



**Haustráðstefna
Jarðfræðafélags Íslands**

Jarðhitarannsóknir og þróunarsamvinna

**Heiðursgestir
Dr. Halldór Ármannson jarðefnafræðingur á ÍSOR
og
Prófessor Stefán Arnórsson jarðefnafræðingur
við Háskóla Íslands**

Ágrip erinda
Haldin á í Orkugarði
Grensásvegi 9
23. nóvember 2012



**Haustráðstefna
Jarðfræðafélags Íslands**

Jarðhitarannsóknir og þróunarsamvinna

**Heiðursgestir
Dr. Halldór Ármannson jarðefnafræðingur á ÍSOR
og
Prófessor Stefán Arnórsson jarðefnafræðingur
við Háskóla Íslands**

Ágrip erinda
Haldin á í Orkugarði
Grensásvegi 9
23. nóvember 2012

Umsjón:

Þorsteinn Sæmundsson, Björn S. Harðarson, Theódóra Matthíasdóttir
og Sigurlaug María Hreinsdóttir

Dagskrá Haustráðstefnu JFÍ, 23. nóvember 2012

08:30 – 09:10	Skráning
Fundarstjóri	Sigurlaug María Hreinsdóttir
09:10 – 09:20	Setning
	Þorsteinn Sæmundsson
09:20 – 09:40	Jarðhitaleit á Dóminíku
	Daði Þorbjörnsson
09:40 – 10:00	Koldíoxíð og sprengigíggar
	Kristján Sæmundsson
10:00 – 10:20	Gas í gufuaugum og borholum á Þeistareykjum
	Finnbogi Óskarsson
10:20 – 10:40	Af nemendum og kennurum Jarðhitaskóla Háskóla Sameinuðu þjóðanna
	Ingvari Birgi Friðleifsson
10:40 – 11:10	Kaffi
11:10 – 11:30	Ölsmökkun
	Jón Benjamínsson
11:30 – 11:50	Jarðhitasvæðið Dallol á saltsléttu Afar rekbeltisins
	Helga Margrét Helgadóttir
11:50 – 12:10	Jarðhitasvæðið á Seltjarnarnesi-Umhverfisvæn og sjálfbær nýting í fjörutíu ár
	Hrefna Kristmannsdóttir
12:10 – 13:00	Matur
Fundarstjóri	Björn S. Harðarson
13:00 – 13:20	Hávermisholur og vatnsæðar
	Stefán Arnórsson
13:20 – 13:40	Efnaeiginleikar rennis holu IDDP-1, Kröflu
	Halldór Ármannsson
13:40 – 14:00	Binding kolefnis í bergi
	Sigurður R. Gíslason
14:00 – 14:20	Nýting jarðhita – Eru ráðgjafar á hálum ís?
	Kristján Jónasson
14:20 – 14:40	Kísilútfellingar úr affallsvatni jarðhitavirkjana
	Ingvi Gunnarsson
14:40 – 15:00	Uppruni grunnvatns. Þverfaglegar rannsóknir
	Árný Erla Sveinbjörnsdóttir
15:00 – 15:30	Kaffi
15:30 – 15:50	Yfirborðsjarðhiti á Hengilssvæðinu
	Grétar Ívarsson
15:50 – 16:10	Efnasamsetning jarðsjávarins Reykjanesi
	Vigdís Harðardóttir
16:10 – 16:30	Þrívítt viðnámslíkan af Hengli, reiknað út frá Magnetótellúrískum (MT) mælingum
	Guðni Karl Rósenkjær
16:30 – 16:50	Lághitaummyndun basalts – áhrif CO ₂ , hita og tíma
	Andri Stefánsson
17:00 -	Móttaka

Efnisyfirlit

Dagskrá Haustráðstefnu JFÍ, 23. nóvember 2012.....	i
Efnisyfirlit.....	iii
Ávarp formanns Jarðfræðafélags Íslands	v
Ágrip erinda.....	1
Lághitaummyndun basalts – áhrif CO ₂ , hita og tíma	3
Andri Stefánsson	
Uppruni grunnvatns. Þverfaglegar rannsóknir.....	4
Árný E. Sveinbjörnsdóttir.	
Jarðhitaleit á Dóminíku	5
Daði Þorbjörnsson & Sigurður Sveinn Jónsson	
Gas í gufuaugum og borholum á Þeistareykjum	6
Finnbogi Óskarsson	
Yfirborðsjarðhiti á Hengilssvæðinu. Kortlagning, lýsing, efnafræði gass og náttúrulegt varmatap.	9
Gretar Ívarsson	
Þrívítt viðnámslíkan af Hengli, reiknað út frá Magnetótellúrískum (MT) mælingum	10
Guðni Karl Rosenkjær, Douglas Oldenburg og Knútur Árnason.	
EFNAEIGINLEIKAR RENNIS HOLU IDDP-01, KRÖFLU	13
Halldór Ármannsson, Þráinn Friðriksson, Guðmundur Heiðar Guðfinnsson, Magnús Ólafsson, Finnabogi Óskarsson og Daði Þorbjörnsson	
Jarðhitasvæðið Dallol á saltsléttu Afar rekbeltisins	16
Helga Margrét Helgadóttir og Hjalti Franzson	
Jarðhitasvæðið á Seltjarnarnesi-Umhverfisvæn og sjálfbær nýting í fjörutíu ár	18
Hrefna Kristmannsdóttir	
Af nemendum og kennurum Jarðhitaskóla Háskóla Sameinuðu þjóðanna.....	21
Ingvar Birgir Friðleifsson	
Kísilútfellingar úr affallsvatni jarðhitavirkjana	26
Ingvi Gunnarsson og Bergur Sigfússon	
Ölsmökkun	28
Jón Benjamínsson	
Koldíoxíð og sprengigígar	29
Kristján Sæmundsson	
Nýting jarðhita – Eru ráðgjafar á hálum ís?	31
Sigmundur Einarsson og Kristján Jónasson	
Binding kolefnis í bergi	34
Sigurður R. Gislason, Eric H. Oelkers, Wallace S. Broecker, Einar Gunnlaugsson, Edda Sif Aradóttir, Bergur Sigfusson, Ingvi Gunnarsson, Juerg M. Matter, Martin Stute, Jennifer Hall, Kiflom Mesfin, Sandra Snæbjörnsdóttir, Helgi Alfreðsson, Domenik Wolff-Boenisch, Andri Stefánsson, Iwona Galeczka, Snorri Gudbrandsson Gabrielle Stockman, Alex P. Gysi, Gudni Axelsson, Jordy Bruno, Fidel Grandia, Knud Didriksen og Susan Stipp	
Hávermisholur og vatnsæðar.....	37
Stefán Arnórsson	

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
23. nóvember 2012

Efnasamsetning jarðsjávarins á Reykjanesi.....	42
Vigdís Harðardóttir	
Ritskrár Halldórs Ármannssonar og Stefáns Arnórssonar	44
Ritskrá Halldórs Ármannssonar	44
Ritskrá Stefáns Arnórssonar	52

Ávarp formanns Jarðfræðafélags Íslands

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands árið 2012 er tileinkuð að þessu sinni jarðhitarannsóknnum og þróunarsamvinnu. Jarðhiti og jarðhitarannsóknir hafa verið mikið í umræðunni á Íslandi undanfarin ár og hefur þróunarsamvinna okkar orðið mun fyrirferðarmeiri hin síðari ár víða um heim.

Heiðursgestir haustráðstefnunnar eru að þessu sinni þeir Dr. Halldór Ármannsson jarðefnafræðingur á ÍSOR og Prófessor Stefán Arnórsson við Háskóla Íslands, en þeir ná báðir þeim áfanga að verða sjötugir í ár. Báðir þessir vísindamenn standa fremstir meðal jafningja þegar kemur að rannsóknum á jarðhita og jarðefnafræði.

Dr. Halldór Ármannsson hefur um langt árabil unnið að rannsóknum á jarðhita og jarðefnafræði. Eftir að Halldór lauk doktorsnámi í Englandi hefur hann starfað víða um heim að rannsóknum sínum, en frá árinu 2003 hefur hann starfað á ÍSOR, en þar á undan á Orkustofnun. Eins og sést á ritlista Halldórs sem er birtur hér í ráðstefnuheftinu hefur hann verið ötull vísindamaður og á að baki glæsilegan feril.

Prófessor Stefán Arnórsson hefur um langt árabil unnið að rannsóknum á jarðhita og jarðefnafræði. Eftir að hann lauk doktorsnámi frá Englandi hóf hann störf við Orkustofnun og byggði þar upp starfsemi jarðefnafræðideildarinnar og stýrði henni í um 10 ár. Eftir veru sína á Orkustofnun hóf Stefán störf við Háskóla Íslands og hefur starfað þar síðan við rannsóknir og kennslu. Líkt og með Halldór þá sést á ritlista Stefáns að hann hefur verið ötull vísindamaður og á að baki glæsilegan feril.

Stjórn félagsins óskar þeim Halldóri og Stefáni til hamingju með þeirra glæsilegu ferla og vonar að íslenskt jarðvísindasamfélag fái að njóta krafta þeirra um ókomin ár. Stjórnin vill ennfremur þakka þeim, sem leitað var til um að flytja erindi á ráðstefnunni, fyrir góðar undirtektir. Það er von okkar að þessi haustráðstefna stuðli að fjörlegri og gagnlegri umræðu um jarðhitarannsóknir og gefi okkur betri yfirsýn yfir þá miklu þróunarsamvinnu sem Ísland er aðili að.

f.h. Jarðfræðafélags Íslands

Þorsteinn Sæmundsson, formaður

Ágrip erinda

Lághitaummyndun basalts – áhrif CO₂, hita og tíma

Andri Stefánsson

Jarðvísindadeild Háskóla Íslands, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík

Ummyndun bergs við lágan hita felur í sér uppleysingu frumsteinda og glers í snertingu við jarðhitavatn og myndun síðsteinda. Margir þættir haft áhrif á ummyndunarferlið svo sem hiti, efna- og steindasamsetning bergs, efnasamsetning jarðhitavökvans og tími. Ummyndun basalts hefur fyrst og fremst verið skoðuð í náttúrunni þar sem erfitt getur reynst að skilja að mismunandi þætti sem hafa áhrif á ummyndunarferlið. Á undanförunum árum hafa rannsóknir verið stundaðar við Jarðvísindadeild Háskóla Íslands á ummyndun bergs með aðstoð tilrauna og hermireikninga á efnahvörfum milli vatns og bergs. Á þennan hátt má skilja að mismunandi þætti sem hafa áhrif á ummyndunarferlið og rannsaka þá kerfisbundið. Þeir þættir sem skoðaðir hafa verið er hiti (25-250°C), samsetning vökva (CO₂, H₂S, selta), samsetning bergs (basalt, ríólít, gler og frumsteindir) og ummyndunartími. Í fyrirlestrinum verður gerð grein fyrir helstu niðurstöðum tengt lághitaummyndun basalts í kolsýruríku og snauðu vatni. Í kolsýruríku og í léttisúru vatni (pH 5-7) myndast steindir eins og kaólínít, kalsedón, Ca-Mg-Fe-ríkur leir og Mg-Fe-Ca-rík karbónöt. Þetta leiðir til upptöku Fe, Al og Si í ummyndunarsteindir og lækkunar á styrk þeirra í vatninu á meðan styrkur Ca og Mg í vatninu fer eftir magni og samsetningu ummyndunarsteinda sem falla út og pH gildi vatnsins. Í basísku vatni (pH>8) sem myndast vegna umfangsmikillar ummyndunar og/eða lágs styrks CO₂ í efnakerfinu myndast steindir eins og kalsedón, seladónít, Ca-Mg-Fe-ríkur leir, geislasteindir og kalsít. Myndun steindanna leiðir til lækkunar á styrk flestra efna í vatninu. Sá þáttur sem hefur mest áhrif á ummyndun basalts við lágan hita er pH-gildi vatnsins. pH gildið ræðst af styrk síru í kerfinu og ummyndunartíma sem stjórna magni basalts sem hefur leyst upp og magni og gerð ummyndunarsteinda sem myndast. Hitastig hefur hins vegar minni áhrif á efnahvörfin. Í ljósi þessa er lághitaummyndun basískra hraunlaga á Íslandi dæmigerð lágsýru ummyndun sem einkennist af myndun seladóníts og kalsedóns, smektíts og klóríts og að lokum geislasteinda og kalsíts eftir því sem tími ummyndunar eykst og pH-gildi vatnsins hækkar.

Uppruni grunnvatns. Þverfaglegar rannsóknir.

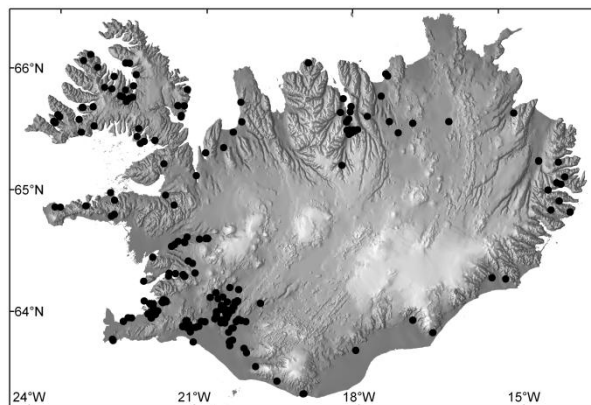
Árný E. Sveinbjörnsdóttir.

Jarðvísindastofnun Háskólans

Massagreiningar hafa verið stundaðar í rúm 40 ár við Raunvísindastofnun Háskólans. Margvísleg verkefni hafa verið unnin með massagreinum stofnunarinnar m.a. á grunnvatni og rennislisleiðum þess. Í upphafi mælinganna voru einungis vetnissamsætur í vatni mældar og þær notaðar til að kortleggja meðalvetnisstyrk úrkomu á Íslandi og meta grunnvatnsstrauma. Síðan þá hafa bæði súrefnis- og kolefnissamsætur bæst við. Á undanförunum árum hefur skilningur aukist á því að þegar samsætur eru notaðar sem kenniefni til að rekja uppruna vatns og kortleggja rennislisleiðir þess er nauðsynlegt að samtúlka þær og efnasamsetningu vatnsins auk grunnvatns- og jarðfræðilegra aðstæðna. Í fyrirlestrinum verða sýnd dæmi um nauðsyn slíkra samtúlkana.

Sem dæmi má nefna að með auknum rannsóknum hefur æ betur komið í ljós að grunnvatn í íslenska berggrunninum, sem ættað er að hluta til sem úrkoma frá síðasta jökulskeiði, er mun algengara en menn töldu. Stundum er hægt að þekkja þetta gamla vatn á samsætu-hlutföllunum eingöngu, en oft sker það sig ekki frá þeirri úrkomu sem einhversstaðar fellur á landið í dag, vegna blöndunar við yngra og þyngra grunnvatn. Til að rekja uppruna þessa vatns er nauðsynlegt að íhuga önnur jarðefnafræðileg gögn, grunnvatnsaðstæður og jarðfræði. Jarðhitakerfin á höfuðborgarsvæðinu eru lýsandi fyrir flókið samspil þessara þátta. Einnig má nefna jarðhitakerfin á sprungusveimum norðurhluta eystra gosbeltisins.

Á árunum 2001 til 2003 var unnið að viðamiklu rannsóknarverkefni styrktu af Rannís, sem nefndist Vatnsauðlindir Íslands. Markmið þessa verkefnis var að skýra á magnbundinn hátt þau ferli sem stjórna styrk efna og samsætna í vatni, aldur þess og uppruna. Safnað var yfir 300 sýnum víðs vegar af landinu við sem breytilegastar aðstæður hvað varðar gerð og aldur berggrunns, nálægð við sjó og hitastig vatns (mynd 1). Gagnagrunnur þessa verkefnis er einstakur því þarna var í fyrsta sinn farið í viðamikla sýnasöfnun á öllu landinu með það í huga að samtúlka samsætur, efnafræði vatns og jarðfræðilegar aðstæður. Úrvinnslu þessara gagna er ekki lokið en fyrirlesturinn byggir að hluta til á þeim.



Mynd 1. Sýnatökustaðir vatns innan verkefnisins Vatnsauðlindir Íslands.

Jarðhitaleit á Dóminíku

Daði Þorbjörnsson & Sigurður Sveinn Jónsson

Íslenskar Orkurannsóknir, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Frá því í desember 2011 og fram í apríl 2012 boruðu Jarðboranir þrjár grannar tilrauna-holur á eyjunni Dóminíku við Karíbahaf. Markmið verkefnisins var að afla upplýsinga um möguleika á jarðhitanytingu á eyjunni.

Dóminíka er hluti af eyjaklasa (eyjaboga) sem kallaður er Litlu-Antillaeyjar (Lesser Antilles). Á eyjunni eru nokkur eldstöðvakerfi og ummerki jarðhita sjást á nokkrum stöðum á yfirborði.

Á Dóminíku búa um 73 þúsund manns en landið hlaut sjálfstæði frá Bretlandi árið 1978. Eyjan er 751 km² að stærð og er því í hópi minnstu þjóðríkja. Meginstöðir hagkerfis landsins hvíla á landbúnaði, einkum bananarækt og þjónustu við ferðamenn. Landrými til landbúnaðar er þó mjög takmarkað þar sem eyjan er mjög fjalllend og stórskorin.

Nokkur hluti rafmagns fyrir eyjaskeggja er framleiddur í litlum vatnsorkuverum en stærstur hluti er framleiddur með díselrafstöðvum. Yfirvöld á Dóminíku eygja von um að raforkuframleiðsla með jarðhita muni spara Dóminíkumönnum olúkaup og mikilvægan gjaldeyri.

Rannsóknarholurnar voru staðsettar af BRGM og CFG í Frakklandi sem hafa á undanförmum árum unnið að jarðhitarannsóknnum á Dóminíku. Verkefnið var kostað af Frönsku þróunarsamvinnustofnuninni (ADF), Evrópusambandinu og stjórnvöldum á Dóminíku.

Fyrsta holan var boruð niður á tæplega 1500 m dýpi, önnur holan niður á ríflega 1500 m dýpi og sú þriðja á 1200 m dýpi. Holurnar eru allar grannar en í þeim er 7“ vinnslufóðring.

Starfsmenn íslenskra orkurannsókna (ÍSÖR) sáu um hönnun holanna, jarðfræðiráðgjöf við borun, mælingar í holunum, prófanir á þeim og umhverfiseftirlit.

Greining á borsvarfi leiddi í ljós að ignímbrít og gjóskuflóðaset eru algengustu myndanirnar ásamt innskotum eða gúlum úr dasíti. Ummyndun er talsverð þegar komið er í jarðhitakerfið og gefur ágæt vísbendingar um hita.

Aðstæður í grennd við holurnar gáfu ekki tilefni til langra prófana en þær gáfu ágæt fyrirheit um mögulega nýtingu. Stefnt er að því að bora tvær vinnsluholur á Dóminíku árið 2013.

Eftirlit með áhrifum borana og prófana á umhverfið fólst í reglulegri sýnatöku af yfirborðsvatni í grennd við holurnar. Sýnataka hófst um hálfum mánuði áður en borun fyrstu holunnar hófst og lauk um þremur mánuðum eftir að prófunum á síðustu holunni lauk. Borun og prófanir virðast ekki hafa haft neikvæð áhrif á vatn á áhrifasvæði framkvæmdanna.

Gas í gufuaugum og borholum á Þeistareykjum

Finnbogi Óskarsson

Íslenskar Orkurannsóknir, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Markviss jarðhitakortlagning á Þeistareykjum hófst á áttunda áratug síðustu aldar með kortlagningu á yfirborðsvirkni og viðnámsmælingum. Jarðefnafræðiniðurstöður árána 1972-1982 birtust í skýrslu Gests Gíslasonar o.fl. (1984) og svo í grein Halldórs Ármannssonar o.fl. (1986), en þar er greint frá gufusýnum úr 34 gufuaugum víðsvegar á svæðinu, auk sýna úr volgrum. Á grundvelli þessara niðurstaðna var svæðinu skipt í fimm svæði (sjá mynd 1); Ketilfjall (A), Bóndhólsskarð (B), Þeistareykjagrundir (C), Tjarnarás (D) og Vestursvæði (E), og þóttu þrjú þeirra (A, C, og D) vænleg m.a. vegna gasstyrks (tafla 1) en þar sjást einnig mest ummerki yfirborðsvirkni.

Gasstyrkur var gegnumgangandi hæstur á svæðum A og D. Á svæði C var styrkur H_2S svipaður en styrkur CO_2 lægri, en á svæði E var CO_2 styrkur svipaður og á svæði D en H_2S styrkur mjög lágur. Engin gufusýni náðust af svæði B. Samsætugögn renndu frekari stöðum undir þessa skiptingu (Darling og Ármannsson, 1989). Þau bentu til þess að gufa sem kemur upp á svæði D hafi að einhverju marki þétt á leiðinni og því séu tölur um gashita þar of háar, svo og að gufa á svæði C sé að stærstum hluta 2. stigs gufa og gashiti því of lágur.

Árin 1991-1997 var fylgst nokkuð reglulega með gasstyrk í þremur gufuaugum, einu á hverju svæðanna A (G-3), C (G-1) og D (G-6) og til eru 5-6 gassýni úr hverju þeirra og nokkrar samsætugreiningar í þéttivatni. Síðan þá hefur ekki verið fylgst með gasstyrk í gufuaugum á svæðinu þar til síðastliðið haust þegar ráðist var í að safna sýnum úr völdum gufuaugum og mæla gasflæði um jarðveg svo að til væru bakgrunnsgildi fyrir umhverfiseftirlit með fyrirhugaðri jarðgufuvirkjun á svæðinu. Safnað var sýnum úr sex gufuaugum, þar á meðal vænlegustu augunum í nágrenni þeirra þriggja sem fylgst var með á 10. áratugnum.

Nokkrar breytingar á gasstyrk í gufunni hafa sést síðan 1981, þótt ekki sé um að ræða samstígar breytingar innan svæðis (tafla 2). Þó hefur vetnisstyrkur hækkað verulega á svæði A, og sömuleiðis metanstyrkur að nokkru marki. Enn sér þess merki að CO_2 styrkur er umtalsvert lægri á svæði C en á hinum svæðunum þótt reyndar mælist einnig lág gildi í G-10 sem er syðst á svæði D. Þegar hugmyndalíkan af svæðinu var sett fram (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 2008) var þetta túlkað sem svo að undir svæði C og jafnvel D væri vatnskerfi á litlu dýpi og að vatn í því kerfi sjóði fyrir tilstilli varma úr gufunni úr dýpra kerfinu. Gufan sem þar kemur upp á yfirborðið er því að stærstum hluta slík 2. stigs gufa. Hins vegar er gert ráð fyrir að yfirborðsgufa við Tjarnarás og einkum Ketilfjall sé 1. stigs gufa ættuð úr dýpra og heitara kerfinu.

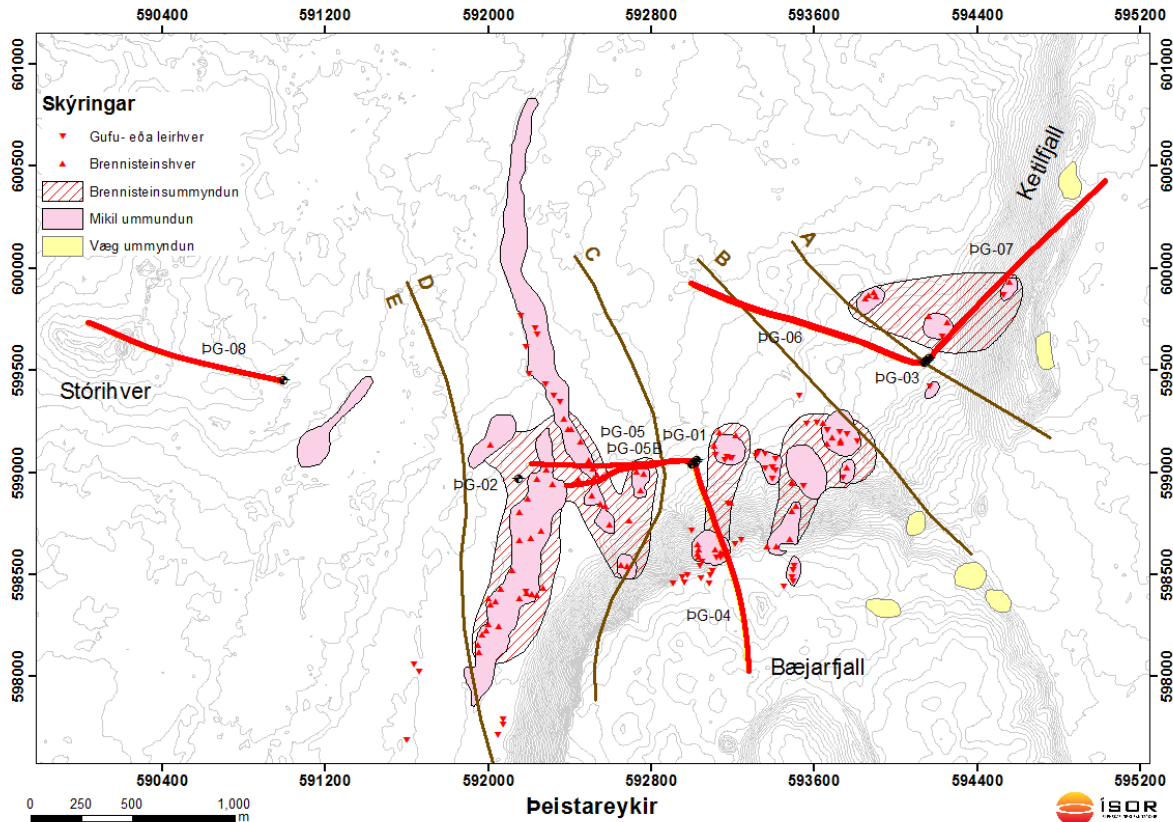
Eftir síðustu aldamót var ráðist í rannsóknaboranir á svæðinu og um þessar mundir er verið að bora 10. djúpu háhitaholuna, ÞG-9 frá nýjum borteig rétt norðan við gangnamannakofann. Lega hinna holnanna er sýnd á mynd 1. Sýni hafa verið tekin úr þeim öllum utan ÞG-8 sem er köld. Holur 2, 5 og (enn sem komið er) 7 hafa aðeins verið prófaðar skömmu eftir borun en hinar holurnar fimm hafa fengið að blása samfelld í nokkra mánuði, nógu lengi til að góð efnasýni fengjast úr þeim. Holur 1, 3, 4, 6 og 7 hafa allar mjög hátt vermi (≥ 2000 kJ/kg) og berghiti í þeim hefur mælst $>300^\circ C$.

Þegar efnasamsetning gufu úr holunum er skoðuð sést svipað mynstur og fyrir gufuaugun. CO₂-styrkur í gufu er lægstur í holum 1, 4 og 6 sem liggja innan eða inn á svæði C, hærri í holum 3 og 5b sem liggja á svæðum A og D en langhæstur í holu 7 sem boruð er undir Ketilfjall. Vökvinn í holu 7 sker sig líka úr, þar er Na-HCO₃ vatn en ekki Na-Cl vatn eins og í hinum holunum sem bendir til þess að hún fari nærri jaðri svæðisins eða tilheyri jafnvel öðru vatnskerfi austan Ketilfjalls. Niðurstöður samsætugreininga á renni holunnar benda raunar frekar til hins síðara.

Heimildaskrá

- Ármannsson, H., Gíslason, G. and Torfason, H. (1986). Surface exploration of the Theistareykir high-temperature geothermal area, Iceland, with special reference to the application of geochemical methods. *Applied Geochemistry*, **1**, 47-64.
- Arnórsson, S., Fridriksson, Th. and Gunnarsson I. (1998). Gas chemistry of the Krafla geothermal field. *Water-Rock Interaction*, **9**, 612-616.
- Ásgrímur Guðmundsson, Bjarni Gautason, Christian Lacasse, Guðni Axelsson, Gunnar Þorgilsson, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Kristján Sæmundsson, Ragna Karlsdóttir, Snorri Páll Kjara, Sveinn Óli Pálmarsson, Sæunn Halldórsdóttir og Þorsteinn Egilsson (2008). Hugmyndalíkan jarðhitakerfisins á Þeistareykjum og jarðvarmamat með rúm-málsaðferð. Íslenskar orkurannsóknir, Mannvit verkfræðistofa og Verkfræðistofan Vatna-skil, skýrsla, ÍSOR-2008/024, 67 s.
- Darling, W.G. and Ármannsson, H. (1989). Stable isotope aspects of fluid flow in the Krafla, Námafjall and Theistareykir geothermal systems of northeast Iceland. *Chemical Geology*, **76**, 197-213.
- Gestur Gíslason, Gunnar V. Johnsen, Halldór Ármannsson, Helgi Torfason og Knútur Árnason (1984). Þeistareykir – Yfirborðsrannsóknir á háhitasvæðinu. Orkustofnun, skýrsla, OS-84089/JHD-16, 134 s.

Haustráðstefna Jarðfræðafélags Íslands
23. nóvember 2012



Mynd 1. Háhitaholur, yfirborðsvirkni og yfirborðsummyndun á Þeistareykjum.

Tafla 1. Styrkur koldíoxíðs og brennisteinsvetnis og áætlaður djúphiti á undirsvæðum A, C og D skv. niðurstöðum Halldórs Ármannssonar o.fl. (1986).

Svæði	CO ₂ (mg/kg)	H ₂ S (mg/kg)	Djúphiti (°C)
A	6000-21000	1900-4700	270-315
C	300-4000	600-3000	230-270
D	3900-25000	500-3300	275-310

Tafla 2. Styrkur koldíoxíðs og brennisteinsvetnis og áætlaður djúphiti (með gashitamælum Stefáns Arnórssonar o.fl., 1998) á undirsvæðum A, C og D skv. niðurstöðum ÍSOR frá hausti 2012.

Gufuauga	Eldra nafn	Svæði	CO ₂ (mg/kg)	H ₂ S (mg/kg)	Meðalgashiti
G-101	G-1	C	3300	880	271
G-102	G-3	A	7500	1900	292
G-103	G-6	D	4900	1300	310
G-104	G-12	C	2500	800	288
G-105	G-9	D	9700	1200	289
G-106	G-10	D	2700	530	263

Yfirborðsjarðhiti á Hengilssvæðinu. Kortlagning, lýsing, efnafræði gass og náttúrulegt varmatap.

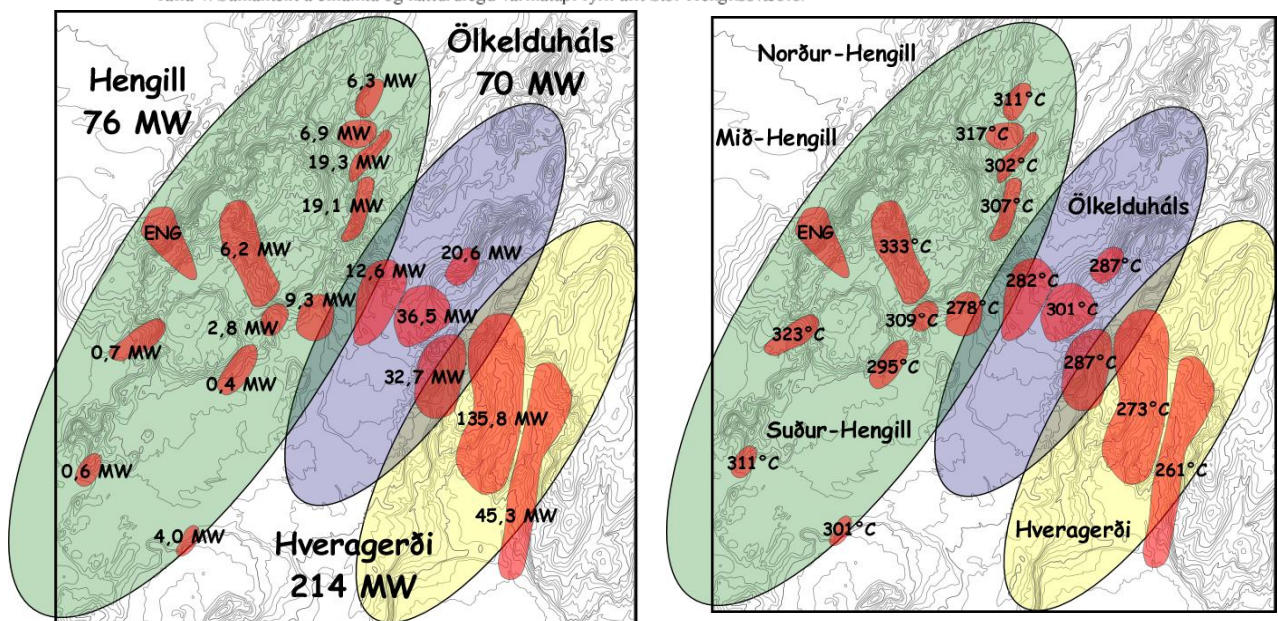
Gretar Ívarsson

Orkuveita Reykjavíkur, Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík

Erindið fjallar um niðurstöður rannsókna sem gerðar voru á Stór-Hengilssvæðinu árin 2007-2010. Allur yfirborðsjarðhiti var kortlagður, gasi úr gufuaugum safnað og náttúrulegt varmatap mælt og/eða áætlað. Helstu niðurstöður um stærð jarðhitasvæða, varmatap og hitastig í jarðhitageyminum má sjá í töflunni fyrir neðan, svo á myndunum tveimur. Fjórar skýrslur um efnið komu út í ágúst 2011 á vegum OR.

	Svæði	Flatarmál	Varmatap	CO ₂ -hiti	H ₂ S-hiti	Meðalhiti
Norður Hengill	Nesjavellir	21.056 m ²	6,34 MW	300°C	321°C	311°C
	Nesjolaugagil	14.552 m ²	6,89 MW	308°C	325°C	317°C
	Köldulaugagil	13.111 m ²	19,29 MW	287°C	317°C	302°C
	Hogavíkurlaugar	9.587 m ²	19,10 MW	299°C	314°C	307°C
	Samtals	58.306 m²	51,62 MW	299°C	319°C	309°C
Mið Hengill	Fremstidalur	7.570 m ²	9,30 MW	280°C	276°C	278°C
	Miðdalur	8.746 m ²	2,80 MW	309°C	309°C	309°C
	Innstidalur	17.085 m ²	6,15 MW	337°C	330°C	333°C
	Engjadalur	á ekki við	á ekki við	á ekki við	á ekki við	á ekki við
	Samtals	33.401 m²	18,25 MW	302°C	298°C	300°C
Suður Hengill	Sleggjubeinsdalur	1.450 m ²	0,73 MW	318°C	328°C	323°C
	Skarðsmýrarfjall	688 m ²	0,40 MW	288°C	302°C	295°C
	Skíðaskáli	2.647 m ²	0,60 MW	304°C	318°C	311°C
	Hverahlíð	10.839 m ²	4,00 MW	287°C	314°C	301°C
	Samtals	15.624 m²	5,73 MW	303°C	317°C	310°C
Ölkeldu-háls	Lakaskörð	26.336 m ²	20,55 MW	289°C	285°C	287°C
	Ölkelduháls	19.190 m ²	36,50 MW	305°C	297°C	301°C
	Kýrgil	14.440 m ²	12,64 MW	287°C	277°C	282°C
	Samtals	59.966 m²	69,69 MW	296°C	288°C	291°C
Hveragerði	Reykjadalur	25.998 m ²	32,70 MW	288°C	285°C	287°C
	Grændalur	170.577 m ²	135,80 MW	270°C	278°C	273°C
	Gufudalur	51.275 m ²	45,29 MW	260°C	263°C	261°C
	Samtals	247.850 m²	213,80 MW	270°C	274°C	272°C
	Samtals alls	415.147 m²	359,09 MW	294°C	299°C	296°C

Tafla 4. Samantekt á efnahita og náttúrulegu varmatapi fyrir allt Stór-Hengilssvæðið.



Kort 5. Náttúrulegt varmatap í MW umfram bakgrunnsgildi.

Þrívítt viðnámslíkan af Hengli, reiknað út frá Magnetó-tellúrískum (MT) mælingum

Guðni Karl Rosenkjær^{1,2}, Douglas Oldenburg¹ og Knútur Árnason².

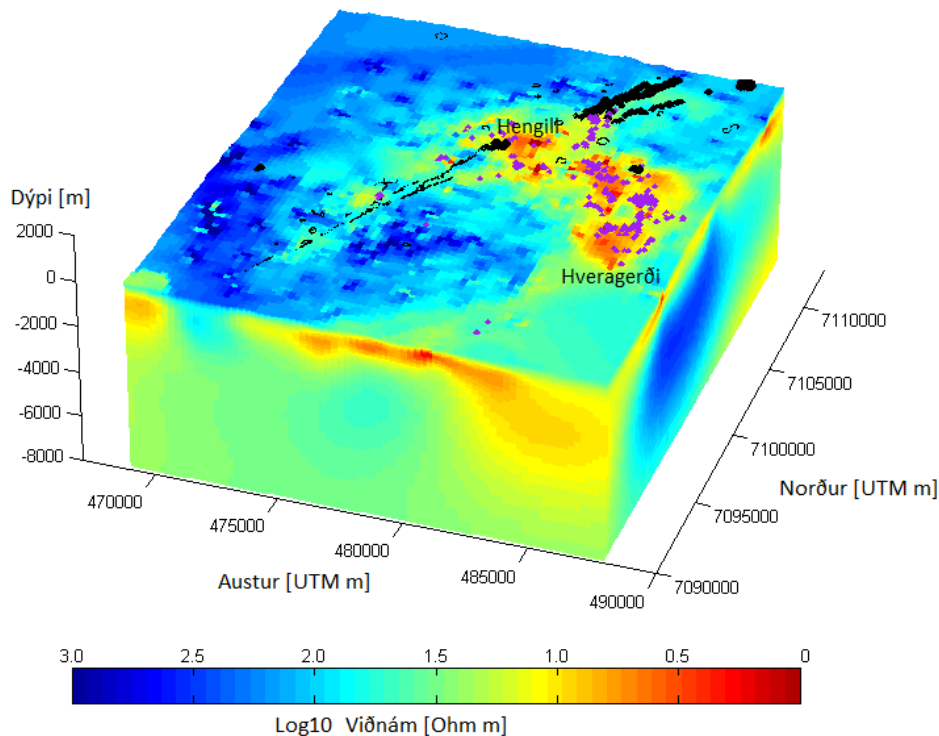
¹Háskólinn í Bresku Kólumbíu, 6339 Stroes Road, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada. ²Íslenskar Orkurannsóknir, Grensásvegur 9, 108 Reykjavík, Ísland.

Viðnámsmælingar eru notaðar til rannsókna á jarðhitakerfum. Líkan af viðnámsgerð jarðar er reiknuð út frá mælingum af yfirborði og reynt er að tengja niðurstöður við eiginleika jarðhitakerfisins eins og jarðhitaummyndun, hita og lekt. Samtúlkun á viðnámsdreifingunni við önnur líkön og upplýsingum frá jarðfræði, jarðefnafræði og öðrum jarðeðlisfræðilegum athugunum gefur okkur góða yfirsýn um jarðhitakerfið.

Andhverf líkangerð (e. inversion modeling) er aðferðafræði sem er gjarnan notuð til að draga fram upplýsingar um viðnám (eða umhverfuna leiðni) frá rafsegulmælingum. Í andhverfri líkangerðinni, eru notuð lögmál rafsegulfræðinnar sem lýsa samanbandi milli viðnáms og rafsegulsviða til þess að leiða út viðnámsdreifingu sem að hefur samfeldar viðnámsbreytingar, uppfyllir skilyrði sem eru gefin og hermir mælingarnar innan ásættanlegra marka. Þessi úrvinnsla er krefjandi í tölvuúrvinnslu, sérstaklega þegar vandamálið er leyst þrívítt. Framfarir í tölvukosti, bæði vél- og hugbúnaði, hafa gert það að fýsilegum kosti að framkvæma þrívíða andhverfa líkangerð út frá magnetótellúrískum (MT) mælingum á jarðhitasvæðum og þannig fá nákvæmari viðnámslíkön. Til að tryggja gæði niðurstaðna er mikilvægt að notast við góða aðferðafræði og nýta upplýsingar frá öðrum mælingum.

Um 145 MT auk um 280 Transcient ElectroMagnetic (TEM) mælinga hafa verið gerðar á Hengilssvæðinu í ýmsum rannsóknar verkefnum og á vegum Orkuveitunnar (Árnason og fl., 2010). Þrívíðri andhverfu líkangerð hefur verið beit á MT mælingar af Hengilssvæðinu (Rosenkjær, 2011; Árnason og fl., 2010) en í báðum tilfellum er notast við gísín módel, með 1 km lárétta möskva stærð. Niðurstöður beggja rannsókna sýndu fram á notagildi þrívíðrar andhverfrar líkangerðar fyrir MT mælingar í jarðhitaleit. Það var líka ljóst að æskilegt væri að auka upplausn líkansins, nota minni lárétta möskva.

Innan GEORG verkefnisins, Advanced 3D Geophysical Imaging Technologies for Geothermal Resource Characterization (Haijiang og fl, 2012), er verið að skoða þrívíðar líkanaaðferðir sem notaðar eru í jarðhitaleit og þá með sérstöku tilliti til MT og smáskjálfta mælinga (e. micro seismics). Hluti af því verkefni var að vinna með háupplausnar líkani af Hengli (Rosenkjær og Oldenburg, 2012), þar sem notaður var hugbúnaður hannaður við Háskólann í Bresku Kólumbíu. Módelið var unnið skrefum, þar sem upplausnin líkansins var augin í hverju skrefi og niðurstöður úr fyrra líkni uppfærð með tilliti til nýja möskvanetsins. Með þessu var unnt að fá viðnámslíkan sem er með 250 m lárétta möskva stærð. Á mynd 1 sést yfirborð viðnámslíkansins og er greinilegt að lágt viðnám nærri yfirborði á svæði sem teygir sig frá Hengli að Hveragerði fellur saman með ummyndun á yfirborði (fjólubláir punktar).



Mynd 1. Viðnámslíkan út frá MT mælingum af Hengilssvæði (Rosenkjær og Oldenburg, 2012). Megin gossprungan eru sýndar með svörtum lit og jarðhitaummyndun á yfirborði með fjólubláum punktum. Samræmið milli ummyndunnar á yfirborði og lágviðnáms sést vel á svæðinu frá Hengli til suðausturs

Líkanið sýnir þrjá athyglisverða viðnámsskrokka.

- Lágviðnámskápu við nærri yfirborði, sem teygir sig frá Hengli til suðausturs að Hveragerði. Hún fellur að ummyndun á yfirborði.
- Háviðnáms hryggir með stefnu suðaustur- norðvestur sem fellur megin gossprungun og suðaustur sem fellur að og skerast undir Hengilinum.
- Djúplægt lágviðnám á , um 4000 m dýpi undir Hengli.

Viðnámið nærri yfirborðinu, þ.e.a.s. lágviðnámskápa og háviðnámskjarni þar undir er tengt við háhita ummyndun í berginu. Lágviðnámskápan stafar af smektít og zeólíta leirumyndunum, sem verða við hitastig á milli 100-230°C. Við hitastig yfir 250°C verður klórít og epídót ummyndun ríkjandi en þær valda hærra viðnámi - háviðnámskápu. Við enn hærri hita með auknu dýpi lækkar viðnám aftur og er greinilegt lágviðnám undir norðaustanverðu svæðinu sem rís hæst í um 4000 m u.s.m. undir sjálfum Henglinum. Þessi viðnámsdreifing fellur vel að hugmyndum um jarðfræði Hengilssvæðisins (Franzson og fl., 2010).

Heimildir

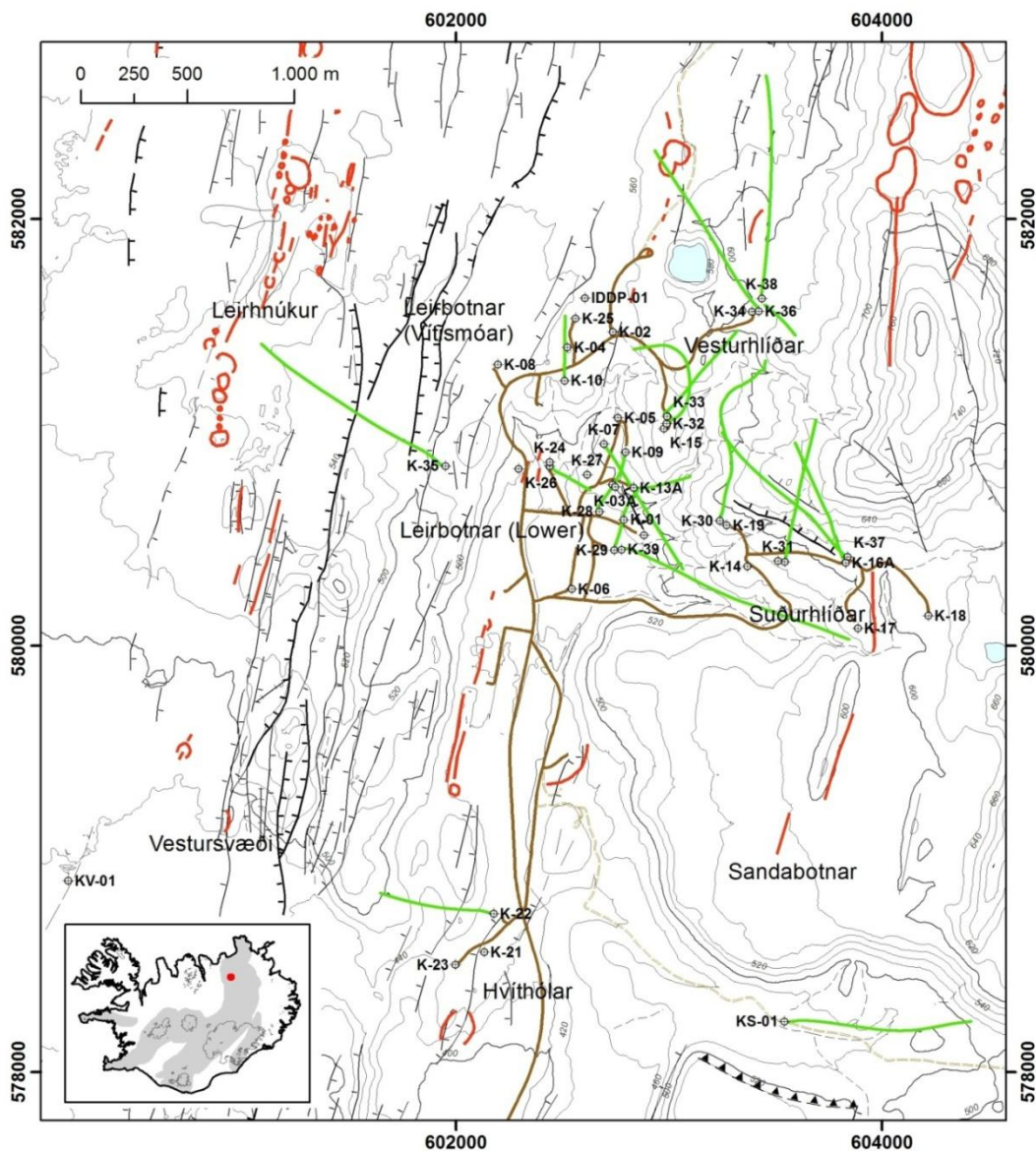
- Árnason, K., Eysteinnsson, H. og Hersir, G.P. (2010). „Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland“. *Geothermics*, **39**, 13-34.
- Franzson, H., Gunnlaugsson, E., Árnason, K., Sæmundsson, K., Steingrímsson, B., og Harðarson, B. S. (2010). “The Hengill Geothermal System, Conceptual model and Thermal Evolution”, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Haijiang, Z., Gasperikova, E., Parker, B., Tryggvason, A., Gudmundsson, O., Seher, T., Newman, G., Fehler, M., og Arnason, K. (2012). „Advanced 3D Geophysical Imaging Technologies for Geothermal Resource Characterization“. *Geothermal Resources Council Transactions*, **36**, 843-848.
- Rosenkjær, G. K. (2011). „Electromagnetic methods in geothermal exploration. 1D and 3D inversion of TEM and MT data from a synthetic geothermal area and the Hengill geothermal area, SW Iceland“, *MS ritgerð*, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands.
- Rosenkjær, G.K. and Oldenburg, D.W. (2012). „3D Inversion of MT data in Geothermal Exploration: A Workflow and application to Hengill, Iceland“. *Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 – February 1, 2012.*

EFNAEIGINLEIKAR RENNIS HOLU IDDP-01, KRÖFLU

Halldór Ármannsson, Þráinn Friðriksson, Guðmundur Heiðar Guðfinnsson, Magnús Ólafsson, Finnbogi Óskarsson og Daði Þorbjörnsson

ÍSOR, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Borun fyrstu djúpborunarholunnar, IDDP-1, í Kröflu lauk á fyrri hluta árs 2009. Borinn lenti í kviku á um það bil 2100 m dýpi og var borun hætt. Holan var hönnuð til borunar í háhitakerfi með að leiðarljósi að finna 400-600°C heitt yfirhitað eða yfirkrítískt renni.



Mynd 1. Krafla. Undirsvæði, borholur

Efnaeiginleikar grynri hluta Kröflukerfisins hafa verið rannsakaðir í þaula síðustu 35 ár. Svæðinu hefur verið skipt niður í nokkur undirsvæði: Leirbotna (Neðri Leirbotna og Vítismóa), Suðurhlíðar, Vesturhlíðar, Sandabotna, Hvíthóla, Vestursvæði, Leirhnúk (Mynd 1). Í Leirbotnum er kerfið gert af efri hluta, sem er vökvakerfi 190-220°C heitt og aðalanjón vökvans er sulfat, og neðri hluta sem er tveggja fasa kerfi um og yfir 300°C heitt (fylgir suðumarksferli) og aðalanjón vökvans er klóríð. Í Hvíthólum er kerfið tveggja fasa og fylgir suðumarksferli að um það bil 1000 m dýpi og er klóríð aðalanjón vökvans þar en kólnar þar fyrir neðan og tekur sulfat yfir sem aðalanjón vökvans. Í Sandabotnum hefur ein hola blásið og geymirinn reynst tveggja fasa um 260°C, hiti fylgt suðumarksferli og aðalanjón vökvans verið klóríð. Í Suðurhlíðum og Vesturhlíðum fylgir hiti suðumarksferli og rennið er tvífasa með klóríð sem aðalanjón. Niðurstöður fyrir einu holuna sem boruð hefur verið við Leirhnúk benda til svipaðra eiginleika. Vestursvæðið virðist tiltölulega kalt og lítið gæft. Innrennsli í Kröflukerfið er staðbundið í Leirbotnum og Vesturhlíðum en í Hvíthólum og Suðurhlíðum annaðhvort frá nærliggjandi hálendi eða langt sunnan að, og í Sandabotnum virðist það komið langt sunnan að.

Á flestum undirsvæðanna hafa verið boraðar djúpar holur (> 2200 m) sem í er súrt renni nálægt botni. Hefur súrinn valdið tæringu og útfellingum járnsambanda (súlfíða, silíkata, oxíða) og kísiloxíðs. Súrinn tengist klóríðanjón og hefur sú hugmynd komið fram að á miklu dýpi sé þækilgeymir sem HCl sameindir sjóði úr. HCl sameindin klofnar undir eins vetnisón og klóríðjón þegar hún kemst í snertingu við vatn. Einnig hefur sú hugmynd komið fram að súrt renni sé einungis til staðar á ákveðnu dýptarbili sem hefði verið fódrað af ef hola IDDP-1 hefði verið boruð í fulla dýpt samkvæmt upphaflegri áætlun. Í Kröflueldum 1975-1984 komst ofgnótt kvikugass inn í jarðhitakerfið en það virðist að mestu leyti horfið og renni yfirleitt komið í jafnvægi. Gas þetta hefur hins vegar komið af stað efnahvörfum milli rennis og bergs sem geta átt sinn þátt í að mynda súrinn og valda útfellingarvandamálum. Uppruni sýrunnar og leiðir til þess að meðhöndla hana verða meðal helstu viðfangsefna í sambandi við mögulega nýtingu djúpborunarholunnar.

Í töflu 1 kemur fram styrkur nokkurra mikilvægra efna í gufu frá IDDP-01 og upplýsingar sem til eru um styrk sömu efna í gufu tveggja eldri þurrgufuholna.

Tafla 1. Styrkur valinna efna í gufu IDDP-01, KG-12 og KJ-36

Parameter	IDDP-01 23.01.2012	KG-12 1979	KJ-36 2009
pH/°C	2.71/22	3.48/19	3.30/21
SiO ₂ mg/kg	38.5		
Na mg/kg	0.43		
Cl mg/kg	82.7	112	400
Cr mg/kg	0.34		
Fe mg/kg	44		
Mn mg/kg	0.79		
Ni mg/kg	0.35		
CO ₂ mg/kg	490	17077	6463
H ₂ S mg/kg	450	1127	3320

Ekki finnast marktækar breytingar á pH í með tíma. Hins vegar var smávægilegur en marktækur munur á pH eftir söfnunaraðferð. Lægra pH fannst ef safnað var beint í plastflösku til ákvörðunarinnar en ef það var mælt í rennsli frá ryðfríum kælispiral. Um gæti

verið að ræða áhrif ófullkominnar þéttingar til lækkunar á pH í plastflöskunum en leysingar á katjónum til hækkunar pHs í kælispiral.

Klóríðstyrkur er nokkuð breytilegur en almennt heldur lægri en í gufu annarra þurrugufuholna, Sennilega á það uppruna í kviku.

Kísilstyrkur er mikill miðað við að um þurrugufu er að ræða. Lítið en marktækt magn situr eftir ef þetta gufan er síuð. Þekkt er að kísill ferðast í gasfasa með gufu við mjög hátt hitastig og mikinn þrýsting og getur það skýrt mikinn kísilstyrk sem reikna má með að minnki með lækkuðum þrýstingi. Við síunina situr einnig eftir brennisteinn í verulegu magni.

Járn og mangan virðast fylgjast að og sömuleiðis króm og nikkell. Hin fyrrnefndu má rekja til borholupípna en hin síðarnefndu til ryðfrís stáls í kælispiral.

Hlutföll stöðugra samsætna benda til staðbundins uppruna vatns í samræmi við staðsetningu holunnar á Leirbotnasvæði (í Vítismóum).

Gasstyrkur er miklu minni en yfirleitt hefur sést í gufu frá háhitaholum, einkum styrkur koldíoxíðs. Er hann ekki í samræmi við birtar upplýsingar um leysni koldíoxíðs í gufu og eru niðurstöður fyrir gashitamæla sem byggja á koldíoxíðstyrk miklu lægri en mældur hiti. Áþekkar niðurstöður hafa fengist fyrir gufu úr nokkrum öðrum mjög heitum holum á Norðausturlandi.

Í heildina ætti efnasamsetning gufu djúpborunarholunnar að vera viðráðanleg til vinnslu hennar. Gufuna má leiða á yfirhituðu formi til yfirborðs og þar er unnt að hækka sýrustig hennar. Einnig þarf að reyna að koma í veg fyrir myndun kísilryks sem getur stíflað og skemmt loka.

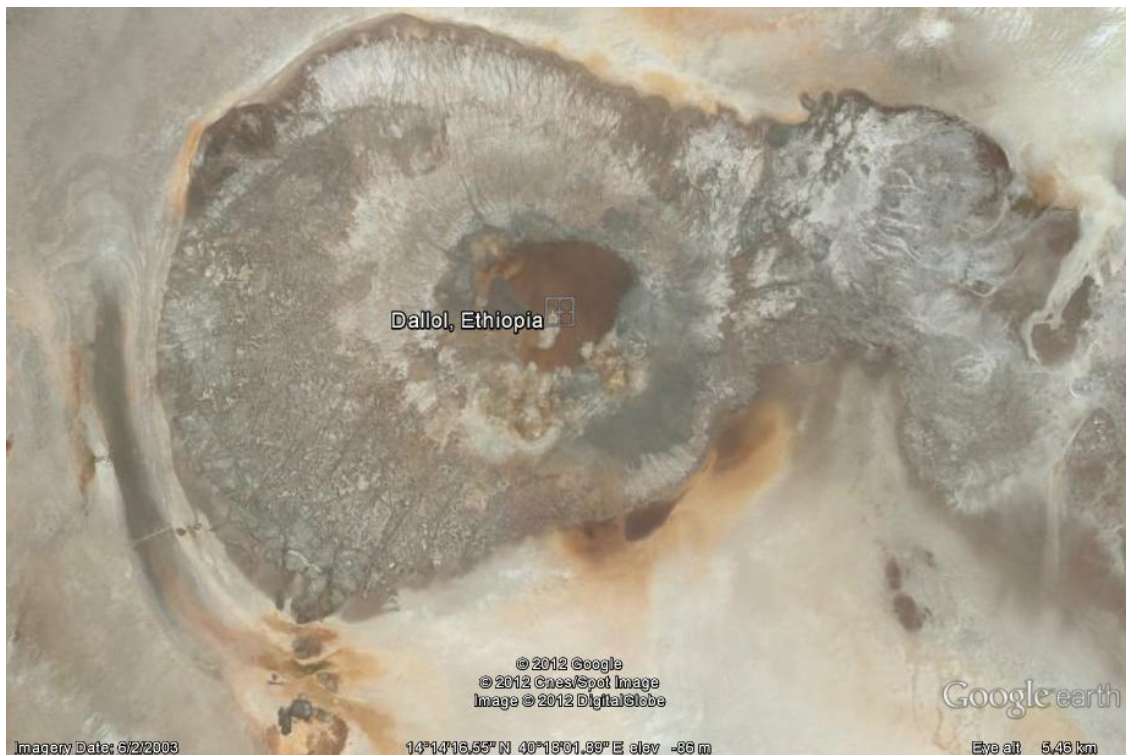
Jarðhitasvæðið Dallol á saltsléttu Afar rekbeltisins

Helga Margrét Helgadóttir og Hjalti Franzson

Íslenskar orkurannsóknir, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Það var í lok febrúar ársins 2012 sem tveir jarðfræðingar Íslenskra orkurannsókna héldu í rúmlega þriggja vikna ferð á heitasta stað jarðar. Áfangastaðurinn var Afar svæðið í Norður-Eþíópíu og tilgangurinn að kortleggja jarðhitasvæðið Dallol. Dallol er staðsett á saltsléttu í Danakil sigdældinni sem er hluti af nyrsta hluta rekbeltis Austur-Afríku og er botn hennar meira en hundrað metrum fyrir neðan sjávarmál og um 2500 m neðan jaðra rekbeltisins.

Dallol fjall, sem er um 12 km², myndaðist við staðbundna upplyftingu saltsléttunnar sem rofnaði nokkuð í kjölfarið og mynduðust við það falleg gljúfur og tignarlegir stólpar. Upplyftingin er talin hafa orðið fyrir minna en 30.000 árum en þá varð síðasta innflæði sjávar frá Rauðahafinu í norðri inn á sléttuna. Að einhverjum tíma liðnum fór yfirmettaður saltvökvi að flæða upp úr miðju fjallsins og huldi sú myndun að nokkru leyti eldri grunn þess. Við þessa tilfærslu saltsins seig miðja fjallsins niður og myndaði hringlaga sigdæld (mynd 1). Þar er jarðhitasvæðið sjálft staðsett og er núverandi virkni bundin við suðurhluta sigdældarinnar. Eldri ummerki um jarðhita má þó sjá víðar en þau eru þó bundin við miðju fjallsins sjálfs. Annað og mun minna jarðhitasvæði er suðvestur af Dallol fjalli við lága, dökka salthæð sem kallast Black Mountain og er það svæði u.þ.b. 0,3 km².



Mynd 1. Dallol fjall á loftmynd (Google Earth).

Samspil saltsins og jarðhitans á fjallinu elur af sér hinar fegurstu og undarlegustu myndanir (mynd 2). Vatnsborð er síbreytilegt og verður það til þess að saltmyndanir byggjast upp og eyðast á víxl. Þegar sjóðandi vatnsborð nær alveg að yfirborði fellur saltið úr bullandi saltþeklinum og smám saman myndast hringlaga saltstólpar, hvítir og gulir vegna brennisteins. Frárennsli vatnsins frá slíkum svæðum myndar oft á tíðum litlar tjarnir og þar verða til svepplaga saltútfellingar. Þegar vatnsborð lækkar verða stólparnir rauðbrúnir (vegna oxunar) og ef áframhaldandi virkni er til staðar leysa vatnsgufan og gas saltið upp að miklu leyti og nokkurs konar gatasigti myndast. Þessi ferli endurtaka sig í einhverjum tilfellum og að lokum verður eftir duftkennt efni í miðju svæðisins sem er að mestu halít, anhýdrít og brennisteinn.



Mynd 2. Norðanvert jarðhitasvæðið á Dallol fjalli. (Ljósmynd: Helga Margrét Helgadóttir)

Dallol jarðhitasvæðið er einstakt í veröldinni, því hvergi er vitað um hreint samband saltbergs og háhita. Þetta var því sérlega spennandi verkefni sem hefur lítið verið rannsakað hingað til vegna fremur erfiðra og hættulegra aðstæðna á svæðinu. Vonandi gefast tækifæri til enn frekari rannsókna í náinni framtíð.

Jarðhitasvæðið á Seltjarnarnesi-Umhverfisvæn og sjálfbær nýting í fjörutíu ár

Hrefna Kristmannsdóttir

Háskólinn á Akureyri

Jarðhitasvæðið á Seltjarnarnesi fannst við hitastigulsboranir á árunum 1965-1967. Það er eitt sex lághitasvæða á höfuðborgarsvæðinu, en fyrir borun var þar engin þekkt hveravirkni á yfirborði. Talið var í fyrstu að Álftanessvæðið og Seltjarnarnessvæðið væru eitt og sama jarðhitakerfið en hitastigulsboranir á árunum 1992-1994 sýndu að Seltjarnarnessvæðið er afmarkað jarðhitasvæði, aðskilið frá Álftanessvæðinu (Kristján Sæmundsson o.fl., 1993).

Berggrunnur svæðisins er einkum basalthraunlög og móberg, 2,5-3 milljón ára gömul og er það innan Kjalarneseldstöðvarinnar eins og hin jarðhitasvæðin á höfuðborgarsvæðinu (Guðmundur Ómar Friðleifsson, 1990). Ummerki um forna háhitaummyndun yfirprentuð af yngri lághita-ummyndun sjást vel í bergi borholanna á Seltjarnarnesi (Kristmannsdóttir and Tómasson, 1978).

Boraðar hafa verið 12 borholur á Seltjarnarnessvæðinu (Mynd 1). Fimm af holunum eru vinnsluholur. Hitaveitan tók til starfa 1972 og nýtir nú fjórar vinnsluholur, SN-4, 5, 6 og 12.

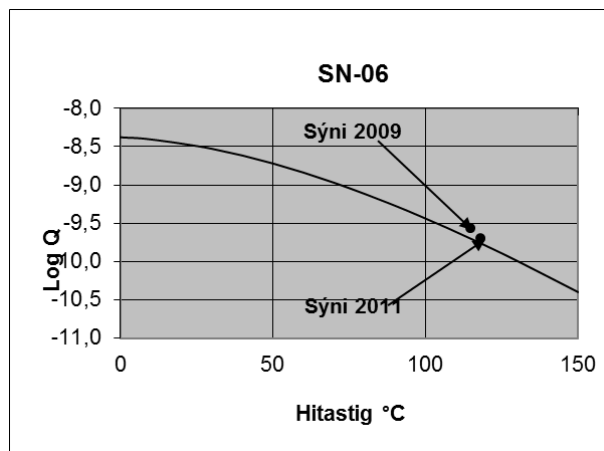


Mynd 1. Borholur á Seltjarnarnesi. Holur merktar með tvöföldum hring eru vinnsluholur.

Þegar farið var að rannsaka jarðhitasvæðið var þegar komin talsverð byggð á Seltjarnarnesi og vegna þess og seltu jarðhitavökvans gögnuðust flestar hefðbundnar jarðhitaleitaraðferðir lítið. Hitastigulsboranir voru í reynd eina aðferðin sem dugði til að afmarka svæðið og staðsetja vinnsluholur, en það var kostnaðarsöm aðferð á sjöunda og áttunda áratug síðustu aldar. Þegar til stóð að bora síðustu vinnsluholuna 1992-1994 voru boraðar fimm grunnar hitastigulsholur til að staðsetja hana. Þær boranir breyttu verulega hugmyndum um gerð jarðhitasvæðisins og jafnframt hitastigulskorti höfuðborgarsvæðisins. Boranirnar leiddu í ljós að aðaluppstreymi jarðhitasvæðisins er nyrst á nesinu við Byggarða eða jafnvel í sjónum rétt norðan þess.

Þrjú meginvatnskerfi eru á svæðinu og gefa þau 75-130 °C heitt vatn. Efst er kerfi með 60-75 °C heitum vatnsæðum, sem nær niður á 400-600 m dýpi og dýpkar til suðurs. Vatn á þessu dýptarbili er mjög salt, líklega yfir 15 % af sjávarseltu (5-6 ‰), en óblönduð sýni hafa ekki fengist. Fyrir neðan tekur við jarðhitakerfi með 80-100 °C heitum vatnsæðum sem nær niður á um 1500 m dýpi. Selta vatnsins á þessu dýptarbili er 5-10 % af sjávarseltu. Dýpst í flestum vinnsluholnanna er kerfi með 120-140 °C heitum vatnsæðum og vatni með svipaða eða nokkru lægri seltu en í kerfinu ofan við. Vísbending hefur fengist um að enn heitara kerfi sé á meira dýpi, með yfir 150 °C heitu vatni sem jafnframt er mun minna salt en í hinum kerfunum, með ≤ 1 ‰ seltu.

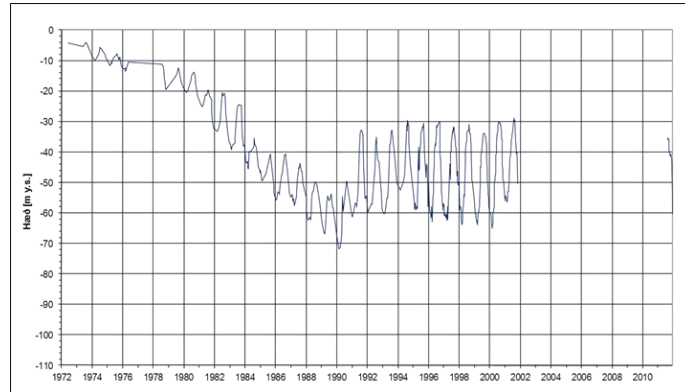
Vinnslueiginleikar svæðisins eru talsvert frábrugðnir því sem gerist á öðrum jarðhitasvæðum á höfuðborgarsvæðinu (Hrefna Kristmannsdóttir, 1983, 1986). Vatnið var nokkuð salt í upphafi (≤ 1 ‰) og jókst seltan með aukinni vinnslu (≥ 3 ‰). Selta er hvati á öll efnahvörf, þar á meðal súrefnistæringu og útfellingar. Komist örlítið súrefni inn í vatnið eins og gjarnan gerist í inntaksgrindum verður tæring verulega meiri í söltu vatni en fersku og því er í byggingarreglugerð Seltjarnarnesbæjar kveðið á um að nota skuli forhitara eða pottofna í húskerfum. Einnig er fylgst vel með mögulegum kalkútfellingum, bæði við holutoppa og í dreifikerfinu. Þó vatnið sé nákvæmlega mettað af kalsíti eins og annað jarðhitavatn á Íslandi (Mynd 2) þá gætu breytingar á blöndunarhlutföllum í vinnsluvatninu orðið til þess að útfelling færi af stað. Útfelling getur orðið mjög hröð í svona söltu vatni byrji hún á annað borð. Útfellingar magnesíumsilíkata og kalsíts hafa orðið í smáum stíl í dreifikerfinu, en taldar stafa af innstreymi kalds neysluvatns. Sé vatnið kælt niður í 15-20 °C, eins og t.d. í snjóbræðslukerfum, verða gjarnan útfellingar af álsilíkati.



Mynd 2. Kalsítmettun í holu SN-6 á móti mældum hita. Línan sýnir jafnvægi fyrir myndun kalsíts og punktarnir tilsvareandi jónamargfeldi vatnsins. Gildi fyrir sýni frá 2009 og 2011 eru merkt á myndinni.

Á fyrstu rekstrarárum veitunnar varð mikill niðurdráttur í jarðhitakerfinu (Mynd 3), en við því var brugðist með því að breyta sölukerfi hitaveitunnar og tvöfalda sem mest af dreifikerfinu. Vatnsborð jarðhitasvæðisins hefur verið nær óbreytt s.l. tuttugu ár.

Mjög gott eftirlit hefur jafnan verið haft með vinnslu á svæðinu og því tekist að leysa farsællega þau vandamál sem upp hafa komið við vinnsluna. Gerð hafa verið nokkur forðafræðilíkön af svæðinu og þau aðlöguð að vinnslugögnum (Helga Tulinius o.fl., 1987, Vatnaskil, 1994, Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2012).



Mynd 3. Breytingar á vatnsstöðu á jarðhitasvæðinu á Seltjarnarnesi á vinnslutímanum. Mælt vatnsborð í mæliholu SN-2. Mælar voru teknir upp í stað hemla árið 1990.

Stór hluti af dreifikerfi Hitaveitu Seltjarnarness er tvöfalt og er affallsvatnið endurnýtt með því að blanda því við vatn sem dælt er upp úr vinnsluholunum, enda er hitastig vinnsluvatnsins yfirleitt rúmlega 100 °C. Nú stendur yfir ferilprófun með flúoresceini til að kanna betur eiginleika svæðisins, treysta betur stoðir forðafræðilíkansins og gera vinnsluna enn sjálfbærari og umhverfisvænni með niðurdælingu á því affallsvatni sem ekki nýtist á annan hátt.

Tilvitnanir

- Guðmundur Ómar Friðleifsson, 1990. Jarðfræði jarðhitasvæðisins í Laugarnesi Reykjavík. Orkustofnun, OS-90035/JHD-07, 63s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1983. Breytingar á efnasamsetningu jarðhitavatns á Seltjarnarnesi á tímabilinu 1970-1983. OS-83106/JHD-19, 27 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2012. *Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2011-2012*. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 12/05, 43s.
- Kristmannsdóttir, H. 1986. Exploitation-Induced Infiltration of Seawater into the Seltjarnarnes Geothermal Field, Iceland Geothermal Resources Council, *Transactions* 19, 389-393.
- Kristján Sæmundsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Jens Tómasson Hilmar Sigvaldason, 1993. Hitastigulsboranir á Seltjarnarnesi haustið 1993 og aðgerðir í holum Sn-2 og Sn-3. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-93079/JHD-40 B, ORKUSTOFNUN, Desember 1993, 17 s.
- Kristmannsdóttir, H. and Tómasson, J., 1978. Zeolite Zones in Geothermal Areas in Iceland. *Natural Zeolites*, Pergamon Press, Oxford and New York 1978, 277-284.
- Tulinius, H., Spencer, A.L, Böðvarsson, G. S., Kristmannsdóttir, H., Thorsteinsson, Th. and Sveinbjörnsdóttir, Á. E. (1987). Reservoir Studies of the Seltjarnarnes Geothermal Field, Iceland. *12th Annual Workshop, Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January 20-21, 1987*, 67-76.
- Verkfræðistofan Vatnaskil, 1994. Líkan af jarðhitasvæðinu á Seltjarnarnesi. Apríl 1994, 39 s.

Af nemendum og kennurum Jarðhitaskóla Háskóla Sameinuðu þjóðanna

Ingvar Birgir Friðleifsson

Jarðhitaskóli Háskóla Sameinuðu þjóðanna. Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík
(www.unugtp.is)

Inngangur

Háskóli Sameinuðu þjóðanna var stofnaður 1975 til að efla rannsóknir, þekkingu og skilning á málum sem Sameinuðu þjóðirnar (Sp) fjalla um. Eitt aðalmarkmiðið var að bæta hag þróunarlandanna með því að veita sérfræðingum þaðan starfsþjálfun við alþjóðleg rannsóknarsetur. Stjórnstöð háskólans var opnuð í Tókýó, en í stað þess að byggja skólahús og rannsóknarstofur víða um heim voru aðildarlönd Sp hvött til að opna dyr háskóla sinna og rannsóknarstofnana og taka þannig þátt í starfsemi Háskóla Sp.

Ísland var eitt af fyrstu aðildarlöndum Sp til að sinna kalli. Eftir alþjóðlega ráðstefnu á Íslandi og mikla undirbúningsvinnu var komist að samkomulagi í árslok 1978 um stofnun Jarðhitaskóla Háskóla Sp á Íslandi. Ríkisstjórnin fól Orkustofnun að sjá um rekstur Jarðhitaskólans og semja við Háskóla Sp þar um. Orkustofnun varð með þessu ein af tengdastofnunum (associated institution) Háskóla Sp. Háskóli Íslands (HÍ) hefur tekið virkan þátt í starfsemi Jarðhitaskólans frá upphafi svo og orkufyrirtæki og verkfræðistofur. Rekstur Jarðhitaskólans er hluti af þróunaraðstoð Íslendinga.

Jarðhitaskólinn er rekinn sem sjálfstæð rekstrareining innan Orkustofnunar. Fastir starfsmenn voru þrír í upphafi en eru sex árið 2012. Námsráð sér um faglega skipulagningu námsins og er einn námsstjóri ábyrgur fyrir hverri braut. Í námsráði eru sex jarðhitasérfræðingar Íslenskra orkurannsókna (ÍSOR, áður Jarðhitadeild Orkustofnunar), einn jarðhitasérfræðingur hjá Hitaveitu Suðurnesja, og þar til nýlega tveir prófessorar við Háskóla Íslands, en annar þeirra starfar nú á eigin verkfræðistofu. Námsráðið er faglegur burðarás starfseminnar. Kennarar og leiðbeinendur koma frá ÍSOR (70%), Háskóla Íslands (10%), Háskólanum í Reykjavík (5%), svo og öðrum rannsóknarstofnunum, orkufyrirtækjum og verkfræðistofum (15%). Skólinn greiðir árlega fyrir kennslu um 50 sérfræðinga. Skólinn hefur átt því láni að fagna að geta nánast alltaf boðið upp á landslið Íslands í jarðhitafræðum. Skólinn hefur notið mikils stuðnings og velvildar orkufyrirtækja og ber sérstaklega að nefna Hitaveitu Suðurnesja, Jarðboranir, Landsvirkjun, Norðurorku og Orkuveitu Reykjavíkur. Styrkur skólans felst í vönduðu vali á nemendum, hæfni kennaranna og gæðum starfsumhverfisins.

Samstarf við aðalstöðvar Háskóla Sp í Tókýó er einkum tengt stefnumótun í rekstrinum. Jarðhitaskólinn sér um að velja samstarfslönd og nemendur. Forstöðumaður Jarðhitaskólans situr árlega fundi háskólaráðs og fundi forstöðumanna stofnana Háskóla Sp fyrir hönd íslensku skólanna: Jarðhitaskóla, Sjávarútvegsskóla (stofnaður 1998), og Landgræðsluskóla (stofnaður 2010). Jafnréttisskóli við Háskóla Íslands verður væntanlega tekinn inn í fjölskyldu Háskóla Sameinuðu þjóðanna 2013. Rektor Háskóla Sp og háskólaráð hvetja mjög til eflingar starfseminnar á Íslandi.

Val nemenda

Fyrstu nemendurnir komu í Jarðhitaskólann vorið 1979. Síðan hefur árlega komið hingað til sex mánaða sérhæfðs náms hópur raunvísindamanna og verkfræðinga frá þróunarlöndunum, og framan af einnig frá löndum Mið- og Austur-Evrópu. Allt er þetta fólk með háskólapróf og starfandi við orkurannsóknir eða orkuframleiðslu og dreifingu í sínum heimalöndum. Boðið er upp á níu sérfræðibrautir: Jarðfræðikortlagningu, Borholujarðfræði, Jarðeðlisfræðilegar mælingar á yfirborði, Borholumælingar, Forðafræði, Umhverfisfræði, Efnafræði heits vatns og gufu, Jarðhitaverkfræði, og Bortækni. Alls hafa 515 raunvísindamenn og verkfræðingar frá 53 þróunarlöndum lokið sex mánaða sérfræðinámi við skólann.

Nemendur eru valdir með viðtölum í heimalöndum sínum. Jarðhitasvæði eru skoðuð og mat lagt á jarðhitamöguleika landsins, rannsóknarstofur skoðaðar, þjálfunarþörf metin og samstarfsstofnanir valdar. Árin 1979-2012 hafa verið farnar 199 slíkar heimsóknir til samstarfslanda, að meðaltali 6 á ári. Þessar ferðir hafa tryggt góða nemendur og markvissa þjálfun sem er löguð að aðstæðum og þörfum hvers lands og þeim tækjabúnaði sem þar er að finna. Aðeins 7 nemendur (af 522) hafa ekki lokið námi, aðallega vegna veikinda.

Námið

Sex mánaða námið hefst með fimm vikna inngangsfyrirlestraflokki þar sem öllum nemendum eru kynnt helstu sérsvið jarðhitafræða þannig að jarðvísindamennirnir viti t.d. hvaða upplýsingum verkfræðingarnir þurfa á að halda og verkfræðingarnir hvaða spurninga ber að spyrja. Mikil áhersla er lögð á þverfaglegt hópstarf. Síðan taka við 5-7 vikna sérhæfð námskeið, mismunandi eftir námsbrautum. Þá er farið í tveggja vikna námsferðir til allra helstu jarðhitasvæða landsins. Lengstum tíma, 12 vikum, er varið í rannsóknarverkefni nemenda þar sem þeir eru í einstaklingskennslu hjá leiðbeinendum sínum. Meirihluti nemenda kemur með rannsóknargögn að heiman til úrvinnslu. Rannsóknarskýrslur nemenda eru allar birtar í Árbók Jarðhitaskólans sem er prentuð og dreift til fyrri nemenda, rannsóknarstofnana og orkufyrirtækja um allan heim. Í mörgum þróunarlöndum er bóka- og tímaritakostur mjög takmarkaður og árbækur Jarðhitaskólans eru því einn helsti brunnur fróðleiks um nýjar rannsóknaraðferðir í jarðhitafræðum. Árbókin er einnig birt á heimasíðu skólans, en þar er að finna allar árbækur Jarðhitaskólans (www.unugtp.is).

Frá 2000 hafa Jarðhitaskólinn og HÍ haft samstarf um að bjóða völdum nemendum Jarðhitaskólans sem ekki hafa meistaraþráðu að stunda meistaranám í HÍ. Sex mánaða námið við Jarðhitaskólann gildir sem fjórðungur meistaranámsins. Alls hafa 33 Jarðhitaskólanemar frá 14 þróunarlöndum lokið meistaranámi frá HÍ. Fyrstu doktorsnemarnir á vegum Jarðhitaskólans komu í HÍ haustið 2008. Jarðhitaskólinn hefur einnig staðið fyrir árlegum jarðhitanámskeiðum í Afríku frá 2005 og í Mið-Ameríku frá 2006. Námskeiðin eru framlag Íslands til Þúsaldarmarkmiða Sameinuðu þjóðanna (www.unugtp.is).

Hvað verður um nemendurna?

Jarðhitaskólinn hefur virkt tölvusamband við 415 fyrrum nemendur (af 515). Nemendur skólans eru leiðandi í jarðhitastarfsemi fjölmargra landa sem sérfræðingar og stjórnendur. Þetta kemur greinilega fram, bæði innan viðkomandi landa og á alþjóðavettvangi. Margir nemendanna eru mjög virkir í alþjóðasamstarfi. Á Alþjóðajarðhitaráðstefnunni í Tyrklandi 2005 voru t.d. 104 nemendur skólans frá 26 löndum höfundar/meðhöfundar 144 ritrýndra greina af 705 í ráðstefnuritinu (20% allra greina). Á Alþjóðajarðhitaráðstefnunni í Indónesíu 2010 voru 139 fyrrum nemendur skólans (af 424) frá 31 landi höfundar/meðhöfundar 199

ritrýndra greina (19% allra greina) í ráðstefnuritinu. Þriðjungur allra nemenda skólans útskrifaðra 1979-2009 voru höfundar/meðhöfundar ritrýndra greina á ráðstefnunni 2010.

Markviss kennsla í rannsóknum svo og þjálfun í að skrifa ágrip og greinar hefur því borið mikinn árangur. Jafnframt hefur það virkað hvetjandi að fyrrum nemendur sem fá greinar samþykktar til flutnings og birtingar í ráðstefnuritum Alþjóðajarðhitaráðstefnunnar (WGC) geta sótt um ferðastyrki til að taka þátt í ráðstefnunum. Upphæð ferðastyrksins fer eftir efnahag stofnunar og lands styrkumsækjanda. Á ráðstefnunum er haldið nemendamót og þannig hittast fjölmargir fyrrum nemendur Jarðhitaskólans á fimm ára fresti. Þetta hefur styrkt verkefnasamstarf milli landa mikið svo og treyst tengsl fyrrum nemenda við skólann.

Leiðbeinendur

Námsráð sér um faglega skipulagningu námsins og er einn námsstjóri ábyrgur fyrir hverri braut. Leiðbeinendur vinna með nemendum samkvæmt áætlun sem mótuð er af námsstjóra, leiðbeinanda og nemanda. Alls hafa 101 sérfræðingur verið aðalleiðbeinendur nemenda og 76 aðstoðarleiðbeinendur. Hér verður gerð grein fyrir þeim sem verið hafa aðalleiðbeinendur 11 nemenda eða fleiri. Höfundur þakkar Ingimari G. Haraldssyni fyrir hönnun gagnagrunns Jarðhitaskólans, sem auðveldar svona greiningu mikið, og Markúsi A.G. Wilde fyrir aðstoð við úrvinnslu.

Halldór Ármannsson hefur verið aðalleiðbeinandi 48 nemenda og meðleiðbeinandi þriggja. Hann hefur setið í Námsráði Jarðhitaskólans og verið námsstjóri umhverfisfræðibrautar frá því brautin var formlega stofnuð 1997. Fram til þess höfðu umhverfismálin verið tekin fyrir sem aukagrein og þá einkum í efnafræði- og verkfræðibrautunum. Alls hafa 42 nemendur lokið námi í umhverfisfræði. Nemendafjöldi í öðrum brautum er eftirfarandi: Jarðfræði 29, Borholujarðfræði 47, Jarðeðlisfræði 51, Borholumælingar 16, Forðafræði 119, Efnafræði 93, Jarðhitaverkfræði 97, og Bortækni 21. Nemendur Halldórs voru höfundar 3 greina á WGC 1995 (frá Kína 2, Nepal 1), 15 greina á WGC 2000 (frá Filippseyjum 1, Guatemala 1, Íran 2, Kenýa 2, Kína 8, Nepal 1), 18 greina á WGC 2005 (frá Guatemala 1, Íran 6, Kenýa 2, Kína 5, Nepal 1, Tyrklandi 1, Úganda 1, Vietnam 1), og 28 greina á WGC 2010 (frá Gvatemala 1, Íran 5, Kenýa 2, Kína 12, Nepal 2, Rússlandi 1, Tanzaníu 1, Tyrklandi 1, Úganda 2, Vietnam 1). Alls 64 greinar.

Stefán Arnórsson hefur verið aðalleiðbeinandi 21 nema og meðleiðbeinandi eins. Hann hefur setið í Námsráði Jarðhitaskólans og verið námsstjóri efnafræðibrautar frá stofnun Jarðhitaskólans 1979. Hann er sá eini sem setið hefur í Námsráði óslitið frá upphafi. Nemendur Stefáns voru höfundar 3 greina á WGC 1995 (frá Filippseyjum), 4 greina á WGC 2000 (frá Kína 1, Filippseyjum 1, Tyrklandi 2), 11 greina á WGC 2005 (frá Filippseyjum 5, Kenýa 2, Kína 1, Rússlandi 1, Tyrklandi 1, Úganda 1), og 19 greina á WGC 2010 (frá Eritreu 1, Filippseyjum 6, Kenýa 4, Rússlandi 3, Tyrklandi 3 og Úganda 2). Alls 37 greinar.

Sverrir Þórhallsson hefur verið aðalleiðbeinandi 25 nema og meðleiðbeinandi 6. Hann hefur setið í Námsráði og verið námsstjóri jarðboranabrautar frá 1983. Nemendur Sverris voru höfundar 1 greinar á WGC 2000 (frá Túnis), 3 greina á WGC 2005 (frá El Salvador 2 og Mongólíu 1), og 1 greinar á WGC 2010 (frá Eþíópíu). Alls 5 greinar.

Grímur Björnsson hefur verið aðalleiðbeinandi 23 nema í forðafræði og meðleiðbeinandi 9. Nemendur Gríms voru höfundar 2 greina á WGC 1995 (frá El Salvador), 12 greina á WGC 2000 (frá El Salvador 2, Eþíópíu 2, Indónesía 1, Kenýa 1, Kína 2, Kostaríka 2, Póllandi 2), 23 greina á WGC 2005 (frá El Salvador 3, Eþíópíu 1, Gvatemala 1, Indónesíu 1, Kenýa 1, Kostaríka 8, Nikaragva 1, Póllandi 4, Rússlandi 3), og 18 greina á WGC 2010 (frá El

Salvador 1, Gvatemala 1, Kenýa 1, Kostaríka 7, Nikaragva 1, Póllandi 5, Rúanda 1, Rússlandi 1). Alls 55 greinar.

Guðni Axelsson hefur verið aðalleiðbeinandi 22 nema og meðleiðbeinandi 16. Hann hefur setið í Námsráði og verið námsstjóri forðafraðibrautar frá 1999. Nemendur hans voru höfundar 3 greina á WGC 2000 (frá Kína 2, Póllandi 1), 14 greina á WGC 2005 (frá Indónesíu 2, Kína 11, Póllandi 1), og 17 greina á WGC 2010 (frá Djíbúti 1, Indónesíu 4, Kenýa 1, Kína 10, Póllandi 1). Alls 34 greinar.

Hjalti Franzson hefur verið aðalleiðbeinandi 20 nema og meðleiðbeinandi 14. Hann hefur setið í Námsráði og verið námsstjóri borholujarðfræðibrautar frá 1981. Nemendur hans voru höfundar 2 greina á WGC 1995 (frá Eþíópíu 1, Filippseyjum 1), 9 greina á WGC 2000 (frá Eþíópíu 3, Filippseyjum 1, Indónesía 1, Pakistan 2, Tyrklandi 1, Úganda 1), 13 greina á WGC 2005 (frá Eþíópíu 2, Filippseyjum 2, Kenýa 1, Indónesíu 3, Íran 2, Kostaríka 1, Tyrklandi 2), og 18 greina á WGC 2010 (frá El Salvador 1, Eþíópíu 1, Filippseyjum 1, Indónesíu 7, Íran 4, Kenýa 1, Kostaríka 2, Tyrklandi 1). Alls 42 greinar.

Páll Valdimarsson hefur verið aðalleiðbeinandi 17 nema og meðleiðbeinandi 8. Hann hefur setið í Námsráði og verið námsstjóri verkfræðibrautar frá 2001. Nemendur hans voru höfundar 1 greinar á WGC 1995 (frá Kína), 3 greina á WGC2000 (frá Kína 1, Tyrklandi 2), 6 greina á WGC 2005 (frá Kína 2, Mongólíu 2, Tyrklandi 2), og 15 á WGC 2010 (frá Indónesíu 1, Íran 3, Kenýa 1, Kína 8, Tyrklandi 2). Alls 25 greinar.

Guðmundur Ómar Friðleifsson hefur verið aðalleiðbeinandi 17 nema og meðleiðbeinandi 6. Hann hefur setið í Námsráði og verið námsstjóri jarðfræðibrautar frá 2007. Nemendur hans voru höfundar 3 greina á WGC 2000 (frá Pakistan 2, Tyrklandi 1), 4 greina á WGC 2005 (frá Kostaríka 2, Tyrklandi 2), og 10 greina á WGC 2010 (frá Erítreu 1, Íran 1, Indónesíu 1, Kostaríka 2, Tanzaníu 2, Tyrklandi 1, Úganda 2). Alls 17 greinar.

Knútur Árnason hefur verið aðalleiðbeinandi 14 nema og meðleiðbeinandi 6. Hann hefur setið í Námsráði og verið námsstjóri jarðeðlisfræðibrautar frá 2007. Nemendur hans voru höfundar 3 greina á WGC 2005 (frá El Salvador 1, Eþíópíu 1, Úganda 1), og 7 greina 2010 (frá El Salvador 1, Erítreu 2, Eþíópíu 1, Kenýa 1, Marokkó 2). Alls 10 greinar.

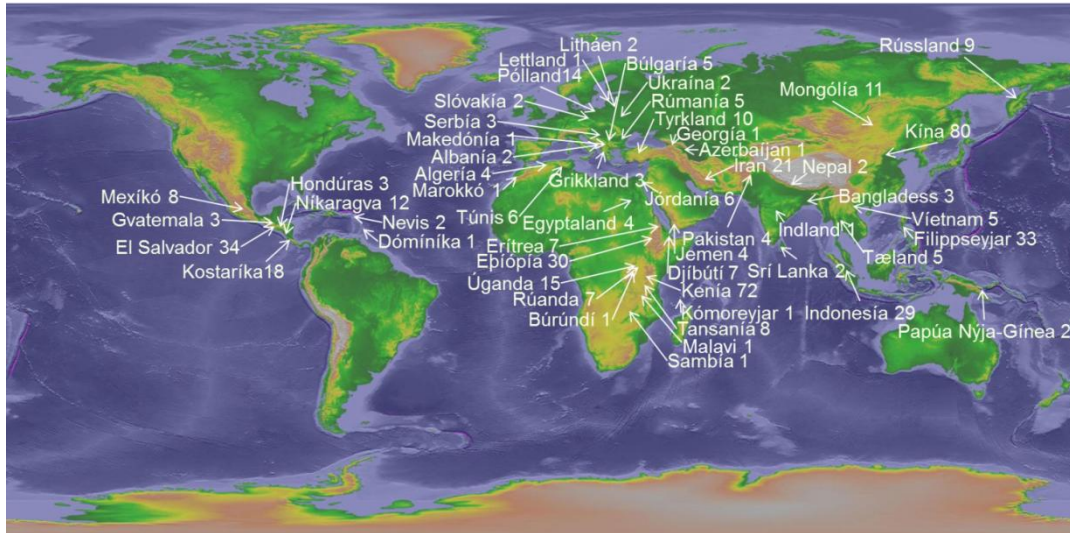
Árni Ragnarsson hefur verið aðalleiðbeinandi 12 nema í verkfræði og meðleiðbeinandi 4. Nemendur hans voru höfundar 2 greina á WGC 2000 (frá Litháen 1, Póllandi 1), 4 greina á WGC 2005 (frá Póllandi 3, Túnis 1), og 3 greina á WGC 2010 (frá Póllandi 3, Túnis 1). Alls 9 greinar.

Snorri Páll Kjaran hefur verið aðalleiðbeinandi 12 nema og meðleiðbeinandi 3. Hann var námsstjóri í forðafraði 1992-1998. Nemendur hans voru höfundar 3 greina á WGC 1995 (frá Kína 2, Slóvakíu 1), 9 greina á WGC 2000 (frá Búlgaríu 1, Júgóslavíu 2, Kína 3, Póllandi 1, Slóvakíu 2), 10 greina á WGC 2005 (frá Júgóslavíu 3, Kína 3, Slóvakíu 2, Tyrklandi 2), og 11 greina á WGC 2010 (frá Júgóslavíu 2, Kína 1, Slóvakíu 2, Tyrklandi 6). Alls 33 greinar.

Árný Erla Sveinbjörnsdóttir hefur verið aðalleiðbeinandi 12 nema í jarðefnafræði og meðleiðbeinandi 1. Nemendur hennar voru höfundar 1 greinar á WGC 1995 (frá Eþíópíu), 6 greina á WGC 2000 (frá Eþíópíu 4, Kostaríka 2), 7 greina á WGC 2005 (frá Eþíópíu 4, Kostaríka 3), og 4 greina á WGC 2010 (frá Eþíópíu 1, Kenýa 1, Kína 1, og Úganda 1). Alls 18 greinar.

Benedikt Steingrímsson hefur verið aðalleiðbeinandi 11 nema og meðleiðbeinandi 13. Hann hefur setið í Námsráði frá 1985 og verið námsstjóri borholumælingabrautar. Nemendur hans voru höfundar 1 greinar á WGC 1995 (frá Filippseyjum), 6 greina á WGC 2000 (frá El Salvador 2, Filippseyjum 2, Indónesíu 1, Kína 1), 11 greina á WGC 2005 (frá El Salvador 3, Filippseyjum 3, Gvatemala 1, Indónesíu 1, Kostaríka 3), og 5 greina á WGC 2010 (frá El Salvador 1, Gvatemala 1, Kenýa 1, og Kostaríka 2). Alls 23 greinar.

Hægt er að nálgast greinar gefnar út í tengslum við WGC á heimasíðu Alþjóða jarðhitasambandsins (<http://www.geothermal-energy.org/>).



Árin 1979-2012 hafa 515 jarðvísindamenn og verkfræðingar

frá 53 þróunarlöndum útskrifast úr Jarðhitaskólanum

Jarðhitakennsla og þróunarsamvinna

Alþjóðlegar orkuspar gera ráð fyrir að 20-40% frumorku jarðarbúa árið 2050 komi frá endurnýjanlegum orkulindum (vatnsafl, lífmassa, vindi, sól, jarðhita og sjávarföllum). Vöxtur í orkunotkun verður mestur í þróunarlöndunum. Lykilatriði í mildun loftlagsbreytinga er að kenna og aðstoða þróunarlöndin við að nýta endurnýjanlegar orkulindir sínar á hagkvæman og umhverfisvænan hátt. Íslenskir jarðvísindamenn og verkfræðingar hafa í áratugi starfað sem ráðgjafar í þróunarlöndunum við nýtingu jarðhita og vatnsafls.

Í ljósi efnahagskreppunnar í heiminum er forgangsriðun verkefna í alþjóðasamstarfi enn brýnni nú en undanfarinn áratug. Þegar litið er yfir 34 ára sögu Jarðhitaskólans sést hversu markvisst hefur tekist að byggja upp mjög sterka hópa jarðhitasérfræðinga í tugum landa. Þetta hefur tekist með kennslu á Íslandi, með hvatningu við heimamenn í hinum ýmsu löndum, og með samstarfi og í raun hópefli fyrrum nemenda skólans innan sinna landa, heimsálfa og heimsálfa í milli. Þátttaka fyrrum nemenda Jarðhitaskólans í World Geothermal Congress WGC 1995 á Ítalíu, WGC 2000 í Japan, WGC 2005 í Tyrklandi og WGC 2010 í Indónesíu hefur verkað eins og kraftmiklar vítamínsprautur á samstarf milli landa. Á ráðstefnunum hafa myndast órofa tengsl milli árganga Jarðhitaskólans. Það sem sameinar þá er skólavistin á Íslandi og reynslan af vinnubrögðum þar sem sérfræðingar á mismunandi sviðum eru reiðubúnir til að vinna opinskátt saman og skiptast á gögnum, og þar sem allir í vinnuhópum eru teknir sem jafningjar.

Kísilútfellingar úr affallsvatni jarðhitavirkjana

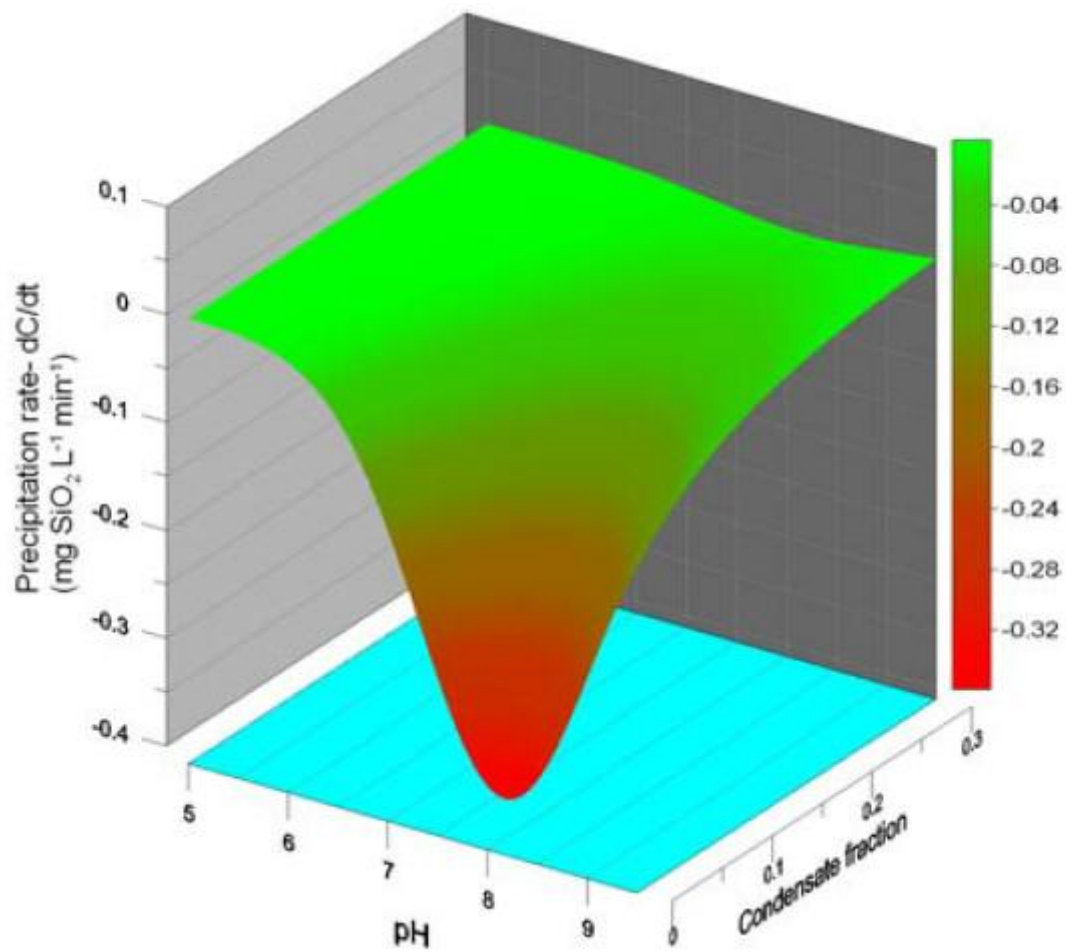
Ingvi Gunnarsson og Bergur Sigfússon

Orkuveitu Reykjavíkur, Bæjarhálsi 1, 110 Reykjavík

Styrkur kísils í háhitajarðhitavatni er á bilinu 500-800 mg/kg og er í jafnvægi við kvars. Við nýtingu á yfirborði verður jarðhitavatnið yfirmettað m.t.t. myndlauss kísils sem gerir meðhöndlun og förgun vatnsins vandasama. Frá jarðhitaorkuverum Orkuveitu Reykjavíkur (Nesjavalla- og Hellisheiðarvirkjun) falla til samtals 700 kg/s af skiljuvatni sem inniheldur milli 700-800 mg/kg SiO₂. Hitastigið á vatninu er á milli 120° og 60°C. Töluverð útfellingarhætta kísils er úr þesskonar vatni og því líklegt að förgun skiljuvatnsins um borholur aftur í jörðina myndi stífla niðurdælingarholurnar ef ekki er gripið til viðeigandi ráðstafana til að koma í veg fyrir útfellingu kísils. Í þessu framlagi er gerð grein fyrir förgun affallsvatns frá jarðhitavirkjunum OR og þeim aðferðum sem beitt hefur verið til að koma í veg fyrir útfellingu kísils í affallsvatni Hellisheiðar og Nesjavallavirkjunar.

Frárennsli skiljuvatns frá Nesjavallavirkjun er um 250 kg/s. U.þ.b. helmingur þess vatns fer í gegnum tafatank. Þar fær kísillinn umfram mettun á myndlausum kísli tíma til að mynda kísilfjölliður sem hafa miklu minni tilhneigingu til að falla út heldur en einliðaður kísill. Tafatankurinn hefur verið í rekstri síðan 2004 og er reynslan af honum mjög góð. Skoðun innan í honum árið 2009 leiddi í ljós að kísilútfellingar við inntak tanksins þar sem lítið af kíslinum var fjölíðaður voru um 3mm á þykkt en við úttak tafatanksins þar sem stór hluti uppleysts kísils umfram mettun myndlauss kísils var fjölíðaður var útfellingarlagið innan við 0,5 mm á þykkt. Tafatankurinn virkar því mjög vel til að minnka útfellingarhættu kísils í affallsvatni Nesjavallavirkjunar. Eftir tafatankinn er þéttivatni blandað saman við skiljuvatnið til að minnka enn frekar styrk kísils í affallsvatninu og þar með útfellingarhættu kísils.

Við núverandir aðstæður flæða um 450 kg/s af skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun. Vatninu er dælt niður í tvö niðurdælingarsvæði. Fram til ársins 2011 þegar varmastöð virkjunarinnar var tekin í notkun var mestur hluti skiljuvatnsins 120°C og var fargað í borholur. Viðtaka borholanna minnkaði með tíma og var svo komið að þær tóku ekki við öllu skiljuvatninu og var því að farga hluta vatnsins í grunnar svelgholur. Útfellingarprófanir og skoðun á pípum leiddi í ljós að útfelling átti sér stað úr 120°C skiljuvatninu sem var að stífla borholurnar. Ráðist var í að gera tilraunir þar sem skoðuð voru áhrif þéttivatns og súruíblöndunar á útfellingarhraða kísils. Þær niðurstöður leiddu í ljós að íblöndun þéttivatns í hlutfallinu 30/70 og sýring niður í pH-6 minnkuðu verulega útfellingarhraða kísils (mynd 1). Þegar ný niðurdælingarveita var tekin í notkun í september 2011 var þéttivatni blandað saman við skiljuvatnið í hlutfallinu 30/70 til að minnka útfellingu kísils. Rekstur niðurdælingarveitunnar hefur gengið betur en þó hefur verið vart við minnkandi vittöku niðurdælingarborholna. Ekki er ljóst hvort það er vegna útfellingar eða hækkandi vatnsborð niðurdælingarsvæðisins.



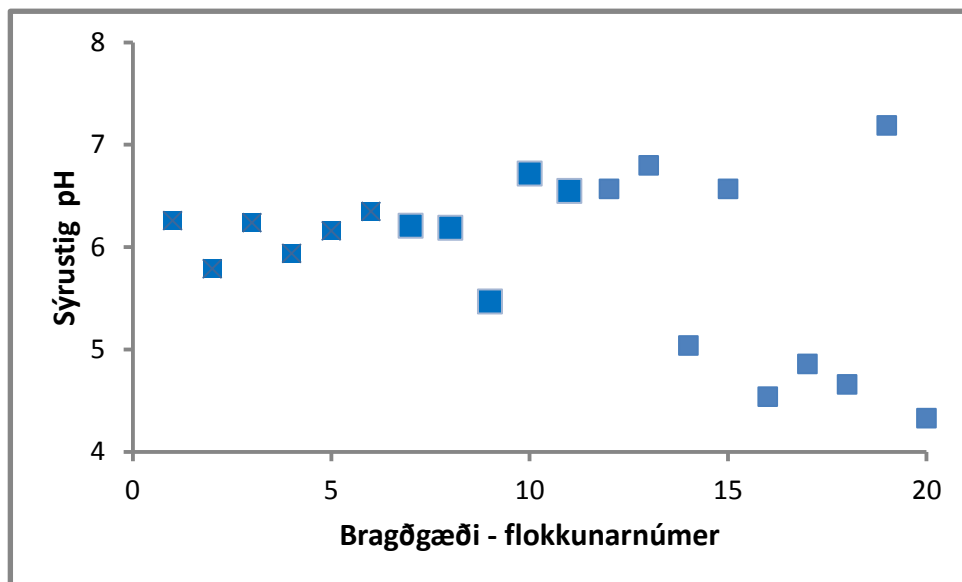
Mynd 1. Áhrif pH-gildis og þéttivatnshlutfalls á útfellingarhraða kísils.

Ölsmökkun

Jón Benjamínsson

Ölsmökkun fór fram í fjórum ferðum. Í fyrstu ferðinni var bragðað á 22 sýnum og reyndust sum þeirra ekki með rétta ölbragðið. Í annarri ferðinni var bragðað á 11 sýnum, 4 í þeirri þriðju og í fjórðu og síðustu ferðin var bragðað á 13 sýnum. Farið var oftast en einu sinni á marga staðina og reyndist öl frá 20 stöðum uppfylla bragðskilyrði þess að kallast öl. Ölið var flokkað í 3 bragðflokka. Mjög bragðgott og sterkt öl fékk þrjár stjörnur, sterkt öl en með síðri bragðgæði fékk tvær stjörnur og öl með lakara bragð og/eða dauðara í styrk hlaut eina stjörnu. Þá var ölinu raðað eftir hlaupandi númerum, fyrst innan hvers stjörnuflokks en síðan öllu slengt saman þannig að því lægra númer þeim mun betra öl. Í þriggja stjörnuflokkinn komust bragðsýni frá 6 stöðum, í tveggja stjörnuflokkinn bragðsýni frá 5 stöðum og 9 í einsstjörnuflokkinn.

Öll ölsýnin voru efnagreind og við skoðun niðurstaðna kom ljós að styrkur koldíoxíðs virtist mestu ráða um bragðgæði og flokkun. Sýnt var þó að styrkur annarra efna svo sem klórs og sulfats gat haft áhrif á bragðgæðin til hins verra ef þau voru yfir ákveðnum styrk í ölsýninu. Mynd 1 hér að neðan sýnir mælt sýrustig í ölsýnunum eftir flokkunarröð bragðgæða. Sýnin 6 í þriggja stjörnuflokknum voru öll með sýrustig pH $6,0 \pm 0,2$. Í tveggja stjörnuflokknum voru niðurstöður ekki jafn einsleitar og var mælt sýrustig frá pH 5,5 og upp í pH 6,7. Og eins og sjá má á mynd 1 þá verða mæliniðurstöður dreifðari með hækkandi flokkunartölu og mældist sýrustig 9 ölsýna í einsstjörnuflokknum á bilinu pH 4,3 og upp í pH 7,2. Það gæti því verið ágætis ráð að stinga í vasann rúllu af lakkmúspappír áður en haldið er í bragðprófun á öli.



MYND 1. Sýrustig ölsýna eftir bragðgæðaflokkun. Númer 1-6 eru í efsta bragðflokknum (þriggja stjörnu), númer 7-11 í miðflokknum (tveggja stjörnu) og númer 12-20 í lægsta gæðaflokknum (einnar stjörnu).

Koldíoxíð og sprengigígar

Kristján Sæmundsson

ÍSOR, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Alkalísk kvika er gasríkari en þóleiútisk. Hátt hlutfall gjalls í hraungosum á Snæfellsnesi kæmi heim við þá vitneskju. Annað gossvæði á landinu sker sig úr um mikla gjallmyndun. Það er í Grímsnesi, en þar gýs þóleiúti. Ég hef velt fyrir mér hvort skýringin þar geti verið þensla koldíoxíðs við snögga þrýstingslækkun. Fyrir meir var koldíoxíð talið geta valdið þeytigosum, en nú virðist sú skýring eiga sér fáa formælendur og hvellsuðu vatns kennt um, sbr. lo. phreatic. Svo er um kvartera maar- vúlkanismann í Eifel með sín 60 „möör“. Lorenz (1974, 1985) og Schmincke (1988) telja þá skýringu eina koma til greina, þótt fremur sýnist hún langsótt. Í Encyclopedia of Volcanoes lýsa Vespermann og Schmincke (2000) frati á koldíoxíð sem orsakavald sprengigosa, en færa ekki rök fyrir því, skrifa aðeins að sú kenning hafi verið kveðin niður.

Koldíoxíð kemur fyrir uppleyst í grunnvatni, en einnig í súperkrítísku formi (krítíski punkturinn er 71 bar, 31°C) sem sérstakur fasi. Dæmi um það er í SA-Ástralíu. Þar er súperkrítískt koldíoxíðið í sandsteini á 2400-2500 m dýpi við hydróstatískan þrýsting og 92°C hita (liquid CO₂ kalla höfundarnir, Chivas o.fl. 1987, það). (Borhola gefur 28.000 tonn á ári af 98% hreinu CO₂). Maar-vúlkanisma sem þar er töldu þeir vera af völdum sprengipenslu koldíoxíðs og nefndu fleiri dæmi, jafnvel án kviku við sprungumyndun. Eifel er eitt gígasvæðanna sem Chivas o.fl. nefndu, enda mikið koldíoxíð-útsreymi þar. Þeir nefna einnig Nyos-Monoun gígasvæðið í Kamerún þar sem koldíoxíðið streymir upp í gígvötn og mettar vatn og setlög. Hér má bæta við grein eftir Barnes og McCoy (1979) um þátt koldíoxíðs í sprengigosi í Alaska. Í fræðunum virðist mönnum annars lítt hafa hugnast koldíoxíð sem orsakavaldur í „freatískum“ gosum, alla vega eru eldfjallabækur fáorðar þar um, sjá þó fróðlega umfjöllun í Williams og McBirney (1979).

Í Grímsnesi gæti suða upp úr jarðhitakerfi sem þar er undir valdið gjallmyndun ein og sér eða verið samverkandi þáttur með koldíoxíði. Þar er háhitakerfi á kólnunarstigi. Hæstur hiti í því nú er á bilinu 165 (Hæðarendi) - 185°C (Klausturhólar). Uppleyst koldíoxíð í vatni þess er um 1,2% af þunga. Rennsli úr borholum ÍSAGA á Hæðarenda er: Vatn um 8 l/s og koldíoxíð 0,1 kg/s við 1 bar. Þaðan kemur megnið af „kolsýru“notkun landsins. Vitað er að jarðhitakerfi þetta (Klausturhólakerfið) nær vestur undir Miðengi, og Hraunborgir eru í jaðri þess suðaustan megin. Í Grímsnesi er gjallmyndunin langmest í Seyðishólum þar sem gjallið áætlast 0,3 km³ (Sveinn Jakobsson 1966), en hraunið er varla nema um 0,05 km³.

Fá jarðhitakerfi hér á landi líkjast Grímsneskerfinu. Nefna má þó kvartera eldfjallasvæðið á Snæfellsnesi og Leirárvæðið. Það er í suðurjaðrinum á 4-5 milljón ára gamalli megineldstöð. Þar kann að eiga sér stað afgösun úr innskotsmassa líkt og á Snæfellsnesi, en hefur þá enst furðu lengi.

Kimberlít-pípur eiga sér ekki neina samsvörun í gígum á yfirborði að talið er, en bent á líkindi þar sem eru öskugígar og „möör“. Kimberlít er alkalískt berg, undirmettað af SiO₂. Karbónatít fylgir oft með. Hér skal nefnt gígasvæði sem gæti komið heim við hvort tveggja: kimberlíta-pípur sem aðfærslurásir og koldíoxíð sem sprengivald. Þetta er Katwe-svæðið í Uganda. Þar eru um 100 síðkvarterir ösku- og túffigígar á 50x12 km svæði norðaustur af vatni einu í Vestri sigdalnum (Gestur Gíslason o.fl. 2007). Í sumum er vatn. Einn af þeim er Katwe-

gígurinn. Í og við hann eru laugar og strýtur úr kalkhrúðri og allmikið koldíoxíð-útspreymi. Í túffinu kringum hann hafa fundist demantar (Holmes 1956). Líklega hefur eitt leitt af öðru kvika af djúpum uppruna (150-200 km), mikið koldíoxíð, kröftug sprengivirkni og einsleitt stórt gígsvæði en ekki eldkeila eins og annars einkennir Vestri-sigdalinn. Holmes (1956) og síðar taldi koldíoxíð rýma gígrásina með flúidiseringu og tæta kvikuna við þenslu þegar þrýstingi létti.

Heimildir

- Barnes I. and G.A. McCoy 1979: Possible role of mantle-derived CO₂ in causing two „phreatic“ explosions in Alaska. - *Geology* 7, 434-435
- Chivas A.R. o.fl. 1987: Liquid carbon dioxide of magmatic origin and its role in volcanic eruptions. – *Nature* 326, 9. April, 587-589.
- Gestur Gíslason o. fl. 2008: The Katwe geothermal prospect. – Report on a geothermal survey prepared for Þróunarsamvinnustofnun og Ministry of Energy and Mineral Development, Uganda. 101 bls.
- Holmes A. 1956: The ejectamenta of Katwe crater, South-West Uganda. – *Verhandl. Koninkl. Nederl. Geol-Mijnbouwendig Genootschap. Geol. Serie, Deel XVI (Gedenkboek H.A. Brouwer)*, p. 139-166.
- Lorenz. V. 1974: On the formation of maars. – *Bull. Volcanol.* 37, 183-204.
- Lorenz V. 1985: In *Kimberlites I: Kimberlites and related rocks*, p. 299-309.
- Schmicke, H.-U. 1988: Vulkane im Laacher See-Gebiet. Ihre Entstehung und heutige Bedeutung. 119 bls.
- Sveinn Jakobsson 1966: The Grímsnes lavas SW-Iceland. – *Acta Naturalia Islandica* II, Nr. 6, 30 bls. myndasíður og kort.
- Vespermann, D. og H.-U. Schmincke 2000: Scoria cones and tuff rings. – In H. Sigurðsson (ed. in chief) *Encyclopedia of Volcanoes*, p. 683-694.
- Williams H. og A.R. McBirney 1979. *Volcanology*. 397 bls.

Nýting jarðhita – Eru ráðgjafar á hálum ís?

Sigmundur Einarsson og Kristján Jónasson

Náttúrufræðistofnun Íslands, Urriðaholtsstræti 6-8, 212 Garðabær

Í umræðu um efnahagslega framtíð íslenskrar þjóðar á síðustu árum hefur ítrekað verið vísað til gríðarlegra orkulinda landsins og þeirra möguleika sem er í þeim fólgin til endurreisnar atvinnu- og efnahagslífs. Þá hafa efasemdir um stóriðjustefnu síðustu áratuga fengið nokkurn meðbyr eftir að Landsvirkjun dró fram gamlar hugmyndir um flutning raforku um sæstreng til Evrópu. Hærra verð og meiri arður eru slagorð dagsins.

Á síðustu árum hefur nýting jarðvarma á háhitasvæðum landsins hlotið mun meiri athygli en nýting vatnsorku. Skoðun á orsökum þessara miklu vinsælda jarðvarmans umfram vatnsorkuna leiðir í ljós að þar er ýmislegt málum blandið. Upp úr síðustu aldamótum kviknaði sú þjóðsaga í þjóðfélagsumræðunni að umhverfisáhrif jarðhitavirkjana væru töluvert minni en umhverfisáhrif vatnsaflsvirkjana. Röksemdir sem fylgdu takmörkuðust við flatarmál þess lands raskast við virkjun. Miðlunarlón vatnsaflsvirkjana eru yfirleitt stærri en flest háhitasvæði og þar með urðu jarðvarmavirkjanir á skömmum tíma nánast umhverfisvænar.

Í þjóðsögunni um jarðvarmavirkjanir hefur því einnig verið haldið á lofti að gnótt sé af slíkri orku sem jafnframt sé endurnýjanleg og vinnslan sjálfbær. Þessar upplýsingar eru reyndar ekki alls kostar réttar. En þær eru varla sprottnar af engu. Eru þær ef til vill byggðar á óheppilegum yfirlýsingum íslenskra jarðvísindamanna, yfirlýsingum sem ekki standast nánari skoðun? Hér skulu tekin þrjú dæmi:

Í blaðaviðtali árið 2003 sagði Guðmundur Ómar Friðleifsson m.a. um djúpboranir eftir jarðhita: „Helsti ávinningurinn er fimm- til tífold aflaukning úr hverri holu, kannski úr fimm megawöttum í 50 megawött“. Í blaðagrein árið 2009 sagði Ólafur G. Flóvenz: „Við eigum gnótt af endurnýjanlegri orku, jarðhita og vatnsorku, sem má framleiða ódýrt á heimsmælikvarða.“ Og í blaðagrein árið 2006 sagði Ólafur: „Umhverfisáhrif háhitavirkjana eru talsvert minni og öðruvísi [en umhverfisáhrif vatnsaflsvirkjana] og þar munar fyrst og fremst um minna rask á yfirborði og að afmá má að mestu ummerkin ef menn kjósa að leggja virkjunina niður. Jarðhitasvæðin sjálf jafna sig á nokkrum árum eða áratugum og leita í upprunalegt horf. Örlítið koldíoxíð og brennisteinsvetni kemur upp með jarðgufunni og sleppur út í andrúmsloftið. Þá hefur virkjun háhitasvæðanna yfirleitt lítil áhrif á hveravirkni á yfirborði og þá helst til aukningar. Að öllu samanlögðu sýnist mér nokkuð ljóst að umhverfisáhrif jarðhitavirkjana eru almennt mun minni en við virkjun jökulánna.“

Hvað eiga ráðamenn að halda? Auðvitað hljóta þeir að taka mark á slíkum yfirlýsingum frá sérfræðingum þjóðarinnar sem fullyrða að við eigum nóg af endurnýjanlegri orku.

Samkvæmt Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar frá 2005 nýta stórar jarðvarmavirkjanir margfalda þá orku sem streymir til yfirborðs á jarðhitasvæðum við náttúrulegar aðstæður. Þó svo að sú orka endurnýist að hluta fer því fjarri að hægt sé að tala um endurnýjanlega orkuvinnslu á þeim háhitasvæðum sem nú þegar hafa verið virkjuð. Í leiðbeiningum með námsefni fyrir grunnskóla má lesa eftirfarandi skilgreiningu á endurnýjanlegri auðlind: *Auðlind* sem hægt er að nota áfram svo lengi sem séð verður án þess að hún rýrni. Ótæpileg vinnsla úr slíkri auðlind getur aldrei orðið sjálfbær.

Í skýrslu Orkustofnunar um mat á vinnslugetu jarðhitasvæða frá 2009 kemur fram að heildarafl háhitasvæða landsins sé talið 4255 MW miðað við 50 ára nýtingartíma. Samkvæmt skýrslunni skal þetta afl helmingast ef gert er ráð fyrir helmingi lengri nýtingartíma, þ.e. 2128 MW til 100 ára. Á sama hátt má gera ráð fyrir 709 MW vinnslu í 300 ár, en nú þegar hafa verið virkjuð tæplega 600 MW á landinu öllu.

Helguvíkuvænting

Árið 2007 gaf Skipulagsstofnun út álit um mat á umhverfisáhrifum álvers Norðuráls í Helguvík með ársframleiðslu allt að 250.000 t. Ein af helstu niðurstöðum Skipulagsstofnunar var eftirfarandi: „Skipulagsstofnun bendir á að þeir virkjunarkostir sem Hitaveita Suðurnesja hyggst nýta vegna fyrsta áfanga álversins eiga eftir að fara í umfjöllun samkvæmt lögum um mat á umhverfisáhrifum og suma á einnig eftir að fjalla um samkvæmt skipulags- og byggingarlögum.“ Að öðru leyti virtist Skipulagsstofnun sátt við hugmyndir framkvæmdaraðila um orkuöflun. Samkvæmt matsskýrslunni var áætlað að fyrri hluti álversins tæki til starfa árið 2010 og síðari hluti árið 2015. Stofnunin gerði af einhverjum ástæðum ekki sambærilegar athugasemdir við þá virkjunarkosti sem Orkuveita Reykjavíkur hugðist nýta fyrir fyrri og síðari áfanga álversins, en alls þarf um 250 MW fyrir fyrri áfangann.

1. tafla. Áætluð orkuöflun fyrir fyrri áfanga álvers í Helguvík var u.þ.b. eftirfarandi skv. matsskýrslu. Tölur eru áætlaðar vegna ónákvæmrar framsetningar í matsskýrslu:

Virkjun	Afl (MW)	Tilbúin
Reykjanes	75	2010
Svartsengi/Eldvörp	50	2010
Krýsuvík	25	2010/2011
Hverahlíð	50	2010/2011
Bitra	50	2010/2011
Samtals	250	

Í nóvember 2012 er unnið að stækkun Reykjanesvirkjunar um 80 MW en önnur orkuöflun er ekki á döfinni. Þrátt fyrir þessa stöðu segir á heimasíðu Norðuráls (19. nóv. sl.) að stefnt sé á framleiðslu í Helguvík árið 2015 og Hagstofan og Seðlabankinn gera ráð fyrir þessum framkvæmdum í spám sínum um efnahagsmál. Ekki verður betur séð er að hér hafi eitthvað skulast til.

Fyrir á þessu ári dró Landsvirkjun fram gamlar hugmyndir um lagningu 700 MW sæstrengs til Evrópu. Þar á bæ er gert ráð fyrir að slíkur sæstrengur gæti verið kominn í gagn við um 2022 og jafnframt er gert ráð fyrir þeim framkvæmdum í orkumálum sem nú þegar eru á döfinni, þ.e. stóriðju í Helguvík og við Húsavík. Þessar hugmyndir samsvara því að á næstu 9-10 árum verði reist hér á landi orkuver sem framleiða allt að 2000 MW eða sem nemur um þrefaldri framleiðslu Kárahnjúkavirkjunar. Þessum framkvæmdum fylgja að sjálfsögðu tilheyrandi

verksmiðjur og flutningsmannvirki. Á sama tíma berast þær fréttir frá Bretlandi að hugsanlega verði heimili þar í landi hituð upp með orku frá íslenskum eldfjöllum innan áratugar.

Hvernig má þetta vera á sama tíma og öflun 250 MW af raforku fyrir álver í Helguvík hefur gengið á afturfótunum, dregist um að minnsta kosti hálfan áratug og ekkert bendir til að sú orka sé á leiðinni í bráð? Ekki verður betur séð en að íslenskir sérfræðingar á sviði orkumála hafi fyrir löngu misst allt jarðsamband. Þetta virðist alltént eiga við um ráðgjafa á sviði jarðhita og ráðgjöf þeirra vegna orkuvinnslu fyrir álver í Helguvík sem hefur algerlega brugðist.

Þessu til viðbótar er rétt að benda á að í umsögn Orkustofnunar vegna mats á umhverfisáhrifum Hverahlíðarvirkjunar og Bitruvirkjunar, sem ætlað var að framleiða orku fyrir síðari áfanga álvers í Helguvík, segir m.a.: „Orkustofnun telur verulega óvissu ríkja um samanlögð áhrif fyrirhugaðra framkvæmda á jarðhitaauðlindina á Hengissvæði.“

Það er mat höfunda að þögnin um stöðu orkuöflunar úr jarðhitasvæðum á suðvesturhorni landsins sé íslenskum jarðvísindamönnum til lítils sóma. Þeim væri nær að stíga niður á jörðina og sýna landsmönnum að þeir séu verðir þess trausts að vera ætlað stórt hlutverk í þróunarsamvinnu á erlendri grund.

Heimildir

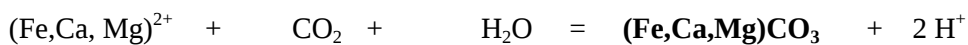
- Guðmundur Pálmason 2005. Jarðhitabók. Eðli og nýting auðlindar. 298 bls. Hið íslenska bókmenntafélag. Reykjavík.
- HRV sf. 2007. Álver í Helguvík. Ársframleiðsla allt að 250.000 t. Matsskýrsla. http://www.skipulagsstofnun.is/media/attachments/Umhverfismat/587/Matssk%C3%BDrsla_2007-08-31_low%20res.pdf Skoðað 19. nóv. 2012.
- Jón Ingimarsson 2012. Er sæstrengur í sjónmáli? Erindi á afmælisráðstefnu VFÍ 8. mars 2012 um framtíðarnýtingu orkuauðlinda á Íslandi. http://www.vfi.is/media/utgafa/80312_JI.pdf Skoðað 19. nóv. 2012.
- Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Axelsdóttir og Guðni Axelsson 2009. Mat á vinnslugetu háhitasvæða. Orkustofnun, 2009/09.
- Jónas Ketilsson, Axel Björnsson, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, Bjarni Pálsson, Grímur Björnsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson 2010. Eðli jarðhitans og sjálfbær nýting hans. Álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita. Orkustofnun, 2010/05.
- Norðurál 2012. Stefnt á framleiðslu í Helguvík 2015. Frétt á heimasíðu Norðuráls. <http://nordural.is/islenska/fyrirtaekid/frettir/nr/132731/> Skoðað 19. nóv. 2012.
- Orkustofnun 2007. Mat á umhverfisáhrifum Bitru- (135 MW) og Hellisheiðarvirkjunar (90 MW). Bréf til Skipulagsstofnunar dags. 9. nóv. 2007.
- Ólafur G. Flóvenz 2006. Framtíðarkostir í orkumálum Íslendinga - Athugasemdir vegna sjónvarpsviðtals. Morgunblaðið 18. janúar. 2006
- Ólafur G. Flóvenz 2009. Orkulindir Íslands og framtíðin. Morgunblaðið 6. apríl. 2009.
- Sigrún Helgadóttir 2003. Komdu og skoðaðu. Sjálfbær þróun og önnur hugtök. Kennaraefni. http://vefir.nams.is/komdu/hringrasir/frodl_hring/sjalfbaer.html Skoðað 19. nóv. 2012.
- Skipulagsstofnun 2007. Álver í Helguvík. Ársframleiðsla allt að 250.000 t. Álit Skipulagsstofnunar um mat á umhverfisáhrifum. <http://www.skipulagsstofnun.is/media/attachments/Umhverfismat/586/2006100033.PDF> Skoðað 19. nóvember 2012.

Binding kolefnis í bergi

Sigurdur R. Gislason¹, Eric H. Oelkers², Wallace S. Broecker³, Einar Gunnlaugsson⁴, Edda Sif Aradóttir⁴, Bergur Sigfusson⁴, Ingvi Gunnarsson⁴, Juerg M. Matter³, Martin Stute³, Jennifer Hall³, Kiflom Mesfin¹, Sandra Snæbjörnsdóttir¹, Helgi Alfredsson¹, Domenik Wolff-Boenisch¹, Andri Stefansson¹, Iwona Galeczka¹, Snorri Gudbrandsson¹, Gabrielle Stockman¹, Alex P. Gysi¹, Gudni Axelsson⁵, Jordy Bruno⁷, Fidel Grandia⁷, Knud Didriksen⁶ og Susan Stipp⁶

¹Institute of Earth Sciences, University of Iceland, ²CNRS, Université Paul Sabatier, France, ³Earth Institute, Columbia University, USA, ⁴Reykjavik Energy, Iceland, ⁵Icelandic GeoSurvey, Iceland, ⁶Nanogeoscience Center, University of Copenhagen, Denmark, ⁷Amphos21, Barcelona, Spain

Í tilraunaverkefninu á Hellisheiði ætlar hópur vísindamanna, verkfræðinga og framhaldsnema að fanga koltvíoxíð frá Hellisheiðarvirkjun og breyta því í stein. Við getum því kallað þetta að steinrenna koltvíoxíð. Binding kolefnis í föstu efni steindar í bergi er öruggasta leiðin til þess að binda kolefni í jarðlögum. Þetta er jafnframt sú aðferð sem tekur lengstan tíma. Því þarf að finna leiðir til þess að hraða leysingu koltvíoxíðs í vatni og að hraða myndun steindanna. Hugmyndin er að fanga koltvíoxíð úr jarðhitagufu á Hellisheiði, leysa það í vatni undir töluverðum þrýstingi (25 börum) og dæla kolsýrða vatninu í jarðlög á rúmlega 500 m dýpi í Þrengslum, sunnan við Hellisheiðarvirkjun. Þegar koltvíoxíð leysist í vatni myndast kolsýra. Kolsýran sýrir vatnið það mikið að pH-gildi þess verður milli 3 og 4. Kolsýruvatnið er hvarfgjarnt, þ.e. það leysir efni á borð við kalsíum, magnesíum og járn tiltölulega hratt úr berginu. Með sýringunni er leysingu bergsins hraðað. Þegar styrkur þessara efna er orðinn nægjanlegur í vatninu ganga þau í efnasamband við koltvíoxíðið og falla út sem föst efni, steindir. Þar með er koltvíoxíðið bundið og getur verið stöðugt þar í milljónir ára. Þessi efnahvörf eru dregin saman með eftirfarandi efnahvarfi.



Tvígildar katjónir

járns, kalsíums koltvíoxíð vatn **karbónatsteintegundir** vetnisjón
og magnesíums

Fjölmörg ljón eru á þessari leið, en þau verða ekki tíunduð hér. Tilgangur verkefnisins er að þróa iðnaðarferli til bindingar á koltvíoxíði og þjálfa unga vísindamenn til þess að tæknin berist hratt til komandi kynslóða. Reynt er að hafa lausnir almennar þannig að einfalt verði að yfirfæra þær á basaltsvæði annars staðar í heiminum. Vinna framhaldsnemanna hefur beinst að tilraunum á rannsóknarstofu þar sem hraði efnahvarfa hefur verið mældur og hraði leysingar koltvíoxíðs í vatni rannsakaður. Reiknilíkön hafa verið þróuð, eiginleikar niður-

dælingarsvæðisins í Þrengslum verið rannsakaðir og náttúrulegar hliðstæður skoðaðar eins og sjá má í heimildum hér á eftir.

Mikið vatn þarf til að steinrenna koltvíoxíð. Vatnspörfin fer eftir hitastigi vatnsins, seltu og koltvíoxíðþrýstingnum. Eftir því sem hiti og selta er lægri og koltvíoxíðþrýstingur hærri, þeim mun minna þarf af vatni. Hitastigið á því grunnvatni á Hellisheiði sem nota á við kolefnisbindinguna er um 19°C, og þarf þá um 22 tonn af grunnvatni til þess að binda eitt tonn af CO₂ en ekki nema 13 tonn ef hitastigið er 2°C. Basalt er betur til þess fallin en flestar bergtegundir að steinrenna koltvíoxíð, því að styrkur Ca, Mg og Fe er mikill í basalti, það leysist tiltölulega hratt miðað við aðrar bergtegundir og er algengt á yfirborði jarðar. Það sem kemur til með að takmarka notkun steinrenningar kolefnis víðar um jörðina er skortur á vatni til efnaskiptanna ef koltvíoxíðið er leyst að fullu í vatni við niðurdælingu. Úthafshryggir eru að mestu úr basalti. Ef unnt verður að þróa tækni til að steinrenna koltvíoxíð við strendur basaltsvæða eða á úthafshryggjum eru mikil tækifæri þar, því að vatnið þar er ótakmarkað.

Heimildir

- Alfredsson, H. A., D. W. Boenisch og A. Stefánsson (2011). CO₂ sequestration in basaltic rocks in Iceland: Development of a piston-type downhole sampler for CO₂ rich fluids and tracers. *Energy Procedia* 4, 3510–3517.
- Aradóttir, E.S., E. Sonnenthal, G. Björnsson og H. Jonsson (2012). Multidimensional reactive transport modeling of CO₂ mineral sequestration in basalts at the Hellisheidi geothermal field, Iceland. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 9, 24-40.
- Flaathen, T.K., Gislason, S.R., Oelkers E.H. og Á. E. Sveinbjörnsdóttir (2009). Chemical evolution of the Mt. Hekla, Iceland, groundwaters: A natural analogue for CO₂ sequestration in basaltic rocks. *Applied Geochemistry* 24, 463-474.
- Gislason, S. R., D. Wolff-Boenisch, A. Stefansson, E. H. Oelkers, E. Gunnlaugsson, H. Sigurdardóttir, B. Sigfússon, W. S. Broecker, J. M. Matter, M. Stute, G. Axelsson og Th. Fridriksson (2010). Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: The CarbFix project. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4, 537–545.
- Gudbrandsson, S., D. Wolff-Boenisch, S. R. Gislason, og E. H. Oelkers (2011). An experimental study of crystalline basalt dissolution from 2 = pH = 11 and temperatures from 5 to 75°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 5496-5509.
- Gysi, A. P. og A. Stefánsson (2012). CO₂-water-basalt interaction. Low temperature experiments and implications for CO₂ sequestration into basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 81, 129–152.
- Gysi, A. P. og A. Stefánsson (2011). CO₂-water-basalt interaction. Numerical simulation of low temperature CO₂ sequestration into basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 4728–4751.
- Matter, J. M, P. B. Kelemen (2009). Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation. *Nature Geoscience* 2, 837-841.
- Matter, J. M., W. Broecker, W., S. R. Gislason, E. Gunnlaugsson, E. H. Oelkers, M. Stute, H. Sigurdardóttir, A. Stefansson, D. Wolff-Boenisch, G. Axelsson, B. Sigfússon (2011). The CarbFix Pilot Project – Storing Carbon Dioxide in Basalt. *Energy Procedia* 4, 5579–5585.
- Oelkers, E. H, S. R. Gislason og J. Matter (2008). Mineral carbonation of carbon dioxide. *Elements* 4, 333–337.
- Ragnheiðardóttir, E., H. Sigurdardóttir, H. Kristjánsdóttir og W. Harveyd (2011). Opportunities and challenges for CarbFix: An evaluation of capacities and costs for the pilot scale mineralization sequestration project at Hellisheidi, Iceland and beyond. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5, 1065–1072.

- Stockmann, G. J., D. Wolff-Boenisch, S. R. Gíslason og E. H. Oelkers (2011). Do carbonate precipitates affect dissolution kinetics? 1: Basaltic glass. *Chemical Geology* 284, 306–316.
- Stockmann, G. J., L. S. Shirokova, O. S. Pokrovsky, P. Benezeth, N. Bovet, S. R. Gíslason, E. H. Oelkers (2012). Does the presence of heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* affect basaltic glass dissolution rates? *Chemical Geology* 296-297, 1-18.
- Wolff-Boenisch, D. (2011). On the buffer capacity of CO₂-charged seawater used for carbonation and subsequent mineral sequestration. *Energy Procedia* 4, 3738–3745.
- Wolff-Boenisch, D., S. Wenau, S. Gíslason og E. H. Oelkers (2011). Dissolution of basalts and peridotite in the presence of organic and inorganic ligands, in seawater and under pCO₂ pressure at 25°C. Implications for mineral sequestration of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 5510-5525. —

Hávermisholur og vatnsæðar

Stefán Arnórsson

Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík

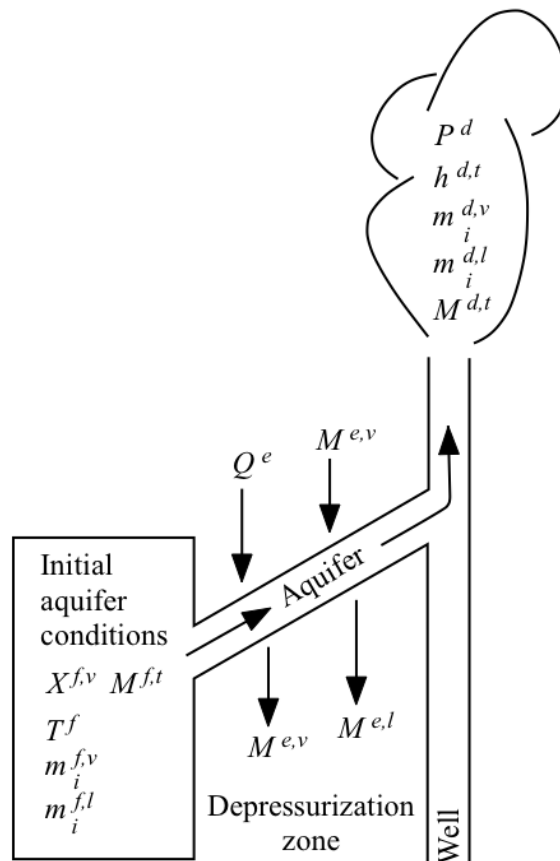
Orsök hávermis

Í vatnsríkjandi háhitakerfum er vermi vökva í renni gufuhola stundum það sama (innan skekkjumarka mælinga) og í upphaflegum djúpvökva en algengt er þó að það sé umtalsvert herra. Slíkar holur eru yfirleitt nefndar hávermisholur. Það eru tvö ferli sem geta leitt til þess að vermi vökva sem flæðir um aðfærsluæðar að borholu hækki á leið sinni, en þessi ferli geta þó ekki orðið virk nema áköf suða eigi sér stað í aðfærsluæðum vegna þrýstifalls. Við þrýstifallssuðu fellur hiti vatnsins um leið og gufan myndast. Þá skapast skilyrði fyrir flæði varma með leiðingu frá heitara bergi yfir í kaldari vökva. Þar sem vatnið er sjóðandi myndi varmi sem berst úr berginu með leiðingu auka á gufumyndun umfram þrýstifallssuðu. Hitt ferlið sem leiðir til hækkunar á vermi vökva sem flæðir inn í borholur tengist því að vatn og gufa hafa ekki sömu flæðieiginleika. Vatnið myndar filmu á yfirborði steinda og þessi filma vill sitja föst meðan öll gufan sem myndast flæðir inn í borholur. Verði rúmmálshluti gufunnar nægilega hár fer svo að verulegur hluti vatnsins, jafnvel allt vatnið, sem flæddi með gufunni í upphafi situr eftir sem filma á yfirborði korna. Í síðara tilfelli flæddi aðeins gufa úr holunni en í því fyrra lítið vatn miðað við gufuna. Í sumum tilfellum getur gufa tapast frá þeim vökva sem flæðir um aðfærsluæð borholu með því að rísa upp í það berg sem liggur yfir æðinni. Ef slíkt gufutap verður, leiðir það til þess að holurennið verður tiltölulega gassnautt og má þekkja þetta ferli á því.

Það vatn sem myndar filmu á yfirborði steinda sýður við herra hitastig en það vatn sem flæðir og er í jafnvægi við gufuna vegna þess að rafhleðslur á yfirborði steindanna toga í vatnssameindirnar sem filmuna mynda. Að því getur þó komið að þetta vatn sjóði ef hitamunur milli bergs og þess vökva sem flæðir verður nógu hár. Ef hávermi orsakast af varmaleiðingu (varmaleiðingarlíkan) leiðir það ekki til breytinga á efnainnihaldi vökvans, aðeins hækkunar á verminu. Efnainnihald vökva í holurenni er hið sama og í upphaflegum djúpvökva (ef lítið er fram hjá útfellingum eða uppleysingu efna í aðfærsluæðum og fódurrörum). Hins vegar er efnainnihald upphaflegs djúpvökva annað en holurennis ef hávermi orsakast af aðskilnaði vatns og gufu í aðfærsluæðum (aðskilnaðarlíkan). Frá sjónarhóli efnavarmafræði svarar aðskilnaðarlíkanið til opins kerfis, varmaleiðingarlíkanið til lokaðs kerfis en kerfið er einangrað ef bæði vermi holurennis og efnainnihald er jafnt vermi og efnainnihaldi upphaflegs djúpvökva.

Mynd 1 sýnir öll þau ferli sem valdið geta breytingum á vermi upphaflega djúpvökva og í sumum tilfellum einnig breytingum á efnainnihaldi hans.

Til að geta reiknað út efnainnihald djúpvökva fyrir hávermisholur út frá efnagreiningum á vatns- og gufusýnum sem safnað er við tiltekinn þrýsting á holutoppi er nauðsynlegt að meta hvaða ferli orsaka hávermi. Sama gildir um hlutföll samsætna sem mæld væru sýnum. Stundum gæti eitt ferli ráðið mestu en hávermið en vissulega geta öll verið að verki fyrir sömu holuna á sama tíma og sýnum er safnað.



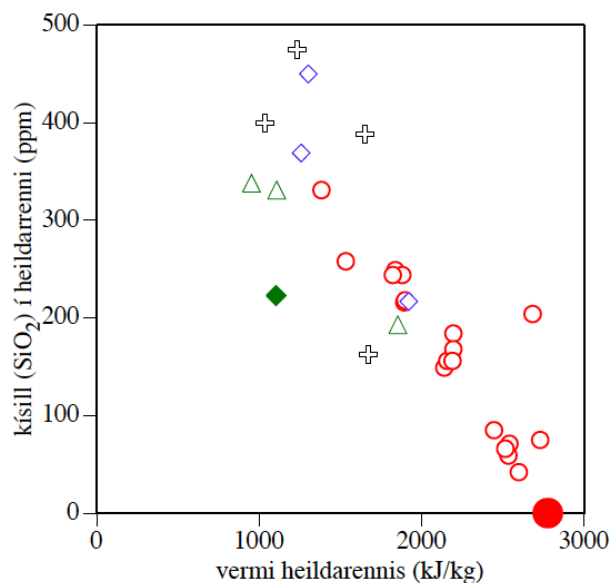
Mynd 1. Einfaldað snið sem sýnir þau ferli í aðfærsluæðum borhola sem geta leitt til breytinga á vermi og efnainnihaldi hins flæðandi vökva. Borholan er sýnd lengst til hægri á myndinni og þær stærðir sem mæla þarf til að reikna út einkenni upphaflegs djúpvökva en þær eru sýnir í kassinn neðst og lengst til vinstri. Tákn hafa eftirfarandi merkingu: $M^{d,t}$ = massaflæði (kg/sek) holurennis, $h^{d,t}$ = vermi holurennis (kJ/kg), P^d = þrýstingur sem sýnum er safnað við (bar abs.), $m_i^{d,l}$ = styrkur efnis i í vatnssýni (ppm eða mól/kg) og $m_i^{d,v}$ = styrkur efnis i í gufusýni. Í kassanum táknar uppskrifað f upphaflegan djúpvökva, T hitastig þessa vökva og $X^{f,v}$ gufuhlutann á honum (miðað við massa). Önnur tákn hafa sömu merkingu og fyrir holurenni. Athugið að $h^{f,t}$ má reikna út frá $X^{f,v}$ og T^f . Í aðfærsluæð (táknað með uppskrifuðu e) merkir Q varmaflæði (kW_t) frá bergi yfir í vökvann sem flæðir inn í borholu, $M^{e,v}$ gufuflæði (kg/sek) sem bætist við rennið við það að filmuvatn gufar upp, $M^{e,l}$ táknar vatn (kg/sek) sem situr eftir í æð sem filma á yfirborði steinda og $M^{e,v}$ með ör niður á við gufu sem tapast úr vökvarenni.

Nálganir

Jarðhitakerfi eru langoftast í sprungnu bergi með misleita lekt. Þegar svo hagar til, óháð því hvort vatn og gufa streymi inn á einum stað í holuna, hlýtur holuvökvinn að vera blanda af vökvapáttum sem hafa streymt mislangt og á misjöfnum hraða frá upprunastað sínum að holunni. Þess vegna er allur holuvökvi blanda margra þátt sem þurfa alls ekki að hafa sama upprunahitann. Ef til vill væri best að herma efnainnihald holurennisins með því að giska á efnasamsetningu, hita og þrýsting hvers vökvapáttar. Slíkri ágiskun og þeirri reikningslegu ítrekun sem henni fylgir skapar mikla óvissu um útkomuna (margar lausnir gætu verið til) og óljóst er hvort nokkur skynsamleg nálgun sé fyrir hendi til að giska á upphaflegt vermi og efnainnihald hvers þáttar. Af þessum sökum er talið réttlætanlegt að styðjast við einföld líkön og gera ráð fyrir að breyting á upphaflegu vermi og efnainnihaldi djúpvökva yfir í vermi og efnasamsetningu holurennis verði við tiltekið hitastig (þrýsting, en vatn og gufa eru á

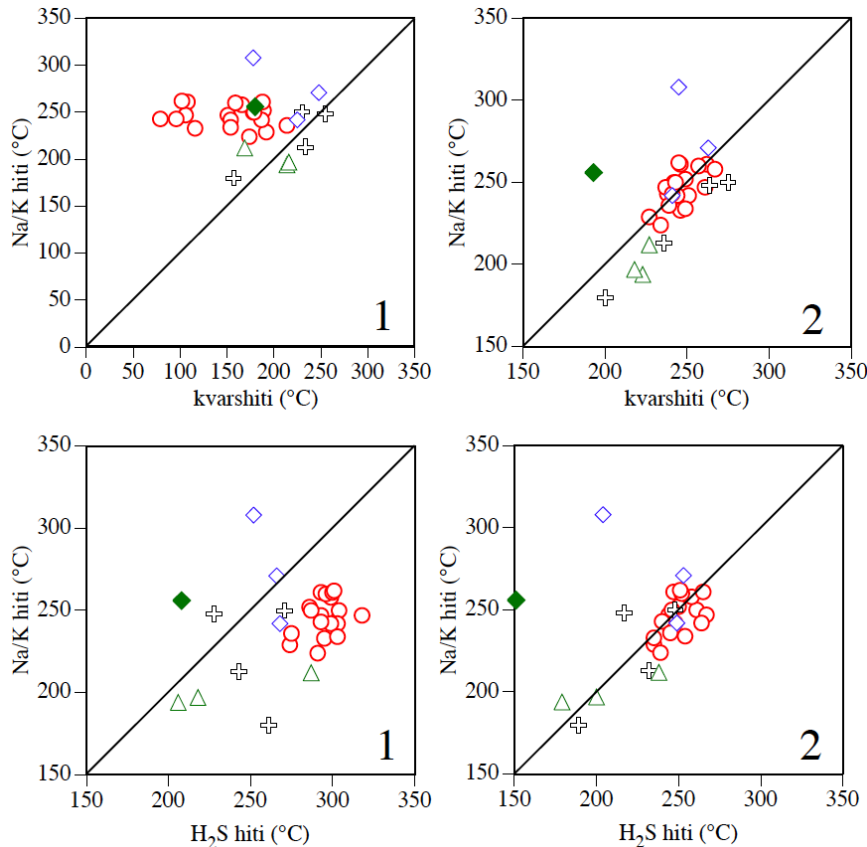
suðumarkferlinum og frá sjónarhóli eðlisfræði ræðst hiti því í raun af þrýstingi). Velja þarf þetta hitastig breytinga á vökvafhlæðinu. Síðan er æskilegt að skoða hversu niðurstöður um efnainnihald djúpvatns eru næmar fyrir vali á nefndu hitahitastigi.

Einföld leið til að meta hvaða ferli orsaki hávermi fyrir hóp af borholum á tilteknu svæði er að skoða samband milli vermis og óhvarfsgjarns efnis eins og klóríðs í heildarrenni ($M^{d,t}$) eða kísils ef hiti í æðum er ekki mjög breytilegur. Á mynd 2 sést að styrkur kísils í heildarrenni lækkar eftir því sem vermið hækkar og stefnir á 0 þegar vermið stefnir á vermi gufu. Niðurstaðan á mynd 2 bendir til þess að aðskilnaður hama (vatns og gufu) í æð sé orsök hávermis. Ef hins vegar styrkur efnis eins og kísil í vatni í holurenni héldist nokkurn vegin óbreytt þótt vermi breyttist og stefndi á hátt gildi þegar vermis rennisins stefndi á vermi gufu væri orsök hávermisins varmaleiðning frá bergi vatnsæðar yfir í vökvann sem fæddi inn í holuna.



Mynd 2. Vensl milli styrks á kísli og vermis í borholum á Olkariasvæðinu í Kenya. Stóri rauði punkturinn svarar til vermis vatnsmettaðrar gufu við 10 bar abs. Gögn frá Cyrusi Karingithi o.fl. (2010).

Sú aðferð sem talin er eiga best við til að meta orsök hávermis er að bera saman niðurstöður efnahitamæla. Æskilegast virðist að nota þrjá slíka mæla, þá sem byggja á kísli (SiO_2) og Na/K hlutfalli í vatnssýnum og loks brennisteinsvetni (H_2S) í holurenni. Na/K-hitamælirinn er óháður því hvaða ferli orsaka hávermi en það eru hinir efnahitamælarnir ekki því þeir byggja á styrk eins efnis en ekki hlutfalli tveggja efna. Á mynd 3 eru niðurstöður efnahitamælanna þriggja bornar saman fyrir varmaleiðingar- og aðskilnaðarlíkönin fyrir borholur á Olkaria-jarðhitasvæðinu í Kenya. Af mynd 3 má lesa að hávermi einstakra hola ræðst að mestu ef ekki öllu leyti af aðskilnaði vatns og gufu í aðfærsluæð þar sem vatnið situr eftir að hluta en öll sú gufa sem myndast skilar sér inn í holuna.



Mynd 3. Vensl milli þriggja efnahitamæla fyrir gufuholur á Olkaria-jarðhitasvæðinu í Kenya. 1 svarar til niðurstaða sem byggja á varmaleiðingarlíkani en 2 til aðskilnaðarlíkansins. Hin ýmsu tákn svara til mismunandi svæða innan Olkariasvæðisins. Með því að niðurstöðum ber vel saman fyrir aðskilnaðarlíkanið en illa fyrir hitt en ályktað að hávermi borhola orsakist að mestu a.m.k. af aðskilnaði vatns og gufu í aðfærsluæð. Gögn frá Cyrusi Karingithi o.fl. (2010).

Vatnsæðar

Einn mikilvægasti liðurinn á útreikningi á efnainnihaldi djúpvökva er val á hita sem er ótruflaður af þrýstifalli í aðfærsluæð (T^f á mynd 1). Fernskonar gögn eru hjálpleg til að átta sig á því hver þessi hiti er og um leið á hvaða dýpi borhola sker vatnsæðar sem veita vökva inn í holurnar þegar þær eru láttnar blása. Í fyrsta lagi eru það skoltöp í borun, í öðru lagi hitamælingar í upphitun eftir að köldu vatni var dælt í holuna í borlok, í þriðja lagi þrýstimælingar í upphitun til að greina vendipunkt fyrir þrýsting og í fjóra lagi notkun efnahitamæla sem byggja á efnagreiningum á vatns- og gufusýnum.

Skoltöp sem verða í borun þurfa ekki endilega að svara til æða sem veita vatni/gufu inn í holuna þegar hún er láttn blása. Köld vatnssúlan í holunni skapar yfirþrýsting sem getur leitt til skoltaps. Eins geta bormenn skráð skoltap þegar borstöng er bætt í og dæling á holuna því stöðvuð um stutta stund. Slíkt skoltap gæti stafað af því að æðar ofar í holunni hafa opnast vegna þess að dæling var stöðvuð og borsvarf hætti að stífla þær en ekki vegna þess að holan hafi skorið æð í botni. Eins getur kæling á bergi við holuna opnað sprungur og orsakað þannig skoltap. Þá geta æðar ofar í holunni sem stífluðust af svarfi opnast á ný ef þrýstingur í holunni lækkar þar sem æðin er. Talið er mikilvægt að skrá öll skoltöp en samtúlka þau við aðrar borholumælingar til að leiða í ljós hvort þau svari öll til veituæða (productive aquifers).

Venja er að dæla köldu vatni á borholur í borlok til að hreinsa úr þeim borsvarf. Mikilvægt er að mæla hita oft í holunni meðan hún er að hitna upp til þess að greina hvar kalt vatn hefur tapast út í æðar eða hvar heitt vatn er gufa streyma úr æðum inn í holuna og gegnum hana eða milli æða. Innstreymi skilar sér sem hitatoppur í upphitun en tap á köldu vatni út í æð sem kælitoppur. Túlkun hitamælinga geta oft verið erfiðar og háðar óvissu í þeim skilningi að stundum á túlka hitamælinguna á fleiri en einn veg. Því getur verið æskilegt að gera fleiri borholumælingar til að styrkja túlkun eins og mælingar á rennsli (spinner survey). Vendipunktur þrýstings sýnir þá æð sem er í tengslum við æð sem ræður þrýstingi í holunni. Samanburður niðurstaða efnahitamæla sem gefa vísbendingu um hita í þeim æðum sem veita inn í holuna í blæstri. Með samanburði við hitamælingar í holu eftir að hitinn hefur náð jafnvægi gefa sterka vísbendingu um hvaða æð (æðar) veita aðallega vökva inn í holuna. Mikilvægt er að tengja virkar æðar við jarðlög. Vitneskja um dýpi vatnsæða og þau jarðlög á sem þær tengjast tilteknu borholusvæði skipa miklu fyrir ákvörðun í dýpi borhola á sama svæði.

Útreikningar á efnainnihaldi djúpvökva

Útreikningar á efnainnihaldi djúpvökva fyrir hávermisholur byggja í grunninn á þrennskona varðveislujöfnum, varðveislu á vökvaflæði, á vermi og á styrk efna í vökvanum (Tafla 1). Þessar varðveislujöfnur einfaldast eftir því hvort kerfið æð-borhola sé einangrað og eftir því hvaða ferli valda mun á upphaflegu vermi djúpvökva og holurennis. Lausn þessara jafna fyrir mismunandi líkön eru má fá í ritverkum eftir Stefán Arnórsson o.fl. (2007, 2010)

Tafla 1. Almennar varðveislujöfnur fyrir massa, vermi og efni í vatni og gufu.

Varðveisla massa	$M^{d,t} = M^{f,t} + M^{e,v} - M^{e,l}$
Varðveisla vermis	$h^{d,t} \cdot M^{d,t} = h^{f,t} \cdot M^{f,t} + h^{e,v} \cdot M^{e,v} - h^{e,l} \cdot M^{e,l} + Q^e$
Varðveisla efna	$m_i^{d,t} \cdot M^{d,t} = m_i^{f,t} \cdot M^{f,t} + m_i^{e,v} \cdot M^{e,v} - m_i^{e,l} \cdot M^{e,l}$

M táknar massaflæði (kg/sek), h vermi (kJ/kg) og m_i styrk efnis i (mól/kg). Merking uppskrifuðu tákna er þessi: d = holurenni, t = heild, f = upphaflegan vökva í æð,

Tilvitnanir

Cyrus W. Karingithi, Stefán Arnórsson og Karl Grönvold (2010) Hydrothermal minerals buffers controlling reactive gas concentrations in the Olkaria geothermal field, Kenya. *J. Volc Geothermal Res.* **196**, 57-76.

Stefán Arnórsson, Jón Örn Bjarnason og Andri Stefánsson (2007) Fluid-fluid interaction in geothermal systems. In: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (eds. A. Liebscher and C.A. Heinrich), **65**, 259-312.

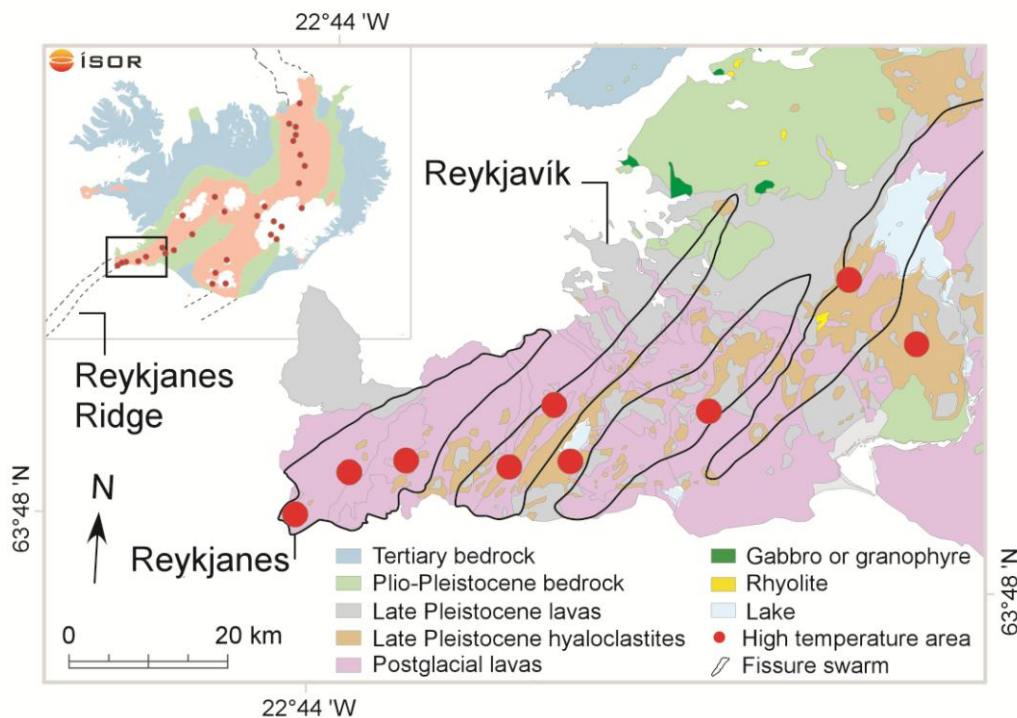
Stefán Arnórsson, Erlindo Angcoy, Jón Örn Bjarnason, Niels Giroud, Ingvi Gunnarsson, Hanna Kaasalainen, Cyrus Karingithi og Andri Stefánsson (2010) Gas chemistry of volcanic geothermal systems. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 1428.

Efnasamsetning jarðsjávarins á Reykjanesi

Vigdís Harðardóttir

Íslenskar orkurannsóknir, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

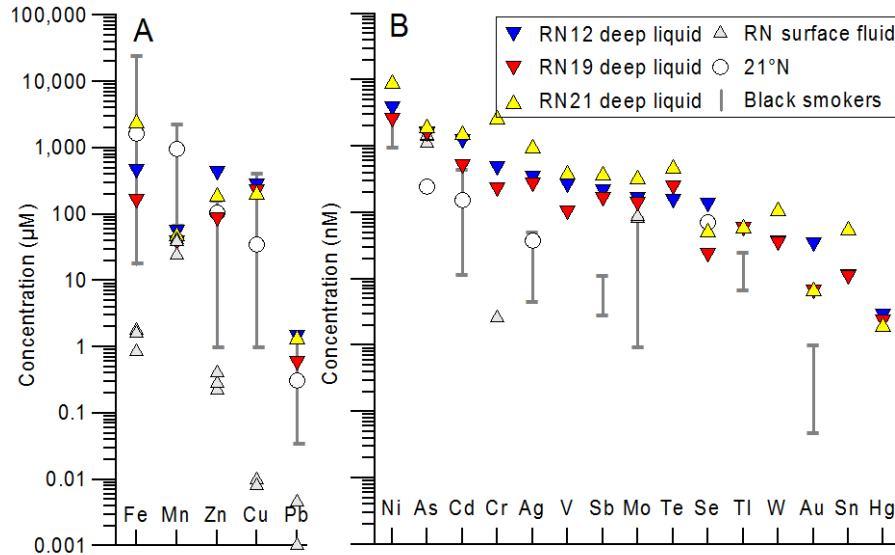
Jarðhitakerfið á Reykjanes (mynd 1) er eina rek-jarðhitakerfið á Atlantshafshryggnum sem er ofansjávar og því gefa rannsóknir á þessu jarðhitakerfi upplýsingar um sambærileg svæði sem finnast á sjávarbotni og nefnd hafa verið „svartir hverir“ (Black smokers). Djúpvökvinn (jarðhitavökvinn) á Reykjanesi er að uppruna sjór sem hefur hvarfast við háan hita við umliggjandi basalt. Þetta hefur leitt til þess að djúpvökvinn, sem er um 270 til 320°C heitur, inniheldur mun meira af uppleystum kísli (SiO_2) en umliggjandi sjór (~120 sinnum meiri styrkur) og kalíum (K) og kalsíum (Ca) eru í um það bil 4 sinnum meiri styrk. Aftur á móti er djúpvökvinn með mun minna af magnesíum (Mg; um 1300 sinnum minna) og súlfati (SO_4 ; um 120 til 2500 sinnum minna) heldur en sjór vegna útfellingar á steindum sem innihalda þessi efni.



Mynd 1. Staðsetning Reykjanes jarðhitasvæðisins, syðst á Reykjanes skaganum (Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson, 2004). Á minni myndinni má sjá hvar Reykjanes hryggurinn (hluti af Atlantshafs hryggnum) kemur að landi. Reykjanes jarðhitakerfið er eina sjávarkerfið á landinu.

Vorið 2007 voru tekin þrjú sýni úr jafn mörgum borholum á Reykjanesi á um 1350 og 1500 m dýpi. Á þessu mikla dýpi er þrýstingur það hár að jarðsjórinn er ekki byrjaður að sjóða þó svo að hitinn sé um 300°C. Við þessar aðstæður hafa litlar eða engar útfellingar orðið og efnasamsetningin sýnir því raunverulegt efnainnihald djúpvökvans. Við efnagreiningar á jarðhitavökvunum kom í ljós að járn (Fe) mældist á bilinu 9–140 mg/kg (ppm), kopar (Cu) um 15 mg/kg, sink (Zn) á bilinu 5–27 mg/kg, blý (Pb) á bilinu 120–290 µg/kg (ppb), gull (Au) á

bilinu 1–6 $\mu\text{g/kg}$ og silfur (Ag) 28–107 $\mu\text{g/kg}$. Þetta er allnokkru meira heldur en hefur verið mælt og reiknað út að sé í „svörtum hverum“ á sjávarbotni með svipað hitastig. Helst líkist djúpvökvinn á Reykjanesi „svörtum hverum“ sem eru um 407°C heitir (mynd 2.).



Mynd 2. Styrkur málma og snefilefna í djúpvökvum úr holum RN-12 (blár), RN-19 (rauður) og RN-21 (gulur). Ófylltu ólituðu þríhyrningarnir eru frá yfirborðsvökvum úr sömu holum. Gráu lóðréttu línurnar sína spönn svartra hvera á sjávarbotni. Til samanburðar er styrkur málma og snefilefna úr svarta hvernum 21°N (hvítur, Vigdís Harðardóttir og fl., 2009).

Heimildir

Vigdís Harðardóttir, Brown KL, Fridriksson Th, Hedenquist JW, Hannington MD, and Thorhallsson S., 2009. Metals in deep liquid of the Reykjanes geothermal system, southwest Iceland: Implications for the composition of seafloor black smoker fluids. *Geology*, v. 37, no.12, p. 1103-1106.

Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson, 2004. Jarðfræðikort af Íslandi. Reykjavík, Íslenskar Orkurannsóknir og Orkustofnun, 1:500,000.

Ritskrár Halldórs Ármannssonar og Stefáns Arnórssonar

Ritskrá Halldórs Ármannssonar

- Ármannsson, H. 2012: Geochemical Aspects of Geothermal Utilization. In Sayigh, A. (ed.) *Comprehensive Renewable Energy*, Vol.7, 95-168. Oxford: Elsevier.
- Flóvenz, Ó.G., Hersir, G.P., Sæmundsson, K., Ármannsson, H. and Friðriksson, Þ. 2012: Geothermal Energy Exploration Techniques. In Sayigh, A. (ed.) *Comprehensive Renewable Energy*, Vol.7, 51-95. Oxford: Elsevier.
- Kristmannsdóttir, H., Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á.E. and Ármannsson, H. 2010. Geochemistry and classification of cold groundwater in Iceland. *Water-Rock Interaction* (Ed. P. Birkle and I.S. Torres-Alvarado), 207-210.
- Ármannsson, H. and Hardardóttir, V. 2010. Geochemical patterns of scale deposition in saline high temperature geothermal systems. *Water-Rock Interaction* (Ed. P. Birkle and I.S. Torres-Alvarado), 133-136.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Arnórsson, S., Heinemeier, J., Ármannsson, H. and Kristmannsdóttir, H. 2010. Dissolved inorganic carbon isotopes in natural waters in Iceland. *Water-Rock Interaction* (Ed. P. Birkle and I.S. Torres-Alvarado), 99-102.
- Ingason, K., Albertsson, A., Pálsson, B., Ballzus, C., Ármannsson, H., Matthíasson, J., Thórhallsson, S. and Gunnarsson, T. 2010. Iceland Deep Drilling Project (IDDP) – Fluid Handling and Evaluation. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 5 pp.
- Christenson, B. W., Ármannsson, H., Kennedy, B. M. and van Soest, T. J. 2010. Geochemical Reconnaissance of Fluids from the Krafla and Nesjavellir Thermal Areas, Iceland: Baseline Studies in Support of the IDDP. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 7 pp.
- Ármannsson, H. 2010. IDDP. The Chemistry of the Krafla Geothermal System in Relation to the IDDP Well. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 5 pp.
- Einarsson, K., Pálsson, B., Gudmundsson, Á., Hólmgeirsson, S., Ingason, K., Matthíasson, J., Hauksson, T. and Ármannsson, H. 2010. Acid Wells in the Krafla Geothermal Field. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 6 pp.
- Kristmannsdóttir, H., Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á. and Ármannsson, H. 2010. Chemical Variety of Water in Icelandic Heating Systems. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 9 pp.
- Gudmundsson, Á., Mortensen, A.K., Hjartarson, A., Karlsdóttir, R. and Ármannsson, H. 2010. Exploration and Utilization of the Námafjall High Temperature Area in N-Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 9 pp.
- Dereinda, F.H. and Ármannsson, H. 2010. CO₂ Emissions from the Krafla Geothermal Area, Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 7 pp.
- Hjartarson, Á. and Ármannsson, H. 2010. Geothermal research in Greenland. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (Ed. R Horne), 8 pp.
- Ólafsdóttir, S.M., Gardarsson, S.M. and Ármannsson, H. 2010. Concentration of hydrogen sulphide from geothermal power plants in the vicinity of Reykjavík City, Iceland.

- Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010 (Ed. R. Horne), 8pp.
- Ármannsson, H.: The Theistareykir geothermal system, North East Iceland. Case history. Short Course III on Surface Exploration for Geothermal Resources, Naivasha, Kenya, 24th October - 17th November, 2008. 12 pp.
- Ármannsson, H. Steingrímsson, B., and Gudmundsson, Á.: Planning of geothermal projects in Iceland. Short Course III on Surface Exploration for Geothermal Resources, Naivasha, Kenya, 24th October - 17th November, 2008. 12 pp.
- Fridleifsson, G.Ó., Ármannsson, H., Árnason, K., Gudmundsson, Á. And Sæmundsson, K. 2008: *Re-evaluation of the first IDDP drillsite*. IDDP report, 13 pp.
- Fridriksson, Th. and Ármannsson, H. 2007. Application of geochemistry in geothermal resource assessment. Short Course on Geothermal Development in Central America - Resource Assessment and Environmental Management, 11 pp.
- Ármannsson, H. 2007. EIA - Example from Bjarnarflag in Iceland. Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources. UNU-GTP, KenGen, Lake Naivasha Simba Lodge, Kenya November 2-17, 10 pp.
- Ármannsson, H. and Ólafsson, M. 2007. Geothermal sampling and analysis. Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources. UNU-GTP, KenGen, Lake Naivasha Simba Lodge, Kenya November 2-17, 10 pp.
- Ármannsson, H. 2007. Application of geochemical methods in geothermal exploration. Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources. UNU-GTP, KenGen, Lake Naivasha Simba Lodge, Kenya November 2-17, 9 pp.
- Ármannsson, H., Fridriksson, Th., Wiese, F., Hernández, P. and Pérez, N. (2007). CO₂ budget of the Krafla geothermal system, NE-Iceland. In *Water-Rock Interaction*, T.D. Bullen and Wang, Y. (Editors), 189-192.
- Ármannsson, H., Fridriksson, Th. and Wiese, F. (2006). The CO₂ budget of Icelandic high-temperature geothermal systems. In *Orkuthing 2006. Energy and society - Environmentally benign quality of life*. S. Ágústsson (Editor), 195-203.
- Kristmannsdóttir, H., Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Ármannsson, H. and Bogason, E. (2006). The project Icelandic hydrological resources. In *Orkuthing 2006. Energy and society - Environmentally benign quality of life*. S. Ágústsson (Editor), 195-203.
- Fridriksson, Th., Kristjánsson, B.R., Ármannsson, H., Margrétardóttir, E., Ólafsdóttir, S. and Chiodini, G. (2006). CO₂ emissions and heat flow through soil, fumaroles and steam heated mud pools at the Reykjanes geothermal area, SW Iceland. *Appl. Geochem.*, 21, 1551-1569
- Baba, A. and Ármannsson, H. (2006). Environmental impact of utilization of geothermal areas. *Energy Sources, Part B*, 1, 267-278.
- Hardardóttir, V., Ármannsson, H. and Thórhallsson, S. (2005). Characterization of sulfide-rich scales in brine at Reykjanes. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey. Horne, H., Okandan, E. (Editors), 8 pp.
- Kristmannsdóttir, H., Björnsson, A., Arnórsson, S., Ármannsson, H. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2005). The Reykholt and Húsafell geothermal fields in Borgarfjörður: a geochemical study. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey. Horne, H., Okandan, E. (Editors), 5 pp.
- Ármannsson, H. (2005). Monitoring the effect of geothermal effluent from the Krafla and Bjarnarflag power plants on groundwater in the lake Mývatn area, Iceland, with particular reference to natural tracers. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey. Horne, H., Okandan, E. (Editors), 8 pp.

- Ármannsson, H., Fridriksson, Th. and Kristjánsson, B.R. (2005). CO₂ emissions from geothermal power plants and natural geothermal activity in Iceland. *Geothermics*, 34, 286-296.
- Steingrímsson, B., Ármannsson, H. and Gudmundsson, Á. (2005). Phases of geothermal development in Iceland. Workshop for Decision Makers on Geothermal Projects and Management, UNU-GTP, KenGen, Naivasha, Kenya, 11 pp.
- Bahati, G., Pang, Z., Ármannsson, H., Isabirye, E. and Kato, V. (2005). Hydrology and reservoir characteristics of three geothermal systems in western Uganda. *Geothermics*, 34, 568-591.
- Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2004). Groundwater in the Lake Mývatn area, northern Iceland: Chemistry, origin and interaction. *Aquatic Ecology*, 38, 115-128.
- Ármannsson, H. (2004). Chemical aspects of exploration of the Theistareykir high-temperature geothermal area, N-E Iceland. In *Water-Rock Interaction*, R.B. Wanty and R.R. Seal II (Editors), Taylor and Francis Group, London, 63-67.
- Zhang, Z.S., Ármannsson, H. and Kristmannsdóttir, H. (2004). Modeling study of WRI in the Bakki low-temperature geothermal field, south-west Iceland. In *Water-Rock Interaction*, R.B. Wanty and R.R. Seal II (Editors), Taylor and Francis Group, London, 227-231.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Arnórsson, S.A., Heinemeier, J., Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2004). Isotopic characteristics of natural waters in Southern Lowlands of Iceland In *Water-Rock Interaction*, R.B. Wanty and R.R. Seal II (Editors), Taylor and Francis Group, London, 1401-1405.
- Ármannsson, H. and Fridriksson, Th. (2004). CO₂ emissions from geothermal areas (Abstract). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, A255.
- Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics* 32, 451-461.
- Ármannsson, H., Ólafsson, M., Harðardóttir, V. and Kristmannsdóttir, H. (2003). Mixing of Fluids from Different Sources in Low Temperature Geothermal Utilization. Proceedings of the International Symposium on Water Resources and the Urban Environment 1-10 November 2003, Wuhan, P.R. China, 1-4.
- Ármannsson, H. (2003). CO₂ Emission from Geothermal Plants. International Geothermal Conference. Multiple Integrated Uses of Geothermal Resources. Proceedings. Reykjavík 14th to 17th September 2003. Session #12, 56-62.
- Friðleifsson, G.Ó. , Ármannsson, H., Árnason, K., Bjarnason, I.Th. and Gíslason, G. Iceland (2003). Deep Drilling Project (IDDP): Drilling Targets for Supercritical Fluid. International Geothermal Conference. Multiple Integrated Uses of Geothermal Resources. Proceedings. Reykjavík 14th to 17th September 2003. Session #06, 8-14.
- Xilai, Zheng , Balke, K-D., Ármannsson, H., Hanxue, Qiu and Zhonglian, She (2002). A developed technique for calculating the mass transfer between contaminated groundwater and porous media. *Environmental Geology*, 42, 982-988.
- Xilai, Zheng , Ármannsson, H., Yongle, Li and Hanxue, Qiu (2002). Chemical equilibria of thermal waters for the application of geothermometers from the Guanzhong basin, China. *J. Volc. Geother. Res.* 113, 119-127.
- Ármannsson, H. (2002). Green accounting for geothermal energy – Comparison of gas emissions with other energy sources. Samorka Symposium. Akureyri, Iceland, May 30-31 2002. Samorka, Reykjavík, On CD, 9 pp (In Icelandic).
- Hauksdóttir, S., Jónasson, Th., Ólafsson, M., Axelsson, G., Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H. and Björnsson, G. (2001). Production monitoring of hitaveitas and energy companies (In Icelandic). In *Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making*, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 472-477.

- Harðardóttir, V., Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2001). Deposition connected with the utilization of geothermal sea water in wells 8 and 9 in Reykjanes. (In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 601-606.
- Axelsson, G., Guðmundsson, Á., Steingrímsson, B., Pálmason, G., Ármannsson, H., Tulinius, H., Flóvenz, Ó.G., Björnsson, S. and Stefánsson, V. (2001). On sustainable production of geothermal energy. (In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 478-484.
- Kristmannsdóttir, H., Thórhallsson, S., Ólafsson, M., Hauksdóttir, S. and Ármannsson, H. (2001). Magnesium silicate deposition during geothermal utilization in Iceland. (In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 404-407.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., Hauksdóttir, S., Axelsson, G., Ólafsson, M. and Guðmundsdóttir, H. (2001). Groundwater investigations in the Lake Mývatn area. (In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 553-559.
- Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2001). Environmental matters in connection with geothermal power plants. (In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 466-471.
- Ármannsson, H., Kristmannsdóttir, H. and Hallsdóttir B. (2001). Gas emissions from geothermal areas In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 324-330.
- Ármannsson, H. (2001). Experience of environmental impact assessment for geothermal projects (In Icelandic). In Orkuþing 2001. Energy culture in Iceland. Basis for policy making, M.J. Gunnarsdóttir (editor), 472-477.
- Harðardóttir, V., Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2001). Scale formation in wells RN-9 and RN-8 in the Reykjanes geothermal field, Iceland. In Water-Rock Interaction 2001, R. Cidu (editor). Svets & Zellinger, Lisse, 779-782.
- Ármannsson, H. (2001). Reaction of groundwater with rock from the Krafla area, N-E Iceland and volcanic gas. In Water-Rock Interaction 2001, R. Cidu (editor). Svets & Zellinger, Lisse, 779-782.
- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H., Hjartarson, H. & Ólafsson, M. (2000). Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland. Geothermics, 29, 525-538.
- Ármannsson, H., Kristmannsdóttir, H. & Ólafsson, M. (2000). Geothermal influence on groundwater in the Lake Mývatn area, North Iceland. Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 515-520
- Ármannsson, H., Kristmannsdóttir, H., Torfason, H. & Ólafsson, M. (2000). Natural changes in unexploited high-temperature geothermal areas in Iceland. Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 521-526.
- Sun Zhanxue & Ármannsson, H. (2000). Gas chemistry and subsurface temperature estimation in the Hveragerði high-temperature geothermal field, SW-Iceland. Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 2235-2240.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H. Árnason, K. (2000). An enforcement project on environmental impact of geothermal exploitation in Iceland. Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 633-638.
- Hauksdóttir, S., Kristmannsdóttir, H., Axelsson, G., Ármannsson, H., Bjarnason, H. & Ólafsson, M. (2000). The influence of effluent water discharged from the Námafjall geothermal field on local groundwater. Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 603-608.

- Friðleifsson, G.Ó. & Ármannsson, H. (1999) Silica sinters in Snæfellsnes and Hnappadalur, West Iceland. *Geochemistry of the Earth's Surface*, Ármannsson, H. (editor). Balkema, Rotterdam, 499-502.
- Kristmannsdóttir, H. & Ármannsson, H. (1999). Environmental studies of unexploited geothermal areas in Iceland. *Geother. Bull.*, 28, 25-28.
- Ármannsson, H., Ólafsson, M., Friðleifsson, G.Ó., Darling, W.G. & Laier, T. (1998). Organic gas in Öxarfjörður, Iceland. *Water-Rock Interaction*, Arehart, G.B & Hulston, J.R. (editors). Balkema, Rotterdam, 371-374.
- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H. & Hjartarson, H. (1997). Emission, dispersion and reaction of H₂S in steam from geothermal fields in Iceland. *Proc. NEDO International geothermal Symposium March 11-12 at Sendai, Japan*. NEDO, 261-268.
- Gíslason, S.R., Arnórsson, S. & Ármannsson, H. (1996). Chemical weathering of basalt as deduced from the composition of precipitation rivers and rocks in SW Iceland. *Am. J. Sci.*, 296, 837-907.
- Zhao Ping & Ármannsson, H. (1996). Gas geothermometry in selected Icelandic geothermal fields with comparative examples from Kenya. *Geothermics*, 25, 307-347.
- Kristmannsdóttir, H. & Ármannsson, H. (1996). Chemical monitoring of Icelandic geothermal fields. *Geothermics*, 25, 349-364.
- Ármannsson, H. & Einarsson, S. (1995). The gas in Lake Lagarfljót (In Icelandic), *Náttúrufræðingurinn*, 64, 265-280.
- Darling, W.G., Griesshaber, E., Andrews, J.N., Ármannsson, H & O'Nions, R.K. (1995). The origin of hydrothermal and other gases in the Kenya Rift Valley. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 2501-2512.
- Ármannsson, H & Gíslason, G. (1995). The chemistry of thermal springs in the Katwe-Kikorongo area, Uganda. *Water-Rock Interaction*, Kharaka, Y.K. & Chudaev, O.V. (editors). Balkema, Rotterdam, 371-374.
- Godfrey, B. & Ármannsson, H. (1995). The chemistry of waters in the Buranga and Kibiro geothermal fields, West Uganda. *Water-Rock Interaction*, Kharaka, Y.K. & Chudaev, O.V. (editors). Balkema, Rotterdam, 505-509.
- Kristmannsdóttir, H. & Ármannsson, H. (1995). Environmental impact of geothermal utilization in Iceland. *Proc. World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, Vol. 4*, 2731-2734.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., Axelsson, G., Ólafsson, M., Hákonarson, S. & Thórhallsson, S. (1995). Monitoring of Icelandic geothermal fields during production. *Proc. World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, Vol. 4*, 1813-1817.
- Eliasson, E.T., Ármannsson, H., Friðleifsson, I.B., Gunnarsdóttir, M.J., Björnsson, O., Thórhallsson, S. and Karlsson, Th. (1990). Space and district heating. Chapter 3 in Dickson, M.H. & Fanelli, M. (editors). *Geothermal Energy*, John Wiley and sons, Chicester, 73-107.
- Gíslason, S.R., Arnórsson, S. & Ármannsson, H. (1994). Present chemical weathering of basalt in Iceland. *Proc. Goldschmidt Conference, Edinburgh 1994*, 333-334.
- Ármannsson, H. (1994). Geochemical studies on three geothermal areas in West and Southwest Uganda. Final report UNDES D GSMD. Geothermal Exploration. UGA/92/002. Kampala, 85 pp.
- Ármannsson, H. (1993). Geochemical studies on three geothermal areas in West and Southwest Uganda. Preliminary Report UNDES D GSMD. Geothermal Exploration. UGA/92/002. Kampala, 66 pp.
- Tole, M.P., Ármannsson, H., Zhong-he, P. & Arnórsson, S. (1993). Fluid/mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry. *Geothermics*, 22, 17-37.

- Ármannsson, H. & Kristmannsdóttir, H. (1992). Geothermal environmental impact. *Geothermics*, 21, 869-880.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H. & Ólafsson, M. (1992). Chemical monitoring of Icelandic geothermal fields during production. Papers presented at the International Conference on Industrial Uses of Geothermal Energy, Reykjavík, Iceland 2-4. September 1992, Reykjavík, 8 pp.
- Ármannsson, H. & Gíslason, G. (1992). The occurrence of acidic fluids in the Leirbotnar field, Krafla, Iceland. *Water Rock Interaction, Kharaka and Maest (eds.)*. Balkema, Rotterdam, 1257-1260.
- Ármannsson, H., Ólafsson, M. & Einarsson, S. (1992). Hydrocarbons in some natural gas emissions in Iceland. 20. Nordiska Geologiska vintermötet. Reykjavík 1992. Abstracts (eds. Geirsdóttir, Á., Norðdahl, H. & Helgadóttir, G.), Reykjavík, 15.
- Elíasson, E.T., Ármannsson, H., Friðleifsson, I.B., Gunnarsdóttir, M.J., Björnsson, O., Thórhallsson, S. and Karlsson, Th. (1990). Space and district heating. Chapter 4.2. in *Small Geothermal Resources. A Guide to Development and Utilization*, Dickson, M.H. and Fanelli, M. (editors). UNITAR/UNDP CENTRE ON SMALL ENERGY RESOURCES, Rome, 101-128.
- Ármannsson, H. (1991). The enviromental effects of geothermal energy (In Icelandic). In *Orkuþing 91*, Smárason, Ó.B. (editor), 264-278.
- Gíslason, S.R., Arnórsson, S. & Ármannsson, H. (1990). Chemical denudation rates in SW. Iceland, *Chem. Geol.*, 84, 64-67.
- Darling, W.G., Allen, D.J. & Ármannsson, H. (1990). Indirect detection of subsurface outflow from a Rift Valley Lake., *J. Hydrol.*, 113, 297-305.
- Pang, Z. & Ármannsson, H. (1989). Modeling chemical equilibrium in hydrothermal systems. *Water-Rock Interaction*, Miles D. (editor). Balkema, Rotterdam, 541-544.
- Ármannsson, H. (1989). Surface geochemical studies of geothermal areas without springs. *Water-Rock Interaction*, Miles D. (editor). Balkema, Rotterdam, 33-36
- Darling, W.G. & Ármannsson, H. (1989). Stable isotopic aspects of fluid flow in the Krafla, Námafjall and Theistareykir geothermal systems of Northeast Iceland, *Chem. Geol.*, 76, 175-196.
- Ármannsson, H., Benjamínsson, J. & Jeffrey, A.W.A. (1989). Gas changes in the Krafla geothermal system, Iceland, *Chem. Geol.*, 76, 175-196.
- Truesdell, A. H., Haizlip, J.R., Ármannsson, H. & D'Amore, F. (1989). Origin and transport of chloride in superheated geothermal steam. *Geothermics*, 18, 295-304.
- Ármannsson, H. (1989). Predicting calcite deposition in Krafla boreholes. *Geothermics*, 18, 25-32.
- Ármannsson, H. (1988). The development of some geothermal fields in Kenya. *Proc. Int. Conf. on Energy for Africa*, Santa Clara, Calif. USA, 10 pp.
- Ármannsson, H., Guðmundsson, Á. & Steingrímsson, B.S. (1987). Exploration and development of the Krafla geothermal area. *Jökull* 37, 13-30.
- Ármannsson, H. (1987). Studies on the geochemistry of steam in the Suswa and Longonot areas and water in the Lake Magadi, Kedong Valley and Lake Turkana areas, Rift Valley, Kenya. - *Exploration for Geothermal Energy KEN/82/002. Final Technical Report UN/DTCD, Nairobi*, 54 pp.
- Ármannsson, H. (1987). On analytical chemistry work performed during the execution of the UN/DTCD project, KEN/82/002, *Exploration for Geothermal Energy. Exploration for Geothermal Energy KEN/82/002. Technical Report. UN/DTCD, Nairobi*, 37 pp.
- Ármannsson, H. (1987). Geochemistry of steam in the Suswa and Longonot geothermal areas. *Exploration for Geothermal Energy KEN/82/002. Technical Report. UN/DTCD, Nairobi*, 57 pp.

- Ármannsson, H. & Benjamínsson, J. (1986). Changes of gas concentrations in Krafla geothermal fluids, 5th Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Reykjavík, Iceland, 13-16.
- Darling, W.G. & Ármannsson, H. (1986). The behaviour of H and O stable isotopes in the Krafla geothermal flow system. 5th Int. Symp. On Water-Rock Interaction, Reykjavík, Iceland, 155-158.
- Jeffrey, A.W., Kaplan, I.R., Poreda, R.J., Craig, H., Ármannsson, H. & Arnórsson, S. (1986). Stable isotope geochemistry of geothermal and sedimentary gases. 5th Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Reykjavík, Iceland, 290-293.
- Ármannsson, H., Gíslason, G. & Torfason, H. (1986). Surface exploration of the Theistareykir high-temperature geothermal area, Iceland, with special reference to the application of geochemical methods, *Appl. Geochem.*, 1, 47-64.
- Thórhallsson, S., Ármannsson, H. & Hauksson, T. (1985). Milos geothermal development. Milos M-2. Production test - December 1984. Consultant's report. Public Power Corporation, Athens, Greece, Orkustofnun, Vírkir, Reykjavík, Iceland, 93 p.
- Ármannsson, H., Burton, J.D., Jones, G.B. & Knap, A.H. (1985). Trace metals and hydrocarbons in sediments from the Southampton Water region, with particular reference to the influence of oil refinery effluent. *Mar. Env. Res.*, 15, 31-44.
- Ármannsson, H. & Gíslason, G. (1983). Geothermal resources of Burundi. Report on a reconnaissance mission 1982.08.30 - 09.13. Orkustofnun NEA, Reykjavík, Iceland. Report No. OS83025/JHD-06, 102 pp.
- Ármannsson, H. (1983). An improved model of the flow in the Krafla geothermal system. 4th Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Misasa, Japan, 32-35.
- Hooker, P.J., Condomines, M., O'Nions, R.K., Oxburgh, E.R., Ármannsson, H. & Grönvold, K. (1982). Helium and other isotopic variations in the Krafla rifting zone, Iceland. *EOS*, 63, 457.
- Ármannsson, H., Gíslason, G. & Hauksson, T. (1982). Magmatic gases in well fluids aid the mapping of the flow pattern in a geothermal system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 167-177.
- Ármannsson, H. (1981). Analysis of mercury in geothermal fluids. Proc. 8th Nordic Trace Element and Microchemistry Conference, Sandefjord, Norway, 10.
- Ármannsson, H. & Ovenden, P.J. (1980). The use of dithizone extraction and atomic absorption spectrometry for the determination of silver and bismuth in rocks and sediments and of a demountable hollow cathode lamp for the determination of bismuth and indium. *J. Env. Anal. Chem.*, 8, 127-136.
- Ármannsson, H., Gíslason, G. & Hauksson, T. (1980). Magmatic gases in well fluids aid the mapping of the flow pattern in a geothermal system. Proc. 3rd Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Edmonton, Canada, 190-191.
- Kidd, R.B. & Ármannsson, H. (1979). Manganese and iron micronodules from a volcanic seamount in the Tyrrhenian Sea. *J. Geol. Soc. London*, 136, 71-76.
- Ármannsson, H. (1979). Dithizone extraction and flame atomic absorption spectrometry for the determination of cadmium, zinc, lead, copper, nickel, cobalt and silver in sea water and biological tissues. *Anal. Chim. Acta*, 110, 21-28.
- Ármannsson, H. (1979). Matrix interference and reagent contamination problems in atomic absorption spectrometry determination of trace metals in environmental matrices. Proc. 7th Nordic Trace Element Conference, Vejle, Denmark.
- Ármannsson, H. (1979). Analytical geochemical studies on cadmium and some other trace metals in estuarine and coastal environments. Ph. D. thesis, the University, Southampton, UK, 241 pp.

- Ármannsson, H. (1977). The use of dithizone extraction and flame atomic absorption spectrometry for the determination of cadmium, zinc, copper, nickel and cobalt in rocks and sediments. *Anal. Chim. Acta*, 88, 89-95.
- Ármannsson, H. & Magnússon, H.F. (1975). Determination of calcium in cements by titration with EGTA. *Anal Chim. Acta*, 74, 208-211.

Ritskrá Stefáns Arnórssonar

Bækur

Arnórsson, S., D'Amore, F. and Gerardo-Abaya, J. (2000) Isotopic and geochemical techniques in geothermal exploration, development and use: Sampling methods, data handling, interpretation. International Atomic Energy Agency Publication (ed. S. Arnórsson), 351 p.

Bókarkafar

Arnórsson, S. (2008) Cooperation between the United Nations University Geothermal Training Programme and the University of Iceland. Minnenum Workshop of the UNU-GTP, 26-27 August, 2008.

Arnórsson, S., Stefánsson, A. and Bjarnason, J.Ö. (2007) Fluid-fluid interaction in geothermal systems. In: Reviews in Mineralogy and Geochemistry (eds. A. Liebscher and C.A. Heinrich), 65, 259-312.

Arnórsson, S. (2004) Environmental impact of geothermal energy utilization. In: *Energy, Waste and the Environment: A geochemical perspective*. Geological Society of London, Special Publication 236, 297-336.

Arnórsson, S. (2001) Chemistry of geothermal waters and hydrothermal alteration. In: *The Oxford Companion to The Earth*. Oxford University Press, 112-113.

Arnórsson, S. (2001) Geothermal energy. In: *The Oxford Companion to The Earth*. Oxford University Press, 437-440.

Arnórsson, S. (2000) Exploitation of geothermal resources. In: *Encyclopedia on volcanoes*, chapter 76, 1243-1257.

Geothermal geochemistry. Historical overview, present status, future outlook. *National Energy Authority* (Orkustofnun).

Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Arnórsson, S. and Heinemeier, J. (1999) Isotopic studies of natural waters in the Skagafjörður region, N-Iceland, deuterium excess and ^{14}C age of groundwater. *International Atomic Energy Agency*, IAEA-SM-361/22.

Arnórsson, S. (1995d) The use of chemical geothermometers. In: *Eyjar í eldhafi*, Gott mál, Reykjavík, 241-267. (In Icelandic).

Arnórsson, S. (1995c) Silica in geothermal waters: Conditions for its deposition and methods to prevent it. *International Geothermal Association*, Auckland, New Zealand, 95-111 (ISBN 0-473-03139-6).

Arnórsson, S. (1995b) Calcium carbonate deposition from geothermal fluids: Causes, operational problems and their solution. *International Geothermal Association*, Auckland, New Zealand, 79-94 (ISBN 0-473-03139-6).

Arnórsson, S. (1995a) Mineral saturation in geothermal fluids. *International Geothermal Association*, Auckland, New Zealand, 65-77 (ISBN 0-473-03139-6).

Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1995) Processes controlling the chemical composition of natural waters in the Hreppar-Land area in southern Iceland. *International Atomic Energy Agency*, IAEA TEC-DOC-788, 21-43.

Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á.E. and Andrésdóttir, A. (1995) Processes influencing D , ^{18}O , B and Cl distribution in cold and thermal waters in the NW-Peninsula and in the Southern Lowlands, Iceland. *International Atomic Energy Agency*, IAEA TEC-DOC-788, 45-61.

- Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á.E. and Andréðdóttir, A. (1993) The distribution of Cl, B, δD and $\delta^{18}O$ in natural waters in the Southern Lowlands of Iceland. *Geofluids '93. Contribuom to an International Conference on fluid evolution, migration and interaction in rocks*. British Gas, 313-318.
- Arnórsson, S., Björnsson, S. Jóhannesson, H. and Gunnlaugsson, E. (1992) The production characteristics of the Reykjavík District Heating Service low-temperature geothermal systems. *Árbók Verkfræðingafélags Íslands 1991/1992*, 344-366. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1992) On geoscientific research at Icelandic research institutions. *Societas Scientiarum Islandica*, Conference Proceedings 3, 155-179. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1991) Geochemistry and geothermal resources in Iceland. In: *Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (co-ordinator F. D'Amore), UNITAR publication, Rome, 145-196.
- Arnórsson, S. (1990) Gas chemistry of geothermal systems. In: *Geochemistry of gaseous elements and compounds* (ed. S.S. Augustithis). Theophrastus Publications Athens, 187-222.
- Gíslason, S.R. and Arnórsson, S. (1990) Saturation state of natural waters in Iceland relative to primary and secondary minerals in basalt. In: *Fluid-Mineral Interactions: A Tribute to H.P. Eugster*. (eds. R.J. Spencer og I-Ming Chou. The Geochemical Society, Special Publication No. 2, 373-393.
- Gíslason, S.R. and Arnórsson, S. (1990) River water chemistry in Iceland and the rate of chemical denudation. In: *Vatnid og landid*, National Energy Authority, Reykjavík, 207-218 (In Icelandic).
- Steinþórsson, S., Óskarsson, N., Arnórsson, S. and Gunnlaugsson, E. (1986) Metasomatism in Iceland: Hydrothermal alteration and remelting of oceanic crust. *NATO ASI Chemical Transport in Metasomatic Processes*, 355-387.
- Arnórsson, S. (1982) Carbon dioxide waters. In: *Eldur í nordri*. Sögufélagid, Reykjavík. 401-407 (In Icelandic).
- Pálmason, G., Arnórsson, S., Fridleifsson, I.B., Kristmannsdóttir, H., Saemundsson, K., Stefánsson, V., Steingrímsson, B., Tómasson, J. and Kristjánsson, L. (1979) The Icelandic crust: evidence from drillhole data on structure and processes. *Ewing Series AGU*, 2, 43-65.
- Arnórsson, S. (1974) The composition of thermal fluids in Iceland and geological features related to the thermal activity. In: *Geodynamics of Iceland and the North-Atlantic area* (ed. Kristjánsson), D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 307-323.

Greinar í tímaritum

- Olsen, N.J., Bird, D.K. and Arnórsson, S. (2012) Redistribution of arsenic in high-temperature hydrothermal systems in Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, in preparation.
- Pope, E.C., Bird, D.K. and Arnórsson, S. (2012) Stable isotopes as a tracer of rock-fluid interaction in Iceland geothermal systems. *Geothermics*, in press.
- Pope, E.C., Bird, D.K., Arnórsson, S. and Giroud, N. (2012) Hydrogeologic evolution of the Krafla geothermal system, Northeast Iceland, in press.
- Pope, E.C., Bird, D.K. and Arnórsson, S. (2012) Evolution of low- ^{18}O Icelandic Crust: Perspectives from a subsurface rhyolite magma in Krafla central volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press.
- Arnórsson, S. (2012) Eðli og endurnýjanleiki jarðvarmakerfa (The nature and renewability of geothermal systems). *Náttúrufræðingurinn*, **82**, 49-72 (In Icelandic with an English summary).

- Stefánsson, A., Arnórsson, S., Gunnarsson, I., Kaasalainen, H. and Gunnlaugsson, E., (2011) The geochemistry and sequestration of H₂S into the geothermal system at Hellisheidi, Iceland. *J. Volc. Geothermal Res.* **202**, 179-188.
- Karingithi, C.W., Arnórsson, S. and Grönvold, K. (2010) hydrothermal minerals buffers controlling reactive gas concentrations in the Olkaria geothermal field, Kenya. *J. Volc Geothermal Res.* **196**, 57-76.
- Pope, E.C., Bird, D.K., Arnórsson, S., Fridriksson, Th., Elders, W.A., Fridleifsson, G.Ó. (2009). Isotopic constraints on ice age fluids in active geothermal systems: Reykjanes, Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 4468-4488.
- Freedman, A.E.J., Bird, D.K., Arnórsson, S., Fridriksson, Th., Elders, W.A., Fridleifsson, G.Ó. (2009) Hydrothermal minerals record CO₂ partial pressures in the Reykjanes geothermal system, Iceland., *Amer. J. Sci.* **309**, 788-833.
- Processes controlling Sr in subsurface and ground waters of Tertiary tholeiitic flood basalts in Northern Iceland. Fridriksson, Th., Arnórsson, S., Bird, D.K., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 6727-6746.
- Arnórsson, S., Axelsson, G. and Saemundsson, K. (2008) Geothermal systems in Iceland. *Jökull*, **58**, 269-302.
- Arnórsson, S. and Óskarsson, N. (2007) Molybdenum and tungsten in volcanic rocks and in surface- and <100°C ground waters in Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 284-304.
- Arnórsson, S., Bjarnason, J.Ö., Giroud, N., Gunnarsson, I. and Stefánsson, A. (2006) Sampling and analysis of geothermal fluids. *Geofluids*, **6**, 1-14.
- Stefánsson, A., Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2005) Redox reactions and potentials in natural waters at disequilibrium. *Chem. Geol.*, **221**, 289-311.
- Gunnarsson, I. and Arnórsson, S. (2005) Impact of silica scaling on the efficiency of heat extraction from high-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, **34**, 320-329.
- Gunnarsson, I., Arnórsson, S. and Jakobsson, S. (2005) Precipitation of poorly crystalline antigorite under hydrothermal conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 2813-2828.
- Gudmundsson, B. Th. and Arnórsson, S. (2005) Secondary mineral-fluid equilibria in the Krafla and Námafjall geothermal systems, Iceland. *Applied Geochemistry*, **20**, 1607-1625.
- Arnórsson, S. (2003) Arsenic in surfac- and up to 90°C ground waters in a basalt area, N-Iceland. *Applied Geochemistry*, **18**, 1297-1312.
- Gudmundsson, B. Th and Arnórsson, S (2002) Geochemical monitoring of the Krafla and Námafjall geothermal areas, N-Iceland. *Geothermics*, **31**, 195-243.
- Stefánsson, A. and Arnórsson, S. (2002) Gas pressures and redox reactions in geothermal fluids in Iceland. *Chem. Geol.*, **190**, 251-271.
- Arnórsson, S., Gunnarsson, I., Stefánsson, A., Andrésdóttir, A. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2002) Major element chemistry of surface- and ground waters in basaltic terrain, N-Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 4015-4046.
- Fridriksson, Th., Neuhoﬀ, P.S., Arnórsson, S. and Bird, D. (2001) Geological constraints on the thermodynamic properties of stilbite-stellerite solid solution in low-grade metabasalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 3993-4008.
- Stefánsson, A., Gíslason, S.R. and Arnórsson, S. (2001) Dissolution of primary minerals in natural waters. II. Mineral saturation state. *Chem. Geol.*, **172**, 251-276.
- Aggarwal, J. K., Palmer, M. R., Bullen, T. D., Arnórsson, S. and Ragnarsdóttir, K. V. (2000) The boron isotope systematics of Icelandic geothermal waters: 1. Meteoric water charged systems. *Geochim. Cosmochim. Acta* **64**, 579-585.
- Gunnarsson, I. and Arnórsson, S. (2000) Amorphous silica solubility and the thermo dynamic properties of aqueous silica in the range 0-350°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* **64**, 2295-2307.

- Arnórsson, S. and Gíslason, S. R. (2000) Energy consumption and environmental impact. I. Energy resources. *Náttúrufræðingurinn*, **69**, 189-205.
- Stefánsson, A. and Arnórsson, S. (2000) Feldspar saturation state in natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta* **64**, 2567-2584.
- Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á. E. (2000) Age and chemical evolution of groundwaters in Skagafjörður, Iceland. *Journal of Geochemical Exploration* **69-70**, 459-463.
- Stefánsson, A., Arnórsson, S. and Gíslason, S. R. (2000) Dissolution of primary minerals of basalt in natural waters. II. Mineral saturation state. *Chem. Geol.*, **172**, 251-276.
- Neuhoff, P. S., Fridriksson, Th., Arnórsson, S. and Bird, D. K. (1999) Porosity evolution and mineral paragenesis during low-grade metamorphism of basaltic lavas at Teigarhorn, eastern Iceland. *Amer. J. Sci.*, **299**, 467-501.
- Arnórsson, S. and Stefánsson, A. (1999) Assessment of feldspar solubility constants in water in the range 0° to 350°C at vapour saturation pressures. *Amer. J. Sci.*, **299**, 173-209.
- Sveinbjörnsdóttir, Á. E. and Arnórsson, S. (1998) The origin of geothermal water in Iceland. II. Results from tracer studies. *Náttúrufræðingurinn*, **68**, 113-125. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á. E. (1998) The origin of geothermal water in Iceland. I. The application of tracers. *Náttúrufræðingurinn*, **68**, 55-67. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1996) Victor Moritz Goldschmidt and geochemistry. *Náttúrufræðingurinn*, **68**, 237-247. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1996) Research - continuous search for new knowledge. *Náttúrufræðingurinn*, **67**, 129-140. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1996) Water-rock interaction. II. The rock. *Náttúrufræðingurinn*, **66**, 183-202. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1996) Water-rock interaction. I. The water. *Náttúrufræðingurinn*, **66**, 73-87. (In Icelandic).
- Gíslason, S.R., Arnórsson, S. and Ármannsson, H. (1996) Chemical weathering of basalt as deduced from the composition of precipitation, rivers, and rocks in Iceland. *Am. J. Sci.*, **296**, 837-907.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Heinemeier, J. and Arnórsson, S. (1995) Origin of ¹⁴C in Icelandic groundwater. *Radiocarbon*, **37**, 551-565.
- Arnórsson, S. (1995b) Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models. II. Low-temperature areas. *Geothermics*, **24**, 603-629.
- Arnórsson, S. (1995a) Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models. I. High-temperature areas. *Geothermics*, **24**, 561-602.
- Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1995) Processes controlling the distribution of B and Cl in natural waters in Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 4125-4146.
- Arnórsson, S. (1993) Geothermal energy. *Náttúrufræðingurinn*, **63**, 39-55 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1993) Introduction to igneous petrology. *Náttúrufræðingurinn*, **62**, 181-205 (In Icelandic).
- Tole, M. P., Ármannsson, H., Zhong-he P. and Arnórsson, S. (1993) Fluid/mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry. *Geothermics*, **22**, 17-32.
- Gíslason, S.R. and Arnórsson, S. (1993) Dissolution of primary basaltic minerals in natural waters: Saturation state and kinetics. *Chem. Geol.*, **105**, 117-135.
- Poreda, R.J., Craig, H., Arnórsson, S. and Welhan, J.A. (1992) Helium isotopes in Icelandic geothermal systems: 1. ³He, gas chemistry, and ¹³C relations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 4221-4228.
- Poreda, R. J. and Arnórsson, S. (1992) Helium isotopes in Icelandic geothermal systems: 2. Helium-heat relationships. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 4229-4235.

- Arnórsson, S., Björnsson, S., Muna, Z.W. and Ojiambo, S.B. (1990) The use of gas chemistry to evaluate boiling processes and initial steam fractions in geothermal reservoirs with an example from the Olkaria field, Kenya. *Geothermics*, **19**, 497-514.
- Arnórsson, S. and Gíslason, S.R. (1990) On the origin of low-temperature geothermal activity in Iceland. *Náttúrufræðingurinn*, **60**, 39-56.
- Gíslason, S.R., Arnórsson, S. and Ármannsson, H. (1990) Chemical denudation rates in SW-Iceland. *Chem.Geol.*, **84**, 64-67.
- Arnórsson, S. (1989) Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters - theoretical considerations. *Geothermics*, **18**, 33-40.
- Gíslason, S.R. and Arnórsson, S., 1988, River water chemistry in Iceland and the rate of chemical denudation: *Náttúrufræðingurinn*, **58**, 183-197. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1987) Gas chemistry of the Krísuvík geothermal field, Iceland, with special reference to evaluation of steam condensation in upflow zones. *Jökull*, **37**, 31-47.
- Arnórsson, S., Cuff, K.E., Ívarsson, G. and Saemundsson, K. (1987) Geothermal activity in the Torfajökull field, South Iceland: Summary of geochemical studies. *Jökull*, **37**, 1-12.
- Arnórsson, S. and Ólafsson, G. (1986) A model for the Reykholtssdalur and the Upper-Árnessýsla geothermal systems with a discussion on some geological and geothermal processes in SW-Iceland. *Jökull*, **36**, 1-9.
- Arnórsson, S. (1986) The chemistry of gases associated with geothermal activity and volcanism in Iceland. *J. Geophys. Res.*, **91**, 12,261-12,268.
- Arnórsson, S. and Ívarsson, G. (1985) Molybdenum in Icelandic geothermal waters. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **90**, 179-189.
- Arnórsson, S. and Gunnlaugsson, E. (1985) New gas geothermometers for geothermal exploration - calibration and application. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 1307-1325.
- Arnórsson, S. (1985) The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *J. Volc. Geothermal Res.*, **23**, 299-335.
- Arnórsson, S. (1985) Gas pressures in geothermal systems. *Chem. Geol.*, **49**, 319 -328.
- Arnórsson, S. (1984) Germanium in Icelandic geothermal systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 2489-2502.
- Ragnarsdóttir, K.V., Walther, J.V. and Arnórsson, S. (1984) Description and interpretation of the composition of fluid and alteration mineralogy in the geothermal system at Svartsengi, Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 1535-1553.
- Arnórsson, S. and Barnes, I. (1983) The nature of carbon dioxide waters in Snaefellsnes, western Iceland. *Geothermics*, **12**, 171-176.
- Arnórsson, S. (1983) Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems - implications for chemical geothermometry investigations. *Geothermics*, **12**, 119-128.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H. (1983b) The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 567-577.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H. (1983a) The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 547-566.
- Gunnlaugsson, E. and Arnórsson, S. (1982) The chemistry of iron in geothermal systems in Iceland. *J. Volc. Geothermal Res.*, **14**, 281-299.
- Arnórsson, S., Sigurdsson, S. and Svavarsson, H. (1982) The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 1513-1532.
- Arnórsson, S. (1981) Mineral deposition from Icelandic geothermal waters, environmental and utilization problems. *Journal of Petroleum Technology*, **33**, 181-187.

- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H. (1980) Geothermal water composition and hydrothermal alteration. *Náttúrufræðingurinn*, **50**, 189-205 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1980) Geochemistry and geothermal investigations. *Náttúrufræðingurinn*, **50**, 206-226 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1980) Chemical geothermometers. *Náttúrufræðingurinn*, **50**, 121-138 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1979) Hydrochemistry in geothermal investigations in Iceland, techniques and application. *Nordic Hydrology*, **10**, 191-224.
- Arnórsson, S., Grönvold, K. and Sigurdsson, S. (1978) Aquifer chemistry of four high-temperature geothermal systems in Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 523-536.
- Arnórsson, S. (1978) Precipitation of calcite from flashed geothermal waters in Iceland. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**, 21-28.
- Arnórsson, S. (1978) Major element chemistry of the geothermal sea-water at Reykjanes and Svartsengi, Iceland. *Min. Mag.*, **42**, 209-220.
- Arnórsson, S. (1977) Changes in the chemistry of water and steam discharged from wells in the Námafjall geothermal field, Iceland, during the period 1970-1976. *Jökull*, **27**, 47-59.
- Arnórsson, S., Kononov, V.I. and Polak, B.G. (1975) Gases of Icelandic hydrothermae. *Bull. Volcanologique*, **39**, 3-14.
- Arnórsson, S. (1975) Geothermal energy in Iceland - utilization and environmental problems. *Naturopa*, **13**, 23-26.
- Arnórsson, S. (1975) Application of the silica geothermometer in low-temperature hydrothermal areas in Iceland. *Am. J. Sci.*, **275**, 763-784.
- Arnórsson, S. and Sigurdsson, S. (1974) The utility of water from the high-temperature areas in Iceland for space heating as determined by their chemical composition. *Geothermics*, **3**, 127-141.
- Arnórsson, S., Kononov, V.I. and Polak, L.K. (1974) General features and geochemical peculiarities of Icelandic hydrothermae. *Geochimya*, **12**, 1747-1766.
- Björnsson, S., Arnórsson, S. and Tómasson, J. (1972) Economic evaluation of the Reykjanes thermal brine area, Iceland. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geologists*, **56**, 2380-2391.
- Björnsson, S., Arnórsson, S. and Tómasson, J. (1970) Exploration of the Reykjanes thermal brine area. *Geothermics*, **2**, 1640-1650.
- Arnórsson, S. (1970) Geochemical studies of thermal waters in the Southern Lowlands of Iceland. *Geothermics*, **2**, 542-546.
- Arnórsson, S. (1970) Underground temperatures in hydrothermal areas in Iceland as deduced from the silica content of the thermal water. *Geothermics*, **2**, 535-541.
- Arnórsson, S. (1970) The distribution of some trace elements in thermal waters in Iceland. *Geothermics*, **2**, 547-552.
- Arnórsson, S., Hawkes, H.E. and Tooms, J.S. (1967) Present-day formation of pyrite in hot springs in Iceland. *Trans. Instn. Mining and Metallurgy*, **76**, B115-B117.

Langir útdrættir í ráðstefnuritum

- Arnórsson, S., Angcoy, E., Bjarnason, J.Ö., Giroud, N., Gunnarsson, I., Kaasalainen, H., Karingithi, C. and Stefánsson, A. (2010) Gas chemistry of volcanic geothermal systems. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 1428.
- Kristmannsdóttir, H., Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á.E., and Ármannsson, H. (2010) Chemical variety of water in Icelandic heating systems. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 1477.

- Angcoy, E. and Arnórsson, S. (2010) An experiment on monomeric and polymeric silica precipitation rates from supersaturated solutions. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 2710.
- Olsen, N.J., Bird, D.K., Arnórsson, S., Fridriksson, Th., Fridleifsson, G.Ó. and Elders, W.A. (2010). Iceland Deep Drilling Project (IDDP): Arsenic distribution and mobility in active and fossil geothermal systems in Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 3907.
- Freedman, A.J.E., Bird, D.K., Arnórsson, S., Fridriksson, Th., Elders, W.A. and Fridleifsson, G.Ó. (2010) Hydrothermal minerals record CO₂ partial pressures in the Reykjanes geothermal system, Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 3911.
- Pope, E.C., Bird, D.K., Arnórsson, S., Fridriksson, Th. Elders, W.A. and Fridleifsson, G.Ó. (2010) Iceland Deep Drilling Project (IDDP): Stable isotope evidence of fluid evolution in Icelandic geothermal systems. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*, paper 3912
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Arnórsson, S., Heinemann J., Ármannsson, H. and Kristmannsdóttir, H. (2010) Dissolved inorganic carbon isotopes in natural waters in Iceland. *Water-Rock Interaction* (Eds. P. Birkie and I.S. Torres-Alvarado) CRC Press, Taylor & Francis Group, 99-102.
- Kristmannsdóttir, H., Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2010) Geochemistry and classification of cold groundwater in Iceland. *Water-Rock Interaction* (Eds. P. Birkie and I.S. Torres-Alvarado) CRC Press, Taylor & Francis Group, 207-210.
- Arnórsson, S., Hurtig, N., Gysi, A.P., Bird, D.K. and O'Day, P.A. (2010) Carbon dioxide waters in Iceland: A natural analogue to CO₂ sequestration in basaltic aquifers. *Water-Rock Interaction* (Eds. P. Birkie and I.S. Torres-Alvarado) CRC Press, Taylor & Francis Group, 837-841.
- Arnórsson, S. (2008) Chemical thermodynamics of two-phase geothermal systems, ICPWS, Berlin, 8-11 September, 2008, 8 pp.
- Arnórsson, S. and Neuhoﬀ, P.S. (2007) Zeolite saturation in surface and <100°C ground waters in Tertiary basalt province, Iceland. In: *Water-Rock Interaction* (eds. T.D. Bullen and Y. Wang), 935-938. Taylor and Francis Group, London.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Arnórsson, S. and Heinemeier, J. (2007) Isotope heterogeneity of Pre-Holocene groundwaters in Iceland. In: *Water-Rock Interaction* (eds. T.D. Bullen and Y. Wang), 789-792. Taylor and Francis Group, London.
- Kristmannsdóttir, h., Björnsson, A., Arnórsson, S., Ármannsson, H. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2005) The Reykholt and húsafell geothermal fields in Borgarfjörður ö a geochemical study. *World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 1995*, paper 0891.
- Lagat, J., Arnórsson, S. and Franzson, H. (2005) Geology, hydrothermal alteration and fluid inclusion studies of Olkaria Domes geothermal field, Kenya. *World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 1995*, paper 0649.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Arnórsson, S. and Heinemeier, J. (2005) Isotopic characteristics ($\square^{18}\text{O}$, $\square\text{D}$, $\square^{13}\text{C}$, ^{14}C) of thermal waters in the mosfellssveit and Reykjavík low-temperature areas, Iceland. *World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 1995*, paper 0880.
- Giroud, N. and Arnórsson, S. (2005) Estimation of long-term CO₂ and H₂S release during operation of geothermal power plants. *World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 1995*, paper 0233.
- Gunnarsson, I. and Arnórsson, S. (2005) Treatment of geothermal waste water to prevent silica scaling. *World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005*. Paper 2025.

- Stefánsson, A. and Arnórsson, S. (2005) the geochemistry of As, Mo, Sb, and W in natural geothermal waters, Iceland. *World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005. Paper 0890.
- Arnórsson, S. and Stefánsson, A. (2005) Wet-Steam well discharges: II. Assessment of aquifer fluid compositions. *World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005. Paper 0896.
- Arnórsson, S. and Stefánsson, A. (2005) Wet-Steam well discharges: I. Sampling and calculation of total discharge compositions. *World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005, paper 0870.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Arnórsson, S., Heinemeier, J., Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H. (2004) Isotopic characteristics of natural waters in the Southern lowlands of Iceland, (eds. R.B. Wanty and R.R. Seal II),. New York, A.A.Balkema Publishers, 2, 1401-1405,
- Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2004) The source and relative age of non-thermal and up to 90°C ground waters in the Skagafjörður tholeiite flood basalt province, N-Iceland. *Water-Rock Interaction* (eds. R.B. Wanty and R.R. Seal II. New York, A.A.Balkema Publishers, 1, 69-73.
- Arnórsson, S., Stefánsson, A. and Gunnarsson, I. (2002) Primary basalt mineral saturation in surface- and up to 90°C ground waters in Skagafjörður, N-Iceland. *Geoscience Society of Iceland*, Fall meeting, Nesjavellir, 28-31.
- Arnórsson, S. and Lindvall, R. (2001) The distribution of arsenic, molybdenum and tungsten in natural waters in basaltic terrain, N-Iceland. *Water-Rock Interaction*, (ed. R. Cidu), 961-964, New York, A.A.Balkema Publishers.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E. and Arnórsson, S. (2001) Isotopic and chemical characteristics of old "ice-age" groundwater, North Iceland. *Water-Rock Interaction*, (ed. R. Cidu), 205-208, New York, A.A.Balkema Publishers.
- Gunnarsson, I., Arnórsson, S. and Jakobsson, S. (2001) Magnesium concentration control in groundwaters in Iceland. *Water-Rock Interaction*, (ed. R. Cidu), 205-208, , New York, A.A.Balkema Publishers.
- Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Arnórsson, S., Heinemeier, J. and Boaretto, E. (2000) ¹⁴C ages of groundwater in Iceland. *World Geothermal Congress 2000*, 1797-1802.
- Arnórsson, S. (2000) The quartz- and Na/K geothermometers. I. New thermodynamic calibration. *World Geothermal Congress 2000*, 929-934.
- Arnórsson, S. (2000) The quartz- and Na/K geothermometers. II. Results and application for monitoring studies. *World Geothermal Congress 2000*, 935-940.
- Arnórsson, S. (2000) Injection of waste geothermal fluids and scaling problems. *World Geothermal Congress 2000*, 3021-3026.
- Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (2000) Water-rock interaction and equilibration between geothermal waters and hydrothermal minerals. *World Geothermal Congress 2000*, 3021-3026.
- Andrésdóttir, A. and Arnórsson, S. (1999) Processes controlling Ca and Mg mobility of natural waters in Skagafjörður, N-Iceland. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 361-364.
- Fridriksson, Th., Neuhoﬀ, P.S., Bird, D.K. and Arnórsson, S. (1999) Clays and zeolites record alteration history at Teigarhorn, eastern Iceland. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 377-380.
- Arnórsson, S. (1999) The relative abundance of Al-species in natural waters in Iceland. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 421-424.
- Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1999) The dissociation constants of Al-hydroxy complexes at 0-350°C and P_{sat} *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 425-428.

- Gunnarsson, I. and Arnórsson, S. (1999) New data on the standard Gibbs energy of H_4SiO_4 and its effect on silicate solubility. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 449-452.
- Arnórsson, S. (1999) Progressive water-rock interaction and mineral-solution equilibria in groundwater systems. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 471-474
- Gudmundsson, B.Th. and Arnórsson, S. (1999) Mineral-fluid equilibria in the Krafla and Námafjall geothermal systems, Iceland. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 503-506.
- Stefánsdóttir, M.B., Gíslason, S.R. and Arnórsson, S. (1999) Flood from Grímsvötn subglacial caldera 1996: Composition of suspended matter. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 539-542.
- Stefánsson, A. and Arnórsson, S. (1999) Feldspar equilibria in geothermal waters. *Geochemistry of the Earth's Surface* (ed. H. Ármannsson), Rotterdam, Balkema, 543-546.
- Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1998) Processes controlling the chemistry of natural waters in the Skagafjörður area, N-Iceland. *Min. Mag.*, **62A**, 69-70.
- Gunnarsson, I. and Arnórsson, S. (1998) The solubility of amorphous silica and the thermodynamic properties of H_4SiO_4 in the range 0-350°C at P_{sat} . *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1998, 18-19. (In Icelandic).
- Andrésdóttir, A. and Arnórsson, S. (1998) The effect of CO_2 partial pressure on pH and elemental mobility in natural waters in Skagafjörður. *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1998, 3-4. (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Andrésdóttir, A., Gunnarsson, I. and Stefánsson, A. (1998) New calibration for the quartz and Na/K geothermometers - valid in the range 0-350°C. *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1998, 42-43. (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Fridriksson, Th. and Gunnarsson, I. (1998) Gas chemistry of the Krafla geothermal field, Iceland. In: *Proc. International Symposium on Water-Rock Interaction*, Auckland, New Zealand, 613-616.
- Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Arnórsson, S., Heinemeyer, J. and Boaretto, E. (1998) Geochemistry of natural waters in Skagafjörður, N. Iceland. II. Isotopes. In: *Proc. International Symposium on Water-Rock Interaction*, Auckland, New Zealand, 653-656.
- Andrésdóttir, A., Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á. E. (1998) Geochemistry of natural waters in Skagafjörður, N. Iceland. I. Chemistry. In: *Proc. International Symposium on Water-Rock Interaction*, Auckland, New Zealand, 605-608.
- Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Andrésdóttir, A., Gunnarsson, I. and Stefánsson, A. (1997) Geothermal activity in Skagafjörður. The age and origin of the water. *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1997, 44-47. (In Icelandic).
- Andrésdóttir, A., Arnórsson, S., Gíslason, S. R., Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Johnsen, S. J. Árnason, B. and Geirsson, K. (1997) Variations in the chemical and isotopic compositions in natural springs in SW-Iceland. *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1997, 4-5. (In Icelandic).
- Fridriksson, Th. and Arnórsson, S. (1996) The saturation state of natural waters in Iceland with respect to zeolites. *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1996, 59-61. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1995) Estimation of initial steam fraction in boiling geothermal reservoirs. *World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 1653-1657.
- Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Johnsen, S.J. and Arnórsson, S. (1995) The use of stable isotopes of oxygen and hydrogen in geothermal studies in Iceland. *World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 1043-1048.

- Arnórsson, S., Gíslason, S.R. and Andrésdóttir, A. (1995) Processes influencing the pH of geothermal waters. *World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 957-962.
- Andrésdóttir, A. and Arnórsson, S. (1995) Studies of the chemical evolution of natural waters in the Hreppar-Land geothermal field, Iceland: An aid to geothermometry interpretation *World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 1001-1006.
- Geirsson, K. and Arnórsson, S. (1995) Conceptual model of the Hveragerdi geothermal reservoir based on geochemical data. *World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 1251-1256.
- Sanzhes, D. and Arnórsson, S. (1995) Application of Cl, B tracers and geoinicators to delineate some production characteristics of Mt. Labo geothermal system, Philippines. *World Geothermal Congress*, Florence, Italy, 1031-1035.
- Arnórsson, S. and Gíslason, S.R. (1994) CO₂ from magmatic sources in Iceland. *Min. Mag.*, **58A**, 27-28.
- Gíslason, S.R., Arnórsson, S. and Ármannsson, H. (1994) Present chemical weathering of basalt in Iceland. *Min. Mag.*, **58A**, 333-334.
- Arnórsson, S. (1994) Processes controlling the chemical composition of thermal and non-thermal waters. I. The source of the dissolved constituents and water-rock interaction. In: *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1994, 35-36 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1994) Processes controlling the chemical composition of thermal and non-thermal waters. II. Results from Hreppar-Land in S-Iceland. In: *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1994, 37-38 (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Andrésdóttir, A. and Gíslason, S.R. (1993) Chemical reactions in the upflow zones of geothermal systems. In: *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April 1993, 54-55 (In Icelandic).
- Gíslason, S. R., Arnórsson, S. and Ármannsson, H. (1993) Chemical weathering of basalt. In: *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland Annual Meeting*, April, 1993, 51-52 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1992) Steam quality in liquid dominated geothermal systems. In: *Proceedings of International Conference on Industrial Uses of Geothermal Energy*, Reykjavík, 2-4 Sept., 1992, 10 p.
- Magnúsdóttir, G.Th., Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1992) Chemical reactions in upflow zones of geothermal systems affecting subsurface temperature estimates by chemical geothermometry. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Water-Rock Interaction* (eds. Y. Kharaka and A. S. Maest), Balkema, Rotterdam, 2, 1459-1462.
- Arnórsson, S. (1992) Calcite deposition in geothermal wells caused by infiltrating seawater. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Water-Rock Interaction* (eds. Y. Kharaka and A. S. Maest), Balkema, Rotterdam, 2, 1389-1392.
- Arnórsson, S. (1991) Evaluation of natural discharge of CO₂ and H₂S from high-temperature geothermal fields in Iceland. In: *Proceedings of the Geoscience Society of Iceland: Conference on Geology and the Environment*, Reykjavík, April, 1991, 18-20 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1991) Study of the distribution of chlorine, boron and oxygen and hydrogen isotopes in natural waters in Iceland. IAEA-report on "Isotopes and geochemistry in geothermal exploration in Asia and the Far East, Africa and the Middle East", Beijing, 24.-27. Sept., 1991, 1-4.
- Arnórsson, S., Gíslason, S.R., Gestsdóttir, K. and Óskarsson, N. (1989) Chlorine and boron in natural waters in Iceland. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Water-Rock Interaction*, Malvern, 37-40.

- Gíslason, S.R. and Arnórsson, S. (1987) The chemistry of river water in Iceland and the rate of chemical denudation. In: *Proceedings of the Conference "Vatnid og landid"*, National Energy Authority, Reykjavík, 85-86 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1987) On the origin of low-temperature geothermal activity in Iceland. In: *Proceedings of the Conference "Vatnid og landid"*, National Energy Authority, Reykjavík, 95-97 (In Icelandic).
- Jeffrey, A.W.A., Kaplan, I.R., Poreda, R.J., Craig, H., Ármannsson, H. and Arnórsson, S. (1986) Stable isotope geochemistry of geothermal and sedimentary gases. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction*, Reykjavík, 290-293.
- Kaufmann, R.S. and Arnórsson, S. (1986) 37Cl/35Cl ratios in Icelandic geothermal waters. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction*, Reykjavík, 325-328.
- Arnórsson, S. and Gunnlaugsson, E. (1986) The use of well discharge chemistry to evaluate the characteristics of boiling geothermal reservoirs. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction*, Reykjavík, 17-20.
- Arnórsson, S. and Svavarsson, H. (1985) Application of chemical geothermometry to geothermal exploration and development. *Geothermal Resources Council Trans.*, **9**, 293-298.
- Svanbjörnsson, A., Matthíasson, J., Frímannsson, H., Arnórsson, S., Björnsson, S., Stefánsson, V. and Saemundsson, K. (1983) Overview of geothermal development at Olkaria. In: *Proceedings of the 9th Stanford Geothermal Engineering Workshop*, 65-72.
- Arnórsson, S. and Gunnlaugsson, E. (1983) Gas chemistry in geothermal systems. In: *Proceedings of the 9th Stanford Geothermal Engineering Workshop*, 231-237.
- Arnórsson, S. and Benjamínsson, J. (1980) The chemistry and origin of carbon dioxide waters in Iceland. In: *Proceedings of the Fourth International Symposium on Water-Rock Interaction*, Edmonton, 195-197.
- Thórhallsson, S., Ragnars, K., Arnórsson, S. and Kristmannsdóttir, H. (1975) Rapid scaling of silica in two district heating systems. In: *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Fransisco, 1445-1449.
- Stefánsson, V. and Arnórsson, S. (1975) A comparative study of hot-water chemistry and bedrock resistivity in the Southern Lowlands of Iceland. In: *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Fransisco, 1207-1216.
- Arnórsson, S., Björnsson, A., Gíslason, G. and Gudmundsson, G. (1975) Systematic exploration of the Krísuvík high-temperature area, Iceland. In: *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Fransisco, 853-864.
- Arnórsson, S., Ragnars, K., Benediktsson, S., Gíslason, G., Thórhallsson, S., Björnsson, S., Grönvold, K. and Líndal, B. (1975) Exploitation of saline high-temperature water for space heating. In: *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Fransisco, 2077-2082.
- Arnórsson, S., Jónsson, J. and Tómasson, J. (1968) General aspects of thermal activity in Iceland. In: *Proceedings of the 23rd International Geological Congress*, Prague, **18**, 77-86.

Óbirtar skýrslur

- Arnórsson, S., Brown, K.L., Roberson-Tait, A. and Thorhallsson, S. (2011) Report of the Geothermal Advisory Board to the Geothermal Development Company Limited (GDC), Nakuru, Kenya, 18 November, 2011, 44 pp.
- Arnórsson, S., Brown, K.L. and Ann Roberson-Tait (2011) Report of the Geothermal Advisory Board to the Geothermal Development Company Limited (GDC), Nakuru and Nairobi, Kenya with follow-on work in the home countries of the GAB members, Feb., 2011, 53 pp.
- Koenig, J., Arnórsson, S., de Jesus, A. and Thain, I. (2009) Observations regarding the planned optimization of the Greater Olkaria Geothermal Area. Report of the Board of Consultants to KenGen, 3-7 August, 2009, 41 pp.
- Koenig, J., Arnórsson, S., de Jesus, A. and Thain, I. (2008) Report on the Meeting of the Geothermal Board of Consultants. *The Kenya Electricity Generating Company Ltd.*, January 2000, 37 pp.
- Gunnarsson, I., Arnórsson, S. and Jakobsson, S. (2002) Magnesium-silicate scales in geothermal utilization. An experimental study. *Science Institute Report RH-06-02*, 15 p.
- Gunnarsson, I., Hauksson, T. and Arnórsson, S. (2002) The Nesjavellir Power Plant. Experimental study for preventing silica deposition from the waste water. *Science Institute Report RH-02-02*, 20 p.
- Arnórsson, S., Gunnarsson, I., Stefánsson, A., Andrésdóttir, A. and Sveinbjörnsdóttir, Á.E. (2001) Primary basalt mineral saturation in surface- and ground waters in the Skagafjörður, N-Iceland. *Science Institute Report RH-12-2001*
- Arnórsson, S. (2001) Installation of a vacuum line for a gas chromatograph with comments on analytical procedures. *International Atomic Energy Agency Report RLA/8/032 02 01*, 21 p.
- Arnórsson, S. and Thórhallsson, S. (2001) Fjölnotkun jarðhita á sjóðandi lághitasvæðum. *ORKUÞING 2001*, 343-349. (In Icelandic).
- Koenig, J. B., Arnórsson, S. Thain, I. and de Jesus, A. C. (2000) Report on the Second Meeting of the Second Geothermal Board of Consultants. *The Kenya Electricity Generating Company Ltd.*, January 2000, 44 pp.
- Arnórsson, S., Elíasson, J. and Gudmundsson, B. Th. (1999) 40 MW geothermal power plant in Bjarnarflag. Environmental assessment. *Science Institute Report RH 26-99*, 36 pp.
- Koenig, J. B., Arnórsson, S., de Jesus, A. C. and Thain, I. A. (1999) Report on the first meeting of the Second Geothermal Board of Consultants. *The Kenya Electricity Generating Company Ltd.*, 38 pp.
- Arnórsson, S. (1999) Geochemical and isotopic monitoring studies at Amatitlan and Zunil, Guatemala. *International Atomic Energy Agency Report, Project C3-GUA/8/011 01 02*, 27 pp.
- Arnórsson, S. (1998) Interpretation of chemical and isotopic data on fluids discharged from wells in the Momotombo Geothermal Field with notes on gas chromatography analysis. *International Atomic Energy Agency Report*, 28 pp.
- Gudmundsson, B. Th. and Arnórsson, S. (1998) Krafla. Samantekt efnagreininga á vatni og gufu úr borholum og tillögur um frekari úrvinnslu. *Landsvirkjun/Raunvísindastofnun RH 16-97*, 8 pp (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1997) Geochemical and isotopic reconnaissance survey of the Totonicapán geothermal field, Guatemala. *International Atomic Energy Agency, Project GUA/8/011*, 20 pp.
- Arnórsson, S. (1997) Interpretation of chemical and isotopic data on fluids discharged from wells in the Momotombo Geothermal Field, Nicaragua, *International Atomic Energy Agency, Project NIC/8/008*, 21 pp.

- Arnórsson, S., Geirsson, K., Andrésdóttir, A. and Sigurdsson, S. (1996) Compilation and evaluation of thermodynamic data on aqueous species and dissociational equilibria in aqueous solution. I. The solubility of CO₂, H₂S, H₂, CH₄, N₂, O₂ and Ar in pure water. *Science Institute Report 17-96*, 20 pp.
- Arnórsson, S. (1995) Chemical investigations of geothermal resources in Guatemala. Geothermal chemistry and re-injection at Zunil. Isotopic composition of geothermal waters in Amatitlan. Geochemical and isotopic exploration at Totonocapan. *International Atomic Energy Agency, Project GUA/8/009-06*, 18 pp.
- Arnórsson, S. and Geirsson, K. (1995) Re-injection of geothermal water. Theoretical assessment of mineral deposition. Science Institute report 19-95, 26 pp. (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Geirsson, K., Fridriksson, Th. and Stefánsson, A. (1995) Krafla and Námafjall. Gas in wells and fumaroles. *Science Institute Report RH 18-95*, 25 pp. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1995) Álitserð um áhrif fyrirhugaðs vatnsátöppunarhúss Þórsbrunnns hf við Suðurá í nágrenni Gvendarbrunna á hugsanlega mengun vatns í vatnsbólum Vatnsveitu Reykjavíkur. Skýrsla unnin fyrir Skipulag ríkisins, september, 1995, 6 bls. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1995) Report on a geochemistry training course held in Dumaguete, Philippines, 20-31 March, 1995 together with some recommendations on geochemical investigations of geothermal resources. *PNOC-EDC*, April 1995, 9 pp.
- Arnórsson, S. (1994) Interpretation of the Chemical and Isotopic Composition of Geothermal Water from Springs and Wells in the Amatitlan Geothermal Field, Guatemala. *International Atomic Energy Agency Project GUA/8/009-05*. Report on an expert mission to Guatemala September 17th to October 1st 1994, 19 p.
- Arnórsson, S. (1992) A summary of basic thermodynamic relations and the methodology of calculating the thermodynamic properties of minerals at different temperatures and pressures. *Report of the Science Institute, University of Iceland no. 21-92*, 41 p.
- Arnórsson, S. and Andrésdóttir, A. (1992) Methods to assess and predict the thermodynamic properties of aqueous species at elevated temperatures and pressures. *Report of the Science Institute, University of Iceland no. 22-92*, 29 p.
- Arnórsson, S. (1992) Research at the Geology Department of the Science Institute. *Science Institute, University of Iceland*, September 1992 (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1992) The development of the Svartsengi and Krafla geothermal fields in Iceland: Examples of a prosperous and a disastrous project. In: *Review of Science Technology and Innovation Policy in Iceland. Annex. Development and transfer of technology in Iceland. Some success - some failures. OECD Secretariat*, March, 1992, 46-51.
- Arnórsson, S., Björnsson, S. and Jóhannesson, H. (1991) Power and energy of the Reykjavík District Heating Service low-temperature geothermal fields. II. Production characteristics of the fields. *Report prepared by Reykir Ltd.* The Reykjavík District Heating Service, November, 1991, 74 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1991) A study of the use of water from Lake Thingvallavatn for the Nesjavellir geothermal power plant. *Report prepared by Reykir Ltd.* The Reykjavík District Heating Service, Jan., 1991, 4 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Björnsson, S. (1990) Power and energy of the Reykjavík District Heating Service low-temperature geothermal fields. I. Production and outlook for the next decade. *Report prepared by Reykir Ltd.* The Reykjavík District Heating Service, July, 1991, 26 p. (In Icelandic).
- Virkir-Orkint Consulting Group Ltd. (1990) Geothermal Development and Energy Pre-Investment Project. Eburru Geothermal Development. Comments on discussion papers and reference reports for Scientific Review Meeting, Nairobi 26-30 March 1990. *The Kenya*

- Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir-Orkint Ltd., Reykjavík), April, 1990, 14 p.
- Arnórsson, S., Björnsson, S. and Bödvarsson, G.S. (1989) Chapter 5. The North East Olkaria Steamfield. In: Feasibility Study for a Geothermal Power Station at North East Olkaria. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir-Orkint Ltd., Iceland, GENZL, New Zealand, Ewbank Preece, England and WLP, Kenya), Dec., 1989, 3 vols., 475 p. Chapter 5, 53 p.
- Björnsson, S., Arnórsson, S. and Bödvarsson, G.S. (1989) Appendix B. North East Olkaria Resource Assessment. In: Feasibility Study for a Geothermal Power Station at North East Olkaria. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir-Orkint Ltd., Iceland, GENZL, New Zealand, Ewbank Preece, England and WLP, Kenya), Dec., 1989, 3 vols., 475 p. Appendix, 45 p.
- Virkir-Orkint Consulting Group Ltd. (1988) Consulting Services for the Rehabilitation of the Geothermal District Heating System in Hódmezővásárhely in Hungary. *Report of Virkir-Orkint Ltd., Reykjavík and Geo-Thermal Co, Budapest*, July, 1988, 16 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1988) Comments on the Report on the Numerical Simulation Studies of the Olkaria Geothermal Field and Replies. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), Febr., 1988, 9 p.
- Arnórsson, S. (1987) Well NG-6 at Nesjavellir. Interpretation of water and steam compositions. *The Reykjavík District Heating Service*, Dec., 1987, 49 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1987) Chemical thermodynamic calculations of the solubility of Mg-Si minerals and changes in saturation during heating, boiling and cooling. Progress report prepared by Virkir Ltd. *The Reykjavík District Heating Service*, 7 p. (In Icelandic).
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Drilling and Connection of Replacement Wells in the East Olkaria Production Field. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), Dec., 1986, 10 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Comments on Report on "Olkaria and Eburru Geothermal Development" By GENZL, Nov., 1986. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), Dec., 1986, 13p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), Nov. 1986, 153 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Nisyros Geothermal Development.-Nisyros Well NIS-2. Production Characteristics and Fluid Composition. *Public Power Corporation, Athens*. (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and National Energy Authority, Reykjavík), Report No. OS-86038, May, 1986, 97 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), May, 1986, 147 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), Feb., 1986, 22 p.
- Arnórsson, S., Svanbjörnsson, A., Frímannsson, H. and Björnsson, S. (1986) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), 49 p.
- Arnórsson, S., Svanbjörnsson, A., Frímannsson, H. and Björnsson, S. (1986) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.*,

- (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), 55 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1986) Geothermal District Heating in Beijing and Tianjin. - Appraisal of Data on the Geothermal Resources. *UN Project CPR/85/020*. (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), July, 1986, 32 p.
- Saemundsson, K., Björnsson, A. and Arnórsson, S. (1985) Report to the United Nations on a mission to Kenya to conduct a training and lecture course in Nairobi, May 13.-31., 1985. *UNDP Project : Exploration for Geothermal Energy KEN/82/002* , 21 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1985) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), July, 1985, 92 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1984) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), Oct., 1984, 160 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1984) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), Jan., 1984, 110 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1983) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), Jan., 1983, 55 p.
- Arnórsson, S., Svanbjörnsson, A. and Gunnlaugsson, E. (1982) Geothermal Resources in Greenland. Estimated underground temperatures and potential use. *Virkir Consulting Group Ltd.*, Reykjavík, Oct., 1982, 18 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1982) Operation of Geothermal Wells at Szentes. Report on Feasibility study and proposal for consulting engineering services for carrying out a pump test. *Intercooperationn Co. Ltd. & Arpad Co. OP, Hungary*. (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), July, 1982, 22 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1982) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), May, 1982, 55 p.
- Jóhannesson, H. and Arnórsson, S. (1982) Assessment of the production characteristics of the geothermal area at Thorleifskot and Laugardaelir. Recommendations for drillings and monitoring. *Hitaveita Selfoss*. 57 p. (In Icelandic).
- Virkir Consulting Group Ltd. (1981) Olkaria Geothermal Project - Status Report on Steam Production, *The Kenya Power Company Ltd.* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), July, 1981, 31 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1981) Recommendations for Further Geothermal Exploration at Olkaria. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan Ltd., Newcastle), 1981, 90 p.
- Gunnlaugsson, E., Arnórsson, S. and Matthíasson, M. (1981) Madagascar, Reconnaissance Survey for Geothermal Resources. *UN Project MAG/77/014. Contract No.147/79* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), May, 1981, vol. 1, 90 p.
- Gunnlaugsson, E., Arnórsson, S. and Matthíasson, M. (1981) Madagascar, Reconnaissance Survey for Geothermal Resources. *UN Project MAG/77/014. Contract No.147/79* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), May, 1981, vol. 2, Appendices.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1980) Madagascar, Reconnaissance Survey for Geothermal Resources. Progress Report- 2nd bi-monthly report. *UN Project MAG/77/014. Contract No. 147/79* (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík), March, 1980, 13 p.

- Virkir Consulting Group Ltd. (1980) Geothermal Development at Olkaria. - A Report Prepared for the Scientific Review Meeting, Dec. 1980. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan, Newcastle), 1980, 72 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1979) Programme for Geothermal Exploration. *The United Republic of Tanzania, Ministry of Water Energy and Minerals*. (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and SWECO, Stockholm), Dec., 1979, 52 p.
- Virkir Consulting Group Ltd. (1979) Progress Report on Steam Production, Olkaria Geothermal Project. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan Ltd., Newcastle), Apr., 1979, 41p.
- Arnórsson, S. (1978) Progress report on the results of chemical analysis of geothermal water and heated water for the Hitaveita Sudurnesja power plant at Svartsengi. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7836, 39 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1978) Progress report on the chemistry of scaling in Krafla wells. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7832, 33 p. (In Icelandic).
- Björnsson, A., Saemundsson, K., Einarsson, S., Thórarinnsson, F., Arnórsson, S., Kristmannsdóttir, H., Gudmundsson, Á., Steingrímsson, B. and Thorsteinsson, Th. (1978) Investigations of geothermal resources in Eyjafjörður. Progress report. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7827, 135 p. (In Icelandic).
- Virkir Consulting Group Ltd. (1978) Reconnaissance of Geothermal Resources. *The United Republic of Tanzania Ministry of Water, Energy and Minerals*. (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and SWECO, Stockholm), Febr., 1978, 51 p.
- Helgason, J. and Arnórsson, S. (1977) Assessment of geothermal energy in the northern part of Tröllaskagi for Holtahreppur. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7738, 21 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1977) Exploration for and exploitation of geothermal resources. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7733, 6 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1977) The influence of magma intrusion on the chemistry of reservoir water at Krafla. Further drilling for steam. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7705, 11 p. (In Icelandic).
- Virkir Consulting Group Ltd. (1977) Report on Geothermal Development at Olkaria. *The Kenya Power Company Ltd.*, (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and Merz & McLellan Ltd., Newcastle), 1977, 203 p.
- Gíslason, G. and Arnórsson, S. (1976) Progress report on changes in flow and fluid chemistry from wells 3 and 4 in Krafla. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7640, 14 p. (In Icelandic).
- Stefánsson, V., Sigfússon, R., Saemundsson, K. and Arnórsson, S. (1976) Geothermal exploration at Thjórsárholt in the summer of 1974. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7631, 20 p. (In Icelandic).
- Björnsson, A., Kristmannsdóttir, H. and Arnórsson, S. (1976) Drilling at Sydra Laugaland, well LJ-5. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7628, 24 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Stefánsson, V. and Arnórsson, S. (1976) Drilling for geothermal water in Árnes, Adaldalur. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7626, 15 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Sigfússon, R., Stefánsson, V. and Arnórsson, S. (1976) Report on geothermal exploration at Baer and Efri-Hreppur in Andakílshreppur for Hitaveita Borgarness. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7606, 16 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Gunnlaugsson, E. (1976) The watershed of Hlíðardalslaekur and waste water from the Krafla power plant. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7602, 13 p. (In Icelandic).

- Arnórsson, S. (1976) Silica and hydrogen sulphide in disposal water from wet-steam wells. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7601, 48 p. (In Icelandic).
- Virkir Consulting Group Ltd. (1976). Feasibility Report for the Olkaria Geothermal Project. *Report prepared for The United Nations and The Government of Kenya*. (Consulting report of Virkir Consulting Group Ltd., Reykjavík and SWECO, Stockholm), 1976, 296 p.
- Arnórsson, S., Ragnars, K. and Saemundsson, K. (1975) Krafla. Results of exploration drillings 1975 and outlook for proving steam. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7558, 15 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Gudmundsson, G., Sigurmundsson, S.G., Björnsson, A., Gunnlaugsson, E., Gíslason, G., Jónsson, J., Einarsson, P. and Björnsson, S. (1975) The Krísuvík geothermal area. Final report on geothermal investigations. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7554, 77 p. (In Icelandic).
- Fridleifsson, I.B. and Arnórsson, S. (1975) Preliminary geothermal investigations in the vicinity of Skíðaskólinn in Kerlingarfjöll. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7553, 5 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Gunnlaugsson, E. (1975) Guide for collecting samples of water and gas. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7552, 42 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Stefánsson, V., Sigurmundsson, S.G., Gíslason, G. and Grönvold, K. (1975) Investigations of the geothermal area in Svartsengi. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7541, 55 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S., Gíslason, G. and Benediktsson, S. (1975) Drilling for geothermal water at Nedri-Dalur in Biskupstungur. Proposal for deepening of the well. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7540, 9 p. (In Icelandic).
- Stefánsson, V., Saemundsson, K. and Arnórsson, S. (1975) Geothermal investigations in Tálknafjörður in the autumn of 1974. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7523, 11 p. (In Icelandic).
- Thórhallsson, S., Arnórsson, S., Benediktsson, S. and Sigurmundsson, S. (1975) Hitaveita Reykjahlíðar. Scaling problems. Proposed solution. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7518, 13 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Arnórsson, S., Ragnars, K., Kristmannsdóttir, H. and Gíslason, G. (1975) Krafla. Report on the results of exploration drillings in 1974. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7506, 47 p. (In Icelandic).
- Stefánsson, V., Saemundsson, K. and Arnórsson, S. (1975) Geothermal investigations in Ségandafjörður 1974. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7503, 7 p. (In Icelandic).
- Sigbjarnarson, G., Tómasson, H., Elíasson, J. and Arnórsson, S. (1974) Report on possible pollution from effluent water from a geothermal power plant at Krafla or Hverarönd. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7427, 16 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1974) Hitaveita Hveragerdis. Report on the cause of scaling - proposals for improvements. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7425, 2 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Ragnars, K. (1974) Hitaveita Hveragerdis. Cause of deposition from the hot water. Ways for improvement. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7422, 11 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1974) Investigations concerning provision of domestic water for Kvíabryggja. *National Energy Authority Report*, OS-JKD-7410, 4 p. (In Icelandic).
- Ragnars, K. and Arnórsson, S. (1974) Svartsengi. Investigations of the geothermal area and exploitation techniques. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7407, 32 p. (In Icelandic).

- Saemundsson, K., Arnórsson, S., Stefánsson, V., Sigurdsson, G. and Benediktsson, S. (1974) Report on geothermal investigations at Leirá in Leirársveit. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7402, 17 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Arnórsson, S., Stefánsson, V. and Sigurmundsson, S. (1973) Geothermal investigations at Bardslaug in Fljót with a cost estimate on drilling. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7326, 11 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1973) Dissolved solids in geothermal waters. Thermodynamic interpretation of their behaviour, geothermal exploration, utilization problems. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7317, 131 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1973) The chemical properties of water from drillhole 1 at Varmahlíd with respect to space heating. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7314, 2 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G., Saemundsson, K., Arnórsson, S. and Benediktsson, S. (1973) Report on geothermal investigation at Thóroddsstadir in Ölfus with a plan on cost for drilling. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7307, 28 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G., Saemundsson, K. and Arnórsson, S. (1973) Report on geothermal investigation in Flói and Ölfus 1972. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7306, 23 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Arnórsson, S. and Benediktsson, S. (1973) Geothermal investigations at Reykjaból in Hrunamannahreppur. *National Energy Authority Report*, OS-JHD-7301, 10 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1973) Evaluation of the influence of exploiting gravel by Vegagerð Ríkisins in Seleyri and construction of main road on the domestic water supply wells of Borgarnes. *National Energy Authority Report*, OS-JKD-7310, 3 p. (In Icelandic).
- Gíslason, G. and Arnórsson, S. (1973) Investigations for supply of domestic water for Hvammstangi. *National Energy Authority Report*, OS-JKD-7308, 12 p. (In Icelandic).
- Kjartansson, H. and Arnórsson, S. (1973) Investigation of shell deposits in Faxaflói. *National Energy Authority Report*, OS-JKD-7307, 12 p. (In Icelandic).
- Einarsson, G. and Arnórsson, S. (1972) The chemical composition of perlite in Prestahnúkur. *National Energy Authority Report*, OS-JKD-7301, 35 p. (In Icelandic).
- Jónsson, A., Ásgeirsson, H. and Arnórsson, S. (1972) Expert mission for the Ministry of Industry regarding perlite. *Report by the Committee for Industrial Volcanic Rocks of the Ministry of Industry*, July, 1972, 27 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Arnórsson, S. and Benediktsson, S. (1972) Report concerning loan to Hitaveita Ólafsfjardar for drilling. Plans for drilling well at Ósbrekka in Ólafsfjörður. *National Energy Authority Report*, Aug., 1972, 7 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Arnórsson, S. and Benediktsson, S. (1972) Report on geothermal investigation in Fellshreppur, Strandasýsla. Plans for drilling at Litla-Fjardarhorn. *National Energy Authority Report*, Aug., 1972, 20 p. (In Icelandic).
- Ragnars, K., Arnórsson, S., Gudmundsson, J.S. and Jónsson, K.Ó. (1972) Silica scaling in Hitaveita Reykjahlídar. *National Energy Authority Report*, Aug., 1972, 12 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1972) Investigations on domestic water in Gaulverjabæjarhreppur. *National Energy Authority Report*, July, 1972, 15 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G. and Arnórsson, S. (1972) The Krísuvík geothermal area - progress report. *National Energy Authority Report*, July, 1972, 15 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1972) The chemistry of the discharge of well G-2, Hveragerði, concerning its use for house heating, greenhouses and pollution of River Varmá. *National Energy Authority Report*, May, 1972, 19 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1972) Wells 2 and 3 in Svartsengi, production, chemistry and scaling. *National Energy Authority Report*, May., 1972, 20 p. (In Icelandic).

- Arnórsson, S., Benediktsson, S. and Gudmundsson, G. (1972) Drilling for hot water at Nedri-Dalur in Biskupstungur. *National Energy Authority Report*, Mar., 1972, 23 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1972) Exploration for domestic water for the town of Siglufjörður. *National Energy Authority Report*, Feb., 1972, 14 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K., Arnórsson, S. and Benediktsson, S. (1972) Report on drilling in Sogn. *National Energy Authority Report*, Feb., 1972, 23 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G. and Arnórsson, S. (1971) Geothermal exploration in Biskupstungnahreppur. *National Energy Authority Report*, Jan., 1972, 22 p. (In Icelandic).
- Kjartansson, H. and Arnórsson, S. (1971) Investigations of clay deposits in 1971. Progress report. *National Energy Authority Report*, Oct., 1971, 17 p. (In Icelandic).
- Hafstad, Th. and Arnórsson, S. (1971) Perlite in Presthnúkur. Geological investigations carried out with exploration drillings in the summer of 1971. *National Energy Authority Report*, Sept., 1971, 20 p. (In Icelandic).
- Saemundsson, K. and Arnórsson, S. (1971) Report on well ASÍ 1 at Ölfusborgir in Ölfus. *National Energy Authority Report*, Dec., 1971, 15 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1971) The geothermal area in Skútudalur. Drillings in 1971 and pumping test of well 6. *National Energy Authority Report*, Nov., 1971, 12 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G., Pálmason, G., Grönvold, K., Ragnars, K., Saemundsson, K. and Arnórsson, S. (1971) Námafjall-Krafla. Progress report on the investigation of the geothermal areas. *National Energy Authority Report*, June., 1971, 118 p. (In Icelandic).
- Tómasson, J., Gudmundsson, G. and Arnórsson, S. (1971) Geothermal investigations in the Nesjavellir area. *National Energy Authority Report*, June, 1971, 32 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G., Jónsson, J., Arnórsson, S., Sigurmundsson, S.G. and Björnsson, S. (1971) Geothermal exploration of the Krísuvík area. Geology, fumarole gas, magnetic and gravity surveying and microearthquakes. *National Energy Authority Report*, May., 1971, 93 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1971) Drillings and investigations of geothermal water in Skútudalur for the town of Siglufjörður. *National Energy Authority Report*, Jan., 1971, 16 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1971) Progress report. Well 8 at Reykjanes. Water chemistry, production and scaling. *National Energy Authority Report*, Jan., 1971, 14 p. (In Icelandic).
- Björnsson, S., Arnórsson, S. and Tómasson, J. (1970) Exploration of the Reykjanes brine area. *National Energy Authority Report*, Sept., 1970, 25 p.
- Gudmundsson, G., Jónsson, J., Arnórsson, S. and Sigurmundsson, S. G. (1970) The Krísuvík Geothermal Project 1970-72. Siting of exploration wells and plans for investigations and drilling. *National Energy Authority Report*, Dec., 1970, 30 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G. and Arnórsson, S. (1970) The Krísuvík Geothermal Project. Second progress report. *National Energy Authority Report*, Sept., 1970, 4 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1970) The Krísuvík Geothermal Project 1970. First progress report. *National Energy Authority Report*, Aug., 1970, 5 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1970) Gas in wells at Námafjall. *National Energy Authority Report*, May, 1970, 3 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Kjartansson, H. (1970) Geochemical exploration - exploration for metalliferous minerals in SE-Iceland 1970. Cost estimate. *National Energy Authority Report*, Apr., 1970, 3 p. (In Icelandic).
- Sigurmundsson, S. G. and Arnórsson, S. (1970) The Krísuvík Geothermal Project 1970-71. Cost estimate. *National Energy Authority Report*, Jan., 1970, 6 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. and Sigurmundsson, S. G. (1970) The Krísuvík Geothermal Project. 1970-71. Exploration, exploration drilling and reservoir studies. *National Energy Authority Report*, Jan., 1970, 44 p. (In Icelandic).

- Björnsson, S., Sigurmundsson, S.G. Tómasson, J. and Arnórsson, S. (1970) The Reykjanes Geothermal Project 1969. The status of the investigations and outlook for 1970. *National Energy Authority Report*, Feb., 1970, 8 p. (In Icelandic)
- Tómasson, J., Björnsson, S., Arnórsson, S. and Sigurmundsson, S.G. (1970) The Reykjanes Geothermal Project 1969. Final report on progress. *National Energy Authority Report*, Jan., 1970, 16p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1969) Flow test. Well N-4, Námafjall. *National Energy Authority Report*, Dec., 1969, 5 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1968) Geochemical studies of water from wells in high-temperature areas. *National Energy Authority Report*, Sept., 1968, 16 p. (In Icelandic).
- Arnórsson, S. (1968) The solubility of quartz in geothermal water and information provided by aqueous silica concentrations on base temperature in low-temperature areas and aquifer temperatures in wells in high-temperature areas. *National Energy Authority Report*, June, 1968, 7 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G., Sigurdsson, S. Th. and Arnórsson, S. (1965) Magnetic Surveying in North Iceland. *National Energy Authority Report*, Oct., 1965, 45 p. (In Icelandic).
- Gudmundsson, G. and Arnórsson, S. (1965) Námafjall. Geology and magnetic surveying. *National Energy Authority Report*, Sept., 1965, 35 p. (In Icelandic).