

## Yfirborðsrannsókn á Torfajökulssvæði

### **Ragna Karlsdóttir ofl, Orkustofnun**

**Kristján Sæmundsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson,  
Jón Örn Bjarnason og Magnús Ólafsson  
Orkustofnun**

Árið 1992 var ráðist í samvinnuverkefni Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur, Hitaveitu Suðurnesja og Landsvirkjunar og var nefnt: Rannsókn jarðhita til raforkuvinnslu (Valgarður Stefánsson; 1992). Stór hluti af þessu viðamikla verkefni var yfirborðsrannsókn á Torfajökulssvæði. Helstu þættir rannsóknarinnar voru:

#### **Jarðfræði:**

Kortlagning jarðfræði Torfajökulssvæðis; Útgáfa jarðhitakorts svo og jarðfræðikorts af svæðinu og samantekt um jarðlagaskipan, gosmyndanir og þróun jarðhitans. Skýrsla Orkustofnunar: *Í Torfajökli; Jarðfræði- og jarðhitakort af Torfajökulssvæðinu* eftir Kristján Sæmundsson og Guðmund Ómar Friðleifsson (2001).

#### **Jarðefnafræði:**

Athuganir á efnu í jarðgufu og heitu vatni til að meta virkni jarðhitans. Skýrsla Orkustofnunar: *Í Torfajökli; Efni í jarðgufu og heitu vatni* eftir Jón Örn Bjarnason og Magnús Ólafsson (2000).

#### **Jarðeðlisfræði:**

Rannsókn á stærð jarðhitakerfisins með TEM-viðnámsmælingum. Skýrsla Orkustofnunar: *Í Torfajökli; TEM-Viðnámsmælingar* eftir Rögnu Karlsdóttur (2001)

Jarðhitasvæðið í Torfajökli er að jafnaði talið hið stærsta á Íslandi og hið aflmesta að Grímsvötnum undanskildum. Land í Torfajökli liggur hátt og er mjög gilskorið, einkum austantil, og er því erfitt yfirferðar. Eigi að síður hefur safnast óhemju mikið af gögnum um Torfajökulssvæðið og hvergi nærri lokið túlkun þeirra né að fullu skilið hvað gögnin geta sagt til um eðli og þróun jarðhitakerfisins.

### **JARÐFRÆÐI**

Jarðlögum á Torfajökulssvæðinu er skipt í átta meginsyrpur auk myndana frá nútíma. Áætlað er að þau spanni í aldri mestallt Brunhes-segulskeiðið. Aðalbergtegundin er líparít, ýmist myndað í jökli eða runnið sem hraun. Elstu myndanirnar eru með bröttum halla. Lok Barmsmyndunar, sem er elst, markast af öskjusigi, en Brandgilsmýndun fyllir í öskjuna. Snörunin, sem einkennir þessar myndanir, er álitin hafa orðið vegna innskots á litlu dýpi eftir að askjan fylltist. Móberg er talsvert útbreitt, bæði innan um setlög og túff í fyllingu öskjunnar, en einnig í miklu yngri lögum og hryggjum frá síðasta jökulskeiði. Brotakerfi svæðisins, sem fram koma í stefnu misgengja og gossprungna, einkennast af bogsprungum, tengdum öskjumyndun; gömlu kerfi af NV-SA sprungum og ungunum NA-SV sprungum. Jarðhiti er mestur um miðbik Torfajökulssvæðisins í yngsta hluta öskjunnar. Gömul ummyndun einkennir austursvæðið þar sem rof er mest, og töluvert er þar enn um hverri. Fylgni við sprungur og misgengi er víða sýnileg, einkum norðaustantil á svæðinu.

Rúmlega 600 bergsýnum af ýmsu tagi hefur verið safnað úr eldstöðinni. Af þeim hafa 260 verið efnagreind, og sýna greiningarnar að alakískar bergtegundir eru yfirgnæfandi. Efnagreingarnar eru úr bergi sem safnað var á árunum 1992-1994. Höfuðtilgangur með

greiningunum var að kanna hvort bergfræðileg þróun hefði átt sér stað frá elsta berginu í það yngsta. Alduröðun berggerða tók hins vegar stakkaskiptum eftir því sem á kortlagninguna leið og sýndi að elsta berg á svæðinu var mun eldra en áður hafði verið talið. Nokkuð hefur verið unnið í úrvinnslu á efnagreiningunum, en henni er hvergi nær lokið, auk þess sem bæta þyrfti við nokkrum efnagreiningum á bergsýnum, sem safnað var á árunum 1998-2000, og mörg hver eru úr lykilsniðum milli bergeininga.

Jarðfræði og jarðhitakortin voru öll unnin í mælikvarðanum 1:20.000. Alls eru 4 slík kort af hvorri gerð, og eru kortablöðin, talin frá NV til NA um SA til SV, kennd við Reykjadali, Brennisteinsöldu, Torfajökul og Hrafninnusker. Nöfnin hafa tilvísun í aðal jarðhitasvæðin á hverju kortblaði. Yfirlitskort af hvorri gerð eru jafnframt birt í mælikvarðanum 1:40.000, og auk þess eru birt tvö sérkort af jarðhitasvæðunum vestan og austan megin á rannsóknasvæðinu í mælikvarðanum 1:15.000. Jarðfræðikortin sýna allar berggerðir, aldursafstöðu, helstu misgengi og bergganga, en jarðhitakortin aðgreina virkan jarðhita frá eldri jarðhitavirkni á nútíma og frá ennþá eldri jarðhitaummyndun, sem einkum sést á rofunum hlutum rannsóknasvæðisins.

### JARDEFNAFRÆÐI

Sýnum af jarðgufu og vatni til efnagreininga var safnað í fimm ferðum um Torfajökuls-svæðið á árunum 1994 - 1997. Alls náðust 68 sýni af ýmsu tagi.

Af efnunum í jarðgufu og heitu vatni má ýmislegt ráða um ástand jarðhitakerfis. Efnastyrkur og efnahlutföll veita t.d. vísbendingar um hita djúpt í jörðu þar sem jarðhitavökvinn var síðast í jafnvægi við berg. Þá geta samsætuhlutföll gefið upplýsingar um uppruna vatns.

Styrkur gass í gufu á jarðhitasvæðinu í Torfajökli er mjög mismikill, og mælist hann allt frá 20 mmól/kg upp í 25000 mmól/kg, ef frá er talið eitt firnagasríkt sýni. Meginþáttur gassins er koldíoxíð, en hlutur þess er meiri en 75 af hundraði í þorra sýna, og meiri en 90 af hundraði í liðugum helmingi. Hlutur vetnis í gasinu er víðast á bilinu 0,5 - 15 af hundraði, en hlutur brennisteinsvetnis 0,5 - 7 af hundraði. Köfnunarefni, metan og argon finnast í mun minna mæli. Styrkur koldíoxíðs í gufu er mjög misdreifður. Langmestur er hann sunnan- og suðaustantil á svæðinu, einkum á boga sem liggur norðan Kaldaklofsfjalla og teygir sig frá hálandisbrúninni vestan Háskerðings allt austur að jaðri íshettu Torfajökuls. Mikið koldíoxíð er einnig vestast í Reykjadalum og sums staðar í nágrenni Landmannalauga. Vetni og brennisteinsvetni fylgja sama mynstri, en dreifing þeirra er þó jafnari en koldíoxíðs. Styrkur kvikasilfurs og bórs í gufu er einnig mestur á téðum hlutum svæðisins. Allt eru þetta taldar vísbendingar um að hiti í jörðu sé þar hærri en annars staðar.

Um miðbik svæðisins liggur rein, frá Landmannalaugum að kalla í norðaustri og suðvestur fyrir Hrafninnusker. Minna gas mælist í gufu á reininni en víðast utan hennar. Þessi rein fylgir meginstefnu gossprungna sunnanlands, og kann hún að tengjast höggun og eldvirkni á svæðinu. Gashitamælar sýna að jafnaði allt að 350°C hita sunnan- og suðaustantil á svæðinu, svo og vestast í Reykjadalum og við Reykjakoll hjá Landmannalaugum. Annars staðar á svæðinu er gashiti lægri, víðast um eða rétt undir 300°C. Samsætuhlutföll vetnis og súrefnis í gufu spanna fremur breitt bil, en fylgjast þó vel að. Leitni gagnanna er skýrð með þéttingu vatns úr gufu í uppstreymisrásum.

Efnahiti vatns úr hverum og laugum er á bilinu 100 - 200°C. Efnasamsetning þessa vatns er hins vegar ekki talin gefa rétta mynd af djúpvatni í jarðhitakerfinu, og þessi gildi eru ekki álitin trúverðugt mat á djúphita. Sunnantil á svæðinu er vatn í laugum og vatnshverum karbónatrikt, en styrkur klóríðs yfirleitt lítill. Í nágrenni Landmannalauga er klóríðstyrkur hins vegar mikill, og styrkur karbónats hóflegur. Styrkur flúoríðs í vatni virðist stjórnað af efnajafnvægi við steindina flúorít. Samsætuhlutföll vetnis og súrefnis benda til þess að uppruna vatns í hverum og laugum jarðhitasvæðisins megi rekja til úrkomu sem fellur á Torfajökulshálendið.

Meginniðurstaða rannsóknar á efnu- og jarðgufu og vatni er þessi: Gashitamælar benda til þess að hiti jarðhitakerfisins í Torfajökli sé víðast naumlega 300°C, eða þar um bil. Þó kann hitinn að vera allt að 350°C þar sem heitast er, en það er einkum á suður- og suðausturhluta svæðisins.

### JARDEDLISFRÆÐI

TEM-viðnámsmælingum var beitt á Torfajökulssvæði til að kanna umfang jarðhitakerfisins niður á um kílómeters dýpi. Mælingar hófust 1993 og þeim lauk vorið 2000. Farið var í fimm vetrarferðir til mælinga, 10–12 daga langar svo og eina stutta haustferð. Alls urðu mælingarnar 123.

Ástæða þess að viðnámsmælingum er beitt við jarðhitarannsóknir er sú að berg, mettað heitu vatni leiðir betur rafstraum en þurr kalt berg. Eðlisviðnám í vatnsmettuðu bergi er auk þess háð poruhluta bergsins, viðnámi vatnsins, hitastigi og ummyndun bergsins. Þessir þættir spila saman á flókinn hátt og er það samspil ekki skilið að fullu. Við rannsóknir á háhitasvæðinu á Nesjavöllum 1985 og 1986 fékkst allitarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins og sú mynd borin saman við umfangsmikil gögn úr borholum (Knútur Árnason o. fl., 1986.). Sá samanburður leiddi í ljós góða fylgni milli hitastigs, ummyndunar og eðlisviðnáms. Þar sem ríkir jafnvægi á milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndunarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979). Við hitastig frá 50-100°C og upp í 200°C er smektít og zeolítar ráðandi ummyndunarsteindir. Frá 200°C upp í 230°C eru zeolítar horfnir og smektít hefur þróast yfir í blandlagssteindir. Ofan við 230°C hafa blandlagssteindirnar þróast yfir í klórít og um og ofan við 250°C eru klórít og epidót ráðandi ummyndunarsteindir.

Samanburður ummyndunarbeltanna við niðurstöður viðnámsmælinganna leiddi í ljós góða fylgni. Einkennandi viðnámsmynd af háhitasvæði er hátt viðnám 10000-20000 Ωm í yfirborði (ógróið hraun), viðnámslækkun niður í 500-1000 Ωm við vatnsborð, lágviðnámskápa með < 10 Ωm utan á háviðnámskjarna með viðnámi allt að því stærðargráðu hærra. Samanburður á eðlisviðnámi og berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu leiddi í ljós að lágviðnámskápan svarar til smektít-zeolítabeltisins við hitastig 50-200°C. Háviðnámskjarninn svarar til klórít-epidótbeltisins við hitastig >240°C. Orsök mismunandi leiðni í ummyndunarbeltunum liggur í jónaskiptaeiginleikum einstakra steinda. Smektít og blandlagssteindirnar eru lagslíköt með lausbundnar jónir og því mikla jónaskiptaeiginleika og þar af leiðandi mikla leiðni. Í klóríti eru jónirnar hins vegar bundnar í kristalgrind og viðnámið því miklu hærra en í leirsteindunum (Deer o.fl., 1962). Ljóst er að viðnámsmælingarnar gefa mynd af ummyndun kerfisins. Samsvörun á milli eðlisviðnáms og berghita er því aðeins fyrir hendi að jafnvægi ríki milli ummyndunar og berghita. Samsvarandi rannsóknir á öðrum háhitakerfum gefa sömu niðurstöður (Ragna Karlsdóttir,

1993, Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996), en rétt er að hafa hugfast að í öllum tilfellum er um háhitakerfi að ræða þar sem ríkjandi bergtegundir eru basískar.

Um samband ummyndunar og viðnáms í jarðhitakerfum þar sem ríkjandi bergtegundir eru súrar er minna vitað. Athugun sem gerð var á viðnámsgögnum frá Berlin-jarðhitasvæðinu í El Salvador benda til samsvarandi viðnámsmyndar á súrum háhitavæðum (Santos L.; 1995). Ummyndunarsteindirnar eru aðrar en gefa sömu svörun í viðnámi, þ.e. lágviðnámskápu utan á háviðnámskjarna. Þó geta þau skil gerst við annað hitastig en í basískum kerfum. Torfajökulssvæði er í raun fyrsta háhitasvæðið á Íslandi, þar sem viðnámsmælingum er beitt á landssvæði þar sem súrar bergtegundir eru mjög ráðandi. Niðurstöður viðnámsmælinganna á Torfajökulssvæði eru talsvert flóknari en áður hefur sést.

Jarðhitasvæðið í Torfajökli er stærsta jarðhitasvæði sem til þessa hefur verið rannsakað með viðnámsmælingum á Íslandi. Land umhverfis Torfajökulshálendið er víðast í 500-600 metra hæð en uppi á hálendinu innan Torfajökulsöskjunnar er land í 800-1100 metra hæð. Ef miðað er við sjávarmál er flatarmál þess svæðis sem orðið hefur fyrir háhitaummyndun tæplega 400 ferkílómetrar. Jafnviðnámskort af viðnámi á 200 m.y.s. sýnir að lágviðnámskápan og háviðnámskjarninn undir sjálfum Torfajökli eru aðskilin frá hinu svæðinu. Að hluta til er það vegna háviðnámsvæðisins sem fleygast inn frá austri inn í miðja öskjuna og einnig er haft á milli við Háskerðing að vestanverðu. Vestara lágviðnámsvæðið með samfelldum háviðnámskjarna undir, nær yfir allan vestur og norðurhluta öskjunnar og vel út fyrir hana.

*En hvað þýða þessar niðurstöður?*

Viðnámsmælingarnar frá Torfajökulssvæðinu sýna miklu flóknari viðnámsmynd en sést hefur á öðrum háhitasvæðum. Einkennandi viðnámsmynd af háhitakerfi er háviðnámskjarni með utanálíggjandi lágviðnámskápu. Lágviðnámskápan er þá greind sem ytri mörk háhitakerfisins, þ.e. ytri mörk þess svæðis sem hefur orðið fyrir ummyndun vegna háhitans. Tvöföld lágviðnámskápa kemur fram á sumum svæðum, einkum um miðbik og vestanverða öskjuna. Einnig eru svæði þar sem engin merki eru um lágviðnámskápu en þau eru: Við öskjubrotið við Laufafell; við öskjubrotið norð-austan Torfajökuls og stórt svæði sem fleygast inn í öskjuna norðan við Torfajökul og tengist mjórri hafti sem liggur norður-suður um Háskerðing. Þetta sýnir að jarðhitakerfið undir sjálfum Torfajökli greinist frá jarðhitakerfi, sem nær yfir alla vestan og norðanverða öskjuna og út fyrir hana. Þetta vestara kerfi nær yfir svæðin, sem kennd eru við Hrafninnusker, Reykjadal og Landmannalaugar.

*Af hverju kemur fram tvöföld lágviðnámskápa á einstökum svæðum?*

Tvöföld lágviðnámskápa, eða tvö lög sem túlka má sem lágviðnámskápu er á sumum svæðum þetta á einkum við um miðbik og vestan til í öskjunni.

*Er það háð því, hver berggerðin er á þeim svæðum?* Eins og sagt er hér að framan verða skil í ummynduninni við 240-250 °C þ.e. sú ummyndun sem veldur lága viðnáminu í lágviðnámskápunni breytist við þetta hitastig yfir í umyndun með herra viðnámi í háviðnámskjarnanum. Þetta á við um háhitakerfi þar sem basalt er ráðandi bergtegund. Í kerfum þar sem súrar bergtegundir eru ráðandi verða samsvarandi ummyndunarskil við lægra hitastig. Þannig eru skil velleiðandi leirsteinda (montmorillónít og kaolínít) og

torleiðandi steinda (klórít og illít) við 180 °C. (Hrefna Kristmannsdóttir; 1985) Tvöfalda lágviðnámskápan um miðbik og vestantil í Torfajökulsöskjunnni gæti því verið þar sem þykkt lag af síru bergi liggur ofan á basísku undirlagi. Mót efri lágviðnámskápunnar við hærra undirlag þýða þá hitastig nálægt 180 °C, en mót neðri lágviðnámskápunnar við háviðnámskjarna þýða 240-250°C. Ekki er hins vegar ljóst hvort jarðfræðilegar aðstæður eru í takt við þessa kenningu. Það er nauðsynlegt að skoða viðnámsgögnin með niðurstöðum jarðfræðirannsóknanna, þegar tími og fjármagn gefst til þess.

*Getur tvöföld lágviðnámskápa þýtt tvö kerfi þ.e. á mismunandi tíma?* Háhitakerfi þróast, bergið ummyndast og myndar lágviðnámskápu utan á háviðnámskjarna. Síðan kólnar kerfið en ummyndunin stendur eftir. Aðstæður breytast og háhitakerfi þróast á ný. Hitagjafinn þarf ekki að vera á sama stað og í fyrri kerfinu. Háhituummyndunin í síðara kerfinu yfirprentar köldu ummyndunina þannig að önnur lágviðnámskápan er "köld ummyndun frá eldra kerfinu. Til að geta í svona hugleiðingar þarf að bera saman niðurstöður frá jarðfræðirannsóknunum og efnafræðinni. Ef til vill er ekki hægt að slá neinu föstu um þessar (eða aðrar síðari) kenningar nema með rannsóknarborunum.

*Af hverju eru stór svæði þar sem ekki vottar fyrir lágviðnámskápu?* Eru það svæði sem ekki hafa orðið fyrir áhrifum frá háhitunum og eru þessi svæði raunveruleg skil á milli háhitakerfa? Þetta þýðir að háhitakerfin á Torfajökulssvæði séu a.m.k. tvö. Eitt kerfi er undir sjálfum Torfajökli í suð-austurhluta öskjunnar en hitt nær yfir Hrafninnusker, Reykjadal og allt norður að Landmannalaugum. Þó er hugsanleg að Landmannalaugar skeri sig frá hinu stóra vestursvæði. Til að geta í þessar hugleiðingar þarf að skoða jarðfræði- og efnafræðigögnin með niðurstöðum viðnámsgagnanna.

Ljóst er, að til er ógrynni gagna frá Torfajökulssvæði, sem hægt er að skoða og bera saman til að öðlast betri skilning á jarðhitakerfinu sem er visast næst stærsta jarðhitakerfi landsins.

## HEIMILDIIR:

- Deer W.A., Howie R.A. og Zussman J., 1962; *Rock-Forming minerals*, Vol. 3, Sheet Silicates. Longmans, Green and Co Ltd, London 1970, 270s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: *Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C*. International Clay conference 1978. Ritsstj. Mortland og Farmer. Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam 1979, 277-288.
- Jón Örn Bjarnason og Magnús Ólafsson, 2000; *Í Torfajökli; Efni í jarðgufu og heitu vatni*. Orkustofnun, OS-2000/030 91s.
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996; *Viðnámsmælingar í Kröflu*. Orkustofnun, OS-96005/JHD-03, 96s.
- Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986: *NESJAVELLIR. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1985*. Orkustofnun, OS-86017/JHD-02, 125 s.
- Kristján Sæmundsson og Guðmund Ómar Friðleifsson, 2001; *Í Torfajökli; Jarðfræði- og jarðhitakort af Torfajökulssvæðinu*. Orkustofnun, OS-2001/036, 118 s.
- Ragna Karlsdóttir, 1993; *NÁMAFJALL. TEM-viðnámsmælingar 1992*. Orkustofnun, OS-93022/JHD-12B, 34s
- Ragna Karlsdóttir, 2001; *Í Torfajökli; TEM-Viðnámsmælingar*. Orkustofnun, OS-2001/031 131s.
- Santos L.; 1995; *One- and two dimensional interpretation of DC-resistivity data from the Berlin geothermal field, El Salvador*. Jarðhitaskóli Sameinuðu Þjóðanna 1995, skýrsla nr. 11, s. 269-302.
- Valgarður Stefánsson, 1992; *Jarðhiti til raforkuvinnslu*. Greinargerð með fjárlagatilögum fyrir árið 1993. Orkustofnun, grg. VS-92/05. 4s.