

# **BÆTT FRUMORKUNÝTNI**

## **Rannsókn á nýtingu frumorku og útblæstri koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum með vistferilsgreiningu**

Lokaskýrsla til Orkusjóðs

Verkefni 12-2007

Ólafur Pétur Pálsson, verkefnastjóri  
Marta Rós Karlsdóttir, doktorsnemi  
Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði- og tölvunarfræðideild Háskóla Íslands

**Verkefnisstjóri:**

Ólafur Pétur Pálsson, deildarforseti Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði- og tölvunarfræðideildar Háskóla Íslands.

**Doktorsnemi:**

Marta Rós Karlsdóttir

**Samstarfsaðilar:**

Halldór Pálsson, dósent, Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði- og tölvunarfræðideild Háskóla Íslands

Rolf Ulseth og Monica Berner, NTNU, Noregi

Svend Frederiksen, Patrick Ljunggren og Per-Olof Johansson, Lund University, Svíþjóð

Andres Siirde og Edward Latosov, Tallinn University of Technology, Eistlandi

Carl-Johan Fogelholm og Thomas Kohl, Aalto University, Finnland

Lars Gullev, VEKS, Danmörk

**Aðilar tengdir verkefni:**

Sigurgeir Björn Geirsson, Orkuveita Reykjavíkur

Einar Gunnlaugsson, Orkuveita Reykjavíkur

Geir Þórólfsson, Hitaveita Suðurnesja

Brynhildur Davíðsdóttir, University of Iceland

Ingimar Guðni Haraldsson, Orkustofnun (the Icelandic National Energy Authority)

Jónas Ketilsson, Orkustofnun (Icelandic National Energy Authority)

## Inngangur

Verkefnið hóf göngu sína sem samstarfsverkefni nokkurra norrænna tækniháskóla undir formerkjum bættar frumorkunýtni á hinum ýmsu sviðum. Tilskipun Evrópusambandsins (2002/91/EC) [1] um orkunýtingu bygginga og evrópustaðall EN15603 [2] um sama efni renna stoðum undir mikilvægi þess að þekkja heildaráhrif orkunotkunar á bæði umhverfi og náttúrulegar auðlindir. Íslenski hluti verkefnisins var þróaður með sérstöðu landsins í huga hvað varðar jarðvarmaauðlindir til þess að svara kalli evróputilskipunarinnar um að til séu upplýsingar um frumorkunýtni og losun gróðurhúsalofttegunda vegna framleiðslu rafmagns og varma með jarðvarma. Bætt frumorkunýting er skoðuð sérstaklega í verkefninu með samvinnslu varma og rafmagns í huga.

Í tilskipuninni er kveðið á um að gefa skuli upp orkunotkun bygginga með því að tiltaka bæði frumorkunotkun og losun gróðurhúsalofttegunda í tengslum við orkuna sem notuð er í byggingum. Orkuvísar eru þar skilgreindir og kallast þeir frumorkustuðull (e. Primary energy factor,  $f_p$ ) og CO<sub>2</sub> útblástursstuðull (e. CO<sub>2</sub> production factor,  $K$ ). Frumorkustuðullinn segir til um hversu mikla frumorku þarf til þess að framleiða og flytja eina kílóvattsstund (kWh) af orku til neytandans og útblástursstuðullinn telur hversu mikill útblástur á gróðurhúsalofttegundum, reiknuðum í koltvísýringsígildum, fylgir því.

Við útreikning á frumorkustuðlinum skal taka með alla þá frumorku sem þarf til að afla, flytja, geyma, meðhöndla og dreifa því „eldsneyti“ sem orkuframleiðslan byggir á [2]. Frumorkustuðullinn getur einnig innihaldið þá frumorku sem þurfti til byggingar á orkuverinu og dreifikerfinu. Útblástursstuðullinn inniheldur þá allan þann útblástur sem á sér stað vegna notkunar á frumorkunni. Umfangsmikil gagnaöflun liggur að baki slíkum útreikningum og hefðbundnar aðferðir til útreiknings og mælinga á umhverfisáhrifum og orkunotkun duga skammt. Heildrænar aðferðir, eins og vistferilsgreining, hafa hins vegar getu til þess að ná utan um slíka útreikninga með sem einföldustum hætti.

Orkuvísar hafa verið reiknaðir víða í Evrópuríkjum, bæði landlægir og almennir, fyrir hinar ýmsu framleiðsluaðferðir á rafmagni og varma en ekki hefur hingað til verið farið í ítarlegar greiningar á orkuframleiðslu með jarðvarma.

Markmið verkefnisins var því að gera slíka greiningu á íslenskum jarðvarmaorkuverum og í kjölfarið, gefa út stuðla fyrir frumorkunýtni og útblástur gróðurhúsalofttegunda í tengslum við jarðvarmanýtingu sem nýtist geti innanlands sem utan. Innan Evrópusambandsins eru um 11 lönd sem nota jarðvarma til þess að framleiða raforku [3] ásamt Íslandi og Tyrklandi, sem liggja utan ESB. Einnig nota 32 Evrópsk ríki jarðvarma til beinnar notkunar, eins og til húshitunar [4]. Fyrir lönd sem nýta jarðvarma til orkuframleiðsu þurfa því að liggja fyrir orkuvísar ef löndin ætla sér að fylgja tilskipunum ESB.

## Framgangur:

Verkefnið hefur verið kynnt við ýmis tækifæri bæði innanlands sem utan. Helstu ráðstefnur, fundir og kynningar eru eftirtaldar:

- Reglulegir vinnufundir með samstarfsaðilum í norræna samstarfshópnum, sem haldnir voru tvisvar á ári þar sem framgangur og niðurstöður voru ræddar.
- Ráðstefnufyrirlestur á 11th International Symposium on District Heating and Cooling í Reykjavík, september 2008.
- Kynning verkefnisins á samkomu Nordic Climate Solutions í Kaupmannahöfn í nóvember 2008 í sérstökum hópi ungra vísindamanna sem bauðst að taka þátt í samkomunni.
- Ráðstefnufyrirlestur á World Geothermal Congress á Bali, Indónesíu, í apríl 2010.
- Ráðstefnufyrirlestur á 12th International Symposium on District Heating and Cooling, í Tallinn, Eistlandi, september 2010.
- Kynning rannsóknarinnar á rannsóknarráðstefnu VON í Háskóla Íslands í nóvember 2010.
- Kynning rannsóknarinnar á jarðvarmaþingi Verkfræði- og Náttúruvísindasviðs (VON) í apríl 2011.
- Kynning rannsóknarinnar á degi doktorsnema í jarðvarmafræðum (European Geothermal PhD day) sem haldinn var í Háskólanum í Reykjavík í mars 2011

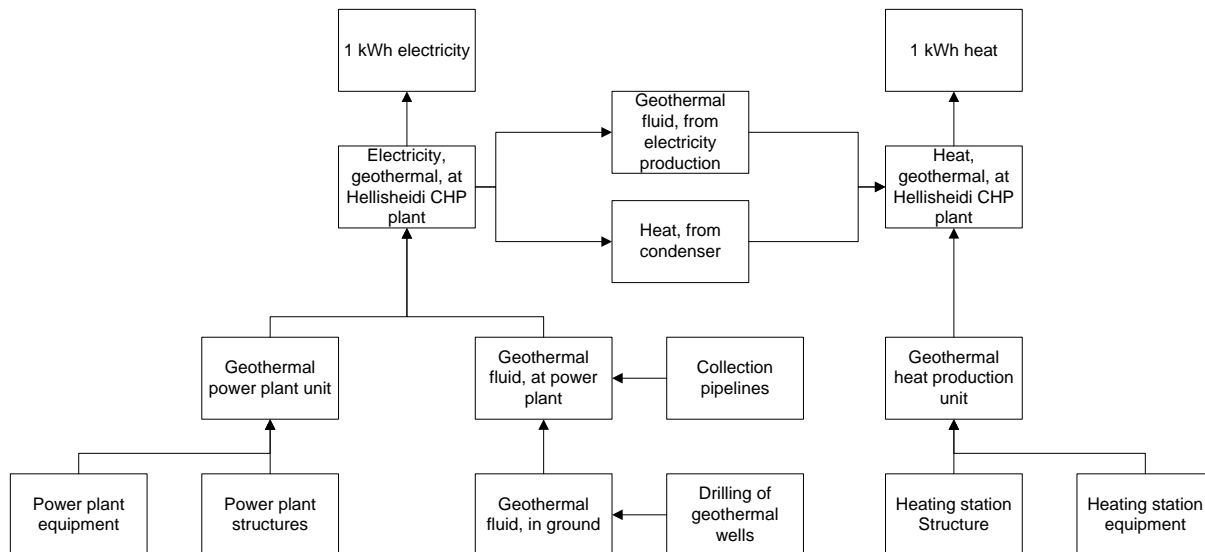
Greinar sem hafa verið skrifaðar í tengslum við ofantaldar ráðstefnur eru 3:

- M. R. Karlsdóttir, O.P. Palsson, H. Palsson: Energy Efficiency Considerations of Geothermal based Power Production, *11<sup>th</sup> International Symposium on District Heating and Cooling*, August 31<sup>st</sup> to September 2<sup>nd</sup>, 2008, Reykjavik, Iceland.
- M. R. Karlsdóttir, O.P. Palsson and H. Palsson: Factors for Primary Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emission of Geothermal Power Production, *World Geothermal Congress*, 25-29 April 2010, Bali, Indonesia.
- M. R. Karlsdóttir, O.P. Palsson and H. Palsson: LCA of Combined Heat and Power Production at Hellisheiði Geothermal Power Plant with Focus on Primary Energy Efficiency, *The 12th International Symposium on District Heating and Cooling*, September 5<sup>th</sup> to September 7<sup>th</sup>, 2010, Tallinn, Estonia

Einnig hafa verið skrifaðar styttri greinar í tímarit tengd Háskóla Íslands og stutt kynning í International Innovation Report 2009 á vegum Research Media Ltd.

Núverandi staða verkefnisins er vinna við skrif á tímaritsgrein sem kynnir lokaniðstöður fyrsta og umfangsmesta hluta rannsóknarinnar sem snýr að gerð ítarlegrar vistferilsgreiningu á Hellisheiðarvirkjun. Mynd 1 sýnir flæðirit þar sem orkuframléiðslan á Hellisheiði er brotin upp í þá helstu þætti sem afla þarf upplýsinga fyrir um efnis- og orkunotkun í vistferilsgreiningunni.

Sem dæmi má nefna að við boranir á jarðhitaholum vegna rannsókna, vinnslu og niðurdælingar eru notaðir jarðhitaborar knúnir díselolíu og telst sú olíunotkun með í útreikningum á heildar frumorkunotkun orkuframleiðslunnar.



Mynd 1 Flæðirit sem sýnir helstu þætti framleiðslunnar þar sem orku- og efnisnotkun er kortlögð

Í upphafi verkefnis átti meðal annars að kanna ítarlega frumorkunotkun allra jarðvarmavirkjanna á Íslandi í formi upptöku jarðvarmavökva úr jarðhitasvæðunum. Þar sem slík vinna var fyrirhuguð og síðar gangsett innan Orkustofnunnar, og þar sem ítarleg vistferilsgreining á svo stóru ferli sem orkuframleiðslu er tímafrek og umfangsmikil var ákveðið að nota Hellisheiðarvirkjun sem grunn að rannsókninni. Sökum þess hversu nýbyggð virkjunin er var auðveldara en ella að nálgast upplýsingar um efnis- og orkumagn sem notað var við undirbúning og byggingu virkjunarinnar, sem eru lykilupplýsingar í gerð vistferilsgreiningar.

Reiknilíkan og gangagrunnur fyrir vistferilsgreiningu á Hellisheiðarvirkjun er nær því lokið og hafa frumniðurstöður nú þegar verið birtar ([6],[7]). Helstu frumniðurstöður útreikninga á orkuvísunum fyrir Hellisheiði eru gefnar í töflum 1 og 2, ásamt þeim stuðlum sem þegar hafa verið gefnir út í staðli EN15603 fyrir mismunandi eldsneyti og uppruna raforku innan Evrópu. Niðurstöður endurspegla bæði greiningu á framleiðslu rafmagns eitt og sér með þeirri tækni sem Hellisheiðarvirkjun byggir á, þar sem tvö þrýstiprep eru til staðar og rafmagn framleitt með háþrýsti- og lágþrýstivélum (e. Double flash cycle), sem og samvinnslu rafmagns og varma eftir að varmastöð virkjunarinnar var tekin í notkun fyrir árslok 2010. Stuðlarnir sem reiknðir hafa verið út fyrir rafmagnsframleiðsluna endurspegla þá bættu nýtni sem fæst með samvinnslu

rafmagns og varma vel og gera það að verkum að frumorkustuðull raforku frá jarðvarmaorkuverinu verður minni eftir að varmaafstöðin er tekin í notkun.

Mynd 2 sýnir svo hvernig vistferilsgreining getur aðgreint hvaðan umhverfisáhrif framleiðslunnar koma, í þessu tilviki losun á gróðurhúsalofttegundum yfir líftíma orkuversins. Þessar frumniðurstöður gefa ríka vísbendingu um hvaða ferli sem rannsaka þarf betur áður en fullgildar niðurstöður nást úr greiningunni.

### Framhald rannsóknar:

Núverandi vinna felst í því að kanna frekar borun á jarðhitaholum þar sem frumniðurstöður sýndu að markverður hluti útblásturs á gróðurhúsalofttegundum er sökum borunarinnar. Hins vegar hafa niðurstöður sýnt að stærstur hluti frumorkunotkunnar Hellisheiðarvirkjunnar mun stafa af upptöku frumorku í formi jarðvarmavökva en einungis lítið brot orkunotkunarinnar tengist uppbyggingarfasa virkjunarinnar, sé miðað við 30 ára líftíma hennar. Sökum þessara frumniðurstæða er hægt að áætla að framkvæmd vistferilsgreininga á jarðvarmaorkuverum sé bundin við breytileika á fjölda og dýpt jarðhitaholna ásamt þeim eiginleikum jarðvarmavökva (gas- og orkuinnihald) sem notaður er í hverri virkjun fyrir sig. Því má áætla að gagnagrunnurinn sem byggður hefur verið fyrir Hellisheiðarvirkjun getur nýst sem almennur gagnagrunnur fyrir önnur jarðvarmaorkuver að því gefnu að upplýsingar um borunarhluta og jarðvarmavökva séu færðar inn í hverju tilviki fyrir sig. Þetta mun spara mikla vinnu við framkvæmd slíkra greininga á öðrum jarðvarmaorkuverum.

Tafla 1 Orkuvísar fyrir rafmagnsframleiðslu ýmissa tegunda orkuvera [2] ásamt útreiknuðum vísam fyrir rafmagnsframleiðslu með jarðvarma á Hellisheiði

Tegund orkuvers	Frumorkustuðull $f_p$ [MWh frumorka / MWh afhent orka]		CO <sub>2</sub> útblásturs stuðull K
	Óendurnýjanleg frumorka	Heildar frumorka	[Kg/MWh]
Rafmagn frá vatnsorku	0.50	1.10	7
Rafmagn frá kjarnorku	2.80	2.80	16
Rafmagn frá kolaorkuveri	4.05	4.05	1340
Evrópski raforkumarkaðurinn UCPTÉ	3.14	3.31	617
Rafmagn frá jarðvarma	0.01	6.33	29
Rafmagn frá jarðvarma með samvinnslu rafmagns og varma	0.01	5.33	29

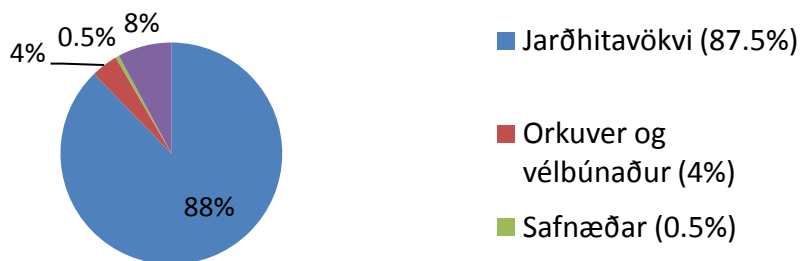
Eftir að rannsókn á jarðvarmaorkuverum lýkur með birtingu á niðurstöðum í vísindatímariti, tekur við rannsókn á beinni nýtingu jarðvarma vegna hitaveitu. Slík greining er álitin mun umfangsminni en greining á jarðvarmaorkuveri og búist er við niðurstöðum úr þeirri greiningu fyrir mitt ár 2012 sem skilað verður í formi tímaritsgreinar í vísindatímariti.

Í greinum þessum eru niðurstöður bornar saman við áður útgefna orkuvísa fyrir annars konar orkuframleiðslu eins og vatnsaflsvirkjanir, kjarnorku, kola- og gasorkuver, ásamt því sem orkunotkun til húshitunar með jarðvarma verður borin saman við annars konar varmagjafa sem algengir eru í Evrópu (viður, kol, olía, gas).

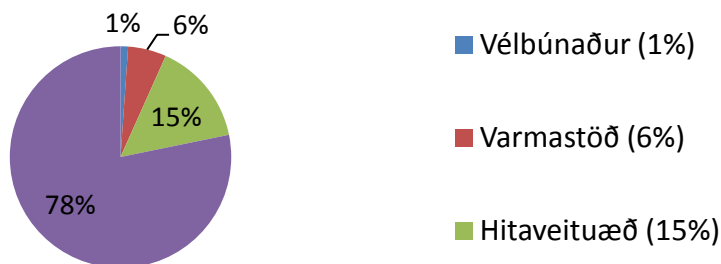
**Tafla 2 Orkuvísar fyrir varmagjafa/eldsneyti af ýmsum toga [2] ásamt útreiknuðum vísam fyrir varmaframleiðslu með jarðvarma á Helligshéiði**

Tegund varmagjafa	Frumorkustuðull $f_p$ [MWh frumorka / MWh afhent orka]		CO <sub>2</sub> útblásturs stuðull $K$
	Óendurnýjanleg frumorka	Heildar frumorka	[Kg/MWh]
Eldsneytisólía	1.35	1.35	330
Gas	1.36	1.36	277
Kol	1.19 – 1.40	1.19 – 1.40	394-433
Viður	0.06 – 0.10	1.06 – 1.10	4-20
Jarðvarmi (frá samvinnslu rafmagns og varma)	<0.01	0.69	0.97

### Útblástur CO<sub>2</sub> ígilda vegna rafmagnsframleiðslu, 29 g/kWh



### Útblástur CO<sub>2</sub> ígilda vegna heitavatsframleiðslu, 1 g/kWh



Mynd 2 Uppruni útblásturs gróðurhúsalofttegunda í koltvísýringsígildum vegna rafmagns- og heitavatsframleiðslu á Hellsisheiði

#### Lokaorð:

Þessi lokaskýrsla hefur greint frá vinnu við rannsókn á frumorkunýtingu jarðvarmaorkuvinnslu. Með því að nota vistferilsgreiningu til þess að greina áhrif jarðvarmanýtingar til orkuframleiðsu með tilliti til orkunotkunar og losun gróðurhúsalofttegunda hefur verið hægt að öðlast víðari skilning á því hvaðan áhrifin koma og hvernig óbeinir þættir framleiðslunnar, eins og bygging orkuversins, lagning hitaveituæðar og borun jarðhitaholna hafa áhrif á heildar umhverfisáhrifin. Þessi rannsókn hefur sýnt að með notkun vistferilsgreiningar komum við auga á að losun gróðurhúsalofttegunda vegna undirbúnings og uppbyggingu jarðvarmavirkjunnar getur vegið umtalsvert af heildarútbæstri alls líftíma virkjunarinnar samanborið við beinan útblástur vegna framleiðslunnar.



## Heimildaskrá

- [1] EU. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Communities. (January, 2003)
- [2] EN 15603:2008. Energy performance of buildings. Overall energy use and definition of energy ratings. Geneva: International Organisation for Standardisation (ISO)
- [3] R. Bertani, Geothermal Power Generation in the World 2005– 2010 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, (April 2010)
- [4] J. W. Lund, D. H. Freeston, T. L. Boyd, Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, (April 2010)
- [5] M. R. Karlsdóttir, O.P. Pálsson, H. Pálsson: Energy Efficiency Considerations of Geothermal based Power Production, *11<sup>th</sup> International Symposium on District Heating and Cooling*, August 31<sup>st</sup> to September 2<sup>nd</sup>, 2008, Reykjavik, Iceland.
- [6] M. R. Karlsdóttir, O.P. Pálsson and H. Pálsson: Factors for Primary Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emission of Geothermal Power Production, *World Geothermal Congress*, 25-29 April 2010, Bali, Indonesia.
- [7] M. R. Karlsdóttir, O.P. Pálsson and H. Pálsson: LCA of Combined Heat and Power Production at Hellisheiði Geothermal Power Plant with Focus on Primary Energy Efficiency, *The 12th International Symposium on District Heating and Cooling*, September 5<sup>th</sup> to September 7<sup>th</sup>, 2010, Tallinn, Estonia