

EÐLI JARÐHITANS OG SJÁLFBÆR NÝTING HANS

Álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita



Höfundar: Jónas Ketilsson, Axel Björnsson, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, Bjarni Pálsson,
Grímur Björnsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson
Útgefandi: Orkustofnun
Skýrsla nr.: OS-2010/05
Samvinnuaðilar: Orkustofnun, rammaáætlun um nýtingu vatnsafls og jarðvarma,
Íslenskar orkurannsóknir, Orkuveita Reykjavíkur, Landsvirkjun
Prentun: Litróf

Apríl 2011
ISBN: 978-9979-68-278-3



Orkugarði
Grensásvegi 9
108 Reykjavík
Sími 569 6000

Borgum
600 Akureyri
Sími: 460 1380

os@os.is

www.os.is

EÐLI JARÐHITANS OG SJÁLFBÆR NÝTING HANS

Álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita

Jónas Ketilsson
Axel Björnsson
Árný Erla Sveinbjörnsdóttir
Bjarni Pálsson
Grímur Björnsson
Guðni Axelsson
Kristján Sæmundsson

OS-2010/05

ISBN 978-9979-68-278-3

SAMANTEKT

Faghópur um sjálfbæra nýtingu jarðhita var skipaður af Orkustofnun og verkefnisstjórn rammaáætlunar um nýtingu vatnsafls og jarðvarma þann 28. mars 2008. Samkvæmt skipunarbréfi átti faghópurinn að skilgreina og meta sjálfbæra jarðhitavinnslu og sjálfbæra jarðhitanytingu, gera tillögur um hvernig haga beri nýtingu jarðhita til lengri tíma litið og semja drög að reglum er hafi það að markmiði að tryggja sjálfbæra jarðhitanytingu. Til þess var lagt mat á eðli og flokkun jarðhitakerfa, orkuforða þeirra, endurnýjanleika auðlindarinnar og vinnslureynslu síðustu áratuga á Íslandi. Þá skoðaði faghópurinn viðeigandi alþjóðasamninga sem Ísland á aðild að.

Orðið *sjálfbær* er almennt notað fyrir enska hugtakið *sustainable* og er það gert í þessari skýrslu. Faghópurinn er þó sammála um að orðið *haldbær* væri betri þýðing á orðinu *sustainable*. Orðasambandið *sjálfbær vinnsla* er notað í skýrslunni fyrir hugtakið *sustainable yield*. *Endurnýjanleiki* er notað fyrir enska hugtakið *renewability*, sem eiginleiki auðlindar. Hann byggir á varmastraumi inn í jarðhitageymi sem er þess eðlis að massi og varmi endurnýjast á hraða sem er af sömu stærðargráðu og nýtingarhraðinn.

Sjálfbær þróun miðar að því að fullnægja þörfum samtímans án þess að skerða möguleika komandi kynslóða til að fullnægja sínum þörfum. Gerður er greinarmunur á hugtökunum *sterkri* og *veikri sjálfbærni* sem taka til allra meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis. Sterk sjálfbærni felur í sér að þróunin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn þessara meginþátta. Veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhvers meginþáttanna enda skili þróunin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata.

Sjálfbær jarðhitanyting tekur til allra þriggja meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis. Sterk sjálfbær jarðhitanyting krefst m.a. sjálfbærrar jarðhitavinnslu (e. *sustainable yield*) á sérhverju jarðhitasvæði sem felur í sér að með ákveðnu vinnslustigi sé hægt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu úr jarðhitakerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sjálfbæra vinnslugetan (E_0) er þó ekki þekkt við upphaf vinnslu. Hana má meta samhliða vinnslu út frá fyrirbyggjandi gögnum um innri gerð og eðli kerfanna auk gagna um viðbrögð þeirra við vinnslu. Slíkt mat verður áreiðanlegra eftir því sem vinnslusaga viðkomandi jarðhitakerfis lengist. Uppbygging vinnslu í hæfilegum þrepum getur oftast tryggt að ekki sé farið yfir sjálfbæru mörkin. Þó geta virkjunarskref farið yfir þau, m.a. vegna þess hve illa þekkt mörkin eru við upphaf nýtingar. Við slíkar aðstæður mætti á einstökum vinnslusvæðum leyfa lotubundna vinnslu þar sem tímabundið væri farið yfir sjálfbæru mörkin ef nýtingin skilar í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata (veik sjálfbærni).

Faghópurinn setur fram tillögu um 10 markmið sjálfbærrar jarðhitanytingar. Markmiðin eru sett fram á grundvelli Brundtland-skilgreiningarinnar fyrir sjálfbæra þróun og fram-kvæmdaáætlunar Ríó-yfirlýsingarinnar í samræmi við leiðbeiningar International Institute for Sustainable Development. Fyrstu tvö markmiðin fjalla um nýtingu auðlindarinnar og endurnýjanleika hennar. Þriðja markmiðið um umhverfisstjórnun, fjórða um nýtni, það fimmta um efnahagsstjórnun og það sjötta og sjöunda um arð og afhendingaröryggi. Áttunda markmiðið fjallar um samfélagsáhrif. Níunda markmiðið og það tíunda fjalla um rannsóknir, nýsköpun og miðlun þekkingar (sjá töflu 1). Hafin er vinna við gerð matslykils sjálfbærrar jarðhitanytingar.

Jarðhitinn átti stóran þátt í að bæta lífsskilyrði íslensku þjóðarinnar á síðustu öld, en um leið hafði hann mótandi áhrif á félagslega þætti. Þróun séríslenskrar sundmenn- ingar, myndun byggðakjarna á jarðhitasvæðum og vöxtur alþjóðlega viðurkennds þekkingarsamfélags eru allt þættir sem hafa haft félagsleg áhrif. Efnahagsáhrif nýtingar jarðhita á þjóðarbúið eru án nokkurs vafa umtalsverð eins og nánar er gerð grein fyrir, hvort sem litið er til raforkuvinnslu, húshitunar eða annarrar nýtingar. Auk efnahagslegs ábata hefur hitaveituvæðingin skilað heilsufarslegum ávinningi, treyst öryggi og sjálfstæði landsins og veitt fjölbreytt tækifæri svo sem til fiskeldis, ylækta, þurrkunar og snjóbræðslu. Af ofangreindu verður ekki annað séð en að áhrif jarðhita- nýtingar séu að mestu leyti mjög jákvæð með tilliti til félags-, efnahags- og umhverfisþátta. Umhverfisáhrif jarðhitavinnslu geta þó einnig verið neikvæð þótt mótvægisáðgerðir bæti þar um. Á lághitasvæðum geta hverir og laugar horfið og á háhitasvæðum geta jarðvarmavirkjanir haft áhrif á útivist eins og öll mannvirki. Fjölnýting jarðhitans hefur þó leitt af sér vinsæla ferðamannastaði.

Faghópurinn gerir greinarmun á hugtökunum *varmastraumur* og *orkuforði*. Varma- straumur er hinn stöðugi straumur varmaorku úr iðrum jarðar til yfirborðs en orkuforði er varmaorka, bundin í bergi og heitu vatni. Frumorkunotkun jarðhita á Íslandi árið 2009 svaraði til 5 GW_{th} varmastraums, sem er minni en áætlaður aðgengilegur varmastraumur til yfirborðs, 7 GW_{th}. Með frekari uppbyggingu jarð- varmavirkjana næstu áratugi, í samræmi við rammaáætlun, gæti frumorkunotkun orðið talsvert meiri en aðgengilegi varmastraumurinn og svarað til 40 GW_{th} varma- straums. Frumorkunotkun af þeirri stærðargráðu mun ganga á orkuforða jarðskorp- unnar, en á 200 árum svarar hún þó aðeins til um 0,3% orkuforðans ofan 3 km dýpis. Því má færa rök fyrir því að halda megi jarðhitavinnslu af þeirri stærðargráðu mjög lengi áfram á Íslandi, þ.e. hún verði sjálfbær í ljósi þess orkuforða sem bundinn er í berginu, að uppfylltum þeim 10 markmiðum sjálfbærrar jarðhitanyýtingar sem fag- hópurinn setur fram (veik sjálfbærni). Þar sem jarðhiti er af skornum skammti kann að vera nauðsynlegt að krefjast sterkrar sjálfbærni.

Nægilegar upplýsingar um auðlindina eru forsenda skynsamlegrar auðlindastjórnunar. Ef tryggja á sjálfbæra jarðhitavinnslu telur faghópurinn það skyldu ríkisins að tryggja að auðlindastýring sé markviss og skynsamleg, úthlutun leyfa sé á jafnréttisgrundvelli og að hagsmunir heildarinnar ráði langtímastefnumörkun á þessu sviði. Upplýsingar um auðlindina fást með rannsóknum, og kröfunni um virka auðlindastýringu ríkisins fylgir að ríkið kosti nægilegar rannsóknir til að auðlindastýringin verði fagleg og markviss. Með því er líklegra að yfirvöld hafi þá yfirsýn sem þarf til þess að tryggja langtímahagsmuni Íslendinga í orkumálum.

Faghópurinn telur að markmið sjálfbærrar jarðhitanyýtingar og hugtakið sjálfbær jarðhitavinnsla megi innleiða í íslenska löggjöf í samræmi við skilgreiningu fag- hópsins (sjá töflu 1) eftir faglega aðkomu þar til bærra sérfræðinga. Faghópurinn, sem eingöngu er skipaður sérfræðingum á sviði raunvísinda og verkfræði, fjallaði eðli málsins samkvæmt mest um jarðhitaauðlindina og nýtingu hennar. Mat á áhrifum jarðhitanyýtingar verður hins vegar að taka til þriggja meginstoða sjálfbærrar þróunar og af þeim sökum tók faghópurinn saman nokkur mikilvæg atriði vegna hverrar stoðar fyrir sig. Ekki ber að líta á þá samantekt sem heildstætt mat á áhrifum jarðhitanyýtingar enda krefst slíkt aðkomu allra viðeigandi fagsviða.

SUMMARY

A Working Group on Sustainable Geothermal Utilisation in Iceland was jointly initiated by the National Energy Authority and the Steering Committee of the Master Plan for Hydro and Geothermal Energy Resources on behalf of the Minister of Industry, Energy and Tourism on the 28th of March 2008. The objective of the group was to propose definitions for the terms *Sustainable geothermal utilisation* and *Sustainable yield (production)*, propose how geothermal resources should be utilized in the long term and suggest a legal implementation. For this purpose the physical characteristics of geothermal systems in Iceland were categorised, the renewability and potential of the resource analysed and the experience from utilisation of numerous geothermal systems reviewed.

Sustainable development aims at meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. It is based on three main pillars, the environment, society and economy. Distinction is made between two approaches: *Strong sustainability* implies development that doesn't involve negative impact on, or decay of, any of the pillars. *Weak sustainability* on the other hand allows some decay of one of the main pillars provided the development yields an overall positive effect on society.

Sustainable geothermal utilization incorporates all the main pillars of sustainable development, i.e. the environment, society and economy. Strongly sustainable geothermal utilization requires *sustainable yield (production)* from each geothermal system. The term sustainable yield refers to the contention that for each geothermal system there should be a certain level of maximum energy production (E_0), for each mode of production, below which it will be possible to maintain constant energy production from the system for at least 100 years. The sustainable production level is virtually unknown at the onset of production, however. It may be estimated as production progresses on basis of available data on the internal structure and nature of geothermal systems as well as data on their response to production. Such estimates become more reliable as the relevant production histories grow longer. Production increased in sensible steps should in most cases ensure that the production doesn't surpass the sustainable level. Production steps may, however, surpass the sustainable level, e.g. because how poorly known it is at the onset of production. In such cases cyclic production schemes can be envisioned, in specific production fields, involving temporarily non-sustainable production, if the utilization as a whole conforms to weak sustainability and yields overall net social benefits.

The Working Group introduces ten goals for sustainable geothermal utilisation based on the Brundtland definition of sustainable development and the Rio Declaration, in harmony with the guidelines of the International Institute for Sustainable Development. The first two goals encompass the resource utilization and its renewability. The third goal refers to environmental management, the fourth to efficiency, the fifth to economic viability, the sixth and the seventh to financial viability and energy security, and the eighth to social development. The ninth and the tenth goals refer to the importance of research, innovation and knowledge sharing (see Appendix VII (Viðauki VII)). Work has started on the development of a sustainability protocol for

geothermal utilisation. The protocol involves sustainability indicators, which can be used to measure changes in individual parameters.

The Working Group recognises that geothermal energy has contributed significantly to improving living conditions in Iceland and the countries' independence. It has improved living standards by supplying clean geothermal fluid at affordable prices to the public and industry for house heating, electricity generation, snow melting, fish farming, horticulture and food drying as well as offering the possibility for municipalities to operate large outdoor public swimming centres all year round. With the growing energy demand of the developing countries the Icelandic geothermal community has trained over 400 geothermal specialists from more than 40 developing countries for over three decades to help stimulate geothermal development around the world for the benefit of mankind. This effort has led to the export of knowhow to other countries. The reduced cost of using geothermal energy instead of electricity, or oil, for house heating is also enormous. Thus, the effects geothermal energy has had on the environment, economy and society are very positive, even though the production may change surface manifestations and geothermal power plants can disrupt recreation in certain areas. Geothermal development have resulted in popular tourist destinations.

The Working Group differentiates between *terrestrial thermal current* and *stored energy* in the Icelandic crust. The thermal current is the continuous flow of thermal energy from the interior of the Earth by thermal conduction and magma intrusions from depth to the surface by volcanism, conduction and convection. The stored energy in the bedrock and the pore fluid is the energy accumulated in the crust over time. The primary geothermal energy use in Iceland was equivalent to a thermal current of about 5 GW_{th} in 2009, which is less than the estimated 7 GW_{th} accessible surface thermal current. With further development in accordance with the Icelandic National Master Plan the primary energy use could increase to 40 GW_{th} in the next decades. Primary energy use of that degree will exploit the stored energy in the crust, but 200 year production is only equivalent to about 0.3% of the stored energy down to 3 km depth. It is claimed that geothermal utilization at such a level would be weakly sustainable if managed in accordance with the ten goals of sustainable geothermal utilisation that the Working Group has proposed.

Effective policy making for sustaining a society based on geothermal utilisation is an important part of ensuring sustainability. The authorities should thus secure efficient and reasonable official geothermal resource management for the long term benefit of society. Along with active official resource monitoring the authorities have to conduct multifaceted research in the field of geothermal energy, on the resources and their utilisation, to increase fundamental understanding of geothermal systems, thus leading to an increase in the estimated geothermal reserves, and in human capacity. Information is thus the key and with active participation of the authorities it is more likely that the oversight needed to secure sustainable utilisation will be sufficient to maintain the supply of geothermal energy for generations to come.

The Working Group suggests that the previously mentioned goals for sustainable geothermal utilisation should be implemented in the Icelandic legal framework after additional contribution from relevant experts. The Working Group, which exclusively includes experts in the fields of natural sciences and engineering, focussed mainly on

the geothermal resource and utilization in its work. Assessment of the impact of geothermal utilization must, however, incorporate the three main pillars of sustainable development and hence the Working Group did also review the main issues associated with each pillar. Therefore this review should neither be considered complete nor final, as a more complete review would require contributions from various experts from the relevant disciplines.

A paper presenting preliminary results of the Working Group can be found in Appendix III (Viðauki III) and the 10 goals of sustainable geothermal utilization can be found in Appendix VII (Viðauki VII).

EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT	5
SUMMARY	7
1. INNGANGUR.....	15
1.1 Skipun og störf faghóps.....	15
1.2 Verkefni faghópsins og uppbygging skýrslu	16
1.3 Forsendur álitserðar – vörður á vegi	16
2 JARÐHITAAUÐLINDIN Á ÍSLANDI.....	19
2.1 Hugmyndir um eðli auðlindarinnar.....	20
2.2 Flokkun jarðhitakerfa.....	21
2.2.1 Lághitakerfi	24
2.2.2 Háhitakerfi	27
2.3 Varmastraumur og orkuforði.....	29
3 SJÁLFBÆR ÞRÓUN	33
3.1 Fólksfjölgun og vinnsluaukning	33
3.2 Þróun hugtaka og alþjóðasamþykktir	34
3.3 Stefna íslenskra stjórnvalda	36
3.4 Sjálfbærnisvísar fyrir jarðhitánýtingu.....	37
3.5 Áhrif jarðhitánýtingar á landsvísu	40
3.5.1 Efnahagsáhrif.....	40
3.5.2 Félagsleg áhrif	50
3.5.3 Umhverfisáhrif	53
4 SJÁLFBÆR JARÐHITAVINNSLA	55
4.1 Vinnslureynsla síðustu áratuga.....	55
4.2 Sjálfbær jarðhitavinnsla – skilgreining.....	57
4.3 Endurnýjanleiki.....	59
4.4 Tilhögun sjálfbærrar jarðhitavinnslu og nýtingar	60
4.5 Mat á sjálfbærri vinnslugetu	63
4.6 Ísland í heild.....	65
5 REGLUR UM SJÁLFBÆRA JARÐHITANÝTINGU	69
5.1 Leyfiserli.....	70
5.2 Opinbert eftirlit með jarðhitavinnslu og orkusparnaður	71
5.3 Sjálfbær þróun og íslensk löggjöf	72
6 NIÐURSTÖÐUR	73
HEIMILDIR	77
VIÐAUKI I – ORÐASKÝRINGAR.....	85
I.1 Orkuhugtök	85
I.2 Auðlindahugtök.....	87
I.3 Hugtök um sjálfbærni.....	88
VIÐAUKI II – BRÉF TIL VERKEFNISSTJÓRNAR.....	91
VIÐAUKI III – RÁÐSTEFNUGREIN Á ENSKU	97
VIÐAUKI IV – FLOKKUN LÁGHITAKERFA.....	107
VIÐAUKI V – FLOKKUN HÁHITAKERFA	113

VI. AUKI VI – LÖG UM JARÐHITANÝTINGU.....	119
VI.1 Lög nr. 98/1940, um eignar- og afnotarétt jarðhita	119
VI.2 Orkulög, nr. 58/1967	120
VI.3 Lög um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, nr. 57/1998	121
VI.3.1 Almennt um auðlindalögin	121
VI.3.2 Eignarréttur	122
VI.3.3 Rannsóknir	122
VI.3.4 Nýting	125
VI.3.5 Skilyrði við veitingu rannsóknar- og/eða nýtingarleyfa	126
VI.3.6 Eftirlit og annað	126
VI.4 Raforkulög, nr. 65/2003	127
VI.4.1 Almennt	127
VI.4.2 Virkjunarleyfi	127
VI.4.3 Skilyrði virkjunarleyfis	128
VI.4.4 Samnýting auðlinda	129
VI.4.5 Eftirlit og annað	130
VI.5 Lög um Orkustofnun, nr. 87/2003	130
VI.6 Mat á umhverfisáhrifum	131
VI. AUKI VII – MARKMIÐ SJÁLFBÆRRAR JARÐHITANÝTINGAR /	133
GOALS OF SUSTAINABLE GEOTHERMAL UTILIZATION	133

MYNDASKRÁ

Mynd 1: Skiptingu ysta hluta jarðar í meginlandsskorpu, úthafsskorpu, og möttul.	19
Mynd 2: Kort sem sýnir aldur jarðlaga og dreifingu jarðhita á Íslandi.	22
Mynd 3: Kort af fornum sprungusveimi.	23
Mynd 4: Myndun þverbrotabelta.	23
Mynd 5: Helstu hníkþættir á Íslandi.	24
Mynd 6: Stílfært líkan af dæmigerðu lághitakerfi á Íslandi.	25
Mynd 7: Stílfært líkan af háhitakerfi.	28
Mynd 8: Kort sem sýnir hitastigul í grunnnum og nokkrum djúpum borholum.	30
Mynd 9: Varmastraumur í gegnum Ísland og orkuforði.	32
Mynd 10: Frumorkunotkun í heiminum frá 1980 til 2008.	33
Mynd 11: Stílfærð mynd af veikri og sterkri sjálfbærni.	36
Mynd 12: Sjálfbærnivísar auðlindastjórnunar fyrir jarðhitavinnslu í Kröflu.	38
Mynd 13: Nýtni iðorku jarðvarmavirkjana á Íslandi.	40
Mynd 14: Hitunarkostnaður neytenda samanborinn við kostnað olíukyndingar.	41
Mynd 15: Hitunarkostnaður á Íslandi um mitt ár 2009 með virðisauka	42
Mynd 16: Þróun stofnkostnaðar jarðvarmavirkjana á Íslandi.....	44
Mynd 17: Skipting stofnkostnaðar nýlegra jarðvarmavirkjana á Íslandi.....	44
Mynd 18: Samanburður á meðalorkuverði til stóriðju og heimila.	46
Mynd 19: Samanburður á nýtingartíma stóriðju og almenna markaðarins.	46
Mynd 20: Notkun jarðhita til iðnaðar, sundlauga, ylræktar og fiskeldis.	48

Mynd 21: Hlutfallsleg skipting jarðhitanotkunar til fiskeldis.....	49
Mynd 22: Orkuflæði jarðhita á Íslandi árið 2008.	49
Mynd 23: Fjölnýting jarðhitans	51
Mynd 24: Fjöldi nemenda Jarðhitaskóla Sp eftir löndum frá 1979-2010.....	53
Mynd 25: Vinnslu- og vatnsborðssaga jarðhitakerfisins í Laugarnesi í Reykjavík.....	56
Mynd 26: Skýringarmynd á hugtakinu „sjálfbær vinnsla jarðhita“.....	58
Mynd 27: Mynd sem sýnir hvernig E_0 , er háð vinnsluaðferð og tækniframförum.....	61
Mynd 28: Dæmi um hvernig nýta má jarðhitakerfi sjálfbært á mismunandi vegu.....	62
Mynd 29: Afmörkun háhitasvæða sem rammaáætlun hefur til skoðunar.	66
Mynd 30: Stílfærð mynd af áætlaðri vinnanlegri hávermisorku til raforkuvinnslu.....	68
Mynd 31: Dæmi um lághitakerfi í þverbrotabelti.....	107
Mynd 32: Dæmi um lághitakerfi í enda sprungusveims.....	108
Mynd 33: Dæmi um lághitakerfi tengt gangi og norður-suður sprungukerfi.	109
Mynd 34: Dæmi um lághitakerfi á Vestfjörðum tengt NV-SA sprungum.	110
Mynd 35: Dæmi um lághitakerfi í setlögum.....	111
Mynd 36: Dæmi um dulið lághitakerfi.	112
Mynd 37: Dæmi um háhitakerfi í megineldstöð rekbeltis.	113
Mynd 38: Dæmi um háhitakerfi í sprungusveimi megineldstöðvar	114
Mynd 39: Dæmi um háhitakerfi í sniðrekbelti	115
Mynd 40: Dæmi um háhitakerfi í eldkeilu utan rekbelta.....	116
Mynd 41: Dæmi um háhitakerfi í rýólít-eldfjalli utan rekbelta	117
Mynd 42: Dæmi um háhitakerfi í megineldstöð á kólnunarstigi.....	118

TÖFLUSKRÁ

Tafla 1: Tillaga að markmiðum sjálfbærrar jarðhitanýtingar.	39
Tafla 2: Forsendur arðsemisútreikninga fyrir 100 MW jarðvarmavirkjun.....	43
Tafla 3: Yfirlit yfir fjölpætta nýtingu á helstu orkuvinnslusvæðum Íslands.	51
Tafla 4: Mat á rafaflí háhitasvæða til 50 ára samkvæmt áætlaðri flatarvinnslugetu	68
Tafla 5: Tillaga að markmiðum sjálfbærrar jarðhitanýtingar.	135
Tafla 6: Suggested goals of sustainable geothermal utilization.....	136

1. INNGANGUR

1.1 Skipun og störf faghóps

Iðnaðarráðherra fór þess á leit, með bréfi dags. 18. október 2007, við formann verkefnisstjórnar rammaáætlunar um nýtingu vatnsafls og jarðvarma að fram fari mat á sjálfbærri nýtingu jarðhita með hliðsjón af þeirri áherslu sem lögð er á verndargildi og orkunýtingu í stefnuyfirlýsingu ríkisstjórnarinnar sem þá sat og í samræmi við viðeigandi alþjóðasamningar sem Ísland á aðild að. Í samstarfi við Orkustofnun var faghópur um sjálfbæra nýtingu jarðhita skipaður þann 28. mars 2008 af Guðna A. Jóhannessyni, orkumálastjóra, og Svanfríði Jónasdóttur, formanni verkefnisstjórnar rammaáætlunar. Í faghópinn voru eftirfarandi sérfræðingar skipaðir: Albert L. Albertsson, verkfræðingur, tilnefndur af Hitaveitu Suðurnesja, Axel Björnsson, jarðeðlisfræðingur, tilnefndur af verkefnisstjórn rammaáætlunar, Árni Gunnarsson, verkfræðingur, tilnefndur af Landsvirkjun, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, jarðfræðingur, tilnefnd af verkefnisstjórn rammaáætlunar, Grímur Björnsson, jarðeðlisfræðingur tilnefndur af Orkuveitu Reykjavíkur, Guðni Axelsson, jarðeðlisfræðingur, tilnefndur af Orkustofnun, Jónas Ketilsson, verkfræðingur, tilnefndur af Orkustofnun, skipaður formaður faghópsins, og Kristján Sæmundsson, jarðfræðingur, tilnefndur af verkefnisstjórn rammaáætlunar. Vegna anna sá Albert sér ekki fært að taka þátt í starfinu og sagði sig því úr faghópnum. Þá tók Bjarni Pálsson, verkfræðingur, við af Árna Gunnarssyni sem fulltrúi Landsvirkjunar í lok árs 2008.

Formaður kallaði faghópinn saman til fyrsta fundar í mars 2008. Hópurinn hefur haft starfsaðstöðu á Orkustofnun og notað fjarfundarbúnað eftir þörfum. Formaður faghópsins hefur sinnt ritarastörfum. Frá upphafi hafa verið haldnir 50 reglulegir fundir. Almenn gagnasöfnun var aðalverkefni faghópsins árið 2008, en mikið fræðilegt efni liggur fyrir um jarðhita bæði hér á landi og erlendis. Orkustofnun hefur m.a. lagt áherslu á alþjóðlegt samstarf í gegnum jarðhitahóp Alþjóða orkumálastofnunarinnar (IEA-GIA) með skipulagningu málstofu um sjálfbæra vinnslu jarðhita á Nýja-Sjálandi árið 2008 og vinnufunda innan IEA-GIA. Að auki skal þess getið að Orkustofnun hefur vistað öll skjöl tengd málinu til varðveislu í skjalavistunarkerfi stofnunarinnar undir málnúmerinu 2010-010050. Faghópurinn sendi verkefnisstjórn rammaáætlunar bréf dags. 30. janúar 2009, sjá viðauka II.

Faghópurinn ræddi við eftirfarandi sérfræðinga og fulltrúa stofnana: Ragnheiði Ólafsdóttur, umhverfisstjóra Landsvirkjunar, Stefán Gíslason verkefnisstjóra Staðardagskrár 21 á Íslandi, Brynhildi Davíðsdóttur, dósent í umhverfis- og auðlindafræðum við Háskóla Íslands, Ólaf Pál Jónsson, lektor í heimspeki við Háskóla Íslands, Friðrik M. Baldursson, prófessor við viðskiptadeild Háskólans í Reykjavík, Ragnar Árnason prófessor við hagfræðideild Háskóla Íslands, Björgólf Thorsteinsson, rekstrarhagfræðing og stjórnarformann Landverndar, Aðalheiði Jóhannsdóttur, dósent við lagadeild Háskóla Íslands, Guðna A. Jóhannesson, orkumálastjóra, Svanfríði Jónasdóttur, formann og Tómas Þ. Tómasson, starfsmann rammaáætlunar. Þá aðstoðuðu ýmsir starfsmenn Orkustofnunar við gerð skýrslunnar ásamt Steini Hafliðasyni sérfræðingi á hagdeild Landsvirkjunar við gerð arðsemismats. Meistararitgerðir Ruth Shortall í auðlinda- og umhverfisfræðum hjá Háskóla Íslands og Rutar Bjarnadóttur í verkfræði hjá REYST tengdust sömuleiðis verkefni faghópsins. Brynhildur Davíðsdóttir, Ragnheiður Ólafsdóttir, Svanfríður Jónasdóttir, Helga Barðadóttir, Sveinbjörn Björnsson, Ragnar Árnason, Kristinn Einarsson og Guðni A. Jóhannesson

fóru yfir valda hluta handrits og lögðu til breytingar. Er sérfræðingum færðar bestu þakkir fyrir.

1.2 Verkefni faghópsins og uppbygging skýrslu

Samkvæmt skipunarbréfi faghópsins, með síðari breytingum vegna flutnings verkefna frá ráðgjafahópi rammaáætlunar um mat á háhitasvæðum skv. bréfi dags. 9. apríl 2008, átti starf faghóps fyrst og fremst að beinast að þremur viðfangsefnum:

1. Leggja fram rökstuddar tillögur um hvernig skilgreina skuli sjálfbæra jarðhitanýtingu og hvernig meta eigi sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa.
2. Gera tillögur um mismunandi nýtingarleiðir er miða að sjálfbærri nýtingu auðlindarinnar.
3. Semja drög að reglum er hafi það að markmiði að tryggja sjálfbæra nýtingu jarðvarma. Taka skal tillit til viðeigandi alþjóðasamninga og yfirlýsinga sem Ísland á aðild að, m.a. Ríó-yfirlýsingarinnar og meginreglna umhverfisréttar.

Faghópurinn ákvað í upphafi þessa verkefnis að skila niðurstöðum sínum í skýrslu. Hún er þannig uppbyggð að á eftir inngangi kemur sér kafli er gerir grein fyrir hugmyndum um eðli jarðhitans og flokkun hans auk uppruna og stærðar varmastraumsins að neðan til yfirborðs. Í þriðja kafla er fjallað um sjálfbæra þróun og mögulegan þátt jarðhitans í henni, alþjóðasamþykktir sem Ísland á aðild að og hvernig hægt er að stefna að sjálfbærri þróun á markvissan hátt. Þar eru einnig settar fram tillögur hópsins um markmið sjálfbærrar jarðhitanytingar. Í fjórða kafla er fjallað um þann þátt sjálfbærrar jarðhitanytingar sem snýr beint að jarðhitavinnslunni sjálfri. Þar er lagt mat á vinnslureynslu síðustu áratuga, fjallað um tilhögun sjálfbærrar vinnslu og stöðu jarðhitanytingar á landsvísu. Í fimmta kafla er rætt um reglur er miða að sjálfbærri nýtingu jarðhita og mögulegri skilgreiningu hugtaka í íslenskri löggjöf. Helstu niðurstöður faghópsins eru síðan teknar saman í lokakafla út frá fyrrgreindum, þremur viðfangsefnum.

Í viðauka I er birtur listi yfir nokkur hugtök sem koma oft fram í skýrslunni og skýringar faghópsins á þeim. Í viðauka II er fyrrgreint bréf faghópsins til verkefnisstjórnar rammaáætlunar. Viðauki III inniheldur grein á ensku eftir sérfræðinga faghópsins, sem birt var á alþjóðlegu jarðhitaráðstefnunni á Balí árið 2010 (Jónas Ketilsson o.fl., 2010a). Í viðauka IV og V er fjallað myndrænt um nokkra helstu flokka lág- og háhitakerfa landsins tengda ólíkum brotakerfum. Í viðauka VI er gerð grein fyrir ákvæðum laga um jarðhitanytingu á Íslandi. Í viðauka VII eru markmið sjálfbærrar jarðhitanytingar á ensku og íslensku.

1.3 Forsendur álitsgerðar – vörður á vegi

Faghópurinn um sjálfbæra nýtingu jarðhita ákvað snemma í starfi sínu að nauðsynlegt væri að afmarka verkefnið, svo takast mætti að ná þeim markmiðum sem skipunarbréf hópsins setur. Eftirfarandi atriði eru dæmi um þá afmörkun, sem líta má á sem eins konar vörður sem hópurinn ákvað að fylgja í starfi sínu:

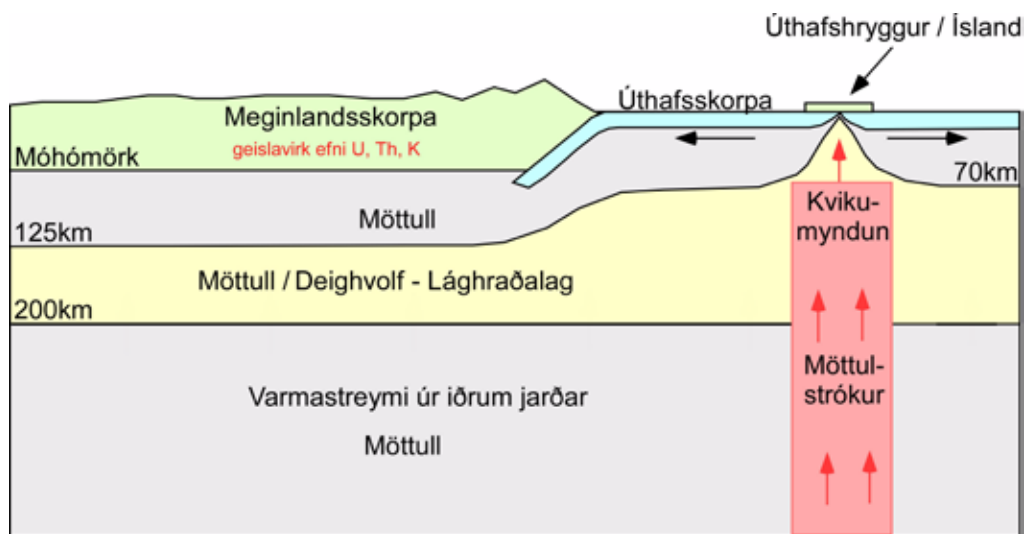
1. Faghópurinn, sem eingöngu er skipaður sérfræðingum á sviði raunvísinda og verkfræði, fjallaði eðli málsins samkvæmt, mest um jarðhitaauðlindina og nýtingu hennar. Mat á áhrifum jarðhitanytingar verður hins vegar að taka til allra þriggja meginstoða sjálfbærrar þróunar og af þeim sökum tók faghópurinn saman nokkur mikilvæg atriði vegna hvernar stoðar. Ekki ber að líta á þá samantekt sem heildstætt mat á áhrifum jarðhitanytingar enda krefst slík rannsókn aðkomu allra viðeigandi fagsviða.
2. Markmið sjálfbærrar jarðhitanytingar eru sett fram á grundvelli Brundtland-skilgreiningarinnar fyrir sjálfbæra þróun og framkvæmdaáætlunar Ríó-yfirlýsingarinnar frá árinu 1992 í samræmi við leiðbeiningar IISD (International Institute for Sustainable Development).
3. Gerður er greinarmunur á hugtökunum *sterkri* og *veikri sjálfbærni* sem taka til allra meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis. Sterk sjálfbærni felur í sér að þróunin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn þessara meginþátta. Veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhvers meginþáttanna enda skili þróunin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata.
4. Gerður er greinarmunur á hugtökunum *sjálfbær jarðhitanyting* og *sjálfbær jarðhitavinnsla*. Sjálfbær jarðhitanyting tekur til allra meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis. Sterk sjálfbær jarðhitanyting felur í sér að nýtingin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn þessara meginþátta og krefst því m.a. sjálfbærrar jarðhitavinnslu á sérhverju jarðhitasvæði sem er þannig að með ákveðnu vinnslustigi sé hægt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu úr jarðhitakerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Vinnslan getur einnig verið lotubundin ef nýtingin skilar í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata en samræmist þá veikri sjálfbærni. Áætlanir um lotubundna vinnslu ættu þess vegna að ná til nokkurra vinnslusvæða, sem sátt er um að nýta mismikið á víxl en þó þannig að orkuafhendingaröryggi sé tryggt til langs tíma.
5. Skilgreining á sjálfbærri jarðhitavinnslu er byggð á niðurstöðum sérfræðingahóps á vegum Orkustofnunar frá árinu 2001. Hún setur ákveðin takmörk á vinnslu jarðhita, sem talið er að jarðhitakerfi þoli til lengri tíma litið.
6. Sökum þess að ráðgjafahópur um mat á háhitasvæðum átti samkvæmt skipunarbréfi sínu, bréfi dags. 20. desember 2007, að semja drög að reglum um framkvæmdir á háhitasvæðum lagði faghópurinn meiri áherslu á áhrif vinnslunnar neðanjarðar en ofan.
7. Faghópurinn hefur farið yfir fjölda faggreina tengdra ætlunarverki sínu, m.a. greinar um íslensku jarðhitaauðlindina. Nefna má grein Gunnars Böðvarssonar um varmastrauminn um skorpuna (1982a), jarðvarmamat Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985), og grein um samanburð vatnsafls og jarðhita eftir Valgarð Stefánsson o.fl. (1998). Faghópurinn styðst við niðurstöður þeirra.
8. Faghópurinn gerir greinarmun á hugtökunum varmastraumur og orkuforði. Varmastraumur er hinn sístæði (stöðugi) straumur varmaorku úr iðrum jarðar til yfirborðs en orkuforði er varmaorka, bundin í bergi og heitu vatni sem fyllir að jafnaði holrúm bergsins.

2 JARÐHITAAUÐLINDIN Á ÍSLANDI

Í þessum kafla er leitast við að gera grein fyrir hugmyndum um eðli jarðhitans, flokkun hans og uppruna varmastraumsins upp undir Ísland.

Jarðhiti er sú varmaorka sem streymir djúpt úr jörðu til yfirborðs og bundin er í jarðskorpunni. Jarðskorpan er þunn, stökk og brotin upp í stóra og smáa fleka sem færast til með deighvelinu, hlutbráðnu lagi ofarlega í möttlinum. Skorpan skiptist í meginlands- og úthafsskorpu. Úthafsskorpan er aðeins um 8 km þykk og endurnýjast stöðugt á úthafshryggjum þar sem tvo fleka rekur í sundur. Á nokkrum stöðum eru svo kallaðir möttulstrókar, afmarkaðar rásir, nokkrir tugir eða hundruð km í þvermál, þar sem uppstreymi kviku er meira en undir venjulegum úthafshrygg. Ísland hefur þá sérstöðu að vera staðsett á miðjum úthafshrygg auk þess sem möttulstrókur er undir landinu (sjá mynd 1).

Meðalvarmastraumur upp til yfirborðs jarðar er aðeins um 87 mW/m^2 . Hann er að meðaltali hærri í úthöfunum um 101 mW/m^2 en lægri á meginlöndunum um 65 mW/m^2 (Lowrie, 2006). Þessi varmastraumur stafar að hluta af hægfara kólnun jarðarinnar og að hluta frá geislavirkum efnum. Lítið er af geislavirkum efnum í úthafsskorpunni og þar ræður mestu varmaflutningur úr iðrum jarðar. Í meginlandsskorpunni er umtalsvert magn geislavirkra efna og veldur niðurbrot þeirra um helmingi varmastraumsins á móti helmingnum sem kemur að neðan upp í skorpuna (Lowrie, 2006). Þennan varmastraum er hægt að nýta í smáum stíl, t.d. með varmadælum til húshitunar. Á mörgum afmörkuðum stöðum er jarðfræðilegum aðstæðum hins vegar þannig háttað, m.a. vegna lektar bergs, að óvenju mikil varmaorka berst með heitum efnum upp í skorpuna og til yfirborðs. Kvika getur flutt varma neðan úr möttlinum upp í skorpuna þar sem varmi kvikunnar hitar upp grunnvatn. Einnig getur staðbundin djúp hringrás vatns flutt varma úr neðri hluta skorpunnar til yfirborðs. Yfirleitt eru orðin jarðhitasvæði og jarðhitakerfi einungis notuð um staði þar sem varmaorka hefur safnast fyrir og hitar grunnvatn á afmörkuðu svæði eða flyst ört til yfirborðs einkum um lekar sprungur.



Mynd 1: Stilfærð yfirlitsmynd sem sýnir skiptingu ysta hluta jarðar í meginlandsskorpu, úthafsskorpu, og möttul með deighvolfi. Undir Íslandi er hvort tveggja, möttulstrókur og flekaskil.

Vatn, bæði í gufu- og vökvaformi, er miðillinn sem flytur orkuna í jarðhitakerfum en mestur hluti hennar er þó bundinn í berginu og vatni í holrýmum þess. Gerðar hafa verið tilraunir til að nýta hita í bergi með litilli lekt með því að örva jarðhitakerfi eða búa til ný með því að skapa lekt með háum þrýstingi. Þetta hefur þó ekki skilað umtalsverðum hagnýtum árangri til þessa. Ágætt yfirlit um eðli jarðhitans, rannsóknir og nýtingu hans er að finna í Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005).

2.1 Hugmyndir um eðli auðlindarinnar

Eðli jarðhitans hefur um margar aldir verið mönnum hagleikið. Sú skoðun var lengi ríkjandi að jarðhitavatn kæmi með kviku úr iðrum jarðar. Það var ekki fyrr en um miðja 19. öld þegar einn helsti frumkvöðull í nútíma efnafræði, Þjóðverjinn Robert Bunsen, rannsakaði hveru á Íslandi, að fram kom önnur skýring á uppruna jarðhitans (Bunsen, 1847). Hann safnaði yfir 100 gassýnum auk vatns- og grjótsýna sem síðar voru greind í rannsóknarstofum vítt og breitt um Evrópu. Bunsen áttaði sig á samspili vatns og bergs og myndun útfellinga. Hann tengdi saman brotalínur, eldvirkni og jarðhita og komst að þeirri niðurstöðu að jarðhitavatnið væri regnvatn að uppruna, sem hefði náð að hitna djúpt í jörðu. Hann áttaði sig á tengslum eldvirkni og háhita og taldi að hitagjafi lághitasvæða væru kólnandi innskot. Það kom hins vegar í ljós að Bunsen var of langt á undan sinni samtíð. Niðurstöður hans gleymdust að mestu og jarðfræðingar héldu áfram að trúa því að jarðhitavatn væri ættað úr kviku og óskýlt regnvatni.

Það var ekki fyrr en eftir aldamótin 1900 að jarðhitarannsóknir hérlandis eflust á ný með þátttöku jafnt íslenskra sem erlendra vísindamanna. Þeir komust að sömu niðurstöðu og Bunsen að jarðhitavatn væri regnvatn að uppruna, sem fengi varmann úr bergkviku eða kólnandi innskotum, jafnt í háhita- sem lághitakerfum.

Trausti Einarsson (1937, 1938, 1942) gerði ítarlegar athuganir á lághitasvæðum landsins, einkum á Norðurlandi. Hann komst að þeirri niðurstöðu að hitagjafi lághitakerfa væri ekki kólnandi innskot heldur hinn stöðugi varmastraumur upp í gegnum jarðskorpuna. Trausti taldi einnig að vatnið rynni eftir sprungum, einkum meðfram berggöngum, niður á nokkurra kílómetra dýpi. Þar hitnaði það þar til það næði hitastigi bergsins og leitaði upp til yfirborðs í hverum og laugum. Samkvæmt kenningum Trausta ríkir jafnvægi milli varmastraumsins að neðan og þess varma sem lághitavatnið flytur til yfirborðs. Líkan hans hefur af þeim sökum verið kallað sístætt (æstætt). Í fyrstu virtist Trausti telja þessa hringrás bundna við einstök jarðhitakerfi, en seinna útvíkkaði og alhæfði hann kenninguna og taldi hana eiga við öll jarðhitakerfi landsins, bæði lág- og háhitasvæði (Trausti Einarsson, 1950, 1966), en fór þar villur vegar.

Gunnar Böðvarsson (1950) skrifaði tímamótagrein þar sem hann sýndi fram á að ofangreindar hugmyndir Trausta gætu ekki staðist varmafræðilega. Gunnar sýndi að varmastraumurinn nægði ekki til að hita allt jarðhitavatn sem kemur til yfirborðs í laugum og hverum á Íslandi. Hann taldi að jarðhitinn væri í raun óstöðugt, og tímabundið fyrirbæri á hverjum stað. Vatnið taki varmann upp með því að kæla smátt og smátt bergið umhverfis rennslirásirnar djúpt í jörðu og flytji hann upp til yfirborðs. Vatnið fær því varmann ekki nema að litlu leyti úr almenna varmastraumnum.

Þegar farið var að bora dýpra en 1500 m djúpar borholur á lághitasvæðum utan Reykjavíkursvæðisins árið 1970 kom í ljós að neðri hluti jarðhitakerfanna, sem borað var í, var mun kaldari en búast mátti við út frá venjulegum hitastigli. Þetta sýndi að á lághita-

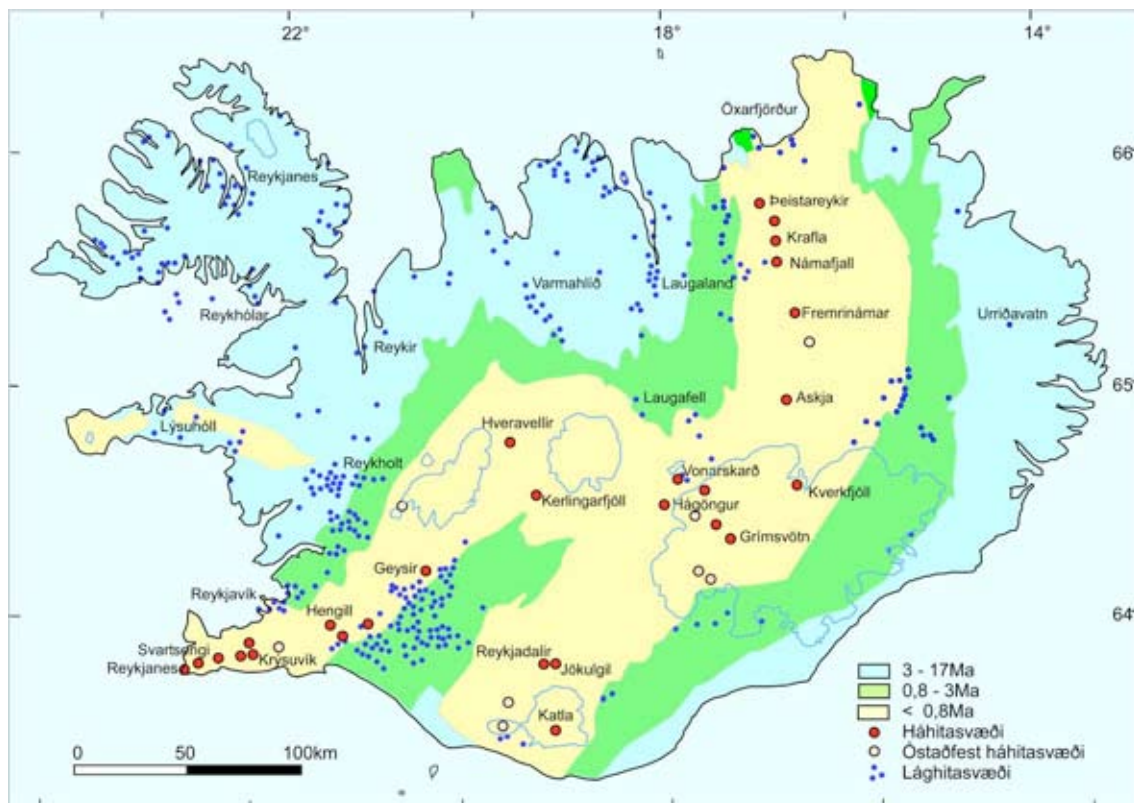
svæðunum á sér stað hræring, sem flytur varma af miklu dýpi upp í grynri hluta kerfanna. Upp úr 1980 endurvakti Gunnar Böðvarsson þrjátíu ára gamlar hugmyndir sínar, útfærði frekar og studdi með nýlegum gögnum og hitaferlum úr borholum (Gunnar Böðvarsson, 1983). Á þessum grundvelli setti Gunnar fram kenningu um eðli lághitas þar sem reiknað er með staðbundnum varmaflutningi með hræringu úr neðri hlutum jarðskorpunnar upp í jarðlög nær yfirborði í lóðréttum sprungum innan jarðhitakerfanna. Þróun hugmynda um eðli háhitasvæðanna var nokkuð önnur en hvað lághitasvæðin snerti. Bunsen taldi augljóst að kvika eða kólnandi innskot væru meginhitagjafi háhitasvæðanna og varð það almenn skoðun jarðhitamanna bæði hér á landi og erlendis. Um þróun hugmynda og þekkingar á eðli jarðhitans vísast m.a. í Axel Björnsson (2005), Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005), Stefán Arnórsson (1995a og 1995) og Stefán Arnórsson o.fl. (2008).

2.2 Flokkun jarðhitakerfa

Jarðhitakerfi er afmarkað rúmmál í jarðskorpu þar sem hræring grunnvatns á sér stað. Það inniheldur alla þætti kerfisins, þ.e. aðrennsli, uppstreymisrás, lauga- og hverasvæði og afrennsli.

Jarðhitakerfi hafa verið flokkuð á mismunandi vegu eftir eðli og eiginleikum þeirra. Algengustu gerðir jarðhitakerfa hér á landi eru háhita- og lághitakerfi. Háhitakerfin fá varmann úr heitum innskotum og kviku á eldfjallasvæðum, en lághitakerfin úr staðbundnum varmaflutningi með varmaleiðingu úr neðri hluta jarðskorpunnar í vatnsgeng jarðlög og sprungur nær yfirborði og varmanámi með hræringu grunnvatns. Oft er stuðst við þær skilgreiningar að lághitakerfi séu kaldari en 150°C á eins kílómetra dýpi og háhitakerfi heitari en 200°C á því dýpi (Gunnar Böðvarsson, 1961, 1964 og 1982b; Helgi Björnsson o.fl., 1982). Jarðhitakerfi með hitastig á bilinu 150-200°C á þessu dýpi eru reyndar þekkt hér á landi. Sum þeirra eru annað hvort afrennsli frá háhitakerfum eða gömul háhitakerfi, langt komin í kólnun. Mynd 2 sýnir legu helstu háhita- og lághitasvæða á Íslandi.

Minnstur hluti jarðhitakerfa er sýnilegur og sum eru dulin með öllu. Aðrennslið til þeirra er í flestum tilfellum lítt þekkt. Það á einkum við um lághitakerfin. Hverir og laugar sýna hvar jarðhitakerfi er undir og stundum sjást sprungurnar sem leiða vatnið til yfirborðs. Afrennsli kerfanna kemur stundum fram í laugum og volgrum. Á háhitasvæðum sýna gufuhverir hvar sýður upp af grunnvatni og gas sem fylgir gufunni ummyndar bergið í leir næst yfirborði. Kulnaðar skellur og leirflákar vitna um breytilega virkni. Í fáeinum tilfellum kemur djúpvatn háhitakerfa fram á svæðum lágt í landi (Hveravellir á Kili, Geysir og Hveragerði). Afrennsli háhitakerfanna neðanjarðar er þekkt í nokkrum tilfellum, en einungis þar sem það er grunnt, nær mest nokkur hundruð metra undir yfirborði.



Mynd 2: Kort sem sýnir aldur jarðlaga og dreifingu jarðhita á Íslandi. Unnið upp úr Axel Björnsson o.fl. (1990).

Myndun jarðhitakerfa á Íslandi er háð lekt bergs og eðli brotakerfanna og má flokka þau eftir þeim. Eldstöðvakerfin með megineldstöðvum sínum og sprungusveimum eru þær jarðfræðilegu einingar sem hafa byggt landið upp. Virkniskeið þeirra er oft um hálf til ein milljón ár. Kerfi þessi eru mörg hver um 100 km á lengd og oft um og yfir 10 km breið. Háhitasvæðin eru öll með tölu innan þeirra virku, langflest í megineldstöðvunum sjálfum, gjarnan tengd innskota- og brotakerfum út frá þrýstimiðju í rótum þeirra. Út frá megineldstöðvum ganga sprungusveimarnir, kerfi af samsíða gjám og misgengjum. Í þeim er mikil lekt sem býður upp á hræringu vatns. Í einstöku tilfellum verða þar til háhitakerfi, en oftar lághitakerfi þar sem sprungusveimarnir ganga inn í og brjóta upp gamla jarðskorpu (sjá mynd 3).

Byggingareiningum landsins var lýst hér að ofan, en jarðhnikið skiptir jafnmiklu máli fyrir jarðhitann. Víkjum þá að helstu hnikpáttunum. Úthafshrygginn rekur afstætt til vest-norðvesturs miðað við möttulstrókinn, en hann togar í uns nýtt hryggjarstykki myndast ofan hans. Við það verða til þverbrotabelti (sjá mynd 4) og sniðrekabelti. Hnikpáttunum á Íslandi er lýst á mynd 5 og í texta með henni.

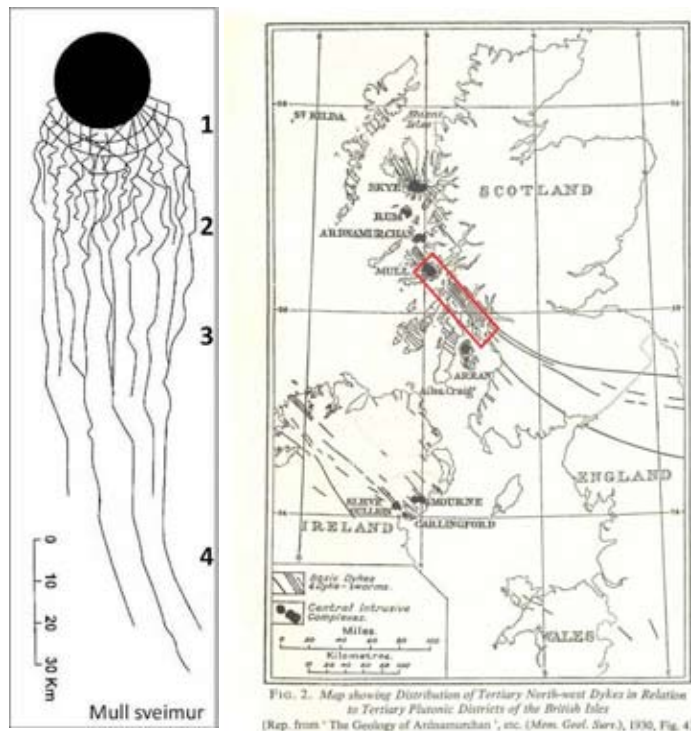
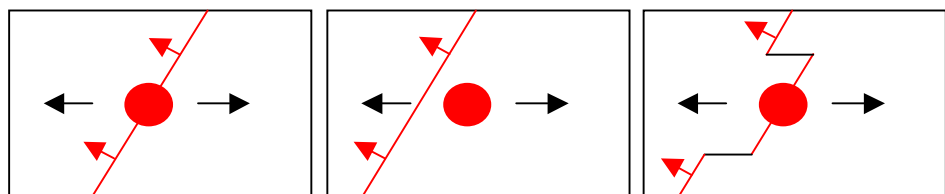
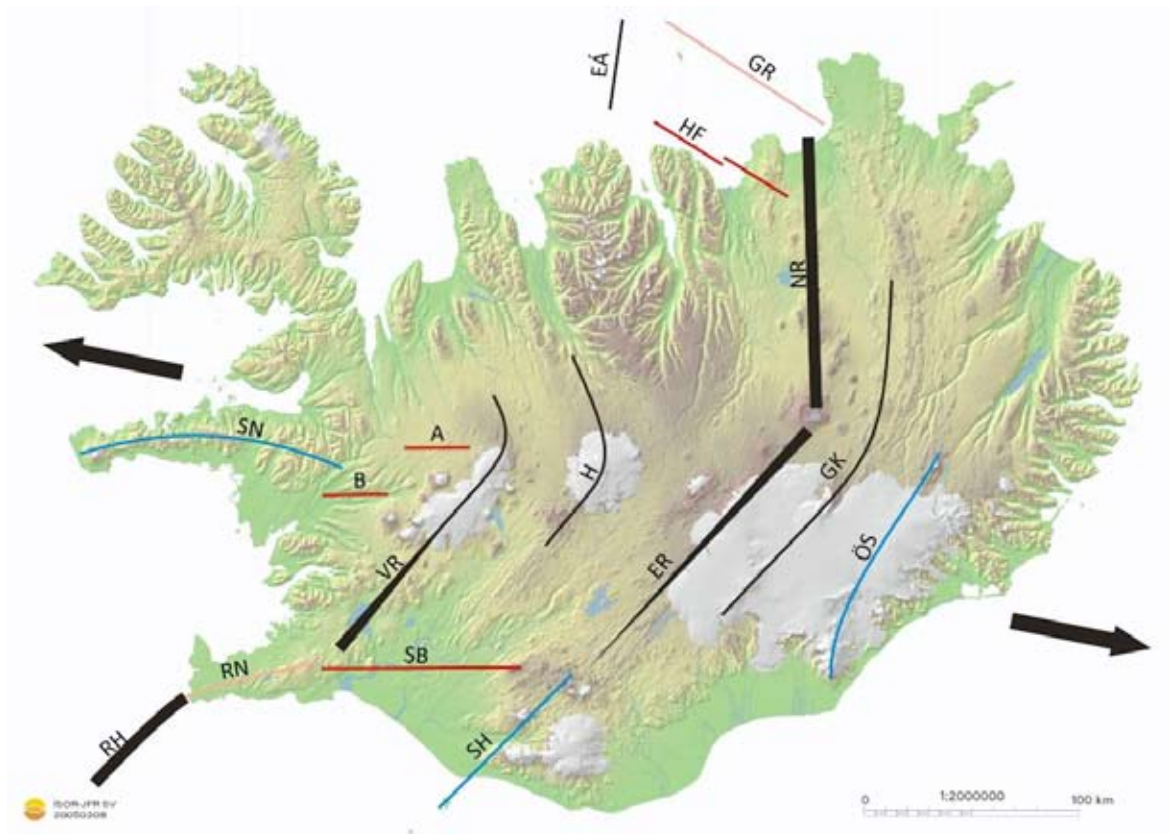


FIG. 2. Map showing Distribution of Tertiary North-west Dykes in Relation to Tertiary Plutonic Districts of the British Isles (Rep. from 'The Geology of Arisaig', etc. (Mem. Geol. Surv.), 1930, Fig. 4)

Mynd 3: Kort af fornum sprungusveimi (hér gangasveimi). Margt má læra af eldstöðvakerfum þar sem 1-2 km hafa rofist ofan af landinu. Hér er dæmi um eitt af fyrstu eldstöðvakerfunum sem kortlögð voru fyrir rúmri öld, Mull-kerfið á Bretlandseyjum frá byrjun tertier-tímabilsins. Sá hluti gangasveimsins frá Mull-eldstöðinni sem sýndur er til vinstri er afmarkaður með rauðum ramma á kortinu til hægri. Bergeitlar eru ráðandi í megineldstöðinni (svört) en gangakerfi mynda hringlægan krans umhverfis (1). Stefnumarkað gangakerfi verður ráðandi fjær (2). Göngum fækkar smám saman (3) og fáeinir ná yfir 300 km frá eldstöðinni (Jolly og Sanderson, 1995). Af samanburði við Ísland má ætla að gjásvæði með sprungugosum hafi náð yfir svæði (1) og (2), en strjálást á svæði (3). Stærstu kvikuhlaup náðu óræveg frá megineldstöðinni. Háhitakerfi eru staðsett í megineldstöðinni og í fáeinum tilfellum skammt utan hennar á svæði (1). Mikil lekt á gjásvæðum (2) er óhagstæð myndun lághitakerfis. Slík kerfi verða til á sprungusvæðum þar sem lekt er minni og sprungur strjálí (3 og 4). Í kynningu á gerðum háhita- og lághitasvæða hér á eftir þarf að hafa þessa mynd í huga.



Mynd 4: Myndun þverbrotabelta (e. transform fault zone). Úthafshrygg rekur til vestnorðvesturs (rauðar örvar) miðað við möttulstrókin (rauður hringur). Þangað leitar kvikan þar til leiðin beint upp opnast og nýtt gosbelti myndast.

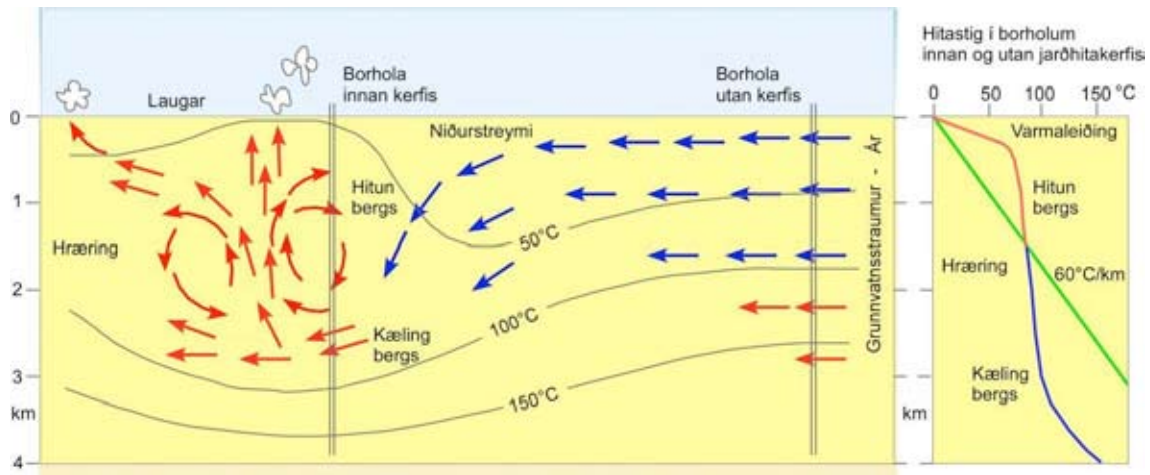


Mynd 5: Helstu hníkþættir á Íslandi. Rekbeltin (e. spreading axis eða rift zone) (svört) hliðrast til austurs frá Reykjaneshrygg (RH) og Eyjafjarðarál (EÁ). Það gerist um Suðurlands-þverbrotabeltið (SB) og annað þverbrotabelti kennt við Tjörnes (HF) milli Húsavíkur og Flateyjar. Brotabelti á Arnarvatnsheiði (A) og í Borgarfirði (B) eru sama eðlis. Þau tengja á milli Vestra rekbeltisins (VR) og Snæfellsness-hliðarbeltisins (SN) (e. flank zone). Vestra (VR), Eystra (ER) og Norðurrekkjabeltið (NR) eru sýnd svört. VR og ER eru sýnd sem fleygar. Það á að gefa til kynna vaxandi gliðnun annars vegar til suðvesturs í VR og hins vegar til norðausturs í ER. Yfir Mið-Ísland liggja eldstöðvakerfi. Þau helstu eru gefin til kynna með H (Hofsjökull) og GK (Grímsvötn-Kverkfjöll). Sniðrekbelti (e. transtensional zone) eru sýnd í bleikum lit, annars vegar Reykjanesskagi (RN) og hins vegar spegilmynd hans, Grimseyjar-Axarfjarðarbeltið (GR). Hliðarbelti Snæfellsness (SN), Suðurlands (SH) og Öræfajökuls-Snæfells (ÖS) eru sýnd í bláum lit. Sveru örvarnar sýna rekstefnuna. Rekhraði er um 1 cm/ári í hvora átt.

2.2.1 Lághitakerfi

Lághitasvæði einkennast af volgrum, laugum og hverum þar sem hitastig er á bilinu 15-100°C. Vatnið er regnvatn sem rennur niður á 1-4 km dýpi um sprungur og lek jarðlög, hitnar og leitar síðan upp til yfirborðs. Þessi hringrás getur verið staðbundin en einnig með langri aðrennslisleið. Dæmi um rennsli langan veg er ferskvatn í laugum í Breiðafjarðareyjum, um og yfir 20 km frá hálendissvæðum Vestfjarða.

Með hringrásinni flyst varmi djúpt úr jörð til efri jarðlaga. Varmagjafinn er því ekki annar en sá varmi sem er í berginu á hverjum stað sem hringrás vatnsins nær til. Hitastig vatnsins er lægra en 150°C á 1 km dýpi. Það inniheldur lítið gas og leysir upp óverulegt



Mynd 6: Stílfært líkan af dæmigerðu lághitakerfi á Íslandi. Staðbundin hræring grunnvatns á sér stað í lekum sprungum þar sem heitt vatn stígur upp til yfirborðs og kalt grunnvatn sekkur og dregst að. Hægra megin er sýndur ótruflaður hitastigull, 60°C/km, utan jarðhitakerfisins (grænn) og hitaferill í borholu innan þess (rauður og blár). Þar sést glögg varmaflutningur að neðan upp í efri hluta skorpunnar (Axel Björnsson, 1990).

magn efna úr berginu. Lághitavatn er því efnasnautt og yfirleitt hæft til neyslu og í hitaveitur án sérstakrar meðhöndlunar.

Hitastig og rennsli á lághitasvæðum ræðst af hækkun hita með dýpi og lekt jarðlaga. Öflugustu lághitasvæðin eru nálægt jöðrum rekbeltanna, t.d. í Mosfellssveit, Árnæssýslu, Borgarfirði og Reykjahverfi þar sem hitastigull er hár og lekt allmikil. Á mynd 6 er einfölduð skýringarmynd af dæmigerðu íslensku lághitakerfi byggð á varmaflutningslíkani Gunnars Böðvarssonar (1983).

Lághitakerfin tengjast oftast brotakerfum eða brotum og má flokka þau eftir ráðandi brotakerfi. Í viðauka IV eru sýnd dæmi um þessa flokka.

1. **Þverbrotabelti** er notað yfir sniðgengi eða kerfi sniðgengja sem tengja ása rekhryggja eða hliðarbelta. Hér á landi má nefna þrjú slík brotabelti: Tjörnes-Húsavíkur-brotabeltið tengir suðurenda Kolbeinshryggjar við Norðurgosbeltið, Suðurlands-brotabeltið tengir Reykjanes og Austurgosbeltið og Borgarfjarðar-brotabeltið tengir út á Snæfellsnes (sjá mynd 5). Öflug lághitakerfi eru í tveim af þessum brotabeltum. Annað er á Suðurlandi. Þar byggjast 70-80 hitaveitur á vinnslu heits vatns úr borholum sem tengjast jarðskjálftasprungum. Sem dæmi má nefna Oddgeirshóla í Flóa (mynd 31 í viðauka). Þar eru einnig stórar veitur sem búa að sjálfrennandi hveravatni svo sem í Laugarási og á Syðri-Reykjum. Hitt þverbrotabeltið er í Borgarfirði. Þar eru öflugustu hverirnir á jarðhitasprungu milli Kleppjárnareykja og Hurðarbaks. Sjálfrennsli úr þeim er um 300 l/s, þar af 180 l/s úr Deildartunguhver. Þar sem rennsli úr hverum og laugum nægir ekki hefur verið bætt úr því með borunum. Sem dæmi um veitur af þessu tagi má nefna Varmaland, Bæ, Snartarstaði, Reykholt og Síðumúla.

2. **Endar sprungusveima** sem ganga frá megineldstöðvum í virku rekbeltunum út fyrir þau. Þar má nefna Reykjavík, Mosfellssveit, Hvalfjörð, Laugardal í Árnessýslu, Mývatnssveit vestanverða, Reykjadal, Aðaldal, Brúaröræfi, Fljótsdalsheiði norðaustur í Urriðavatn í Fellum og Skagafjörð. Í viðauka er sýnt dæmi um hvernig jarðhitinn í Skagafirði tengist sprungukerfinu norðvestur úr Hofsjökli (mynd 32).
3. **Norður-suður gangakerfi og brot á Mið-Norðurlandi** mynduðust hornrétt á stefnu minnstu spennu þegar gliðnun var ríkjandi á upphleðslutíma berglaganna. Stefna minnstu spennu í núverandi spennusviði er sú sama, tengd gliðnun í gosbelti sem lá suður og inn á land frá Eyjafjarðarál. Það er enn virkt sem brotabelti á landi. Skýr dæmi um þessi tengsl eru utan til á Tröllaskaga, t.d. í Skeggjabrekkudal, þar sem annað af tveim vinnslusvæðum Hitaveitu Ólafsfjarðar er. Það er eitt elsta vinnslusvæði landsins. Mynd 33 í viðauka sýnir dæmi um jarðhitakerfi af þessu tagi.
4. **Á Vestfjörðum eru NV-SA og N-S-sprungur** og gangar ráðandi í dreifingu jarðhitans. Sjö þorp og skólasetur njóta þar hitaveitu: Sveinseyri, Suðureyri, Reykjanes við Djúp, Drangsnæs, Klúka, Krossholt og Reykhólar. Auk hitaveitu á Sveinseyri er vatnsmikið sjálfrennandi kerfi, 10-50°C heitt, við Tálknafjörð nýtt til fiskeldis (mynd 34 í viðauka).
5. **Jarðhitakerfi í setlögum.** Undir Eyjafjöllum og í Mýrdal hafa fundist nýtanleg jarðhitakerfi í setmyndunum, ofan um það bil 500 m dýpis. Í þessum kerfum er ekki lóðrétt hræring vatns að ráði ef undan er skilið vatnskerfið sem tengist Seljavallalaug, en það sker sig úr um hita og tengsl við sprungur og innskot. Vatnsgæfni í setlagakerfunum minnkar með dýpi, en hiti hækkar, nær þó sjaldnast 50°C. Skógaveitan er stærst nokkurra smáveitna á þessu svæði. Mynd 35 í viðauka sýnir norðvestur-suðaustur hitasnið af þessu svæði.
6. **Stök jarðhitakerfi með óvissum tengslum við brotakerfi landsins.** Nokkur þeirra eru í fornum megineldstöðvum, líklega tengd brotakerfum þeirra. Svo er um þrjú í Dalasýslu, tvö í Strandasýslu, tvö í Vestur-Húnavatnssýslu og tvö í Borgarfjarðarsýslu. Önnur gætu helst fallið í 1. flokk 1 hér að ofan. Allstórar hitaveitur byggjast á nokkrum þessara kerfa. Sem dæmi um veitur af þessu tagi má nefna Grenivíkurveitu frá Reykjum í Fnjóskadal, Stórutjarnir, Blönduósveitu frá Reykjum við Reykjabraut, Hvammstangaveitu frá Reykjum í Miðfirði, Reykjaskóla í Hrótafirði, Búðardalsveitu frá Grafarlaug í Reykjadal, Laugar í Sælingsdal, Húsafell og Leirárhverfið í Borgarfirði.

Afrennsli lághitavatns frá háhitakerfum er talið vera í Kelduhverfi, annars vegar frá Þeistareykjum og hins vegar frá Kröflu eða Gjástykki. Afrennsli Þeistareykjakerfisins kemur fram í volgum lindum sem spretta fram syðst í Lónunum. Afrennsli Kröflu og/eða Gjástykkis kemur aðallega fram í Litlá í Kelduhverfi, en einnig t.d. í Grjótagjá. Hæstur hiti í Litlá var um og innan við 20°C, en í Kröflueldum hækkaði hann á tímabili upp fyrir 50°C. Þar hefur líklega gætt varma frá berggöngum sem söfnuðust í sprungusveiminn skammt upp og suður af byggðinni í langvarandi kvikuhlaupi sem fylgdi upphafshrinu Kröfluelda.

Annars konar afrennsli lághitavatns, líklega tengt kvikuinnskotum eða djúpstæðu háhitakerfi, er einnig þekkt. Það kemur fram í giljum niður undan gígsvæði Eyjafjallajökuls sunnan megin (Seljavallalaug). Annað dæmi um slíkt er í suðvesturhlíð Prestahnúks. Þetta sama gæti átt við um jarðhitakerfin í Staðarsveit (Lýsuhóll og Ölkelda). Það eina sem bendir til tengsla við háhita er nálægðin við virk eldfjöll og eldfjallasvæði.

Dulin lághitakerfi hafa fundist á undanförunum áratugum þar sem þeirra sér ekki merki á yfirborði (Guðni Axelsson o.fl., 2005a). Fjöldi dulinna kerfa er kominn á þriðja tuginn og flest þeirra eru nýtt til hitaveitu. Öflug og heit ($>85^{\circ}\text{C}$) kerfi sem þannig hafa fundist eru við Eyjafjörð (Hjalteyri og Árskógssandur), inn af Eskifirði, vestan við Stykkishólm (sjá mynd 36 viðauka), í Miklaholtshreppi á Snæfellsnesi (Eiðhús-Straumfjarðartunga), í Skorradal (Stóra-Drageyri), á Hvalfjarðarströnd og Kjós (Miðsandur og Hrafnabjörg-Hvammsvík), á Seltjarnarnesi og norðan við Selfoss (Ósabotnar).

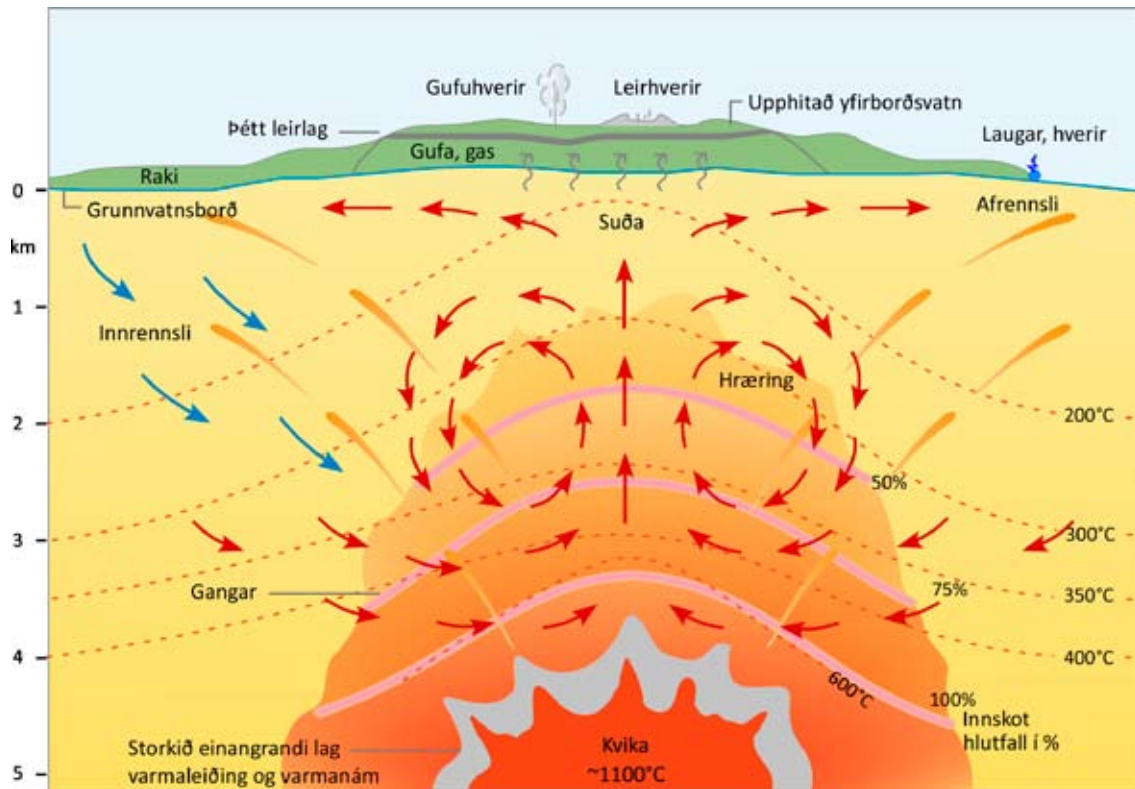
2.2.2 Háhitakerfi

Háhitasvæðin einkennast m.a. af gufuaugum, leirhverum, brennisteini, hverasöltum og í stöku tilfellum sjóðandi vatnshverum. Alls staðar nema á ysta hluta Reykjanesskagans er djúpvatn þeirra, eins og á lághitasvæðunum, regnvatn sem hringrásar í sprungum en meginhitagjafinn eru kólnandi kvikuinnskot á fárra km dýpi í jarðskorpunni. Háhitasvæðin eru því öll tengd eldstöðvum innan gosbelta landsins eða kólnandi innskotum nærri jöðrum þeirra. Hitastigið fylgir gjarnan suðumarksferli og er því oft um eða yfir 300°C á 2 km dýpi og mun hærra næst hitagjafanum.

Vegna hás hitastigs og kvikugasa sem leysast upp í vatninu er vatnið súrt sem veldur því að verulegt magn efna úr berginu leysast upp. Gasið kemur úr storknandi kvikunni. Yfirleitt er vatnsborð á margra tuga metra dýpi í háhitakerfunum. Vatnið í þeim sýður og leitar þá gufa upp til yfirborðs í gufuaugum eða gufustrókum. Einnig þéttist gufan og blandast regnvatni næst yfirborði og myndar leirhveru. Gastegundir úr kvikunni gera gufuna tærandi og veldur það leirmyndun kringum uppstreymið. Einnig falla út efni, einkum brennisteinssambönd.

Þar sem grunnvatn er nærri yfirborði og djúpvatn nær að streyma til yfirborðs einkennast háhitasvæði af hverum með breiðum af kísilhrúðri í kring. Dæmi um slík svæði eru Geysissvæðið, Hveragerði, Reykjanes og Hveravellir á Kili. Það sem einkum ræður afli háhitasvæða er stærð og dýpt á varmagjafann og lekt jarðlaga. Eðli hveravirkinnar á yfirborði ræðst einkum af stöðu grunnvatnsborðs yfir jarðhitageyminum og lekt sprungna sem leiða gufu upp til yfirborðs. Á mynd 7 er einfölduð skýringarmynd af háhitakerfi.

Líftími háhitakerfa samsvarar virkniskeiði eldstöðvakerfanna sem þau nærast á. Flest eru í megineldstöðvunum sjálfum, en í nokkrum tilfellum einnig í sprungusveimum sem ganga út frá þeim. Alls eru háhitakerfin um 24 talsins á Íslandi. Af þeim eru 10 í megineldstöðvum með eldfjallslögun og miðlægu sigi (öskju): Krafla, Dyngjufjöll, Kverkfjöll, Grímsvötn, Vonarskarð, Torfajökull, Mýrdalsjökull, Tindfjöll, Hofsjökull og Kerlingarfjöll. Þrjú ofantalinnu eru utan rekbeltanna (Tindfjöll, Mýrdalsjökull og Torfajökull). Hin háhitakerfin eru í megineldstöðvum þar sem gosvirknin er mest og hefur í flestum tilfellum hlaðið upp fjallaþyrpingu fremur en eldfjalli út frá miðlægri gosvirkni. Meðal þeirra eru Þeistareykir, Fremrinámar, Hengill og Krýsuvík. Virknin er ekki söm og jöfn allt virknitímabil megineldstöðvanna, né heldur er hún staðbundin. Hún ræðst af þróun þeirra og innskotavirkni sem er lotubundin bæði á löngum



Mynd 7: Stílfært líkan af háhitakerfi. Hitagjafinn er kvikuhólf og kólnandi innskot. Hlutfall innskota eykst með dýpi og nálgast 100% á 4 km dýpi (sverar bleikar línur á myndinni). Varminn úr þeim hitar grannbergið og vatn sem um það streymir. Það stígur upp og kalt vatn úr umhverfinu og kælt vatn frá jöðrum kerfisins dregst að. Jafnhitalínur bungast upp á við, hér sýndar í samræmi við suðumarksferil.

tímaskala, með fáum fösum með nokkurra tuga eða hundraða árpúsunda millibili, og á stuttum tímaskala, með nokkurra áratuga eða alda millibili.

Kvikuólf ráða langtímasveiflum og staðbundinni gos- og jarðhitavirkni í megineldstöðvum/eldfjöllum, en í rekbeltunum kemur spennan á flekaskilunum til viðbótar og getur hún ein ráðið virkninni.

Á þróunarskeiði megineldstöðvar í rekbelti klofnar eldstöðin um sprungusveiminn og sígur. Gliðnun, og þar með stækkun í rekstefnu, getur numið nokkrum kílómetrum á breiddina á virkniskeiði eldstöðvarinnar. Innskotavirknin sem skapar hitagjafann helst langtímum saman, jafnvel allt æviskeiðið, á sama stað eða stöðum. Þannig verður til kjarnasvæði sem haldast heit, en vaxa í rekstefnu og kólna til endanna.

Með ofangreint í huga má greina nokkra undirflokka háhitakerfa út frá brotkerfum, jarðfræðilegu umhverfi og þróunarstigi. Í viðauka V eru sýnd dæmi um þessa flokka:

1. **Háhitakerfi í megineldstöð rekbeltis.** Megineldstöðvar markast af mestri upphleðslu á takmörkuðu svæði í eldstöðvakerfunum með vísbendingu um kvikuhólf út frá tengdum gígaröðum og sprungukerfum, oft hringlægum sem og rýólíti. Í flestum þessara megineldstöðva er askja. Krafla og Dyngjuþjöll eru dæmi. Önnur dæmi án öskju eru Hengill, Þeistareykir og Fremrinámar (sjá mynd 37 í viðauka).

2. **Háhitakerfi í sprungusveimi megineldstöðvar.** Í Kröflukerfinu er háhitakerfi af þessari gerð í staðbundinni þyrpingu gosstöðva (Námafjall) og annað í Gjástykki nálægt norðurenda gosvirkni í kerfinu (mynd 38 í viðauka). Þriðja dæmið er kennt við Hverahlíð, sunnan við Hellisheiði.
3. **Háhitakerfi í sniðrekbelti.** Basaltkerfi Reykjanesskagans milli Brennisteinsfjalla og Reykjaness hýsa háhitakerfi. Rýólít kemur þar ekki fyrir. Tímabil gliðunar með gosvirkni og sniðgengisfærslu skiptast á. Hvort um sig stendur í nokkrar aldir. Yfirstandandi sniðgengistímabil hefur staðið í 750 ár, álíka lengi og það næsta á undan (mynd 39 í viðauka).
4. **Háhitakerfi í eldkeilu utan rekbelta.** Öskjur og sveiglægar gossprungur vísa á kvikuþró og undirliggjandi kvikurás. Mýrdalsjökull er dæmi. Í honum er djúp og mikil askja. Jarðhiti er ekki sýnilegur en kemur fram í afrennsli (Jökulsá). Í Mýrdalsjökli hefur kvikuþró greinst á fárra kílómetra dýpi í skjálftamælingum sem S-bylgjuskuggi. Eyjafjallajökull er annað dæmi enn sem komið er án öskju. Þar benda laugar sunnan í fjallinu til afrennslis frá háhitakerfi. Eyjafjallajökull gýs aðallega basalti en einnig ísúrri og súrri (þ.e. kísilsýruríkri) kviku. Vísbending er um kvikuþró á 7-10 km dýpi (sjá mynd 40 í viðauka).
5. **Háhitakerfi í rýólíteldfjalli utan rekbelta.** Torfajökull og Kerlingarfjöll eru dæmi um rýólíteldfjöll hér á landi. Einkenni slíkra er að eldfjallið sjálft gýs nær eingöngu rýólíti, gjarnan í störgosum með löngum hléum. Skýringin er talin vera grunnstæð kvikuþró með súru bergi sem basaltkvika brýst ekki upp úr en kemur upp utan við. Þannig þróaðist Torfajökull í hliðarbelti (gosbelti utan rekbeltis) fram á síðasta jökulskeið, að rekbelti færðist suðvestur yfir hann. Feiknaöflug háhitakerfi tengjast rýólíteldfjöllum. Svo er um Torfajökul, en hann hýsir öflugasta háhitakerfið hér á landi (sjá mynd 41 í viðauka).
6. **Háhitakerfi í megineldstöð á kólnunarstigi.** Háhitakerfin deyjast út með eldvirkninni. Nokkur slík eru þekkt, mislangt komin í kólnun. Þau einkennast af hlutfallslega háum styrk koldíoxíðs í hveragasi. Lengst komið í kólnun og kolsýruríkast er Grímsneskerfið. Hæstur hiti í því er um 185°C. Ölkelduhálskerfið er með svipuðum einkennum, rúmlega 200°C heitt sá hluti kerfisins sem er þekktur. Hveragerðiskerfið með Grændal er enn eitt dæmi. Það er yfir 235°C heitt, hitnar til norðurs en kólnar í suður, og er um 175°C syðst í Hveragerði (sjá mynd 42 í viðauka).

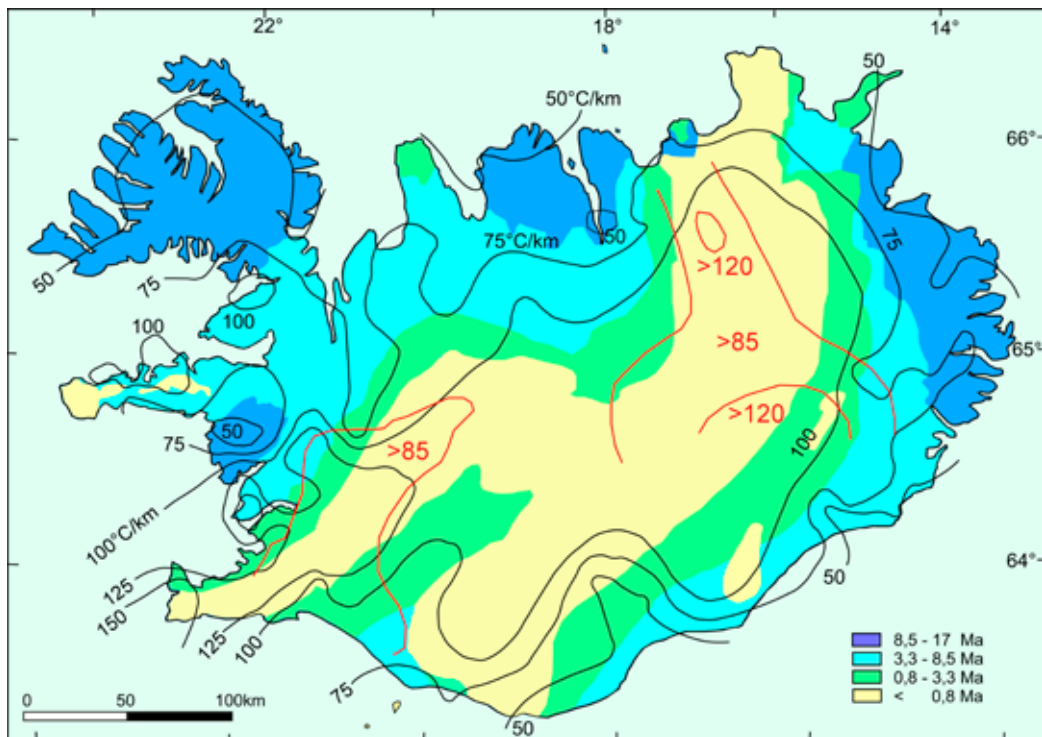
2.3 Varmastraumur og orkuforði

Eins og komið hefur fram byggir jarðhitinn á Íslandi annars vegar á þeim mikla orkuforða, sem bundinn er í jarðskorpunni og hins vegar á varmastraumnum neðan úr möttli upp í gegnum jarðskorpuna. Á níunda áratug síðustu aldar var lagt mat á stærð þessara þátta. Fyrstur mat Gunnar Böðvarsson (1982a) stærð heildarvarmastraumsins gegnum jarðskorpu Íslands og síðan Orkustofnun bundna varmaorku í jarðskorpu landsins (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Í þessum tveimur athugunum var því sinn hvor þáttur jarðhitans metinn, þ.e. sístæði varmastraumurinn að neðan og varmaorkan sem geymd er í skorpunni.

Nú liggja fyrir betri upplýsingar um hitaástand jarðskorpunnar á Íslandi einkum byggðar á hitamælingum í borholum (Guðmundur Pálmason og Kristján Sæmundsson, 1979; Ólafur Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 1993; Kristján Sæmundsson o.fl., 2003) en einnig á öðrum jarðeðlisfræðilegum mælingum eins og viðnámsmælingum og jarðstraumamælingum (MT) sem ná niður á mikið dýpi (Axel Björnsson o.fl., 2005). Farið verður stuttlega yfir þessar upplýsingar hér á eftir. Ekkert stórvægilegt hefur þó komið fram sem er í mótsögn við niðurstöður Gunnars Böðvarssonar (1982a) og vinnuhóps Orkustofnunar (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985).

Mynd 8 sýnir aldur berggrunnsins undir Íslandi og hitastigul í jarðskorpunni, sem er ákvarðaður með mælingum í grunnnum og djúpum borholum utan áhrifasvæða jarðhitakerfa auk þess að vera metinn út frá MT-mælingum. Þessi stigull er kallaður ótruflaður hitastigull og hefur verið talinn endurspegla varmastreymið með varmaleiðingu upp í gegnum skorpuna. Innan gosbeltanna er berg mjög lekt og kælt af greiðu streymi grunnvatns niður á um það bil 1 km dýpi. Þar eru því engar grunnar borholur sem geta sagt til um ótruflaðan hitastigul. Lega $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$ línunnar er því dregin með verulegri óvissu á mynd 8.

Einnig má meta hitastigulinn út frá hámarksdýpi jarðskjálfta. Við um það bil 600°C hættir basaltberg að fjaðra og verður seigfljótandi. Mesta dýpi skjálfta endurspeglar því 600°C jafnhitaflöt. Önnur leið til að meta hitastigul er að kortleggja með MT mælingum dýpi niður á lágviðnámslag sem er talið stafa af hlutbráð (um 5% bráð við 1100°C hita)



Mynd 8: Kort sem sýnir hitastigul í grunnnum og nokkrum djúpum borholum utan jarðhitasvæða. Jafnstigulslínur eru dregnar með svörtum, grönnum línum. Tölurnar eru $^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Rauðu línurnar sýna áætlaðan stigul út frá dýpi niður á 1100°C hlutbráð samkvæmt MT-mælingum. Þær gefa nokkuð lægri stigul, einkum á SV-landi, sjá umræðu í texta. Aldur jarðlaga á kortinu er tekinn úr: Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson (2003), hitastigull í borholum er úr: Kristján Sæmundsson o.fl. (2003) og MT-stigull: Axel Björnsson o.fl. (2005).

í basalti (Axel Björnsson, 1985; 2007). Gott samræmi er á milli stiguls sem fundinn er út frá skjálftadýpi og hitastigli samkvæmt dýpi niður á hlutbráð. Það bendir til þess að reikna megi með því í fyrstu nálgun að hitastigullinn sé línulegur frá yfirborði og niður að hlutbráðna laginu (Axel Björnsson, 2007). Hitastigullinn á Kröfluslóðum og yfir möttulstróknum norðan við Vatnajökul er samkvæmt MT mælingum 110-140°C/km og um 80-90°C/km nær jöðrum gosbeltisins á Norðurlandi. Á Suðvesturlandi er hann um 80°C/km í gosbeltinu og því mun lægri en mælingar í grunnnum holum við jaðrana sýna.

Nýlegar djúpar rannsóknarholur á Helliðshöfði og Reykjanesi benda til þess að hitastigullinn í gosbeltinu á þessum slóðum sé aðeins um 100°C/km (Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005) og því mun lægri en sá stigull sem fram kemur í grunnnum holum og sýndur er á mynd 8. Hugsanlegt er að hitastigull mældur í grunnnum holum sé truflaður af láréttu rennsli jarðhitavatns, einkum á Suðvesturlandi og víðar við jaðra gosbeltanna.

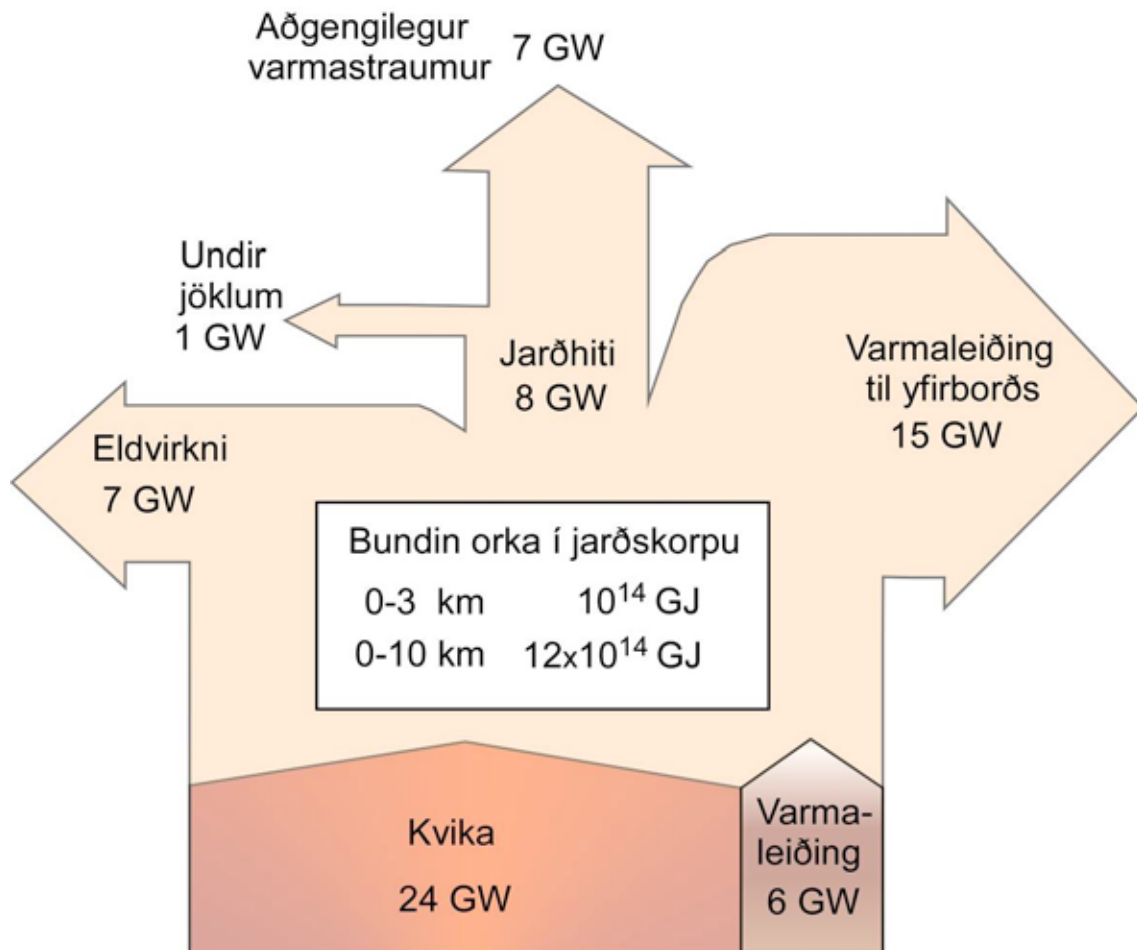
Þessar tölur um hitastigul falla í grófum dráttum að líkani Guðmundar Pálmasonar (1973; 1986) er lýsir myndun jarðskorpunnar á Íslandi. Það líkan gefur allt að 200°C/km stigul í miðju gosbeltinu en lækkar síðan með aldri jarðlaga og með fjarlægð frá rekásnum.

Rétt er að fjalla nánar um mat Gunnars Böðvarssonar (1982a) á orkuflæði upp í gegnum skorpuna og um mat Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985) á orkuforðanum í skorpunni því með þessum rannsóknum var lagður grunnur að umfjöllun um stærð og eðli jarðhitaaudlindarinnar. Valgarður Stefánsson sameinaði síðar niðurstöður beggja (sjá t.d. Valgarður Stefánsson o.fl., 1998). Á mynd 9 er einföld skýringarmynd af þessum þáttum jarðhitans byggð á niðurstöðum Valgarðs. Varmastraumurinn að neðan er sýndur lengst til vinstri, orkuforðinn í skorpunni í miðjunni og varmastreymi til yfirborðs hægra megin.

Gunnar Böðvarsson áætlaði að varmastraumurinn að neðan upp undir Ísland væri alls um 30 GW ($1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$), þar af berast um 24 GW með kvikustreymi og 6 GW með varmaleiðingu (sjá mynd 9). Hann mat aðeins þann hluta landsins, sem er ofansjávar, en auðvitað er einnig varmastreymi upp undir landgrunnið. Þessi orka streymir um jarðskorpu landsins upp í gegnum yfirborðið. Í skorpunni áætlaði Gunnar að varmastraumurinn skiptist í 7 GW sem fylgja eldvirkni, 8 GW berast með vatni og gufu á jarðhitasvæðum og 15 GW með varmaleiðingu. Þessi varmaleiðing samsvarar um 150 mW/m² á Íslandi sem er um tvisvar sinnum meira en heimsmeðaltalið, en svipað og á mörgum öðrum virkum brotasvæðum og úthafshryggjum á jörðinni. Hins vegar er varmaflutningur með kviku og jarðhitavirkni óvenju mikill upp í gegnum Ísland eða jafnmikill og með varmaleiðingu.

Meginniðurstaða jarðvarmamats Orkustofnunar frá 1985 eru þær að orkuforði Íslands niður á 10 km dýpi sé um $12 \cdot 10^{14}$ GJ, en ofan 3 km dýpis sé orkuforði $1 \cdot 10^{14}$ GJ. Til samanburðar nam frumorkunotkun mannkyns árið 2008 $5 \cdot 10^{11}$ GJ. Geta má þess að samkvæmt niðurstöðum Orkustofnunar er orkuþéttleikinn (varmaorka á rúmmáls-einingu, J/m³) mestur innan gosbeltis landsins, einkum á háhitasvæðunum. Þá var metið að orkuforði 5 stærstu háhitasvæðanna; Torfajökuls, Grímsvatna, Hengils, Krýsuvíkur og Kröflu væri um 70% af orkuforða allra háhitasvæða landsins.

Með því að bera saman tölurnar um orkuforða og varmaflæði er hægt að meta gróflega hve langan tíma það hefur tekið varmann ofan 10 km dýpis að safnast fyrir í berggrunnum, eða hve langan tíma það tekur hann að endurnýjast. Niðurstaðan er tímalengd af stærðargráðunni 1,3 milljónir ára. Ljóst er að þessi endurnýjun gerist mishratt. Sá hluti hennar sem gerist með streymi kviku, vatns og gufu endurnýjast margfalt hraðar en sá hluti sem endurnýjast aðeins með varmaleiðingu. Þessir reikningar og vangaveltur sýna glögg þann mikla orkuforða sem er til staðar í jarðskorpu Íslands og að fræðilega er hægt að vinna mikla orku ef samfélagið telur ásættanlegt að ganga á hluta orkuforðans í örlitlum mæli.



Mynd 9: *Varmastraumur í gegnum Ísland og orkuforði. Byggt á mynd Valgarðs Stefánssonar (1998). Gunnar Böðvarsson (1982a) mat varmastrauminn en Guðmundur Pálmason o.fl (1985) lögðu mat á bundna orku í jarðskorpunni.*

3 SJÁLFBÆR ÞRÓUN

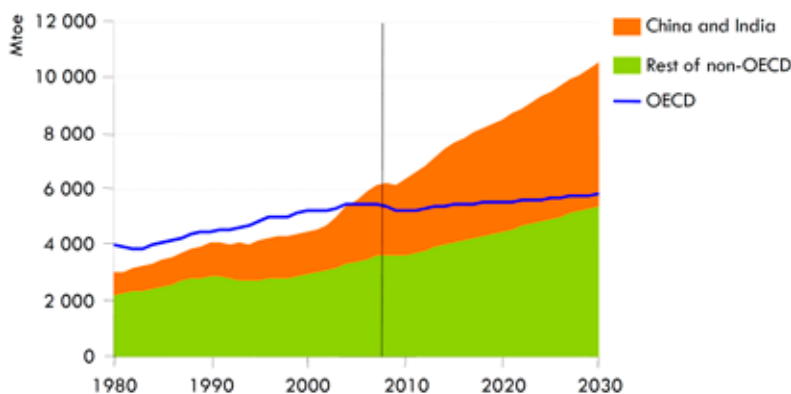
Á undanförunum tveimur öldum hefur gífurleg fólksfjölgun og vinnsluaukning orðið til þess að flestar þjóðir og alþjóðasamtök hafa leitað leiða til þess að nýta auðlindir jarðar með hagsmuni komandi kynslóða að leiðarljósi. Þessi vinna hefur leitt af sér hugtakið um sjálfbæra þróun. Í þessum kafla er gerð grein fyrir þróun hugtaksins sjálfbær þróun, alþjóðasamþykktum sem Ísland á aðild að og hvernig hægt er að stefna að sjálfbærri þróun á markvissan hátt með jarðhitanýtingu.

3.1 Fólksfjölgun og vinnsluaukning

Frá árinu 1980 hefur mannkyni fjölgað um 51% og var íbúatalan komin í 6,8 milljarða árið 2009 (Sp, 2009). Frumorkunotkun í heiminum hefur aukist samhliða fólksfjölgun eða um 50% frá árinu 1980 og er komin í 500 EJ (1 EJ = 10^{18} J) (IEA, 2009). Auk þess hefur losun á sorpi innan OECD aukist um 65% á sama tíma (OECD, 2008). Af ofangreindu er ljóst að undanfarna þrjá áratugi hefur orkunotkun og mengun aukist samfara fjölgun mannkyns.

Á næstu tveimur áratugum er því spáð að mannkyninu muni fjölga um fjórðung og það nái 8,4 milljörðum árið 2030. Þó að þessar tölur séu geigvænlegar hefur dregið talsvert úr frjósemi frá því sem var. Meðalfrjósemi í heiminum hefur þannig lækkað úr 5,02 í 2,65 börn á hverja móður milli árána 1950 og 2005. Sp spá því að frjósemin muni halda áfram að lækka niður í 2,02 börn á konu fyrir 2045-2050 (Sp, 2007).

Alþjóða orkumálastofnunin (IEA) gaf nýlega út skýrslu um þróun orkumála til 2030. Samkvæmt spám stofnunarinnar mun frumorkunotkun aukast um 40% frá 2007 til 2030 með bættem félagslegum jöfnuði í heiminum (IEA, 2009). Um 90% af áætlaðri aukningu er í löndum utan OECD og þar af helmingurinn í Kína og Indlandi (sjá mynd 10). Þessari aukningu verður að mestu mætt með frekari vinnslu jarðefnaeldsneytis, eða sem nemur 77% að mati IEA. Þessu samhliða er talið að heildarlosun gróðurhúsalofttegunda á jörðinni muni aukast um þriðjung, úr 42,4 Gt (Gigatonn = 10^{12} kg) koldíoxíðgildis árið 2005 í 56,5 Gt árið 2030. Raforkuþörf er talin muni aukast verulega á næstunni eða um 76% á tímabilinu 2007-2030. Aukningin mun krefjast 4800 GW_e í uppsettu rafafli (IEA, 2009).



Mynd 10: Frumorkunotkun í heiminum frá 1980 til 2008 auk áætlaðrar notkunar til ársins 2030 (1 Mtoe = 42 PJ) (IEA, 2009).

Af ofantöldu er ljóst að huga þarf að orkuforða jarðar til þess að svara aukinni eftirspurn á næstu tveimur áratugum. Hversu lengi geta auðlindir jarðar annað eftirspurninni og hvaða áhrif mun aukin mengun hafa á umhverfið? Að mati IEA eru auðlindir jarðar taldar nægar en nýting þeirra gæti haft veruleg neikvæð áhrif á umhverfið, efnahag og orkuöryggi til lengri tíma litið. Ef losun gróðurhúsalofttegunda heldur áfram að vaxa mun það auka líkurnar á loftlagsbreytingum og draga úr loftgæðum. Að öllu samanlögðu hefur IEA komist að þeirri niðurstöðu að þróun orkumála í heiminum sé ósjálfbær (IEA, 2009).

3.2 Þróun hugtaka og alþjóðasamþykktir

Árið 1972 boðuðu Sameinuðu þjóðirnar (Sp) til alþjóðlegrar ráðstefnu um umhverfismál í Stokkhólmi. Þar komu yfir hundrað þjóðarleiðtogar saman til að álykta í fyrsta sinn sérstaklega um náttúruvernd og mengunarmál. Umhverfisáhrif voru þar með ekki lengur einkamál einstakra ríkja heldur verkefni sem Sp kusu að takast á við. Á Stokkhólmsráðstefnunni kom fram að áhyggjur þróunarlanda væru allt annars eðlis en þeirra þróðu þar sem áhersla á umhverfismál væri munaður hinna ríku. Almennar umræður á þessum tíma um takmörkun á mengun voru taldar geta hindrað iðnvæðingu þróunarlanda og komið í veg fyrir félagslegan jöfnuð í heiminum. Nærtækast þótti að iðnríkin myndu draga úr framleiðslu, skerða líf skjörin og flytja fjármagn frá þeim ríku til hinna fátækari (Simensen og Tägil, 1994). Árið 1972 var einnig samþykkt af hálfu Sp samningur um verndun menningar- og náttúruarfleifðar heimsins (Fornleifavernd ríkisins, 2011).

Umræður í kjölfar Stokkhólmsráðstefnunnar snérust því um hvernig hægt væri að koma á auknum félagslegum jöfnuði í heiminum án þess að skaða umhverfið. Árið 1983 skipuðu Sp heimsnefnd um efnahags- og umhverfisþróun (*e. World Commission on Environment and Development*, WCED). Nefndin fékk það þríþætta verkefni að fjalla um vaxandi hnignun umhverfis og náttúruauðlinda og áhrif hnignunar á efnahags- og félagslega þróun. Skipun nefndarinnar fól í sér viðurkenningu Sp á að umhverfis- og efnahagsmál væru í eðli sínu hnattræn og að það væri í allra þágu að móta sameiginlega stefnu á þessu sviði. Nefndin hefur síðan verið kennd við formann hennar, Gro Harlem Brundtland (Gunnar Schram, 1993).

Í skýrslu Brundtland-nefndarinnar er lagður grundvöllur að alþjóðlegu regluverki á sviði umhverfis- og þróunarmála ásamt því að bent er á misskiptingu auðs milli ríkja heims. Þar er bent á að hagvexti yrði að halda innan þeirra marka að hann ylli ekki meiri umhverfisspjöllum og að nýta ætti sem minnst óendurnýjanlegar auðlindir. Ennfremur er bent á að meira fjármagni yrði að verja til styrktar þróunarlöndum, efla þyrfti umhverfisvernd og vinna bug á fátækt (WCED, 1987).

Í skýrslunni eru sett fram viðmið þar sem allar helstu meginreglur alþjóðlegs umhverfisréttar eru teknar saman í einu skjali. Í skýrslunni er sömuleiðis að finna nokkur lykilhugtök á sviði sjálfbærrar þróunar sem enn í dag eru grundvallarhugtök (Aðalheiður Jóhannsdóttir, 2004), þar á meðal skilgreining á sjálfbærri þróun:

Sjálfbær þróun er þróun sem fullnægir þörfum samtíðarinnar án þess að skerða möguleika komandi kynslóða til að fullnægja sínum þörfum.

(WCED, 1987)

Þessi skilgreining hefur mikið verið notuð síðan, þó hún sé bæði einföld og óræð í senn. Margir hafa ranglega túlkað hana sem verndarkröfu, en hún er frekar réttlætiskrafa sem flyst frá einni kynslóð til annarrar (Ólafur P. Jónsson, 2007).

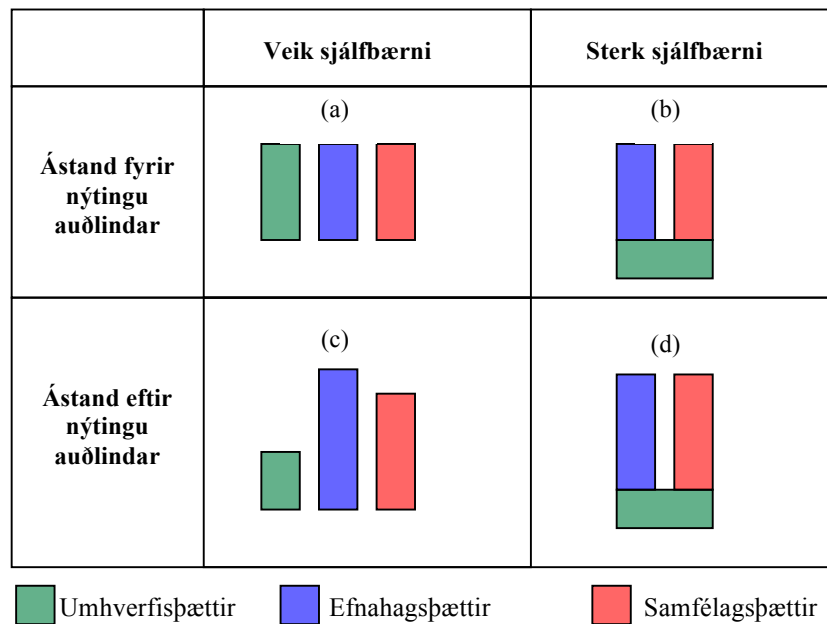
Árið 1992 boðuðu Sp til ráðstefnu í Ríó de Janeró um umhverfi og þróun. Sú ráðstefna var þá stærsta alþjóðaráðstefna sem haldin hafði verið með fulltrúum frá 178 ríkjum. Þar var Ríó-yfirlýsingin og framkvæmdaáætlun hennar samþykkt.

Ríóyfirlýsingin um umhverfi og þróun (*e. The Rio declaration on environment and development*) samanstendur af 27 meginreglum um umhverfi og þróun. Fullyrða má að samþykkt Ríó-yfirlýsingarinnar hafi markað söguleg tímamót í alþjóðlegri samvinnu á þessu sviði. Þrátt fyrir að yfirlýsingin hafi ekki stöðu þjóðréttarsamnings hafa þættir hennar haft mikil áhrif á þróun alþjóðlegs umhverfisréttar. Sem dæmi um þetta má nefna að óumdeilt er að 2. meginregla Ríó-yfirlýsingarinnar hefur stöðu þjóðréttarvenju en hún fjallar um fullveldisrétt ríkja til að hagnýta náttúruauðlindir sínar í samræmi við eigin stefnu í umhverfis- og þróunarmálum. Einnig fjallar hún um þá skyldu sem ríki bera til að tryggja að starfsemi innan lögsögu þeirra eða undir þeirra stjórn valdi ekki tjóni á umhverfi annarra ríkja eða á svæðum utan lögsögu ríkja. Á hinn bóginn má segja að 15. meginregla yfirlýsingarinnar, varúðarreglan svokallaða (*e. precautionary principle*) hafi alls ekki náð sömu festu og sú fyrrnefnda og er einatt deilt um varúðarregluna og inntak hennar (Aðalheiður Jóhannsdóttir, 2004). Varúðarreglan kveður á um að þegar vísindaleg óvissa er til staðar um afleiðingar framkvæmda fyrir umhverfið, skal náttúran njóta vafans.

Framkvæmdaáætlun Ríó-yfirlýsingarinnar (Dagskrá 21) er alþjóðlegur samningur undirritaður af 179 þjóðum. Áætlunin tekur til margra þátta umhverfis- og þróunarmála. Samningurinn skiptist í 40 kafla og er skjalið í heild um 500 blaðsíður. Þessari áætlun er ætlað að vera leiðbeinandi fyrir ríki heims fram á þessa öld. Hún er nokkurs konar handbók um alþjóðasamvinnu og aðgerðir ríkja sem miða að sjálfbærri þróun. Pólitísk samstaða 178 þjóða náðist um skjalið, sem er töluvert afrek í ljósi þess að áætlunin nær í raun til flestra þátta þjóðfélagsins. Í 9. kafla áætlunarinnar er m.a. fjallað um umhverfis- og auðlindastjórnun. Þar er lögð áhersla á að stuðla að aukinni notkun mengunarlausra og endurnýjanlegra orkugjafa. Hvatt er til aukinnar orkunýtni og kveðið á um að iðnaður verði frekar byggður upp þar sem völ er á umhverfisvænum orkugjöfum (Gunnar Schram, 1993). Vöxtur orkuiðnaðarins á Íslandi er því í samræmi við framkvæmdaáætlunina að þessu leyti.

Sjálfbær þróun hefur verið frumregla stefnumótunar í umhverfismálum allt frá því að hugtakið var sett fram í Brundtland-skýrslunni (WCED, 1987). Á sama tíma og það verður að teljast jákvætt að slíkt hugtak sé orðið þekkt á heimsvísu og yfirvöld um víða veröld leitist við að marka sína stefnu með sjálfbæra þróun að leiðarljósi er notkun hugtaksins víða á reiki. Hugtakið hefur verið gagnrýnt fyrir innihaldsleysi sem og „að hver sem er geti haldið því fram að öll þróun sé eða geti verið sjálfbær“ (Aðalheiður Jóhannsdóttir 2004). Bosselmann (2002) telur að gera verði greinarmun á annars vegar veikri sjálfbærni og hins vegar sterkri sjálfbærni.

Faghópurinn nálgast þessi hugtök út frá Brundtland skilgreiningunni þannig að sterk sjálfbærni felur í sér að þróunin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn meginþátt sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis, en veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhvers meginþáttanna enda skili þróunin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata.



Mynd 11: Stílfærð mynd af veikri og sterkri sjálfbærni út frá auðlindanýtingu á grunni umhverfis-, efnahags- og félagsþátta. Veik sjálfbærni (myndir (a) og (c)) gerir ráð fyrir að stoðirnar séu allar jafnar og að höfuðstól megi flytja t.d. frá umhverfi til efnahags og/eða samfélags en sterk sjálfbærni (myndir (b) og (d)) felur í sér að nýtingin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn þessara þátta.

Samfélagslegur ábati og samfélagslegur kostnaður er skilgreindur í viðauka I.3. Með sterkri sjálfbærni er m.a. átt við að aldrei er gengið á höfuðstól náttúrunnar og athöfnum mannsins og lifnaðarháttum sé haldið innan þessara takmarka (sjá mynd 11). Nánar um sterka og veika sjálfbærni í m.a. Gowdy (2000).

3.3 Stefna íslenskra stjórnvalda

Hér á landi hefur verið unnið við að hrinda niðurstöðum frá Ríó í framkvæmd með sérstakri framkvæmdaáætlun á sveitarstjórnarstigi (Staðardagskrá 21) sem byggir á framkvæmdaáætlun Ríó-yfirlýsingarinnar (Dagskrá 21).

Árið 2002 gaf umhverfisráðuneytið út ritið Velferð til framtíðar: *Sjálfbær þróun í íslensku samfélagi, stefnumörkun til 2020*. Í formála ritsins kemur fram að leiðsögnin frá Ríó væri enn gagnleg að mati ráðherra og að Íslandi bæri að taka tillit til Ríó-yfirlýsingarinnar þar sem ríki heims skuldbundu sig til þess að stuðla að sjálfbærri þróun á heimsvísu og heima fyrir. Í ritinu kom fram sú stefnumörkun að nýta beri endurnýjanlegar auðlindir landsins þannig að hámarka skuli efnahagslega og félagslega velferð án þess að skaða umhverfið.

Í Helsinki þann 28. október 2008 undirritaði forsætisráðherra norrænu áætlunina „Sjálfbær þróun – ný stefna fyrir Norðurlönd“. Áætlunin fjallar um langtíamarkmið þróunar á Norðurlöndunum, eða fram til ársins 2020. Áætlunin er í fjórum köflum og er í þeim m.a. greint frá markmiðum og aðgerðum varðandi loftslagsmál og endurnýjanlega orku. Er í áætluninni kveðið á um að til þess að stemma stigu við loftlagsbreytingum skuli nýta náttúruauðlindir Norðurlandanna með sjálfbærum hætti. Þessu tengt má svo nefna

að sem aðili að EES-samningnum hefur Ísland skuldbundið sig til að tryggja að náttúruauðlindir séu nýttar af varúð og skynsemi skv. c-lið 73. gr samningsins.

Í stjórnarsáttmála ríkisstjórnar Samfylkingar og Sjálfstæðisflokks árið 2007 var lögð sérstök áhersla á að meta verndargildi háhitasvæða og flokka þau með tilliti til verndar og orkunýtingar. Stefnan var sett á að ljúka vinnu við rammaáætlun árið 2009 og í framhaldi af því að leggja niðurstöðu vinnunnar fyrir Alþingi. Þangað til yrði ekki farið inn á öröskuð svæði nema rannsóknarleyfi lægi fyrir. Umrædd ríkisstjórn sat ekki út kjörtímabilið og tók ríkisstjórn Samfylkingar og Vinstrihreyfingarinnar-græns framboðs (VG) við í maí 2009. Sú ríkisstjórn hefur í stjórnarsáttmála ákveðnari stefnu um sjálfbæra nýtingu auðlinda landsins. Stefna ríkisstjórnar Samfylkingar og VG er sú, skv. umræddum stjórnarsáttmála, að við orkuvinnslu með jarðvarma verði gætt varúðar- og verndarsjónarmiða. Segir í stjórnarsáttmálanum að stefna þessarar ríkisstjórnar byggji á meginreglum umhverfisréttar, en vikið var að nokkrum þeirra hér á undan.

3.4 Sjálfbærnivísar fyrir jarðhitanytingu

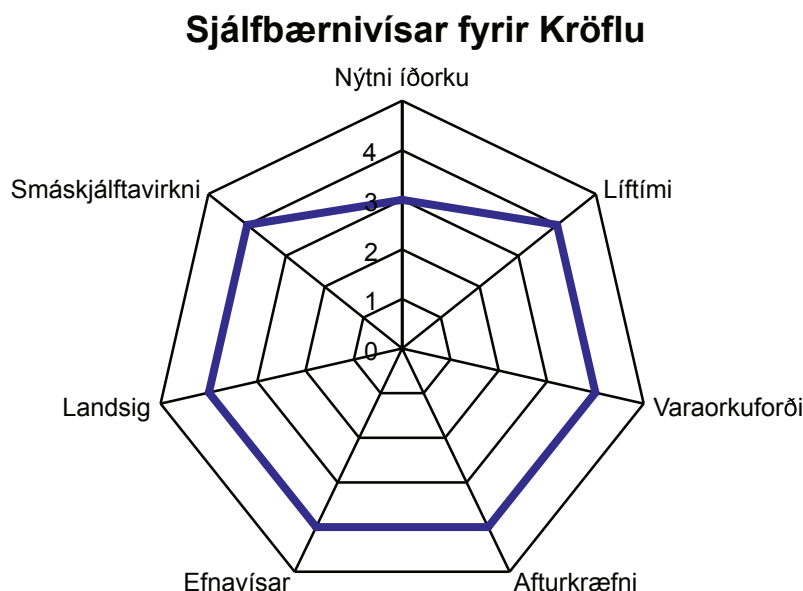
Í 40. kafla framkvæmdaáætlunar RÍO-yfirlýsingarinnar er skorað á alþjóðasamfélagið að þróa með sér matslykil um sjálfbæra þróun. Slíkir matslyklar sem samansettir eru af mörgum vísum eru taldir nauðsynlegir til þess að hægt sé að stefna markvisst að sjálfbærri þróun. Matslykill er eins konar hjálpartæki sem er notað til þess að greina hver staðan er, hvert ferðinni er heitið og hversu langt er á áfangastað. Matslykill felst í grundvallaratriðum í því að framfylgja og mæla árangur sjálfbærrar þróunar. Sjálfbærnivísar matslykils geta verið margs konar en hver sjálfbærnivísir er notaður til þess að mæla einhvern einn afmarkaðan hluta matslykilsins, eins og útstreymi ákveðinna gróðurhúsalofttegunda. Sjálfbærnivísir verður að byggja á vísindalegum grunni, vera næmur fyrir breytingum, sýna í hvaða átt þróunin stefnir og veita upplýsingar um grunnástand (Becker, 2004). Þessi atriði eru nauðsynleg til þess að tryggja að vísirinn mæli það sem honum er ætlað. Sem dæmi má nefna matslykil Sp, sem var hugsaður sem eins konar fyrirmynd fyrir þjóðir og samfélög sem vildu þróa með sér sjálfbærnivísa. Matslykillinn skiptist í fjóra yfirflokka; félags-, umhverfis-, efnahags- og stofnanabundna (Jón Jónsson og Anna Þórhallsdóttir, 2007; Jón Jónsson, 2006).

Íslensk stjórnvöld hafa meðal annars sett upp matslykil fyrir landið í heild í fyrrnefndri skýrslu umhverfisráðuneytisins, Velferð til framtíðar (2002). Þar má finna 17 markmið til grundvallar matslyklinum. Þau skiptast í fjóra yfirflokka; heilnæmt og öruggt umhverfi, verndun náttúru Íslands, sjálfbær nýting auðlinda landsins og hnattræn viðfangsefni. 35 vísar voru skilgreindir fyrir fyrrgreinda fjóra flokka. Árið 2005 kom út önnur og endurskoðuð útgáfa af matslyklinum með samtals 59 vísum (Umhverfisráðuneytið, 2005, 2007).

Landsvirkjun og Orkustofnun hafa tekið þátt í mótun matslykils fyrir Alþjóða vatnsaflssamtökin, IHA, til þess að reisa og reka vatnsaflsvirkjanir með sjálfbæra þróun að markmiði. Orkufyrirtækjum stendur til boða í framtíðinni að votta vatnsaflsvirkjanir með aðstoð vottunarstofu. Ennfremur hefur Landsvirkjun í samstarfi við Alcoa Fjarðaál sett á laggirnar sjálfbærniverkefni til að fylgjast með áhrifum framkvæmda við Kárahnjúkavirkjun og álverið í Reyðarfirði á samfélag, umhverfi og efnahag á Austurlandi. Fyrirtækin fengu til liðs við sig fulltrúa ýmissa hópa, bæði með og á móti framkvæmdunum og myndaður var samráðshópur sem vann að verkefninu og skilgreindi 34 vísa (Landsvirkjun og Alcoa, 2005). Samhliða undirbúningi tengdum

fyrirhugaðri orkuvinnslu og álvinnslu á Norðurlandi hafa stærstu framkvæmdaaðilar þess verkefni sett á laggirnar samskonar verkefni við mótun matslykils.

Faghópurinn, Landsvirkjun og Orkustofnun komu að tveimur meistararitgerðum um sjálfbærnivísa fyrir jarðhitánýtingu á árinu 2009, ritgerðum þeirra Ruth Shortall meistaraneima í umhverfis- og auðlindafræðum við Háskóla Íslands og Rutar Bjarnadóttur meistaraneima við REYST í verkfræði. Í samvinnu við Shortall hefur faghópurinn sett saman 10 markmið sem skilgreina hvað átt er við með sjálfbærri jarðhitánýtingu (sjá töflu 1) í samræmi við leiðbeiningar IISD (International Institute for Sustainable Development) við gerð matslykla (sjá t.d. Hardi and Zdan, 1997). Fyrstu tvö markmiðin fjalla um nýtingu auðlindarinnar og endurnýjanleika hennar. Þriðja markmiðið um nýtni, fjórða um mikilvægi rannsókna og tækniframfara, það fimmta um umhverfisáhrif og það sjötta um þjóðfélagsleg áhrif. Sjöunda markmiðið fjallar um orkuöryggi, aðgengi að orkunni og fjölbreytileika. Áttunda og níunda markmiðið fjalla um efnahagsleg áhrif og tíunda markmiðið fjallar um mikilvægi þess að koma á framfæri þekkingu og áunninni reynslu við jarðhitánýtingu. Til að framfylgja þessum markmiðum voru svo skilgreindir sjálfbærnivísar og þeim beitt á Kröfluvirkjun sem vinna þarf frekar að mati faghópsins. Rut Bjarnadóttir útfærði sérstaklega þá vísa sem beinast að auðlindinni sjálfri út frá hugmyndum faghópsins. Hún þróaði sjálfbærnivísa fyrir auðlindastjórnun sem fanga mikilvægustu þætti við mat á sjálfbærri jarðhitavinnslu. Niðurstöðurnar fyrir Kröflusvæðið gefa til kynna að vinnslan þar sé sjálfbær eins og sjá má á myndum 12 og 13. Á mynd 12 má sjá einkunn fyrir hvern vísi fyrir sig frá 1 til 5 þar sem 5 er hæsta mögulega einkunn. Á mynd 13 má sjá hvernig nýtnivísirinn er fundinn með því að bera íðorkunýtni (e. *exergy efficiency*) allra jarðvarmavirkjana á Íslandi, ásamt nokkurra erlendra, saman við nýtni Kröfluvirkjunar og eins og sjá má er nýtni íðorku undir meðaltali. Af þeim sökum fær virkjunin einkunnina 3 af 5 mögulegum (Ruth Shortall, 2010; Rut Bjarnadóttir, 2010).



Mynd 12: *Sjálfbærnivísar auðlindastjórnunar fyrir jarðhitavinnslu í Kröflu.. Sjálfbærnivísarnir taka ekki á öðrum þáttum sjálfbærrar þróunar og gefa því ekki heildaráhrif virkjunar á samfélag, umhverfi og efnahag. Heimild: Rut Bjarnadóttir (2010). Þýðing: Jónas Ketilsson*

Tafla 1: Tillaga að markmiðum sjálfbærrar jarðhitanytingar. Orðskýringar hugtaka má finna í viðauka I. Markmiðin eru sett fram með sterka sjálfbærni að leiðarljósi, sem felur í sér að nýtingin hafi ekki neikvæð áhrif á neina af meginstoðum sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags eða umhverfis. Veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhverra meginstoðanna, t.d. með lotubundinni vinnslu (sjá kafla 4.4), enda skili nýtingin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata.

Auðlindastjórnun

- (1) Jarðhitaauðlindina skal nýta á sjálfbæran hátt, þannig að framboð tryggir orku til húshitunar, raforkuvinnslu og annarra nota sé nægilegt fyrir félagslega og hagræna þróun viðkomandi samfélags og þjóðfélagsins í heild án þess að skaða umhverfið.

Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluáðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu úr kerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sé vinnsluálag umfram E_0 er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en, eða jöfn, E_0 er skilgreind sem sjálfbær, en vinnsla umfram E_0 telst ekki sjálfbær.

Huga skal að niðurdælingu jarðhitavökvans aftur í jarðhitageyminn til að styðja við langtímanýtingu, einkum í jarðhitakerfum með takmarkað innstreymi.

- (2) Grunnvatnsnotkun virkjunar skal ekki rýra almenna neysluvatnstöku nálægra byggðalaga.

Umhverfisstjórnun

- (3) Jarðhitaauðlind skal nýtt á þann hátt að sem minnst umhverfisáhrif fylgi samkvæmt gildandi lögum hverju sinni. Ætíð skal nota þá tækni og hönnun sem dregið getur úr umhverfisáhrifum. Fylgja skal áætlunum um umhverfisstjórnun á öllum stigum framkvæmda og rekstrar.

Nýtni

- (4) Leitast skal við að haga jarðhitanytingu þannig að nýting tiltækrar íðorku (*e. exergy*) sé sem best. Æskilega hámarksnýtni til raforkuvinnslu skal miða við fræðilega hámarksnýtni við umbreytingu varma í raforku (Carnot-nýtni). Á hönnunarstigi nýrra áfanga jarðvarmavirkjana skal þessu markmiði fylgt, t.d. með tækniþróun, niðurdælingu og með fjölnýtingu jarðhitavökvans.

Hagstjórnun

- (5) Orkuvinnsla frá jarðvarmavirkjunum og hitaveitum skal vera samkeppnishæf við aðra orkugjafa og arðbær. Lágmarka ber fjárhagslega áhættu jarðvarmavirkjana og hitaveitna og skulu þær vera þjóðhagslega og samfélagslega hagkvæmar. Taka skal tillit til kostnaðar og ábata vegna breytinga á umhverfisverðmætum við útreikning á þjóðhagslegri og samfélagslegri hagkvæmni

Arður og öryggi

- (6) Hámarka skal afrakstur af auðlindinni með verðmætasköpun og hagkvæmni að leiðarljósi. Almenningsur skal njóta hæsta forgangs að orkunni á hóflegu verði og/eða njóta ávinnings af henni í formi auðlindaafgjalds.
- (7) Rekstur jarðvarmavirkjana og hitaveitna skal vera áreiðanlegur og miðast við orkuafhendingaröryggi.

Samfélagsábyrgð

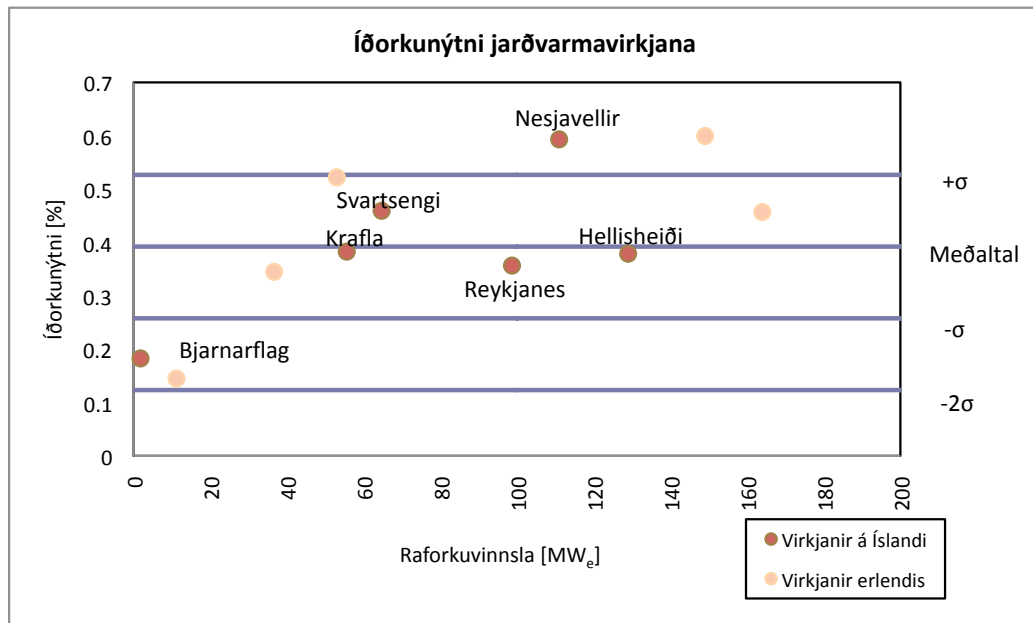
- (8) Orkufyrirtæki skulu sýna samfélagsábyrgð og nýting jarðhitaauðlindarinnar skal hafa í heildina jákvæð samfélagsleg áhrif.

Rannsóknir og nýsköpun

- (9) Orkufyrirtæki og hið opinbera skulu stuðla að rannsóknum sem efla þekkingu á jarðhitaauðlindinni og tækniþróun sem bætir nýtingu, eykur hagkvæmni og dregur úr umhverfisáhrifum, annað hvort með beinum aðgerðum eða í samvinnu við háskóla og aðra rannsóknar- eða þróunaraðila. Þá skal jafnframt stuðla að tækniframförum sem hækka sjálfbæra vinnslustigið.

Miðlun þekkingar

- (10) Þekking á jarðhitaauðlindinni og reynsla sem aflast við nýtingu hennar skal vera aðgengileg og gagnsæ jafnt almenningi sem fræðasamfélögum.



Mynd 13: Nýtni iðorku jarðvarmavirkjana á Íslandi ásamt nokkurra erlendra jarðvarmavirkjana. Virkjanir sem einnig eru nýttar til að hita upp kalt vatn til beinnar nýtingar nýta iðorkuna betur. Heimild: Rut Bjarnadótti (2010). Þýðing: Jónas Ketilsson.

3.5 Áhrif jarðhitanýtingar á landsvísu

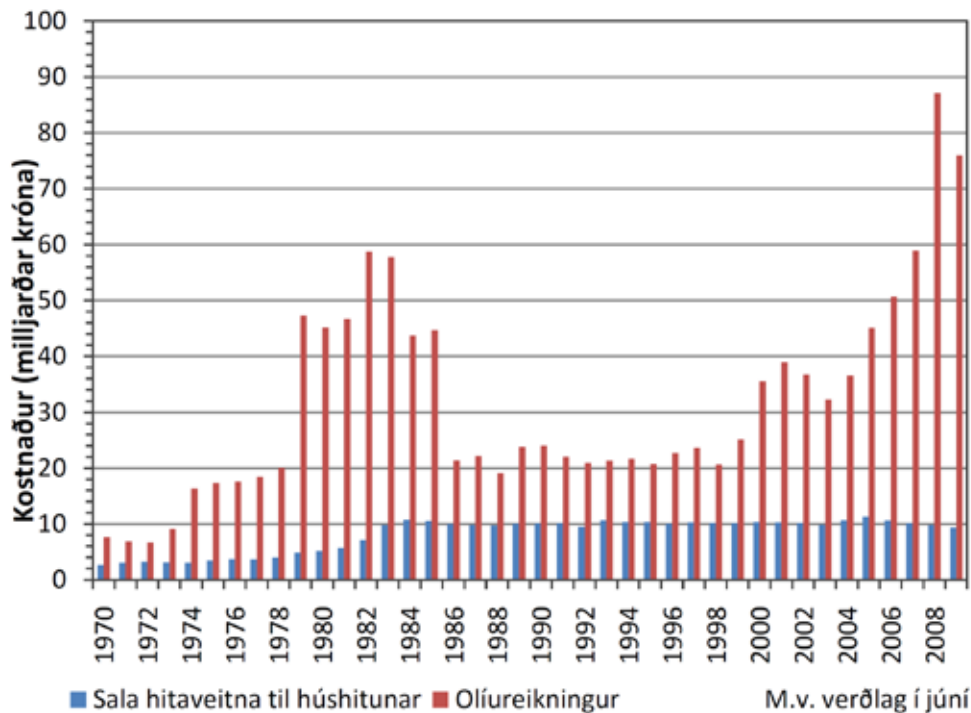
Faghópurinn, sem eingöngu er skipaður raunvísindamönnum, fjallaði eðli málsins samkvæmt, mest um jarðhitaauðlindina og nýtingu hennar. Mat á áhrifum jarðhitanýtingar verður hins vegar að taka til hinna þriggja meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. efnahags-, félagslegra og umhverfispáttar auk markmiðanna sem skilgreind eru í töflu 1. Faghópurinn tók saman nokkur mikilvæg sjónarmið innan hvers þáttar fyrir sig sem greint er frá í næstu undirköflum. Ekki ber að líta á þá sem heildstætt mat á áhrifum jarðhitanýtingar enda krefst slík rannsókn aðkomu fleiri en raunvísindamanna.

3.5.1 Efnahagsáhrif

Efnahagsáhrif húshitunar með jarðhita

Efnahagsáhrif nýtingar jarðhita á þjóðarbúið eru án nokkurs vafa mikil, hvort sem litið er til raforkuvinnslu eða hitunar, og verða því meiri sem olíuverð hækkar. Þannig urðu olúkreppur 8. áratugarins til þess að stjórnvöld lögðu aukna áherslu á rannsókn jarðhitasvæða og uppbyggingu hitaveitna til að leysa olúkyndingu af hólmi. Er nú svo komið að um níu af hverjum tíu heimilum landsins njóta hitaveitu. Um efnahagsáhrif húshitunar með jarðhita í stað olíu vísast í Ingimar G. Haraldsson o.fl. (2010).

Ef notkun landsmanna á jarðvarma til húshitunar er skoðuð yfir tímabilið 1970-2009 má sjá að notkunin jókst úr 5 PJ (PJ = 10¹⁵J) í áætluð 18,8 PJ árið 2009. Til að skoða hin efnahagslegu áhrif sem þessi nýting jarðvarmans hefur á þjóðarbúið er nærtækt að bera saman kostnað neytenda vegna upphitunar með jarðvarma og olíu. Er þá gert ráð fyrir að olúkynding væri með svipuðu sniði og tíðkaðist fyrir daga hitaveitna þegar olúketill var í hverju húsi (Ingimar G. Haraldsson o.fl., 2010).

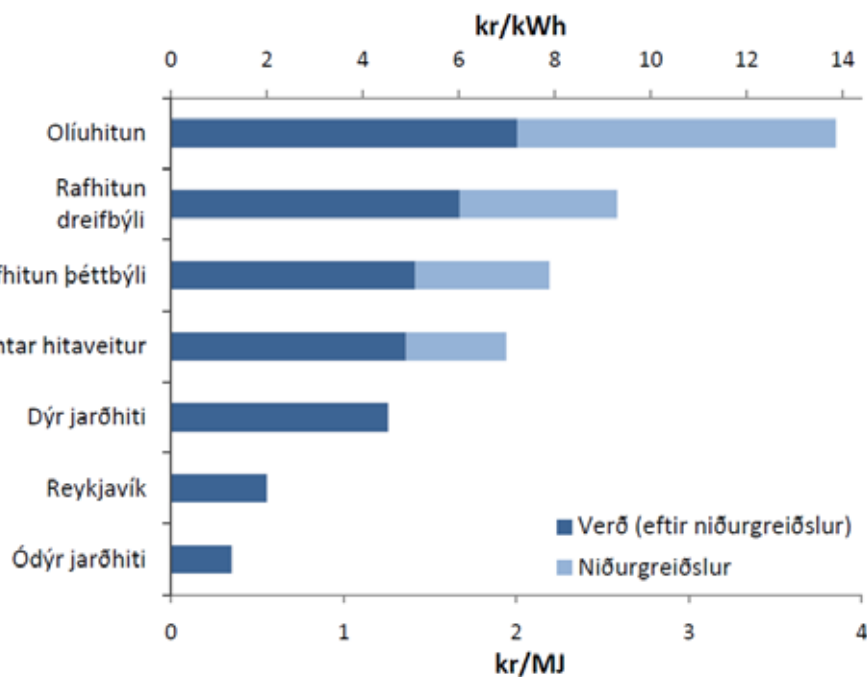


Mynd 14: Heildarhitunarkostnaður neytenda sem tengdir eru hitaveitu samanborinn við kostnað olíukyndingar. Tölur miðast við verðlag í júní 2010 (Ingimar G. Haraldsson o.fl., 2010).

Mynd 14 sýnir heildarsölu hitaveitna til húshitunar án virðisaukaskatts ásamt áætluðum kostnaði þjóðarbúsins við sambærilega olíukyndingu á verðlagi í júní 2010. Gasolíuverð án virðisaukaskatts er notað til að meta kostnaðinn og gert er ráð fyrir 65% varmanýtingu í kötlum. Hefur jarðvarmakynding reynst ódýrari kostur öll þau ár sem til skoðunar voru og jafnframt mun stöðugri. Þannig reis olíuverð mikið á 8. áratugnum og hélst hátt fram yfir miðjan 9. áratuginn, en féll þá hratt og náði nýju lágmarki árið 1987. Síðan þá hefur kostnaður við olíukyndingu rúmlega þrefaldast, en kostnaður við jarðvarmakyndingu hefur lækkað talsvert. Notkun jarðhita til húshitunar hefur því ekki einungis haft sparnað í för með sér fyrir þjóðarbúið, heldur einnig varið það fyrir olíuverðs- og gengissveiflum.

Þjóðhagslegur sparnaður vegna jarðhitakyndingar er talinn hafa numið um tveimur milljörðum árið 1972. Þá var olíuverð lágt og jarðhitanotkun til húskyndingar einungis um 28% af því sem hún er í dag. Árið 2009 nam sparnaðurinn um 67 milljörðum kr og árið 2008 77 milljörðum króna (mynd 14). Uppsafnaður núvirtur sparnaður miðað við 2% raunávöxtun nemur um 1330 milljörðum kr frá 1970 til loka árs 2009. Eru þetta um tvöföld útgjöld ríkissjóðs á árinu 2009 (Ingimar G. Haraldsson o.fl., 2010).

Þær forsendur sem hér eru notaðar eru síður en svo þær einu réttu, enda má lengi velta vöngum yfir mögulegum tilvikum og útfærslum olíukyndingar. Þannig mætti hugsa sér að kyndikatlar í heimahúsum stáðuðu af betri varmanýtingu og útfærslur hitakerfa væru aðrar, s.s. tvöföld dreifikerfi með miðlægum kyndikötlum. Þá er ekki tekið tillit til þátta eins og rekstrarkostnaðar og starfa. Því er nokkur óvissa í slíku mati eins og sjá má á mynd 15 þar sem borinn er saman hitunarkostnaður orkugjafa um mitt ár 2009. Því er hugsanlegt að kostnaður við olíukyndingu sé fremur vanmetinn og raunsparnaður þjóðarbúsins meiri.



Mynd 15: Hitunarkostnaður á Íslandi um mitt ár 2009 með virðisauka (söluverð til notenda) (Ingimar G. Haraldsson o.fl., 2010).

Þrátt fyrir þá óvissu sem óhjákvæmileg er í einföldu mati sem þessu má þó gera ráð fyrir að það gefi ágæta hugmynd um stærðargráðu sparnaðar sem af jarðvarmakyndingu hlýst. Þá er ótalinn fjárhagslegur ávinningur sem kann að felast í annarri nýtingu jarðvarma, s.s. til sundlaugareksturs, snjóbræðslu og ylræktar sem allt eykur lífsgæði sem ekki væru til staðar ef flytja þyrfti orkuna inn. Líklegt má þó teljast að ef jarðvarmans nyti ekki við væru fallvötnin beislud til raforkuvinnslu til húshitunar líkt og gert er í Noregi. Slík kynding er töluvert hagkvæmari en kynding með olíu eins og mynd 15 sýnir, en eftir sem áður er ljóst að jarðhitinn er hagkvæmasti kostur þegar kemur að upphitun.

Efnahagsáhrif raforkuvinnslu með jarðhita

Ísland er auðugt af hagkvæmum raforkukostum, bæði í formi vatnsafls og jarðvarma. Þannig má segja að nýting jarðvarma til raforkuvinnslu sé ekki forsenda samfélags á Íslandi með sama hætti og nýting hans til húshitunar en raforkuvinnslan skapar tækifæri fyrir atvinnulíf og efnahag landsins. Að þessu leyti er raforkuvinnsla svipuð fiskveiðum, þar sem ekki þarf að veiða nema lítinn hluta núverandi fiskafla til að metta alla Íslendinga. Einungis 21% af núverandi raforkuvinnslu þarf til að anna eftirspurn eftir raforku frá öðrum kaupendum en í ál- og járnblendiiðnaði.

Efnahagslegum áhrifum af nýtingu jarðvarma til raforkuvinnslu má skipta í tvennt. Annars vegar er hægt að tala um bein áhrif þar sem beinar tekjur og störf tengd raforkuverum skila sér inn í hagkerfið og hins vegar óbein áhrif virkjana. Raforkuvinnsla á Íslandi setur orkufrekum iðnaði í landinu skorður þ.e. iðnaðurinn getur ekki stækkað svo nokkru nemi án þess að til komi aukin raforkuvinnsla. Því eru óbein áhrif jarðvarmavirkjunar mikil þar sem hún er forsenda fjárfestingar og starfa við þann iðnað sem kaupir orkuna af raforkuverinu. Þá eru ótalín áhrif á aðrar stærðir s.s. ferðamennsku, vinnslu á heitu vatni og verðmæti þekkingar Íslendinga á jarðvarma.

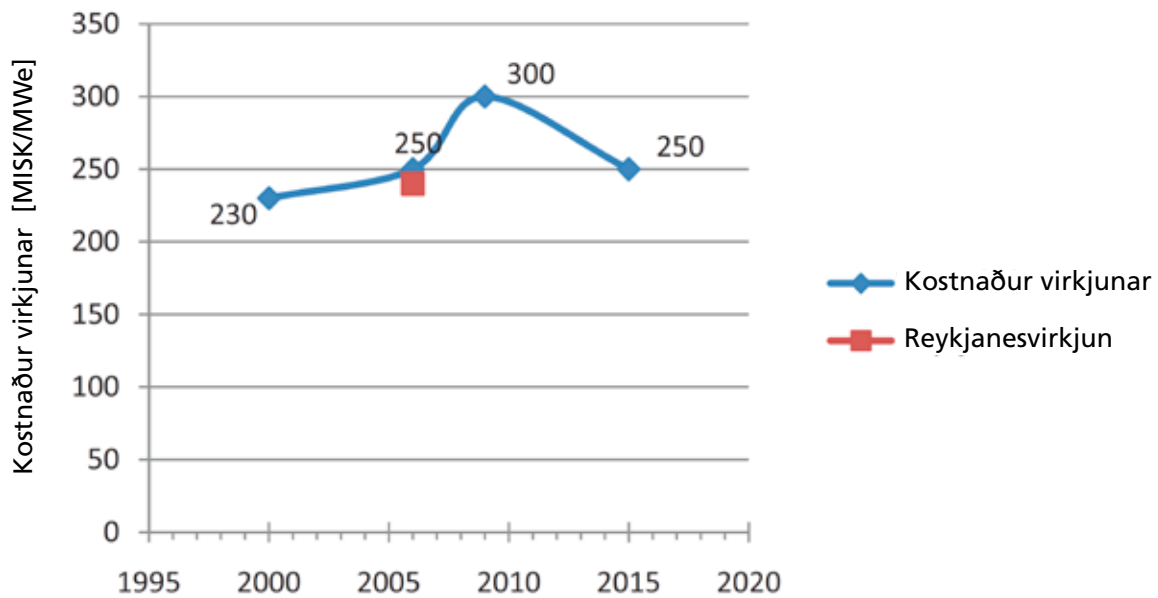
Til að unnt sé að varpa ljósi á arðsemi jarðvarmavirkjunar til raforkuvinnslu þarf að gera áætlun um stofnkostnað og helstu forsendur um rekstur hennar. Komin er góð reynsla á byggingu og rekstur jarðvarmavirkjana og út frá sögulegum gögnum viðurkenndra aðila er hægt að draga upp trúverðuga mynd af arðsemi slíks verkefnis (sjá helstu forsendur í töflu 2). Jarðhitasvæði henta misvel til virkjunar, sum svæði gefa góða arðsemi en önnur ekki eins góða. Því er eðlilegt að munur sé á einstaka framkvæmdum eins og kemur fram í næstu málsgreinum. Borun hefur skilað um 80% viðunandi árangri.

Stofnkostnaður 20-60 MW jarðvarmavirkjunar á óþekktu háhitasvæði var áætlaður vera 144 mkr/MW (milljón króna) árið 2001 (Valgarður Stefánsson, 2001a). Framreiknað með byggingarvísitölu frá byrjun árs 2001 til 2010 yrði stofnkostnaður 294 mkr/MW. Orkuveita Reykjavíkur hefur metið stofnkostnað fyrir 90 MW jarðvarmavirkjun vera 278-333 mkr/MW (Anna Skúladóttir, 2009). Mannvit telur stofnkostnað við byggingu 100 MW Reykjanesvirkjunar á árunum 1997-2008 nema samtals 237 mkr/MW. Mannvit telur jafnframt stofnkostnað nýrra jarðvarmavirkjana vera um 250-300 mkr/MW þar af helmingur innlendur kostnaður (Arnar Hjartarson og Jóhann G. Einarsson, 2010). Í eftirfarandi útreikningum er miðað við 275 mkr/MW í stofnkostnað og 40 ára líftíma. Tafla 2 inniheldur lykilstærðir arðsemismatsins. Á myndum 16 og 17 er gerð grein fyrir þróun stofnkostnaðar og einstaka kostnaðarliðum. Western Governors Association (2005) gefur hærri gildi án skýringa með tilvísun til trúnaðarupplýsinga.

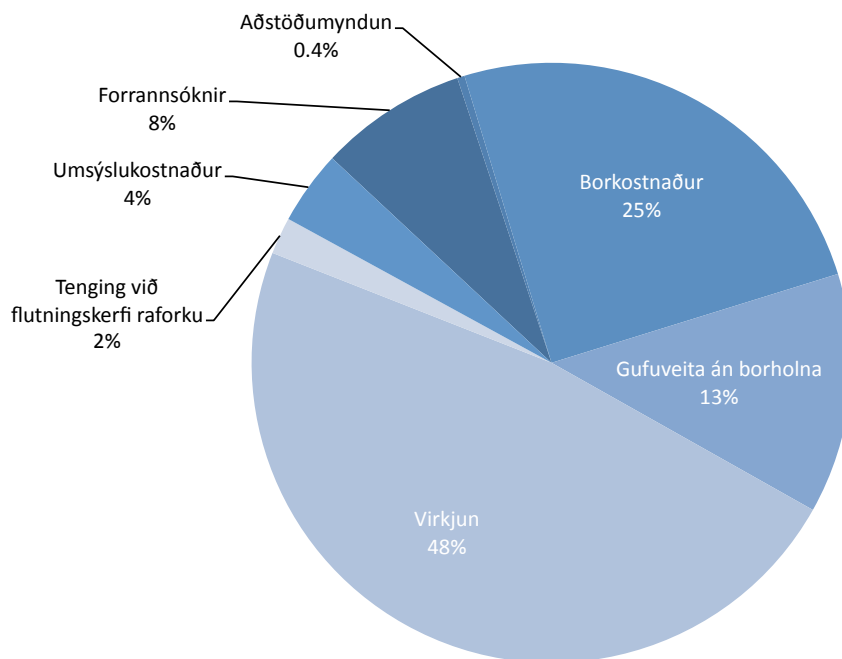
Árlegur rekstrarkostnaður jarðvarmavirkjana er talinn vera um 1% af stofnkostnaði (Egill B. Hreinsson, 2001). Jarðvarmavirkjun krefst viðhalds ef vinnsla á að haldast óskert til lengri tíma. Til dæmis þarf á sumum svæðum að hreinsa borholur á nokkurra ára fresti, bora nýjar til viðhalds vinnslunni, skipta út lokum og öðrum viðkvæmum búnaði en önnur mannvirki og búnaður auk borholna á sumum svæðum endist áratugum saman. Gera má ráð fyrir að árlegur viðhaldskostnaður sé að jafnaði af stærðargráðunni um 1% af stofnkostnaði.

Tafla 2: Forsendur arðsemisútreikninga fyrir 100 MW jarðvarmavirkjun.

Lykilstærðir	
Uppsett rafafl [MW]	100
Gengi [kr/USD]	125
Eiginfjárlutfall	30%
Vextir m.v. orkusölu í erlendri mynt til 40 ára [USD]	5,16%
Nýtingarstundir [klst]	8300
Vinnsla [GWh/ári]	830
Tekjuskattur hlutafélaga	18%
Raforkuverð án flutnings [kr/kWh]	3,5
Stofnkostnaður [makr]	27,5
Fjármagnskostnaður á byggingatíma [makr]	1,6
Árlegur rekstrarkostnaður [% af stofnkostnaði]	1%
Árlegur viðhaldskostnaður [% af stofnkostnaði]	1%
Árlegar tekjur af raforkusölu [makr]	2,9
Árlegur rekstrarkostnaður [makr]	0,55
Arðsemi verkefnis	8,0%



Mynd 16: *Þróun stofnkostnaðar jarðvarmavirkjana á Íslandi með spá um líklega þróun til ársins 2015. Heimild: Arnar Hjartarson og Jóhann G. Einarsson (2010). Þýðing: Jónas Ketilsson.*



Mynd 17: *Skipting stofnkostnaðar nýlegrar jarðvarmavirkjunar á Íslandi. Heimild: Arnar Hjartarson og Jóhann G. Einarsson (2010). Þýðing: Jónas Ketilsson.*

Árlegur rekstrar- og viðhaldskostnaður myndi því samtals hljóða upp á 2% af stofnkostnaði en það svarar til u.þ.b. 550 mkr á ári fyrir 100 MW virkjun. Anna Skúladóttir telur 20% af tekjum 90 MW jarðvarmavirkjunar fara í rekstrarkostnað sem samkvæmt neðangreindum útreikningum er í samræmi við 2% af stofnkostnaði sem miðað er við í þessari úttekt (um 0,7 kr/kWh eða 5,3 US mills/kWh). Sömuleiðis kemur fram í skýrslu Mannvits að rekstrarkostnaður 100 MW Reykjanesvirkjunar hafi verið um 4,5 US mills/kWh árið 2008 og að rekstrarkostnaður Svartsengis hafi verið um 3,9 US mills/kWh sem er í samræmi við ofangreint mat (Arnar Hjartarson og Jóhann G. Einarsson, 2010).

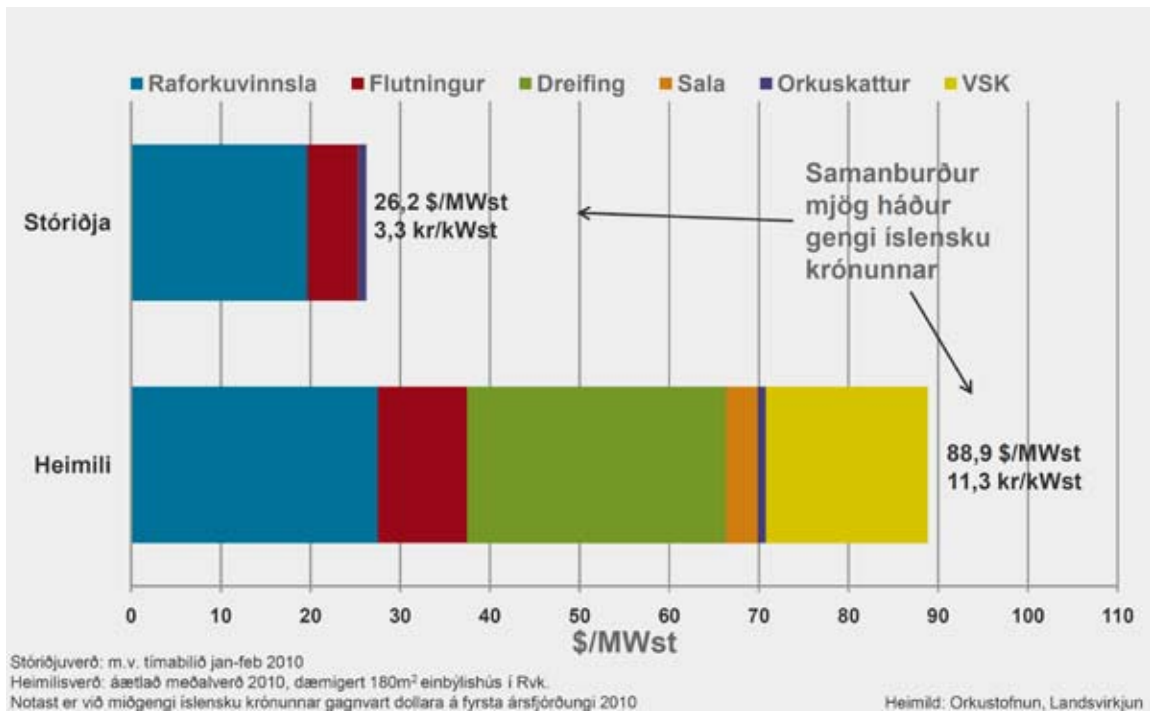
Tekjur af nýrri jarðvarmavirkjun koma líklega fyrst og fremst frá nýjum iðnaði. Hagfræðistofnun Háskóla Íslands telur verð til álvera á Íslandi vera um 28 US mills á kWh (2009). Stofnunin tekur fram að meðalverð í heiminum árið 2007 hafi verið 27-30 US mills eða 3,2 – 3,6 kr/kWh (sjá mynd 18). Á ársfundi Landsvirkjunar kom fram að heildsöluverð fyrirtækisins á raforku til stóriðju, með flutningi og orkuskatti, á fyrsta ársfjórðungi 2010 var um 26,2 US mills á kWh eða 3,3 kr/kWh (Hörður Arnarsson, 2010). Gera má ráð fyrir að raforkuverð sé ekki í boði á þessu verði til stóriðju í dag og því er gert ráð fyrir 28 US mills á kWh, án flutnings, við arðsemisútreikninga eða 3,5 kr/kWh miðað við gengið 125 kr/USD.

Ef nýtingarstuðull virkjunarinnar er 95%, framleiðir hún rafmagn í 8.300 klst á ári og vinnsla 100 MW virkjunar því 830 GWh á ári. Tekjur af virkjuninni eru því um 2,9 mkr (milljarðar króna) á ári. Þegar rekstrar- og viðhaldskostnaður upp á 550 mkr hefur verið greiddur standa eftir 2,35 mkr til að standa undir afskriftum, fjármagnskostnaði, tekjuskatti og hagnaðarkröfu.

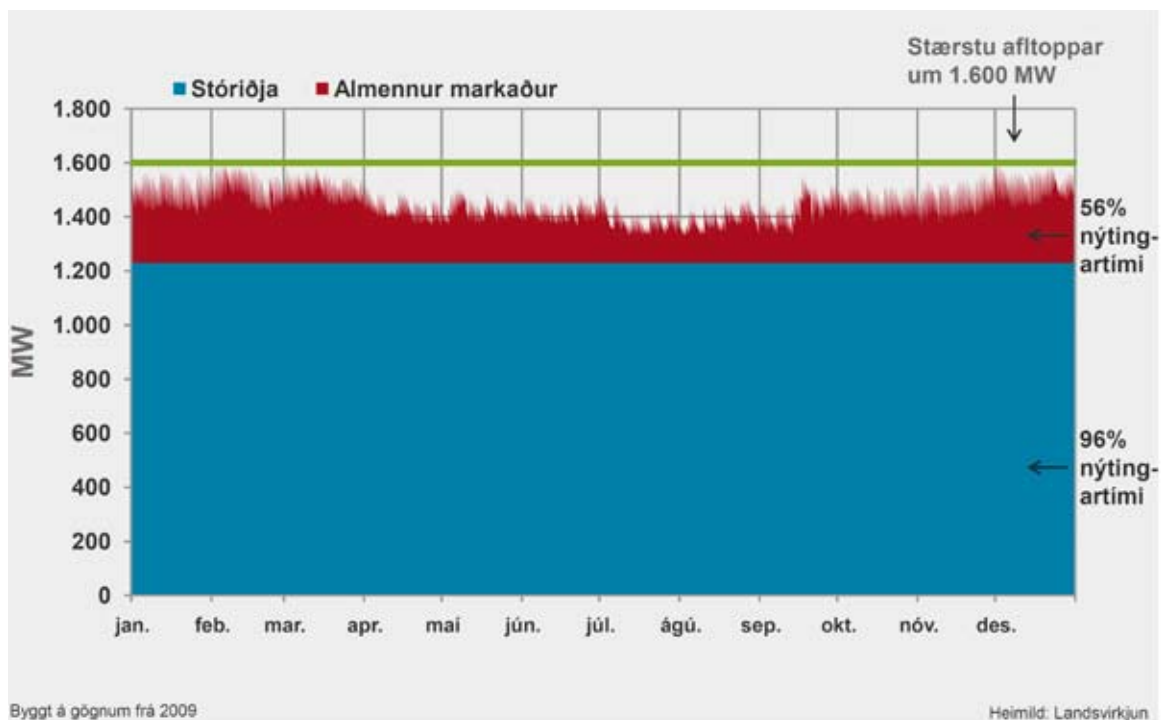
Töluvert flóknara er að reikna arðsemi af orkusölu frá jarðvarmavirkjunum til almenna markaðarins, en vænta má þess að arðsemin væri nokkuð álíka. Þó svo að heildsöluverð raforku fyrir almenna markaðinn sé um 40% hærra en til stóriðju vegur lægra nýtingahlutfall þungt á móti. Samkvæmt gögnum Landsvirkjunar frá árinu 2009 var nýtingarhlutfall almenna markaðarins um 56% á móti 96% nýtingarhlutfalli stóriðjumarkaðarins, eins og sjá má á mynd 19. Því skal þó haldið til haga að jarðvarmavirkjanir henta best til að framleiða grunnafl á stöðugu álagi, en örar sveiflur í vinnslu eru líklegar til að hafa slæm áhrif á endingu og rekstur jarðvarmavirkjana.

Fjármagnskostnaður er verulega háður vaxtakostnaði þar sem rekstrarkostnaður er lágur og stofnkostnaður hár. Tekjur og fjármögnun af nýjum stóriðjuverum og virkjunum eru að jafnaði í erlendri mynt og því óhætt að miða við vaxtaumhverfi erlendis. Í uppfærðu arðsemismati Kárahnjúka frá árinu 2008 er stuðst við nafnvextina 5,16% (USD). Á þeim tíma var vaxtastig mun hærra og ólíkt því sem er nú en endurspeglar e.t.v. frekar langtímaumhverfi vaxta en það lága grunnvaxtaumhverfi sem nú ríkir. Þá ber að geta þess að ekki er raunhæft að reikna með því að álag á grunnvexti verði hátt eins og verið hefur undanfarin misseri á Íslandi heldur ber að horfa til langs tíma þar sem jarðvarmavirkjun er í eðli sínu langtímafjárfesting.

Til þess að átta sig á stærðargráðum má í einföldu dæmi gera ráð fyrir 1 mkr í vaxtakostnað miðað við 30% eiginfjárlutfall og 0,5 mkr í afborganir miðað við 40 ára lán með jöfnum afborgunum. Við það nemur hagnaður um 0,9 mkr fyrir skatta og afskriftir. Hlutfélög og einkahlutfélög greiða 18% tekjuskatt en sameignafyrirtæki eins og Landsvirkjun og Orkuveita Reykjavíkur greiða 32,7% tekjuskatt til ríkisins. Víða er greitt afgjald til jarðeiganda fyrir nýtingu jarðhitans, en jarðeigandi er í mörgum



Mynd 18: Samanburður á annars vegar meðalorkuverði Landsvirkjunar til stóriðju og hins vegar samsetningu á orkuverði Orkuveitu Reykjavíkur til heimila í Reykjavík (Hörður Arnarson, 2010).



Mynd 19: Samanburður á nýtingartíma stóriðju annars vegar og almenna markaðarins hins vegar (Hörður Arnarson, 2010).

tilvikum ríkið sjálft. Óljóst er hversu mikið slíkt afgjald gæti verið en væntanlega einhverjir aurar á hverja kWh. Beinar tekjur ríkisins af raforkuvinnslunni í gegnum skatta ættu því að vera um 0,2 mkr árlega m.v. 18% tekjuskatt og meira ef ríkið er jafnframt landeigandi. Þá eru ótaldir þeir skattar sem orkuverið greiðir til sveitarfélaga í formi fasteignagjalds og skatttekjur af starfsfólki virkjunarinnar.

Við mat á arðsemi virkjunarinnar þarf að gera nánari grein fyrir sjóðsflæði (*e. cash flow*) á líftíma virkjunarinnar að gefinni veginni ávöxtunarkröfu (*e. WACC*). Þá þarf að leggja mat á fjármagnskostnað á rannsóknar- og byggingartíma virkjunarinnar, um 1,6 mkr, sem dreginn er frá núvirtu sjóðsflæði ásamt stofnkostnaði virkjunarinnar. Við mat á arðsemi er sömuleiðis gert ráð fyrir jafngreiðsluláni og viðeigandi skattgreiðslum samkvæmt sjóðstreymi hvers árs fyrir sig. Niðurstaða arðsemisútreikninga er að arðsemi nemur um 8% og arðsemi eiginfjár um 12,6% m.v. fyrrgreindar forsendur í töflu 2.

Ekki verður rætt um arðsemi þjóðfélagsins af virkjun jarðvarma án þess að reikna með óbeinum áhrifum hennar s.s. vegna nýrra orkunotenda enda verður tæpast farið út í nýjar stórvirkjanir á Íslandi nema kaupandi sé að orkunni. Orkuvinnsla verður til langframa takmarkandi þáttur á vöxt orkufreks iðnaðar í landinu þ.e. iðnaður á erfitt með að stækka til langs tíma án þess að farið verði út í frekari orkuöflun. Fjárfesting í orkuvinnslu hefur því haldist í hendur við fjárfestingar í iðnaði.

Hægt er að skipta afleiddri starfsemi af sölu raforku frá jarðvarmavirkjunum í fernt. Í fyrsta lagi er starfsemi kaupanda orkunnar en hér á landi hafa nokkur stóriðjuver verið byggð á síðustu áratugum. Í öðru lagi hefur jarðvarmavirkjun áhrif á ferðamennsku og í þriðja lagi er starfsemi byggð á heitu affallsvatni virkjananna. Að lokum skapast dýrmæt þekking sem nýtist á ýmsum sviðum. Óbein áhrif jarðvarmavirkjana geta því verið umtalsverð á hagkerfi landsins.

Gjaldeyrstekjur aukast með nýrri virkjun og afleiddri starfsemi. Undanfarin ár hafa tekjur nýrra jarðvarmavirkjana að mestu verið í erlendri mynt en rekstrarkostnaður og hluti stofnkostnaðar í íslenskum krónum. Mestur hluti orku frá nýjum jarðvarmavirkjunum er seldur nýjum iðnaði þar sem útflutningstekjur myndast. Hluti af stofnkostnaði og tekjum þess iðnaðar fer í innlendar fjárfestingar og innlendan kostnað og skatta og er því gjaldeyrisskapandi þ.e. gjaldeyrinn fer í að kaupa íslenskar krónur. Eignarhald slíkra stóriðjuvera hefur hingað til að miklu leyti verið erlent og því má gera ráð fyrir að hagnaður slíkrar starfsemi fari að mestu úr landi. Meðan á framkvæmdatíma stendur má gera ráð fyrir að bygging jarðvarmavirkjunar af þessari stærð krefjist 1.500-2.000 manna (Anna Skúladóttir, 2009).

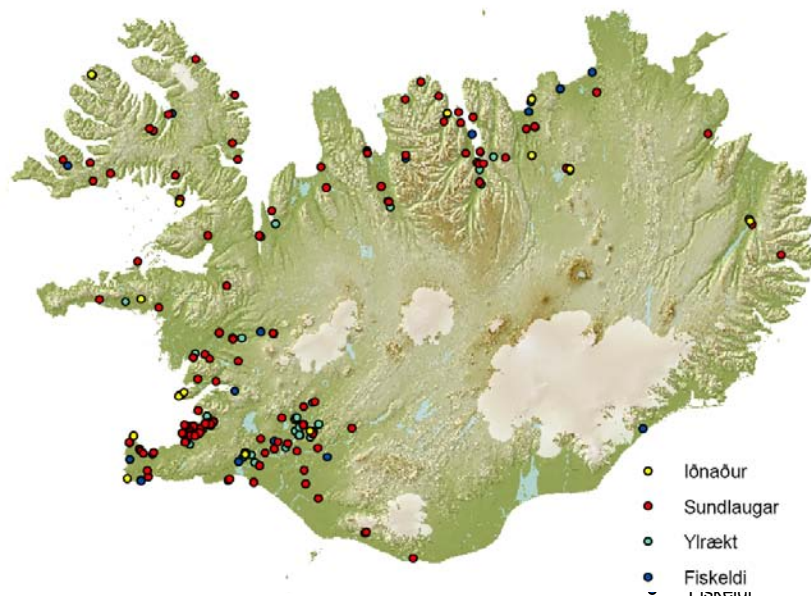
Innlendur kostnaður t.d. álvera er talinn vera 30% af veltu þeirra (Hagfræðistofnun Háskóla Íslands, 2009). Talsmaður Alcoa Fjarðaáls heldur því fram að upphæð Fjarðaáls í innlendum kostnaði sé 9,5 mkr (Erna Indriðadóttir, 2009) en orkuþörf álversins samsvarar um tæplega 600 MW jarðvarmavirkjun. Miðað við 100 MW væri hægt að áætla 1/6 af innlendum kostnaði Fjarðaáls eða 1,6 mkr árlega í innlendum kostnaði sem myndi skila sér sem gjaldeyrstekjur og eru þá ótaldar þær gjaldeyrstekjur sem fengjust með sköttum og gjöldum. Því má draga þá ályktun að hreinar gjaldeyrstekjur þjóðarbúsins af 100 MW jarðvarmavirkjun og kaupanda orkunnar gætu hlaupið á nokkrum milljörðum árlega, háð gerð atvinnustarfseminnar og mögulegum ruðningsáhrifum í samfélaginu. Þá á eftir að taka tillit til upphæðar upphaflegrar fjárfestingar á flæði gjaldeyris til landsins og skattheimtu ríkisins af stóriðjuveri. Fyrir hvert starf í álveri er talið að 2,3 störf skapist í öðrum greinum (Nýsir, 2006).

Hagfræðistofnun telur auk þess að 180 mkr fjárfesting í orkuöflun og 220 mkr í stóriðjuframkvæmdum skili auknum þjóðhagslegum bata um 95 mkr á núvirði fyrstu 4 árin þar af 3 mkr vegna fjárfestinga í virkjunum (2009).

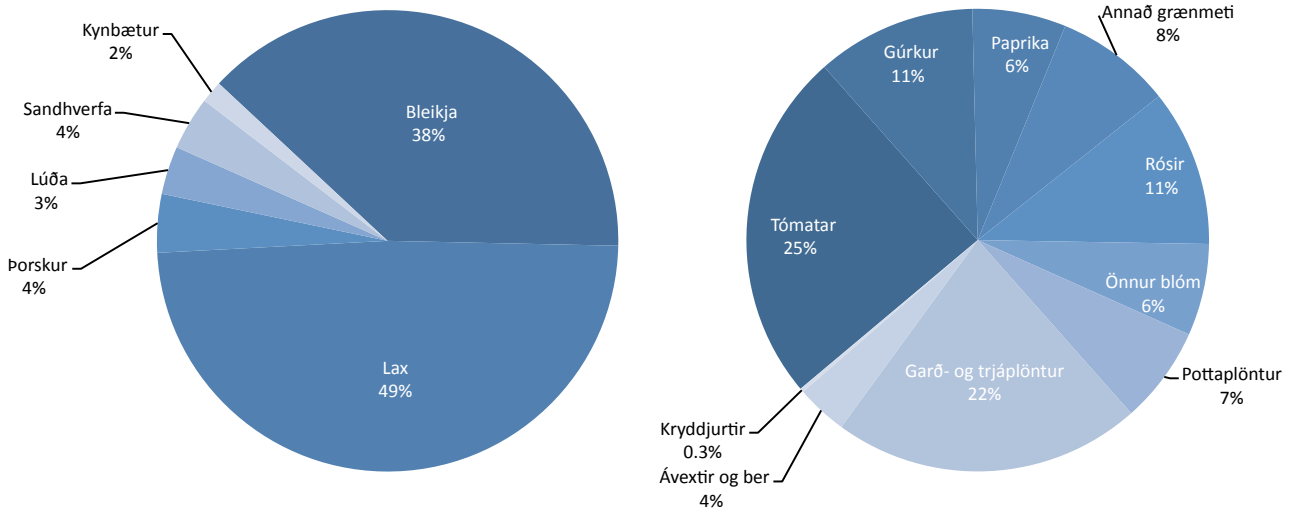
Efnahagsáhrif fjölnýtingar

Fjölnýting jarðhita á Íslandi er margvísleg og skipar mikilvægan sess, m.a. með auknu fæðuöryggi með fiskeldi og ylrækt og getur stuðlað að sjálfstæði landsins á ögurstundum. Á mynd 20 má sjá kort yfir jarðhitanotkun til fiskeldis, ylræktar, sundiðkunar og iðnaðar á Íslandi. Fiskeldi nýtur góðs af jarðhitanotkun með því að hraða vexti eldisfiska eins og nánar er gerð grein fyrir á mynd 21. Í dag spannar ræktun í upphituðum gróðurhúsum vítt svið og eru grænmeti og ávextir, blóm til afskurðar og skreytinga, pottaplöntur, garð- og trjáplöntur og krydd dæmi um afurðir ylræktar. Helstu framleiðsluvörur ylræktar má sjá á mynd 21 eftir flatarmáli ræktunar. Ýmis iðnaður nýtur einnig góðs af jarðhitanum, einkum fisk- og þörungapurrkun. Þess má einnig geta að koldíoxíð m.a. í gosdrykki er unnið úr gasríku jarðhitavatni við Hæðarenda í Grímsnesi þar sem rekin er kolsýruverksmiðja. Um jarðhitanotkun á Íslandi vísast í Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson (2010a).

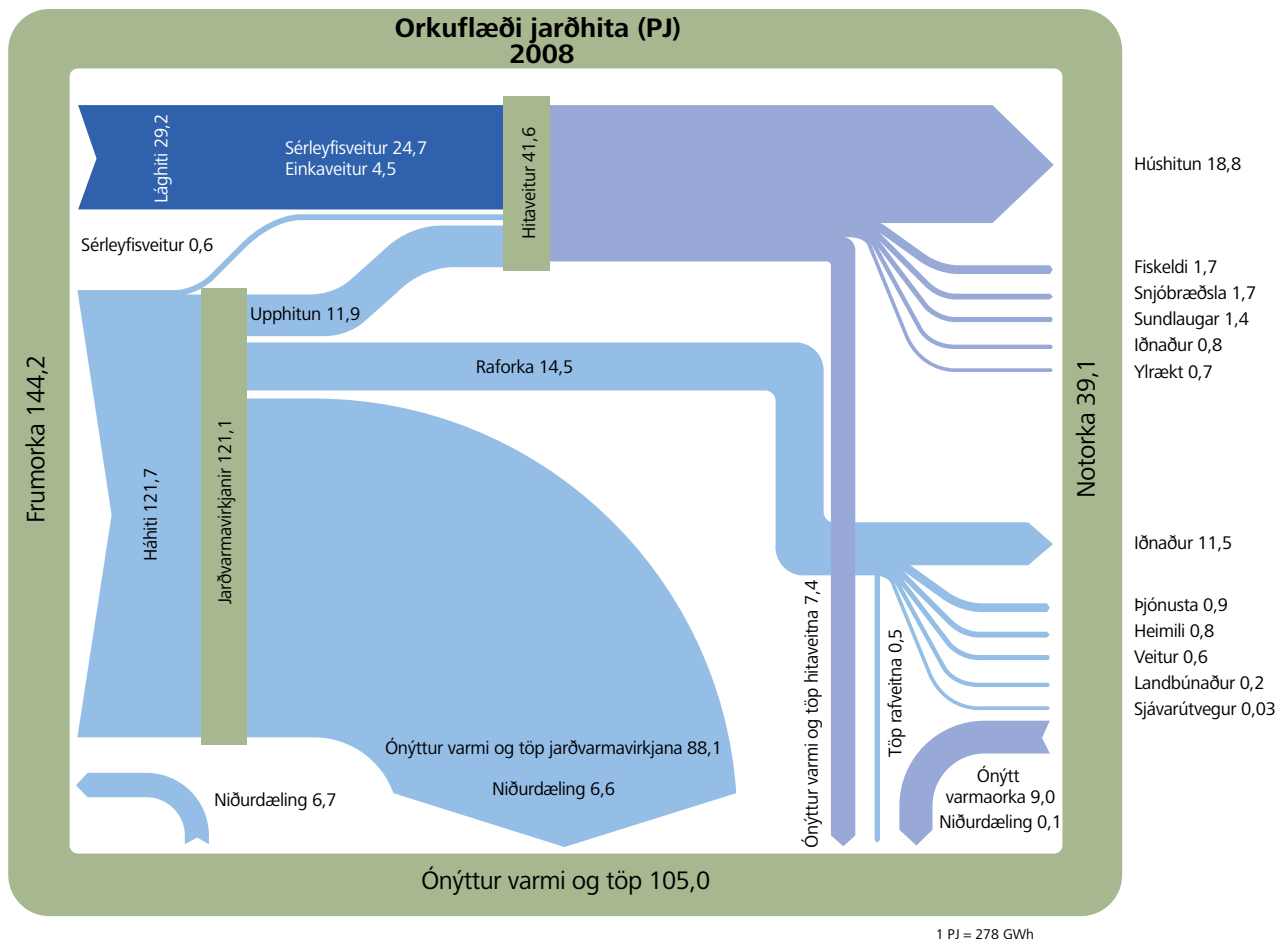
Fjölnýting jarðhita byggir aðallega á beinni nýtingu frá lághitasvæðum, en um 30% af hitaveituvatni er upphitað vatn frá jarðvarmavirkjunum eins og sjá má á mynd 22 yfir orkuflæði jarðhita á Íslandi. Myndin sýnir að ónýttur varmi og töp jarðvarmavirkjana eru mikil en jafnframt skapar það tækifæri til fjölnýtingar sem annars væru ekki til staðar. Athuga skal að viðmiðunarástand er við 15°C og 1 bar_a. Ef samsvarandi iðorkuflæðismynd væri sýnd þá væri ónýttur varmi og töp ekki jafn áberandi eins og sjá má á mynd 13 þar sem kemur fram að nýtni iðorku er að meðaltali um 40% í íslenskum jarðvarmavirkjunum. Sú staðreynd að um aukaafurð er að ræða þýðir að vinnslukostnaður heita vatnsins er mjög lágur. Það skapar samlegðaráhrif með raforkuvinnslunni og sparnað fyrir notendur heita vatnsins. Um frumorkunotkun jarðvarmavirkjana og hitaveitna á Íslandi vísast í Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson (2010b).



Mynd 20: Notkun jarðhita til iðnaðar, sundlauga, ylræktar og fiskeldis árið 2008 (Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson, 2010a).



Mynd 21: Hlutfallsleg skipting jarðhitanothunar til fiskeldis (til vinstri) og ylræktar (til hægri) árið 2008 (Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson, 2010a).



Mynd 22: Orkuflæði jarðhita á Íslandi árið 2008. Frumorkunotkun (til vinstri) frá lághita- og háhitakerfum sem endar hjá notenda (til hægri). Mismunur frumorku og notorku er ónýttur varmi og töp sem í sívaxandi mæli er dælt aftur ofan í jarðhitageyma. Viðmiðunarástand er við 15°C og 1 bar_a (Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson, 2010a).

Nálægð höfuðborgarsvæðisins við orkuverin á Nesjavöllum og Hellisheiði hafa gert vinnsluna sérlega hagkvæma. Gufan er skilin frá gufu/vökva blöndunni sem kemur upp úr holunum og notuð í rafmagnsvinnsluna. Affallið er notað til að hita upp ferskvatn sem síðan er nýtt til húshitunar o.s.frv. Jarðvarmavirkjanirnar í Bjarnarflagi, Svartsengi, Nesjavöllum og senn Hellisheiði eru þannig skýrustu dæmin um hve fjölnýting jarðvarmans hefur leitt af sér margvíslega tekjusköpun, aðra en beinar tekjur af raforkusölu.

Nýtingu jarðhitans í Svartsengi fylgir mikið af heitum jarðsjó sem myndar Bláa lónið. Við Bláa lónið, sem árlega er sótt af 400.000 gestum, hefur verið byggt upp heilsuhótel, veitingasala, ráðstefnuaðstaða, fræðslu- og sýningarrými um eldvirkni og út frá þeirri starfsemi hafa síðan verið unnar heilsuvörur sem eru seldar bæði á innlendri og erlendri grundu.

Alls staðar þar sem háhiti hefur verið nýttur til raforkuvinnslu hefur skapast umsvifamikil ferðamennska sem erfitt er að meta að fullu til fjár. Nýting jarðvarmans á Kröflusvæðinu hefur opnað aðgang ferðamanna að áhugaverðu svæði og hátt í 200 þúsund ferðamenn koma inn á svæðið árlega til að ganga um nýja hraunið við Leirhnjúk, skoða Víti og ekki síst kynna sér jarðhitánýtinguna í Kröflustöð. Nýlega var byggt upp svokallað Baðlón við Jarðbaðshóla. Það nýtir skiljuvatn frá Bjarnarflagsvirkjun. Er það þegar orðið eitt helsta aðdráttarafl ferðamanna á Mývatnssvæðinu með tugþúsundir heimsókna á ári og hefur lónið m.a. skapað grundvöll fyrir starfsemi heilsunámskeiða á nærliggjandi hótélum á veturna. Hefur nýting jarðvarmans þannig leitt af sér vinsæla ferðamannastaði með fjölnýtingu hans, en hvergi fælt frá.

Vert er að minnast á ýmsa möguleika sem verða til við aukaafurðir jarðavarmavirkjana. Í Grindavík nýtir fyrirtækið ORF líftækni rafmagn og jarðvarma til að framleiða prótein í lyfja- og snyrtivöruíðnað. Á Reykjanesi hafa verið gerðar tilraunir með að samtvinna raforkuvinnslu og annan iðnað, einkum saltvinnslu og hausapurrkun, en enn sem komið er hefur slíkur iðnaður verið smár í sniðum. Áhugavert verkefni er í gangi hjá fyrirtækinu Carbon Recycling International þar sem á að vinna metanól sem blandað er saman við annað eldsneyti á bíla. Ef það verkefni heppnast dregur það úr mengun frá jarðvarmavirkjunum og minnkar þörf á jarðefnaeldsneyti og þar með útblástursmengun og sparar gjaldeyri. Frá jarðvarmavirkjunum rennur mikið af heitu vatni sem aukaafurð. Ekki hefur tekist að laða til landsins gufufrekan iðnað en möguleg tækifæri eru í slíku og mætti vel hugsa sér eins konar iðnaðargarð í nágrenni jarðvarmavirkjana þar sem gufu- og orkufrekur iðnaður nýtur nálægðar við jarðvarmaorkuver og afurðir þess (sjá töflu 3).

Ómögulegt er að spá fyrir um framtíð þeirrar starfsemi sem er afleidd af fjölnýtingu jarðvarmans eða þeim tækifærum sem skapast í framtíðinni, en ljóst er að hann hefur leitt af sér öflugri ferðaþjónustu og skapað iðnað og atvinnutækifæri sem ekki ættu sér von á Íslandi nema með nýtingu jarðvarmans (sjá mynd 23).

3.5.2 Félagsleg áhrif

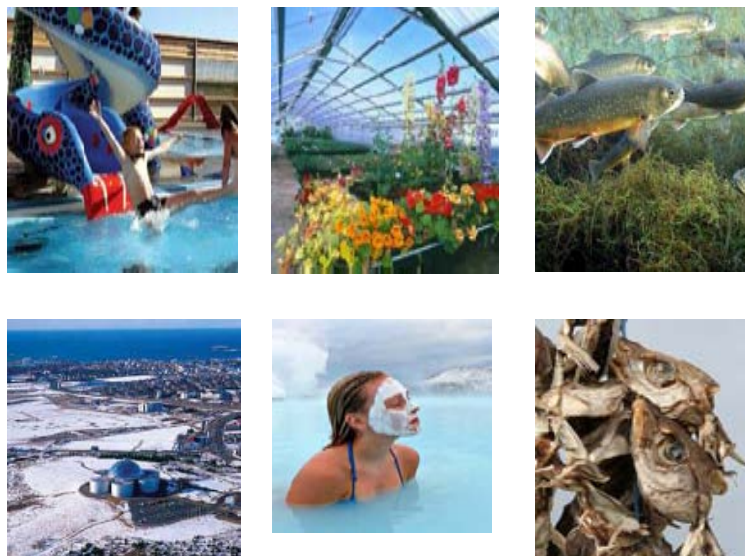
Jarðhitinn átti stóran þátt í að bæta lífsskilyrði þjóðarinnar á síðustu öld, en um leið hafði hann mótandi áhrif á ýmsa félagslega þætti. Þróun séríslenskrar sundmenningar,

myndun byggðakjarna á jarðhitasvæðum og vöxtur alþjóðlega viðurkennds þekkingarsamfélags eru allt þættir sem rekja má beint til félagslegra áhrifa jarðhitánýtingar. Mikinn fróðleik um þróun nýtingar jarðhita er að finna í bókinni Auður úr iðrum jarðar (Sveinn Þórðarson, 1998). Einnig er fjallað um viðhorf til vatnsaflsvirkjana í bók Unnar B. Karlsdóttur (2010).

Félagshugsun varð ungmennafélögum hvati til uppbyggingar sundlauga á landinu snemma á 20. öld. Sundkennsla var víða gerð að skyldu í framhaldi af því með ánægju

Tafla 3: Yfirlit yfir fjölbætta nýtingu á helstu orkuvinnslusvæðum Íslands.

Virkjun	Upp-haf	Raforku-vinnsla	Iðnaður	Nýting lágvarma	Ferðamennska
Bjarnarflag	1967	3 MW	Kísilgúrvinnsla (hætt), byggingar-einingar	Hitaveita og baðlón	Baðlón og hvera-svæði við Hverarönd
Krafla	1978	60 MW	Enginn	Láprýstiprep	Ferðamannaaðstaða við Leirhnúk og Víti
Svartsengi	1978	78 MW	Ýmsar heilsuvörur, metanól	Tvívökva-hverflar, hitaveita, baðlón og gróðurhús	Baðlón, fræðslusetur og safn um eldvirkni
Nesjavellir	1987	120 MW		Hitaveita	Vinsælt útivistarsvæði, Adrenal íngarður
Húsavík	2001	2		Hitaveita	
Reykjanes	2006	100 MW	Saltvinnsla (ekki starfrækt um þessar mundir), hausapurrkun		Jarðhitasafn í Reykjanesvirkjun, Gunnhver
Hellisheiði	2006	213 MW		Hitaveita, lágrýstaflostöð	Ferðamannamóttaka



Mynd 23: Fjölnýting jarðhitans í sundlaugum, gróðurhúsum, fiskeldi, snjóbræðslu, í Bláa lóninu og hausapurrkun.

og öryggi borgara að leiðarljósi. Gott dæmi um slíkt framtak er Seljavallalaug sem byggð var árið 1923 og er staðsett nokkuð úr alfaraleið. Í dag hafa sundlaugar breyst úr nýstárlegum munaðar- og áningarreitum í sjálfsagða viðkomustaði í daglegu lífi. Laugararnar eru mikilvægur vettvangur félagslegs samneytis borgara og skipa stóran sess í lífi margra. Mikil útbreiðsla eykur einnig á lífsgæði ferðalanga sem yfirleitt þurfa ekki að leita langt til að skola af sér ferðarykið. Þó að Íslendingum þyki slíkt sjálfsagt eru laugarnar hluti aðdráttarafls landsins fyrir erlenda ferðamenn og eiga þátt í að skapa ferðamennskunni sérstöðu.

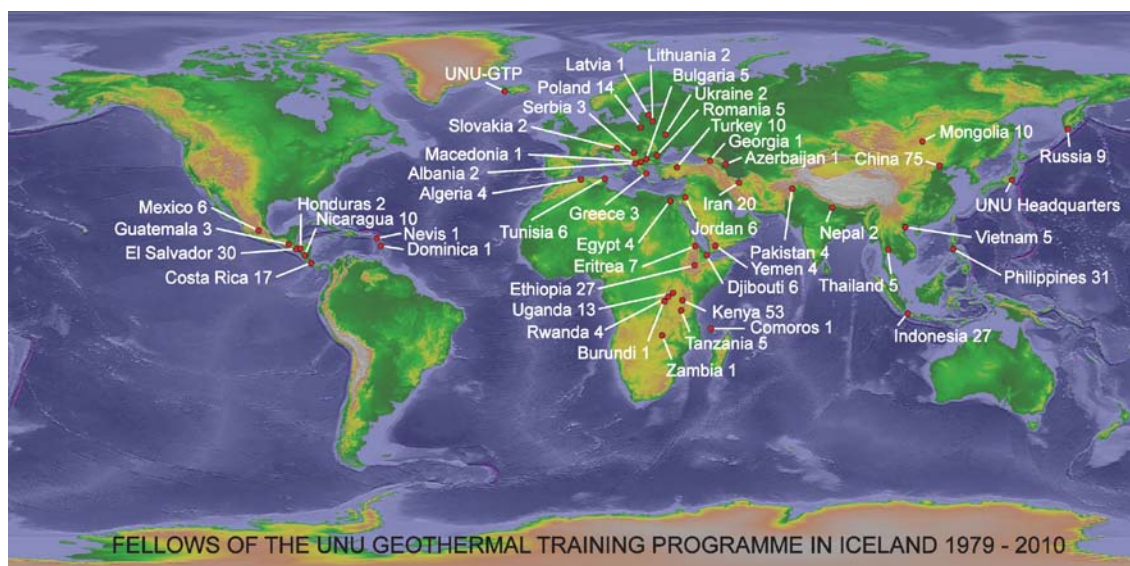
Einn af kostum jarðhita er að hann má fjölnýta eins og greint hefur verið frá. Íslensk grænmetis- og plönturækt hefur notið góðs af jarðhitinum. Má færa að því líkur að hún ætti erfitt uppdráttar án hans. Jarðhitinn hefur verið nýttur til að auka framboð og fjölbreytni á grænmeti og kryddi og með því án efa bætt matarmenningu þjóðarinnar. Einnig hefur fjölbreytt framboð á afskornum blómum, pottaplöntum og trjágræðlingum skapað ótalmargar ánægjustundir og þannig leitt til aukinna lífsgæða og sjálfbærni eyjasamfélagsins.

Landsmenn njóta jarðhitans almennt í heldur hærri híbýlahita en tíðkast í nágrannalöndum vegna lágs verðs jarðhitavatns. Má ætla að þægindi í híbýlum séu því meiri en ella. Bakrennslið er víða nýtt til snjóbræðslu sem eykur á öryggi og minnkar mokstur, en slíkt væri óhugsandi í olíu- og rafmagnskyntum fjarvarmaveitum. Einnig færist notkun snjóbræðslu í vöxt á leikvöngum og gervigrasvöllum með auknum möguleikum til íþróttaiðkunar yfir vetrartímann.

Heilsufarsáhrif heitavatnsnotkunar á Íslandi eru margvísleg. Í samantekt Hrefnu Kristmannsdóttur og Sigríðar Halldórsdóttur (2008) er lagt faglegt mat á heilsufarsáhrif heitavatnsnotkunar þegar hitaveitur tóku við af kola- og olíukyndikerfum. Niðurstaða þeirra er að auk efnahagslegs ábata hefur hitaveituvæðingin skilað verulegum heilsufarslegum ávinningi. Má þar helst nefna aukin loftgæði, aukin lífsgæði með heitu vatni á lágu verði m.a. til þrífnaðar og almennan aðgang að sundstöðum. Sundiðkun hefur reynst stoðkerfissjúklingum vel vegna eðliseiginleika heita vatnsins, þ.e.a.s. varma og vatnsþrýstings (Ólafur G. Björnsson, 2000). Heit böð geta sömuleiðis haft jákvæð áhrif á ósjálfráða taugakerfið, innkirtlakerfið og ónæmiskerfið og geta leitt til aukins jafnvægis, dregið úr meinafræðilegri starfsemi, aukið eigin lækningamátt líkamans og styrkt hann gegn innri og ytri áreitum. Mikilvægt hlutverk heita vatnsins varðandi heilbrigði er jafnframt fólgið í því að minnka streitu, sem er ein öflugasta forvörn gegn sjúkdómum (Hrefna Kristmannsdóttir og Sigríður Halldórsdóttir, 2008).

Jarðhitinn hefur einnig haft nokkur áhrif á byggðaðróun, enda voru heimavistarskólar á síðustu öld gjarnan reistir á svæðum sem nutu jarðhita. Á sumum stöðum mynduðust stærri þéttbýliskjarnar eins og raunin varð í Hveragerði og Laugarási, á Laugarvatni, Flúðum og Laugum í Reykjadal. Allir bera þessir staðir vott um mótunaráhrif jarðhitans á byggðaðróun inni í landi og heilbriggt mótvægi hans við áhrif sjávarútvegsins á þéttbýlismyndun til stranda.

Sú reynsla sem safnast hefur á þeirri öld sem liðin er frá tilraun Stefáns B. Jónssonar árið 1908 við að nýta jarðhita til húskyndingar, hefur skilað dýrmætum fjársjóði þekkingar til samfélags vísindamanna, hönnuða og rekstraraðila sem horft er til frá öllum heimshornum. Jarðhitinn hefur skapað störf af háum gæðum og haft í för með sér nýsköpun og rannsóknir í háskólum landsins. Sú þekking og reynsla Íslendinga af



Mynd 24: *Fjöldi nemenda Jarðhitaskóla Sp eftir löndum frá 1979-2010.*

jarðhitanýtingu undanfarna öld var forsenda þess að Jarðhitaskóla Sp var valinn staður á landinu. Sækja hann árlega nemendur frá mörgum álfum. Jarðhitinn hefur því ýtt undir og stutt við akademíska mótun þekkingarsamfélags innanlands, sem hefur haft mikilsverð áhrif út á við með um 452 nemendum sem útskrifast hafa úr náminu (mynd 24). Nýlega jókst námsframboð á sviði jarðhita með tilkomu tveggja skóla á þessu sviði, RES (School of Renewable Energy Science) (sem þó starfar ekki lengur) og REYST (Reykjavík Energy School of Sustainable Systems). Nú geta fróðleiksfúsir nemendur frá öllum ríkjum heims sótt í íslenska jarðhitaþekkingu með framhaldsmenntun á háskólastigi. Því má segja að núlifandi kynslóð jarðhitaðnaðarins á Íslandi geri það sem í hennar valdi stendur til að miðla þekkingu sinni ekki bara til næstu kynslóðar vísindamanna á Íslandi heldur allra þeirra sem sækjast eftir skilningi á eðli auðlindarinnar og nýtingarmöguleikum.

Það virðist því ljóst að nýting jarðhitans til upphitunar og beinnar notkunar hefur haft umtalsverð áhrif á íslenskt samfélag önnur en þau sem mæla má beint með hagrænum mælistikum. Verður ekki annað séð en að þau séu að mestu leyti jákvæð. Þá er ógetið félagsáhrifa raforkuvinnslu með jarðvarma í 40 ár, en ætla má að þau séu nokkuð óljósari en áhrif kyndingar og beinnar notkunar. Stafar það helst af því að notandinn er fjær orkuuppsprettunni og hann sé síður meðvitaður um af hvaða meiði frumorkan sem nýtt er til raforkuvinnslunnar er sprottin. Ljósið sem stafar frá lampanum sem kveikt er á að kvöldi getur hvort heldur sem er átt uppruna sinn í fallvötnum eða orku úr iðrum jarðar eða jafnvel verið blanda af hvoru tveggja.

3.5.3 Umhverfisáhrif

Eins og öll nýting mannsins á náttúrunni hefur vinnsla jarðhita umhverfisáhrif í för með sér. Má þar nefna sjónræn áhrif, jarðrask, gaslosun frá virkjunum og áhrif á auðlindina sjálfa sem er til umfjöllunar í kafla 4. Sjónræn áhrif og jarðrask tengjast framkvæmdum en gaslosun og breytingar á auðlindinni tengjast hinsvegar rekstri virkjana og vinnslu. Um umhverfisáhrif jarðhitanýtingar vísast í Hrefnu Kristmannsdóttur (1997) og umsagnir faghópa rammaáætlunar (2010).

Gaslosun stafar af því að uppleyst kvikugös í jarðhitavökvanum losna úr læðingi við þá þrýstingslækkun sem á sér stað á leið til yfirborðs. Mest kveður að koldíoxíði og brennisteinsvetni. Styrkur gastegundanna í vökvanum er breytilegur eftir borholum og virkjanasvæðum. Heildarlosun koldíoxíðs frá jarðvarmavirkjunum nam um 0,185 milljón tonnum árið 2008, en heildarútblastur gastegundarinnar á landsvísu var um 3,289 milljón tonn árið áður af mannavöldum (Birna Hallsdóttir o.fl., 2009). Því má ætla að útblástur jarðvarmavirkjana nemi tæpum 6% af heildarkoldíoxíðlosun landsins. Sé tekið mið af stöðlum Alþjóða orkumálastofnunarinnar (IEA) nemur koldíoxíðlosun íslenskra jarðvarmavirkjana um 5-6% af losun olíukyntra virkjana erlendis. Útblástur koldíoxíðs frá jarðvarmavirkjunum var því um 3,1 milljón tonnum minni árið 2008 en hann hefði verið frá jafnstórum olíukyntum virkjunum. Jarðvarmavirkjanir losa einnig nokkurt magn H_2S og nam heildarlosun 31 ktonn árið 2008. Hér ber að halda til haga að fyrir nokkrum árum var gaslosun jarðvarmavirkjana ekki talin fram í losun af mannavöldum. Lá þar til grundvallar að jarðhitakerfi myndu hvort sem er bera þessi gös til yfirborðs, einkum þau sem liggja á suðurmarksferli, en svo er um flest háhitakerfin. Má segja að núverandi aðferð, að telja alla gaslosun inn í heildarlosun Íslands, sé þannig í samræmi við varúðarregluna sem sett var fram í aðurnefndri Ríó-yfirlýsingu í kafla 3.2 þó einungis fáar þjóðir telji slíka losun fram. Jarðvarmavirkjanir geta þó haft ýmis önnur umhverfisáhrif í för með sér s.s. áhrif á jarðmyndanir, fornleifar, landslag, gróðurfar, fuglalíf, lífríki sjávar og fjöru, smádýralíf og hveraörverur, loftgæði, hljóðvist, ferðamennsku og ekki síst samfélagsáhrif. Nánar er fjallað um umhverfisáhrif jarðvarmavirkjana í matsskýrslum fyrirhugaðra virkjana á vef Skipulagsstofnunar.

Umhverfisáhrif af vinnslu lághita eru vægari en af vinnslu háhita þar sem um hverfandi losun gastegunda er að ræða og yfirleitt ber minna á hitaveitum en jarðvarmavirkjunum. Lækkun í útblæstri koldíoxíðs vegna jarðhitakyndingar í stað olíukyndingar nam um 2,2 milljón tonnum árið 2008. Helstu umhverfisáhrif verða þar sem dælt er úr borholum á lághitasvæðum og volgrur og laugar hafa þornað. Sökum þess að sérstætt lífríki hitakærra örvera er víða til staðar í volgrum og laugum má leiða að því rök að dæling á lághitasvæðum, sem þurrkar upp hveru og laugar, vinni gegn markmiðum um líffræðilega fjölbreytni og kalli á mótvægisáðgerðir ef óttast er um útdauða einhverra tegunda.

Um þessar mundir fara á nokkrum stöðum fram prófanir á aðferðum til að fanga koldíoxíð frá mismunandi uppsprettum og dæla því djúpt niður í hentug berglög. Við Hellsheiðarvirkjun er t.d. stefnt að því að beisla það koldíoxíð sem kemur upp úr borholum með jarðgufu og dæla því aftur niður í lítt ummynduð basaltlög í útjaðri jarðhitakerfisins í Þrengslunum þar sem vonast er til að það bindist sem kalsít. Fjölbjóðlegu rannsóknarverkefni vegna þessa, CarbFix, var hleypt af stokkunum haustið 2007 (Hólmfríður Sigurðardóttir o.fl., 2010). Stefnt var að því að niðurdælingin hæfist nálægt áramótum 2009/2010. Enn hefur ekki orðið af því. Í Svartsengi er sömuleiðis verið að gera tilraunir með að framleiða metanól úr koldíoxíði sem eldsneyti fyrir ökutæki eins og gerð var grein fyrir í kafla 3.5.1. Í fyrsta áfanga verða framleiddar ríflega tvær milljónir tonna af metanóli með því að nýta þrjár milljónir tonna af koldíoxíði úr útblæstri frá virkjuninni í Svartsengi. Metanólinu verður svo blandað saman við eldsneyti fyrir bílaflota landsins (K.C. Tran og Albert Albertsson, 2010). Loks má nefna að í tengslum við CarbFix verkefnið á Hellsheiði mun brennisteinsvetni sem kemur með gufunni einnig verða fangað og skilað á ný niður í berglög utan jarðhitakerfisins. Hillir því undir tæknilega lausn á því hvítleiða vandamáli sem brennisteinsvetnislykt er mörgum.

4 SJÁLFBÆR JARÐHITAVINNSLA

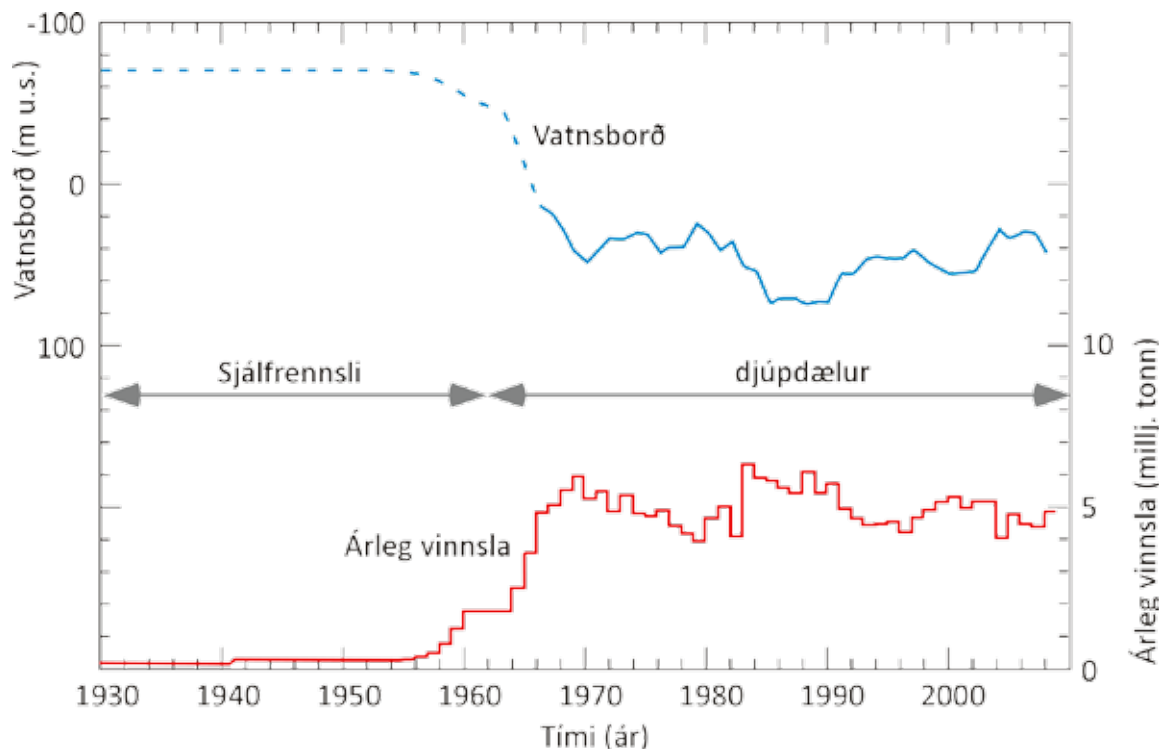
Í þessum kafla verður fjallað um þann þátt sjálfbærrar jarðhitanytingar sem snýr beint að jarðhitavinnslunni sjálfri og þar með að fyrsta markmiðinu í töflu 1. Nokkuð hefur verið fjallað um sjálfbæra vinnslu jarðhitans á undanförunum árum, bæði á innlendum og erlendum vettvangi. Samræmda skilgreiningu á sjálfbærni fyrir jarðhitann hefur þó vantað og menn notað hugtök að eigin geðþóttu. Þá má nefna að hugtökunum endurnýjanleiki og sjálfbærni er oft ruglað saman. Endurnýjanleiki lýsir eiginleikum orkulindar en hugtakið sjálfbær lýsir því hvernig vinnslu úr henni er háttað. Sem dæmi um nýlegar umfjallanir má nefna greinar Rybach og Mongillo (2006), Guðna Axelssonar o.fl. (2005b og 2006), Bromley o.fl. (2006), Valgarðs Stefánssonar og Guðna Axelssonar (2005), Sanyal (2005), Ungemach o.fl. (2005) og O'Sullivan og Mannington (2005) auk greinargerðar Gríms Björnssonar (2005). Þá er nýkomið út sérhefti tímaritsins *Geothermics* helgað sjálfbærri jarðhitanytingu (Mongillo og Axelsson, 2010).

Í kafla 4.2 er gerð grein fyrir skilgreiningu á hugtakinu *sjálfbær vinnsla jarðhita* sem faghópurinn hefur ákveðið að styðjast við. Þá verður fjallað um hvaða aðferðir koma helst til greina við sjálfbæra jarðhitavinnslu og nýtingu. Að mati faghópsins er þessi skilgreining bæði eðlileg og raunhæf, auk þess að vera í takt við Brundtland-skýrsluna (WCED, 1987). Skilgreiningin, sem hér er stuðst við, er hvorki byggð á fjárhagslegum sjónarmiðum né jarðfræðilegum aðstæðum. Hún setur ákveðin takmörk á vinnslu jarðhita, sem talið er að jarðhitakerfi þoli til lengri tíma litið. Má því segja að slík vinnslustefna sé í anda sterkar sjálfbærni að því gefnu að þróunin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn meginþátt sjálfbærrar þróunar.

Viðbrögð jarðhitakerfa við vinnslu, og þar með að miklu leyti afkastageta þeirra, stjórnast aðallega af því hvernig og hversu mikið þrýstingur í kerfunum lækkar við vinnslu. Lækkunin ræðst aðallega af: (a) stærð viðkomandi kerfis, (b) lekt bergs í kerfinu, (c) vatnsrýmd þess, en vatnsrýmd stýrir því hvernig vatnsforði jarðhitakerfis breytist við ákveðna þrýstingsbreytingu, (d) innstreymi í kerfið frá jöðrum og (e) jarðfræðilegri byggingu þess. Á grundvelli lækkunar þrýstings með vinnslu má flokka jarðhitakerfi gróflega í tvo flokka: Opin kerfi þar sem þrýstingur nær nýju jafnvægi við stöðuga vinnslu vegna innstreymis og lokuð kerfi þar sem þrýstingur lækkar stöðugt við vinnslu. Afkastageta jarðhitakerfa ákvarðast eðlilega einnig af orkuinnihaldi þeirra og hvort þau kólna með tímanum. Hitabreytingar í jarðhitakerfum eru reyndar afar hægar miðað við þrýstingsbreytingarnar og hafa verið óverulegar hingað til í flestum jarðhitakerfum, sem nýtt eru. Kólnun jarðhitakerfa verður aðallega af þremur ástæðum. Í fyrsta lagi kólna opin kerfi utan og ofan frá vegna kaldara innstreymis. Í öðru lagi gætu kerfi kólnað vegna niðurdælingar, en hennar er sérstaklega þörf í lokuðum kerfum. Þá geta tvífasa jarðhitakerfi kólnað staðbundið vegna þrýstingslækkunar og aukinnar suðu.

4.1 Vinnsloreynsla síðustu áratuga

Nú er komin nokkurra áratuga, jafnvel hálftrar aldar, reynsla á vinnslu jarðhita úr fjölmörgum jarðhitakerfum, bæði hér á Íslandi og víðar. Auk þess hafa reiknilíkön verið sett upp fyrir fjölda þeirra og með þeim leitast við að spá fyrir um framtíðarástand



Mynd 25: Vinnslu- og vatnsborðssaga jarðhitakerfisins í Laugarnesi í Reykjavík. Frá 1930 til u.þ.b. 1960 var sjálfrennsli úr grunnum holum nýtt en á sjöunda áratugnum var vinnslan tífölduð með borun djúpra vinnsluholna og dælingu með djúpöxuldælum.

kerfanna. Reynslan frá mörgum þessara svæða sem og líkanreikningar, hafa sýnt að með því að halda vinnslu innan ákveðinna marka er hægt að halda jarðhitakerfunum í jafnvægi í mjög langan tíma eða stýra má vinnslunni þannig að þrýstings- og hitabreytingar verði mjög hægar (Guðni Axelsson o.fl., 2005).

Gott dæmi um jarðhitavinnslu sem náð hefur nokkurn veginn jafnvægi er vinnslan á Laugarnessvæðinu í Reykjavík. Mynd 25 sýnir að þrýstingur í jarðhitageyminum var óbreyttur fyrstu 30 árin þegar vinnsla takmarkaðist við sjálfrennsli úr borholum. Á sjöunda tug síðustu aldar var farið að nota djúpdælur í Laugarnesi. Á þann hátt var vinnslan tífölduð, eins og fram kemur á myndinni. Við þessa breytingu á vinnslu-tilhögun lækkaði vatnsborð (þrýstingur) í jarðhitageyminum um eina 120 m. Síðastliðin 30 ár hafa þrýstingur og meðalvinnsla hins vegar haldist nokkuð stöðug. Þetta dæmi sýnir að jarðhitakerfið hefur fundið sér nýtt jafnvægi þó að vinnslan úr kerfinu hafi verið augin tífalt frá því sem var framan af. Þetta þýðir einnig að aðstreymi inn í jarðhitageyminn er nú u.þ.b. tíu sinnum meira en í upphaflegu ástandi. Jarðhitakerfið í Laugarnesi virðist vera nokkurn veginn í jafnvægi, þrátt fyrir þessa aukningu í vinnslu, og allt bendir til að hægt sé að viðhalda 5 – 6 Gl (160-190 l/s) vinnslu á ári í mjög langan tíma.

Ekki er vitað hvort hægt sé að draga þrýsting meira niður í jarðhitakerfinu í Laugarnesi án þess að kerfið beri skaða af, en auðsjáanlega er fyrir hendi eins konar jafnvægisástand við mun meiri vinnslu en samsvarar náttúrlegu frárennsli. Reyndar varð vart innrennslis sjávarmengaðs vatns í ákveðnar borholur á Laugarnessvæðinu þegar vinnslan var mest um miðbik níunda áratugar síðustu aldar. Það var túlkað þannig að

vinnslan væri farin að nálgast efri mörk vinnslugetu jarðhitakerfisins. Við því var brugðist með minnkandi dælingu. Fleiri dæmi eru um jarðhitakerfi þar sem nokkurs konar jafnvægisástand hefur náðst, bæði á Íslandi og erlendis (Guðni Axelsson o.fl., 2005b og 2010). Einnig eru fjölmörg dæmi um lághitakerfi á Íslandi þar sem vinnslan er enn langt undir vinnslugetu viðkomandi kerfis og vinnslan því klárlega sjálfbær. Oft eru þessi kerfi nýtt af litlum dreifbýlishitaveitum. Sem dæmi má nefna ýmis kerfi í þverbrotabeltum Suðurlands og Borgarfjarðar, kerfi á Vestfjörðum og kerfi á Norðurlandi (t.d. í Skagafirði, Hjalteyri í Eyjafirði og á Hveravöllum í Reykjahverfi).

Lærdómsríkt dæmi um ágenga vinnslu er Geysissvæðið í Kaliforníu. Þegar orkukreppan komst í algleyming undir 1980 hófst kapphlaup um að nýta aðrar orkulindir en hinar hefðbundnu, og fleiri fyrirtæki hófu að vinna jarðgufu á Geysissvæðinu umfram þau 943 MW sem orkufyrirtækið PG&E rak með góðum árangri. Árið 1998 hafði uppsett afl tvöfaldast og í stað eins voru nú komin sex orkufyrirtæki. Á þessum tíma fór að halla á ógæfuhlið. Þrýstingur í jarðhitakerfinu hriðlækkaði vegna vatnspurrðar. Ekki var farið nógu varlega, og orkunefnd Kaliforníu, sem gefur út leyfi til vinnslu, var ekki nógu gagnrýnin á stöðuna (Barker, 2000; Goyal og Box, 2002; Guðmundur Pálmason, 2005). Annað dæmi er Laugalandssvæðið í Eyjafirði. Þar var vatnspörf Hitaveitu Akureyrar meiri en hefðbundnar borholudælur gátu annað vegna niðurdráttar. Við þessu var brugðist með fjölgun vinnslusvæða hitaveitunnar og niurdælingu bakrásarvatns. Þá má nefna að niðurdráttur í jarðhitakerfinu á Hofstöðum við Stykkishólm hefur vaxið stöðugt með tímanum, vegna takmarkaðs innstreymis í kerfið. Með niurdælingu bakrásarvatns hefur hægt verulega á niurdættinum og nálgast hann nú jafnvægi. Einnig má nefna að með tilkomu Nesjavallavirkjunar var hægt að draga úr vinnslunni á hinu afkastamikla jarðhitakerfi í Mosfellssveit, sem nú er í góðu jafnvægi.

Að síðustu eru örfá dæmi þess að jarðhitakerfi hafi kólnað vegna innstreymis kaldara grunnvatns þannig að breyta hefur þurft vinnslutilhögun viðkomandi hitaveitu. Dæmi er jarðhitakerfið í Þorleifskoti við Selfoss. Þar hefur annars vegar verið brugðist við með dýpri fódringum og hins vegar með nýju vinnslusvæði í Ósabotnum. Annað dæmi er Elliðaársvæðið í Reykjavík, en þar var hægt að stöðva kólnunina eftir tilkomu Nesjavallaveitu með því að minnka vinnsluna.

4.2 Sjálfbær jarðhitavinnsla – skilgreining

Vinnslureynsla síðustu áratuga bendir til þess að fyrir sérhvert jarðhitakerfi ætti að vera til einhvers konar vinnsluþröskuldur þess eðlis að ef vinnslan er undir þessum þröskuldi þá sé hægt að halda henni stöðugri í mjög langan tíma. Þannig eru takmörk fyrir því hve mikinn jarðhita er hægt að vinna úr hverju jarðhitakerfi ef jafnvægi á að haldast, eða breytingar að vera hóflega hægar.

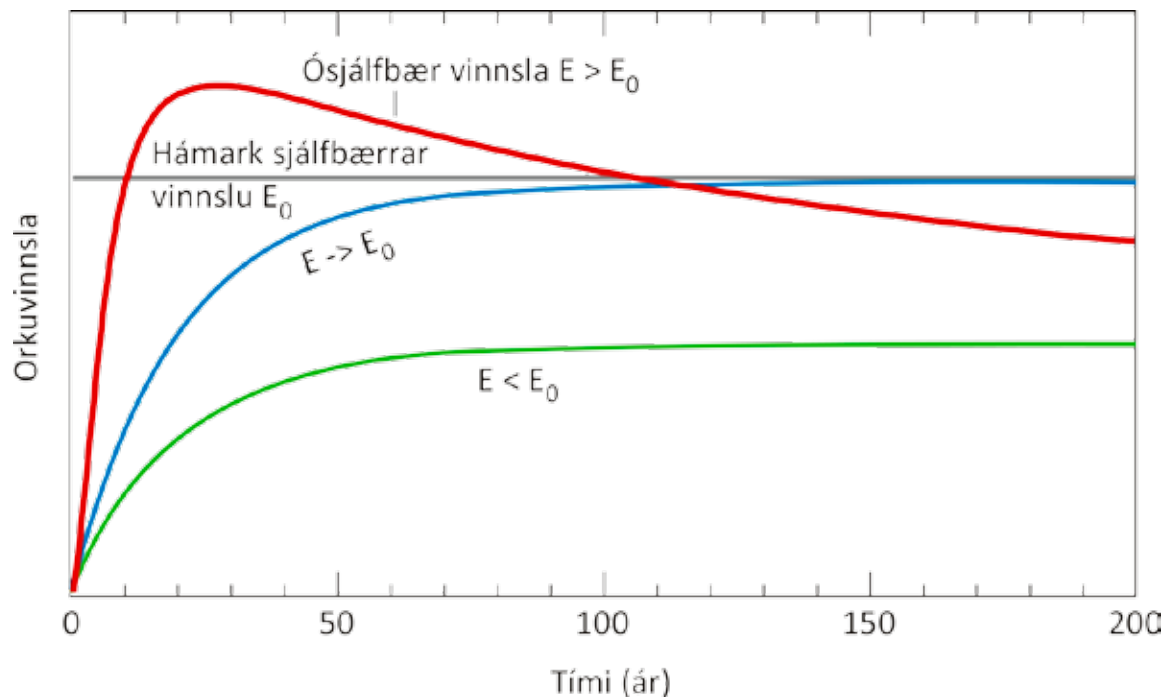
Einfaldast er að líta á sjálfbæra vinnslu úr auðlind sem sömu vinnslu í langan tíma. Spurningin er hve langan tíma ber að miða við í tilfelli jarðhitans og þá einnig hve mikla breytingu á eðlisástandi viðkomandi kerfis ætti að leyfa. Í sumum tilfellum hefur verið stuðst við 20 – 30 ára afskriftartíma jarðhitavirkjana sem viðeigandi tímakvarða. Þá hefur jarðhitavinnslu stundum verið líkt við námuvinnslu, sem ásamt þessum stutta tímakvarða hefur sáð efasemdum um að hægt sé að nýta jarðhita á sjálfbæran hátt. Á hinn bóginn má hugsa sér tímakvarða með jarðsögulega tilvísun, t.d. tímann frá lokum síðustu ísaldar (10.000 ár) eða jafnvel miklu lengri tíma. Segja má að það sé einnig óraunhæfur tímakvarði, borinn saman við tímakvarða mannlegra athafna. Viðeigandi

tímakvarði liggur því einhvers staðar þarna á milli (Guðni Axelsson o.fl., 2001a og 2001b; Valgarður Stefánsson, 2000).

Sérfræðingahópur á vegum Orkustofnunar lagði til árið 2001 skilgreiningu á hugtakinu *sjálfbær vinnsla jarðhita á einu jarðhitasvæði* (Guðni Axelsson o.fl., 2001a og 2001b). Hún tekur hvorki til hagrænna atriða, umhverfismálefna né tækniþróunar, en búast má við að slíkir þættir sveiflist umtalsvert í tímans rás. Faghópurinn hefur ákveðið að styðjast við þá skilgreiningu en leggur til að í stað þess að miða við 100-300 ár eins og sérfræðingahópurinn lagði til árið 2001 að þá sé miðað við að lágmarki 100 ár vegna þeirrar miklu óvissu sem á allan hátt fylgir langtímaspám:

Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluaðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu frá kerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sé vinnsluálag meira en E_0 , er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en eða jöfn E_0 er skilgreind sem sjálfbær vinnsla en vinnsla umfram E_0 er ekki sjálfbær.

Skilgreining þessi tekur til allrar vinnanlegrar jarðhitaorku, og er því í raun háð eðli viðkomandi jarðhitakerfis. Hún tekur hins vegar hvorki til álagsþátta og nýtni, breytinga sem verða kunna á kerfinu, né hagrænna atriða, umhverfismálefna og tækniþróunar, en t.d. má búast við því að E_0 vaxi með tímanum, m.a. vegna dýpri borana og vanmats á stærð kerfanna með bættum rannsóknum og leit. Þá er skilgreiningin einnig háð vinnsluaðferð sem getur falið í sér sjálfrennsli, dælingu, niðurdælingu eða vinnslu með hléum. Auk þess má segja að E_0 sé háð orkuverði því það ræður miklu um hversu þróuðum vinnsluaðferðum er hægt að beita. Mynd 26 sýnir inntak skilgreiningarinnar í einföldum dráttum.



Mynd 26: Skýringarmynd á hugtakinu „sjálfbær vinnsla jarðhita“. E_0 er hámarksvinnslustig sjálfbærrar vinnslu.

4.3 Endurnýjanleiki

Orkulindum heimsins er jafnan skipt í tvo meginflokka, endanlegar og endurnýjanlegar. Meginorkulindir okkar Íslendinga, jarðhiti og vatnsorka, eru flokkaðar sem endurnýjanlegar, m.a. af þeim alþjóðastofnunum sem láta sig orkumál varða, samanber tilskipun Evrópuþingsins og -ráðsins 2009/28/EB. Reyndar er endurnýjanleika og sjálfbærni mjög oft ruglað saman, og brýnt að gera þar greinarmun eins og áður hefur komið fram.

Ástæða þess að jarðhitinn er flokkaður með endurnýjanlegum auðlindum er sú að honum er viðhaldið af samfelldum náttúrlegum varmastraumi. Því er hann betur talinn eiga heima í þeim flokki, en í flokki endanlegra orkulinda. Þessi flokkun er þó ekki svo einföld því að jarðhiti er í eðli sínu tvíþættur, þ.e. samsettur af annarsvegar varmastraum sem berst úr iðrum jarðar með varmaleiðingu og varmaburði kviku eða vatns og hinsvegar orkuforða sem bundinn er í jarðskorpunni. Endurnýjun þessara tveggja þátta er mjög mismunandi. Sá hluti orkuforðans, sem endurnýjast með varmaleiðingu, endurnýjast svo hægt að á tímakvarða eins mannsaldurs ætti hann frekar að teljast endanlegur en endurnýjanlegur. Vægi þessara tveggja þátta í jarðhitaorkuvinnslu er bæði háð jarðhitakerfi og vinnsluálagi. Í sumum kerfum er vægi orkuforðans yfirgnæfandi, en í öflugustu háhitakerfunum í gosbeltum Íslands er vægi varmastraumsins sem berst með kviku yfirgnæfandi.

Ef orkuvinnsla úr jarðhitakerfi er innan sjálfbærra marka (sbr. skilgreiningu að framan) má reikna með að tiltölulega hægt sé gengið á orkuforðann og að endurnýjun jarðhitaorkunnar í kerfinu haldist nokkurn veginn í hendur við vinnsluna. Hér má aftur nefna dæmið frá Laugarnesi, sem sýnir að við tíðöldun vinnslunnar hefur innstreymi í jarðhitageyminn einnig u.þ.b. tífaldað án þess að kólnun eigi sér stað. Í þessu tilfalli endurnýjar jarðhitageymirinn sig þannig í réttu hlutfalli við núverandi vinnslustig. Til þess að viðhalda þessu stöðuga ástandi, sem endurspeglast í nær óbreyttu vatnsborði og hita í langan tíma, verður að vera fyrir hendi viss endurnýjanleiki í kerfinu. Þó er líklegt að áhrifasvæði (rúmmál) jarðhitavinnslunnar sé mjög stórt og að endurnýjunin sé að einhverju leyti á kostnað orkuforða í ytri og dýpri hlutum jarðhitakerfisins. Sennilegt er að núverandi vinnsla úr jarðhitakerfinu í Laugarnesi sé mjög nálægt E_0 . Ef vinnsla úr jarðhitakerfi er hins vegar mjög lítil miðað við E_0 er erfiðara að greina hvort auðlindin er endurnýjanleg eða hvort hún gangi á mikinn orkuforða. Það kæmi ekki í ljós fyrir en annað hvort vinnslan væri aukin, eða eftir margra áratuga vinnslu.

Á mörgum lághitasvæðum á Íslandi er vinnslan lítil, vegna lítils orkumarkaðar á viðkomandi svæði. Vinnslan úr þeim jarðhitakerfum er væntanlega mun minni en E_0 og jafnvel í jafnvægi við endurnýjun orkuforða þeirra. Á þeim háhitasvæðum sem nýtt eru í stórum stíl til að mæta orkuþörfum stórnotenda er vinnslan hins vegar líklegast af sömu stærðargráðu og E_0 , en endurnýjunin samt öflug vegna eðlis jarðhitakerfanna.

4.4 Tilhögun sjálfbærrar jarðhitavinnslu og nýtingar

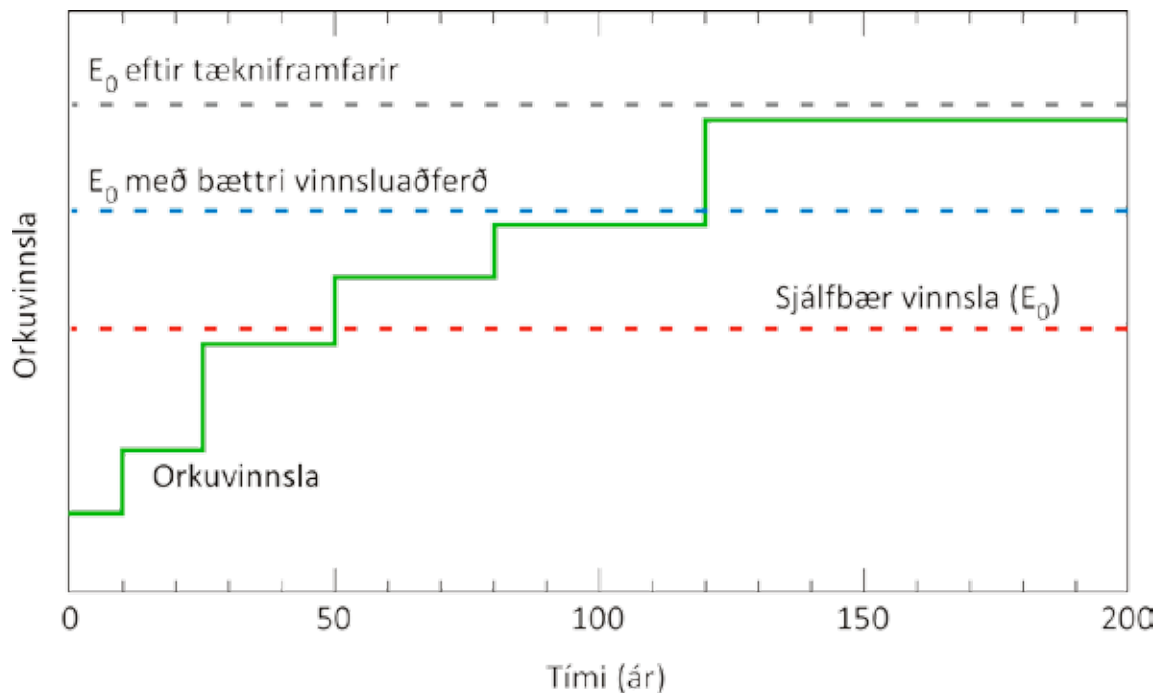
Haga má jarðhitavinnslu og nýtingu á mismunandi vegu þó miðað sé við skilgreininguna hér að framan. Í því sambandi þarf að hafa eftirfarandi í huga:

- (a) Sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa er ekki þekkt við upphaf vinnslu. Hana má hins vegar meta samhliða vinnslu út frá fyrirliggjandi gögnum um innri gerð og eðli kerfanna og gögnum um viðbrögð þeirra við vinnslu, eins og fjallað verður um hér á eftir. Slíkar áætlanir verða áreiðanlegri eftir því sem vinnslusaga viðkomandi jarðhitakerfis lengist.
- (b) Þá er sjálfbæra vinnslugetan háð vinnslutækninni, jafnt vinnsluaðferðinni sem beitt er og tækniframförum. Til dæmis má nefna að í flestum tilfellum eykur niðurrennsli/niðurdæling affallsvatns vinnslugetu jarðhitakerfa a.m.k. til skemmri tíma litið (Guðni Axelsson, 2004). Þá eru líkur á að með dýpri borholum í framtíðinni (3-5 km í stað 2-3 km í dag) megi vinna meiri orku úr mörgum jarðhitakerfum, ekki síst háhitakerfum tengdum eldstöðvum (Guðmundur Ó Friðleifsson o.fl., 2005).

Valgarður Stefánsson og Guðni Axelsson (2005) fjalla um hvernig megi sameina tímalengdina í skilgreiningunni hér að ofan og þá staðreynd að hagkvæmniathuganir sjá að öllu jöfnu aðeins nokkra áratugi fram í tímann. Þeir benda á að með því að auka orkuvinnslu úr jarðhitakerfi í hæfilegum skrefum megi slá tvær flugur í einu höggi. Annars vegar geti slík skref hæglega verið hagkvæm vegna hlutfallslega minni upphafs fjárfestingar. Hins vegar nýtast slík skref til þess að meta sjálfbæru vinnslugetuna. Í skrefunum megi áætla hæfilega stærð næsta skrefs, safna sífellt betri gögnum til áætlana og þannig nálgast sjálfbæru mörkin í áföngum. Fjallað verður nánar um skrefaupbyggingu hér að neðan.

Mynd 27 er einföld skýringamynd þar sem reynt er að sýna hvernig sjálfbær vinnslugeta er háð vinnsluaðferð og tækniframförum. Auk þess er sýnt hvernig auka má orkuvinnsluna í skrefum upp að sjálfbæru mörkunum eins og þau breytast með tímanum.

Ofangreind umfjöllun vísar til tveggja sjálfbærra vinnsluaðferða, annars vegar vinnsluaukningar í skrefum upp að sjálfbæru mörkunum og hins vegar nýtingar þar sem vinnslan er stöðug allt frá upphafi. Til viðbótar þessum aðferðum má hugsa sér vinnslu, sem fer tímabundið yfir sjálfbæru mörkin, annað hvort í fyrstu eða þá með hléum, og er þannig ágeng um tíma (veik sjálfbærni). Meðalvinnslan til lengdar yrði samt undir sjálfbæru vinnslumörkunum. Líkanreikningar hafa sýnt að eftir tímabil ágengrar vinnslu endurheimta jarðhitakerfi gjarnan að meira eða minna leyti fyrra ástand, þ.e. breytingin vegna vinnslunnar er að verulegu leyti afturkræf. Tímabundin ágeng vinnsla getur samræmst sjálfbærri þróun ef henni fylgir verulegur efnahagslegur og þjóðfélagslegur ávinningur, t.d. í þróunarlöndum með þeim fyrirvörum um veika sjálfbærni sem áður hafa verið nefndir. Faghópurinn kýs að kalla slíka tilhögun lotubundna vinnslu og á hún einkum við um virkjun háhitasvæða. Í lotubundinni vinnslu eru háhitasvæðin virkjuð í stórum skrefum, sem ólíklegt er að séu sjálfbær skv. skilgreiningunni að framan, en eru mjög hagkvæm vegna stærðar sinnar og til þess ætluð að mæta orkuþörf sem vex í stórum skrefum. Eins getur virkjunarskref farið yfir sjálfbæru mörkin vegna þess hve illa þekkt þau eru við upphaf nýtingar háhitasvæðis. Með lotubundinni vinnslu á einstökum vinnslusvæðum má nálgast markmiðið um sjálfbæra nýtingu, að því

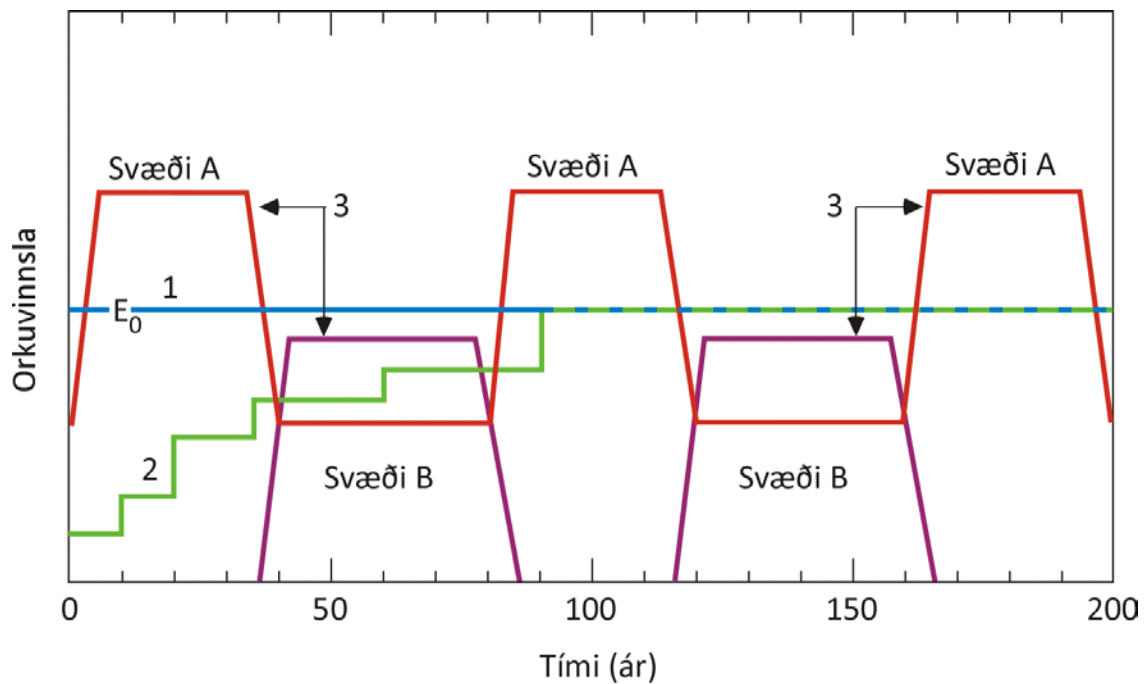


Mynd 27: Stílfærð skýringarmynd sem sýnir hvernig sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa, E_0 , er háð vinnsluaðferð og tækniframförum. Jafnframt sýnir myndin hvernig auka má orkuvinnsluna í skrefum samkvæmt hugmyndum Valgarðs Stefánssonar og Guðna Axelssonar (2005).

gefnu að annað vinnslusvæði sé tiltækt þegar dregið er úr vinnslunni á því fyrri. Ef nýtingin skilar í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata getur hún samræmst veikri sjálfbærni. Vinnsluaðferðirnar sem um er að ræða og leitt geta til sjálfberrar jarðhitanytingar eru þá þessar helstar:

- (1) Stöðug vinnsla í a.m.k. 100 ár, þó með sveiflum vegna tímabundins álags eins og árssveiflum. Þetta er varla raunhæfur kostur vegna þess að sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa er ekki þekkt fyrirfram. Því þarf í raun e.k. reynslutímabil í upphafi þar til sjálfbær vinnslugetan hefur verið metin (sterk sjálfbærni).
- (2) Vinnsla aukin í nokkrum þrepum þar til sjálfbær vinnslugeta hefur verið metin. Vinnslan er þá undir sjálfbæru mörkunum (sjá mynd 27) (sterk sjálfbærni).
- (3) Lotubundin vinnsla, þ.e. mikil vinnsla í nokkra áratugi (um 50 ár), sem jafnvel teldist ágeng til lengdar, með tímabilum minni vinnslu eða jafnvel algjörum hléum (einnig um 50 ár, sjá mynd 28). Jarðhitakerfið myndi þá ná að jafna sig að miklu leyti þegar dregið yrði úr vinnslunni, eða í hléunum. Vinnsla getur þó aldrei orðið svo ágeng að hún valdi varanlegum skaða á jarðhitakerfinu, skaða sem vinnsla undir sjálfbæru mörkunum myndi ekki valda. Ef einstök vinnslusvæði eru nýtt á lotubundin hátt þurfa að vera tiltæk önnur svæði, sem nýta mætti meðan dregið væri úr vinnslu á þeim fyrrnefndu, sjá lið (ii) hér að neðan (veik sjálfbærni). Þannig héldist nokkurn veginn stöðug vinnsla samanlagt úr jarðhitakerfunum, sem nýtt væru þannig saman.

Mynd 28 sýnir einfalda skýringarmynd af vinnsluaðferðunum. Algenzt er að aðferð (2) sé beitt við virkjun háhitasvæða og má nefna bæði Nesjavelli og Svartsengi sem íslensk



Mynd 28: Skýringarmynd sem sýnir dæmi um hvernig nýta má jarðhitakerfi sjálfbært á mismunandi vegu. Tölurnar vísa í vinnsluaðferðir sem fjallað er um í textanum. Ekki er gert ráð fyrir hækkun E_0 með tíma vegna vinnslu- og tækniframfara. Þá er í aðferð (3) gert ráð fyrir að orka fáiast frá öðru vinnslusvæði (svæði B) meðan upphaflega vinnslusvæðið (svæði A) er hvílt.

dæmi, þó virkjun hvorugs svæðisins hafi markvisst stefnt að því að fara ekki yfir E_0 . Ekki er hægt að setja fram algilda áætlun fyrir skrefauppbýggingu því jarðhitakerfin eru svo mismunandi. Þannig hæfa misstór skref mismunandi svæðum og einnig mismunandi kröfum orkumarkaðarins. Fyrsta skref gæti t.d. byggt á þeirri orku sem telst tiltæk eftir borun nokkurra fyrstu djúpu rannsóknarholnanna, t.d. miðað við tvöfalt afl þeirra. Einnig er hugsanlegt að fyrsta skrefið felist í umfangsmikilli álagsprófun án virkjunar. Líklega er eitthvað um það að vinnsla á háhitasvæðum í heiminum sé ágeng skv. skilgreiningunni sem hér er stuðst við. Í fyrsta lagi í tilfellum þar sem orkuþörfin er mikil, eða hún hefur vaxið í stórum skrefum. Í öðru lagi vegna þess að sjálfbæra vinnslustigið hefur verið óþekkt, og langtíma vinnslugetan ofmetin, við upphaf vinnslu. Í þriðja lagi í tilfellum þar sem ætlunin hefur einfaldlega verið að vinna jarðhitann á ágengan hátt hinn stutta afskriftartíma virkjana. Einnig má benda á að Guðni Axelsson o.fl. (2006) vísa í fjórðu leiðina sem miðast við stöðuga vinnslu töluvert undir sjálfbæru mörkunum eftir upphafstímabil ágengrar vinnslu eins og í aðferð (3).

Benda má á að skoða þarf sjálfbæra vinnslu í víðara samhengi en fyrir einstök jarðhitasvæði óháð öðrum. Þá má nota aðferðirnar, sem hér hafa verið til umfjöllunar, til þess að meta sjálfbæra vinnslugetu allra þekktra jarðhitasvæða í ákveðnum landshluta, eða jafnvel á landinu öllu. Hafa þarf eftirfarandi í huga:

- (i) Við langtíma vinnslu má reikna með þrýstingssamgangi milli aðliggjandi vinnslusvæða, jafnvel yfir tugi km.
- (ii) Ef einstök vinnslusvæði eru nýtt lotubundið, og á ágengan hátt um tíma, þurfa að vera tiltæk önnur svæði, sem nýta má meðan dregið er úr vinnslu á þeim fyrrnefndu, eða meðan þau eru hvíld (mynd 28).

- (iii) Ef þróun jarðhitavinnslu í ákveðnum landshluta á hins vegar að fylgja þrepa-hugmyndinni verður væntanlega þörf á því að vinnsla sé aukin samtímis á mörgum svæðum í litlum þrepum fyrir stórkaupendur.

4.5 Mat á sjálfbærri vinnslugetu

Líkanreikningar, sem gerðir eru á grundvelli tiltækra upplýsinga um gerð og vinnslu-viðbrögð jarðhitakerfa, einnig kallaðir hermireikningar, eru að mati faghópsins öflug-asta tækið til þess að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa. Þeir nýtast einnig til að meta hvernig best er að haga vinnslunni í framtíðinni og til að meta áhrif mismunandi vinnslutækni, eins og niðurrennsli/niðurdælingar, og hugsanleg áhrif milli nálægra kerfa við langtíma vinnslu. Hins vegar er enn ekki komin fram örugg forðaðfræðiaðferð til að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitasvæða, t.d. með jarðeðlisfræðilegum mælingum, áður en í þau er borað (*e. green field*). Vinnslugeta jarðhitakerfa verður því ekki ákvörðuð af öryggi út frá yfirborðsummerkjum og –mælingum einum saman.

Vinnslugeta jarðhitakerfa fer eftir stærð kerfisins, vatnslekt og hitastigi. Þar að auki þarf nægjanlegt vatn að hafa aðgang að kerfinu. Lághitakerfin eru misvel opin fyrir að-streymi og niðurdráttur í þeim mismikill af völdum vinnslu. Þau grunnstæðustu eru við-kvæm fyrir kólnun af völdum örara aðstreymis við vinnslu. Aðstreymi háhitakerfanna kemur djúpt að og frá hlið og þó einkum langs eftir sprungukerfum sem þau tengjast. Kerfin eru þétt ofan til og þess vegna rennur grunnvatnið ekki raleiðis niður. Þar sem aðstreymið er sjór (Reykjanes) eða sjóblanda (Eldvörp-Svartsengi) er það tregara vegna útfellingar anhydríts. Niðurdráttur verður meiri við vinnslu og gufupúði verður til ofan suðuborðs, sem nýst getur tímabundið til aukinnar gufuvinnslu.

Fyrsta nálgun við mat á vinnslugetu háhitasvæðanna hefur til skamms tíma falist í að miða við flatarmál háviðnámskjarna epídót- og klórítbeltis á 800 m dýpi til að áætla vinnslugetu (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 2006). Viðnámsmælingum verður þó að treysta með varúð. Hvort tveggja er að hefðbundnar mælingar (t.d. TEM) skynja sjaldnast niður í sjálft vinnsludýpið og svo hitt að rafviðnám ræðst meira af ummyndun en berghita. Viðnámsmælingarnar greina ekki í sundur útkulnuð háhitakerfi og heit virk kerfi ef lagskipting ummyndunar er sú sama í báðum. Með samanburði við aðra rannsóknarþætti má sneiða vafasömustu skákirnar af og minnka óvissuna. Þar er einkum byggt á efnahita í hveragasi og djúpvatni og jarðfræðilegri þróun í eldvirkni, kortlagningu á smáskjálftum og gerð efsta hluta skorpunnar út frá skjálftamælingum. Á þremur háhitasvæðum er lítil (Gjástykki, Brennisteinsfjöll) eða engin (Hrúthálsar) hveravirkni. Í Gjástykki er hún þó næg til að gefa fyrirheit um yfir 260°C heitt jarðhitakerfi. Í Brennisteinsfjöllum skortir á rannsóknir, og í Hrúthálsum er lítið um ummerki á yfirborði nema útkulnaða ummyndun.

Algengast er að yfirborðsrannsóknir skili niðurstöðum um líklegt flatarmál og hitastig jarðhitakerfis. Þá hjálpar samanburður við önnur þekkt og virkjuð jarðhitakerfi. Þessar rannsóknir eru þá grunnur ákvörðunar um að bora fæinar djúpar holur, sem er ætlað að kanna djúphita og lekt jarðhitakerfisins sem er til rannsóknar. Eins þurfa rannsóknirnar að gefa til kynna nægilega vænlegt svæði til að orkufyrirtækið, sem vill fjármagna frekari boranir, geti endurheimt fjárfestinguna síðar meir. Rannsóknarboranir skila jafnframt mikilvægum gögnum inn í rúmmálslíkön af vinnslugetu jarðhitakerfisins. Í rúmmálslíkönum er einfaldlega lítið á jarðhitakerfið sem lokaðan kassa af ákveðinni þykkt, flatarmáli og hita. Vökvinn í lokaða líkaninu er síðan dreginn gegnum virkjun yfir ákveðið árabíl og þannig metið hvaða stærð á virkjun svæðið getur borið.

Furðualgengt er að svona aðferðir skili á bilinu 10-20 MW_e afkastagetu á hvern ferkílómetra vinnslusvæðis sem er yfir 240°C (Sarmiento og Grímur Björnsson, 2007).

Reynslan hefur sýnt að varasamt er að ákvarða vinnslusvæði háhita þröngt á frumstigi rannsókna og vinnslu eða gefa sér forsendur út frá huglægu mati á þeim þáttum sem mestu ráða um vinnslugetuna. Slíkt er ekki tímabært fyrr en þekking á svæðunum er studd með beinum mælingum í borholum. Dæmi um þetta eru fjögur af virkjuðum háhitasvæðum landsins. Vinnslueiginleikar Kröflusvæðisins reyndust ólíkir því sem reiknað var með þegar virkjun var hönnuð. Á vinnslusvæði Hellsheiðarvirkjunar reyndust vinnslueiginleikar norðausturhlutans (Skarðsmýrarfjalls) lakari en fyrirfram var búist við, meðan á suðausturhlutanum við Gráuhnúka og Hverahlíð reyndust þeir miklu betri. Svartsengis-Eldvarpakerfið reyndist heitast í Eldvörpum, sem í upphafi var talið í jaðri kerfisins og Reykjaneskerfið reyndist lokaðra og niðurdráttur í því við vinnslu meiri og hraðari en við var búist. Tilgangur með fyrstu borunum er að fá vitneskju um vinnslueiginleikana. Þess vegna er yfirleitt nauðsynlegt að bora holur af vinnslugerð víðar en á einum borteig til að fá nauðsynlegar upplýsingar sem byggt yrði á við ákvörðun um stað og fyrsta áfanga virkjunar. Til að afla þessarar vitneskju þarf einkum tvennt: Tíma til rannsókna og aðgengi að svæðunum vegna rannsóknarborana. Hvort tveggja er naumt skammtað. Tíminn sem þarf til rannsóknarborana og prófana telst í árum þegar um nýtt svæði er að ræða og því getur skipt máli að orkufyrirtækjunum sé veitt heimild til könnunar nokkrum árum áður en til ákvörðunar kemur um uppbyggingu orkuvera.

Langsótt er að meta vinnslugetu nýrra svæða með flóknum reiknilíkönum. Til þess liggur sú ástæða að flókin reiknilíkon hafa ekki forspárgildi nema verulegt gagnamagn styðji við kvörðun þeirra. Því er ekki að heilsa snemma í langri rannsóknasögu á háhitasvæði. Líkansmiðir verða því að styðjast við eigin reynslu og þekkingu, sem að sama skapi sveigir reiknilíkonin að þeirra sérvisku sem þarf ekki að vera sú eina rétta. Þá er líka sú hættu fyrir hendi að enn eigi eftir að gera uppgötvanir um innri gerð og ástand jarðhitakerfisins sem fella á reiknilíkan að. Slíkt getur haft áhrif á spár þess. Hér má taka sem dæmi að frumgerðir nákvæmra reiknilíkana Nesjavalla og Hellsheiðar voru kvarðaðar með borholum sem eru staðsettar utan við heitustu hluta jarðhitakerfanna. Líkonin voru því of köld og spáðu þar með lægra vermi og minni vinnslugetu en síðar kom í ljós (Sarmiento og Grímur Björnsson, 2007).

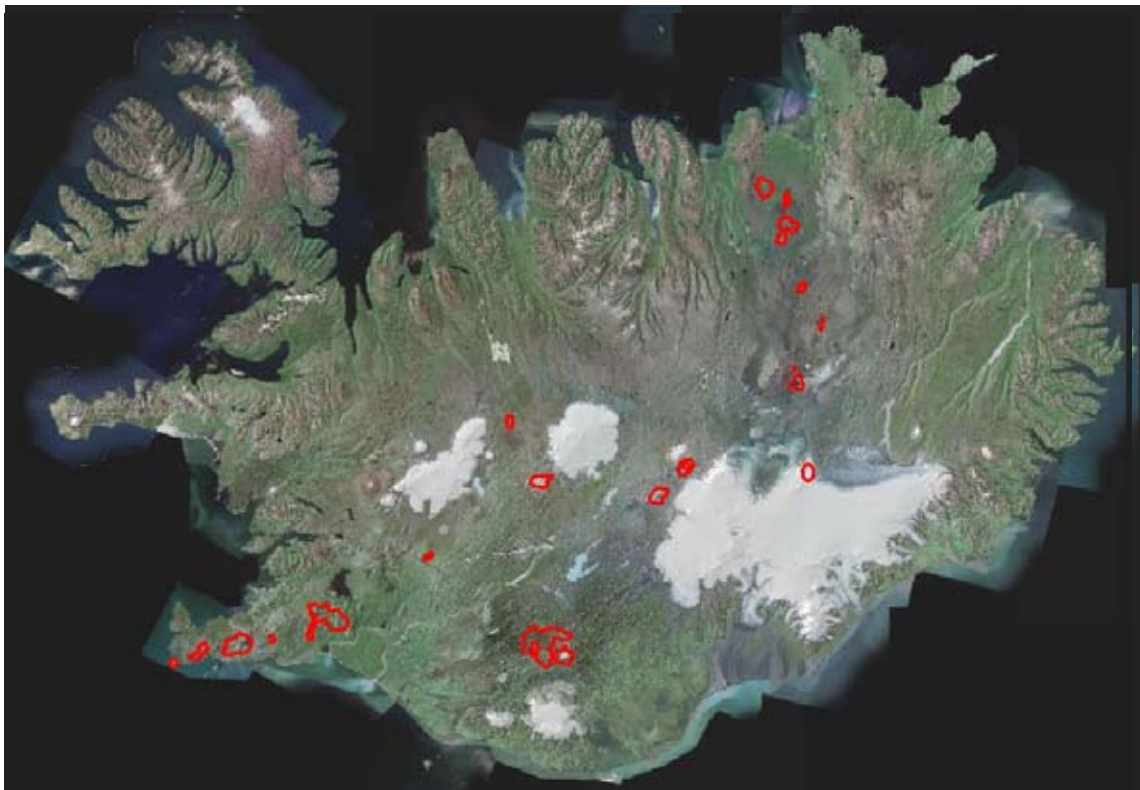
Jarðhitakerfi með margra ára eða áratuga vinnslusögu og 10-50 djúpum borholum ber hins vegar að meta með nákvæmum reiknilíkönum. Vinnsluspár geta þá náð til allt að 100 ára. Þá eru komin fram grundvallargögn um einn mikilvægasta eiginleikann í langtímavinnslugetu jarðhitakerfis, þ.e.a.s. hvernig og þá hve hratt varmi og massi berst til vinnslusvæða frá ytri jöðrum jarðhitakerfanna. Hér eru reiknilíkonin vel hæf til að spá fyrir um þennan eiginleika jaðranna, þ.e. að bæta upp það sem af er tekið. Hann er trúlega sá almikilvægasti í mati á sjálfbæru vinnslugetunni E₀. Jafnframt því að meta aðstreymið eru reiknilíkonin öflug verkfæri til að staðsetja hentug niðurdælingarsvæði og meta hvort og þá hvernig kæling berst frá þeim til vinnslusvæða. Loks ber að nefna að vel skorðuð reiknilíkon geta metið hvernig og þá hve hratt jarðhitakerfi jafna sig ef tekin er ákvörðun um það á síðari stigum að stöðva rekstur einstakra virkjana. Þannig má hugsanlega endurheimta jafngóða auðlind að ákveðnum hvíldartíma liðnum. Svona rannsókn hefur til að mynda þegar verið gerð í reiknilíkani Hengils (Grímur Björnsson, 2007). Í heild sinni má því telja að vel kvörðuð og rekin reiknilíkon af jarðhitakerfum, sem hafa verið í samfelldri vinnslu í mörg ár, séu grundvöllurinn að mati á sjálfbærri vinnslugetu til 100 ára eða lengur.

4.6 Ísland í heild

Hér að ofan var lýst þeim aðferðum sem beita má til að meta sjálfbæra vinnslugetu einstakra jarðhitakerfa. Erfitt er að beita þeim af nákvæmni fyrir Ísland í heild, bæði vegna mikils fjölda lítt rannsakaðra jarðhitakerfa og vegna jarðhitaorku sem væntanlega er að finna utan þekktra jarðhitakerfa og ekki hefur enn verið rannsökuð.

Til þess að leggja einhvers konar tölulegt mat á sjálfbæra vinnslugetu jarðhitaauðlindarinnar í heild sinni má styðjast við áætlað varmastreymi um landið og áætlaðan orkuforða jarðskorpunnar (kafla 2.3). Síðastaði varmastraumurinn er áætlaður um 30 GW_{th} (mynd 9). Færa má rök fyrir því að jarðhitavinnslu af þeirri stærðargráðu væri hægt að viðhalda mjög lengi á Íslandi, þ.e. vinnslan væri sjálfbær. Þessi varmastraumur hefur verið, og mun haldast, nokkurn veginn óbreyttur í mjög langan tíma, margfalt lengri tíma en öldin sem skilgreiningin í kafla 4.2 miðar við. Auðvitað er aðeins hægt að fanga og nýta hluta varmastraumsins. Hrávarmavinnsla af stærðargráðunni 30 GW_{th} í 200 ár svarar reyndar aðeins til um 0,015% af orkuforða jarðskorpunnar niður á 10 km dýpi og aðeins til um 0,2% bundinnar orku niður á 3 km dýpi.

Einnig má bera varmaflæðið á landsvísu saman við frumorkunotkun jarðhita sem jafngilti um 5 GW_{th} varmaflæði árið 2009. Með stækkun jarðvarmavirkjana um 1000 MW_e gæti frumorkunotkun aukist og svarað til 15 GW_{th} varmaflæðis. Með virkjun nær allra háhitasvæða, sem til skoðunar eru hjá rammaáætlun, gæti frumorkunotkun jafngilt yfir 40 GW_{th} varmaflæði eða tæp 0,3% bundinnar orku niður á 3 km dýpi miðað við 200 ára nýtingu og 3% bundinnar orku miðað við nýtingu í tvö árþúsund.



Mynd 29: Afmörkun háhitasvæða sem rammaáætlun hefur til skoðunar út frá viðnámsmælingum og/eða yfirborðsummerkjum (Orkustofnun, 2009b).

Orkustofnun hefur lagt gróft mat á vinnslugetu þekktra háhitasvæða Íslands til raforkuvinnslu (Jónas Ketilsson o.fl., 2009). Matið byggir á yfirgripsmiklum viðnámsmælingum á nær öllum háhitasvæðunum. Með viðnámsmælingunum má afmarka háviðnámskjarna þar sem hitastig hefur náð yfir 230-240°C á einhverjum tíma. Mat á vinnslugetu allra svæðanna byggir á nýlegum áætlunum um vinnslugetu nokkurra háhitasvæða með rúmmálsmati.

Líkindadreifð vinnslugeta á flatareiningu er metin út frá fjórum þekktum háhitasvæðum og niðurstaðan svo notuð til að meta öll háhitasvæðin á grundvelli stærðar háviðnámskjarna. Svæðin fjögur eru Hengill, Námafjall, Krafla og Þeistareykir. Að meðaltali er flatarvinnslugetan að lágmarki 3 MW_e/km² í 95% tilvika (lágildid), að lágmarki 5 MW_e/km² í 50% tilvika (miðgildid) og að lágmarki 9 MW_e/km² í 5% tilvika (hálgildid).

Nú er unnt að bora niður á mun meira dýpi en áður og auk þess er unnt að skábora til að ná til svæða sem áður voru talin óaðgengileg. Einnig er verið að þróa aðferðir erlendis til að örva torlek jarðhitakerfi eða hreinlega að búa til jarðhitakerfi í þéttu en heitu bergi. Við núverandi orkuverð á Íslandi er ólíklegt að hægt verði að beita slíkum aðferðum til jarðhitavinnslu á næstunni þó slíkar rannsóknir geti haft hagrænt gildi fyrir íslenskan jarðhitaðnað t.d. til að örva tregar holur, eins og raunar hefur verið gert hér í 40 ár.

Með samanburði við mat Orkustofnunar frá 1985 kemur í ljós að mat á samanlögðu flatarmáli háhitasvæðanna hefur hækkað úr 480 km² í 850 km² (75% aukning) og áætlað rafafli til 50 ára hefur hækkað úr 3300 MW í 4300 MW (30% aukning). Afmörkun þekktra háhitasvæða með viðnámsmælingum og yfirborðsmælingum má sjá á mynd 29 og mat á vinnslugetu í töflu 4 (Jónas Ketilsson o.fl., 2009).

Hafa þarf í huga að fyrir einstök svæði er matið, sem birt er í töflu 4, mjög ónákvæmt og frekar ber að líta á samanlagða vinnslugetu þeirra. Er það m.a. vegna þess að í sumum tilfellum ofmeta viðnámsmælingar stærð svæða vegna ummyndaðra hluta sem hafa kólnað og í öðrum tilfellum vanmeta þær stærð svæða vegna heitra og vatnsgæfra hluta sem ekki sýna lágt viðnám. Slík tilfelli hafa t.d. fundist bæði í Kröflu og á Hengilssvæðinu. Einnig má segja að slíkt gróft flatarmálsmat falli úr gildi þegar reynt hefur á jarðhitakerfi með orkuvinnslu um hríð og hægt er að setja upp reiknilíkon til mun nákvæmara afkastamats.

Mat á vinnslugetu háhitasvæða er háð ýmsu öðru en eðli auðlindarinnar. Má þar helst nefna orkuverð, tækniþróun, upplýsingastig og verndarstefnu (sjá mynd 30). Þar er einnig vinnanleg hávermisorka til raforkuvinnslu metin út frá skýrslum Orkustofnunar frá 1985 og 2009. Miðað við 8100 nýtingarstundir í 50 ár samsvara 4300 MW af rafafli 6·10⁹ GJ af hrávarma og 3300 MW af rafafli 5·10⁹ GJ af hrávarma. Þetta er þó einungis lítið brot af orkuforða í berggrunni sem er talinn vera 12·10¹⁴ GJ niður á 10 km dýpi.

Uppsett rafafli jarðvarmavirkjana á Íslandi árið 2009 var 575 MW_e. Áætlað uppsett rafafli svæða þar sem mati á umhverfisáhrifum er lokið, eða í vinnslu, nemur samtals um 850 MW_e. Ef gert er ráð fyrir að uppsett rafafli jarðvarmavirkjana á Íslandi nái 1400 MW_e á næstu tíu árum hafa um 30% af áætlaðri vinnslugetu háhitasvæða verið virkjuð.

Tafla 4: Mat á rafaflí háhitasvæða til 50 ára samkvæmt áætlaðri flatarvinnslugetu borið saman við rúmmálsmat frá 1985 og nýtanlegt gufuafl (Jónas Ketilsson o.fl., 2009).

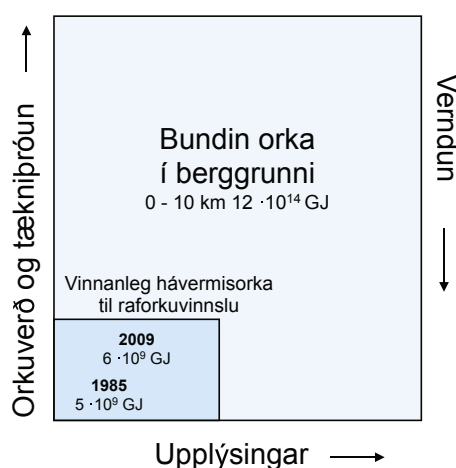
Svæði	Mat á aflu 1985		Mat á aflu 2009				
	Stærð [km ²]	Afl [MW ₅₀]	Stærð ^{****} [km ²]	Nýt. afl ^{***} [MW]	Hágildi	Miðgildi	Lággildi
					[MW ₅₀]		
Reykjanes [*]	2	28	9	100	81	45	27
Svartsengi-Eldvörp	11	108	30	80	270	150	90
Krýsuvík	60	302	89	5	801	445	267
Brennisteinsfjöll	2	12	5		45	25	15
Hengill	100	689	142	400	1278	710	426
Geysir [*]	3	27	5		45	25	15
Kerlingarfjöll	11	76	39		351	195	117
Hveravellir [*]	1	9	14		126	70	42
Torfajökull	147	1012	253		2277	1265	759
Hágöngur	8	63	43	5	387	215	129
Vonarskarð	11	65	29		261	145	87
Kverkfjöll ^{**}	25	49	31		279	155	93
Askja ^{**}	25	74	27		243	135	81
Hrúthálsar ^{**}	7	62	4		36	20	12
Fremrinámar	4	35	10		90	50	30
Krafla-Námafjall	37	464	62	125	558	310	186
Gjástykki	7	69	11		99	55	33
Þeistareykir	19	150	48	50	432	240	144
Samtals	480	3294	851	765		4255	

* Viðnámsmælingar miða við lágviðnámskápu á sama dýpi þar sem háviðnámskjarni kom ekki fram.

** Viðnámsmælingar ekki til staðar og því byggir flatarmál á yfirborðsummerkjum.

*** Gufuafl rannsóknar- og/eða vinnsluholna umreiknað í rafafl.

**** Flatarmál byggir á viðnámsmælingum og útbreiðslu yfirborðsummerkja.



Mynd 30: Stílfærð mynd af áætlaðri vinnanlegri hávermisorku til raforkuvinnslu frá þekktum háhitasvæðum og hvernig mat á henni hefur hækkað með tíma vegna tæknipróunar og upplýsinga um auðlindina úr 5·10⁹ GJ hrávarma (eða 3300 MW₅₀ rafafls) í 6·10⁹ GJ hrávarma (4300 MW₅₀ rafafls). Framsetning byggð á nálgun Stefáns Arnórssonar sem m.a. má sjá að hluta til í Stefán Arnórsson og Sigurður R. Gíslason (2000).

5 REGLUR UM SJÁLFBÆRA JARÐHITANÝTINGU

Í viðauka VI er gerð grein fyrir lagaumhverfi jarðhitanýtingar á Íslandi. Um fyrirkomulag leigu á vatns- og jarðhitaréttindum í eigu ríkisins vísast auk þess í niðurstöður nefndar forsætisráðuneytisins (Karl Axelsson o.fl., 2010). Jarðhiti er skilgreindur sem endurnýjanleg auðlind samkvæmt m.a. tilskipun Evrópuþingsins og -ráðsins, 2009/28/EB, um að auka vinnslu rafmagns með endurnýjanlegum orkugjöfum til notkunar á innri raforkumarkaði. Sem endurnýjanleg auðlind er hún á hreyfingu neðanjarðar, hugsanlega undir fleiri en einu eignarlandi. Viðmið eignaréttar á jarðhita er landsvæði eins og kemur fram í auðlindalögum (nr. 57/1998). Með auðlindalögnum hefur ríkinu verið falið viðtækt lögformlegt forræði yfir rannsóknnum og nýtingu jarðhita í landinu og þarf sérstakt leyfi ráðherra bæði til að rannsaka og nýta jarðhita. Landeigenda er þó heimilt að rannsaka jarðhita í eigin landi og nýta til heimilisþarfa. Stjórnsýslulegt hlutverk ríkisins í þessum efnum er þannig að hafa umsjón með hvort og hvernig auðlindin er rannsökuð og nýtt (Valgarður Stefánsson, 2001b).

Eins og kemur fram í viðaukanum veita auðlinda- og raforkulögin ríkinu vald til þess að hafa stjórn á nýtingu auðlinda í jörðu, en jafnframt verður að gera ráð fyrir að fyrirkomulagið leggi þær skyldur á ríkið að auðlindastýringin sé markviss og skynsamleg þannig að úthlutun leyfa sé á jafnréttisgrundvelli og að hagsmunir heildarinnar ráði langtímastefnumörkun á þessu sviði. Forsenda skynsamlegrar auðlindastýringar er að fyrir liggi nægilegar upplýsingar um auðlindirnar til þess að stjórnandinn geti metið áhrif þeirra aðgerða sem völ er á við stýringuna. Ef þekkingin á auðlindunum er svo takmörkuð að ekki er hægt að sjá fyrir árangur stjórnunaraðgerða verður stjórnunin handahófskennd (Valgarður Stefánsson, 2002).

Upplýsingar um auðlindirnar fást með rannsóknum, og kröfunni um virka auðlindastýringu ríkisins fylgir að ríkið kosti nægilegar auðlindarannsóknir til þess að auðlindastýringin geti verið fagleg og markviss. Til þess að orkufyrirtæki eða aðrir leggi fram fjármagn til orkurannsókna vilja orkufyrirtækin fá tryggingu fyrir því að þau njóti þessarar fjárfestingar þegar fram líða stundir. Helsta aðferðin væri sú að sá sem kostar rannsóknir á orkulind fái fyrirheit í rannsóknarleyfi um virkjunarleyfi. Svo er raunin með nýtingarleyfi fyrir hitaveitu en ekki með virkjunarleyfi til raforkuvinnslu. Leyfishafi á þó rétt á endurgreiðslu á sannanlegum kostnaði, sem nýst getur virkjunarleyfishafa.

Með erindisbréfi frá iðnaðarráðuneytinu til Orkustofnunar hefur stofnuninni verið falið leyfisveitingarvald samkvæmt lögum um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu frá og með 1. ágúst 2008. Hefur með því verið tryggt að stjórnvaldsákvæðanir samkvæmt lögnum eru nú kæranlegar til æðra stjórnvalds, iðnaðarráðuneytisins, auk þess sem ákvæðanir um leyfisveitingar eru nú teknar af fagstofnun sem býr yfir sérþekkingu í þeim málaflokki sem um ræðir.

Í viðauka VI.3.5 kemur fram að við veitingu nýtingarleyfa skal þess gætt að nýting auðlinda í jörðu sé með þeim hætti að tekið sé tillit til umhverfissjónarmiða, nýting auðlindanna sé hagkvæm frá þjóðhagslegu sjónarmiði og tekið sé tillit til nýtingar sem þegar er hafin í næsta nágrenni. Telji Orkustofnun að umsækjandi um nýtingarleyfi uppfylli ekki þessar kröfur getur hún synjað um leyfi eða sett sérstök skilyrði í leyfi af

þessu tilefni, sbr. 17. gr. auðlindalaga. Í rannsóknar- og nýtingarleyfi skal m.a. tilgreina tímalengd leyfis, mörk svæðis, til hvaða auðlinda leyfið tekur, ákvæði um magn og nýtingarhraða, upplýsinga- og tilkynningarskyldu leyfishafa, þ.m.t. skyldu til afhendingar á sýnum og gögnum og hvernig hún skuli innt af hendi, umhverfis- og öryggisráðstafanir, sbr. 18. gr. auðlindalaga. Aðilar sem vinna jarðhita úr jörðu skulu haga vinnslu sinni með þeim hætti að nýting verði sem best þegar til lengri tíma er litið eins og það er orðað í gildandi lögum. Í því sambandi skal m.a. ekki tekinn meiri jarðvarmi en þörf er. Borunum skal hagað þannig að þær takmarki sem minnst frekari nýtingu síðar, sbr. 26. gr. auðlindalaga.

5.1 Leyfisferli

Faghópurinn sér fyrir sér þrepaskipt leyfisferli jarðhitavinnslu. Í fyrsta lagi leyfi til rannsókna þar sem litlar sem engar boranir hafa átt sér stað og vinnslusaga er því ekki fyrir hendi til að gera flókin reiknilíkön. Í annan stað virkjunarleyfi fyrsta áfanga virkjunar þar sem gufuafl úr rannsóknarholum liggur til grundvallar ákvörðunar ásamt öðrum rannsóknum. Í þriðja lagi má sjá fyrir sér að orkufyrirtæki vilji auka vinnslu úr vinnslusvæðum með stækkun virkjana sem þegar eru í rekstri, og mun meiri þekking er fengin auk vinnslusögu til að meta áhrif aukinnar vinnslu og hagkvæmni orkuvers. Þar verði grundvöllur leyfa reiknilíkön af jarðhitakerfunum og horft a.m.k. jafnlangt fram í tímann og nemur afskriftartíma orkuversins. Við mat á umhverfisáhrifum er þó eðlilegra að meta nokkra slíka áfanga í einu til þess að hægt sé að meta umhverfisáhrif framkvæmdarinnar að fullu í samræmi við umfang framtíðarvinnslu á því þó að fyrstu áfangar virkjunar séu smærri. Við mat á umhverfisáhrifum er þá frekar lögð áhersla á umhverfisáhrif framkvæmdarinnar á yfirborði. Við útgáfu virkjunarleyfa er aftur á móti lagt mat á vinnslugetu svæðanna og hvort forsendur séu fyrir stækkunum eður ei.

Þó svo að leyfisferlið sé í sjálfu sér ákveðið tæknilegt úrvinnsluefni, má ekki gleyma hinu að leyfisferlin munu ætíð hafa pólitíska hlið. Almenna reglan hér getur þá verið að því stærri sem áform eru um vinnslu vökva og varma úr jörðu, því veikari verður sjálfbærni framkvæmdarinnar á þeim tíma sem ráðist er í hana. Eigi samt sem áður að fara í slíkar framkvæmdir, hvílir sú samfélagsábyrgð á leyfishafa að til þess verði séð að framkvæmdin skapi nægilegan mannauð, vísindi og þekkingu þannig að í heildina skili framkvæmdin jákvæðum samfélagslegum áhrifum (veik sjálfbærni) og að í tímans rás megi vinnsla úr jarðhitakerfi sem í upphafi er ósjálfbær nálgast E_0 og verða sjálfbær.

Beiting hugtaka um veika og sterka sjálfbærni opnar athyglisverð tækifæri þegar kemur að því að meta E_0 . Hugtökin má nefnilega tengja við margvíslegar aðferðir hefðbundinnar forðafræði, eins og hún hefur þróast hérlendis sem erlendis. Jafnframt ætti að vera mögulegt að flétta niðurstöður forðafræðirannsókna inn í mikilvæg laga- og leyfisferli, við mótun langtíma vinnslustefnu á skala einstakra jarðhitakerfa og landsins í heild, og þá þannig að markmiðum um sjálfbæra þróun sé fylgt bæði af hálfu stjórnvalda og orkufyrirtækja. Loks er það skoðun faghópsins að í öllu leyfisferli háhitasvæða eigi að gera þá kröfu til orkufyrirtækja að sjálfbæra vinnslugetan E_0 sé áætluð þegar ákvörðun verður tekin um fyrsta virkjunaráfanga og viðhaldið með bestu fánlegu þekkingu á hverjum tíma. Að sama skapi sýnist eðlilegt að vinnsluleyfi séu tengd orku- og massatöku úr jarðhitakerfinu jafnframt því rafafla sem ákveðin vinnslurás í orkuveri getur útvegað. Með því er orkufyrirtækjum gefinn kostur á að hámarka nýtingu á jarðhitavökvanum á hverjum tíma.

Viðátta jarðhitakerfa er oft það mikil að eignarhald hvers jarðhitakerfis getur skipst á marga landeigendur. Auðlindalögin gera ráð fyrir því að margir eigendur geti verið að einni jarðhitaauðlind, og er auðlindin þá sameign eigendanna sbr. 27. gr. auðlindalaga og 4. mgr. 5 gr. raforkulaga. Með aukinni nýtingu jarðhita á næstu áratugum er fjárféð að vandfarið verði með skilgreiningu á eignarhluta hvers eiganda og hvernig skuli háttað leyfisveitingu til eins aðila þar sem auðlindin er í reynd eign margra og því er til bóta að lögfesta leikreglur um sameignarfélög eigenda jarðhitaréttar.

Við mat á orkukostum er gjarnan beitt hefðbundnum arðsemisútreikningum eins og gert hefur verið (sjá kafla 3.5.1) og í grein eftir Lovekin (2000). Það er skoðun faghópsins að það væri til verulegra bóta að taka tillit til valréttar (*e. option value*) í arðsemisreikningunum eins og kostnaðar- og ábatagreiningu (*e. cost-benefit analysis*) yfirleitt. Valréttur vísar til þess vals sem orkufyrirtækið eða stjórnvöld hafa með því annaðhvort að velja að ráðast í tiltekna framkvæmd eða ekki. Slíkan valréttur má ávallt meta til fjár (sbr. Dixit og Pindyck, 1994). Virði hans er þeim mun meira sem óvissa um framtíðina er meiri og hraðar dregur úr henni yfir tíma. Ef ákveðið er að ráðast í framkvæmdina tapast viðkomandi valréttur. Dæmi um valrétt sem orkufyrirtæki á jarðhitasviði hafa gjarnan er hvort stækka eigi jarðvarmavirkjanir. Ef í ljós kemur að afkastageta jarðhitakerfisins er næg er ákvörðunin rétt. Ef hitt kemur í ljós, hefði e.t.v. betra verið að stækka ekki. Sá möguleiki felur í sér væntanlegt tap af ákvörðun um að stækka virkjun. Lækkun væntanlegs taps af því að fresta þeirri ákvörðun um t.d. eitt ár er virði valkostarins í eitt ár. Þannig kann að vera að einkenni auðlindarinnar skýrist í tímans rás og ef hægt er að meta þessa óvissu og hvernig hún er fall af tíma má reyna að meta hvenær hagkvæmast sé að stækka virkjunina með tilliti til áhættunnar (Ragnar Arnason, 2009).

5.2 Opinbert eftirlit með jarðhitavinnslu og orkusparnaður

Í viðauka VI er í köflum 3.6 og 4.5 fjallað um opinbert eftirlit Orkustofnunar með rannsóknar-, nýtingar- og virkjunarleyfum á jarðhitasvæðum. Miklar breytingar hafa átt sér stað í íslenskum orkugeira undanfarinn áratug; Rannsóknarsvið Orkustofnunar var aðskilið frá stjórnsýslusviði stofnunarinnar árið 2003 og Íslenskar Orkurannsóknir stofnaðar, raforkuvinnsla jarðvarmavirkjana hefur sexfaldast og árið 2008 voru gerðar breytingar á auðlindalögunum. Við þessar breytingar vaknar sú spurning hvort skipulag hins opinbera eftirlits sé nægjanlegt til að tryggja framangreind markmið (sjá töflu 1). Niðurstaða rannsóknar Guðlínar Steinsdóttur er að óneitanlega mætti hið opinbera eftirlit hér á landi vera skilvirkara og byggjast á meiri samvinnu viðkomandi stofnana og sveitarfélaga. Til að styrkja hið opinbera mætti kveða á um aukið samráð og samvinnu viðeigandi stofnanna og byggingaryfirvalda í íslenskum rétti, koma á fót samráðsnefnd viðkomandi aðila og semja jarðhitastaðla til handa framkvæmdaraðilum (Guðlín Steinsdóttir, 2009). Auk þess mætti kveða á um skilaskyldu sérleyfisveitna og einkaveitna til Orkustofnunar og hvetja til orkusparnaðar að mati faghópsins.

Aukin áhersla á orkusparnað hefur bætt nýtingu jarðvarma til upphitunar og hafa m.a. Norðurorka, Hitaveita Siglufjarðar, Hitaveita Dalvíkur og Hitaveita Egilsstaða- og Fella náð árangri í þá átt með breytingu á sölufyrirkomulagi frá hemlum í magnmæla og bættum stýrikerfum. Eftir sem áður er ónýttur varmi og töp hitaveitna um 18% af upptekt úr jarðhitakerfum og er því talsvert tækifæri til orkusparnaðar í þeim efnum (Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson, 2010a).

5.3 Sjálfbær þróun og íslensk löggjöf

Hugtakið sjálfbær þróun er að finna í íslensku lagasafni á þó nokkrum stöðum. Hér verða aðeins nefndir þeir lagabálkar sem hafa með umhverfisrétt og umhverfisvernd að gera, en það eru skipulags- og byggingarlög, nr. 73/1997, náttúruverndarlög, nr. 44/1999, þjóðminjalög nr. 107/2001, lög um umgengni um nytjastofna sjávar, nr. 57/1996, og lög um umhverfismat áætlaða nr. 105/2006. Við þetta má bæta lögum um Evrópska efnahagssvæðið, nr. 2/1993, en þau lög mæla fyrir um innleiðingu reglna Evrópusambandsins á þeim sviðum sem við á inn í íslenska löggjöf. Þau lög sem hér hafa verið nefnd eiga það sameiginlegt að í þeim er að finna markmiðsákvæði um sjálfbæra þróun án þess að kveðið sé á um hvernig þeim skuli framfylgja. Tilvísanir í sjálfbæra þróun eru almennar og oft er orðalag lagaákvæðanna heldur loðið sbr. 3. mgr., 1. gr. náttúruverndarlaga þar sem segir að markmið laganna sé „að auðvelda umgengni og kynni þjóðarinnar af náttúru landsins og menningarminjum og stuðla að vernd og nýtingu auðlinda á grundvelli sjálfbærrar þróunar.“ Þetta er eina tilvísunin í sjálfbæra þróun í áður nefndum lögum og ekki er að finna neina skilgreiningu á hugtakinu sjálfu. Það sama má segja um hin lögin sem nefnd eru hér að framan.

Þessar almennu og óljósu vísanir í íslenskum lagatexta til sjálfbærrar þróunar eru í samræmi við skilning þeirra Bosselmann (2002) og Aðalheiðar Jóhannsdóttur (2004) þar sem bent er á hversu veikt hugtakið er þegar það stendur eitt og sér. Sjálfsagt mætti styrkja hugtakið og gera notkun þess skilvirkari með skýrari skilgreiningu í lögum eða reglugerðum. Ein leið sem fara mætti í þessum efnum er að byggja á raforkulögum, nr. 65/2003. Í raforkulögunum sjálfum er ekki að finna vísanir né skilgreiningar á hugtakinu sjálfbær þróun. Hins vegar er reglugerðaheimild 45. gr. laganna nýtt og framkvæmd laganna nánar útfærð með reglugerð um framkvæmd raforkulaga, nr. 1040/2005. Þar má t.a.m. finna ákvæði sem lúta að skilgreiningu hugtaka, hvernig virkjunarleyfi eru gefin út og hvaða skilyrði lögaðilar þurfi að uppfylla til að hljóta slíkt leyfi. Í 5. mgr. 5. gr. reglugerðarinnar segir:

Ráðherra skal við leyfisveitinguna taka tillit til mats á umhverfisáhrifum vegna framkvæmdarinnar og fullnaðarúrskurðar stjórnvalda þar um. Ráðherra skal eftir því sem við á mæla fyrir um mótvægisáðgerðir og önnur skilyrði til að koma í veg fyrir eða draga úr áhrifum framkvæmdar á umhverfi og til að stuðla að sjálfbærri nýtingu endurnýjanlegra orkulinda og að varlega sé farið í nýtingu óendurnýjanlegra auðlinda. Slíkar áðgerðir eða skilyrði skulu vera í eðlilegum tengslum við framkvæmdina og geta m.a. lotið að hönnun og búnaði viðkomandi mannvirkja, staðarmörkum, nýtingarmagni, vöktun, mælingum, rannsóknum, upplýsingaskilum, framkvæmdum sem miða að því að varðveita náttúrugæði og frágangi á starfsstöðvum og landi á starfstíma og að honum loknum.

Hér er um að ræða eina skýrustu vísun í sjálfbæra nýtingu auðlindar í íslenskri löggjöf. Engu að síður er hugtakið ekki skilgreint sérstaklega, hvorki sjálfbær þróun né sjálfbærni. Tillagan sem hér er gerð er þess efnis að fara mætti sömu leið með auðlindalögin. Bæta mætti við lögin markmiðsákvæði þar sem fram væri tekið hvert markmið laganna væri. Í 33. gr. auðlindalaganna er að finna sambærilega reglugerðarheimild og í 45. gr. raforkulaganna. Hana mætti nýta til að skilgreina í regluverkinu hvað sjálfbær vinnsla jarðhita felur í sér sbr. þá skilgreiningu sem sett er fram í kafla 4 og auk þess hver markmið sjálfbærrar jarðhitanýtingar eru, sbr. töflu 1 ásamt hugmyndafræði sterkrar og veikrar sjálfbærrar jarðhitanýtingar.

6 NIÐURSTÖÐUR

Samkvæmt skipunarbréfi faghópsins átti vinna hans að beinast að þremur viðfangsefnum. Hér á eftir eru helstu niðurstöður hópsins dregnar saman fyrir hvert viðfangsefni fyrir sig.

1. Leggja fram rökstuddar tillögur um hvernig skilgreina skuli sjálfbæra jarðhitanytingu og hvernig meta eigi sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa.

Sjálfbær þróun miðar að því að fullnægja þörfum samtímans án þess að skerða möguleika komandi kynslóða til að fullnægja sínum þörfum. Gerður er greinarmunur á hugtökunum sterkri og veikri sjálfbærni sem taka til allra meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis. Sterk sjálfbærni felur í sér að þróunin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn þessara meginþátta. Veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhvers meginþáttanna enda skili þróunin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata (sjá skilgreiningu í viðauka I.3).

Sjálfbær jarðhitanyting tekur til allra þriggja meginstoða sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags og umhverfis. Sterk sjálfbær jarðhitanyting krefst m.a. sjálfbærrar jarðhitavinnslu (e. *sustainable yield*) á sérhverju jarðhitasvæði sem felur í sér að með ákveðnu vinnslustigi sé hægt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu E_0 úr jarðhitakerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sjálfbæra vinnslugetan er þó ekki þekkt við upphaf vinnslu. Hana má meta samhliða vinnslu út frá fyrirbyggjandi gögnum um innri gerð og eðli kerfanna og gögnum um viðbrögð þeirra við vinnslu. Slíkt mat verður áreiðanlegra eftir því sem vinnslusaga viðkomandi jarðhitakerfis lengist. Uppbygging vinnslu í hæfilegum þrepum getur oftast tryggt að ekki sé farið yfir sjálfbæru mörkin. Þó geta virkjunarskref farið yfir sjálfbæru mörkin, m.a. vegna þess hve illa þekkt mörkin eru við upphaf nýtingar. Við slíkar aðstæður mætti á einstökum vinnslusvæðum leyfa lotubundna vinnslu þar sem tímabundið væri farið yfir E_0 ef nýtingin skilar í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata (sjá skilgreiningu í viðauka I.3) og samræmist þannig veikri sjálfbærni.

Faghópurinn setur fram 10 markmið sem hann leggur til að stefnt sé að með sjálfbærri jarðhitanytingu (sjá töflu 1). Markmiðin eru sett fram á grundvelli Brundtland-skilgreiningarinnar fyrir sjálfbæra þróun og framkvæmdaáætlunar Ríó-yfirlýsingarinnar í samræmi við leiðbeiningar IISD (International Institute for Sustainable Development). Fyrstu tvö markmiðin fjalla um nýtingu auðlindarinnar og endurnýjanleika hennar. Þriðja markmiðið um umhverfisstjórnun, fjórða um nýtni, það fimmta um efnahagsstjórnun og það sjötta og sjöunda um arð og afhendingaröryggi. Áttunda markmiðið fjallar um samfélagsáhrif. Níunda markmiðið og það tíunda fjalla um rannsóknir, nýsköpun og miðlun þekkingar.

Komin er nokkurra áratuga reynsla á vinnslu jarðhita úr fjölmörgum jarðhitakerfum, bæði hér á Íslandi og erlendis. Reiknilíkön hafa jafnframt verið gerð fyrir fjölda þessara kerfa. Reynslan af jarðhitavinnslu á mörgum þessara svæða og líkanreikningarnir hafa sýnt að með því að halda vinnslu innan ákveðinna skilgreindra marka er unnt að halda jarðhitakerfunum nokkurn veginn í jafnvægi í langan tíma eða stýra vinnslunni þannig að þrýstings- og hitabreytingar séu hægar áratugum saman.

Faghópurinn hefur ákveðið að styðjast við skilgreiningu fyrri faghóps Orkustofnunar en leggur til að í stað þess að miða við 100-300 ár sé miðað við að lágmarki 100 ár:

Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluaðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu kerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sé vinnsluálag meira en E_0 , er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en eða jöfn E_0 er skilgreind sem sjálfbær vinnsla en vinnsla umfram E_0 er ekki sjálfbær.

Skilgreining þessi tekur til allrar orku, og er því í raun háð eðli viðkomandi jarðhitakerfis. Hún tekur hins vegar ekki mið af sveiflukenndu álagi, langtímabreytingum í kerfinu, nýtni, hagrænna atriða, umhverfis né tækniþróunar. Búast má við því að E_0 vaxi með tíma, t.d. vegna tækniframfara, þ.á.m. niðurdælingar, stefnuborana og dýpri borana. Skilgreiningin er einnig háð vinnsluaðferð eins og t.d. hvort beitt er dælingu, niðurdælingu eða vinnslu með hléum. Auk þess er E_0 einnig háð orkuverði sem ræður miklu um hversu þróuðum vinnsluaðferðum er unnt að beita.

2. Gera tillögur um mismunandi nýtingarleiðir er miða að sjálfbærri nýtingu auðlindarinnar.

Helstu vinnsluaðferðirnar og nýtingarleiðir sem leitt geta til sjálfbærrar jarðhitánýtingar eru eftirfarandi að mati faghópsins:

- (1) Stöðug vinnsla í a.m.k. 100 ár, þó með sveiflum vegna tímabundins álags eins og árssveiflum (sterk sjálfbærni).
- (2) Vinnsla aukin í nokkrum þrepum þar til sjálfbær vinnslugeta hefur verið metin. Vinnslan er þá undir sjálfbæru mörkunum (sterk sjálfbærni).
- (3) Lotubundin vinnsla, þ.e. mikil vinnsla í nokkra áratugi (um 50 ár), sem jafnvel teldist ágeng til lengdar, með tímabilum minni vinnslu eða jafnvel algjörum hléum (einnig um 50 ár, sjá mynd 28). Jarðhitakerfið myndi þá ná að jafna sig að miklu leyti þegar dregið yrði úr vinnslunni, eða í hléunum. Vinnsla getur þó aldrei orðið svo ágeng að hún valdi varanlegum skaða á jarðhitakerfinu, skaða sem vinnsla undir sjálfbæru mörkunum myndi ekki valda. Ef einstök vinnslusvæði eru nýtt á lotubundin hátt þurfa að vera tiltæk önnur svæði, sem nýta mætti meðan dregið væri úr vinnslu á þeim fyrrnefndu, sjá lið (ii) hér að neðan (veik sjálfbærni). Þannig héldist nokkurn veginn stöðug vinnsla samanlagt úr jarðhitakerfunum, sem nýtt væru þannig saman.

Lotubundna vinnsluaðferðin sýnir að skoða þarf sjálfbæra vinnslu og nýtingu í víðara samhengi en fyrir einstök jarðhitasvæði. Auk þess þarf að hafa í huga að við langtímavinnslu má reikna með þrýstisamgangi milli aðliggjandi vinnslusvæða, jafnvel yfir tugi km. Ef jarðhitánýting í ákveðnum landshluta á að fylgja þrepahugmyndinni verður væntanlega þörf á því að vinnsla eigi sér stað samtímis á mörgum svæðum í litlum þrepum ef orkuþörfin er mikil.

Faghópurinn gerir greinarmun á hugtökunum *varmastraumur* og *orkuforði*. Varmastraumur er hinn stöðugi straumur varmaorku úr iðrum jarðar til yfirborðs en orkuforði

er varmaorka, bundin í bergi og heitu vatni. Frumorkunotkun jarðhita á Íslandi árið 2009 svaraði til 5 GW_{th} varmastraums, sem er minni en áætlaður aðgengilegur varmastraumur til yfirborðs, 7 GW_{th}. Með frekari uppbyggingu jarðvarmavirkjana næstu áratugi, í samræmi við rammaáætlun, gæti frumorkunotkun orðið talsvert meiri en aðgengilegi varmastraumurinn og svarað til 40 GW_{th} varmastraums (veik sjálfbærni). Frumorkunotkun af þeirri stærðargráðu mun ganga á orkuforða jarðskorpunnar, en á 200 árum svarar hún þó aðeins til um 0,3% orkuforðans ofan 3 km dýpis. Því má færa rök fyrir því að halda megi jarðhitavinnslu af þeirri stærðargráðu mjög lengi áfram á Íslandi, þ.e. hún verði sjálfbær í ljósi þess orkuforða sem bundinn er í berginu, að uppfylltum þeim 10 markmiðum sjálfbærrar jarðhitánýtingar sem faghópurinn setur fram. Þar sem jarðhiti er af skornum skammti, t.d. til húshitunar, kann að vera nauðsynlegt að krefjast sterkrar sjálfbærni.

3. Semja drög að reglum er hafi það að markmiði að tryggja sjálfbæra nýtingu jarðvarma. Taka skal tillit til viðeigandi alþjóðasamninga og yfirlýsinga sem Ísland á aðild að, m.a. Ríó-yfirlýsingarinnar og meginreglna umhverfisréttar.

Að mati faghópsins hefur ríkinu verið falið viðtækt lögformlegt forræði yfir rannsóknum og nýtingu jarðhita í landinu. Stjórnsýslulegt hlutverk ríkisins í þessum efnum er að hafa umsjón með hvort og hvernig auðlindin er rannsökuð og nýtt. Nægilegar upplýsingar um auðlindina eru nauðsynleg forsenda skynsamlegrar auðlindastjórnunar. Ef tryggja á sjálfbæra jarðhitánýtingu telur faghópurinn það skyldu ríkisins að tryggja að auðlindastýring sé markviss og skynsamleg, úthlutun leyfa sé á jafnréttisgrundvelli og að hagsmunir heildarinnar ráði langtímastefnumörkun á þessu sviði. Upplýsingar um auðlindina fást með rannsóknum, og kröfunni um virka auðlindastýringu ríkisins fylgir að ríkið kosti nægilegar rannsóknir til að auðlindastýringin verði fagleg og markviss. Með því er líklegra að yfirvöld hafi þá yfirsýn sem þarf til þess að tryggja langtímahagsmunum Íslendinga í orkumálum. Af þeim sökum kann að vera heppilegt að slík yfirsýn og fagþekking vegna leyfisveitinga og stjórnunar auðlindarannsókna á vegum ríkisins sé á forræði sömu stofnunar.

Að mati faghópsins á mat á umhverfisáhrifum að taka á umhverfisáhrifum á yfirborði næstu áratugi svo að hægt sé að meta umhverfisáhrif framkvæmdarinnar að fullu. Við útgáfu virkjunarleyfa til þess að reisa og reka raforkuver er aftur á móti lagt mat á stærð einstakra áfanga með tilliti til vinnslugetu jarðhitakerfisins, annars vegar út frá rannsóknarborunum og forrannsóknum við mat á fyrsta áfanga og hins vegar með líkanreikningum við mat á stækkunum.

Faghópurinn telur að markmið sjálfbærrar jarðhitánýtingar og hugtakið sjálfbær jarðhitavinnsla megi innleiða í íslenska löggjöf í samræmi við skilgreiningu faghópsins (sjá töflu 1 eða viðauka VII) eftir faglega aðkomu þar til bærri sérfræðinga. Þá má koma á skilvirkara opinberu eftirliti með vinnslu og nýtingu jarðhita, t.d. með samráði opinberra eftirlitsstofnanna. Kveða þyrfti á um skilaskyldu á vinnslugögnum orkufyrirtækja til Orkustofnunar og stuðla að orkusparnaði.

Alþjóða orkumálastofnunin (IEA) spáir 76% aukningu í raforkuvinnslu næstu tvo áratugin, aðallega með bruna jarðefna sökum fólksfjölgunar og neyslu. Vegna þeirra umhverfisáhrifa sem það kann að hafa í för með sér telur IEA orkustefnu mannkyns vera ósjálfbæra. Í 9. kafla framkvæmdaáætlunar Ríó-yfirlýsingarinnar, sem erindisbréf ráðherra tilgreinir að hafa skuli til hliðsjónar, er tekið fram að iðnaður skuli frekar byggður upp þar sem völ er á umhverfisvænum orkugjöfum. Af þeim sökum telur

faghópurinn að aukin vinnsla jarðhita á Íslandi, frá því sem nú er, sé ásættanleg ef hún fylgir markmiðunum tíu.

Faghópurinn, sem eingöngu er skipaður sérfræðingum á sviði raunvísinda, fjallaði eðli málsins samkvæmt, mest um jarðhitaauðlindina og nýtingu hennar. Mat á áhrifum jarðhitanýtingar verður hins vegar að taka til hinna þriggja meginstoða sjálfbærrar þróunar og af þeim sökum tók faghópurinn saman nokkur mikilvæg sjónarmið innan hvers þáttar fyrir sig. Ekki ber að líta á þá samantekt sem heildstætt mat á áhrifum jarðhitanýtingar enda krefst slík rannsókn aðkomu fleiri en raunvísindamanna.

HEIMILDIR

Aðalheiður Jóhannsdóttir, 2004. *Er sjálfbær þróun lagalegt hugtak?* Rannsóknir í Félagsvísindum V. Háskólaútgáfan: Reykjavík, 11-37.

Anna Skúladóttir, 2009. *Staðreyndir um fjárhagsstöðu OR*. Fréttablaðið, 25. nóvember 2009, tbl. 9, bls. 18.

Arnar Hjartarson og Jóhann G. Einarsson, 2010. *Geothermal Resources and Properties of HS Orka, Reykjanes Peninsula, Iceland: Independent Technical Report*. Mannvit Engineering.

Axel Björnsson, G. Johnsen, S. Sigurðsson, G. Þorbergsson and E. Tryggvason, 1979. *Rifting of the plate boundary in North Iceland 1975-1978*. J. Geophys. Res., 84, 3029-3038.

Axel Björnsson, 1985. *Dynamic of crustal rifting in NE Iceland*. Journal of Geoph. Res., 90, 10151-10161.

Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz, 1990. *Uppruni hvera og lauga á Íslandi*. Náttúrufræðingurinn, 60 (1), 15-38.

Axel Björnsson, 1990. *Jarðhitarannsóknir. Yfirlit um eðli jarðhitasvæða, jarðhitaleit og vinnslu jarðvarma*. Orkustofnun, (OS-90020/JHD-04).

Axel Björnsson, 2005. *Development of thought on the nature of geothermal fields in Iceland from Medieval times to the present*. Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Axel Björnsson, Hjálmar Eysteinnsson and Martin Beblo, 2005. *Crustal formation and magma genesis beneath Iceland: Magnetotelluric constraints*. Geological Society of America, Special Paper, 388, 665-686.

Axel Björnsson, 2007. *Temperature of the Icelandic crust: Inferred from electrical conductivity, temperature surface gradient, and maximum depth of earthquakes*. Tectonophysics, 447 (2008), 136-141.

Barker, B.J., 2000. *The Geysers: Past and Future*. Geothermal Resources Council Bulletin, 29, 163-171.

Becker, J., 2004. *Making sustainable development evaluations work*. Sustainable Development, 12(4), John Wiley & Sons, Ltd and ERP Environment.

Birna Sigrún Hallsdóttir, Kristín Harðardóttir, Jón Guðmundsson og Arnór Snorrason, 2009. *National Inventory Report – Iceland 2009*. Umhverfisstofnun, (UST-2009/07).

Bosselmann, K., 2002. *The Concept of Sustainable Development. Environmental Law for a Sustainable Society*. NZCEL Monograph Series. Auckland, 81-96.

Bromley, C.J., Mongillo, M., and Rybach, L., 2006. *Sustainable utilization strategies and promotion of beneficial environmental effects – Having your cake and eating it too*. Proceedings of the New Zealand Geothermal Workshop 2006, Auckland, New Zealand, November 2006.

Bunsen, R., 1847. *Über den inneren Zusammenhang der pseudovulkanischen Erscheinungen Islands*. Wöhler und Liebig's Annalen der Chemie und Pharmacie, 62, 1-59.

Dixit, A.K. og Pindyck, R.S., 1994. *Investment under uncertainty*. Princeton. University Press, Princeton, New Jersey, Bandaríkin.

Egill B. Hreinsson, 2001. *Hver er hagkvæmni orkusölu til stóriðju?* Ráðstefna Verkfræðingafélags Íslands (VFÍ) um arðsemi virkjana og þátttöku íslendinga í stóriðju. Reykjavík.

Erna Indriðadóttir, 2009. *Fréttir. Alcoa á Íslandi*. [vefsíða] Alcoa Fjarðaál, mars 5, 2009. Heimsótt 1. desember 2009.

Fornleifavernd ríkisins, 2011. *Fréttir. Menningarmálastofnun Sameinuðu þjóðanna: Samningur um verndun menningar- og náttúruarfleifðar heimsins*. [vefsíða] Fornleifavernd ríkisins. Heimsótt 22.mars 2011.

Gowdy, J.M., 2000. *Terms and concepts in ecological economics*. Wildlife Society Bulletin, 28, 26-33.

Goyal, K.P. og Box, W.T., 2004. *Geysers performance update through 2002*. Proceedings 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January.

Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005. *Hiti og jarðlög í nýjum borholum í Þrengslum*. Íslenskar Orkurannsóknir, (ISOR-05140).

Grímur Björnsson, 2005. *Orðanotkun, aðferðafræði og skilgreiningar við gerð hugmynda- og reiknilíkana af jarðhitakerfum í Hengli*. Íslenskar orkurannsóknir, (ISOR-05203).

Grímur Björnsson, 2007. *Endurskoðað hugmyndalíkan af jarðhitakerfum í Hengli og einfalt mat á vinnslugetu nýrra borsvæða*. Orkuveita Reykjavíkur (Nýjar virkjanir 3-2007).

Guðlín Steinsdóttir, 2009. *Opinbert eftirlit með jarðhitanytingu á Íslandi*. ML. Ritgerð. Háskóli Reykjavíkur: Reykjavík.

Guðmundur Ó. Friðleifsson, Wilfred A. Elders, Sverrir Þórhallsson og Albert Albertsson, 2005. *The Iceland deep drilling project.- a search for unconventional (supercritical) geothermal resources*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24. – 29. apríl.

Guðmundur Kjartansson, 1960. *Jarðfræðikort af Íslandi, blað 3, blað 6* [samsett] : mkv 1:250 000 / Menningarsjóður: Reykjavík.

Guðmundur Pálmason, 1973. *Kinematics and heat flow in volcanic rift zones, with application to Iceland*. Geophysical Journal 33, 451-481.

Guðmundur Pálmason og Kristján Sæmundsson, 1979. *Summary of Conductive Heat Flow in Iceland*. Terrestrial Heat Flow in Europe (V.Cermak and L. Rybach, eds), Springer Verlag, 218-220.

Guðmundur Pálmason, Gunnar V. Johnsen, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Karl Ragnars, Guðmundur I. Haraldsson og Gísli K. Halldórsson, 1985. *Mat á jarðvarma Íslands*. Orkustofnun, (OS-85076/JHD-10).

Guðmundur Pálmason, 1986. *Model of crustal formation in Iceland, and application to submarine mid-oceanic ridges*. In: Vogt, P.R., Tucholke, B.E. (eds.), *The geology of North America*, vol. M. Geological Society of America, pp.87-97. The Western North Atlantic Region.

Guðmundur Pálmason, 2005. *Jarðhitabók - Eðli og nýting auðlindar*. Hið Íslenska Bókmenntafélag, Reykjavík.

Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson, 2001a. *Um sjálfbæra vinnslu jarðhita. Umfjöllun málstofu Orkustofnunar*. Orkustofnun, greinargerð (GAx-ÁsG-BS-GP-HÁ-HTul-ÓGF-SvB-VS-2001/06).

Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson, 2001b. *Sustainable production of geothermal energy: suggested definition*. IGA-News, Quarterly No. 43, January-March 2001, 1-2.

Guðni Axelsson, 2004. *Niðurdæling í jarðhitakerfi – tilgangur, kostir og ókostir*. Erindi flutt á málþingi Jarðhitafélags Íslands 10. nóvember, Jarðhitafélag Íslands, rit 10, 5-12.

Guðni Axelsson, Grímur Björnsson, Þorsteinn Egilson, Ólafur G. Flóvenz, Bjarni Gautason, Steinunn Hauksdóttir, Magnús Ólafsson, Ómar B. Smáráson and Kristján Sæmundsson, 2005a. *Nature and properties of recently discovered hidden low-temperature geothermal reservoirs in Iceland*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, apríl.

Guðni Axelsson, Valgarður Stefánsson, Grímur Björnsson and Jiurong Liu, 2005b. *Sustainable Management of Geothermal Resources and Utilization for 100 – 300 Years*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, apríl.

Guðni Axelsson, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson 2006. *Hvernig á að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitasvæða?* Orkuþing 2006. Orkan og samfélagið – vistvæn lífsgæði. Sigurður Ágústsson (ritstjóri), 468-476.

Guðni Axelsson, Þorgils Jónasson, Magnús Ólafsson og Árni Ragnarsson, 2010. *Successful Utilization of Low-Temperature Geothermal Resources in Iceland for District Heating for 80 Years*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Balí, Indónesía, apríl.

Gunnar Böðvarsson, 1950. *Geofysiske metoder ved varmtvandsprospektering i Island*. Tímarit V.F.Í., 35, 48-59.

Gunnar Böðvarsson, 1961. *Physical characteristics of natural heat resources in Iceland*. Jökull, 11, 29-38.

Gunnar Böðvarsson, 1964. *Physical characteristics of natural heat sources in Iceland*. Proceedings of the UN Conference On New Sources of Energy, Volume 2: Geothermal Energy, Rome, August 1961. United Nations, New York, 82-89.

Gunnar Böðvarsson, 1982a. *Terrestrial energy currents and transfer in Iceland* í Guðmundur Pálmason (ritstj.): Continental and oceanic rifts. Geodynamic Series, 8, Am. Geophys. Union, 271-282.

Gunnar Böðvarsson, 1982b. *Glaciation and geothermal processes in Iceland*. Jökull, 32, 21-28.

Gunnar Böðvarsson, 1983. *Temperature/flow statistics and thermomechanics of low-temperature geothermal systems in Iceland*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 19, 255-280.

Gunnar G. Schram, 1993. *Framtíð jarðar*. Alþjóðamálastofnun Háskóla Íslands: Reykjavík. ISBN 9979-54-062-1.

Hagfræðistofnun Háskóla Íslands, 2009. *Áhrif stóriðjuframkvæmda á íslenskt efnahagslíf*. Iðnaðarráðuneytið: Reykjavík.

Hardi, P. og Zdan, T., 1997. *Assessing Sustainable Development: Principles in Practice*. Winnipeg: The International Institute for Sustainable Development.

Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998. *Jarðfræðikort af Íslandi 1:500.000*. Berggrunnur. Náttúrufræðistofnun Íslands (2. útgáfa).

Helgi Björnsson, Sveinbjörn Björnsson og Þorbjörn Sigurgeirsson, 1982. *Penetration of water into hot rock boundaries of magma at Grímsvötn*. Nature, 295 (585), 580-581.

Helgi Torfason og Guðmundur Ingi Haraldsson, 1984. *Kortlagning yfirborðsjarðhita í Leirföllum í landi Oddgeirshóla, Hraungerðishreppi, Árnessýslu*. Orkustofnun, Greinargerð (HeTo-GIH-84/01).

Hólmfríður Sigurðardóttir, Sigurður R. Gíslason, Wallace S. Broecker, Eric H. Oelkers og Einar Gunnlaugsson, 2010. *The CO₂ Fixation into Basalt at Hellisheidi Geothermal Power Plant, Iceland*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Balí, Indónesía, apríl.

Hrefna Kristmannsdóttir, 1997. *Umhverfisáhrif jarðhitanytingar: Uppgjör verksins*. Orkustofnun, (OS-97074).

Hrefna Kristmannsdóttir og Sigríður Halldórsdóttir, 2008. *Heitt vatn og heilbrigði: Heilsufarsáhrif heitavatnsnotkunar á Íslandi*. Ritroð Heilbrigðisvísindastofnunar Háskóla Akureyrar, ISSN 1670-8040.

Hörður Arnarsson, 2010. *Þróun íslensks raforkumarkaðar og framtíðarsýn Landsvirkjunar*. Ársfundur Landsvirkjunar 2010. 16. apríl 2010.

Ingimar G. Haraldsson, Þóra Þórisdóttir og Jónas Ketilsson, 2010. *Efnahagsáhrif húshitunar með jarðhita í stað olíu árin 1970-2009*. Orkustofnun, (OS-2010/04).

Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson, 2010a. *Jarðhitanoftun á Íslandi til ársins 2009*. Orkustofnun (OS-2010/02).

Ingimar G. Haraldsson og Jónas Ketilsson, 2010b. *Frumorkunotkun jarðvarmavirkjana og hitaveitna á Íslandi til ársins 2009*. Orkustofnun, (OS-2010/03).

International Energy Agency, 2009. *World Energy Outlook 2009 Climate Change Excerpt*. ISBN: 978-92-64-06130-9.

Jolly, R.J.H. og D.J. Sanderson, 1995. *Variation in the form and distribution of dykes in the Mull swarm, Scotland*. J. Structural Geology 17, 1543-1547.

Jón Ö. Geirsson Jónsson og Anna G. Þórhallsdóttir, 2007. *Sjálfbærnivísar fyrir litil samfélög. Hvanneyri sjálfbært samfélag?* [veggspjald]. Fræðaðing Landbúnaðarins, Bændasamtök Íslands, Reykjavík.

Jón Ö. Geirsson Jónsson, 2006. *Hvernig er hægt að mæla sjálfbæra þróun?* BS ritgerð við Landbúnaðarháskóla Íslands 2006.

Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson, 2009. *Mat á vinnslugetu háhitasvæða*. Orkustofnun, (OS-2009/09).

Jónas Ketilsson, Guðni Axelsson, Axel Björnsson, Grímur Björnsson, Bjarni Pálsson, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, Kristján Sæmundsson, 2010a. *Introducing the Concept of Sustainable Geothermal Utilization into Icelandic Legislation*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010a, Balí, Indónesía, apríl.

Jónas Ketilsson, Lárus Ólafsson, Guðlín Steinsdóttir, Guðni A. Jóhannesson, 2010b. *Legal Framework and National Policy of Geothermal Development in Iceland*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Balí, Indónesía, apríl.

K' C Tran and Albert Albertsson, 2010. *Utilization of Geothermal Energy and Emission for Production of Renewable Methanol*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Balí, Indónesía, apríl.

Karl Axelsson o.fl., 2010. *Fyrirkomulag varðandi leigu á vatns- og jarðhitaréttindum í eigu íslenska ríkisins*. Skýrsla nefndar forsætisráðherra sem skipuð var samkvæmt III. bráðabirgðaákvæði laga nr. 58/2008.

Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 2006. *Mat á stærð háhitakerfa með viðnámsmælingum*. Íslenskar Orkurannsóknir, Greinargerð (ÍSÖR-06108).

Kristján Sæmundsson, 1991. *Jarðfræði Kröflukerfisins*. Náttúra Mývatns. Hið íslenska Náttúrufræðafélag, Reykjavík.

Kristján Sæmundsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, 2001. *Í Torfajökli: jarðfræði- og jarðhitakort af Torfajökulssvæðinu*. Orkustofnun, (OS-2001/036).

Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson, 2003. *Jarðhitakort af Íslandi*. Orkustofnun, unnið af Rannsóknarsviði fyrir Auðlindadeild.

Kristján Sæmundsson, Haukur Jóhannesson og Ólafur G. Flóvenz, 2003. *Hitastigulskort af Íslandi*. Ársskýrsla ÍSÖR 2003.

Kristján Sæmundsson og Magnús Ólafsson, 2004. *Fremrinámur og Gjástykki: Rannsóknir sumarið 2003*. Íslenskar Orkurannsóknir, (ÍSÖR-04096).

Kristján Sæmundsson, 2010. *Jarðfræðikort af Gjástykki*. Íslenskar Orkurannsóknir.

- Landsvirkjun og Alcoa, 2005. *Sjálfbærni-verkefni: Mælingar á árangri Alcoa og Landsvirkjunar við byggingu og rekstur Fjarðaáls og Kárahnjúkavirkjunar: Áfangaskýrsla, vísar og grunnástand*. Guðjónó: Reykjavík.
- Lovekin, J. W., 2000. *The economics of sustainable geothermal development*. Geothermal Resource Council Transactions, 24, 113-118.
- Lowrie, W., 2006. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, 7. Prentun, ISBN 0 521 46728 4.
- Mongillo, Mike A., og Guðni Axelsson (ritstjórar), 2010: Special issue on sustainable geothermal utilization., *Geothermics*, 39 (4), 279-402.
- Nýsir hf. Ráðgjafabjónusta, 2006. *Mat á samfélagslegum og efnahagslegum áhrifum álvers Alcoa Fjarðaáls í Reyðarfirði*.
- O'Sullivan, M. and W. Mannington, 2005. *Renewability of the Wairakei-Tauhara geothermal resource*. Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- OECD, Environment Directorate, 2008. *OECD Key Environmental Indicators 2008*. OECD: París.
- Orkustofnun, 2009b. *Háviðnámskjarnar háhitakerfa*. Rammaáætlun um vernd og nýtingu jarðhita og vatnsafls. (<http://www.leirhver.orkugardur.is/rammi/>)
- Ólafur Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 1993. *Heat flow and geothermal processes in Iceland*. Tectonophysics 225,123-138.
- Ólafur Grímur Björnsson, 2000. *Nýting jarðhita til ferðaþjónustu einkum með tilliti til baðlækninga*. Orkustofnun, (OS-2000/025).
- Ólafur Jóhannesson, 1956. *Um eignar- og umráðarétt jarðhita*. Tímarit lögfræðinga. 1956, 6 (3), 134-157. ISSN 0493-2714.
- Ólafur Lárusson, 1950. *Eignarréttur*. Hlaðbúð: Reykjavík.
- Ólafur P. Jónsson, 2007. *Lýðræði og náttúruvernd*. Umhverfisþing 2007.
- Páll Einarsson, 1978. *S-wave shadows in the Krafla caldera in NE-Iceland. Evidence for a magma chamber in the crust*. Bull. Volcanologique, 41, 1-9.
- Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir, 1980. *Seismological evidence for lateral magma intrusion during the July 1978 deflation of the Krafla volcano in NE-Iceland*. J. Geophys., 47,160-165.
- Ragna Karlsdóttir, Hjálmar Eysteinnsson, Ingvar Þór Magnússon, Knútur Árnason og Ingibjörg Kaldal, 2006. *TEM-mælingar á Þeistareykjum og í Gjástykki 2004-2006*. Íslenskar Orkurannsóknir, (ÍSÖR-2006/028).
- Ragnar Árnason, 2009. *Energy Utilization in Iceland: Basic Economic Principles*. Ráðstefna á vegum Hagfræðistofnunar Háskóla Íslands og Landverndar. Orka og umhverfi: Hvernig skal standa að orkunýtingarmálum á Íslandi, 20. janúar 2009. Grand Hótel, Reykjavík.

Rammaáætlun um vernd og nýtingu náttúrusvæða með áherslu á vatnsafl og jarðhitasvæði- 2. áfangi, 2010. *Niðurstöður faghópa: Kynningar- og umsagnarferli verkefnisstjórnar*. Rammaáætlun: Reykjavík.

Rut Bjarnadóttir, 2010. *Sustainability evaluation of geothermal systems in Iceland, Indicators for sustainable production*. Master's thesis, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland.

Ruth Shortall, 2010. *A Sustainability Assessment Protocol for Geothermal Utilization*. Master's thesis, Faculty of Environmental & Life Sciences, University of Iceland.

Rybach, L. og M. Mongillo, 2006. *Geothermal sustainability – A review with identified research needs*. Geothermal Resources Council Transactions, 30, 1083-1090.

Sameinuðu Þjóðirnar, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, 2007. *World Population Prospects: The 2006 Revision*. United Nation: New York.

Sameinuðu Þjóðirnar, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, 2009. *World Population Prospects: The 2008 Revision in Population Newsletter No. 87*. United Nation: New York

Sanyal, S. K., 2005. *Sustainability and renewability of geothermal power capacity*. Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Sarmiento, Z.F. and Grímur Björnsson, 2007. *Reliability of early modelling studies for high-temperature reservoirs in Iceland and the Philippines*. Proceedings of the 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January 2007.

Sigurlaug Hjaltadóttir, Kristín H. Vogfjörð og Ragnar Slunga, 2009. *Seismic signs of magma pathways through the crust in the Eyjafjallajökull volcano, South Iceland*. Veðurstofa Íslands, (VÍ-2009/013).

Simensen, J. og Tägil, S., 1994. *Saga Mannkyns: 16. bindi Veröldin breytist*. Þýð. Egill Jónasson Stardal. Almenna Bókafélagið.

Stefán Arnórsson, 1995a. *Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models – I. High-temperature areas*. Geothermics, 24, 561-602.

Stefán Arnórsson, 1995. *Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models. II. Low-temperature areas*. Geothermics, 24 (5/6), 603-629.

Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson, 2008. *Geothermal systems in Iceland*. Jökull, 58, 269-302.

Stefán Arnórsson og Sigurður R. Gíslason, 2000. *Orkunotkun og umhverfisáhrif. Náttúrufræðingurinn*, 69, 211-228.

Sveinn P. Jakobsson, 1979. *Petrology of recent basalts of the Volcanic Zone, Iceland*. Acta Naturalia Islandica, 26.

Sveinn Þórðarson, 1998. *Auður úr iðrum jarðar – Saga hitaveitna og jarðhitanytingar á Íslandi*. Hið Íslenska Bókmenntafélag.

Trausti Einarsson, 1937. *Über eine Beziehung zwischen Heissen Quellen und Gängen in der isländischen Basaltformation*. Visindafélag Íslendinga, Greinar 2, 134-145.

Trausti Einarsson, 1938. *Nokkur almenn orð um jarðhita*. Tímarit V.F.Í., 23, 57-60.

Trausti Einarsson, 1942. *Über das Wesen der heissen Quellen Islands mit einer Übersicht über die Tektonik des mittleren Nord-Islands*. Visindafélag Íslendinga, 26.

Trausti Einarsson, 1950. *Um orsakir jarðhitans. Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði og nágrenni árin 1947-1949*, Fyrri hluti, Jarðborunardeild raforkumálastjórnar ríkisins, 72-79.

Trausti Einarsson, 1966. *Um orsakir jarðhitans*. Tímarit V.F.Í., 51, 23-32.

Umhverfisstjórnuneytið, 2002. *Velferð til framtíðar: sjálfbær þróun í íslensku samfélagi: stefnumörkun til 2020*. Umhverfisstjórnuneytið.

Umhverfisstjórnuneytið, 2005. *Tölulegar vísbendingar 2005. Velferð til framtíðar: sjálfbær þróun í íslensku samfélagi*. Umhverfisstjórnuneytið.

Umhverfisstjórnuneytið, 2007. *Velferð til framtíðar: sjálfbær þróun í íslensku samfélagi: áherslur 2006-2009*. Umhverfisstjórnuneytið.

Ungemach, P., M. Antics and M. Papachristou, 2005. *Sustainable geothermal reservoir management*. Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Unnur Birna Karlsdóttir, 2010. *Þar sem fossarnir falla: viðhorf til náttúru og vatnsaflsvirkjana á Íslandi 1900-2008*. Hið íslenska bókmenntafélag. ISBN: 9789979662525.

Valgarður Stefánsson og Elías B. Eliasson, 1998. *Samnýting orkulinda*. Orkustofnun, (OS-98005).

Valgarður Stefánsson, 2000. *The renewability of geothermal energy*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, maí – júní.

Valgarður Stefánsson, 2001a. *Stofnkostnaður jarðvarmavirkjana*. Orkuþing 2001: Orkumenning á Íslandi: Grunnur til stefnumótunar, Grand Hótel 11.-13. október 2001. Reykjavík.

Valgarður Stefánsson, 2001b. *Forðafraði og lagarammi*. Orkuþing 2001: Orkumenning á Íslandi: Grunnur til stefnumótunar, Grand Hótel 11.-13. október 2001. Reykjavík.

Valgarður Stefánsson, 2002. *Sjónarmið Orkustofnunar*. Málþing Jarðhitafélags Íslands: Virkjun jarðhita – leyfisveitingar og mat á umhverfisáhrifum. Rit 5/2002.

Valgarður Stefánsson og Guðni Axelsson, 2005. *Sustainable utilization of geothermal resources through stepwise development*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24. – 29. apríl.

Western Governors Association - Geothermal Task Force, 2005. *Near-Term Geothermal Resource Assessment*.

World Commission on Environment and Development, 1987. Ritsj. Gro Harlem Brundtland. *Our common future*. Oxford University Press.

VIÐAUKI I – ORÐASKÝRINGAR

Hér á eftir er listi yfir nokkur hugtök sem koma fyrir í skýrslunni og skýringar faghópsins á þeim. Miðað er við íslensk jarðhitakerfi og aðstæður.

I.1 Orkuhugtök

Orka (e. energy)

Orka er grundvallarstærð í eðlisfræðilegu kerfi sem lýsir hæfileika kerfisins til að framkvæma vinnu. Orka er til á margvíslegu formi og því er ekki til ein allsherjar skilgreining á hugtakinu (aflfræðileg orka, raforka, kjarnorka o.fl.). Aflfræðileg orka er t.d. skilgreind sem sú vinna sem framkvæmd er þegar kraftur breytir hraða hlutar. Orka er mæld í einingunni J eða Nm. Einnig er oft notuð einingin kWh.

Hitastig (e. temperature)

Hitastig er eðlisfræðileg stærð sem lýsir hreyfiorku sem býr í óreiðukenndri hreyfingu efniseinda. Varast ber að nota orðið hiti um hitastig þó slíkt sé algengt í daglegu tali. Hitastig er mælt í °C eða K.

Varmi eða varmaorka (e. heat)

Varmi er sú orka sem leiðist við snertingu eða geislar frá hlut með hærra hitastigi, til hlutar með lægra hitastig. Enginn varmi streymir milli hluta með sama hitastig. Algengt er að varma sé ruglað saman við innri orku, en það er munur á þessu tvennu: varminn sem flæðir frá umhverfinu í kerfið ásamt vinnunni sem umhverfið framkvæmir á kerfinu jafngildir aukningu innri orku þess. Í daglegu tali er orðið hiti einnig notað yfir varma.

Jarðhiti (e. geothermal energy)

Jarðhiti er eftir bókstaflegri merkingu orðsins sú varmaorka sem bundin er í jörðinni og sú orka sem streymir stöðugt til yfirborðs. Í daglegu tali er oftast átt við laugar og hvera á yfirborði og orku í jarðhitageymi.

Varmaflutningur (e. heat transfer)

Varmaflutningur á sér stað á þrjá vegu: með varmaleiðingu, varmaburði og varmageislun.

Varmaburður (e. convection/advection of heat)

Flutningur varmaorku með efni sem er á hreyfingu. Einnig er notað orðið hringhreyfing fyrir varmaburð svo og orðið hræring, sem gjarnan er notað í jarðhitafræðum.

Varmaleiðing (e. *heat conduction*)

Flutningur varmaorku í kyrrstæðu efni. Orkan berst sem hreyfiorka úr einni ögn í aðra og þannig koll af kolli eftir efninu. Varmaleiðni lýsir eiginleika efnis til að leiða varma. Varmaflutningur með varmaleiðingu er oftast margfalt hægari en með varmaburði.

Varmastraumur úr iðrum jarðar (e. *terrestrial thermal current*)

Stöðugur varmastraumur um jarðskorpuna með flæði varmaorku úr iðrum jarðar með varmaleiðingu og varmaburði með heitu vatni og kviku. Varmastraumur er mældur í einingunni J/s eða W. Varmastraumur á flatarmálseiningu er mældur í W/m^2 eða mW/m^2 .

Orkuþéttleiki (e. *energy density*)

Orka á rúmmálseiningu. Eining J/m^3 .

Vermi (e. *enthalpy*)

Varmaorka á massaeiningu. Eining J/kg eða kJ/kg.

Íðorka jarðvarma (e. *exergy of geothermal heat*)

Íðorka jarðvarma er sú hámarksvinna sem vökvinn fær framkvæmt við vinnuferli niður í $15^\circ C$ við andrúmsloftsþrýsting (1 bar-a).

Frumorka (e. *primary energy*)

Frumorka er sú orka í náttúrunni sem ekki hefur gengið í gegnum umbreytingarferli af manna völdum. Fyrir jarðvarma er það sú orka sem losnar úr vökvænum við vinnuferli niður í meðalhitastig á yfirborði jarðar, $15^\circ C$, og andrúmsloftsþrýsting (1 bar-a).

Notorka (e. *energy use*)

Notorka er sá hluti frumorku sem nýtist til að framkvæma vinnu, framleiða raforku, til upphitunar eða beinnar neyslu.

Orkunýtni (e. *energy efficiency*)

Hlutfall notorku og íðorku jarðvarma. Fyrir raforkuvinnslu er hámarksnýtni skilgreind skv. Carnot-vél.

I.2 Auðlindahugtök

Auðlind (e. resource)

Auðlind er eitthvað sem menn hafa gagn eða ánægju af og flokkast sem verðmæti í formi hráefna, orkulinda eða þjónustu til þess að uppfylla ákveðin lífsskilyrði. Auðlind vísar ekki til efnis eða hlutar heldur til þeirra verðmæta sem efnið eða hluturinn gefur, sem hugsanlega er arðbært að nýta. Orkulindir má flokka sem óendurnýjanlegar auðlindir eins og kol, olíu og gas eða endurnýjanlegar auðlindir eins og vatnsorku og jarðhita.

Endurnýjanleiki (e. renewability)

Eiginleiki auðlindar. Byggir á varmastraum inn í jarðhitageymi. Massi og varmi endurnýjast á hraða sem er af sömu stærðargráðu og nýtingarhraðinn.

Orkuforði (e. stored energy)

Bundin orka í jarðskorpu á skilgreindu dýpi.

Nýtanlegur orkuforði (e. reserve)

Jarðvarmi sem hægt er að nýta á hagkvæman hátt miðað við orkuverð, tæknistig, upplýsingar og verndun á hverjum tíma.

Jarðhitakerfi (e. geothermal system)

Afmarkað rúmmál í jarðskorpu þar sem hræring grunnvatns á sér stað og varmi er fluttur með vatni úr neðri hluta skorpunnar upp undir yfirborð. Það inniheldur alla þætti kerfisins, þ.e. aðrennsli, uppstreymisrás, jarðhitageymi, lauga- og hverasvæði og afrennsli.

Háhitakerfi (e. high temperature system)

Jarðhitakerfi þar sem hitastig er 200°C eða hærra á 1000 metra dýpi.

Lághitakerfi (e. low temperature system)

Lághitakerfi þar sem hitastig er 150°C eða lægra á 1000 metra dýpi.

Jarðhitageymir (e. geothermal reservoir)

Heitur og vatnsgæfur hluti jarðhitakerfis, sem hægt er að nýta til orkuvinnslu.

Vinnslusvæði (e. production area)

Athafnasvæði virkjunar eða hitaveitu til orkuöflunar úr jarðhitageymi.

I.3 Hugtök um sjálfbærni

Sjálfbær (e. *sustainable*)

Orðið sjálfbær er almennt notað fyrir enska hugtakið sustainable og er það gert í þessari skýrslu. Faghópurinn er þó sammála um að orðið haldþætt, sem stungið hefur verið upp á, væri betri þýðing á sustainable.

Sjálfbær þróun (e. *sustainable development*)

Sjálfbær þróun er þróun sem fullnægir þörfum samtíðarinnar án þess að skerða möguleika komandi kynslóða til að fullnægja sínum þörfum.

Sjálfbær orkuþróun (e. *sustainable energy development*)

Samkvæmt Alþjóða orkumálastofnuninni (International Energy Agency) og Alþjóðlegu kjarnorkumálastofnuninni (International Atomic Energy Agency) er sjálfbær orkuþróun skilgreind sem nægt framboð tryggrar og umhverfisvænnar orku á viðráðanlegu verði í samræmi við þarfir félagslegrar og hagrænnar þróunar.

Sterk sjálfbærni (e. *strong sustainability*)

Með sterkri sjálfbærni er gert ráð fyrir að þróunin hafi ekki neikvæð áhrif á neinn meginþátt sjálfbærrar þróunar; efnahag, samfélag og umhverfi.

Veik sjálfbærni (e. *weak sustainability*)

Veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhvers meginþáttanna; efnahag, samfélag og umhverfi enda skili þróunin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata.

Sjálfbær nýting jarðhita (e. *sustainable geothermal utilisation*)

Jarðhitaauðlindina skal nýta á sjálfbæran hátt, þannig að framboð tryggrar orku til húshitunar, raforkuvinnslu og annarra nota sé nægilegt fyrir félagslega og hagræna þróun samfélagsins og þjóðfélagsins í samræmi við markmiðin 10 í töflu 1.

Sjálfbær vinnsla jarðhita (e. *sustainable geothermal yield / production*)

Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluaðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu frá kerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sé vinnsluálag meira en E_0 , er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en eða jöfn E_0 er skilgreind sem sjálfbær vinnsla en vinnsla umfram E_0 er ekki sjálfbær.

Samfélagslegur ábati (e. social benefit)

Er samanlagður ábati allra einstaklinga í samfélaginu af verkefni eða viðskiptum, óháð því hvort þeir eru beinir þátttakendur eða ekki í viðkomandi verkefni eða viðskiptum. Ábati af tiltekinni nýtingu orkuauðlinda felst í auðlindarentu og öðrum hagnaði sem til verður vegna hennar.

Samfélagslegur kostnaður (e. social cost)

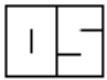
Nær til kostnaðar vegna umhverfisrasks valréttargildis auðlinda, mengunar og annarra áhrifa af nýtingu sem draga úr nytsemd fólks á auðlindinni.

Valréttargildi (e. option value)

Er virði þess að eiga möguleika á nýtingu í framtíðinni, hugsanlega með einhverjum hætti sem nú er óþekktur.

VIÐAUKI II

BRÉF TIL VERKEFNISSTJÓRNAR RAMMAÁÆTLUNAR



Svanfríður Jónasdóttir
Verkefnisstjórn rammaáætlunar
Laugahlið
621 DALVÍK

Reykjavík, 30. janúar 2009
Tilvísun: 2008010007
Bréfalykill: 10.1
Verknúmer: 3034207

Efni: Áfangaskýrsla starfshóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita

Vísað er til skipunarbréfs starfshópsins, dags. 28. mars 2008. Starfshópnum er gert að skila áfangaskýrslu um framvindu verksins og lokaskýrslu um mitt ár 2009. Í samræmi við þetta vill starfshópur með bréfi þessu gera grein fyrir störfum sínum til þessa en nefndin telur enn nokkuð í land áður en hún getur lokið hlutverki því sem henni hefur verið ætlað. Nefndin mun þó kappkosta við að ljúka við gerð lokaskýrslu innan sex mánaða. Hönnun sérstakrar matsaðferðar og beiting hennar á Kröfluvirkjun verður þó ekki lokið fyrr en í lok árs 2009. Nefndin telur ekki tímabært að láta tillögur frá sér fara á þessu stigi þó að gerð verði grein fyrir framvindu verksins og áherslum nefndarinnar.

1. Skipun starfshópsins, störf og efnisöflun

Iðnaðarráðuneytið fór þess á leit við verkefnisstjórn rammaáætlunar um verndun og nýtingu náttúrusvæða, að fram fari mat á sjálfbærri nýtingu jarðhita. Í samstarfi við Orkustofnun var starfshópur um sjálfbæra nýtingu jarðhita skipaður þann 28. mars 2008 af Guðna A. Jóhannessyni, Orkumálastjóra, og Svanfríði Jónasdóttur, formanni verkefnisstjórnar. Samkvæmt tilnefningum eiga þessir sæti í nefndinni: Albert L. Albertsson, aðstoðarforstjóri, tilnefndur af Hitaveitu Suðurnesja, Axel Björnsson, jarðeðlisfræðingur, tilnefndur af verkefnisstjórn, Árni Gunnarsson, verkfræðingur, tilnefndur af Landsvirkjun, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, jarðfræðingur, tilnefnd af verkefnisstjórn, Grímur Björnsson, jarðeðlisfræðingur tilnefndur af Orkuveitu Reykjavíkur, Guðni Axelsson, jarðeðlisfræðingur, tilnefndur af Orkustofnun sem fulltrúi RARIK og Norðurorku, Jónas Ketilsson, verkfræðingur, tilnefndur af Orkustofnun, skipaður sem formaður starfshópsins, og Kristján Sæmundsson, jarðfræðingur, tilnefndur af verkefnisstjórn rammaáætlunar. Því miður fór það svo að vegna anna sá Albert L. Albertsson sér ekki fært að taka þátt í starfinu og hefur því dregið sig út úr verkinu. Að lokum skal nefna að Bjarni Pálsson tók við af Árna Gunnarssyni sem fulltrúi Landsvirkjunar í lok árs 2008.

Formaður kallaði starfshópinn saman til fyrsta fundar í mars 2008. Hann hefur haft starfsaðstöðu á Orkustofnun og fjarfundarbúnaður á Akureyri notaður við tækifæri. Formaður starfshópsins hefur sinnt ritarastörfum. Reglulegir nefndarfundir frá upphafi eru nú orðnir þrettán. Almenn gagnasöfnun var aðalverkefni nefndarinnar árið 2008, en mikið fræðilegt efni liggur fyrir um auðlindamál jarðhita bæði hér á landi og erlendis. Orkustofnun hefur lagt áherslu á alþjóðlegt samstarf um ofangreint málefni og hefur m.a. nýtt til þess

aðkomu sína að þróunarverkefni innan IEA-GIA (*e. International Energy Agency - Geothermal Implementing Agreement*). Auk þess skal þess getið að Orkustofnun hýsir lokað vefsvæði fyrir starfshópinn þar sem safnað hefur verið saman ýmsum greinum, fundargerðum og áhugaverðu efni er tengist sjálfbærri þróun og nýtingu jarðhita. Við verklok verður greinasafninu safnað saman til varðveislu fyrir næsta starfshóp og vistað í GoPro, skjalavistunarkerfi Orkustofnunar.

Starfshópnum til ráðuneytis hafa verið þau Ragnheiður Ólafsdóttir, umhverfisstjóri Landsvirkjunar, Stefán Gíslason verkefnisstjóri Staðardagskrár 21 á Íslandi, Brynhildur Davíðsdóttir, umhverfshagfræðingur og dósent í umhverfis- og auðlindafræðum við Háskóla Íslands, Ólafur P. Jónsson, lektor í heimspeki við Háskóla Íslands, Friðrik M. Baldursson, hagfræðingur og prófessor við viðskiptadeild Háskóla Reykjavíkur, Ragnar Árnason hagfræðingur og prófessor við hagfræðideild Háskóla Íslands, Björgólfur Thorsteinsson, rekstrarhagfræðingur og stjórnarformaður Landverndar og Aðalheiður Jóhannsdóttir, lögfræðingur og dósent við lagadeild Háskóla Íslands. Þau hafa m.a. sótt einstaka fundi starfshópsins og kynnt hópnum sjónarhorn sín og viðkomandi fræðigreina á sjálfbærni. Auk þess hafa Tómas Þ. Tómasson, starfsmaður rammaáætlunar, Orkumálastjóri og formaður verkefnisstjórnar sótt einstaka fundi starfshópsins.

2. Verkefni og starfssvið

Samkvæmt skipunarbréfi starfshópsins með síðari breytingum verkefnisstjórnar vegna verkefnaflutnings frá háhitahóp (bréf dags. 9. apríl 2008), á starf nefndarinnar fyrst og fremst að beinast að þremur viðfangsefnum:

1. Leggja fram rökstuddar tillögur um hvernig skilgreina eigi sjálfbæra jarðhitanytingu og hvernig meta eigi sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa.
2. Koma með tillögur að mismunandi nýtingarleiðum er miða að sjálfbærri nýtingu auðlindarinnar.
3. Semja drög að reglum er hafi það að markmiði að tryggja sjálfbæra nýtingu jarðvarma. Taka skal tillit til viðeigandi alþjóðasamninga og yfirlýsinga sem Ísland á aðild að, m.a. Ríó-yfirlýsingarinnar og meginreglna umhverfisréttar.

Starfshópurinn hefur ákveðið að ganga útfrá fyrri skilgreiningu faghóps Orkustofnunar um sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa. Samkvæmt henni er sjálfbær jarðhitavinnsla skilgreind sem orkuvinnsla sem hægt er að viðhalda í a.m.k. 100 ár. Auk þess verður fjallað um hinar ýmsu nýtingarleiðir í lokaskýrslu, m.a. ágeng vinnsla með hléum. Eðli jarðhitaauðlindarinnar, uppruni og þróun hefur einnig verið til umfjöllunar sem greint verður frá í lokaskýrslu ásamt skilgreiningum á helstu hugtökum málinu tengt. Á einhvern hátt þarf að taka tillit til þess að afkastageta auðlindarinnar vex með aukinni þekkingu og tækniframförum, eins og rætt hefur verið af starfshópnum. Þar má nefna dýpri boranir og uppgötvun jarðhita á áður óþekktum svæðum, bæði nálægt og fjarri þekktum jarðhitasvæðum. Einnig verður tekið til skoðunar hvernig skal haga ákvæðum um meðferð auðlindar í leigusamningum en eðli leigjanda er fyrst og fremst að ná sem mestum arði af

nýtingu auðlindarinnar á leigutímanum, en það þarf ekki endilega að samræmast markmiðum ríkisins og þjóðar.

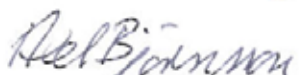
Þriðja meginverkefni starfshópsins er að tengja nýtingu jarðhita við sjálfbæra þróun og þær alþjóðasamþykktir sem Ísland á aðild að. Starfshópurinn hefur lagt meginþunga sinnar vinnu við þennan verklið þar sem um frumraun er að ræða. Viðfangsefnið sýndist í fyrstu nánast óvinnandi sökum umfangs og skorts á fordæmum. Vinnan í nefndinni og tíðar heimsóknir sérfræðinga hafa hins vegar aukið vonir um að hægt sé að komast að þokkalega faglegri niðurstöðu í þessu umfangsmikla máli. Sömuleiðis verður tekið til skoðunar hvort það þjóni langtímahagsmununum þjóðarinnar að semja reglur sem kveða nánar á um með hvaða hætti skuli farið með auðlindir landsins. Nefndin hefur hins vegar ekki talið það verkefni sitt að útfæra tillögur sínar í formi frumvarpa þó að nefndin muni skoða með hvaða hætti lögleiðing þess í íslenskan rétt sé framkvæmanleg. Starfshópurinn hefur talið hlutverk sitt felast fyrst og fremst í því að skilgreina helstu hugtök, lýsa eðli og þróun auðlindarinnar út frá langtímanýtingu hennar og koma með tillögur um hvernig auðlindin verði best nýtt út frá sjónarmiðum sjálfbærrar þróunar. Til þessa hefur Orkustofnun ákveðið að styrkja meistaranema í auðlindafræðum við Háskóla Íslands við gerð slíkra sjálfbærnivísa sem byggja á hugmyndafræði sjálfbærrar þróunar ásamt aðferðafræði sem þróuð hefur verið af IHA (*e. International Hydropower Association*). Matsaðferðinni verður svo beitt á Kröfluvirkjun í samvinnu við Landsvirkjun. Áætluð verklok þessa liðar er í lok ársins 2009.

4. Verklök

Áætluð verklök eru í júní 2009 með gerð lokaskýrslu. Áhersla verður lögð á skilgreiningar á helstu hugtökum tengdum málefnum sjálfbærrar nýtingar jarðhita, helstu nýtingarleiðum og gert grein fyrir úrslausnarefnum markmiða starfshópsins. Nefndin mun leggja fram tillögur þess efnis með hvaða hætti lögleiða megi fyrrgreind hugtök í íslenskan rétt þó að tillögurnar verði þó ekki útfærðar í formi frumvarpa. Þróun matsaðferðar og beiting hennar á Kröfluvirkjun verður þó ekki lokið fyrr en í lok þessa árs. Reynt verður eftir föngum að gera þó grein fyrir því með hvaða hætti matsaðferðin beitir hagrænum stjórntækjum við mat á sjálfbærri orkuþróun jarðvarmavirkjana.

Virðingarfyllst


Jónas Ketilsson
formaður


Axel Björnsson


Arný E. Sveinbjörnsdóttir


Bjarni Pálsson


Grímur Björnsson


Guðni Axelsson


Kristján Sæmundsson

VIÐAUKI III

RÁÐSTEFNUGREIN Á ENSKU

INTRODUCING THE CONCEPT OF SUSTAINABLE GEOTHERMAL UTILIZATION INTO ICELANDIC LEGISLATION

Introducing the Concept of Sustainable Geothermal Utilization into Icelandic Legislation

Jonas Ketilsson¹, Gudni Axelsson², Axel Bjornsson³, Grimur Bjornsson⁴, Bjarni Palsson⁵, Arny Erla Sveinbjornsdottir⁶, Kristjan Saemundsson²

¹Orkustofnun, Grensasvegi 9, IS-108 Reykjavik, Iceland, ²Iceland GeoSurvey, ³University of Akureyri, ⁴Reykjavik Geothermal, ⁵Landsvirkjun Power, ⁶University of Iceland

Corresponding author: jonas.ketilsson@os.is

Keywords: Sustainable development, weak sustainability, strong sustainability, sustainability indicators, geothermal, legislation, Iceland.

ABSTRACT

In this study the term sustainable geothermal utilization is discussed, based on the principles of sustainable development, and legal implementation suggested in the form of mending a derivative regulation from laws that are already in place. The development of a comprehensive assessment framework of sustainability indicators is introduced taking into consideration economic prosperity, environment and social justice. Sustainable development as defined by the World Commission on Environment and Development is a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. This definition is inherently vague, and is often understood in various ways. In an attempt to link sustainable development to the management of geothermal resources two approaches are introduced; weak sustainability which assumes the validity of growth and places equal importance on environment, social justice and economic prosperity and strong sustainability having the environment as a foundation to social justice and economic prosperity. In simple terms, strong sustainability focuses on the viability and health of the geothermal system to sustain exploitation, whereas weak sustainability believes in economic forces and technological advances. In this paper the main methods of sustainable geothermal utilization are outlined. Those methods have also been categorized as either weak or strong sustainable approaches.

1. INTRODUCTION

This paper is the work of a group of geothermal professionals established by the Icelandic Ministry of Industry as a part of the Master Plan for hydro and geothermal energy resources in Iceland. The professionals come from power companies, the regulator, research institutes and universities. The objective is to propose how to define sustainable geothermal utilization and how to assess sustainable potential of geothermal resources and to propose different sustainable utilization modes in accordance with the Rio Declaration from 1992. The group has sought advice from e.g. a philosopher, national economists, a historian, a resource economist, an environmental management specialist, an environmental engineer and an environmental lawyer. A postgraduate student was as well funded to create sustainability indicators for geothermal utilization and apply it to the Krafla geothermal power plant.

It is the policy of the Government of Iceland to increase the utilization of the renewable energy resources further, e.g. for fuelling the transport sector. A broad consensus on conservation of valuable natural areas has been influenced

by social opposition, increasing over the last decade, against large hydropower and some geothermal projects. Moreover, some energy companies plan to take green-initiatives in minimizing visual impact of geothermal power-plants to further increase public acceptance of geothermal utilization for electric power production. The Icelandic Government decided in 1997 to develop a Master Plan for potential power projects. All proposed projects are being evaluated and categorized on the energy efficiency and economics but also on the basis of the impact that the power developments would have on the environment. This complete Master Plan on the energy resources and the value of their conservation is to be presented to the Icelandic Parliament for formal consideration in 2010.

Geothermal energy plays an important role in providing the nation with clean and reliable energy and is fundamental to the Icelandic economy as well as Icelandic welfare and independence, with 62% of the primary energy consumption coming from geothermal in year 2008. It has been estimated that the present value of the estimated savings of house heating with geothermal instead of oil between 1970 and 2008, using 2% real interest rate over the cost price index is 880.000 million ISK (127 ISK/US\$). In 2008 the estimated savings of that year amounted to about 12% of the value of imported goods or almost equivalent to the total imports of refined oil products (Ketilsson et al., 2010).

Effective policy making for sustaining a renewable energy society in Iceland, as well as providing an effective legislature, is crucial for sustaining a long-term lifespan of the resource. Due to the abundance of hydropower and geothermal energy in Iceland relative to the population, Iceland can possibly afford to utilize the resources in a sustainable manner. Thus the aim of this paper is to look into how the concept of sustainable geothermal utilization can be introduced and defined in Icelandic legislation.

2. SUSTAINABLE DEVELOPMENT

As is widely recognized today, sustainable development was first introduced in the Brundtland Report in 1987 (World Commission on Environment and Development, 1987). The report, *Sustainable Development, Our Common Future*, World Commission on Environment and Development was drafted by the World Commission on Environment and Development, an internationally diversified group of politicians, civil servants and experts on environmental law and development, according to the UN General Assembly's declaration to convene a conference on environment and development. The report laid down a wide framework of environmental and developmental policies for the future as well as highlighting urgent environmental and developmental problems affecting the world and portraying misdistribution of wealth between different states. The report provided a key

statement on sustainable development, defining it in the following way: “*Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*” The report introduced draft rules where all basic principles of international environmental law were formulated in a complete document. The report clearly suggests that the term sustainable development indicates a broad policy, both as an objective as well as a principle (Johannsdottir, 2005).

The Rio Conference held in Brazil in 1992 came in the wake of the Brundtland Report. However, the origins of the Rio Conference can be traced directly back to the United Nations Conference on the Human Environment, also known as the Stockholm Conference, in 1972. This was the first UN’s major conference on international environmental issues. The Rio Declaration on Environment and Development was accepted along with Agenda 21. In Chapter 5.2 of Agenda 21 sustainable development is described as having a synergistic relationship with demographic trends and factors. Agenda 21 is a comprehensive plan of action to be implemented globally, nationally and locally by organizations affiliated to the United Nations System, state governments, and major groups in every area in which human activity impacts on the environment (United Nations Division for Sustainable Development, 2005).

Even though the Rio Declaration is regarded as a soft law instrument (see Johannsdottir, 2005) the principles laid down in the declaration have had tremendous effect on the evolution of environmental law since its formation, especially from an international stand point. That being said the various principles of the declaration have had different degrees of influence. For example, it is not contested that Principle 2 of the Declaration, that it is the sovereign right of states to exploit their own natural resources in accordance with their own environmental and developmental policies and that it is their obligation to ensure that the utilization causes no harm to the environment beyond their jurisdictional realms, has achieved the status of international custom. To contrast this, the status of the precautionary principle that is put forth in Principle 15 of the Declaration has not achieved this status and is debated regularly. The same can be said about the polluter principle, dictated in Principle 16 of the Declaration (Johannsdottir, 2005).

Sustainable development has been the axiom of environmental policies worldwide ever since the Brundtland Report was first published. According to Johannsdottir (2005) “The term has a certain built-in tone of encouragement and positive aspiration; however at the same time, it reflects uncertainties and lacks demarcation.” This ambiguity of the concept has Dr. Klaus Bosselmann, the Director of the New Zealand Centre for Environmental Law, regarded having both pros and cons (Bosselmann, 2002). The focal point of Bosselmann’s argument is that one must distinguish between on the one hand strong sustainability and on the other weak sustainability. By strong sustainability Bosselmann refers to when certain limitations of environment are accepted, mainly to say that sustainable development should take place within ecological limits, and all human action should be kept within those limits. Bosselmann’s notion of weak sustainability refers to that sustainability should build on the suggestion that the environment, nature and ecosystem should have the same standing as economic and social

factors and the two should be balanced together, see figure 1.

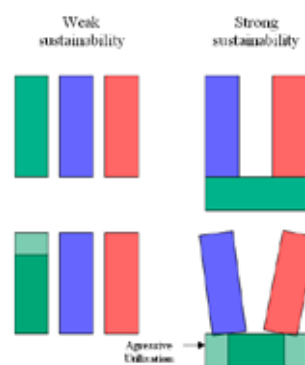


Figure 1. Weak and strong sustainability – Environment, nature and ecosystem (green), economic (blue) and social factors (red). When the resource is exploited aggressively the foundation to social and economic prosperity can collapse as shown above.

Sustainable geothermal utilization has been discussed to some degree in the literature in recent years, partly because the term “sustainable” has become quite fashionable. A general and logical definition has been missing, however, and the term has been used at will. In addition the terms renewable and sustainable are often confused. The former should refer to the nature of a resource while the latter should refer to how it is used. Geothermal energy has been defined to be renewable, e.g. by the EU (Directive 2009/28/EC). As examples of recent discussions of the issue the papers by Axelsson et al. (2005), Stefansson and Axelsson (2005), Sanyal (2005), Ungemach et al. (2005), O’Sullivan and Mannington (2005) and Bromley et al. (2006), as well as the report by Björnsson (2005), may be mentioned. Rybach and Mongillo (2006) present a good review of recent sustainability research.

3. GEOTHERMAL RESOURCES IN ICELAND

The geothermal systems of Iceland are manifestations of the thermal energy that is in-place as well as flowing through the crust of the country. The size of these components was estimated separately in the 1980’s. Bodvarsson (1982) estimated, on one hand, the size of the total steady state energy current through the crust while Palmason *et al.* (1985), on the other hand, estimated the amount of thermal energy stored in the crust. In these two studies the geothermal potential of Iceland is estimated quite differently, which reflects in fact the dual nature of geothermal resources.

The results of these studies have not been comprehensively updated or revised since they were completed, partly because no new data that seriously alter their main results have become available. It may be mentioned that Stefansson (2000) has combined the results of both studies in a unified presentation. Both studies relied on available temperature gradient and heat-flow maps of Iceland. Such maps have been revised and updated as more data have become available, without drastically changing the overall picture (Flovenz and Saemundsson, 1993).

Bodvarsson (1982) estimated that the energy current from below Iceland is about 30 GW (1 GW = 10^9 W) on the average. This includes 24 GW by flowing magma and 5 GW by heat conduction and 1 GW by radiogenic heat

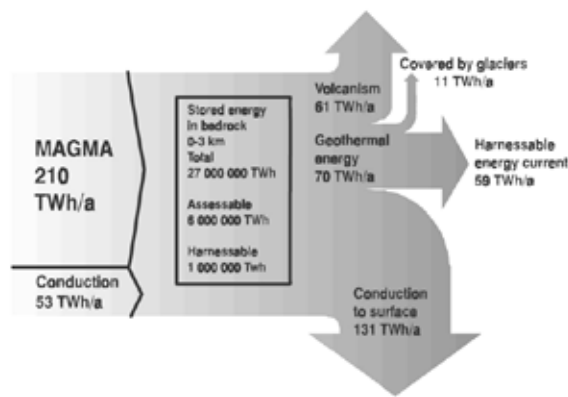


Figure 2: Terrestrial energy current through the crust of Iceland and stored heat (Stefansson, 2000).

production. He only considered land above sea-level, while considerable additional energy also flows up through the ocean floor around the island. This energy flows through the crust, which also stores great amounts of energy (see below), up to the surface. Bodvarsson estimated that at the surface the energy current splits between 7 GW by volcanic activity, 8 GW by water- and steam-flow in geothermal areas and 15 GW by heat conduction. According to these numbers the energy flux through Iceland is about 5-fold the world average. Bodvarsson (1982) also estimated that the energy transported by water and steam in geothermal areas in Iceland is about 1/10 of the corresponding world-wide land-based flow.

The principal result of Palmason *et al.* (1985) is that the total energy stored in the crust of Iceland, from surface down to 10 km depth, amounts to about 1.2 YJ ($1 \text{ YJ} = 10^{24} \text{ J}$). Above 3 km depth the energy stored is only about 0.1 YJ (termed accessible energy). Again these results only apply to the crust directly below the section of the country above sea-level. According to this study the energy density (concentration) is greatest within the volcanic zone, in particular in the high-temperature systems. The thermal energy stored in five of the largest high-temperature systems is estimated to account for 70% of the total energy stored in all high-temperature systems in Iceland. Figure 2 presents a simple sketch of both components of the geothermal potential of Iceland.

By combining the estimated energy stored and energy current it is possible to estimate roughly how long it has taken the thermal energy above 10 km depth to accumulate in the crust, or the time-scale on which this stored energy is renewed. In this way an estimate of the order of 1.3 million years is obtained. But it is clear that this replenishment takes place at drastically variable time-scales, depending on the mode involved. Thus energy replenishment through the flow of magma, water or steam is several orders of magnitude faster than replenishment by heat conduction alone.

4. SUSTAINABLE UTILIZATION OF GEOTHERMAL RESOURCES

Experience from utilization of numerous geothermal systems the last half a century has shown that it's possible to produce geothermal energy in such a manner that a geothermal system, which previously was in an undisturbed natural state, reaches a new equilibrium (at least a semi-equilibrium) after massive production starts, which may be maintained for a long time. This is because pressure decline in geothermal systems, due to production, can cause the

recharge to the systems to increase approximately in proportion to the rate at which mass is extracted.

Axelsson and Stefansson (2003) and Axelsson *et al.* (2005) discuss a few such examples. One of the best examples is the Laugarnes geothermal systems in Reykjavik, from which the average yearly mass extraction has been about 5 Mm³ (about 160 l/s average production) the last four decades. This has not caused a substantial pressure decline in the system, except for the first few years. Therefore, it is believed that the inflow, or recharge, to the systems is now about tenfold what it was before production started. Axelsson *et al.* (2009) present other comparable Icelandic low-temperature examples. Another good example is the Matsukawa geothermal system in Japan (Hanano, 2003), which also has been utilised for about four decades for an approximately steady electricity generation (about 60 kg/s average steam production). In other cases geothermal production has been excessive and it has not been possible to maintain it in the long-term. The utilization history of the Geysers area in California is a good example of excessive production of the mass reserve. Total generation in the area has been reduced by almost half because of a nearly steady pressure decline in the system (Barker, 2000).

It seems natural to classify sustainable geothermal utilization as energy production that somehow can be maintained for a very long time. Based on this understanding and case histories, such as the ones mentioned above, Axelsson *et al.* (2001) have proposed the following definition for the term "sustainable production of geothermal energy from an individual geothermal system":

*For each geothermal system, and for each mode of production, there exists a certain level of maximum energy production, E_0 , below which it will be possible to maintain constant energy production from the system for a very long time (100-300 years). If the production rate is greater than E_0 it cannot be maintained for this length of time. Geothermal energy production below, or equal to E_0 , is termed **sustainable production** while production greater than E_0 is termed **excessive production**.*

This definition applies to the total extractable energy, and depends in principle on the nature of the geothermal system in question. It does, however, neither consider load-factors, utilization efficiency, economical aspects, environmental issues nor technological advances. The value of E_0 may be expected to increase with time through technological advances, e.g. through deeper drilling targets. In addition the definition depends on the mode of production, which may involve free-flow, pumping, injection or periodic production. It must be emphasized that this definition is

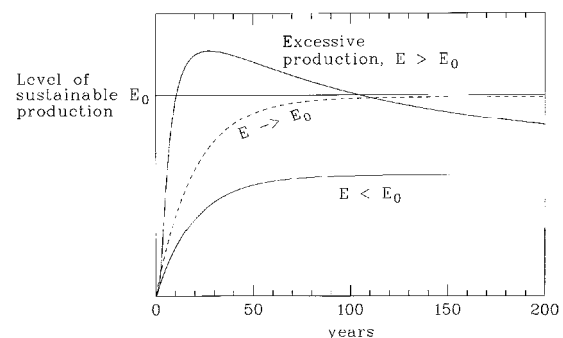


Figure 3. A schematic figure illustrating the difference between sustainable and excessive production (Axelsson *et al.*, 2001).

simply based on the Brundtland definition, but does not imply economical sustainability, which normally is considered on a much shorter time scale, normally of the order of 30 years.

The definition is based on a much longer time-scale. In contrast, the time since Iceland was settled (1000 years) could also be used as a time-frame, or a period on the geological time-scale, such as the time since the end of the last ice-age (10,000 years). These time-frames are considered unrealistic in view of the time-scale of human endeavours. Therefore, a time-frame within the bounds of these different time-scales was chosen.

Even though geothermal resources are normally classified as renewable energy sources, because they are maintained by a continuous energy current, such a classification may be an oversimplification. Geothermal resources are in essence of a double nature, i.e. a combination of an energy current (through heat convection and conduction) and stored energy. The renewability of these two aspects is quite different as the energy current is steady (fully renewable) while the stored energy is renewed relatively slowly, in particular the part renewed by heat conduction. The semi-equilibrium reached in cases such as Laugarnes and Matsukawa may reflect the renewability of the corresponding geothermal resources. The renewable component (the energy current) is greater than the recharge to the systems in the natural state, however, because production has induced an additional inflow of mass and energy into the systems (Stefansson, 2000). In the case of Laugarnes it may have increased by a factor of 5-10.

If energy production from a geothermal system is within the sustainable limit defined above one may assume that the stored energy is mined relatively slowly and that the energy in the reservoir is renewed at approximately the same rate as it is extracted at. Once again the Laugarnes system provides a good example. To maintain such a semi-steady state for a long time thus requires the renewable part of the underlying resource to be relatively powerful. Yet it is likely that the “volume of influence” of the geothermal energy extraction is very large and that the renewability is to some degree supported by energy extraction from the outer and deeper parts of the geothermal system in question.

The value of E_0 is not known a priori, but it may be estimated for individual systems, through modelling, on the basis of exploration and production data as they become available. Axelsson *et al.* (2005) present a few such examples. For Iceland as a whole it is proposed that total utilization less than, or comparable to, the total heat-flow through the island can be considered sustainable. This amounts to about 29 GW of thermal energy. Of course only a small part of the heat-flow can be captured to generate energy, but generation at this rate for 100-300 years would only amount to about 0.015% of the thermal energy stored in the crust of the island down to 10 km depth and to about 0.2% of the energy stored down to 3 km depth.

It seems evident that geothermal resources can be utilised through various different modes of operation, all of which may adhere to the sustainability definition presented above. In addition to utilization modes in which production is always below the sustainable limit much more aggressive utilization modes can be envisioned (not sustainable in the long-term), either initially or intermittently. Modelling studies have demonstrated that following a period of excessive production geothermal systems are able to recover approximately back to their pre-production state,

i.e. the effects of intense production are mostly reversible (see later). Such production modes are more in-line with the utilization of many high-temperature geothermal systems today. They are harnessed in large steps, which are unlikely to be sustainable along the lines of the definition above, but are economically feasible due to their size. They are also intended to meet a demand for electrical power that grows in large steps, for example due to the demands of power-intensive industry.

The main methods/modes of sustainable geothermal utilization that may be envisioned are thus the following:

- (1) Constant production (aside from variations due to temporary demand such as annual variations) for 200 years. This is hardly a realistic option because the sustainable production capacity of geothermal systems is unknown beforehand. Therefore, a kind of test-period is required initially until the sustainable potential has been assessed.
- (2) Production increased in a few steps until the sustainable potential has been assessed and the sustainable limit attained.
- (3) Excessive production (not sustainable) for a few decades (perhaps about 30 years) with total breaks in-between, perhaps a little longer than the production periods (about 50 years), wherein a geothermal system is able to recover almost fully.
- (4) Excessive production for 30 – 50 years followed by a steady, but much reduced production for the next 150 – 170 years. The production following the excessive period would thus be much less than the sustainable potential at constant production (mode (1)).

Of these methods 1-2 and 3-4 can be considered strong and weak sustainable approaches respectively in accordance with Bosselmann (2002). It should be pointed out that the sustainable development of energy resource utilization must eventually be viewed in a broader context than for single geothermal systems independent of other systems. The following must be kept in mind:

- (i) During long-term utilization some interference, even considerable, may be expected between adjacent geothermal fields being used, even over considerable distances (tens of km). This possible interference must be kept in mind but can possibly be mitigated with known measures like reinjection.
- (ii) If single geothermal systems are being utilised in an intense/excessive manner during a certain period other geothermal systems may need to be available in the same general region, which could then be utilised while the former systems are being rested. Thus the overall geothermal resource utilization in the region may be managed as sustainable, even though single geothermal systems are not.

If geothermal development in a region is, on the other hand, in a step-wise manner the development may be required to be ongoing in several geothermal fields at the same time, because the steps in each field are likely to be so small.

5. ASSESSING THE SUSTAINABLE POTENTIAL E_0

The concept of strong and weak sustainability allows for coupling standard reservoir engineering tools into the permitting and legislative processes that accompany decision making in geothermal projects. Two permitting categories can be envisioned, for new green field projects and where existing power projects are to be expanded based on available production history and detailed numerical

reservoirs models. The legislative decision making will nevertheless always have a political flavour, in particular when a developer has plans for large power projects. The first rule of thumb may therefore be that the larger a project is in terms of extracted mass and heat from depth, the weaker is its sustainability. For such instances the political responsibility is to make sure that large projects generate the manpower-need, technology and sciences to raise the sustainable potential E_0 from its initial estimate, optimally making an initially non sustainable production strategy into a sustainable one.

Green field geothermal projects have in general no single methodology for estimating their long term (>100 years) generating capacity. Most common are simple methods based on surface exploration that produce an area estimate for resistivity anomaly coupled with structural maps, chemistry of fumaroles and other parameters that set likely ranges in deep reservoir temperatures and fluid chemistry. By drilling a few exploration wells the deep reservoir temperature, permeability and fluid quality is determined. Based on these a volumetric generating capacity estimate can be put forward, surprisingly often resulting in a normalized area based capacity of some 10-20 MW/km² electric (Sarmiento and Bjornsson, 2007). Other analysis such as comparison with similar reservoirs elsewhere also can support the early generating capacity estimate. Applying numerical reservoir models at the early stage is more controversial. For example pressure drawdown data are scarce or missing, forcing the modeller to use his own intuition to set the outer reservoir permeability. The model is therefore biased by the modeller's background and experience. Resource discoveries also may still have to be made. As an example, the 120 MW Nesjavellir project in Iceland had an early numerical model that was calibrated against downhole data collected in wells outside the hottest part of the reservoir. This led to pessimistic enthalpy predictions and thus reduced the initial generating capacity estimate (Sarmiento and Bjornsson, 2007).

Developed geothermal projects, in particular where some 5-30 years of production data are at hand collected in tens of wells, can be granted expansion licences based on detailed well by well numerical models that consider much longer prediction times than the common 15-30 years for financial recovery of the investment. At this stage the numerical models are properly constrained by field data to account for boundary recharge that accompanies pressure drawdown, a property that may be the single most important parameter in estimating E_0 . The boundary recharge is to be complemented with other activities such as optimal location of injection wells, an issue that is hard to assess without detailed numerical modelling. Finally, the numerical models allow for studies on the recovery rates of mass and heat reserves, after a large power project goes into a resting or reduced production period. All this modelling activity is to make sure that the development complies with the minimum 100 year criterion for sustainable development being proposed by the authors of this paper. A recent modelling study that incorporates the sustainability concept is for example given by Bjornsson *et al.* (2006).

Finally, with the sustainable generating potential E_0 at hand, it appears reasonable that governmental licensing authorities grant annual extraction licences that are based on produced heat instead of MW installed. This allows the geothermal developer to later optimise power plants and well field without reapplying for the various licenses and permits that otherwise might be necessary.

6. SUSTAINABILITY INDICATORS

The Bellagio Principles for Assessment give guidelines for assessing progress toward sustainable development. They include the whole assessment process including the choice and design of indicators, their interpretation and communication of the result. (Hardi and Zdan, 1997):

The first step of defining Geothermal Sustainability Assessment Protocol (GSAP) is to define clear sustainability goals for geothermal utilization. The Working Group has agreed on eleven goals;

Resource Management / Renewability

(1) See definition above (4. Sustainable utilization of geothermal resources). If possible, sustainable production should be the goal during geothermal utilization. However, in cases where excessive production is necessary (e.g. for electricity generation), a geothermal reservoir must be afforded a recovery period. Such recovery periods should be on a timescale acceptable to society and the use of other geothermal reservoirs should be possible in the meantime. Resource management strategies should therefore consider a number of geothermal systems based around a central volcanic system.

(2) Water usage for the power plant is compatible with other water usage needs in the hydrological catchment area of the geothermal resource.

Efficiency

(3) The geothermal resource is managed in such a way as to obtain the maximum use of all heat and energy produced and to minimise the waste of energy, by adequate forward planning and design of plants, the use of efficient technologies, reinjection where appropriate and cascaded energy uses.

Research and Innovation

(4) New technologies for the exploitation of previously untapped geothermal, or other energy resources, are actively researched or supported either directly or through links with university programmes or other research and development groups.

Environmental Impacts

(5) The geothermal resource is managed so as to minimize local and global environmental impacts through thorough resource and environmental impact assessment before development, appropriate reinjection management, usage of mitigation technologies and environmental management strategies during all phases of development

Social Aspects

(6) The use of the geothermal resource generates net positive social impacts.

Energy Security, Accessibility, Availability and Diversity

(7) The energy supplied by the geothermal resource is readily available, accessible and affordable.

(8) The geothermal energy source is reliable and contributes to energy security for a nation or region.

Economic and Financial Viability

(9) The geothermal energy project is cost-effective, financially viable and minimizes risk. The project should carry positive net national economic benefits.

(10) The enterprise managing the geothermal resource practises corporate social responsibility (Shortall, 2009).

Table 1: Systems and subsystems used in systems analysis for indicator development (Shortall, 2009).

Human	Natural	Support
Government & Organizations (Owner/Developer/ Contractors)	Geothermal Resource (Individual & National/Regional)	Economy (Local & National)
Individual Development System (Local & National)	Environmental System (Local & National)	Infrastructure (Local & National)
Social System (Local & National)		

Knowledge Sharing

(11) Knowledge and experience gained during the development of geothermal utilization projects should be accessible and transparent to the public and other interested groups.

The second step is to develop sustainability indicators. Two different methods are suggested. The first method involves developing thematic indicators, where the indicators are grouped into the following themes: Environment, Social, Economic and Institutional and further into sub-themes similar to the approach used in the development of the Hydropower Sustainability Assessment Protocol (IHASAP, retrievable at hydropower.org). The other method is system based and involves finding indicators for the three main systems relevant to sustainable development i.e. Human, Natural and Support, and their subsystems (Bossel, 1999). While the theme-based approaches are more common for national energy indicator sets and allow for more emphasis on the systematic cross-linkages between the indicators, the systemic approach offers a more structured, holistic view of the sustainability of the systems (Shortall, 2009).

In Iceland a Geothermal Sustainability Assessment Protocol (GSAP) is being developed based on the systemic approach (Shortall, 2009). The three main systems are broken up into seven sub-systems as shown in Table 1. For each subsystem, seven orientors of viability must be satisfied in order for the sub-system to be viable or sustainable. The seven orientors are: Effectiveness, Efficiency, Freedom of Action, Security, Adaptability, Coexistence and Psychological Needs. Around 40-50 sustainability indicators have been defined but only eight are directly linked to the geothermal resource itself. In this approach no indicator is deemed more important than another (Shortall, 2009).

In 2009-2010 the GSAP will be implemented for a project involving the Krafla geothermal power plant in N-Iceland. Further testing of the protocol will be performed in the near future for different geothermal projects and for countries at different stages of development to ensure the validity of the indicators for different national conditions.

7. IMPLEMENTATION INTO ICELANDIC LEGAL FRAMEWORK

The Icelandic legislature has incorporated the concept of Sustainable Development into several acts. The acts worthy of mention, i.e. acts that have to do with environmental law, are The Planning and Building Act no. 73/1997, The Nature Conservation Act no. 44/1999 and The Strategic Environmental Assessment Act no. 105/2005. Adding to this list is The European Economic Agreement Act no. 2/1993 which stipulates the induction of EU legislation into the Icelandic legal system. These laws all share a common denominator, which is that Sustainable Development is always an objective of the law rather than being strictly stipulated. The reference to Sustainable Development in these acts is also rather vague e.g. Paragr. 3, Art. 1 of The

Nature Conservation Act which states that the Act is to, among other things, promote protection and utilization of resources on the grounds of sustainable development. This is the only reference in the Act and no attempt is made to define what is meant by sustainable development. The same can be said about the aforementioned Acts which cite sustainable development. An article is worth mentioning for a thorough overview of Icelandic legal framework and national policy in regards to geothermal utilization, (Ketilsson *et al.*, 2009).

The general and uncertain mentions of Sustainable Development in Icelandic law are in turn with the views expressed by scholars such as Bosselmann and Jacob (Johannsdottir, 2005) i.e. the weaknesses of the term itself. It is the authors' opinion that sustainable geothermal utilization should be defined and implemented into Icelandic law. A possible method of achieving this would be to model somewhat the Icelandic Electricity Act no. 65/2003. In the Electricity Act itself there is no mention of sustainable development or sustainable utilization. However the Act has a derivative regulation, Regulation no. 1040/2005, which implements the application of the Act in a more precise manner. The regulation takes on various aspects of the law that empowers it, such as defining various concepts, implementation of how power development licenses are issued and what conditions are to be met in order to acquire a power development licenses. In Paragr. 5, Art. 5 of the regulation it says (in Icelandic, translated unofficially here) that the Minister [of Industry] shall aspire to promote sustainable utilization of renewable resources. This is one of the more direct mentions of how sustainability shall be implemented by law but again, sustainable utilization or sustainability is not defined.

Our suggestions are that this should be done in regards of The Resource and Utilization Act no. 57/1998. In the Act there could be, as is in the aforementioned environmental acts, an article stating the objective of the Act. Then, a derivative regulation could be implemented, as has been in the case of the Electricity Act, which would then in turn define what is considered sustainable utilization of a geothermal resource. The regulation could go on to state that sustainable utilization is a condition of being granted and/or should be in the contents of a power development license. These parameters e.g. that go further than the already in place regulation derived from the Electricity Act, could also be applied to that same regulation, both included in the article on definitions, the article on power development licenses (both applications and conditions for the license) as well as the article which defines the content of each license.

8. CONCLUSIONS

In this study the term sustainable geothermal utilization is discussed, based on the principles of sustainable development, and legal implementation suggested into Icelandic legal framework. The main methods of sustainable geothermal utilization have also been outlined. Those methods have been categorized as either weak or strong sustainable approaches with Bosselmann's definitions in mind, i.e. weak sustainability assuming the validity of growth and placing equal importance on environment, social justice and economic prosperity and strong sustainability having the environment as a foundation to social justice and economic prosperity.

The development of a comprehensive assessment framework of sustainability indicators is introduced taking into consideration economic prosperity, environment and

social justice based on the Bellagio principles from the International Institute for Sustainable Development.

The concept of sustainable utilisation of geothermal resources can be implemented into Icelandic legislation and defined in the form of mending a derivative regulation from laws that are already in place. However, protection and utilisation of energy resources is a political debate. The Master Plan for hydro and geothermal energy resources in Iceland is to facilitate with decision making and will be presented to the Parliament in 2010. The results of this working group will facilitate in the discussion on sustainable utilization of energy resources in Iceland.

ACKNOWLEDGEMENTS

The working group would like to acknowledge the contribution of the specialists the group has sought advice from, especially; Ragnheiður Ólafsdóttir, head of environmental affairs at Landsvirkjun, Adalheiður Johannsdóttir, professor environmental law, Brynhildur Davíðsdóttir, resource economist, Ólafur Pall Jónsson, philosopher, and Ragnar Arnason, professor in economics, from University of Iceland, Fridrik Mar Baldursson, professor in economics at Reykjavík University, Stefan Gíslason, environmental management specialist, from Local Agenda 21 office in Iceland, Björgólfur Thorsteinsson, economist and chairman of the Icelandic Environment Association and Ruth Shortall, postgraduate student at University of Iceland.

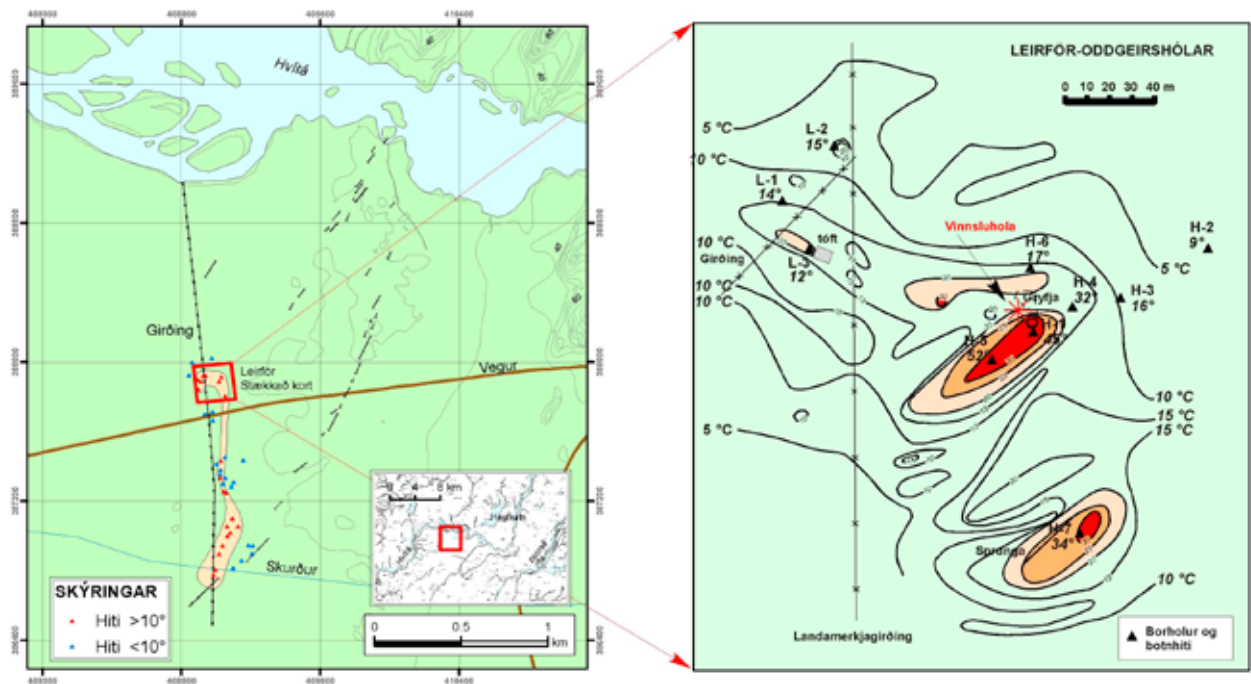
This work was financially supported by Orkustofnun (the National Energy Authority), Landvirkjun Power and Reykjavík Energy.

REFERENCES

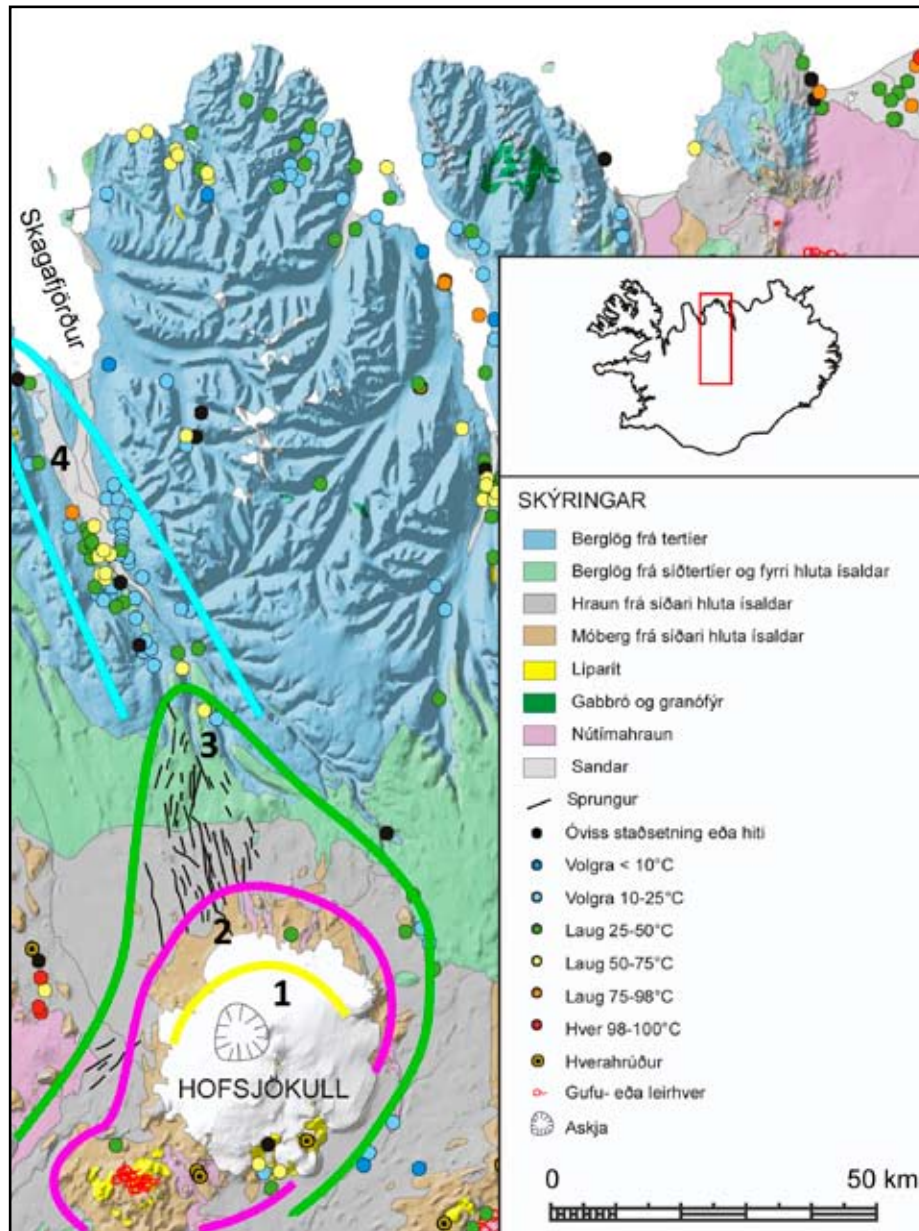
- Axelsson, G., Th. Jonasson, M. Ólafsson and A. Ragnarsson, 2009: "Successful Utilization of Low-Temperature Geothermal Resources in Iceland for District Heating for 80 Years". Paper submitted to the World Geothermal Congress 2010.
- Axelsson, G., V. Stefánsson, G. Björnsson and J. Liu, 2005: "Sustainable utilization of geothermal resources for 100 – 300 years". Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 2005, 8 pp.
- Axelsson, G. and V. Stefánsson, 2003: "Sustainable management of geothermal resources". Proceedings of the International Geothermal Conference 2003, Reykjavík, Iceland, September 2003, 40-48.
- Axelsson, G., A. Gudmundsson, B. Steingrímsson, G. Palmason, H. Armannsson, H. Tulinus, O.G. Flovenz, S. Björnsson and V. Stefánsson, 2001: "Sustainable production of geothermal energy: suggested definition". IGA-News, Quarterly No. 43, January-March 2001, 1-2.
- Barker, B.J., 2000: "The Geysers: Past and Future". *Geothermal Resources Council Bulletin*, **29**, 163-171.
- Bossel, H., 1999. "Indicators of Sustainable Development: Theory, Method, Applications. A report to the Balaton Group", Winnipeg: The International Institute for Sustainable Development.
- Björnsson G., E. Gunnlaugsson and A. Hjartarson, 2006: "Applying The Hengill Geothermal Reservoir Model In Power Plant Decision Making And Environmental Impact Studies". Proceedings, Tough Symposium.
- Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- Björnsson, G., 2005: "Terminology, methodology and definitions used in the development of conceptual- and numerical models of geothermal systems in the Hengill-region" (in Icelandic). Iceland GeoSurvey, report ISOR-05203, Reykjavík, Iceland, 16 pp.
- Bosselmann, K., 2002. "The Concept of Sustainable Development". In *Environmental Law for a Sustainable Society*, 81-96. Bosselmann, K. and Grinlinton, D. (eds.). Auckland: NZCEL Monograph Series
- Bodvarsson, G. 1982: "Terrestrial energy currents and transfer in Iceland". In *Continental and oceanic rifts. Geodynamic Series*, 8, 271-282. Palmason, G. (ed.). Washington D.C: American Geophysics Union.
- Bromley, C.J., M. Mongillo and L. Rybach, 2006: "Sustainable utilization strategies and promotion of beneficial environmental effects – Having your cake and eating it too". Proceedings of the New Zealand Geothermal Workshop 2006, Auckland, New Zealand, November 2006, 5 pp.
- Flovenz, O.G. and K. Saemundsson, (1993): "Heat flow and geothermal processes in Iceland". *Tectonophysics*, **225**, 123-138.
- Hanano, M., 2003: "Sustainable steam production in the Matsukawa geothermal field, Japan". *Geothermics*, **32**, 311-324.
- Hardi, P and Zdan, T. (eds.) (1997): *Assessing Sustainable Development: Principles in Practice*. Winnipeg: The International Institute for Sustainable Development.
- Johannsdóttir, A., (2005): "Considerations on the Development of Environmental Law in the light of the Concept of Sustainable Development". *Ympäristöjuridikka*, **2**, 27-48.
- Ketilsson et al, 2009: "Legal Framework and National Policy for Geothermal Development in Iceland". Paper submitted to the World Geothermal Congress 2010.
- O'Sullivan, M. and W. Mannington, 2005: "Renewability of the Wairakei-Tauhara geothermal resource". Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 24- 29, 8 pp.
- Palmason, G., G.V. Johnsen, H. Torfason, K. Saemundsson, K. Ragnars, G.I. Haraldsson and G.K. Halldorsson, 1985: Geothermal resource assessment for Iceland (in Icelandic: Mat á jarðvarma Islands). Orkustofnun report OS-85076/JHD-10, 134 pp.
- Rybach, L. and M. Mongillo, 2006: Geothermal sustainability – "A review with identified research needs". *Geothermal Resources Council Transactions*, **30**, 1083-1090.
- Sanyal, S. K., 2005: "Sustainability and renewability of geothermal power capacity". Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 24-29, 13 pp.
- Sarmiento Z.F., and G. Björnsson, 2007: "Reliability of Early Modeling Studies for High-Temperature Reservoirs in Iceland and the Philippines". Stanford Geothermal Workshop.
- Shortall, R, Geothermal Sustainability Assessment Protocol (GSAP): Preliminary Report. 2009.

- Stefansson, V., 2000: "The renewability of geothermal energy". Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May-June 2000, 883-888.
- Stefansson, V. and G. Axelsson, 2005: "Sustainable utilization of geothermal resources through stepwise development". Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 2005, 5 pp.
- Ungemach, P., M. Antics and M. Papachristou, 2005: "Sustainable geothermal reservoir management". Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 24-29, 12 pp.
- United Nations Division for Sustainable Development (2005). Agenda 21 - U.N. Doc. A/CONF.151/26 (Vol. 1) [Website]. Available from: <www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm>. [Accessed 9 June 2009].
- World Commission on Environment and Development, 1987: Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, 400 pp.

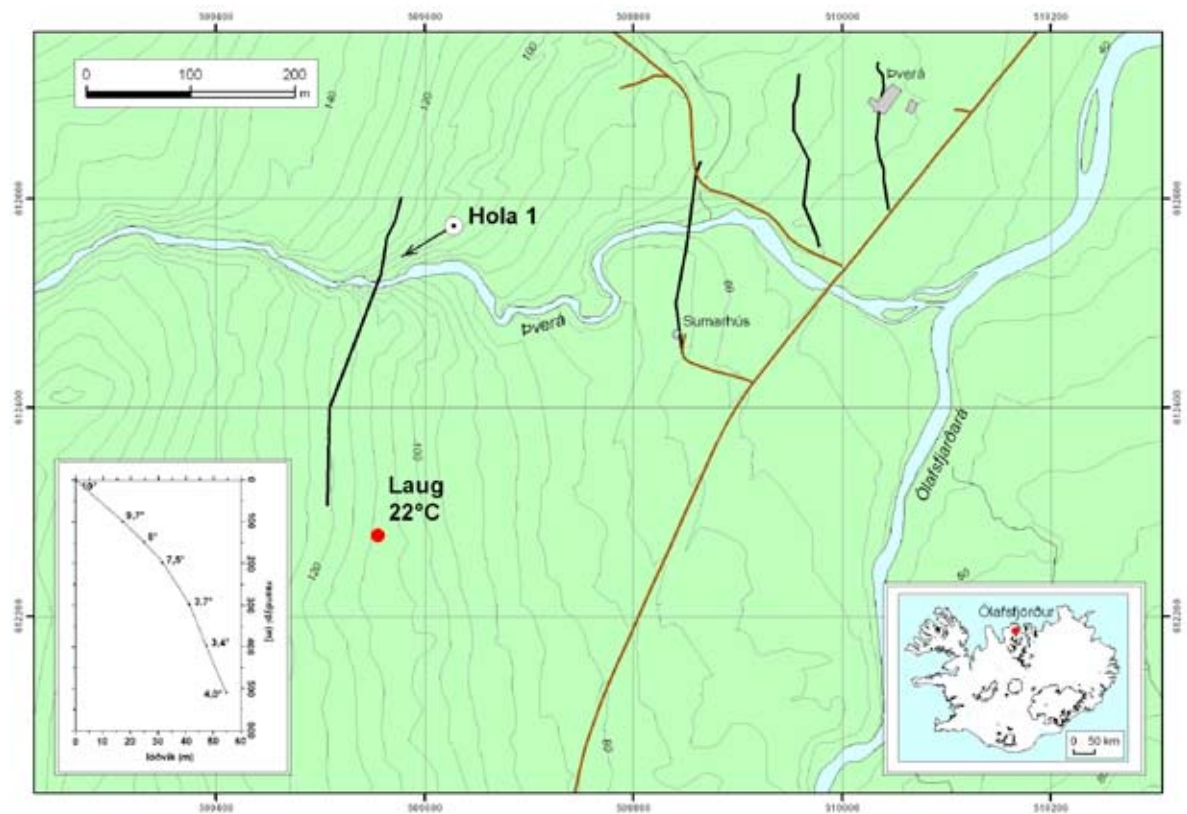
VIÐAUKI IV – FLOKKUN LÁGHITAKERFA



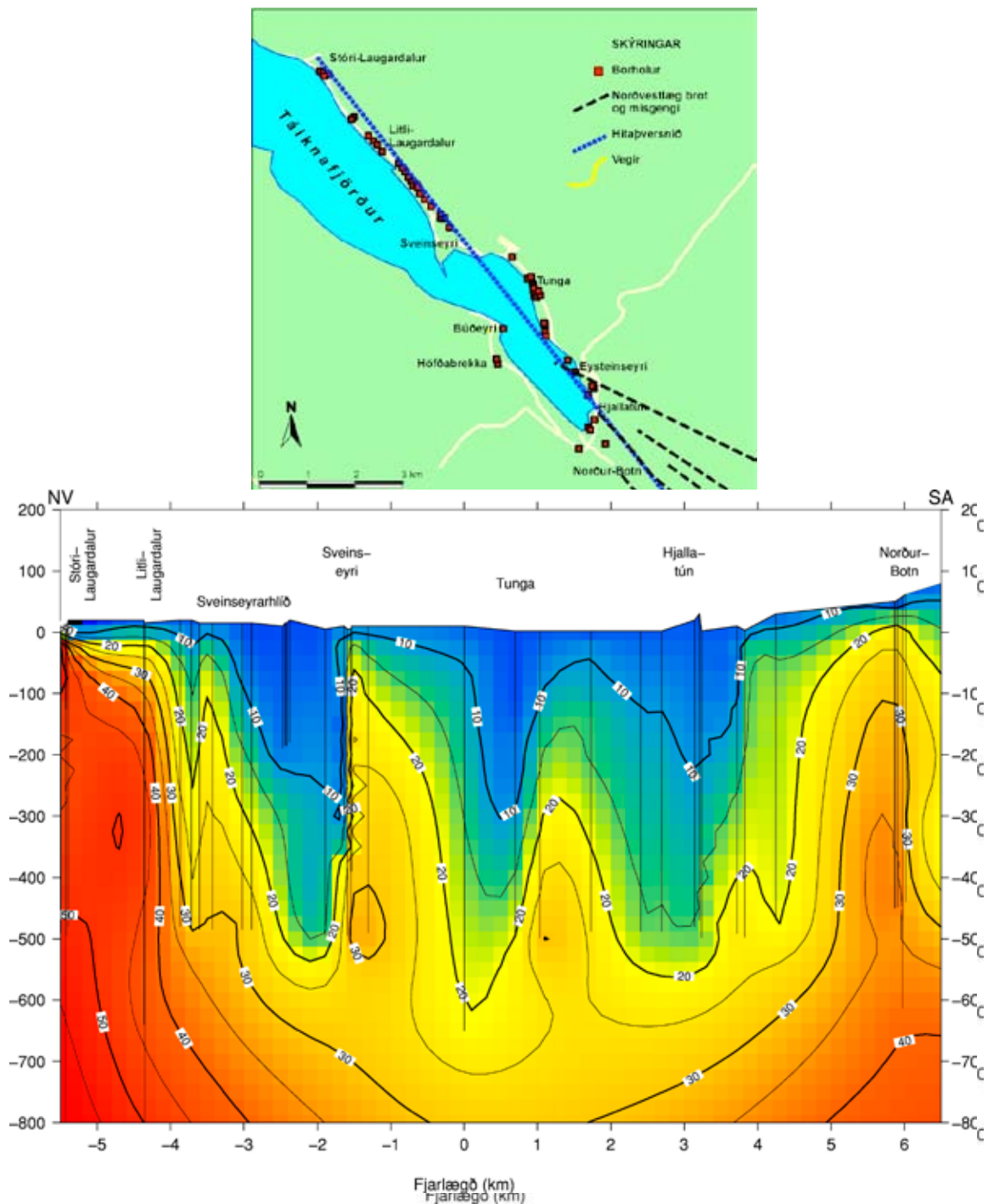
Mynd 31: Dæmi um lághitakerfi í þverbrotabelti. Oddgeirshólar í Flóa. Á Suðurlandi fá 80-90 stórar og smáar hitaveitur heitt vatn úr laugum og borholum tengdum jarðskjálftasprungum. Kerfin eru yfirleitt opin og lágrýst. Þau heitustu gefa sjálfrennandi vatn vegna suðunnar. Myndin sýnir dæmi um tengsl lauga við jarðskjálftasprungur. Sprungurnar eru sundurslitnar og skástígar. Á myndinni vinstra megin sjást tvær sprungurákir og er jarðhitinn í þeirri vestri. Bleikt svæði sýnir hvar hita gætir í jarðvegi. Svæðið er heitast nyrst, í Leirföllum 45-52°C. Myndin hægra megin sýnir jafnhitalínur á 0,5 m dýpi. Svartir þríhyrningar sýna grunnar leitarholur. Þær ná stutt niður úr Þjórsárhrauni sem hér er undir og gáfu til kynna afrennsli til vesturs (Helgi Torfason og Guðmundur Ingi Haraldsson, 1984). Vinnsluhola var boruð rétt vestan við stærsta og heitasta blettinn. Holan er um 570 m djúp og getur gefið um 20 l/s af rúmlega 80°C heitu vatni með dælingu og nokkurra tuga metra niðurdrætti vatnsborðs.



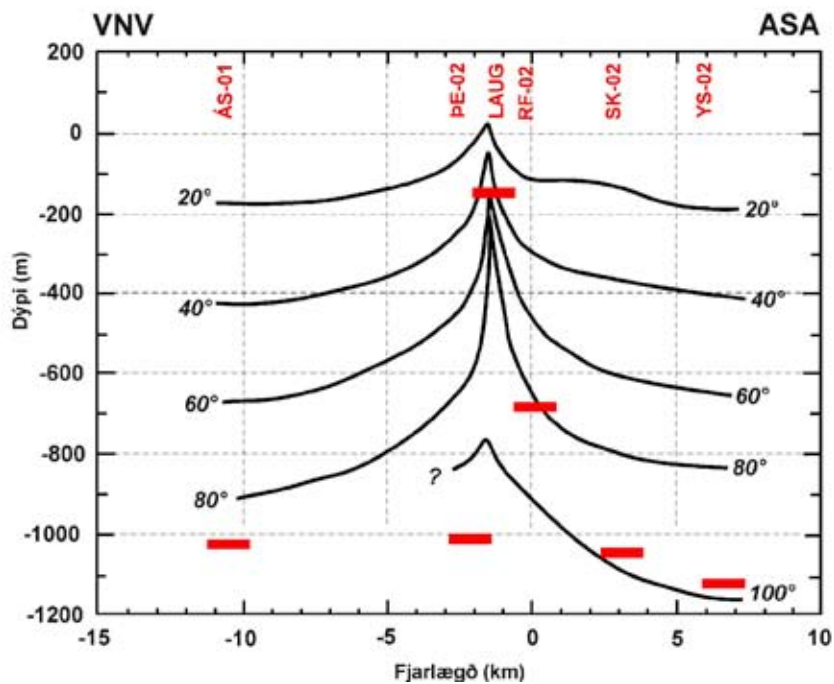
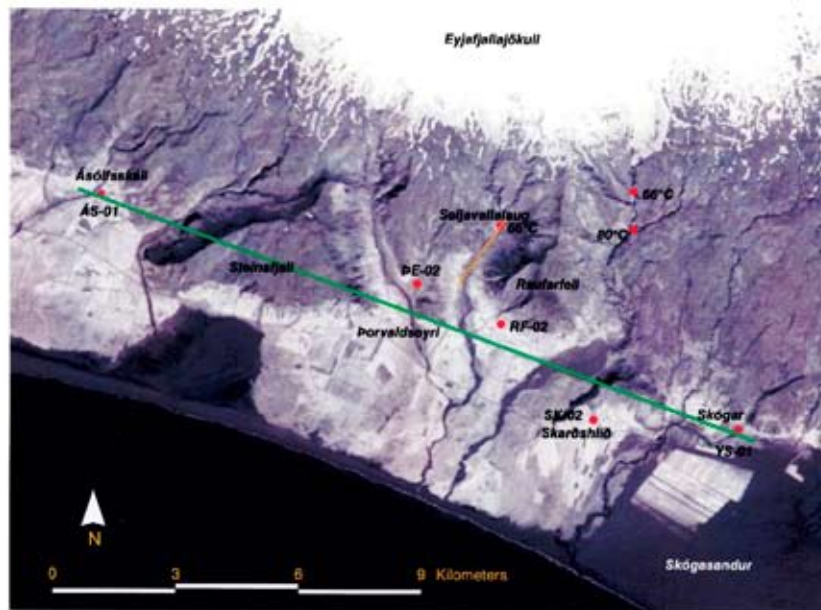
Mynd 32: Dæmi um lághitakerfi í enda sprungusveims norður úr Hofsjökli. Sprungusveimar eldstöðvakerfa liggja skáhallt á rekstefnu og ná margir hverjir út fyrir rekbeltin þar sem gangainnskotin frá þeim brjóta upp miklu eldra berg frá fyrri hluta ísaldar og tertíer. Myndin sýnir Hofsjökulskerfið. Það nær til norðurs ofan í Skagafjörð. Hofsjökull er eldfjall með öskju (1). Næst því hefur gosið móbergi og hraunum (2). Fjær strjálást gossprungur, en misgengi halda áfram langa leið (3). Þegar kemur niður í dalina koma fyrir einstöku gos og sýnileg misgengi og sprungur sem heitt vatn vellur úr (4). Yst gefa laugarnar til kynna tengsl við sprungur. Ætla má að gangar nái norður undir allt kerfið að meðtöldum laugasvæðunum, en á þeim dýpki með vaxandi fjarlægð frá eldfjallinu þar sem þeir eiga upptök sín. Þar ná einungis mjóar sprungur upp til yfirborðs. Sjá mynd 3 í aðaltexta til samanburðar. Grunnur kortsins er jarðfræðikort af Íslandi (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson 1998 og jarðhitakort af Íslandi (Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson, 2003).



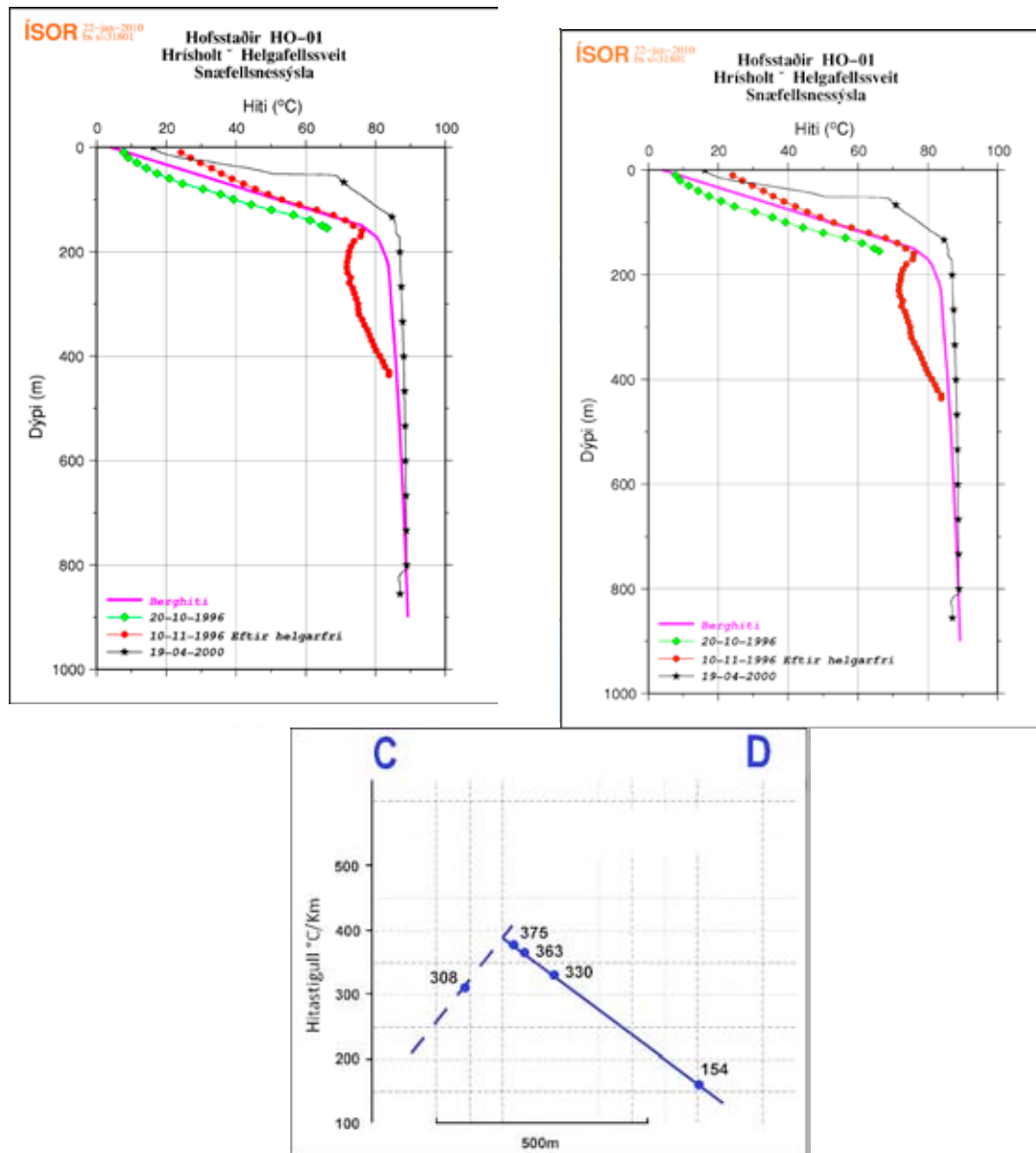
Mynd 33: Dæmi um lághitakerfi tengt gangi og norður-suður sprungukerfi. Þverá í Ólafsfirði. Myndin sýnir tengsl berggangs og laugar sem algengt er yst á Tröllaskaga. Á kortinu eru sýndir nokkrir berggangar (svartar línur með norðlæga stefnu). Einn af þeim kemur fram í gili Þverár. Honum hallar nokkrar gráður til austurs. Laug er neðan við hann sunnan við ána. Þar er lausaruðningur í brekkunni og vatnið í henni trúlega runnið frá ganginum. Borhola var staðsett neðan við ganginn Þverármegin og stefnt á ská í átt að honum (örin). Myndin vinstra megin sýnir halla holunnar í gráðum frá lóðlinu. Hún kom í ganginn og rúmlega 40°C heita vatnsæð á 500 m dýpi. Holan getur gefið um 20 l/s sjálfrennandi.



Mynd 34: Dæmi um lághitakerfi á Vestfjörðum tengt NV-SA sprungum í Tálknafirði. Við Tálknafjörð radast laugar á norðvestur-suðaustur línur. Hér er sýndur 14 km langur kaflur. Á tveimur stöðum, nyrst og syðst, sést heitt vatn vella úr sprungum í basaltklöpp. Þær eru rétt um 1 cm víðar. Vinnslan nýtir sjálfrennsli sem nemur alls um 200 l/s. Þessi sprungustefna er algeng á Vestfjörðum. Minna má í því sambandi á lekann í Vestfjarðagöngum. Þar kom vatnið úr misgengissprungum með þeirri stefnu. Neðri myndin sýnir hitasnið byggt á um 70 borholum (lóðrétt strik). Hitatoppur teygja sig upp meðfram sprungum. Þar á milli er bergið kaldara niður á nokkur hundruð metra dýpi. Vatnið er notað í fiskeldi og smávegis í sundlaug og til hitunar á Sveinseyri. Svæðislægur hitastigull í þéttu bergi á þessu svæði er rúmlega 50°C/km.

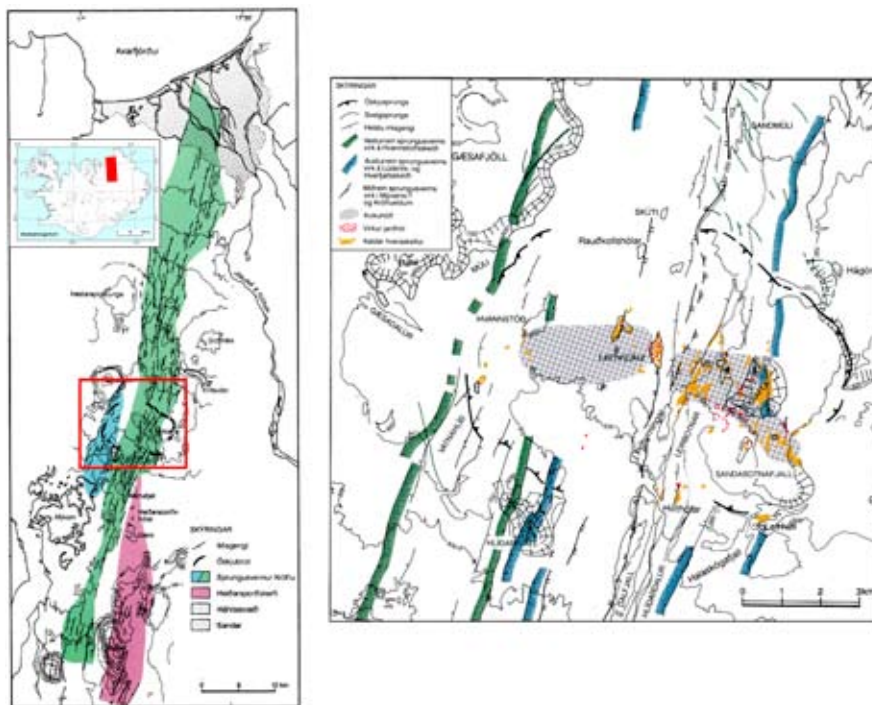


Mynd 35: Dæmi um lághitakerfi í setlögum. Undir Eyjafjöllum eru laugar inn af Seljavöllum og í giljum þar austur af, allt að 80°C heitar. Þær eru sunnan við gígsvæði Eyjafjallajökuls og eru líklega afrennsli frá djúpstæðu háhitakerfi. Borað hefur verið eftir heitu vatni á nokkrum stöðum milli Ásólfskála (ÁS-01) og Skóga (YS-02). Borstaðirnir eru merktir á hitasnið og holudýpi sýnt með rauðu þverstriki. Á Seljavöllum er grunn borhola með yfir 60°C heitu vatni. Báðum megin við Seljavelli (laug) lækkar hitinn jafnt út í frá. Þar hefur vatn aðallega náðst á dýpinu ofan 400-500 m. Þar er vatnsfordinn í lekum berglögum. Vatnið er alls staðar sótt með djúpdælum. Hiti þess er á bilinu 40-50°C fjærst Seljavallatoppnum, en yfir 60°C næst honum (á Þorvaldseyri og Raufarfelli).

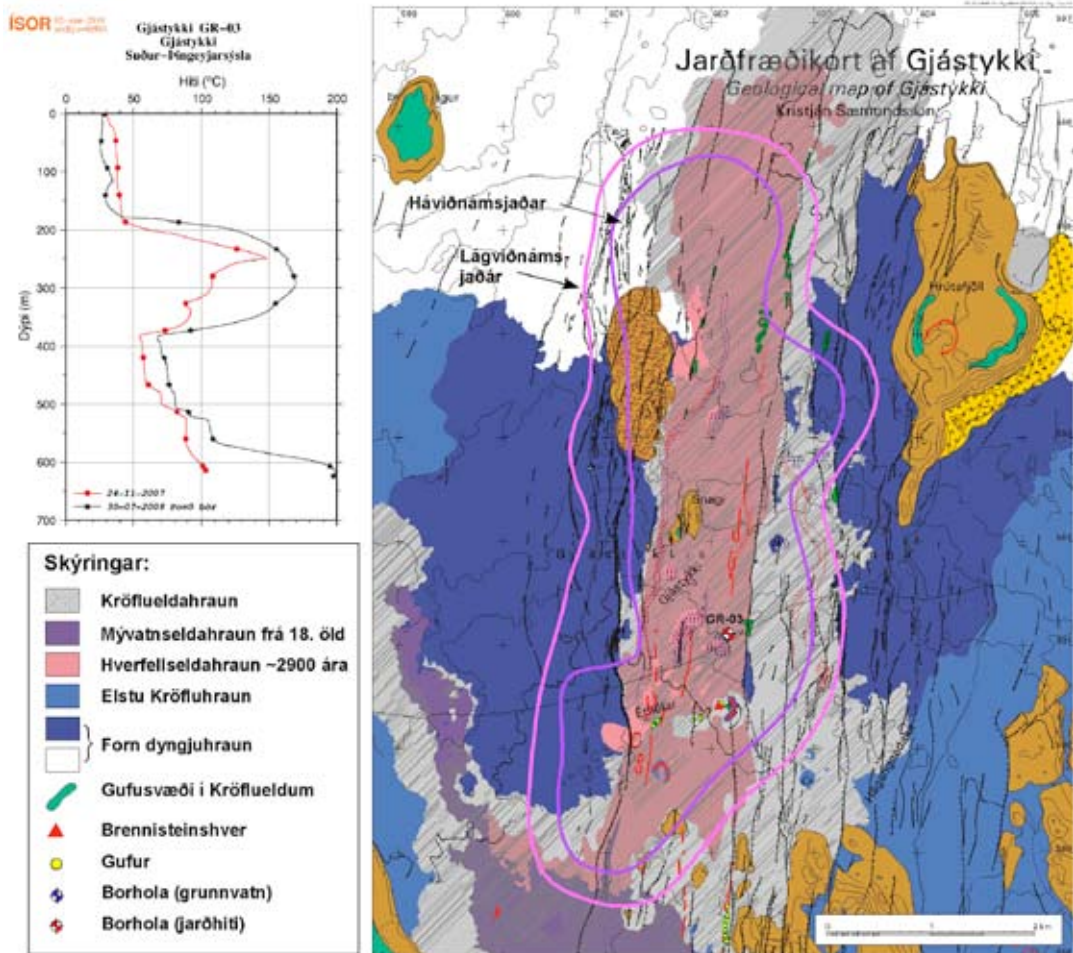


Mynd 36: Dæmi um **dulið lághitakerfi**. Með leitarborunum hafa fundist jarðhitakerfi á 25-30 stöðum á landinu þar sem jarðhiti er ekki á yfirborði. Á þeim byggjast nokkrar allstórar hitaveitur svo sem á Seltjarnarnesi, Eskifirði, Hvalfjarðarströnd, í Stykkishólmi og Skorradal. Hér er sýnt dæmi um rannsókn af þessu tagi. Það er frá Stykkishólmi. Kort sýnir norðvest-suðaustlægt hitafrávik. Það fannst með því að bora 50-60 m djúpar holur til hitamælinga. Tölurnar sýna hitastigul í þeim, línulega framlengdan niður á 1 km dýpi. Gildin eru fráleitlega há og sýna ekki þann hita sem vænta mætti á 1 km dýpi, heldur gefa þau til kynna varmaflutning neðan frá upp undir yfirborð. Myndin hægra megin sýnir að hár stigull (yfir 350°C/km) nær niður á tæplega 200 m dýpi. Þar er varmaleiðing ráðandi frá tæplega 90°C heitu vatnskerfi undir. Holan kom í vatnsæð á rúmlega 800 m dýpi. Svarti ferillinn yst til hægri sýnir hita í holunni eftir tveggja ára vinnslu við 100 m niðurdrátt vatnsborðs. Vinnslan sýndi að vatnskerfið er fremur lokað. Hamlað var á móti sívaxandi niðurdrætti með borun holu til niðurdælingar bakvatns. Sú hola er í nyrðri rauða belgnum, rúmlega 1 km frá vinnsluholunni. Hún kom í vatnskerfið á rúmlega 400 m dýpi.

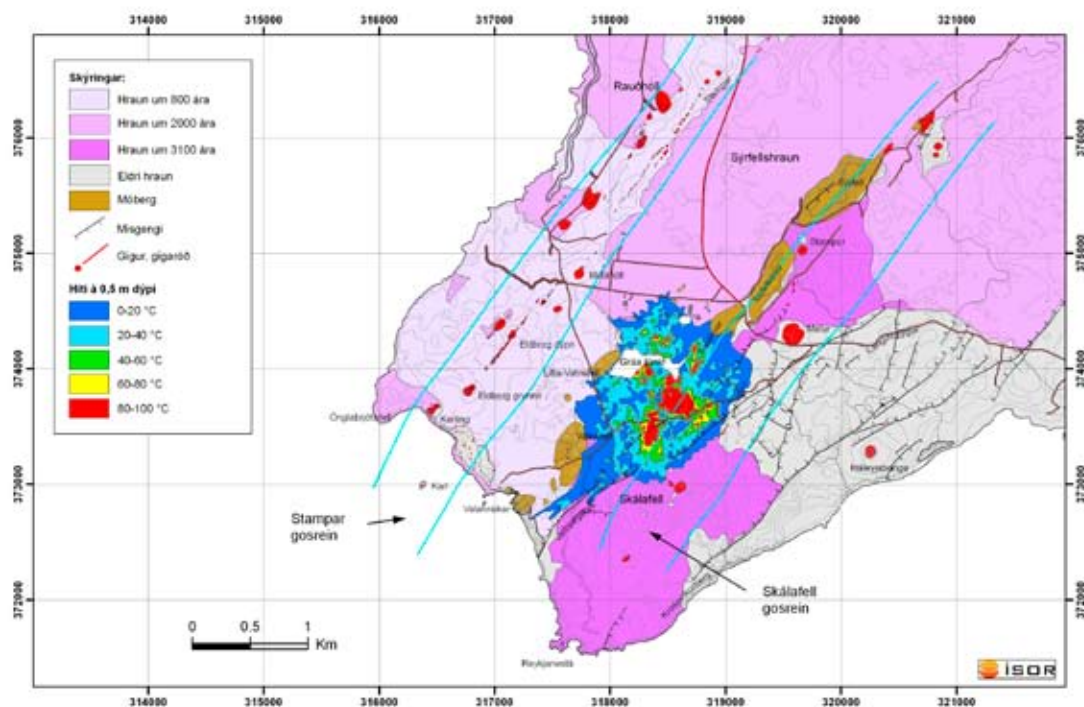
VIÐAUKI V – FLOKKUN HÁHITAKERFA



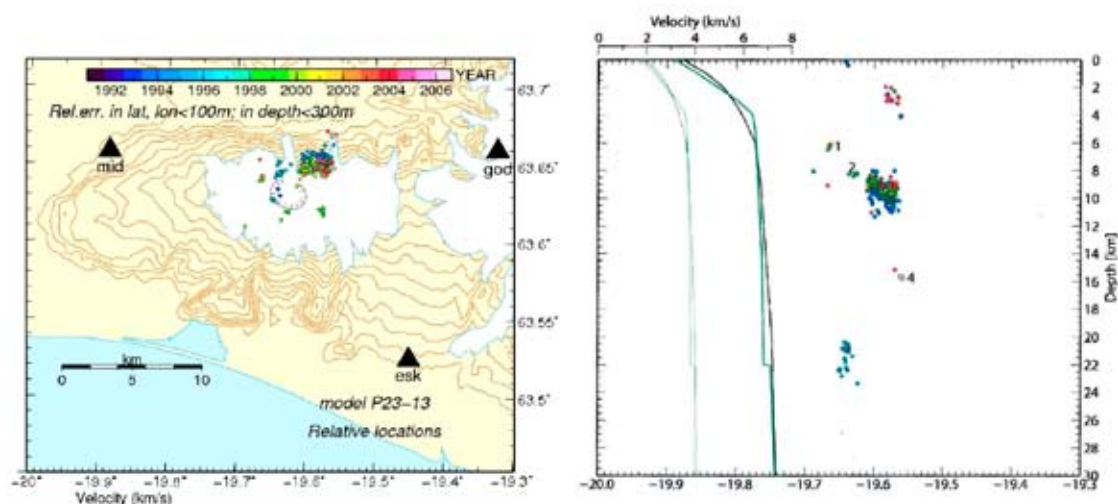
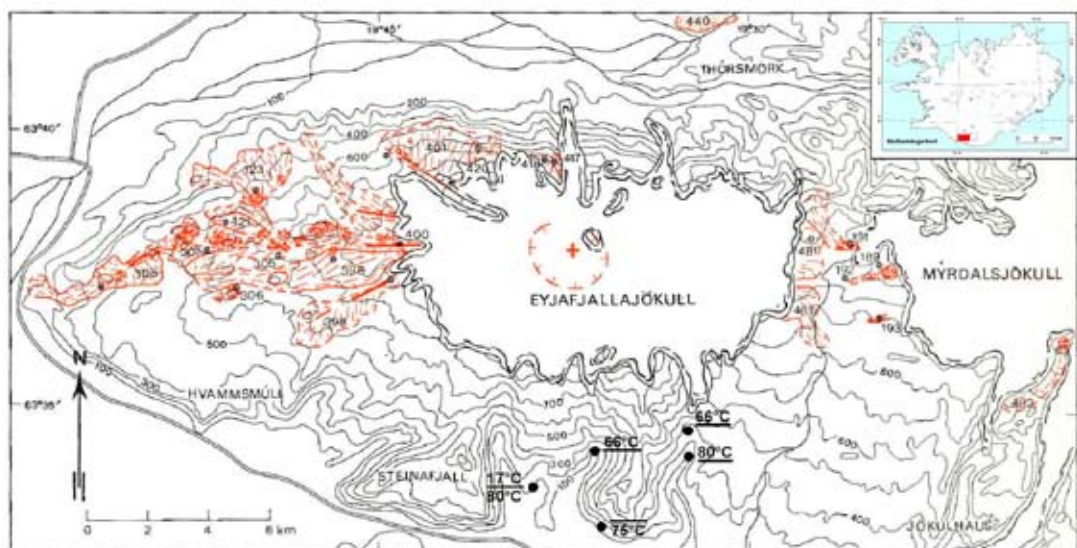
Mynd 37: Dæmi um háhitakerfi í megineldstöð rekbeltis. Krafla er dæmi um þróaða megineldstöð í rekbelti. Sínd er Kröfluaskjan og sprungusveimar sem liggja yfir hana. Sprungusveimarnir eru tveir. Þeir hafa verið virkir á víxl. Sá eystri hefur verið virkur síðustu 3000 ár með 6 sprungugosum og tilheyrandi færslu á misgengjum og gjám. Þar á undan var sá vestri virkur í um 5000 ár, með höggum á siggengjum af völdum kvikuhlaupa þótt ekki gysi í honum nema einu sinni á því tímabili. Kvikuhólf er í miðri öskjunni á 3 km dýpi. Sammiðja rauðir hringir sýna miðju mesta landriss og sigs í Kröflueldum og aðaluppstreymi kviku (Axel Björnsson o.fl., 1979). Þaðan virðast innskot leita austur og vestur til viðhalds jarðhitakerfinu. Gráu svæðin sem teygja sig til austurs og vesturs frá miðju kvikuhólfsins eru S-bylgjuskuggar sem komu fram í Kröflueldum (Páll Einarsson, 1978; Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir, 1980) og stafa væntanlega af bráðnum innskotum. Jarðhitinn er annars vegar á belti þvert yfir öskjuna, nánast beint yfir kvikuhólfinu og S-bylgjuskuggunum. Tognað hefur á hvoru tveggja, jarðhitasvæðinu og kvikuhólfinu í samræmi við rekstefnu og -hraða. Jarðhiti og ummyndun er einnig á suðurjaðri öskjunnar, en slíkt er algengt nærri sigsprungum öskjujaðra. Virkur jarðhiti er ekki vestast í öskjunni en þar eru ærnar vísbendingar um jarðhita í ummyndun bergs og jarðhitasprengigígum. Kerfi af sveigsprungum, berggöngum, goshyggjum og gígaröðum er misdreift kringum öskjuna. Rýólítfjöll (Hlíðarfjall, Jörundur og Rani) eru af þeim toga. Kringlægar gosmyndanir gefa til kynna s.k. keilugangakerfi út frá þrýstimiðju í rótum öskjunnar. Jarðfræðikortið er eftir Kristján Sæmundsson (1991). Önnur háhitasvæði af þessari gerð eru: Dyngjujökull, Grímsvötn, Kverkfjöll og Hofsjökull (með afrennsli í Nauthaga), Vonarskarð, Hágöngur (áður kennt við Köldukvíslarbotna), öll með öskju. Í þessum flokki eiga einnig heima Hengill, Prestahnúkur, Langjökull norður, Skaftárkatlar, Hróthálsar, Fremrinámar og Þeistareykir, líklega öll án öskju.



Mynd 38: Dæmi um *háhitakerfi* í *sprungusveimi* megineldstöðvar, hér í Gjástykkí 4-5 km norðan Kröfluöskjunnar. Í Kröflueldum enduðu mörg af kvikuhlaupum undan Kröflu norður í Gjástykkí. Þar hefur þrisvar gosið eftir ísöld. Gosstöðvarnar eru sunnan til í viðnámsfráviki af sömu gerð og einkennir jarðhitakerfi: Háviðnámskjarni undir lágviðnámskápu. Innri og ytri mörk háviðnámskjarnans á 600 m dýpi eru sýnd með blárri og rauðbleikri línu (Ragna Karlsdóttir o.fl., 2006). Merki um jarðhita á yfirborði eru ummyndun í móbergi, mest í Snaga, gufur og gufuhverir með brennisteinsútellingum sem komu upp í Kröflueldum. Gufusvæði sem þá spruttu upp, aðallega milli Hrutafjalla og Hituhóla (grænar klessur), eru löngu kulnuð. Þau heita frá gamalli tíð Hrutafjallahitur. Milli jarðhitans í Gjástykkí og Kröflu er um fjöggra km bil, sem viðnámsmælingar (TEM-aðferð) skynja kalt. Álika langt bil er á milli jarðhitans í Kröflu og Námafjalli, sem er annað dæmi hliðstætt við Gjástykkí. Hveragas í Gjástykkí gefur efnahita upp á um 260°C (Kristján Sæmundsson og Magnús Ólafsson, 2004). Dýpi á grunnvatn á mótis við veginn yfir Gjástykkí er um 180 m. Hitamæling í 600 m djúpri borholu norðan við veginn sýnir heita afrennslistungu frá uppstreymi sunnar (sjá gufur og hverir á kortinu). Neðan hennar kólnar en á 600 m dýpi er komið í um 200°C. Jarðfræðikortið er eftir Kristján Sæmundsson (2010). Auk Gjástykkis og Námafjalls er þriðja háhitakerfið af þessari gerð þekkt í Hverahlið á Hengilssvæðinu.

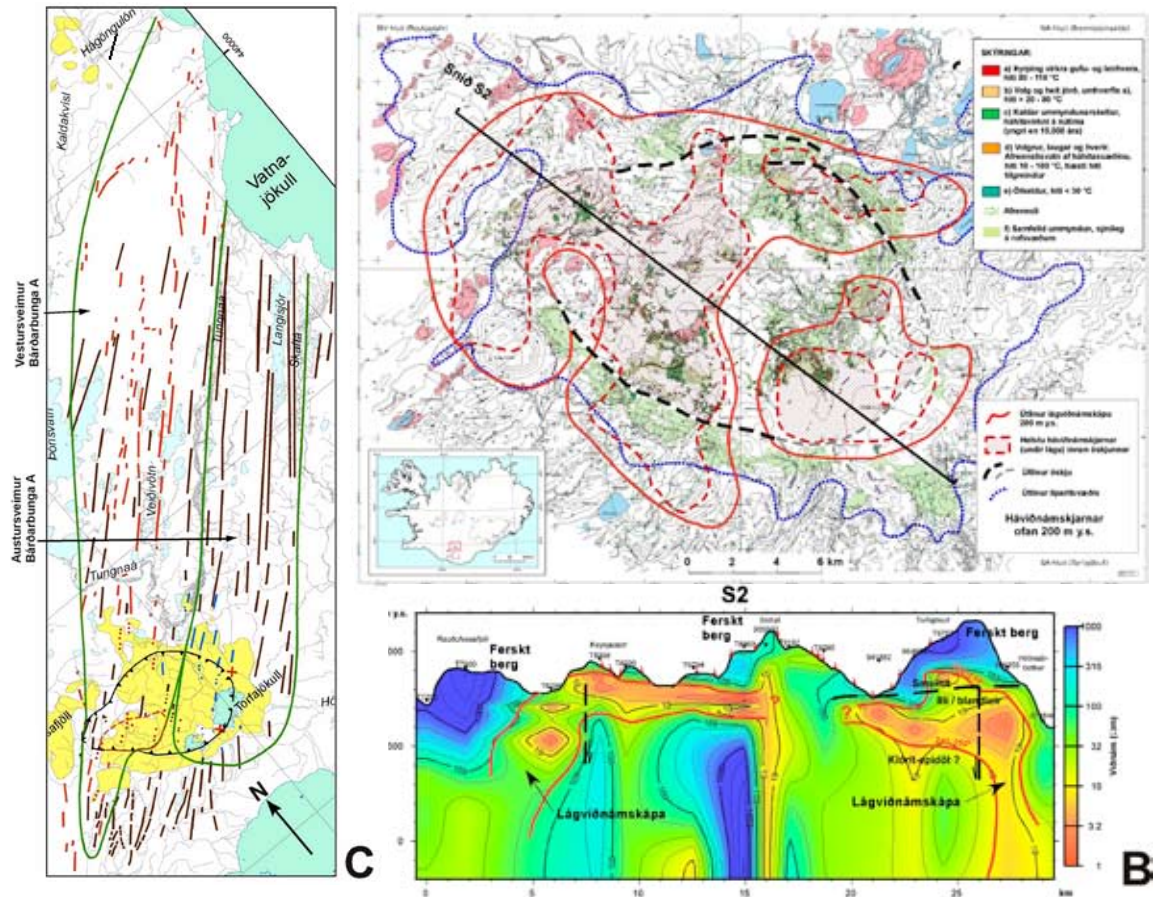


Mynd 39: Dæmi um háhitakerfi í sniðrekbelti á Reykjanesi. Reykjanes er dæmi um háhitakerfi í megineldstöð sem eingöngu gýs basalti. Megineldstöðin ákvarðast af sprungugosum á þrem gosreinum (Stamparein, móbergsrein og Skálafellsrein). Þær ná skammt norðaustur fyrir Reykjaneshælinn. Norðar taka við gjár og misgengi sem liggja norðaustur í Voga- og Strandarheiði. Á þeim er ekki vitað um jarðhita fyrr en kemur að lághita á Vatnsleysuströnd (nýfundinn með borun) og vestast á Innnesjum. Hitamælingar í jarðvegi sýna að jarðhitasvæðið á Reykjanesi er næstum samhverft um móbergsreinina og það staðfesta hitamælingar í borholum. Aðaluppstreymi kerfisins og vinnslan er í móbergsreininni. Vatnið í jarðhitakerfinu er saltara en sjór (vegna uppgufunar úr því). Í viðnámsmælingum sjást því litlir breytileikar í viðnámsgerð. Hæstur hiti, um 310°C, er við vestri móbergshrygginn (Litla-Vatnsfell), en aðalvinnsluholurnar eru við þann eystri (Rauðhóla), um 290-300°C. Þessar gosreinar marka uppstreymisrásir. Öll háhitakerfin á Reykjanesskaga eru af þessari gerð á mismunandi „virknistigi“ þó. Hin eru Svartsengi-Eldvörp, Krýsuvík-Trölladyngja, og Brennisteinsfjöll. Háhitasvæðin eru í eðli sínu lágbrystisvæði (heitt vatn er léttara en kalt). Því streymir kalt vatn að þeim, en afrennsli frá á litlu dýpi, auk þess sem vatn gufar upp til yfirborðs.

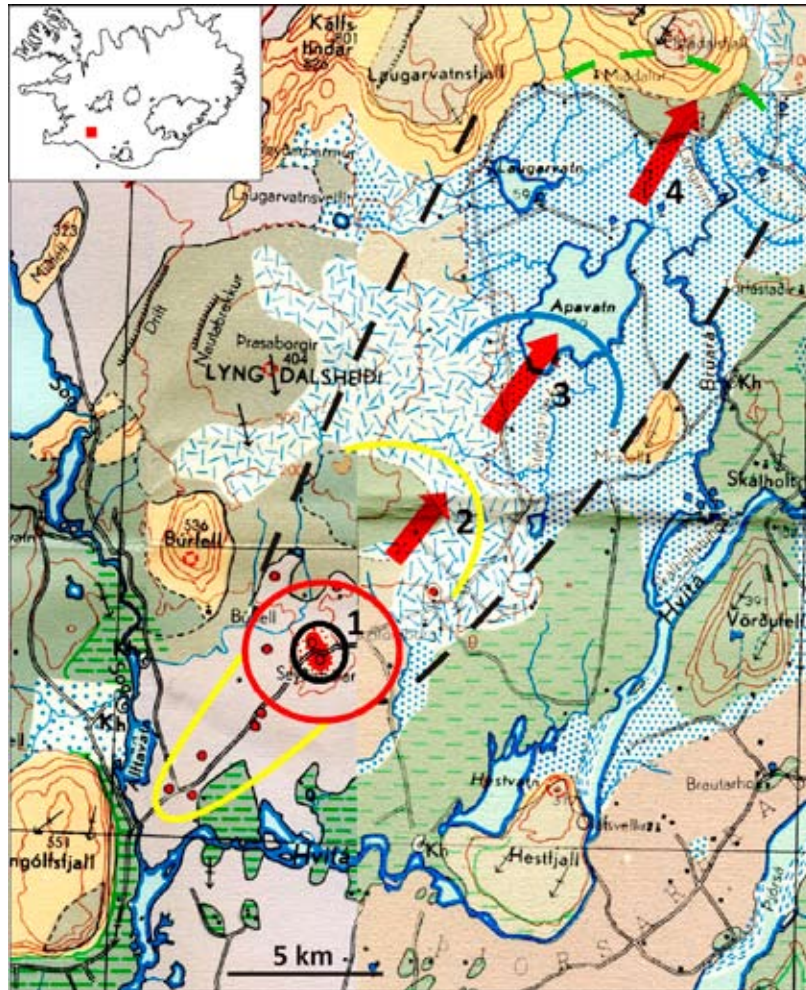


Mynd 40: Dæmi um háhitakerfi í eldkeilu utan rekbelta án öskju undir Eyjafjallajökli. Eyjafjallajökull er eldkeila með gosreinum austur og vestur úr og myndar með þeim eldhrygg (Sveinn P. Jakobsson, 1979). Aðalgigurinn er 2,3 km í þvermál, líklega sigketill, þótt tæpast geti kallast askja. Jarðhiti er ekki í fjallinu sjálfu, en laugar eru í giljum sunnan við hann. Þær sýna að heitt berg er undir fjallinu og verða tæpast skýrðar öðruvísi en sem uppstreymi og afrennsli frá jarðhitakerfi. Það myndi eiga rætur í innskotum undir gígsvæðinu og berggöngum út frá því, sem keilugangar í giljunum inn af Seljavöllum vitna um. Vatnið í laugunum er nokkuð kolsýruríkt en að öðru leyti ekki líkt háhitavatni. Skjálftavirkni síðustu ára tengist kvikuinnskotum (Sigurlaug Hjaltadóttir o.fl. 2009). Þau setjast að á mismunandi dýpi undir eldfjallinu og mynda innskotseitla (kvikuþrær). Þann neðsta á um 22 km dýpi þar sem líklega eru skil milli skorpú og möttuls. Aftur á 7-10 km dýpi þar sem vænta mætti skila milli innskota- og gosbergshluta skorpunnar. Þaðan liggur kvikurás beint upp undir gígsvæðið með kvikusöfnun á 2-3 km dýpi þar sem ætla má að sé botn eldfjallsins. Basaltkvikan í Eyjafjallajökli er frumleg og eðlisþung og leitar út í veilur eða eðlisþyngdarskil í skorpunni fremur en rakleiðis upp til yfirborðs. Það gerir súra (kísilsýruríka) kvikan hins vegar. Innskotin verða varmagjafi jarðhitakerfis, einkum þau gryninstu.

A



Mynd 41: Dæmi um háhitakerfi í rýólít-eldfjalli utan rekbelta með öskju undir Torfajökli. Mynd A sýnir kort af Torfajökli sem dæmi um rýólíteldfjall með öskju (Kristján Sæmundsson og Guðmundur Friðleifsson, 2001). Hún er um 17 km á langvegin. Innan rýólítisvæðis, sem er auðkennt með blárri umgjörð, kemur basalt ekki til sögunnar fyrr en á síðasta jökulskeiði sem móberg og bólstraberg í efnisrýrum hryggjum og breiðum. Kortið sýnir jarðhita og ummyndun (sbr. skýringar). Gufu- og leirhverir eru innan öskjunnar, en laugar utan hennar. Ofan í kortið er teiknað viðnám á um 600 m dýpi (200 m hæð yfir sjávarmáli). Það sýnir háviðnámskjarna (rúðustrikaðan) og lágviðnámskraga umhverfis. Háviðnámskjarni gefur til kynna að hiti í jarðhitakerfinu hafi innan hans á einhverju stigi náð um 240°C. Við þann hita hverfa vel leiðandi leirsteindir, en ummyndunarsteindir sem leiða illa taka við og verða ríkjandi í háviðnámskjarnanum. Sá hluti háviðnámskroksins sem lendir innan öskjunnar fellur vel að gufuhverasvæðinu og er lofandi um háhita, en meiri óvissa er um þann hlutann sem er utan við. Á mynd B sést þversnið af viðnámsgerðinni. Hún kemur allvel heim við ummyndun bergsins og útmörk öskjunnar, en gefur til kynna að jarðhitakerfið kunni að vera tvískipt. Það væri í samræmi við tvískiptan sprungusveim sem liggur yfir það frá norðaustri til suðvesturs eins og sjá má á mynd C. Eystri hlutinn hefur ekki verið virkur eftir ísöld.



Mynd 42: Dæmi um háhitakerfi í megineldstöð á kólnunarstigi. Í Grímsnesi er dæmi um háhitakerfi á kólnunarstigi, og raunar er hitinn í því kominn niður fyrir 200°C-mörkin miðað við 1000 m dýpi. Hæsti hiti í kerfinu hefur mælst 185°C, en yfir 200°C á um það bil 2000 m dýpi í næstum þéttu bergi. Kerfið einkennist af hárri koldíoxíðremmu. Hún kemur fram í kalklaugum, sprengigígum, líklega tilkomnum af völdum þenslu koldíoxíðs við fasabreytingu og hlutfallslega mikilli gjallmyndun í basaltgosum, sem annars eru þeim ekki eiginleg nema vatn komist í gosrás og hvelsjóði. Miðja eldvirkinnar er í Seyðishólum. Þar eru upptök stærstu hraunanna og þar er gjallið mest. Kalklaugarnar eru norðar, ofan við Klausturhóla og Miðengi. Koldíoxíð (kolsýra) er unnin úr borholum svo fullnægir innanlandsmarkaði. Sprungusveimur liggur frá norðaustri til suðvesturs og myndar með gosmiðjunni klassískt eldstöðvakerfi. Myndin sýnir útlinur norðausturgreinar sprungusveimsins. Rauðar örvar sýna stefnu kvikuhaupa frá kvikuuppsprettu undir Seyðishólum. Það gýs næst kvikuuppsprettunni (gulur bogi), fjær eru víðar gjár og misgengi ráðandi og fáein gos koma fyrir (Mosfell) (blár bogi) og síðan mjóar sprungur eftir að kemur norður í Apavatn að vísu séðar flestar í ungum setmyndunum. Mjög heit lághitakerfi (>100°C) eru í fjærsta hluta kerfisins milli Laugarvatns og Brúarár. Vatn sem fæðir jarðhitakerfin myndi leita í gagnstæða átt við kvikuhaupin (gangainnaskotin). Grunnur jarðfræðikortsins er frá Guðmundi Kjartanssyni (1960). Önnur jarðhitakerfi (háhitakerfi) í þessum flokki eru Geysissvæðið í Haukadal og Hveragerðiskerfið (einnig kennt við Grændal).

VIÐAUKI VI – LÖG UM JARÐHITANÝTINGU

Í eftirfarandi umfjöllun verður farið yfir þróun löggjafar varðandi eignarhald og nýtingu á jarðhita tekið saman af Lárusi Ólafssyni og Valborgu Steingrímsdóttur, lögfræðingum á Orkustofnun, fyrir faghópinn. Verður reynt að gefa yfirsýn yfir löggjöfina sem og samspil hennar innbyrðis. Verður stiklað á stóru hvað þessi mál varðar en yfirferðin verður á engan hátt tæmandi, en þess í stað reynt að einblína á helstu atriði sem máli skipta í umræðu þessari. Í ljósi þessa verður ekki lögð áhersla á einstaka lagabálka varðandi heimildir til að reisa og reka raforkuver, sem einkenndust af því umhverfi raforkumála sem var við lýði fyrir opnun raforkumarkaðarins með gildistöku raforkulaga frá árinu 2003.

VI.1 Lög nr. 98/1940, um eignar- og afnotarétt jarðhita

Lög nr. 98/1940 eru fyrstu sérlögin hér á landi er vörðuðu nýtingu og eignarrétt jarðhita. Fram að gildistöku laganna hafði þá eingöngu verið kveðið sérstaklega á um hagnýtingarrétt landeiganda í ákvæðum vatnalaga, þ.e. 9. og 10. gr. laganna.

Í 1. gr. laganna sagði um eignarrétt á jarðhita að landareign hverri fylgir réttur til umráða og hagnýtingar á hverum og laugum (jarðhita), sem á henni eru, þó með takmörkunum þeim sem lögin þessi ákveða. Í 3. gr. laganna sagði að landeiganda sé rétt að hagnýta sér hverri og laugar, eins og honum þykir best henta til heimilisþarfa, framleiðslu og iðnaðar. Þá sagði í 4. gr. að ef landmerki liggja um hverasvæði þannig, að einhver hluti hveragufunnar eða loftsins eða laugarvatns liggja svo í landareign tveggja eða fleiri landeigenda, að ekki verði aðskilið, þegar hagnýtt er, þá skuli skorið úr því með mati, hvern hlutfallslegan rétt hver jörð hefur til jarðhitaorkunnar. Ekki var hins vegar að finna í lögnum almenna eignarnámsheimild, og var tillaga til slíkrar heimildar felld út úr frumvarpinu við þinglega meðferð frumvarpsins.

Þrátt fyrir að í lögnum hafi verið byggt á eignarrétti landeiganda á jarðhita sem finnst í landi hans þá var ríkisvaldinu eftir sem áður heimilt að láta af eigin frumkvæði framkvæma rannsóknir á jarðhita í eignarlandi. Þannig sagði í 8. gr. laganna eftirfarandi: „*Ríkið hefur rétt til að láta rannsaka hveraorku með borun eða á annan hátt, hvar sem er á landi hér. Er landeigandi eða umráðamaður skyldur að leyfa mönnum þeim, er ríkið gerir út í þeim tilgangi, óhindraðan aðgang að landareigninni. Verði landið fyrir einhverjum skemmdum við rannsóknina, eða biði landeigandi eitthvert tjón af henni, skal það bætt að fullu eftir mati, náist ekki samkomulag. Enga aðstoð er landeigandi eða umráðamaður skyldur að láta í té við rannsóknina, nema fyrir fulla borgun.*“ Samkvæmt þessu var ríkinu óskylt að tilkynna landeigenda á nokkurn hátt um rannsóknir á landareign viðkomandi. Voru rannsóknir því ekki háðar samþykki landeigenda né heldur hvíldi sú kvöð á ríkinu að tilkynna landeigenda um slíkar rannsóknir. Framangreint ákvæði laga nr. 98/1940, með síðari breytingum, var svo tekið upp í orkulög, nr. 58/1967. Þar sagði orðrétt í 15. gr.: „*Ríkið hefur rétt til að láta rannsaka jarðhita með borun eða á annan hátt, hvar sem er á landi hér. Er landeigandi eða umráðamaður skyldur að leyfa mönnum þeim, er ríkið gerir út í þeim tilgangi, óhindraðan aðgang að landareigninni. Verði landið fyrir einhverjum*

skemmdum við rannsóknina, eða bíði landeigandi eitthvert tjón af henni, skal það bætt að fullu eftir mati, náist ekki samkomulag.“

Þótt ríkisvaldið hafi haft viðtæka heimild til að láta fara fram rannsóknir á jarðhita í eignarlöndum þá útilokaði slíkt eigi heimildir landeigenda til að láta fara fram samskonar rannsóknir. Sagði orðrétt í 9. gr. laganna: „*Eigendum eða umráðamönnum jarða, þar sem jarðhiti er, eða jarðhitasvæði eiga, er heimilt að leita aðstoðar ríkisins við rannsókn jarðhitans. Skal ríkið veita mönnum slíka aðstoð ókeypis, eftir því sem aðstæður leyfa og fé er veitt til þess í fjárlögum. Á sama hátt skal ríkið veita mönnum aðstoð um samning kostnaðaráætlunar um notkun jarðhitans.*“. Samkvæmt ákvæðinu hvíldi rik skylda á ríkinu til þess að veita bæði fjárhagslegan, sem og tæknilegan, stuðning til þeirra landeigenda sem höfðu hug á að láta rannsaka jarðhita á eignarlöndum sínum.

Að lokum skal það ítrekað að lög þessi hrófluðu eftir sem áður ekki við einkarétt ríkisins til þess að reisa og reka raforkuver, sbr. raforkulög, nr. 12/1946 en með þeim lögum var í fyrsta skipti mörkuð heildarstefna í raforkumálum á Íslandi. Þannig var sá réttur ávallt í höndum ríkisins þrátt fyrir ótvíræðan eignarrétt landeigenda yfir auðlindinni.

VI.2 Orkulög, nr. 58/1967

Með orkulögum má segja að hafi komið fram fyrsti heilstæði lagabálkurinn sem tók almennt á orkumálum, allt frá rannsóknum á auðlindum til nýtingar á þeim sem og allri stjórnsýslu þessu tengt. Áður var minnst á að í raforkulögunum frá 1946 var í fyrsta skipti mörkuð heildarstefna í raforkumálum, en með orkulögum var byggt á þeim grunni sem raforkulögin höfðu lagt upp með en til viðbótar kom annars konar nýting, sbr. hitaveitur og rannsóknir almennt á auðlindum. Þá fólu lögin í sér að á laggirnar var komið sérstakri stofnun um orkumál, þ.e. Orkustofnun, sem ætlað var m.a. það hlutverk að annast rannsóknir, áætlana- og skýrslugerð á sviði orkumála og vera ráðherra til ráðuneytis um þau málefni.

Aðdragandi setningu laganna var að árið 1965 skipaði raforkumálaráðherra nefnd til þess að endurskoða þágildandi raforkulög. Í nefndinni sátu Gísli Jónsson rafveitustjóri, Jón Sigurðsson deildarstjóri, sem var formaður nefndarinnar, og Valgarð Thoroddsen verkfræðingur. Störf nefndarinnar voru nánar afmörkuð í skipunarbréfi þar sem sagði m.a.: „*Sérstaklega er nefndinni ætlað að gera glögg skil milli verksviðs embættis raforkumálastjóra og verksvið rafmagnsveitna ríkisins og Héraðsrafmagnsveitna ríkisins, jafnframt því sem skipulag raforkuvinnslu og raforkudreifingar á vegum ríkisins verði ihugað í ljósi þeirrar stefnu, sem mörkuð hefur verið með setningu laga um Landsvirkjun*“. Eins og greina má af verkefnum nefndarinnar samkvæmt skipunarbréfi er ljóst að stefnt var að endurskoðun á þágildandi ákvæðum raforkulaga, en ekki því lagaverki sem snéri að rannsóknum á auðlindum, sbr. lög, nr. 98/1940. Hins vegar vaknaði sú hugmynd við störf nefndarinnar hvort ekki væri æskilegt að starfssvið hennar yrði víkkað á þá vegu að henni yrði einnig falið að endurskoða í heild þau lög er fjölluðu almennt um nýtingu auðlinda hér á landi. Í kjölfar vinnu nefndarinnar yrði svo lögð til tillaga um heildarlög um orkumál. Tillaga þessi um breytta tilhögun á starfssviði nefndarinnar var samþykkt af ráðherra í maí 1966.

Í frumvarpi því sem varð að orkulögum voru ekki lagðar til róttækar breytingar á þágildandi lögum á sviði orku- og auðlindamála, heldur var eins og að framan var getið lagt til að löggjöf á þessu sviði yrði samræmd þannig að unnt yrði að fella hana í einn lagabálk.

Þá var í lögunum lagður af einkaréttur ríkisins til að reisa og reka raforkuver en þess í stað komið á því kerfi, sem hélst allt til gildistöku raforkulaga árið 2003, að ríkisvaldinu hafði eftir sem áður allt að einu í hendi sér hverjir fengu slík leyfi þar sem leyfi Alþingis eða ráðherra var áskilið til þeirrar starfsemi.

Hvað varðar ákvæði um jarðhita voru þágildandi ákvæði laga nr. 98/1940 tekin nánast óbreytt inn í samsvarandi ákvæði orkulaga. Í stuttu máli má segja að helstu breytingar sem gerðar voru, voru einna helst að tilvísun til „hvera og lauga“ var skipt út fyrir „jarðhita“. Hins vegar voru gerðar tvær efnislegar breytingar hvað varðar ákvæði um jarðhita. Í fyrsta lagi var samþykkt ákvæði varðandi heimild til eignarnáms á jarðhitaréttindum og jarðhitaorku. Í öðru lagi var samþykkt það nýmæli að leitað yrði umsagnar Orkustofnunar varðandi hagnýtingu og hvers konar ráðstöfunar jarðhita sem væri í eigu ríkisins. Seinna atriðið, varðandi umsögn Orkustofnunar, var eins og áður sagði nýmæli í lögum og var það fyrirmynd að því kerfi sem við tók, þ.e. að leita bæri faglegar umsagnar Orkustofnunar áður en til rannsóknar eða nýtingar kæmi á auðlindum hér á landi hvort sem það væri í eignarlöndum eða þjóðlendum.

VI.3 Lög um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, nr. 57/1998

VI.3.1 Almenn t um auðlindalögin

Með gildistöku laga um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu árið 1998 var komið á því regluverki sem við lýði er í dag varðandi rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu. Taka lögin til auðlinda í jörðu í landi, í botni vatnsfalla og stöðuvatna og í sjávarbotni innan netlaga. Sú breyting var gerð á lögunum árið 2006 að þau taka einnig til rannsókna á vatnsafla til raforkuframleiðslu. Með auðlindum í lögunum er átt við hvers konar frumefni, efnasambönd og orku sem vinna má úr jörðu, hvort heldur í föstu, fljótandi eða loftkenndu formi og án tillits til hitastigs sem þau kunna að finnast við.

Þar sem lögunum er ekki ætlað að taka með heildstæðum hætti á umhverfismálum, náttúruvernd eða skipulagsmálum sem tengjast rannsóknum eða nýtingu þessara auðlinda er ítrekað í 3. mgr. 1. gr. laganna að um rannsóknir og nýtingu samkvæmt þessum lögum gilda einnig náttúruverndarlög, skipulags- og byggingarlög og önnur lög sem varða rannsóknir og nýtingu lands og landsgæða.

Áður en lengra er haldið er rétt að gera grein fyrir þeirri breytingu sem gerð var á stjórnsýslu auðlindalaga árið 2008. Með lögum nr. 68/2008 um breytingu á lögum um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, nr. 57/1998, með síðari breytingum, og lögum um eignarrétt íslenska ríkisins að auðlindum hafsbotnsins, nr. 73/1990, með síðari breytingum, var iðnaðarráðherra veitt heimild til að fela Orkustofnun leyfisveitingarvald skv. 1. mgr. 4. gr. og 1. mgr. 6. gr. laga nr. 57/1998 að hluta eða öllu leyti sem og að fara með heimildir ráðherra skv. 1. mgr. 4. gr., 19. gr. og 20. gr.

laganna. Með vísan til framangreindra heimilda hefur iðnaðarráðherra falið Orkustofnun að fara með leyfisveitingarvald samkvæmt ákvæðum laga um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, nr. 57/1998, frá og með 1. ágúst 2008. Eftirfarandi umfjöllun mun taka mið af þessum breytingum og verður vísað til Orkustofnunar sem leyfisveitanda þar sem slíkt á við, þrátt fyrir að samkvæmt orðanna hljóðan sé almennt vísað til iðnaðarráðherra í texta laganna.

VI.3.2 Eignarréttur

Kveðið er á um eignarrétt í II. kafla laganna þar sem segir í 1. mgr. 3. gr. að eignarlandi fylgir eignarréttur að auðlindum í jörðu, en í þjóðlendum eru auðlindir í jörðu eign íslenska ríkisins, nema aðrir geti sannað eignarrétt sinn til þeirra. Þess ber að geta að árið 2008 voru gerðar breytingar á lögunum varðandi rétt opinberra aðila til að framselja með varanlegum hætti eignarrétt á jarðhita og grunnvatni. Hins vegar var sömu aðilum veit heimild til að leigja umrædd réttindi í allt að 65 ár.

VI.3.3 Rannsóknir

Um rannsóknir samkvæmt lögunum er nánar kveðið á um í III. kafla laganna. Þar segir í 1. mgr. 4. gr. að Orkustofnun er heimilt að hafa frumkvæði að og/eða láta rannsaka og leita að auðlindum í jörðu hvar sem er á landinu og skiptir þá ekki máli þó að landeigandi hafi sjálfur hafið slíka rannsókn eða leit eða heimilað það öðrum, nema viðkomandi aðili hafi gilt rannsóknarleyfi samkvæmt lögum þessum. Með sama hætti getur Orkustofnun heimilað öðrum rannsóknir og leit og skal þá gefa út rannsóknarleyfi til viðkomandi.

Eins og þegar hefur verið greint frá í fyrri umfjöllun hefur ríkisvaldinu verið heimilt lögum samkvæmt að veita leyfi til rannsókna innan eignarlanda óháð vilja landeiganda, sbr. lög. nr. 98/1940 og lög nr. 58/1967. Er hér því ekki um grundvallarbreytingu að ræða hvað þetta varðar en hins vegar er í lögunum með skýrum hætti kveðið á um að heimildir Orkustofnunar nái bæði til landsvæða utan eignarlands og innan. Eftir sem áður veita lögin landeiganda heimild til að framkvæma sjálfur rannsóknir á eignarlandi sínu án leyfis ráðherra. Honum ber þó að gera fyrir fram grein fyrir verulegum framkvæmdum, svo sem borunum, sprengingum eða gerð námuganga, og er Orkustofnun heimilt að setja skilyrði fyrir umræddum framkvæmdum. Að auki kunna ákvæði annarra laga að eiga við slíkar framkvæmdir. Þá er Orkustofnun heimilt að setja landeiganda þau skilyrði sem nauðsynleg eru talin vegna öryggis eða af tæknilegum ástæðum eða ef ætla má að leit eða rannsóknir geti spillt vinnslu sem fram fer á svæðinu eða möguleikum til vinnslu síðar.

Í 1. mgr. 5. gr. laganna er kveðið á um heimildir samkvæmt rannsóknarleyfi þar sem segir að slíkt leyfi feli í sér heimild til þess að leita að viðkomandi auðlind á tilteknu svæði á leyfistímanum, rannsaka umfang, magn og afkastagetu hennar og fylgja að öðru leyti þeim skilmálum sem tilgreindir eru í lögum þessum og Orkustofnun telur nauðsynlega. Þó svo að ekki segi berum orðum í lögunum að rannsóknarleyfi skuli vera sérleyfi þá má ráða af 2. mgr. 5. gr. að svo sé raunin. Þar segir að rannsóknarleyfi skuli einungis veitt einum aðila á hverju svæði en heimilt er þó að veita fleiri en einum aðila slíkt leyfi sameiginlega hafi þeir staðið saman að rannsóknarleyfisumsókn og gert með sér samning um skiptingu rannsóknarkostnaðar. Með vísan til þessa er því óheimilt að veita öðrum aðila, en leyfishafa, leyfi á tilteknu svæði á gildistíma leyfis, sem og á

gildistíma forgangs að nýtingarleyfi þegar slíkt á við. Um forgang að nýtingarleyfi er nánar kveðið á um í 3. mgr. 5. gr. laganna þar sem segir að Orkustofnun sé heimilt að kveða á um í rannsóknarleyfi um fyrirheit um forgang leyfishafa að nýtingarleyfi fyrir hitaveitur í allt að tvö ár eftir að gildistíma rannsóknarleyfis er lokið og að öðrum aðila verði ekki veitt rannsóknarleyfi á þeim tíma. Rétt er að ítreka að heimild þessi nær eingöngu til forgangs að nýtingarleyfi vegna hitaveitna frá og með árinu 2006. Fyrir þann tíma tók þessi heimild til nýtingarleyfa almennt, óháð því í hverju nýtingin fólst.

Eins og áður sagði felur leyfi til rannsókna í sér heimild til þess að leita að auðlind á tilteknu svæði á leyfistíma, rannsaka umfang, magn og afkastagetu hennar. Lögin gera ekki greinarmun á leit og rannsóknum. Í frumvarpi iðnaðarráðherra til laga um rannsóknir og nýtingu á jarðrænum auðlindum var lagt til að svo yrði en frumvarpið hlaut ekki afgreiðslu. Lögin skilgreina ekki frekar hvað felist í rannsóknum eða hvaða skilyrði eru sett fyrir einstökum rannsóknarframkvæmdum. Rannsóknarboranir eru þannig t.a.m. ekki háðar leyfisveitingu Orkustofnunar. Hins vegar er í lögum kveðið á um að ef landeigendur rannsaka jarðhita án leyfis skuli tilkynna Orkustofnun um rannsóknarboranir og sé stofnuninni heimilt að setja landeiganda þau skilyrði sem nauðsynleg eru talin vegna öryggis eða af tæknilegum ástæðum eða ef ætla má að leit eða rannsóknir geti spilt vinnslu sem fram fer á svæðinu eða möguleikum til vinnslu síðar.

Hvað varðar heimildir til útgáfu rannsóknarleyfa á auðlindum í þjóðlendum þá er Orkustofnun samkvæmt 4. gr. laganna heimilt að hafa frumkvæði að og/eða láta rannsaka og leita að auðlindum í jörðu hvar sem er á landinu. Í athugasemdum við 4. gr. frumvarps sem síðar varð að lögum segir um þetta atriði að gert sé ráð fyrir að heimildir Orkustofnunar nái bæði til landsvæða utan eignarlands og innan. Í 2. mgr. 3. gr. laga nr. 58/1998, um þjóðlendur og ákvörðun marka eignarlanda, þjóðlendna og afrétta segir að leyfi forsætisráðherra þurfi til að nýta vatns- og jarðhitaréttindi, námur og önnur jarðefni innan þjóðlendu nema mælt sé fyrir um annað í lögum. Orkustofnun er jafnframt heimilt að leyfa nauðsynleg afnot af landi til hagnýtingar á þessum réttindum.

Í rannsóknarleyfum er skýrt tekið fram að leyfið sé háð almennum gildandi réttarreglum á hverjum tíma. Það undanþiggur ekki leyfishafa frá því að sækja um leyfi vegna starfsemi sinnar sem að öðru leyti er mælt fyrir um í lögum um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu eða öðrum lögum sem starfsemin fellur undir.

Þess má geta að í rannsóknarleyfum er að finna fyrirvara um að ýmsar framkvæmdir, s.s. rannsóknarboranir, falli undir framkvæmdir sem kunna að vera háðar mati á umhverfisáhrifum, skipulagsskyldar framkvæmdir skuli vera í samræmi við skipulagsáætlanir, afla skuli framkvæmdaleyfa og byggingarleyfa viðkomandi sveitarstjórnar og að afla skuli starfsleyfis hjá viðkomandi heilbrigðisnefnd. Þá er skýrt kveðið á um að leyfishafa beri í hvívetna að fara að lögum í umgengni um rannsóknarsvæði, taka tillit til umhverfissjónarmiða við rannsóknir og framkvæmdir sem og við frágang að þeim loknum. Er sérstaklega bent á að um vernd rannsóknarsvæðis gildi lög um náttúruvernd. Loks er eftir atvikum gerður fyrirvari við að fari svo að ofangreint svæði verði úrskurðað þjóðlenda þurfi einnig leyfi forsætisráðherra.

Rannsóknarleyfi felur í sér almennt leyfi til rannsókna, en ekki leyfi til einstakra rannsóknarframkvæmda, hvort sem er yfirborðsrannsókna eða rannsóknarborana.

Lögunum var hvorki ætlað að taka með heildstæðum hætti á umhverfismálum, náttúruvernd og skipulagsmálum, né hrófla við eða víkja úr vegi þeirri löggjöf. Því gilda t.d. ákvæði laga um mat á umhverfisáhrifum, laga um náttúruvernd og skipulags- og byggingarlaga um allar framkvæmdir rannsóknarleyfishafa þrátt fyrir útgáfu rannsóknarleyfis. Framkvæmdir rannsóknarleyfishafi í kjölfar útgáfu rannsóknarleyfis eru því háðar leyfum þar til bættra yfirvalda. Rannsóknarleyfi raska því á engan hátt þeirri vernd sem náttúru og umhverfi er tryggð með öðrum lögum.

Þá er kveðið á um í 4. mgr. 5. gr. að Orkustofnun skuli leita umsagnar umhverfissráðuneytis áður en ákvörðun um veitingu leyfis er tekin. Þessu til viðbótar ber Orkustofnun að leita umsagnar landeiganda á viðkomandi svæðis í samræmi við 13. og 14. gr. stjórnsýslulaga, nr. 37/1993, sbr. dómur Héraðsdóms Reykjavíkur í máli nr. E-45/2004 (Reykjahlíðardómur). Í umræddum héraðsdómi, sem ekki var áfrýjað til Hæstaréttar, segir m.a.:

„Af því sem nú hefur verið rakið verður ráðið að ákvæði laga nr. 57/1998 fela í sér ýmsar skerðingar á almennum umráða- og nýtingarrétti eiganda fasteignar með tilliti til rannsókna og nýtingar á auðlindum í jörðu. Verður ráðið af forsögu laga nr. 57/1998, svo og lögunum í heild, að þessar skerðingar á eignarrétti séu grundvallaðar á því meginviðhorfi að nýting auðlinda í jörðu sé þýðingarmikil með tilliti til almannahagsmuna og er þetta talið réttlæta aukin afskipti handhafa ríkisvalds af rannsókn og nýtingu þeirra. Að öllu þessu virtu verður 4. gr. laga nr. 57/1998 ekki skýrð rýmkindi skýringu á þá leið að ráðherra sé skylt að láta landeiganda njóta forgangs til rannsókna og nýtingar. Verður að telja lög nr. 57/1998 skýr um það atriði að ráðherra beri að taka afstöðu til umsókna landeiganda um rannsóknarleyfi með sama hætti og þegar um er að ræða umsóknir annarra, sbr. þær reglur og sjónarmið sem fram koma í VIII. kafla laga nr. 57/1998. Styður það þessa lögskýringu að í frumvarpi til laga um rannsóknir og nýtingu á jarðrænum auðlindum sem lagt var fyrir 131. löggjafarþing 2004-2005 (þskj. 459, 374. mál) er gert ráð fyrir þeirri breytingu á gildandi rétti að landeigandi eigi forgangsrétt að rannsóknarleyfi á auðlind sinni. Í ljósi þess að hér er um að ræða lögakveðnar skerðingar á eignarréttindum, sem löggjafinn hefur metið nauðsynlegar í almannabágu, og telja verður að mælt sé fyrir um fullnægjandi bótaúrræði landeiganda í 28. og 29. gr. laganna, getur 72. gr. stjórnarskrárinnar ekki haggð þessari niðurstöðu. Víkur þá næst að þeirri málsástæðu stefnanda að brotið hafi verið gegn andmælarétti hans við útgáfu leyfisins 31. maí 2002.

Eins og áður greinir kemur aðeins fram í lögum nr. 57/1998 að leita skuli umsagnar Orkustofnunar og umhverfissráðuneytis áður en rannsóknarleyfi er veitt. Af þessum fyrirmælum laga nr. 57/1998 verður þó ekki gagnályktað á þá leið að andmælaréttar samkvæmt IV. kafla stjórnsýslulaga nr. 37/1993 skuli ekki gætt, sbr. til hliðsjónar 1. málslíð 2. mgr. 2. gr. laga nr. 37/1993. Er það niðurstaða dómara að við útgáfu leyfisins 31. maí 2002 hafi ótvírætt borið að gæta ákvæða laga nr. 37/1993 að því marki sem lög nr. 57/1998 höfðu ekki að geyma skýr fyrirmæli um annað. Bar því að tilkynna aðilum máls um meðferð þess og gefa þeim kost á að tjá sig um efni þess í samræmi við nánari fyrirmæli 13. og 14. gr. laga nr. 37/1993.“

VI.3.4 Nýting

Í IV. kafla laganna er fjallað um nýtingarleyfi. Í 1. mgr. 6. gr. segir að nýting auðlinda úr jörðu er háð leyfi Orkustofnunar hvort sem það er til nýtingar auðlinda í eignarlöndum eða í þjóðlendum með þeim undantekningum sem greinir í lögnum. Landeigandi hefur ekki forgang að nýtingarleyfi vegna auðlindar í eignarlandi sínu, nema hann hafi áður fengið útgefið rannsóknarleyfi. Í ákvæði þessu felst einnig að landeiganda er óheimilt að hefja nýtingu á jarðefnum og meiri háttar nýtingu á jarðhita og grunnvatni án leyfis Orkustofnunar. Á þetta þó ekki við um nýtingu á grjóti, möl, sandi, vikri, gjalli og öðrum slíkum gos- og steinefnum, svo og mold, mó og surtarbrandi, sem fram fer á eignarlandi. Er hér um að ræða óbreytta reglu frá þágildandi lögum.

Landeiganda er einnig heimilt að hagnýta jarðhita án leyfis til heimilis- og búsparfa, þar með talið til iðnaðar og iðju, og grunnvatn til svipaðrar starfsemi. Hins vegar vaknar sú spurning hvað séu eðlileg not til heimils- og búsparfa og verður því ekki svarað hér en rétt er að vísa til þess sem Ólafur Lárusson lagaprófessor kvað á um í riti sínu *Eignaréttur*, þar sem hann fjallaði um sambærilegt álitaefni vegna þágildandi laga nr. 98/1940. Þar segir Ólafur m.a. (1950):

„Með hliðsjón af þessum ákvæðum virðist almenna reglan vera sú, að eignarráð landeiganda nái svo langt niður, sem nauðsynlegt er að leyfa honum þau til þess að hann geti haft þau not af landi sínu, sem heyra til venjulegrar hagnýtingar á eignarrétti yfir fasteignum.“

Þessu til fyllingar er rétt að hafa hugfast að ætla má að þeir sem ráðist í kostnaðarsama jarðhitaleit, eða vinnslu jarðhita, séu aðilar sem geta lagt í töluverða áhættu um óarðbær fjárútlát með hagnýtingu jarðhita í stórum stíl að leiðarljósi (Ólafur Jóhannesson, 1956). Af þessu má ráða að eðlileg not til heimils- og búsparfa falli ekki undir slíkt, enda ljóst að umfangsmiklar rannsóknir og hugsanleg vinnsla á jarðhita í stórum stíl falli undir almenna skilgreiningu á heimils- og búspörfum.

Um heimildir samkvæmt nýtingarleyfi segir í 2. mgr. 6. gr. laganna að nýtingarleyfi felur í sér heimild til handa leyfishafa til að vinna úr og nýta viðkomandi auðlind á leyfistímanum í því magni og með þeim skilmálum öðrum sem tilgreindir eru í lögum þessum og Orkustofnun telur nauðsynlega. Það skal ítrekað að nýtingarleyfi felur ekki í sér heimild til framleiðslu á raforku, en um slíkt fer samkvæmt ákvæðum raforkulaga. Að sama skapi skal einnig ítrekað að nýtingarleyfi er ekki skilyrði fyrir því að aðila verði veitt virkjunarleyfi. Í ljósi þessa felur nýtingarleyfi eingöngu í sér heimild til að nýta t.a.m. jarðhita vegna þarfa hitaveitu, en ekki vegna annarra nota á jarðhita.

Líkt og með útgáfu rannsóknarleyfis þá skal Orkustofnun leita umsagnar umhverfisráðuneytis og landeiganda áður en ákvörðun um veitingu leyfis er tekin. Þessu til viðbótar skal Orkustofnun einnig leita umsagnar viðkomandi sveitastjórnar en það eðlilegt þykir að sveitarstjórnir veiti umsögn um útgáfu nýtingarleyfis innan marka sveitarfélags þar sem hagsmunir þess eru ríkir bæði frá efnahagslegu og umhverfisverndarlegu sjónarmiði.

Þótt Orkustofnun sé heimilt að veita leyfi í eignarlöndum, óháð vilja landeiganda, þá ber nýtingarleyfishafa samkvæmt 1. mgr. 7. gr. laganna að ná samkomulagi við landeiganda um endurgjald fyrir auðlindina eða leita eftir heimild til eignarnáms áður en til vinnslu á grundvelli leyfisins kemur. Ef leyfishafi nær ekki samkomulagi við landeiganda, eða hann hefur eigi óskað eftir eignarnámi, innan 60 daga frá útgáfu leyfisins þá fellur umrætt nýtingarleyfi úr gildi.

VI.3.5 Skilyrði við veitingu rannsóknar- og/eða nýtingarleyfa

Um skilyrði við veitingu leyfa, efni þeirra og afturköllum er nánar kveðið á um í VIII. kafla laganna. Það verður hins vegar til sanns vegs færa að leiðbeiningar um umsóknir eru ekki ítarlegar samkvæmt ákvæðum laganna, t.d. í samanburði við sams konar leiðbeiningar í raforkulögum. Þannig segir eingöngu í 16. gr. laganna að í umsóknum um rannsóknar- og nýtingarleyfi skuli koma skýrt fram hver tilgangur sé með öflun leyfis ásamt ítarlegum upplýsingum um fyrirhugaðar framkvæmdir umsækjanda eftir nánari ákvörðun Orkustofnunar. Með vísan til þessa ákvæðis er augljóst að gagnsæi varðandi kröfur um gæði og innihald umsókna er ekki mikið, að frátöldum kröfum um rannsóknaráætlun. Hins vegar má draga ályktun um þær kröfur sem gera skal til innihald umsókna með því að skoða ákvæði 18. gr. laganna þar sem kveðið er á um efni og innihald rannsóknar- og/eða nýtingarleyfa.

Að sama skapi er ljóst að lögin kveða ekki með ítarlegum hætti á um hvernig skuli staðið að auðlindastýringu við útgáfu leyfa en í 17. gr. laganna segir að við veitingu nýtingarleyfa skal þess gætt að nýting auðlinda í jörðu sé með þeim hætti að tekið sé tillit til umhverfissjónarmiða, nýting auðlindanna sé hagkvæm frá þjóðhagslegu sjónarmiði og tekið sé tillit til nýtingar sem þegar er hafin í næsta nágrenni. Telji Orkustofnun að umsækjandi um nýtingarleyfi uppfylli ekki þessar kröfur getur hann synjað um nýtingarleyfi eða sett sérstök skilyrði í nýtingarleyfi af þessu tilefni. Með hliðsjón af kröfum um skýrar lagaheimildir vegna ákvarðanna stjórnvalda verður að draga þá ályktun að í lögin skorti nánari leiðbeiningar á sviði auðlindastýringar. Einnig er ljóst að, að óbreyttu, felist ekki í lögunum heimild til að endurskoða leyfi í ljósi breyttra forsenda eða sérstaka tilvika frá þeim tíma sem nýtingarleyfi var veitt.

VI.3.6 Eftirlit og annað

Orkustofnun er ekki eingöngu leyfisveitandi samkvæmt ákvæðum laganna heldur er stofnunin einnig eftirlitsaðili samkvæmt þeim. Er í IX. kafla laganna kveðið á um eftirlit Orkustofnunar sem og gagna- og upplýsingaskil leyfishafa eða annarra framkvæmdaraðila.

Leyfishafi skal eigi sjaldnar en árlega og við lok leyfistíma senda Orkustofnun skýrslu þar sem fram koma upplýsingar um niðurstöður leitar, rannsókna, upplýsingar um eðli og umfang auðlinda, heildarmagn og mat á verðmæti auðlindar sem nýtt hefur verið og fleiri atriði samkvæmt nánari ákvæðum leyfis. Þá skal leyfishafi senda sýni af jarðfræðilegum efnum óski Orkustofnun þess.

Við jarðboranir skal færa dagbók er gefur upplýsingar um staðsetningu holunnar, jarðlög, gerð þeirra og dýpi, hvenær vatn eða gufa kemur í holuna, hitastig o.fl. Skylt er að láta Orkustofnun í té afrit af dagbókinni eigi síðar en einum mánuði eftir að borun er

lokið. Orkustofnun getur krafist þess að berg- og jarðvegssýnishorn séu varðveitt. Ef Orkustofnun mælir svo fyrir er leyfishafa jarðborunar skylt að tilkynna stofnuninni þegar í stað er heitt vatn eða gufa kemur upp eða eykst í borholu.

Um afturköllun leyfa er nánar kveðið á um í 20. gr. laganna þar sem segir að Orkustofnun getur afturkallað leyfi ef skilyrðum þeirra er ekki fullnægt. Nú hlítir leyfishafi ekki skilyrðum þeim sem sett eru í leyfinu eða samningum sem tengjast leyfinu og skal Orkustofnun veita honum skriflega aðvörun og frest til úrbóta. Sinni leyfishafi ekki slíkri aðvörun skal afturkalla leyfið. Þá er Orkustofnun heimilt að afturkalla leyfi ef bú leyfishafa er tekið til gjaldþrotaskipta eða hann leitar nauðasamninga.

Í X. kafla auðlindalaga er getið um eignarnáms- og bótaákvæði. Til viðbótar því sem áður hefur komið fram varðandi endurgjald og eignarnám þá er rétt að vekja athygli á að heimili Orkustofnun öðrum en landeiganda að leita og rannsaka auðlind innan eignarlands þá getur landeigandi krafist bóta samkvæmt 28. gr. laganna. Er einnig að finna heimild til þess að taka land eignarnámi náist ekki samkomulag við landeiganda og er það leyfishafi sem ber allan kostnað af eignarnáminu, sbr. 1. mgr. 29. gr. laganna.

VI.4 Raforkulög, nr. 65/2003

VI.4.1 Almenn

Ástæða er í umfjöllun þessari að gera grein fyrir einstaka ákvæðum raforkulaga er varða nýtingu á auðlindum í jörðu. Samkvæmt 4. tölul. 1. gr. laganna er markmið þeirra m.a. að stuðla að nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa og taka tillit til umhverfissjónarmiða að öðru leyti. Þá er í 4. tölul 3. gr. endurnýjanlegar orkulindir skilgreindar sem orkulindir sem geta endurnýjað sig í sífellu, svo sem fallvötn, jarðhiti, vindorka, sjávarföll og sólarorka.

Líkt og með lög nr. 57/1998, þá hefur iðnaðarráðherra með vísan til heimildar í 32. gr. raforkulaga falið Orkustofnun leyfisveitingarvald sitt samkvæmt 1. mgr. 4. gr., 2. mgr. 9. gr., 13. gr. og 1. mgr. 18. gr. frá og með 1. ágúst 2008. Eftirfarandi umfjöllun mun taka mið af þessum breytingum og verður vísað til Orkustofnunar sem leyfisveitanda þar sem slíkt á við, þrátt fyrir að samkvæmt orðanna hljóðan sé almennt vísað til iðnaðráðherra í texta laganna.

VI.4.2 Virkjunarleyfi

Meginregla laganna um leyfisskyldu virkjana er samkvæmt 1. mgr. 4. gr. sú að leyfi Orkustofnunar þarf til að reisa og reka raforkuver. Undantekning frá þeirri meginreglu er að slíkt leyfi þarf ekki vegna raforkuvera með uppsettu afli sem er undir 1 MW nema orka frá raforkuveri sé afhent inn á dreifikerfi dreifiveitna eða flutningskerfið. Eigendur virkjana með uppsett afl 30–1.000 kW skulu skila Orkustofnun tæknilegum upplýsingum um virkjun. Einnig er skylt að tilkynna Orkustofnun árlega um heildarraforkuvinnslu raforkuvera með uppsettu afli yfir 100 kW.

Líkt og kveðið er á um í auðlindalögunum skal handhafi virkjunarleyfis ná samkomulagi við landeiganda og eigendur orkulinda um endurgjald, eða leita eignarnáms, innan 90 daga frá útgáfu leyfisins og hafi slíkt ekki verið gert innan þeirra tímamarka fellur leyfi niður. Þar auki er þess getið í 2. mgr. 4. gr. laganna að ef framkvæmdir á grundvelli virkjunarleyfis eru ekki hafnar 10 árum eftir útgáfu þess, eða að virkjun er ekki komin í rekstur innan 15 ára, þá fellur virkjunarleyfi úr gildi. Hins vegar er leyfishafa heimilt að sækja um endurnýjun leyfis áður en að þessum tímamörkum kemur. Er með þessu ætlað að sporna við því að einstakir aðilar geti „tekið frá“ hagkvæma virkjunarkosti og komið þannig í veg fyrir að þeir verði nýttir af öðrum. Hins vegar er ljóst að undirbúningur raforkuvinnslu getur tekið mjög langan tíma og að teknu tilliti til þess er mögulegt að fá leyfi endurnýjað ef upphaflegi tíminn er ekki talinn nægjanlegur. Sé vilji virkjanaleyfishafa augljós til að nýta leyfi sitt og tafir eðlilegar er rétt að líta svo á að leyfið skuli framlengt fari hann fram á það.

VI.4.3 Skilyrði virkjunarleyfis

Um skilyrði fyrir útgáfu virkjunarleyfis segir í 2. mgr. 5. gr. laganna að Orkustofnun getur sett skilyrði er lúta að því að tryggja nægilegt framboð raforku, öryggi, áreiðanleika og skilvirkni raforkukerfisins og nýtingu endurnýjanlegra orkulinda. Enn fremur má setja skilyrði er lúta að umhverfisvernd, landnýtingu og tæknilegri og fjárhagslegri getu virkjunarleyfishafa. Það er svo ítrekað að öll skilyrði skulu tilgreind í reglugerð, sbr. 5. gr. reglugerðar um framkvæmd raforkulaga, nr. 1040/2005. Í athugasemdum við 5. gr. frumvarps þess sem varð að raforkulögum segir m.a. eftirfarandi: „Í 2. mgr. eru talin sjónarmið sem leggja má til grundvallar við veitingu leyfis til að reisa og reka raforkuver. Eru þau í samræmi við þau sjónarmið sem talin eru í tilskipun 96/92/EB um innri markað raforku og rakin eru í 3. kafla almennra athugasemda. Þau verður að útfæra í reglugerð þar sem fram koma hlutlæg og gagnsæ skilyrði fyrir útgáfu leyfis. Samkvæmt tilskipuninni verða skilyrðin að auki að vera með þeim hætti að unnt sé að sannreyna ákvarðanir sem teknar eru á grundvelli þeirra. Í ákvæðinu segir í fyrsta lagi að heimilt sé að binda leyfi skilyrðum er lúta að því að tryggja nægilegt framboð raforku. Í því sambandi getur ráðherra t.d. sett skilyrði um afkastagetu og að leyfishafi skuli fullnýta afkastagetu virkjunar ef eftirspurn er fyrir hendi. Ekki er heimilt að hafna útgáfu virkjunarleyfis á þeirri forsendu einni að framboð raforku sé nægilegt. Í öðru lagi segir að heimilt sé að setja skilyrði er lúti að öryggi, áreiðanleika og skilvirkni raforkukerfisins enda er um að ræða eitt samtengt kerfi og ný virkjun hefur áhrif á rekstur þess. Tryggja þarf að ekki verði um óæskileg áhrif vegna hennar að ræða. Í þriðja lagi er heimilt að setja skilyrði sem eiga að tryggja að nýttar séu endurnýjanlegar orkulindir. Ráðherra getur samkvæmt þessu ákveðið að eingöngu skuli heimila nýjar virkjanir er nýta endurnýjanlegar orkulindir. Í fjórða lagi getur ráðherra bundið leyfi skilyrðum er lúta að umhverfisvernd. Með því er fyrst og fremst átt við að veiting leyfis verður bundin því skilyrði að fram fari mat á umhverfisáhrifum ef við á, sbr. lög nr. 106/2000, um mat á umhverfisáhrifum. Þá kann að þurfa að útfæra ýmis skilyrði í leyfi sem leiða af mati á umhverfisáhrifum. Í fimmta lagi má samkvæmt ákvæðinu binda leyfi skilyrðum er lúta að landnýtingu. Um landnýtingu fer samkvæmt skipulags- og byggingarlöggjöf. Ekki er við það miðað að iðnaðarráðherra fari inn á svið þeirrar löggjafar. Hann getur hins vegar sett skilyrði um að leyfi sé háð því að sú löggjöf sé uppfyllt. Þá kann að vera talið nauðsynlegt, t.a.m. vegna mats á umhverfisáhrifum, að setja kröfur sem tengjast landnýtingu. Í sjötta lagi getur ráðherra sett skilyrði er varða tæknilega og fjárhagslega getu

virkjunarleyfishafa. Með þessu er átt við að umsækjendur um leyfi verði að sýna fram á tæknilega getu til að reisa viðkomandi virkjun og fjárhagslegt bolmagn.“

Ástæða er til að vekja athygli á 5. mgr. 5. gr. reglugerðar um framkvæmd raforkulaga þar sem segir að Orkustofnun skuli við leyfisveitingu taka tillit til mats á umhverfisáhrifum vegna framkvæmdarinnar og fullnaðarúrskurðar stjórnvalda þar um. Þá skal Orkustofnun eftir því sem við á mæla fyrir um mótvægisáðgerðir og önnur skilyrði til að koma í veg fyrir eða draga úr áhrifum framkvæmdar á umhverfi og til að stuðla að sjálfbærri nýtingu endurnýjanlegra orkulinda og að varlega sé farið í nýtingu óendurnýjanlegra auðlinda. Slíkar áðgerðir eða skilyrði skulu vera í eðlilegum tengslum við framkvæmdina og geta m.a. lotið að hönnun og búnaði viðkomandi mannvirkja, staðarmörkum, nýtingarmagni, vöktun, mælingum, rannsóknnum, upplýsingaskilum, framkvæmdum sem miða að því að varðveita náttúrugæði og frágangi á starfsstöðvum og landi á starfstíma og að honum loknum. Í umræddri málsgrein er þannig vísað almennt til sjálfbærrar nýtingar endurnýjanlegra orkulinda án þess þó að skilgreina það hugtak nánar. Er hér leyfisveitanda látið eftir að túlka umrædda tilvísun, en slík túlkun getur hins vegar aldrei gengið lengra en nauðsyn kallar til hverju sinni með tilliti til kröfu skýrleika lagaákvæða, sem og kröfu um að íþyngjandi ákvarðanir hafi fullnægjandi lagastoðir.

Af framangreindum má ráða að ekki eru gerðar kröfur um að umsækjandi um virkjunarleyfi sé einnig handhafi nýtingarleyfis. Þessu til stuðnings má vísa til 27. gr. frumvarps til laga um breytingu á lögum nr. 57/1998, um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, með síðari breytingum, sem lagt var fyrir Alþingi á 133. löggjafarþingi 2006-2007. Í 27. gr. frumvarpsins var lögð til sú breyting á 5. gr. raforkulaga á þá vegu að við ákvæðið bætist ný málsgrein, svohljóðandi: „Umsækjandi virkjunarleyfis hafi gilt nýtingarleyfi vegna viðkomandi auðlindar samkvæmt lögum um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu.“ Þess ber að geta að frumvarp þetta var ekki afgreitt frá Alþingi. Þar sem ekki er gerð krafa um að nýtingarleyfi sé skilyrði fyrir veitingu virkjunarleyfis, og þar sem raforkulög eru ekki sérlæg varðandi rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, er ljóst að möguleikar leyfisveitanda til að stýra auðlindanýtingu við útgáfu virkjunarleyfis eru þrengri en ella. Í ljósi þessa væri æskilegt að löggjafinn tæki á þessu með því að breyta raforkulögum á þá vegu að auka vægi auðlindastýringar við útgáfu virkjunarleyfa. Ekki er með þessu verið að krefjast þess að nýtingarleyfi verði gert að skilyrði fyrir útgáfu virkjunarleyfis, heldur væri er hægt að breyta núgildandi raforkulögum á þá vegu að sameina megi skilyrði nýtingarleyfa við ákvæði raforkulaga.

VI.4.4 Samnýting auðlinda

Raforkulögin gera ráð fyrir því að unnt sé að samnýta tiltekna auðlind vegna tveggja eða fleiri virkjana. Þannig segir í 4. mgr. 5. gr. laganna, sem og 6. gr. reglugerðarinnar, að leyfi fyrir vatnsaflsvirkjun getur verið bundið því skilyrði að samningar takist um samrekstur annarra vatnsaflsvirkjana og vatnsmiðlana á viðkomandi vatnasviði. Virkjunarleyfi fyrir jarðgufuvirkjun getur á sama hátt verið bundið því skilyrði að samningar takist um samrekstur með öðrum þeim sem nýta sama jarðhitasvæði. Þá er Orkustofnun heimilt í virkjunarleyfi að gera fyrirvara um það að öðrum aðila kunni að verða veitt leyfi til virkjunar sem nýtir sama vatnasvið eða jarðhitasvæði. Orkustofnun er heimilt að endurskoða ákvæði virkjunarleyfis með tilliti til þessa og bæta í það ákvæðum sem hún telur nauðsynleg til að tryggja heildarhagkvæmni í orkunýtingu

vatnasviðsins eða jarðhitasvæðisins. Rétt er að vekja athygli á að samkvæmt ákvæðum þessum, sem og samkvæmt 2. mgr. 6. gr. laganna, þá er heimilt að kveða á um í virkjunarleyfi að það skuli endurskoðað að tilteknum tíma liðnum, enda hafi forsendur fyrir skilyrðum leyfisins breyst verulega. Er hér um að ræða heimild sem að óbreyttu er ekki að finna í lögum nr. 57/1998 varðandi nýtingarleyfi en æskilegt væri að sams konar heimild væri þar að finna.

VI.4.5 Eftirlit og annað

Eftirlit með því að fyrirtæki sem starfa samkvæmt raforkulögum fullnægi þeim skilyrðum sem um starfsemina gilda samkvæmt lögum þessum, reglugerðum settum samkvæmt þeim og öðrum heimildum er í höndum Orkustofnunar, sbr. VII. kafli laganna. Orkustofnun getur kafið eftirlitsskylda aðila um allar upplýsingar og gögn sem nauðsynleg eru við framkvæmd eftirlitsins. Orkustofnun getur einnig skyldað þessa aðila til að upplýsa stofnunina reglulega um atriði sem máli skipta við eftirlitið. Þá getur Orkustofnun krafist þess að eftirlitsskyldur aðili komi á innra eftirliti í samræmi við kröfur sem stofnunin setur.

Telji Orkustofnun að eftirlitsskyld starfsemi samræmist ekki skilyrðum raforkulaga, reglugerðum settum samkvæmt þeim, skilyrðum leyfis eða öðrum heimildum getur hún krafist þess að úr verði bætt að viðlögðum dagsektum. Dagsektir geta numið 10–500 þús. kr á dag.

Í 36. gr. laganna er kveðið á um afturköllun leyfa í nánar tilgreindum tilvikum en þar segir að ef leyfishafi fer ekki að skilyrðum raforkulaga, reglugerða settra samkvæmt þeim, skilyrðum leyfisins, samningum sem tengjast leyfinu eða öðrum heimildum skal Orkustofnun veita honum skriflega aðvörun og hæfilegan frest til úrbóta. Ef leyfishafi sinnir ekki aðvörun Orkustofnunar innan tilgreindra tímamarka getur ráðherra afturkallað leyfið eða breytt því. Ef um alvarleg brot eða vanrækslu er að ræða eða ljóst er að leyfishafi getur ekki staðið við skyldur sínar samkvæmt leyfinu getur ráðherra þó afturkallað það án aðvörunar. Eins og áður er nefnt þá hefur iðnaðarráðherra með vísan til heimildar í 32. gr. raforkulaga falið Orkustofnun leyfisveitingarvald sitt frá og með 1. ágúst 2008. Eftir sem áður þá nær heimild Orkustofnunar til að afturkalla leyfi með ofanefndum skilyrðum einungis til leyfa sem Orkustofnun hefur veitt, og því ber ráðherra að afturkalla eða breyta leyfum sem veitt voru fyrir 1. ágúst 2008 ef til þess kemur.

VI.5 Lög um Orkustofnun, nr. 87/2003

Til viðbótar framangreindu er rétt að vekja athygli á að samkvæmt 3. tölul. 1. mgr. 2. gr. laga um Orkustofnun er hlutverk stofnunarinnar m.a. að safna gögnum um orkulindir og aðrar jarðrænar auðlindir, nýtingu þeirra og orkubúskap landsmanna, varðveita þau og miðla upplýsingum til stjórnvalda og almennings. Til að sinna þessu hlutverki sínu er Orkustofnun heimilt að krefjast gagna sem varða nýtingu á jarðrænum auðlindum, orkuframleiðslu og orkunotkun, þ.m.t. gagna um innflutning, geymslu og sölu á jarðefnaeldsneyti. Skyld er þeim sem stunda atvinnurekstur er varðar framangreint að afhenda stofnuninni nauðsynleg gögn innan frests sem hún tilgreinir. Sé gögnum ekki skilað innan tilgreinds frests er Orkustofnun heimilt að leggja dagsektir á viðkomandi

fyrirtæki eða stofnun. Dagsektir geta numið 10–100 þús. kr á dag, sbr. 5. og 6. mgr. 2. gr. laganna.

VI.6 Mat á umhverfisáhrifum

Samkvæmt lögum um mat á umhverfisáhrifum kunna boranir að vera háðar mati á umhverfisáhrifum. Er þar m.a. átt við um boranir á vinnsluholum og rannsóknarholum á háhitasvæðum og boranir eftir jarðhita á lághitasvæðum þar sem ölkeldur, laugar eða hverir eru á yfirborði eða í næsta nágrenni. Séu slíkar framkvæmdir fyrirhugaðar skal framkvæmdaraðili tilkynna Skipulagsstofnun um hana. Það er svo metið í hverju tilviki fyrir sig og út frá þar til gefnum viðmiðunum, sem varða eðli og staðsetningu framkvæmdar og eiginleika hugsanlegra umhverfisáhrifa, hvort framkvæmd verði háð mati á umhverfisáhrifum.

Sé fyrirhuguð framkvæmd háð mati á umhverfisáhrifum skal framkvæmdaraðili gera tillögu að matsáætlun til Skipulagsstofnunar eins snemma á undirbúningsstigi framkvæmdar og kostur er þar sem m.a. skal lýsa fyrirhugaðri framkvæmd, framkvæmdasvæði, öðrum möguleikum sem til greina koma og hvaða gögn liggi fyrir. Tillögu að matsáætlun skal svo kynna umsagnaraðilum en samkvæmt lögum um mat á umhverfisáhrifum eru það m.a. opinberar stofnanir sem sinna lögbundnum verkefnum er varða matsskyldar framkvæmdir eða umhverfisáhrif þeirra. Er þetta til þess fallið að auka skilvirkni í stjórnsýslu þar sem leyfisveitanda er veitt ákveðin aðkoma að málum strax á undirbúningsstigi með umsögn um tillögu að matsáætlun. Eftir að umsagnir berast til Skipulagsstofnunar tekur sú stofnun ákvörðun um framhaldið, hvort að tillögu verði hafnað eða hún samþykkt. Sé tillaga samþykkt með athugasemdum verða þær athugasemdir Skipulagsstofnunar hluti af matsáætlun sem svo skal kynnt leyfisveitendum og öðrum umsagnaraðilum.

Í kjölfarið á samþykkttri matsáætlun er svo unnin frummatsskýrsla byggð á henni. Þegar hún hefur verið fullunnin gefst leyfisveitanda aftur tækifæri til þess að koma að athugasemdum þar sem Skipulagsstofnun er skylt að leita umsagnar leyfisveitanda og annarra aðila, eftir því sem við á, um frummatsskýrslu. Framkvæmdaraðili vinnur svo endanlega matsskýrslu á grundvelli frummatsskýrslu og skal þar gera grein fyrir framkomnum athugasemdum og umsögnum og taka afstöðu til þeirra. Endanleg matsskýrsla er send Skipulagsstofnun sem í áliti um matsskýrsluna fjallar sérstaklega um afgreiðslu framkvæmdaraðila á þeim athugasemdum og umsögnum sem borist hafa við kynningu á frummatsskýrslu.

VIÐAUKI VII

MARKMIÐ SJÁLFBÆRRAR JARÐHITANÝTINGAR /

GOALS OF SUSTAINABLE GEOTHERMAL UTILIZATION

Tafla 5: *Tillaga að markmiðum sjálfbærrar jarðhitanytingar. Orðskýringar hugtaka má finna í viðauka I. Markmiðin eru sett fram með sterka sjálfbærni að leiðarljósi, sem felur í sér að nýtingin hafi ekki neikvæð áhrif á neina af meginstoðum sjálfbærrar þróunar, þ.e. samfélags, efnahags eða umhverfis. Veik sjálfbærni leyfir rýrnun einhverra meginstoðanna, t.d. með lotubundinni vinnslu (sjá kafla 4.4), enda skili nýtingin í heildina jákvæðum samfélagslegum ábata.*

Auðlindastjórnun

- (1) Jarðhitaauðlindina skal nýta á sjálfbæran hátt, þannig að framboð tryggir orku til húshitunar, raforkuvinnslu og annarra nota sé nægilegt fyrir félagslega og hagræna þróun viðkomandi samfélags og þjóðfélagsins í heild án þess að skaða umhverfið.

Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluáðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu úr kerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sé vinnsluálag umfram E_0 er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en, eða jöfn, E_0 er skilgreind sem sjálfbær, en vinnsla umfram E_0 telst ekki sjálfbær.

Huga skal að niðurdælingu jarðhitavökvans aftur í jarðhitageyminn til að styðja við langtímanýtingu, einkum í jarðhitakerfum með takmarkað innstreymi.

- (2) Grunnvatnsnotkun virkjunar skal ekki rýra almenna neysluvatnstöku nálægra byggðalaga.

Umhverfisstjórnun

- (3) Jarðhitaauðlind skal nýtt á þann hátt að sem minnst umhverfisáhrif fylgi samkvæmt gildandi lögum hverju sinni. Ætíð skal nota þá tækni og hönnun sem dregið getur úr umhverfisáhrifum. Fylgja skal áætlunum um umhverfisstjórnun á öllum stigum framkvæmda og rekstrar.

Nýtni

- (4) Leitast skal við að haga jarðhitanytingu þannig að nýting tiltækrar íðorku (*e. exergy*) sé sem best. Æskilega hámarksnýtni til raforkuvinnslu skal miða við fræðilega hámarksnýtni við umbreytingu varma í raforku (Carnot-nýtni). Á hönnunarstigi nýrra áfanga jarðvarmavirkjana skal þessu markmiði fylgt, t.d. með tækniþróun, niðurdælingu og með fjölnýtingu jarðhitavökvans.

Hagstjórnun

- (5) Orkuvinnsla frá jarðvarmavirkjunum og hitaveitum skal vera samkeppnishæf við aðra orkugjafa og arðbær. Lágmarka ber fjárhagslega áhættu jarðvarmavirkjana og hitaveitna og skulu þær vera þjóðhagslega og samfélagslega hagkvæmar. Taka skal tillit til kostnaðar og ábata vegna breytinga á umhverfisverðmætum við útreikning á þjóðhagslegri og samfélagslegri hagkvæmni

Arður og öryggi

- (6) Hámarka skal afrakstur af auðlindinni með verðmætasköpun og hagkvæmni að leiðarljósi. Almenningsur skal njóta hæsta forgangs að orkunni á hóflegu verði og/eða njóta ávinnings af henni í formi auðlindaafgjalds.
- (7) Rekstur jarðvarmavirkjana og hitaveitna skal vera áreiðanlegur og miðast við orkuafhendingaröryggi.

Samfélagsábyrgð

- (8) Orkufyrirtæki skulu sýna samfélagsábyrgð og nýting jarðhitaauðlindarinnar skal hafa í heildina jákvæð samfélagsleg áhrif.

Rannsóknir og nýsköpun

- (9) Orkufyrirtæki og hið opinbera skulu stuðla að rannsóknum sem efla þekkingu á jarðhitaauðlindinni og tækniþróun sem bætir nýtingu, eykur hagkvæmni og dregur úr umhverfisáhrifum, annað hvort með beinum aðgerðum eða í samvinnu við háskóla og aðra rannsóknar- eða þróunaraðila. Þá skal jafnframt stuðla að tækniframförum sem hækka sjálfbæra vinnslustigið.

Miðlun þekkingar

- (10) Þekking á jarðhitaauðlindinni og reynsla sem aflast við nýtingu hennar skal vera aðgengileg og gagnsæ jafnt almenningi sem fræðasamfélögum.

Tafla 6: Proposed goals of sustainable geothermal utilization. The goals are put forward with strong sustainability in mind, which implies development that doesn't involve negative impact on, or decay of, any of the main pillars of sustainable development, i.e. society, economy or environment. Weak sustainability on the other hand allows some decay of one of the pillars, e.g. through cyclic production, provided the development yields an overall positive effect on society.

Resource management

- (1) The geothermal resource shall be utilized in a sustainable manner so that the supply of secure energy for space heating, electricity generation and other use is sufficient for social and economic development of the community and society as a whole without harming the environment.

For each geothermal area and each mode of production there exists a certain maximum level of production, E_0 , so that with production below E_0 it is possible to sustain steady energy production from the system for at least 100 years. If the level of production exceeds E_0 it is not possible to sustain steady production from the system for so long. Geothermal production that is less than or equal to E_0 is defined as sustainable production but production exceeding E_0 is not sustainable.

Reinjection of the geothermal fluid into geothermal reservoirs should be considered to support long term utilization, in particular for geothermal systems whose inflow is restricted.

- (2) Water usage of the power plant must not reduce supply of cold water to communities nearby.

Environmental management

- (3) A geothermal resource should be managed in such a way as to cause minimum environmental effects in accordance with the law. Techniques and design that can mitigate environmental effects shall be deployed whenever possible. Plans for environmental management shall be followed at all phases of development.

Efficiency

- (4) Geothermal utilization shall be managed in such a way as to maximize the utilization of exergy available. The desired maximum efficiency for electricity generation should be based on the theoretical maximum efficiency for converting heat to electrical energy (Carnot efficiency). At the design level of new stages of geothermal power plants this objective should be adhered to with e.g. technical development, reinjection, and cascaded energy use.

Economic management

- (5) Energy use from geothermal power and heat plants must be competitive in regards to alternative energy sources, as well as economic. The financial risk of the project shall be minimized. The project should carry positive net national and community economic benefits. Cost and benefit due to changes in environmental qualities must be considered when estimating positive net national and community benefits.

Energy security and profitability

- (6) The yield of the resource shall be maximized with regard to profitability and efficiency. The public shall have a priority claim to the energy generated at a reasonable price and/or enjoy its benefits in the form of resource revenue.
- (7) The operation of geothermal power and heat plants shall be reliable and prioritize the security of supply.

Community responsibility

- (8) The power companies should be responsible toward the community and the effect of the utilization of the geothermal resource shall be as positive for the community as possible and yield net positive social impact.

Research and innovation

- (9) Power companies and the government shall encourage research that improves the knowledge of the geothermal resource as well as technical developments that improve efficiency, increase profitability and reduce environmental effects, either directly or in cooperation with universities or other research or development institutions. Technical progress that increases E_0 should also be promoted.

Dissemination of knowledge

- (10) Information and experience gained through geothermal utilization shall be accessible and transparent to the public and the academic community alike.

