

# Eðli jarðhita - nýting og umhverfisáhrif

Stefán Arnórsson

Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík

## Helstu niðurstöður

Jarðhiti er ekki endurnýjanleg auðlind nema ef til vill sum jarðfræðilega ung háhitasvæði. Einstök jarðhitasvæði gætu þó enst í nokkrar aldir ef nýting þeirra er hófleg. Jarðhiti er ekki mikilvæg orkuauðlind á veraldarvísu og muni ekki verða svo. Engu að síður er hann mikilvæg orkulind í ýmsum löndum, einkum þeim sem eru á virkum eldfjallasvæðum. Í dag kemur um 0,1% af árlegri orkunotkun mannkyns frá jarðhita en hartnær 90% frá jarðefnaeldsneyti (kol, hráolía, jarðgas). Árið 2005 var uppsett rafafli jarðgufuvirkjana um 0,36% af rafafli allra orkuvera í heiminum. Á Íslandi hefur nýting jarðhita sérstöðu, bæði hvað varðar umfang miðað við íbúafjölda og fjölbreytilega notkun en ekki síst vegna áhrifa þessarar nýtingar á byggðapróun. Skólasetur og þéttbýli hafa risið víða á jarðhitastöðum. Áform um nýtingu jarðhita útheimtir áhættufé því óvissa er jafnan um árangur. Ef stefnt er að því að virkja stórt, er skynsamlegast að virkja í áföngum; leggja í eins smáa virkjun í fyrsta áfanga og hagkvæmni leyfir og stækka síðar í ljósi viðbragða svæðisins. Með þetta í huga er raforkuframleiðslu með jarðgufu fyrir álver ekki ákjósanlegur valkostur því slík nýting útheimtir virkjun í stórum áföngum sem felur í sér áhættu. Á hinn bóginn hentar virkjun jarðgufu vel fyrir stækkandi markað heimila og smáiðnaðar. Hefðbundnar jarðgufurafstöðvar nýta þann varma illa sem berst með vatni og gufu um borholur. Með fjölnotkun má nýta varmann miklu betur og er hún þess vegna bæði æskileg og umhverfisvæn. Orkuverin í Svartsengi og á Nesjavöllum eru til fyrirmyndar á veraldarvísu hvað þetta varðar. Umhverfisáhrif af nýtingu lághita eru sáralitlar og stundum til bóta í ýmsu tilliti eins og fyrir rekstur skolpkerfa í þéttbýli. Á hinn bóginn hefur nýting háhita, bæði til varma- og raforkuframleiðslu, veruleg umhverfisáhrif. Mestu máli skipta lækkun á þrýstingi í jarðhitageyminum og efnamengun, bæði frá loftbornum og vatnsbornum efnunum. Auk þess veldur jarðrask sjónmengun en það getur einnig spillt jarðvegi og jarðmyndunum. Mannvirki valda sjónmengun. Gufu- og vatnsstreymi veldur bæði varma- og hávaðamengun. Loks má nefna að landsig hefur orðið á sumum svæðum í kjölfar vinnslu og dæmi eru um að niðurdæling hafi valdið smáskjálftum.

## 1. INNGANGUR

Jarðhiti er meðal mikilvægustu auðlinda Íslendinga. Um leið er hann meðal sérstæðustu náttúrufyrirbæra á Íslandi. Þótt jarðhiti sé ekki mikilvæg orkulind á veraldarvísu er hann mikilvægur í mörgum löndum, einkum þeim sem eru á virkum eldfjallasvæðum. Borið saman við aðrar orkulindir sem mannkynið hefur yfir að ráða

hefur jarðhitinn sérstöðu í mikilvægum atriðum. Hann er staðbundin auðlind ólíkt kjarnorku og jarðefnaeldsneyti (kol, hráolía og jarðgas) sem vinna má á einum stað en flytja síðan heimshorna á milli þar sem þörf er fyrir orku. Líkt og gerist með aðrar auðlindir í jörðu útheimtir það áhættufé að afla upplýsinga um tiltekið jarðhitasvæði áður en rökstudd vitneskja liggur fyrir um hagkvæmni virkjunar. Í jarðhitafyrirtæki sem fjölnýtir jarðhita eða rekur hitaveitu eina sér fer saman hjá einum og sama aðilanum skyldan um staðbundna markaðsþjónustu, þörf þessa markaðar, óvissan um árangur af borunum, tímasetningu fyrir byggingu virkjunar og stærð hennar og hagkvæmni. Þetta veldur því að kaupendum raforku getur þótt erfitt að treysta á jargufuvirkjanir miðað við orkuver sem nota úran (kjarnorka) eða jarðefnaeldsneyti. Þá orkugjafa má kaupa og reisa virkjun þegar markaðurinn þarf á henni að halda. Tímasetning virkjunar, stærð og verð raforku er hins vegar óljóst þegar lagt er af stað með könnun á tilteknu jarðhitasvæði. Fjölnýting jarðvarma skapar jarðhitanum algera sérstöðu sem orkugjafa. Nýting varma í varmaorkuveri er staðbundin þannig að samkeppni til aðhalds um verð verður ekki við komið. Hins vegar getur slík nýting haft afgerandi áhrif á raforkuverð frá þessu sama orkuveri. Það er ástæða til að skoða gildandi orkulög í þessu samhengi.

Ef til vill er jarðhitanýting hlutfallslega mikilvægari á Íslandi en í nokkru öðru ríki. Slík nýting hefur haft mikil áhrif á þróun byggðar í landinu og einstaklingar og lítil sem stór sveitarfélög hafa sett áhættufé í boranir eftir heitu vatni með hitaveitu eða aðra nýtingu í huga. Þá eru ýmis jarðhitasvæði meðal eftirsóttustu ferðamannastaða á Íslandi og hafa þannig nýtingargildi fyrir ferðamennsku og útivist.

Tvö jarðvarmaorkuver á Íslandi skera sig úr á veraldarvísu hvað varðar fjölnýtingu jarðhitans og um leið góða nýtingu þess varma sem kemur með vatni og gufu upp um borholur. Þetta eru orkuverin í Svartsengi og á Nesjavöllum. Oftast hafa áform um jarðhitanýtingu á Íslandi skilað árangri og má þakka það öðru fremur varfærni í vinnubrögðum og skilningi og þekkingu á auðlindinni. Þó hafa orðið mistök hér sem annars staðar eins og sagan um virkjun í Kröflu sýnir. Því verður ekki neitað að virkjun á Hellisheiði og Reykjanesi minna að nokkru á Kröflu. Þar virðist fagkunnátta ekki hafa verið nýtt sem skyldi við ákvörðun um stærð virkjunar en verðmæti hvers jarðhitasvæðis til nýtingar liggur annars vegar í eiginleikum svæðisins sjálfs og hins vegar í þeirri fagþekkingu sem beitt er við undirbúning vinnslu og ákvörðun um stærð virkjunar.

Í þessu kaflakorni er lögð áhersla á umfjöllun um nýtingu háhita í tiltölulega stórum stíl en einnig er komið inn á notkun lághita og eðli jarðhitans, sérstaklega hvað varðar umhverfisáhrif nýtingar og spurninguna um hvort þessi auðlind sé endurnýjanleg.

## **2. EÐLI JARÐHITANS OG FLOKKUN JARÐHITAKERFA**

Hiti í jörðinni vex með dýpi. Ástæðan er niðurbrot geislavirkra samsætna, aðallega af úran og kalí. Þegar þessar geislavirku samsætur brotna niður og mynda ný léttari frumefni breytist örlítill massi í varmaorku. Varmamyndun á sér einnig stað í iðrum jarðar fyrir áhrif þyngdarafslsins en hún er lítil miðað við varmamyndun frá niðurbroti geislavirkra efna. Varminn sem myndast í iðrum jarðar streymir til yfirborða með varmaleiðni en hann flyst einnig með bergkviku upp í efri jarðlög þar sem hún kólnar og storknar. Grunnvatn sem sígur djúpt í jörðu og hitnar við snertingu við heitt berg getur flutt varma úr berginu og frá kvikuinnskotum til yfirborðs. Slík hringrás grunnvatns sem nefnist hræring leiðir til myndunar jarðhitakerfa.

Nýting jarðhita byggir á því að bora í lekt berg eftir heitu vatni eða gufu og flytja varmann til yfirborðs með jarðhitavökvanum. Jarðvarmaorka er þó ekki bundin við lekt berg. Umfangsmiklar tilraunir hafa verið gerðar til að nýta varma úr heitu bergi sem er með lélega eða enga vatnslekt. Ef nýta á varmann í þéttu bergi, þarf að gera það lekt. Það er gert með því að dæla vatni niður í borholu undir háum þrýstingi uns bergið lætur undan og springur. Síðan er köldu vatni dælt niður um borholuna og það látið streyma um sprungurnar að annarri holu þar sem því er dælt upp heitu. Vatninu sem dælt er niður hitnar við streymi eftir sprungunum um heitt bergið milli holanna. Þessi tækni hefur ekki, enn sem komið er a.m.k. skilað hagnýtum árangri.

Jarðhitasvæði finnast aftur og aftur í tilteknu jarðfræðilegu umhverfi þótt engin tvö jarðhitasvæði séu eins. Þessi vensl jarðhitasvæða við jarðfræðilegt umhverfi réttlætir skiptingu þeirra í flokka. Flokkun hefur þó verið með ýmsu móti allt eftir því hvaða þekkingu og reynslu sá hefur sem gerir tillögu um flokkun. Fraser Goff og Kathy Janik (2000) skiptu jarðhitasvæðum í fimm flokka: (1) Svæði í ungu storkubergi, (2) svæði í ungum sprungum sem myndast hafa við jarðskorpuhreyfingar, (3) svæði í setlagatrogum sem geyma gamalt vatn undir yfirþrýstingi, (4) svæði í heitu bergi sem ekki er vatnslekt og (5) kvikukerfi. Gunnar Böðvarsson (1961) skipti jarðhitasvæðum á Íslandi í háhita- og lághitasvæði. Háhitasvæðin svara til svæða í ungu storkubergi samkvæmt flokkun Goff og Janik (2000) en lághitasvæðin til svæða í ungum sprungum, a.m.k. flest þeirra. Flokkun Gunnars Böðvarssonar (1961) höfðar ekki aðeins til jarðfræðilegs umhverfis, heldur einnig til þess að nýtingarmöguleikar jarðvarma eru háðir hitastigi vatnsins í jarðhitasvæðunum er. Háhitasvæðin liggja innan virku gosbeltanna og eru grunnstæð innskot af bergbráð varmagjafi þeirra (mynd 1). Lághitasvæðin finnast hins vegar einkum í eldra bergi utan hinna virku gosbelta (mynd 1) þar sem jarðskorpuhreyfingar hafa brotið upp berggrunninn, gert hann lekann og skapað þannig aðstæður fyrir streymi grunnvatns niður í heitt berg á nokkurra kílómetra dýpi.

## mynd 1

Varmagjafi lághitasvæðanna er heitt berg í rótum þeirra. Þessi svæði myndast líklega oftast við það að jarðskorpuhreyfingar brjóta upp gamalt berg og gera það lekt. Vatn sígur niður í sprungurnar, hitnar við snertingu við heitt berg og stígur síðan upp vegna þess að heitt vatn er edlisléttara en kalt. Um leið og vatnið hitnar kælir það bergið. Eftir því sem tíminn líður kólnar bergið í rótum jarðhitakerfisins. Um leið fjarar hringrás grunnvatnsins smám saman út og svæðið lognast út af. Einstök lághitasvæði geta lifað í árþúsundir, jafnvel lengur og einstök háhitasvæði í tugi til hundruðir árþúsunda.

Vinnsla heits vatns úr lághitasvæðum sem tengjast sprungum örvar írennsli í þau á köldu grunnvatni og styttir þannig líftíma þessara svæða miðað við náttúrulegt gegnumstreymi vatns. Þessi svæði ber því að skoða sem varmanámur. Hversu vel tekst að nýta varmann er háð þéttleika sprungnanna og því hversu áköf vinnslan er. Líkanreikningar gefa til kynna að nýta megi 5-25% varmans sem er í bergi jarðhitakerfa. Því ákafari sem vinnsla heits vatns er úr slíkum svæðum því minni heildarorka fæst úr þeim. Sömu sögu er að segja ef langt er milli sprungna. Svo dæmi séu tekin má nefna að lághitasvæði þau sem Orkuveita Reykjavíkur nýtir gætu enst í nokkrar aldir allt eftir vinnsluálagi (Guðmundur Pálmason, 2005) en erfitt er þó að segja til um það með nokkurri vissu.

Háhitasvæðin ber einnig að skoða sem varmanámur, þó allt eftir því á hvaða stigi þau eru á æviskeiði sínu. Gömul svæði sem ekki fá lengur varmainnspýtingu frá kviku eru vissulega varmanámur en ung svæði sem enn hafa kvikuhólf í rótum sínum mætti skoða sem endurnýjanlega orkulind á tímaskalanum aldir, a.m.k. ef kvika úr dýpri jarðlögum berst tiltölulega oft upp í rætur þessara svæða.

Þær gerðir jarðhitasvæða sem Goff og Janik (2000) tengja við setlagatrog og heitt þétt berg eru ljóslega varmanámur. Kvikukerfi eins og t.d. hraunið sem rann á Heimaey árið 1973 eru tiltölulega skammlíf og ekki endurnýjanleg orkulind.

### 3. NÝTING JARÐHITA

Nýtingu jarðvarma er yfirleitt skipt í tvo flokka, annars vegar notkun jarðgufu til raforkuframleiðslu og hins vegar beina nýtingu varma í jarðhitavatni eða jarðgufu. Bein nýting er margbreytileg (myndir 2 og 3) og fer hún mjög vaxandi. Á Íslandi er húshitun langmikilvægust en erlendis heilsuþöð og varmadælur. Á síðustu 10-15 árum hefur notkun varmadæla aukist gífurlega í mörgum löndum, en þær spara verulega upphitun húsa ef rafmagn er notað. Notkunarmöguleikar jarðhitavatns og gufu eru háðir hitastigi þeirra (mynd 4). Bein nýting jarðvarma eftir löndum árið 2005 er sýnd á mynd 5.

#### mynd 2

#### mynd 3

Nýting jarðhita í flestum löndum hefur fyrst og fremst beinst að raforkuframleiðslu. Raf afl jarðgufustöðva hefur vaxið jafnt og þétt undanfarna 3-4 áratugi (mynd 6) eða um 260 MW á ári. Á Íslandi hefur þetta afl stóraukist á síðust 10 árum (mynd 7) og var 484 MW í árslok 2008. Mynd 8 sýnir uppsett afl jarðgufustöðva árið 2007 eftir löndum. Í árslok 2007 var uppsett raf afl jarðgufuorkuvera á Íslandi 4,3% af afli slíkra orkuvera í heiminum. Á árinu 2005 var uppsett raf afl jarðgufustöðva 0,36% af uppsettu afli allra raforkuvera í heiminum.

Bein notkun jarðvarma hefur mest verið bundin við húshitun, sundlaugar og böð og gróðurhús þar til síðustu árum að nýting á yl í jörðu með notkun varmadæla hefur stóraukist. Varmadælur sem nýta yl úr jörðu vinna líkt og ísskápur. Munurinn er sá að í ísskáp er tiltekið rými kælt en með jarðvarmadælum er þessu öfugt farið, húsrými er hitað upp. Með raforku er varma “dælt” úr kaldara umhverfi yfir í heitara. Mikil raforka sparast við upphitun húsa ef varmadælutækni er beitt. Vökvi í lokaðri rás flytur varmann í húsið, ýmist úr jarðvegi eða borholum sem ná vel niður í grunnvatn. Í fyrra tilfellinu eru leiðslur sem flytja vökvann lagðar í jarðveginn en niður í borholur í því síðara. Jarðvegur fær verulegan hluta af yl sínum frá sólinni. Því nýta varmadælur sem byggja á lögnum fyrir hringrásarvökva í jarðvegi ekki á jarðvarma í þeim skilningi að uppruni varmaorkunnar sé ættaður úr iðrum jarðar.

#### mynd 4

Á þessu ári nam orkunotkun jarðvarma 0,1% af orkunotkun mannkyns. Þetta hlutfall mun vafalítið hækka í framtíðinni. Þó eru hverfandi líkur á því að nýting jarðvarma á

veraldarvísu verði marktæk og varla mun hún skipta sköpum til að draga úr notkun jarðefnaeldsneytis. Nú kemur nær 90% af árlegri orkunotkun mannkyns frá jarðefnaeldsneyti (kolum, hráolíu og jarðgasi). Eftir sem áður er jarðhitinn mikilvægur ýmsum ríkjum, einkum þeim sem eru á eldfjallasvæðum eins og Ísland. Sérstaða Íslendinga meðal þjóða heims tengist vafalítið helst fjölpætri og mikilli notkun jarðhita ásamt hinum forna menningararfi okkar. Nálægt helmingur af árlegri orkunotkun okkar kemur frá jarðhita.

## **mynd 5**

## **myndir 6 og 7**

Sú varmaorka sem berst til yfirborðs með vatni og gufu eða frá laugum og hverum hefur verið nefnd frumorka (Guðmundur Pálmason, 2005). Sá hluti þessarar orku sem er nýttur nefnir Guðmundur notorku. Frumorkan er orkuinnihald orkugjafans án tillits til þess hve orkan nýtist vel í hinum ýmsu orkuvinnsluferlum. Hitaveitur nýta frumorkuna vel, eða allt að 80-90%. Í hefðbundnum jarðgufustöðvum er nýting varmans sem berst með vatni og gufu til yfirborðs um borholur tiltölulega léleg, vatninu hent en aðeins 10-14% varmaorkunnar í gufunni er breytt í raforku. Sé heita vatnið notað til húshitunar og gufan líka, auk raforkuframleiðslu verður nýting frumorkunnar miklu meiri, 60-80%. Á þennan hátt er frumorka jarðhitans vel nýtt í orkuverunum í Svartsengi og á Nesjavöllum en ekki í orkuverum í Kröflu, á Hellsheiði og Reykjanesi sem hönnuð eru með hefðbundnu sniði til raforkuframleiðslu eingöngu. Fyrir virkjun háhita sem nýtir varmann vel þarf húshitunarmarkað eða annan markað sem nýtt getur varma beint.

## **mynd 8**

Mun ítarlegri upplýsingar um nýtingu jarðhita á Íslandi er að finna í Jarðhitahitabók Guðmundar Pálmasonar (2005). Þá hefur Ingvar Birgir Friðleifsson (2008) tekið saman ítarlegar upplýsingar um notkun jarðhita á Íslandi og í öðrum löndum.

## **4. UNDIRBÚNINGUR AÐ VINNSLU OG VÖKTUNARMÆLINGAR**

Þótt Íslendingar hafi náð miklum og góðum árangri við nýtingu jarðhita og hafi reist jarðvarmaorkuver í Svartsengi og á Nesjavöllum sem eru einstök í sinni röð hefur okkur stundum verið mislögð höndin vegna fljótræðis og ófullnægjandi nýtingu á þeirri þekkingu sem við búum yfir. Ábati af vinnslu jarðhita er annars vegar háður eðli auðlindarinnar en hins vegar þeirri þekkingu, vandvirkni og varfærni sem beitt er við undirbúning vinnslu. Ófullnægjandi undirbúningur að vinnslu getur haft í för með sér meiri umhverfisáhrif af nýtingu en vera þyrfti og um leið dregið úr hagkvæmni virkjunar og leitt til slakrar umgengni um auðlindina sjálfa.

Til þess að stuðla að sem bestum árangri við vinnslu auðlinda úr jörðu hefur verið þróað ákveðið verklag við undirbúning að vinnslu. Þetta verklag á vissulega við um jarðhitann jafnt sem olíu og málmgrýti svo dæmi séu tekin.

Áform um nýtingu jarðhita eru óvissu undirorpin líkt og gildir með áform um vinnslu annarra auðlinda úr jörðu. Ástæðan er sú að eiginleikar auðlindarinnar eru ekki þekktir fyrir en aflað hefur verið upplýsinga um þessa eiginleika með ýmsum mælingum og borunum og það kostar fé. Niðurstaða af leit og borunum getur orðið sú að nýting svári ekki kostnaði og þá hefur fé glatast. Með öðrum orðum: Það útheimtir áhættufé að afla upplýsinga um jarðhitasvæði, stór og smá, áður en unnt er sýna fram á hvort nýting geti talist hagkvæm og engin tvö jarðhitasvæði eru eins þannig að ekki er unnt að flytja niðurstöður af einu svæði yfir á annað. Þetta með áhættuna virðist ekki alltaf vera nógu skýrt í huga landans. Eitt er víst að varfærni í fjármálum og aðgætni hefur ekki átt upp á pallborðið á Íslandi og víðar á síðustu árum. Eðlilegt hlýtur að teljast að gróin og stöndug fyrirtæki sem hafa notið ábata af nýtingu auðlinda úr jörðu hafi nægilegan rekstrarafgang til að leggja fram áhættufé við jarðhitaleit og boranir fremur en að taka áhættufé að láni.

Eins og áður sagði hefur ákveðið verklag verið þróað til að draga sem mest úr áhættu við undirbúning að nýtingu auðlinda í jörðu. Hinn rauði þráður þessa verklags er að skipta undirbúningi að vinnslu í áfanga og miða að því að lágmarka kostnað en hámarka upplýsingar í hverjum áfanga en leggja niðurstöður fyrri áfanga til grundvallar ákvörðunar um hvort leggja eigi í næsta áfanga.

Á mynd 9 er sýnd hefðbundin áfangaskipting fyrir undirbúning að virkjun jarðvarma, a.m.k. þegar um tiltölulega stórt raforkuver er að ræða (50-100 MW og stærra). Eftir að ákvörðun hefur verið tekin að kanna jarðhitasvæði er fyrsti undirbúningsáfanginn jarðhitaleit. Þá er beitt ýmsum athugunum og mælingum sem veita óbeinar upplýsingar um eiginleika auðlindarinnar, eins og stærð svæðisins, hita og lekar jarðmyndanir. Ef niðurstöðurnar eru jákvæðar þannig að ástæða þykir til að halda áfram í næsta áfanga – leitarboranir<sup>1</sup> – en eitt megin notagildi jarðhitaleitarinnar er að staðsetja leitarholur til að afla beinna upplýsinga um hita í berggrunni og lekar jarðmyndanir. Ekki er gerlegt að viðhafa fastar reglur um hver fjöldi leitarhola skuli vera. Það fer eftir upplýsingum um stærð svæðisins og áform um nýtingu, en 2 til 4 holur þykir oft hóflegur fjöldi. Tilgangurinn með borun leitarhola og annarra borhola sem síðar kunna að vera boraðar þarf að vera alveg skýr. Ef afla á gufu til raforkuframleiðslu ber að staðsetja hverja holu þar sem líkur eru taldar mestar á að gufa fáist; ekki til að afla almennra upplýsinga um svæðið.

## mynd 9

Ef leitarborun skilar fullnægjandi árangri er næsti áfangi undirbúnings að virkjun að afmarka vinnslusvæði (wellfield, borholureit) með borun úthola<sup>2</sup> (step-out wells). Algengt er að bora slíkar holur í 0,6 til 1 km fjarlægð frá leitarholu sem hefur skilað góðum árangri hvað varðar afköst. Ef borun úthola skilar árangri hefur líklegt vinnslusvæði verið afmarkað. Fleiri holur eru boraðar inn á milli leitar- og úthola,

---

<sup>1,2</sup> Nafngiftir á íslensku fyrir holur sem boraðar eru í jarðhitasvæði eru að nokkru óljósar, a.m.k. að því er varðar tilganginn. Talað er um rannsóknarholur, tilraunaholur og vinnsluholur. Höfundur kýs á nota orð sem eru þýðingar úr ensku, þ.e. leitarhola (exploration well), úthola (step-out well), reynsluhola (appraisal well) og vinnsluhola (production well). Allar holur sem síðar kunna að verða nýttar verða vinnsluholur.

reynsluholur til að ná upp meiri gufu, prófa holurnar og meta endingartíma reitsins með hjálp reikninga sem herma eftir flæði úr holunum. Í kjölfarið er forhönnun unnin fyrir virkjun, gerð áætlun um hagkvæmni og tekin ákvörðun tekin um stærð virkjunarinnar. Misjafnt er hversu mikillar gufu hefur verið aflað áður en ákvörðun um virkjun er tekin. Algengt að sú tala sé 50-80% af gufupörf virkjunar.

Fjölpættar prófanir og athuganir eru gerðar á borholum. Algengt er að draga saman allar upplýsingar um svæði í líkan – mynsturlíkan - sem er myndrænn uppdráttur sem lýsir helstu vinnslueiginleikum eins og rennsli úr borholum, hita, lekum jarðmyndunum og á hvaða dýpi þær liggja. Mynd 10 sýnir mynsturlíkan af lághitasvæðum Orkuveitu Reykjavíkur í Mosfellssveit. Mynsturlíkon eru lögð til grundvallar vinnslulíkönnum sem spá fyrir um afkastagetu vinnslusvæða og endingu þeirra og æskilega fjarlægð milli vinnsluhola. Jafnframt er spáð um hversu rennsli úr holum dvínar með tíma og gerðar áætlanir um borun viðhaldshola (replacement wells) til að veita upp minnkandi rennsli úr eldri holum. Nauðsynlegt er að afmarka viðbótatsvæði við jaðar vinnslusvæðis fyrir borun viðhaldshola.

## **mynd 10**

Eftir að vinnsla fer af stað er nauðsynlegt að fylgjast með viðbrögðum borholureitsins við vinnsluálaginu, sérstaklega lækkun á þrýstingi, írennsli kalds vatns í svæðið og breytingum á rennsli vatns og gufu úr vinnsluholum. Niðurstöðurnar eru nýttar til að bæta mynsturlíkanið og uppfæra vinnslulíkanið.

Langt er síðan sú hugmynd þróaðist að æskilegt væri að virkja á hverju svæði í áföngum, leggja eins fljótt og mögulegt er í eins smáa virkjun og álitlegt telst frá hagkvæmnisjónarmiði og stækka þá virkjun eða byggja nýja að fenginni reynslu um viðbrögð svæðis við vinnsluálagi.

Það verður að segjast eins og er að það hefðbundna verklag sem hér hefur verið lýst er ekki aðlaðandi fyrir þá aðila sem sýnt hafa jarðgufuvirkjunum áhuga til raforkuframleiðslu fyrir álver. Háhitinn á Íslandi hentar heldur ekki vel slíkri nýtingu sem gerir kröfur um stóra áfanga og samninga um raforkusölu til langs tíma. Öryggið er mest og árangurinn þess vegna vissastur, bæði frá hagrænu og umhverfislegu sjónarmiði ef virkjað er í smáum áföngum til að sinna stækkun hins almenna markaðar, hvort heldur sem um er að ræða heimili eða iðnað.

Erlendis hafa ýmsir aðilar sýnt nýtingu jarðhita áhuga, námugeirinn, olíugeirinn og raforkugeirinn. Hér á landi er það raforkugeirinn eingöngu. Sú saga hefur verið sögð að hinn hefðbundni orkugeiri kunni ekki til verka sem skyldi í ljósi þeirrar óvissu sem ætíð er fyrir hendi við virkjun jarðhita. Olíugeirinn hefur tilhneigingu til að taka of mikla áhættu, áttar sig ekki á því að dollarar streyma frá jarðgas- og olíuholum en bara sent frá jarðgufuholum. Námugeirinn þekkir ekki til þess verklags sem einkennir raforkugeirann. Besta blandan til að hagnýta jarðhita til raforkuframleiðslu eru líklega orku- og námugeirarnir.

Virkjun jarðgufu til raforkuframleiðslu er auðveld þegar virkja skal til að draga úr notkun annarra orkugjafa eins og jarðefnaeldsneytis. Slíkum raforkuverum er lokað þegar ný jarðgufuvirkjun er tilbúin. Málið verður flóknara þegar bygging jarðgufuvirkjana á að þjóna stækkandi markaði, bæði vegna óvissu um hagkvæmni og tímasetningar. Og málið verður enn flóknara ef fjölnýta á jarðvarmann eins og gert er í virkjunum á Nesjavöllum

og í Svartsengi en slík nýting er vistvæn að því er varðar meðferð á auðlindinni. Nauðsynlegt er að huga mun betur að þróun verklags við nýtingu háhita ef hún á að miðast við að vera sem sjálfbærust.

## 5. MAT Á STÆRÐ AUÐLINDAR

Árið 1976 komust Jarðkönnunarstofnun og Námskrifstofa Bandaríkjanna (U. S. Geological Survey og U. S. Bureau of Mines) að sameiginlegri niðurstöðu um flokkun og nafngiftir fyrir auðlindir í jörðu. Niðurstöðurnar voru birtar í USGS Bulletin, 1450-A (United States Geological Survey, 1976). Orðið auðlind (resource) er skilgreint sem “uppsöfnun á föstum, fljóttandi eða loftkenndum náttúrulegum efnum í jarðskorpunni á því formi og í því magni að vinnsla hráefnis sé nú hagkvæm eða að hún geti orðið hagkvæm í framtíðinni”. Þessi skilgreining á auðlind hentar vel jarðhitnum. Annað hugtak, grunnforði, (reserve base) var skilgreint á eftirfarandi hátt: “Sá hluti auðlindar sem hefur þá eiginleika auðgunar og stærðar að núverandi vinnsluáðferðir duga fyrir arðbæra vinnslu”. Hugtakið grunnforði á einnig við um jarðhita.

Árið 1979 birti Bandaríska Jarðkönnunarstofnunin niðurstöður mats á stærð jarðhitaauðlindarinnar í Bandaríkjunum (Muffler, 1979). Hún byggði á því að meta varmaforða í heitu bergi í þekktum jarðhitasvæðum og giska á út frá jarðfræðilegum forsendum hver varmaforðinn væri í jarðhitasvæðum sem enn höfðu ekki uppgötvast. Árið 1985 sendi Orkustofnun frá sér sambærilega skýrslu sem fjallaði um mat á jarðvarma (jarðhita) Íslands (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Í báðum þessum skýrslum er gert ráð fyrir því að jarðhitasvæði séu varmanáma en ekki endurnýjanleg auðlind. Varmamatsaðferðin segir ekkert til um það hversu mikla nýtingu eða aflmiklar jarðgufuvirkjanir einstök svæði þola. Í Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005) segir orðrétt:

“Það er lífseigur misskilningur að varmamat með ofangreindri aðferð segi til um afl jarðhitasvæða. Eðli aðferðarinnar er slíkt að hún getur ekkert um afluð sagt. Til að finna afluð verður verður að beita öðrum aðferðum. Flestar þeirra byggjast að einhverju leyti á reynslutölum úr rekstri jarðhitaorkuvera...”

Tilgangur mats á stærð auðlindar er sá að reyna að átta sig á verðmæti hennar til framtíðar og matið myndar grunninn að ákvörðun ráðamanna hins opinbera eða fyrirtækja um fjárframlög til rannsókna til að auka þekkingu á auðlindinni og til að kanna eiginleika hennar. Þetta hefur þó naumast verið skilningur íslenskra stjórnvalda á sínum tíma og ef til vill ekki enn í dag því fljótlega eftir að umrædd skýrsla koma út var farið að draga verulega úr fjárveitingum til Orkustofnunar sem þá var langstærsta opinbera stofnunin sem sinnti könnun og rannsóknum á jarðhita.

Niðurstöður Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985) á varmaforða í aðgengilegum háhitasvæðum á Íslandi næmi  $10^{21}$  Júlum. Ekki er auðvelt að skynja þá stærð sem þessi tala endurspeglar. Því var henni breytt í rafafli og miðað við að unnt væri að ná 25% varmans úr berginu á 50 árum. Þá fékkst að rafafli nýtanlegra háhitasvæða á Íslandi næmi um 3566 MW. Hér hefur sú tala verið lækkuð nokkuð hér, eða niður í 2956 MW með því að taka til hliðar svæði sem mjög líklegt er talið að verði friðuð (Geysissvæði, Hveravellir á Kili, Askja og Kverkfjöll, Tafla 2). Auk þess hefur verið sleppt eftirtöldum svæðum: Prestahnúkur, Tindfjallajökull, Blautakvísl, Hrúthálsar, Gjástykki og Axarfjörður. Boranir hafa sýnt að síðastnefnda svæðið er ekki háhitasvæði. Vafasamt er



að hin svæðin séu háhitasvæði nema e.t.v. Gjástykki. Í mati Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985) er áætluð vinnslugeta þessara svæða til raforkuframleiðslu miðað við 50 ára endingartíma 451 MW.

## 6. ER JARÐHITINN ENDURNÝJANLEG AUÐLIND?

Í Jarðhitabók eftir Guðmund Pámason (2005) er gerð ítarleg grein fyrir því hvort jarðhiti sé endurnýjanleg auðlind eða endanleg. Niðurstaða hans er sú að jarðhitinn sé ekki endurnýjanleg auðlind og fyrir því eru færð gild rök. Þessi niðurstaða er í samræmi við ýmsar eldri athuganir. Ber sérstaklega að nefna rannsóknir Gunnars Böðvarssonar (t.d. Gunnar Böðvarsson, 1982) og athuganir Sveinbjörns Björnssonar (1980) og Axels Björnssonar o.fl. (1990) á lághitinum. Mögulegt er að sum ung háhitasvæði sem hafa kvikuhólf í rótum sínum megi teljast endurnýjanleg orkulind, a.m.k. ef ný kvika úr dýpri jarðlögum berst tiltölulega oft upp í þessi hólf og viðheldur þeim. Það er alveg ljóst að jarðvarmi í gömlu, heitu en óleku bergi svo og svæði í setlagatrogum sem finnast víða erlendis eru ekki endurnýjanlegar orkulindir.

Það viðhorf sem oft heyrst að jarðhitinn sé endurnýjanleg auðlind stenst varla enda er það ekki í samræmi við fyrirbyggjandi gögn. Sá varmi sem flæðir úr iðrum jarðar upp í gegnum jarðskorpuna getur engann vegin skýrt varmaflæði frá jarðhitasvæðum. Til þess er hann alltof lítill. Jarðsögulega hljóta jarðhitasvæði að vera tímabundin fyrirbæri og nýting jarðhitasvæða stýttir æviskeið þeirra. Hér er þó rétt að benda á að Guðmundur Pálmason (2005) hefur sýnt fram á að sum jarðhitasvæði sem hafa verið virkjuð geti enst í margar aldir enda sé nýtingu þeirra stillt í hóf.

Sum orka er sannanlega endurnýjanleg, að minnsta kosti á þeim tímakvarða sem skiptir mannkyn máli eins og sólarorkan á hvaða formi sem hún er; þ.e. bein sólargeislun, vindorka, vatnsföll, ölduföll, sjávarstraumar og ylur í jarðvegi. Þeir orkugjafar sem almennt er viðurkennt að ekki séu endurnýjanlegir eru kol, hráolía og jarðgas ásamt geislavirkum efnum (kjarnorka). Yfirleitt er staðhæft að þessar auðlindir eyðist eftir því sem af þeim er tekið. Vissulega er það rétt fyrir einstakar námur og olíulindir. Eftir sem áður er jarðolía og málmgrýti alltaf að myndast en myndunarhraðinn er hverfandi miðað við vinnslu.

Erfitt er að segja hvers vegna jarðhitinn hefur verið settur í flokk endurnýjanlegra orkulinda í alþjóðlegu samhengi. Ef til vill hefur honum verið þröngvað inn í þá flokkun sem sniðin hefur verið fyrir aðra orkugjafa þótt hann eigi þar ekki heima.

Vatnsborð og þar með vatnsþrýstingur fellur oft mikið í jarðhitasvæðum sem eru nýtt. Má þar nefna lækun vatnsborðs í Laugarnessvæðinu í Reykjavík á síðari hluta sjöunda áratugar síðustu aldar sem leiddi til vatnsskorts hjá Hitaveitu Reykjavíkur síðari hluta vetrar. Viðbrögðin voru boranir á Elliðaársvæðinu og athuganir á borholum í Mosfellssveit. Á Reykja- og Reykjahlíðarsvæðunum í Mosfellssveit leiddu þessar athuganir til djúpborana með mjög góðum árangri. Í kjölfarið var þjónustusvæði Hitaveitu Reykjavíkur stækkað til alls höfuðborgarsvæðisins. Hin aukna vinnsla á Reykja- og Reykjahlíðarsvæðunum leiddi til sívaxandi lækkunar á vatnsborði. Svæðin voru greinilega ofnýtt. Á mynd 10 eru sýndar niðurstöður líkanreikninga á vatnsborði í jarðhitasvæðunum í Mosfellssveit miðað við mismunandi meðaldælingu heits vatns úr svæðunum (Stefán Arnórsson o.fl., 1992). Árssveiflur á grunnvatnsborði sem fara koma á myndinni orsakast af árstíðabundinni dælingu úr jarðhitasvæðunum. Miðað við

meðalupptöku úr svæðinu sem nemur um 500 lítrum á sekúndu helst vatnsborð stöðugt að meðaltali. Við þessar aðstæður er írennsli í svæðin jafnt því vatnsmagni sem úr þeim er dælt. Stöðugt ástand í grunnvatnsbúskap segir þó ekkert til um það hvort hiti vatnsins sem upp er dælt breytist. Raunin varð sú að kælingar varð aðeins vart í fáum holum vestast á Reykjasvæðinu. Steypt var í þessar holur til þess að draga úr hinu kalda írennsli.

Einfaldað mynsturlíkan af lágheitsvæðum Orkuveitu Reykjavíkur í Mosfellssveit er sýnt á mynd 11. Virk sprungurein, kennd við Krísuvík, liggur í gegnum svæðin. Írennsli í þau verður einkum eftir sprungunum úr suðvestri og norðaustri. Neðan um 1000 metra dýpis hefur bergið í sprungureininni kólnað vegna írennslis hins kalda grunnvatns. Þess má geta að jarðhitaummyndun bendir til þess að lágheitsvæðin in Mosfellssveit liggja í gömlum háheitsvæðum. Upphaflega hafa þessi svæði legið inni í virka gosbeltinu þar sem Hengill er nú. Með tímanum hafa þau ýst út úr gobeltinu vegna landreksins, slitnað frá kviku-varmagjafanum og kólnað smám saman niður. Loks hafa hin fornu háheitsvæði þau lent inn í Krísuvíkursprungusveimnum, berggrunnur þeirra brotnað upp og núverandi lágheitsvæði orðið til.

### **mynd 11**

Lítum nú á annað svæði sem Orkuveita Reykjavíkur nýtir, Elliðaársvæðið. Ef svæðið er hvílt um stund og dæling úr því hafin á ný kemst á nýtt jafnvægi á grunnvatnsborði eftir u.þ.b. eina viku. Vandamálið sem upp kemur við langtímadælingu er kólnun á vatninu sem stafar af írennsli kalds vatns. Jarðhitakerfið sem kennt er við Elliðaár er í gömlum berggrunni og er vatnslektin í honum bundin við sprungur. Ofan á þessum berggrunni er Reykjavíkurgrágrýtið. Það er ungt og bæði gropið og lekt, nánast eins og stöðuvatn af grunnvatni ofan á hinum gamla berggrunni. Þegar dæling hefst úr borholum á Elliðaársvæðinu og vatnsþrýstingur lækkar, streymir kalt grunnvatn úr Reykjavíkurgrágrýtinu niður um sprungur í hinum eldri og undirliggjandi berggrunni, blandast þar heita vatninu sem leiðir til lækkunar á hita á því vatni sem upp er dælt úr vinnsluholum og því meira sem meiru er dælt upp. Á fyrstu 20 árum vinnslu á Elliðasvæðinu lækkaði hitinn um allt að 20°C. Þá var brugðið á það ráð að minnka vinnsluálagið og nota svæðið á veturnum þegar vatnsþörf var mikil en hvíla það þess á milli. Þannig er kæling á borholuvatninu vegna írennslis kalds grunnvatns úr efri jarðlögum hinn takmarkandi þáttur á vinnslugetu Elliðaársvæðisins.

Á Laugarnessvæðinu í Reykjavík hófst borun djúpra hola eftir heitu vatni í lok sjötta áratugar síðustu aldar. Dýpsta holan var boruð niður á 2200 metra dýpi. Á mynd 12A er sýndur mældur hiti í holunni. Einnig er sýndur hitastigull í berggrunni umhverfis jarðhitasvæðið samkvæmt mælingum í hitastigulsholum. Athyglisvert er að hitinn neðan um 1000 metra dýpis er lægri í jarðhitasvæðinu en í berginu umhverfis. Hins vegar er hann hærri ofan þessa dýpis. Neðan nokkur hundruð metra dýpis í jarðhitasvæðinu vex hitinn lítið með dýpi. Hitaferill sem þessi verður til við djúpa hringrás á grunnvatni. Kalt grunnvatn sígur niður í berggrunninn og hitnar með snertingu við heitt berg en kælir bergið um leið. Síðan stígur heita vatnið upp vegna þess að það er léttara í sér en það kalda og hitar upp efri jarðlög. Í Laugarnessvæðinu er uppruni varmans í heita vatninu heitt berg í rótum jarðhitasvæðisins. Með tímanum kólnar þetta berg niður og hringrás grunnvatnsins dofna smám saman uns hún lognast út af. Nú svarar það vatnsrennsli sem Orkuveita Reykjavíkur dælir úr svæðinu árlega til um 200 lítra á sekúndu. Rennsli úr heitum

laugum á svæðinu var um 10 lítrar á sekúndu áður en vinnsla hófst. Endingartími svæðisins miðað við núverandi vinnslu gæti verið nokkur hundruð ár allt eftir stærð svæðisins og þéttleika sprungna. Hvorki er auðvelt að svara spurningum um stærð svæðisins né um þéttleika sprungna. Þó væri ástæða til að að spyrja slíkra spurninga og útvega jarðhitamönnum fé til að reyna að svara þeim. Sjálfur mundi ég giska á að endingartíminn gæti verið nokkur hundruð ár eða svipaður og forði vinnanlegra kola eða bákíts sem er hráefnið fyrir framleiðslu áls miðað við núverandi árlega vinnslu þessara hráefna. Óvissan um endingu Laugarnessvæðisins og annarra jarðhitasvæða vekur upp spurningar um siðgæðisviðhorf gagnvart komandi kynslóðum. Er ekki rétt að fara eins vel þessa með þessa auðlind og kostur er? Hitamælingar í djúpum borholum í Mosfellssveit og á Eyjafjarðarsvæðinu eru sambærilegar við þær á Laugarnessvæðinu og sýna að varmagjafinn er heitt berg í rótum svæðanna og nýting þeirra því námuvinnsla á varma.

## mynd 12

Háhitasvæði á Íslandi sem annars staðar í veröldinni eiga sitt upphaf, æviskeið og endi. Í dag eru sum svæði ung önnur á besta aldri og enn önnur að kólna niður. Þannig er svæðið í Hveragerði að kólna. Ummyndunarsteindir í berginu í jarðhitakerfinu sýna að svo sé. Lágghitasvæðið í Laugarnesi liggur einnig í gömlu háhitasvæði. Sama gildir um lágghitasvæðin í Mosfellssveit eins og áður var nefnt. Loks má nefna að mörg forn háhitasvæði sem eru útkulnuð fyrir löngu er að finna bæði á Austurlandi og vestan lands. Eitt slíkt er í hlíðum Esju og má sjá það frá Reykjavík. Líklegt verður að teljast að háhitasvæði sem liggja á flekamótum eins og til dæmis Nesjavellir og Kröflusvæðið geti reynst endurnýjanlegar auðlindir, a.m.k. á þann tímamælikvarða sem verður að teljast mannum raunhæfur. Streymi kviku inn í hólfi undir þessum svæðum sem er varmagjafi þeirra er ef til vill ekki stöðugt en gæti þó orðið nógu oft til að viðhalda varmagjafanum. Öðru máli gegnir um svæði sem eru þroskuð og liggja nú utan flekamótanna eins og Hveragerði. Rökrétt væri að líta á það svæði sem varmanámu.

## 7. LÖG UM MAT Á UMHVERFISÁHRIFUM

Gildandi lög (nr. 105 frá 2006) um mat á umhverfisáhrifum vegna framkvæmda virðast miðuð við vegagerð, virkjun vatnsafls eða aðrar framkvæmdir sem ekki eru undirorpnar mikilli óvissu. Þessi lög eiga ekki vel við áætlanir um nýtingu jarðhita vegna þeirrar óvissu sem þeim fylgir. Það vekur nokkra athygli að skilgreining á umhverfi samkvæmt lögnum virðist ekki taka til auðlindarinnar, aðeins hins ytra umhverfis. Ég get ekki skilið þetta öðruvísi en svo að ekki þurfi að meta áhrif nýtingarinnar á auðlindina sjálfa. Þá verður ekki séð af lögnum að huga þurfi að áhrifum nýtingar auðlindar á umhverfið eftir að framkvæmdum er lokið, aðeins fylgjast með hverjar þær verða. Lög um umhverfismat þarf að endurskoða að því er varðar jarðhitann.

Ef fyrirtæki sýnir áhuga á því að fá leyfi til að nýta jarðhitasvæði þarf þetta fyrirtæki að leggja í verulegan kostnað og tímafrekt ferli við mat á umhverfisáhrifum miðað við virkjun af tiltekinni stærð. Reynslan sýnir að umhverfismatið er gjarnan miðað við stóra virkjun þrátt fyrir það að hugmyndir um stærð virkjunar séu óljósar vegna skorts á upplýsingum um auðlindina. Ástæða þessa mun vera sú að matið þarf að endurtaka ef

fyrst er virkjað smátt en farið fram á stækkun virkjunar síðar. Þeir sem ekki hafa sérþekkingu á jarðhitasviðinu misskilja gjarnan beiðni orkufyrirtækisins og telja að beiðnin endurspegli að virkjun af þeirri stærð sem umhverfismatið miðar við sé í hendi.

Það sem gerir jarðhitann sérstakan er óvissan um árangur þegar hafist er handa með jarðhitaleit með nýtingu hans að leiðarljósi. Umhverfismat án gagna er að hluta skáldskapur. Til að skapa eðlilegan grunn fyrir orkunýtingu eða verndun jarðhitasvæða er nauðsynlegt að fyrir liggi ákvörðun um að tilekin jarðhitasvæði skuli ætluð til orkunýtingar en að önnur skuli sem minnst snert. Þessi svæði, a.m.k. sum þeirra, mætti skipuleggja fyrir útivist og ferðamennsku en önnur friðuð sem mest, annaðhvort vegna sérstakar náttúru, minja og sögu. Þá mætti hugsa sér að friða einhver svæði fyrir orkunýtingu en láta komandi kynslóðum eftir að ákveða orkuvinnslu munandi að jarðhitinn er ekki endurnýjanleg auðlind. Ef sú ákvörðun liggur fyrir að nýta megi tiltekin jarðhitasvæði til orkuvinnslu gæti orkufyrirtæki eða einhver annar aðili sótt um leyfi til jarðhitaleitar og leitarborana á þessum svæðum og fengið leitarleyfi að gefnum ákveðnum skilyrðum um umgengni við umhverfið. Skili leitarboranir fullnægjandi árangri ætti fyrirtækið að hafa rétt til borunar á út- og reynsluholum til að afmarka vinnslusvæði. Fyrirtæki sem ákveður að leggja í kostnað til að afmarka hugsanlegt vinnslusvæði ætti að fá heimild til virkjunar. Endanleg heimild um stærð virkjunar ætti að byggja á mati á afkastagetu svæðisins og hagkvæmni hennar. Þetta sjónarmið mitt byggir á siðgæðiskröfu um sem sjálfbærasta nýtingu jarðhitans en slíka kröfu er einmitt að finna í lögum um umhverfismat áætlaða. Í leyfisveitingu ættu líka að vera kvaðir um frágang virkjunar að svo miklu leyti sem hann varðar umhverfisáhrif. Leyfi til jarðhitaleitar, síðari undirbúningur að virkjun og rekstur virkjunar ættu þeir einir að fá sem reynslu hafa af jarðhitanytingu.

Á mynd 1 er sett fram hugmynd um hvaða þekkt háhitasvæði skuli heimilt að nýta, hver skuli friða frá orkunotkun og hver skuli fara undir smásjána með tilliti til ákvörðunar um orkuvinnslu eða friðun. Vonast er til að þessar hugmyndir reynist gagnlegar umræðu og ákvörðun um verndun jarðhitasvæða eða orkuvinnslu á þeim. Rétt sýnist að leyfa vinnslu á öllum þeim svæðum sem þegar hafa verið athuguð með borunum auk Vonarskarðs. Samkvæmt mínum hugmyndum skulu eftirtalin svæði friðuð: Geysissvæðið, Kerlingarfjöll, Hveravellir á Kili, Torfajökulssvæðið, Kverkfjöll og Askja. Skoða þyrfti betur hvort réttara teldist að nýta eða friða Brennisteinsfjöll og Gjástykki. Hugmynd um friðun Öskju og Kverkfjalla ræðst af sérstæðri náttúru þessara svæða en nýting þeirra væri líka erfið vegna mikillar hæðar yfir sjó og því hversu afskekkt þau eru. Óvenjulegur yfirborðsjarðhiti réttlætir friðun Hveravalla og Geysissvæðisins ásamt sögu beggja og fornminja á Hveravöllum. Bæði þessi svæði eru lítil og myndu líklega ekki þola stóra virkjun. Kerlingarfjöll og Torfajökulssvæðið búa yfir mjög sérstakri náttúrufergurð og geyma sérstæða jarðfræði. Hér er þeirri hugmynd varpað fram að þessi tvö svæði sem bæði eru líklega öflug til orkuvinnslu, sérstaklega hið síðarnefnda, skuli friðuð og láta það eftir komandi kynslóðum að nýta þau sýnist þeim svo vegna þarfar á orku fyrir fólk í landinu.

Friðun jarðhitasvæðis frá orkunýtingu þarf ekki að innibera að viðkomandi jarðhitasvæði skuli vera ómanngert með öllu. Svæðið gæti nýst til útivistar og fyrir ferðamennsku. Góð umgengni væri betur tryggð með göngustígum og nauðsynlegri aðstöðu sem áningarstaður fremur en án alls skipulags. Eins mætti hugsa sér nýtingu í

smáum stíl sem ekki illi sjónmengun eða raskaði hverum eins og nú er raunar á Geysissvæðinu og Hveravöllum þótt frágangur þyrfti að vera betri.

Á mynd 1 eru ekki sýnd nokkur háhitasvæði sem talin eru útkulnuð eða óviss vegna ófullnægjandi gagna um þau. Má þar nefna svæði eins og Presthnúk og Tindfjöll. Eitt svæði (í Grímsnesi) sem merkt er sem háhitasvæði á mynd 1, er eftir borholugögnum að dæma ekki dæmigert háhitasvæði. Það virðist vera millistig milli há- og lághitasvæða eins og þau hafa verið skilgreind (Stefán Arnórsson o.fl., 2008). Háhiti gæti leynst undir yfirborði innan gosbelta Íslands þótt hans sjáist ekki merki á yfirborði. Sama gildir um lághita, bæði innan gosbeltanna og í eldra bergi. Í lögum um umhverfismat þyrfti að gera ráð fyrir þessum möguleika.

## 8. UMHVERFISÁHRIF AF NÝTINGU JARÐHITA

Umhverfisáhrif af nýtingu jarðhita eru tvíþætt. Annars vegar áhrif á auðlindina sjálfa og hins vegar á hið ytra umhverfi. Bæði er um að ræða náttúrulega og félagslega þætti. Grunnáhrif nýtingar á jarðhitakerfi er lækkun á vökvapryðstingi í því. Þrýstilækkunin getur leitt til þess að vatnshverir þorna upp og nýtingin örvar írennsli kalds vatns sem getur haft neikvæð áhrif vinnslueiginleika kerfisins, a.m.k. ef írennslið leiðir til kælingar. Kalt írennsli er á hinn bóginn nauðsynlegt til að nýta þann varmaforða sem er í bergi hvers jarðhitakerfis en hann er mun meiri en sá varmi sem er í vökvanum í kerfinu.

Umhverfisáhrif af nýtingu háhitasvæða eru umtalsverð. Lækkun á vökvapryðstingi í háhitasvæðum vegna nýtingar örvar suðu. Með því móti getur nýtingin leitt til aukinnar gufuhveravirkni. Ef slík svæði eru ofnýtt geta vatnsæðar á vinnslusvæði “þornað upp”, þ.e. gufustreymi verður ríkjandi í aðfærsluæðum vinnsluhola. Umhverfisáhrif af nýtingu lághita eru miklu minni heldur en af nýtingu háhita og oftast hverfandi á hið ytra umhverfi. Hefðbundin raforkuvinnsla með jarðgufu eins og í Kröflu og á Reykjanesi og Hellisheiði nýtir þann varma illa sem kemur með vatni og gufu frá borholum. Fjölnýting eins og í virkjunum á Nesjavöllum og í Svartsengi nýtir varmann miklu betur og felur um leið í sér vistvænni og sjálfbærari vinnslu.

Á borholureit á háhitasvæði og í næsta nágrenni virkjunar eru áhrif á ytra umhverfi aðallega:

- (1) Sjónmengun
- (2) Hávaðamengun
- (3) Gufumengun
- (4) Jarðrask
- (5) Landsig

Umhverfisáhrif virkjunar á ytra sem innra umhverfi eru einkum:

- (6) Varmamengun og
- (7) Efnamengun.

Síðast taldi liðurinn er oftast sá sem getur reynst alvarlegastur þótt hann sé ekki auðsær og kemur ekki glögglega í ljós fyrr en eftir nokkurn tíma. Í háhitavatni og jarðgufu eru finnast ýmis efni í það háum styrk að þau geta verið skaðleg umhverfi sínu. Mengun af

völdum þessara efna hefur verið skipt í tvo flokka, loftborna- og vatnsborna mengun. Þau efni sem mikilvægust eru hér á landi vegna efnainnihalds jarðgufu og jarðhitavatns eru brennisteinsvetni og ál. Hátt innihald salta í jarðhitavatni getur skaðað gróður eins og í Svartsengi og á Reykjanesi. Stundum er styrkur arsens í jarðhitavatni ofan viðmiðunarmarka fyrir neysluvatn svo og baríums í heitum jarðsjó. Bæði efnin hafa eituráhrif og arsen er krabbameinsvaldandi. Bór í jarðhitavatni getur haft skaðleg áhrif á ýmsan gróður.

Erlendis er jarðhitavatn yfirleitt mun saltara en hérlendis. Hin lága selta sem jafnan einkennir íslenskt jarðhitavatn ræðst af lágum styrk auðleystra salta í basalti en nær öll jarðhitasvæði á Íslandi er að finna í slíku bergi. Salt jarðhitavatn finnst þó víða nálægt ströndum landsins, sérstaklega á Reykjaneskaga. Seltan í þessu vatni á rót sína að rekja til sjávar sem seitrað hefur inn í berggrunninn. Háhitasvæði sem liggja á flekamótum, ekki flekaskilum eins og Ísland, innihalda oft mjög mikið af arsen og bór og jafnvel ýmsum málum eins og blýi og sinki. Slíkt vatn er skaðlegt lífríkinu, bæði lífi í vötnum og jurtum. Salt háhitavatn er á hinn bóginn snautt af áli og brennisteinsvetni andstætt ósöltu háhitavatni á Íslandi.

Í jarðgufu eru það einkum brennisteinsvetni, koltvíoxíð og metan sem hafa neikvæð umhverfisáhrif. Brennisteinsvetni hefur hvítleiða lykt en það sem skiptir máli er eiturverkanir þess og tæringaráhrif. Auk þess getur brennisteinsvetni í lofti valdið súru regni. Í Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005) er að finna töflu um eituráhrif brennisteinsvetnis samkvæmt upplýsingum frá Einari Gunnlaugssyni. Koltvíoxíð og metan eru gróðurhúsalofttegundir. Þessar lofttegundir draga í sig vatnmeislu frá jörðu og leiða þannig til hitunar á andrúmsloftinu. Það ber þó að geta þess hér að streymi koltvíoxíðs frá jarðgufuvirkjunum er mun minna en frá bruna jarðefnaeldsneytis og minna metans berst mrð jarðgufu út í snúrúmsloftið en með jarðgasi. Útblástur koltvíoxíðs frá jarðgufuvirkjunum er breytilegt en það er þó sámlægt að miða við að það sé 10% á framleidda orkueiningu miðað við brennslu jarðefnaeldsneytis. Háhitasvæði erlendis er stundum að finna í setlögum. Í þessum svæðum getur styrkur metans verið hár. Metan er um tuttugu-falt sterkari gróðurhúsalofttegund en koltvíoxíð.

Stundum er styrkur kvikasílfurs tillöglulega hár, bæði í jarhitavatni og jarðgufu. Skepnur útskilja kvikasílfur ekki úr líkamanum sem safnast því upp og getur það haft alvarlegar eiturverkanir.

Það eru einkum þrjár leiðir sem hafa verið farnar til að draga úr umhverfisáhrifum frá virkjunum á háhitasvæðum. Þær eru skáboranir, förgun á skiljuvatni og þéttivatni (þéttir gufu) um borholur niður í jarðhitageyminn og virkjun í þrepum. Borun skáhola minnkar jarðvegsrask og dregur úr sjónmengun. Förgun skiljuvatns og þéttivatns um borholur (oft nefnd niðurdæling) getur dregið mjög úr efnamengun á grunnvatni og varmamengun. Virkjun í þrepum miðar að því að finna út vinnslugetu hvers svæðis og stilla þrýstingslækkun (niðurdætti) í jarðhitageyminum í hóf. Tilgangur niðurdælingar er öðrum þræði sá sami, að vinna gegn þeim niðurdætti í vinnslusvæðinu sem vinnslan veldur. Hreinsun lofttegunda úr jarðgufu gæti stórminnkað loftmengun frá gufuvirkjunum en henni hefur lítið verið sinnt til þessa nema hreinsun á brennisteinsvetni. Orkuveita Reykjavíkur vinnur nú markvisst að því að draga úr umhverfisáhrifum af þeim gufuvirkjunum sem hún rekur, einkum loftborinni mengun. Nú þegar er skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun fargað aftur ofan í jarðhitageyminn um borholur. Sömu sögu er að segja frá Nesjavöllum, Svartsengi og Kröflu. Þeirri hugmynd hefur verið varpað fram að

e.t.v. væri best að minnka loftmengun frá jarðgufuvirkjunum með því að nýta gastegundirnar sem fylgja gufunni (Stefán Arnórsson, 2004).

Áköf vinnsla, bæði lághita- og háhitasvæða felur í sér tiltölulega lélega nýtingu á þeim varma sem er í berginu. Orkan í svæðinu nýtist betur til langtíma lítið með hóflegri vinnslu. Þeirri hugmynd hefur verið varpað fram að tímabundin ágeng vinnsla á háhitasvæði og síðan hvíld geti verið áhugaverð frá sjónarhóli hagkvæmni, þ.e. mikil vinnsla í tiltölulega stuttan tíma sem leiðir til mikils þrýstifalls og tímabundinnar hvíldar fyrir svæðið í kjölfarið til að það jafni sig þrýstingslega áður en ágeng vinnsla hefst aftur. Þessi nálgun sýnist hæpin og vistvæn er hún ekki. Ágeng vinnsla gæti leitt til þess að byggja þyrfti helmingi fleiri virkjanir en þörf er á á hverjum tíma og til langtíma lítið að hafa alltaf helming þeirra í hvíld. Ekki veit ég hver vildi taka borholur í notkun aftur sem hafa verið ónotaðar í 20-30 ár. Fóðringar í borholunum gætu ryðgað og því áhættusamt að nota þær aftur. Bora þyrfti nýjar holur í stað þeirra sem voru hvíldar, a.m.k. að einhverju leyti. Í gufuborholu sem er 2000-2500 m djúp eru um 3 km af stálfóðurrörum. Járngrýtisnámur í veröldinni endast að vísu í árhundruð er ágeng jarðhitavinnsla felur í sér bruðl með stál og það kostar kol að framleiða það og orku að vinna járngrýtið og að flytja það frá vinnlustað til jarðhitasvæðisins.

## 9. LOKAORÐ

Sú nýting jarðhita sem einkennt hefur Ísland þar til á allra síðustu árum er bein notkun varma í lághitavatni, langmest fyrir hitaveitur en einnig fyrir gróðurhús, sundlaugar og böð og ýmislegt fleira. Þessi nýting er mjög vistvæn og skiptir afkomu Íslendinga miklu máli efnahagslega því upphitun húsa með jarðhitavatni er að jafnaði langódýrasti kosturinn sem völ er á. Að hluta til liggur hin vistvæna nýting í því að styrkur efna í lághitavatni er tiltölulega lágur vegna þess að styrkur auðleystra salta er lágur í basalti því sem berggrunnur Íslands er gerður af. Efnamengun af lághitavatni er hverfandi, sjónmengun er sáralítill og hávaðamengun engin. Á mörgum svæðum er nýting tiltölulega lítil þannig að byggt er á sjálfrennsli úr borholum.

Að mínu mati ætti áhersla Íslendinga á nýtingu háhita að byggjast á fjölnýtingu líkt og nú gerist á Nesjavöllum og í Svartsengi (sjá mynd 4). Möguleikarnir á skynsamlegri nýtingu háhitans er gífurlegir en það kostar hugmyndaauðgi, mannafla, þekkingu, þolinmæði, strit og fé til að þróa nýjar nýtingaraðferðir og síðast en ekki síst pólitískan vilja. Þróun nýrra leiða til nýtingar jarðhita krefst mannafla sem skortir tilfinnanlega hér á landi. Þá má nefna að ýmis nýting önnur en raforkuframleiðsla og húshitun er atvinnuskapandi og yfirleitt vistvæn. Besta dæmið er Bláa Lónið í Svartsengi. Hér skulu að lokum nefndir nokkrir nýtingarmöguleikar jarðvarma sem lítið hefur verið sinnt á Íslandi: Þurrkun grænmetis, vinnsla efna úr jarðhitavatni eins og kolsýru og vetnis, og líþíums úr jarðsjó á Reykjanesi, framleiðsla skepnufóðurs með örverum og ræktun þörunga til framleiðslu á eldsneyti fyrir ökutæki. Þá má nefna aukna áherslu á framleiðslu steypueininga og matvælaframleiðslu í gróðurhúsum. Vel má vera að sumir þessara möguleika reynist ekki raunhæfir þegar betur er að gáð. Engu að síður tel ég það sjónarmið í fullu gildi að nauðsynlegt sé að leyfa þekkingarsamfélagi raunvísinda- og tæknimanna að spyrja grundvallarspurninga um nýtingarmöguleika jarðhitans og útvega þeim fé til að reyna að svara þessum spurningum. Fyrirverandi menntamálaráðherra Frakka, Claude Jean Allègre, lét þau orð falla einhvern tíma að raforkan væri ekki

árangur af verkefni til að þróa kertaljósið frekar heldur af því að spyrja og svara ýmsum grundvallarspurningum um eðli hlutanna.

#### TILVITNANIR

- Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz (1990) Um uppruna hvera og lauga á Íslandi. Náttúrufræðingurinn, **60**, bls. 15-38.
- Goff, Fraser og Janik, Cathy J. (2000) Geothermal systems. Í: Encyclopedia of Volcanoes (ritstj. H. Sigurðsson, B. Houghton, S. R. McNutt, H. Rymer og J. Stix), Academic Press, New York, bls. 817-834
- Guðmundur Pálmason (2005) Jarðhitabók – eðli og nýting auðlindar. Reykjavík, Hið íslenska bókmenntafélag, 298 bls.
- Guðmundur Pálmason, Gunnar V. Johnsen, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Karl Ragnars, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gísli Karel Halldórsson (1985) Mat á jarðvarma Íslands. Orkustofnun, skýrsla OS-85076/JHD-10, 134 bls.
- Gunnar Bödvarsson (1961) Physical characteristics of natural heat resources in Iceland. Jökull, **11**, bls. 29-38.
- Gunnar Bödvarsson (1982) Terrestrial energy currents and transfer in Iceland. Í: Continental and oceanic rifts. Geodynamic series (ritstj. Guðmundur Pálmason), Am. Geophys. Union, **8**, bls. 271-282.
- Ingvar B. Friðleifsson, Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Árni Ragnarsson og Rybach, L. (2008) The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. Í: IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Resources (ritstj. O. Hohmeyer og T. Trittin), Luebeck, Þýskalandi, janúar, 2008, bls. 59-80.
- Martinovic, M. (1990) Lumped and disturbed parameter models of the Mosfellssveit geothermal field, SW-Iceland. UNU Geothermal Training Programme, Skýrsla 9, 47 bls.
- Muffler, L. J. P. (1979) Summary. Í: Assessment of the geothermal resources of the United States – 1978. U. S. Geol. Survey Circ. 790 (ritstj. L. J. P. Muffler), bls 156-163.
- Stefán Arnórsson (2004) Environmental impact of geothermal energy utilization. Í: Energy, Waste and the Environment: a Geochemical Perspective (ritstj. R. Giere og P. Stille), Geological Society, London, Special Publication, **236**, 297-336.
- Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson (2008) Geothermal systems in Iceland. Jökull, **58**, bls. 269-302.
- Stefán Arnórsson, Sveinbjörn Björnsson, Haukur Jóhannesson og Einar Gunnlaugsson (1992) Vinnslueiginleikar lághitasvæða Hitaveitu Reykjavíkur. Árbók Verkfræðingafélags Íslands 1991/1992, Reykjavík, bls. 344-366.
- Sveinbjörn Björnsson (1980) Jarðhiti, grunnvatn og varmi. Náttúrufræðingurinn, **50**, bls. 271-293.
- United States Bureau of Mines og United States Geological Survey (1976) Principles of the mineral resource classification system of the U. S. Bureau of Mines and the U. S. Geological Survey. U. S. Geol. Survey Bull., **1450-A**, 5 bls.



Skrá yfir myndir

Mynd 1. Dreifing háhitasvæða og lághita á Íslandi.

Mynd 2. Bein árleg orkunotkun jarðvarma á veraldarvísu árið 2005 eftir tegund. TJ = terajúl =  $10^{12}$  Júl.

Mynd 3. Bein árleg orkunotkun jarðvarma á Íslandi árið 2005 eftir tegund. TJ = terajoule =  $10^{12}$  Júl.

Mynd 4. Línurit Baldurs Líndal. Þetta línurit sem nefnt er eftir Baldri Líndal efnaverkfræðingi sýnir dæmi um notkunarmöguleika á jarðhitavatni og gufu eftir hitastigi.

Mynd 5. Hlutfallsleg bein árleg orkunotkun jarðvarma í heiminum árið 2005 eftir löndum.

Mynd 6. Uppsett afl jarðgufuvirkjana í heiminum á tímabilinu 1970-2007. Með uppsettu afli er átt við ástimplað afla véla í virkjun, það afl sem vélar stöðvarinnar geta framleitt sé nægileg gufa til staðar.

Mynd 7. Uppsett rafafl í jarðgufustöðvum á Íslandi í árslok 2008. Bláa línun sýnir fyrirhugaða stækkun Hellisheiðarvirkjun um 90 MW. Áætlanir um virkjanir í Hverahliðum á Hellisheiði, Þeistareykjum, Námafjalli og aukna virkjun í Kröflu eru ekki sýndar.

Mynd 8. Hlutfallslegt uppsett afl jarðgufustöðva árið 2007 eftir löndum.

Mynd 9. Algeng áfangaskipting við undirbúning að virkjun jarðgufu til framleiðslu á raforku. Ýmis afbrigði eru til af þessari áfangaskiptingu en þau eiga það öll sameiginlegt að lágmarka kostnað fyrir hvern áfanga en hámarka upplýsingar og leggja niðurstöður fyrri áfanga til grundvallar ákvörðunar um að leggja í næsta áfanga

Mynd 10. Reiknuð vatnsborðslækkun á Reykja- og Reykjahlíðarsvæðinu í Mosfellssveit fram til ársins 2000 fyrir 400-1300 sekúndulíttra meðalvinnslu. Frá Martinovic, 1990).

Mynd 11. Einfaldað mynsturlíkan af Reykja- og Reykjahlíðarsvæðunum í Mosfellssveit. Horft er í austur. Stórar hvítar, gráar og svartar örvar sýnt kalt, volgt og heitt vatn sem streymir inn í jarðhitakerfið eftir virkum sprungum sem sýnar eru með þremur beinum heilum og slitnum línunum. Grönnu örvarnar sýna uppstreymi á heitu vatni. Samsíðu línurnar tvær sem eru hornréttar virku sprungurnar tákna öskjumisgengi.

Mynd 12. Mældur hiti í djúpum borholum á lághitasvæðum þar sem hræring vatns er drifin með eðlisþyngdarmun á kaldri súlu grunnvatns utan svæðanna og heitri innan þeirra. A: Laugarnessvæðið í Reykjavík, B: Reykir í Mosfellssveit, C: Laugaland í Eyjafirði.

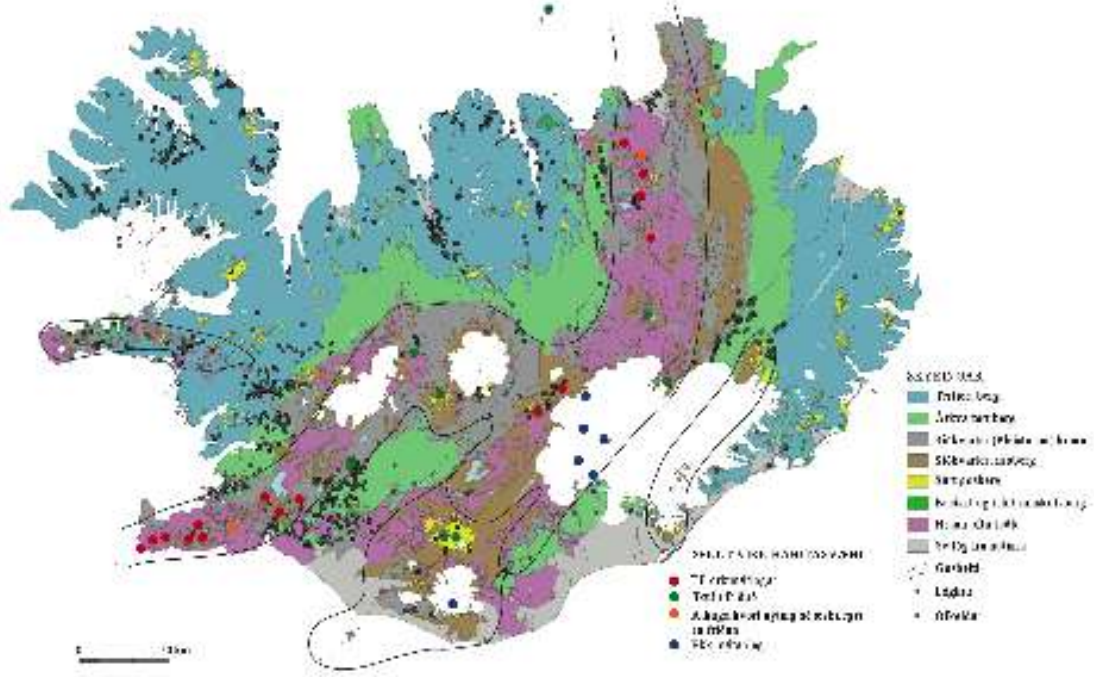
Tafla 1. Uppsett afl (MW) og orkuframleiðsla í jarðgufustöðvum á Íslandi				
Svæði	Rafafl	Árleg orkunotkun	Álagsstuðull %	Virkjunaráfangi tekinn í notkun
	MW	GWh		
Efri-Reykir	0,1			
Hellisheiði	213,0	17,917	79,7	2006,2007,2008 <sup>a</sup>
Húsavík	2,0			
Krafla	60,0	9.253	54,7	1977,1997 <sup>b</sup>
Námafjall	3,0	6,282	75,2	1969
Nesjavellir	120,0		87,1	1998,2001,2005 <sup>c</sup>
Reykjanes	100,0	5,340	77,0	2006
Svartsengi	76,0	3,467	73,9	1997,1980,1989, 1993,1999,2008 <sup>d</sup>
Alls	574,1	56,786		

<sup>a</sup>90 MW árið 2006 og 33 MW 2007 og 90 MW í desember 2008. <sup>b</sup>30 MW 1977 og 30 MW 1997.

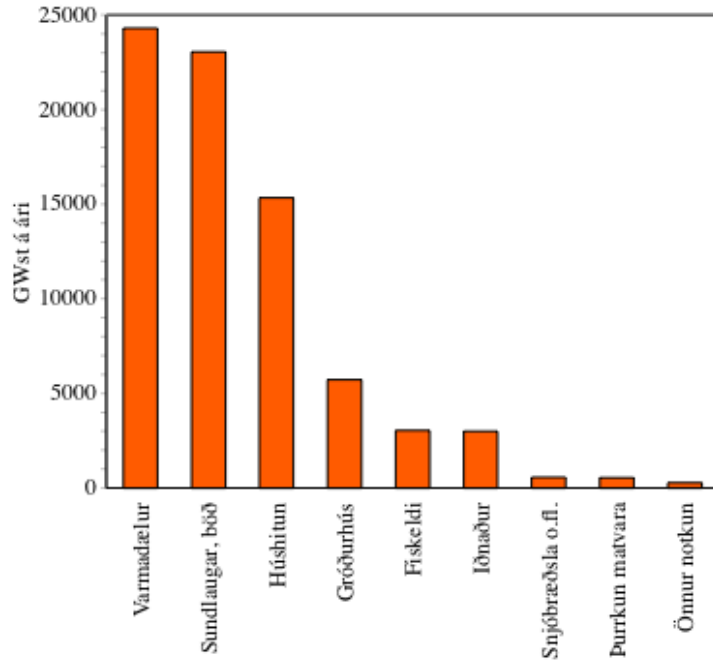
<sup>c</sup>60 MW 1998, 30 MW 2001 og 30 MW 2005. <sup>d</sup>2 MW 1977, 6 MW 1980, 3,6 MW 1989, 4,8 MW 1993, 30 MW 1999, 30 MW í apríl 2008.

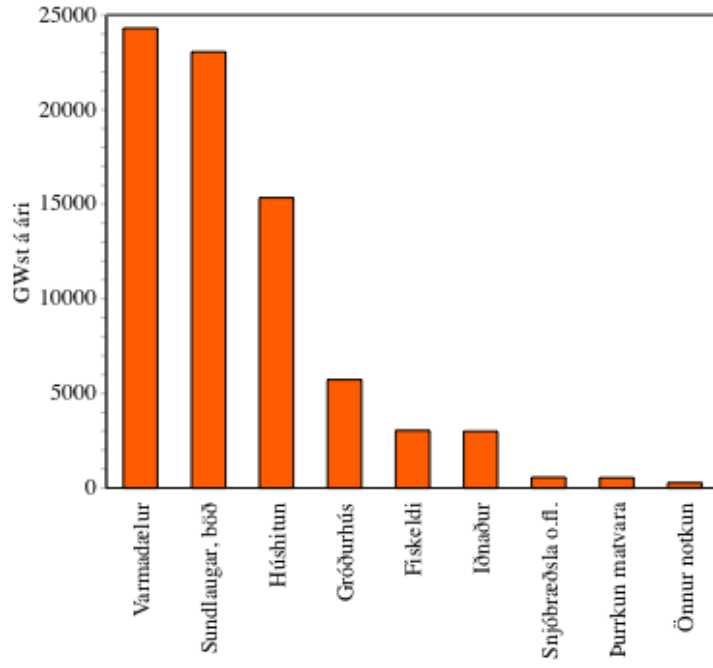
Tafla 2. Tæknilega nýtanlegur háhiti á Íslandi samkvæmt mati Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985) með breytingum frá höfundi.			
Svæði	Varmaforði í svæði >130°C 10 <sup>18</sup> Júl	MW 50 ár <sup>a</sup>	Núverandi Virkjanir <sup>b</sup> MW
Reykjanes	2,4	28	100
Svartsengi og Eldvörp	10,7	108	76
Krísuvík	42,6	302	0
Brennisteinsfjöll	1,9	12	0
Hengill	97,0	689	333
Geysir, Hveravellir, Askja	28,2	(110)	
Kerlingarfjöll	10,7	76	0
Torfajökull	135,8	964	0
Köldukvíslarbotnar	7,8	63	0
Vonarskarð	10,7	65	0
Kverkfjöll	24,3	(49)	
Fremrinámar	3,9	35	0
Námafjall	8,5	88	3
Krafla	36,6	376	60
Þeistareykir	18,4	150	0
Alls:	439,5	2956	572

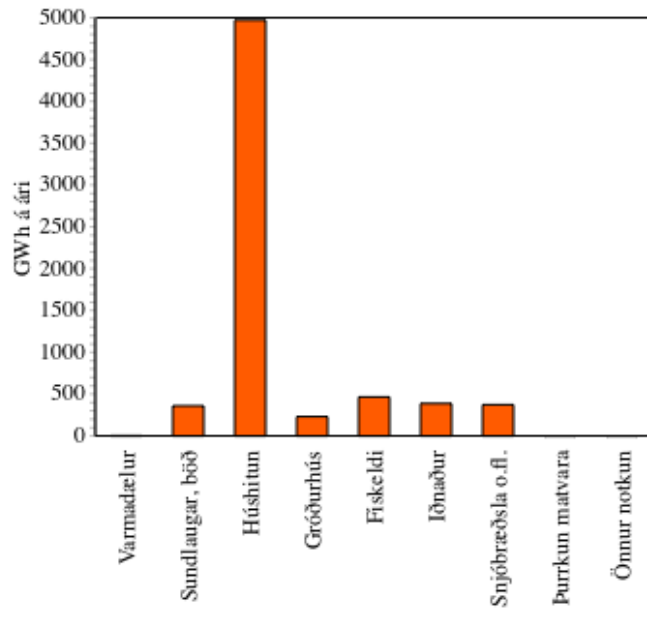
<sup>a</sup>Reiknað afl einstakra háhitasvæða. Tölurnar eru fengnar með því að umreikna áætlaðan nýtanlegan orkuforða í hverju svæði yfir í afl miðað við 50 ára nýtingartíma. Tilgangurinn með birtingu þessara talna er sá einn að setja fram áætlaðan varmaforða á skiljanlegra form. Þessar tölur segja ekkert til um afl svæðanna fyrir raforkuframleiðslu. Til að finna aflið þarf að bora, mæla rennsli úr holunum og spá hvernig rennslið breytist með tíma með hermireikningum. <sup>b</sup>Í árslok 2008.

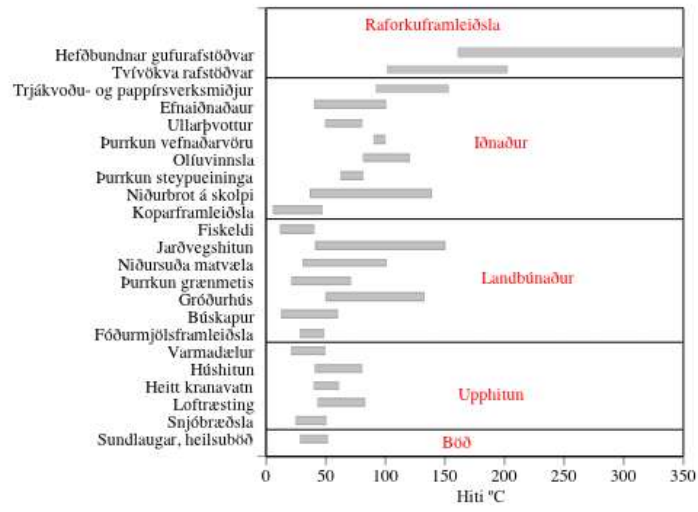


Geological map of the Hnífsdalur area, prepared by the Icelandic Geological Survey in 1958 (Scale 1:50000). Modified from the map.



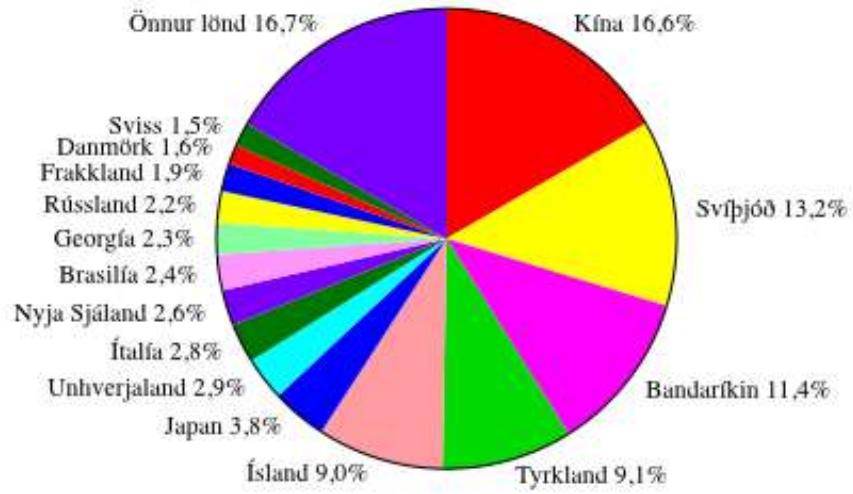


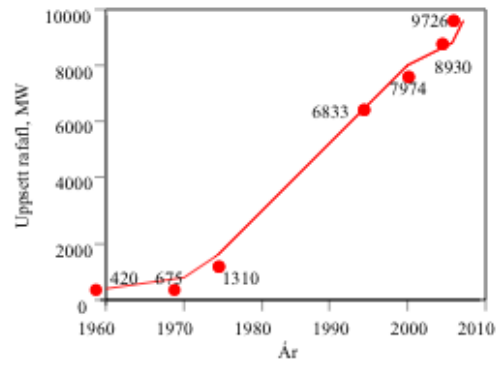


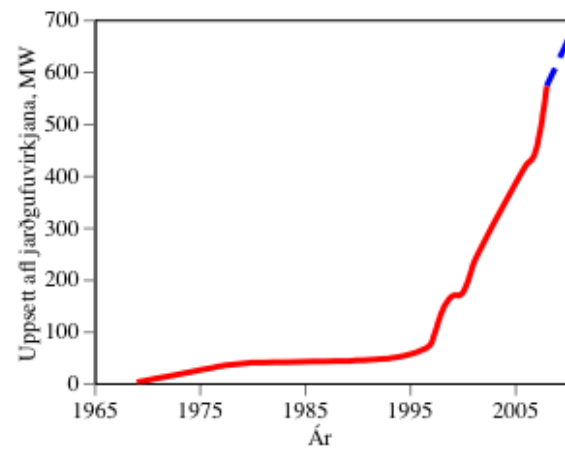


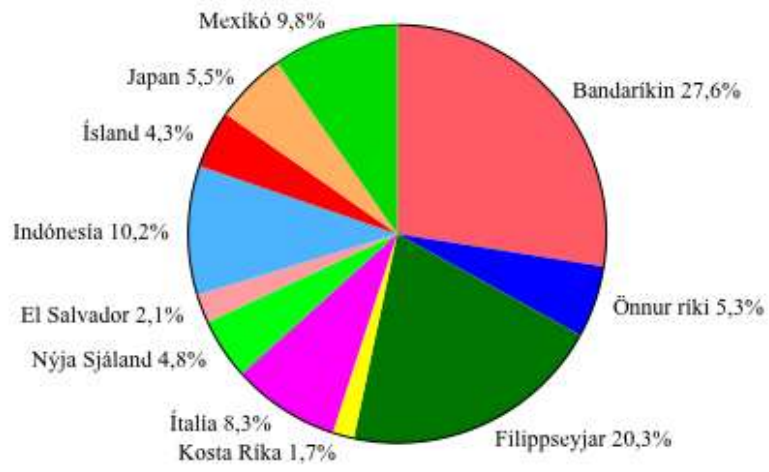












ÁFANGAR	ADGERDIR
	Val á svæði og áætlun um jarðhitaleit
	<i>Ákvörðun um jarðhitaleit</i>
<b>Fyrsti áfangi:</b> Jarðhitaleit	Mælingar og athuganir á yfirborði til að afla óbeinna upplýsinga um lekar jarðmyndanir, stærð svæði og hita í berggrunni <b>Niðurstaða: Fyrsta mynsturlikan af jarðhiakerfinu</b>
	<i>Ákvörðun um leitarboranir</i>
<b>Annar áfangi:</b> Leitarboranir	Fyrstu beinu upplýsingarnar fást um eiginleika jarðhitkerfisins eins og jarðlög, lekar jarðmyndanir, efni í vatni og gufu, hita, þrýsting og afl borhola <b>Niðurstaða: Endurbætt líkan af jarðhitakerfinu</b>
	<i>Ákvörðun um borun út- og reynsluhola</i>
<b>Þriðji áfangi:</b> Borun út- og síðar reynsluhola og afmörkun líklegs vinnslusvæðis	Frekari borholumælingar til að skilgreina eiginleika hugsanlegs vinnslusvæðis eins og hita, þrýsting, dýpi vatnsæða, jarðlög og ummyndun, efni í gufu og vatni, skeljun og tæringu og afl borhola. Hermireikningar eru gerðir til að meta afkastagetu vinnslusvæðis og endingartíma <b>Niðurstaða: Fullnægjandi mynsturlikan af jarðhitakerfinu, fyrsta vinnslulíkan</b>
	<i>Ákvörðun um virkjun</i>
<b>Fjórdi áfangi:</b> Forhönnun og hagkvæmniathugun	Mat á stærð vinnslusvæðis, langtímaprófun borhola. Hermireikningar til að meta æskilega fjarlægð milli borhola, afkastagetu vinnslusvæðis og endingartíma. Borun vinnsluhola til að ná upp því vökvaflæði sem virkjun þarf. Prófanir með tæringu og skeljun eftir þörfum <b>Niðurstaða: Vinnslulíkan af borholureit</b>
	<i>Endanleg ákvörðun um virkjun</i>
<b>Fimmti áfangi:</b> Endanleg ákvörðun um virkjun og stærð hennar	Hönnun, kostnaðaráætlun, útboð, fjármögnun, framkvæmdir, afmörkun svæðis við jaðar vinnslusvæðis fyrir borun viðhaldshola (replacement wells)
<b>Sjötti áfangi:</b> Eftirlitsmælingar	Rekstur, sala á orku og eftirlitsmælingar til að kanna viðbrögð borholureits við vinnsluálagi <b>Niðurstaða: Endurmat á vinnslugetu svæðis</b>
	<i>Ákvörðun um stækkun virkjunar eða nýja virkjun</i>
<b>Sjöundi áfangi:</b> Stækkun virkjunar eða ný virkjun	Áfangar þrjú til fimm eru endurteknir eftir því sem þurfa þykir vegna borunar nýrra hola

Mynd 9. Algeng áfangaskipting við undirbúning að virkjun jarðgufu til framleiðslu á raforku. Ýmis afbrigði eru til af þessari áfangaskiptingu en þau eiga það öll sameiginlegt að lágmarka kostnað fyrir hvern áfanga en hámarka upplýsingar og leggja niðurstöður fyrri áfanga til grundvallar ákvörðunar um að leggja í næsta áfanga.

