



**Icelandexcursions**  
GRAY LINE ICELAND

*Allrahanda ehf*



## **HVERAVELLIR Á KILI – ÁÆTLUN UM NÝTINGU VARMA TIL RAFORKUFRAMLEIDSLU**

Unnið fyrir Hveravallafélagið



*Varmalausnir ehf*  
Greinargerð, júlí 2013



## INNGANGUR

Hér er fjallað um möguleika á nýtingu varma frá borholu sem nefnist VE-04 (vellir, hola nr. 4) og var boruð af Árna Kópssyni á Breiðamel (einnig nefndur Bökunarhóll) við Hveravelli á Kili í ágúst 2010, samkvæmt lýsingu frá Íslenskum orkurannsóknum (ÍSOR) frá sama ári<sup>1</sup>. Árni Kópsson boraði einnig kaldavatnsholu rétt á undan heitu holunni, kölluð VE-03, einnig samkvæmt fyrrnefndri lýsingu frá ÍSOR. Upphafið að vinnu þessarar greinargerðar er rakið til fundar í húsnæði Iceland Excursions (Hópfærðabílar Allrahanda) að Klettagörðum 4, Reykjavík, þann 20. júní, 2013. Á fundinn mættu Gunnar Guðjónsson frá Hveravallafélaginu, Sigurdór Sigurðsson og Þórir Garðarsson frá Allrahanda og Gísli byggingarstjóri.

Heita vökvann eða gufuna frá VE-04 mætti nýta til raforkuframleiðslu en til þess má einnig nýta kalda vatnið til að þétta gufu eða kæla vinnslumiðil í tvenndarvél (binary). Heita vatnið sem kemur frá raforkuframleiðslunni má nýta til upphitun húsa sem eiga að rísa við Hveravelli og er hér gert ráð fyrir 1500 m<sup>2</sup> húsnæði (50 herbergja hótél ásamt eldhúsi og starfsmannaaðstöðu)<sup>2</sup>.

Hér verður gert grein fyrir þeim mælingum sem framkvæmdar hafa verið við heitu holuna (VE-04) ásamt nýlegu afkastamati, umræðum um val á búnaði til raforkuframleiðslu, ásamt kostnaðaráætlun við alla þessa þætti.

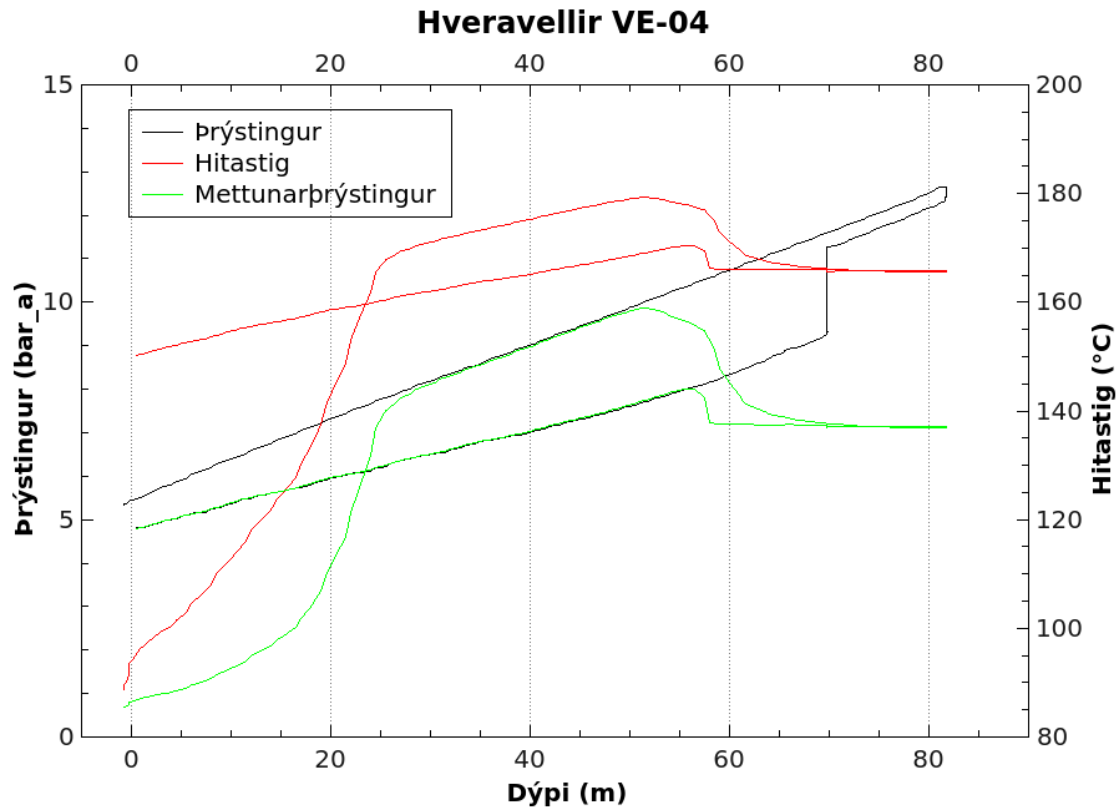
## VARMI FRÁ HOLU VE-04 Á BREIÐAMEL

Heita holan á Hveravöllum, VE-04, var mæld í september 2010 af starfsmönnum ÍSOR (Ragnar Ásmundsson og Sveinbjörn Sveinbjörnsson eldri). Fyrst var mælt niður holu, hitastig og þrýsting og svo upp holu eftir að holan var opnuð og vatni hleypt af henni þar til þurr gufa kom út um stútinn<sup>3</sup>. Kvikmynd sem sýnir hluta af þessu er að finna á:

[http://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=vzyR\\_tjY-Cs](http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=vzyR_tjY-Cs)

Á mynd 1 er sýnd hita- og þrýstingsmæling í holu VE-04 sem Árni Kópsson boraði í ágúst 2010. Hitinn verður hæstur 179 °C. Þegar hleypt er af henni gegnum lítinn stút verður þrýstingur við hann um 4,8 bar (ca. 4 bar yfir loftþyngd, hér eftir táknaður með bar-y). Gufan er á suðuferli niður í 56 m dýpi, en þar er virðist vera gott gufuinnstreymi í holuna.

- 
- 1 Ragnar Ásmundsson, Árni Hjartarson, og Elías Þorsteinsson, *Fýsileiki jarðvarmavinnslu til raforkuframleiðslu á Hveravöllum á Kili*, Greinargerð ÍSOR-10061 (Íslenskar orkurannsóknir, 2010).
  - 2 50 herbergi verða á ca. 1000 m<sup>2</sup>, eldhúsið um 300 m<sup>2</sup> ásamt starfsmannaaðstöðu og um 200 m<sup>2</sup> fyrir geymslur og aðra aðstöðu, samtals um 1500 m<sup>2</sup>.
  - 3 Kvikmynd sem sýnir hluta af þessu er að finna á: [http://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=vzyR\\_tjY-Cs](http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=vzyR_tjY-Cs)



Mynd 1: Hiti (rauður ferill) og þrýstingur (svartur ferill) sýndur við mismunandi dýpi, fyrst í lokaðri holu og svo þegar hleypt var af henni. Útreiknaður mettnarþrýstingur er sýndur stíl samanburðar (grænn ferill).

Á mynd 1 má sjá að það er tvífasa streymi frá 56 metra dýpi (hallatala þrýstingsferilsins gefur um  $580 \text{ kg/m}^3$  eðlismassa) og til samanburðar er vatnssúla ofan á gufuæðinni þegar mælir var að fara niður á meðan holan var lokað, þó rétt tæplega vatnssúla að öllu leyti því vatnið er við suðumark frá um 25 metra dýpi og niður að æðinni. Á mynd 2 sést hvernig útstreymið leit út þegar búið var að tappa vatninu ofan af æðinni.



Mynd 2: Hér er útstreymið orðið nokkuð þurrt, enda fellur þrýstingur hratt um stútinn.

Vermi holunnar má áætla útfrá þeim stað í holunni sem telja mætti að innstreymið sé á vökvaformi og þeim þrýstingi og hitastigi sem mældur var við holutopp í rennsli (sjá t.d. Jarðhitabókina bls. 86<sup>4</sup>). Á mynd 1 sést að hæstur hiti er 179 °C en þegar holan fer í rennsli er hæstur hiti við innstreymisæðina 170 °C og þrýstingur er þar nægilega hár til að halda streyminu öllu í vökvafasa og alveg örugglega við 169 °C. Útreiknað vermi vökvans ( $H_d$ ) er á þessum stað 715 kJ/kg (miðað við 169 °C). Þetta útreiknaða vermi passar vel við mælingarnar við stútinn, því við 4,8 bar þrýsting fæst hitastig 150 °C frá slíkri vermisuppsprettu, sem er í fullu samræmi við melda hitastigið við stútinn. Mettað gufuvermi ( $H_g$ ) við 4,8 bar er 2746 kJ/kg og mettað vatnsvermi ( $H_v$ ) er 633 kJ/kg. Útreiknað gufuhlutfall ( $x$ ) er þá:

$$x = \frac{H_d - H_v}{H_g - H_v} = \frac{715 - 633}{2746 - 633} = 0,0385$$

sem þá þýðir að gufuhlutfallið er 3,85%. Til að hækka gufuhlutfallið er holan opnuð enn frekar en þá streymir meira upp úr holu og þrýstingur lækkar. Holan hefur staðið lengi opin og stendur ekki undir jöfnu streymi þannig, þ.e. hún byrjar að púlsa og rennsli dettur tímabundið niður.

Undirritaðir, Elías og Ragnar frá Varmalausnum mættu til mælinga á holurennslu þann 19. júlí, eftir ráðleggingar frá Sverri Þórhallssyni hjá ÍSOR sem veitti okkur skissu af heppilegri uppsetningu. Sigurdór frá Allrahanda náði í tösku með mælitækjum til ÍSOR og kom þeim í rútu til Hveravalla (tveir þrýstingsmælur og einn hitamælir tengdir skráningatæki). Árni Kópsson útvegaði þrengingu úr 6" í 3" rör, tvo 3" kúluloka og tvö 3" hné. Árni sauð einnig á fjóra 1/2" stúta. Skrúfað var fyrir holu eftir stuttar mælingar á hegðun holunnar, en hún reyndist nokkuð óregluleg; bil milli gosa var frá 12 mínútum til um klukkutíma og gosin mjög misstór og einnig mismikil. Gostími var frá 3 til 7 mínútum. Um 3700 lítra mælikari var komið fyrir við holuna, en það fékkst að láni frá Kaupfélagi

4 Guðmundur Pálmason, *Jarðhitabók. Eðli og nýting auðlindar* (Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag, 2005).





Skagfirðinga<sup>5</sup> ásamt vatnshæðarmæliröri með 1/2" stút fyrir þrýstingsmæli. Guðmundur Sigurðsson og Gunnar Guðjónsson frá Hveravallafélaginu voru til aðstoðar með allt mögulegt, svosem verkfæri, jarðvinnu við holu og færslu mælikars til og frá kerru. Guðmundur Rafnsson frá Umhverfisstofnun veitti einnig aðstoð sína við mælingar og aðra ráðgjöf auk rauðs Ópals, sem er líklega undirstöðufæðutegund. 6" rörið sem hefur lengi verið á holunni var fjarlæggt og rennsli út um holulokann stillt á rólegt rennsli og látið standa yfir nótt.

Þann 20. júlí var holutoppur útbúinn og tengdur mælitækjum til aflestrar, sjá mynd 3. Streyminu frá holu er beint í karið og timburpallur settur yfir það til að lágmarka vatnsúða. Það tókst vel og engir dropar fundust við að ganga gegnum gufumekkin fyrir aftan karið. Þrýstingsmælir með beinum aflestri var tengdur í „svanaháls“ ásamt síritandi þrýstingsmæli. Síritandi hitamælir var tengdur á sama rör og þrýstingsmælir einnig tengdur neðst í rör sem liggur frá botni kars og lóðrétt upp með því, en sú mæling getur gefið upplýsingar um rennslisstöðugleika.



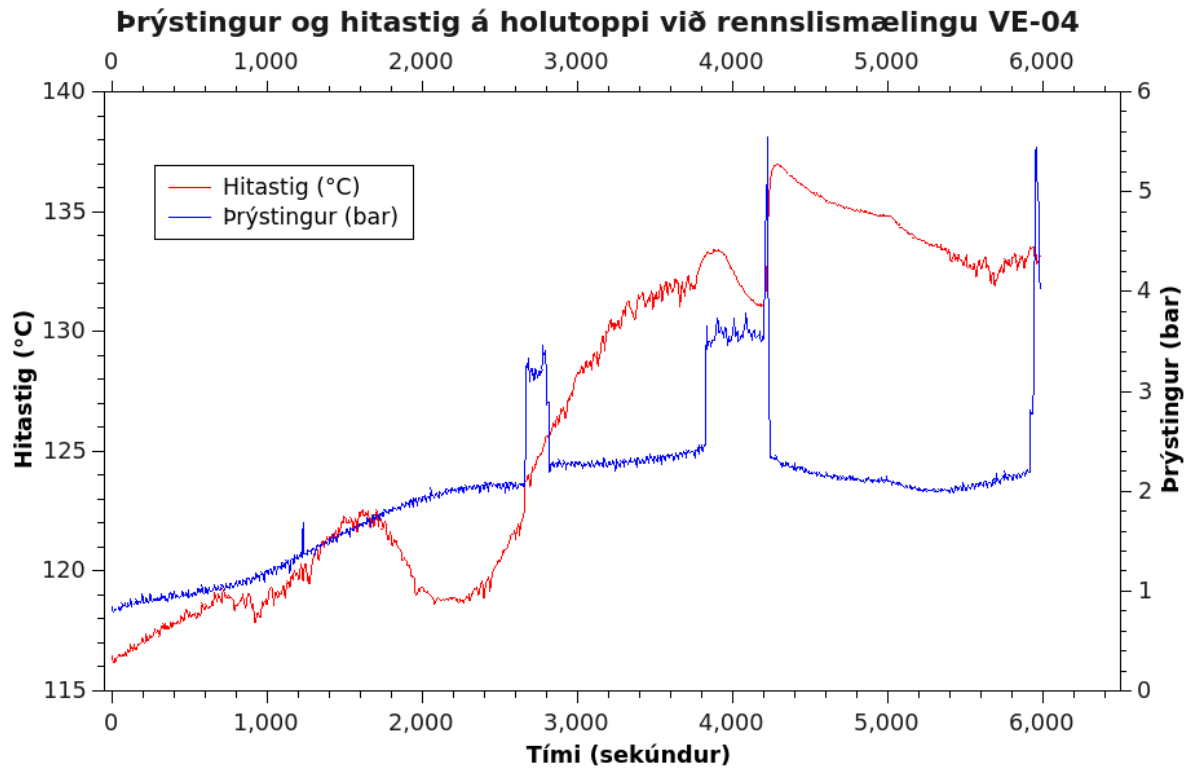
Mynd 3: Uppsetning við holu VE-04 vegna mælinga á rennsli um 3" rör frá 6" holu. Síritandi mælar eru tengdir með köplum.

Hleypt var af holu ofan í karið rétt fyrir hádegi og í fyrstu virtist rennslið geta verið allt að 2 L/s (metið út frá um 20% vatnshæð í kari eftir um 6 mínútur) en svo hægði verulega á og rennslið hætti nánast alveg. Ljóst var að þrengja þyrfti að holunni til að halda stöðugu rennsli og eftir prófanir kom í ljós að stöðugt rennsli fékkst einungis ef þrýstingur á leggnum milli lokanna væri nálægt 2 bar-y. Rennsli þar reyndist yfirleitt nálægt 0,2 L/s. Þetta litla rennsli var auðmælt með vatnsfötu sem var fyllt reglulega og fyllingartími mældur. Dæmi um þrýstingsmælisyrpu sem tók rúmlega einn og

5 Páll Sighvatsson, forstöðumaður vélaverkstæðis KS útvegaði ýmis tengi og kerru. Hilmar Baldursson mjólkurfræðingur hjá Mjólkursamlagi KS (ostagerðinni) lánaði kar og Gísli E. Sveinsson viðhaldsstjóri samlagsins sauð 1/2 tommu stút á rör sem tengdist neðst í karið og nýttist til mats á rennslisstöðugleika.



hálfan klukkutíma er sýnd á mynd 4 ásamt hitastigi. Þegar holan er opnuð lítið eitt eftir stöðugt hámarksrennsli hækkar þrýstingur eitthvað en verður óreglulegur og fellur svo aftur.



Mynd 4: Holutoppþrýstingur og hitastig mælt með síritamælum frá ÍSOR. Þrýstingur verður stöðugur við um 2 bar-y (yfir loftþyngd) við tiltekna opnun holu og hitastigið leitar í 132 °C. Aukin opnun veldur óstöðugu rennsli og púlsun. Tíminn var mældur í sekúndum og tímabilið í heild er rúmlega einn og hálfur klukkutími.

Ef hola er opnuð til fulls eftir tímabil stöðugs rennslis gefur hún mjög vel í stuttan tíma (kvikmynd Gunnars til af þessu og sjá einnig mynd 5) en koðnar svo niður í nánast ekki neitt rennsli, en þessi hegðun er væntanlega sú sama og holan sýndi þegar hún stóð opin. Þetta er þó sennilega eitthvað kröftugra gos sem gæti helgast af því að þegar rennsli hefur verið undanfari goss, þá er engin kæling áberandi frá kaldara vatni sem fellur að holu á litlu dýpi og meginæðin fær að kasta frá sér varma óhindruð eins lengi og hún þolir. Meginæðin nær hins vegar ekki að halda þetta öfluglu rennsli lengi og því þarf að herða að holunni og jafna út varmaaflið með samsvarandi rennslisminnkun.



Mynd 5: Kröftugasta rennslið (gos) fæst í stuttan tíma eftir stöðugt jafnaðarrennsli.

Á sunnudegi 21. júlí var holan skilin eftir í stöðugu rennsli og verður látin standa þannig eins lengi og hægt er til að kanna hvort einhverjar breytingar verða á rennslinu (auðveldast að lesa annað slagið þrýsting af nálarmælimum og safna vatni meðan holan blæs).

Við varmavinnslu til raforkuframleiðslu er reiknað með að kalt vatn frá holu VE-03 verði notað. Útreiknað gufuhlutfall á streyminu þegar það var jafnt við 2.3 bar-y er 6,6%. Við útstreymi beint út í loft (eða karið) er gufuhlutfallið um 15% við 97°C, en þar mældist suðumarkið á Hveravöllum, sem samsvarar um 940 hPa loftþrýstingi. Eðlismassi vökvans sem var mældur í karinu er um 960 kg/m<sup>3</sup> og því er massarennslíð um 0,22 kg/s (massi vökvans um 85% af heildarmassa vatns og gufu).

Upplýsingar um holurnar sem hér eru til umræðu eru í töflu 1.

Tafla 1: Grunnupplýsingar um borun holna VE-03 og VE-04 við Hveravelli

Nafn	Dagsetningar borunar	Fóðring	Borað dýpi
VE-03 (köld hola)	11-12 ágúst 2010	6" í 15 metra	5,5" í 21 metra
VE-04 (heit hola)	13-18 ágúst 2010	6" í 30 metra	5,5" í 88 metra



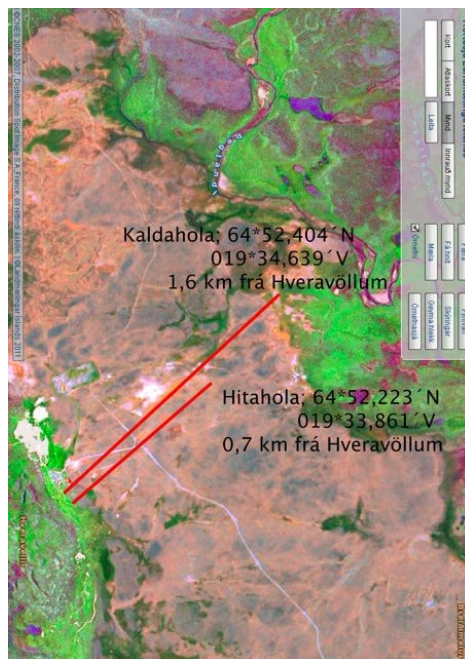


## VINNSLUMÖGULEIKAR

Hægt er að nýta varmaorku úr jarðgufuholum til raforkuframleiðslu á tvo vegu:

1. Nýta gufuna beint, eftir að stillt hefur verið á rétt flæði. Hægt væri að nota einfalda gufuvél, þ.e. bullu sem gengur fram og til baka þegar gufunni er hleypt á til skiptis sitt hvorum megin í strokknum. Einnig mætti nota túrbínu hverfil en þá þarf að gæta þess að hreinsa vel gufuna (nota þurra gufu). Dæmi um slíka vél er 100 kW bakþrýstingstúrbína sem rekin er á Efri-Reykjum í Biskupstungum til margra ára og er nú í eigu Orkuveitu Reykjavíkur (Elliott túrbína). Fleiri leiðir mætti fara, t.d. nota Tesla hverfil, sem er einfalt að smíða en ekki verður farið út í neina tilraunastarfsemi í þessu verkefni.
2. Hleypa öllu streymi úr holunni inn á varmaskipta sem svo eru tengdir tvenndarvél (binary, eða ORC). Þá er hverfill eða þjappa einangruð frá jarðhitavökvanum eða gufunni og minni hætta á vandræðum vegna útfellinga.

Í báðum tilvikum þarf að tengja við rafal til raforkuframleiðslu. Allan varma sem gengur af má nýta í hitaveitu á Hveravöllum. Vegna staðsetningar á hálendinu er heppilegast að hafa frostlög (glýkól) í lokuðu kerfi á öllum hitaveitulögnum. Varaketill gæti hitað upp frostlöginn ef vinnslustopp verður frá holunni og sennilega nærtækast að brenna dísilolíu í varakatlinum.



Mynd 6: Afstöðumynd á Hveravöllum. Mynd: Gunnar Guðjónsson.

### BEIN GUFUNÝTING EÐA NÝTING TVÍFASA STREYMIS

Hægt er að skilja gufuna frá vatni með gufuskilju, en í einföldustu gerð er gufuskilja tankur með röri sem kemur frá holu og niður í tankinn. Gufunni er oft hleypt upp frá tankinum en vökvanum er tappað af neðan til. Gufan hefur þá lágan þrýsting og er leidd inn í e.k. hverfil sem getur snúist við lítið þrýstingsfall. Helst er hér að nefna svonefndar bakþrýstingstúrbínur (nafnið er tilkomið því þessar lágþrýstu túrbínur eru stundum láttnar taka við afgangsgufu frá háþrýstum hverflum). Dæmi um lágþrýstingnýtingu er á Efri-Reykjum í Biskupstungum, þar sem Orkuveita Reykjavíkur hefur





rekið Elliott gufuvél sem tengd er holu ER-23. Sú vél er um 100 kW og notar nokkur kg af gufu á sekúndu. Haft var samband við Elliott í þessu verkefni en gufumagnið sem við höfum er of lágt til slíkrar nýtingar og þyrfti að lágmarki 1,2 kg/s af gufu<sup>6</sup> og eitthvað hærri gufuþrýsting en næðist ef soðin er af svo mikil gufa. Þegar gufuþrýstingur er lækkaður, t.d. með því að opna betur holuna og „flassa“ holuna, stundum nefnd nýsjálenska aðferðin, þá þarf að stækka inntakið í hverfilinn vegna aukins gufurúmmáls og túrbínukostnaður eykst.

Annar kostur sem nefndur var í inngangi þessa kafla er að nota einfalda „gamaldags“ gufuvél, sem hefur t.d. tvö hólf og loka á milli til að stýra bullu fram og til baka í strokki, eða eins og gert var í gufulestum og öðrum gufustýrðum vélum fyrir á öldum og enn í dag í einstaka tilfellum. Hitastigið og þá gufuþrýstingur þarf þó að vera nokkuð hærri en fæst frá VE-04 en á móti kemur að verðlag á svona búnaði, jafnvel með rafli getur verið mjög lágt. Sem dæmi, starfar nokkurskonar „gufutrúboði“ á Indlandi sem hefur birt nokkur myndskreið af hræódýrum gufuvélum sem hann og félagar hans smíða með gamla laginu<sup>7</sup>. Takið sérstaklega eftir myndskreiðinu sem sýnir gufuvélina tengda rafli og getur keyrt á 40 psi, sem samsvarar um 3 bar yfirþrýstingi, en þá heyrir og sést að



*Mynd 7: Eins strokka gufuvél (blá) sem hægt er að tengja við rafal (grænn). Gufan kemur inn um svarta rörið. Kvikmyndir af ýmsum útfærslum þessarar vélar eru á vefnum (sjá tilvísun í texta). Verð er um 7000 USD frá framleiðanda.*

gufuvélina byrjar að erfiða talsvert. Mynd 7 sýnir gufuvélina og 400 V rafal, 50 Hz sem getur gefið 30 kVA (myndi samsvara 30 kW ef vélin nær því afli undir álagi). Ráðlagður gufuþrýstingur á þessa vél er á bilinu 10 til 13 bar, sem er hærri en VE-04 ræður við en sennilega gengi vélin niður undir 6 bar yfirþrýsting sem kannski næðist við lítið streymi. Heilt yfir virðist þessi aðferð, eins einföld og hún þó er, ekki henta við VE-04. Gunnar Guðjónsson hefur einnig fengið myndir sendar af sambærilegum kínverskum gufuvélum í 15 kW og 24 kW útfærslum en þessi nýtingarleið var ekki

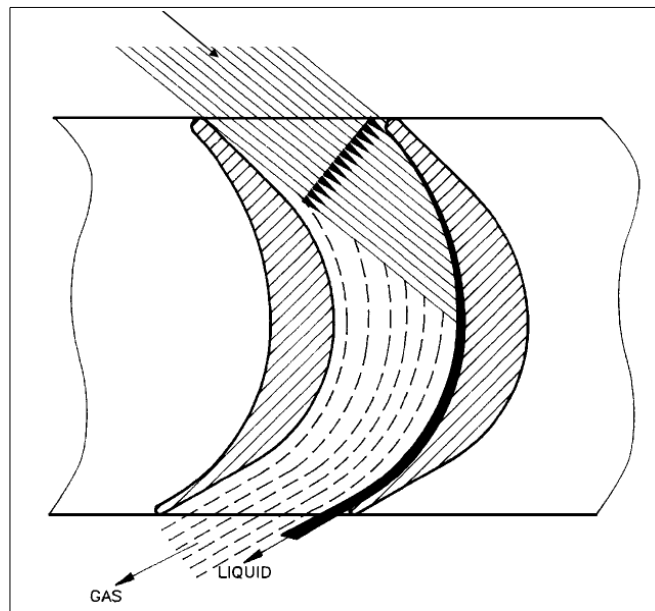
6 Hér er átt við þurrufu, þ.e. 'vapor' eins og yfirleitt í þessum texta

7 <http://www.youtube.com/user/aadhunikglobalenergy?feature=watch>



skoðuð frekar hér.

Að lokum má hugsa sér að nýta tvífasa streymi, þ.e. sambland vatns og gufu. Tesla túrbínan er stundum nefnd í þessu samhengi en hér verður ekki farið út í tilraunaverkefni á þeim nótum eða öðrum. Vélar sem hafa verið notaðar með þessum hætti fyrir jarðhita eru allar of stórar fyrir VE-04 og yfirleitt tilraunaverkefni (í Bandaríkjunum og Mexíkó). Túrbínur sem ráða við tvo fasa hafa einnig verið notaðar í lokaðar hringrásir (tvenndarvélar, sjá næsta kafla) þar sem notaðir eru tvífasa vinnslumiðlar (t.d. er ammóníak-vatnsblanda í Kalina jarðhitavélinni á Húsavík sem var sett upp árið 2000 og Siemens setti upp endurbætta vél árið 2009 í Bruchsal, Þýskalandi sem er einnig tvífasa og notar sömu vökvablöndu). Mynd 8 sýnir hvernig tvífasa streymi skiptist upp þegar því er beint gegnum safnstút að hverfilsblöðum sem aðgreina flæðið þannig að vökvinn rennur yst og gufan (eða gasið) nær miðju. Varmalausnir (Elías og Ragnar) heimsóttu Eið Jónsson og samstarfsmenn hans í Árteigi, þar sem Pelton og Francis hverflar hafa verið smíðaðir fyrir vatnsaflsvirkjanir víða um landið í áratugi. Áhugi var þar á bæ að prófa að setja lítinn Pelton hverfil á streymið við Hveravelli og er sú hugdatta í skoðun.



Mynd 8: Tvífasa streymi sem beint er að túrbínublöðum, vökvinn er yst og gufa innar. Mynd fékkst frá Energent Corporation.

## NÝTING Í TVENNDARVÉLUM

Tvenndarvélar hafa þann kost að hverfillinn er lokaður inni í hringrás með sérvöldum vinnslumiðli (stundum nefndur kælivökvi) sem sýður við hitastig sem henta jarðhitakerfinu, byggir upp þrýsting á gasformi og knýr þannig hverfilinn. Tvenndarvélar eru oft kallaðar 'binary' vélar í daglegu tali eða ORC vélar (ORC er skammstöfun fyrir Organic Rankine Cycle, sem lýsir vinnsluhringrásinni). Kæla þarf vinnslumiðilinn svo hann þéttist aftur í vökva. Aðstæður til kælingar eru góðar á Hveravöllum með nýtingu vatns frá holu VE-03. Á Hveravöllum eru líkur á útfellingum frá jarðhitavökvanum eins og sjá má á hverasvæðinu annars vegar og núna á rörinu sem var ofan á VE-04, sem varð hvítt af kísilútfellingum, sjá mynd 9. Guðmundur Rafnsson benti okkur á að kísillinn á rörinu hefur þrjú lög, hvert þeirra kannski 2-3 mm á þykkt og sennilega eru þetta „kísiláhringir“ síðan borað var árið 2010.



Mynd 9: Holutoppur VE-04 á Breiðamel (Bökunarhóli við Hveravelli. Rörið er hvítt af útfellingum. Mynd: Gunnar Guðjónsson.

Haft var samband við nokkurn fjölda tvenndarvélaframleiðenda í þessu verkefni. Í fyrrnefndri skýrslu ÍSOR frá 2010<sup>8</sup> er fjallað um tvenndarvél frá þýskum framleiðanda og aftur var haft samband við hann og fleiri aðila í Þýskalandi en einnig hefur nú verið haft samband við fjölmarga aðra framleiðendur og viðmælendur í Bandaríkjunum, Kanada, Íslandi, Rúmeníu, Kína og Svíþjóð.

Yfirleitt eru gastúrbínur notaðar í tvenndarvélum, þ.e. hverfillinn er samsettur úr þyrlblöðum sem taka við gasinu og þrýstingur þess ýtir á blöðin sem eru ýmist formuð líkt og skóflur eða skeiðar sem taka við miklu átaki þegar gufan lendir á þeim (þá nefndur 'impulse' eða atlags hverfill) eða þá þyrlblöðin eru formuð líkt og dropar sem ýtast áfram þegar gasið streymir um þá og framhjá þeim (þá nefndur 'reaction' eða gagntaks hverfill). Gasið er sérvalið og hentar oft vel að velja gastegundir með nokkuð stórum sameindum, sem þá þurfa ekki að fara eins hratt til að gefa sama átak og léttari sameindir (eins og vatnsgufan, sem þarf að fara mjög hratt til að ná almennilegu átaki). Þannig er hverflinum hlíft við tæringu eða efnarofi og gasið hvarfast heldur ekki við annað lagnaefni, varmaskipta og dælur.

Einstaka framleiðendur smíða tvenndarvélar sem nota skrúfupjöppur í stað túrbína, en skrúfupjöppur eru algengar í kælivélum (þ.e. kælivarmadælum) til að þétta gas og losa út varma við hærri hitastig en eru á eimunarhliðinni, þaðan sem varminn er tekinn. Í viðsnúnum þjöppuvélum er þrýstingur byggður upp eimunarmegin í vélinni og sá þrýstingur felldur yfir þjöppuna, sem þá snýr henni. Kæla þarf hinum megin við þjöppuna, líkt og í öðrum tvenndarvélum til að þétta vinnslumiðilinn niður í vökvafasa. Eitt þessara þjöppufyrirtækja er ElectraTherm sem selur nú 50 kW tvenndarvélar sem geta við kjörskilyrði gefið 65 kW rafafli (sjá mynd 10). Líkt og vélar frá mörgum öðrum framleiðendum, er ElectraTherm vélin í upprunalegri útgáfu tengd spanraflum sem verður að tengjast fyrirliggjandi raforkukerfi til þess að geta unnið á réttri tíðni og gefið út rétta spennu. Ekkert raforkunet er á Hveravöllum og því hófust viðræður við ElectraTherm um lausnir og nú getur það fyrirtæki boðið útgáfu sömu vélar en með samstilltum rafli (synchronous) og þá keyrir vélin sjálfstætt (er í 'island-mode'). Heilt yfir virðist um vandaðan búnað að ræða sem Varmalausnir geta mælt með til raforkuframleiðslu á Hveravöllum ef nota skal tvenndarvél.

8 Ragnar Ásmundsson, Árni Hjartarson, og Elías Þorsteinsson, *Fýsileiki jarðvarmavinnslu til raforkuframleiðslu á Hveravöllum á Kili.*



*Mynd 10: Tvenndarvél frá ElectraTherm sem kallast Green Machine. Myndin er tekin í Rúmeníu í desember 2012 þar sem jarðhiti er nýttur til raforkuframleiðslu. Á Hveravöllum yrði sennilega vatnskæling og ekki þarf þá að nota loftkæliturn eins og þann sem sýndur er á myndinni aftan við vélargáminn.*

Til er önnur 50 kW tvenndarvél á markaði frá framleiðandanum Infinity Turbine sem hefur stundum verið nefndur í tengslum við íslensk verkefni. 10 kW vél frá því fyrirtæki var skoðuð af undirrituðum á sínum tíma í tengslum við Hveravelli en nú bjóðast stærri útfærslur, 50 og 250 kW (í daglegu tali nefndar gulu vélnar). Helsti markaður þessa fyrirtækis er iðnaður sem getur nýtt heitan glatvarma og ekki er neitt sérstakt gert til þess að útfæra vélnar fyrir jarðvarmanýtingu. Greg Giese frá Infinity benti reyndar á eitt jarðhitaverkefni í Japan keypti þeirra vélar en við eftirgrennslan í okkar tengslaneti í Japan kom í ljós að notkun vélna var ekki í jarðhitaverkefni. Það gerir vélnar ekki óhæfar en huga þarf mun betur að hvernig meðhöndla skal vökvann við inntak. Almennt má segja að Infinity Turbines er fyrirtæki sem býður „samsetta parta“, þ.a. hægt er að kaupa hvoru tveggja einingar samsettar hjá fyrirtækinu og merktar þeim en einnig má velja saman hluti og merkja þá einhverjum öðrum framleiðanda, ef áhugi er á því. Verð á búnaði er í lægri kantinum í samanburði við t.d. ElectraTherm en á mótí kæmi viðbótarkostnaður við útfærslur fyrir jarðhitakerfi auk þess sem erfiðara er að sjá að trygging sé fyrir góðri heildarvirkni alls búnaðar.

Eins og fyrr var nefnt var haft samband við fjölmarga aðra framleiðendur tvenndarvéla. Enginn þeirra reyndist vera með heppilegan búnað fyrir Hveravelli og stundum voru viðræður endaslepptar ef viðkomandi aðilar voru ekki tilbúnir til að selja búnað til Íslands. Svo eitthvað sé rakið hér nánar, þá var vélin frá Dürr-Cyplan sem skoðuð var árið 2010 í samráði við GFZ-Potsdam eitthvað stærri en hentar á Hveravelli auk þess sem Dürr-Cyplan er ekki enn búin að útfæra 'island-mode' vélar sem geta unnið án þess að tengjast stærra raforkukerfi. Enginn þessara aðila sem selja lítil orkuver gátu boðið vélar sem henta jarðhitaverkefnum sérstaklega og útfærslur hinna sem höfðu þá reynslu voru fyrir talsvert stærri vélar, eða frá 250 kW og yfirleitt ekki undir 3 MW.

Í ljósi þess að rennismælingar við VE-04 gáfu einungis 0,22 kg/s virðist fátt annað koma til greina





varðandi nýtingu annað en 10 kW vélin frá Infinity Turbines (IT10xr). Hægt væri að nýta varmi niður í t.d. 100° C og forðast þannig kísilútfellingar við þrýstings- og hitafall í varmaskiptum. Með þessum hætti mætti ná í varmaafli sem samsvarar 65 kJ/s (295,7 kJ/kg \* 0,22 kg/s). Ef nýtingin er um 9% í tvenndarvélinni mætti framleiða 5,8 kW af rafafli. Hægt væri að hlaða rafhlöður meðan nýting er lítil og eiga þannig möguleika á meira afli tímabundið.

IT10xr tvenndarvélin er afhent opin (ekki í gámi) á sleða eða láréttum undirvagni. Vélin samanstendur af plötueimi, plötueimsvala, einhjóla hverfli sem er fasttengdur samfasa rafli (með síseglum sem þá leyfa keyrslu án tengingar við raforkunetið), hringrásadælu fyrir vinnslumiðil og tanki fyrir vinnslumiðil, allt samsett á ramma. Vélin tæki heitan vökva inn á sig frá varmaskiptilykkju milli jarðhitavökva og eimis, til að vernda eiminn fyrir útfellingum eða öðrum mögulegum jarðvökvatengdum vandamálum. Vélin er afhent án vinnslumiðils, en hún getur nýtt R134a og R245fa. Kerfið er að öllu leyti samsett og lagnir þrýstingsprófaðar. Stýringar eru handvirkar.

Þyngd: 422 kg uppsett. Lengd er 1550 mm, breiddin 788 mm og hæð 1753 mm.

## BORUN HÁHITA HOLU

Þegar borað er í háhitasvæði er mikilvægast að reyna að koma í veg fyrir að hinn mikli varmi leiti út í jarðlöggin í kringum holuna og brjóti sér leið upp til yfirborðs. Hættan er fyrst og fremst sú að mikill hiti að neðan nái til kaldara vatns ofar sem þá snöggsýður og gæti valdið miklum sprengingum neðanjarðar. Fóðringar eiga þá til að spýta upp í loftið og hola hrynur í kjölfarið og skilur eftir sig lítinn gíg. Slíkt hefur tvisvar gerst á Íslandi, annars vegar í Kröflu (hola 4, Vítismór) og í Krýsuvík (hola 14, Seltún). Gígurinn í Kröflu kallast í dag Sjálfskaparvíti og er nokkuð tilkomumikill. Í Krýsuvík var um 50 ára gamla hola að ræða, þ.a. hættan er ávallt til staðar í vanhönnuðum holum. Í hvorugu tilfellinu urðu slys á mönnum en mannvirki eyðilögðust, holur, fóðringar og aðstöðuskúr svo eitthvað sé nefnt. Það er áhættumat Varmalausna að hola VE-04 sé á stað þar sem jarðlög eru nokkuð opin og þrýstingur æðarinnar er ekki mjög mikill, eða undir 10 bar á um 60 metra dýpi, þar sem jarðlagaprýstingur er væntanlega hærri (með þeim undantekningum sem fylgja sprungum sem augljóslega ná til yfirborðs, því svæðið kringum holuna er þakið náttúrulegum gufuaugum). Þrýstingur helst þá ýmist niðri eða er hleypt upp til yfirborðs gegnum opnar sprungur í jarðlögum og hætta á gufusprengringum því lítil. Efstu fóðringasamsetningar gætu þó verið farnar að tærast (áhrif súrefnis og vætu frá borun) og í versta falli, ef lokað væri fyrir holu í hámarks púlsun, þá gæti þrýstingurinn hreyft við efstu fóðringum og jafnvel ýtt þeim eitthvað upp.

Þessi texti um háhitaholur og borun þeirra er í Jarðhitabók:

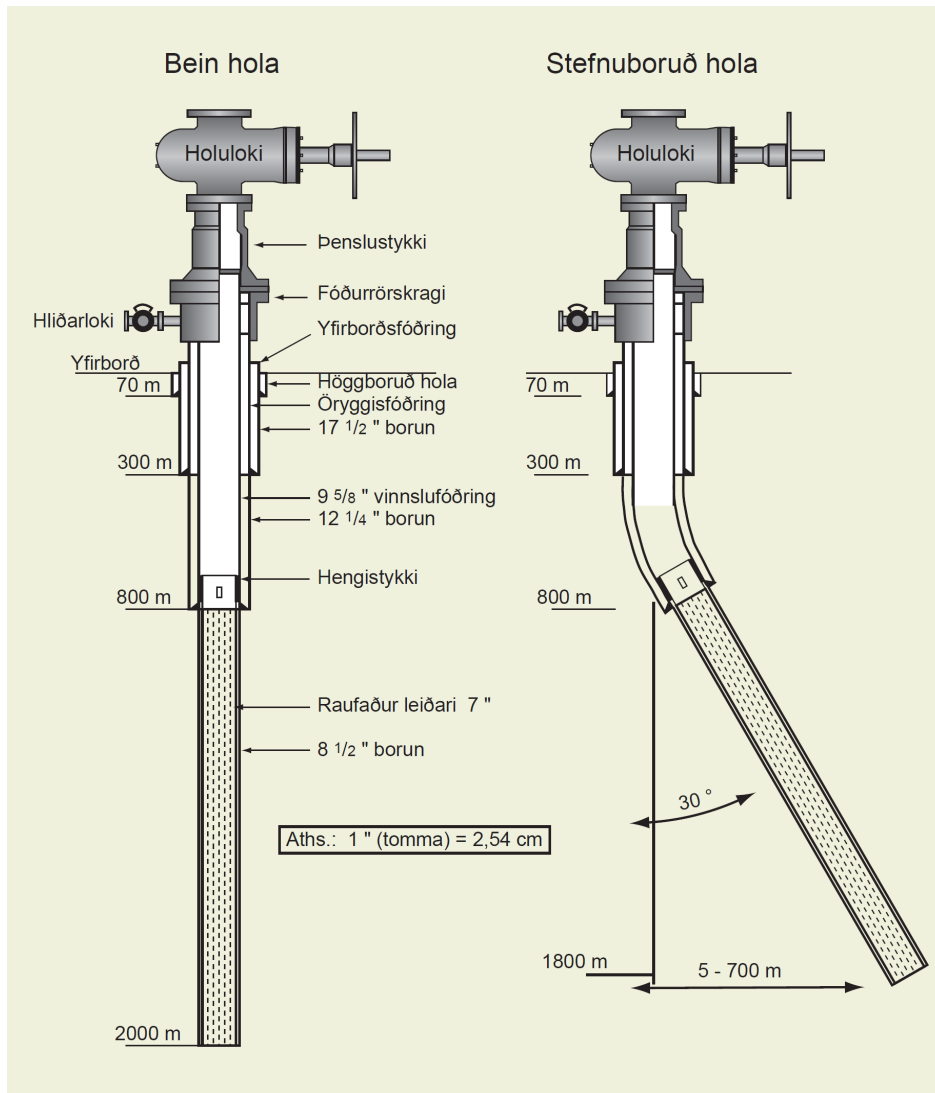
*„Í háhitaholum þarf að sjá til þess að fóðurrör nái hverju sinni nægilega langt til að standast þann þrýsting sem búast má við, og þarf því að steypa hvert nýtt fóðurrör innan í þeim ytri eftir því sem borun fer dýpra í jarðhitakerfið.*

*Algengt fyrirkomulag fóðurröra í dæmigerðri háhitaholu er sýnt til vinstri á mynd 11. Efst er yfirborðsfóðring sem sett er í holuna þegar búið er að bora 30-70 m niður. Hún er venjulega um 46 cm víð (18 tommur) og er ætlað að stýra boruninni í efsta hluta holunnar. Venjulega er borað fyrir yfirborðsfóðringu með höggbor. Síðan tekur við öryggisfóðring sem nær niður á um 300 m. Þar innan í er vinnslufóðring niður á 6-800 m. Þessar fóðringar eru settar í holuna þegar réttu dýpi er náð, og eru þær allar steypar fastar með því að dæla steypu niður í holuna innan í fóðringunni og upp utan með henni milli fóðringar og holuveggjar. Neðst í steypu fóðurrörin er í háhitaholum oftast nær sett hengistykki og í það hengd götuð eða raufuð fóðurrörslengja sem kallast leiðari. Þannig eru háhitaholur járnklæddar frá yfirborði niður til botns. Tilgangur leiðarans er að hindra að holuveggurinn hrynji saman inn í holuna, en götin gera heita vatninu og gufunni kleift að*



komast óhindrað inn í holuna og upp eftir henni. Leiðarinn er yfirleitt 18 cm (7 tommur) að þvermáli.

Í lághitaholum á Íslandi þar sem jarðlög eru traust er fódurinn fyrst og fremst til þess gerð að kalt vatn komi ekki inn ofarlega í holuna. Í háhitaholum þarf að vísu einnig að útiloka kalt innstreymi, en þar er megingangurinn að tryggja að fódurrör og holutoppur þoli hinn háa þrýsting sem getur orðið í háhitaholum. Einnig þarf steypa fódurrörið að ná svo langt niður að bergið sjálft standist þrýstinginn og ekki sé hætt á að gufan ryðjist út meðfram fódurrörinu.



Mynd 11: Hefðbundin hönnun á háhitaholu. Mynd úr Jarðhitabókinni, bls. 129.

Fódurrörin ofan við leiðarann eru kirfilega steypst föst með sementsblöndu sem dælt er niður innan í rörinum og upp með þeim að utan þar sem hún storknar milli bergs og rörs. Ýtt er á eftir sementsblöndunni með vatni þannig að hún fari öll út um neðri enda fódurrörsins. Rúmmál sementsblöndunnar þarf að svara til þess rúmmáls sem fylla á upp í utan við fódurrörið. Til þess að geta reiknað það rúmmál út þarf að mæla vídd holunnar áður en rörin eru látin í hana. Þá er einnig mjög mikilvægt að steypingin taki ekki of langan tíma því að annars er hætt á að sementsblandan storkni áður en hún er komin á sinn stað utan við fódurrörið. Steypingin er mikið vandaverk og einungis á færi reyndra manna að stjórna henni.



*Þeir eiginleikar sementsblöndunnar sem mestu skipta fyrir steypingu fódurröra eru eðlismassi, storknunarhraði og styrkleiki. Mismunandi eiginleikar henta eftir því hvort um er að ræða yfirborðsfóðringu, þar sem steypan má vel storkna hratt, eða dýpri fóðringu þar sem draga þarf úr storknunarhraða svo að tími vinnist til að koma sementsblöndunni fyrir. Eðlismassi hennar hefur áhrif á þrýstinginn í kraganum milli fódurrörs og bergs. Sé hann hár er meiri hættan en ella á að steypan þrengi sér út í bergið og tapist að einhverju leyti í stað þess að fylla kragann. Ýmis efni eru notuð í sementsblönduna til þess að hún fái rétta eiginleika í hverju tilviki fyrir sig.“*

Ef um 300 til 500 metra djúp háhitahola yrði boruð á Breiðamel, nálægt VE-04, þá þarf fyrst að áætla þrýstinginn sem vinnslufóðring þarf að þola. Ef vinnslufóðring nær niður á 250 m dýpi, þá þarf þrýstingspolið (utan frá) að vera yfir 75 bar (eðlismassi jarðlaga að jafnaði tæplega 3000 kg/m<sup>3</sup>). Þrýstingspol inni í slíkri fóðringu er mun hærra. Hitastig jarðvarmavökva sem héldist niðri við þennan jarðlagaprýsting væri um 290 °C (vatn sem sýður við 290 °C gefur nálægt 75 bar þrýsting). Efnahitamælingar (kvarshiti) frá Hveravöllum gefa væntingar um 190 til 265 °C<sup>9</sup> í jarðhitakerfinu, eða þeim hluta þess sem er ábyrgur fyrir yfirborðsvirkninni. Samkvæmt því ætti þrýstingur jarðhitavökvans ekki að vera hærri en um 50 bar og á þeim forsendum væri í lagi að miða við 250 m fóðringu. Ef við færum ódýrustu leiðina og miðum einungis við 50 bar, þá þyrfti fóðringin að ná niður í 167 m. Holan þarf ekki að vera mjög víð til að standa undir raforkuframleiðslu á Hveravöllum sem dugar hótélrekstri og öðru tilheyrandi. Sem dæmi, ef jarðhitakerfið sem tengist holunni væri 200°C, þá væri varmi í hverju kg sem nýtt væri niður í 100 °C um 433 kJ. Með einungis 10% nýtingu gæfi þetta kg af jarðvarmavökva um 43 kW. Rennsli frá holunni þarf því ekki að vera mikið en við miðum hér við 5 kg/s (óþekkt ennþá hversu mikið hlutfall verður gufa, en það ræðst af vermi holunnar).

## NIÐURSTADA OG SKÝRINGAR Á KOSTNAÐI

Varmalausnir undirbjuggu þetta verkefni með það í huga að geta framleitt um og yfir 50 kW rafafis fyrir Hveravelli, hvoru tveggja fyrir núverandi aðstöðu og framtíðar gístiaðstöðu. Raunin varð hins vegar önnur og hola VE-04 getur ekki staðið undir nema um tíunda hluta þess sem fyrst var talið hugsanlegt. Holan blekkir svolítið með öflugum gosum þar sem rennsli margfaldast í stuttan tíma (algengt einkenni púlsandi hola) en því miður reyndist ekki hægt að viðhalda því rennsli eða sambærilegu til lengri tíma. Mjög lítið úrval er af vélum til raforkuframleiðslu sem nýta þetta lítinn varma og helst má nefna gufuvélar sem þá þurfa mun hærri þrýsting en VE-04 gefur, eins og hér hefur verið rakið. Einungis einn framleiðandi tvenndarvéla getur útvegað vél sem hentar fyrir núverandi holurennisli á Hveravöllum og það er 10 kW tvenndarvél frá Infinity Turbines sem kostar 50 þúsund USD (6 milljónir króna). Hverfill vélarinnar er tengdur jafnspennu rafli sem býður upp á þann möguleika að hlaða rafhlöður beint og taka allt afl af þeim rafhlöðum, þá gegnum riðlara (inverter) þegar það á við.

Við hverja virkjun, hversu lítil sem hún er, verður talsverð umframvinna með tilheyrandi kostnaði, þar með talið bygging, rafbúnaður, jarðvegsvinna og lagnir. Það væri því athugandi að bora nýja háhitaholu sem gæti gefið meira rennsli og eitthvað hærri kerfishita og þar með aukið vermi sem ætti að gera raforkuvinnsluna hagkvæmari. Þá væri ýmist hægt að nýta gufuna beint við hærri þrýsting eins og rakið var hér að ofan eða framleiða meira magn í tvenndarvél.

Við virkjanaframvæmdir er oft talað um stofnkostnað á hverja afleiningu, t.d. krónur á Watt. Vatnsaflsvirkjanir eru ódýrastar og mega í dag kosta á bilinu 200 til 300 kr/W. Jarðvarmavirkjun er aðeins dýrari og kostar kannski allt að 400 kr/W. Þessi verð miðast við stærri framkvæmdir. Ef við

9 Árni Hjartarson og Magnús Ólafsson, *Hveravellir : könnun og kortlagning háhitasvæðis*, Skýrsla ÍSOR-2005/014 (Reykjavík: Íslenskar orkurannsóknir, 2005), <http://www.os.is/gogn/Skyrslur/ISOR-2005/ISOR-2005-014.pdf>.

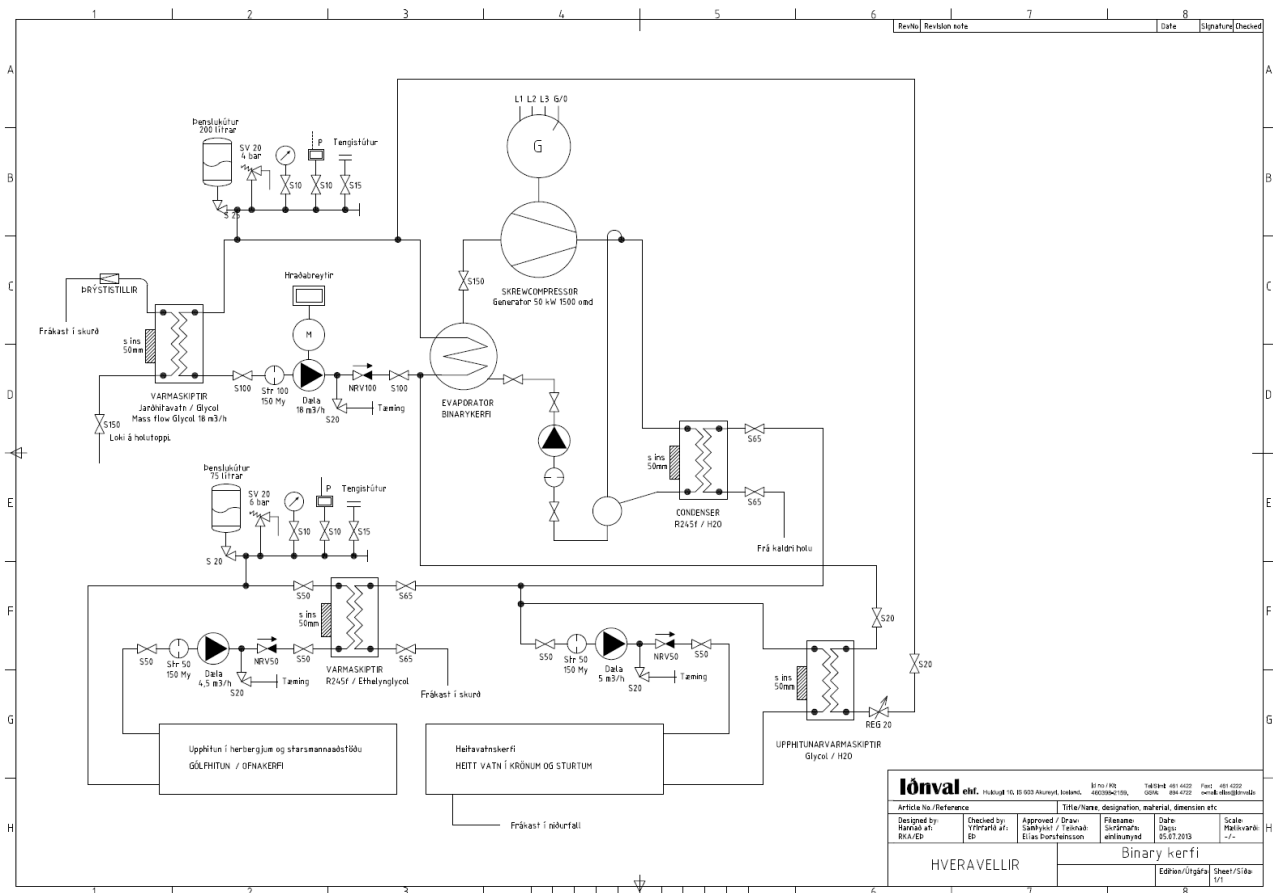


reiknum með að hvert Watt á Hveravöllum kosti 800 kr þá væri heildar kostnaður við 50 kW virkjun (ásamt borun) um 40 milljónir.

Varmalausnir áætla að kostnaður við ýmsar framkvæmdir tengda virkjuninni (hönnun, bygging, rafbúnaður, jarðvegsvinna og lagnir) verði á bilinu 5-7 milljónir. Vélbúnaður til framleiðslu á 50 kW í tvenndarvél reyndist á bilinu 20 til 34 milljónir króna en ef hægt væri að nýta gufu beint úr háhitaholu gætu verð orðið hagstæðari. Samkvæmt þessu mætti borun háhitaholu ekki kosta meira en 15 milljónir (svo heildarkostnaður verði undir 40 milljónum). Almennt er stofnkostnaður við jarðvarmavirkjanir að skiptast nokkurn vegin til helminga milli borunar og virkjunarbúnaðar.

Ekki verður farið nánar út í hvern einasta kostnaðarlið meðan ennþá er óljóst hvort farið verði í frekari boranir og að auki hefur nákvæmari útfærsla á staðsetningu virkjunar ekki verið ákveðin. Það er þó mat Varmalausna að 50 kW jarðvarmavirkjun ætti að geta risið fyrir 40 milljónir króna, að öllu meðtöldu. Hið forkveðna verður þó ekki of oft endurtekið: borun til jarðvarmaöflunar er áhættustarfsemi. Hægt væri að minnka áhættu með fleiri grunnum holum sem færu þá ekki í hæsta hitann en rennsli þeirra myndi bætast við það sem fyrir er úr VE-04. Þessar holur þyrftu strangt til tekið ekki að hanna sem háhitaholur en viðbótar þyngingar eða yfirborðsfóðringar væru skilyrði til að tryggja öryggi.

Hugsanleg útfærsla á varmanýtingu til raforku- og varmavinnslu á Hveravöllum er sýnd á mynd.



Mynd 12 Tillaga að varmanýtingu fyrir 50 kW tvenndarvél og til hitaveitu í framtíðar gistiðstöðu. Borholuvökvinn er meðhöndlaður í aðskildum varmaskipti sem hægt verður að þrifa. Raforkan færi ýmist inn á rafhlöðubanka eða til beinnar nýtingar. Hitaveituvatnið er upphitað kalt vatn úr holu VE-03 sem er fyrst notað til kælingar á tvenndarvélinni.





Varmalausnir ehf  
Greinargerð, júlí 2013

### **HEIMILDALISTI**

Árni Hjartarson, og Magnús Ólafsson. *Hveravellir : könnun og kortlagning háhitasvæðis*. Skýrsla ÍSOR-2005/014. Reykjavík: Íslenskar orkurannsóknir, 2005.

<http://www.os.is/gogn/Skyrslur/ISOR-2005/ISOR-2005-014.pdf>.

Guðmundur Pálmason. *Jarðhitabók. Eðli og nýting auðlindar*. Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag, 2005.

Ragnar Ásmundsson, Árni Hjartarson, og Elías Þorsteinsson. *Fýsileiki jarðvarmavinnslu til raforkuframleiðslu á Hveravöllum á Kili*. Greinargerð ÍSOR-10061. Íslenskar orkurannsóknir, 2010.