



## **Mat á stærð háhitakerfa með viðnámsmælingum**

Knútur Árnason  
Ragna Karlsdóttir

Unnið fyrir Orkustofnun vegna Rammaáætlunar

**Greinargerð**

**ÍSOR-06108**

Verknr.: 540-103

05.05.2006

ÍSLENSKAR ORKURANNSÓKNIR

Reykjavík: Orkugarður, Grensásvegi 9, 108 Rvk. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1699  
Akureyri: Rangárvöllum, P.O. Box 30, 602 Ak. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1599  
isor@isor.is – www.isor.is

## Mat á stærð háhitakerfa með viðnámsmælingum

### Viðnámskipan íslenskra háhitasvæða

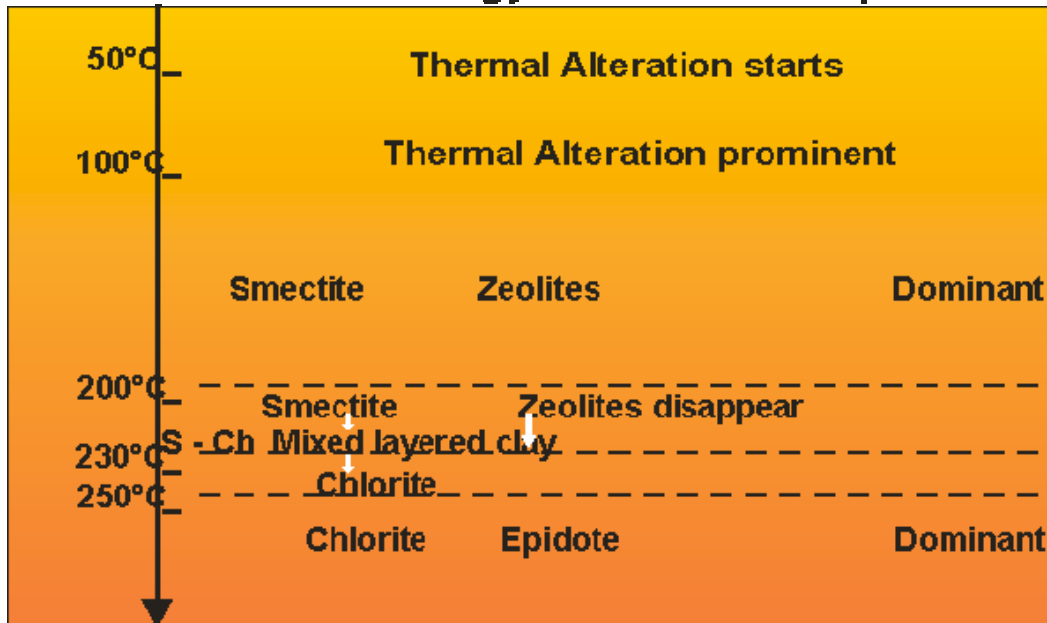
Í árána rás hefur fengist allmikil reynsla af notkun viðnámsmælinga í jarðhitarrannsóknnum. Notagildi mælinganna byggist á því að eðlisviðnám berglaga jarðskorpunnar er sá eðliseiginleiki, sem mælanlegur er frá yfirborði og gefur upplýsingar um hitaástand berglaga og vatnsinnihald. Almennt séð hafa berglög með jarðhitavatni lægra eðlisviðnám en berg mettað köldu vatni, en í háhitakerfum landsins er myndin all miklu flóknari eins og rakið verður hér á eftir. Þeir þættir sem einkum hafa áhrif á eðlisviðnám vatnsmettaðs bergs eru poruhluti bergsins, eðlisviðnám vatnsins, hitastig og ummyndunarsteindir. Ofangreindir þættir spila oft saman á flókinn hátt og vantar allmikið á að það samspil sé skilið að fullu. Settar hafa verið fram reynslujöfnur sem lýsa áhrifum hinna einstöku þátta. Slíkar reynslujöfnur byggja yfirleitt á mælingum eðlisviðnáms mismunandi bergsýna við mismunandi aðstæður.

Ólafur G. Flóvenz o.fl. (1985) gerðu tilraun til að kanna samband ofantalinna frumþátta og eðlisviðnáms bergs í efsta kílómetra jarðskorpu Íslands utan gosbeltanna. Meginniðurstaða þeirrar vinnu var sú, að neðan ungra og ferskra yfirborðsлага sé eðlisviðnám bergs sem mettað er vatni með litla seltu (með eðlisviðnám við stofuhita hærra en u.þ.b. 1 Ωm) nánast óháð eðlisviðnámi vatnsins, en hins vegar háð poruhluta og hitastigi. Rafleiðnin virtist tengd ummyndunarsteindum, en utan gosbeltanna eru ummyndunarsteindir tengdar lághita (leirsteindir og zeólítar) ráðandi í efsta kílómetranum. Líta má á rafleiðni í poruvökva og leirsteindum sem rafrás með samsíða-tengdum viðnámsmum og fer straumurinn þá einkum um það viðnámið sem leiðir betur.

Skilningur á sambandi eðlisviðnáms og innri eðlisþátta háhitakerfa jókst verulega við umfangsmiklar rannsóknir sem gerðar voru á Nesjavallasvæði árin 1985 og 1986 (Knútur Árnason o.fl., 1987). Þar fékkst ítarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins, byggð á tvívíðri túlkun á jafnstraumsmælingum. Viðnámsskipanina var hægt að bera saman við gögn úr borholum. Sá samanburður leiddi í ljós góða fylgni milli hitastigs og ummyndunar annars vegar og eðlisviðnáms hins vegar.

Í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum er víðast jafnvægi milli ummyndunar og hitastigs nema á vesturjaðri kerfisins þar sem kólnun hefur átt sér stað (Hjalti Franzson, 1988). Þar sem jafnvægi er milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndunarsteindum eins og sýnt er á mynd 1 (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979). Við hita frá um 50-100°C og upp að u.þ.b. 200°C er smektít og zeólítar ráðandi ummyndunarsteindir. Á bilinu 200°C til 230°C hverfa zeólítar að mestu og smektít þróast yfir í blandlagssteindir. Við 230°C hafa blandlagssteindir þróast yfir í klórít og um og ofanvið 250°C verða klórít og epidót ráðandi ummyndunarsteindir.

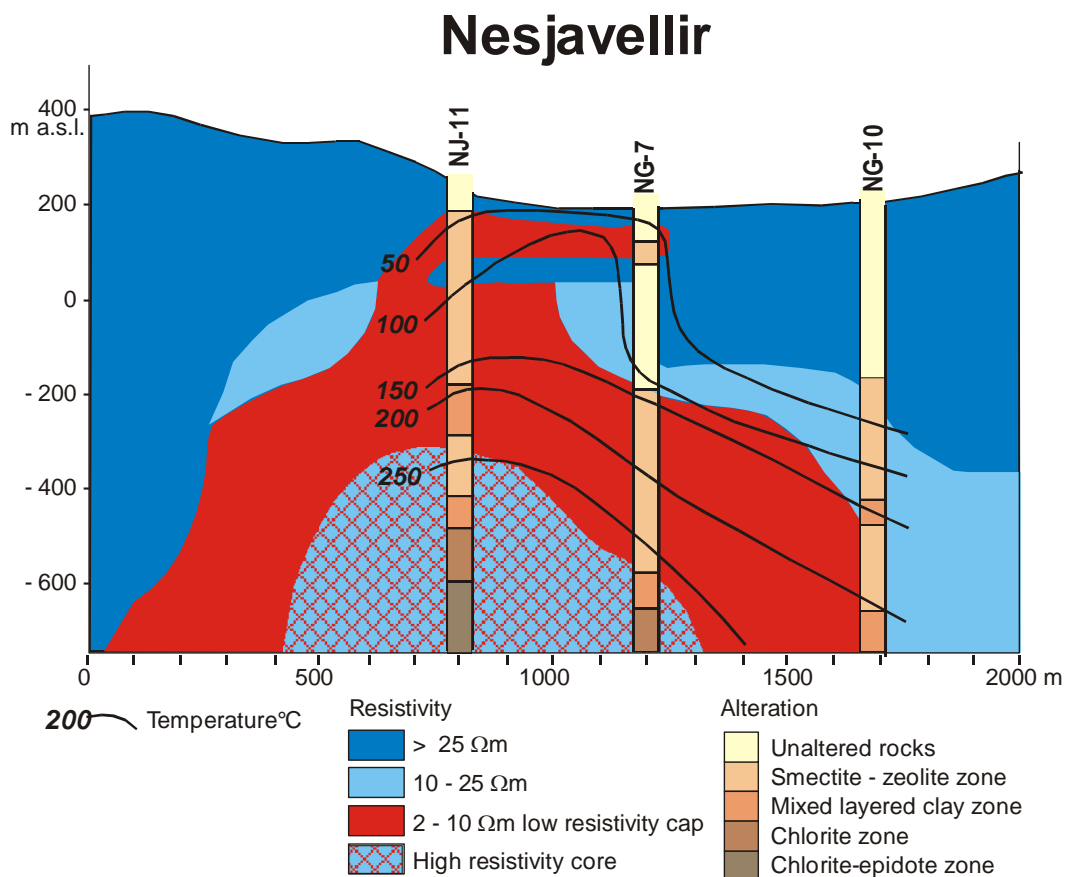
## Alteration mineralogy at different temperatures



Mynd-1. Ummyndun basaltbergs við mismunandi hitastig.

Samanburður á eðlisviðnámi við berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu (sjá mynd 2) sýndi að eðlisviðnámið er hátt í köldu og fersku bergi en lækkar mjög og er 1-5  $\Omega$ m þegar kemur í smektít-zeólítabeltið við hita á bilinu 50 til 200°C. Þegar kemur niður í klórít- og klórít-epidótbeltið og hiti er kominn yfir 230°C hækkar viðnámið aftur og verður allt að því stærðargráðu hærra en í smektít-zeólítabeltinu. Ekki sást afgerandi fylgni milli berggerðar (basalthrauna/móbergs) og eðlisviðnáms. Ekki verður þó af því dregin sú ályktun að viðnámið sé óháð berggerð og poruhluta, heldur frekar hitt að áhrif ummyndunar yfirgnæfi áhrif poruhluta og ummyndunarstig bergsins sé ráðandi frekar en gerð frumbergins. Í smektít-zeólítabelti er viðnám gjarnan lægra í móbergi en basalthraunum, en það er talið vera vegna þess að móberg ummyndast mun auðveldar en hraunlög. Reyndar er hugsanlegt að viðnámsþækkunin í klórít-beltinu sé að hluta til vegna minnkandi poruhluta.

Út frá mælingum á eðlisviðnámi jarðhitavatnsins í Nesjavallakerfinu og áætluðum poruhluta bergsins má, með reynslujöfnum um samband þessara þátta og eðlisviðnáms, meta hvert eðlisviðnám jarðlaga væri ef leiðni eftir poruvökva er ráðandi. Slíkir reikningar gefa mun hærra eðlisviðnám en mælist í smektít-zeólítabeltinu. Því er ljóst að rafleiðni í smektít-zeólítabeltinu er einkum af völdum ummyndunarsteinda en ekki vegna leiðni í poruvökva. Viðnámið í klórítbeltinu getur hins vegar svarað til þess að þar sé leiðni í poruvökva ráðandi. Þennan mismun í leiðni í ummyndunarbeltunum má skilja í ljósi mismunandi uppbyggingar smektít- og klórít steindanna. Smektít steindirnar hafa lausbundnar jónir og mikla jónaskiptaeiginleika en í klóríti eru þessar jónir fastbundnar í kristalgrind (Deer o.fl., 1962).



**Mynd 2.** Samanburður á eðlisviðnámi, ríkjandi ummyndun og berghita í jarðhitageyminum undir Nesjavalladal.

Jarðhitakerfið á Nesjavöllum er mettað vökva með lága seltu. Viðnámsmælingar á öðrum háhitasvæðum hérlandis sýna að sú viðnámskipan sem í ljós kom á Nesjavöllum og lýst er hér að ofan virðist eiga almennt við um háhitakerfi með ósöltum jarðhitavökva. Neðan ferskra berglaga með háu viðnámi (>50 Ωm) er lágviðnámskápa með eðlisviðnámi 1-10 Ωm, sem endurspeglar smektít-zeólítabelti. Neðan hennar hækkar viðnámi aftur þar sem klórítumyndun tekur við. Ef ummyndun er í jafnvægi við hitastig endurspeglar lágviðnámskápan hita á bilinu 50-200°C en hækkandi viðnámi þar fyrir neðan þýðir að hiti sé kominn um og yfir 230°C.

Í jarðhitakerfunum á utanverðum Reykjaneskaga, sem mettuð eru söltu vatni, kemur fram svipað samband milli breytinga í eðlisviðnámi og ummyndunar. Þó er sá munur á að eðlisviðnámsgildi eru mun lægri en í fersku kerfunum (Ragna Karlsdóttir, 1998).

Þessari túlkun á sambandi viðnáms og hitaástands háhitakerfa má þó ekki beita í blindni. Ekki er hægt að slá því föstu að ummyndun sé í jafnvægi við hitastig og úr því fæst ekki skorið svo óyggjandi sé nema með borunum.

Hækkandi viðnám neðan lágviðnáms þarf ekki endilega að þýða að komið sé niður í klórítbelti. Hugsanlega er hiti að lækka og/eða ummyndun að minnka með dýpi t.d. ef um er að ræða lárétt rennsli í vel lekum jarðlögum grunnt í jörðu. Í jarðhitakerfinu í Hvíthólum við Kröflu kemur fram hærra viðnám neðan lágviðnáms sem fellur saman við minni ummyndun í basalhraunum neðan móbergslaga (Knútur Árnason o.fl., 1984). Þetta ber að hafa í huga þegar túlka á niðurstöður þeirra viðnámsmælinga sem hér er fjallað um.

Þó að hin almenna heildarmynd af sambandi eðlisviðnáms og ummyndunarsteinda í háhitakerfum sé vel staðfest og skilin í megindráttum, vantar verulega á að finni drættir séu þekktir. Oft má sjá kerfisbundinn breytileika á viðnámi, bæði í lágviðnámskápunni og háviðnámskjarnanum. Út frá slíkum breytingum má án efa lesa nokkrar upplýsingar. Reynslan virðist benda til þess að í ferskvatnskerfum, þar sem fram kemur mjög lágt viðnám ( $< 5 \Omega\text{m}$ ) með mun hærra (stærðargráðu eða meira) undir, megi gera ráð fyrir öflugri jarðhitavirkni og háum hita. Ef viðnámið í lágviðnámskápunni er um eða yfir  $10 \Omega\text{m}$  og einungis tvisvar- til þrisvar sinnum hærri undir virðist virknin almennt vera minni eða dvínandi. Slíka viðnámsskipan má oft sjá á jöðrum háhitakerfanna, en stundum einnig innan víðáttumikilla kerfa. Þess ber þó að geta hér að hærra viðnám í lágviðnámskápunni á jöðrum háhitakerfa getur verið tilkomið vegna þrívíðra áhrifa í mæligögnum. Eins ber að hafa í huga að háviðnámskjarninn kemur oft fram það djúpt að hann er við neðri mörk dýptarskynjunar mælinganna og í slíkum tilfellum er viðnám hans illa ákvarðað.

Viðnám innan lágviðnámskápunnar og háviðnámskjarnans getur verið breytilegt af ýmsum ástæðum, svo sem breytilegum hita, breytilegu ummyndunarstigi (hversu mikið af frumberginu hefur náð að ummyndast) og yfirprentun ummyndunar við breytt hitaástand. Jöfnur sem lýsa breytingum eðlisviðnáms í lágviðnámskápunni og háviðnámskjarnanum með hitastigi, að óbreyttu ummyndunarstigi, eru ekki þekktar. Almennt má þó gera ráð fyrir að viðnám fari lækkandi með hækkandi hita.

Ekki liggja heldur fyrir gögn til að meta hvernig viðnám breytist með ummyndunarstigi. Næsta víst má þó telja að í smektít-zeólítabeltinu (lágviðnámskápunni) fari viðnám lækkandi með aukinni ummyndun því að magn leiðandi steinda er þá vaxandi. Í klórít- og klórít-epidótbeltunum (háviðnámskjarnanum) má hins vegar leiða líkur að því að viðnámið geti fari hækkandi með hækkandi ummyndunarstigi. Ástæðan er sú að ummyndunarstig, og eins hvaða steindir eru til staðar, er verulega háð lekt. Greining ummyndunar í borsvarfi úr háhitaholum bendir til þess að við litla lekt og lágt ummyndunarstig geti smektít verið til staðar við hærri hita en  $240^\circ\text{C}$ , en að við góða lekt víki það fullkomlega fyrir klóríti (Hjalti Franzson, munnl. uppl.). Eins virðist smektít geta verið til staðar við hitastig hærra en  $240^\circ\text{C}$  í söltum háhitakerfum (Hjalti Franzson o. fl., 2001).

Ef hitaástand jarðhitakerfis hefur breyst nýlega, t.d. við kólnun, er líklegt að gamla ummyndunin ráði mestu um eðlisviðnám bergsins. Áhrif hitastigs á eðlisviðnám munu þó valda viðnámsbreytingum, en einnig fara að myndast nýjar ummyndunarsteindir í samræmi við breytt hitastig. Það tekur hins vegar nokkurn tíma að yfirprenta ríkjandi ummyndun þannig að viðnámið fari að endurspeglar breytt hitaástand (klórít breytist

t.d. ekki í blandlags- eða leirsteindir við kælingu). Sömuleiðis má gera ráð fyrir því að það taki ummyndunarstig bergsins nokkurn tíma að bregðast við hækkandi hita.

Af því sem rakið hefur verið hér að framan má vera ljóst að ekki er hægt, svo óyggjandi sé, að túlka breytileika í viðnámsskipaninni yfir í breytilegar aðstæður í jarðhitageyminum, einungis út frá viðnámsgildum. Við slíka túlkun verður að taka tillit til annarra tiltækra og óháðra gagna. Efnainnihald hveravatns og styrkur og hlutföll gastegunda í gufuaugum geta gefið upplýsingar um líklegan djúphita. Afstæður aldur og saga eldvirkni gefur upplýsingar um hugsanlega varmagjafa og kortlagning brota gefur vísbendingar um líklegar rennislíleiðir jarðhitavökva.

## Mat á stærð háhitakerfa

Þegar meta á stærð vinnanlegra jarðhitakerfa, verður að taka mið af því hversu djúpt skal borað og hvaða kröfur eru gerðar til hitastigs. Ef nýta á jarðhitann til raforkuframleiðslu er æskilegt að jarðhitavökvinn sé um og yfir 240°C. Í ljósi þess sem rakið er hér að ofan er því rökrétt að miða við útbreiðslu háviðnámskjarnans, en hann kemur einmitt fram um þetta hitabil.

Ef gert er ráð fyrir hefðbundnum háhitaborunum, niður á um 2 km dýpi, með vinnslu hluta neðan um 800 m, er æskilegt að á því dýpi sé hitastig komið um og yfir 240°C. Að gefnum þessum forsendum virðist því eðlilegt að **meta stærð jarðhitageymanna út frá flatarmáli þess svæðis þar sem háviðnámskjarninn kemur fram á 800 m dýpi eða grynnra.**

Í ljósi þess sem sagt er í kaflanum hér á undan kann þetta í sumum tilfellum að vera ofmat, þar sem jarðhitakerfin kunna að hafa kólnað, en skilið eftir háviðnámskjarna. Þess ber þó að geta að einungis er eitt staðfest tilvik þar sem borað hefur verið og hitastig reynst verulega lægra en eðlisviðnám benti til, en það var í Hágöngum austan Kröflu.

Ofnagreind aðferðafræði kann einnig að vanmeta stærð jarðhitakerfanna. Nýlegar boranir við Hverahlíð á Hellisheiði og sunnan Hveradala leiddu í ljós mjög háann hita og þrýsting neðan 1 km dýpis. Undir Hverahlíð kemur ekki fram afgerandi háviðnámskjarni þó að þar sé trúlega öflugt vinnslusvæði. Ef borað er dýpra en almennt gerist mun sú aðferðafræði sem hér er lögð til vanmeta stærð jarðhitakerfanna.

Það er því við því að búast að í sumum tilfellum verði stærðin ofmetin og í sumum tilfellum vanmetin. Svör við því hvort heldur er og hversu mikið frávik er verður ekki staðfest nema með borunum. Miðað við núverandi stöðu þekkingar og hefðbundna vinnslutækni er ofangreind aðferð trúleg sú besta sem völ er á.

**Þess ber að geta, að fram til þessa hefur stærð háhitakerfa verið gefin upp sem flatarmál háviðnámskjarna og lágviðnámskápu á um 800 m dýpi.** Þessi skilgreining hefur þó þann annmarka að í mörgum tilfellum teygir sig lágt viðnám (< 10 Ωm) nokkuð langt út fyrir háviðnámskjarnann, einkum þegar dýpra kemur. Samkvæmt reynslu af sambandi eðlisviðnáms og hitastig (ummyndunar) endurspeglar það trúlega

ekki hitastig nýtanlegt til hefðbundinnar raforkuvinnslu og því er talið réttara að miða við stærð háviðnámskjarnans.

## Heimildir

Deer, W. A., Howie, R. A. og Zussman, J., 1962: *Rock-Forming Minerals, Vol. 3, Sheet Silicates*, Longmans, Green and Co Ltd, London, 270 s.

Hjalti Franzson, Sigvaldi Thordarson, Grímur Björnsson, Steinar Þór Guðlaugsson, Bjarni Richter, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Sverrir Þórhallsson; 2001: *Reykjanes, hola RN-10. Borun og rannsóknir. Lokaskýrsla. Orkustofnun - Rannsóknasvið, OS-2001/066* 144 s.

Hjalti Franzson, 1988: *Nesjavellir. Borholujarðfræði. Vatnsgengd í jarðhitageymi. Orkustofnun, OS-88046/JHD-09*, 58 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C. *International Clay conference 1978. Ritstj. Mortland og Farmer. Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam 1979*, 277-288.

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: *Nesjavellir -- Ölkelduháls. Yfirborðsrannsóknir 1986. Orkustofnun, OS-87018/JHD-02*, 112 s.

Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Knútur Árnason, 1985: Resistivity Structure of the Upper Crust in Iceland. *Journal of Geophysical Research., Vol. 90, No. B12*, 10136-10150.

Ragna Karlsdóttir, 1998: *TEM-viðnámsmælingar í Svartsengi 1997. Orkustofnunar - Rannsóknasvið, OS-98025*, 43 s.



Mat á stærð háhitakerfa með viðnámsmælingum