



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Umhverfisáhrif jarðhitanýtingar

Uppgjör verksins

Hrefna Kristmannsdóttir

**Samvinnuverk Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur,
Hitaveitu Suðurnesja, Landsvirkjunar og Umhverfis-
ráðuneytisins**

1997

OS-97074



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 760 100

Hrefna Kristmannsdóttir

Umhverfisáhrif jarðhitanytingar

Uppgjör verksins

**Samvinnuverk Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur, Hitaveitu
Suðurnesja, Landsvirkjunar og Umhverfisráðuneytisins**

OS - 97074

Desember 1997

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569-6000 - Fax 5688896

Netfang os@os.is - Heimasíða <http://www.os.is>

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

Skýrsla nr.: OS-97074	Dags.: Desember 1997	Dreifing: ☒ Opin ☐ Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: UMHVERFISÁHRIF JARÐHITANÝTINGAR Uppgjör verkefnis		Upplag: 30
		Fjöldi síðna: 20 + viðauki
Höfundar: Hrefna Kristmannsdóttir		Verkefnisstjóri: Hrefna Kristmannsdóttir
Gerð skýrslu / Verkstig: Samantekt, verkstaða		Verknúmer: 760 100
Unnið fyrir:		
Samvinnuaðilar: Samvinnuverk Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur, Hitaveitu Suðurnesja, Landsvirkjunar og umhverfisráðuneytis		
Útdráttur: Í skýrslunni er gerð grein fyrir stöðu rannsóknarverkefnisins 'Umhverfisáhrif jarðhitanytingar'. Um er að ræða samvinnuverk OS, LV, HR og HS og Umhverfisráðuneytisins. Því var komið á fót 1992 og skilgreint sem átaksvær til 3-5 ára, en er í eðli sínu langtíma- verk. Rannsóknir hafa fyrst og fremst beinst að umhverfisáhrifum vinnslu á háhitasvæðum. Í upphafi voru skilgreind forgangsverkefni sem beinast að því að setja viðmið og skilgreina rannsóknaratriði og framkvæmd eftirlits (í fjórum liðum), og jafnframt að þróun aðferða til eftirlits með áhrifum jarðhitanytingar (í 8 liðum). Einstökum verkþáttum og stöðu þeirra er lýst ítarlega, gangur verksins rakinn og gerð grein fyrir kosnaði. Birt er skrá yfir helstu skýrslur og greinargerðir sem gerðar hafa verið í tengslum við verkið. Í viðauka eru útdrættir frá kynningarfundum um verkið.		
Lykilorð: Jarðhiti, nýting, umhverfisáhrif, verkpættir, verkstaða		ISBN-númer:
		Undirskrift verkefnisstjóra: 
		Yfirfarið af:

Efnisyfirlit

1. Inngangur.....	3
2. Lýsing verkþátta.....	5
3. Gangur verksins.....	7
4. Kostnaður.....	9
5. Staða einstakra verkþátta umhverfisverksins.....	11
6. Niðurlagsorð.....	13
7. Skýrslur, greinar og greinargerðir um umhverfisverkið.....	14
Viðauki: Útdrættir erinda frá kynningarfundum.....	21

Tölur

Tafla 1. Yfirlit yfir kostnað 1997.....	10
Tafla 2. Uppgjör verkefnisins 1997.....	10

1. INNGANGUR

Til að halda góðum lífskjörum í landinu og tryggja hagvöxt er nauðsynlegt að nýta náttúruauðlindir landsins. Þjóðin vill ekki spilla umhverfi um of og eyðileggja náttúruperlur landsins og því þarf að fara bil beggja við virkjanir og kjósa þá kosti sem eru umhverfisvænstir. Mikilvægt er að sátt sé um slíkar framkvæmdir og opin umræða milli virkjunaraðila, náttúruverndarsamtaka og almennings. Líklegt þykir að veruleg aukning verði á raforkuframleiðslu með jarðhita á næstu áratugum. Þrátt fyrir að óveruleg umhverfisspjöll og mengun fylgi jarðhitanytingu samanborið við flesta aðra orkuvinnslu er eðlilegt á tímum vaxandi vitundar um umhverfismál, að lögð sé aukin áhersla á rannsóknir á umhverfisáhrifum samfara nýtingu þessarar helstu orkulindar þjóðarinnar. Orkustofnun hefur á undanförunum árum lagt aukna áherslu á rannsóknir á umhverfisáhrifum orkunýtingar, en mun meiri vinna hefur verið lögð í umhverfisrannsóknir tengdar vatnsaflsvirkjunum en jarðhita.

Ekki er endilega gefið að breyting umhverfis á jarðhitasvæðum í kjölfar virkjunarframkvæmda þurfi að vera til hins verra. Meðal helstu náttúruperlna okkar eru taldar borholur sem boraðar voru í Hverarönd, Námafjalli á sjötta áratugnum og blása nú sem öflugir hverir og draga til sín ferðamenn að ógleymdu affallslóni virkjunarinnar í Svartsengi. Einnig er ljóst að margar virkjunarframkvæmdir hafa opnað falleg svæði fyrir ferðamenn með vegagerð og merkingum, og frágangur virkjunaraðila á þessum svæðum er yfirleitt til fyrirmyndar.

Orkufyrirtækjunum er ljóst mikilvægi þess að frekara átak verði gert í umhverfisrannsóknum á jarðhitasvæðum vegna hins aukna vægis umhverfismála og hinnar formlegu afgreiðslu umhverfismats við staðarval virkjana, sem tilkoma nýrra laga um umhverfismat hefur haft í för með sér. Hluti þeirra rannsókna, sem fram hafa farið við undirbúning virkjunarframkvæmda á íslenskum jarðhitasvæðum fellur undir umhverfisrannsóknir og virkjunaraðilar hafa gjarna fylgst með og látið rannsaka ýmsa þá þætti sem tengjast mengunar- og umhverfisáhrifum. Á síðari árum hafa rannsóknir á umhverfisáhrifum tengdum hvers konar framkvæmdum orðið mun markvissari en áður.

Lög um mat á umhverfisáhrifum framkvæmda frá 1993 gera ráð fyrir að framkvæmdir vegna jarðvarmavirkjana séu matskyldar ef varmaafli er 25 MW eða meira að hráorku eða uppsett afl er 10 MW eða meira. Samkvæmt lögnum skal umhverfismat vera fastur liður í gerð skipulagsáætlana og við greinargerð um staðarval skulu áhrif mismunandi kosta borin saman. Samkvæmt lögnum er þess og krafist, að fram fari mat á umhverfispáttum fyrir virkjun og ávinningur virkjunar metinn miðað við óæskileg umhverfisáhrif. Þegar voru í undirbúningi árið 1991 var talið æskilegt að virkjunaraðilar hefðu frumkvæði að því að skipuleggja umhverfisrannsóknir á jarðhitasvæðum. Þannig ættu þeir meiri möguleika á að taka þátt í að móta þær kröfur sem settar yrðu um þau umhverfismál er virkjanir varða. Þetta varð kveikjan að samvinnuverkefni Orkustofnunar og helstu notenda háhitaorku á Íslandi um rannsóknir á umhverfisáhrifum jarðhitanytingar.

Rannsóknarverkefni um áhrif jarðhitavinnslu á *Umhverfisverkið*, hófst á árinu 1991. Ákveðið var að beina rannsóknum fyrst og fremst að áhrifum vinnslu háhitasvæða á umhverfið, þar sem þau eru meiri og augljósari en áhrif vinnslu lághitavæða. *Umhverfisverkið* er samvinnuverkefni Hitaveitu Suðurnesja, Hitaveitu Reykjavíkur, Landsvirkjunar, Umhverfissráðuneytisins og Orkustofnunar. Samstarfssamningur var undirritaður þann 3. mars 1992 að undangenginni nokkurra

mánaða kynningu og undirbúningsvinnu. Verkefnið var skilgreint sem átaksverk til 3-5 ára þótt það sé í eðli sínu langtímaverk.

Í upphafi var umhverfisverkið skilgreint af faghópi á Orkustofnun, sem gerði samantekt á stöðu rannsókna á umhverfisáhrifum jarðhitanytingar á Íslandi og mat rannsóknarþörf ýmissa umhverfisþátta. Við gerð samningsins um samvinnu virkjunaraðila var skipuð samstarfsnefnd með fulltrúum allra aðila og tók hún þátt í frekari skilgreiningu verksins. Umhverfisráðuneytið gerðist síðan fljótlega aðili að verkefninu og á fulltrúa í samstarfsnefnd um það. Samvinna hefur verið við Veðurstofu Íslands, Raunvísindastofnun og Verkfræðistofnun Háskóla Íslands um ýmsa verkþætti.

Í samstarfssamningi er markmið verkefnisins skilgreint á eftirfarandi hátt: "Markmiðið með samningi þessum er að rannsaka ítarlega áhrif háhita jarðhitasvæða á umhverfið og hver breyting verði þar á við virkjun svæðanna til framleiðslu á raforku og/eða hitaorku. Jafnframt þessu að rannsaka ýmsar leiðir til að draga úr mengun samfara nýtingu háhitasvæða".

Samstarfsnefnd og fagnefnd unnu í upphafi mikið starf við skilgreiningu forgangsverkefna, sem æskilegt væri að vinna innan ramma umhverfisverksins. Skipta má þeim verkefnum annars vegar í rannsóknir, sem beinast að því að setja viðmið og skilgreina hvaða atriði þurfi að rannsaka og fylgjast með og hvernig beri að haga slíku eftirliti. Undir þennan flokk fellur einnig samstarf um athugun á reglugerðum um umhverfismál jarðhitanytingar. Hins vegar er um að ræða þróun sérstakra aðferða til eftirlits með áhrifum jarðhitanytingar. Forgangsverkefnin skiptast í eftirfarandi verkþætti:

Almenn atriði, skilgreining og viðmið

1. Umhverfisúttekt, svonefnd núllgrunnsúttekt, á öllum svæðum sem þegar hafa verið virkjuð.
2. Rannsóknir á umhverfisáhrifum náttúrulegrar jarðhitavirkni.
3. Mælingar á gasi í andrúmslofti bæði á virkjuðum og óvirkjuðum jarðhitasvæðum og í grennd við þau.
4. Athugun á erlendum reglugerðum um umhverfismál jarðhitavinnslu.

Þróun aðferða til eftirlits með áhrifum jarðhitavinnslu á umhverfi

5. Þróun fjarkönnunaraðferða til umhverfisrannsókna.
6. Mat á breytingu á náttúrulegu útstreymi gufu.
7. Hæðar- og þyngdarmælingar á jarðhitasvæðum til þess að rannsaka áhrif massatöku.
8. Rannsókn smáskjálftavirkni á jarðhitasvæðum.
9. Rannsóknir á grunnvatni.
10. Mat á aðferðum til gaslosunar.
11. Tilraunir varðandi niðurdælingu affallsvatns.

12. Rannsókn á myndun og útbreiðslu gufupúða í jarðhitageymum virkjunarsvæða.

Hér á eftir er gerð grein fyrir stöðu verkþátta, sem unnir hafa verið innan umhverfisverksins frá upphafi til loka árs 1997.

Fjórum sinnum hefur verið gerð heildarsamantekt um stöðu, á árunum 1992, 1994, í febrúar og júlí 1996 (Hrefna Kristmannsdóttir, greinargerðir HK-92/09, HK-94/01, HK-96/01, OS-96038/JHD-23 B). Í greinargerðinni frá 1994 var unnin ítarleg langtímaáætlun um framhald verksins.

Skrá yfir helstu skýrslur og greinargerðir, sem samdar hafa verið í tengslum við verkið eru teknar saman í lok skýrslunnar. Auk þessara rita hefur mikill fjöldi minnisblaða og fundargerða verið skrifaður þann tíma, sem verkið hefur staðið. Ritin í skránni eru flokkuð eftir sömu númerum og verkþættir í listanum hér á undan. Rit, sem fjalla um áætlanir, eru samantekt á stöðu verksins almennt, eða falla ekki beint undir einn verkþátt, eru merkt með (0).

2. LÝSING VERKÞÁTTA

Almenn atriði, skilgreining og viðmið

Vinna samstarfsnefndar, fagverkefnishóps og verkefnisstjóra á Orkustofnun fellur undir almenna vinnu við verkefnið. Einnig má nefna vinnu við gerð skýrslna, bæði úttektarskýrslur, skýrslu um þörf á umhverfisrannsóknum á óvirkjuðum svæðum á næstu árum og ýmis kynningarrit. Jafnframt fellur samvinna og mótun alþjóðlegs samvinnuverkefnis á vegum IEA (International Energy Agency) um rannsóknir á umhverfisáhrifum samfara nýtingu jarðhita undir almenna vinnu í umhverfisverkefninu svo og innlend samvinna á þessu sviði.

1. Gerð **umhverfisúttektar**, svonefndrar núllgrunnsúttektar, á svæðum, sem þegar hafa verið virkjuð eða til stendur að virkja, felst í því að taka saman upplýsingar um ríkjandi ástand til að byggja á mat á hugsanlegum breytingum og nauðsynlegu eftirliti. Tekinn er saman heimildalisti um rannsóknir á hverju svæði. Eftir að gátlista Skipulags ríkisins hefur verið svarað eru teknar saman tillögur um hvaða viðbótarrannsókn sé þörf og hvernig beri að haga eftirliti með tilteknum umhverfisþáttum. Er þá hliðsjón höfð af leiðsögureglum Skipulagsins um umhverfismat.

2. **Rannsóknir á umhverfisáhrifum náttúrulegrar jarðhitavirkni:** Til að unnt sé að meta breytingar vegna virkunar þurfa að vera til upplýsingar um náttúrulegt ástand svæða og eðlilegar sveiflur í virkni. Rannsóknir á náttúrulegum breytingum á virkni jarðhitasvæða hafa verið takmarkaðar og ósamfelldar, þar sem fjármagn til rannsókna er takmarkað og rannsóknir á náttúrulegu ástandi jarðhitasvæða hafa að öllu jöfnu ekki verið forgangsverkefni. Af sömu ástæðu hefur heldur ekki verið lögð mikil vinna í að meta náttúrulegt útstreymi efna frá óvirkjuðum jarðhitasvæðum. Fyrir flest óvirkjuð svæði eru til einhver gögn um efnasamsetningu gass og vatns, en um magn útstreymis eru þau ófullkomin og því er mikil óvissa bundin mati á efnaútstreymi. Þannig hefur verið stærðargráðu munur á þeim tölum, sem ýmsir aðilar hafa birt um náttúrulegt útstreymi efna frá jarðhitasvæðum.

3. Mælingar á gasi í andrúmslofti á virkjuðum og óvirkjuðum jarðhitasvæðum: Gös í jarðhitagufu eru sum eitruð og önnur eru svokölluð gróðurhúsagös og eru því meðal þeirra þátta, sem krafist er eftirlits með. Mælingar á gasi í andrúmslofti yfir jarðhitasvæðum, bæði óvirkjuðum og vinnslusvæðum, eru því nauðsynlegar til að fá hugmynd um styrk helstu mengandi gasa og einnig að fylgjast með dreifingu þeirra og hvörfun í andrúmsloftinu. Rannsókn þessa hefur verið einn aðalverkpátturinn í *Umhverfisverkinu*. Sérstaklega er mikill áhugi á að fá vitneskju um hvort brennisteinsvetni, sem berst út í andrúmsloftið með jarðhitagufu, oxist yfir í brennisteinstvíoxíð, og þá hversu mikill hluti þess. Talsverðar umræður hafa orðið um afdrif brennisteinsvetnisins þegar lengra dregur frá jarðhitasvæðunum Bagalegt er að hafa ekki betri vitneskju um þetta vegna þeirra alþjóðlegu samninga og reglugerða um losun brennisteinsgasa, sem Íslendingar verða aðilar að á næstunni. Einnig skiptir það verulegu máli við mat á þeim kostnaði, sem þarf að leggja í hreinsibúnað fyrir jarðhitavirkjanir, hvort brennisteinsvetni breytist að einhverju marki yfir í brennisteinstvíoxíð eða ekki. Innan *Umhverfisverksins* var skilgreindur verkþáttur, sem fólst í því að prófa mæliaðferðir og síðan að mæla grunngildi fyrir brennisteinsgös um nokkurra mánaða skeið á hverju vinnslusvæði. Samhliða aðferðaþróuninni voru gerðar skammtímamælingar á fleiri gösum og þá víðar. Að auki var skilgreindur verkþáttur, sem miðaði að því að skýra afdrif brennisteinsvetnis, bæði með tilraunum og mælingum á brennisteinsgösum, utan Nesjavallasvæðisins, á Írafossi og við Korpu.

4. Athugun á erlendum reglugerðum um umhverfismál jarðhitavinnslu: Við gerð reglugerða og krafna varðandi umhverfismál jarðhitavirkjana er eðlilegt að taka mið af lögum og reglum annarra þjóða, en þó þannig að tekið sé tillit til aðstæðna og sérstöðu. Innan Umhverfisverksins var áætlað að safna saman erlendum reglugerðum um jarðhitanytingu og vinna úr þeim í samvinnu við Umhverfisráðuneytið.

Þróun aðferða til eftirlits með áhrifum jarðhitavinnslu á umhverfi

5. Þróun fjarkönnunaraðferða til umhverfisrannsókna: Fjarkönnun er oft mun ódýrari og fljótlegri en aðrar aðferðir. Innrauðar mælingar hafa á undanförunum árum verið í stöðugri framför og hafa þær verið notaðar með góðum árangri til að fylgjast með breytingum á virkni jarðhita- og eldfjallasvæða. Skiptir þar mestu máli að með öflugri tölvum er unnt að gera miklu viðameiri leiðréttingar en áður á ýmsum þáttum eins og landslagi og umhverfishitastigi. Merkjafræðistofa Verkfræðideildar Háskólans hefur verið að þróa slíkan búnað, sem unnt er að koma fyrir í lítilli flugvél. Skilgreint var þriggja ára samvinnuverkefni innan Umhverfisverksins um þróun á aðferðum til að fylgjast með breytingum á varmaflæði á jarðhitasvæðum í samvinnu við Merkjafræðistofuna og með styrk frá Rannsóknarsjóði Rannsóknarráðs Íslands.

6. Mat á breytingum á náttúrulegu útstreymi gufu: Mat á náttúrulegu gufuútstreymi er nauðsynlegt vegna virkjunar. Mjög erfitt getur reynst að meta breytingar á náttúrulegu útstreymi gufu því annars vegar er það oft mjög dreift og hins vegar geta kröftug gufuaugu flutt mikla gufu, og heppileg mælitæki ekki til fyrir hvorugan kostinn. Einfaldara er þó að meta dreifða útstreymið með sæmilegri nákvæmni, en að mæla streymi í kröftugum gufuaugum. Það skiptir auk þess minna máli í heildarstreyminu. Því var skilgreindur innan Umhverfisverksins verkþáttur, sem miðaði að því að þróa mælibúnað fyrir streymi úr gufuaugum.

7. Hæðar- og þyngdarmælingar á jarðhitasvæðum: Við massatöku úr jarðhitasvæðum lækkar vökvaþrýstingur, porur og sprungur falla saman og þarmeð sigur landið. Sé tekinn meiri vökvi úr berginu en nær að streyma til þess aftur verða einnig massabreytingar. Af þessum sökum er nauðsynlegt að gera reglulega hæðar- og þyngdarmælingar samfara vinnslu á jarðhitasvæðum. Innan Umhverfisverksins var sett það markmið að mæla einu sinni á hverju virkjunarsvæði og koma upp hæðar- og þyngdarmæligrunni á þeim öllum. Í ljósi niðurstaðna mælinganna átti síðan að gera áætlun um magn og tíðni slíkra mælinga til framtíðareftirlits, sem virkjunaraðilar létu gera á eigin kostnað framvegis.

8. Rannsóknir á smáskjálftavirkni: Breytingar á hita og þrýstingi á jarðhitasvæðum og breytingar á grunnvatnsstöðu og grunnvatnsrennsli, svo og niðurdæling, geta haft áhrif á smáskjálftavirkni. Suða og brestir í bergi, sem er að dragast saman, geta valdið suði, sem numið er með skjálftamælum. Æskilegt var talið að koma af stað rannsóknum á þessum þáttum á íslenskum háhitasvæðum. Gerð var áætlun um rannsókn innan Umhverfisverkefnisins á hugsanlegum breytingum á virkni smáskjálfta í kjölfar niðurdælingar og vinnslu á jarðhitasvæðinu í Svartsengi. Þótt áætlunin hafi verið miðuð við Svartsengi hafa rannsóknirnar almennt gildi fyrir önnur jarðhitasvæði hér á landi.

9. Grunnvatnsrannsóknir: Við förgun affallsvatns er ávallt nokkur hætta á efnamengun grunnvatns og fyrir virkjun er því nauðsynlegt að hafa undirstöðuupplýsingar um efnasamsetningu grunnvatnsins og fylgjast reglulega með hugsanlegum breytingum í kjölfar vinnslu. Innan Umhverfisverksins var stefnt að því að koma þessum þætti í réttan farveg hjá virkjunaraðilum þar sem honum var áfátt.

10. Mat á aðferðum til gaslosunar: Aðferðir til að minnka loftmengun samfara jarðhitanytingu eru margar og henta misvel eftir aðstæðum á hverjum virkjunarstað. Stefnt var að því innan umhverfisverksins að gera úttekt á þessum aðferðum og meta fyrir helstu virkjunarstaði, hver þeirra væri ódýrust og hagkvæmust, eða hvort yfirleitt væri þörf á sérstökum gaslosunarbúnaði.

11. Niðurdæling affallsvatns kemur í veg fyrir efnamengun og stækkun lóna á yfirborði og er því talin umhverfisbætandi. Innan Umhverfisverksins var því áætlað að vinna að tilraunum um niðurdælingu affallsvatns, sem fælust í prófunum á áhrifum sýrustigs á útfellingamörk.

12. Myndun og útbreiðsla gufupúða: Við þrýstingslækkun í kjölfar jarðhitanytingar geta myndast gufupúðar í jarðhitageymum virkjunarsvæða. Innan Umhverfisverksins var mótaður verkþáttur, sem fólst í því að þróa jarðeðlisfræðilegar aðferðir til að fylgjast með útbreiðslu þeirra. Var Svartsengissvæðið notað sem tilraunasvæði, en þar er gufupúðinn allvel þekktur frá borunum í hann.

3. GANGUR VERKSINS

Verkið hófst 1991 með undirbúningsvinnu á Orkustofnun, kynningu og fyrstu umræðum við væntanlega samstarfsaðila. Í ársbyrjun 1992 var unnið að nánari skilgreiningu og mótun verksins, samningum við samstarfsaðila um verkþætti, kostnaðarskiptingu og gerð ramma-samnings um sameiginlega vinnu við verkið. Einnig var unnið áfram að mótun fleiri rannsóknar-verkefna. Helstu sérverkefni ársins 1992 voru að vinna að frumgerð umhverfisúttektar á hverju

virkjunarsvæði, svokallað forverk. Hafin var forvinna við mælingar á gasi í andrúmslofti, gerðar hæðar- og þyngdarmælingar á Reykjanesi og á Hengilssvæði og unnið að grunnvatnsrannsóknnum á Hengilssvæði. Samhliða var unnið að rannsóknnum á nokkrum óvirkjuðum háhitasvæðum, Kverkfjöllum, Fremrinámum, Þeistareykjum og í Krýsuvík.

Á árinu 1993 var lokið við skýrslu þar sem metin var staða umhverfisrannsókna á virkjunarsvæðum Landsvirkjunar, Hitaveitu Suðurnesja og Hitaveitu Reykjavíkur. Fólst vinnan að miklu leyti í samantekt heimildalista fyrir hvert svæði og frumúrvinnslu þeirra. Einnig var unnið að úrvinnslu hæðar- og þyngdarmælinga á Reykjanesi, að skammtíamælingum á gasi á öllum virkjunarsvæðum samstarfsaðila og á nokkrum óvirkjuðum svæðum. Settar voru upp fyrstu prófunarplöturnar til að rannsaka áhrif úða og tæringar frá jarðhitagufu á virkjunarsvæðum. Vinna við fjarkönnunarverkefni hófst og var flogið yfir og mynduð öll virkjunarsvæði og einnig nokkur óvirkjuð svæði. Unnið var að smáskjálftarannsóknnum í Svartsengi og að þróun aðferða til að kortleggja útbreiðslu gufupúða. Af öðrum rannsóknarverkefnum má nefna gaslosun og einnig var keyptur búnaður til að reyna að mæla gufustreymi úr gufuaugum. Rannsókn óvirkjaðra svæða var aukin og farið á Þeistareyki, Kverkfjöll og Krýsuvíkursvæði til að fylgjast með breytingum í virkni.

Á árinu 1994 var unnið áfram við flesta ofangreinda verkþætti. Mest áhersla var lögð á vinnu við gasmælingar, hæðar- og þyngdarmælingar og fjarkönnun. Langtíamælingar á brennisteinsgösum voru gerðar í Kröflu og í Svartsengi og settur upp tæringar- og úðaprófunarbúnaður á Nesjavöllum. Í tengslum við gasmælingarnar var unnið að sérstakri rannsókn á afdrifum brennisteinsvetnis, sem streymir út í andrúmsloftið frá jarðhitasvæðunum, í samvinnu við Veðurstofu Íslands og Umhverfisstofu Íslands. Settar voru upp mælistöðvar fyrir brennisteinsgös á Írafossi og við Korpu. Gerðar voru hæðar- og þyngdarmælingar á Hengilssvæðinu. Unnið var úr smáskjálftamælingum og gufupúðarannsóknnum frá fyrra ári og skrifaðar um þær skýrsla. Flogið var yfir sömu svæði og 1993 til hitainnrauðrar myndatöku vegna fjarkönnunarrannsókna. Gerðar voru áfangaskýrslur um það verk. Nokkuð var unnið áfram að úttekt á aðferðum til gaslosunar. Gerðar voru grunnvatnsathuganir á Kröflusvæði. Rannsókn óvirkjaðra svæða var með sama sniði og árið áður. Gerð var stöðuskýrsla um Umhverfisverkið og langtímaáætlun um verkið endurskoðuð.

Á árinu 1995 var áfram unnið að gasmælingum, rannsókn á afdrifum brennisteinsvetnis, smáskjálftarannsóknnum, fjarkönnun, hæðar- og þyngdarmælingum, gaslosun og athugun á erlendum reglugerðum. Lokið var við langtíamælingar á gasi í Kröflu og á Nesjavöllum og skrifuð um þær skýrsla. Einnig var lokið mælingum á Írafossi og Korpu og sett upp mælistöð í Bjarnarflagi um haustið. Jafnframt var unnið að hæðar- og þyngdarmælingum á Kröflu-Námafjallssvæði og umhverfisúttekt á Námafjallssvæðinu. Skrifuð var skýrsla um grunnvatnsathuganir á Kröflusvæði frá árinu áður. Sett var upp samfelld skráning á grunnvatnshitastigi á tveimur stöðum á Námafjallssvæði, Grjótagjá og Stórugjá. Flogið var í þriðja sinn yfir jarðhitasvæði og þau mynduð á hitainnrauðu sviði og skrifaðar voru áfangaskýrslur um verkið. Verkfæng Umhverfisverksins var svipað og 1994, en minna var gert í rannsóknnum á óvirkjuðum svæðum.

Árið 1996 var lokið við gasmælingar og unnið úr þeim að hluta. Einnig var haldið áfram úrvinnslu hæðar- og þyngdarmælinga á Kröflu-Námafjallssvæði. Úrvinnsla fjarkönnunarmælinga hélt einnig áfram. Unnið var að umhverfisúttekt í Bjarnarflagi í samvinnu við Landsvirkjun. Svölítið var unnið við rannsóknir á óvirkjuðum svæðum, rannsóknir á úða og tæringu og grunnvatnsrannsóknir.

Á árinu 1997 hélt áfram úrvinnsla á gasmælingum og í fjarkönnunarverkefni. Rannsóknir á óvirkjuðum svæðum voru í nokkru meiri en tvö undanfarin ár, einkum vegna styrks frá Rannsóknarráði Íslands til rannsókna í Kverkfjöllum. Talsvert miklar rannsóknir fóru af stað á grunnvatnskerfum á Kröflu- Námafjallssvæði, einnig með styrk frá Rannsóknarráði Íslands. Úrvinnsla gagna í fjarkönnunarverkefni hélt áfram og kom út um það stöðuskýrsla. Haldinn var opinn kynningarfundur um verkefnið í október þar sem gerð var upp staða verkefnisins og kynntar helstu niðurstöður þess. Gefið var út út hefti með útdráttum erinda og er það viðhengi við þessa skýrslu.

4. KOSTNAÐUR

Yfirlit yfir kostnað við verkið frá og með árinu 1992 til ársloka 1997 er sýnt í töflu 1. Taflan sýnir ekki alveg réttan heildarkostnað rannsókna, því eigið framlag samvinnuaðila er nokkuð örugglega vanáætlað. Í það vantar framlagða vinnu og ýmsan kostnað, sem Orkustofnun hefur ekki gögn til að meta.

Í töflu 2 er sýnt uppgjör kostnaðar fyrir árið 1997 og eru stærstu verkefnin þar brotin meira upp. Við fjárhagsuppgjörið er ávallt nokkuð álitamál hvernig eigi að skipta verkþáttum milli ára og ekki verður hjá því komist að einhver skörun verði. Samstarfsaðilar eiga oft í erfiðleikum með að færa fjárveitingu til verkefnisins milli ára og því reynt að taka tillit til þessa þótt áætlaðri vinnu tímabilsins sé ekki að fullu lokið. Við uppgjörið hefur því verið leitast við að hafa með þá verkþætti sem samið var um að unnir yrðu á hverju ári og voru langt komnir um áramót, þótt vinnu lyki ekki að fullu fyrr en snemma á næsta ári.

Á árinu 1992 var heildarkostnaður verksins um 13,5 Mkr, sem var talsvert lægra en áætlað hafði verið. Ástæðan var sú að samningum var ekki lokið fyrr en undir mitt ár og dróst vinna fram á árið 1993, enda var þá raunkostnaður 3,5 Mkr yfir áætlun. Það stafaði reyndar líka af því að viðbótarverk voru tekin inn eftir frágang samnings.

Heildarkostnaður 1993 var 18,8 Mkr og var þá lokið við ýmsa verkþætti, sem ekki tókst að ljúka 1992 vegna þess hversu samningar drógust.

Heildarkostnaður verksins á árinu 1994 var um 18,2 Mkr. Á árinu 1995 hafði verið reiknað með auknu framlagi til óvirkjaðra svæða, sem ekki fékkst, og nam heildarkostnaður verksins það ár 15,8 Mkr. Árin 1996 og 1997 var unnið að því að ljúka sem flestum verkþáttum og lækkaði kostnaður því talsvert miðað við það sem var þegar verkefnið var í hámarki. Heildarkostnaður við verkefnið er nú orðinn um 84 mkr.

Tafla 1. Yfirlit yfir kostnað við verkið Umhverfisáhrif jarðhitanytingar 1997.

KOSTNAÐUR í þús. kr	1992	1993	1994	1995	1996	1997	Samtals
Verkháttur							
Umhverfisúttekt/Forverk	2.560	1.630		345	562	309	5.406
Almennt ,mótun, verkstjórn	1.600	2.870	2.250	2.460	2.171	2.508	13.859
Landmælingar	7.495	2.090	5.770	4.200	1.772	1.116	22.443
Grunnvatnsrannsóknir	160	55	260	125	124	1.949	2.673
Rannsókn á óvirkj. sv.	1.770	1.400	1.330	810	465	1.431	7.206
Mælingar á gasi		4.325	5.190	4.935	1.544	562	16.556
Athugun á úða og tæringu		290	225	290	291	154	1.250
Smáskjálftamælingar		2.250	995	280		37	3.562
Kortlagning gufupúða		865					865
Mat á gufustreymi		230	55	40	9		334
Fjarkönnun		2.500	2.040	1.550	1.625	2.066	9.781
Gaslosun		255	170				425
Ahrif sýrustigs á útfellingu		50					50
Samtals	13.585	18.810	18.285	15.035	8.563	10.132	84.410

Tafla 2. Uppgjör verkefnisins Umhverfisáhrif jarðhitanytingar 1997.

	Verknúmer	Tímar	Vinnukostn.	Annar kostn.	ALLS
Almennt	760 100	80	269.920	266.564	536.484
Verkefnisstj.,úttektarf. skýrslug.	760 100	455	1.781.325	189.869	1971.194
Umhverfisúttekt á Reykjanesi	760 141	84	283.416	25.119	308.535
Gasmælingar	760 2x1	165	556.710	4.806	561.516
Fjarkönnun	760 3x1	8	31.320	2.035.000	2.066.320
Úði og tæring	760 2x2	36	1.214.64	32.163	153.627
Hæðar og þyngdarmælingar	760 132	325	1.096.550	19.030	1.115.580
Smáskjálftarannsóknir	760-144	11	37.114		37.114
Rannsókn óvirkjaðra svæða	760 110	148	499.352	90.782	590.134
Rannsókn í Kverkfjöllum	760-111	175	590.450	250.889	841.339
Grunnvatnsrann. Nám-Krafla	760 133	178	600.572	1.348.095	1.948.667
SAMTALS		1.665	5.868.193	4.262.317	10.130.510

5. STAÐA EINSTAKRA VERKÞÁTTA UMHVERFISVERKS

Upprunalega verkefninu um Umhverfisáhrif jarðhitanytingar mun ljúka árið 1997 að frátöldum nokkrum langtímaverkefnum. Stærstu sérverkefnum, sem skilgreind voru í upphafi, er að mestu lokið. Heildarkostnaður hefur numið um 84 mkr auk ýmiss kostnaðar sem orkufyrirtækin hafa lagt í og ekki kemur fram í uppgjöri.

1. Umhverfisúttekt-núllgrunnsúttekt: Byrjað var á slíkri úttekt í svokölluðu forverki 1992, sem lauk með skýrslu 1993. Núllgrunnsúttekt var unnin fyrir Reykjanessvæði 1996-1997 og er skýrsla um það verk komin út. Vegna fyrirhugaðrar virkjunar í Bjarnarflagi lét Landsvirkjun gera umhverfisúttekt á þeirri framkvæmd og var mat á breytingum á grunnvatni og gasútsreymi samfara virkjun unnið af sérfræðingum Orkustofnunar innan "Umhverfisverks".

2. Umhverfisáhrif náttúrulegrar jarðhitavirkni: Þrátt fyrir niðurskurð fjárframlaga hefur verið unnið að úttekt á umhverfisáhrifum náttúrulegs jarðhita og tímaháðum eðlisbreytingum jarðhita á nokkrum jarðhitasvæðum, sem ætla má að verði virkjuð á næstu áratugum: (Þeistareykjum, Krýsuvík, Trölladyngju). Jafnframt þessu hefur verið unnið að úttekt á einu svæði, sem ekki er útlit fyrir að verði virkjað í bráð (Kverkfjöll). Þessi rannsókn er í eðli sínu langtímaverkefni, sem ekki hefur fyrirsjáanleg verklok. Skrifaðar hafa verið greinargerðir um staka verkþætti á hverju ári. Gerð hefur verið lausleg langtímaáætlun um rannsóknir á náttúrulegum breytingum á jarðhitasvæðum, er líklegt má telja að verði virkjuð á næstu áratugum og var gefin út skýrsla um það efni 1995 og gerð nákvæmari kostnaðaráætlun um tillögur fyrir nokkur svæði sem talin eru næst því að verða virkjuð.

3. Mælingar á gasi í andrúmslofti á virkjuðum og óvirkjuðum jarðhitasvæðum og í grennd við þau: Skammtímamælingar voru gerðar 1992-1993 á gastegundum í andrúmslofti á virkjunarsvæðum allra samstarfsaðila og í Hveragerði og auk þess á nokkrum óvirkjuðum jarðhitasvæðum, þ.e. á Ölkelduhálsi, Þeistareykjum og Krýsuvík. Gefin var út skýrsla um niðurstöður mælinganna. Gerðar hafa verið langtímamælingar á brennisteinsgastegundum um 4-6 mánaða skeið á gasi í andrúmslofti á virkjunarsvæðum allra samstarfsaðila, nema á Reykjanesi og skrifaðar um það skýrslur. Samstarfsverkefni Veðurstofu Íslands, Orkustofnunar og Umhverfissráðuneytis um rannsókn á afdrifum brennisteinsvetnis úr útstreymi jarðhitasvæða í andrúmslofti mun væntanlega ljúka á næstu mánuðum með líkangerð og úrvinnslu gagna frá mælingum á Írafossi og Kröflu og einnig er verið að gera tilraunir í samvinnu við Norrænu Eldfjallastöðina til þess að fá úr því skorið hve stór hluti brennisteinsvetnisins getur oxast í brennisteinstvíoxíð á tilteknum tíma við mismunandi aðstæður.

Könnun á tæringaráhrifum andrúmslofts á virkjunarstöðunum á mannvirki mun ljúka 1997. Gefnar hafa verið út skýrslur um niðurstöðurnar.

4. Athugun á erlendum reglugerðum um umhverfismál jarðhitavinnslu: Vinna við þetta verk hefur gengið hægt, en vonast er til að söfnun erlendra reglugerða um umhverfismál er varða jarðhitavirkjanir og upplýsingar um hvernig staðið er að umhverfisúttekt og eftirliti í orkuverum og úrvinnslu safnaðra gagna muni halda áfram og ljúka á næstu tveimur árum.

5. Þróun fjarkönnunaraðferða til umhverfissrannsókna: Í samvinnu við Merkjafræðistofu Verkfræðideildar Háskólans hefur verið unnið að þróun og notkun innrauðrar myndatöku á jarðhitasvæðum til að fylgjast með breytingum á varmaflæði. Verkefnið hófst á árinu 1993 og hafa öll vinnslusvæði samstarfsaðila verið mynduð þrívægis og einnig nokkur óvirkjuð svæði; Þeistareykir, Kverkfjöll, Krýsuvík, Trölladyngja, Ölkelduháls, Fremrinámur. Vinnu við verkefnið seinkaði nokkuð vegna fjárskorts, en lauk að mestu í ár. Komið hafa út sjö framvinduskýrslur og lokaskýrsla um þetta verkefni.

6. Mat á breytingu á náttúrulegu útstreymi gufu: Vinnu við þróun og prófun búnaðar til þess að mæla gufustreymi úr gufuaugum í samvinnu við Hitaveitu Reykjavíkur lauk að mestu á árinu 1995 og hefur komið út um það skýrsla.

7. Hæðar- og þyngdarmælingar á jarðhitasvæðum til þess að rannsaka áhrif massatöku: Unnið hefur verið að hæðar- og þyngdarmælingum á öllum virkjunarsvæðum samstarfsaðilanna. Á árinu 1995 var lokið fallmælingum á Kröflusvæðinu fyrir Landsvirkjun og verður úrvinnslu lokið á árinu 1997 og hefur þá Orkustofnun tekið þátt í kostnaði við að koma upp mælineti fyrir slíkar mælingar á öllum virkjunarsvæðum. Átaki í þessum rannsóknarþætti er því lokið. Ljóst er að gera þarf slíkar mælingar u.þ.b. fimm tals hvert ár í því mælineti, sem búið er að setja upp á hverjum stað, svo lengi sem virkjanirnar starfa. Eðlilegt er talið að mælingar þessar falli hér eftir alfarið undir rekstur viðkomandi virkjana og greiðist af þeim. Vegna mikils kostnaðar við hefðbundnar hæðarmælingar þyrfti að vinna að því að því að móta ódýrari aðferðir og koma þá einkum til greina GPS aðferðir og fjarkönnunartækni.

8. Rannsókn á smáskjálftavirkni á jarðhitasvæðum: Á árunum 1993-1994 var unninn fyrsti liður áætlunar um rannsókn og eftirlit með hugsanlegum áhrifum vinnslu og niðurdælingar á smáskjálftavirkni á jarðhitasvæðinu í Svartsengi, sem samin var 1992. Verkið var unnið í samvinnu við sérfræðinga á Raunvísindastofnun og kom út skýrsla um niðurstöður. Á árunum 1994-1996 þokaðist verkið nokkuð áfram og á árinu 1996 var stigið stórt skref fram á við þegar komið var upp þremur föstum jarðskjálftastöðvum á Reykjanesi. Vinna við verkið mun fjárfest á næstu árum.

9. Rannsóknir á grunnvatni: Unnið hefur verið að rannsóknnum grunnvatns á Hengilssvæði og í Kröflu. Gefin var út skýrsla um rannsóknir í Kröflu og gerð grunnvatnskorts á Hengilssvæði er lokið. Stefnt var að því að leggja grunn að framtíðareftirliti með grunnvatni á Kröflu og Námafjallssvæði og fékkst fjármagn til þess verks í ár og er verkefnið í fullum gangi og verður a.m.k. næstu tvö ár.

10. Mat á aðferðum til gaslosunar: Unnið hefur verið mun minna við þennan þátt en áætlað var. Hitaveita Reykjavíkur hafði unnið talsvert að þessu verkefni áður en *Umhverfisverkið* hófst og var áætlað að halda þeirri vinnu áfram innan ramma þess. Stefnt var að því að ljúka á árinu 1997 úttekt á þekktum leiðum til umhverfisvænnar losunar á gasi og stöðu málsins. Og safna upplýsingum um aðferðir til hreinsunar á gasi til vinnslu á hreinni kolsýru úr hveralofiti, þar sem slík iðnaðarnýting getur leitt til minna útstreymis koltvíoxíðs. Þessi verkefni biða en æskilegt væri að ljúka þeim síðar.

11. Tilraunir varðandi niðurdælingu affallsvatns: Rannsókn á áhrifum sýrustigs á útfellingu og útfellingarhraða í jarðsjó í niðurdælingarvatni í Svartsengi átti að hefjast 1993 og ljúka á árinu 1995, en frestast að hluta til vegna tæknilegra vandamála.

12. Rannsókn á myndun og útbreiðslu gufupúða í jarðhitageymum virkjunarsvæða: Gerðar voru tilraunir 1993 til að kortleggja gufupúða í Svartsengi með jarðsveiflumælingum. Prófuninni var ekki lokið, en gefin var út greinargerð um fyrsta áfanga hennar. TEM viðnámsmælingar er önnur aðferð, sem hugsanlega gæti nýst til þessa. Gildir svipuðu máli um þær og smáskjálftarannsóknir að þær eru kostnaðarsamt langtímaverk. Æskilegt væri að halda áfram með þessar rannsóknir á næstu árum.

6. NIÐURLAGSORÐ

Á þeim árum sem umhverfisverkefnið hefur staðið hefur uppistaða þess verið samvinnuverk milli virkjunaraðila háhitaorku. Upprunalega verkefninu mun ljúka árið 1997 að fráskildum fæinum langtímaverkefnum er munu standa eitthvað lengur. Ýmsir af stærri verkþáttum umhverfisverksins eru tengdir Alþjóðlegu samvinnuverkefni á vegum IEA (International Energy Agency) um rannsóknir á umhverfisáhrifum samfara nýtingu jarðhita og verða niðurstöður þeirra kynntar á alþjóðajarðhitaráðstefnunni í Japan árið 2000. Heildarkostnaður við verkefnið hefur numið um 84 mkr. Flestum stærstu sérverkefnum, sem skilgreind voru sem samvinnuverk við virkjunaraðila er lokið. Eins og gjarnan er með rannsóknarverkefni hafa sprottið upp ýmis ný verkefni í kjölfar upprunalega verkefnisins og munu þau væntanlega halda áfram sem sjálfstæð verkefni. Eins og fram hefur komið hér að framan væri æskilegt að halda áfram rannsóknum á mörgum þeim verkþáttum, sem unnið hefur verið að innan *Umhverfisverksins*. Ljúka þarf rannsóknum á afdrifum brennisteinsvetnis í andrúmslofti vegna þess hversu mikilvægt það er varðandi þörf á hreinsibúnaði við jarðhitavirkjanir og þar með orkukostnað. Einnig er mikilvægt að unnið verði áfram að úttekt á þekktum leiðum til umhverfisvænnar losunar á gasi og aðferðum til hreinsunar á gasi til vinnslu á hreinni kolsýru úr hveralofthiti til að minnka útstreymi koltvísýrings. Áframhaldandi rannsóknir á smáskjálftavirkni á jarðhitasvæðum eru mikilvægar og munu fyrirsjáanlega halda áfram á næstu árum. Vegna mikils kostnaðar við hefðbundnar hæðarmælingar þyrfti að vinna að því að því að móta ódýrari aðferðir og koma þá einkum til greina GPS aðferðir og fjarkönnunartækni. Æskilegt er að koma á eftirliti með breytingum á jarðhitasvæðum, virkjuðum og óvirkjuðum, með fjarkönnunaraðferðum.

Langtímaáætlanir, sem gerðar voru um ítarlegar rannsóknir á óvirkjuðum svæðum og núllgrunnsúttekt á virkjuðu svæðunum hafa ekki gengið eftir. Hvað virkjuðu svæðin varðar þá varð niðurstaðan sú að virkjunaraðilar vildu ekki leggja í mikinn kostnað nema fyrir dyrum stæðu nýjar framkvæmdir. Rannsóknir á óvirkjuðum svæðum hafa verið í lágmarki undanfarin tvö ár vegna skorts á fjármagni, þrátt fyrir að allir aðilar samvinnuverkefnisins séu sammála um mikla nauðsyn þess að stórauka rannsóknir og eftirlit með óvirkjuðum svæðum vegna framtíðarvirkjana. Afla þarf grunnupplýsinga um núverandi ástand svæðanna og eðlilegar sveiflur til að byggja á mat á hugsanlegum breytingum í kjölfar vinnslu. Einnig er eðlilegt að frummat á umhverfisáhrifum fyrirhugaðrar virkjunar liggi fyrir við endanlegt val á milli virkjunarstaða. Í slíku frummati er lagt til að miðað sé við 20 MW raforkuvirkjun, þar sem talið er hagkvæmast að byrja með 20-40 MW virkjanir á háhitasvæðum og stækka þær síðan í ljósi reynslu af vinnslu.

Teknar hafa verið saman lauslegar tillögur um umhverfisrannsóknir á þeim háhitasvæðum, sem næstar eru taldar standa virkjun. Lagt er til að gerð verði frumúttekt á rannsóknarþörf á tveimur svæðum á hverju ári næstu þrjú ár. Lauslega áætlaður árlegur kostnaður við rannsóknir þessar er 6 Mkr á ári. Í ljósi þess verði gerðar tillögur um framhaldsrannsóknir og eftirlit með breytingum á náttúrulegri virkni í framtíðinni. Jafnframt verði haldið áfram því eftirliti, sem þegar er hafið á nokkrum óvirkjuðum jarðhitasvæðum. Niðurstöður þessara rannsókna munu síðar nýtast til að forgangsraða virkjun svæðanna á tíma.

Núverandi virkjunaraðilar eiga erfitt með að kosta rannsóknir á svæðum, sem óvíst er að þeir munu nokkru sinni nýta. Ríkisvaldið þarf því að koma inn og kosta þessar rannsóknir og endurkrefja síðan þá aðila sem svæðin virkja um rannsóknarkostnað, þegar að virkjun kemur á sama hátt og gert er, þegar vatnsorkurannsóknir eiga í hlut.

7. SKÝRSLUR, GREINAR OG GREINARGERÐIR UM UMHVERFISVERKIÐ

Ritverk eru flokkuð í efnisflokka 1-12 samkvæmt skilgreiningu í inngangi og kafla 2. Rit sem eru almenn eðlis, áætlanir eða yfirlit, hafa merkinguna (0).

Axel Björnsson og Hjálmar Eysteinnsson, 1998. Breytingar á landhæð við Kröflu 1974-1995. Samantekt á landhæðarmælingum. OS-98002. (Í útgáfu). (0)

Ásgrímur Guðmundsson, 1993. Ástand holu AB-02 í Búrfellshrauni. Orkustofnun Greinargerð ÁsG-93/09.3s. (9)

Benedikt Steingrímsson og Valgarður Stefánsson, 1993. Námafjall-Krafla: Hitamælingar til kvörðunar á innrauðum myndum. Orkustofnun Greinargerð BS/VS-93-02, 2s. (5)

Bryndís Brandsdóttir, Páll Einarsson, Knútur Árnason og Hrefna Kristmannsdóttir. Smáskjálfta og bylgjubrotsmælingar í tengslum við niðurdælingu affallsvatns í jarðhitasvæðið við Svartsengi sumarið 1993. Samvinnuverkefni Raunvísindastofnunar Háskólans, Orkustofnunar og Hitaveitu Suðurnesja um umhverfisáhrif jarðhitavinnslu. Orkustofnun, OS-94016/JHD-05, Raunvísindastofnun Háskólans, RH-03-94, 28 s. (8)

Gretar Ívarsson, Magnús Sigurgeirsson, Einar Gunnlaugsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1993. Mælingar á brennisteinsgösum í andrúmslofti. Styrkur brennisteinsdíoxíðs við Svartsengi og Kröflu. Samvinnuverk Orkustofnunar, Hitaveitu Suðurnesja og Landsvirkjunar. Orkustofnun, OS-95025/JHD-18 B, 34 s. (2)

Guðrún Þóra Pálsdóttir, 1992. Umhverfisáhrif jarðhitavirkjana. Staða gagnasöfnunar. Orkustofnun Greinargerð GÞP-92/01, 2s. (1)

Guðrún Þóra Pálsdóttir, 1992. Mælingar á loftmengun í Svartsengi. Orkustofnun Greinargerð GÞP-92/02, 3s. (3)

Gunnar Þorbergsson og Guðmundur H. Vigfússon, 1993. Fallmælingar fyrir Hitaveitu Suðurnesja 1992. Orkustofnun Greinargerð GÞ, GHV-93/01, 11 s. (7)

Halldór Ármannsson, 1992. Umhverfisverkefni. Krafla, Námafjall Sérverk 1993. Orkustofnun Greinargerð HÁ-92/02, 2s. (0)

Halldór Ármannsson, 1993. Um framkvæmd umhverfisúttektar. Orkustofnun Greinargerð HÁ-93/01, 2s. (1)

Halldór Ármannsson, 1994. CO₂ útblástur frá jarðhitavirkjunum 1980-1994. Orkustofnun Greinargerð HÁ-94/03, 2s. (3)

Halldór Ármannsson, 1995. Um affallsvatn frá Kröfluvirkjun. Niðurstöður athugana á holu AB-02, Búrfellshrauni. Samvinnuverk Orkustofnunar og Landsvirkjunar. OS-95046/JHD-30 B, 14s. (9)

Halldór Ármannsson and Hrefna Kristmannsdóttir, 1992. Geothermal Environmental Impact. Geothermics, 21, 869-880. (0)

Halldór Ármannsson, 1997. Reykjanes. Forkönnun vegna mats á umhverfisáhrifum. Unnið fyrir Hitaveita Suðurnesja. OS-97031, 58s. (1)

Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Guðný Þ. Pálsdóttir og Árni Jón Reginsson, 1993. Áhrif vinnslu jarðhita á umhverfið. Framvinduskýrsla um forverk og mótun samvinnuverkefnis. Samstarfsverkefni Landsvirkjunar, Hitaveitu Reykjavíkur, Hitaveitu Suðurnesja og Orkustofnunar. Orkustofnun, OS-93034/JHD-09, 239 s. (0)

Helgi Torfason, 1995. Breytingar á jarðhita sunnan Kleifarvatns, Krisuvík. Athugun 14. ágúst 1995. Orkustofnun Greinargerð, HeTo-95/06, 2s. (2)

Helgi Torfason, Magnús Ólafsson og Kristján H. Sigurðsson, 1993. Kverkfjöll. Rannsókn jarðhitasvæðisins 1992 og 1993: Framgangur útvinnu. Orkustofnun Greinargerð, HeTo/MÓ/KHS-93/04, 5s. (2)

Helgi Torfason, Magnús Ólafsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1993. Kverkfjöll. Rannsókn jarðhitasvæðisins 1994: Greinargerð um stöðu rannsókna og gildi þeirra. Orkustofnun Greinargerð, HeTo/MÓ/HK-93/05, 6s. (2)

Helgi Torfason og Halldór Ármannsson, 1995. Athuganir á jarðhita á Þeistareykjum. Sýnataka og vettvangsathuganir 11-13. nóvember 1995. Orkustofnun Greinargerð, HeTo/HÁ-95/07, 3s. (2)

Hjálmar Eysteinnsson, Gunnar Þorbergsson og Ólafur G. Flóvens, 1991. Landhæðar- og þyngdarmælingar við Svartsengi og á Reykjanesi. Orkustofnun Greinargerð, HE-GP-ÓGF-91/01, 10 s. (7)

Hjálmar Eysteinnsson, 1993. Hæðar- og þyngdarmælingar á utanverðum Reykjanesskaga 1992. Samvinnuverkefni Hitaveitu Suðurnesja og Orkustofnunar. Orkustofnun OS-93029/JHD-08, 53 s. (7)

Hjálmar Eysteinnsson, 1994. Áætlun um þyngdarmælingar á Kröflusvæðinu 1994. Orkustofnun Greinargerð HE-94/02. (7)

Hjálmar Eysteinnsson, 1994. Eftirlit með áhrifum vinnslu á jarðhitasvæðunum í Kröflu og Bjarnarflagi með hæðar- og þyngdarmælingum. Orkustofnun Greinargerð HE-94/03. (7)

Hjálmar Eysteinnsson og Theodor Theodorsson 1994. Endurskoðuð áætlun um eftirlit með áhrifum vinnslu á jarðhitasvæðin í Kröflu og Bjarnarflagi með hæðar- og þyngdarmælingum. Orkustofnun Greinargerð HE/ThTh-94/04. (7)

Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson, 1990. Umhverfisáhrif jarðhitanytingar. Orkustofnun Greinargerð, HK-HÁ-90/02, 6s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1991. Sérverkefni um umhverfisáhrif jarðhitanytingar. Orkustofnun Greinargerð, HK-9103, 3s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, Halldór Ármannsson, Benedikt Steingrímsson, Sverrir Þórhallsson, Ásgrímur Guðmundsson, Knútur Árnason, 1991. Sérverkefni um umhverfisáhrif jarðhitanytingar. Orkustofnun Greinargerð, HK, HÁ, BS; SP, ÁG, KÁ-9104, 5s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1992. Átaksverkefni um rannsókn á umhverfisáhrifum jarðhitanytingar, Orkustofnun Greinargerð, HK-92/05, 2s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1992. Staða samvinnuverks um rannsókn á umhverfisáhrifum jarðhitanytingar, Orkustofnun Greinargerð, HK-92/09. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1992. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1993 fyrir Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð HK-92/07, 4s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1992. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1993 fyrir Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð HK/08, 3s. (0)

- Hrefna Kristmannsdóttir og Sverrir Þórhallsson, 1992. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1993 fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð HK/SP-92/12, 3s. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1993. Áætlun 1993 vegna verksins umhverfisáhrif jarðhitanytingar - Tillögur að sérverkum unnum í sameiningu af öllum samstarfsaðilum Greinargerð, HK-94/02, 4s. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1993. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Verkþættir í ársáfangi 1993 fyrir Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð HK/08, 3s. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir og Ásgrímur Guðmundsson, 1993. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1994 fyrir Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð HK/ÁG-05, 5s. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir og Benedikt Steingrímsson, 1993. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi fyrir Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð HK/BS-07, 3s. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif jarðhitanytingar - Sérverk um rannsóknir á umhverfisáhrifum. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/02, 4s. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/02. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/03. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/04. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Reykjavíkur í lok júlí. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/05. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Suðurnesja í lok júlí. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/06. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/09. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/10. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/11. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/14. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/15. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Staða verkefnisins hjá Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð, HK-94/16. (0)
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Staða og langtímaáætlun verkefnisins Umhverfisáhrif jarðhitanytingar- Orkustofnun Greinargerð, HK-94/01. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1995 fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð HK-94/16, 4s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Verkþættir í ársáfangi 1995 fyrir Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð HK-94/13, 3s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1995 fyrir Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð HK-94/12, 2s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir og Sverrir Þórhallsson, 1994. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1994 fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð HK/SP-08, 7s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Verkþættir í ársáfangi 1996 fyrir Landsvirkjun. Orkustofnun Greinargerð HK-9509, 2s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Samvinnuverkefni um umhverfisáhrif jarðhitavinnslu. Tillaga um gasmælingar í Námafjalli. Orkustofnun Greinargerð HK-95/02, 2s. (3)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Umhverfisáhrif Jarðhitanytingar- Sérverk um rannsóknir á umhverfisáhrifum. Orkustofnun Greinargerð, HK-95/05, 2s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Greinargerð vegna samvinnuvers um þróun aðferða við notkun fjarinnrauðra mynda til að fylgjast með breytingum á jarðhitavirkni á yfirborði jarðhitasvæða. Orkustofnun Greinargerð HK-95/03, 1s. (5)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1995 fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð HK-95/07, 3s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Tillögur um verkþætti í ársáfangi 1996 fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð HK-95/08, 4s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1995. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Lýsing verkþátta í ársáfangi 1996 fyrir Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun Greinargerð HK-9507, 3s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1996. Uppgjör verkefnisins Umhverfisáhrif jarðhitanytingar. Staða verks og fjárhagsuppgjör fyrir árið 1995. Orkustofnun Greinargerð, HK-96/01, 4s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, 1996. Samvinnuverkefni um Umhverfisáhrif Jarðhitavinnslu. Lýsing verkþátta í ársáfangi 1996 fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Orkustofnun Greinargerð HK-9607, 2s. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir and Halldór Ármannsson, 1995. Environmental impact of geothermal utilization in Iceland. Proceedings of the world geothermal Congress 1995, Florence, Italy, 2731-2734. (0)

Hrefna Kristmannsdóttir, Halldór Ármannsson, Sverrir Þórhallsson, Helgi Torfason, Magnús Ólafsson, Hjálmar Eysteinnsson, Knútur Árnason, Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundsson, 1995. Umhverfisrannsóknir á þeim háhitasvæðum sem næst standa virkjun vegna stóriðjuáforma. OS-95058/JHD-38 B, 10s. (2)

- Hrefna Kristmannsdóttir, Magnús Sigurgeirsson, Halldór Ármannsson and Hreinn Hjartarson, 1997. Emission, dispersion and reaction of H_2S in steam from geothermal fields in Iceland. Proceedings of Nedo Geothermal Symposium, Sendai Japan, 261-269. (3)
- Knútur Árnason, 1992. Yfirborðsjarðeðlisfræði á háhitasvæðum í vinnslu. Rannsókn á hæðarbreytingum, gufupúðum og skjálftavirkni. Orkustofnun Greinargerð KÁ-92/6, 9s. (7,8,12)
- Knútur Árnason, 1992. Smáskjálftamælinet á háhitasvæðum í vinnslu. Orkustofnun Greinargerð KÁ-92/7, 6s. (8)
- Knútur Árnason, 1993. Tilraun til að kanna gufupúða í Svartsengi. Orkustofnun Greinargerð KÁ-93/5, 9s. (12)
- Kolbeinn Árnason, Ásmundur Eiríksson, Jón Atli Benediktsson og Vilhjálmur Þorvaldsson, 1994. Þróun mæliaðferða fyrir reglubundnar fjarkönnunarrannsóknir á Íslandi. Styrkur nr. 93027. Framvinduskýrsla til Rannsóknarráðs ríkisins. Upplýsinga og merkjafræðistofa Háskólans 1994, F94121, 53 s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1994. Hitamyndir af jarðhitasvæðum. Fjarkönnun á hitainnrauðu sviði úr flugvél 1993. I. Reykjanes, Eldvörp, Svartsengi, Kleifarvatn og Hengill. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1994. UMH F941001, 48s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1994. Hitamyndir af jarðhitasvæðum. Fjarkönnun á hitainnrauðu sviði úr flugvél 1993. II. Námafjall, Krafla og Þeistareykir. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1995. UMH F941001, 38s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1995. Hitamyndir af jarðhitasvæðum. Fjarkönnun á hitainnrauðu sviði úr flugvél 10. nóv.1995. I. Reykjanes, Eldvörp, Svartsengi og Sandfell-Trölladyngja. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1995. UMH F951201, 19s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1995. Hitamyndir af jarðhitasvæðum. Fjarkönnun á hitainnrauðu sviði úr flugvél 10. nóv.1995. II. Krýsuvík, Brennisteinsfjöll og Hengill. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1995. UMH F951202, 38s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1996. Hitamyndir af jarðhitasvæðum. Fjarkönnun á hitainnrauðu sviði úr flugvél 29. sept.1995. III. Námafjall og Krafla. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1995. UMH F960101, 30s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1996. Hitamyndir af jarðhitasvæðum. Fjarkönnun á hitainnrauðu sviði úr flugvél 29.sept.1995. IV. Askja, Fremrinámur og Þeistareykir. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1995. UMH F950102, 34s. (5)
- Kolbeinn Árnason, 1997. Kortlagning hitabreytinga á jarðhitasvæðum með fjarkönnun úr flugvél. Upplýsinga- og merkjafræðistofa Háskólans 1997. UMH F97091. (5)
- Magnús Ólafsson, Magnús Á. Sigurgeirsson og Sverrir Þórhallsson, 1997. Áhrif úða og tæringar á fjórum háhitasvæðum. OS-97069.(3)
- Magnús Á. Sigurgeirsson, 1995. Mæling á H_2S og SO_2 í andrúmslofti við Kröflustöð. Bráðabirgðaniðurstöður. Greinargerð, MÁS-Janúar, 1995. (3)
- Magnús Á. Sigurgeirsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Undirbúningsvinna fyrir rannsóknir á afdrifum brennisteinsvetnis í útstreymi frá jarðhitasvæðum. Orkustofnun Greinargerð, MÁS/KHS/HK-94/01, 3s. (3)

Magnús Á. Sigurgeirsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1996. Mælingar á brennisteinsgösum í andrúmslofti. Styrkur brennisteinsvetnis og brennisteinstvíoxíðs á Nesjavöllum og í Bjarnarflagi. Samvinnuverk Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur og Landsvirkjunar. OS-96019/JHD-10B, 24s. (3)

Magnús Á. Sigurgeirsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1996. Mælingar á brennisteinsgösum í andrúmslofti. Styrkur brennisteinsvetnis og brennisteinstvíoxíðs við Korpu og Írafoss. Samvinnuverk Orkustofnunar Veðurstofu Íslands og Umhverfisstofu Íslands. OS-96020/JHD-11B, 58s. (3)

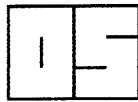
Magnús Á. Sigurgeirsson og Sverrir Þórhallsson, 1996. Úði og tæring við orkuverin á Nesjavöllum og við Kröflu. Samvinnuverk Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur og Landsvirkjunar. OS-96023/JHD-12 B. (3)

VIÐAUKI: Úttættir frá kynningarfundum um niðurstöður rannsóknarverkefnisins
Umhverfisáhrif jarðhitanytingar

KYNNINGARFUNDUR
UM NIÐURSTÖÐUR
RANNSÓKNARVERKEFNISINS

UMHVERFISÁHRIF JARÐHITANÝTINGAR

Átaksverk
ORKUSTOFNUNAR
um rannsóknir á
umhverfisáhrifum jarðhitanýtingar
í samvinnu við
HITAVEITU REYKJAVÍKUR
HITAVEITU SUÐURNESJA
LANDSVIRKJUN
OG
UMHVERFISRÁÐUNEYTIÐ



Fundurinn verður haldinn í Rúgbrauðsgerðinni,
Borgartúni 6, Reykjavík
þann 2. október, 1997, kl. 9.10 - 18.00.

Fundarstjóri
Helgi Bjarnason deildarstjóri á Landsvirkjun

**Fimmtudaginn 2. október 1997, kl. 9¹⁰-18 í Rúgbrauðsgerðinni,
Borgartúni 6, Reykjavík.**

DAGSKRÁ

Fundarstjóri: Helgi Bjarnason deildarstjóri á Landsvirkjun

- 9¹⁰-9²⁰ Setning: Magnús Jóhannesson ráðuneytisstjóri Umhverfissráðuneytis.
9²⁰-9⁴⁰ Umhverfisáhrif jarðhitanytingar: Halldór Ármannsson og Hrefna Kristmannsdóttir, Orkustofnun.
9⁴⁰-10⁰⁰ Umhverfisrannsóknir orkufyrirtækja: Albert Albertsson, Hitaveita Suðurnesja.
10⁰⁰-10³⁰ Umfang átaksverks um umhverfisrannsóknir á íslenskum jarðhitasvæðum: Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson, Orkustofnun.

10³⁰-11⁰⁰ Kaffihlé

- 11⁰⁰-11²⁰ Brennisteinsvetni í andrúmslofti á jarðhitasvæðum: Einar Gunnlaugsson og Gretar Ívarsson, Hitaveita Reykjavíkur.
11²⁰-11⁴⁰ Langtímamælingar á brennisteinsgastegundum í andrúmslofti á jarðhitasvæðum: Hrefna Kristmannsdóttir, Magnús Á. Sigurgeirsson og Kristján H. Sigurðsson, Orkustofnun.
11⁴⁰-12⁰⁰ Líkanareikningar og hvörfun brennisteinsvetnis: Hreinn Hjartarson, Veðurstofu Íslands.
12⁰⁰-12²⁰ Áhrif úða og tæringar á mannvirki á jarðhitasvæðum: Magnús Á. Sigurgeirsson, Sverrir Þórhallsson og Magnús Ólafsson, Orkustofnun og Einar Gunnlaugsson, Hitaveitu Reykjavíkur.

12²⁰-13³⁰ Hádegishlé

- 13³⁰-13⁵⁰ Hæðar- og þyngdarbreytingar á jarðhitasvæðum: Hjálmar Eysteinnsson, Orkustofnun.
13⁵⁰-14¹⁰ Þróun fjarkönnunaraðferða til að kortleggja hitabreytingar á jarðhitasvæðum: Kolbeinn Árnason, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands.
14¹⁰-14³⁰ Áhrif niðurdælingar á smáskjálftavirkni jarðhitasvæða. Dæmisaga úr Svartsengi: Bryndís Brandsdóttir og Páll Einarsson, Raunvísindastofnun Háskóla Íslands og Knútur Árnason og Hrefna Kristmannsdóttir, Orkustofnun.
14³⁰-14⁵⁰ Skjálftamælanet á Reykjanesi: Kristján Ágústsson, Ragnar Stefánsson, Bergur H. Bergsson og Sigurður Th. Rögnvaldsson, Veðurstofu Íslands.
14⁵⁰-15¹⁰ Tilraun til að kanna suðusvæði í Svartsengi með jarðsveiflumælingum: Knútur Árnason, Orkustofnun.

15¹⁰-15³⁰ Kaffihlé

- 15³⁰-15⁴⁵ Aðferðir til mælinga á gufustreymi úr gufuaugum: Gestur Gíslason, Hitaveitu Reykjavíkur.
15⁴⁵-16¹⁵ Rannsóknir á breytingum í virkni á óvirkjuðum jarðhitasvæðum: Halldór Ármannsson, Helgi Torfason, Magnús Ólafsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir, Orkustofnun.
16¹⁵-16⁴⁰ Samanteknar niðurstöður og tillögur um framhaldsrannsóknir: Eiríkur Bogason, framkvæmdastjóri Samorku.

UMHVERFISÁHRIF JARÐHITANÝTINGAR

Halldór Ármannsson og Hrefna Kristmannsdóttir
Orkustofnun

Helstu umhverfisáhrif jarðhitanytingar eru: Útlitsbreytingar á yfirborði jarðar, eðlisbreytingar umhverfis, hávaði, varmamengun,efnamengun, menningar- og félagsleg áhrif.

Undir útlitsbreytingar flokkast jarðrask og önnur landspjöll, sem fylgja mannvirkjagerð, en einnig breytingar á virkni hvera og lauga. Jarðhitanyting á sér þær málsmætur að athafnasvæði er lítið, nýting er iðulega nálægt vinnslu og bor er fjarlægður að loknu verki. Nátengd er umgengni um svæðin eftir að virkjun er hafin. Borholur, sem ekki á að nota strax, er unnt að hylja og þær sem alls ekki á að nota, þarf að steypa í.

Landsig getur skemmt mannvirki, breytt farvegum o.fl. Nátengd er breyting á vatnsborðsstöðu. Í einstökum tilfellum er hætt á breytingum á jarðskjálftavirkni í sambandi við massatöku eða sér í lagi niðurdælingu, þar sem henni er beitt við losun affalls og endurnýjun vatnskerfa.

Töluverður hávaði getur fylgt framkvæmdum eins og jarðborunum, en mestum hávaða valda þó blásandi háhitaholur. Er honum haldið í skefjum með hljóðdeyfingu.

Varmamengun getur orðið af manna völdum, þegar afrennsli frá virkjun kemst í önnur vatnskerfi, en varnabreytingar geta einnig fylgt náttúrulegum ferlum eins og gerðist við Námafjall 1977, þegar grunnvatn í nágrenni jarðhitasvæðisins hitnaði verulega. Niðurdæling er áhrifaríkust til að losna við varma frá vatnsfasa, en gufa er kæld með vatni.

Helstu loftmengunarvaldar eru koltvíoxíð, sem er gróðurhúsalofttegund, og brennisteinsvetni. Útblástur koltvíoxíðs frá jarðhitavirkjunum og verksmiðjum er lítill í samanburði við hliðstæðan útblástur frá starfsemi sem nýtir brennslu jarðefna. Að auki er verið að færa til koltvíoxíð í hringrás þess en ekki að mynda nýtt eins og gert er við brennslu. Hlutur jarðhita í hringrás koltvíoxíðs er lítill. Brennisteinsvetni er eitrað í stórum skömmtum.Útblástur þess frá jarðhitastarfsemi er þó yfirleitt mjög staðbundinn, og áhyggjur fremur hafðar af hinni óþægilegu lykt þess en af eituráhrifum. Kvartanir og reglugerðir um hámarksstyrk í andrúmslofti eru mjög tengdar streymi þess til andrúmslofts fyrir virkjun. Við brennslu jarðefna er brennisteinsútblastur á formi brennisteinsvíoxíðs, sem er mjög mengandi, veldur t.d sýringu jarðvegs ("súru regni"). Með tíma getur brennisteinsvetni breyst í brennisteinsvíoxíð og þarf að fylgjast vel með því. Geta má þess þó að heildarbrennisteinsútblastur vegna vinnslu jarðhita er umtalsvert minni en styrkur brennisteins í útblæstri vegna hliðstæðrar olíunotkunar. Auk þessara tveggja lofttegunda er ástæða til að fylgjast með styrk lofttegunda, sem eru í minni mæli í jarðhitagasi, þ.e. metani (gróðurhúsalofttegund), ammoníaki, arseni, kvikasilfri (eitruðum lofttegundum), bóri (skaðlegu gróðri) og radoni (geislavirkri lofttegund).

Í affallsvatni er aðallega gætt að brennisteinsvetni, arseni og bóri ásamt kvikasilfri og öðrum hættulegum þungmálum. Affarasælasta leiðin til að losna við það er niðurdæling í jarðhitakerfið, sem auk þess hefur þann kost að lengja líftíma kerfisins. Skemmdir geta og orðið af völdum vatnsúða, sem berst frá virkjunum og getur valdið kísailútfellingum á gróðri og skaða af völdum bórs.

Menningar- og félagsleg áhrif tengjast röskun atvinnulífs í byggðarlögum, þar sem virkjanir eru reistar. Mikil atvinna skapast meðan á byggingu stendur og dregur að sér fólk frá hefðbundinni atvinnustarfsemi, sem getur borið af varanlegan skaða. Fjöldi aðkomufólks dvelur tímabundið á staðnum og gerir kröfur til aukinnar þjónustu. Svæðið opnast til ferðamennsku vegna bættra vega og aukinnar þjónustu. Loks getur starfsemin valdið röskun á náttúruminum og fornminjum

UMHVERFISRANNSÓKNIR ORKUFYRIRTÆKJA

Albert Albertsson
Hitaveitu Suðurnesja

Orkufyrirtækin sem að samvinnuverkefninu standa svo og önnur orkufyrirtæki hafa um áratuga skeið staðið að umfangsmiklum umhverfisrannsóknum og umhverfisvöktun hvert á sínu sviði. Rannsóknir og vöktun á umhverfi athafnarymis fyrirtækjanna hafa til þessa ekki verið samræmdar, hvorki hvað varðar það sem rannsakað hefur verið, né hvernig eða hversu nákvæmlega staðið hefur verið að athugunum. Rannsóknirnar hafa að hluta verið unnar af fyrirtækjunum sjálfum, rannsóknarstofnunum svo sem Orkustofnun, Raunvísindastofnun Háskólans o.fl. og sjálfstæðum fyrirtækjum. Rannsóknum hefur verið lýst og niðurstöður þeirra birtar í skýrslum, sem margar hverjar eru opinberar og aðgengilegar almenningi. Því má segja að orkufyrirtækin hafi unnið fyrir opnum tjöldum og þar með lagt grunninn að nokkuð heilstæðri umhverfisgát, sem til fyrirmyndar má hafa þegar kemur til þess að ný jarðhitasvæði eru virkjuð.

Ótvíræður er vilji orkufyrirtækjanna til þess að raska sem minnst láði, legi og lifríki, og jafnframt hafa gát á öllum breytingum sem óhjákvæmilegar eru þegar virkjað er. Þennan vilja og rétt hugarfar sýna rannsóknir síðustu áratuga, þátttaka fyrirtækjanna í þessu stóra samvinnuverkefni sem nú er kynnt, og stofnun umhverfisráðs Samorku. Þessi umfangsmikla og árangursríka samvinna Orkustofnunar, Umhverfisráðuneytis og orkufyrirtækjanna þriggja hefur lagt grunninn að skilgreindri og samræmdri umhverfisvernd og umhverfisgát og þar með einnig lagt grunninn að vinnubrögðum að hætti evrópskra umhverfisstaðla. Skilningur manna á umhverfisáhrifum jarðhitavirkjana hefur aukist og þau skilgreind og flokkuð. Samvinnuverkefnið leggur til mestallan efnivið í ramma laga og reglugerða um mat á umhverfisáhrifum jarðhitavirkjana og nauðsynlega umhverfisgát þeirra. Vandað samræmt mat á umhverfisáhrifum jarðhitavirkjana og umhverfisgát þeirra, sem og viðtæk fagleg samstaða, gerir umhverfisfiskatta, sem minnst hefur verið á opinberlega að undanförmu, með öllu óþarfa, og eykur þar með tiltrú innlendra sem og erlendra aðila á íslenskum jarðhitavirkjunum.

Aðferðir við mat á umhverfisáhrifum jarðhitavirkjana og umhverfisgát þeirra verður að vera í stöðugri þróun. Með stöðugri þróun og með íslenskar jarðhitavirkjanir sem vettvang þróunar er lagður traustur grunnur að útflutningi á þekkingu, reynslu, nýjum aðferðum, tækjum og tólum. Stefna ber markvisst að útflutningi á þeirri reynslu sem íslenskur jarðhitaiðnaður og íslenskir rannsóknaraðilar afla á sviði umhverfismála, og ber opinberum aðilum að stuðla að og hvetja til útflutnings.

Gerð er grein fyrir helstu rannsóknum Hitaveitu Suðurnesja síðastliðin tuttugu ár á umhverfisáhrifum virkjunarinnar í Svartsengi og viðbrögð við þeim. Lýst er jákvæðum umhverfisáhrifum virkjunarinnar í Svartsengi og Sjóefnavinnslunnar á Reykjanesi. Gerð er grein fyrir auknum fjölda ferðamanna vegna sérstöðu orkuversins, fjölbættrar starfsemi við Bláa lónið og framleiðslu heilsusalts á Reykjanesi.

UMFANG ÁTAKSVERKS UM UMHVERFISRANNSÓKNIR Á ÍSLENSKUM JARÐHITASVÆÐUM

Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson
Orkustofnun

Orkustofnun hafði á árinu 1991 frumkvæði að því að koma á fót átaksverkefni í rannsóknum á áhrifum vinnslu háhita á umhverfið. Leitað var samstarfs við helstu virkjunaraðila háhita, og er *Umhverfisverkið* samvinnuverkefni Hitaveitu Suðurnesja, Hitaveitu Reykjavíkur, Landsvirkjunar og Orkustofnunar. Umhverfisráðuneytið gerðist fljótlega aðili að *Umhverfisverkinu* og á fulltrúa í samstarfsnefnd um það. Fjöldi aðila hafa tekið þátt í vinnu við rannsóknarverkefnið m.a. Veðurstofan, Raunvísindastofnun H.Í., Verkfræðistofnun H.Í. og Norræna Eldfjallastöðin.

Lög um mat á umhverfisáhrifum framkvæmda voru í undirbúningi á þessum tíma og var talið æskilegt að virkjunaraðilar hefðu frumkvæði að því að skipuleggja umhverfisrannsóknir á jarðhitasvæðum og tækju þátt í að móta þær kröfur sem settar yrðu um þau umhverfismál er virkjanir varða. Samstarfssamningur um verkefnið var undirritaður 3. mars 1992 að undangenginni nokkurra mánaða kynningu og undirbúningsvinnu. Verkefnið var skilgreint sem átakswerk til 5 ára þótt það sé í eðli sínu langtímaverk. Í samstarfssamningi er markmið verkefnisins skilgreint á eftirfarandi hátt: "Markmiðið með samningi þessum er að rannsaka ítarlega áhrif háhitasvæða á umhverfið og hver breyting verði þar á við virkjun svæðanna til framleiðslu á raforku og/eða varmaorku. Jafnframt þessu að rannsaka ýmsar leiðir til að draga úr mengun samfara nýtingu háhitasvæða".

Í upphafi voru skilgreind forgangsverkefni, sem æskilegt væri að vinna innan ramma *umhverfisverksins*.

Forgangsverkefnin skiptast í eftirfarandi verkþætti:

Almenn atriði, skilgreining og viðmið

1. Umhverfisúttekt, svonefnd núllgrunnsúttekt, á öllum svæðum sem þegar hafa verið virkjuð.
2. Rannsóknir á umhverfisáhrifum náttúrulegrar jarðhitavirkni.
3. Mælingar á gasi í andrúmslofti á virkjuðum og óvirkjuðum jarðhitasvæðum og í grennd við þau.
4. Athugun á erlendum reglugerðum varðandi umhverfismál jarðhitavinnslu.

Þróun aðferða til eftirlits með áhrifum jarðhitavinnslu á umhverfi

5. Þróun fjarkönnunaraðferða til umhverfisrannsókna.
6. Mat á breytingu á náttúrulegu útstreymi gufu.
7. Hæðar- og þyngdarmælingar á jarðhitasvæðum til þess að rannsaka áhrif massatöku.
8. Rannsókn á smáskjálftavirkni á jarðhitasvæðum.
9. Rannsóknir á grunnvatni.
10. Mat á aðferðum til gaslosunar.
11. Tilraunir varðandi niðurdælingu affallsvatns.
12. Rannsókn á myndun og útbreiðslu gufupúða í jarðhitageymum virkjunarsvæða

Heildarkostnaður við *Umhverfisverkefnið* er nú orðinn um 80 mkr og hefur Orkustofnun greitt um 45 % kostnaðar en samvinnuaðilarnir afganginn. Í töflunni hér að neðan er samantekt kostnaðar fyrir helstu verkþættina, en þess ber að geta að eigin vinna samvinnuaðila er ekki að fullu metin í uppgjörinu. Umfangsmestu verkþættirnir hafa verið hæðar- og þyngdarmælingar, rannsóknir á gasi og þróun fjarkönnunaraðferða til eftirlits með jarðhitasvæðum.

Kostnaður við *Umhverfisverkið* 1992-1997

Verkefnið	UMHVERFISÁHRIF JARÐHITANÝTINGAR						
KOSTNAÐUR í þús. kr	1992	1993	1994	1995	1996	1997	Samtals
Verkpáttur							
Umhverfisúttekt/Forverk	2560	1630		345	562	277	5374
Kynning, mótun, verkstjórn	1600	2870	2250	2460	2171	1014	12365
Landmælingar	7495	2090	5770	4200	1772	1041	22368
Grunnvatnsrannsóknir	160	55	260	125	124	630	1354
Rannsókn á óvirkj. sv.	1770	1400	1330	810	465	861	6636
Mælingar á gasi		4325	5190	4935	1544	562	16556
Athugun á úða og tæringu		290	225	290	291	154	1250
Smáskjálftamælingar		2250	995	280		51	3576
Kortlagning gufupúða		865					865
Mat á gufustreymi		230	55	40	9		334
Fjarkönnun		2500	2040	1550	1625	2035	9750
Gaslosun		255	170				425
Ahrif sýrustigs á útfellingu		50					50
Samtals	13585	18810	18285	15035	8563	6625	8093

Fyrsti verkþátturinn, sem unnið var að í *Umhverfisverkinu* var núllgrunnsúttekt á umhverfisþáttum í svokölluðu forverki 1992, sem lauk með skýrslu 1993. Önnur verkefni tengd umhverfisúttekt hafa verið vinna við mat á hugsanlegum breytingum á grunnvatni og gasústreymi samfara fyrirhugaðri virkjun í Bjarnarflagi og núllgrunnsúttekt á Reykjanessvæði, sem lokið var með skýrslu 1997.

Gott yfirlit hefur fengist um styrk, innbyrðis tengsl og dreifingu brennisteinsgasa á jarðhitasvæðunum og er nú verið að tengja veðurgögn og mælingar á brennisteinsvetni og brennisteinstvíoxíði á virkjunarsvæðunum. Skammtíamælingar voru gerðar á virkjunarsvæðum allra samstarfsaðila og í Hveragerði og auk þess á nokkrum óvirkjuðum jarðhitasvæðum, þ.e. á Ölkelduhálsi, Þeistareykjum og Krýsuvík. Gerðar hafa verið langtíamælingar, um 4-6 mánaða skeið, á gasi í andrúmslofti á virkjunarsvæðum allra samstarfsaðila, nema á Reykjanesi, og skrifaðar um þær skýrslur. Verið er að vinna úr gögnum frá mælingum á Írafossi og Korpu með hjálp loftdreifingarlíkana og einnig er verið að setja upp tilraunir í samvinnu við Norrænu Eldfjallastöðina til þess að fá úr því skorið hve stór hluti brennisteinsvetnis getur oxast í brennisteinstvíoxíð á tilteknum tíma við mismunandi aðstæður. Könnun á áhrifum gass og gufu í andrúmslofti á virkjunarstöðunum á mannvirki mun ljúka 1997.

Unnið hefur verið mun minna við verkþáttinn, mat á aðferðum til gaslosunar en áætlað hafði verið. Hitaveita Reykjavíkur hafði unnið talsvert að þessu verkefni áður en *Umhverfisverkið* hófst og var áætlað að halda þeirri vinnu áfram innan ramma þess. Stefnt var að því að gera ítarlegri úttekt á þekktum leiðum til umhverfisvænnar losunar á gasi. Einnig var á áætlun að safna upplýsingum um aðferðir til hreinsunar á gasi til vinnslu á hreinni kolsýru úr hveralofti, þar sem slík iðnaðarnýting getur leitt til minnkunar á útstreymi koltvísýrings. Þessi verkefni frestast en æskilegt væri að ljúka þeim síðar.

Einnig er að ljúka verkefni um þróun á fjarkönnunaraðferðum til að fylgjast með langtímabreytingum í varmaflæði og virkni á jarðhitasvæðum. Verkefnið hófst 1993 og hafa öll vinnslusvæði samstarfsaðila verið mynduð þrívægis og einnig nokkur óvirkjuð svæði tvisvar til þrisvar þ.e. Þeistareykir, Kverkfjöll, Krýsuvík, Trölladyngja, Ölkelduháls og Fremri námur. Unnið verður úr öllum mælingunum að einhverju leyti, en sérstök svæði verða valin til nákvæmari könnunar og samanburðar við rannsóknir á jörðu niðri. Lokaskýrsla þessa verks er í vinnslu.

Á árinu 1995 var þróaður og prófaður búnaður til þess að mæla gufustreymi úr gufuaugum í samvinnu við Hitaveitu Reykjavíkur.

Unnið hefur verið að hæðar- og þyngdarmælingum á öllum virkjunarsvæðum samstarfsaðilanna. Unnið hefur verið úr eldri gögnum og er búið er að skilgreina mælinet og eðlilegt eftirlit með þessum þætti á hverjum stað.

Á árunum 1993-1994 var hafin rannsókn á hugsanlegum áhrifum vinnslu og niðurdælingar á smáskjálftavirkni á jarðhitasvæðinu í Svartsengi. Verkið var unnið í samvinnu við Raunvísindastofnun Háskólans, sem á næstu árum hélt nokkuð áfram með verkið á eigin kostnað. Á síðasta ári var unnið að áframhaldi þessa verks og setti Veðurstofa Íslands upp þrjá fasta jarðskjálftamæla á Reykjanesi.

Unnið hefur verið að rannsóknnum á grunnvatni á Hengilssvæði og í Kröflu. Gerð grunnvatnaskorts á Hengilssvæði er lokið. Gefin var út skýrsla um rannsóknir í Kröflu 1996. Styrkur til frekari grunnvatnsrannsókna á Kröflu og Mývatnssvæði fékkst 1997 fékkst frá Rannsóknarráði og mun það verkefni standa a. m. k. næstu tvö ár.

Unnið hefur verið nokkuð að rannsókn á áhrifum sýrustigs á útfellingu og útfellingarhraða í jarðsjó í niðurdælingarvatni í Svartsengi.

Árið 1993 voru gerðar tilraunir til að kortleggja gufupúða í Svartsengi með jarðsveiflumælingum.

Lítið fjármagn hefur fengist til að efla umhverfisrannsóknir á óvirkjuðum háhitasvæðum þrátt fyrir samdóma álit samstarfsnefndar um *Umhverfisverkið* og forsvarsmanna Orkustofnunar um nauðsyn þess. Nokkuð hefur þó verið unnið að úttekt á umhverfisáhrifum náttúrlegs jarðhita og tímaháðum eðlisbreytingum jarðhita á nokkrum jarðhitasvæðum, sem ætla má að verði virkjuð á næstu áratugum (Þeistareykjum, Krýsuvík, Trölladyngju) og á einu svæði, sem ekki er útlit fyrir að verði virkjað í bráð (Kverkfjöll). Þessi rannsókn er í eðli sínu langtímaverkefni og verklok þess ekki fyrirsjáanleg. Gerð hefur verið langtímaáætlun um rannsóknir á náttúrulegum breytingum á jarðhitasvæðum, er líklegt má telja að verði virkjuð á næstu áratugum. Vegna aukinnar áherslu á umhverfisþætti við val á staðsetningu og forgangsroðun virkjana er mikilvægt að þessu verkefni verði haldið áfram.

BRENNISTEINSVETNI Í ANDRÚMSLOFTI Á JARÐHITASVÆÐUM

Einar Gunnlaugsson og Gretar Ívarsson
Hitaveitu Reykjavíkur

Sagt er frá niðurstöðum mælinga Orkustofnunar og Hitaveitu Reykjavíkur á gasi í andrúmslofti árið 1993. Niðurstöðurnar voru birtar í skýrslu sem nefnist: Mælingar á gasi í andrúmslofti, OS-93074/JHD-16. Mældur var styrkur brennisteinsvetnis (H_2S), brennisteinsdíoxíðs (SO_2) og kvikasilfurs (Hg) á níu háhitasvæðum, Hveragerði, Nesjavöllum, Ölkelduhálsi, Krísuvík, Svartsengi, Reykjanesi, Kröflu, Námafjalli og Þeistareykjum.

Orkustofnun mældi styrk þriggja gastegunda. Safnað var tvisvar einn sólarhring í senn. Sýnin voru síðan mæld á rannsóknarstofu. Mælingar Hitaveitu Reykjavíkur á brennisteinsvetni voru gerðar með Jerome 621 mælitæki sem gefur kost á mörgum mælingum á skömmum tíma og þar með dreifingu brennisteinsvetnis í andrúmslofti á stóru svæði.

Samkvæmt mælingum Orkustofnunar eru hæstu mæligildi fyrir H_2S frá Nesjavöllum $200 \mu g/m^3$ (160 ppb), en einnig allhá í Bjarnarflagi, $83 \mu g/m^3$ (66,6 ppb) og Kröflu, um $45 \mu g/m^3$ (36,1 ppb). Á Reykjanesi og Ölkelduhálsi mældust rúm $30 \mu g/m^3$ (24,1 ppb) og í Námaskarði og Þeistareykjum um $20 \mu g/m^3$ (16 ppb). Annars staðar mældist minna en $10 \mu g/m^3$ (8ppb).

Samkvæmt mælingum Hitaveitu Reykjavíkur á H_2S eru einstök mæligildi á bilinu 0-522 ppb og meðalgildi mælistaða á bilinu 0 – 498 ppb. Meðaltöl svæða voru á bilinu 2,1 – 40,2 ppb H_2S og meðaltal allra svæða 15,7 ppb. Lægsta meðalgildi fyrir brennisteinsvetni reyndist vera í Hveragerði (2,1 ppb) og litlu hærra á Nesjavöllum og Kröflu, 6,0 og 6,4 ppb. Á Reykjanesi, Ölkelduhálsi og Svartsengi á bilinu 10,2 – 16,4 ppb, og á Þeistareykjum og Krísuvík á bilinu 22,5 – 24,4 ppb. Hæst reyndist meðalgildið vera á Námafjallssvæðinu um 40,2 ppb.

Samkvæmt dreifingu og flatarmáli jafnstyrktarlína er áætlað að afgösun H_2S sé mest á Nesjavallasvæðinu eða sem samsvarar 88 faldri afgösun Hveragerðissvæðisins, þar sem afgösun er minnst. Næst mest er hún á Námafjallssvæðinu (67 föld) en síðan koma Krafla (28 föld), Þeistareykir (22 föld) og Svartsengi (2 föld).

Flest mæligild fyrir SO_2 liggja nærri óvissumörkum greiningaraðferðarinnar, eru í flestum tilvikum lægri en $5 - 6 \mu g/m^3$. Í öllum tilfellum er styrkur SO_2 og H_2S vel undir viðmiðunarmörkum leyfilegu hámarki mengunnar.

Mælingar á kvikasilfri benda til þess að styrkur þess sé í öllum tilfellum lægri en $6 ng/m^3$, rétt við óvissumörk greiningaraðferðar. Er styrkur kvikasilfurs svipaður og styrkur þess utan jarðhitasvæða, svo sem yfir haf- og strandsvæðum.

Einkennandi er fyrir mælingarnar, einkum hvað varðar SO_2 og H_2S er hve breytileiki er mikill á styrk sýna sem tekin eru á sama söfnunarstað. Er greinilegt að afstaða söfnunartækja til gufuúttreymis og ríkjandi vindáttar á meðan á söfnun stendur ræður hér mestu.

LANGTÍMAMÆLINGAR Á BRENNISTEINSGASTEGUNDUM Í ANDRÚMSLOFTI Á JARÐHITASVÆÐUM

Hrefna Kristmannsdóttir, Magnús Sigurgeirsson og Kristján H. Sigurðsson
Orkustofnun

Brennisteinsvetni (H_2S) er ríkjandi brennisteinsgastegund í jarðhitagufu og eru rúm sex þúsund tonn af því losuð árlega í íslenskum jarðhitavirkjunum. Það er eitruð gastegund í háum styrk, en vegna þynningar er hættu af því bundin við nánasta umhverfi útstreymis. Það er einnig mjög hvarfgjarn og í oxandi umhverfi getur það myndað brennistein(S), brennisteinstvíoxíð (SO_2) eða brennisteinssýru (H_2SO_4). Skiptar skoðanir eru um hver afdrif brennisteinsvetnisins eru í andrúmsloftinu. Mikill brennisteinn myndast sjáanlega umhverfis gufuaugu við oxun brennisteinsvetnis. Margir telja að meginhluti þess brennisteinsvetnis, sem berst með lofti lengra frá jarðhitasvæðunum oxist einnig yfir í brennistein, sem falli til jarðar með úrkomu. Hann safnist þar fyrir í jarðvegi og verði smám saman að málmsöltum, sem séu alls ekki skaðleg. Aðrir telja að brennisteinsvetnið oxist aðallega yfir í brennisteinstvíoxíð. Þetta atriði skiptir verulegu máli vegna alþjóðlegra samninga og reglugerða og við mat á því hvort nauðsynlegt sé að setja upp hreinsibúnað fyrir jarðhitavirkjanir.

Mælingar á brennisteinsgastegundum í andrúmslofti yfir jarðhitasvæðum, bæði óvirkjuðum og vinnslusvæðum hafa verið einn aðalverkþátturinn í “Umhverfisverkinu” og sömuleiðis rannsókn á dreifingu þeirra og hvörfum í andrúmsloftinu. Skammtíamælingar leiddu í ljós mikinn breytileika á styrk gastegunda á sama stað og að til að fá haldgóðar upplýsingar um grunngildi þessara gastegunda þyrfti að mæla samfelt í langan tíma (í nokkra mánuði a.m.k.) og gera veðurathuganir samhliða. Eftir prófun mismunandi mæliaðferða var mælt um 4-6 mánaða skeið á öllum virkjunarsvæðunum, nema á Reykjanesi. Samskonar mælingar voru gerðar við Korpu og á Írafossi til að kanna dreifingu og hvörfun brennisteinsvetnis. Mælistaðir voru valdir með hliðsjón af niðurstöðum skammtíamælinganna. Inntak fyrir loft var í um 2 m hæð og þaðan var loftinu dælt stöðugt gegnum síur og það rúmmáls-mælt. Skipt var um síur á sólarhringsfresti. Brennisteinsvetninu var safnað í síu gegnvætta af silfurnítratlausn ($AgNO_3$), þar sem það binst sem silfursúlfíð (Ag_2S) og brennisteinstvíoxíðinu á síu gegnvætta með kalíumhýdroxíðlausn (KOH) og síðan oxað yfir í sulfat (SO_4) og greint sem slíkt.

Niðurstöður mælinganna sýndu að styrkur brennisteinsvetnis var að meðaltali mjög svipaður á öllum jarðhitasvæðunum, en hæstur á Nesjavöllum.

Meðaltöl og spönn mælinga á brennisteinsvetni (H_2S) og brennisteinstvíoxíði (SO_2) Styrkur í $\mu g/m^3$

Staður	Meðalstyrkur H_2S	Styrkspönn H_2S	Meðalstyrkur SO_2	Styrkspönn SO_2
Nesjavellir	13	9,5-15,2	1,7	1,0-2,9
Svartsengi	10	6,6-11,6	1,0	0,8-1,3
Krafla	11	9,6-12,1	2,4	2,1-2,8
Námafjall	11	10,5-11,4	5,5	2,5-8,3

Þessi gildi eru stærðargráðu lægri en hæst mældist í skammtíamælingunum. Meðaltöl af styrk brennisteinstvíoxíðs eru mjög breytileg á milli svæða, en skýra má hæstu gildin með utanaðkomandi mengun. Svo virðist sem óverulegur hluti brennisteinsvetnisins oxist yfir í brennisteinstvíoxíð inni á jarðhitasvæðunum sjálfum jafnvel á kyrrum dögum þegar lítil hreyfing er á lofti. Í úrkomu hverfur brennisteinsvetni að mestu úr lofti, en styrkur brennisteinstvíoxíðs virðist lítið háður úrkomu. Frumtúlkun á mælingum við Korpu og á Írafossi bendir heldur ekki til mikillar oxunar á þeirri leið, en úrvinnsla gagna, líkangerð og tilraunir í samvinnu við Norrænu Eldfjallastöðina mun væntanlega skýra frekar hve stór hluti brennisteinsvetnisins getur oxast í brennisteinstvíoxíð á tilteknum tíma við mismunandi aðstæður.

LÍKANAREIKNINGAR OG HVÖRFUN BRENNISTEINSVETNIS

Hreinn Hjartarson, Veðurstofu Íslands.

Helstu niðurstöður:

Skoðaðar hafa verið niðurstöður mælinga sem fram fóru á tímabilinu frá því í september 1994 þar til í desember 1995, á magni brennisteinsvetnis og brennisteinsdíoxíðs. Mælistaðirnir voru að Korpu við Reykjavík og að Írafossi í Grímsnesi. Tilgangur mælinganna var að varpa nokkru ljósi á dreifingu og afdrif brennisteinsvetnisins frá Nesjavallasvæðinu. Ljóst er að mun viðameira mælinet hefði þurft til að fá niðurstöður sem gæfu skýr svör við spurningunni um hvörfun brennisteinsvetnisins yfir í SO_2 en það er mjög mikilvægt atriði í umhverfismálaumræðunni.

Við dreifingarútreikninga eru notuð föst gildi fyrir útblásturinn, 6,9 kg/mín að vetrarlagi en 4,1 kg/mín að sumarlagi. Notað er Gaussískt reiknilíkan frá bandarískum aðila. Það tekur tillit til stöðugleika loftins, vindhraða og hitastigs ásamt eiginleikum þeirrar lofttegundar sem um er að ræða.

Með líkanareikningum má sýna fram á að styrkur brennisteinsvetnis á mælistöðunum er oft afleiðing af flutningi vetnisins frá Nesjavöllum án hvörfunar yfir í brennisteinsdíoxíð. Styrkur brennisteinsdíoxíðs að Írafossi er mjög lágur og langtímamælingar sýna enga aukningu þrátt fyrir verulega aukningu á útblæstri frá Nesjavöllum. Magn SO_2 að Korpu er að jafnaði lægra en í Reykjavík og engin fylgni er milli styrks brennisteinsvetnis og brennisteinsdíoxíðs hvorki að Írafossi eða á Korpu. Í mörgum tilvikum má sjá að úrkoma hefur nokkur áhrif á styrk brennisteinsvetnisins að Korpu en nokkur misbrestur var á skráningu úrkomu að Nesjavöllum meðan á mælingum stóð. Hvarfhraði efnaferlisins sem oxar brennisteinsvetnið yfir í SO_2 er mjög breytilegur eftir aðstæðum og er þar fyrst og fremst um að ræða hve oxandi umhverfið er. Það magn koldíoxíðs sem í útblæstrinum er, ásamt brennisteinsvetninu og vatnsgufu, veldur frekar súru umhverfi. Því má ætla að hraði útskolunar úr andrúmsloftinu sé að jafnaði til muna meiri en hvarfhraðinn.

ÁHRIF ÚÐA OG TÆRINGAR Á JARÐHITASVÆÐUM

Magnús Á. Sigurgeirsson, Sverrir Þórhallsson og Magnús Ólafsson, Orkustofnun.
Einar Gunnlaugsson, Hitaveitu Reykjavíkur

Greint er frá athugunum á úða og tæringu á fjórum háhitasvæðum, Nesjavöllum, Kröflu, Námafjalli og Svartsengi á árunum 1994-1997. Til að mæla tæringu málma voru notaðar plötur úr jární, kopar og áli. En til úðamælinga voru notaðir speglar. Plöturnar voru festar upp á tréstaure, fjórar af hverri gerð á hvern staur. Fimm staurar voru settir upp á Nesjavöllum og við Kröflu en sex á hinum stöðunum. Athugunartíminn var um eitt ár. Til að mæla úða og tæringu voru plöturnar vigtaðar fyrir og eftir notkun og fundið út hvort um þyngdaraukningu eða minnkun var að ræða. Eftir próftímann kom í ljós að járn- og koparplöturnar voru verulega tærðar. Járnplöturnar voru allar ryðgaðar og höfðu í sumum tilvikum klofnað í ryðflögur. Á koparplötunum hafði myndast veðrunarhúð, í sumum tilfellum það mikil að hún flagnaði af. Álplöturnar voru lítið tærðar, en á þeim voru þó yfirleitt smáir mattir dýlar. Á speglunum mátti í sumum tilfellum sjá ljósa örsmáa úðadíla en almennt voru ekki mikil merki um úða. Til að kanna hversu mikil tæringin á járninu var í reynd var veðrunarhúð (ryðið) leyst upp af nokkrum plötum og síðan reiknað út hversu mikil þynning þeirra var. Einnig voru flögur af koparskífum greindar í röntgentæki til að finna út hvaða ummyndunarsteindir höfðu myndast. Niðurstöðurnar sýna að járnskífurnar léttust í flestum tilvikum. Eftir að ryðið hafði verið leyst upp af plötunum og þær síðan vigtaðar aftur kom í ljós að plöturnar frá Nesjavöllum höfðu þynnst u.þ.b. tvöfalt meira en þær frá Kröflu, eða 0,090 mm/ári á móti 0,047 mm/ári. Ástæður fyrir þessu er ekki að fullu ljósar en nefnd skulu þó tvö atriði sem skipt geta máli. Mælingar hafa leitt í ljós að afgösun á H_2S er um þrefalt meiri við Nesjavelli en Kröflu. Ekki er ólíklegt að það flyti fyrir tæringu járnsins. Einnig má benda á að sjávarúða gætir án efa meira við Nesjavelli en við Kröflu. Áhrif seltu á járn þarf vart að tíunda hér. Kanna þyrfti þessa þætti betur. Koparskífurnar ýmist léttust eða þyngdust. Í þeim tilvikum sem létting átti sér stað er greinilegt að veðrunarhúðin hefur flagnað af plötunum. Röntgengreining á veðrunarhúðinni leiðir í ljós að um er að ræða steindirnar, cuprite (CuO), posnjakite og brochantite, sem eru koparsúlfatsteindir, og svo covellite (CuS). Koparsúlfatsteindirnar virðast vera meira ráðandi við Kröflu en Nesjavelli. Er það í góðu samræmi við mælingar á brennisteinsgösum í andrúmslofti en þær leiddu í ljós að styrkur brennisteinsdíoxíðs (SO_2) er um 50 % meiri við Kröflu en Nesjavelli. Staðfesta röntgengreiningar að brennisteinsgös eiga stóran þátt í tæringu koparsins. Í Kröflu og á Nesjavöllum varð örlítil þyngdaraukning á áli og speglum. Í Svartsengi er einkennandi hversu mismikil tæringin er á milli staure. Mælist þarna mesta tæring á jární í þessum athugunum. Smávægileg þyngdarlétting varð á áli og speglum. Við Námafjall var þyngdarbreyting mest á járn- og koparplötum sem voru við Hverarönd. Þar kemur fram mesta mælda þyngdarlétting á kopar. Mesta mælda tæring á áli kemur einnig fram við Hverarönd. Speglar léttast lítillega. Þær athuganir sem hér hefur verið greint frá benda til að tæring málma sé mjög háð afstöðu til gufuústreymis- og gasústreymisstæða á virkjunarsvæðum, s.s. við orkuver, kæliturn og frárennslisrásir, svo eitthvað sé nefnt. Til dæmis kemur skýrt fram að tæring á kopar er mest við Hverarönd þar sem gas- og gufuústreymi er mikið og jafnframt kemur fram að tæringin minnkar með fjarlægð frá hverasvæðinu. Tæring á jární og kopar á Nesjavöllum var mest við stöðvarhús og við Kröflu var hún mest við kæliturn. Í Svartsengi var tæring á jární og kopar mest við bunustokk, þar sem jarðsjór rennur frá orkuverinu. Einnig kemur fram að veður skiptir máli hvað tæringu varðar, einkum úrkoma og ríkjandi vindátt. Sem dæmi má nefna að við Nesjavelli varð þyngdaraukning mest á járnplötum sem snéru á móti suðri og ennfremur mest létting á plötum sem snéru á móti norðri. Þær athuganir sem hér hefur verið greint frá benda til að með þessum einföldu mælingum megi fá haldgóða mynd af tæringu og úða á jarðhitasvæðum, virkjuðum sem óvirkjuðum.

Hæðar og þyngdarbreytingar á jarðhitasvæðum

Hjálmar Eysteinnsson, Orkustofnun

Tilgangur hæðar og þyngdarmælinga á jarðhitasvæðum er að fylgjast með umhverfisáhrifum vegna vinnslu úr þeim. Þegar jarðhitavökva er dælt upp úr jörðinni minnkar þrýstingur og veldur samþjöppun bergsins og landssigi. Ef jarðhitavökvinn nær ekki að andurnýjast nægjanlega hratt veldur það lækkun í þyngdarsviði vegna þess massa sem hverfur. Því gefa þessar mælingar mikilvægar upplýsingar um ástand og stærð jarðhitakerfisins.

Hér á landi er reglulega fylgst með þremur háhitasvæðum með þessum hætti, það er í Svarsengi-Reykjanesi, á Nesjavöllum og Ölkelduhálsi, og í Kröflu. Miðað er við að hvert svæði sé mælt á að minsta kosti fimm ára fresti.

Á Reykjanesi hefur land sigið á um 100 km² svæði. Mest er sigið við Svartsengisvirkjun þar sem land hefur sigið um 155 mm frá 1975 fram til 1992 er síðast var hæðarmælt. Þetta samsvarar 10 mm árssigi að meðaltali. Landsig var mest í upphafi vinnslunnar (14 mm/ári, 1975-1982), en á seinni árum hefur dregið úr sigráðanum (7 mm/ári, 1987-1992). Við jarðhitakerfið á Reykjanesi hefur land sigið mest um 40 mm, sem samsvarar 5 mm/ári. Þyngdarmælingarnar sýna yfirleitt nokkra þyngdarminnkun frá Svartsengi og út á Reykjanesi eða sem samsvarar 5-8 µgal/ári. Við virkjunarsvæðið í Svarsengi er þyngdarlækkunin um 80 µgal frá upphafi mælinga sem samsvarar 20 m niðurdrætti vatnsborðs, miðað við 10% poruhluta bergs.

Á Nesjarvallarsvæðinu hefur land sigið á takmörkuðu svæði umhverfis virkjunarsvæðið, mest um 45 mm á tímabilinu frá 1984 til 1994. Það landsig hefur einkum átt sér stað frá 1987, sem gefur um 6 mm sig á ári. Á Ölkelduhálsi hefur mælt landris, millli árunna 1994-1996, mest um 60 mm. Óverulegar þyngdarbreytingar eru á Nesjarvallarsvæðinu fram til 1994, en þá mældist yfirleitt þyngdarlækkun upp á 50 µgal, en mest er hún um 150 µgal. Ekki er hægt að skýra þessa miklu þyngdarlækkun með massatöku vegna vinnslu á Nesjavöllum. Til þess nær þyngdarminnkunin yfir of stórt svæði og eins er hún ekki áberandi mest við virkjunarsvæðið. Hugsanlega er hér um breytingar á grunnvatnsborði að ræða, en 50 µgal minnkun þýðir um 10-15 m vatnsborðslækkun, miðað við 10% poruhluta.

Á Kröflusvæðinu hafa orðið verulegar breytingar í hæð og þyngd samfara Kröflueldum. Þar hefur land risið um all að 3 metra, og annarstaðar sigið um rúman metra. Frá 1989, þegar landrisið náði hámarki, og fram til 1995, þegar síðast var mælt, hefur land sigið, mest um 250 mm. Á þessu tímabili kemur fram sigdæld umhverfis vinnslusvæði Kröfluvirkjunar, með mesta sig um 190 mm, sem samsvarar um 30 mm sigi á ári. Að því best er séð eru mældar þyngdarbreytingar eingöngu tengdar Kröflueldum. Óverulegar þyngdarbreytingar eru á vinnslusvæði Kröfluvirkjunnar frá 1986 og fram til 1995.

Samanburður á mældum hæðarbreytinum á Svartengis- og Kröflusvæðunum, mældar annarsvegar með hefðbundnum aðferðum, og hinsvegar með gervitungla radarmælingum (SAR), sýna mjög gott samræmi. Gervitungla mælingarnar gætu því innan fárra ára komið að einhverju leyti í staðinn fyrir kostnaðarsamar hefðbundnar hæðarmælingar.

ÞRÓUN FJARKÖNNUNARAÐFERÐA TIL AÐ KORTLEGGJA HITABREYTINGAR Á JARÐHITASVÆÐUM

Kolbeinn Árnason

Árið 1993 var efnt til sameiginlegs rannsóknaverkefnis Upplýsinga- og merkjafræðistofu Háskólans (UMH), Orkustofnunar, Landsvirkjunar og Hitaveitna Reykjavíkur og Suðurnesja um notkun fjarkönnunartækni við að mæla hitastig á yfirborði jarðhitasvæða og fylgist með og kortleggja breytingar sem verða á virkni þeirra með tímanum.

Árin 1993, 1994 og 1995 var flogið yfir jarðhitasvæðin á Suðvesturlandi, frá Reykjanesi að Hengli og einnig nokkur háhitasvæði á Norðurlandi og varmageislun þeirra mæld með hitaskanna sem komið hefur verið upp hjá UMH. Eftir mælingarnar 1993 voru gerðar miklar endurbætur á hitaskannanum og enn frekari breytingar 1994. Næmni tækisins er nú um það bil 0,1°/grágildi og hægt er að mæla með því á öllu hitasviðinu upp fyrir 1000°C.

Nokkur töf varð á seinni hluta verkefnisins sem lýtur að því að kortleggja breytingar sem verða á varmageislun jarðhitasvæða með tímanum. Í því skyni þarf að vinna sameiginlega úr mælingum sem gerðar eru af sama svæðinu á mismunandi tímum. Forsenda fyrir slíkri úrvinnslu er sú að geómetríá myndefnisins sem safnað hefur verið í tvö eða fleiri skipti af sama svæðinu sé sambærileg, en alltaf er nokkur bjögun í myndunum og hún er mismunandi frá einu skipti til annars. Skannanum er komið fyrir í flugvélinni með þeim hætti að hann er festur við gólf vélarinnar og hreyfist því eins og hún meðan á mælingu stendur. Óreglulegar hreyfingar flugvélarinnar koma fram sem bjögun í geómetríu þess myndefnis sem verið er að safna og þessa bjögun þarf að leiðrétta áður en hægt er að bera gögnin saman með stafrænum hætti.

Nú hefur verið þróaður sérstakur hugbúnaður til þess að laga geómetríu einnar myndar að annarri (eða korti) þannig að nákvæmur samanburður myndefnisins í tölvm er mögulegur. Þessi hugbúnaður hefur reynst mjög vel og gerir hann kleift að sýna á myndrænan hátt hvar hitastigsbreytingar hafa orðið og jafnframt hversu mikil hitnunin eða kólnunin er á hverjum stað.

Tilgangurinn með geómetrískum leiðréttingum hitamyndanna er sá að sýna fram á hvar og hversu miklar breytingar hafa orðið á yfirborðshita jarðhitasvæða milli tveggja mælinga, en þessar leiðréttingar eru tímafrek vinna. Ef hægt er að ganga úr skugga um að engar hitabreytingar hafa orðið á ákveðnum svæðum án þess að gera þessar leiðréttingar er því hægt að spara sér þessa vinnu.

Með því að bera saman tölfræði hitamynda sem teknar eru af sama svæðinu á mismunandi tíma er hægt að einangra þá staði þar sem einhverjar breytingar hefa orðið á varmageisluninni. Þannig er hægt að takmarka geómetrískar leiðréttingar á gögnunum við slíka staði, staðsetja breytingarnar nákvæmlega og reikna út hversu miklar þær eru. Með þessu móti er hægt að gera reglubundið eftirlit með jarðhitasvæðum mun ódýrara án þess að minnka gildi þeirra upplýsinga sem fást úr hverju mælingaflugi.

Tilkoma leiðréttingarhugbúnaðar fyrir geómetríu hitamyndanna breytir því ekki að núverandi fyrirkomulag skannans í flugvélinni er óheppilegt. Ákjósanlegra væri að koma honum fyrir með þeim hætti að hann sé óháður öllum hreyfingum flugvélarinnar og haldi ákveðinni stöðu miðað við jörð meðan mæling fer fram. Það er að sjálfsögðu gerlegt en kostar peninga, sem hingað til hafa ekki legið á lausu.

ÁHRIF NIÐURDÆLINGAR Á SMÁSKJÁLFTAVIRKNI JARÐHITASVÆÐA: DÆMISAGA ÚR SVARTSENGI.

Bryndís Brandsdóttir og Páll Einarsson

Raunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 5, 107 Reykjavík.

Knútur Árnason og Hrefna Kristmannsdóttir

Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík.

Við niðurdælingu affallsvatns í námasvæði ber að hafa í huga möguleg áhrif hennar á spennusvið bergsins og þar með skjálftavirkni viðkomandi svæðis. Niðurdæling kaldara vatns í heitt berg skapar mismunaspennu í berginu og hækkandi vökvaprýstingur lækkar brotmörk bergsins, jafnvel svo að það brotni í smáskjálfta. Þar sem vatn undir þrýstingi leitar strax út í nýmyndaðar sprungur má nota smáskjálftavirknina til þess að rekja slóð affallsvatns neðanjarðar á meðan á niðurdælingu stendur.

Erlendar rannsóknir sýna að nokkuð algengt er að smáskjálftavirkni aukist í tengslum við niðurdælingu í jarðhitasvæði. Dæmi um slík jarðhitasvæði eru Salton Sea og Geysers í Kaliforníu, Tongonan og Puhagan á Filippseyjum, Wairakei á Nýja-Sjálandi, og Larderello, Travale og Latera á Ítalíu. Reynsla manna víða um heim hefur þó sýnt að oft reynist mjög erfitt að meta samband smáskjálftavirkni og niðurdælingar og að nær ómögulegt er að gera sér fyrirfram grein fyrir áhrifum niðurdælingar. Þó er ljóst að niðurdælingarþrýstingur hefur mikil áhrif á smáskjálftavirknina. Sem dæmi má nefna að smáskjálftavirkni í Wairakei jarðhitasvæðinu jókst til til muna árið 1984 þegar affallsvatni var dælt í svæðið undir 20-30 bara þrýstingi við holutopp. Hins vegar hafði niðurrennsli affallsvatns á árunum 1988 og 1989 engin marktæk áhrif á sama svæði.

Vorið 1993 voru settir upp færanlegir jarðskjálftamælar umhverfis Svartsengi með það að meginmarkmiði að kanna smáskjálftavirkni innan jarðhitasvæðisins og skrásetja hugsanlegar breytingar á henni, í kjölfar niðurdælingar affallsvatns í jarðhitakerfið. Jafnhliða voru gerðar bylgjubrots- og jarðóróamælingar til þess að fá upplýsingar um hljóðhraða svæðisins og til kvörðunar á skjálftaupptökum.

Skjálftavirkni á Reykjanesi var með minnsta móti þá mánuði sem mælingarnar stóðu yfir. Engir skjálftar mældust við Svartsengi í tengslum við niðurrennsli 217,5 þúsund tonna af vatni í holu H-6 á tímabilinu frá 19 júlí fram í desember, 1993. Engrar dælingar var þörf þar sem vatnið rann sjálfkrafa niður holuna. Með samanburði við niðurdælingartilraunir erlendis verður að telja þetta eðlilegt. Magn affallsvatns var allt of lítið og lekt svæðisins of mikil til þess að niðurdælingin hefði nokkur áhrif á vökvaprýsting svæðisins. Þar sem minnkandi vökvaprýstingur í jarðskorpunni lækkar brotmörk bergsins verður að telja að niðurdráttur grunnvatnsborðs í Svartsengi vegna jarðhitavinnslunnar hafi haft í för með sér tímabundna fækkun smáskjálfta á þessu svæði.

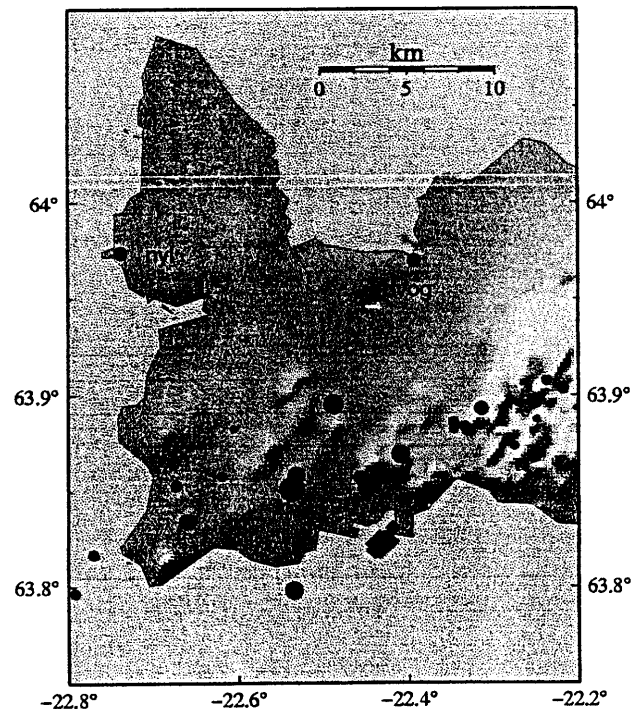
JARÐSKJÁLFTAMÆLANET Á REYKJANESI

Kristján Ágústsson, Ragnar Stefánsson,
Bergur H. Bergsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson,
Veðurstofu Íslands.

Frá því í mars 1997 hafa 3 jarðskjálftamælar af SIL gerð verið reknir á Suðurnesjum og tengdir úrvinnslu- og eftirlitskerfi Veðurstofunnar. Mælanetið er hluti af síðasta áfanga átaksverks Orkustofnunar, fyrirtækja í orkuvinnslu og Umhverfissráðuneytis um rannsóknir á umhverfisáhrifum jarðhitanytingar. Um leið er það hluti af almennu eftirlitskerfi Veðurstofunnar með jarðhræringum á og við Reykjanesskagann. Hitaveita Suðurnesja stóð að miklu leyti undir stofnkostnaði netsins og stendur undir rekstri og gagnaúrvinnslu ásamt Veðurstofunni. Við eftirlitið og úrvinnsluna nýtast einnig aðrar SIL stöðvar í mælakerfi Veðurstofunnar, einkanlega næstu stöðvar svo sem í Krísuvík, Hafnarfirði og Vogsum. Til að fylgjast með áhrifum jarðhitavinnslu þarf fleiri stöðvar, nær vinnslusvæðinu, en reynslan af rekstri þessara fyrstu stöðva á að skapa grunn til að meta hvernig best er að þetta kerfið um leið og skapaður er bakgrunnur til að fylgjast með áhrifum vinnslunnar.

Notkunarmöguleikar jarðskjálftamælinga við jarðhitavinnslu og til eftirlits með henni eru margir. Meðal annarra má nefna jarðskjálftavirkni tengda vinnslu og niðurdælingu, óróa eða suð og staðsetningu hans, hljóðhraðabreytingar og fleira. Þessar athuganir geta gefið mikilvægar upplýsingar um jarðhitakerfið og breytingar á því.

Það sem af er árinu hefur mjög lítið verið um jarðskjálfta á utanverðum Reykjanesskaga (vestan Trölladyngju/Krísuvíkur) og því lítil reynsla komin á mælanetið. Virkni á þessu svæði hefur reyndar verið lítil frá því á miðjum áttunda áratugnum. Smæstu skjálftar sem netið hefur greint eru af stærðinni -0.4 og eiga upptök í Fagradalsfjalli. Reikna má með að skjálftar af stærðinni 0.0 með upptök í Svartsengi mælist á 3 stöðvum (grv, nyl, vog). Til að góð brotlausn fáiist með SIL hugbúnaðinum verðum við að gera ráð fyrir að atburðir sjáist á 4–5 stöðvum. Þá þurfa atburðir í Svartsengi að ná stærð um 0.2. Næmni kerfisins má auka með fjölgun stöðva að vissu marki. Órói setur eðlilega neðri mörk á stærð mælanlegra skjálfta. Komið hefur í ljós að sveifluvidd óróa á mælinum í Grindavík er um það bil hundraðföld miðað við hinar stöðvarnar. Ef það er dæmigert fyrir svæðið er trúlega ekki unnt að nema mikið minni jarðskjálfta en -1.0 á Richter í grennd við Svartsengi en reynslan á eftir að leiða það í ljós.



Mynd 1: Jarðskjálftar og sprengingar á utanverðum Reykjanesi á tímabilinu frá 23. mars til 15. september 1997. Jarðskjálftmælar eru sýndir með svörtum hringjum og jarðskjálftar með rauðum hringjum. Stærð þeirra er frá -0.4 – 2.3 stig á Richter. Sprengingar eru sýndar með grænum tígulum og stærð þeirra er frá 0.2 – 1.2 stig á Richter.

TILRAUN TIL AÐ KANNA SUÐUSVÆÐI Í SVARTSENGI MEÐ JARÐSVEIFLUMÆLINGUM

Knútur Árnason, Orkustofnun

Árið 1993 var gerð tilraun til að kanna hvort sjá megi tilvist og útbreiðslu suðusvæðisins í Svartsengi með jarðeðlisfræðilegum mælingum á yfirborði. Þessi tilraun fólst í því að kanna breytileika í hljóðhraða bergsins undir Svartsengi. Fræðilegar athuganir benda til þess að hljóðhraðinn breytist verulega við það að suða verður í berginu og einungis virðist þurfa örlítinn gufuhluta til þess að hljóðhraðinn falli nánast niður í hraða í þurru bergi.

Tilraunin var gerð í tengslum við rannsókn á smáskjálftavirkni í Svartsengi. Liður í þeirri rannsókn var að framkalla skjálfta með sprengingum í og umhverfis vinnslusvæðið. Orkustofnun hafði um stundarsakir til afnota upptökutæki og kapal sem nota má til að nema jarðskjálftabylgjur í 48 nemum með 25 m milli nema. Ákveðið var að setja þessi tæki upp í Svartsengi og nema jarðskjálftabylgjur frá sprengingunum.

Tilraunin var gerð í tveimur hlutum. Í fyrri hlutanum var hlustunarkapallinn lagður meðfram gufulögninni að holum H-2 og H-3, fram hjá orkuverinu og til suðvesturs út eftir veginum í átt að Eldvörpum. Jarðskjálftabylgjur frá sprengingum voru skráðar stafrænt fyrir hvern hinna 48 nema með þar til gerðum upptökutækjum (söfnunarbíl 2 ms). Sprengt var á um 560 m dýpi í holu SG-4 og á um 40 m dýpi í kaldavatnsholu HSK-1 norður með Grindavíkurvegi. Einnig var sprengt vestast í Blálóninu og í Grindavíkurhöfn.

Þessar mælingar, og þá einkum gögn frá skotinu í Grindavíkurhöfn, gáfu vísbendingar um verulega lægri hljóðahraða á svæðinu um og austan við stöðvarhúsið í Svartsengi en þar fyrir vestan. Hraðalækkunin virtist í grófum dráttum í samræmi við þá hraðabreytingu sem gera má ráð fyrir við suðu í vatnsmettuðu bergi við 200°C.

Því var ákveðið að gera frekari tilraunir og leggja hlustunarkapalinn frá afleggjaranum að malarnámunum vestan í Svartsengisfelli og norður með Grindavíkurveginum og sprengja í Grænavatni í Krísuvík og í sjó við Hafnir vestan á Reykjanesskaga. Með því móti ættu hljóðbylgjur sem berast eftir háhraðalögum djúpt í jörðu og brotna síðan til yfirborðs að fara upp í gegnum svæðið kringum holum H-2 og H-3 þar sem vitað er að suða er til staðar í jörðu. Ef um er að ræða verulegan gufuhluta í berginu á þessum slóðum, ætti að koma fram seinkun í komutíma bylgnanna borið saman við svæði þar sem gufa er ekki til staðar.

Skráningin á skotunum í Höfnum og Grænavatni sýndi enga marktæka breytingu í hljóðhraða í bergi undir kaplinum norður með Grindavíkurveginum. Einungis eru um eða innan við 300 m milli norðausturenda kapalsins á fyrri staðnum og suðurenda hanns á seinni staðnum. Ólíklegt er að verulegur munur sé á meðalhljóðhraða efstu nokkur hundruð metra jarðskorpunnar undir þessum tveimur stöðum. Hljóðhraðinn í efstu hundruð metrunum virðist því vera verulega lægri á svæðinu austan við orkuverið og norður með Grindavíkurvegi en vestan orkuversins.

Hugsanlega er suða í berginu undir mun stærra svæði en ætla má út frá ummerkjum á yfirborði, en gufusvæðið á yfirborði er einkum takmarkað við nágrenni austustu vinnsluholanna. Annar möguleiki er að lægri hljóðhraði undir og norðaustan við virkjunina sé ekki vegna gufu í bergi heldur vegna þess að jarðfræðilegar aðstæður séu aðrar þar en vestar. Lægri hljóðhraða má hugsa sér að skýra með hærra hlutfalli móbergs og/eða mun brotnara bergi.

Jarðlagasnið úr borholum í Svartsengi sýna heldur minna móberg í vestustu holunum en í holum austar, en sá munur er hvergi nærri nægur til að skýra þann mun sem virðist vera í hljóðhraðanum. Hugsanlega er brotarein með NA-SV stefnu undir austanverðu svæðinu sem hefur lægri hljóðhraða en bergið vestan hennar. Slíkrar brotareinar sér lítinn stað á yfirborði utan brota í Þorbirni, en brot og misgengi á láglendinu geta verið hulin ungum hraunum.

Niðurstaða þessara tilrauna er því sú að þær benda til þess að hljóðhraði í efstu nokkur hundruð metrum jarðskorpunnar við Svartsengi sé verulega lægri í austurhluta vinnslusvæðisins en vesturhluta þess. Ekki er ljóst hvort lágur hraði tengist suðu í bergi, en til þess að svo sé virðist þurfa að gera ráð fyrir að suðusvæðið sé verulega stærra en hingað til hefur verið talið. Sú tilraun sem hér er lýst var gerð með það fyrir augum að þreifa á vandamálinu með lágmarks tíma og tilkostnaði til að fá vísbendingar um hvort hljóðhraðamælingar gætu nýst við kortlagningu suðusvæðisins. Til að fá úr því skorið hvort hinn lági hraði tengist suðu í berginu, þarf að kortleggja útbreiðslu lághraðasvæðisins mun betur en gert hefur verið og gera líkanreikninga þar sem tekið er tillit til fyrirliggjandi gagna úr borholum á svæðinu.

AÐFERÐIR TIL MÆLINGA Á GUFUSTREYMI ÚR GUFUAUGUM

Gestur Gíslason

Hitaveita Reykjavíkur

Varmi frá háhitasvæðum tapast á náttúrulegan hátt til yfirborðs með vatni í hverum, varmaleiðni um varmaskellur og gufu í gufuaugum og leirhverum. Aðferðir til þess að ákvarða rennsli frá vatnshverum og hitastreymi um hitaskellur hafa verið þróaðar, en mæling á gufustreymi frá gufuaugum hefur reynst erfiðleikum bundin, sérstaklega úr þeim öflugustu. Stærstur hluti náttúrulegs varmatapsins verður hins vegar um stór gufuaugu, og nánast öll gaslosun frá háhitasvæðum fer um gufuaugu.

Streymi um minni gufuaugu er unnt að mæla með því að þétta gufuna, en gufumagn í öflum gufuaugum hefur verið metið með því að bera stærð gufustróksins saman við gufustróka úr smærri gufuaugum, sem hafa verið mæld. Þess aðferð er bundin verulegri óvissu, er mjög persónubundin og erfitt er að samræma hana milli mælingamanna. Þegar skilgreindir voru forgangsverkpættir í átaksverkefni um *"Umhverfisáhrif jarðhitánýtingar"* 1991-1992 voru mælingar á gufustreymi úr gufuaugum einn þeirra þátta, sem ákveðið var að vinna að.

Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna hefur um árabíl notað búnað til mælinga á gufustreymi úr gufuaugum, sem byggir annars vegar á lofthraðamælingum með lítilli vindrellu og hins vegar á mælingum á þrýstimun með "pítot-rörum". Samkvæmt upplýsingum sem hingað bárust reyndist búnaðurinn bærilega, og var því ákveðið að reyna hann við íslenskar aðstæður, og var því keyptur árið 1993 svipaður búnaður og notaður er á Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna. Gerð var grein fyrir fyrstu niðurstöðum tilraunarinnar í skýrslu Gestis Gíslasonar og Magnúsar Á. Sigurgeirssonar *"Athugun á búnaði til mælinga á gufustreymi úr gufuaugum"*. Skýrslan kom út árið 1995.

Búnaðurinn var reyndur á Nesjavöllum, bæði á náttúrulegum gufuaugum og við gufustreymi úr gufulögnum virkjunarinnar. Niðurstöður sýna að bæði tækin duga til að mæla straumhraða gufunnar við ákveðin skilyrði, en einnig hafa tilraunirnar leitt í ljós nokkur tæknileg vandamál. Gufuhraðinn í þeim augum sem mæld voru með rellunni reyndist á bilinu 0 - 25 m/s. Vegna dropamyndunar nær rellan ekki að snúast á blautri vatnsgufu þegar hraðinn er undir 5 - 6 m/s, en mikið að þeim gufuaugum sem reynt var að mæla er undir þeim mörkum. Þá kom einnig í ljós að mismunaþrýstingurinn sem gufuhraði veldur í "pítot-rörinu" er mjög lágur, eða á bilinu 0 - 2 mbar. Nákvæmstu mælar sem voru handbærir mældu hins vegar þrýsting á bilinu 0 - 64 mbar. Þetta mætti væntanlega laga með því að festa kaup á nákvæmnisþrýstimæli. Þétting í augum pítot-rörsins veldur einnig erfiðleikum við mælingu sem og þrýstitap í röri og slöngum.

Það er ljóst að lokinni fyrstu tilraun á búnaðinum að með endurbótum á honum má fá upplýsingar um hraða gufunnar í gufuaugum. Markmiðið er hins vegar að fá mælingu á gufumagni, en til þess þarf eðlisrúmmál gufunnar að vera þekkt. Ef um er að ræða mettaða vatnsgufu þá er það vel þekkt sem fall af hitastigi, en um leið og þétting hefst eykst óvissa í reikningum í réttu hlutfalli við þéttinguna. Þétting veldur þannig óvissu um eðlisrúmmál og varmainnihald auk þess sem dropamyndun við þéttingu truflar mælitækin eins og að ofan greinir.

Hér á landi er algengast að þegar gufa nær yfirborði í gufuaugum er hún mettuð og hitastig hennar nálægt 100°C, og þétting hefst um leið og gufan sleppur út í andrúmsloftið. Það er því ljóst að til þess að draga sem mest úr óvissuþáttum verður að mæla gufustreymi í gufuaugum áður en þétting hefst. Þetta leiðir til þess að erfitt er að koma við einhverjum búnaði yfir gufuauganu til að auðvelda mælingu því það kann að leiða til þéttingar gufunnar.

RANNSÓKNIR Á BREYTINGUM Í VIRKNI Á ÓVIRKJUÐUM JARÐHITASVÆÐUM

Halldór Ármannsson, Helgi Torfason, Magnús Ólafsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna
Kristmannsdóttir
Orkustofnun

Yfirborðsummerki jarðhitasvæða breytast hvort sem þau eru virkjuð eða ekki. Í fortíðinni hefur ýmiss konar rask af manna völdum haft veruleg áhrif á ásýnd sumra þeirra eins og alkunna er með holur sem boraðar voru í Hverarönd, Námafjalli á sjötta áratugnum en ekki var gengið frá þannig að þær blása nú sem öflugir hverir og draga til sín ferðamenn.

Með umhverfirannsóknunum á óvirkjuðum háhitasvæðum er fyrst og fremst átt við öflun upplýsinga um núverandi ástand svæðanna og eðlilegar sveiflur til að byggja á mat á hugsanlegum breytingum í kjölfar vinnslu. Einnig er eðlilegt að frummat á umhverfisáhrifum fyrirhugaðrar virkjunar liggi fyrir við endanlegt val á milli virkjunarstaða. Í slíku frummati er lagt til að miðað sé við 20 MW raforkuvirkjun, þar sem talið er hagkvæmast að byrja með 20-40 MW virkjanir á háhitasvæðum og stækka þær síðan í ljósi reynslu af vinnslu. Helstu umhverfisrannsóknir sem eru á könnu Orkustofnunar eru jarðhitakortlagning, grunnvatnskortlagning, athugun á gufuútsreymi, á styrk gass í gufu og andrúmslofti á háhitasvæðum og rannsóknir á náttúrlegum breytingum á virkni svæðanna. Ennfremur þarf að gera nákvæmar hæðar- og þyngdarmælingar og athuga smáskjálftavirkni áður en vinnsla hefst. Meta þarf áhrif affalls gufu, gass og vatns og sýna fram á rennislíleiðir og dreifingu. Margir þessara þátta eru hluti frumrannsókna á háhitasvæðum og ekki unnir sérstaklega vegna umhverfisrannsókna. Í sambandi við átakaverkið voru 28 háhitasvæði tekin fyrir og staða þeirra með tilliti til virkjunar og umhverfisrannsókna metin. Þá höfðu 7 þeirra verið virkjuð að einhverju marki, 3 voru komin á vinnsluboranastig, 8 á rannsóknaboranastig, 4 á yfirborðsrannsóknastig en frumrannsókn vantaði fyrir sex þeirra. Staða þeirra með tilliti til hinna ýmsu þátta umhverfisrannsókna er sýnd í Töflu 1.

Tafla 1. Staða 28 háhitasvæða með tilliti til hinna ýmsu þátta umhverfisrannsókna

Stig	Heim- ilda- listi	Frum- mat	Jarð- hita- kort	Náttúr- legt gufu- streymi	Styrkur gass í gufu	Gas í andrúms- lofti	Grunn- vatns- kort	Þyngd- armæl- ingar	Breytingar á náttúrlegri virkni
Tilbúið	15	8	17	10	11	10	15	14	9
Að hluta	0	0	5	6	9	3	2	2	8
Vantar	13	20	6	12	8	15	11	12	11

Ekki hefur verið fylgst skipulega með breytingum á yfirborðsvirkni jarðhitasvæða á Íslandi gegnum tíðina en út frá lýsingum á hinum þekktari, t.d. Geysis- og Reykjanessvæðum má lesa nokkra sögu. Hverir kvikna og slokkna og virðast útfellingar áhrifamiklar við að stífla hveravirkni en truflanir af völdum hreyfinga eins og jarðskjálfta opna leiðir vatnsins á ný og svo koll af kolli. Gufuauðu færast til, öflug augu myndast en hverfa svo skyndilega og virðast breytingar á vatnsborði jarðhitakerfa hafa mikil áhrif að þessu leyti. Hitastigsbreytingar gerast hægar en geta haft varanleg áhrif. Þó geta þær verið umtalsverðar á nokkrum árum. T.d. hefur hiti í borholum í Ölfusdal lækkað um 5-10°C á um 30 árum þrátt fyrir litla massatöku úr svæðinu og má ætla að ástæður séu náttúrlegar.

Breytingar vegna virkjunar svæða geta verið umtalsverðar og tengjast að langmestu leyti breytingum á vatnsborði vegna massatöku. Greinileg dæmi eru um myndun gufupúða í Svartsengi en samfara henni hefur aukist mjög virkni gufuaugna á yfirborði sem vart þekktist fyrir virkjun. Í Hvíthólum, Kröflu, hefur og orðið vart við mikla aukningu á yfirborðsgufu. Það ferli hófst þó áður en borað var í Hvíthólum og raunar áður en nokkur verulegur massi var tekinn úr svæðinu öllu. Því er erfitt að dæma um hvort sú aukning er náttúrleg eða af völdum virkjunar.

Í Rotorua, Nýja Sjálandi, hefur jarðhiti á yfirborði verið mikill frá alda öðli, þar á meðal allmargir goshverir. Rennsli er mikið og var byrjað að virkja það á þriðja tug aldarinnar og fengu menn að virkja óheft þar til nokkrir frægustu hverirnir virtust ætla að hverfa og með þeim sú ferðamennska sem er helsta tekjulind bæjarbúa. Sett var í gang viðtæk rannsóknaráætlun í því augnmiði að skilja eðli breytinganna, sett voru lög sem bönnuðu fyrst boranir og skipuðu síðan fyrir lokun allra holna á ákveðnu svæði og loks var gerð áætlun um niðurdælingu og varmaskipti neðanjarðar. Nú svo komið að tekin eru upp úr svæðinu um 20% af þeim massa sem tekin voru úr því 1985 en hverirnir eru farnir að gjósa af fullum krafti. Rannsóknirnar hafa gefið góða mynd af svæðinu og sýndu að breytingar ganga ójafnt yfir svo að viðtækar athuganir þarf fremur en stikkprufur

Af framansögðu má ráða að mikilvægt er að þekkja ástand svæðis og vita hvaða breytingar hafa orðið þar, hverjar gætu orðið ef ekki væri virkjað og hverjar ef virkjað væri. Því var ákveðið að hluti átaksverkefnis Orkustofnunar, Hitaveitu Reykjavíkur, Hitaveitu Suðurnesja, Landsvirkjunar og Umhverfissráðuneytisins fælist í rannsókn á breytingum á yfirborðsvirkni nokkurra óvirkjaðra svæða. Voru þrjú svæði valin: Þeistareykir og Krýsuvík sem svæði sem til greina kemur að verði virkjuð innan skamms, og Kverkfjöll sem óaðgengilegt svæði þar sem fengist gætu langtímaupplýsingar um breytingar. Fremur erfitt hefur reynst að fjármagna þennan þátt verkefnisins enda ekki hægt að krefjast þess að orkufyrirtæki kosti rannsóknir á svæðum sem þau eiga kannski aldrei eftir að virkja.

Á Þeistareykjum var gerð yfirgripsmikil yfirborðsrannsókn 1981-1983 og er gengið út frá niðurstöðum hennar sem grunni. Farnar hafa verið 4 stuttar ferðir til að kortleggja breytingar á yfirborðshita og taka sýni til efnagreininga úr völdum gufuaugum og volgrum. Komið hafa í ljós mjög afgerandi breytingar á yfirborðsvirkni, bæði tilfærsla ummerkja en einkum þó hvarf þeirra. Gashitamælar benda til kólnunar jarðhitakerfisins á því svæði þar sem ummerkjum hefur fækkað en hiti hefur staðið í stað og e.t.v. hækkað annars staðar.

Heildarrannsókn á Krýsuvíkursvæðinu í byrjun áttunda áratugarins er grunnur til samnburðar. Þá var og farið yfir svæðið og tekin sýni úr nokkrum gufuaugum 1983. Greinilegar breytingar hafa orðið varðandi einstök ummerki, þ.e. hverir hafa kviknað og slokknað o.þ.h. en í heildardráttum virðast umfang og virkni svæðisins nokkurn veginn óbreytt. Athuganir á gashita frá örfáum gufuaugum benda heldur ekki til breytinga.

Enginn grunnur var til samnburðar fyrir Kverkfjöll og hafa rannsóknir fram að þessu helgast af jarðhitakortlagningu og vali á gufusýnatökustöðum til þess að skapa slíkan grunn.

Þær breytingar í jarðhitakerfum sem mestu geta valdið um breytingar á yfirborðsvirkni eru vatnsborðsbreytingar og hitastigsbreytingar. Á svæðum þar sem vatnsborð hvera nær yfirborði er unnt að fylgjast með því og nota efnahitamæla til að fylgjast með hitastigi. Þar sem vatnsborð liggur á miklu dýpi er það augljóslega ekki hægt nema með því að bora holur sem ná niður fyrir vatnsborð og notkun gashitamæla er þá eina tiltæku aðferðin til að meta hitastig. Í raun eru þeir ekki nógu nákvæmir til þess að unnt sé að byggja á þeim upplýsingar um hitastigsbreytingar af þeirri stærðargráðu sem líklegt er að verði í jarðhitakerfum á nokkurra ára tímabili. Til þess að unnt sé að fylgjast með slíkum óvirkjuðum jarðhitasvæðum á viðunandi hátt þannig að þau verði tiltæk til umhverfismats vegna borana þarf að bora a.m.k. eina rannsóknarholu til að fylgjast með vatnsborði og hitastigi en fylgjast um leið með breytingum á yfirborðsummerkjum jarðhita og efnasamsetningu gufu úr völdum gufuaugum. Eðlilegt er að ríkið standi undir kostnaði við slíkar rannsóknir en virkjunaraðili borgi fyrir þær þegar hann fær svæðið afhent til virkjunar.