

LV-2011-017



Landsvirkjun



# Útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum

Náttúran

Mótvægisáðgerðir

Laga- og regluumhverfi

## Upplýsingablað



Skýrsla LV nr: LV-2011-017

Dags: 30. júlí 2011

Fjöldi síðna: 25

Upplag: 10

Dreifing:

- Opin  
 Birt á vef LV  
 Takmörkuð til

Titill: Útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum

Höfundar / fyrirtæki Landsvirkjun; Sigurður Óli Guðmundsson og Bjarni Pálsson.

Verkefnisstjóri: Bjarni Pálsson

Unnið fyrir: Landsvirkjun

Samvinnuaðilar: \_\_\_\_\_

Útdráttur: Unnið er að gerð loftslagsáætlunar hjá Landsvirkjun þar sem öll losun gróðurhúsalofttegunda frá fyrirtækinu er skoðuð og kannaðar mögulegar aðgerðir til að draga úr losun. Hluti af því er að skoða útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum fyrirtækisins, sem er stór hluti losunar í starfsemi fyrirtækisins. Í þessari skýrslu er reynt að varpa ljósi á útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum og hvort um er að ræða náttúrulegt útstreymi eða manngert. Skoðaðar eru nokkrar mótvægisáðgerðir og farið yfir það lagaumhverfi sem tengt er útstreymi frá jarðvarmavirkjunum.

### Lykilorð:

Loftslagsáætlun, útstreymi, losun, jarðvarmi, jarðvarmavirkjun, gróðurhúsaáhrif, gróðurhúsalofttegundir, GHG, koltvísýringur, gas, mótvægisáðgerðir, losunarbókhald.

ISBN nr:

Samþykki verkefnisstjóra  
Landsvirkjunar

# Útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum

Náttúran  
Mótvægisáðgerðir  
Laga- og regluhverfi

## Samantekt

Óvissa er um það í alþjóðasamfélaginu hvort útstreymi frá jarðvarmavirkjunum sé tilfærsla á náttúrulegu útstreymi eða hvort um manngerða aukningu útstreymis sé að ræða. Ítalía gefur útstreymi frá jarðvarmavirkjunum ekki upp í losunarbókhaldi sínu sem skilað er vegna Loftslagsamnings Sameinuðu þjóðanna árlega, en það gera hins vegar auk Íslands meðal annars Portúgal, Nýja Sjáland og Bandaríkin. Ítalía styður með vísindalegum gögnum þá ákvörðun sína að gefa útstreymi frá jarðvarmavirkjunum ekki upp í losunarbókhaldinu. Engar leiðbeiningar hafa verið gefnar upp um það á vegum IPCC hvernig meta eigi útstreymi frá þessum geira. Ráðlagt er þó að þetta sé gefið upp og var gerð athugasemd við það í yfirferð á losunarbókhaldi Íslands þegar útstreymi frá jarðvarmavirkjunum var undanskilið á árunum 2001 - 2005. Áhugavert væri að skoða frekar niðurstöður frá Lardarello á Ítalíu og þau gögn sem þar liggja að baki og bera saman við Ísland. Ljóst er að frekari rannsókna er þörf og Landsvirkjun þarf að afla sér ítarlegri og afdráttarlausari upplýsinga frá sérfræðingum á þessu sviði ef fyrirtækið vill fá vissu í málið. Áhugavert væri að mæla útstreymi koltvísýrings frá fyrirhuguðum virkjanasvæðum áður en framkvæmdir hefjast og ná með því að kortleggja grunnástand svæðisins fyrir virkjun þess. Þessum mælingum yrði svo haldið áfram reglulega á rekstartíma virkjunarinnar.

Allar tölur um vinnslu og losun gróðurhúsalofttegunda frá jarðvarmavirkjunum Landsvirkjunar eru vistaðar í gagnagrunninum ViewData. Á árinu 2010 og fram á ár 2011 var aðferðum við úrvinnslu þessara gagna breytt og samræmd aftur í tímunn, meðal annars er nú fyrst greint á milli vinnsluborhola sem tengdar eru virkjun og því hluti af raforkuvinnslunni og rannsóknarborhola. Samkvæmt uppfærðum tölum var heildarútstreymi gróðurhúsalofttegunda frá jarðvarmavirkjunum og rannsóknarborunum árið 2010 um 45.000 tonn CO<sub>2</sub>-ígildi, eða tæplega 75% af heildarútstreymi gróðurhúsalofttegunda fyrirtækisins. Landsvirkjun vinnur að undirbúningi jarðvarmavirkjana á fimm stöðum á landinu og er heildarstærð þeirra virkjunarkosta á bilinu 300 – 1.000 MW, því er ljóst að útstreymi frá jarðvarmavirkjunum á vegum Landsvirkjunar mun aukast talsvert ef eitthvað af þessum virkjunarkostun verða að veruleika.

Mörg verkefni eru í gangi sem snúa að bindingu koltvísýrings eða notkun hans í iðnaði víða um heim. Mikil framför hefur verið á síðustu árum og margar aðferðir hafa verið prófaðar og/eða eru í þróun. Í þessari skýrslu voru skoðaðar þrjár aðferðir sem horft hefur verið til héraendis en þær eru binding í jarðlögum, efnahvörf til framleiðslu eldsneytis og líftækni meðal annars til framleiðslu fóðurs. Án þess að horft hafi verið út fyrir landsteinana í þessari samantekt er ljóst að möguleikar á aðgerðum til að draga úr útstreymi koltvísýrings jarðvarmavirkjana eru nokkrir og við fyrstu sýn virðast þeir geta nýst vel sem mótvægisáðgerðir vegna útstreymis koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum Landsvirkjunar. Landsvirkjun hefur þegar skoðað aðkomu að hluta þessara verkefna.

Losun koltvísýrings frá orkuvinnslu, þar með talið frá jarðvarmavirkjunum, er ekki meðal forgangsatríða ríkisstjórnarinnar miðað við aðgerðaráætlun í loftslagsmálum sem samþykkt var árið 2010. Hins vegar er ljóst að losun frá orkuvinnslu má ekki aukast miðað við losun 2005, eigi markmið um samdrátt í losun fyrir árið 2020 að nást. Í Loftslagssamningi Sameinuðu þjóðanna eru ákvæði um upplýsingagjöf um losun frá endurnýjanlegri orkuvinnslu það er frá lónum og jarðvarmavirkjunum en

ekki er líklegt að þau ákvæði verði hert á næstu árum. Ekki eru heldur sérstök ákvæði um þessa gerð losunar í viðskiptakerfi ESB (EU-ETS) sem Ísland vinnur að inngöngu í þó svo að losunin gæti fallið undir sérstakan flokk í kerfinu sem nefnist „skipting birgða“. Auk þess verður að horfa til þess að kolefnismarkaðir eru enn að mótast og að núverandi tímabil (2008 – 2012) á markaði ESB tekur einungis til lítils hluta þeirrar starfssemi sem losar gróðurhúsalofttegundir á heimsvísu. Stefnan er að fella ávallt fleiri geira undir kerfið, hvort útstreymi frá jarðvarmavirkjunum mun falla þar undir eða hvenær er erfitt að segja til um. Óvissa vegna áframhalds Kyoto bókunarinnar er einnig mikil. Þrátt fyrir það er mikilvægt fyrir Landsvirkjun að vera vel í stakk búna til að takast á við þær breytingar sem mögulegar eru og því mikilvægt fyrir fyrirtækið að vera meðvitað um losun gróðurhúsalofttegunda frá starfsemi og að fylgjast vel með mögulegri þróun á þessum vettvangi.

## Efnisyfirlit

Inngangur .....	1
<b>1. Kortlagning - Náttúrulegt útstreymi og útstreymi frá jarðvarmavirkjunum.....</b>	<b>3</b>
1.1 Almennt um losun gróðurhúsalofttegunda frá orkuframleiðslu á Íslandi.....	3
1.2 Almennt um útstreymi frá háhitasvæðum .....	4
1.3 Náttúrulegt eða manngert útstreymi? .....	5
<b>2. Mótvægisáðgerðir.....</b>	<b>11</b>
2.1 Binding í jarðlögum .....	11
2.1.1 CarbFix.....	11
2.2 Efnahvörf til framleiðslu eldsneytis.....	13
2.2.1 CRI – Framleiðsla á metanóli.....	13
2.2.2 Mitsubishi í samstarfi við Elkem Ísland ehf – DME framleiðsla.....	14
2.3 Framleiðsla á lífmassa .....	16
2.4 Samantekt mótvægisáðgerða .....	17
<b>3. Laga- og regluhverfi, möguleg þróun.....</b>	<b>18</b>
3.1 Útstreymi frá jarðvarmavirkjunum.....	18
<b>4. Heimildaskrá.....</b>	<b>22</b>

## Töfluskrá

<b>Tafla 1</b> - Leið koltvísýrings til yfirborðs skv. erlendum rannsóknum. Heimild: (Ármannsson, 2003).....	5
<b>Tafla 2</b> - Leið koltvísýrings til yfirborðs skv. rannsókn frá Reykjanesi. Heimild: (Fridriksson o.fl. 2006) og (Ármannsson og Dereinda, 2010) .....	6
<b>Tafla 3</b> - Útstreymi frá Kröflu, Svartsengi og Nesjavöllum. Heimild: (Ármannsson o.fl., 2005).....	7
<b>Tafla 4</b> - Útstreymi koltvísýrings frá nokkrum jarðvarma- og eldfjallasvæðum í heiminum. Heimild: (Ármannsson o.fl., 2005). .....	9

## Myndaskrá

<b>Mynd 1</b> - Útstreymi GHG á Íslandi 2008 samkvæmt þeim flokkum notkunar sem Kyoto bókunin tekur til. Heimild: Unnið upp úr (Birna Sigrún Hallsdóttir o.fl., 2010).....	3
<b>Mynd 2</b> - Hugmyndalíkan fyrir uppruna og streymi koltvísýrings frá eldvirkum háhitasvæðum. Heimild: Landsvirkjun. ....	4
<b>Mynd 3</b> - Hellsheiðarvirkjun. Heimild: (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. c.) .....	11
<b>Mynd 4</b> - Framleiðsluferill metanóls. Heimild: CRI. ....	13
<b>Mynd 5</b> - Þrívíddarmynd af fyrirhugaðri verksmiðju CRI sem framleiða mun vistvænt eldsneyti á háhitasvæðinu við Svartsengi. Heimild: CRI/Arkís.....	14
<b>Mynd 6</b> - Framleiðsluferli DME fyrir fyrirhugaða verksmiðju á Íslandi. Heimild: (Iðnaðarráðneytið o.fl., 2010)..	15
<b>Mynd 7</b> - Rafmagnsframleiðsla með jarðhita árið 2009 eftir löndum. Innfellda myndin sýnir meðal varmaflæði (e. heat flow) í $\text{mW/m}^2$ og flekaskilin. Heimild: (Goldstein o.fl., 2011). .....	20

## Inngangur

Ísland hefur gengist undir alþjóðlegar skuldbindingar í loftslagsmálum vegna rammisamnings Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar, svokallaðs Loftslagssamnings og vegna Kyoto bókunarinnar sem gildir til ársins 2012. Hluti af skuldbindingum Íslands vegna Loftslagssamningsins er að veita upplýsingar um stefnumörkun og aðgerðir til þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, ásamt heildarlosun og bindingu. Þessar upplýsingar eru skráðar í svokallað losunarbókhald sem gefið er út árlega og skilað til Loftslagsstofnunar Sameinuðu þjóðanna. Ísland hefur einnig tekið upp talsvert af regluverki ESB í loftslagsmálum í gegnum EES samninginn. Árið 2007 settu íslensk stjórnvöld fram markmið um samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda (GHL) um 50 - 75% fram til ársins 2050 miðað við árið 1990 (Umhverfisráðuneytið, 2007). Sama ár var skipuð sérfræðinganefnd til að fjalla um tæknilega möguleika á að draga úr nettóútstreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi undir formennsku Brynhildar Davíðsdóttur og skilaði hún af sér niðurstöðum um mitt ár 2009. Í framhaldi af því samþykkti ríkistjórn Íslands aðgerðaráætlun í loftslagsmálum síðla árs 2010. Þá hefur Landsvirkjun skuldbundið sig til að upplýsa um losun gróðurhúsalofttegunda frá eigin starfsemi þar sem fyrirtækið er aðili að Global Roundtable on Climate Change (GROCC). Landsvirkjun hefur auk þess yfirlýst markmið um að verða kolefnishlutlaust fyrirtæki.

Þó nokkur óvissa er um alþjóðlegar skuldbindingar eftir árið 2012 og því mikilvægt fyrir Landsvirkjun að vera vel í stakk búna til að takast á við mögulegar breytingar. Mikilvægt er fyrir fyrirtækið að vera meðvitað um losun gróðurhúsalofttegunda frá starfsemi sinni og að fylgjast vel með þróuninni á vettvangi loftslagsmála. Vegna þessa er unnið að gerð loftslagsáætlunar hjá Landsvirkjun, í þeirri vinnu þarf að skoða alla losun GHL frá starfsemi fyrirtækisins og kanna mögulegar aðgerðir til að draga úr losuninni eins mikið og hægt er án þess að stefna rekstraröryggi fyrirtækisins í hættu. Huga þarf að mörgum þáttum vegna losunar GHL og er útstreymi GHL frá jarðvarmavirkjunum einn þeirra.

Í árslok 2010 voru tvær jarðvarmavirkjanir í eigu Landsvirkjunar, Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð, samanlagt afl þeirra er 63 MW og var heilarraforkuvinnsla þessara tveggja stöðva árið 2010 um 515 GWst. Allar tölur um vinnslu og losun gróðurhúsalofttegunda frá jarðvarmavirkjunum eru vistaðar í gagnagrunninum ViewData. Á árinu 2010 og fram á ár 2011 var aðferðum við úrvinnslu þessara gagna breytt og samræmd aftur í tímann, meðal annars er nú fyrst greint á milli vinnsluborhola sem tengdar eru virkjun og því hluti af raforkuvinnslunni og rannsóknarborhola. Samkvæmt uppfærðum tölum var heildarútstreymi gróðurhúsalofttegunda frá jarðvarmavirkjunum og rannsóknarborunum árið 2010 um 45.000 tonn CO<sub>2</sub>-ígildi, eða tæplega 75% af heildarlosun gróðurhúsalofttegunda fyrirtækisins. Landsvirkjun vinnur að undirbúningi jarðvarmavirkjana á fimm stöðum á landinu og er heildarstærð þeirra virkjunarkosta á bilinu 300 – 1.000 MW, því er ljóst að útstreymi frá jarðvarmavirkjunum á vegum Landsvirkjunar mun aukast talsvert ef eitthvað af þessum virkjunarkostun verða að veruleika.

Í þessari skýrslu er ætlunin að átta sig á hlut jarðvarmavirkjana í losunarbókhaldinu, skoða útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum og mögulegar mótvægisáðgerðir. Auk þess verður farið yfir það lagaumhverfi sem tengt er losun gróðurhúsalofttegunda og snýr að útstreymi frá jarðvarmavirkjunum, ásamt mögulegri þróun á þeim vettvangi. Greinargerðin er þrískipt þar sem leitast er eftir því að velta upp eftirfarandi þáttum:



**1. Kortlagning – Náttúrulegt ústreymi og ústreymi vegna jarðvarmavirkjana:**

Skoðað náttúrulegt ústreymi koltvísýrings frá háhitasvæðum. Reynt að velta upp hversu mikið af ústreyminu er náttúrulegt og hversu mikið er vegna virkjunar jarðvarmans.

**2. Mótvægisgerðir:**

Gerð er grein fyrir þeim mótvægisgerðum sem til skoðunar eru á Íslandi og nýst gætu vegna ústreymis koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum. Helst er horft til þriggja aðferða en þær eru binding í jarðlögum, efnahvörf til framleiðslu eldsneytis og líftækni meðal annars til framleiðslu fóðurs. Þrjú verkefni voru sérstaklega tekin til skoðunar en þau eru CarbFix verkefnið, metanólframleiðsla á vegum CRI og framleiðsla á DME í samstarfi við Mitsubishi.

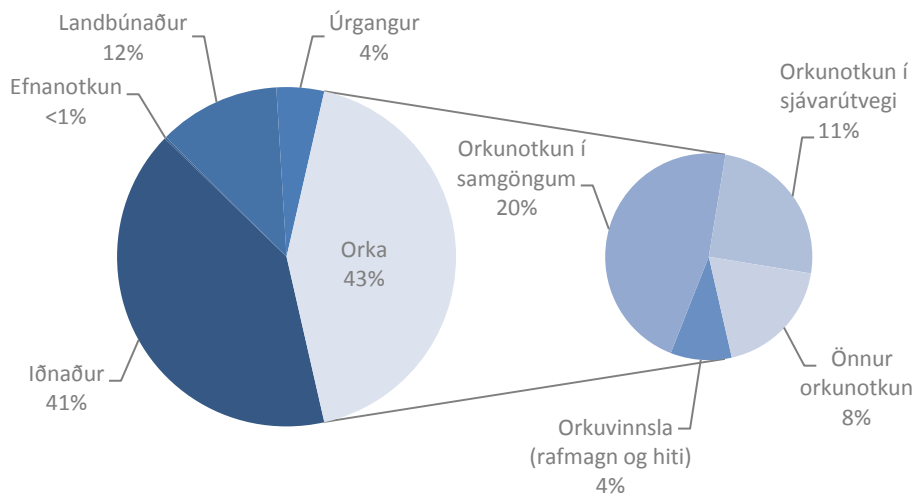
**3. Laga- og regluhverfi tengt ústreymi gróðurhúsalofttegunda frá jarðvarmavirkjunum:**

Að mestu leyti er vísað í almenna umfjöllun um laga- og regluhverfi tengt loftslagsmálum í skýrslu Landsvirkjunar, LV-2011-016 *Loftslagsáætlun Landsvirkjunar: Aðgerðir vegna losunar gróðurhúsalofttegunda*, en þar er ítarleg umfjöllun um málaflokkinn. Í þessari skýrslu er þó velt upp atriðum sem snúa sérstaklega að jarðvarmavirkjunum.

Vinna við skýrslugerðina og upplýsingaöflun fór að mestu leyti fram í desember 2010 og janúar 2011 og miðast upplýsingar skýrslunnar við það. Skýrslan var hins vegar ekki búin til útgáfu fyrr en í júní 2011 og var þá texti hennar uppfærður lítilsháttar.

# 1. Kortlagning - Náttúrulegt útstreymi og útstreymi frá jarðvarmavirkjunum

## 1.1 Almennt um losun gróðurhúsalofttegunda frá orkuframleiðslu á Íslandi



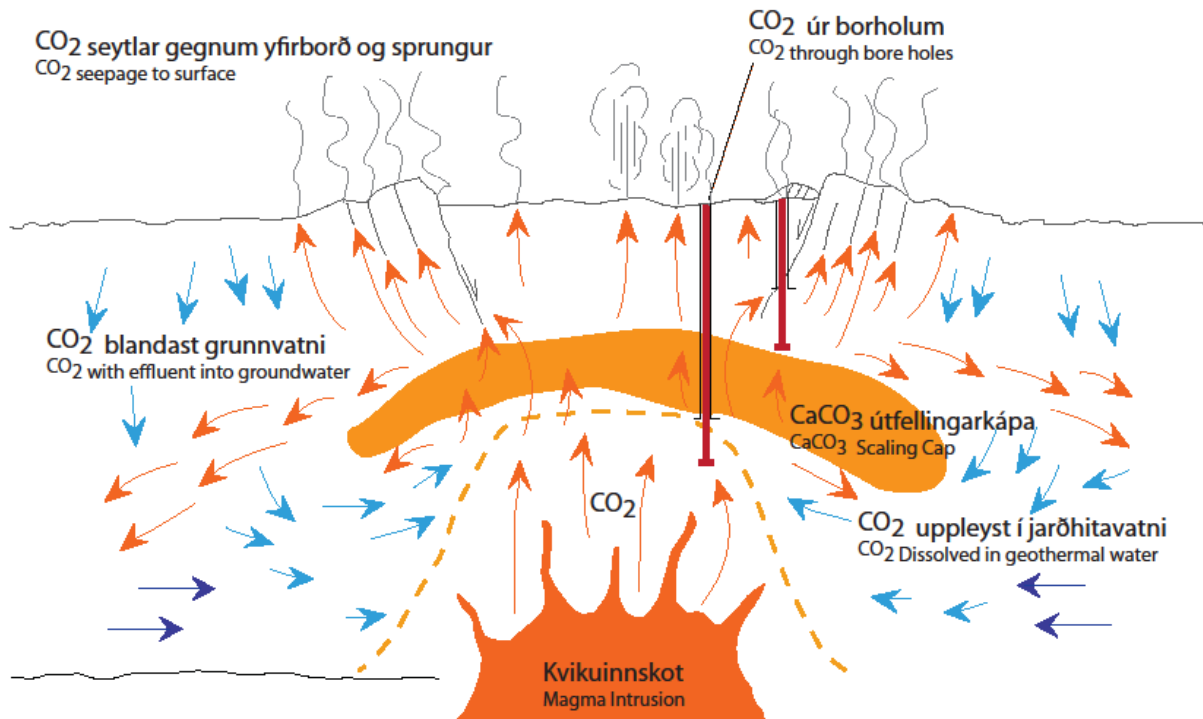
Mynd 1- Útstreymi GHG á Íslandi 2008 samkvæmt þeim flokkum notkunar sem Kyoto bókunin tekur til. Heimild: Unnið upp úr (Birna Sigrún Hallsdóttir o.fl., 2010).

Ísland hefur talsverða sérstöðu í orkumálum og er losun GHG frá orkuframleiðslunni hérlendis lítil miðað við önnur lönd enda er langstærstur hluti orkunnar hérlendis frá endurnýjanlegum orkuauðlindum, jarðvarma og vatnsafla (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl., 2009). Losun frá orkuvinnslu (til hita og rafmagnsframleiðslu) var um 4% af heildarútstreymi Íslands árið 2008 líkt og sést á mynd 1. Brynhildur Davíðsdóttir o.fl. (2009) fjalla um losun frá orkuvinnslu hérlendis í skýrslu sinn um möguleika til að draga úr nettóútstreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi og er allur texti að neðan fenginn þaðan. Í skýrslunni kemur fram að losun GHG í orkuframleiðslu sé aðallega vegna notkunar jarðefnaeldsneytis og frá jarðvarmavirkjunum. Almennt reiknast engin losun gróðurhúsalofttegunda frá vatnsaflsvirkjunum, en þó ber að geta þess að losun hlýst af vatnsaflsvirkjunum aðallega vegna rotnunar lífmassa í uppistöðulónum. Þetta er þó ekki tekið með vegna Kyoto bókunarinnar en gefið upp í losunarbókhaldi Íslands vegna Loftslagssamningsins. Vegna þess að notkun jarðefnaeldsneytis til raforkuframleiðslu hefur minnkað mikið á Íslandi á síðustu árum er losun frá orkuvinnslunni aðallega háð útstreymi frá jarðvarmavirkjunum, en árið 2007 var um 83% losunar frá orkuframleiðslu landsins frá jarðvarmavirkjunum. Auk þess er fjallað um aðferðir til að draga úr losun vegna orkuframleiðslu hérlendis og er helsta áherslan á útstreymi frá jarðvarmavirkjunum. Bent er á nokkrar leiðir til að draga úr útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum og er helst horft til þriggja aðferða en þær eru binding í jarðlögum, efnahvörf til framleiðslu eldsneytis og líftækni meðal annars til framleiðslu fóðurs. Í skýrslunni er einnig bent á aðferðir til að auka nýtni virkjananna og talið líklegt að aukning í losun GHG vegna orkuframleiðslu landsins verði vegna nýrra jarðvarmavirkjana.

## 1.2 Almennt um útstreymi frá háhitasvæðum

Háhitasvæði á Íslandi eru öll tengd virkum eldstöðvum og varmastreymi inn í svæðin kemur úr fremur grunnstæðum kvikuinnskotum eða kvikuþróum. Kólnandi kvikuinnskot eru talin losa frá sér kvikugös, sem flest eru léttari en vatn og gufa og leita því upp til yfirborðs. Kvikugösin eru aðallega koltvísýringur ( $\text{CO}_2$ ), brennisteinsvetni ( $\text{H}_2\text{S}$ ) en einnig lítill hluti meðal annars vetnis ( $\text{H}_2$ ), niturs ( $\text{N}_2$ ) og metans ( $\text{CH}_4$ ). Hluti kvikugasanna eru því gróðurhúsalofttegundir, að langstærstum hluta koltvísýringur. Koltvísýringurinn leysist upp að hluta í jarðhitavatninu en sé vatnið yfirmettað með tilliti til karbónatsteinda leitar hann ýmist við að hvarfast við steindir úr bergi, einkum sem kalk ( $\text{CaCO}_3$ ), leitar út úr jarðhitakerfinu með afrennsli eða leitar til yfirborðs í gegnum sprungur eða jarðveg. Koltvísýringurinn fellur oft út þar sem suða á sér stað í jarðhitakerfinu. Hugmyndalíkan fyrir uppruna og streymi koltvísýring frá eldvirkum háhitasvæðum má sjá á mynd 2.

Mynd 2 - Hugmyndalíkan fyrir uppruna og streymi koltvísýring frá eldvirkum háhitasvæðum. Heimild: Landsvirkjun.



Ljóst er að þegar boraðar eru holur ofan í jarðhitageyminn mun gas líklega leita að auðveldustu leið til yfirborðs, það er upp holuna. Þrýstingur nærri borholum fellur og staðbundin yfirmettun myndast í aðstremisikeilunni umhverfis holuna, oftast vegna suðu. Því er jarðhitavökvinn í fyrstu yfirmettaður af koltvísýringi en nær síðan nýju jafnvægi. Við vinnslu jarðhita streymir jarðhitavökvi um borholur til yfirborðs og sýður þá hluti vatnsfasans og mettunarmörk vökvans breytast verulega. Frjálst gas streymir með gufufasa frá skiljustöð að hverfli og eimsvala og er gasinu ýmist dælt eða því „jektað“ þaðan út í andrúmsloftið.

Mikilvægt er í þessu sambandi að velja upp þeirri spurningu hversu mikið náttúrulegt útstreymi koltvísýringis er frá jarðvarmasvæðum fyrir virkjun jarðhitans og hversu mikið útstreymið er vegna

virðjunarinnar sjálfrar? Meta þarf grunnástand útstreymis frá svæðinu fyrir byggingu jarðvarmavirkjunar svo áhrif virkjunarinnar á útstreymið séu ljós. Til að afla upplýsinga um viðfangsefnið var haldinn fundur með Halldóri Ármannssyni, jarðefnafræðingi hjá ÍSOR en hann hefur rannsakað útstreymi frá háhitasvæðum mikið og skrifað margar greinar tengdar rannsóknum sínum. Hann benti á fræðigreinar sem gott væri að kynna sér til að átta sig á viðfangsefninu. Í framhaldi af því voru lesnar um tíu fræðigreinar sem fjölluðu á einn eða annan hátt um viðfangsefnið. Í kaflanum hér að neðan hafa helstu atriði þessara greina verið dregin saman. Auk þess að velta upp þeim spurningum sem settar hafa verið fram hér að ofan var einnig leitast við að svara hvar, hvernig og hversu mikill koltvísýringur verður til og hvernig hann streymir til yfirborðs.

### 1.3 Náttúrulegt eða manngert útstreymi?

Fyrst ber að velta því upp hvar koltvísýringurinn myndast og hvernig hann streymir til yfirborðs. Ármannsson, Fridriksson og Kristjánsson (2005) lýsa uppruna koltvísýrings í jarðhitakerfum með eftirfarandi hætti:

*Geothermal systems can be considered as geochemical reservoirs of CO<sub>2</sub>. Carbon isotope ratios of CO<sub>2</sub> in Icelandic geothermal fluids indicate that degassing of mantle-derived magma is the sole source of CO<sub>2</sub> in these systems, elsewhere metamorphic decarbonation of marine limestone and decomposition of organic sediments are also important sources of CO<sub>2</sub> in some geothermal systems. CO<sub>2</sub> sinks in geothermal systems include calcite precipitation, CO<sub>2</sub> discharge to the atmosphere and release of CO<sub>2</sub> to enveloping groundwater systems. (bls. 290).*

Talið er að útstreymi koltvísýrings sé breytilegt eftir svæðum og benda margar rannsóknir til þess að jarðvirgni á svæðunum svo sem sprungur og misgengi geti haft mikil áhrif á útstreymið. Í Chiodini o.fl. (1998) kemur fram að: „...geothermal field evidence that active faults and fractures act as uprising channels of deep CO<sub>2</sub> rich geothermal or magmatic gases.“ (bls. 543). Rannsóknir frá Reykjanesi benda einnig til þessa en í Fridriksson o.fl. (2006) er þessu lýst með eftirfarandi hætti: „The soil diffuse degassing at Reykjanes appears to be strongly controlled by the local tectonics.“ (bls 1551). Koltvísýringurinn getur komist til yfirborðs með ólíkum leiðum og hefur það talsvert verið rannsakað. Niðurstöður úr erlendum rannsóknum fyrir þrjú ólík svæði má sjá í töflu 1.

Tafla 1 - Leið koltvísýrings til yfirborðs skv. erlendum rannsóknum. Heimild: (Ármannsson, 2003).

	Pantelleria Island	Furnas Volcano	Mammoth Mountain
Soil [%]	81	49	63-90
Focussed degassing [%]	7		
Fumarole [%]	0,0004		
Bubbles [%]	3		
Groundwater [%]	9	51	10-37

Fyrir Ísland var þetta rannsakað á Reykjanesi og skv. Fridriksson o.fl. (2006) og Ármannsson og Dereinda (2010) er ljóst að langmest af koltvísýringnum berst í gegnum jarðveginn (e. soil) eða um 97,3% af því útstreymi sem mælt var í rannsókninni, mun minna hlutfall útstreymisins kemst til yfirborðs í gegnum gufuaugu líkt og sést af töflu 2. Vísbendingar virðist einnig vera um að munur sé á jarðhitakerfum eftir því hvort vökva- eða gufufasinn er ríkjandi og í Ármannsson og Dereinda (2010)

kemur fram að: „...in vapour dominated systems the emissions are large to start with but then will decrease and if averaged over some years they can be treated as just a transfer while the same does not apply to liquid dominated systems.“ (bls 1-2).

Tafla 2 - Leið koltvísyrings til yfirborðs skv. rannsókn frá Reykjanesi. Heimild: (Fridriksson o.fl., 2006) og (Ármannsson og Dereinda, 2010)

Leið CO <sub>2</sub> til yfirborðs	Hlutfall af heildarústreymi CO <sub>2</sub> [%]
Soil (ísl. jarðvegur)	97,3
Steam vents (ísl. gufuaugu)	1,6
Pools (ísl. hverir)	1,1

Þrátt fyrir að jarðvarmi sé viðurkenndur sem endurnýjanleg orkulind þá hefur sérstaklega vinnsla jarðhitans á háhitasvæðum til framleiðslu rafmagns verið til umræðu á síðari árum vegna útblásturs CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S frá þessari starfssemi. Rannsóknir hafa sýnt að talsvert náttúrulegt ústreymi koltvísyrings er frá jarðhitasvæðum og í sumum tilfellum er náttúrulega ústreymið talsvert meira heldur en frá jarðvarmavirkjununum sjálfum (Ármannsson og Dereinda, 2010). Árið 2002 skrifuðu Bertaini og Thain grein þar sem þeir reyndu að leggja mat á ústreymi koltvísyrings frá þeim jarðvarmavirkjunum sem starfræktar voru í heiminum á þeim tíma. Vegið meðaltal ústreymis fyrir þær 85 jarðvarmavirkjanir sem skoðaðar voru var 122 g/kWst en rannsóknin náði yfir um 85% af uppsettu afli jarðvarmavirkjana þess tíma. Með því að bera þetta saman við notkun jarðefnaeldsneytis til raforkuframleiðslu þótti sýnt að virkjun jarðvarma væri umhverfisvæn og gæti því nýst sem lausn við vaxandi áhyggjum af losun gróðurhúsalofttegunda. Í þessari grein var einnig velt upp hinu náttúrulega ústreymi á mótis við það sem jarðvarmavirkjanir valda. Ármannsson (2003) fjallar um þennan samanburð og þar kemur fram það sjónarmið að ústreymi koltvísyrings frá jarðvarmavirkjunum sé þegar hluti af kolefnishringrásinni og í raun sé ekki verið að auka koltvísýring sem losaður er til andrúmsloftsins vegna jarðvarmavirkjana líkt og þar sem jarðefnaeldsneyti er brennt til orkuframleiðslu. Ármannsson og Dereinda (2010) vitna í rannsóknir frá Lardarello á Ítalíu en þar segir: „A study in the Lardarello field in Italy has shown a noticeable and measurable decrease in the natural release of CO<sub>2</sub> from the ground as a result of geothermal power development“. (bls 1). Í Ármannsson (2003) kemur einnig fram að vegna þróunarinnar í Lardarello hafi Ítalir ákveðið að ústreymi frá jarðvarmavirkjunum sé ekki manngert og því ekki gefið upp í losunarbókhalda landsins til Loftlagssamningsins en í greininni segir:

*Thus it is suggested that background emission from geothermal areas be estimated before the total added from a power plant is estimated. On the basis of the results of such studies Italy has decided not to include geothermal CO<sub>2</sub> emission as part of their anthropogenic greenhouse gas emission reported in connection with international agreements. (bls 56).*

Í Ármannsson (2003) kemur einnig fram að það sé mat Ítala að „...CO<sub>2</sub> emission can be regarded as being transferred in its location rather than being an addition to the CO<sub>2</sub> cycle.“ (bls 59-60). Íslendingar fylgdu fordæmi Ítala og gáfu ekki upp upplýsingar um ústreymi frá jarðvarmavirkjunum til Loftlagssamnings á árunum 2001 – 2005 (Birna Sigrún Hallsdóttir, 2010).

Í Ármannsson o.fl. (2005) var reynt að bera saman ústreymi frá jarðvarmavirkjunum og náttúrulegt ústreymi héraendis. Þegar greinin var skrifuð voru þrjár jarðvarmavirkjanir á Íslandi, í Kröflu,

Svartsengi og á Nesjavöllum. Af töflu 3 sést að útstreymi stöðvanna er ólíkt, útstreymi frá Nesjavöllum er langt undir heimsmeðallagi sem var 122 g/kWst ef miðað er við Bertaini og Thain (2002) en útstreymi frá bæði Svartsengi og Kröflu er yfir meðallagi. Í Ármannsson og Dereinda (2010) er fjallað ítarlegar um Svartsengi og Kröflu. Í Svartsengi myndaðist snemma árs 1990 nokkurs konar gufupúði eða tappi (e. steam pillow) í jarðhitakerfinu. Þegar borað var í þennan gufupúða til að nýta gufuna jókst útblástur koltvísýrings tímabundið en féll svo aftur. Þegar aftur var borað í gufupúðann á árunum 1998 - 2000 kom sama hegðun fram.

Tafla 3 - Útstreymi frá Kröflu, Svartsengi og Nesjavöllum. Heimild: (Ármannsson o.fl., 2005).

VirkJun	Vegna raforkuvinnslu		Vegna raforku- og varmvinnslu	
	CO <sub>2</sub> [g/kWh]	S as SO <sub>2</sub> [g/kWh]	CO <sub>2</sub> [g/kWh]	S as SO <sub>2</sub> [g/kWh]
<b>Krafla</b>	152	23	152	23
<b>Svartsengi</b>	181	5	74	2
<b>Nesjavellir</b>	26	21	10	8

Í Kröflu er um aðra skýringu að ræða. Margar holur voru boraðar í Kröflu á árunum 1997 – 1999 til að afla orku til stækkunar stöðvarinnar úr 30 MW í 60 MW. Flestallar borholurnar höfðu hátt vermi eða voru nálægt því að vera á gufuformi. Á þessum árum jókst útstreymi koltvísýrings umtalsvert en minnkaði svo aftur árið 2003 þrátt fyrir að framleiðslan væri ekki minnkuð. Þetta telja Ármannsson og Dereinda (2010) að ýti undir tilgátuna um það að hafi jarðvarmagufan hátt vermi eða gufufasi sé ríkjandi þá sé útstreymi koltvísýrings mikið í upphafi en minnki svo þegar á líður líkt og tilhneigingin virðist vera á Kröflusvæðinu. Rétt er þó að velta upp öðrum skýringum til dæmis því að hávermisholur eða dýpri holur vinna gufu úr jarðlögum sem eru nær hitagjafanum þar sem koltvísýringurinn á uppruna sinn. Ef gufan er unnin ofar í kerfinu hefur bæði vermið og koltvísýringurinn tapast í öðrum ferlum svo sem þynnst út eða fallið út sem CaCO<sub>3</sub>. Upplýsingar úr gagnagrunni Landsvirkjunar um útstreymi frá Kröflu sýna að útstreymi frá virkjuninni hefur verið að minnka á síðustu árum.

Í Ármannsson o.fl. (2005) eru teknar saman tilraunir sem gerðar hafa verið til að meta náttúrulegt útstreymi frá öllum jarðhita-/eldvirkum svæðum á Íslandi en þau eru um 35 - 40 talsins og er þar vísað í fjölda heimilda. Í greininni kemur fram að heildarútstreymi koltvísýrings hafi verið metið um 1,0 - 2,1·10<sup>9</sup> kg/ári af Arnórsson og Gíslason (1994) með aðferðafræði sem síðar var yfirfærð á Nýja Sjáland en mat þeirra byggir á: „...the assumption that convective flow of steam is the dominant heat transport process in these areas.“ (Ármannsson o.fl, 2005, bls 292). Hins vegar er bent á í Ármannsson o.fl. (2005) að út frá þeirri staðreynd að mestallur koltvísýringur sem streymir til yfirborðs er úr bergkvikunni, sé hægt með einföldum reikningi að áætla mögulegt árlegt streymi bergkviku til jarðskorpu sem reynist vera um 5,8·10<sup>11</sup> kg/ári en það var gert með eftirfarandi nálgunum: „Basaltic magma is intruded into the Icelandic crust along the ~ 500 km long volcanic zone where spreading occurs at a rate of 2 cm/year. The thickness of the crust in the rift zone is of the order of 20 km, assuming a density of 2.900 kg/m<sup>3</sup> for the magma, the annual amount of magma that is emplaced in the crust is therefore equal to 5,8 · 10<sup>11</sup> kg/year.“ (bls 292 – 293). Magn koltvísýrings sem mögulegt er að streymi frá kvikunni er talið vera um 1,3·10<sup>9</sup> kg/ári og er talið líklegt að það séu efri mörk þessa mats þar sem ekki er tekið tillit til neinnar bindingar koltvísýrings í þeirri

tölu. Ennfremur kemur fram í Ármannsson o.fl. (2005) að beinar mælingar hafa verið gerðar á tveimur svæðum landsins í Grímsvötnum og Eyjafjallajökli en einnig að hluta við Heklu og á Reykjanesi. Heildarústreymi þessara svæða er áætlað um  $3 \cdot 10^8$  kg/ári sem er um 25% af áætluðu heildarústreymi frá jarðhitasvæðum landsins og því getur verið að áætlað náttúrulegt heildarústreymi frá jarðhitasvæðum landsins sé vanáætlað, frekari rannsóknar er þó þörf til að hægt sé að fullyrða þar um. Árið 2002 var áætlað útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum landsins um  $1,6 \cdot 10^8$  kg og er því að minnsta kosti 8 – 16% af áætluðu heildarústreymi frá jarðhitasvæðum landsins. Í Ármannsson o.fl. (2005) var tekið á samanburði á náttúrulegu útstreymi frá jarðhitasvæðum landsins og útstreymi frá jarðvarmavirkjunum. Eftirfarandi texti er einkar áhugaverður:

*Comparison of the observed CO<sub>2</sub> emissions from Icelandic geothermal power plants with the estimated natural emissions from geothermal systems is of critical importance for evaluating the environmental effect of geothermal exploitation in Iceland. As noted above, the total CO<sub>2</sub> emission from the three major geothermal power plants in the country was  $1,6 \times 10^8$  kg in 2002, which is essentially equal to the natural CO<sub>2</sub> discharge from Grímsvötn, the most active volcano in Iceland. The emissions from power plants correspond to more than 8–16% of the maximum annual total emissions estimated on the basis of geologic constraints, as described above. This causes concern about the validity of the argument that CO<sub>2</sub> emissions from geothermal power plants in Iceland are negligible in comparison to natural emissions, although this argument may still apply to the situation in Italy. (bls 294).*

Samkvæmt þessu er því talið að ef til vill sé ekki réttmætanlegt af Íslendingum að álíta að útstreymi vegna jarðvarmavirkjana sé hverfandi miðað við náttúrulegt útstreymi frá jarðhitasvæðum landsins. Íslendingar hófu aftur að gefa upp þessar upplýsingar í losunarbókhalda sínu árið 2006 (Birna Sigrún Hallsdóttir, 2010) og var meðal annars vísað til niðurstaðna rannsókna Ármannssonar o.fl. (2005).

Nokkrar rannsóknir hafa verið gerðar við Kröflu þar sem reynt hefur verið að meta náttúrulegt útstreymi frá svæðinu. Ármannsson, Fridriksson, Wiese, Hernández og Pérez (2007) fjalla um rannsóknir á tveimur svæðum við Kröflu í grein sinni og eru niðurstöður þeirra rannsókna að: „*The natural emissions of CO<sub>2</sub> of geothermal origin in Krafla are of the order of 84 kt/yr.*” (bls. 189). Í greininni er einnig reynt að meta hversu mikið magn koltvísýrings hefur bundist í berginu á svæðinu. Bindingin virðist svæðabundin en áætlað er að um 1400 Mt hafi bundist á þeim tíma sem kerfið hefur verið virkt. Sú nálgun er gerð að: „*...the long-term average accumulation rate is between 12,7 kt/yr and 4,8 kt/yr.*” (bls. 192). Miðað við það fæst að hlutfallið á milli útstreymisins og þess gass sem binst sé um 7:1 – 17,5:1. Varhugaverð nálgun er gerð á magni útstreymisins sem hlýst ef til vill af því að ekki er áætlað að útstreymi hafi alltaf verið jafn mikið og það mældist árið 2007. Í Ármannsson og Dereinda (2010) er fjallað um nýja rannsókn sem gerð var á svæðinu og þá var rannsóknarsvæðið norðar og vestar heldur en í Ármannsson o.fl. (2007). Niðurstöður Ármannssonar og Dereinda (2010) voru að: „*The amount of soil diffuse CO<sub>2</sub> flux from geothermal origin is estimated around 14,13 t/d and the total CO<sub>2</sub> output is 26,33 t/d for a survey area of 2,5 km<sup>2</sup>.*” (bls. 5-6). Það gerir að heildarústreymið frá rannsóknarsvæðinu (með tilliti til bakgrunns mælinga) er um  $9,610 \text{ t/ári}$  eða  $0,0096 \cdot 10^9$  kg/ári sem er lágt miðað við fyrri rannsókn frá 2007. Höfundar telja það ekki óeðlilegt þar sem: „*...the new surveyed area generally showed a low CO<sub>2</sub> flux except for some points North-East of*

the Víti lake crater where there are surface manifestations of geothermal activity such as steam vents and mud pool.” (bls. 5). Þessi tala er einnig lág ef miðað er við önnur jarðhitasvæði heimsins líkt og sjá má af töflu 4.

Tafla 4 - Útstreymi koltvísýrings frá nokkrum jarðvarma- og eldfjallasvæðum í heiminum. Heimild: (Ármannsson o.fl., 2005).

Svæði	Útstreymi CO <sub>2</sub> [10 <sup>9</sup> kg yr <sup>-1</sup> ]
<b>Pantellera Island, Italy</b>	0,39
<b>Vulcano, Italy</b>	0,13
<b>Solfatara, Italy</b>	0,048
<b>Ustica Island, Italy</b>	0,26
<b>Popocatepetl, Mexico</b>	14,5 - 36,5
<b>Yellowstone</b>	10 – 22 <sup>a</sup>
<b>Mammoth Mountain, USA</b>	0,055-0,2
<b>White Island, New Zealand</b>	0,95
<b>Mt. Erebus, Antarctica</b>	0,66
<b>Taupo Volcanic Zone, New Zealand</b>	0,44
<b>Furnas, Azores, Portugal</b>	0,01
<b>Mid-Ocean Volcanic System</b>	30 - 1000

<sup>a</sup> Diffuse degassing only

Ármannsson og Dereinda (2010) yfirfæra niðurstöður rannsóknarsvæðisins (um 2,5 km<sup>2</sup> að stærð) á allt jarðhitasvæði Kröflu (um 50 km<sup>2</sup>) og með því fæst að náttúrulegt heildarútstreymi svæðisins er um 192,21 kt/ári. Sé það borið saman við áætlað útstreymi frá Kröflustöð frá 2006 sem var 63.500<sup>1</sup> t sést að náttúrulega útstreymið frá svæðinu er um 3 sinnum meira en frá Kröflustöð.

Ljúkum þessari yfirferð á kafla úr *Fridriksson o.fl.* (2006) þar sem lýst er niðurstöðum mats á útstreymi koltvísýrings fyrir þá fyrirhugaða 100 MW Reykjanesvirkjun. Eftirfarandi kafli er áhugaverður:

*Production of 100 MW<sub>e</sub> at Reykjanes requires approximately 168 kg/s. The steam will be separated at a pressure of 19 bar-a; taking 290 °C as the reservoir temperature, the corresponding steam fraction under these conditions will be 0,207. If the concentration of CO<sub>2</sub> in the deepfluid is taken to be equal to 1250 ppm (see Section 3.5) and the CO<sub>2</sub> is assumed to partition quantitatively into the steam, the concentration of CO<sub>2</sub> in the steam will be approximately 6000 ppm or 0.6% of the steam massflow. The resulting emissions of CO<sub>2</sub> from the planned power plant will be approximately 1 kg/s or 31.600 t/year. This value is a minimum estimate, because if a significant portion of the production at Reykjanes will be from wells that produce from the hottest parts of the geothermal reservoir, e.g., well RN-10, the CO<sub>2</sub> concentration of the produced steam could be significantly higher than 0.6%. Note that these calculations assume neither that production will result in the formation of a steam cap in the geothermal system nor that magmatic activity may increase the concentration of CO<sub>2</sub> in the deep fluid as happened in Krafla. The above calculations demonstrate that the planned power plant at*

<sup>1</sup> Þetta eru þær tölur sem miðað var við á þeim tíma sem greinin var skrifuð, Landsvirkjun lét árið 2011 endurskoða tölur um útstreymi frá jarðvarmavirkjunum fyrirtækisins.



*Reykjanes will significantly increase the CO<sub>2</sub> emissions from the geothermal system. If the present natural emissions do not change with time in response to production the increase will be about sixfold. (bls 1567).*

Af þessu er ljóst að áætlað var að heildarútstreymi frá svæðinu myndi aukast með tilkomu virkjunarinnar allt að sexfalt.

Ljóst er að mörgu þarf að hyggja í þessu máli og ekki er einhlítt svar við þeim spurningum sem velt var upp í upphafi. Athyglisvert er að velta upp eftirfarandi þremur kostum:

1. Er með tilkomu jarðvarmavirkjunar verið að flýta fyrir náttúrulegu útstreymi koltvísýrings tímabundið, útstreymið minnki svo aftur þegar á rekstartíma stöðvarinnar líður og útstreymið á líftíma hennar sé hverfandi?
2. Er um að ræða hreina útstreymisaukningu vegna virkjunarinnar?
3. Er útstreymið að hluta til náttúrulegt og að hluta til vegna virkjunarinnar?

Ágreiningur virðist vera um það hvort að með virkjun jarðvarma sé verið að auka heildarútstreymi koltvísýrings frá svæðinu eða hvort að útstreymi frá jarðvarmavirkjunum sé í raun tilfærsla á náttúrulegu útstreymi sem fram myndi koma sama hvort virkjað yrði eður ei. Svo virðist sem í því tilliti þurfi að horfa til hvers svæðis fyrir sig, þar sem þau virðast hegða sér með ólíkum hætti. Ítalir virðast hafa rök fyrir því að gefa upplýsingarnar ekki upp í losunarbókhaldi sínu en spurning er hvað gildir um Ísland. Í dag er allt útstreymi frá borholum sem nýttar eru til orkuvinnslu og rannsókna gefið upp í kolefnisbókhaldi Landsvirkjunar. Áhugavert væri að skoða frekar niðurstöður frá Lardarello á Ítalíu og þau gögn sem þar liggja að baki og bera saman við Ísland. Ljóst er að frekari rannsókna er þörf og Landsvirkjun þarf að afla sér afdráttarlausari upplýsinga frá sérfræðingum á þessu sviði ef fyrirtækið vill fá vissu í málið. Samantektin hér að ofan er einungis hugsuð sem fyrsta skrefið í þá átt.

Áhugavert væri að mæla útstreymi koltvísýrings frá fyrirhuguðum virkjanasvæðum áður en framkvæmdir hefjast og ná með því að kortleggja grunnástand svæðisins fyrir virkjun þess. Þessum mælingum yrði svo haldið áfram reglulega á rekstartíma stöðvarinnar. Því væri hægt að bera saman útstreymið fyrir og eftir virkjun og fylgjast með þróun þess. Fyrirhugaðar jarðvarmavirkjanir á Norðausturlandi eru áhugaverður kostur í því sambandi og væri tilvalið að fara í slíkar mælingar sumarið 2012.

## 2. Mótvægisáðgerðir

Samdráttur í losun GHG út í andrúmsloftið er eitt af stóru verkefnum þessarar aldar og til að hann nái fram að ganga þarf að grípa til mótvægisáðgerða. Jarðvarmavirkjanir eru þar ekki undanskildar. Mörg verkefni eru í gangi sem snúa að bindingu koltvísýrings eða notkun hans í iðnaði víða um heim. Mikil framför hefur verið á síðustu árum og margar aðferðir hafa verið prófaðar og/eða eru í þróun. Brynhildur Davíðsdóttir o.fl. (2009) fjalla í skýrslu sinni um aðferðir til að fanga útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum. Aðallega er horft til þriggja aðferða en þær eru binding í jarðlögum, efnahvörf til framleiðslu eldsneytis og líftækni meðal annars til framleiðslu fóðurs. Fjallað verður um þessar þrjár aðferðir hér að neðan með sérstaka áherslu á CarbFix verkefnið, metanólframleiðslu á vegum CRI og framleiðslu á DME í samstarfi við Mitsubishi.

### 2.1 Binding í jarðlögum

Koltvísýring er hægt að binda í basalti. Um er að ræða vel þekkt náttúrlegt ferli á jarðhitasvæðum og gengur CarbFix verkefnið út á að nýta sér þetta náttúrlega efnahvarf.

#### 2.1.1 CarbFix



Mynd 3 - Hellisheiðarvirkjun. Heimild: (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. c.)

CarbFix er rannsóknarverkefni á Hellisheiði þar sem ætlunin er að fanga koltvísýring úr jarðhitagufu, binda í efnasamband við basalt og mynda steindir. Með því móti er hægt að binda koltvísýringinn um þúsundir, jafnvel milljónir ára á stöðugu formi neðanjarðar (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl. 2007).

CarbFix er samstarfsverkefni milli Háskóla Íslands, Columbia háskóla í Bandaríkjunum, CNRS (National Center for Scientific Research) stofnunarinnar í Frakklandi og Orkuveitu Reykjavíkur (OR) ásamt ráðgjöfum en þar má nefna Verkfræðistofuna Mannvit og ÍSOR (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2009). Árið 2009 unnu einnig að verkefninu átta doktorsnema auk eins mastersnema (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2009). Formlega var verkefnið milli þessara samstarfsaðila sett af stað þann 29. september 2007 (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2009) en þó var undirbúningsvinna hafin fyrr.

Tilraunastaður fyrir verkefnið er Hellisheiðarvirkjun, sem staðsett er á sunnanverðu Hengilssvæðinu í Sveitarfélaginu Ölfusi í Árnassýslu og er núverandi framleiðslugeta upp á um 213 MW (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. c.). Í borholum á um 2000 m dýpi er jarðgufa beisluð til vinnslu og inniheldur gufan ýmis jarðhitagös, aðallega CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S og H<sub>2</sub> (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2009). CarbFix verkefnið snýr einungis að CO<sub>2</sub> en OR vinnur einnig að niðurdælingu á H<sub>2</sub>S. Notast þarf við gasskilju til að aðskilja CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S og geta unnið með hvora gastegund um sig. Hugmyndir OR eru að nota enga efnahvata í sinni gasskilju þar sem sú aðferð er dýr (Árni Gunnarsson verkefnastjóri hjá Landsvirkjun, munnleg heimild 15. desember 2010), aðferð OR er lýst svo í stöðuskýrslu CarbFix verkefnisins fyrir árið 2009:

*The process starts with a removal of Non-Condensable Gas, containing CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> and other gases, from the condenser at Hellisheiði geothermal plant. The gases will be compressed and cooled. A hydrogen component will be separated from the gas mixture by diffusion of H<sub>2</sub> through*

*membranes and/or absorption of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> into water in a scrubber, allowing H<sub>2</sub> to be released. The steam, comprised primarily of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> is then directed to the distillation column, where these components are separated.* (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2009, bls. 8).

Þegar gösin hafa verið aðskilin er hægt að meðhöndla gösin H<sub>2</sub>S og CO<sub>2</sub> hvort um sig á ólíkan hátt. Áætlað er að dæla báðum gösum aftur niður í jarðveginn en H<sub>2</sub>S þó mun dýpra (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2011), niðurdæling H<sub>2</sub>S er þó ekki hluti af CarbFix verkefninu. Í CarbFix verkefninu er áætlunin að leysa koltvísýringinn í vatni undir þrýstingi og dæla blöndunni niður um borholur á um 400 – 800 m dýpi rétt utan við mörk jarðhitasvæðisins en þar eru basaltslög (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. a). Vökvinn hvarfast við málmjónir svo sem kalsíum úr basaltinu og myndar kalsít steindir sem eru stöðugar (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. a). Með þessu móti er koltvísýringurinn bundinn á stöðugu formi í þúsundir ára neðanjarðar (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. a). Um er að ræða náttúrulegt efnahvarf en tilraunir CarbFix snúa meðal annars að því að flýta þessum efnahvörfum (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. b). Basaltið er einkum gott vegna þess hversu hvarfgjarnt það er, en það inniheldur einnig nóg af tvígildis/tengis málmjónum svo sem Ca, Mg og Fe sem nauðsynlegar eru til að mynda stöðugar karbónat steindir (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. b). Basalt er algeng bergtegund héraendis og er um 90% af Íslandi gert úr basalti en einnig eru stór basaltsvæði víða erlendis og ef verkefnið gengur eftir gæti reynst mögulegt að yfirfæra verkefnið á önnur basaltsvæði heimsins (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. a og Orkuveita Reykjavíkur, e.d., b). Þess ber að geta að holrýmd basaltsins er takmörkuð (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. a) og því gætu verið einhver takmörk á magni koltvísýrings sem hægt er að binda. Þetta þarf þó að rannsaka betur og ekki hægt að alhæfa neitt að svo stöddu. Hætta getur verið á því að gasið getið komið upp aftur og það þarf að vakta vel. Leki koltvísýrings er einn af þeim þáttum sem gaumgæfilega verður vaktaður þegar verkefnið verður prófað við raunverulegar aðstæður (Orkuveita Reykjavíkur e.d. b).

Rannsóknir hafa leitt í ljós að verkefnið gengur eftir á tilraunastofunni og í tölvumódelum. Uppsetning og prófun búnaðar í verkefninu er lokið og hefur verið sýnt fram á að hægt er að leysa upp CO<sub>2</sub> í því magni sem þarf til að dæla því uppleystu í vatni ofan í jörðina (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2011). Eftir er að sýna fram á hvort koltvísýringurinn bindist í bergi en vegna tæknilegra örðugleika, einkum vegna vandamála með gasskiljustöð, hefur ekki enn tekist að prófa niðurdælingu í einhverju mæli við raunverulegar aðstæður á Hellisheiði. Stjórnendur verkefnisins eru vongóðir um að stutt sé í að komist verði yfir tæknilega örðugleika (Hólmfríður Sigurðardóttir, 2011). Þegar hægt verður að prófa aðferðina við raunverulegar aðstæður kemur fyrst í ljós hvort sú tilgáta sem hér hefur verið lýst að ofan gangi upp.

Landsvirkjun var á frumstigum aðili að verkefninu þar til ákveðið var að setja upp tilraunstöð á Hellisheiði. Á haustmánuðum 2010 héldu aðilar frá Landsvirkjun fund með OR þar sem óskað var eftir því að fá að fylgjast með framgangi verkefnisins, ekki síst framvindu í málefnum gasskiljustöðvarinnar og niðurdælingar á H<sub>2</sub>S vegna áðurnefndrar nýrrar reglugerðar. (Árni Gunnarsson verkefnastjóri hjá Landsvirkjun, munnleg heimild 15. desember 2010).

Spennandi er að horfa til framgangs þessa verkefnis og er það eitthvað sem Landsvirkjun gæti að öllum líkindum yfirfært á sín háhitasvæði.

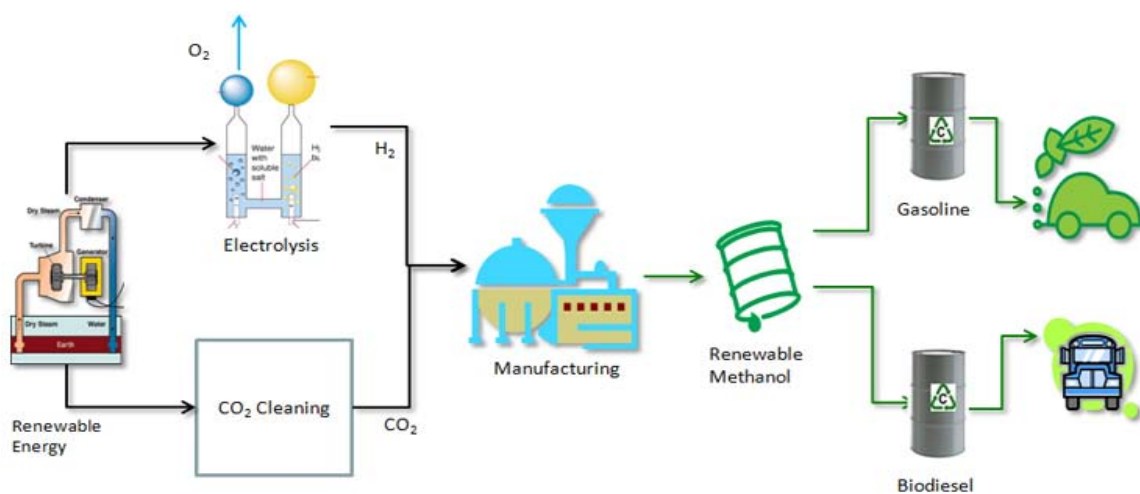
## 2.2 Efnahvörf til framleiðslu eldsneytis

Mögulegt er að fanga koltvísýring svo sem úr útblæstri jarðvarmavirkjana og nýta sem hráefni í eldsneytisframleiðslu. Eldsneyti úr kolvetnum sem búið er til með iðnaðarferlum er kallað gervioldsneyti eða tilbúið eldsneyti og þarf til framleiðslu þess vetni og kolefni (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl., 2009). Koltvísýringur er auðfánleg og ódýr gastegund og hentar því ágætlega til verksins, hins vegar er sameindin stöðug og erfið til hvörfunar, auk þess sem dýrt og orkufrekt getur verið að fanga og hreinsa gasið (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl., 2009). Tvö fyrirtæki hérlendis eru komin af stað með verkefni um eldsneytisframleiðslu af þessu tagi en þau eru Carbon Recycling International sem stefnir að framleiðslu metanóls og Mitsubishi í samstarfi við Elkem Ísland (áður Íslenska Járnblendifélagið) ehf. og fleiri aðila sem hyggja á framleiðslu dímetýl eter (DME).

### 2.2.1 CRI – Framleiðsla á metanóli

Carbon Recycling International (hér eftir CRI) er fyrirtæki sem stefnir að því að nýta íslenska raforku, koltvísýring og vatn til framleiðslu metanóls sem nota má sem íblöndunarefni í eldsneyti.

CRI var stofnað árið 2006 og er í eigu íslenskra og bandarískra fjárfesta. Aðalskrifstofa fyrirtækisins er á Íslandi, auk skrifstofu í La Jolla California í Bandaríkjunum (CRI, e.d. a). Margir aðilar eru í samstarfi við CRI og meðal samvinnuaðila má nefna Olís, HS Orku, Grindarvíkurbæ, Mannvit og NMI, (CRI, e.d. b). CRI hefur einkaleyfi á þeirri tækni sem þeir nota til framleiðslu metanólsins og því eru tæknileg úrvinnsluatriði framleiðslunnar ekki opinber gögn heldur einungis stóra myndin. Til framleiðslunnar þarf rafmagn, vatn og koltvísýring (CRI, e.d. b). Stílað er inn á að fá rafmagn frá endurnýjanlegum orkugjöfum svo sem jarðvarma, vatnsafli, vindorku eða sólarorku (CRI, e.d. b). Með rafgreiningu vatns fæst vetni sem notað er í framleiðsluna og súrefni. Koltvísýringurinn er unnin úr til dæmis jarðvarmagufu og hreinsaður í gasskilju með efnahvötum (Árni Gunnarsson verkefnastjóri hjá Landsvirkjun, munnleg heimild 15. desember 2010 og CRI, e.d. c). Vetni og koltvísýringi er blandað saman í réttum hlutföllum og nýtt til framleiðslu metanóls. Yfirlit yfir framleiðsluferilinn má sjá á mynd 4.



Mynd 4 - Framleiðsluferill metanóls. Heimild: CRI.

Endurnýjanlegu metanóli er hægt að blanda í bensín eða lífrænan dísil í ákveðnum hlutföllum án þess að breyta þurfi bíl vélum eða dreifingu eldsneytis (CRI, e.d. d). Helstu kostir endurnýjanlegs metanóls eru minni mengun, betri eldsneytisnýting og vonast er til að flytja þurfi minna inn af jarðefnaeldsneyti (CRI, e.d. d). Úr ákveðinni iðnaðarstarfsemi og borholum losnar koltvísýringur sem streymir út í andrúmsloftið. Með aðferðum CRI er hægt að nýta þann útblástur til framleiðslu metanóls sem íblöndunarefni í eldsneyti eins og lýst hefur verið að ofan. Þegar eldsneytið er brennt losnar koltvísýringurinn út í andrúmsloftið en þetta er sá koltvísýringur sem fangaður var frá iðnaðarferlunum og borholunum og einnig er líklegt að bruninn verði hreinni og eldsneytisnýtingin betri. Með þessu móti hefur því verið dregið úr losun koltvísýrings.

CRI hefur undirritað samkomulag við Íslenska aðalverktaka (ÍAV) um byggingu eldsneytisverksmiðju við Svartsengi og verður verksmiðjan sú fyrsta sinnar tegundar í heiminum (Morgunblaðið, 2010a). Verksmiðjan mun fá raforku og koltvísýring frá jarðvarmavirkjun HS Orku í Svartsengi og áætlað er að framleiðslugeta verksmiðjunnar verði um 5 milljónir lítrar af endurnýjanlegu metanóli á ári þegar fullum afköstum hefur verið náð, áform eru um að setja eldsneytið fyrst á innlandan markað (Morgunblaðið, 2010a).



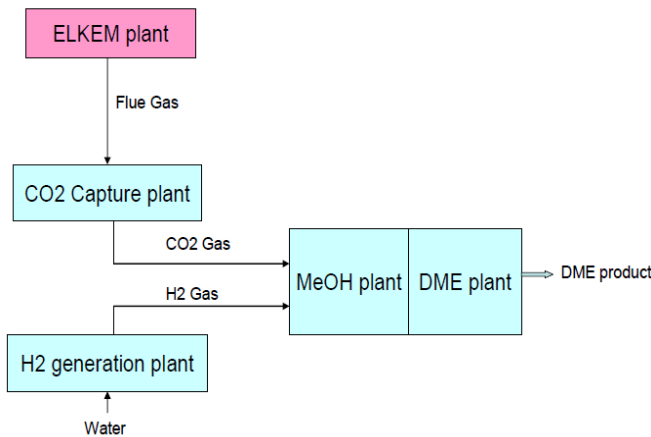
*Mynd 5 - Þrívíddarmynd af fyrirhugaðri verksmiðju CRI sem framleiða mun vistvænt eldsneyti á háhitasvæðinu við Svartsengi. Heimild: CRI/Arkís*

Landsvirkjun hefur skrifað undir viljayfirlýsingu um hagkvæmniathugun á metanólverksmiðju á Kröflusvæðinu í Mývatnssveit. Hagkvæmniathugunin snýr að því að kanna fýsileika þess að reisa metanólverksmiðju við Kröflu og er meðal annars verið að skoða efnisinnihald gufunnar og helstu viðskiptaforsendur. Unnið er að því að skilgreina allar helstu stærðir og breytur verkefnisins og er vonast til að þeirri vinnu verði lokið haustið 2011 (Þórólfur Nielsen, sérfræðingur hjá Landsvirkjun, munnleg heimild 14. desember 2010). Þessi vinna hefur verið unnin af starfsmönnum CRI í samstarfi við verkefnishóp innan Landsvirkjunar. Áhugavert verður að sjá niðurstöður hagkvæmniathugananna og ljóst að reynsla verður komin á verkefnið eftir að versmiðjan við Svartsengi kemst í rekstur.

### **2.2.2 Mitsubishi í samstarfi við Elkem Ísland ehf – DME framleiðsla**

DME eða dímetýl eter er lífrænt efnasamband með efnaformúluna  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$  og er litarlaus gastegund (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). DME hefur verið notað sem drifefni (e. propellant) í iðnaði um nokkurt skeið og þá helst við snyrtivörugerð, en á síðari árum hefur færst í vöxt að nota DME sem eldsneyti (Nexant, 2008). Vel hefur gefist að nota DME sem eldsneyti í lítið breyttum dísilvélum eða

sem íblöndunarefni í dísilolíu eða LPG<sup>2</sup> gös og er það þá undir þrýstingi og á fljótandi formi (Orkustofnun, e.d. og LPG Solutions, 2007). Bruni DME er mun hreinni en bruni dísilolíu og bensíns og er losun svifryks (PM), NO<sub>x</sub> og CO mun minni (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). Mesta framleiðsla DME á heimsvísu er í Kína, Japan, Kóreu og Brasilú en á síðari árum hafa önnur lönd verið að sækja í sig veðrið og má nefna hugmyndir um stórar framkvæmdir í Egyptalandi, Indlandi, Indónesíu, Íran og Úsbekistan (IDA, 2010).



Mynd 6 - Framleiðsluferli DME fyrir fyrirhugaða verksmiðju á Íslandi. Heimild: (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010).

Í lok árs 2008 var skrifað undir viljayfirlýsingu milli Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands (NMÍ), Iðnaðarráðuneytisins, Orkustofnunar, japanska fyrirtækisins Mitsubishi og Heklu um gerð hagkvæmniathugunar um byggingu og reksturs verksmiðju á Íslandi sem framleiðir DME. Framleiðslan byggir á nýlegri tækni sem Mitsubishi hefur þróað og hefur einkaleyfi fyrir (Nýsköpunarmiðstöð Íslands, 2008). Áhugi Japana er tilkominn vegna árangurs Íslendinga í hagnýtingu vatnsafls og jarðvarma (Nýsköpunarmiðstöð Íslands, 2008). Hagkvæmniathugunin skilaði jákvæðri niðurstöðu og hvorki þóttu vera tæknilegir né umhverfislegir annmarkar

sem slægju slíka verksmiðju út af borðinu (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). Horft hefur verið til verksmiðju á Grundartanga þar sem koltvísýringur frá Elkem Ísland ehf. yrði nýttur ásamt vetni úr rafgreiningu til framleiðslu á DME (Morgunblaðið, 2010b). Þar sem Mitsubishi á einkaleyfi á framleiðslutækninni hefur ekki mikið verið gefið út um þá tækni sem nota á við framleiðsluna og einungis var birtur útdráttur úr skýrslunni um hagkvæmniathugunina þar sem lokaskýrslan sjálf er trúnaðarmál.

Algengast er að framleiða DME úr svokölluðu efnasmíðagasi sem er gasblanda vetnis og kolmónoxíðs sem oftast er fengið úr jarðefnaeldsneyti svo sem jarðgasi eða kolum, einnig er hægt að framleiða DME úr koltvísýringi og vetni (Orkustofnun, e.d.). Hægt er að fá koltvísýringinn á marga vegu svo sem úr iðnaðarútblastri eða frá borholu. Vetnið er hægt að fá með ýmsu móti en algengast er að notast við rafgreiningu vatns (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). Fyrstu skref framleiðslu DME eru þau sömu og í metanólframleiðslu og því er framleiðsluferillinn mjög svipaður og við framleiðslu á metanóli. Hins vegar er DME unnið meira en metanólið og því má segja að DME sé unnið úr metanóli (Orkustofnun, e.d.). Af mynd 6 má sjá grófan framleiðsluferil DME fyrir fyrirhugaða verksmiðju á Íslandi. Útblásturinn, sem tekinn yrði úr Járblendiverksmiðjunni á Grundartanga, er ekki hreinn koltvísýringur og því þarf að byrja á því að hreinsa útblásturinn. Vetnið er svo fengið úr vatni með

<sup>2</sup> LPG er skammstöfun fyrir Liquefied petroleum gas sem er yfirheiti um jarðgös eins og própán og bútan sem eru fljótandi undir ákveðnum þrýstingi og hægt að nota sem eldsneyti. Notkun á LPG sem eldsneytisgjafa fyrir farartæki hefur aukist til muna á síðustu árum til dæmis í Bretlandi (LPG Solutions, 2007).

rafgreiningu (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). Efnasmíðagas er myndað með því að blanda CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub> saman í réttum hlutföllum og úr efnasmíðablöndunni er lokaafurðin DME búin til (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). Fyrirhugað er að notast við efnahvata og tækni sem Mitsubishi hefur einkaleyfi á (Iðnaðarráðuneytið o.fl., 2010). Eins og með metanólframléiðslu CRI sem lýst var hér að ofan dregur framleiðsla á DME úr losun koltvísýrings þar sem útblástur frá iðnaði eða borholum er nýttur til framleiðslu eldsneytisins í stað þess að fara út í andrúmsloftið.

DME getur nýst sem eldsneytisgjafi í stað dísilolíu og einungis þarf að breyta bílvélum lítillega til að geta nýtt DME auk þess sem sumir bílaframleiðendur eru farnir að hanna vélar sem ganga fyrir DME án breytinga (IDA, 2010).

### 2.3 Framleiðsla á lífmassa

Brynhildur Davíðsdóttir o.fl. (2009) fjalla í skýrslu sinni um tvær mismunandi leiðir til framleiðslu lífmassa til að binda koltvísýring frá jarðvarmavirkjunum og er fyrri aðferðinni lýst svo:

*Fjölmargar tegundir örvera geta bundið CO<sub>2</sub> í frumum sínum líkt og plöntur. Til þess þurfa þær nýtanlega orku, annað hvort úr ljósi (ljóstillífur) eða úr orkuríkum ólífrænum efnasamböndum (efnatillífur). Sprotafyrirtækið Prokátín ehf. hefur undanfarin ár unnið að þróun aðferðar til að rækta örverur á afgangi frá jarðhitaorkuverum og gert tilraunir í orkuverinu á Nesjavöllum. Örverurnar eru ræktaðar í tönkum og nýta orkuna úr H<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S sem er í jarðhitagasinu og binda um leið CO<sub>2</sub>. Við þetta myndast prótínríkur lífmassi með svipaða efnasamsetningu og næringargildi og hágæðafiskmjöl. (bls. 57).*

Hægt er að selja lífmassann til fóðurgerðar. Þessi aðferð er aðallega hugsuð til að binda brennisteinssambönd en í því ferli binst einnig nokkuð af koltvísýringi (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl., 2009). Auk þess er talið að hægt væri að auka mjölframléiðsluna með framleiðslu á vetni. Með 1 MW rafgreini væri mögulegt að framleiða 128 tonn af vetni árlega og með því fengist um 400 tonn af slíku mjöli og með því mætti binda um 770 tonn af koltvísýringi (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl., 2009). Hin leiðin sem nefnd er væri að framleiða lífdísil úr örpörungum en aðferðinni er lýst á eftirfarandi hátt:

*Vaxandi áhugi er nú víða um heim á ræktun örpörunga (microalgae) bæði til að binda CO<sub>2</sub> og framleiða lífdísilolíu (biodiesel). Líkt og plöntur nota örpörungar ljós sem orkugjafa og binda kolefni í lífmassa sínum. Úr lífmassa má vinna eldsneyti, fóður, matvæli og ýmsar verðmætar lífrænar afurðir. Örpörungar innihalda hátt hlutfall olíu og framleiðsla hráefnis til lífdísilframléiðslu úr þörungaræktun getur verið margfalt skilvirkari en úr plöntum m.t.t. þess landrýmis sem þarf til ræktunarinnar. Á þennan hátt má fá allt að 140.000 lítra af lífdísilolíu á hektara samanboreið við í mesta lagi 6.000 lítra séu plöntur notaðar. Af þessum sökum hafa rannsóknir stórukist á þessum möguleika og mörg verkefni eru í burðarliðnum. Ýmsir kostir gætu verið við ræktun örpörunga á Íslandi. Þar má nefna mikla birtu stóran hluta ársins, ódýrt rafmagn og aðgang að þéttum straumi af CO<sub>2</sub> frá jarðhitavirkjunum. Fýsilegt gæti verið að samnýta aðstöðu og búnað vegna fyrrgreindrar ræktunar sem nýtir H<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S og rækta jafnframt örpörunga á því CO<sub>2</sub> sem eftir væri í afganginu. Þetta á þó eftir að rannsaka betur og ekki liggja fyrir tölur um hugsanlega hagkvæmni. (Brynhildur Davíðsdóttir o.fl. 2009, bls. 57 – 58).*

Í maí 2011 hóf Landsvirkjun aðkomu að verkefnum Próaktín.

## 2.4 Samantekt mótvægisáðgerða

Án þess að horft hafi verið út fyrir landsteinana í þessari samantekt er ljóst, að möguleikar á aðgerðum til að draga úr losun koltvísýrings vegna útblásturs jarðvarmavirkjana eru nokkrir, og við fyrstu sýn virðast þeir geta nýst vel sem mótvægisáðgerðir vegna útstreymis koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum Landsvirkjunar.

CarbFix verkefnið gengur út á það að binda koltvísýring um þúsundir ára neðanjarðar á stöðugu formi sem steindir. CRI og DME verkefnin byggja bæði á því að skapa verðmæti úr koltvísýringnum. Þau eru mjög lík í grunninn og byggja á sama ferlinu þar sem DME er meira unnið en metanól. Grundvallarforsenda fyrir þessum verkefnum er að hægt sé að skilja koltvísýringinn frá jarðvarmagufunni eða iðnaðarútbلاstrinum svo hægt sé að nýta hann. OR hyggst ekki nota efnahvata við sína vinnslu en bæði CRI og DME verkefnin nýta hins vegar efnahvata við þennan aðskilnað, en ekki var aðgengilegt að kynna sér frekari tæknilegar útfærslur þeirra verkefna. Almennt er mun dýrara að notast við efnahvata (Árni Gunnarsson verkefnastjóri hjá Landsvirkjun, munnleg heimild 15. desember 2010). Framleiðsla lífmassans byggir á því að búa til fóður eða framleiða lífdísil og í báðum tilfellum eru sköpuð verðmæti. Framleiðsla lífmassans er einnig áhugaverð hvað varðar bindingu brennisteinsvetnis. Auk þessara mótvægisáðgerða eru einnig fleiri iðnferlar sem miða að því að framleiða ýmsar afurðir svo sem áburð og annars konar eldsneyti úr koltvísýringi.

Ljóst er að Landsvirkjun þarf að huga að útblæstri frá jarðvarmavirkjunum bæði hvað varðar koltvísýring og ekki síður vegna brennisteinsvetnis og þeirrar nýju reglugerðar sem um útblástur þess gildir. Sé ætlunin að vinna með hvora gastegund fyrir sig er ljóst að einhvers konar gasskilja er nauðsynleg en einnig má horfa til þess möguleika að dæla gösunum beint niður án þess að skilja þau að. Vegna fyrirhugaðrar aukningar í virkjun jarðvarma á vegum Landsvirkjunar er um brýnt verkefni að ræða.



### 3. Laga- og regluhverfi, möguleg þróun

Ítarlega er fjallað um það laga- og regluhverfi sem gildir í loftslagsmálum tengdum losun gróðurhúsalofttegunda og mögulega þróun á þeim vettvangi í fyrsta kafla skýrslu Landsvirkjunar, LV-2011-016 *Loftslagsáætlun Landsvirkjunar: Aðgerðir vegna losunar gróðurhúsalofttegunda*. Þar er fjallað um rammisamning Sameinuðu þjóðanna, Kyoto bókunina, kolefnismarkaði, regluverk ESB og íslensk lög og reglur. Auk þess sem velt er upp mögulegri þróun í málaflokknum. Ekki þótti ástæða til að endurtaka þann kafla hér og er því vísað í hann til upplýsinga um viðfangsefnið, hins vegar er hér að neðan velt upp nokkrum atriðum er snúa beint að útstreymi gróðurhúsalofttegunda frá jarðvarmavirkjunum.

#### 3.1 Útstreymi frá jarðvarmavirkjunum

Ísland skilaði upplýsingum um útstreymi frá jarðvarmavirkjunum til Loftslagssamningsins fram til ársins 2000, en gaf þessar upplýsingar svo ekki upp í nokkur ár þar sem rannsóknir, meðal annars íslenskar, bentu til mikillar óvissu í mati á útstreyminu (Birna Sigrún Hallsdóttir, 2010). Talið var að útstreymið sem kæmi frá jarðvarmavirkjunum væri tilfærsla koltvísýrings á jarðhitasvæðinu frekar en aukning í útstreymi. Árið 2006 var aftur farið að skila upplýsingum um útstreymi frá jarðvarmavirkjunum til Loftslagssamningsins, þar sem nýjar rannsóknir bentu til þess að við virkjun jarðvarmans ykist heildarlosun á svæðinu (Birna Sigrún Hallsdóttir, 2010) og var meðal annars vísað í grein Ármannsson o.fl., (2005) sem rætt er um í kafla 1.3 *Náttúrulegt eða manngert útstreymi?* Í skýrslu Íslands um losunarbókhald landsins frá 2006 sem skilað var til Loftslagsstofnunar Sameinuðu þjóðanna kemur meðal annars fram að:

*Researches indicate that CO<sub>2</sub> emissions associated with the utilization of geothermal energy in Iceland constitute a net increase in emissions. The emissions are though considerably less extensive than from fossil fuel power plants.* (Birna Sigrún Hallsdóttir, Rob Kasma, Jón Guðmundsson og Óttar Freyr Gíslason, 2006, bls. 39).

Til að tryggja áreiðanleika upplýsinga og samanburðarhæfni á milli landa starfa á vegum Loftslagssamningsins úttektarteymi (e. Expert Review Team (ERT)), sem fara árlega yfir þær upplýsingar sem aðildarríki skila til Loftslagssamningsins. Þau ár sem Ísland skilaði ekki upplýsingum um útstreymi frá jarðvarmavirkjunum var af hálfu úttektarteyma ítrekað farið fram á að þessum upplýsingum væri skilað (Birna Sigrún Hallsdóttir, 2010). Í úttektarskýrslu frá 2005 má finna eftirfarandi texta:

*However, the ERT noted that both geothermal energy and hydroelectric power are potential sources of greenhouse gases. While the Revised 1996 IPCC Guidelines do not provide default methods, they do state that it is good practice to estimate emissions from all sources in a country. Given the importance of geothermal energy and hydroelectric power in Iceland, the ERT reiterates the recommendation of the 2004 review report that it should examine these sources and estimate the related emissions.* (FCCC, 2006, bls. 8).

Í úttektarskýrslunni frá 2005 er vísað í leiðbeiningar Milliríkjanefndar um loftslagssamninginn (Intergovernmental Panel on Climate Change eða IPCC) frá 1996. Þær voru endurskoðaðar 2006 og í þeirri útgáfu er að finna eftirfarandi texta:

*There can be anthropogenic emissions associated with the use of geothermal power. At this stage no methodology to estimate these emissions is available. However if these emissions can be measured, they should be reported in source category 1.B.3 „Other emissions from energy production“. (IPCC, 2006, bls. 1.11).*

Þrátt fyrir að leiðbeiningar IPCC leggi það til að útstreymi frá jarðvarmavirkjunum sé talið fram er ekki lögð fram nein aðferðafræði við mælingarnar eða mat á útstreyminu vegna jarðvarmavirkjana og ekki öll lönd sem telja jarðvarmann fram í losunarbókhaldi sínu. Í tengslum við þessa vinnu var farið yfir losunarbókhald (National Inventory skýrslur) margra landa og við þá vinnu kom í ljós að meðal landa sem gefa upp jarðvarmann í bókhaldi sínu eru auk Íslands, Portúgal, Nýja Sjáland og Bandaríkin. Í losunarskýrslu Íslands frá 2010 fjalla Birna Sigrún Hallsdóttir o.fl. (2010) um útstreymi frá jarðvarmavirkjunum og þar kemur fram að Íslendingar reiði sig á jarðvarma til húshitunar (90%) og til raforkuframleiðslu (24,5% af rafmagnsframleiðslu árið 2008). Raforkuframleiðsla með jarðvarma er talin hafa frekar lítil umhverfisáhrif en losun koltvísýrings er þó talinn einn af neikvæðu þáttum hennar. Sýnt hefur þó verið fram á að útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum sé þó mikið minna heldur en frá orkuverum sem nýta jarðefnaeldsneyti. Aðferðafræðinni við mælingar á útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum er lýst með eftirfarandi hætti í skýrslunni frá 2010:

*The total emissions estimate is based on direct measurements. The enthalpy and flow of each well are measured and the CO<sub>2</sub> concentration of the steam fraction determined at the wellhead pressure. The steam fraction of the fluid and its CO<sub>2</sub> concentration at the wellhead pressure and the geothermal plant inlet pressure are calculated for each well. Information about the period each well discharged in each year is then used to calculate the annual CO<sub>2</sub> discharge from each well and finally the total CO<sub>2</sub> is determined by adding up the CO<sub>2</sub> discharge from individual wells. (Birna Sigrún Hallsdóttir o.fl. 2010, bls. 58)*

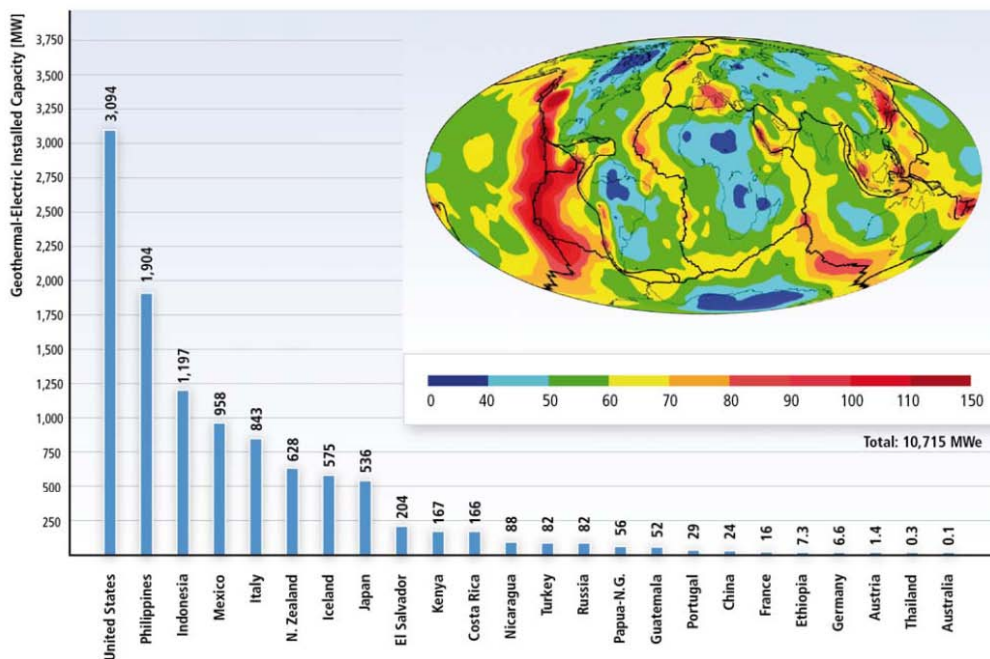
Óvissan á því magni sem gefið er upp vegna útstreymis koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum í losunarskýrslunni er talið vera um 10% (Birna Sigrún Hallsdóttir o.fl., 2010). Ef litið er á það sem kemur fram í skýrslum annarra landa má fyrst nefna að í skýrslu Bandaríkjanna frá 2010 er að finna eftirfarandi texta „*Although geothermal energy is technically not a fossil fuel, geothermal energy-related CO<sub>2</sub> emissions are included for reporting purposes*“ (U.S. Environmental Protection Agency 2010, bls. 3-4). Í skýrslu Portúgal frá 2010 er að finna eftirfarandi texta:

*A small amount of electricity is produced from two geothermic sources in Azores archipelago: Pico Vermelho and Ribeira Grande Plants, and they are assumed to increment the release of carbon dioxide to atmosphere. The available reporting (CRF) categories do not consider a specific place to report CO<sub>2</sub> emissions from geothermal electricity production. Nevertheless, emissions from these activity are clearly related to sector 1 (Energy) and must be better considered as fugitive emissions. However, for fugitive emissions the CRF nomenclature allows only the classes Solid Fuels (1B1) and Oil and Natural Gas (1B2), which are not exactly suitable for this activity. Sector 7 (Other) could be used in principle, but would imply that emissions from this category would be no longer included in the energy sector. Fugitive emissions from geothermal electricity production are therefore reported in category 1B2d (Other fugitive emissions from oil and natural gas). (Portuguese Environmental Agency 2010 bls. 3-24).*

Í skýrslu Nýja Sjálands frá 2010 er að finna eftirfarandi upplýsingar:

While some of the energy from geothermal fields is transformed into electricity, emissions from geothermal electricity generation are reported in the fugitive emissions category because they are not the result of fuel combustion, unlike the emissions reported under the energy industries category. Geothermal sites, where there is no use of geothermal steam for energy production, have been excluded from the inventory. In 2008, emissions from geothermal operations were 515.4 Gg CO<sub>2</sub>-e, an increase of 105.6 Gg CO<sub>2</sub>-e (25.8 per cent) since the 1990 level of 409.8 Gg CO<sub>2</sub>-e. (Ministry for the Environment New Zealand, 2010, bls. 47)

Í skýrslu Þýskalands frá árinu 2010 er útstreymi gróðurhúsaloftteguna frá jarðvarmavirkjunum þar í landi velt upp en niðurstaðan er að útstreymið sé hverfandi. Nýting til raforkuframleiðslu þar er í landi er um 6,6 MW (sjá mynd 7) og því um mjög lítið magn að ræða.



Mynd 7 - Rafmagnsframleiðsla með jarðhita árið 2009 eftir löndum. Innfella myndin sýnir meðal varmaflæði (e. heat flow) í mW/m<sup>2</sup> og flekaskilin. Heimild: (Goldstein o.fl., 2011).

Af þeim löndum sem ekki gefa upp upplýsingar um útstreymi jarðvarmans má nefna Ítalíu líkt og rætt hefur verið um í fyrsta kafla. Með hliðsjón af mynd 7 sést að mörg þeirra landa sem nýta jarðvarma til raforkuvinnslu eru þróunarlönd og hafa ekki skuldbundið sig til að gefa upp losunarbókhald sitt og gefa því ekki upp útstreymi frá jarðvarmavirkjunum frekar en öðru.

Ljóst er að ekki er samstaða um það hvernig á að meðhöndla útstreymi frá jarðvarmavirkjunum í losunarbókhaldinu og ekki er gefin upp nein aðferðafræði við mat á útstreyminu. Líkt og rætt var um í kafla 1.3 þá ríkir talsverð óvissa um það með hvaða hætti útstreymi frá þessari starfssemi er, hvort útstreymi frá virkjun sé tilfærsla náttúrulegs útstreymis eða hvort um manngerða aukningu er að ræða.

Líkt og fram kemur í skýrslu Landsvirkjunar, LV-2011-016 *Loftslagsáætlun Landsvirkjunar: Aðgerðir vegna losunar gróðurhúsalofttegunda* þá er losun koltvísýrings frá orkuvinnslu, þar með talið frá jarðvarmavirkjunum, ekki meðal forgangsatriða ríkisstjórnarinnar miðað við aðgerðaráætlun í loftslagsmálum sem samþykkt var árið 2010. Hins vegar er ljóst að losun frá orkuvinnslu má ekki

aukast miðað við losun 2005, eigi markmið um samdrátt í losun fyrir árið 2020 að nást. Í Loftslagssamningnum eru ákvæði um upplýsingagjöf um losun frá endurnýjanlegri orkuvinnslu það er frá lónum og jarðvarmavirkjunum en ekki er líklegt að þau ákvæði verði hert á næstu árum. Ekki eru heldur sérstök ákvæði um þessa gerð losunar í viðskiptakerfi ESB (EU-ETS) sem Ísland vinnur að inngöngu í þó svo að losunin gæti fallið undir sérstakan flokk sem nefnist „skipting birgða“. Horfa verður til þess að kolefnismarkaðir eru enn að mótast og að núverandi tímabil (2008 – 2012) á markaði ESB tekur einungis til lítils hluta þeirrar starfsemi, sem losar gróðurhúsalofttegundir á heimsvísu. Stefnan er að fella ávallt fleiri geira undir kerfið. Hvort útstreymi frá jarðvarmavirkjunum mun falla þar undir eða hvenær er erfitt að segja til um. Óvissa vegna áframhalds Kyoto bókunarinnar er einnig mikil. Þrátt fyrir það er mikilvægt fyrir Landsvirkjun að vera vel í stakk búna til að takast á við þær breytingar sem mögulegar eru, því mikilvægt fyrir fyrirtækið að vera meðvitað um losun gróðurhúsalofttegunda frá starfseminni og að fylgjast vel með mögulegri þróun á þessum vettvangi. Mikilvægt er því fyrir Landsvirkjun að hefja mælingar og rannsaka vel sín jarðvarmasvæði með það að leiðarljósi að fá vitneskju um það hversu mikið af útstreyminu frá þessum svæðum er manngert og hversu mikið náttúrulegt og geta tekið þátt í umræðunni um þetta viðfangsefni með vísindaleg gögn til rökstuðnings. Mikilvægt er að koma þessum mælingum af stað sem fyrst svo mögulegt sé að hefja mælingar á fyrirhuguðum virkjanasvæðum.

#### 4. Heimildaskrá

- Arnórsson, S., Gíslason, S.R., (1994). CO<sub>2</sub> from magmatic sources in Iceland. *Mineralogical Magazine*, 58A, 27 – 28.
- Ármannsson, H. (2003). *CO<sub>2</sub> emission from Geothermal Plants*. International Geothermal Conference, Reykjavík. Sótt þann 10.janúar af <http://www.jardhitafelag.is/media/PDF/S12Paper103.pdf>
- Ármannsson, H., Dereinda, F. H. (2010). *CO<sub>2</sub> emissions from the Krafla Geothermal Area, Iceland*. Sótt þann 10. janúar af <http://www.landsvirkjun.is/media/rannsoknir/0250-CO2-Emissions-from-the-Krafla-Geothermal-Area,-Iceland.pdf>
- Ármannsson, H., Fridriksson, Th., Kristjánsson, B.R. (2005). CO<sub>2</sub> emissions from geothermal power plants and natural geothermal activity in Iceland. *Geothermics*, 34, 286-296.
- Ármannsson, H., Fridriksson, Th., Wiese, F., Hernández, P., and Pérez N. (2007). *CO<sub>2</sub> budget of the Krafla geothermal system, NE-Iceland*. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Water-Rock Interaction 2007, Taylor & Francis Group, London, 189-192.
- Bertani, R. and Thain, I. (2002). Geothermal power generating plant CO<sub>2</sub> emission survey. *IGA News*, 49, 1-3.
- Birna Sigrún Hallsdóttir, Kristín Harðardóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason og Jóhann Þórsson. (2010). *Emissions of greenhouse gases in Iceland from 1990 – 2008 – National Inventory Report 2010*. Umhverfisstofnun, UST – 2010/05.
- Birna Sigrún Hallsdóttir, Rob Kamsma, Jón Guðmundsson og Óttar Freyr Gíslason. (2006). *National Inventory Report - Iceland 2006*. Umhverfisstofnun. UST – 2006:10.
- Birna Sigrún Hallsdóttir (Sérfræðingur hjá Umhverfisstofnun). (2010). Tölvupóstur til Hákon Aðalsteinssonar, verkefnastjóra hjá Landsvirkjun þann 17. febrúar 2010 - *Fyrirspurn um skráningu losunar GHL*.
- Brynhildur Davíðsdóttir, Ágústa Loftsdóttir, Birna Hallsdóttir, Bryndís Skúladóttir, Daði Már Kristófersson, Guðbergur Rúnarsson, Hreinn Haraldsson, Pétur Reimarsson, Stefán Einarsson, Þorsteinn Ingi Sigfússon. (2009). *Möguleikar til að draga úr nettóútstreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi*. Skýrsla Sérfræðinganeftdar. Umhverfisráðuneytið.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco B., og Marini, L. (1998) Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geochem.* 13, 543–552.

- CRI. (e.d. a). *About us – Vision & History*. Sótt þann 20. júní 2011 af [http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=18&lang=en](http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=18&lang=en)<sup>3</sup>
- CRI. (e.d. b). *About us Investors & Partners*. Sótt þann 20. júní 2011 af [http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com\\_content&view=article&id=10&Itemid=15&lang=en](http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=15&lang=en)
- CRI. (e.d. c). *Technology*. Sótt þann 20. júní 2011 af [http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3&Itemid=2&lang=en](http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=2&lang=en)
- CRI. (e.d. d). IAV begins construction of Carbon Recycling International's first clean fuel production plant at Svartsengi geothermal power plant in Iceland. Sótt þann 20. júní 2011 af [http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2%3Aiaav-begins-construction-of-carbon-recycling-internationals-first-clean-fuel-production-plant-at-svartsengi-geothermal-power-plant-in-iceland&catid=2&Itemid=6&lang=en](http://www.carbonrecycling.is/index.php?option=com_content&view=article&id=2%3Aiaav-begins-construction-of-carbon-recycling-internationals-first-clean-fuel-production-plant-at-svartsengi-geothermal-power-plant-in-iceland&catid=2&Itemid=6&lang=en)
- FCCC (Framework Convention on Climate Change). (2006.) *Report of the individual review of the greenhouse gas inventory of Iceland submitted in 2005 – FCCC/ARR/2005/ISL*. Sótt þann 20. desember af <http://unfccc.int/resource/docs/2006/arr/isl.pdf>
- Fridriksson, T., Kristjánsson, B.R., Ármannsson, H., Margrétardóttir, E., Ólafsdóttir, S., and Chiodini, G. (2006). CO<sub>2</sub> emissions and heat flow through soil, fumaroles, and steam heated mud pools at the Reykjanes geothermal area, SW Iceland. *Applied Geochemistry*, 21, 1551–1569.
- Goldstein, B., G. Hiriart, R. Bertani, C. Bromley, L. Gutiérrez-Negrín, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester, V. Zui. (2011). *Geothermal Energy*. In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. Von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hólmfríður Sigurðardóttir. (2009). *Annual Status Report 2009*. Sótt þann 15. desember 2010 af [http://www.or.is/media/PDF/CarbFix\\_StatusReport2009\\_09062010.pdf](http://www.or.is/media/PDF/CarbFix_StatusReport2009_09062010.pdf)
- Hólmfríður Sigurðardóttir (verkefnastjóri CarbFix verkefnisins hjá Orkuveitu Reykjavíkur). (2011). Tölvupóstur til Sigurðar Óla Guðmundssonar, Landsvirkjun þann 14. júlí 2011 - *Fyrirspurn um CarbFix verkefnið*.

<sup>3</sup> Allar heimildir frá CRI voru upphaflega fengnar í desember 2010, en við uppfærslu heimasíðu CRI breyttust vefslóðir og voru þær því uppfærðar fyrir útgáfu skýrslunnar.

- IDA (International DME Association). (2010). *Frequently Asked Questions*. Sótt þann 19. desember af <http://www.aboutdme.org/index.asp?bid=234#Q2.1>
- Iðnaðarráðuneytið, Orkustofnun, Nýsköpunarmiðstöð, Mitsubishi, Hekla, NordicBlueEnergy. (2010). *A Feasibility study report for a DME Project in Iceland – Summary*. Sótt þann 19. desember 2010 af <http://www.os.is/gogn/os-onnur-rit/OS-2010-DME-project.pdf>
- IPCC. (2006). Volume 2 - Energy. Í *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds)*. Published: IGES, Japan. Sótt þann 18. desember 2010 af <http://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol2.pdf>
- LPG Solutions. (2007). *General Facts on LPG*. Sótt þann 15. desember 2010 af <http://www.lpg-solutions.co.uk/facts.html>
- Morgunblaðið. (6. desember 2010a). *Hefja framleiðslu í vor*. Sótt þann 15. desember 2010 af [http://feeds.mbl.is/mm/frettir/innlent/2010/12/06/hefja\\_framleidslu\\_i\\_vor/](http://feeds.mbl.is/mm/frettir/innlent/2010/12/06/hefja_framleidslu_i_vor/)
- Morgunblaðið. (18. september 2010b). *Risaverksmiðja í pípunum*. Skoðað þann 19. desember 2010 á [http://www.mbl.is/mm/gagnasafn/grein.html?grein\\_id=1349325&searchid=3b114-0794-e3903](http://www.mbl.is/mm/gagnasafn/grein.html?grein_id=1349325&searchid=3b114-0794-e3903)
- Ministry for the Environment New Zealand. (2010). *New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2008*. Sótt þann 20. desember 2010 af [http://unfccc.int/files/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/application/zip/nzl-2010-nir-15april.zip](http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/nzl-2010-nir-15april.zip)
- Nexant. (2008). *Dimethyl Ether(DME) Technology and Markets*. Sótt þann 19. desember 2010 af [http://www.chemsystems.com/reports/search/docs/abstracts/0708S3\\_abs.pdf](http://www.chemsystems.com/reports/search/docs/abstracts/0708S3_abs.pdf)
- Nýsköpunarmiðstöð Íslands. (2008). *Samstarf við Mitsubishi um athugun á framleiðslu eldsneytis*. Sótt þann 19. desember 2010 af <http://www.nmi.is/nyskopunarmidstod/frettir/nr/664/>
- Orkustofnun. (e.d.). *DME*. Sótt þann 19. desember 2010 af <http://www.os.is/eldsneyti/vettvangur-um-vistvaent-eldsneyti/dme/>
- Orkuveita Reykavíkur. (e.d. a). *CarbFix – About the Project*. Sótt þann 14. desember 2010 af <http://www.or.is/English/Projects/CarbFix/AbouttheProject/>

Orkuveita Reykavíkur. (e.d. b). *CarbFix – FAQs*. Sótt þann 14. desember 2010 af  
<http://www.or.is/English/Projects/CarbFix/FAQs/>

Orkuveita Reykjavíkur. (e.d. c). *Hellisheiðarvirkjun*. Sótt þann 14. desember 2010 af  
<http://www.or.is/UmOR/Veiturogveitusvaedi/Virkjanir/Hellisheidarvirkjun/>

Portuguese Environmental Agency. (2010). *Portuguese National Inventory report on greenhouse gases 1990 – 2008*. Sótt þann 20. desember 2010 af  
[http://unfccc.int/files/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/application/zip/prt-2010-nir-25may.zip](http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/prt-2010-nir-25may.zip)

Umhverfisstofnun. (2007). *Stefnumörkun í loftslagsmálum*. Sótt þann 23. júní 2011 af  
[http://www.ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Loftslagsbreytingar/Stefnumorkun\\_i\\_loftslagsmalum.pdf](http://www.ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Loftslagsbreytingar/Stefnumorkun_i_loftslagsmalum.pdf)

U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2008*. Sótt þann 20. desember af  
[http://unfccc.int/files/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/application/zip/usa-2010-nir-15april.zip](http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/zip/usa-2010-nir-15april.zip)

*Heimildir mynda og taflna eru settar í mynda- og töflutexta.*





Landsvirkjun

Háaleitisbraut 68  
103 Reykjavík  
landsvirkjun.is

landsvirkjun@lv.is  
Sími: 515 90 00

