

**Aðferðir til mælinga á gaslosun frá  
jarðhitasvæðum**

**Ingunn María Þorbergsdóttir, Halldór Ármannsson**

**Greinargerð IMTh-HÁ-2002-01**

## Aðferðir til mælinga á gaslosun frá jarðhitasvæðum

### Inngangur

Rannsóknarverkefni var sett á stofn árið 1991 með það að markmiði að rannsaka áhrif háhita jarðhitasvæða á umhverfið og hver breyting verði þar á við virkjun svæðanna til framleiðslu á raforku og/eða hitaorku (Hrefna Kristmannsdóttir 1997). Frá jarðhitasvæðum losnar jarðgas út í andrúmsloftið og getur valdið loftmengun og eru koldíoxíð og brennisteinsvetni helstu loftmengunarvaldar frá jarðhitasvæðum á Íslandi. Koldíoxíðútblástur frá jarðhitavirkjunum á Íslandi var áætlaður 5% af öllum koldíoxíðútblæstri á landinu árið 2000. Sama ár var áætluð losun brennisteinsvetnis vegna jarðhitanytingar 75% af heildarlosun brennisteinsefnasambanda hér á landi (Birna Hallsdóttir 2001). Þá á eftir að taka inn í myndina magn náttúrulegrar losunar á jarðgasi á háhitasvæðum sem á sér stað m.a. um gufuaugu og í gegnum jarðveg. Einnig þarf að fá vitneskju um hvort náttúruleg gaslosun um gufuaugu og í gegnum jarðveg breytist við virkjun jarðhitans.

Innan rannsóknarverkefnisins var skilgreindur verkþáttur sem miðaði að því að þróa aðferðir til að meta breytingar á náttúrulegu útstreymi gufu og er það mikilvægt vegna virkjunar. Þá var hugmyndin að þróa aðferð og finna búnað til mælinga á streymi úr gufuaugum (Hrefna Kristmannsdóttir 1997). Keypt var til landsins vindrella sem byggir á lofthraðamælingum og Pítot-rör til mælinga á þrýstimun og búnaðurinn prófaður hér á landi árið 1995. Báðar mæliaðferðirnar gáfu svörun við gufustreymi, en ekki varð ljóst hvort eða hvernig hægt verði að beita búnaðinum til að mæla náttúrulegt gufustreymi. Frekari þróunar á þessu sviði er þörf til að geta fengið marktækar mælingar á gufustreymi um gufuaugu (Gestur Gíslason og Magnús Á. Sigurgeirsson 1996).

Jafnframt því að gas berst út í andrúmsloftið um gufuaugu á jarðhitasvæðum er einnig um að ræða gaslosun í gegnum jarðveg. Þessi þáttur hefur fengið litla umfjöllun hér á landi til þessa þó slíkar rannsóknir hafi verið framkvæmdar á nokkrum stöðum í heiminum, aðallega á Ítalíu og í Bandaríkjunum (Chiodini o.fl. 1996, 1998, 1999, 2001; Chiodini og Frondini 2001; Evans o.fl. 2001; Gerlach o.fl. 2001). Þekking á magnbundinni gaslosun um jarðveg á háhitasvæðum á Íslandi er nánast engin og mikilvægt að kanna hvort gaslosun í gegnum jarðveg er veruleg eða óveruleg á háhitasvæðum landsins.

Þessari greinargerð er ætlað að kynna rannsóknaraðferðir til magnbundinna mælinga á náttúrulegri losun jarðgass frá jarðhitasvæðum. Jafnframt er í greinargerðinni bent á þær rannsóknaraðferðirnar sem hentugastar eru með tilliti til jarðgasmælinga á háhitasvæðum á Íslandi og komið á framfæri upplýsingum um kostnað við kaup á tækjum/búnaði til að framkvæma jarðgasrannsóknir. Að lokum er sett fram tillaga að vali á háhitasvæðum á Íslandi þar sem til greina kæmi að framkvæma mælingar á náttúrulegri gaslosun.

## Jarðhitasvæði til rannsókna á gasútstreymi

Til að skoða náttúrulegt gasflæði frá jarðhitasvæðum er einkum um að ræða rannsóknir á háhitasvæðum. Reykjanes, Svartsengi, Nesjavellir, Krafla, Námafjall og Hveragerði eru virkjuð háhitasvæði þar sem gerðar hafa verið athuganir á styrk gass í andrúmslofti. Aftur á móti eru m.a. Þeistareykir og Krísuvík óvirkjuð háhitasvæði þar sem styrkur nokkurra gastegunda hefur verið mældur í andrúmslofti (sjá t.d. Hrefna Kristmannsdóttir o.fl. 2000; Noorollahi 1999; Grétar Ívarsson o.fl. 1993).

Brennisteinsvetni sem losnar frá jarðhitasvæðum hérlendis oxast ekki yfir í brennisteinsdíoxíð nem að litlu leyti, líklega vegna kulda og sólarleysis (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl. 2000). Áhrif vegna losunar súrra loftmengunarefna hér á landi eru þar af leiðandi að öllum líkindum ekki mikil. Rannsókn á afgösum brennisteinsvetnis á nokkur jarðhitasvæðum leiddi í ljós að áætluð afgösum brennisteinsvetnis sé mest á Nesjavallarsvæðinu en minnst á Hveragerðissvæðinu (Grétar Ívarsson o.fl. 1993).

Hardy Phanz hjá Institute of Applied Botany í Þýskalandi var síðla júlímánaðar 2002 við rannsóknir á sambandi CO<sub>2</sub> losunar úr ölkeldum og gróðurþekju við ölkeldur á Snæfellsnesi. Jafnframt leit hann á háhitasvæði á Reykjanesi til að athuga samband á milli CO<sub>2</sub> losunar og gróðurþekju. Út frá athugunum sínum telur hann líklegt að í háhitagufu á Íslandi gæti ekki eituráhrifa vegna jarðgass á gróðurþekju jarðhitasvæðanna. Hann telur áhrif hitastigs á gróður við gufuaugu vera meiri en eituráhrif vegna gass í gufunni (2002 munnl. uppl.).

## Rannsóknaraðferðir til mælinga gasflæði

Hér á eftir fara lýsingar á völdum aðferðum til magnbundinna mælinga á gasflæði frá eldvirkum svæðum og jarðhitasvæðum.

### *Líkanreikningar*

Með líkanreikningum er hægt að nálgast magn gaslosunar um yfirborð á jarðhitasvæðum. Þá er notast við massajafnvægi gass í innstreymisrásum og útstreymisrásum svæðisins. Auk þess þarf vatnafræði (*hydrology*) svæðanna að vera vel þekkt og skilgreind. Vatnafræði svæðisins felst í að þekkja loftslag á svæðinu (hiti, raki, úrkoma/uppgufun), stærð vatnasviðsins, taftíma vatnsins og rennsli vatnsins (í lindum o.fl.). Þá þarf að vera til staðar vitneskja um jarðfræði svæðisins. Efnagreiningarnar á vatni í innstreymis- og útstreymisrásum svæðisins miða svo að því að kanna breytingar í efnainnihaldi með tíma og rekja uppruna vatnsins (kalt vatn, jarðhitavökvi, o.s.frv.). Uppruna vatnsins er hægt að finna með því að nota bikarbónat innihald vatnsins og hlutföll kolefnissamsæta, hlutföll brennisteinssamsæta og efnahitamæla s.s. kísil og Na-K efnahitamæla (Cruz o.fl. 1999).

Raunhæft er að framkvæma líkanreikningana fyrir Kröflukerfið, Hengilsvæðið, Hveravelli og e.t.v. fleiri kerfi þar sem vatnabúskapur er vel þekktur. Þekkja þarf úrkomumagn, rennsli útstreymis, reikna CO<sub>2</sub> innihald djúpvökva, gera ráð fyrir að hluti þess fari í

kalsítmyndun ofar í kerfinu (Niels Óskarsson munnlegar upplýsingar), o.fl. til að reikna heildar CO<sub>2</sub> losun með gufuaugum og í gegnum jarðveg.

Annarri aðferð væri jafnframt hægt að beita til að finna CO<sub>2</sub> losun um yfirborð. Á lygnum degi, að sumri og vetri, er hægt að kanna CO<sub>2</sub> styrk með IR-tæki (Niels Óskarsson munnl. uppl.). Til að reikna gaslosun svæðisins (magn á tímæiningu) er styrkur CO<sub>2</sub> í ákveðnum mælilínunum fundinn með IR-tæki (línurnar staðsettar með GPS-tæki) og streymi í gufuaugum mælt (e.t.v. með Pítot-röri, sjá síðar í greinargerðinni). Til mælinga væri hægt að fara um á fjórhjóli á sumrin en snjósleða á veturna.

### *Mælingar á gasstreymi úr gufuaugum*

Til útreikninga á flæði gastegunda frá gufuauga þarf að vita hlutfall vatns:óuppleysts gass, styrk tiltekins gass í gasfasanum, rennsli gufunnar og flatarmál gufuaugans (Mori o.fl. 2001).

Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna hefur notað tvennskonar tækjabúnaður til mælinga á gufustreymi úr gufuaugum. Annarsvegar vindrellu (*Vane Probe*) sem byggir á lofthraðamælingum en hinsvegar Pítot-rör (*Pitot static tube*) til mælinga á þrýstimun. Svipaður búnaður var prófaður hér á landi 1995 (Gestur Gíslason og Magnús Á. Sigurgeirsson 1996). Pítot-rörið sem prufað var af fólki Orkustofnunar og Orkuveitunnar árið 1995 er að finna á skrifstofu Gestis Gíslasonar á Orkuveitunni. Enn er vindrellan og búnaður tengdur henni ekki fundin nema að hluta. 112

Pítot-rör mælir lofthraða með þrýstibreytingu sem myndar rafmerki sem er í hlutfalli við mismuninn á þrýstingnum sem myndaður er af heildarþrýsting<sup>0</sup> og þrýstingi staðnaðs/kyrrstæðs lofts (*static pressure*); heildar þrýstingur – þrýstingur kyrrstæðs lofts = hraðaprýstingur. Hraða lofts (V(m/s)) er hægt að reikna með jöfnunni:

$$V = 44,72136 K_{\text{pitot}} \Gamma_{\text{pitot}} (h_{\text{KPa}}/d)^{1/2}$$

þar sem  $K_{\text{pitot}}$  er Pítot-rör fasti,  $\Gamma_{\text{pitot}}$  er gas samþjöppunar fasti,  $h_{\text{KPa}}$  er heildar þrýstingur – þrýstingur kyrrstæðs lofts (kPa) og  $d$  er eðlisþyngd lofts ( $\text{kg/m}^3$ ) reiknuð með jöfnunni:

$$d = 3,4834 (G P_B / Z T_K)$$

þar sem  $G$  er *ideal specific gravity* (mólmassi gass ( $\text{kg}/(\text{kg mól})$ )/mólmassa lofts ( $\text{kg}/(\text{kg mól})$ )),  $P_B$  er barómetrískur þrýstingur (kPa),  $Z$  er samþjöppunarstuðull gass,  $T_K$  er hitastig (K).

Þegar vatnsgufa á í hlut er eftirfarandi leiðréttingarþáttur notaður:

$$CD_d = 1 - ((0,3783 (RH/100)P_S)/P_B)$$

$$d_{\text{COR}} = d CF_d$$

$$P_S = 1,7526 \times 10^8 e^{(-5315,76/T_K)}$$

þar sem  $CD_d$  er leiðréttingarþáttur eðlisþyngdarinnar,  $RH$  er rakastig (%),  $P_S$  er hlutþrýstingur vatnsgufu við  $T_K$  (kPa) og  $d_{\text{COR}}$  er leiðrétt eðlisþyngd lofts ( $\text{kg/m}^3$ ). Leiðréttingarþáttur vegna eðlisþyngdar lofts er notaður í jöfnu fyrir hraða lofts (V).

Við stöðlun á búnaðinum er notast við vindgöng þar sem stöðlunarlína er fengin með því að teikna þrýstifall um rásirnar með heildarþrýstingi og þar sem loft er kyrrstætt á Pítot-rörinu á móti rennslinu sem orsakaði þrýstifallið. Staðallínan er fengin með minnst 10 punktum. Því fleiri sem stöðlunarpunktarnir eru því nær kemst staðalkúrfan línu raunkúrfunnar (*actual flow response curve*). Stöðlunarlínan ætti einnig að innihalda

barómetrískan þrýsting, hitastig og rakastig loftmassans sem notaður var til stöðlunar á búnaðinum. Rennslið er svo reiknað út með mældum meðallofthraða um þekkt flatarmál rásarinnar (Klopfenstein Jr. 1998).

Ein aðferð til viðbótar hefur verið þróuð til að mæla CO<sub>2</sub> fæði frá eldfjalla/jarðhita gufuaugum (Mori o.fl. 2001). Aðferðin byggir á kenniefnataekni (*tracer gas technique*) sem prufuð hefur verið á jarðhitasvæðum í Japan og á Spáni. Í grunninn er aðferðin þannig að kenniefni á gasformi með þekktu flæði  $q$  (mól/s) er dælt niður í gufuaugað um þar til gert rör. Við gufuaugað er blöndu af jarðhitagasi og kenniefninu safnað eða suguð inn í efnagreiningartæki til að mæla styrk CO<sub>2</sub> (eða annarar gastegundar) og kenniefnisins. G.r.f. að kenniefnið og jarðgasið sé vel blandað og blandan einsleit þegar hún kemur upp um gufuaugað. Flæði CO<sub>2</sub> ( $Q$  (mól/s)) er þá skilgreint sem:

$$Q = q(D(\text{CO}_2))/D(\text{kenniefni})$$

Þar sem  $D(\text{CO}_2)$  og  $D(\text{kenniefni})$  eru styrkur CO<sub>2</sub> og kenniefnisins (mól/mól) og fundin með efnagreiningartæki.

Mælt er með að nota SF<sub>6</sub> gas sem kenniefni fyrir athuganir á háhitasvæðum. Hægt er að nota það upp að hitastigi 500°C. Ýmsar upplýsingar er að finna um SF<sub>6</sub> á heimasíðu *U.S. Environmental Protection Agency*. Aðferð til sýnatöku á SF<sub>6</sub> er lýst á heimasíðu *USGS* með tilvísun í heimildir og gasið er selt á kútum hjá *PELCHEM™* (sjá heimasíðu 2002).

Þegar um er að ræða gufuaugu á háhitasvæðum þá þarf tækjabúnaðurinn sem kemst í snertingu við jarðgasið að þola hátt hitastig og sterka sýruvirkni. Kísilrör, títanrör og þétt keramikrör þola snertingu við háhitagufu og er hægt að stinga niður í gufuaugu. Þessi efni væri því hægt að nota í rör sem stungið er niður í gufuauga til niðurdælingar á kenniefni og í rör sem notað er við sýnatöku (Mori o.fl. 2001). Kostnaður við tækjakaup vegna aðferðar kenniefnisins liggur í flæðimæli, gaskút, rorum til niðurdælingar og sýnatöku. Hugsast getur að með útfærslu á þessi aðferð væri hægt að mæla flæði H<sub>2</sub>S úr gufuaugum.

### **Gasflæði úr jarðvegi**

Mælingar á gasstreymi úr jarðvegi á jarðhitasvæðum eru oftast framkvæmdar með aðferð lokaðra hólfna (*closed-chamber method* eða *static chamber method*). Aðferðin hefur reynst notadrjúg til mælinga á flæði CO<sub>2</sub> úr jarðvegi á eldvirkum svæðum. Um beinar mælingar er að ræða og ekki þarf að gera nálganir eða leiðréttingar er varða eiginleika jarðvegsins þegar aðferð hólfanna er notuð.

Svokölluð söfnunarhólf (*accumulation chamber*) hafa verið notuð til rannsókna á flæði koldíoxíðs frá jarðvegi á eldfjalla- og jarðhitasvæðum í nokkur ár (sjá t.d. Chiodini o.fl. 1996, 1998, 1999, 2001; Chiodini og Frondini 2001; Evans o.fl. 2001; Gerlach o.fl. 2001). Þetta eru yfirleitt hólklega hólf oft um 10 cm há og með þverskuðarflatarmál um 300 cm<sup>2</sup>. Við tæki þessi er tengd rás sem tekur sýni úr hólfinu sendir það í gegnum efnagreiningartæki og svo rás sem liggur frá efnagreiningarbúnaðinum aftur inn í hólfnið í skiptum fyrir það sem tekið var út. Söfnunarhólfinu er komið fyrir á jarðvegsyfirborðinu til að fanga koldíoxíð sem streymir frá jarðveginum. Aukning í styrk CO<sub>2</sub> með tíma,  $d[\text{CO}_2]/dt$ , er tengd (g. r. f. *ideal* gashegðun) rúmmáli (V) og þverskuðarflatarmáli (A) hólfins, hitastigi (T) og þrýstingi (P) inni í hólfinu. Til útreikninga á flæðinu er eftirfarandi jafna notuð ( $\phi$ ):

$$\phi = (PV/RTA)(d[\text{CO}_2]/dt)$$

þar sem  $R$  er gasfastinn og einingum getur verið hagrætt þannig að  $\phi$  er gefið upp í mól  $m^{-2} d^{-1}$  eða  $g m^{-2} d^{-1}$ . Til að fá viðunandi niðurstöður á útreikningum á flæðinu með jöfnunni þarf að ákvarða  $d[CO_2]/dt$  áður en  $[CO_2]$  í hólfinu fer að nálgast  $[CO_2]$  í jarðveginum (Evans o.fl. 2001; Gerlach o.fl. 2001). Upplýsingar um kostnað við tækjakaup vegna aðferðar söfnunarhólfanna er að finna í viðauka.

Meðaltími á  $\phi_{\text{jarðvegur}}$   $CO_2$  mælingum er um 1 mínúta, þannig að á tiltölulega stuttum tíma er hægt að kortleggja flæði  $CO_2$  á tiltölulega stóru svæði. Kortið má nota til að fá heildarflæði  $CO_2$  frá öllu kerfinu standi nógu margar flæðimælingar á bak við kortlagða svæðið. Af kortum þessum má svo velja nokkra staði til endurtekinnna mælinga og fá þannig hugmynd um þróun kerfisins með tíma. Álíka búnaður og aðferðarfræði hefur verið notuð til flæðimælinga á metani úr jarðvegi (Cardellini o.fl. 2002).

Þættir sem áhrif hafa á styrk gass í jarðvegi og gasflæði um snertiflöt jarðvegs og andrúmslofts eru breyting í loftþrýsting, úrkoma, hitastig jarðvegs, hitastig andrúmslofts og rakastig (sjá t.d. Chiodini o.fl. 1998).

Víða um heiminn hefur aðferð lokaðra hólfanna verið notuð sem og Eddy correlation turn til rannsókna á losun gróðurhúsalofttegunda um jarðveg landbúnaðarsvæða (sjá t.d. NFJ seminar no: 342). Hér á Íslandi er slíkur búnaður til á RALA til magnbundinna mælinga á flæði gróðurhúsalofttegunda í og úr jarðvegi. *Eddy correlation* turninn (*Edibox* tengdur hugbúnaði *Edisol*) mælir af stóru svæði (sem þó er breytilegt eftir vindhraða o.fl.) yfir langt tímabil (Moncrieff o.fl.1997). Turninn er síritandi og að jafnaði staðsettur upp í Borgarfirði. RALA notar einnig lokuð kyrrstæð hólf (*static chambers*) sem er færlegur búnaður notaður til að mæla yfir ákveðnu afmörkuðu svæði (sjá t.d. Kawbe o.fl. 1997), aðferð sem sennilega hentar betur fyrir jarðgasmælingar á jarðhitasvæðum. Þessi búnaður er í notkun að jafnaði einu sinni í viku en er þess á milli geymdur á RALA.

Í landi Mófellsstaðakots í Skorradal er *Eddy correlation* búnaðurinn innan rafmagnsgirðingar sem er um 8 m á kant. Álíka búnaði er lýst í grein eftir (Moncrieff o.fl.1997). *Edibox* er í um 2 m hæð frá jarðvegsyfirborði; við yfirborð á meðalþykkt iðustrausmags við jörðu. Sýnataka af  $CO_2$  fer fram um slöngu rétt neðan við *Edibox*-ið, jafnframt er þar hitamælir. Sýni eru tekin af andrúmslofti, greind með  $CO_2/H_2O$  greini og skráð í tölvu sem tengd er efnagreiningartækinu. Frá *Edibox*-inu koma svo upplýsingar um stefnu loftstreymisins í þrjár stefnur (3D). Gögnum er safnað á 20 mín. fresti allt árið.

Beinar mælingar á  $CO_2$  flæði frá jarðvegi eru framkvæmdar á nokkrum stöðum í Borgarfirði s.s. í landi Mófellsstaðakots í Skorradal, á Stóra Kroppi og í landi Hurðarbaks á Hvalfjarðarströnd. Á hverjum rannsóknarstað eru 4 stöðvar þar sem flæðimælingar eru endurteknar nokkrum sinnum á ári. Á hverri stöð nemur áframmi, um 40 cm á kant, við yfirborð jarðvegsins og nær um 10 cm niður í jarðveginn. Efst á rammanum er um 2 cm breið rauf sem hellt er í vatni til þéttingar rétt áður en söfnunarhólfi úr glæru pelxígleri er komið fyrir ofan í raufinni. Þegar söfnunarhólfinu hefur verið komið fyrir í raufinni þá er búnaðurinn tengdur við efnagreiningartæki (IR) og gögnum svo sjálfvirkir hlaðið inn í tölvu. Við hverja mælingu á  $CO_2$  flæði er tækið keyrt í 4 mín, fyrst m.t.t. ljóstillífunarþáttarins og svo m.t.t. rotnunar/öndunar jarðvegsins. Inni í söfnunarhólfinu er vífta sem hrærir í loftmassanum innan hólfinsins. Jafnframt er í toppi hólfinsins ljósnemi sem mælir PAR (á bylgjulengdinni frá ca. 300 til 700 nm). Auk þess er hitaskynjari inni í hólfinu. Við sýnatöku er lofti dælt úr hólfinu um rás sem liggur frá hólfinu ofanverðu, í gegnum  $Mg(ClO_4)_2$  *skrubber* (sem tekur vatn úr loftinu) inn í IR greininn. Þaðan er svo

loftinu aftur dælt neðarlega inn í hólfið um koparpípu sem alsett er götum til að dreifa loftinu. Hitastig jarðvegsins er mælt samfara CO<sub>2</sub> flæðimælingunum.

Einnig er til hólf á RALA sem notað er þegar kanna á flæði metans úr jarðvegi. Þá er sýnum safnað í sprautu um lítið gat efst á hólfinu með jöfnu millibili í 1 klst. og sett á litlar glerflöskur. Metan er svo greint í gasgreini RALA. Hugsanlega er hægt að nota þessa aðferð fyrir H<sub>2</sub>S frá jarðvegi á háhitasvæðum, þ.e. taka sýni með ákveðnu millibili úr hólfinu og efnagreina í gasgreini. Þetta þarf að kanna og prufa. Hinsvegar er til búnaður sem getur skynjað H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og fleiri gastegundir (*DRAGER Polytron II frá West Systems*) og væri þá möguleiki að notast við aðferðina eins og henni er lýst fyrir CO<sub>2</sub> hér á undan (sjá einnig í viðauka).

Gerð hefur verið tilraun til að nota söfnunarhólf RALA til að kanna flæði koldíoxíðs og metans um snertilföt vatns og lofts í Blöndulóni. Búnaðurinn er fyllilega fær um að afla gagna á slíkum skilfleti svo fremri að vindhraði/öldugangur sé ekki mikill. Söfnunarhólfinu er þá komið fyrir ofan í frauðramma (flotholti), keðjur tengdar í hvert horn undir rammanum og lóð/sakka tengd keðjunum til að auka stöðugleika búnaðarins á vatnsfletinum. Líklega er hægt að aðlaga þann búnað til mælinga á gaslosun um vatnsflöt í gjám.

Jón Guðmundsson á Umhverfissviði RALA hefur veitt vilyrði fyrir því að ROS fái söfnunarhólf og greiningarbúnað lánaðan til könnunar á CO<sub>2</sub> flæði úr jarðvegi á háhitasvæðum til að fá hugmynd um magn flæðisins sem á sér stað úr jarðvegi á slíkum stöðum. Það fer eftir gróðurþekju og magni lífræns efnis í jarðveginum hvort taka verði tillit til áhrifa þessa þátta í flæðimælingunum.

## Framhaldið

- Mælt er með því að líkanreikningar verði framkvæmdir fyrir Kröflukerfið og Nesjavallasvæðið líkt og list er hér í kaflanum "Líkanreikningar". Til samanburðar er jafnframt tilvalið að nota þessi tvö háhitasvæði til rannsókna á gasflæði um jarðveg og gufuaugu. Þeistareykir og Krísuvík eru óvirkjuð svæði sem hafa verið skoðuð með tilliti til styrks gass í andrúmslofti og liggur beinast við að stunda þar áfram rannsóknir þá með tilliti til gaslosunar um gufuaugu og jarðveg.
- Halda þarf áfram þróun Pítot-rörsins til mælinga á gasstreymi úr gufuaugum. Vert er að gera samanburðarmælingar á aðferð Pítot-rörsins og aðferð kenniefnis til mælinga á gaslosun um gufuaugu.
- Áður en farið er út í viðamikil tækjakaup á búnaði erlendis frá til mælinga á gaslosun úr jarðvegi á háhitasvæðum er gott að vera búin að framkvæma slíkar mælingar á CO<sub>2</sub> með búnaði frá RALA (þarf að gera ráðstafanir vegna H<sub>2</sub>S, e.t.v. með *scrubber*) og tilraun til að mæla gasflæði H<sub>2</sub>S frá jarðvegi (hugsa út aðferð). Þegar slík vitneskja er til staðar er ráðlagt að fara að fjárfesta í búnaði til magnbundinna mælinga á gaslosun úr jarðvegi. Reynslan sýnir að aðferð söfnunarhólfa er notadrýgst til rannsóknar á losun jarðgass um jarðveg (sbr. Chiodini o.fl. 1996) vegna þess að þá þarf ekki að gera nálganir eða leiðréttingar er varða eiginleika jarðvegsins.

## Heimildir

Bergfeld, D., F. Goff, C.J. Janik, 2001. Elevated carbon dioxide flux at the Dixie Valley geothermal field, Nevada; relations between surface phenomena and the geothermal reservoir. *Chemical Geology*, 177: 43-66.

Carapezza, M.L. og C. Federico, 2000. The contribution of fluid geochemistry to the volcano monitoring to Stromboli. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95: 227-245.

Cardellini, C., G. Chiodini, F. Fondini, D. Granieri, J. Lewicki og L. Reruzzi, 2002. Accumulation chamber measurements of methane fluxes: application to volcanic-geothermal areas and landfills. *Applied Geochemistry*, (in press).

Chiodini, G. og F. Frondini, 2001. Carbon dioxide degassing from the Albani Hills colcanic region, Central Italy. *Chemical Geology*, 177: 67-83.

Chiodini, G., F. Frondini, C. Cardellini, D. Granieri, L. Marini og G. Ventura, 2001. CO<sub>2</sub> degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research*, (B8) 106: 16.231-16.221.

Chiodini, G., F. Frondini, D.M. Kerrick, J. Rogie, F. Parello, L. Peruzzi og A.R. Zanzari, 1999. Quantification of deep CO<sub>2</sub> fluxes from Central Italy. Examples of carbon balance from regional aquifers and of soil diffuse degassing. *Chemical Geology*, 159: 205-222.

✕ Chiodini, G., R. Cioni, M. Guidi og B. Raco, 1998. Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13: 543-552.

Chiodini, G., F. Frondini og B. Raco, 1996. Diffuse emission of CO<sub>2</sub> from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy). *Bull. Volcanology*, 58: 41-50.

Evans, W.C., M.L. Sorey, B.M. Kennedy, D.A. Stonestrom, J.D. Rogie og D.L. Shuster, 2001. High CO<sub>2</sub> emissions through porous media: transport mechanisms and implications for flu measurement and fractionation. *Cemical Geology*, 177: 15-29.

Gerlach, T.M., M.P. Doukas, K.A. McGee og R. Kessler, 2001. Soil efflux and total emission rates of magmatic CO<sub>2</sub> at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California, 1995-1999. *Chemical Geology*, 177: 101-116.

Gestur Gíslason og Magnús Á. Sigurgeirsson, 1996. *Athugun á búnaði til mælinga á gufustreymi úr gufuaugum. Samstarfsnefnd Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar um umhverfisáhrif jarðhitanytingar* Orkustofnun OS-96050/JHD-31b, 9 bls.

Grétar Ívarsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Einar Gunnlaugsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1993. Mælingar á gasi í andrúmslofti. Styrkur brennisteinsvetnis, brennisteinsdíoxíðs og kvikasilfurs á háhitasvæðum. Samvinnuverkefni Orkustofnunar og Hitaveitu Reykjavíkur. OS-93074/JHD-16, 69 bls.

Heimasíða Airflow<sup>TM</sup>. Specialists in Air Movement Technology (júní 2002). Pitot Static Tube, <http://www.airflow.co.uk/instr/static-pit.htm>



Heimasíða eFunda: engineering fundamentals (júni 2002). eFunda: Theory of Pitot Static Tubes,

[http://www.efunda.com/designstandards/sensors/pitot\\_tumes/pitot\\_tubes\\_theory.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/pitot_tumes/pitot_tubes_theory.cfm)

Heimasíða PELCHEM™ (júli 2002). Sulphur Hexafluoride:

[http://www.pelchem.com/sulfur\\_hexafluoride.html](http://www.pelchem.com/sulfur_hexafluoride.html)

Heimasíða USGS (júli 2002). USGS: The Reston SF<sub>6</sub> Laboratory: SF<sub>6</sub> Sampling,

<http://water.usgs.gov/lab/sf6/sampling>

Heimasíða U.S. Environmental Protection Agency (júli 2002). Catalog of Guidelines and Standards for the Handling and Management of Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>):

<http://www.epa.gov/highgwp1/sf6/pdf/sf6utility7.pdf>

Kabwe, L. K., M. J. Hendry, G. W. Wilson og J. R. Lawrence, 2002. Quantifying CO<sub>2</sub> fluxes from soil surfaces to the atmosphere. *Journal of Hydrology*, 260: 1-14.

Klopfenstein Jr., R., 1998. Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. *ISA Transactions*, 37: 257-263.

Klusman, R. W., J.N. Moore og M.P. LeRoy, 2000. Potential for surface gas flux measurements in exploration and surface evaluation of geothermal resources. *Geothermics*, 29: 637-670.

Moncrieff, J.B., J.M. Massheder, H. de Bruin, J. Elbers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Sogaard og A. Verhoef, 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 188-189, 589-611.

Mori, T., P.A. Hernández, J.M.L. Salazar, N.M. Pérez og K. Notsu, 2001. An in situ method for measuring CO<sub>2</sub> flux from volcanic-hydrothermal fumaroles. *Chemical Geology*, 177: 85-99.

Norman, J.M., C.J. Kucharik, A.T. Gower, D.D. Baldocchi, P.M. Crill, M. Rayment, K. Savage og R.G. Striegl, 1997. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *Journal of Geophysical Research*, (D24) 102: 28.771-28.777.

NJF seminar no: 342. Agricultural soils and greenhouse gasses in cool-temperate climate. Hotel Reykholt, W-Iceland, 31. July – 3. August 2002.

Oskarsson, N., K. Pálsson, H. Ólafsson og T. Ferreira, 1999. Experimental monitoring of carbon dioxide by low power IR-sensors: soil degassing in the Furnas Volcanic Center, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92: 181-193.

Rashid, K.A., D. Gavril, N. A. Katsanos og G. Karaiskakis, 2001. Flux of gases across the air-water interface studied by reversed-flow gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 934: 31-49.

Rogie J.D., D.M. Kerrick og M.L. Sorey, 2001. [Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California](#). Earth and Planetary Science Letters, 188: 535-541.

Orkustofnun, 12. ágúst 2002

*Ingunn María Þorbergsdóttir og Halldór Ármannsson.*

## **Viðauki**