



**Haustráðstefna
Jarðfræðafélags Íslands**

Jarðhiti og jarðverkfræði

**Heiðursgestir
Birgir Jónsson, Ingvar Birgir Friðleifsson
og Ragna Karlsdóttir**

Ágrip erinda

Haldin í sal Orkuveitu Reykjavíkur
Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík
18. nóvember 2016



**Haustráðstefna
Jarðfræðafélags Íslands**

Jarðhiti og jarðverkfræði

**Heiðursgestir
Birgir Jónsson, Ingvar Birgir Friðleifsson
og Ragna Karlsdóttir**

Ágrip erinda

Haldin í sal Orkuveitu Reykjavíkur
Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík
18. nóvember 2016

Umsjón:

Sigurlaug María Hreinsdóttir, Lúðvík E. Gústafsson,
Erla María Hauksdóttir og Esther Ruth Guðmundsdóttir

Dagskrá Haustráðstefnu JFÍ, 18. nóvember 2016

08:30 – 09:00 Skráning

Fundarstjóri Esther Ruth Guðmundsdóttir

- 09:00 – 09:15 Setning
Sigurlaug María Hreinsdóttir
- 09:15 – 09:30 Gas í grjót - Niðurdæling jarðhitagass á Hellisheiði
Ingvi Gunnarsson
- 09:30 – 09:45 Búrfellsvirkjun II jarðtækni og jarðfræðiaðstæður
Haraldur Hallsteinsson
- 09:45 – 10:00 Jarðfræði Esju og orkumál
Ingvar Birgir Friðleifsson
- 10:00 – 10:15 Three-Dimensional Geological Modeling of Hellisheidi Geothermal Field using Leapfrog Geo
Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir

10:15 – 10:45 Kaffi

- 10:45 – 11:00 Sources and Reactions of Volatiles in Icelandic Thermal Fluid
Andri Stefánsson
- 11:00 – 11:15 Assessing volatile heterogeneity in the Icelandic mantle and transport of volatiles from the mantle to surface
Sæmundur Ari Halldórsson
- 11:15 – 11:30 Jarðgöng á Íslandi, með áherslu á Norðfjarðargöng
Birgir Jónsson
- 11:30 – 11:45 Stutt lýsing á „Geothermal Risk Mitigation Facility“ sjóðnum og uppbyggingu jarðhitavirkjana í Austur Afríku
Gísli Guðmundsson
- 11:45 – 12:00 Jarðhitaleit og heitavatnsöflun í Hoffelli í Hornafirði. Staða jarðhitaleitar fyrir hitaveitu á Höfn og nágrenni
Heimir Ingimarsson

12:00 – 13:00 Matur

Fundarstjóri Erla María Hauksdóttir

- 13:00 – 13:15 Yfirlit um borun IDDP-2 djúpborunarholu á Reykjanesi 2016
Guðmundur Ómar Friðleifsson
- 13:15 – 13:30 Staða kolefnishringrásarinnar á Jörðinni. Hvað er til ráða?
Sigurður Reynir Gíslason
- 13:30 – 13:45 CarbFix verkefnið: Binding kolefnis í basalti
Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir
- 13:45 – 14:00 Jarðfræðingar og mannvirkjarannsóknir
Þorbjörg Hólmgeirsdóttir
- 14:00 – 14:15 „Lága viðnámið“
Ragna Karlsdóttir

14:15 - 14:45 Kaffi

14:45 – 15:00 Lághtarannsóknir á Skeiðum

Árni Hjartarson

15:00 – 15:15 Heildarsýn Hengilsins (endurskoðun hugmyndalíkans af Hengilssvæðinu)

Anette K. Mortensen

15:15 - 15:30 Boranir við Dælislaug í Fljótum

Þórólfur Hafstað

15:30 – 15:45 Phonolite-hosted zeolite deposits in the Kaiserstuhl Volcanic Complex, Germany

Tobias Weisenberger

15:45 - 16:00 Umræður

16:00 - Móttaka í boði Jarðfræðafélags Íslands

Efnisyfirlit

Dagskrá Haustráðstefnu JFÍ, 18. nóvember 2016.....	i
Efnisyfirlit	iii
Ávarp formanns	v
SOURCES AND REACTIONS OF VOLATILES IN ICELANDIC THERMAL FLUID	3
Andri Stefánsson ¹ , Sæmundur A. Halldórsson ¹ , David Hilton ² , Árný E. Sveinbjörnsdóttir ¹ , Jaime D. Barnes ³ , Shuhei Ono ⁴ , Jan Heinemeier ⁵ , Jens Fiebig ⁶ , Finnbogi Óskarsson ⁷ , Peter Torssander ⁸ , Stefán Arnórsson ¹	
Heildarsýn Hengilsins - Uppfært hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu á Hellisheiði	4
Anette K. Mortensen, Bjarni Reyr Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson, Ingvi Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Edda Sif Aradóttir, Gretar Ívarsson	
JARÐHITARANNSÓKNIR Á SKEIÐUM	5
Árni Hjartarson	
Three-Dimensional Geological Modeling of Hellisheidi Geothermal Field using Leapfrog Geo	6
Bastien Poux, Sveinborg H. Gunnarsdóttir	
Jarðgöng á Íslandi; með áherslu á Norðfjarðargöng	8
Birgir Jónsson	
Stutt lýsing á „Geothermal Risk Mitigation Facility“ sjóðnum og uppbyggingu jarðhitavirkjana í Austur Afríku	10
Gísli Guðmundsson og Lilja Tryggvadóttir	
Yfirlit um borun IDDP-2 djúpbórunarholu á Reykjanesi 2016	12
Guðmundur Ó. Friðleifsson, Ari Stefánsson, Ómar Sigurðsson, Þór Gíslason.	
Stækkun Búrfells jarðfræði og jarðtækni	14
Haraldur Hallsteinsson	
Jarðhitaleit og heitavatnsöflun í Hoffelli í Hornafirði. Staða jarðhitaleitar fyrir hitaveitu á Höfn og nágrenni.....	16
Heimir Ingimarsson	
Jarðfræði Esju og orkumál.....	18
Ingvar Birgir Friðleifsson	
Gas í grjótt - Niðurdæling jarðhitagass á Hellisheiði.....	20
Ingvi Gunnarsson ¹ , Edda Sif Aradóttir ¹ , Bergur Sigfússon ¹ , Deirdre Clark ² , Þorsteinn Ari Þorgeirsson ¹ , Sandra Snæbjörnsdóttir ² , Eric Oelkers ^{3,4} , Bjarni Már Júlíusson ⁵ , og Sigurður Reynir Gíslason ² .	
„Lága viðnámið“	21
Ragna Karlsdóttir	
CarbFix verkefnið: Binding kolefnis í basalti.....	22
Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir ¹ , Eric H. Oelkers ^{1,2,3} , Kiflom Mesfin ¹ , Edda Sif Aradóttir ⁴ , Knud Dideriksen ⁵ , Ingvi Gunnarsson ⁴ , Einar Gunnlaugsson ⁴ , Juerg M. Matter ^{6,7} , Martin Stute ⁷ , Sigurdur R. Gíslason ¹	
Staða kolefnishringrásarinnar á Jörðinni. Hvað er til ráða?	24
Sigurður Reynir Gíslason	
Assessing volatile heterogeneity in the Icelandic mantle and transport of volatiles from the mantle to surface	26
Sæmundur A. Halldórsson ¹ , Andri Stefánsson ¹ , David R. Hilton ² , Jaime D. Barnes ³ , Shuhei Ono ⁴ , Erik H. Hauri ⁵ , Enikő Bali ¹ , Martin J. Whitehouse ⁶ , Margaret E. Hartley ⁷	
Phonolite-hosted zeolite deposits in the Kaiserstuhl Volcanic Complex, Germany.....	27

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
18. nóvember 2016

Tobias Björn Weisenberger¹ and Simon Spürgin²

Í upphafi skyldi endinn skoða28

Þorbjörg Hólmgeirsdóttir¹, Matthías Loftsson¹ og Eiríkur Freyr Einarsson²

Boranir við Dælislaug í Fljótum.....30

Þórólfur H. Hafstað

Ávarp formanns

Kæru félagar,

Verið hjartanlega velkomin á Haustráðstefnu Jarðfræðafélagsins 2016. Sérstakir heiðursgestir í ár eru þau Birgir Jónsson, Ingvar Birgir Friðleifsson og Ragna Karlsdóttir en öll eru þau sjötug á árinu. Einn mann verð ég að nefna líka og það er Gestur Gíslason, hann er að sjálfsögðu 70 í ár eins og hin þrjú. Gestur afþakkaði þátttöku á ráðstefnunni en biður fyrir kærar kveðjur.

Þemað í ár er Jarðhiti og jarðverkfræði og vil ég þakka Orkuveitu Reykjavíkur sérstaklega fyrir að lána okkur salinn undir samkomuna.

Einhver forföll urðu hjá fyrirlesurum á síðustu metrunum, ég breytti því síðasta fyrirlestrartímanum í umræðutíma, hann mun án efa nýttast okkur vel.

Nú mun ég stikla á stóru um nám og starfsferil heiðursgesta.

Það er gaman að segja frá því að Birgir, Ingvar og Ragna eru útskriftarsystkini úr Menntaskólanum í Reykjavík. Þau útskrifuðust árið 1966 en Gestur en útskrifðast ári síðar, árið 1967.

Birgir útskrifaðist með B.Sc.Hons í jarðfræði frá Háskólanum í Manchester og með M.Sc í jarðverkfræði frá Háskólanum í Durham.

Eftir MR tók við hjá Birgi sumarvinna hjá Orkustofnun þar sem hann varð svo síðar starfsmaður en hann starfaði þar frá 1966-1997. 1997-1999 starfaði hann hjá VSÓ ráðgjöf í Reykjavík en hefur frá árinu 1999 verið dósent við Háskóla Íslands, auk þess að vera deildarstjóri Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar árin 2001-2004

Birgir þekkir starfsemi Jarðfræðafélagsins enda sat hann í stjórn JFÍ 1976-1978.

Dr. Ingvar Birgir Friðleifsson nam við St. Andrews háskóla í Skotlandi og kláraði þar B.Sc. Hons. árið 1970, þaðan lá leiðin til Oxford háskóla þar sem hann lauk doktorsprófi árið 1973. Doktorsritgerð hans fjallaði um jarðfræði Esjunnar frá Hvalfirði og austur fyrir Mósarðshnúka og Stardalshnúk. Að því loknu snéri Ingvar Birgir aftur heim og hóf störf við rannsóknir hjá jarðhitadeild Orkustofnunar, þar sem hann starfaði til 1978. Árin 1977-1981 var hann að auki verkefnastjóri fyrir Íslands hönd í hinu alþjóðlega verkefni the Iceland Research Drilling Project (IRDP) sem unnið var að á Reyðarfirði.

Ingvar Birgir er einn af stofnendum og fyrsti forstöðumaður Jarðhitaskóla Háskóla Sameinuðu þjóðanna sem rekinn er hjá Orkustofnun og settur var á laggirnar árið 1979. Hann var forstöðumaður þar frá 1979-1986 og aftur 1988-2013. Undir hans stjórn útskrifuðust á þeim tíma 515 nemendur frá 53 þróunarlöndum. Ingvar sinnti einnig stundakennslu við Háskóla Íslands um árabíl í bergfræði og jarðhitafræði. Afrek Ingvars eru ekki upptalin en ég læt hér við sitja.

Ragna Karlsdóttir er með cand polyt gráðu frá danska Tækniháskólanum DTU (Danmarks Tekniske Universitet). Hóf störf með námi hjá Orkustofnun 1970 og var síðan fastráðin á Orkustofnun frá 1976 að loknu námi. Ragna hefur frá árinu 1991 verið virkur meðlimur Zonta International sem berst fyrir réttindum kvenna og sinnt þar hinum ýmsu ábyrgðarstörfum.

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
18. nóvember 2016

Gestur Gíslason útskrifaðist með B.Sc. frá Jarðvísindadeild Háskóla Íslands árið 1973. Frá 1973 starfaði hann hjá Orkustofnun við ýmis verkefni. Gestur vann nokkur verkefni fyrir Þróunaraðstoð Sameinuðu þjóðanna og meðal annars í Hondúras, Kenýa og í Úganda. Gestur vann hjá Hitaveitu Reykjavíkur síðar Orkuveita Reykjavíkur frá 1990-2008 en hefur starfað sem sérfræðingur hjá Reykjavík Geothermal síðan 2008. Gestur sat í stjórn JFÍ árin 1991-1993.

En að öðrum málum, eins og þið sjáið er ég kona eigi einsömul og mun draga mig í hlé frá störfum félagsins nú um áramótin. Ég er heppin að hafa góða stjórn á bak við mig og efast ekki um að þau taki skipulag Vorráðstefnunnar með trompi. Formennsku minni lýkur í vor, þá verð ég búin að sitja 4 ár og tími til kominn að aðrir taki við.

Við skulum svo, kærur vinir, njóta dagsins og samverunnar og ég endurtek það sem ég sagði á síðustu haustráðstefnu,

Spjöllum við kollegana, spyrjum fréttu, segjum sögur, gleymum stressi, streitu og hinu daglega amstri. Rifjum upp með sjálfum okkur hvað er í alvörunni mikilvægt og gerum okkur glaðan dag saman.

f.h. Jarðfræðafélags Íslands
Sigurlaug María Hreinsdóttir, formaður

Ágrip erinda

SOURCES AND REACTIONS OF VOLATILES IN ICELANDIC THERMAL FLUID

Andri Stefánsson¹, Sæmundur A. Halldórsson¹, David Hilton², Árný E. Sveinbjörnsdóttir¹, Jaime D. Barnes³, Shuhei Ono⁴, Jan Heinemeier⁵, Jens Fiebig⁶, Finnbogi Óskarsson⁷, Peter Torssander⁸, Stefán Arnórsson¹

¹ Institute of Earth Sciences, University of Iceland, Sturlugata 7, 101 Reykjavík, Iceland

² Fluids and Volatiles Laboratory, Geosciences Research Division, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, La Jolla, CA 92093-0244, USA

³ Department of Geological Sciences, University of Texas, Austin, Texas, USA

⁴ Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, United States

⁵ AMS 14C Dating Laboratory, Institute of Physics and Astronomy, University of Aarhus, DK-8000 Denmark

⁶ Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität, Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt am Main, Germany

⁷ ÍSOR, Grensásvegi 9, 018 Reykjavík, Iceland

⁸ Department of Geological Sciences, Stockholm University, S-10691 Stockholm, Sweden

Thermal fluids in Iceland range in temperature from <10 to >440°C and are dominated by water (>97 mol%) with chloride concentration from <10 to >20,000 ppm. The isotope systematics of the fluids reveal many important features of the source and transport of volatiles from the mantle beneath Iceland and through the crust to surface. Studies spanning over four decades have shown a large range of values for δD (-131 to +3.3‰), tritium (-0.4 to +13.8 TU), $\delta^{18}O$ (-20.8 to +2.3‰), $^3He/^4He$ (3.1 to 30.4 R_A), $\delta^{11}B$ (-6.7 to +25.0‰), $\delta^{13}C_{\Sigma CO_2}$ (-27.4 to +4.6‰), $^{14}C_{\Sigma CO_2}$ (+0.6 to +118 pMC), $\delta^{13}C_{CH_4}$ (-52.3 to -17.8‰), $\delta^{15}N$ (-10.5 to +3.0‰), $\delta^{34}S_{\Sigma S-II}$ (-10.9 to +3.4‰), $\delta^{34}S_{SO_4}$ (-2.0 to +21.2‰) and $\delta^{37}Cl$ (-1.0 to +2.1‰) in both liquid and vapor phases. Based on this isotopic and chemical dataset, it can be concluded that the thermal fluids originates from meteoric and/or seawater. For other volatiles, degassing of mantle-derived melts contribute to He, CO₂ and possibly also to Cl in the fluids whereas water-rock interaction also contributes to CO₂ and is the major source of H₂S, SO₄, Cl and B in the fluids. Air-water interaction mainly controls N₂, Ar and Ne concentrations. The large range of many non-reactive volatile isotope ratios, such as $\delta^{37}Cl$ and $^3He/^4He$, are considered to indicate heterogeneity of the mantle and derived melts beneath Iceland. In contrast, the large range of many reactive isotopes, such as CO₂ and H₂S, are heavily affected by processes occurring within the geothermal systems, including fluid-rock interaction, depressurization boiling, and isotopic fractionation between secondary minerals and the aqueous and vapor species. Variations due to these geothermal processes may exceed any differences observed among various sources highlighting the importance and effects of chemical reactions on the isotope systematics of reactive elements.

Heildarsýn Hengilsins - Uppfært hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu á Hellisheiði

Anette K. Mortensen, Bjarni Reykr Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson,
Ingvi Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Edda Sif Aradóttir, Gretar
Ívarsson

Orkuveita Reykjavíkur, Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík

Hengill er u.þ.b. 400.000 ára gömul megineldstöð, sem er staðsett á mótum vestara gosbeltisins, Reykjanes gosbeltisins og jarðskjálftabelti Suðurlands. Víðáttumikil svæði með jarðhitaummerkjum er að finna á Hengilssvæðinu og samkvæmt viðnámsmælingum er áætluð stærð jarðhitakerfisins um 110 km². Jarðhitakerfið er nýtt til orkuframleiðslu á tveimur stöðum, norðan og sunnan við megineldstöðina, en samtals er uppsett afl 423 MWe og 433 MWt. Hellisheiðarvirkjun er staðsett í suðurhluta Hengils megineldstöðvarinnar og var tekin í notkun árið 2006. Virkjunin var stækkuð í fjórum áföngum og frá árinu 2011 hefur uppsett afl hennar verið 303 MWe og 133 MWt.

Eldri hugmyndalíkon af jarðhitakerfinu á Hellisheiði gerðu ráð fyrir að uppstreymi væri tengt djúpstærðum varmagjafa staðsettum undir megineldstöðinni með útstreymi til norð-norðausturs og suð-suðvesturs eftir sprungusveimnum sem þar er. Hitastig, þrýstingur og jarðfræðileg gögn frá tæplega 60 vinnsluholum og 13 niðurdælingaholum, ferilefnaprófanir og vinnslugögn frá 10 ára framleiðslusögu hafa bætt innsýn í eiginleika jarðhitakerfisins á Hellisheiði, en þessar upplýsingar hafa verið felldar inn í uppfært hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu á Hellisheiði.

Uppfært hugmyndalíkan af jarðhitageyminum á Hellisheiði gerir ráð fyrir að varmagjafinn tengist frekar grunnnum og staðbundnum innskotum sem m.a. urðu við sprungugos á nútíma norðan- og sunnanvert við Hengill. Þessir stakstæða varmagjafar skapa a.m.k. þrjú aðskilin uppstreymissvæði sem hafa verið skilgreind á Hellisheiði. Uppstreymissvæðin hafa sérstök einkenni en þau er talin vera samspil af dýpt og stærð varmagjafans og gegndræpi sem stjórnað er af jarðhniki á hverjum stað. Ennfremur benda ferilefnaprófanir til þess að gegndræpi sé mjög misátta á Hellisheiði þannig að rennsli er stjórnað af misgengjum og gossprungum með NNA-SSV stefnu. Samspil milli staðbundins uppstreymis frá frekar grunnnum varmagjöfum og gegndræpi stjórnað af misgengjum og gossprungum leiðir til þess að jarðhitakerfið á Hellisheiði er hólfaskipt. Þetta er í samræmi við viðbrögð jarðhitakerfisins við vinnslu en í ljós hefur komið staðbundinn þrýstingsniðurdráttur og dvínun í holuafköstum meðfram gossprungunum, þar sem vinnslubéttleiki er mikill, á meðan veruleg vatnsborðshækkun hefur átt sér stað innan misgengjum vestast í sigdalnum, þar sem affallsvatni er dælt niður í djúp jarðlög í jarðhitageyminum.

Framtíðar vinnslu- og niðurdælingaáætlun fyrir Hellisheiðarvirkjun mun byggja á uppfærðu hugmyndalíkani af jarðhitakerfinu með sérstaka áherslu á að dreifa niðurdælingu víða á vinnslusvæðinu til að tryggja að hún m.a. muni veita betri þrýstingsstuðning við hólfíð meðfram gossprungunum þar sem mikil vinnsla er á því svæði.

JARÐHITARANNSÓKNIR Á SKEIÐUM

Árni Hjartarson

Íslenskar Orkurannsóknir, ÍSOR, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Mikinn lághita er að finna í þverbrotabelti Suðurlands og hann hefur víða verið nýttur. Í því sambandi ná nefna Bakka í Ölfusi, Gljúfurholt, Laugardæli, Stóru-Reyki, Brautarholt, Kaldárholt, Laugaland í Holtum. Hér verður fjallað um lághitarannsóknir á Skeiðum og jarðfræðina þar. Aðstæður á Skeiðum eru um margt sérstæðar. Þjórarárhraunið mikla hylur láglendið að mestu en hér og hvar standa þó klapparholt úr eldra og þéttara bergi upp úr því. Undir hrauninu eru þykk setlög frá síðjökultíma og byrjun hólósen. Jarðskjálftasprungur og ýmis merki höggunar sjást oft vel í hrauninu. Kalda grunnvatnið er ýmist hreint og tært, járnmengað eða ísalt nema hvort tveggja sé. Jarðhiti finnst á stöku stað á yfirborði þar sem eldra bergið stendur upp úr en leynist líka víða undir hrauni og gerir þá yfirleitt ekki vart við sig á yfirborði. Við þessar aðstæður verður hitaleit einkum að byggjast á hitastigulsborunum en ummerki um höggun geta einnig gefið mikilsverðar vísbendingar. Nokkrar litlar hitaveitur eru á Skeiðum, bæði fyrir einstaka bæi og hverfi, sem og frístundabyggð.

Mikið er um borholur á Skeiðum sem boraðar hafa verið ýmist vegna neysluvatnsöflunar, jarðhitaöflunar eða virkjunarrannsóknna í tengslum við áformaðar virkjanir í Þjórásá. Hitamælingar í borholum, sem boraðar eru í gegnum Þjórarárhraunið, sýna víðast hvar lágan og jafnan hita niður í gegn um hraunið og sandlögin sem liggja næst undir því. Síðan tekur hitastigið að rísa með auknu dýpi og hitastigull kemur í ljós. Hann getur verið allhár ofan til í borholum en fer lækkandi niður á við ef jarðhitakerfi er í nánd og fellur niður undir núll þegar niður í kerfið sjálft er komið. Þessi jarðhitakerfi virðast vera mjög grunnstæð og standa vafalítið í sambandi við jarðskjálftasprungur. Hafa má í huga að almennur hitastigull á þessum slóðum, þ.e. stigull sem ekki er undir áhrifum frá jarðhita, er um $80^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Þar sem hitastigullinn fer yfir $150^{\circ}\text{C}/\text{km}$ verða að teljast sæmilegar líkur á að nýtanlegur jarðhiti geti fundist. Ef hann mælist hærri er að sama skapi vænlegra um árangur.

Greint verður sérstaklega frá jarðhitaleit í Kílhrauni á Skeiðum, sem gerð hefur verið undanfarin missiri, en niðurstöður hennar gefa góðar vonir um árangur af vinnsluborunum.

Three-Dimensional Geological Modeling of Hellisheidi Geothermal Field using Leapfrog Geo

Bastien Poux, Sveinborg H. Gunnarsdóttir

Íslenskar Orkurannsóknir, ÍSOR, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Introduction

The work presented summarizes the proceedings and results of a collaborative project between ÍSOR and Orkuveita Reykjavíkur to compile and correlate the geoscientific data accumulated over the years at the Hellisheidi geothermal field. The data was generated by the drilling of many deep wells and by other studies completed in the area over the years. Once all the data were organized, compiled, verified and finally imported in Leapfrog Geo software it was possible to build several three-dimensional models to represent the geology, the alteration mineralogy, the formation temperature distribution and the resistivity of the area. The models created were also combined together to interpret their relations and they were also used for well prognosis and planning as a new well was being drilled in the area at the same period (June 2016).

Project frame

There are 73 deep wells in the selected area, 56 of them are production wells and 17 are injection wells; most of them have been directionally drilled. The deepest well, HE-42, was drilled vertically to 3322 meters in 2007. The depth of the model that was built was fixed to 3000 meters below sea level, which corresponds to about 30 meters below the bottom of HE-42.

Before building the models, it was necessary to gather the available datasets, which were sourced from varying platforms and formats. Most of the well data come from the files compiled during the drilling phase and integrated into a logging software at the well site. Additional data is the results of further work in the area such as surface geological and structural mapping, geophysical surface surveys and well logging, seismicity recordings and laboratory analyses on rock samples. Given the large amount of data generated at Hellisheidi, this phase was fastidious but essential in creating a high quality dataset to build accurate models.

Modeling process

Once all the data was integrated in Leapfrog Geo, the models boundaries and the topography were defined before starting to work on the models. The first model to be built is the geological model, it is the combination of the lithological and the structural model, created separately before being merged (Figure 1). Since the geology of the area is quite complicated and the structural relations not yet fully understood a simplified approach (as described below) had to be adopted for the modelling. This applies both for the lithological and structural model.

The geology of the area is composed by three main types of formation: the hyaloclastite formations erupted during glacial periods, the interglacial lava flows erupted from fissures, and the intrusive rocks rising throughout the fractures, two of which are present on the current surface, dated of 5000 and 2000 years old. The structural model is composed by two main tectonic systems; the dilatationary rifting as exemplified by the fissure zone and a transform component concentrated in the eastern part of Hengill and related to the South Iceland Seismic Zone (Franzson et al., 2010)

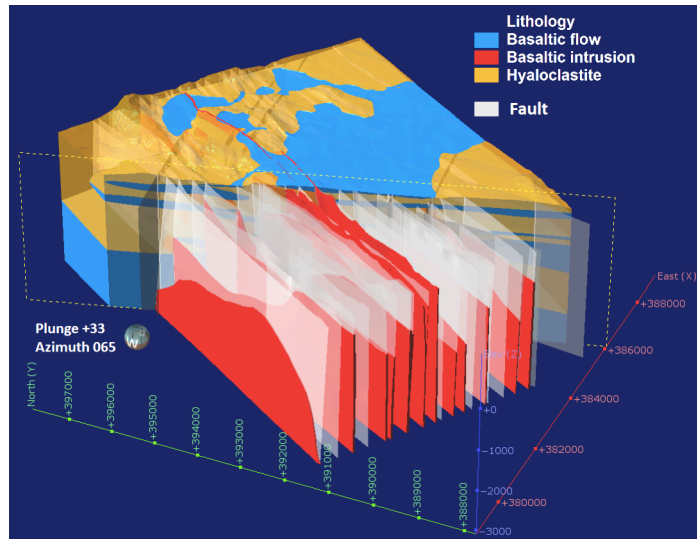


Figure 1: Geological model of the Hellisheiði geothermal field

Several other models representing geoscientific data of the Hellisheiði geothermal field were built. One of them is the alteration mineralogy model, based mostly on the results from microscopic and x-ray diffraction analyses on rock samples. The temperature and the resistivity models had been created during previous studies and by using other softwares; they were imported as a 3D grids of points and converted into volumes using the Radial Basis Function of Leapfrog Geo.

Combining the models

One of the tool in Leapfrog Geo is used to combine models, which will calculate the volumetric intersection of the models considered. This is a useful tool to visualise how elements from different models are related to each other. Several combined model were created, three of them gave particularly good results: the relation between low resistivity and alteration mineralogy, the distribution of temperatures over the intrusive rocks, and the alteration mineralogy in formations above 280°C, reflecting the thermal evolution of the geothermal system.

Well Prognosis

At the end of the modeling project, the drilling of a new well, HE-59, was about to start. This drilling was a good opportunity to test the geological model and to prepare a well prognosis with the expected lithology and the possible fracture zones that might be encountered. The well was drilled to 2381 meters, important losses started at 838 meters and no cuttings were recovered below 902 meters. However, a temperature log was run to the bottom and allowed to locate major aquifers. Figure 2 shows the well trace of HE-59 with the lithology down to 902 meters and the location of aquifers. There a good correlation between the geological model and the formations encountered as well as the major aquifers observed.

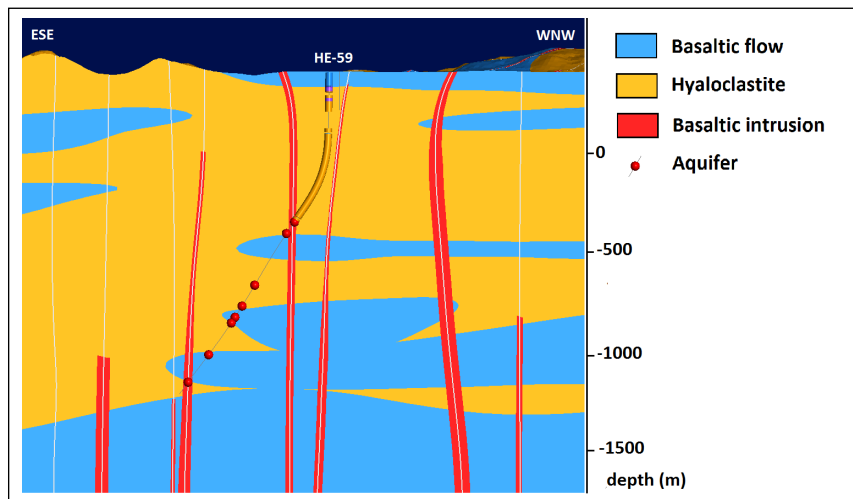


Figure 2: Geological cross section and trace of the well HE-59 with its lithology and the location of the major aquifers

References

Franzson, H, Gunnlaugson, E., Arnason, K., Sæmundsson, K., Steigrimsson, B., Hardarson, B., 2010. *The Hengill Geothermal Sytem, Conceptual model and Thermal Evolution*. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.

Jarðgöng á Íslandi; með áherslu á Norðfjarðargöng

Birgir Jónsson

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild HÍ

Jarðgangagerð hefur verið nokkuð til umræðu í fjölmiðlum hérlandis, en þar er yfirleitt verið að tala um veggöng, en ekki um virkjanagöng, sem eru þó hafa verið mun umfangsmeiri framkvæmdir bæði varðandi lengd og rúmmál á gangagreftri. Algengustu bergtegundir við gangagerð hér á landi eru; ýmsar tegundir basalts, og kargaberg, basaltgangar og misþykk og misgrófkornótt setbergslög. Undanfarna áratugi hafa aðrar bergtegundir komið fyrir við gangagerð hér á landi. Nokkur reynsla hefur fengist við að fást við þessar „nýju“ bergtegundir:

Líparít: Í framhjáakstursgöngum Búðarhálsvirkjunar er farið í gegnum smástuðlað líparít storkuberg (kubbaberg), fáeinir tugir metra – gott jarðgangaberg. Í aðrennslisgöngum sömu virkjunar er farið í gegnum líparítösku og súran setbergsjaðar sömu líparít myndunar – mjög lélegt gangaberg, svo líparít þarf að kanna vel. Aldur myndunarinnar er ca 1.M ár.

Jökulberg: Yfirleitt gott jarðgangaberg: Nokkur jökulbergskafli er í norðanverðum aðrennslisgöngum Búðarhálsvirkjunar – gott berg, aldur ca. 1,2 M ár. Nokkuð langir kaflar eru í veitugöngum til Kárahnjúkavirkjunar frá Kelduá til Jökulsár í Fljótsdal og þaðan áfram til aðrennslisganga virkjunarinnar – gott gangaberg – aldur ca. 2M ár. Jarðgöng í Húsavíkurhöfða eru öll í jökulbergi, - gott gangaberg, 11,3 m víð göng, 1 km á lengd – aldur líklega ofarlega eða efst í Tjörneslögunum, ofan á Breiðavíkurlögunum, aldur ca. 1,3M ár. Stækkun Búrfellsvirkjunar, nokkrir tugir metra aðkomuganga frá gangamunna eru í jökulbergi, gott berg, en miklar styrkingar og forboltun þurfti vegna þunnrar þekju, aldur ca. 2M ár.

Flykruberg (welded tuff) er nokkrir tugir metra í Norðfjarðargöngum. Sennilega besta jarðgangaberg landsins. Aldur tæplega 12M ár.

Setbergslög, óstöðug: Í Norðfjarðargöngum voru nokkur setbergslög, oftast rauð, en einnig gul til græn, sem þurfti sérstaklega að styrkja ef þau voru yfir 4 m að þykkt. Sennilega gosaska úr nálægri Reyðarfjarðareldstöð. Aldur 11.5-12M ár. Í Óshlíðargöngum voru einnig dökkgrá setlög sem þurfti að styrkja sérstaklega ef þau náðu 4m þykkt. Þetta setberg hefur myndast við veðrun og rof í langtíma mislægismyndun (Breiðhillusyrpunni) sem sést ofan gamla vegarins í Óshlíð. Aldur 15,5-16M ár. (viðbótar munnlegar upplýsingar frá Ágústi Guðmundssyni og Matthíasi Loftssyni)

Norðfjarðargöng; 7,9 km veggöng. Upphaflegt jarðfræðikort af svæðinu (stratigrafía) eftir sjálfan G.P.L. Walker. Undirbúningsjarðfræðivinna fyrir útboðsgögn Vegagerðarinnar var unnin af Ágústi Guðmundssyni. Göngin liggja gegnum NV-jaðar áhrifasvæðis Reyðarfjarðareldstöðvarinnar, þannig að nokkur óregla var í uppröðun og halla jarðlaganna sem komu fram í göngunum, t.d. voru langir kaflar eingöngu í kargabergi. Gangagröfturinn hófst í nóvember 2013 er Hanna Birna sprengdi fyrstu sprenginguna og lauk í september 2015 er Ólöf Nordal sprengdi í gegn. Göngin verða opnuð fyrir umferð í september 2017 og hefur verkið gengið samkvæmt áætlun. Göngin leysa af hólmi fjallveginn yfir Oddsskarð, en þar eru einbreið jarðgöng í rúmlega 600 m hæð, 0,6 km löng. Gangagröfturinn var vanalega 10 m á sólarhring, nema þar sem farið var í gegnum setbergslög sem voru þykkari en 4m, en þá fór graftarhraði niður í 2-4 m á sólarhring, þar sem beita þurfti mun umfangsmeiri

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
18. nóvember 2016

bergstyrkingum eins og forborun með 8m löngum bergboltum, stálnetum, stálgrindarbogum og margföldu magni af sprautusteypu.

Stutt lýsing á „Geothermal Risk Mitigation Facility“ sjóðnum og uppbyggingu jarðhitavirkjana í Austur Afríku

Gísli Guðmundsson og Lilja Tryggvadóttir

Mannvit, Urðarhvarf 6, 203 Kópavogur.

Nýting jarðhita til raforkuframleiðslu er bæði mikilvægur og vistvænn kostur. Möguleikar til þess að nýta jarðhita til raforkuframleiðslu eru óvíða eins miklir og í Austur Afríku, þ.e.a.s. í þeim löndum þar sem gliðnunarbeltið (rekbeltið/sigdældin) gengur í gegnum meginlandsplötu Afríku, sjá mynd 1. Gliðnunarbeltin eru tvö, annars vegar Austurbeltið og hins vegar Vesturbeltið. Austurbeltið nær frá Eþíópíu (auk Djíbútí og Eritreu) í norðri, í gegnum Kenía og inn í Norður-Tansaníu, í suðri. Vesturbeltið myndar einskonar hliðarbelti frá Austurbeltinu, en það nær frá Úganda í norðri, Kongó, Rúvanda, Búrundi, Tansaníu, Sambíu, Malaví og Mósambík í suðri, hvar gliðnunarbeltið gengur út í Indlandshaf.

Nýting jarðhita til raforkuframleiðslu er komin vel á veg í Kenía. Í Kenía er uppsett afl til raforkuframleiðslu 573 MW_e, auk þess sem heildarframleiðslugetan er talin vera um 10.000 MW_e (Omenda og Sisiyu, 2015). Miðað við þessar tölur er aðeins búið að virkja tæp 6 % af heildarframleiðslugetu landsins. Önnur lönd í Austur Afríku er komin mun skemmra á veg en Kenía. Í Eþíópíu er uppsett afl til raforkuframleiðslu 7,3 MW_e (Aluto), en heildarframleiðslugeta landsins er líklegust talin vera um 4.200 MW_e (Kebede, 2014). Framleiðslugeta annara landa er mun minni en í Kenía og/eða í Eþíópíu.

Nokkrir lána- og styrkjasjóðir eru í boði til fyrirtækja sem hafa áhuga á að hagnýta jarðhita til raforkuframleiðslu í Austur Afríku. Markmið þessa erindis er að kynna starfsemi eins þessara kosta, en það er „Geothermal Risk Mitigation Facility“ eða GRMF. GRMF er sjóður sem er fjármagnaður af þýskum og alþjóðlegum þróunarbönkum og styrkir jarðhitarannsóknir og jarðhitaboranir í Austur Afríku.

Markmið sjóðsins er að aðstoða fyrirtæki í fyrstu skrefum í virkjun jarðvarma. GRMF sjóðurinn styrkir annars vegar:

- yfirborðs jarðhitarannsóknir, þar sem aðal áhersla er lögð á jarðeðlisfræðilegar mælingar og að grunn jarðfærðirannsóknir hafi þegar verið framkvæmdar,

og hins vegar

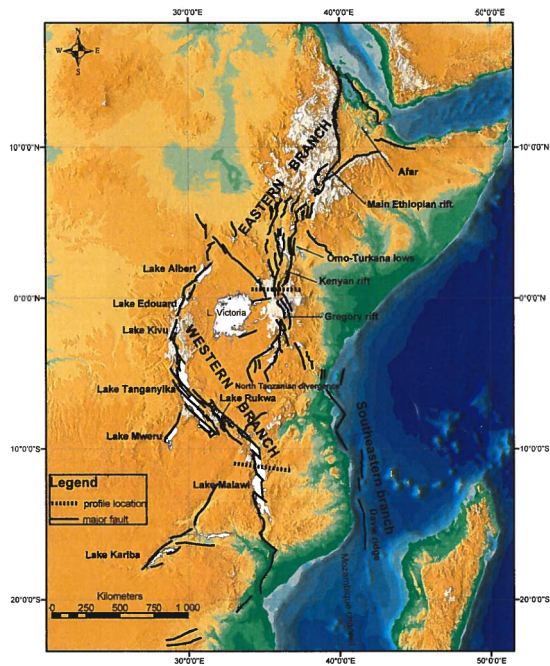
- borun og prófun tveggja rannsóknar holna í vinnslustærð. Einnig má sækja um allt að þrjár grannar borholur (e. slim wells) eða fara blandaða leið og sækja um styrk fyrir eina holu í vinnslustærð og tvær grannar holur.

Að koma Mannvits að GRMF er að fara yfir og meta styrkumsóknir með tilliti til útgefinna sjóðsreglna og þekkingu á virkjun jarðvarma sem og að halda utan um verkefni sem hljóta styrk hjá sjóðum. Mannvit starfar sem undirverktaki hjá þýska fyrirtækinu Rödl & Partner.

Sjóðurinn hóf starfsemi árið 2012 en Mannvit hóf ráðgjöf við hann árið 2014. Á þessum fjórum árum hafa verið haldin þrjú umsóknarferli og það fjórða er í gangi. Hvert umsóknarferli saman stendur af forumsókn (e. expression of interest) og svo umsókn. Alls hafa verið sendar inn 56 forumsóknir, þar af 34 yfirborðsverkefni og 22 borverkefni, og alls hefur verið sótt um 29 verkefni í þremur umsóknarferlum, þar af 12 yfirborðsverkefni og 17 borverkefni.

Í Austur Afríku eru uppi metnaðarfullar áætlanir um nýtingu jarðvarma til raforkuframleiðslu. Almennt má segja að jarðhitasvæði í Austurbeltinu henti mjög vel til raforkuframleiðslu. Flestir virkjanakostirnir eru í Kenía og Eþíópíu og því verður megin raforkuframleiðslan þar. Í Vesturbeltinu finnast víða öflug lághitasvæði og vel má vera að einhver þessara svæða nýtist til raforkuframleiðslu, en segja má að í Vesturbeltinu sé möguleiki til raforkuvinnslu aðeins brot af því sem finnst í Austurbeltinu.

Í erindinu verða sýnd dæmi af týpískum umsóknum til sjóðsins, fjallað um nokkrar jarðhitarannsóknir og hvaða nálganir eru gerðar við mat á orkugetu viðkomandi svæða.



Mynd 1. Gliðunarbleti Austur Afriku. Beltinu er skipt upp í Austurbelti (Easter branch) og Vesturbelti (Western branch). Myndin er frá Chorowicz, 2005.

Heimildir

Chorowicz, J., (2005) The East African Rift System. *Journal of the African Earth Science*, 43, 379-410.

Kebede, S., (2014) Geothermal Exploration and Development in Ethiopia: Country update. Presented at Short Course IX on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, GDC and KenGen, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, Nov. 2-24, 2014.

Omenda, P., Simiyu, S., (2015) Country Update Report for Kenya 2010-2014. Proceedings World Geothermal Congress, Australia, 19-25 April, 2015.

Yfirlit um borun IDDP-2 djúpborunarholu á Reykjanesi 2016

Guðmundur Ó. Friðleifsson, Ari Stefánsson, Ómar Sigurðsson, Þór Gíslason.

HS Orka, Brekkustígur 36, 260 Reykjanesbær, Iceland. gof@hsorka.is



Jarðborinn Þór á RN-15/IDDP-2 á Reykjanesi. Kynningarskilti var sett upp á útsýnisstað við borstaðinn.

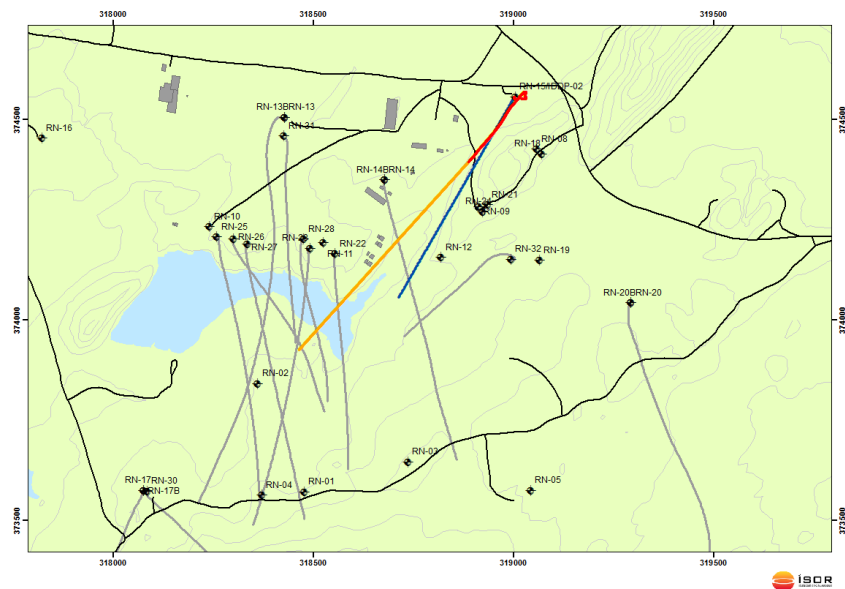
Borun RN-15/IDDP-2 á Reykjanesi hóst 11. ágúst 2016. Vinnsluborhola RN-15, sem var 2,5 km djúp, var tekin úr vinnslu og gerð klár til dýpkunar niður í 5 km dýpi sem IDDP-2 borhola. Hún ber nafn og kenni af báðum holum. Tilgangurinn er að djúpbora niður í rætur háhitakerfisins þar sem jarðhitavökvæði gæti hafa náð yfirmarksástandi í hita og þrýstingi (supercritical condition). Ef djúpu heitu jarðlögin og sprungukerfi í þeim reynast nægjanlega lek, þá má trúlega vinna úr þeim orkuríka yfirhitaða gufu til orkuframleiðslu og fleiri nota. Ef þau hins vegar reynast treggæf á vatn og gufu, þá verður reynt að örva lekt með því að dæla vatni niður í funheitt bergið, og vonast til að það skili sér upp í vinnsluborsvæðið ofan við og bæti orkubúskapinn þar. Í framhaldi af djúpboruninni sjálfri verða því gerðar margskonar vinnslutilraunir, svipað og gert var í IDDP-1 borholunni í Kröflu fyrir nokkrum árum. Ólíkt öðrum háhitakerfum á Íslandi þá hefur Reykjanes jarðhitakerfið þá sérstöðu að jarðhitavökvinn er eingöngu uppruninn úr sjó. Að því leiti til líkist Reykjaneskerfið háhitakerfum á hafsbotni, svokölluðum svarstropum (black smokers) sem finna má á úthafshryggjum um öll heimshöf, en hvergi eins aðgengileg og á Reykjanesi. Rannsóknargildi IDDP-2 er því óumdeilt og hefur dregið að sér fjölda vísindamanna um allan heim. Verkefnið er að stórum hluta kostað af orkuiðnaðinum (HS Orku, Statoil, Landsvirkjun, Orkuveitu Reykjavíkur og Orkustofnun) en nýtur jafnframt erlendra styrkja til ýmissa rannsókna, svo sem frá ICDP, NSF og EU H2020 (DEEPEGS). Yfirlit um djúpborunarverkefnið í heild er aðgengilegt á www.iddp.is, en það hefur starfað óslitið frá árinu 2000. Fjöldi verktaka, stofnanna og vísindamanna kemur að og styður við verkefnið með einum eða öðrum hætti.

Hola RN-15 var boruð lóðrétt niður í 2507 m dýpi árið 2004, með vinnslufóðringu í 794 m og 12 ¼” víða óföðraða holu þaðan niður í botn. Bestu æðar holunnar voru á 1680m og 2400m m dýpi, og vökvinn um 290°C heitur. Holan skilaði 2-3 MWe í núverandi Reykjanesvirkjun. Hún er staðsett norðan til í jarðhitakerfinu og verður skáboruð til suðurs í átt að megin uppstreymisrásum. Stærsta bor Jarðboranna hf., Bentec Euro Rig 250, nefndur Þór, var stillt upp á borstað í júlí 2016, og hófst

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
18. nóvember 2016

borunin 11. ágúst. Fyrst var holan kæld rólega niður og síðan dýpkuð í 3000 m. Stefnuborun hófst á 2750m dýpi. Þá var 9 7/8" and 9 5/8" fóðringum rennt niður og þær steypar fastar með svokallaðri ofanfrá steypingu (reverse cementing), sem tókst vel. Vegna algjörs skoltaps fékkst ekkert borsvarf upp úr holunni við þessa dýpkun. Fóðringarendi var settur í 2941m dýpi, heldur ofar en til stóð. Utan á fóðringuna hafði verið spenntur fjöldinn allur af köplum, með 9 hitanemum, einum þrýstinema og síðan 841 m langur ljósleiðarakapall. Slíkt hefur ekki verið gert áður í íslenskri háhitaholu og heyrir því til merkra nýjunga. Steypingu fóðringar var lokið 6. september. Holan var síðan boruð áfram með 8 1/2" borkrónu. Hún reyndist mjög vatnslek neðan fóðringar og var um tíma reynt að stífla lekana með steypu, en síðan borað áfram í svokallaðri blindborun, en þá verður allt borsvarf eftir í opnum sprungum og holrými bergsins. Borsvarfsýni eru því einungis til frá 3000-3200 m dýpi. Nokkrum sinnum hefur verið reynt að kjarnabora í holunni, og tókst að ná í 1/2 m kjarnabút frá 3648m dýpi, Hann er úr sprungufylltu innskotsbergi. Reynt verður að ná fleiri borkjörnum.

Þegar ágrípið þetta er ritað þá er í fyrsta skipti verið að bora með nýrri gerð af háhitamótor frá Baker Hughes, sem út af fyrir sig er hið merkasta mál, og er holan orðin 3850m djúp. Hún er langdýpsta hola landsins til þessa. Í erindinu verður stiklað á stóru um um stöðu IDDP verkefnisins, en fyrirhuguð verklok borunar gætu teygst fram á næsta ár.



Lituðu ferlarnir á kortinu sýna fyrirhugaða, núverandi og væntanlega legu IDDP-2 holunnar. Gráu ferlarnir sýna legu stefnuboraðra vinnsluholna.

Stækkun Búrfells jarðfræði og jarðtækni

Haraldur Hallsteinsson

Framkvæmdasvæði verkefnis er staðsett á Suðurlandi, nánar tiltekið við rætur Búrfells á láglendi Þjórsár, mitt á milli Árnes- og Rangárvallasýslu, í um 130 km fjarlægð frá höfuðborgarsvæðinu. Markmiðið með stækkuninni er að auka nýtingu raforku sem tilstaðar er í Búrfellsstöð um allt að 100 MW. Með stækkuninni verður komið fyrir nýju stöðvarhúsi neðanjarðar í Samsstaðarklifi sem er í grennd við núverandi Búrfellsstöð og kemur til með að nýta Bjarnalón sem inntakslón. Helstu mannvirki eru 370 m langur og allt að 22 m djúpur aðrennslisskurður að inntaki þar sem taka við 110 m djúp og 6,03 m við lóðrétt fallgöng. Stöðvarhús sem er 64 m langt, 16 m breitt og 40 m hátt þar sem það er hæst. 450 m löng frárennslisgöng sem eru 10,7 m há og 8 m breið þar sem sniðið er breiðast. 2,2 km langur frárennslisskurður að mestu grafinn í sand og við hliðina á fallgöngunum eru lóðrétt kapalgöng 4,5 m í þvermál og um 115 m löng. Fallgöngin og kapalgöngin eru heilboruð en önnur mannvirki neðanjarðar eru boruð og sprengd.

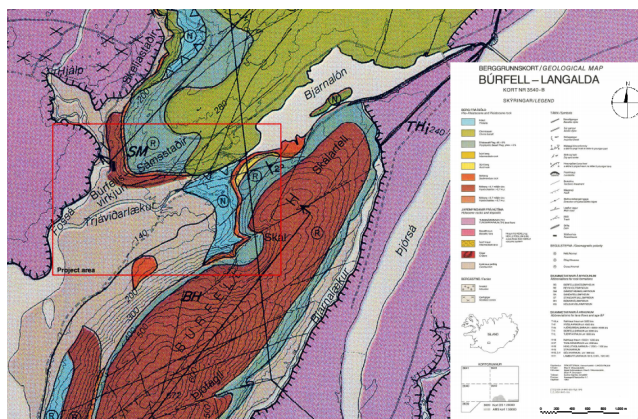
Helstu jarðfræðirannsóknir tengdar virkjuninni voru gerðar með kjarnaborunum, loftborunum og gryfjum, auk þess höfðu verið gerðar jarðsveiflumælingar og borro-boranir.

Bestar upplýsingar um jarðfræði svæðisins fást með borun á kjarnaholum þar sem hægt er að mæla þykktir á jarðlögum og meta bergið með Q kerfinu þar sem berggæðin byggjast á eiginleikum bergmassans en ekki styrk einstakra bergblokka. Í Q kerfinu byggist berggæðamatið á eftirfarandi þáttum:

- RQD lengdarhlutfall kjarnabrota sem mælast > 10 cm (rock quality designation)
- J_n fjöldi sprungukerfa (joint set number)
- J_r lögun og áferð sprunguflata (joint roughness number)
- J_a gerð og þykkt sprungufyllinga (joint alteration number)
- J_w vatn í sprungum (joint water reduction number)
- SRF mælikvarði fyrir spennuástand (stress reduction factor)

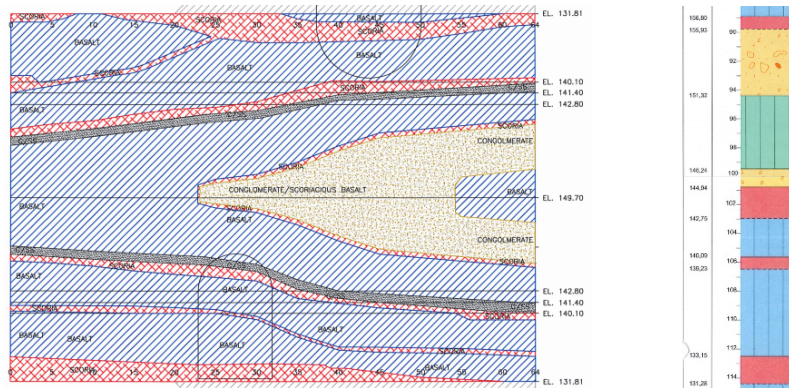
Q-gildið er síðan reiknað skv. Jöfnunni:

$$\frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * J_w / SRF$$



Mynd 1. Jarðfræðikort af Búrfellssvæðinu.

Mannvirki á svæðinu lenda að mestu í jarðlögum innan svokallaðrar Eldri Búrfells myndunar þar sem skiptast á basaltlög og kargalög með einstaka setlögum á milli. Ef borin er saman jarðfræði úr borholum og jarðgöngum virkjunarinnar kemur í ljós að góð samsvörun er á milli þeirra. Mynd 2 sýnir samanburð á borholu BF-39 og jarðfræðikortlagningu stöðvarhúss.



Mynd 2. Jarðfræði stöðvarhúss, borið saman við borholu BF-39

Lítið hefur verið um vandamál vegna vatns nema þar sem borað hefur verið í gegnum rannsóknarholur í aðkomugöngum og hefur þá vatn bæði flætt upp úr holunum og niður úr loftinu. Í stöðvarhúsinu var mjög lítið vatn en þegar borað var fyrir stangarfærslumælum og bergboltum var borað upp í vatnsleiðandi lög yfir stöðvarhúsinu. Af þeim ástæðum var ráðist í kerfisbundna grautun á efri hluta stöðvarhúss til að loka á innrennslíð og koma í veg fyrir vatnsleka vegna bergfærslna. Lekinn í stöðvarhúsinu er breytilegur og virðist tengjast úrkomu á svæðinu að einhverju leiti.

Bergstyrkingar hafa verið ákvarðaðar út frá Q kerfinu og eru fyrirskrifaðir styrkingarflokkar fjórir í aðrennslisgöngum og frárennslisgöngum en þó er örlítill munur á milli ganga vegna stærðar ganganna. Jarðfræðin er kortlögð og Q gildi er metið eftir hverja sprengda færu, þykkt sprautusteypu, fjöldi og lengd bergbolta ákveðin út frá því samkvæmt fyrirskrifuðum styrkingum í hönnunargögnum.

Jarðhitaleit og heitavatnsöflun í Hoffelli í Hornafirði. Staða jarðhitaleitar fyrir hitaveitu á Höfn og nágrenni

Heimir Ingimarsson

Íslenskar orkurannsóknir (ÍSOR)

Á undanförunum árum hefur náðst góður árangur í borun rannsóknarholna í Hoffelli/Miðfelli í Hornafirði. Skipulegar jarðhitarannsóknir í Austur-Skaftafellssýslu að tilhlutan sveitafélaganna á svæðinu hófust með rannsóknaborunum árið 1992 á vegum Ómars Bjarka Smárásonar (Jarðfræðistofan Stapi). Þá kom í ljós áberandi hitafrávik við Hoffell/Miðfell og hitastigull reiknaðist 186°C/km. Efnagreiningar bentu til að hiti vatns í jarðhitakerfinu gæti verið 70-80°C. Jarðhitaleit var haldið áfram með hléum allt fram til 2006, að mestu undir stjórn Stapa en einnig kom Orkustofnun að þessum rannsóknum. Árið 2012 tók RARIK við sem framkvæmdaraðili af sveitafélögunum og í kjölfarið kom ÍSOR að jarðhitarannsóknum á svæðinu. Jarðlagamælingar voru gerðar í völdum rannsóknarholum auk holusjármælinga í þeim og kom í ljós að jarðhitakerfið við Hoffell var flóknara en talið var og mælingarnar breyttu þeim hugmyndum sem menn höfðu um jarðhitakerfið og sprungur þess. Á grundvelli þessara mælinga, og eftir þeim gögnum sem Ómar Bjarki Smáráson (Jarðfræðistofan Stapi) hafði safnað um áratuga skeið, var vinnsluholan HF-1 boruð skammt austan við syðsta hluta N-S hitahámarksins svokallaða og var árangur af þeirri borun ásættanlegur en samt vantaði á að nægt vatn fengist fyrir hitaveitu á Höfn.

Vinnsluholan HF-2 var boruð síðla árs 2014 en hún var staðsett með svipuðum hætti og jafnan hefur verið gert hérlandis við leit að földum jarðhitakerfum en þá er tekið mið af hitastigli í grunnum rannsóknarholum og borað síðan nokkurn veginn beint í ofan í hitastigulshámarkið. Árangur af þeirri borun stóðst engan veginn væntingar og í framhaldinu voru allar forsendur teknar til gagn Gerrar endurskoðunar. Við þá skoðun var horft til þess hitahámarks sem liggur nokkuð flatt, þ.e. ekki með áberandi hitatopp. Í kjölfarið voru boraðar nokkrar hitastigulsholur til að ákvarða legu hitahámarksins en það sýnir norðaustlæga stefnu. Tilgátan er sú að aðaluppstreymi jarðhitans tengist sprungum með norðaustlæga stefnu og teygir sig til norðausturs frá þeim stað þar sem djúpu holurnar HF-1 og HF-2 voru boraðar. Haustið 2015 voru boraðar tvær 500 m djúpar rannsóknarholur, ASK-122 og ASK-123 í þeim tilgangi að kanna nánar innri gerð jarðhitakerfisins við Hoffell. Berghiti í jarðhitakerfinu hefur verið áætlaður um 60°C á 500 m dýpi. Þessar holur gerðu staðsetningu á nýrri vinnsluholu markvissari og var vinnsluholan HF-3 staðsett skammt suðaustur af holu ASK-122. Holunni var ætlað að skera vatnsæðar sem komu fram í holu ASK-122 en dýpra þar sem búast mætti við að þær yrðu heitari. Það tókst og lofar sú vinnsluhola mjög góðu og hefur aukið þann möguleika að hægt verði að fá nægjanlegt vatn fyrir hitaveitu á Höfn og nágrenni. Áframhaldandi rannsóknarboranir hafa verið í gangi á þessu ári og ljóst er að jarðhitakerfið teygir sig talsvert lengra norðaustur frá Hoffelli en fyrst var talið.

Heimildir

Sigurður G. Kristinnsson, Helga Margrét Helgadóttir, Halldór Ö. Stefánsson, Hörður Tryggva-son, Friðgeir Pétursson og Magnús Ólafsson (2013). *Borun holu HF-1 við Hoffell í Nesjum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2013/030, 49 s.

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
18. nóvember 2016

Sigurður G. Kristinsson, Helga Margrét Helgadóttir, Sigurveig Árnadóttir, Halldór Ö. Stefáns-son, Þórólfur H. Hafstað og Magnús Ólafsson (2015). *Hoffell í Nesjum – Hóla HF-2. Borsaga, jarðfræði og mælingar*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2015/027, 30 s.

Sigurður G. Kristinsson, Heimir Ingimarsson, Bastien R. Poux, Þórólfur H. Hafstað, Halldór Ö. Stefánsson, Halldór Ingólfsson, Friðgeir Pétursson, Magnús Ólafsson (2016). *Hoffell í Nesjum – Hóla HF-3. Borsaga, jarðfræði, afköst og mælingar*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2016/033, 43 s.

Stapi-Jarðfræðistofa (1993). *Jarðhitaleit í Austur-Skaftafellssýslu árið 1992*. Sýslunefnd Austur-Skaftafellssýslu, 88 s.

Stapi-Jarðfræðistofa (1994). *Jarðhitaleit í Austur-Skaftafellssýslu árin 1993–1994*. Sýslunefnd Austur-Skaftafellssýslu, 200 s.

Stapi-Jarðfræðistofa (2002). *Hornafljörður–Hoffell. Jarðhitaleit árið 2002*. Greinargerð ÓBS/02-11, 18 s.

Stapi-Jarðfræðistofa (2005). *Hornafljörður–Hoffell. Jarðhitaleit árið 2003–2004*. Greinargerð ÓBS/05-01, 19 s.

Stapi-Jarðfræðistofa (2006). *Jarðhitaleit við Hoffell árið 2005–2006*. Greinargerð ÓBS/06-07, 9 s.

Jarðfræði Esju og orkumál

Ingvar Birgir Friðleifsson

Aðalatriðin í myndunarsögu höfuðborgarsvæðisins má lesa í Esju, á láglendinu vestan og sunnan fjallsins, í Viðey og á ströndinni við Sundin. Berggrunnur höfuðborgarsvæðisins er allur myndaður á kvarter (yngri en 3 milljónir ára). Aldursgreiningar benda til að líparítið í Móskaðahnúkum sé um 1,8 milljón ára (Leó Kristjánsson o.fl. 1980). Jarðlögunum hallar yfirleitt til suðausturs. Elsta bergið kemur fram norðvestast, en jarðlagastaflinn yngist til suðausturs.

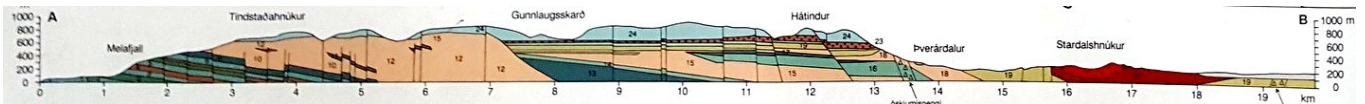
Á kvartertímanum skiptust á jökulskeið og hlýskeið. Skeiðin voru mislöng, en að jafnaði virðast jökulskeiðin hafa komið með um 100 000 ára millibili. Á jökulskeiðunum var allt land hulið þykku ís. Við eldsumbrot undir ísnum hlóðust upp móbergsfjöll yfir gosrásum. Skriðjökklar mótuðu landslagið væntanlega mikið. Þegar jöklarnir hopuðu mynduðust jökulurðir og sandkenndar leirur á flatlendi, en yfir gnæfðu úfin móbergsfjöll. Á hlýskeiðum runnu hraun yfir flatlendið og náðu stundum að fylla dalina milli móbergsfjalla. Þannig hlóðst upp jarðlagastaflir þar sem skiptast á þykkar móbergshrúgur og hraunlagabelti. Oft skiptu móbergsfjöllin landinu í reiti þannig að t.d. hraun frá eldvarpi austan fjalls gat ekki runnið vestur fyrir fjallið. Ef langt hlé varð á gosvirkni í einum dal gat framburður lækja myndað sandlög og móbergsset við rætur fjallsins á sama tíma og hraun brunnu í næsta dal. Í jarðlagastaflanum er því að finna þunnar „greinar“ af sandi, mól og móbergi, sem þykkna í áttina að gildum „stofnum“ (fjöllum) úr gosmóbergi. Vatn á oft greiða leið um slík jarðlög.

Á svæðinu frá Hvalfirði og austur fyrir Skálafell í Kjósarsýslu var eldvirknin stöðug í rúmlega eina milljón ára. Á þessum tíma voru að minnsta kosti 10 jökulskeið. Gosvirknin var tvíþætt; annars vegar voru flæðigos úr sprungum og dyngjum líkt og á Reykjanesi síðustu árbúsundin, en hins vegar megineldstöðvar líkar Hengilssvæðinu og Öskju í Dyngjufjöllum. Eldgos eru þar tíðari en annars staðar í gosbeltinu. Hvert gos hefur að minnsta kosti einn aðfærslugang. Berggrunnurinn undir megineldstöðvum einkennist því öðru fremur af mjög þéttneti ganga. Á Esjusvæðinu voru tvær megineldstöðvar og eru þær nefndar eftir Kjalarnesi og Stardal (Ingvar Birgir Friðleifsson, 1973 og 1985). Auk ganganna einkennast þær af stórum innskotseitlum, sem hafa troðist upp í móbergs- og hraunabeltin í jarðlagastaflanum. Kjalarneseldstöðin er eldri og mun stærri en Stardalseldstöðin, sem er ofar í jarðlagastaflanum (yngri) en jarðlögin í borholum í Reykjavík. Mörg atriði í túlkun á Kjalarneseldstöðinni byggja þó á samanburði við Stardalseldstöðina, sem er mun minna rofin.

Kjalarneseldstöðin er nær algjörlega rofin niður fyrir sjávarmál og sér aðeins í jaðra hennar á Kjalarnesi, á ströndinni þaðan að Mógilsá, í Viðey, og við Sundin. Berggrunninn utan eldstöðvarinnar má hins vegar kanna á Hvalfjarðarströnd, í Esju, og í borholum í Reykjavík, Seltjarnarnesi, og Mosfellssveit. Í jarðlagastafla Esju eru a.m.k. fjögur þykk móbergslög (merki um jökulskeið) frá þeim tíma sem Kjalarneseldstöðin er talin hafa verið virk. Neðar í jarðlagastaflanum er vitað um fjögur jökulskeið; þunn jökulbergslög frá tveimur efri skeiðunum er að finna á Hvalfjarðarströnd við rætur Eyrarfjalls í Kjós (Björn Jónasson og fleiri, 1972), en neðsta jökulbergslagið er að finna í toppi Akrafjalls (Hjalti Franzson, munnlegar upplýsingar). Öll þessi jökulskeið hafa verið rakin upp í Borgarfjörð (Kristján Sæmundsson, munnlegar upplýsingar).

Við samanburð á jarðlagaskipan Esju og berggrunnins undir Reykjavík virðast lögin koma nokkuð vel heim og saman. Sem dæmi má taka að í jarðlagasniðum af borholum á Seltjarnarnesi (S-1 og S-4) kemur fram eitt þykkt móbergslag (250 m), sem hugsanlega svarar

til móbergseininga 4 og 7 í Esju. En í borholu S-3, sem er milli S-1 og S4, eru þóleít hraunlög, alls um 150 m (Jens Tómasson og fleiri, 1977). Norðantil í Esju eru þessi móbergslög aðskilin, en sameinast í suðvesturhluta Esju. Móbergseining 4 myndaði þar fjall og runnu hrauneiningar 5 og 6 upp að því úr norðri, en kaffærðu það ekki, og hlóðst því móbergseining 7 beint ofan á móbergseiningu 4 suðaustantil (Ingvar Birgir Friðleifsson, 1973). Neðan við móbergslagið M á Seltjarnarnesi er þóleít basalt BP₁, sem lílega svarar til Esju einingar 3, en þessi eining er talin fyrsti gosfasinn í Kjalarneseldstöðinni. Þetta gæti skýrt hversu þykk eining BP₁ er á Seltjarnarnesi (tæpir 800m). Neðan við BP₁ er ólívínþóleít eining BÓ, sem svarar til einingar 2 í Esju. Þar fyrir neðan er myndbreytt (hraun) og ferskt (gangar) þóleít basalt BP₂, sem líklega svarar til einingar 1 í Esju. Ef þessi tenging er rétt ætti berg í einingu BS á Seltjarnarnesi að hafa öfuga segulstefnu, en einingar M, BP₁, BÓ og BP₂ rétta. Til að kanna þetta þarf við næstu borun á Seltjarnarnesi að taka kjarnabút úr þessum lögum til segulmælinga, eða sökkva segulmæli niður fyrir fódðringu í einhverri vinnsluholunni. Gosvirknin færðist smátt og smátt austur. Kjalarnesmegineldstöðin þokaðist út úr gosbeltinu, en gosvirknin varð mest þar sem Kistufell í Esju er nú. Þá fengu jarðlögin neðst í Kistufelli sinn mikla halla. En ekki leið á löngu þar til gosvirknin var komin austur fyrir Grafardal. Þar myndaðist stórt og myndarlegt eldfjall, Stardalsmegineldstöðin. Öskjuvatn myndaðist, svipað



og síðar gerðist í Öskju í Dyngjufljóllum, en askjan fylltist síðan af gosefnum. Þunnfljótandi hraunlög runnu langt vestur úr virka gosbeltinu og mynduðu hinn reglulega hraunlagabunka, sem nú myndar topp Esjunnar frá Skálafelli vestur undir Hvalfjörð. Æviskeiði eldstöðvarinnar lauk með líparitgosum undir jökli á bogsprungum umhverfis Stardalsöskjuna. Glæsilegustu menjar þeirra eldsumbrota eru Móskaðshnúkar, en einnig má finna líparit sunnan við öskjurimann í Grímmannsfelli (Ingvar Birgir Friðleifsson, 1973 og 1985). Þar fyrir vestan eru fjölmargar vinnsluholur Orkuveitu Reykjavíkur, sem yljað hafa höfuðborgarbúum áratugum saman. Jarðlögin þar má tengja inn í jarðlagastafla Esju. Það er ómetanlegt fyrir jarðfræðinga, sem greina jarðlög í borholum með smásjárskoðun á borsvarfi, að geta skoðað samsvarandi jarðlög í kulnuðum megineldstöðvum eins og í Esjunni, og í virkum megineldstöðvum eins og Hengli og á Torfajökulssvæðinu. Þannig eru jarðfræðirannsóknir mikilvægur þáttur orkumála.

Heimildir

Björn Jónasson, Margrét Hallsdóttir, Sigríður Friðriksdóttir, Snorri Zóphóniasson, og Þórunn Skaftadóttir, 1973.

Eyrarfjall jarðfræðiskýrsla. Ritgerð jarðfræðinema við Háskóla Íslands, 45 bls. Leiðbeinandi Kristján Sæmundsson.

Ingvar Birgir Friðleifsson, 1973. Petrology and structure of the Esja Quarternary volcanic region, Southwest Iceland. Doktorsritgerð við Háskólann í Oxford, 208 bls.

Ingvar Birgir Friðleifsson. Jarðsaga Esju og nágrennis. Árbók Ferðafélags Íslands 1985, 141-172.

Jens Tómasson, Þorsteinn Thorsteinsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Ingvar Birgir Friðleifsson, 1977.

Höfurborgarsvæði, Jarðhitarannsóknir 1965-1973. Orkustofnun, Jarðhitadeild, 109 bls.

Leó Kristjánson, Ingvar Birgir Friðleifsson og Norman D. Watkins, 1980. Stratigraphy and paleomagnetism of the Esja, Eyrarfjall and Akrafjall Mountains, SW-Iceland. Journal of Geophysics 47, bls. 31-42.

Gas í grjót - Niðurdæling jarðhitagass á Hellisheiði

Ingvi Gunnarsson¹, Edda Sif Aradóttir¹, Bergur Sigfússon¹, Deirdre Clark², Þorsteinn Ari Þorgeirsson¹, Sandra Snæbjörnsdóttir², Eric Oelkers^{3,4}, Bjarni Már Júlíusson⁵, og Sigurður Reynir Gíslason².

¹Orkuveita Reykjavíkur, Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík

²Jarðvísindastofnun Háskólans, Háskóli Íslands, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík

³Earth Sciences, University College London, United Kingdom

⁴GET, CNRS/UMR5563, Toulouse France

⁵Orka náttúrunnar, Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík

Orkuveita Reykjavíkur og síðar Orka náttúrunnar hefur frá því Nesjavallavirkjun var tekin í notkun leitað leiða til að minnka útblástur jarðhitagasa frá virkjunum sínum. Þegar Hellisheiðarvirkjun var tekin í notkun 2006 og aukning varð á styrk brennisteinsvetnis í Reykjavík jók OR áherslu á að leysa þetta mikilvæga umhverfismál fyrir jarðhitaiðnaðinn.

Mögulegar leiðir til að leysa vandann voru skoðaðar og eftir ítarlega skoðun var ákveðið að leysing í vatni og niðurdæling jarðhitagassins aftur ofan í jarðhitageyminn væri sú lausn sem hentaði best fyrir aðstæður hér á landi. Tilraunaniðurdælingar voru gerðar þar sem jarðhitagasi var dælt niður í berggrunninn og niðurstöður þeirra gáfu tilefni til bjartsýni á getu aðferðarinnar til að minnka útblástur frá jarðhitavirkjunum. Árið 2014 hófst niðurdæling umtalsverðs hlutfalls jarðhitagass frá Hellisheiðarvirkjun þar sem um 8000 tonnum af gasi var dælt niður árlega. Jafnframt var dælt niður ferilefnum til að geta fylgst með endurkomu jarðhitagassins sem dælt var niður inná vinnslusvæði virkjunarinnar. Reglulega er fylgst með styrk ferilefnis í vinnsluholum virkjunarinnar og samanburður á styrk ferilefnis og breytingum í styrk jarðhitagasa í holunum segir til um hversu stór hluti jarðhitagassins binst í jarðhitakerfinu. Niðurstöður benda til að umtalsverður hluti gasanna skilar sér ekki aftur í vinnsluholur virkjunarinnar og hefur líklega bundist á formi steinda í jarðhitakerfinu.

Niðurdæling jarðhitagassins hefur gengið vel og um mitt árið 2016 var niðurdælingin tvöfölduð. Afkastageta stækkaðs gashreinsunarkerfis er 16000 tonn á ári eða 60% og 30% af H₂S og CO₂ útblæstri Hellisheiðarvirkjunar.

„Lága viðnámið“

Ragna Karlsdóttir

ÍSÖR

Viðnámsmælingar hafa verið notaðar til jarðhitarannsóknna á Íslandi í hartnær 70 ár og eru gjarnan eitt af fyrstu skrefum í rannsókn jarðhitakerfa. Í fyrstu leituðu menn að lágviðnámi í jörðu sem gat endurspeglað jarðhita, þar sem vatnsfyllt berg með heitu vatni gefur lægra viðnám en þurrt berg. Viðnámsmyndin varð flóknari þegar farið var að nota viðnámsmælingar á háhitasvæðum og í ljós kom að hitaháð ummyndun bergsins gaf einkennandi viðnámsmynd.

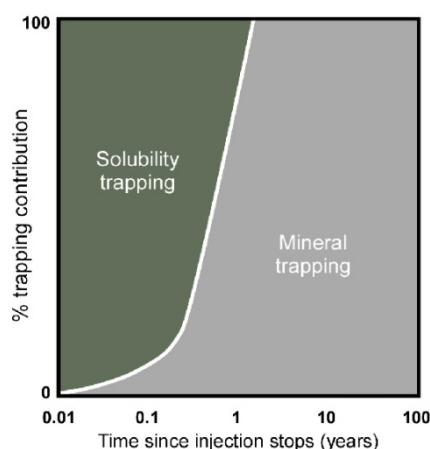
En málið er ekki svo einfalt. Lágt viðnám í jörðu er ekki alltaf vísbending um jarðhita og lága viðnámið getur gefið upplýsingar um ýmislegt annað en jarðhita.

Nýjar mæliaðferðir og túlkun þeirra gáfu svo enn nákvæmari og stærri mynd af viðnámsgerð jarðar.

CarbFix verkefnið: Binding kolefnis í basalti

Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir¹, Eric H. Oelkers^{1,2,3}, Kiflom Mesfin¹, Edda Sif Aradóttir⁴, Knud Dideriksen⁵, Ingvi Gunnarsson⁴, Einar Gunnlaugsson⁴, Juerg M. Matter^{6,7}, Martin Stute⁷, Sigurdur R. Gislason¹

¹Institute of Earth Science, University of Iceland, Iceland ²CNRS/UMR 5563, Université Paul Sabatier, France ³Earth Science, University College London, UK ⁴Reykjavik Energy, Iceland ⁵Nano-Science Center, Department of Chemistry, University of Copenhagen, Denmark ⁶Ocean and Earth Science, University of Southampton, UK ⁷Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, NY, USA



Mynd 1. Tímaskali kolefnisbindingar í CarbFix verkefninu (Snæbjörnsdóttir et al. 2016)

Loftslagsbreytingar eru ein stærsta vátta okkar tíma og við þurfum að bregðast við hækkuðum styrk koldíoxíðs (CO_2) í andrúmslofti með öllum tiltækum ráðum, eins fljótt og auðið er. Ein af þeim aðferðum sem hægt er að notast við er binding kolefnis í bergi. Svo kolefnisbinding beri árangur þarf að þróa öruggar aðferðir og finna hentuga staði svo bindingin sé varanleg. Binding kolefnis í basalti gæti uppfyllt þau skilyrði.

CarbFix verkefnið var sett á laggirnar árið 2007 í þeim tilgangi að meta bindimöguleika kolefnis í basalti. Verkefnið er samvinnuverkefni nokkurra stofnana og háskóla með Orkuveitu Reykjavíkur, Háskóla Íslands, franska rannsóknarráðið í Toulouse og Columbia háskóla í New York í broddi fylkingar. Hugmyndin gengur út á að leysa koldíoxíðið í vatni fyrir eða við niðurdælingu þess í basaltlög. Basalt er mjög hvarfgjarnt og inniheldur um 25wt% kalsíum-, magnesíum- og járnoxíð. Kolsýrði niðurdælingarvökvinn ræðst á bergið og leysir þessar katjónir sem bindast koldíoxíðinu og mynda karbónatsteindir á borð við kalsít (CaCO_3), magnesít (MgCO_3) og síderít (FeCO_2). Þar með er koldíoxíðið bundið í steindir þar sem það getur verið stöðugt í milljónir ára (Gislason & Oelkers, 2014).

Árið 2012 voru gerðar tvær niðurdælingartilraunir á CarbFix 1 svæðinu, í Svínahrauni í Þrengslum, um þrem kílómetrum sunnan Hellsheiðarvirkjunar. Í janúar-mars var 175 tonn af CO_2 dælt niður í basaltlög á um 500-800 m dýpi og á um 35-50°C hita, og í júní-ágúst sama ár var 73 tonn af gasblöndu frá Hellsheiðarvirkjun, sem samanstóð af 75% CO_2 og 25% brennisteinsvetni, dælt niður við sömu aðstæður. Yfirgripsmikilli efnavöktun var haldið úti fyrir, eftir og á meðan á niðurdælingartilraununum stóð. Niðurstöður úr þessari vöktun benda til

Þess að um 95% þess kolefnis sem dælt var niður sé bundið í steindir innan tveggja ára frá niðurdælingu (Matter et al., 2016; Snæbjörnsdóttir et al., 2016).

Þessar fyrstu niðurstöður lofa góðu og ef vel tekst til gæti aðferðin nýst til að binda koldíoxíð á öruggan hátt í milljónir ára. Basalt er algengasta bergtegundin á yfirborði jarðar; það þekur um 5% af yfirborði meginlandanna, auk þess sem stór hluti hafsbotsins er basalt. Við náttúrulegar aðstæður eins og á jarðhitasvæðum þar sem CO₂ úr kvikuinnskotum í rótum jarðhitakerfanna leikur um bergið eru allt að 70 kg af CO₂ náttúrulega bundið í karbónatsteinum í hverjum rúmmetra af basalti (Wiese et al., 2008). Þetta þýðir að fræðilega gæti basalt úthafshryggjanna bundið CO₂ frá bruna alls jarðefnaeldsneytis á jörðinni (Snæbjörnsdóttir et al., 2014). Hver framtíð kolefnisbindingar verður ræðst þó af pólitískum og efnahagslegum hvötum fremur en tilstuðlan vísindamanna.

Heimildir

Gislason, S.R., Oelkers, E.H., 2014. Carbon storage in basalt. *Science*, v. 344, pp. 373-374

Matter, J. M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Oelkers, E. H., Gislason, S. R., Aradóttir, E. S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Sigurdardóttir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H. A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Fernandez de la Reguera Taya, D., Hall, J., Dideriksen, K., and Broecker, W. S., 2016, Rapid carbon mineralization for permanent and safe disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions.: *Science*, v. 352, pp 1312-1314.

Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Oelkers, E.H., Mesfin, K.G., Aradóttir, E.S., Dideriksen, K., Gunnarsson, I., Gunnlaugsson, E., Matter, J.M., Stute, M., Gislason, S.R., 2016. The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the *in situ* mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix site in SW-Iceland: *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Accepted subject to minor revisions.

Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármannsson, H., Einarsson, G. M., and Gislason, S. R., 2014, CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges: *Energy Procedia*, v. 63, p. 4585-4600.

Wiese, F., Fridriksson, T., and Ármannsson, H., 2008, CO₂ Fixation by Calcite in High-temperature Geothermal Systems in Iceland: ISOR, Iceland Geosurvey, ISOR-2008/003

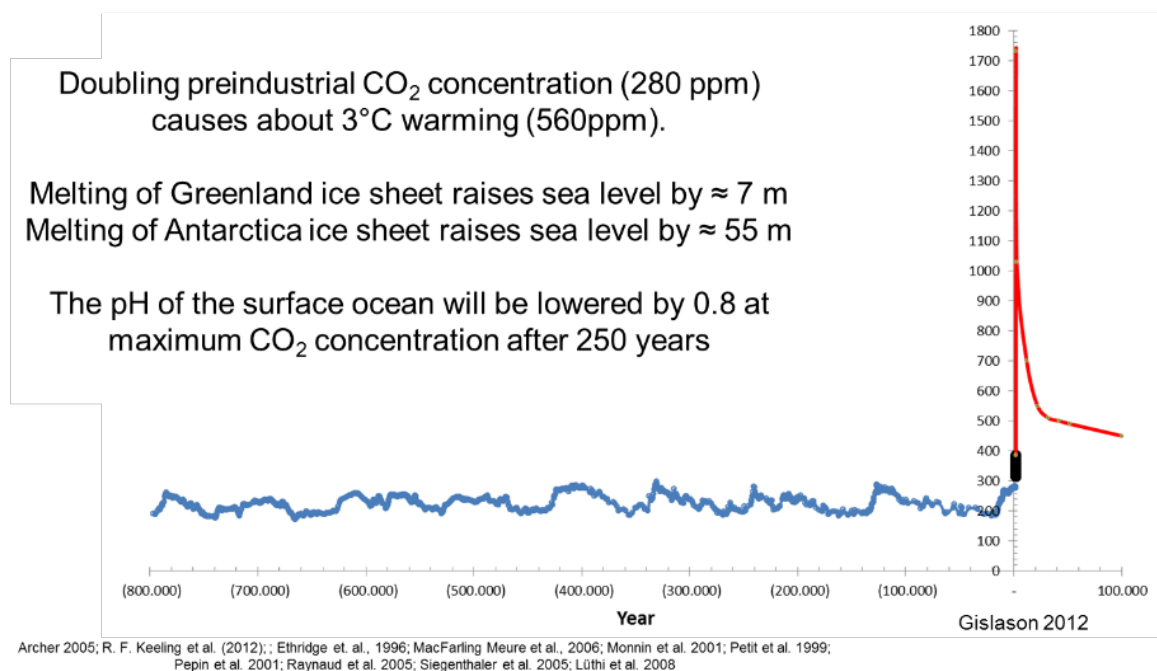
Staða kolefnishringrásarinnar á Jörðinni. Hvað er til ráða?

Sigurður Reynir Gíslason

Jarðvísindastofnun Háskólans

Spár um styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti í framtíðinni eru uggvænlegar. Ef við höldum áfram að auka losun þess með bruna lífrænna orkugjafa, og gerum ekkert til að binda koltvíoxíðið, margfaldast styrkur þess í andrúmslofti eins og sjá má á 1. mynd. Ef við breytum ekki háttum okkar er talið að við og afkomendur okkar brennum alla lífræna orkugjafa á jörðinni á næstu fimm öldum, og mest af þeim á næstu 200 árum. Áætlað er að styrkurinn verði hátt í 1800 ppmv eftir 250 ár, en talið er að hiti hækki um 3°C við tvöföldun þess styrks sem var fyrir iðnbýltingu (280 ppmv). Það mun síðar taka veðrun bergs um milljón ár að koma styrknum niður í það sem hann áður var (Sigurður Reynir Gíslason 2012).

If we burn all fossil fuel (5000 GtC) at the current rate
increase and do nothing about it, most of it will be finished
in 250 years and all in 500 years
(Caldeira and Wickett 2003; Archer 2005)

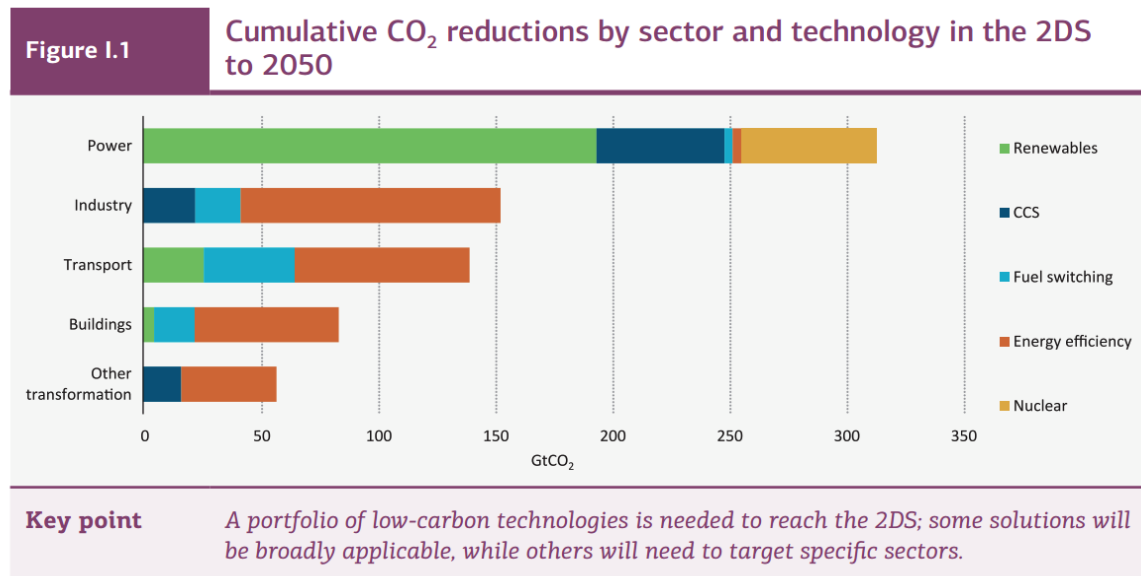


Mynd 1. Styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti 800.000 ár aftur í tíma og 100.000 ár fram á við (lítillega breytt frá Sigurði Reyni Gíslasyni 2012 og heimildum þar í).

Ef við viljum koma í veg fyrir frekari súrnun sjávar og breytingar á loftslagi og sjávarstöðu verðum við að taka okkur á. Vera sjálfbærari og þróa aðferðir til að binda koltvíoxíð, sem losnar við bruna lífrænna orkugjafa, í a.m.k. þúsund ár. Það verður best gert með því að binda það í bergi.

Nú hafa þjóðir heims komið sér saman um að takmarka losun koltvíoxíðs á næstu áratugum þannig að hiti á jörðinni hækki ekki um meira en 2°C (COP21). Til þess að ná þessum

markmiðum COP21 þarf að bæta orkunýtingu, auka not endurnýjanlegra orkugjafa og kjarnorku en minnka bruna lífrænna orkugjafa eins og sjá má á 2. mynd (International Energy Agency 2015). Loks þarf að fanga koltvíoxíð úr útblæstri orkuvera sem nota lífræna orkugjafa, og iðjuvera eins og t.d. járnbræðsla, álvera og sementsverksmiðja. Þetta koltvíoxíð, um 80 gígatonn (Gt CO₂), verður síðan að binda í bergi fyrir árið 2050.



2. mynd. Heildarminnkun í losun CO₂ til andrúmslofts til þess að minna en tveggja gráðu markmið COP21 um hlýnun andrúmslofts náist (International Energy Agency, 2015).

Nú lítur út fyrir að við þurfum að gera enn betur í takmörkun á losun koltvíoxíðs til andrúmslofts en markmið COP21 gerir ráð fyrir, til að hlýnum jarðar verði ekki meiri en tvær gráður á næstu áratugum og öldum (The Global Carbon Project, 2015). Við verðum að losa minna og binda meira koltvíoxíð.

Í erindinu mun ég lýsa stöðu kolefnisbúskaps jarðarinnar og kolefnisbindingar í bergi.

Heimildir

International Energy Agency (2015). Energy technology perspectives 2015, Paris: OECD/IEA. Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action. Executive Summary. <http://www.iea.org/etp/etp2015/>

Sigurður Reynir Gíslason (2012). Kolefnishringrásin. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík, Iceland, 269 bls.

The Global Carbon Project (2015). The Global Carbon Budget 2015. <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>

Assessing volatile heterogeneity in the Icelandic mantle and transport of volatiles from the mantle to surface

Sæmundur A. Halldórsson¹, Andri Stefánsson¹, David R. Hilton², Jaime D. Barnes³, Shuhei Ono⁴, Erik H. Hauri⁵, Enikő Bali¹, Martin J. Whitehouse⁶, Margaret E. Hartley⁷

¹ Institute of Earth Sciences, University of Iceland, Sturlugata 7, 101 Reykjavík, Iceland

² Fluids and Volatiles Laboratory, Geosciences Research Division, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, La Jolla, CA, USA

³ Department of Geological Sciences, University of Texas, Austin, Texas, USA

⁴ Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

⁵ Department of Terrestrial Magmatism, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., USA

⁶ NORDSIM, Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Sweden

⁷ School of Earth and Environmental Sciences, University of Manchester, Manchester, UK

Assessing primary volatile heterogeneity of the mantle beneath Icelandic is an essential requirement before the role of secondary modifications following the release and transport of volatiles from the mantle-crust system and into hydrothermal systems, can be evaluated. Recently published stable isotope data (D, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{37}\text{C}$) suggest that the Icelandic mantle samples at least two distinct mantle volatile reservoirs that (i) preserve the geochemical signatures of Earth's heterogeneous accretion and early differentiation and (ii) show strong evidence for recycled crustal material trapped by the Iceland plume source. These findings are largely consistent with observations from radiogenic and noble gas isotope systematics.

By targeting a suite of subglacially erupted basalts along with melt inclusions and sulfide minerals present in mafic minerals from primitive Icelandic basalts, for the stable isotopic composition of H_2O (δD), O ($\delta^{18}\text{O}$) and S ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{36}\text{S}$), we aim to address (i) how many endmember components are required to describe volatile heterogeneity present in the Icelandic mantle and (ii) what elemental, stable and radiogenic isotopic compositions best represents Iceland's primordial, and/or recycled volatile mantle components? By combining our results with trace element ratios ($\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$, Cl/Nb and S/Dy) and radiogenic isotopes (Sr, Nd, Hf and Pb), we can test for modification of mantle-derived stable isotope values and constrain better the degree of volatile heterogeneity in Iceland mantle and, in particular the mantle plume source. We will present results from a detailed study involving chlorine isotopes and on-going work on hydrogen isotopes. The Iceland chlorine isotope data display significant variability in $\delta^{37}\text{Cl}$ values, from -1.8‰ to +1.4‰, and are devoid of any evidence for seawater-derived enrichments in Cl. This is consistent with the notion that the variation in $\delta^{37}\text{Cl}$ values in Icelandic basalts can be solely attributed to mantle heterogeneity.

Phonolite-hosted zeolite deposits in the Kaiserstuhl Volcanic Complex, Germany

Tobias Björn Weisenberger¹ and Simon Spürgin²

¹ISOR, Iceland GeoSurvey, Grensásvegur 9, 108, Reykjavík, Iceland; tobias.b.weisenberger@isor.is

²Hans G. Hauri Mineralstoffwerke, Bötzingen, Germany; s.spuergin@hauri.de

Several subvolcanic phonolitic intrusions occur within the Miocene Kaiserstuhl Volcanic Complex (KVC) located in the central-southern segment of the Upper Rhine Graben, which is part of the European Cenozoic Rift System. Hydrothermally altered phonolitic rocks are of economic interest, due to the high (>40 wt%) zeolite content, which accounts for the remarkable zeolitic physicochemical properties of the ground rock. These properties have widespread industrial application in water softening, catalysis, remediation of soils and soil quality, wastewater treatment, and as additive in the cement industry. Currently the largest phonolite intrusion Fohberg is active in mining, located in the eastern part of the KVC. The Endhale phonolite, approximately 1.5 km to the north marks a further deposit currently under exploration. Both phonolites are hosted in Tertiary sedimentary units.

The aim of this study is to carry out a new mineralogical and geochemical data a) to evaluate the manifestation of hydrothermal alteration of the Fohberg and Endhale phonolitic intrusions, and b) to constrain the physical and chemical properties of the fluids, which promoted hydrothermal replacement of primary igneous minerals. The high degree of alteration is in contrast to the only slightly altered Kirchberg phonolite in the western KVC. The alkaline intrusive bodies are characterized by the primary mineralogy: feldspathoid mineral, K-feldspar, aegirine-augite, wollastonite, and andradite, with additional REE-minerals (e.g. götzenite). Fluid-induced re-equilibration of feldspathoid minerals and wollastonite caused breakdown to a set of secondary phases. Feldspathoid minerals are totally replaced by secondary phases including various zeolite species, calcite, and barite. Wollastonite breakdown results in the formation of various zeolites, calcite, pectolite, sepiolite, and quartz. The large variability of secondary minerals indicates a heterogenic fluid composition throughout the phonolitic intrusions and through time. Zeolites formed during sub-solidus hydrothermal alteration under alkaline conditions and completely replace feldspathoid minerals in the matrix of the rock. A sequence of Ca-Na dominated zeolite species (gonnardite, thomsonite, mesolite) is followed by pure sodium endmember species (analcime, natrolite). These sequence reflects an increase in $\log[a\text{Na}^+]/(a\text{H}^+)$ of the precipitating fluid. In contrast to the Fohberg phonolite the Endhale phonolite contains analcime in addition to natrolite as pure Na zeolite species. The appearance of analcime is caused by higher silica activity during fluid rock interaction, which favors the formation of analcime over natrolite. The Fohberg phonolite is cut by fractures, which are totally or partially sealed with secondary minerals. Secondary minerals contain zeolites, followed by calcite and a variety of other silicates, carbonates, and sulphates as younger generations. Stable isotope analyses of late fracture calcite indicate the late circulation of meteoric fluids and mobilization of organic matter from surrounding sedimentary units.

Í upphafi skyldi endinn skoða

Þorbjörg Hólmgeirsdóttir¹, Matthías Loftsson¹ og Eiríkur Freyr Einarsson²

¹Mannvit hf.

²Norconsult í Noregi (áður Mannvit hf.)

Jarðfræði er veigamikill hluti af allri mannvirkjagerð. Mannvirki eru grunduð á jarðlögum og meirihluti byggingarefnis okkar er á einn eða annan hátt úr klöpp og setlögum. Til dæmis eru vegir yfir 90% úr steinefni og aðalbyggingarefnið okkar Íslendinga, steinsteypa, er yfir 70% steinefni og til viðbótar er sementið unnið úr ýmsum jarðefnum. Í anda þessa eru jarðfræðingar mikilvægir í starfsliði verkfræðistofa og endurspeglast það m.a. í því að hjá Mannviti starfa að jafnaði um 10-15 jarðfræðingar hverju sinni. Þeir koma að margvíslegum verkefnum, bæði við skipulag, hönnun og rannsóknir/prófanir í tengslum við mannvirkjagerð af öllu tagi.

Mannvit hefur frá árinu 1993 rekið rannsóknarstofu þar sem gerðar eru allar hefðbundnar efnisprófanir og margar sérhæfðar prófanir sem tengjast efnistækni af ýmsu tagi og framleiðslu- og framkvæmdaefirliti. Unnið er eftir alþjóðlegum stöðlum. Markmið þessara prófana er annars vegar að ákvarða eða meta eiginleika hins rannsakaða efnis og niðurstöðurnar notaðar til að ákvarða hönnunarforsendur. Hins vegar eru niðurstöðurnar notaðar til að meta hvort efni standist þar til gerðar kröfur, t.d. við eftirlit með framleiðslu eða framkvæmdum eða vegna skemmdagreininga. Nú eru sjö manns það sem má kalla fastir starfsmenn á rannsóknarstofunni, þar af eru fjórir jarðfræðingar.

Með vel ígrunduðum jarðfræði- og efnisrannsóknum er oft hægt að sjá og koma í veg fyrir ýmis kostnaðarsöm og jafnvel hættuleg vandamál. Íðulega helst það í hendur að víðtækar efnisprófanir í hönnunar- og framkvæmdaferli leiða af sér að kostnaður við mannvirkjagerð lækkar og að sama skapi getur þessi kostnaður hækkað ef menn sýna ekki aðgát.

Gott dæmi um þetta er þegar fyrir nokkrum árum var búið að hanna tvær tíu hæða blokkir sem átti að reisa á óbyggðu svæði í byggð. Útboðsgögn voru tilbúin og átti að auglýsa útboðið fljótlega. Algenzt er að hús á svæðinu standi á staurum og hvíli á hörðu setlagi sem er á um það bil 3 til 4 m dýpi. Reynslan sýndi að við smáframkvæmdir á svæðinu gátu lagnir sigið og skemmst á meðan húsin stóðu eftir. Íbúar í nágrenninu höfðu því áhyggjur af þessum nýframkvæmdum og óskuðu eftir rannsóknum.

Jarðfræðingur á vegum Mannvits fór á svæðið stuttu fyrir fyrirhugað útboð með það að markmiði að afla upplýsinga til að meta líkur á hugsanlegu sigi á nágrannalóðum þegar grunnar yrðu teknir fyrir mannvirkjunum. Rannsókn beindist fyrst að könnun á þykkt og gerð jarðvegs yfir þessu harða seti. Grafnar voru gryfjur, jarðefni skoðað og mælt dýpi á grunnvatn. Við athugun kom í ljós að undir harða setlaginu, sem fyrirhugað var að grunda á, var mýkra set úr silti sem ekki sá fyrir endann á við gryfjutöku. Því var ákveðið að bora nokkrar holur á svæðinu.

Vestast á svæðinu stendur klöppin upp úr og í holu sem var staðsett ekki langt þar frá fundust engin ummerki um þetta neðra siltlag og klöppin var á 5,2 m dýpi. Um miðbik svæðisins var önnur hola, þar var siltlagið um 4-5 m að þykkt og klöppin á um 9,5 m dýpi. Hvorug hinna holanna náði á fastan botn, í þriðju holunni, þeirri sem var syðst á svæðinu var neðra siltlagið

tæpir 22 m að þykkt. Í þeirri holu var holubotn í 34,0 m í sandi með skeljabrotum. Borun á fjórðu holunni var hætt á 9,5 m dýpi í neðra siltlaginu. Á svæðinu er því allverulegur bergstallur, nákvæm staðsetning hans er óþekkt.

Niðurstaðan var sú að útboðið frestaðist og hönnun á svæðinu var breytt. Önnur blokkin reis í óbreyttri mynd, enda er sú bygging staðsett vestast á svæðinu þar sem er tiltölulega grunnt á klöpp. Hin byggingin var fyrirhuguð þar sem neðra siltlagið mældist þykkast, hún hefur ekki enn risið. Í staðinn stendur þar nú létt, einnar hæðar bygging og bílastæði. Leiða má að því líkum að einfaldara og ódýrara verklag hefði verið að ráðast strax í jarðfræðirannsóknir og skipuleggja og hanna með tilliti til aðstæðna.

Boranir við Dælislaug í Fljótum

Þórolfur H. Hafstað

ÍSÖR

Jarðhiti er nokkuð útbreiddur á utanverðum Tröllaskaga. Hitaveitur eru til að mynda á öllum þéttbýlisstöðunum er og sú nýjasta á Hofsósi. Þar er notað heitt vatn utan úr Hrolllaugsdal, sem fannst eftir umfangamikla jarðhitaleit. Skagafjarðarveitur hafa á undaförnum áratugum einnig lagt alllangar hitaveitur í dreifbýli í héraðinu og er mikill meiri hluti þess nú jarðhitaður.

Jarðhiti er í Fljótum hefur verið þekktur lengi á allmörgum stöðum og var sæmilega kannaður á níunda áratugnum. Heitt vatn var og er notað á nokkrum bæjum þar, einkum í nágrenni við Reykjarhól í Austur-Fljótum og ekki síður Barðslaug og Sólgarða; þar er skóli og sundlaug.

Töluvert umfangmiklar yfirborðsrannsóknir höfðu verið gerðar í sveitinni fyrir 1990 og þá var ljóst orðið að jarðhitinn fylgdi yfirleitt norð-suðlægum sprungum. Efnagreiningar bentu til að heitast væri vestast á svæðinu; við Barðslaug og Reykjarhól á Bökkum en að í Austur-Fljótum mætti búast við lægri hita. Á báðum þessum svæðum þóttu vera allgóðar jarðhitalíkur samkvæmt viðnámsmælingum.

Tvær fiskeldisstöðvar voru stofnsettar þarna í grennd við þekkta jarðhitastaði; annars vegar á Lambanesreykjum/Hraunum og hins vegar við Reykjarhól á Bökkum og þar var á báðum stöðum borað eftir heitu vatni. Hvorug þessara fiskeldisstöðva stöðva hefur lifað af þrátt fyrir heitt vatn.

Á svæðinu utan við Barð er jarðhiti í landi Langhúsa. Þar hét áður Dælislaug og var fyrst borað við hana árið 1997 eftir að vandræði urðu við nýtingu laugarinnar. Þá náðist samband við sprungu, sem gaf sjóðandi heitt vatn á innan við 80 m dýpi. Aftur var borað þarna 2014 og þá niður á um 200 m dýpi. Þá fékkst mun meira vatn og nóg til að Skagafjarðarveitur byrjuðu á hitaveitulögn um Fljót.

Nokkuð vantaði þó á að nægu vatnsmagni hefði verið náð en fyrri áfangi veitulagnarinnar um Austur-Fljót og Stíflu var gerður sumarið 2015. Jafnframt var boruð ný hola sem lukkaðist ekki. Ljóst var að ráðgjöf ÍSÖR hafði brugist og vatnsgefandi sprungu hallaði öðruvísi en ætlað var.

Fjórða holan var strax staðsett með tilliti til þess (LH-04) og var boruð 2015-16. Hún varð 170 m djúp og þá farin að gjósa um 30 L/s.

Það er mikið.

Athyglisvert er að skoða hversu heitt vatn fæst þarna á litlu dýpi. Það veldur því að hanna þarf grunnar vinnsluholur með tilliti til þess að hiti sé $>110^{\circ}\text{C}$ og þess vegna þarf að nota öxuldælu.

Niðurstaðan varð að þarna fékkst yfirdrifið sjálfrennsli.

Með er mynd af því rennsli frá Skagafjarðarveitum.

