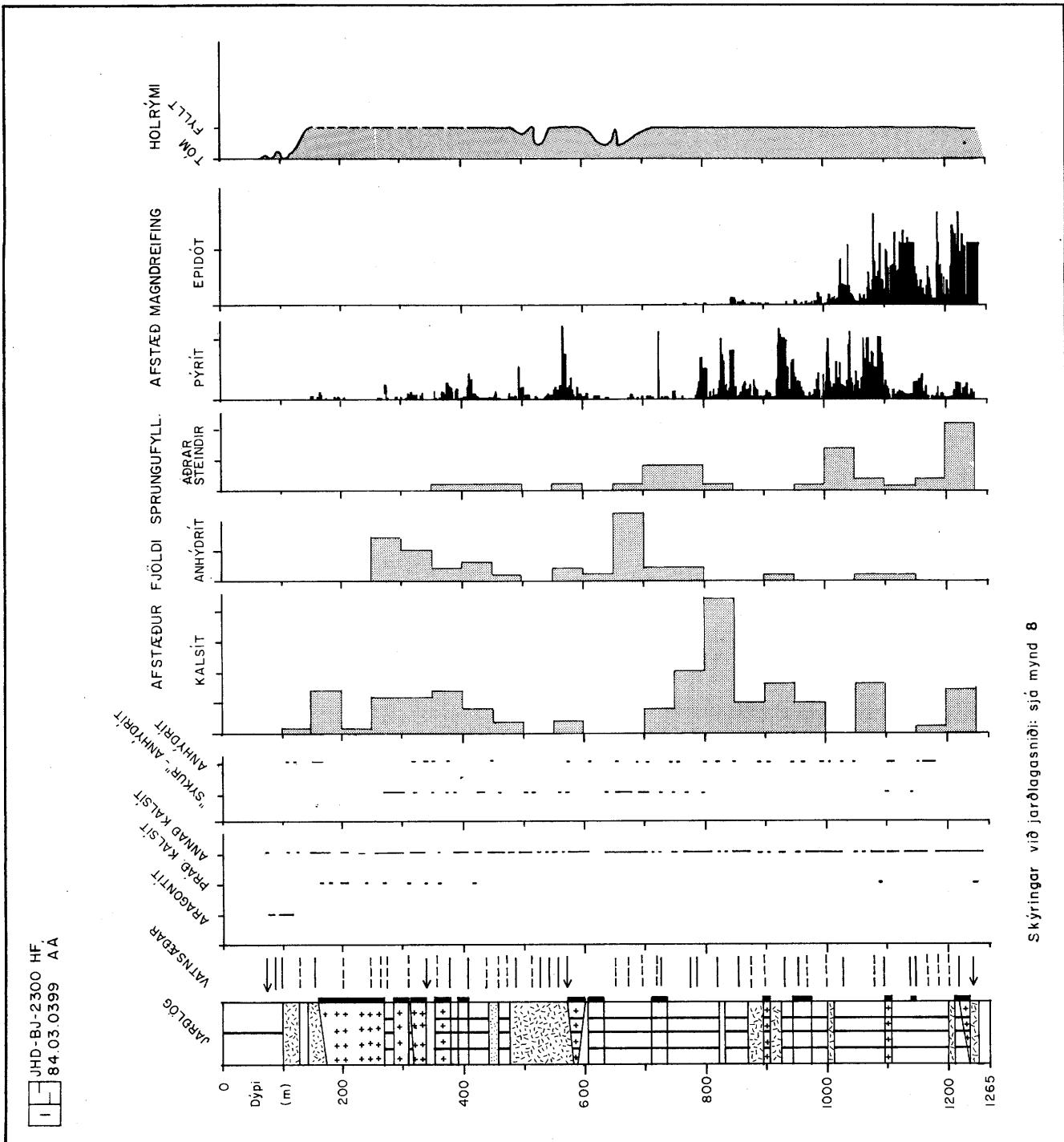
Á mynd 9 er sýnt einfaldað jarðlagasnið, vatnsæðar, yfirlit yfir greiningaraðferðir, svo og dreifing ummyndunarsteinda í jarðlögum borholunnar. Ef steind var greind á 10 m fresti eða minna taldist hún samfelld á því dýptarbili í holunni, en að öðrum kosti er línan slitin.

Karbónöt er safnheiti yfir kísilsnauðar steindir sem hafa CO₂ grúppu. Eins og sýnt er á mynd 9 finnst þessi steindargrúppa frá um 70 m niður á botn holunnar. Hún telst algeng í allri holunni en virðist þó öllu algengari ofan 600 m og neðan 1200 m. Í greiningu reyndist unnt að greina á milli þriggja gerða karbónata og er sú skipting sýnd á mynd 10.

Aragonít finnst sem holufylling á mjög afmörkuðu dýptarbili eða frá 75 m í 115 m. Í svarfsmásjá greindist aragonít sem smáar kúlulaga þyrpingar, í þunnsneiðum sem fjaðrað karbónat, en þessar greiningar voru staðfestar í röntgen.

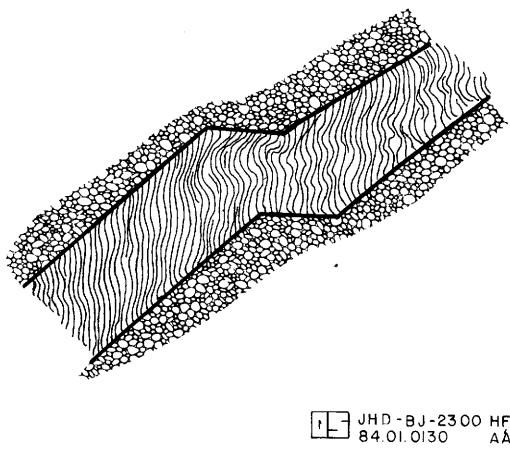


Mynd 9. Dreifing ummyndunarsteinda í EG-2.



Mynd 10. Sundurgreining karbónata, anhýdríts og sprungufyllinga. Magndreifing pýrít og epidóts og fylling holrýma.

Tágakennt karbónat. Á mynd 11 er á skematiskan máta sýndur einkennandi strúktur þessa karbónats, og líkjast kristallarnir bylgjóttum tágum sem liggja á milli sprungujaðra. Ekki hefur enn verið skorið úr því með röntgengreiningu hvort um kalsít sé að ræða eða eitthvert annað karbónat. Eins og sýnt er á mynd 10 er steindin algeng á dýptarbilinu frá 160 m niður á um 415 m dýpi. Einnig finnst spor á 1085 og 1240 m dýpi. Steindin er ætíð sem sprungufylling og einskorðast við innskot eða jaðra þeirra. Sams konar karbónat hefur fundist í djúpt rofinni megineldstöð, og einskorðast það þar greinilega við hátt ummyndunarstig (Hjalti Franzson, óbirt gögn).



Mynd 11. Einfaldað riss af "tágakenndu" karbónati.

Kalsít, sem er langalgengasta karbónatsteindin, finnst frá 70 m niður á botn holunnar. Í efsta hluta holunnar verður kalsíts fyrst vart við vatnsæðarnar á 73 m og 110 m en tekur við sem megin karbónatsteindin þar stuttu neðar. Þessi áberandi breyting frá aragoníti yfir í kalsít bendir til að það fyrrnefnda sé óstöðugt við háan hita. Slíkt samband er greinilegt á jarðhitavæðinu í Svartsengi (Hjalti Franzson 1983a). Kalsítíð er sums staðar leirborið. Er slíkt kalsít algengara ofan 600 m, en vottur þess finnst allt niður undir um 1100 m dýpi. Yfirleitt er það eldri hluti kalsítsins innan hverrar kalsítfyllingar sem er leirborið, en slík óhreinindi hverfa gjarnan í yngri hluta fyllingarinnar. Kalsít er ein algengasta sprungufyllingin (sbr 5.5), mjög áberandi í ummyndun frumhluta bergs á líku dýpi og vatnsæðar koma fram (5.2) og virðist vera einna síðust útfellingasteinda að falla út úr jarðhitavökvanum (5.6).

Kalsedón finnst strjált neðan 500 m dýpis. Í þunnsneiðum sést það hafa umkristallast yfir í kvars. Kalsedón hefur nær undantekningalaust fallið út næst holuveggjum, annað hvort á undan eða í kjölfar leirskánar.

Kvars finnst fyrst á um 140 m dýpi og fylgir þar jaðarbergi inniskotsins en finnst ekki innan þess fyrr en neðan 400 m, en þaðan finnst það nær samfellt niður alla holuna.

Analísí/wairakít er fremur fátítt, aðeins vottar fyrir því á 5 stöðum sem holufylling á milli 500-950 m dýpis. Ekki er hér gerður greinarmunur á analísími og wairakíti.

Stilbít er algeng geislasteinstegund innan setlagsins á 435-455 m dýpi og hefur þar kristallast inn á milli setkorna. Það hefur myndast á undan kvarsi og kalsíti.

Anhydrit telst, eins og sýnt er á mynd 9, nokkuð algeng steind allt frá um 100 m niður á um 1200 m dýpi. Út frá svarf- og þunnsneiðagreiningu er unnt að skipta anhydritinu í two hópa og er sú skipting sýnd á mynd 10.

Í öðrum hópnum, sem nefndur hefur verið "sykur"anhydrit, kemur það fyrir í svarfsmásjá sem safn smárra hvítleitra kristalla, í útliti einmitt sem brot úr molasykri. Í bergfræðismásjá hafa þessir smáu kristallar mjög óreglulega bylgjóttu kristallögun. Röntgengreining gefur ótvíraett anhydrit til kynna. Þessi tegund anhydrits kemur fyrir frá 270 m niður á 800 m dýpi en einnig vottar fyrir henni á 1085 m og 1140 m dýpi. Í öllum tilfellum hefur þetta anhydrit sest fyrir í sprungum og ætið í sprungum sem víðastar sjást í svarfi (< 5 mm). Athyglisvert er einnig, að hvergi sjást merki um útfellingar af öðru tagi í sömu sprungufyllingu. Þetta bendir til mikils útfellingahraða þessara kristalla. Verður nánar fjallað um þetta í kafla 5.5. Hitt **anhydrítið**, sem er svipar því sem er algengast á öðrum jarðhitasvæðum kemur fyrir sem stakir og vel gerðir kristallar með greinilega hornréttu kleifnifleti. Þetta anhydrit finnst frá 105 m í 165 m og svo dreift neðan 310 m niður á um 1200 m. Það finnst ýmist sem holu- eða sprungufylling og hefur í því síðastnefnda oftast kristallast ásamt með öðrum útfellingum. Anhydrit finnst á tveim stöðum (880 m og 965 m) sem ummyndun plagíóklasa.

Albit finnst eingöngu sem ummyndun á plagíóklasa. Albíts verður fyrst vart á 140 m dýpi allt niður á um 320 m dýpi, er ekki greinanlegt þaðan og niður á um 510 m. Frá því dýpi og til botns holunnar er það algeng ummyndun plagíóklasa (sbr. mynd 8).

Prenit finnst dreift neðan 700 m, aðallega sem holufylling, en finnst einnig sem ummyndun á plagíóklas.

Epidóts verður fyrst vart innan 640-680 m dýptarbils en síðan ekki fyrr en neðan 760 m. Steindin greinist nær samfellt í holunni neðan 850 m dýpis. Þar sem epidót er auðgreinanlegt í svarfsmásjá, var gerð könnun á afstæðu magni þess með dýpi, með talningu af svarfsspjöldum, og er það sýnt á mynd 10. Þar sést, að epidót greinist nokkuð samfellt en í litlu magni frá um 840 m niður undir 1000 m dýpi en neðan þess verður greinileg aukning í magni þess. Svo virðist sem helstu epidótopparnir neðan 1000 m fylgi lagskilum og móbergsmyndunum.

Sphen (titamít). Steinid þessi hefur mjög hátt ljósbrotn, gulleit en að því er virðist ópleókróisk. Í "krosspólar" ljósi er hún í flestum tilvika nær ógegnsæ vegna innlyksna annarra steinda, en þar sem innlyksur eru ekki til staðar, hefur steindin mjög háa tvíbrotsliti. Í svarfsmásjá líkist hún epidóti að lit nema er gulleitari. Líklegt er, að um steindina sphen sé að ræða, en þörf er staðfestingar á því með örgreiningu. Steindin finnst sem holu- og sprungufylling en einnig sem ummyndun á ólivíni, pýroxeni og plagíóklas. Steindin finnst dreift frá 840 m niður á um 1210 m, en er fremur algeng þaðan og eins langt og svarfsýni náðust.

Wollastonít var aðallega greint í svarfsmásjá en greindist einnig í þunnsneiðum neðan 1200 m. Það finnst einungis sem holu- og sprungufylling.

Amfiból. Vottur amfibóls greindist í röntgen á um 840 m dýpi en verður ekki aftur vart fyrr en á um 1160 m dýpi. Amfiból finnst nær samfellt neðan um 1200 m. Amfiból er bæði sem holu- og sprungufylling svo og sem ummyndun á pýroxeni. Líklegast er hér aktínólit á ferðinni.

Granat finnst í þunnsneiðum nær samfellt neðan um 1210 m dýpis, aðallega sem holu- og sprungufylling en í einu tilfelli sem ummyndum pýroxens. Líklegast er um að ræða grossular granat.

Pýrit er hér notað sem samheiti yfir súlfíðsteindir. Það finnst nær samfellt frá um 90 m dýpi. Magn þess er þó mismikið eins og best sést á mynd 10. Er augljóst, að margir af stærri toppum koma fram á sama dýpi og virkar vatnsæðar.

Leirsteindir eru flokkaðar að mestu á grundvelli röntgengreininga, en einnig var höfð hliðsjón af þunnsneiða- og svarfgreiningum.

Smektítt greinist fyrst á um 70 m dýpi og allt niður á um 450 m en vottar aðeins fyrir því í tveimur greiningum þar fyrir neðan, í báðum tilvikum innan fremur fersklegra innskota.

Blandlagsleir. Blandlagsleir greindist í einu sýni á um 155 m dýpi (við vatnsæð) en síðan nokkuð samfellt frá um 300-700 m, en ekki nema í tveimur sýnum þar fyrir neðan (bæði sýnin innan fremur lítt ummyndaðs innskotsbergs).

Svellandi klórít (corrensít) greindist óglöggt í tveimur sýnum á dýptarbilinu 800-825 m.

Klórít greindist fyrst á um 150 m dýpi og telst vera nokkuð samfellt niður á um 440 m. Röntgengreiningar gáfu ekki ótvírað svör um tilveru klóríts á dýptarbilinu 500-600 m, en neðan þess dýpis greindist klórít í nær hverju sýni.

Clínó-pýroxen greinist í þunnsneiðum bæði sem ummyndun á pýroxen og sem holufylling. Steindin finnst eingöngu við jaðar innskota í holunni á milli 150-350 m, 570-640 m, 710 og 880 m dýpis.

Magnetít sem ummyndunarsteind finnst við mjög sambærilegar aðstæður og clínó-pýroxeninn nema hann virðist vera stöðugur aðeins fjær innskotum.

Oxaður málmur er mjög áberandi bæði í svarfi og þunnsneiðum og finnst á svipuðum dýptarbilum og í nánu sambandi við áðurnefndan pýroxen og magnetít, en hefur meiri útbreiðslu líkt og sýnt er á mynd 8 og 9.

Þessar þrjár síðastnefndu steindir teljast myndaðar við hitaummyndun við innskotsjaðra. Viss beltaskipti ummyndunar er greinanleg (sjá mynd 6) þar sem næst innskotum er clínó-pýroxen og magnetít, fjær hverfur það fyr nefnda, en í staðinn fer að bera á rauðleitum málmi ásamt magnetítinu. Enn fjær innskotsjaðrinum tekur við einrátt rauðleitt oxunarbelti. Ekki er vitað hvað þessi belti eru þykk en væntanlega eru þau ekki mikil yfir 1 m. Slík ummyndun sem þessi er sjaldgæf við jaðra innskota og er hún talin vera í sambandi við gosgang (flæði hraunkiku í lengri tíma). Það, að hún greinist sjaldan við innskotajaðra í borholum, og hvað þá á svo ákveðinn máta, bendir mjög sterkelega til, að þar sem hún finnst í holunni, sé hún tengd þessu sérstaka innskoti. Clínó-pýroxen (hedenbergít) og magnetít hefur verið greint við innskotsjaðra í dýpri hlutum jarðhitakerfisins í Kröflu (Hrefna Kristmannsdóttir, 1981).

Aðrar ummyndunarsteindir:

K-feldspat. Á 576, 900, 922, 1212, 1220 og 1250 m dýpi fannst í þunnsneiðum steind sem hafði lágt ljósbrotn og tvíbrot, lágt neikvætt 2V og sýndi víða góða tvíburun. Líklegt er að um sé að ræða adularia eða K-feldspat. Það sem stutt gæti þá tilgátu er að á umræddum dýptarbilum, að undanskildu 900 m dýpinu, eru toppar í mælingum á náttúrulegu gamma, en sú mæling nemur m.a. magn geislavirks kalíum í berginu.

Talk, pýrophyllít. Í röntgengreiningum á leir kemur fram toppur með d-gildi frá um 9,00 til 9,30 í 20 sýnum af þeim þrjátíu, sem greind voru á dýptarbilinu 150-580 m. Samkvæmt upplýsingum sem finna má í Brindley and Brown (1980) er hugsanlega um að ræða talk eða pýrophyllít. Þetta þyrfti að kanna nánar.

5.4 Ummundunarbelti

Á mynd 12 er sýnd hefðbundin beltaskipting ummyndunar (sbr. Hrefna Kristmannsdóttir 1978) á grundvelli þeirrar dreifingar steinda sem sýnd er á mynd 9. Þó er sú undantekning á, að bætt er við klórítbelti þar sem sú steind finnst án epídóts og/eða amfibóls (aktínólíts).

Ofan 70 m dýpis sést engin ummyndun, hvorki í berginu sjálfu né útfellingar í blöðrum berg-laga.

Smektít-zeólíta beltið nær frá 70 m niður á um 125 m dýpi.

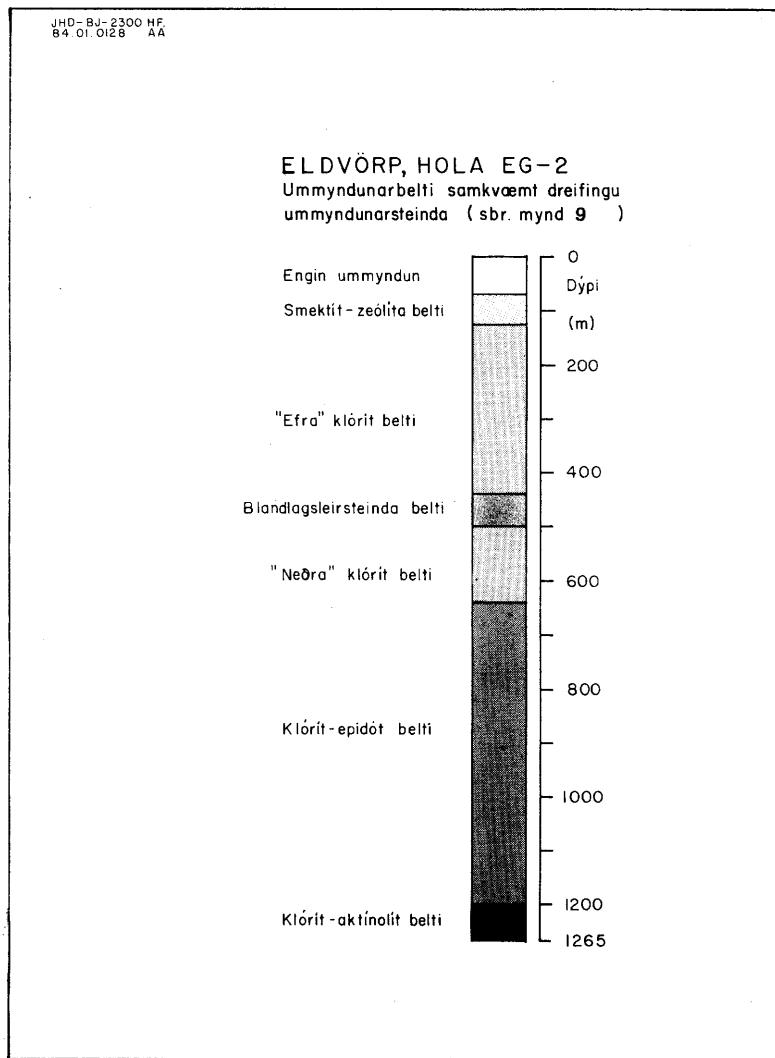
"Efra" klórít beltið nær frá 125 m niður á 440 m.

Par tekur við **blandlagsleirsteinda belti**. Neðri mörk þess beltis eru talin vera á um 500 m.

Efri mörk svokallaðs **"neðra" klórít beltis** eru ekki vel skilgreind þar sem leirröntgengreiningar á 500-570 m gefa ekki einhlíta klóríttoppa.

Klórít-epidót beltið nær frá 640 m niður á um 1200 m, en þar verður fyrst vart við amfiból (líklegast aktínólít).

Klórít-aktínólít beltið nær frá 1200 m og a.m.k. niður á botn holunnar.

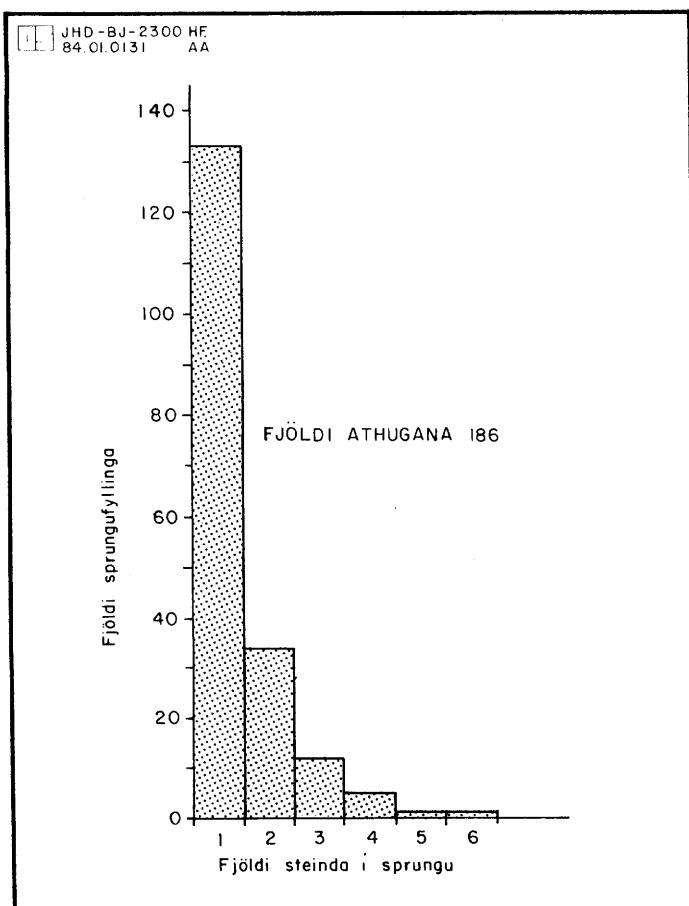


Mynd 12. Beltaskipting ummyndunar í EG-2.

5.5 Sprungufyllingar

Í þunnsneiða- og að einhverju leyti í svarfgreiningu var gerð lausleg könnun á fjölda sprungufyllinga og tegunda steinda í sprungum. Súluritið á mynd 13 sýnir fjölda steinda í einstökum sprungum. Þar kemur fram að meirihluti sprungna hefur aðeins eina tegund steinda. Ein skýringin kann að vera sú að aðeins mjóstu æðarnar komi best fram í greiningu á svarfi í hverri slíkri sprungufyllingu. Mynd 10 sýnir fjölda slíkra sprungufyllinga innan hvers 50 m dýptarbils í holunni. Unnt er að greina þrjá meginflokk sprungufyllinga:

- Sprungufyllingar þar sem **kalsít** finnst. Slíkar fyllingar finnast á flestum dýptarbilum í holum nema þær virðast fremur fátiðar á milli 500-700 m dýpis. Ofan þess dýpis tengjast þær ummyndun þeirri, sem fylgir innskotsberginu, og er bæði innan þess og við jaðrana. Erfiðara er að tengja kalsít æðar neðan 700 m dýpis við sérstakt jarðfræðilegt fyrbrigði. Líklegt er þó, að kalsít æðar neðan 1200 m séu tengdar sprungum við jaðra fínkorna basaltinnskots. Kalsít æðarnar eru greinilega yngstu útfellingarnar, sem og annars staðar í holunni með aðeins einni undantekningu á tæplega 480 m dýpi, þar sem kvars hefur fallið út á eftir. Algengt er að pýrít hafi fallið út samtíma kalsíti.

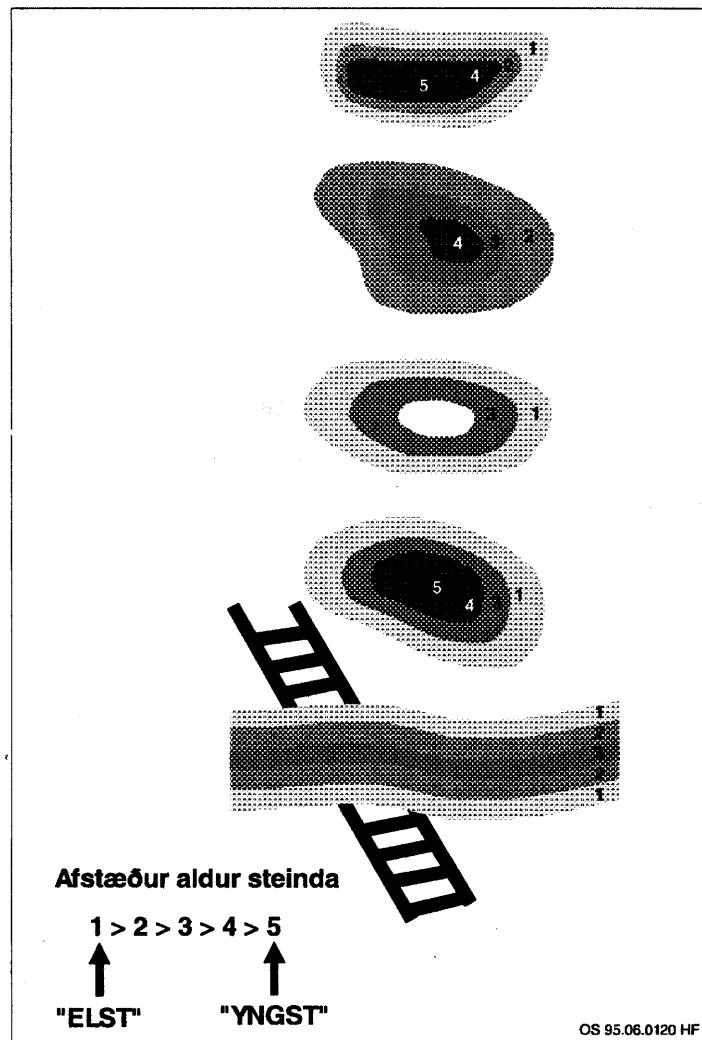


Mynd 13. Tíðni sprungufyllinga á móti fjölda steinda í hverri sprungu.

- Anhýdrít sprungufyllingar koma fyrir frá 250 m niður á um 800 m dýpi en lítt þar fyrir neðan. Eins og áður er lýst (sbr. mynd 10) sýna anhýdrít sprungufyllingarnar mjög oft

sérstakan kristalstrúktúr ("sykur"anhýdrít). Það vekur athygli að þær sprungufyllingar tengjast jaðri dólerítinnskots (sjá 4.3 og 5.3) á þessu dýptarbili, þær mynda breiðustu sprungufyllingarnar sem í svarfgreiningu sjást, og að auki eru þær undantekningarlaust eina steindin sem náð hefur að kristallast í sprungunni. Eins og áður var minnst á, bendir tilvera þessarar tegundar anhýdríts sprungufyllingar sterklega til að átt hefur sér stað hröð kristöllun hennar í kjölfar sprungumyndunarinnar og fylt þær sprungur áður en aðrar steindir hefðu átt þar möguleika á að falla út. Mjög sennilegt er að þessi gerð anhýdríts hafi fallið út við hraða upphitun jarðsjávar sem streymt hefur niður í jarðhitakerfið, en slíku fyrirbæri hefur verið lýst á háhitasvæðinu á Reykjanesi (Orkustofnun 1971). Þar sem hin tegund anhýdríts hefur fallið út í sprungum er það ætíð á undan kalsíti.

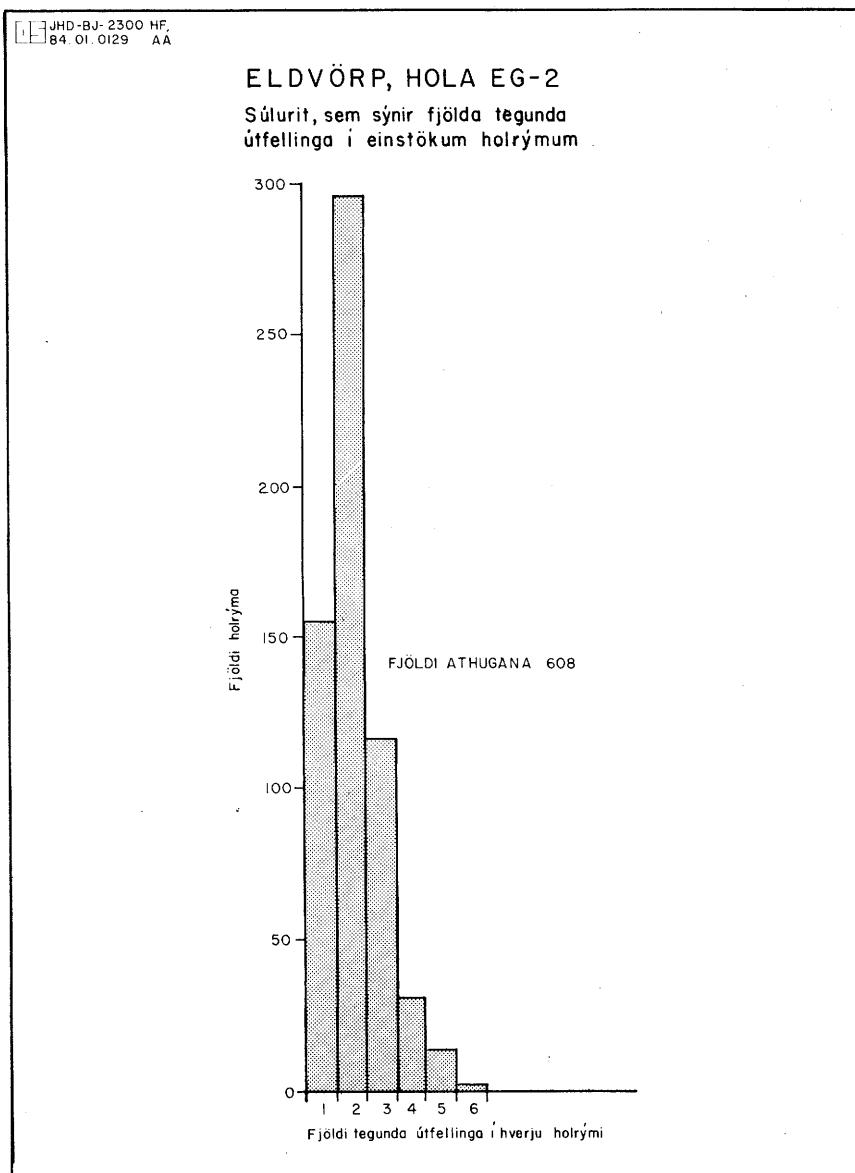
- c) Í þessum hópi, sem er minnstur, teljast aðrar **prungufyllingar**, þar sem hvorki koma fyrir kalsít né anhýdrít. Ofan 850 m dýpis eru kalsedón og leirfyllingar algengastar, neðan 950 m epidót og wollastonít og neðan 1200 m auk þess amfiból og granat. Þessi hópur er líklega allur eldri en kalsít sprungufyllingarnar.



Mynd 14. Einfaldaður þverskurður útfellinga í holrýmum berglaga.

5.6 Röðun ummyndunarsteinda

Athugun á tímaröðun ummyndunarsteinda hefur verið gerð í borholum á tveimur virkum háhitasvæðum; í Svartsengi (Hjalti Franzson, 1983a, 1983b) og á Nesjavöllum (Valgarður Stefánsson o.fl., 1983).



Mynd 15. Tíðni útfellingategunda í holrýmum.

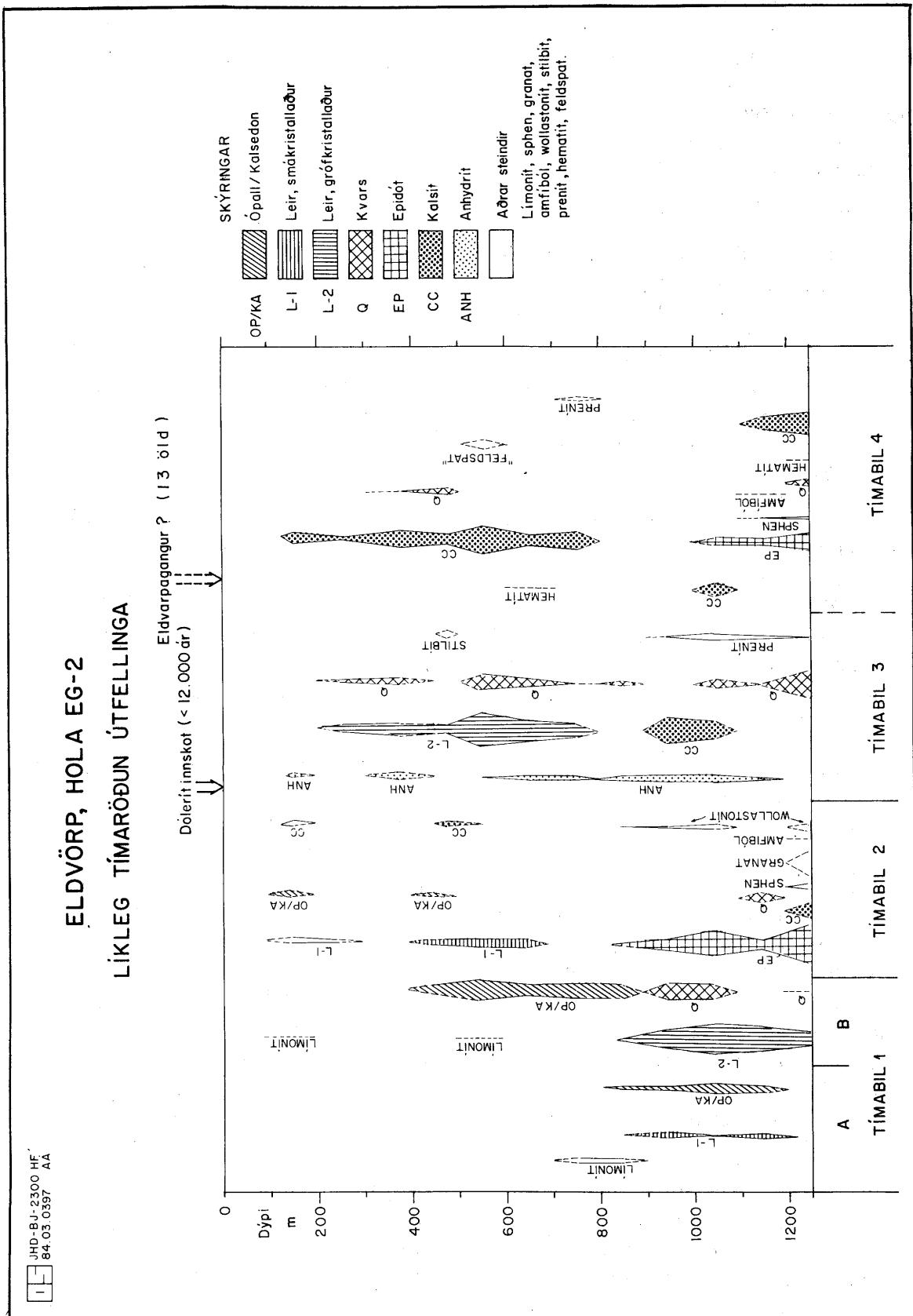
Fjöldi ummyndunarsteinda í einstökum holrýmum er mjög breytilegur. Innbyrðis lega þeirra í hverju holrými gefur til kynna afstæðan aldur þeirra eins og sýnt er á einfaldan hátt á mynd 14. Röðun þeirra í tíma og rúmi geta gefið upplýsingar um þær breytingar sem orðið hafa í jarðhitakerfinu og veitt upplýsingar um hvaða steindir eru líklegastar til að vera í jafnvægi við núverandi ástand jarðhitakerfisins.

Athugunin á röðun steinda í EG-2 var að miklu leyti gerð í þunnsneiðum en einnig að nokkru í svarfgreiningu. Samtals var gerð athugun á 608 holu- og sprungufyllingum og sýnir súluritið á

mynd 15 fjölda tegunda steinda í þeim holrýmum. Sú röðun, sem líklegt er að sé til staðar í berglögum sem hola EG-2 sker, er sýnd á einfaldaðan hátt á mynd 16. Nokkur túlkun felst í tengingu steindahópa ofan 800 m við þá sem neðar liggja, en sú tenging virðist falla fremur vel saman sé anhýdrítið allt talið samtímaútfelling. Breidd einstakra steindabelta á mynd 16 er byggð á hve algeng viðkomandi steind er í því röðunarsæti innan hvers 100 m dýptarbils, og er slíkt talið vísbending um hve ráðandi útfellingasteind hún er í því tímaskeiði jarðhitakerfisins sem borholan sker.

Í það minnsta fjögur tímaskeið ummyndunar má greina á mynd 16:

1. A. Elstu útfellingarnar, þ.e. límonít, illa kristallaður leir og kalsedón vitna um jarðhitakerfi þar sem hitastig er lægra en 180°C neðan 800 m dýpis en ummerki jarðhita ofan þess dýpis ekki merkjanleg. Það fyrstnefnda er þó talið helst falla út í köldi vatnskerfi.
- B. Í kjölfar mjög áberandi leirútfellingatímabils tekur kísill að falla út, annars vegar sem kvars neðan 900 m en ópall og/eða kalsedón frá því dýpi og upp að 400 m. Þessi breyting í kristöllun gæti bent til að á þeim tíma hafi hiti neðan 900 m verið 180°C eða hærri en lægri ofan þess dýpis (Stefán Arnórsson o.fl. 1983). Ofan 400 m gætir ekki jarðhitauummerkjá nema ef vera kynni vottur límoníts.
2. Á þessu tímabili á sér stað öflug upphitun frá einkennum lághitakerfis yfir í háhitakerfi. Áberandi epidót útfellingar ($>230^{\circ}\text{C}$) neðan 800 m og neðan 1200 m tekur í kjölfar þess að myndast sphén, granat og amfiból ($>270^{\circ}\text{C}$). Að því búnu tekur við kristöllun wollastoníts ($>270^{\circ}\text{C}$) allt upp undir 850 m dýpi sem gæti bent til enn haekkandi hita í efri berglagamyndunum innan þessa tímabils. Þrátt fyrir augljós merki um háan hita neðan 800 m dýpis er ekki að finna áberandi merki ofan þess dýpis um jarðhitakerfi, þar sem illa kristallaður leir, kalsedón og síðast kalsíts vitna um, en þessar síðastnefndu útfellingar ná upp á allt að 150 m dýpi.
3. Petta tímabil útfellinga ber vott um verulega kælingu innan kerfisins jafnframt hitnun ofan 700 m dýpis. Anhydrit markar upphaf tímabilsins og nær allt frá um 150 m niður fyrir 1000 m dýpi. Mjög líklega tengjast anhydrit sprungufyllingarnar ("sykur"anhydrit) þessu tímabili. Tvær gerðir anhydríts hafa fundist á háhitasvæðinu á Reykjanesi, og virðist lýsing þeirra í samræmi við það, sem hér er lýst (Orkustofnun, 1971). Tilvera mikils magns anhydríts í efri hluta jarðhitakerfisins á Reykjanesi var túlkað á þann veg að þegar kaldur jarðsjór flæðir inn í jarðhitageyminn (svo sem vænta má við brotahreyfingar), þá tekur anhydritið að falla út við upphitnun jarðsjávarins (Jens Tómasson and Hrefna Kristmannsdóttir 1972). Slík skýring á mjög vel við anhydritið í Eldvarpaholunni, sérstaklega þar sem augljóslega hefur orðið veruleg kólnun í kerfinu í kjölfar anhydritútfellinganna. Eftir anhydrit tekur við áberandi leirkristöllun ofan 800 m dýpis en á svipuðum tíma kalsít á milli 900-1100 m. Á eftir því taka við kvarsútfellingar allt frá 200 m niður á botn holunnar. Að síðustu kristallast prenít neðan um 900 m dýpis ($>200^{\circ}\text{C}$) svo og vottur kalsíts á milli 1000-1100 m.
4. Upphitun markar upphaf þessa tímabils jarðhitakerfisins, epidót kristallar finnast neðan um 1000 m dýpis ($>230^{\circ}\text{C}$) og í kjölfar þess vottar fyrir spheni og amfibóli neðan um 1150 m dýpis. Í efri hluta holunnar verða áberandi kalsítútfellingar og síðan vottur af kvarsi (4-500 m). Á milli 5-600 m dýpis vottar einnig fyrir steind, sem í mörgu líkist K-feldspati. Að því er best verður séð er kalsít síðasta (yngsta) útfellingin neðan 1100 m dýpis.



Mynd 16. Líkleg tímaröðun útfellinga.

Kalsít virðist ekki í jafnvægi við jarðhitavökva við hærri hita en 270°C og ætti samkvæmt því ekki að finnast innan klórít-aktínólít beltisins (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979). Svo er ástatt í neðra jarðhitakerfinu í Leirbotnasvæðinu (Hrefna Kristmannsdóttir 1978), í Suðurhlíðum Kröflu (Valgarður Stefánsson o.fl. 1982), á Hvítólasvæðinu í Kröflu (Ásgrímur Guðmundsson og Guðmundur Ó. Friðleifsson, óbirt gögn), á Reykjanesi (Jens Tómasson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1972; Hjalti Franzson o.fl. 1983a) og á Nesjavöllum (Hjalti Franzson o.fl. 1983b). Kalsít telst fremur algengt í svonefndu klórít-aktínólít ummyndunarbelti Eldvarpa-svæðisins (sbr. mynd 19) og gæti því túlkast sem merki um lækkað hitastig ($<270^{\circ}\text{C}$). Samkvæmt röðun ummyndunarsteinda (mynd 16) hefur slík kæling orðið á því ummyndunartímbili, sem er næst núverandi ástandi.

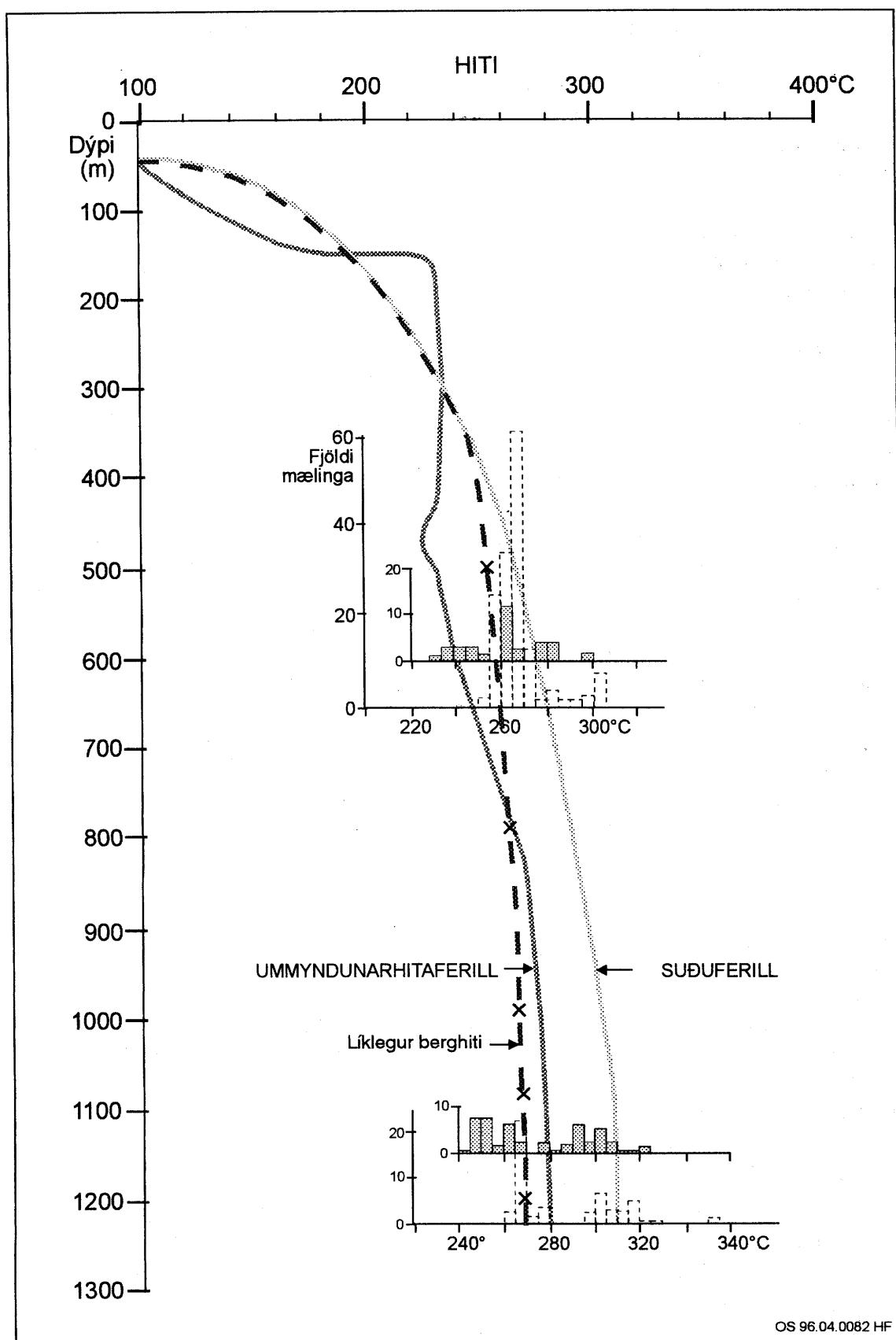
5.7 Vökvainnlyksur

Í námsleyfi höfundar á Nýja-Sjálundi árið 1987 voru gerðar mælingar á vökvabólum í útfelli-ningakristöllum í svarfi úr borholunni. Vökvainnlyksa er vöki sem lokast inni í kristal samtímis jarðhitaútfellingu, annað hvort þegar kristallinn er að myndast (prímer) eða í sprungum sem komið hafa í kristalinn eftir að hann myndaðist (sekúnder) og lokast síðan aftur með kristöllum. Vökvinn sem í innlyksunni geymist er jarðhitavökvinn sem streymdi um bergið þegar kristallinn myndaðist. Þegar vökvinn í innlyksunni kólnar (t.d. þegar kristallinn sem innlyksan er í fer úr jarðhitaumherfi í stofuhita svarfsýnis), dregst vökvinn saman. Við það myndast undirþrýstingur og þar með gufubóla (vapour bubble). Í sérstakri smásjá, sem til er á Orkustofnun, er unnt að hita kristalinn sem innlyksan er í og fylgjast um leið með breytingum sem verða í innlyksunni. Við upphitun þenst vökvinn og þegar sama hitastigi er náð og þegar vökvinn lok-aðist inni í kristalnum, hverfur gufubólan. Þessi hiti er kallaður samrunahiti Th (temperature of homogenization). Með kælingu kristals í sömu smásjá er unnt að ákvarða bræðslumark vökvans, sem kallað er T_m (temperature of melting). Það er gert með því að hraðfrysta kristalinn í fljótandi köfnunarefni og síðan hita upp aftur hægt og rólega þar til ísinn bráðnar. Bræðslumarkið er háð magni uppleystra efna í vökvananum. Í jarðhitavökva Eldvarpa er seltan og CO_2 helstu efnin sem áhrif hafa á bræðslumarkið, og er líklegt að það síðarnefnda lækki bræðslumarkið um einar $0,2^{\circ}\text{C}$.

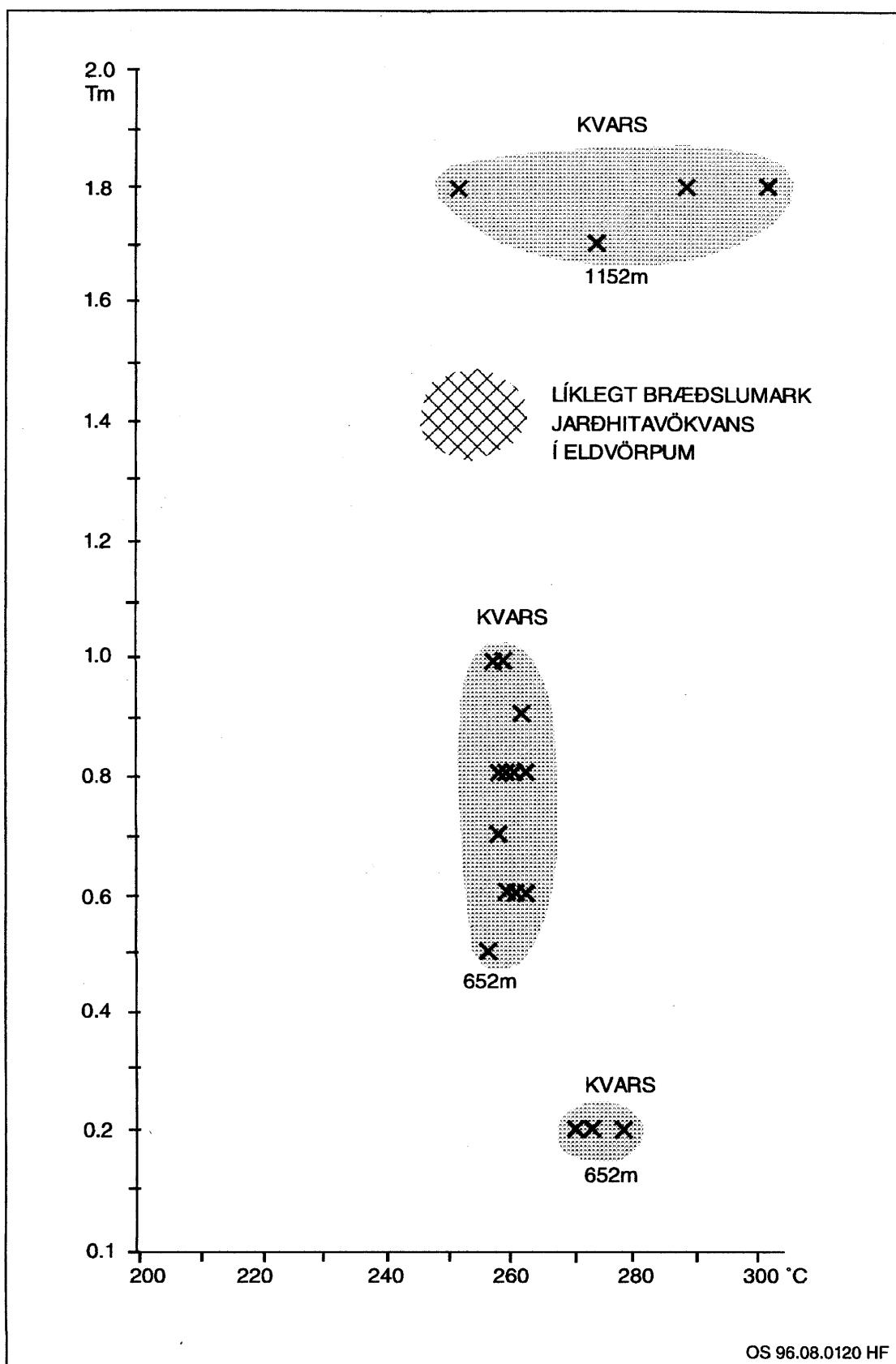
Í allt var mælt Th í 144 vökvainnlyksum á fjórum stöðum í holunni; 602, 650, 1150 og 1225 m dýpi , og eru niðurstöður sýndar sem stöplarit á mynd 17. Á $600\text{-}650\text{ m dýpi}$ fellur áberandi hluti mælinganna á hitabilið $255\text{-}275^{\circ}\text{C}$, sem er svipaður og mældur hiti á því dýptarbili (um 260°C). Í neðri hluta holunnar ($1100\text{-}1300\text{ m}$) spannar hiti vökvainnlyksanna mun breiðara svíð eða frá um $240\text{-}320^{\circ}\text{C}$. Virðast gildin hópast á tvö hitabil; $240\text{-}280^{\circ}\text{C}$ og $285\text{-}320^{\circ}\text{C}$. Það gæti bent til að lægra hitabilið sé nærrí númerandi hitaástandi í jarðhitakerfinu, en það hærra endurspegli eldra og heitara ástand en nú ríkir. Athyglisvert er einnig að í síðara tilfellinu liggur hitinn nærrí suðuferli þess dýptarbils, sem bendir til sjóðandi jarðhitakerfis.

Á mynd 18 er sýnt bræðslumark nokkurra innlyksa (í kvarsí) af 652 og 1152 m dýpi . Augljóst er að bræðslumark vökvans er afar breytilegt, allt frá því að vera nálægt ferskvatni yfir seltu sem er hærri en núverandi selta jarðhitavökvans. Þessi breytilega selta er mjög í samræmi við mælingar sem gerðar hafa verið í jarðhitakerfi Svartsengis, en þar voru þær túlkaðar sem vísbendingar um breytilegt magn ferskvatns í jarðhitakerfinu, sem mögulega má tengja loftslags-breytingum (jökulskeið/hlýskeið).

Líta ber á þessar innlyksumælingar sem fyrsta skref slíkra mælinga í Eldvarpaholunni, en nánari mælingar gætu gefið mun ítarlegri upplýsingar um hita- og seltubreytingar í jarðhitakerfinu með tíma.



Mynd 17. Mælingar á hita (Th) í vökvainnlyksum í kvarsi.



Mynd 18. Mælingar á bræðsluhita (Tm) í vökvainnlyksum.

6. VATNSÆÐAR

Í þessum kafla er greint frá vatnsæðum sem holan sker, og þeim upplýsingum sem liggja til grundvallar ákvörðunar um tilveru þeirra.

EG-2 er fyrsta holan á Eldvarpasvæðinu og því var lítið vitað um vatnsæðar og legu þeirra og þaðan af síður þau áhrif sem þær hafa haft á nærliggjandi berg. Í fyrstu voru þess vegna at-hugaðar nokkuð vel allar hitamælingar sem framkvæmdar voru á bortíma, en vegna erfidiðleika í borun reyndist nauðsynlegt að hitamæla allt að 20 sinnum. Í hverjum hluta holunnar eru því til 5-10 hitamælingar. Langflestir þeirra hafa þegar verið birtar í áfangaskýrslu (Benedikt Steingrímsson o.fl. 1983). Skoltapsmælingum, sem veita markverðar upplýsingar um virkar vatnsæðar, hafa einnig verið gerð skil í áðurnefndri áfangaskýrslu. Á Gufubor er svonefndur Geograph síriti, sem nemur snöggar breytingar í flæði skolvatns í "flow-line", svo og afstæðar hitabreytingar á skolvökva. Þessi síriti hefur reynst notadrjúgur til að staðsetja vatnsæðar nákvæmar en gert er með skoltapsmælingum. Allar þessar mæliaðferðir gefa góða hugmynd af legu og afstæðri stærð vatnsæða. Í framhaldi var gerð könnun á hvort einhver sérstök einkenni ummyndunar tengdust þessum æðum. Eins og fram kemur í eftirfarandi lýsingum á einstökum æðum, virðast helstu einkennin vera almenn aukning í ummyndun frumhluta bergsins og aukning í pýríti og kalsíti (kafli 4, myndir 8, 9, 10 og 16). Athyglisvert er einnig, að fylgni var fremur góð á milli sumra vatnsæða og hækkaðs gildis í náttúrulegri gammamælingu (sjá mynd 4). Þessi samanburðarkönnun gefur aukna trú á að nýta megi jarðfræðigögn í næstu borholu í Eldvörpum, auk hefðbundinna gagna, til að staðfesta betur vatnsæðar.

Í holu EG-2 finnast merki um allt að 48 vatnsæðar og eru 29 þeirra í vinnsluhluta holunnar. Þessar vatnsæðar eru merktar inn á myndir 4, 8, 9, 10 og 13, og jafnframt skráðar í töflum 2 og 3. Helstu einkenni og gögn um hverja æð fyrir sig eru settar fram í viðauka I.

Í töflu 2 er vatnsæðum skipt í þrjá flokka á grundvelli þeirrar svörunar sem þær gefa í mælingum. Vega hita- og skoltapsmælingar ásamt útslagi Geographs þungt í þeirri flokkun. Flokkunin gefur til kynna, að holan skeri 4 stórar vatnsæðar, og eru tvær þeirra í vinnsluhluta holunnar. "Smáar til meðal vatnsæðar" eru 21 að tölu þar af 15 í vinnsluhluta holunnar. Tuttugu og þrjár flokkast í þriðja hópinn, sem gaf ógleggsta svörun, og er í raun vafamál hvort sumar þeirra séu virkar vatnsæðar í núverandi ástandi. Hægra megin í sömu töflu gefur að líta líklegustu aðstæður sem skýrt gætu jarðfræðilega legu vatnsæðarinnar. Þar kemur fram að 27 æðanna tengjast innskotsbergi og eru ráðandi við jaðra þeirra (og merkir samkvæmt jarðfræðilegri túlkun leiðni eftir lóðréttum fleti). Aðrar æðar virðast flestar fylgja lagmótum upphleðslumyndana (sem þá túlkast sem lárétt leiðni).

Í töflu 3 er sýndur samanburður á stærð vatnsæða og jarðfræðilegri legu þeirra og sést þar glöggt hvað innskotin ráða miklu um vatnsleiðni við holuna. Svo virðist að ekki sé umtalsverður munur á afstæðri stærð eða fjölda vatnsæða við dólerítganginn annars vegar og svonefndan Eldvarpagang hins vegar.

Tafla 2. Skipting vatnsæða í EG-2 í stærðarflokka, og jarðfræðileg skipting.

JHD-BJ-2300 HF
84.03.0395 AÁ

AFSTÆÐ STÆRD ÆÐA				JARDFRÆÐILEG LEGA ÆÐA						
Nr.	Dýpi (m)	Ráðandi æð	Smá til meðalstór æð	Óviss og/eða mjög smá æð	Innan innskots	Innskots-jaðar	Innan hraunlags	Hraunlags- skil	Innan móbergs	Skil milli hraunlags móbergs
1	75	X						X		
2	88		X					X		
3	100		X							
4	ca. 130			X					?	X
5	155		X				X			
6	ca. 202			X			X			
7	ca. 250		X		X					
8	ca. 265			X			X			
9	275			X			X			
10	ca. 310			X			X			
11	340	X					X			
12	ca. 358			X	X					
13	380		X				X			
14	410		X				X			
15	ca. 440			X						X
16	ca. 460			X			X			
17	ca. 476			X						X
18	490		X						X	
19	515			X					X	
----- VINNSLUFOÐRING 524 m -----										
20	530		X				X			
21	545		X				X			
22	566		X				X			
23	575	X					X			
24	ca. 653			X				X		
25	675			X					X	
26	700			X			X			
27	725			X			X			
28	ca. 730		X				X			
29	780		X						X	
30	790		X							X
31	825		X							X
32	860		X						X	
33	880			X						X
34	905			X						X
35	935		X				X			
36	960		X		X					
37	975			X			X			
38	1005			X						X
39	1035		X						X	
40	1085			X			X			
41	1100		X				X			
42	1145		X				X			
43	1152		X					X		
44	1175			X					X	
45	1192			X					X	
46	1210			X			X			
47	1225		X				X			
48	ca. 1250	X					X			
		4	21	23	3	24	2	8	6	4

Tafla 3. Samanburður á stærð vatnsæða og jarðfræðilegri legu þeirra.

Jarðfræðileg lega vatnsæðar	Afstæð stærð vatnsæðar			Æðar samtals
	Stór æð	Meðalstór æð	Óviss og/eða smá æð	
Innan innskots		1	2	3
Við innskotsjaðar	3	11	10	24
Innan hraunlags		1	1	2
Innan móbergs		2	3	5
Hraunlagaskil	1	4	3	8
Skil hraunlags og móbergs		2	3	5
Samtals	4	21	22	

7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Á mynd 19 er dregið upp einfaldað þrívitt jarðfræðilegt líkan af jarðhitakerfinu í Eldvörpum þar sem yfirborðs- og borholugögn hafa verið samtúlkuð.

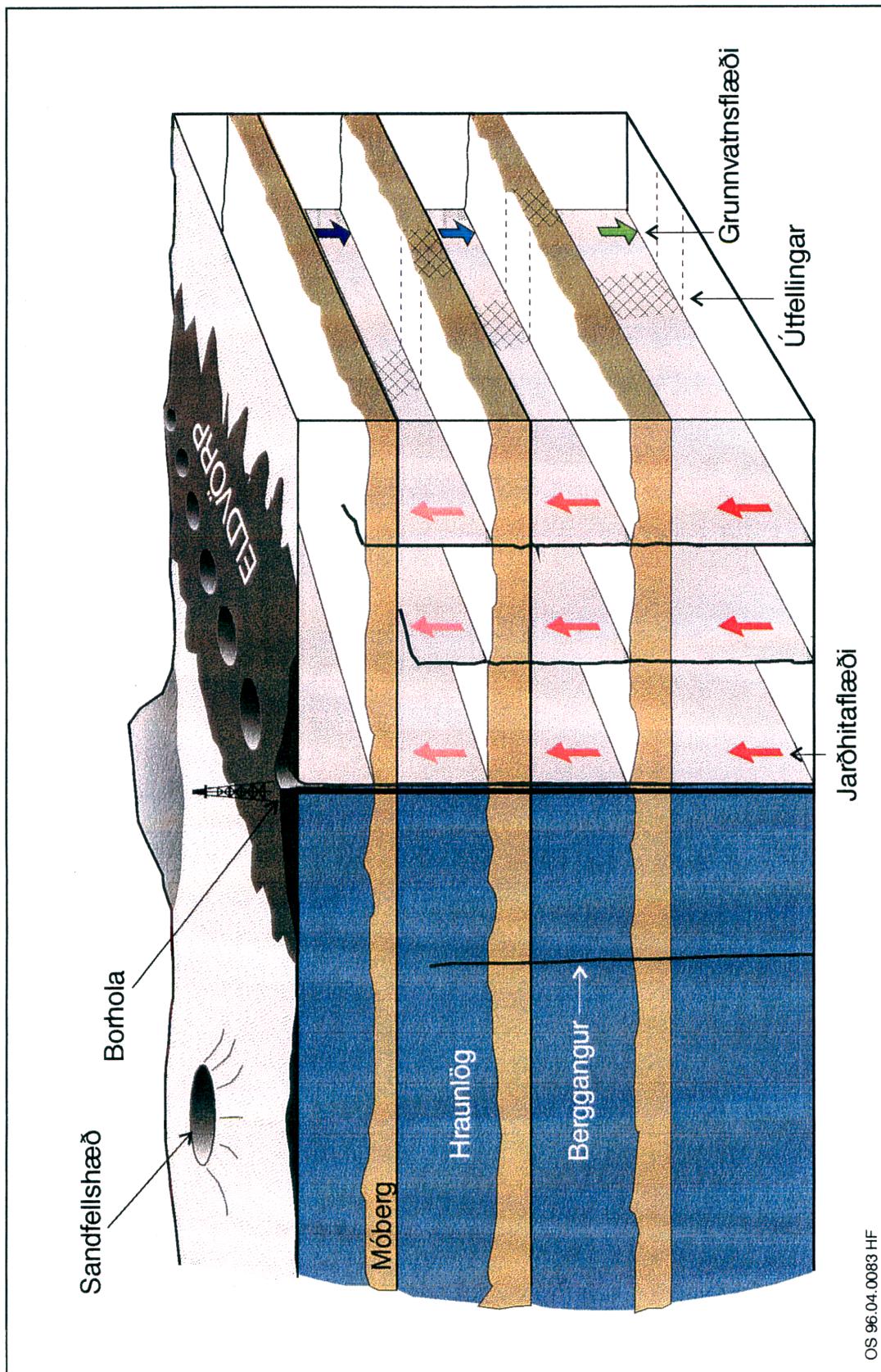
Yfirborðsummerki og viðnámsmælingar benda til að grunnvatnsstraumar tengist gossprungu Eldvarpahraunsins; í norðri flæðir kalt grunnvatn niður eftir gossprungunni, í miðhluta gossprungunnar er uppfleði jarðhitavökvars og hliðarstreymi hans frá jarðhitakerfinu til suð-austurs eftir sömu sprungu. Þau skörpu skil sem verða í viðnámi nærrí Eldvarpasprungunni eru í góðu samræmi við ungan aldur Eldvarpagossins, þ.e. því ójafnvægi sem ríkir við "nýorðna" lektaraukningu.

Jarðfræðigögn úr borholunni segja svipaða sögu. Jarðlagastaflinn samanstendur af hraunlagasyrpum aðskildum af móbergsmyndunum, og svipar honum mjög til þess sem greinist í holum í Svartsengi. Borholan virðist skera langsum eftir tveimur lóðréttum berggöngum; dólerítgangi og síðan gosgangi Eldvarpa. Sá fyr nefndi er líklega yngri en móberg frá síðasta jökulskeiði en sá síðar nefndi frá 13. öld. Vatnslekt fylgir jöðrum þeirra, sem bendir til lóðrétrar lektar og uppstreymis. Jafn hiti í vinnsluhluta holunnar ($250-270^{\circ}\text{C}$) bendir einnig til uppstreymis.

Ummyndun er mjög mikil neðan rúmlega 100 m dýpis. Vísbindingar eru um a.m.k. fjögur jarðhitaskeið, frá lághitakerfi í upphafi til þriggja háhitafasa, og eru tveir þeir síðari að líkindum tengdir við dólerítganginn og Eldvarpaganginn.

Mælingar á vökvainnslýksum benda til að jarðhitakerfið neðan 1000 m dýpis hafi fyrr á tínum verið sjóðandi en hafi nú lækkað niður í um $260-270^{\circ}\text{C}$, og er freistandi að telja að sú hita-lækkun stafi af niðurstreymi kaldara grunnvatns inn í jarðhitakerfið eftir nyrðri hluta "Eldvarpagangsins".

Breytileg selta í vökvainnlyksum bendir til meiri ferskvatnsáhrifa á fyrri tíma jarðhitakerfisins. Svipaðar sveiflur mælast í innlyksum í Svartsengi. Líklegt er að þessar seltusveiflur orsakist af breytilegum grunnvatnsbúskap á jökul-/hlýskeiðum.



Mynd 19. Skematískt jarðfræðilíkan af jarðhitakerfinu í Eldvörpum.

8. HEIMILDIR

Benedikt Steingrímsson, Hjalti Franzson, Svanbjörg Helga Haraldsdóttir, Þorsteinn Thorsteinsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Héðinn Ágústsson og Sverrir Þórhallsson 1983: Borun holu EG-2, Eldvörpum. Áfangaskýrsla. Orkustofnun, OS-83107/JHD-42 B, 50 s.

Brindley, G.W. og G. Brown, 1980: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Ed: Brindley, G.W. and G. Brown. Mineralogical Society, Monograph No.5, 495 s.

Haukur Jóhannesson, 1989. Jarðfræði Reykjanesskaga. Í: Náttúrufar á sunnanverðum Reykjaneskaga (ritstj. Kristbjörn Egilsson). Náttúrufræðistofnun Íslands, Reykjavík, 13-22.

Hjalti Franzson 1983a: Svartsengi, hola SG-12. Borun, jarðlög, ummyndun og vatnsæðar. Orkustofnun, OS-83003/JHD-02, 54 s.

Hjalti Franzson, 1983b: The Svartsengi high-temperature field, Iceland subsurface geology and alteration. In: Geothermal Resources Council, Transactions, 7: 141-145.

Hjalti Franzson, Hilmar Sigvaldason, Ómar Sigurðsson og Héðinn Ágústsson, 1983a: Nesjavellir, hola NG-7, þriðji áfangi: Borun vinnsluhluta, 593-200 l m. Orkustofnun, JHD. 23 s.

Hjalti Franzson, Guðjón Guðmundsson, Jens Tómasson og Þorsteinn Thorsteinsson, 1983b: Borun holu RnG-9, Reykjanesi. Orkustofnun, JHD. 31 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, 1978: Ummyndun berggrunns á Kröflusvæðinu. Orkustofnun, OSJHD-7854, 29 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C. In: International Clay Conference 1978. Edited by M.M. Mortland and V.C. Framer. Elsevier Publishing Company, Amsterdam: 359-367.

Hrefna Kristmannsdóttir, 1981: Wollastonite from hydrothermally altered basaltic rocks in Iceland. Mineralogical Magazine, 44: 95-99.

Jens Tómasson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1972. High temperature alteration minerals and thermal brines, Reykjanes, Iceland. Contr. Miner. Petrrol. 36: 123-134.

Jón Ingimarsson og Jónas Elíasson, 1980: Svartsengi - I. Grunnvatnsrannsóknir vegna ferskvatnsöflunar fyrir varmaorkuver. II Kort. Orkustofnun, OS80031/ROD12, 86 s. og 7 kort.

Jón Jónsson, 1973: Sundhnúkahraun við Grindavík. Náttúrufræðingurinn, 43: 145-153.

Jón Jónsson, 1978: Jarðfræðikort af Reykjanesskaga. Orkustofnun, OS-JHD 7831, 303 s.

Jón Jónsson, 1983: Eldgos á sögulegum tímum á Reykjanesskaga. Náttúrufræðingurinn, 52, (1-4): 127-139.

Kristinn J. Albertsson, 1976: K/Ar ages of Pliocen-Pleistocene Glaciations in Iceland with special reference to the Tjörnes sequence, northern Iceland. Doktorsritgerð við háskólan í Cambridge, 268 s.

Kristján Sæmundsson, 1995: Um aldur stóru dyngnanna á utanverðum Reykjanesskaga. Í; Eyjar í Eldhafi. Útg. Gott Mál: 165-172.

Lúðvík S. Georgsson og Helga Tuliníus 1983: Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjannesskaga 1981 og 1982. Orkustofnun, OS-83049/JHD-09, 70 s.

Magnús Sigurgeirsson, 1995 a: Yngra Stampahraunið á Reykjanesi. Náttúrufræðingurinn, 64 (3): 211-230.

Magnús Sigurgeirsson, 1995 b: Miðaldalagið. Í: Eyjar í Eldhafi. Útg. Gott Mál: 189-198.

Orkustofnun, Jarðhitadeild, 1971. Reykjanes, heildarskýrsla um rannsókn háhitavæðis. 172 s.

Sigmundur Einarsson og Haukur Jóhannesson, 1989. Aldur Arnarseturshrauns á Reykjannesskaga. Fjöldit Náttúrufræðistofnunar 8, 15 s.

Stefán Arnórsson, Einar Gunnlaugsson and Hörður Svavarsson, 1983: The chemistry of geothermal waters in Iceland. III Chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47, No.3: 567-577.

Valgarður Stefánsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Gísli K. Halldórsen, Halldór Ármannsson, Hjalti Franzson og Trausti Hauksson, 1982: Krafla - hola KJ-14. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Orkustofnun, OS82061/JHD09. 119 s.

Valgardur Stefánsson, Jens Tómasson, Einar Gunnlaugsson, Hilmar Sigvaldason, Hjalti Franzson og Ómar Sigurðsson, 1983: Nesjavellir, hola NG-6. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Orkustofnun, OS-83023/JHD-04. 100 s.

VIÐAUKI I

Upplýsingar um vatnsæðar

Í þessum viðauka er lýst helstu einkennum hverrar vatnsæðar sem hola EG-2 sker.

1. (75 m) Þessi vatnsæð kemur aðeins fram í fjórum af 10 hitamælingum, líklegast vegna þess að steyp var í hana. Algjört skoltap varð. Á þessu dýpi verður fyrst vart við ummyndun ólivíns í kalsít og leir og ummyndunar glers í leir verður einnig vart. Einnig verður hér fyrst vart við útfellingar í blöðrum, og samkvæmt röntgengreiningum virðist kalsít myndast hér í stað aragoníts. Vatnsæðin er innan mjög blöðrótt dyngjubasalts.
2. (88 m) Þrjár af tíu hitamælingum sýna æð á þessu dýpi. Á Geograph kemur fram um 40% útslag. Hár borhraði einkennir þetta dýpi. Samkvæmt jarðlagagreiningu kemur æðin fram á lagmótum hraunlaga.
3. (100 m) Sjö hitamælingar af 10 gefa vísbendingu um vatnsæð. Aukin ummyndun á ólivíni og gleri yfir í leir. Kalsít hefur myndast í stað aragoníts. Nokkuð er um útfellingar í blöðrum. Æðin kemur fram á mótum Hraunlagamyndunar 1 og Móbergsmyndunar 1.
4. (ca 130 m) Einu ummerki þessarar æðar er að finna í tveimur hitamælingum af tíu. Svarf vantar af þessu dýpi og þar af leiðandi einnig jarðfræðilega skilgreiningu.
5. (155 m) Fimm af 10 hitamælingum vitna um vatnsæð á þessu dýpi. Ólivín sýnir aukna myndbreytingu yfir í leir og kalsít, pýroxen sést einnig hafa ummyndast yfir í kalsít. Röntgengreining nærri þessu dýpi sýnir blandlagsleirsteind. Allar porur virðast fylltar, og aukning verður í magni pýríts. Aðeins ofar, eða í 145 m dýpi merkist um 5% útslag á Geograph. Þessi æð kemur fram við innskotsjaðar á grófkorna dóleríti.
6. (ca 202 m) Vottur um þessa vatnsæð kemur fram í tveimur hitamælingum af átta. Greinileg aukning verður í ummyndun á pýroxeni og plagióklasa. Æðin kemur fram í blájaðri dólerítinnskots.
7. (ca 250 m) Einu merkin um vatnsæð á þessu dýpi kemur fram í fjórum af átta hitamælingum. Hún kemur fram rétt innan við jaðar dólerítinnskots.
8. (ca 265 m) Tilvera vatnsæðar er hér mjög óræð, þar sem hún merkist aðeins í einni af 8 hitamælingum. Ef hún er til staðar þá liggur hún nærrí jaðri dólerítinnskotsins.
9. (275 m) Þrjár af átta hitamælingum gefa vísbendingu um vatnsæð á þessu dýpi, auk þess að um 1 l/s skoltapsaukning verður. Greinileg aukning er í ummyndun pýroxens og plagióklasa og aukning í pýrítmagni. Æðin kemur fram við jaðarinn á dólerítinnskoti.
10. (ca 310 m) Gögn um þessa æð er takmörkuð við eina hitamælingu af átta og aukningu í ummyndun pýroxens og plagióklasa. Hún liggur við jaðar dólerítinnskots.
11. (340 m) Sex hitamælingar af átta sýna á áberandi hátt vatnsæð á þessu dýpi, enda kom algert skoltap og 70% útslag á geograph. Svarf vantar af þessu dýptarbili en mjög líklegt er að æðin liggi eftir jaðri dólerítinnskots.
12. (ca 358 m) Gögn um vatnsæð á þessu dýpi merkjast í tveimur hitamælingum af fimm. Í þunnsneið sem tekin er um 8 m ofar greindist kalsítummyndun í pýroxeni. Æðin kemur fram innan líklegs Eldvarpagangs.
13. (380 m) Þrjár hitamælingar af fimm bera vott um vatnsæð á þessu dýpi. Aukning í pýrítmagni kemur fram, auk þess sem vart varð við um 1 l/s skoltapsaukningu. Æðin kemur fram við jaðar svonefnnds Eldvarpagangs.

14. (410 m) Fjórar af fimm hitamælingum sýna æð nærri þessu dýpi (415-425 m). 12 l/s skoltapsaukningar verður vart auk þess sem 25% útslag kemur fram á Geograph á 410 m og annað álika mikið á 415 m dýpi. Áberandi aukning er í pýritmagni á um 410 m og á svipuðu dýpi verður vart aukningar í ummyndun plagióklasa og pýroxens. Einnig einkennir hár borhraði þetta dýpi. Æðin liggur við neðri jaðar dólerítinskots og mögulega er önnur vatnsæð á næstu hraunlagaskilum fyrir neðan, þ.e. í 415 m.
15. (ca 440 m) Aðeins sér votta fyrir mögulegri vatnsæð í einni af fimm hitamælingum, og á svipuðu dyptarbili eykst skoltap óverulega (0,5 l/s). Aukning er í ummyndun plagióklasa. Þessi mögulega æð kemur fram innan um 15 m þykks lags af settúffi.
16. (ca 460 m) Tilveruvott af þessari vatnsæð er aðeins að finna í einni hitamælingu af fimm. Hún kemur fram við innskotsjaðar.
17. (ca 476 m) Aðeins ein hitamæling af fimm gefur vísbendingu um vatnsæð á þessu dýpi. Ef um vatnsæð er að ræða, er hún á mótum Hraunlagamyndunar 2 og Móbergsmyndunar 2.
18. (490 m) Tilvera þessarar vatnsæðar styðst við þrjár af fimm hitamælingum. Áberandi pýríttoppur auk þess sem porur eru yfirgnæfandi fylltar. Vatnsæðin liggur líklegast eftir lagaskilum í móberginu.
19. (ca 515 m) Óvist er um virkni þessarar vatnsæðar þar sem hún sést ekki á hitamælingum. Mjög áberandi er að á þessu dýpi eru allar porur fylltar auk þess sem kalsítummyndun plagióklasa er áberandi. Þessi líklega æð er innan móbergs.
20. (530 m) Allar fimm hitamælingarnar vitna um æð á þessu dýpi, svo og um 2 l/s skoltapsaukning og 15% útslag á Geograph. Allar blöðrur eru hér fylltar af útfellingum.
21. (545 m) Fimm hitamælingar af sjö sýna vatnsæð á þessu dýpi, um 15% útslag á Geograph, 2 l/s skoltapsaukning, áberandi mikið af pýriti, skápur sést á víddarmælingu, wairakít greindist í þunnsneið og vart verður aukningar í kalsítummyndun á plagióklas.
22. (560 m) Prjár af sjö hitamælingum sýna tilveru æðar. Wairakít greinist í þunnsneið mjög áberandi pýríttoppur og toppur í náttúrulegu gamma. 8% útslag á Geograph.
23. (575 m) Allar sjö hitamælingarnar sanna tilveru æðar á þessu dýpi. Um 50% útslag verður á Geograph. Aukning verður í pýriti og ummyndun plagióklasa og glers yfir í kalsít. Líklegt er að K-feldspat hafi fallið út í þessu dýpi svo og wairakít.
Mjög líklega tilheyra fjórar síðastnefndu vatnsæðarnar (21-23) sama æðakerfinu sem nær að því er virðist mestri lekt við 575 m þ.e. á jaðri dólerítsins. Því til merkis er fremur samfellt ummyndunarmynstur (s.s. kalsít, wairakít, pýrit, ummyndun pýroxens og plagióklasa og nær samfellt útslag á náttúrulegu gamma). Pessar æðar fylgja mjög líklega eftir nær löðréttum jaðri dólerítinskots sem borað var í gegnum á dyptarbilinu 575-600 m. Athyglisvert er að neðan innskotsins minnkar ummyndun til muna.
24. (ca 655 m) Ekki skal fullyrt hvort hér sé um vatnsæð að ræða, þar sem engar hitamælingar gáfu slíkt til kynna. Hér er byggt á 4 l/s skoltapsaukningu og svo nokkurra metra breiðu belti þar sem greinileg aukning verður í útfellingum. Ef um æð er að ræða er hún innan hraunlags.

25. (675 m) Þessi æð kemur ógreinilega fram í einni hitamælingu af sjö, en einnig verður vart við um 4 l/s skoltapsaukningu. Aukning verður í ummyndun plagióklasa og pyroxens. Æðin er líklega innan karga á hraunlagaskilum.
26. (700 m) Þessi mögulega æð er ekki studd neinum hitamælingagögnum, heldur verður á þessu dýpi vart við aukningu í útfellingum, kalsítummyndun plagióklasa og síðast en ekki síst um 4 l/s aukningu í skoltapi. Ef um æð er að ræða kemur hún fram við jaðar svo-nefnds Eldvarpagangs.
27. (725 m) Engar hitamælinganna sjö sýna vatnsæð á þessu dýpi. Tvö útslög koma á Geograph, 15 og 20% en einnig er áberandi pýríttoppur á þessu dýpi. Ef um æð er að ræða, fylgir hún eftir jaðri Eldvarpagangsins.
28. (ca 730 m) Ein hitamæling af sjö gefur von um tilveru æðar á þessu dýpi. Nærri sama dýpi (ca 735 m) kemur fram toppur í náttúrulegu gamma og samsvarandi lággildistoppur í neftrónudreifingu. Um 7 m neðar kemur um 70% útslag á geograph. Vart verður við kalsít ummyndun á plagióklasa og á líku dýpi verður vart við að ólivín ummyndast yfir í kvars. Ef um æð er að ræða, er hún við neðri jaðar líklegs Eldvarpagangs.
29. (780 m) Þótt engin hitamælinganna sjö sýni vatnsæð á þessu dýpi, verður þar algjört skoltap í stuttan tíma, smáskápur sést í víddarmælingu og aukning verður í náttúrulegu gamma ásamt lággildistoppi í neftrónudreifingu. Ef um æð er að ræða kemur hún fram við hraunlagaskil.
30. (790 m) Í fimm af sjö hitamælingum má finna vísbendingu um vatnsæð á þessu dýpi. Algjört skoltap verður, en einnig komst gas inn í holuna á þessu dýpi og olli því að holan "spýtti upp úr sér" í einar 10 mínútur. Kalsítummyndun pýroxens og plagióklasa er áberandi, mjög greinileg aukning í pýrítí og wairakíti sem allt eins getur verið K-feldspat. Svellandi-klórít greindist í röntgen á þessu dýpi og aftur varð vart við að ólivín ummyndast í kvars. Æðin kemur fram innan 5 m þykks settúffs.
31. (825 m) Tvær hitamælingar af sjö benda til vatnsæðar á þessu dýpi. Áberandi aukning verður á ummyndun pýroxens og í minna mæli plagióklasa, þar á meðal kalsítummyndunar. Vel afmarkaður toppur er í náttúrulegu gamma ásamt lággildistoppi í neftrónudreifingu. Æðin kemur fram í 10 m þykkum móbergslagi á milli hraunlaga.
32. (860 m) Sex hitamælingar af sjö gefa vísbendingu um æð á þessu bili. Um 5 m ofar verður 15 % útslag á Geograph auk þess sem aukning verður í kalsítummyndun glers og plagióklasa. Toppur er í náttúrulegu gamma mælingu og lággildistoppur í neftrónudreifingu. Æðin kemur fram á mótaum tveggja hraunlaga.
33. (880 m) Merki um æð finnst ekki í hitamælingunum sjö, en útslag sést í náttúrulegu gamma og nifteindadreifingu. Aukning er í kalsítummyndun plagióklasa. Ef um æð er að ræða liggar hún í jaðri basalteitils innan Móbergsmýndunar 3.
34. (905 m) Hitamælingar gefa ekki vísbendingu um vatnsæð, en á þessu dýpi kemur fram 5% útslag á Geograph, auk óverulegrar skoltapsaukningar, toppur sést í náttúrulegu gamma og einnig greindist þar líklegur K-feldspat. Þessi mögulega æð er við neðri mörk basalteitils í neðri hluta Móbergsmýndunar 3.
35. (935 m) Vísbendingu um æð á þessu dýpi gefa þrjár af sjö hitamælingum, 15% útslag á Geograph auk óverulegrar skoltapsaukningar. Aukning verður á ummyndun pýroxens

og plagióklasa, sérstaklega m.t.t. kalsíts, og einnig verður aukning í magni á pýríti. Vatnsæðin kemur fram nærrí efri jaðri svonefnds Eldvarpagangs.

36. (960 m) Visbendingu um æð á þessu dýpi gefa tvær af sjö hitamælingum og 65% útslag á Geograph. Æðin kemur fram innan svonefnds Eldvarpagangs.
37. (975 m) Ekki eru gögnin beisin sem benda til æðar á þessu dýpi, en það helsta er aukin kalsítummyndun plagióklasa og toppur í náttúrulegu gamma og lággildistoppur í nifteindadreifingu. Ef um æð er að ræða kemur hún fram við neðri jaðar Eldvarpagangsins.
38. (1005 m) Aðeins ein af sjö hitamælingum gefur visbendingu um vatnsæð. Áberandi pýríttoppur og mikil af kalsít útfellingum auk kalsítummyndunar plagióklasans. Á þessu bili verður um 6 l/s skoltapsaukning. Möguleg vatnsæð er innan ca 10 m þykks móbergslags.
39. (1035 m) Þrjár af sjö hitamælingum sýna tilveru vatnsæðar auk þess sem 2 l/s skoltapsaukning verður á svipuðu dýpi. Æðin er á hraunlagaskilum.
40. (1085 m) Ein af sjö hitamælingum gefur möguleika á vatnsæð á þessu dýpi. Skörp aukning í pýríti kemur fram. Æðin kemur fram á mótum tveggja hraunlaga.
41. (1100 m) Fjórar af sjö hitamælingum benda til vatnsæðar á þessu dýpi. Áberandi aukning er á pýríti og um 2 l/s skoltapsaukning. Vatnsæðin kemur fram við jaðar nokkurra metra þykks dólerítinnskots.
42. (1145 m) Tilvera æðar á þessu dýpi styðst við fjórar af sjö hitamælingum, áberandi toppi í náttúrulegu gamma og óverulegum lággildistoppi í nifteindadreifingu. Óverulegrar aukningar verður vart í skoltapi. Æðin kemur fram við efri jaðar líklegs 4 m þykks þóleíttinskots.
43. (1152 m) Þrjár hitamælingar af sjö vekja vonir um æð á þessu dýpi auk óverulegrar aukningar á pýríti og ummyndunar pýroxens og plagióklasa. Æðin kemur fram innan hraunlags.
44. (1175 m) Ein af sjö hitamælingum sýna mögulega æð hér. Samkvæmt jarðfræðinni kemur hún fram innan þykks karga á hraunlgaskilum.
45. (1192 m) Hér er aðeins stuðst við eina hitamælingu af sjö. Ef um vatnsæð er að ræða kemur hún fram við hraunlagamót.
46. (1210 m) Aðeins ein hitamæling af sjö gefur vonir um vatnsæð. Áberandi toppur er í náttúrulegu gamma, og aukning er í ummyndun pýroxens og plagióklasa. Æðin kemur fram við efri jaðar Eldvarpagangsins.
47. (1225 m) Ein af sjö hitamælingum bendir til æðar á þessu dýpi. Aukning verður í kalsítummyndun plagióklasa og pýroxens, og óveruleg aukning í pýríti. Æðin kemur fram við neðri jaðar Eldvarpagangsins.
48. (ca 1250 m) Tvær hitamælingar eru til af þessu dýpi, en ekkert svarf náðist vegna skyndilegs skoltaps. Ætla má að æðin sé í nánum tengslum við Eldvarpaganginn sem borholan sker rétt fyrir ofan.

VIÐAUKI II

Erindi um jarðfræði Eldvarpa,

flutt á jarðhitaráðstefnu á Nýja-Sjálandi 1987

THE ELDVORP HIGH-TEMPERATURE AREA, SW-ICELAND.
GEOTHERMAL GEOLOGY OF FIRST EXPLORATION WELL.

Hjalti Franzson

National Energy Authority of Iceland

ABSTRACT

Surface geology and resistivity data show that the eruption episode of 2100-2500 years ago in the Eldvorp region causes a downflow of colder groundwater in the northern part of the "fissure swarm" while an upflow characterizes its central part. The first exploration well EG-2 dissects two vertical dyke feeders; the older one, a dolerite, dates back to less than 12000 yrs while the younger one is the feeder to the 2150 yrs Eldvorp eruption. Hydrothermal alteration pattern shows that these vertical structures provide the main upflow channels of the Eldvorp system. A study of the deposition sequence in veins and vesicles shows evolution stages from a low-temperature to a high temperature system. The last deposition suggests that the system is showing some cooling below 1200 m depth.

INTRODUCTION

The Eldvorp high temperature area is located about 6 km WSW from the Svartsengi high-temperature field on the western part of the Reykjanes Peninsula (fig.1). The field has been investigated by Orkustofnun (National Energy Authority) mainly for the Sudurnes Regional Heating. This paper deals chiefly with the results of the subsurface geology of the first exploratory well drilled in the Eldvorp area. The well discharges 150 kg/sec at 7 bar wellhead pressure, has a maximum temperature of 262 °C and an enthalpy of 1339 kJ/kg. The waters have a salinity of about 2/3 sea-water similar to that found in the Svartsengi field to the east.

SURFACE EXPLORATION

Jonsson (1973, 1978, 1983) mapped in detail the surface geological features in the Reykjanes peninsula, and dated the post-glacial volcanicity. About 2100 to 2500 yrs ago, relatively intense volcanic activity prevailed in a 2.5 km wide zone centering in the main Eldvorp fissure line (fig. 1). Georgsson and Tulinius (1983) mapped the resistivity structures of the western Reykjanes Peninsula. The iso-thermal lines at 600 m depth (fig. 1), which are derived from resistivity values, show a WSW-trending belt of relatively high temperatures culminating at the Svartsengi and Eldvorp fields; this belt coincides with a deeper micro-seismic zone (fig. 1). A marked temperature variation occurs in the area of the Eldvorp fissure "swarm"; anomalously low temperatures in the northeastern part, high in the central part, and a gentle fall in temperature towards the south-east. The anomaly can be explained by the intrusion of apparently cold waters from the northeast along the Eldvorp fissures, whereas in the central part the fissures are providing a passage for ascending hydrothermal fluids which then flow towards southeast. Surface thermal alteration is found at two locations (fig.1), both on or adjacent to an Eldvorp eruptive fissure. The southern one is located on the high temperature resistivity anomaly and is active, whereas the northern one is inactive and is according to the resistivity within a relatively cold area.

DRILLING

The well EG-2 is the first exploration well to be sunk into the Eldvorp high temperature system. It was sited a few tens of meters to the west of the main Eldvorp fissure, at the western end of the low-resistivity anomaly and within the active surface manifestation. It was drilled early 1983 and took 49 days to complete. Although EG-2 was an exploration well it was designed as a production well. The uppermost 60 m were drilled with a percussion drill and cased with a 18 5/8" casing. A rotary drill rig continued with a 17 1/2" bit down to 528 m and a 13 3/8" production casing was cemented in down to 525 m depth. The production part of the well was drilled with a 12 1/4" bit. At 1265 m depth, the bottom of the string became stuck and some 15 m of the string had to be left behind in the well. Further drilling was abandoned due to rapid downflow from aquifers at 535-575 m depth resulting in a rapid heat-up and a subsequent pressure-buildup at wellhead. The well was cased with a slotted 9 5/8" liner down to 1208 m depth. The maximum inclination from vertical is about 3° at 1100 m depth.

SUBSURFACE GEOLOGY

The lithology and the alteration in the cutting samples (taken at 2 m intervals) were identified using binocular stereo-and petrographic microscopes and XRD methods used in identifying alteration minerals. The sampling depth was corrected for the time it took for the cuttings to travel to surface. Geophysical lithological logs were also used to locate formation boundaries. The resolution of the stratigraphy is estimated to be of the order of 1 m for most parts of the well. The primary aim of mapping the geology of the well was to locate the structures that affect the geothermal system.

The simplified geological section of the well (fig. 2) shows the succession to be totally composed of basaltic igneous rocks of two types; accumulative volcanics and intrusive rocks. The former constitutes about 75% of the succession and is divided into subaerial lava sequences intersected by distinct hyaloclastite horizons that represent volcanic eruptions during glaciations. Only a minor part of the hyaloclastites were identified as having been reworked. The sequence can fairly easily be correlated with the stratigraphic sequence found in wells of the Svartsengi field some six kilometers away (fig. 3). The age of the sequence, as evidenced by the number of hyaloclastite horizons (glaciations), ranges from Recent to more than 0.5 m.y. at the base of the Eldvorp borehole.

The uppermost hyaloclastite horizon in the Eldvorp area is very likely to have formed during the last glaciation which ended some 12000 years ago. The overlying lava sequence can be divided into two parts where the upper 30 m belong to the 2150 year old Eldvorp fissure eruption, and the lower 70 m can be related to an older olivine tholeiite shield volcano.

The well penetrated about 25% of intrusives. Their occurrence in the well is unusual because they are most

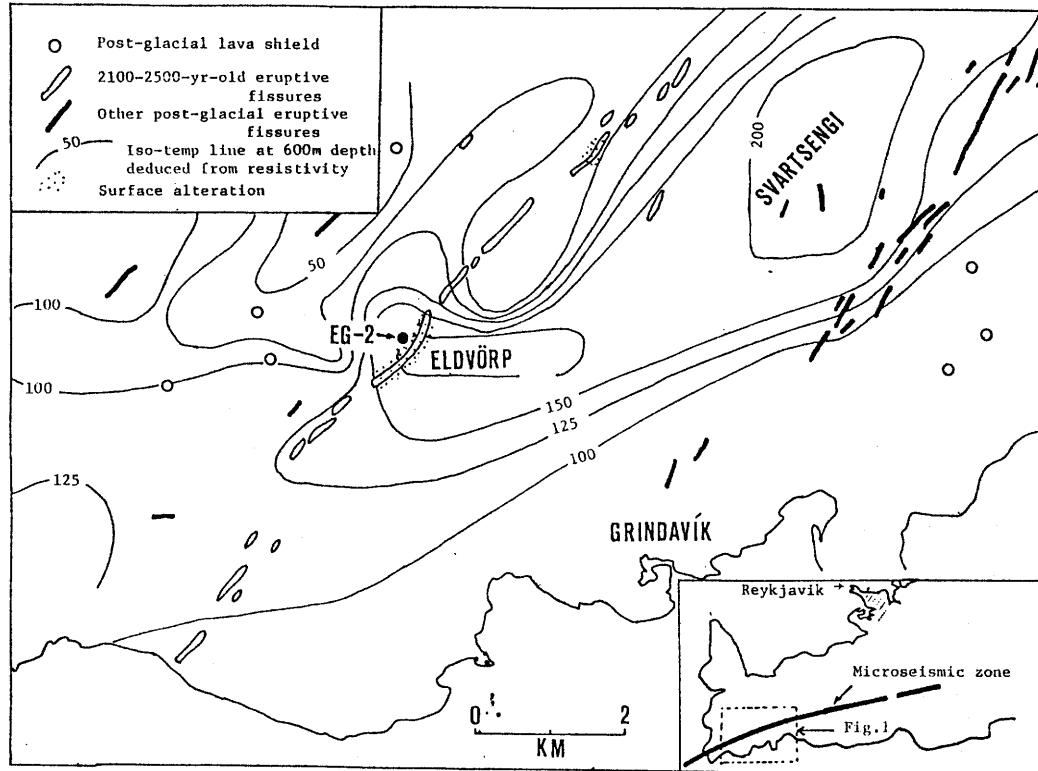


Figure 1. Reykjanes Peninsula with the plate boundary indicated by microseismic zone. Main figure shows postglacial eruption sites (deduced from Jonsson 1978 and 1983), and the iso-temperature lines at 600 m depth b.s.l. (Georgsson and Tulinius 1983).

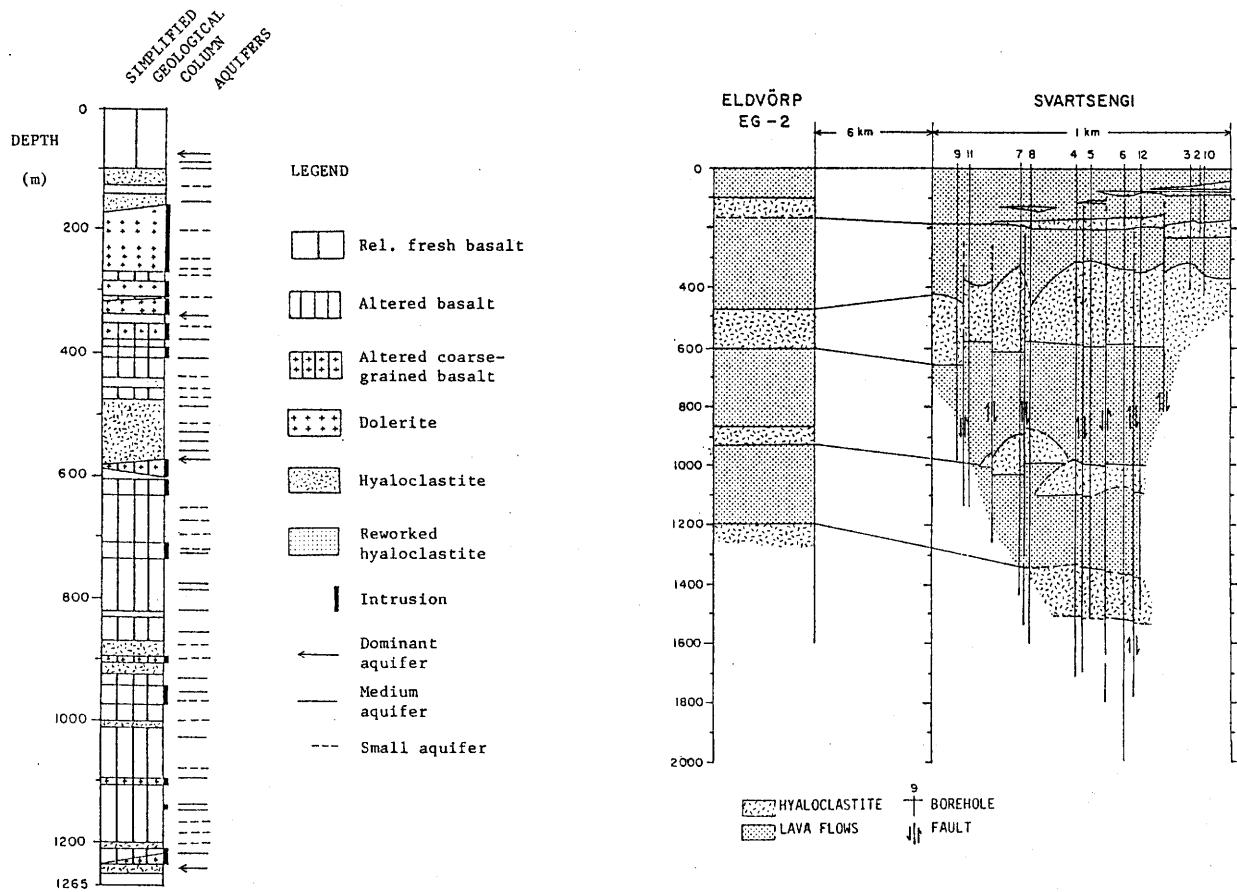


Figure 2. A simplified lithological section of well EG-2 and the location of aquifers.

Figure 3. A correlation of accumulative volcanic units in Eldvorp and Svartsengi fields.

abundant in the upper part of the rock sequence. The intrusives can clearly be divided into three petrographically distinct groups (fig. 4).

The most dominant intrusive rock is a dolerite (olivine tholeiite) found between 150-400 m, at about 600 m, near the bottom of the well. A three layered contact metamorphic zone in the country rock can be related to the boundary of the dolerite (figs. 4 and 5). Closest to the dolerite a clino-pyroxene and magnetite are found gradually giving way to a magnetite and oxidation (probable haematite) assemblage and furthest away from the intrusive boundary only oxidation is observed. Although such a metamorphic relationship has been observed adjacent to intrusions in other high temperature areas in Iceland this example is by far the most conspicuous, and would infer that the intrusion may have been a feeder to a prolonged surface eruption. The metamorphic zonation is present in dominant part of the well which indicates the close proximity of the intrusion. The contact metamorphism can be traced up into the uppermost hyaloclastite horizon which dates back to the last glaciation, so the dolerite is younger than 12000 yrs. The olivine tholeiite compound lava unit (shield volcano) directly overlying the hyaloclastite is a likely surface equivalent of the dolerite feeder.

The second intrusion was identified as the feeder of the Eldvorp eruption of 2150 yrs. Contact metamorphism associated with the Eldvorp feeder is insignificant. The third group contains two thin finegrained basalt intrusions, found in the lowest part of the well.

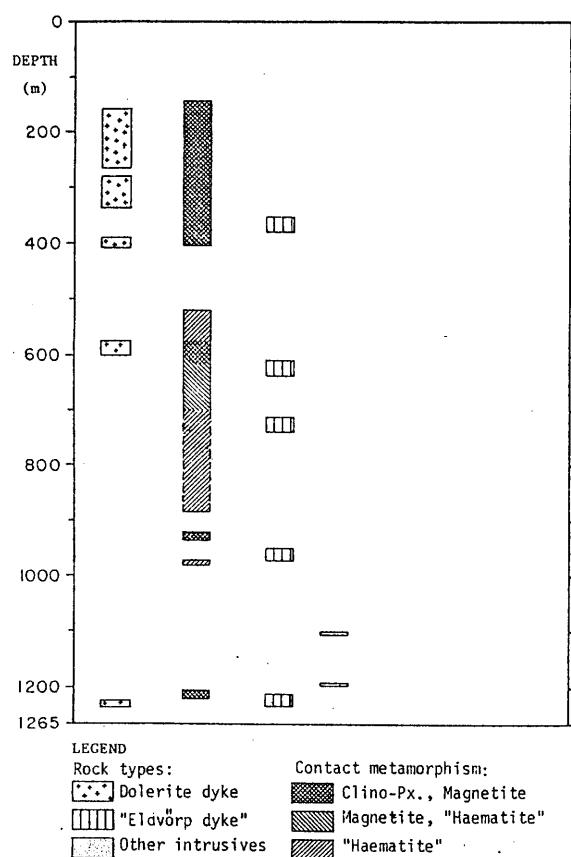


Figure 4. Intrusive rocks and contact metamorphism in EG-2.

AQUIFERS

Various methods were used to locate aquifers (feedpoints) accurately (e.g. circulation loss monitoring, Geograph flowrate monitoring and most importantly a number of temperature logs run at various stages during drilling).

A total of 47 aquifers (feedpoints) were located in the well, of which 29 are within the production part and 18 above. They are divided into 3 size categories; 4 dominant, 21 intermediate and the remaining 23 small. The correlation of the aquifer location with the geology of the well shows the following relationship in table 1.

Geological formation	Aquifers		
	dominant	interm.	small
Within intrusion	1	2	
Intrusion boundary	3	11	10
Within lava	1	1	
Within hyaloclastite	2	4	
Between lava flows	1	4	3
Between lava & hyaloclastite	2	3	
TOTAL	4	21	22

Table 1. The geological setting of aquifers in well EG-2

Table 1 shows that the majority of aquifers are related to intrusions; mainly their boundaries. As shown above the well for most part of its entire length is very near to the two vertical dyke feeders, and that implies that the aquifers lying along the horizontal stratification boundaries must be closely related to the vertical intrusion type aquifers.

ALTERATION

The distribution of alteration minerals is shown in figure 5, along with the analytical methods. In general, if a mineral was found within a 10 m interval, the line in figure 5 is drawn continuous. The figure shows that a fairly intense alteration stage has occurred in the upper half of the well where quartz, albite, chlorite and illite have been found just below 100 m indicating temperatures above 200 °C. A clear connection was seen between the appearance of the intrusive rocks in the well and the highest alteration intensity.

Figure 6 shows the alteration zonation deduced from figure 5. It represents the highest alteration stage reached during the life of the hydrothermal system but not necessarily the present condition. A direct transition from smectite to chlorite occurs at about 125 m depth indicating a very sharp temperature increase to about 230 °C. The disappearance of chlorite and the predominance of mixed layered clays at 440-500 m depth may indicate a reversal in temperature. This proposed temperature reversal is also supported by the reduced intensity in the alteration of the primary minerals and a decrease in vug and vein mineral deposition. The "lower" chlorite zone extends to about 640 m where

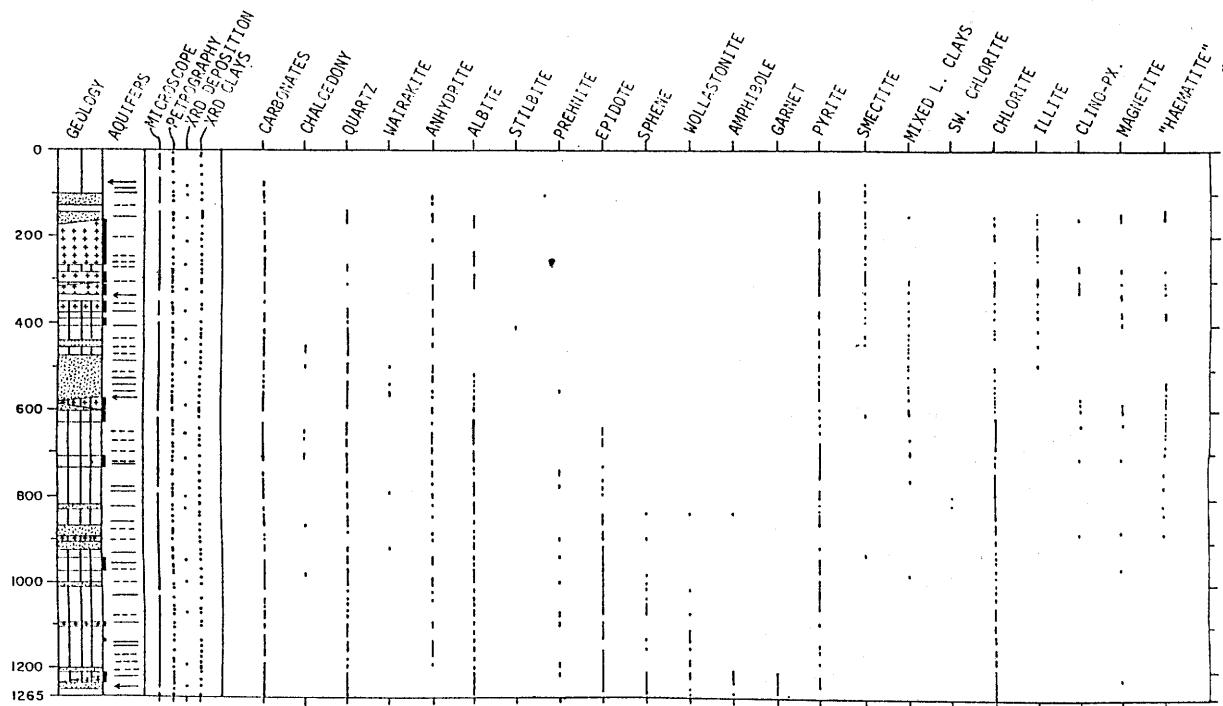


Figure 5. Distribution of alteration minerals in well EG-2.

epidote appears indicating a temperature in the region of 250 °C. The appearance of wollastonite at about 1000 m depth may indicate temperatures surpassing 270 °C and the appearance of both amphibole and garnet at about 1200 m infers temperatures above 280 °C.

The primary rock constituents show similar alteration trends as evidenced by the alteration zones. All volcanic glass and olivines have been altered in and below the smectite-zeolite zone. Pyroxenes and the plagioclases show a greater resistance to alteration. They alter preferentially in the dolerite at 150-400 m depth and then again below 800 m. Clay is the most common alteration of the primary constituents and albite commonly alters the plagioclase. Below about 800 m epidote, sphene and prehnite can be observed to replace plagioclase. It is important to note that calcite is a common alteration product of the primary minerals, especially where aquifers are encountered in the well.

Vein fillings can be divided into three groups: The most common is calcite, found at all depth levels except between 500-700 m. These calcite veins are believed to be the youngest in the system, often enclosing pyrite. Calcite veins often coincide with locations of aquifers.

The second most common vein mineral group is anhydrite, dominantly occurring on its own in relatively large fractures at the boundary of the dolerite. Although these fractures are more abundant in the upper 800 m they are found as deep as 1150 m.

The third and the least conspicuous group includes those veins where neither calcite or anhydrite appear. Above 800 m these include most commonly clays and chalcedony whereas below about 950 m epidote, wollastonite are found and amphibole and garnet below 1200 m.

Figures 5 and 6 give an overall summary of alteration irrespective of time of formation. A study of relative deposition sequence in vesicles and veins, however, makes it possible to determine their relative ages. the sequence of mineral deposition in vesicles and

veins was closely examined in well EG-2. Similar studies have been made in the Svartsengi and the Nesjavellir high-temperature fields (Franzson 1983, Stefansson et al 1983, Franzson and Sigvaldason 1985) and in a Tertiary deeply eroded central complex (Fridleifsson 1983a, 1983b). Figure 7 is based on more than 600 observations

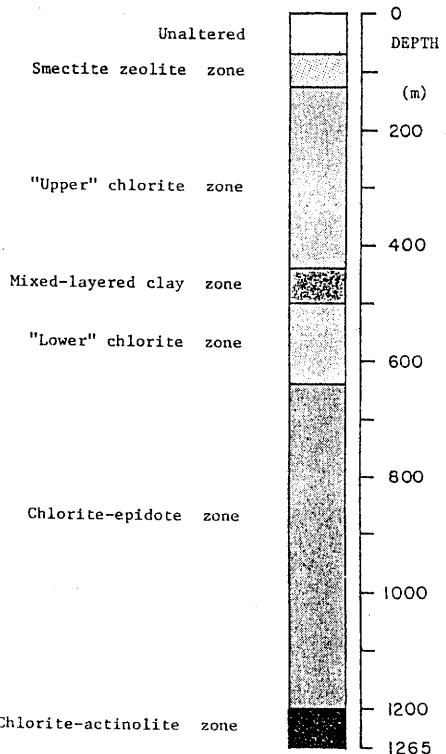


Figure 6. Alteration zones in EG-2.

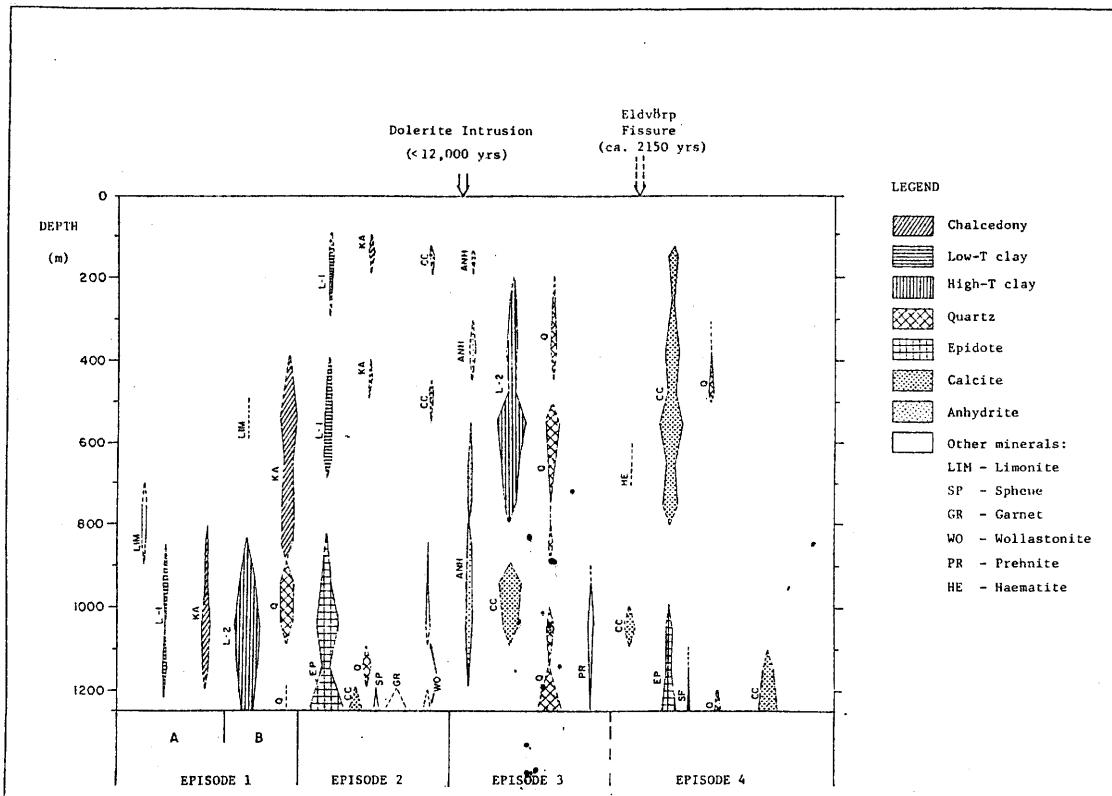


Figure 7. Relative time sequence of mineral deposition in EG-2.

on individual vesicle and vein fillings of which some 450 had a deposition sequence of 2-5 minerals. The width of field of individual minerals is proportional to its relative abundance. Four episodes can be recognized:

During episode 1, which is oldest, low-temperature, limonite clays and chalcedony deposited indicating temperatures of less than 180 °C. These were followed by high-T clays and quartz (>180 °C) up to about 800 m depth while chalcedony deposited between 800 m and to about 400 m depth.

During the second episode heating of the geothermal system continued as epidote appears below 800 m, followed at deeper levels by calcite, quartz, sphene, garnet and wollastonite.

The third episode starts off with a very distinct anhydrite deposition conclusively related to the boundary of the < 12000 yrs old dolerite feeder. A detailed alteration study in the Reykjanes high-temperature field, some 10 km west of Eldvörp, shows that anhydrite is deposited during influx of seawater as it heats up on its descend into the hydrothermal system (Tomasson and Kristmannsdóttir 1972). It is likely that the anhydrite at Eldvörp depicts such an influx and a cooling of the hydrothermal system. Anhydrite was succeeded by the deposition of high-T clays above 800 m and then by quartz indicating elevated temperatures of >180 °C below about 200 m depth.

The onset of the fourth episode is less firmly set, but in the upper part of the section conspicuous calcite deposition occurred which was probably preceded by haematite. Below 1000 m epidote, sphene and quartz were deposited followed by calcite. The calcite was the last major phase to deposit in the hydrothermal system and was as previously observed to be abundant near aquifers. The evidence of the Eldvörp fissure eruption slightly preceding the calcite deposition (c.f. fig. 7) is not conclusive but in places traces of haematite can be seen lining the calcite veins.

DISCUSSION

The close relation between the dykes and the hydrothermal system demonstrates how important magma intrusions (dykes) are in the development of the system in the Icelandic geothermal; whether it is causing a cold groundwater flux into the system or providing channels for its thermal upflow. Figure 8 shows a schematic model of the presently active Eldvörp field where it is envisaged that the fissures of the "Eldvörp swarm" provide downflow channels of cold groundwater, whereas within the central part of the "swarm" an upflow of the hydrothermal system is occurring along the same fractures. It is envisaged that a zone of deposition separates these two systems, at least to some extent.

The near absence of calcite at temperatures above about 280 °C (chlorite-actinolite zone) in other Icelandic geothermal fields implies its instability (Kristmannsdóttir 1979, Stefansson et al. 1982, Franzson et al. 1983). In Eldvörp, however appreciable amounts of calcite is seen as the last phase to crystallize at depth levels where amphiboles and garnets had crystallized earlier. That suggests that present temperatures at the base of the well have been lowered below 280 °C. That is in accordance with the maximum temperatures of about 260 °C measured in the well.

An interesting repetition occurs in the depositional sequence occurs in the Eldvörp system (fig. 7) where a clay deposition is near invariably followed by silica deposition (chalcedony/quartz). This sequence is in turn followed by minerals containing Ca and Fe (calcite + pyrite, epidote, prehnite, etc.). The start of each deposition sequence coincides with a distinct change in the geothermal system, especially following the elevation of the hydrothermal system into relatively unaltered rocks. Four such occurrences can be seen, two in episode 1, one in episode 2, and one in episode 3. Similar sequences have been observed in the Svartsengi and

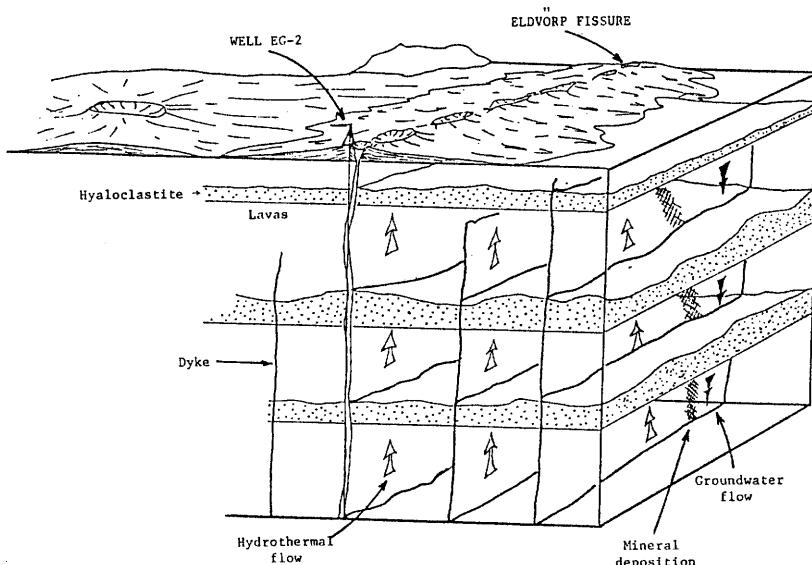


Figure 8. A conceptual geological model of the Eldvorp field.

Nesjavellir high-temperature fields (Franzson 1983, Franzson and Sigvaldason 1985).

The dating of the anhydrite deposition, as being younger than 12000 yrs, emphasizes the relatively rapid changes taking place in the Eldvorp hydrothermal system seen in the deposition sequence following the anhydrite.

MAIN CONCLUSIONS

1. The combination of the resistivity and geological features shows that the Eldvorp "fissure swarm" causes a downflow of cold groundwater in the northern part, but an upflow of the hydrothermal system in its central part.

2. The geology of well EG-2 shows two intrusive dyke events, the earlier one a feeder to a shield volcano of < 12000 yrs, the younger one the dyke feeder to the Eldvorp lava (2150 yrs.)

3. The active hydrothermal system is closely related to the intrusions as the majority of the aquifers relate to fractures created by the intrusions. The hydrothermal alteration is also closely linked with the intrusions especially the dolerite.

4. A study of the deposition sequence in vesicles and veins shows development stages of the hydrothermal system from an initial low-temperature to the present-day high-temperature condition. It also shows that the dolerite dyke first caused a downflow of groundwater followed afterwards by an upflow of hydrothermal fluids.

ACKNOWLEDGEMENTS

I thank Professor D. Freeston and Mr G. Scott for critically reading the paper and Mrs Mary Weston for secretarial help. The permission of the Sudurnes Regional Heating to publish the data is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- FRANZSON, H., 1983: The Svartsengi high temperature field, Iceland. Subsurface geology and alteration. In: Geothermal Resources Council, Transactions, vol 7, p 141-145.
- FRANZSON, H., G. GUDMUNDSSON, J. TOMASSON AND TH. THORSTEINSSON, 1983: Drilling of well RnG-9, Reykjanes high-temperature field, OS-report, 31p. (In Icelandic).
- FRANZSON, H. and H. SIGVALDASON 1985: Nesjavellir, well NG-7. Geology, alteration, geophysical logs and aquifers. OS-85124/JHD-18, 80 p. (In Icelandic with an English summary)
- FRIDLEIFSSON, G. O., 1983a: The geology and alteration history of the Geitafell central volcano, South-East Iceland. Ph.D. thesis, Edinburgh University, 324 p.
- FRIDLEIFSSON, G. O., 1983b: Mineralogical evolution of a hydrothermal system. Geothermal Resources Council, Transactions, vol 7, p 146-152.
- GEORGSSON L.S. AND H. TULINIUS, 1983: Resistivity survey on the western Reykjanes Peninsula in 1981 and 1982. Orkustofnun, OS-83049/JHD-09, 70pp. (In Icelandic).
- JONSSON J., 1973: Sundhnukahraun vid Grindavik. Natturufraedingurinn, vol 43, p 145-153. (In Icelandic with an English summary).
- JONSSON J., 1978: Geological map of the Reykjanes Peninsula: OS-JHD 7831, 303p. (In Icelandic).
- JONSSON J., 1983: Volcanic eruptions in historic time on the Reykjanes Peninsula. Natturufraedingurinn, vol 52, p 127-139. (In Icelandic with an English summary).

KRISTMANNSDOTTIR H., 1979: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300 °C. In: International Clay Conference 1978. Edited by M.M. Mortland and V.C. Farmer. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, p. 359-367.

STEFANSSON, V., A. GUDMUNDSSON, B. STEINGRIMSSON, G. HALLDORSSON, H. ARMANNSSON, H. FRANZSON, T. HAUSSON, 1982: Krafla well KJ-14. Drilling, research and discharge characteristics. OS82061/JHD09, 119p. (In Icelandic).

STEFANSSON, V., J. TOMASSON, E. GUNNLAUGSSON, H. SIGVALDASON, H. FRANZSON AND O. SIGURDSSON, 1983: Nesjavellir, well NG-6. Drilling, research and discharge characteristics. OS-83023/JHD-04, 100 p. (In Icelandic).

STEINGRIMSSON B.S., H. FRANZSON, S.H. HARALDSOTTIR, TH.THORSTEINSSON, G. GUDMUNDSSON, G.O. FRIDLEIFSSON, H. AGUSTSSON AND S. THORHALLSSON, 1983: The drilling of well EG-2, Eldvorp, preliminary report. OS-83107/JHD-42 B, 50p (in Icelandic).

TOMASSON, J. AND H. KRISTMANNSDOTTIR 1972: High temperature alteration minerals and thermal brines, Reykjanes, Iceland. Contr. Miner. Petrol., 36, p 123-134.