

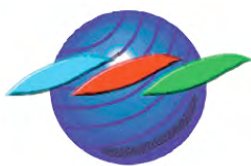
Verkefnisstjórn rammaáætlunar um vernd og nýtingu náttúrusvæða með áherslu á vatnsafl og jarðhita

Viðauki við skýrslu verkefnisstjórnar um 2. áfanga

JARÐHITI Á ÍSLANDI

**Eðli auðlindar og ending
Verklag við undirbúning að vinnslu
Umhverfisáhrif af nýtingu**

Stefán Arnórsson
Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands



Apríl, 2011

Efnisyfirlit

Inngangur	3
1. Eðli háhitasvæða	4
1.1 Flokkun jarðhitasvæða og jarðfræðileg einkenni þeirra	4
1.2 Fjöldi, stærð og þróun háhitasvæða.....	6
1.3 Varmagjafinn	7
1.4 Vinnslueiginleikar.....	8
2. Mat á stærð auðlindar	10
3. Endurnýjanlegar og endanlegar orkulindir	12
3.1 Inngangur.....	12
3.2 Varmaorka jarðar og jarðhitakerfa	12
3.3 Endurnýjanleiki jarðhitakerfa.....	13
3.4 Varmagjafinn	14
3.4.1 Háhitakerfi	14
3.4.2 Lághitakerfi	16
3.5 Hræring og lekt	16
3.6 Varmanám úr bergi	18
4. Sjálfbær þróun	21
4.1 Skilgreiningar og viðhorf.....	21
4.2 Írennsli.....	22
5. Aðferðafræði við undirbúning að nýtingu jarðhita	27
6. Umhverfisáhrif	30
6.1 Helstu áhrif á nær- og fjærumhverfið	30
6.2 Leiðir til að draga úr umhverfisáhrifum og stuðla að sjálfbærni	30
6.3 Nýting orkulinda og verndun náttúrusvæða	31
7. Flokkun virkjunarhugmynda og sjálfbær þróun	33
7.1 Röðun virkjunarhugmynda	33
7.2 Sjálfbær þróun	33
8. Helstu niðurstöður	36
9. Tilvitnanir	38
Viðauki 1. Upplýsingar úr Mineral Commodities (2010)	41

INNGANGUR

Þessi skýrsla um jarðhita er rituð að beiðni verkefnisstjórnar 2. áfanga rammaáætlunar en þar á höfundur sæti sem fulltrúi iðnaðarráðherra. Óskað var eftir sérfræðialiti sem yrði viðauki við heildarskýrslu Verkefnisstjórnarinnar líkt og skýrslur faghópa. Skoðanir í skýrslunni eru álit höfundar.

Fjallað er um ýmsa þá þætti háhitaauðlindarinnar sem ekki eru teknir til umræðu í skýrslum faghópa, einkum

- eðli háhitasvæða
- hvort einstök jarðhitasvæði séu endurnýjanleg eða endanleg auðlind
- tilgang þess að meta stærð auðlinda í jörðu
- sjálfbæra þróun með tilliti til jarðhita
- hefðbundið verklag við undirbúning að vinnslu jarðhita og annarra auðlinda í jörðu
- umhverfisáhrif af jarðhitanytingu

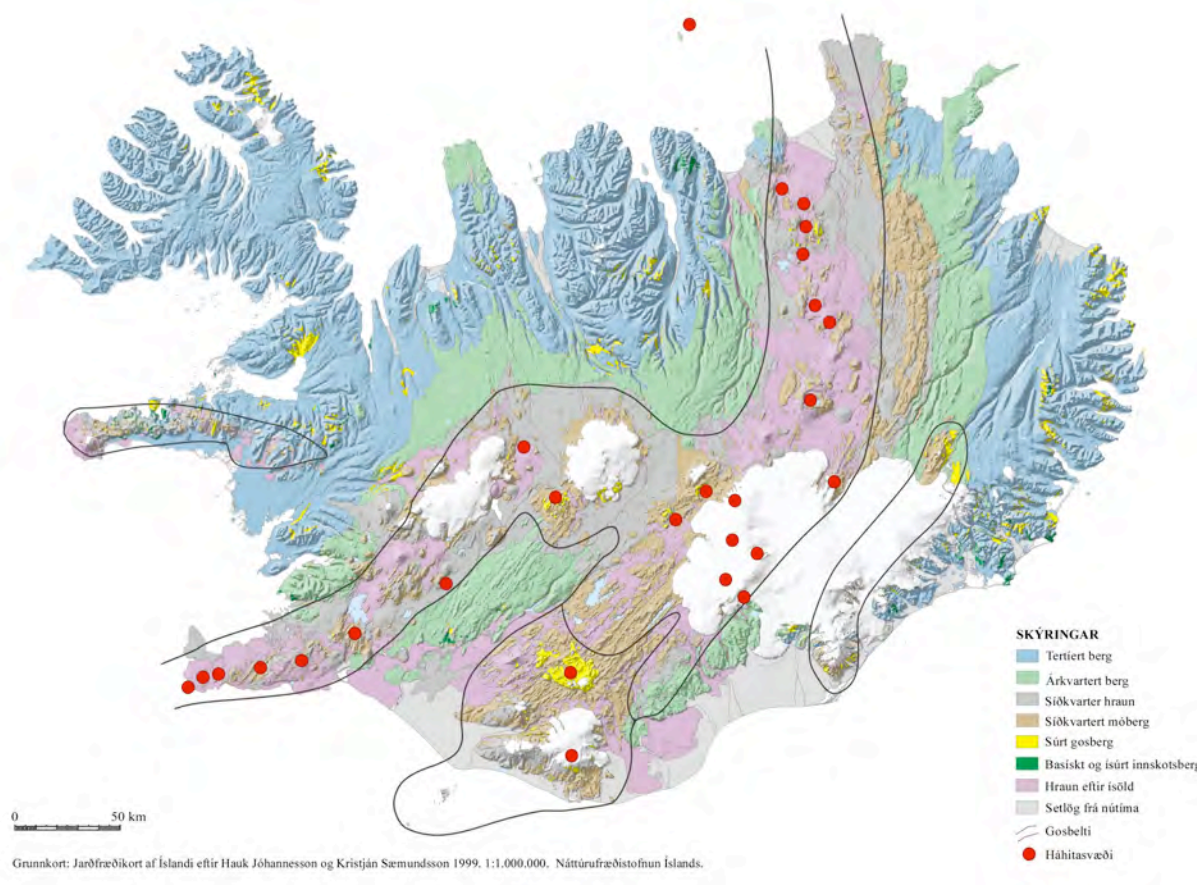
Loks er fjallað um nokkur atriði sem tengjast nýtingu háhitakerfa og fallvatna með tilliti til eðlismunar þessara orkulinda og/eða verndunar náttúrusvæða þar sem þær er að finna.

1. EDLI HÁHITASVÆÐA

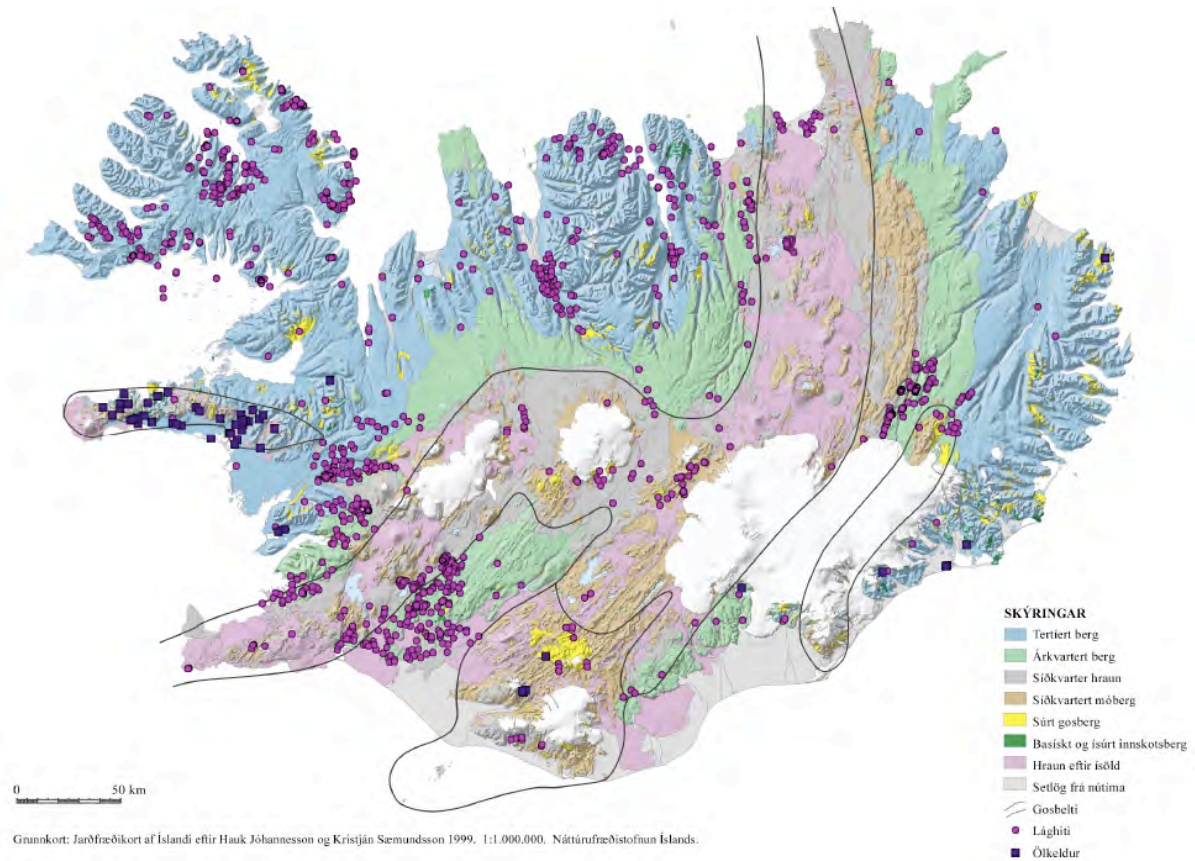
1.1 Flokkun jarðhitasvæða og jarðfræðileg einkenni þeirra

Gunnar Böðvarsson (1961) skipti jarðhitasvæðum á Íslandi í tvo meginflokka, háhitasvæði og lághitasvæði. Hann flokkaði jarðhita undir 150°C sem lághita en jarðhita yfir 200°C á tiltölulega litlu dýpi sem háhita. Auk þess flokkaði hann tvö jarðhitasvæði sem jaðarsvæði, þ.e. millistig milli háhita- og lághitasvæða. Háhitasvæðin liggja í hinum virku gosbeltum landsins (mynd 1) en lághitasvæðin fyrst og fremst í eldri berggrunni, kvarterum og tertíerum, þótt þau finnist einnig í yngra bergi (mynd 2). Jaðarsvæðin tvö eru bæði nálægt jöðrum gosbeltanna. Þau eru Geysissvæðið í Haukadal og Hveravellir í Reykjahverfi. Eldri skipting jarðhitasvæða í tvo flokka sem svarar vel flokkun Gunnars er vatnshverasvæði (lághitasvæði) og gufuhverasvæði (háhitasvæði). Ingvar Birgir Friðleifsson (1979) benti á að hiti í borholum á háhitasvæðum væri yfir 200°C ofan 1000 metra dýpis en undir 150°C í lághitasvæðum ofan sama dýpis. Þegar þessi ábending kom fram hafði verið borað lítið í jarðhitasvæði miðað við það sem nú er og nokkur frávik eru þekkt frá flokkun Ingvars Birgis eins og t.d. að Reykjabóli í Hrunamannahreppi.

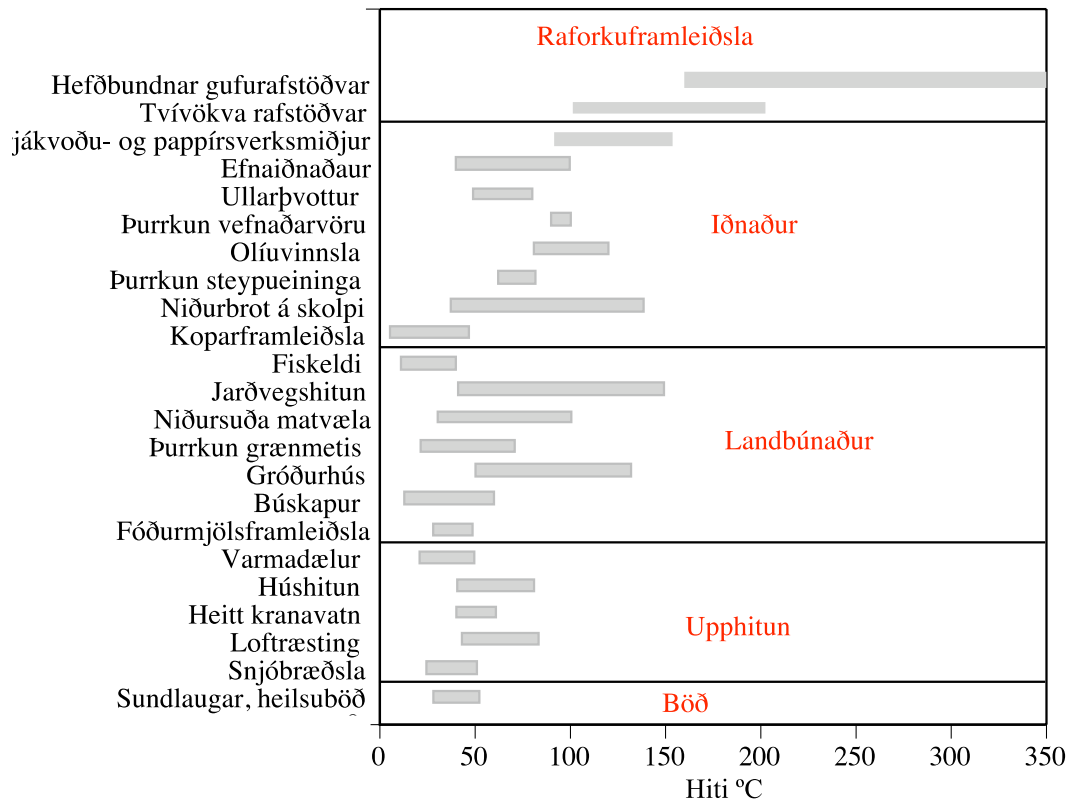
Flokkun Gunnars á jarðhitasvæðum á Íslandi byggir vissulega á því jarðfræðilega umhverfi sem svæðin liggja í en nafngiftin höfðar jafnframt til hvoru tveggja í senn, hitans í svæðunum og notagildis þeirra, en notkunarmöguleikar jarðhitavökva fara fyrst og fremst eftir hitastigi hans (mynd 3). Miðað við flokkun sem sett hefur verið fram af Goff og Janik (2000) mætti flokka háhitasvæði sem svæði í ungu storkubergi en lághitasvæðin, a.m.k. flest þeirra, sem tektónísk svæði eða með öðrum orðum svæði sem tengjast ungum tektónískum, vatnslekum sprungum í annars eldri og vatnspéttari berggrunni.



Mynd 1. Þekkt háhitasvæði á Íslandi.



Mynd 2. Lághiti og ölkeldur á Íslandi.



Mynd 3. Línurit Baldurs Líndal sem sýnir notkunarmöguleika jarðhitavats og gufu eftir hitastigi.

Flest virk háhitasvæði á Íslandi finnast í sambærilegu jarðfræðilegu umhverfi eða þar sem sprungusveimar skera flekaskil. Í eystra gosbeltinu einkenna megineldstöðvar þessa skurðpunkta. Á Reykjanesskaga eru hins vegar engar megineldstöðvar. Að minnsta kosti þrjú háhitasvæði liggja á virkum sprungusveimum skammt frá megineldstöðvum, Námafjall, Nesjavellir og Hellisheiði. Varmagjafi ungra háhitasvæða sem tengjast sprungusveimum eingöngu er að líkindum aðallega gangar auk silla en í háhitasvæðum í megineldstöðvum eru þessar og fleiri gerðir innskota, eins og keilugangar auk djúpstæðari eitla.

Líklegt er talið að varmagjafi háhitasvæðanna innan gosbeltanna sé innskot, ýmist kvika eða storkuberg sem enn er að kólna niður eftir að kvikan storknaði. Varmagjafi lághitasvæðanna er hins vegar heitt berg í rótum þeirra (sjá kafla 3). Talið er að hitastigið í lághitakerfunum ráðist af hitastigli og botni hringrásar grunnvatns (nefnt base depth af Gunnari Böðvarssyni, 1961). Hitastigullinn annars vegar og heit innskot í rótum háhitakerfa hins vegar eru talin gera það að verkum að jarðhitakerfi með hita á bilinu 150-200°C eru sjaldgæf.

1.2 Fjöldi, stærð og þróun háhitasvæða

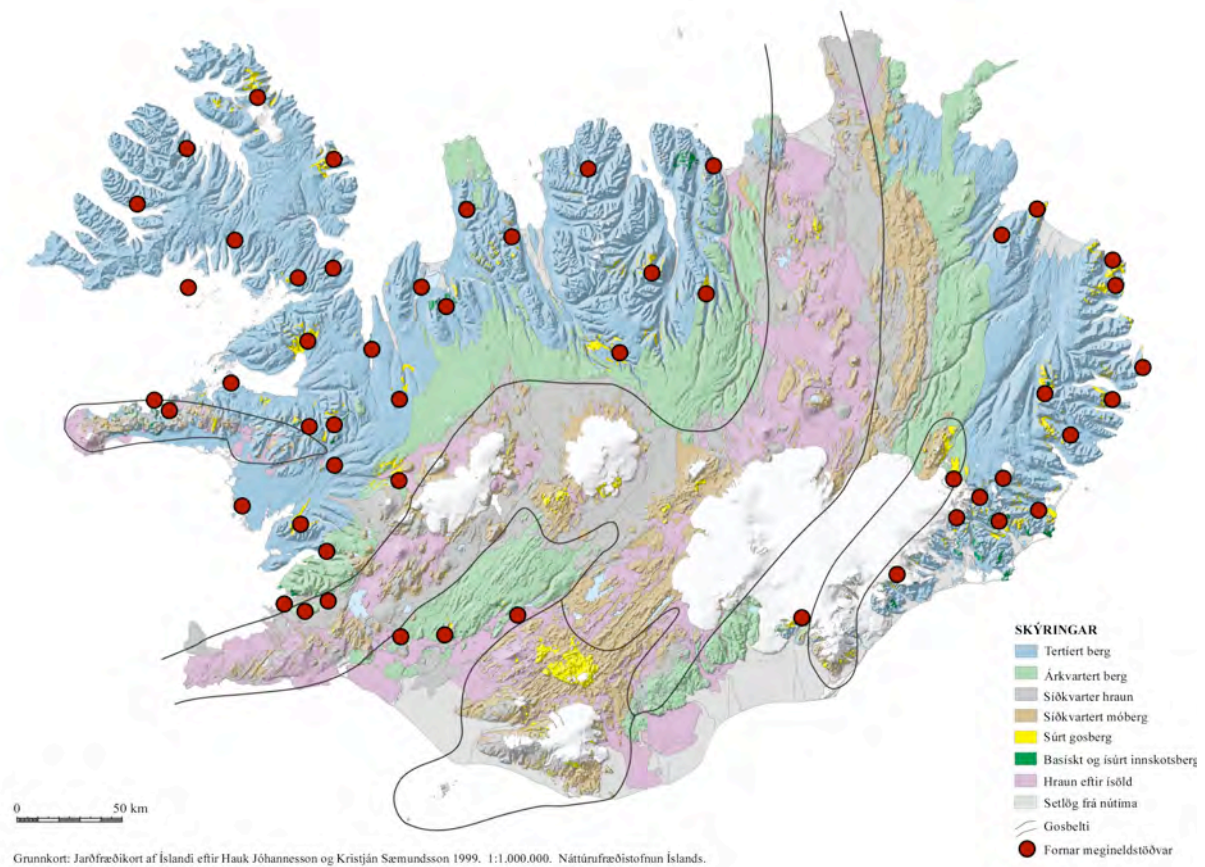
Guðmundur Pálmason o.fl. (1985) nefna alls 28 háhitasvæði og telja Svartsengi-Eldvörp vera eitt svæði. Eftir að skýrsla þeirra félaga kom út hafa boranir sýnt að eitt þessara svæða er lághitasvæði (Öxarfjörður), eitt er undir sjó (Kolbeinsey) og tvö eru líklega ekki háhitasvæði (Tindfjallajökull, Prestahnúkur) en fjögur eru undir jökli (Mýrdalsjökull, Grímsvötn, Hofsjökull, Þórðarhyrna). Loks skal nefnt að eitt þeirra svæða sem Guðmundur Pálmason o.fl. (1985) telja hluta af Torfajökulssvæðinu er annars staðar talið sérstakt svæði (Blautakvísl). Með því að telja Blautukvísl hluta af Torfajökulssvæðinu eru háhitasvæðin 19 sem eru tæknilega nýtanleg vegna legu sinnar. Í skýrslu Verkefnisstjórnar rammaáætlunar (2011) sem þessi skýrsla er viðauki við eru svæðin talin 20 og hefur Stóra-Sandvík á Reykjanesskaga bæst við en ekki er alveg víst hvort þetta nýja háhitasvæði er sjálfstætt háhitasvæði eða hluti af Reykjanessvæðinu. Á mynd 1 eru sýnd alls 27 háhitasvæði, þar af eitt undir sjó og 6 undir jökli. Ennfremur eru Eldvörp og Svartsengi talin tvö svæði en Stóra-Sandvík ekki talin sem sérstakt svæði heldur sem hluti af Reykjanesi þótt það sé óljóst.

Háhitasvæðin eru mjög misstór að flatarmáli, 2-140 km² samkvæmt Guðmundi Pálmasynti o.fl. (1985) en 5-253 km² samkvæmt niðurstöðu í skýrslu Verkefnisstjórnar rammaáætlunar (2011) en hún byggir á viðnámsmælingum (Jónas Ketilsson o.fl., 2009).

Öll háhitasvæði eiga sitt upphaf, sögu og endalok. Takmarkaðar upplýsingar eru til um aldur einstakra svæða en mat sem m.a. byggir á fornum, rofnum háhitasvæðum í kvarter og tertíer jarðmyndunum bendir til þess að hann geti legið á bilinu tugir til hundruð þúsunda ára. Athuganir sýna að jarðhitasvæðið á Reykjanesi var virkt á ísöld og er því meira en 10.000 ára, líklega mun eldra (Pope o.fl., 2009). Sá möguleiki er fyrir hendi, eins og t.d. á Krísuvíkursvæði, að sum háhitasvæði eða hlutar þeirra gætu verið mjög skammlíf, afleiðing af einu smáu kvikuinnskoti sem leiðir af sér myndun gufuhvera í einhverja áratugi eða aldir, sbr. Hverinn Eina.

Eins og fram hefur komið liggja flest hinna virku háhitasvæða landsins á flekaskilum, nánar tiltekið þar sem sprungusveimar skera þessi skil. Þrjú háhitasvæði eru þó alllangt frá slíkum skilum (Hveragerði, Geysissvæðið og Hveravellir á Kili). Háhitasvæði á flekaskilum eru ung jarðfræðilega en þau sem liggja utan þeirra í eldra bergi eru talin eldri. Forn háhitasvæði er víða að finna utan gosbeltanna (mynd 4). Alls eru þekkt 42 forn háhitasvæði í tertíer berggrunni (3-15 milljón ára gamall) og 10 í árkvarterum (0,8 til ~3ja milljón ára gamall). Um það bil eitt háhitasvæði hefur því myndast að meðaltali í hinum eldri berggrunni

á 280 þúsund ára fresti. Innan virku gosbeltanna eru 27 háhitasvæði þekkt, en þau eru í 0-500 þúsund ára gömlu bergi. Því hefur eitt svæði myndast að meðaltali hver 19 þúsund ár.



Mynd 4. Megineldstöðvar á Íslandi í tertíer og kvarter berggrunni. Í þessum megineldstöðvum eru forn háhitasvæði.

Þegar háhitasvæði eldast kaffærast þau undir yngri hraunlögum. Þau geta sokkið á flekaskilunum undan nýjum hraunlögum eða rekið frá þeim út úr gosbeltunum. Ef þau berast út úr gosbeltunum tekur rof við og þannig skilar sér berg ummyndað af háhita aftur til yfirborðs. Það er einmitt hið ummyndaða berg sem er sönnun þess að um fornan háhita er að ræða. Búast má við því að háhitakerfi séu til innan gosbeltanna þótt yfirborðsmerki finnist engin. Þessi svæði hafa grafist undir yngri gosmyndunum um leið og þau rekur frá flekamótunum til jaðra gosbeltanna. Eins gætu forn háhitasvæði utan gosbeltanna verið fleiri en þau sem nú sjást á yfirborði. Raunar er það svo að tvö forn, grafín háhitasvæði eru þekkt í kvarter berggrunni en þau hafa nú breyst í lághitasvæði. Þetta er Laugarnessvæðið í Reykjavík og lághitasvæðin að Reykjum og Reykjahlíð í Mosfellsbæ.

1.3 Varmagjafinn

Varmagjafi ungra háhitasvæða er grunnstæð kvikuinnkot eða storkuberg sem enn er afbrigðilega heitt eftir storknun. Kvika sem myndar stór innkot og tiltölulega djúpstæð (>2 km) verður að gabbrói eða granófýr við storknun. Smærri og grunnstæðari kvikuinnkot verða að smá- eða dulkornóttu bergi, dóléríti eða basalti, ef kvikan er basísk. Slík innkot eru algeng á 1-2 km dýpi. Þetta sýna athuganir, bæði á fornum háhitasvæðum og eins boranir í virk háhitakerfi (t.d. Walker, 1963; Stefán Arnórsson, 1995; Hjalti Franzson, 1995, 1998, 2000, 2004).

Jarðskorpan undir Íslandi skiptist í 5 lög (0 til 4, Guðmundur Pálmason, 1973). Næstneðsta lagið, lag 3 er að mestu gert úr innskotabergi (Walker, 1974) og því tiltölulega eðlisþungt miðað við basíska kviku. Hins vegar er lag 2 eðlisléttara en það lag er gert úr hraunlögum en einnig innskotum að nokkru. Basísk kvika sem leitar upp úr möttli hefur tilhneigingu til að mynda innskot á mótum laga 2 og 3 vegna eigin eðlisþyngdar og eðlisþyngdarmunar þessara laga. Af þeim sökum þykkar lag 3 við það að það hleðst ofan á það. Kvikuinnskot efst í lagi 3 og ofar eru talin meginvarmagjafi háhitasvæða. Dýpi niður á lag 3 er breytilegt (Guðmundur Pálmason, 1973), oft á bilinu 3-4,5 km í gosbeltunum. Þá er talið að stórar kvikuþrær hafi tilhneigingu til að myndast á mótum skorpu og möttuls. Þessar þrær fæða líklega grunnstæðari innskot öðru hverju (Ágúst Guðmundsson, 1987). Einnig er talið að kvika geti leitað beint úr möttli upp í efstu lög jarðskorunnar eða til yfirborðs.

Háhitakerfi myndast um leið og kvikuinnskot kemur af stað hræringu grunnvatns. Þessi hræring felur í sér að heitt vatn ofan innskotsins stígur og kaldara vatn rennur að varmagjafanum. Uppstreymi heita vatnsins veldur því að varmi flyst frá varmagjafanum upp í ofanálíggjandi jarðlög og hitar þau upp. Þannig safnast upp varmi frá kviku-varmagjafanum í grunnstæðara bergi. Ef svæðin sökkva ekki niður á mikið dýpi á eða við flekamót, rekur þau með tímanum frá flekamótunum og þá slitna þau frá varmagjafanum. Gömul háhitakerfi sem hafa slitnað frá varmagjafanum eru varmanámur af heitum vökva í heitu bergi; varminn í þeim tapast smátt og smátt við streymi grunnvatns gegnum hið heita berg og með leiðingu – kerfið kólnar. Hins vegar bendir allt til þess að kvikuinnskot viðhaldi að langmestu varmastreymi inn í ung háhitakerfi. Sum háhitakerfi sem rekið hefur út úr gosbeltunum eru orðin að lághitakerfum, eins og Laugarnessvæðið í Reykjavík og Reykja- og Reykjahlíðarsvæðin í Mosfellsbæ.

Athuganir sem byggja á styrk klóríðs og bórs í jarðhitavatni gefa til kynna að þessi efni séu að mestu ættuð frá kviku í sumum ungum háhitasvæðum (Reykjanes, Nesjavöllir, Námafjall, Krafla) en jarðhitavatnið í eldri háhitasvæðum (Geysissvæði, Hveravellir á Kili, Hveragerði) og einnig í Landmannalaugum “sér” ekki kvikugös (Giroud, 2008).

1.4 Vinnsloeiginleikar

Borað hefur verið í alls 9 háhitasvæði. Flæði úr einstökum borholum er mjög breytilegt, bæði innan og milli svæða. Flæðið endurspeglar lekt jarðlaganna. Á svæðunum í Námafjalli, Nesjavöllum, sums staðar á Hellisheiði, Svartsengi og Reykjanesi eru borholur gæfar. Í Kröflu er lekt hins vegar minni að meðaltali. Þá hefur ekki enn fundist góð lekt á Krísuvíkursvæði. Á Kröflusvæði er ljóst að léleg lekt tengist miklu magni innskota sem eru þétt nema þar sem jarðskorpuhreyfingar hafa brotið þau upp. Á Krísuvíkursvæði hafa verið boraðar margar holur, bæði grunnar og djúpar, en viðunandi árangur hefur aldrei fengist hvað varðar vatns- og gufuflæði úr holum. Breytileg lekt milli svæða endurspeglast m.a. í fjölda hola sem boraðar hafa verið miðað við stærð virkjunar. Þannig hafa verið boraðar alls 40 holur í Kröflu fyrir 60 MW raforkuver en 23 á Nesjavöllum fyrir 120 MW raforkuver og 300 MW jarðvarmaorkuver.

Á veraldarvísu eru það aðallega tveir þættir sem hafa leitt til þess að hætt hefur verið við nýtingu jarðhitasvæðis eftir að borað hafði verið í svæðið, ófullnægjandi lekt annars vegar og efni í vatni og gufu hins vegar sem ýmist valda útfellingum eða tæringu eða rýra gæði gufu með miklu gasi en einstaka sinnum er orsökina óásættanleg umhverfisáhrif. Ördugleikar hafa orðið við nýtingu nokkurra borhola á Kröflusvæði, bæði fyrr og nú, fyrst vegna mikils gass í gufu í kjölfar eldsumbrotanna sem hófust 1975 og síðar vegna þess að vatn í æðum í djúpum borholum er súrt. Víða um lönd er að finna súrt og því tærandi borholuvatn eins og t.d. í Japan, á Filippseyjum, Indónesíu og á Kosta Ríka (IAEA, 2005), auk Kröflu. Á hluta Torfajökulssvæðis er magn koltvíoxíðs í gufuaugum mjög hátt (Jón Örn Bjarnason og

Magnús Ólafsson, 2000). Það er talið endurspeglar háan styrk þessarar gastegundar í djúpvökva sem hefði umtalsverð áhrif á gæði gufu úr borholum til raforkuframleiðslu væri þar borað.

Reynslan frá Kröflu sýnir að óvissa er um árangur borana þegar holur eru dýpri en 2ja km vegna hættu á því að holan lendi í súrum vökva. Einnig virðist lekt oft léleg neðan þessa dýpis sem orsakast af mikilli tíðni innskota. Bergið í innskotunum er þétt og því ekki lekt nema þar sem tektónískar sprungur hafa höggvið þau í sundur. Sama gæti gilt um fleiri háhitasvæði sem liggja í megineldstöðvum. Þó verður ekkert sagt með vissu um afl borhola á háhitasvæðum og gæði holuvökvans fyrr en borað hefur verið í þau.

Sett hafa verið fram almenn líkön af háhitasvæðum á veraldarvísu. Fyrsta háhitakerfið sem tekið var til nýtingar var þurr-gufusvæðið í Larderello á Ítalíu í upphafi tuttugustu aldar. Þetta svæði einkennist af því að eingöngu gufa streymir úr borholum og gufa ræður vökvaþrýstingi í berginu. Almenn er talið að gufan hafi orðið til við suðu á mjög djúpstæðu vatni og að hún hafi safnast upp á minna dýpi undir þéttu þakbergi (Goff og Janik (2000). Wairakei-svæðið á Nýja-Sjálandi er fyrsta háhitasvæðið af svokallaðri heitavatnsgerð sem nýtt var til raforkuframleiðslu en þar er eingöngu vatn í jarðhitalindinni neðan ákveðins dýpis. Virkjun á þessu svæði var gangsett 1958. Þetta svæði hefur gjarnan verið skoðað sem dæmigert vatns-háhitasvæði. En seinni tíma boranir og athuganir hafa leitt í ljós að háhitasvæði af nefndri gerð geta verið mjög mismunandi. Á Íslandi eru jarðfræðilegar aðstæður þannig að kvikuinnskot sem eru varmagjafi háhitasvæðanna eru tiltölulega mjög grunnstæð og líkur á að bæði vatn og gufa séu til staðar í rótum sumra jarðhitakerfa næst varmagjafanum. Raunar benda athuganir á Kröflusvæði og Hellisheiði til þess að gufupúði geti verið til staðar næst kviku-varmagjafanum, ofar er tvífasakerfi (blanda af vatni og gufu), svonefnt neðra kerfi í Kröflu og efst heitavatnskerfi (nefnt efra kerfi í Kröflu) þar sem vatn er neðan suðumarks (t.d. Halldór Ármannsson o.fl., 1987). Efni í jarðhitavökvanum benda til þess að tvífasakerfið í Kröflu sé blanda af gufu úr gufupúðanum sem undir liggur og heita vatninu sem ofar liggur (Giroud, 2008). Grunnvatn streymir úr norðri yfir varmagjafann og gufupúðann og hitnar við uppstreymi gufunnar. Sambærileg mynd hefur verið dregin upp á Alto Peak jarðhitasvæðinu á Filippseyjum (Angcoy, 2010). Ofangreind mynd af flæði vatns og gufu í háhitakerfi gefur kerfinu aðra vinnslueiginleika en háhitakerfum sem hafa sambærilega byggingu og Wairakei.

Það almenna líkan sem helst gæti lýst einkennum háhitakerfa á Íslandi og byggir á jarðfræði er eftirfarandi: Varmagjafinn er kvika eða heit innskot. Heitt vatn og gufa rís yfir varmagjafanum. Írennsli kalds grunnvatns er tiltölulega mest eftir sprungum sem liggja gegnum kerfin og út fyrir þau en einnig niður eftir sprungum innan kerfisins. Góð lekt er þó ekki bundin við sprungur. Ýmsar aðrar jarðmyndanir geta verið vel vatnslekar eins og bólstraberg og hraunlög, bæði gjallkargi á yfirborði þeirra og kælisprungur, svo og maskað berg á jöðrum innskota. Í megineldstöðvum virðast innskot vera mjög algeng og lekt í þeim því á heildina litið tiltölulega léleg. Ef holur eru boraðar nálægt jöðrum háhitasvæða, einkum í sprungustefnu, er hætta á köldu írennsli veruleg með neikvæðum áhrifum á svæði í vinnslu.

2. MAT Á STÆRD AUÐLINDAR

Stærð háhitaauðlindarinnar á Íslandi hefur verið endurmetin nýlega (Jónas Ketilsson o.fl., 2009) og studdist Faghópur IV við þá niðurstöðu. Niðurstaðan var sú að samanlagt rafafli háhitasvæðanna væri 4255 MW_e (miðgildi) miðað við 50 ára endingartíma sem er 30% aukning frá fyrra mati Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985), en í ljósi óvissu gæti það legið á bilinu frá 2409 MW_e til 7659 MW_e. Mat Jónasar Ketilssonar o.fl. (2009) var byggt á umfangsmiklum viðnámsmælingum en þær gefa hugmynd um flatarmál svæðanna. Samkvæmt þessu mati er heildarflatarmál þeirra svæða sem tekin voru inn í matið 851 km². Þetta er mun hærri tala en í matinu frá 1985 sem var 473 km². Hins vegar gerði hið síðara mat ráð fyrir minni aflgetu á hvern ferkílómetra háhitasvæðis en hið eldra mat.

Í skýrslu Orkustofnunar um ítarlegt mat hennar á jarðavarma (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985) segir orðrétt:

Þetta mat er heildarmat, landsmat, á jarðvarma, sem þýðir að gengið hefur verið út frá afar einföldum forsendum og alhæfingum við alla útreikninga, sem matið byggir á.

Ennfremur segir í ágrípi skýrslunnar:

Heildarmagn jarðvarma, jarðvarmaforði berggrunnins, frá yfirborði og niður á 10 km dýpi er $1,2 \cdot 10^{24}$ J (júl). Sá hluti þessa jarðvarma sem er ofan 3ja km dýpis, aðgengilegur jarðvarmaforði berggrunnins, er um $0,1 \cdot 10^{24}$ J. Af öllum þessum jarðvarma er talið að ná megi um $3,5 \cdot 10^{21}$ J upp um borholur. Þessi varmi er nefndur tæknilega vinnanlegur jarðvarmi.

Þá kemur fram í skýrslunni að aðgengilegur varmaforði í háhitakerfum umfram 130°C sé $0,5 \cdot 10^{21}$ J og að tæknilega vinnanlegur jarðvarmi við holutopp sé $0,07 \cdot 10^{21}$ J. Ef þessari síðustu tölu um orku er breytt í rafafli og gert ráð fyrir ákveðinni nýtni varmans fæst að unnt sé að framleiða alls um 3500 MW_e rafafli í 50 ár með jarðgufu og hefur þá háhitasvæðum undir jökli verið sleppt.

Að því er næst verður komist er viðmiðið 3ja km dýpi ekki byggt á jarðfræðilegum upplýsingum um eðli háhitasvæða heldur á því hversu djúpt stærsti jarðbor á Íslandi á þeim tíma gat borað.

Bæði mötin áætla orkuförða í háhitakerfunum sem síðan er breytt yfir í rafafli miðað við valinn endingartíma. Þetta felur í raun í sér að litið sé á háhitasvæðin sem endanlega orkulind, ekki endurnýjanlega. Um þetta atriði er sérstaklega fjallað í næsta kafla.

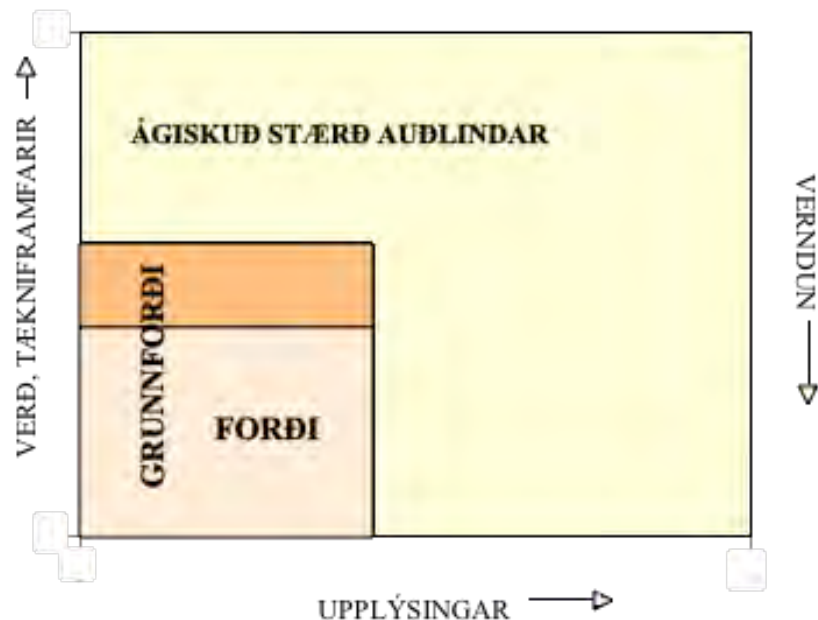
Eins og fram kemur í Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005), en hann er jafnframt fyrsti höfundur ofangreindrar skýrslu Orkustofnunar frá 1985, segir matið á varmaorku í háhitasvæðunum ekkert til um aflgetu þeirra. Talan 3500 MW_e, eins og hún er skilin hér, þjónar aðeins því hlutverki að breyta illskiljanlegri orkutölu, $0,07 \cdot 10^{21}$ J, yfir í skiljanlega tölu rafafli, 3500 MW_e. Í þessu samhengi þykir rétt að vitna í Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005):

Það er lífseigur misskilningur að jarðvarmamat með ofangreindri aðferð segi til um afl jarðhitasvæða. Eðli aðferðarinnar er slíkt að hún getur ekkert um aflið sagt ...

Matið frá 1985 og eins hið síðara mat frá 2009, byggir á almennum forsendum. Í hvorugri skýrslunni er tekið mið af breytilegri jarðfræðilegri byggingu einstakra háhitasvæða og ekki heldur legu þeirra innan gosbeltanna eða súrum vökva eða miklu gasi í gufu. Allir þessir þættir fela í sér að ekki má taka tölur um aflgetu einstakra svæða í tiltekinn tíma bókstaflega heldur ber að líta svo á að matið bendi eindregið til þess að háhitalindin sé stór orkulind, a.m.k. miðað við fólksfjölda Íslendinga, og í ljósi þess væri eðlilegt að stjórnvöld mótuðu stefnu um hvernig mætti stuðla að nýtingu þessarar auðlindar. Raunar hafa núverandi stjórnvöld þegar gert það í stjórnarsáttmála sínum, að minnsta kosti að hluta, en þar segir að

nýtingin skuli vera sem sjálfbærust og sem umhverfisvænst. Eðlileg viðbrögð stjórnvalda við matinu frá 1985 og 2009 væru að stuðla að útvegum fjár til að byggja upp þekkingu á eðli þeirrar auðlindar sem háhitinn er. En reynslan varð önnur; ríkisvaldið hóf þegar á árinu 1986 að draga úr fjárveitingum til grunnrannsókna á jarðhitaauðlindinni og nú er svo komið að ríkissjóður ver sáralitlu fé til þessa málaflokks, aðeins til tiltekinna verkefna, en stærstur hluti verkefna er unninn fyrir framlag orkufyrirtækja. Með þessum breytingum hefur rannsóknarstarfsemin dreifst og þekkingarleg hefð ekki byggst upp sem skyldi. Of stór hluti fjárframlaga er eyrnamerktur (e. restricted) og um leið of lítill hluti frjáls (e. unrestricted). Sýn höfundar er sú að mannaflaskortur sé framundan í jarðhitageiranum á sviði jarðvísinda, sérstaklega fyrir grunnrannsóknir á eðli auðlindarinnar en lítið virðist gert til að taka á þeim vanda.

Algennt er að meta stærð auðlinda í jörðu (resource size) eins og málmsteinda og annarra steinefnasetlaga en jafnframt er aflað upplýsinga um forða (reserve) og grunnforða (reserve base) tiltekinna nytjasteinda. Í riti Bandarísku jarðfræðistofnunarinnar (U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2010, bls. 189-191, sjá viðauka aftast í þessari skýrslu) er að finna skilgreiningar á þessum hugtökum. Þannig merkir stærð auðlindar ágiskaða stærð, forði er það magn sem þekkt er, í hendi ef svo mætti segja, og hagkvæmt er að nýta. Grunnforði er einnig þekkt stærð en vinnsla miðað við gildandi verðlag er óhagkvæm fyrir hluta auðlindarinnar (mynd 5). Rétt er að líta á mat á stærð þeirrar orkulindar sem háhitinn er sem faglega ágiskun. Hugsanlega voru ákvarðanir um stærð jarðgufuvirkjana á Hellisheiði og Reykjanesi miðaðar við ágiskaða stærð (orkuforða) orkulindanna þar. Ef svo er hafa óbeinar upplýsingar um auðlind verið taldar jafngilda beinum upplýsingum. Um leið væri vikið frá hefðbundnu verklagi við undirbúning að vinnslu, sbr. kafla 5. Eðlilegra væri að ákvarðanir um jarðgufuvirkjanir eða aðra nýtingu jarðhita byggðu á borholugögnum. Á mynd 5 eru hugtökin forði, grunnforði og stærð auðlindar skýrð nánar.



Mynd 5. Vensl milli hugtaka sem lýsa hvar vitneskja um tiltekna auðlind í jörðu stendur. Forði (reserve): Þekkt auðlind sem hagkvæmt er að nýta. Grunnforði (reserve base). Þekkt auðlind, en einungis er hagkvæmt að nýta hluta hennar vegna verðlags. Ágiskuð stærð auðlindar (inferred resource): Byggir á vísbendingum og almennum upplýsingum en ekki beinum mælingum.

3. ENDURNÝJANLEGAR OG ENDANLEGAR ORKULINDIR

3.1 Inngangur

Orkulindum jarðar hefur verið skipt í tvo flokka, endurnýjanlegar og endanlegar (einnig nefndar óendurnýjanlegar). *Endurnýjanlegar orkulindir endurnýjast jafnhvort eða hraðar en úr þeim er tekið. Endanlegar orkulindir eyðast eftir því sem af þeim er tekið.* Það sem réttlætir þessa tvískiptu flokkun er að flestar þær orkulindir sem jarðarbúar nýta falla vel undir hana. Sumar þessara orkulinda endurnýja sig mjög hægt, á milljónum eða tugmilljónum ára, jafnvel lengri tíma, en aðrar mjög hratt, sumar á fáum klukkustundum eins og bein sólarorka eða vindurinn. Enn aðrar orkulindir endurnýja sig á áratugum eða árbúsundum eins og viður og mór. Tvískipting orkulinda er því ekki annað en nálgun og vafalítið til orðin vegna sívaxandi vinnslu jarðefnaeldsneytis, en endurnýjun þess tekur tugmilljónir ára og lengur og útlit er fyrir að þessi orkulind verði upp urin eftir eina til tvær aldir eða svo. Þetta kallar á þróun í átt til nýtingar á endurnýjanlegum orkulindum.

Það sem nú virðist vera enn meira áhyggjuefni á heimsvísu en tæming endanlegra orkulinda eru umhverfisáhrif af brennslu jarðefnaeldsneytis, bæði afleiðingar hnattrænnar hlýnunar og súrnun sjávar. Af þessum sökum er nú lögð mikil áhersla á það innan Evrópusambandsins og miklu víðar að nýta aðra orkugjafa en jarðefnaeldsneyti, bæði hefðbundna og nýja, þar á meðal jarðhitakerfi eins og þau sem á Íslandi eru en slík jarðhitakerfi eru af þeirri gerð sem nefna má heitavatnskerfi (e. hydrothermal systems). Einnig er lögð áhersla á að þróa tækni til að nýta jarðvarma í heitu, þurru bergi - ekki vatnsleiðandi (e. hot dry rock). Þá hefur áhugi aukist á byggingu kjarnorkuvera til rafmagnsframleiðslu þótt hörmungarnar í Japan í mars á þessu ári geti sett strik í reikninginn. Frá 2005 hefur verið hafist handa við byggingu um 55 nýrra kjarnorkuvera í veröldinni (IAEA, 2010) með 1000 MW uppsett rafafli hvert (Survey of Energy Resources, 2010). Aukningin er mest í Asíu. Undanfarna áratugi hefur líka verið lögð rík áhersla á að beisla vindorku til raforkuframleiðslu. Frá 1990 hefur uppsett afl vindorkuvera tvöfaldast á þriggja og hálfis árs fresti. Árið 2010 var uppsett afl vindorkuvera alls um 150.000 MW (Survey of Energy Resources, 2010). Fleiri dæmi mætti nefna eins og ræktun repju til olíuframleiðslu fyrir dísilvélar.

Hvort, eða að hve miklu leyti, orkulind er endurnýjanleg á tilteknum tímaskala höfðar til eðlis auðlindarinnar þótt umfang vinnslu hljóti óhjákvæmilega einnig að koma inn í myndina. Með sanni má segja að jarðhitakerfi séu endurnýjanleg orkulind ef nýtingin felur í sér að beisla sjálfrennsli úr laugum eða hverum því slík nýting gengur ekki á auðlindina. Öðru máli gegnir um nýtingu í stórum stíl. Síðar í þessum kafla er sýnt fram á að slík nýting felur í sér varmatöku úr jarðhitakerfum langt umfram náttúrulegt varmatap og ekki verður séð að nýtingin örvi varmaflæði í svæðið. Fyrir slíka nýtingu ber að líta á einstök jarðhitakerfi sem varmanámur sérstaklega þegar um er að ræða lághitakerfi og háhitakerfi sem eru ekki með kvikuvarmagjafa. Þessar niðurstöður eru í samræmi við Guðmund Pálmason (2005), Mannington o.fl. (2004) og Glover og Mroczek (2009).

3.2 Varmaorka jarðar og jarðhitakerfa

Varmaorka jarðar (geothermal energy) á rót sína að rekja til niðurbrots geislavirkra efna í jörðinni, aðallega úrans, þóríums og kalíums. Varmaflæðið út um yfirborð jarðar nemur 41.000 GW samkvæmt Pollack o.fl. (1993) en nýrri athuganir gefa bæði lægri og hærri gildi, 31.000 GW (Hofmeister og Criss, 2005) og 47.000 GW (Davis og Davis, 2010). Svarar þetta flæði til þess varma sem verður til við niðurbrot hinna geislavirku efna.

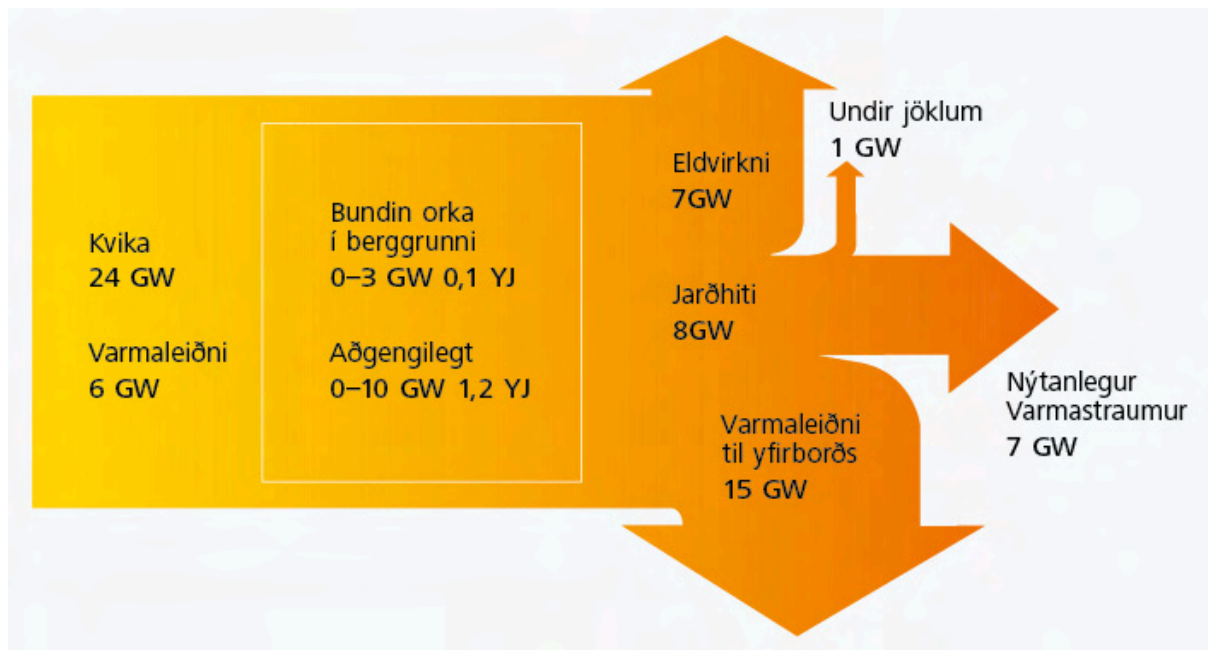
Í jarðskorpunni er varmaorkuforðinn gífurlegur, $5,4 \cdot 10^{24}$ MJ ofan 10 km dýpis (Survey of Energy Resources, 2010). Aðeins mjög lítil hluti þessa varma er þó tæknilega nýtanlegur. Eingöngu við tiltekna jarðfræðilegar aðstæður er það gerlegt, nefnilega þar sem berg er lekt og vatn og/eða gufa flytja varmann til yfirborðs, í svokölluðum heitavatnskerfum¹ en jarðhitakerfi á Íslandi eru einmitt af þeirri gerð. Þessi kerfi eru því auðlind (e. geothermal resource²). Langstærsti hluti varmaorku jarðar er hins vegar í heitu, þurru þ.e. þéttu bergi. Nokkur tilraunaverkefni eru nú í gangi og talsvert rannsóknafé mun nú lagt í að þróa tækni til að gera þennan varma nýtanlegan en meðan tæknin er ekki fyrir hendi er þessi varmalind ekki auðlind. Takist það hins vegar með framförum í tækni að nýta þennan varma hefur varmaauðlind jarðar stækkað gífurlega (sjá mynd 5) og væri nánast óþrjótandi.

3.3 Endurnýjanleiki jarðhitakerfa

Hjá Evrópusambandinu er jarðvarmaorka (geothermal energy) flokkuð sem endurnýjanleg orkulind (European Union, 2009) og orðið skilgreint þannig:

.. energy stored in the form of heat beneath the surface of the solid earth.

Hæpið þykir að þýða orðið “geothermal energy” yfir á íslensku með orðinu jarðhiti eða jarðhitasvæði. Síðari tvö orðin eru jafnan notuð um hita á yfirborði jarðar eins og laugar og hverir og um *heitavatnskerfi* í jörðu, þ.e.a.s. jarðhitakerfi af tiltekinni gerð (e. hydrothermal system). Geothermal energy eins og það er skilgreint hjá Evrópusambandinu er vissulega endurnýjanleg orkulind. Orðið þýðir varmaorka jarðar og eins og áður hefur komið fram



Mynd 6. Orkubúskapur jarðskorpunnar undir Íslandi. Lengst til vinstri er sýnt varmaflæði úr möttli upp í jarðskorpuna með kviku annars vegar (24 GW) og með varmaleiðingu (leiðni) hins vegar (6 GW). Í miðjunni er sýndur varmaforði í berggrunni, annars vegar niður á 3ja km dýpi og hins vegar niður á 10 km. Lengst til hægri er svo sýnt áætlað flæði upp í gegnum jarðskorpuna. Þessar tölur eru ekki vel þekktar nema e.t.v. sú neðsta um varmaleiðingu. Fyrir jarðhitakerfi (jarðhita á myndinni) og eldvirkni hljóta tölurnar á hverjum stað að vera meðaltal yfir alllangt tímabil. Byggt á mynd í grein Stefáns Arnórssonar o.fl. (2008).

¹ Íslenskt orð er ekki til sem svarar til hugtaksins “hydrothermal system”. Hér hefur þessu enska orði verið snarað yfir á íslensku með beinni þýðingu í heitavatnskerfi.

² Orðið resource er notað hér í þeirri merkingu sem það er skilgreint af Bandarísku jarðfræðistofnuninni (sjá viðauka í þessari skýrslu).

endurnýjast hún sífellt með niðurbroti geislavirkra efna sem í jörðinni er að finna, eða sem nemur 31.000-47.000 GW þótt þessi endurnýjun sé vissulega mjög hæg.

Í Survey of Energy Resources (2010), bls. 462 stendur orðrétt (í þýðingu höfundar):

Jarðvarmaorka er yfirleitt flokkuð sem endurnýjanleg auðlind þar sem “endurnýjanleg” lýsir einkennum auðlindarinnar: Orkan sem tekin er úr auðlindinni endurnýjast stöðugt á tímaskala svipuðum þeim sem orkuvinnslan nær yfir.

og er vitnað í Valgarð Stefánsson (2000) í þessu sambandi. Mynd 6 lýsir orkubúskap jarðskorpunnar undir Íslandi. Hún er nýrri útgáfa myndar úr umræddri grein eftir Valgarð Stefánsson (2000) en umrætt mat á orkubúskap byggir á grein eftir Gunnar Böðvarsson (1982). Meginniðurstaðan sem fram kemur á mynd 6 er að nýtanlegur varmastraumur nemi 7 GW. Þessi tala segir þó ekkert um hvar í íslenskum jarðhitakerfum þessi straumur (varmaflæði) er. Ennfremur hlýtur hann að vera meðaltal yfir tiltekið tímabil á hverjum stað sem er mjög breytilegt. Til dæmis hefur gosið tvívegis í Öræfajökli frá því land byggðist en oft á öld í Grímsvötnum. Eftir fjölda innskota í fornum megineldstöðvum að dæma í og við háhitaummyndað berg er kvikuflæðið ekki stöðugt heldur tiltölulega sjaldgæfir atburðir alveg eins og eldgos. Því virðist ekki rökrétt að telja að meðalvarmaflæðið endurspegli stöðuga endurnýjun varma í einstökum jarðhitakerfum. Tími milli endurnýjunar varma með kviku getur hæglega náð yfir margar aldir eða lengur en nemur endingu einstakra jarðhitakerfa miðað við sjálfbæra þróun (100-300 ár, sjá Jónas Ketilsson o.fl., 2009).

Í Jarðhitabók sinni færir Guðmundur Pálmason (2005) sterk rök fyrir því að einstök jarðhitakerfi séu varmanámur, að nánast ekkert muni um endurnýjun varmans miðað við þann varma sem úr svæðunum er tekinn umfram náttúrulegt varmatap, jafnvel þótt nýtingin sé ekki mikil.

Á Goldschmidt ráðstefnunni í Knoxville í Tennessee í Bandaríkjunum í júní 2010 sem höfundur sótti kom fram í erindi yfirmanns umhverfisverkefnis Stanfordháskóla að varmaflæði út úr jörðinni um yfirborðið sé endurnýjanleg orkulind en að einstök jarðhitakerfi séu varmanámur líkt og kolalög og olíulindir. Skilgreining Bandarísku jarðfræðistofnunarinnar er sú sama samkvæmt erindi dr. Lindu Gundersen eins af forstjórum stofnunarinnar sem einnig var haldið á nefndri ráðstefnu. Evrópusambandið tekur ekki afstöðu til þess í regluverki sínu hvort einstök jarðhitasvæði séu endurnýjanleg eða endanleg orkulind en ofangreind skilgreining Evrópusambandsins á “geothermal energy” verður ekki skilin á annan veg en þann að hún sé samhljóða skilgreiningu vestan hafs um varmaflæði.

Skilgreining aðila vestanhafs á einstökum jarðhitasvæðum miðar við tiltölulega umfangsmikla nýtingu. Ef nýting byggir á sjálfrennsli úr laugum og hverum, er jarðhitinn vissulega endurnýjanleg orkulind og ef nýting er í smáum stíl eins og víða gerist með lághita í dreifbýli á Íslandi má ljóst vera að varmanáman endist mjög lengi miðað við umfangsmikla nýtingu á sama svæði.

Höfundur telur rök Guðmundar Pálmasonar (2005) vel grunduð og fær ekki betur séð en rétt sé að líta á einstök jarðhitakerfi sem varmanámur ef nýting er umfangsmikil, þ.e. umtalsvert umfram náttúrulegt varmatap. Rök eru færð fyrir þessari niðurstöðu í kaflanum hér á eftir.

3.4 Varmagjafinn

3.4.1 Háhitakerfi

Eins og fjallað var um í kafla 1.3 eru innskot algeng í háhitakerfum, bæði þeim sem nú eru virk og eins í fornum kerfum sem finnast í teríerum og kvarterum berggrunni. Þessi innskot veita kerfunum varma, bæði með storknun kviku og síðari kælingu storkubergsins. Þeirri

hugmynd hefur verið varpað fram að þau efnahvörf sem leiða til ummyndunar bergs í háhitakerfum séu útvermin og bæti þannig varma við þessi kerfin. Athugun sýnir þó að lítið munar um þennan varma (Stefán Arnórsson, óbirtar athuganir). Háhitasvæði með kviku í rótum sínum fá að öllum líkindum engan varma með varmaleiðingu upp í gegnum jarðskorpuna því kvikan undir þeim er vafalítið heitari en bergið undir þessum kvikuinnskotum. Eins má búast við því að jarðhitakerfið sjálft sé heitara en það berg sem umlykur það til hliðanna og því á sér ekki stað nein varmaleiðing inn í kerfið frá hliðunum.

Eins og bent var á í kafla 1.2 eiga háhitasvæði sína sögu, upphaf, þróun og endi. Háhitakerfi sem myndast á flekamótum getur með tíð og tíma rekið frá þessum mótum og endanlega út úr gosbeltinu. Innskot kviku í efstu lög jarðskorpunnar þar sem berg er stökkt og lekt kemur upphitun af stað hræringu grunnvatns og leiðir með því til myndunar háhitakerfis. Hræringin veldur því að jarðhitavökvinn flytur varma upp í efri jarðlög og hitar þau upp. Þannig safnast upp varmi í jarðhitakerfum sem ættaður er frá kviku auk þess sem hluti varmans frá kvikunni tapast út í andrúmsloftið með gufu og heitu vatni og eitthvað með leiðingu. Vegna reks kerfisins út úr gosbeltinu kemur að því að það slitnar frá kvikuvarmagjafanum. Þá má búast við því að við taki kólnun á því storkubergi sem myndaðist við kristöllun kvikunnar og enn er afbrigðilega heitt. Um leið dregur úr varmaflæði inn í kerfið. Það breytist smám saman í varmanámu sem kólnar niður, mest eftir því hversu mikið vatn flæðir um það.

Kvikufleði upp í rætur háhitakerfa leiðir til varmainnspýtingar. Vitað er að það getur valdið aukinni hveravirkni eins og átti sér stað, bæði í Kröflu á 18. öld (Ólafur Jónsson, 1945) og eins í Námafjalli í eldsumbrotunum 1975-84. Hins vegar er ekki víst að slíkt kvikufleði leiði til aukningar á uppsöfnun varma í bergi jarðhitakerfisins, a.m.k. ef hiti fylgir suðumarksferli með dýpi. Hins vegar gæti það aukið á gufumyndun. Nýrri kviku fylgir gas og jarðskjálftar þannig að áhrifin af innskoti nýrrar kviku eru bæði jákvæð og neikvæð.

Miðað við að náttúrulegt varmatap á Námafjallssvæðinu sé 300 MW skil ég niðurstöðu Valgarðs Stefánssonar (2000) sem greint var frá í kafla 3.3 svo að 300 MW varma streymi stöðugt inn í rætur svæðisins. Væri þar reist 90 MW_e jarðgufustöð sem starfrækt væri í 50 ár myndi varmataka úr kerfinu vegna vinnslunnar vera um 750 MW og væntanlega væri hún viðbót við náttúrulegt varmaflæði. Svæðið myndi tæplega jafna sig á 50 árum eftir hina auknu varmatöku, heldur á lengri tíma en 125 árum, og vafalítið mun lengri, því hvorki er við því að búast að varmaflæði vaxi inn í kerfið umfram náttúrulegt varmatap meðan á vinnslunni stendur né eftir að hún hefur verið stöðvuð. Eins er ekki við því að búast að náttúrulega varmaflæðið nýtist að öllu til að flytja varma í vatn og berg kerfisins sem kólnaði í kjölfar vinnslunnar. Þá ber að hafa í huga að eldsumbrot á Námafjallssvæðinu með innspýtingu á nýrri kviku verða líklega ekki oftár en á um 250 ára fresti. Þess utan segja almennar tölur um varmaflæði upp í jarðskorpuna undir Íslandi, sbr. mynd 6, ekkert til um slíkt flæði inn í jarðhitakerfið í Námafjalli á næstu áratugum ef ákveðið yrði fljótlega að virkja á svæðinu. Það sýnist því hæpið að líta á það sem almenna reglu að einstök háhitasvæði jafni sig á svipuðum tíma og vinnsla hefur staðið.

Náttúrulegt varmatap háhitasvæðisins á Reykjanesi er 130 MW (Þráinn Friðriksson o.fl., 2006). Þetta varmaflæði svarar til 100 L/s rennslis af 300°C vatni. Það svæði sem mælt varmatap náði yfir er um 2 km². Hið mikla varmaflæði verður naumast skýrt nema með varmaflæði frá kviku gegnum þunnt lag af bergi (50-100 m) milli kvikunnar og botns á hræringu sjávar í kerfinu (sjá Helgi Björnsson o.fl., 1982; Stefán Arnórsson o.fl., 2007). Núverandi varmataka úr svæðinu fyrir 100 MW jarðgufuvirkjun nemur meira en um 1000 MW varma. Þessi tala svarar til varmaflæðis gegnum jarðskorpuna með leiðingu yfir svæði sem er svipað að flatarmáli og Vatnajökull. Því ber að líta á nýtingu úr svæðinu sem

varmanám því flæði varma með leiðingu í svæðið er ekkert þar sem kerfið er heitara en umlykjandi berg og ekki getur talist líklegt að nýtingin örvi varmaflæði með kvikustreymi úr möttli inn í rætur jarðhitakerfisins. Reykjanessvæðið er hér valið sem dæmi um háhitasvæði í nýtingu vegna þess að nákvæmar upplýsingar liggja fyrir um náttúrulegt varmastreymi úr svæðinu áður en vinnsla hófst.

Háhitakerfi með kviku-varmagjafa gætu enst lengi þrátt fyrir ákafa nýtingu ef hún flytti fyrir storknun kvikunnar líkt og átti sér stað þegar sjó var dælt á hraunið sem rann úr Eldfelli í Vestmannaeyjum árið 1973 (sjá Valdimar K. Jónsson og Matthías Mattíasson, 1974). Ending jarðhitakerfisins færi eftir því hvað kvikuhólflið væri stórt. Á þetta er bent hér þótt ekki sé vitað hvort þessar hugrenningar reynist raunverulegar. Hitt virðist þó líklegt að ágeng nýting sem flýttir þannig fyrir storknun kviku í rótum jarðhitakerfis gæti leitt til þess að kerfið liði undir lok. Önnur hugmynd sem byggir á nokkrum gögnum, m.a. frá Kröflu og Hellisheiði, og ástæða er að þróa frekar til að auka skilning á háhitakerfum og vinnslueiginleikum þeirra er að gufupúði myndast neðst í þeim yfir varmagjafanum og að uppstreymi þessarar gufu flytji með sér varma upp í það grunnvatn sem ofar liggur og hiti það þannig upp. Þetta gufuhitaða grunnvatn er jarðhitalindin. Gufan í gufupúðanum gæti myndað súrt vatn við þéttingu. Eins gæti jarðhitavatn næst gufupúðanum verið súrt og því tærandi.

Þrýstifall í háhitakerfum sem vinnsla orsakar getur örvað suðu í uppstreymisrásum og aukið þannig á gufuflæði til yfirborðs. Með þessu móti tapast varmi umfram náttúrulegt varmatap sem nýtist því ekki vinnslunni. Á lághitasvæðum er þetta með öðrum hætti. Þar leiðir vinnsla oft til þess að laugar og hverir þorna. Þetta dregur úr, stöðvar jafnvel að mestu leyti náttúrulegt afrennsli frá slíkum svæðum. Ef það gerist nýtist hið náttúrulega rennsli.

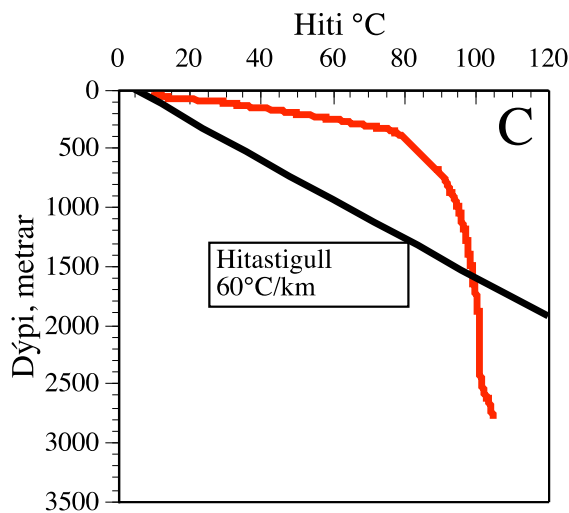
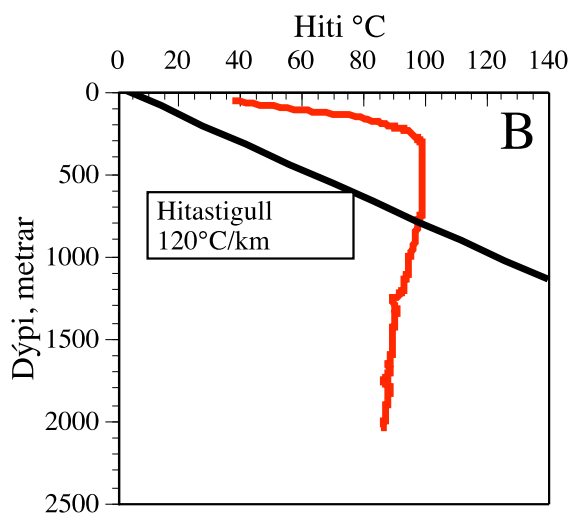
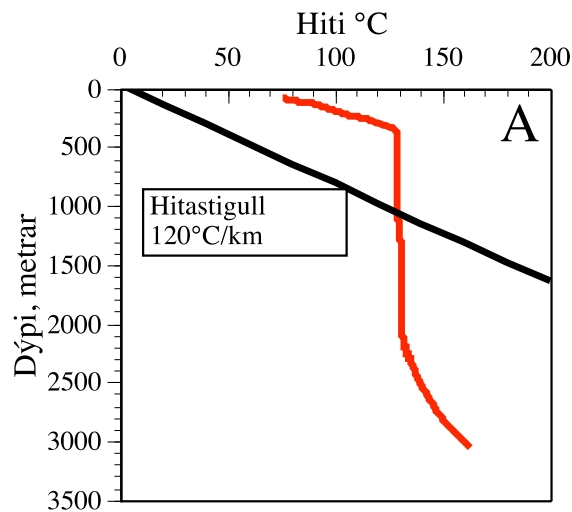
3.4.2 Lághitasvæði

Í djúpum borholum á nokkrum lághitasvæðum á Íslandi (Laugarnessvæðið í Reykjavík, Laugaland í Eyjafirði og Reykja- og Reykjahlíðarsvæðin í Mosfellsbæ) er hiti lægri djúpt niðri en vænta má út frá hitastigli í berggrunni í nágrenni þessara svæða (sbr. rauðu og svörtu ferlana á mynd 7). Segja má að rætur þessara kerfa séu kuldapollar. Þeir mynduðust við náttúruleg skilyrði áður en vinnsla hófst við það að kalt grunnvatn seig djúpt í jörðu og kældi bergið en hitnaði um leið. Upphitaða vatnið steig síðan upp vegna þess að það er eðlisléttara en kalt og hitaði upp efri jarðlög þannig að uppstreymið jafnaði út hitann í jarðhitakerfunum yfir allstórt dýptarbil. Ferlarnir á mynd 7 sýna að írennsli í jarðhitakerfin hlýtur að vera ofan frá og varmagjafinn er heitt berg í rótum þeirra (Sveinbjörn Björnsson, 1980).

Náttúrulegt rennsli úr laugum á Laugarnessvæðinu var um 11 L/s af 89° heitu vatni (Barth, 1950) áður en farið var að bora á svæðinu. Svarar það til orkuflæðis umfram 5°C sem nemur 3,05 MW. Þetta varmaflæði svarar til varmaflæðis með leiðingu upp í gegnum jarðskorpuna yfir 25,6 km² svæði og er þá miðað við að hitastigull sé 100°C/km. Nú mun dælt um 200 L/s af 130°C vatni úr Laugarnessvæðinu eða sem nemur 98,3 MW og jafngildir það varmaflæði með leiðingu upp í gegnum jarðskorpuna á 825 km². Af ofangreindum tölum má ljóst vera að sá varmi sem flæðir með leiðingu upp í gegnum jarðskorpuna inn í jarðhitakerfið er hverfandi miðað við varmatöku úr því. Sá varmi sem er nýttur og geymdur í berginu endurnýjar sig því á mjög löngum tíma. Laugarnessvæðið er þess vegna varmanáma af heitu bergi. Sama gildir um lághitasvæðin í Mosfellsbæ og inni í Eyjafirði, sbr. mynd 7.

3.5 Hræring og lekt

Bæði háhita- og lághitakerfi með hita yfir ~100°C og jafnvel með lægri hita eru svonefnd hræringarkerfi. Hiti í jarðskorpunni vex með dýpi og því býr grunnvatn við óstöðugt ástand, heitara og eðlisléttara vatn liggur undir kaldara og eðlisþyngra vatni. Hið djúpstæðara heita



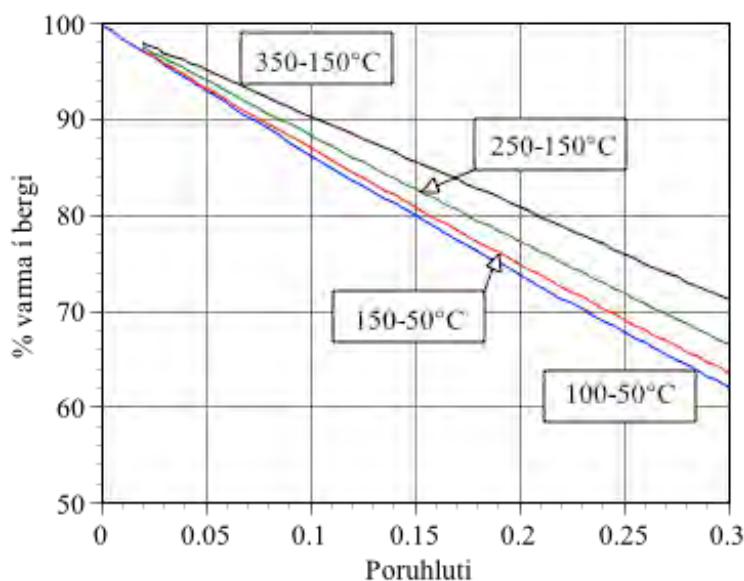
Mynd 7. Rauðir ferlar sýna hita í djúpum borholum á (A) Laugarnessvæði (Reykjavík), (B) í Mosfellsbæ og (C) að Laugalandi (Eyjafirði). Svarti ferillinn sýnir hitastigul í berggrunni utan svæðisins. Fyrir neðan 1000 m dýpi í Reykjavík er berghiti utan svæðisins hærra en í svæðinu sjálfu en ofan þessa dýpis er hann lægri. Hitaferillinn í jarðhitasvæðinu sýnir að varmanám (kæling) hefur átt sér stað djúpt í jarðhitakerfinu en uppsöfnun varma ofar í því. Þetta verður vegna uppstreymis á heitu vatni sem jafnar út hitann yfir tiltölulega stórt hitabil. Sams konar hitaferlar eru í djúpum borholum í Mosfellsbæ og í Eyjafirði. Varmagjafi jarðhitasvæðanna er heitt berg í rótum þeirra. Svæðin deyja smám saman út eftir því sem bergið í rótum þeirra kólnar. Írennsli í svæðin er ofan frá.

vatn stígur upp ef lekt er nægileg, en svonefnd Rayleigh-tala er mælikvarði á þá lágmarkslekt sem nauðsynleg er til að knýja hræringu grunnvatns vegna eðlisþyngdarmunar á misheitumgrunnvatnssúlum og mynda þannig hræringarkerfi (sjá t.d. Sveinbjörn Björnsson, 1980). Það liggur í hlutarins eðli að þessi jarðhitakerfi myndast þar sem lekt í berggrunni er best - þau eru lektarfrávik. Fjöldmörg dæmi má nefna þessu til stuðnings. Mjög mörg lágheatasvæði tengjast sprungum í annars þéttari berggrunni eins og í Reykholtssdal í Borgarfirði og Mosfellsbæ, sums staðar í Skagafirði og miklu víðar. Á háheatasvæðum er lekt bergs best nálægt sprungum eins og í Kröflu (Hveragil) og á Hellisheiði. Hveragil er sprengigígargöð á sprungu, líklega til orðin á síðjökultíma (Kristján Sæmundsson, 1991). Best lekt á Hellisheiði hefur fundist nálægt gossprungum sem eru 1800 og 5700 ára gamlar (Sinton o.fl., 2005). Af þessu er ályktað að írennsli í jarðhitakerfin hlýtur að vera tiltölulega mest eftir sprungum sem skera jarðhitakerfin og teygja sig út fyrir þau en einnig ofan frá um sprungurnar. Þessi ályktun felur í sér að varmi í bergi utan jarðhitakerfa nýtist ekki mikið til vinnslu.

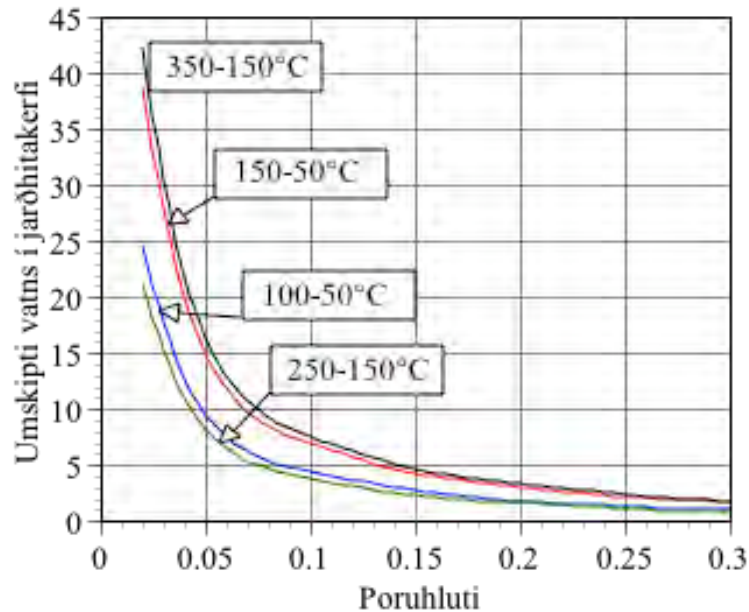
3.6 Varmanám úr bergi

Mynd 8 sýnir hversu stór hluti varma í jarðhitakerfi er í berginu eftir því hver poruhluti þess er. Dæmin sem sýnd eru á myndinni miða annars vegar við lágheatakerfi og hins vegar við háheatakerfi. Tvö dæmi eru tekin sem svara til lágheatakerfa þar sem upphaflegur hiti er 150°C og 100°C og gert ráð fyrir að kerfin verði ekki nýtt meira en niður í 50°C. Dæmin fyrir háheatakerfi eru einnig tvö og gera ráð fyrir 250°C og 350°C upphafshita og kælingu í 150°C. Eftir því sem hitinn er hærri verður hlutfallslega minni hluti varmans í vökvanum fyrir ákveðinn poruhluta. Ræðst það af því að eðlisrúmmál vatns vex með hækkandi hita en rúmmál bergs mjög lítið.

Porurými í bergi hefur verið mikið rannsakað, bæði með beinum mælingum og smásjárathugunum (Valgarður Stefánsson o.fl., 1997; Ómar Sigurðsson o.fl., 2000; Hjalti Franzson o.fl., 2010). Porurými fundið með mælingum er kerfisbundið herra en það sem byggir á smásjárskoðun, eða sem nemur 5-10% (Hjalti Franzson o.fl., 2010). Yfirleitt er lítill munur á samhangandi poruhluta (e. effective porosity) og heildarporuhluta (e. total porosity). Nokkur munur er á gaslekt annars vegar og vatnslekt hins vegar (Ómar Sigurðsson o.fl., 2000) en það gefur til kynna að sumar porur séu svo smáar að vatn nái ekki að flæða um þær.



Mynd 8. Bláa og rauða línan svara til jarðhitakerfa sem upphaflega eru 100° og 150°C heit og er reiknað með kælingu niður í 50°C. Græna og svarta línan svara til 250° og 350°C jarðhitakerfa sem kæld væru í 150°C.



Mynd 9. Vensl poruhluta við hversu oft má endurnýja heitt vatn í jarðhitakerfi með varmanámi úr berginu. Ferlarnir á myndinni hafa sömu merkingu og á mynd 8.

Í móbergi er poruhlutinn á bilinu 10-50% af rúmmáli (Hjalti Franzson o.fl., 2010). Í fornum megineldstöðvum er poruhlutur storkubergs á sama bili, þótt poruhlutur meirihluta sýna sé undir 0,2 (Hjalti Franzson o.fl., 1997, 2008). Ekki er mögulegt að gefa ákveðin viðmið um poruhluta bergs í virkum háhitakerfum en með samanburði við forn háhitasvæði má búast við að hann liggja oft á bilinu 10-20% en líklegast er hann þó lægri þar sem mikið er um innskot.

Mynd 9 sýnir hversu oft megi skipta um vatn í jarðhitakerfi miðað við að írennslið sé 5°C og að allt bergið nái að kólna jafnmikið og gert var ráð fyrir á mynd 8. Ef gert er ráð fyrir 10 og 20% poruhluta fyrir 250°C háhitasvæði má skipta um vatn 4 og 1,8 sinnum en 7,8 og 3,5 sinnum ef hitinn er 350°C. Sé gert ráð fyrir 10% poruhluta og 250°C dugir vökvinn í 1 km² vinnslusvæðis (1,5 km á þykkt) til að framleiða 15 MW_e rafafls í 25 ár. Tafla 1 sýnir endingartíma í árum sem fall af poruhluta bergsins og er þá miðað við að sá gufuhlutur sem myndast við þrýstifallssuðu fari minnkandi í rennsli eftir því sem bergið kólnar, þannig að í lokin sé hann helmingur upphaflegs gufuhluta. Tölurnar í töflu 1 ættu að skoðast sem fyrsta nálgun, enda byggðar á mjög einfölduðum forsendum og ekki er ljóst hversu mikinn hluta varmans reynist unnt að vinna úr berginu, þ.e. hver varmaheimtustuðullinn er. Ennfremur er það einföldun að gera ráð fyrir að gufuflæði minnki línulega með tíma eftir að búíð er að skipta út upphaflegum vökva í kerfinu.

Ef eingöngu streymir vatn inn í borholur má mæla áhrif kælingar af köldu írennsli. Að öðrum kosti er hugsanlegt að meta hana með líkanreikningum en meðan þeir byggja ekki á fullnægjandi gögnum fylgir mikil óvissa slíku mati. Loks má greina kalt írennsli með notkun náttúrulegra kenniefna sem finnast í lágum styrk í köldu vatni en háum í jarðhitavatni (sjá mynd 10). Þessi jarðefnafræðilega aðferð ásamt hitamælingum er talin veita öruggastu vitneskju um kælingu í aðfærsluæðum borholna þótt báðum fylgi ýmsir annmarkar.

TAFLA 1. Endingartími háhitasvæða í árum sem miðar við að unnin sé gufa samsvarandi 15 MW_e úr hverjum km² vinnslusvæðis og að þykkt jarðhitalindar sé 1,5 km. Dálkar 2-3 eiga við kerfi sem upphaflega var 250°C og kælt niður í 150°C og samsvarandi fyrir dálka 4-5¹.

Poruhluti	250-150°C		350-150°C	
	Ending vökva	Ending kerfis	Ending vökva	Ending kerfis
0,02	5	59	9	195
0,05	13	65	22	202
0,10	25	75	44	214
0,15	38	85	66	227
0,20	50	95	87	239
0,25	63	104	109	251
0,30	76	114	131	264

¹Gert er ráð fyrir að gufuflæði minnki með tíma og að það sé í lokin að meðaltali helmingur þess sem það var í upphafi.

4. SJÁLFBÆR ÞRÓUN

4.1 Viðhorf og skilgreiningar

Núverandi stjórnvöld hafa sett sér það markmið að umhverfisáhrif vegna framkvæmda á háhitasvæðum fyrir orkuvinnslu skuli vera í lágmarki. Ennfremur að tryggja skuli að nýting háhitalinda sé sem sjálfbærust, sbr. bréf frá iðnaðarráðuneytinu til formanns verkefnisstjórnar rammaáætlunar, Svanfríðar Jónasdóttur, dags. 18. október, 2007. Þetta er skilið á þann veg að ekki sé aðeins átt við auðlindina sjálfa heldur einnig hið ytra umhverfi.

Hugtakið sjálfbær þróun byggir á siðgæðisvitund núverandi kynslóðar gagnvart komandi kynslóðum og er fjallað um slíka þróun í skýrslu Sameinuðu þjóðanna “Our Common Future” sem unnin var af nefnd á vegum Sameinuðu þjóðanna og jafnan er kennd við formann hennar, Gro Harlem Brundtland fyrrverandi forsætisráðherra Noregs. Í þeirri skýrslu er hugtakið sjálfbær þróun skilgreint sem *framvinda sem fullnægir þörfum samtíðarinnar án þess að skerða möguleika komandi kynslóða til að fullnægja þörfum sínum*. Þegar um er að ræða nýtingu endanlegra orkulinda eins og háhitans er þessi skilgreining annmörkum háð. Að því kemur að endanleg auðlind sem er nýtt verður þurrausin. Ýmsar viðbætur við upphaflega skilgreiningu á sjálfbærri þróun hafa því verið settar fram (t.d. Dunstall, 1999). Guðmundur Pálmason (2005) hefur skilgreint sjálfbæra vinnslu orku úr jarðhitakerfum þannig að:

... vinnslunni þurfi að haga svo að hún skerði ekki fyrrisjábanlega getu komandi kynslóða til að nýta sér sömu orkulind ...

Orkustofnun og Íslenskar orkurannsóknir hafa sett fram skilgreiningu fyrir sjálfbæra nýtingu jarðhitakerfa. Hún byggir á því að grunnvatnsborð (þrýstingur) nái stöðugu gildi til langs tíma litið, varmaupptaka haldist stöðug og að svæðið endist í 100-300 ár. Við þessar aðstæður er írennsli í jarðhitakerfið jafnt því rennsli sem úr því er tekið vegna vinnslunnar. Þetta viðmið er eðlilegt fyrir skynsama nýtingu en það segir ekkert um það hversu hratt er gengið á orkuforðann í jarðhitakerfinu og það er einmitt orkuforðinn sem öllu máli skiptir til langs tíma litið. Tíminn 100-300 ár er vissulega langur. En erfiðleikinn við tímaviðmið af þessu tagi er e.t.v. fyrst og fremst sá að það er sértækt fyrir jarðhita fremur en almennt fyrir auðlindir í jörðu. Úran er mikilvægur orkugjafi fyrir kjarnorkuver. Forði úrans í veröldinni er háður verði eins og á við um aðrar auðlindir í jörðu. Tafla 2 sýnir forða úrans í þremur löndum miðað við verð, vinnslu árið 2008 og ágiskun um ófundnar úranjarðmyndanir. Í Bandaríkjunum er lítil úranvinnsla vegna þess að hagkvæmur forði er enginn. Í Brasilíu er lítil vinnsla þrátt fyrir allmikinn úranforða. Miðað við úranforða í þessum tveimur löndum og vinnslu árið 2008 endist hann lengi en af ólíkum ástæðum. Ýmsum gæti þótt það ruglingslegt að hafa ólíkar reglur um mat á endingu auðlinda í jörðu og þegar um jarðhitakerfi er að ræða er ekki vitað hversu lengi kerfið endist jafnvel þótt það hafi verið í vinnslu í áratugi hvað þá þegar ákvörðun er tekin um að virkja á nýju svæði.

Umræðan um sjálfbæra þróun og skilningur á því hvernig nýta skuli endanlegar auðlindir jarðar án þess að yfirgefa upphaflegan siðaboðskap hefur tekið talsverðum breytingum á undanförunum árum. Nú er litið svo á sjálfbæra þróun að hún þurfi ætíð að sameina þrjá þætti; hagkvæmni, félagsleg sjónarmið og eðli auðlinda. Stefnuörkun um nýtingu háhitasvæða þarf að taka mið af ofangreindum þáttum. Af félagslegum ástæðum ætti þéttbýli að hafa forgang að nýtingu háhitasvæða sem eru í nágrenni við þau vegna þess að reynslan hefur sýnt að jarðhitavatn til húshitunar er mjög hagkvæmt og skiptir máli fyrir lífskjör, skapar öryggi og stuðlar að stöðugleika, ekki síst í heimi orkuskorts. Fjölnýting háhita er æskilegri en nýting til raforkuframleiðslu eingöngu því með því móti er auðlindin betur nýtt auk þess sem slík nýting býður upp á atvinnutækifæri sem hafa þjóðhagslegan ávinning. Fjölnýting er helst möguleg

Tafla 2. Vinnsla og úranforði í nokkrum löndum, Úr Survey of Energy Resources (2010). Allar tölur eru í þúsundum tonna af úrani.

Land	Forði <40 US \$/kg U	Forði <260 US \$ /kg U	Ófundnar úran- námur	Vinnsla úrans 2008	Endingar- tími ár
Kanada	267,1	387,4	850	9,00	43
Bandaríkin	0,0	472,1	2.613	1,49	316
Brasilía	139,9	157,7	800	0,33	478

ef svæðin eru innan „atvinnufjarlægðar“ frá þéttbýli. Vissulega er það rétt að raforkuframleiðsla getur aflað mestra tekna fyrir orkuver en ekki dugir að líta einangrað á þennan þátt hagkvæmni í ljósi sjálfbærrar þróunar.

Eignarhald á háhitalindinni og hver nýtir hana hefur áhrif á hvernig arði er skipt. Það er stjórnvalda að móta reglur þar um. Þá hafa ákvarðanir um val á fyrirtæki til virkjunar áhrif á þekkingarstig og atvinnutækifæri tengd þessari auðlind á hinum örsmáa íslenska vinnumarkaði. Það er félagslegur þáttur sem huga þarf að. Loks ber að nefna að nýsköpunar er þörf til að auka möguleika á beinni nýtingu jarðvarma og jafnvel ýmissa efna í jarðhitavatni og jarðgufu. Virkjunarleyfi til raforkuframleiðslu eingöngu flytur þessa möguleika til virkjunaraðila eða leiðir til þess að þeim verður ekki sinnt.

4.2 Írennsli

Þeir tveir þættir sem ráða mestu um afkastagetu jarðhitakerfis fyrir utan stærð þess eru lekt bergsins og írennsli á köldu vatni sem kemur í staðinn fyrir þann heita vökva sem úr kerfinu er tekinn. Kalt írennsli leiðir til þess að bergið í jarðhitakerfinu kólnar um leið og vatnið hitnar og við það gengur á varmaforðann í orkulindinni. Engin tvö jarðhitakerfi eru eins. Bæði jarðfræðileg og grunnvatnsfræðileg bygging er mismunandi. Í sumum kerfum þarf litla lækkun á grunnvatnsborði (þrýstingi) til þess að örva verulega írennsli á köldu vatni. Á öðrum svæðum hefur kælingar ekki orðið vart þrátt fyrir mikla þrýstilækkun í jarðhitalindinni og áratuga vinnslu.

Mjög mikilvægt er að bæta vöktunarmælingar og þróa nýjar til að afla upplýsinga um varmanám úr jarðhitakerfum í vinnslu. Gögn sem fengjust með slíkum mælingum eru nauðsynleg ef reka á einstök jarðhitakerfi á forsendum sjálfbærni. Vegna mikilvægis vöktunarmælinga til að nema kalt írennsli er fjallað nokkuð ítarlega um þær hér á eftir.

Kalt grunnvatn hvort sem það streymir inn í háhita- eða lághitakerfi hitnar við rennsli gegnum heitt berg kerfisins. Nema mætti kælingu með beinni hitamælingu ef eingöngu vatn streymir inn í borholur en það er ekki gerlegt ef suða hefst í aðfærsluæðum. Við allar aðstæður má nota náttúruleg kenniefni eins og klóríð til að nema írennsli á köldu fersku vatni vegna þess að styrkur þessa efnis er lágur í köldu grunnvatni en jafnan mun hærri í jarðhitavatni. Þannig er lækkun á styrk klóríðs í borholuvatni vísbending um írennsli kalds grunnvatns. Ef írennsli í ferskvatnskerfi væri sjór eða sjávarblandað vatn leiddi það til aukningar á klóríðstyrk eins og átt hefur sér stað á hluta Laugarnessvæðisins í Reykjavík (sjá Stefán Arnórsson o.fl., 1992).

Oft lækkar styrkur klóríðs í jarðhitavatni án þess að kæling mælist, a.m.k.í uphafi. Þessi lækkun er forboði kælingar eins og sérstaklega er fjallað um hér að neðan fyrir lághitasvæðið við Selfoss sem kennt er við Laugardæli og Þorleifskot.

Kælingar á vatni sem dælt er úr borholum hefur orðið vart á nokkrum lághitasvæðum; Reykjum í Mosfellsbæ, Laugardælum/Þorleifskoti við Selfoss, Árbæ undir Ingólfsfjalli og Elliðaársvæðinu í Reykjavík. Á nefndum lághitasvæðum takmarkast vinnslugeta ekki við stöðugt grunnvatnsborð heldur áhrif írennslis af köldu grunnvatni á hitastig vatnsins sem úr holum er dælt.

Elliðaárkerfið liggur í tertíer berggrunni en Reykjavíkurgrágrýtið sem er miklu yngra liggur mislægt ofan á honum. Mikið grunnvatn er í Reykjavíkurgrágrýtinu sem streymir niður í sprungur jarðhitakerfisins þegar niðurdráttur verður vegna dælingar úr borholum (Stefán Arnórsson o.fl., 1992). Stöðugt vatnsborð næst eftir u.þ.b. viku dælingu. Eftir um það bil tveggja áratuga vinnslu með djúpdælum (um 1990) hafði jarðhitavatnið kólnað um nær 20°C. Breytingar á efnainnihaldi vatnsins sýndu að kælingin stafaði af blöndun kalds grunnvatns í jarðhitavatnið án þess að kalda grunnvatnið næði að hitna að ráði áður en það streymdi inn í borholur. Reynt var að koma í veg fyrir írennslu á köldu grunnvatni í borholur með því að setja dýpri fóðringar í þær en það skilaði ekki árangri. Ástæðan var sú að kalda grunnvatnið streymir niður um sprungur í berginu. Niðurstaðan var sú að æskilegt væri að minnka vatnstöku sem mest úr þessu svæði og nýta það aðeins í kuldaköstum á vetrum þegar mest þörf væri á heitu vatni til húshitunar (Stefán Arnórsson o.fl., 1992).

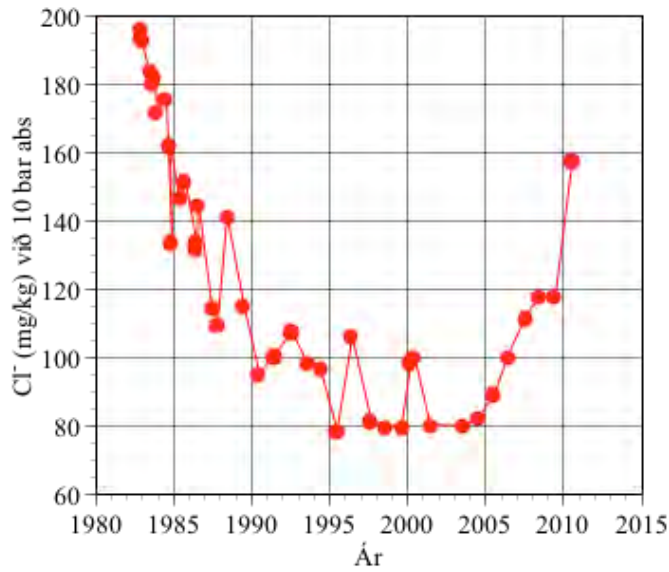
Í Laugardælum og við Þorleifskot rétt austan Selfoss hefur verið dregið úr áhrifum af köldu írennslu með því að bora dýpri holur, en þar hagar svo til að hið kalda vatn sem streymir í svæðið nær upphaflega að hitna verulega við streymi um heitt berg áður en það nær inn í borholur. Írennslíð þekkist á því að styrkur klóríðs í vatninu lækkaði. Það er fyrirboði kælingar (Jens Tómasson og Gísli Karel Halldórsson, 1981). Langlíklegast er að berg næst æðum kólni við hið kalda írennslu sem aftur hitnar sífellt minna eftir því sem tíminn líður.

Vestast á Reykjasvæðinu í Mosfellsbæ fannst mjög góð lekt um 1970 og voru boraðar nokkrar holur þar í hnapp. Fljótlega varð vart mikillar kælingar sem endaði með því að holurnar voru ekki nýtanlegar. Var steypt í þær til að koma í veg fyrir ákaf kalt írennslu um þessar holur niður í jarðhitakerfið. Krísvíkursprungureinin liggur frá Krísvíkursvæðinu um Hjalla í Heiðmörk og Norðurholt norðaustur í Mosfellsbæ. Í sprungureininni er hitastigull nánast enginn sem bendir til mikils streymis á köldu grunnvatni til norðausturs út eftir sprungum reinarinnar. Talið er að hið ákafa írennslu kalds grunnvatns í Reykjakerfið í Mosfellsbæ sé um þessa sprungurein (Stefán Arnórsson o.fl., 1992).

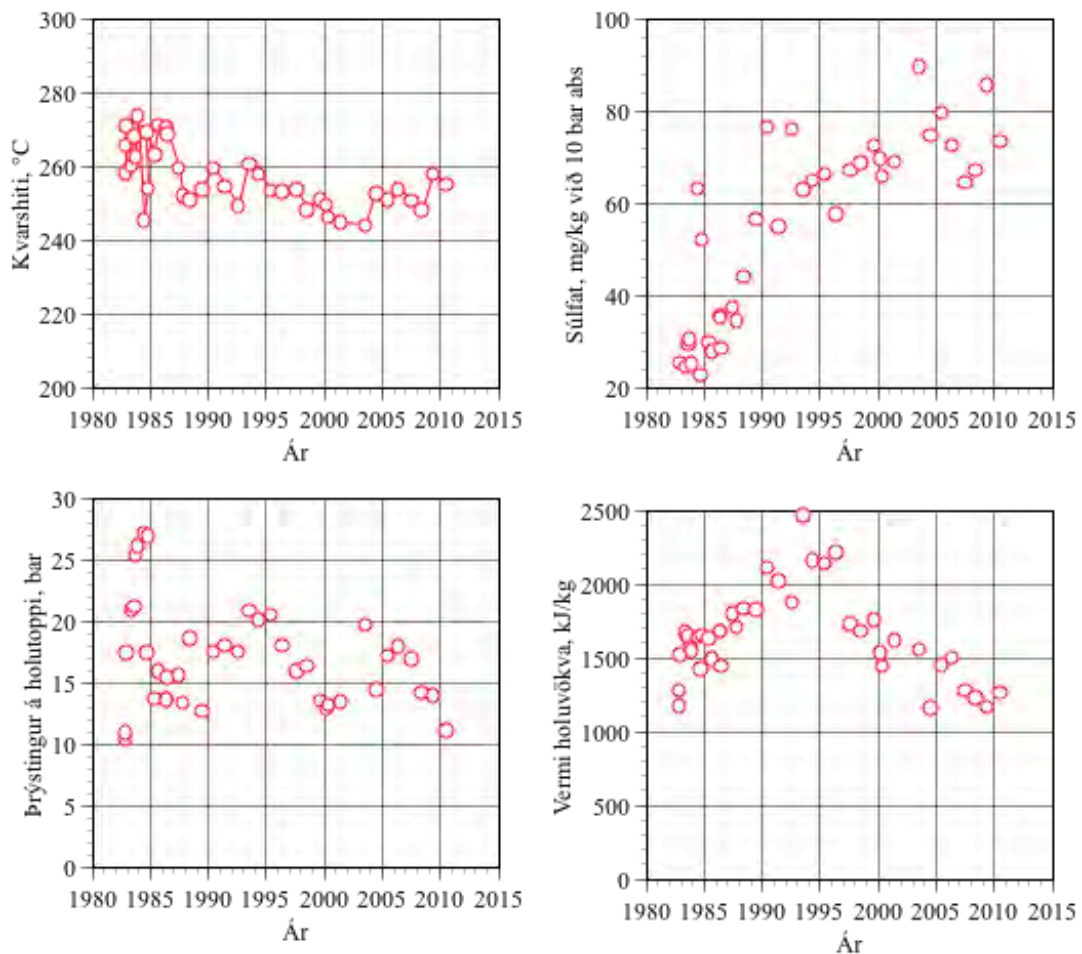
Ofangreind dæmi af lághitakerfum sýna að stöðug orkuupptaka úr kerfunum er ekki möguleg með umtalsverðum niðurdrætti. Vinnsla úr þessum kerfum takmarkast við kælingu á því vatni sem upp er dælt. Á öðrum lághitasvæðum er það írennslíð sjálft, þ.e. lekt bergsins sem er takmarkandi þáttur fyrir stöðugt grunnvatnsborð. Dæmi um slík svæði eru Reykjahlíð í Mosfellsbæ og lághitasvæðin í innanverðum Eyjafirði. Á þessum svæðum nær írennslisvatn að hitna áður en það streymir inn í borholur. Það gæti orsakast af því að borholurnar liggja ekki nærri jöðrum jarðhitakerfanna.

Í háhitakerfum þar sem vatn er sjóðandi er ekki mögulegt að mæla kælingu sem orsakast af köldu írennslu því hiti sjóðandi vatns ræðst af gufuþrýstingi. Í slíkum tilfellum verður að notfæra sér mælingar á lækun á styrk klóríðs í vatninu eða annarra náttúrlegra kenniefna. Þannig var verulegur hluti þess vatns sem streymdi úr einu vinnsluholunni í Hvíthólaklifi í Kröflu (hola 21) kringum síðustu aldamót kalt írennslu, allt upp í helmingur (Björn Guðmundsson og Stefán Arnórsson, 2002; Trausti Hauksson, pers. uppl.). Lækkunar á styrk klóríðs hefur orðið vart í fleiri holum.

Mynd 10 sýnir hvernig styrkur klóríðs í borholuvatni úr holu 21 í Kröflu hefur breyst með tímanum. Fyrstu árin lækkaði styrkur þessa efnis en varð síðan stöðugur fram til ársins 2005

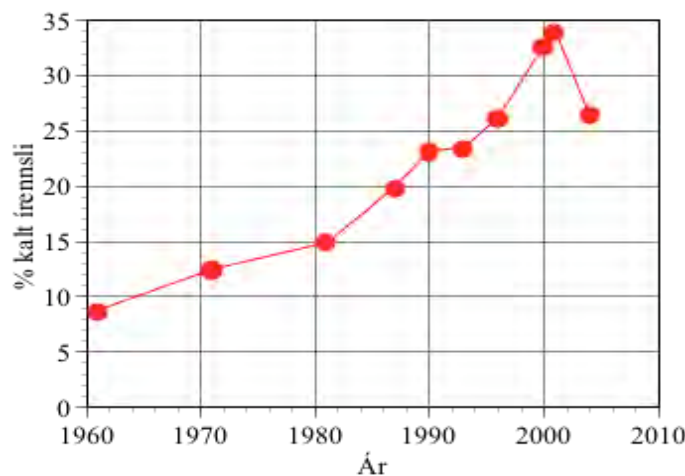


Mynd 10. Breyting á styrk klóríðs (Cl) í vatni í holu 21 í Kröflu. Lækkunin er merki um írennsli á köldu grunnvatni í aðfærsluæð holunnar. Rúmlega helmingslækkun á Cl fram til 2005 er vísbending um að írennsli á köldu grunnvatni í kjölfar vinnslu nemi rúmlega helmingi þess vökva sem streymdi úr holunni á tímabilinu 1995-2005. Eftir árið 2005 hefur styrkur klóríðs farið vaxandi.

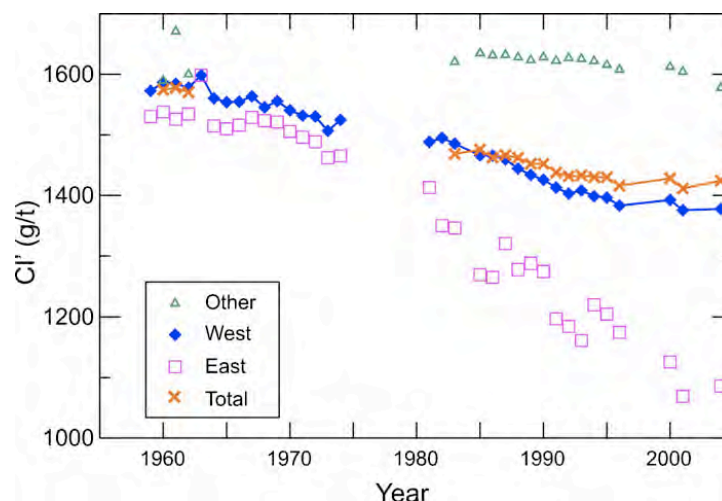


Mynd 11. Hóla 21 í Kröflu. A: Kvarshiti, B: Styrkur súlfats í vatni við 10 bar abs., C: Þrýstingur á holutoppi og D: Vermir holuvökva.

þegar hann tók að hækka aftur. Breytingar á kvarshita eru sambærilegar (mynd 11A). Þessi niðurstaða bendir til þess að upphaflega hafi kalt írennsli átt sér stað og nokkur kæling um leið en síðustu árin hafi hiti í aðfærsluæð holunnar hækkað nokkuð aftur. Kalda írennslisvatnið hefur náð að hitna upp að miklu leyti við rennsli um heitt berg jarðhitakerfisins og endurnýja efnavægi við kvars áður en það flæddi inn í borholuna. Hækkun á styrk súlfats er merki um kælingu á vatni í æð (mynd 11B). Gagnapunktarnir síðustu 5 árin sýna þó mikla dreifingu svo ekki verður ráðið í kerfisbundnar breytingar á súlfati á því tímaseiði. Þrýstingur á holutoppi hefur sveiflast óreglulega og eru orsakirnar óþekktar (mynd 11C). Í upphafi var vermi holuvökva nálægt vermi gufumettaðs vatns við hita í aðfærsluæð. Fram til 1995 hækkaði vermið stöðugt og nálgast vermi mettaðar vatnsgufu, en hefur síðan lækkað og var árið 2010 það sama og í upphafi. Lækkun vermis er vísbending um kalt írennsli.



Mynd 12. Kalt írennsli í jarðhitakerfið í Wairakei frá upphafi vinnslu. Sú breyting sem varð árið 2000 til „lækkunar“ á köldu írennsli endurspeglar hækkun á klóríði. Hún orsakast líklegast af niðurdælingu á klóríðríku skiljuvatni en förgun skiljuvatns með niðurdælingu um borholur hófst 1996.



Mynd 13. Breytingar með tíma á meðalstyrk klóríðs (Cl) í djúpvatni á hinum ýmsu vinnslusvæðum á Wairakeisvæðinu á Nýja-Sjálandi. East: Austur borholusvæði, West: Vestur borholusvæði, Other: Aðallega Te Mihi svæðið, Total: allar holur sem safnað var úr. Úr grein eftir Glover og Mroszek (2009).

Jarðhitasvæðið í Wairakei á Nýja Sjálandi var tekið í notkun 1958. Vinnslusaga svæðisins er flókin. Um miðjan níunda áratuginn var hluti þáverandi borholusvæðis að nálgast endalok arðbærrar nýtingar vegna staðbundinnar kælingar en á öðrum hlutum svæðisins gekk gufuvinnsla vel (Bixley, 1986). Boranir á nýjum stöðum innan svæðisins hafa skilað góðum árangri. Vegna þrýstifalls hefur myndast gufupúði í jarðhitakerfinu og hefur reynst mjög arðbært að vinna gufu úr honum. Írennsli á köldu grunnvatni í svæðið er mikið eftir lækkun á styrk klóríðs í vatninu að dæma (myndir 12 og 13). Um 26% þess vökva sem streymdi frá vinnsluholum árið 1996 var kalt írennsli að uppruna (Glover og Bacon, 2000) en 33,9% árið 2001 (Glover og Mroczek, 2009). Árið 2004 hafði klóríð hækkað verulega frá 2001. Ekki er vitað með vissu hver orsök er, en samkvæmt Glover og Mroczek (2009) kemur þrennt til greina: Tiltölulega meira rennsli frá borholum frá Te Mihi-svæðinu, írennsli úr dýpi jarðlögum og írennsli förgunarmatns í vinnsluholum. Síðasta skýringin virðist nærtækust þar sem niðurdæling skiljuvatns í kerfið hófst 1996. Styrkur kísils í borholuvatni hefur lækkað en það endurspeglar kælingu. Þannig svarar lækkunin til kælingar um tæpar 20°C á 50 ára tímabili (1960-2010) í holu WK-30 og er hún svipuð í mörgum öðrum holum (Glover og Mroczek, 2009). Mannington o.fl. (2004) hafa metið lækkun varmaorku í bergi og vökva í Wairakei-svæðinu með líkanreikningum fyrir breytilega niðurdælingu. Niðurstaða þeirra er sú að niðurdæling í borholusvæði stytta nýtanlegan ævitíma jarðhitakerfisins. Eftir um 100 ára vinnslu (til 2050) er niðurstaða þeirra sú að orkuforði umfram 180°C hafi lækkað úr 1600 PJ í 500-600 PJ, eða um 63-69%. Ítarlegar vöktunarmælingar á Wairakei-svæðinu í meira en hálfa öld sýna svo ekki verður um villst að nýtingunni hefur fylgt varmanám úr bergi. Líkanreikningar byggðir á þessum gögnum gefa til kynna að nýtileg varmaorka svæðisins til raforkuframleiðslu verði upp úrin eftir um 150 ára vinnslu.

5. AÐFERÐAFRÆÐI VIÐ UNDIRBÚNING AÐ NÝTINGU JARÐHITA

Þegar áformum um nýtingu auðlinda í jörðu eins og jarðhita er hrint í framkvæmd, er óvissa um árangur fyrir hendi vegna þess að upplýsingar skortir um eiginleika auðlindarinnar. Það útheimtir nokkurt áhættufé að afla þessara upplýsinga. Ákveðið verklag hefur verið þróað við undirbúning að nýtingu slíkra auðlinda. Rauði þráðurinn í verklaginu byggist á kostnaðarvitund og fagkunnáttu og felur í sér að lágmarka áhættu og kostnað en hámarka árangur. Ef varlega er farið, þarf oft ekki að bora nema fáar holur til að draga að mestu úr óvissu. Til að ná settu takmarki er undirbúningi skipt í áfanga og niðurstöður úr fyrri áfanga eru lagðar til grundvallar ákvörðun um hvort leggja skuli í næsta áfanga. Stór hluti kostnaðar við undirbúning að nýtingu liggur í borunum. Hámarks árangri felur því í sér að bora sem færstar holur með sem minnstum tilkostnaði til að ná til yfirborðs tilskildu flæði af gufu og/eða vatni, ekki aðeins við upphaf vinnslu heldur yfir afskriftartíma virkjunar, jafnvel lengur. Borkostnaður fyrir gufuöflun vegna raforkuframleiðslu er umtalsverður hluti virkjunarkostnaðar, gjarnan 30-40% af heildarkostnaði, þó breytilegur eftir eiginleikum hvers svæðis. Til viðbótar nefndri hagkvæmninálgun hafa nú bæst við sjónarmið um umgengni við auðlind og hið ytra umhverfi. Þannig er jafnan að því stefnt að umhverfisáhrif nýtingar séu í lágmarki og að vinnslan uppfylli sem best skilyrði sjálfbærrar þróunar.

Þar sem talsverð fjárfesting liggur í borunum og óvissa er um vinnslugetu jarðhitakerfa til langtíma litið er það viðhorf orkufyrirtækja algengt að reisa virkjun á nýju svæði svo fljótt sem auðið er og eins litla og talist getur ásættanlegt frá sjónarhóli hagkvæmni. Með því móti fæst fjárfesting í borunum til baka eins fljótt og mögulegt er og með vöktunarmælingum koma viðbrögð jarðhitakerfis við vinnsluálagi í ljós. Þessi viðbrögð eru síðan lögð til grundvallar ákvörðun um stækkun virkjunar eða byggingu nýrrar á sama svæði.

Í námugeiranum er undirbúningi að vinnslu jarðefna gjarnan skipt í fjóra megináfanga sem lýsa því hvar verkið stendur miðað við jákvæða útkomu, sbr. feitlettruðu orðin aftast í hverri línu hér að neðan. Ensku orðin í sviga framan við örvarnar lýsa aðgerðum í hverjum áfanga. Skáletruðu íslensku orðin eru höfundar og eru þau þýðing á þeim ensku í svigunum:

- 1) *Steinefnaleit*³ (mineral prospecting) ⇒ *frávik (anomaly)*
- 2) *Ítarleg athugun á frávik* (study of anomaly) ⇒ *vísbending um steinefnalög (indicated deposit)*
- 3) *Gildismat á steinefnalögum* (evaluation of deposit) ⇒ *þekkt steinefnamyndun (proven deposit)*
- 4) *Hagkvæmniathugun* (economic assessment) ⇒ *hagnýt steinefnanáma (economic deposit)*

Hér að neðan er helstu áföngum að virkjun háhitasvæða lýst og er miðað við tiltölulega stóra jarðgufuvirkjun (50-100 MW). Ekki eru til neinar algildar reglur um hvernig áfangaskipting skuli vera í smáatriðum. Sú áfangaskipting sem höfundur aðhyllist fyrir jarðhita er þessi:

1. *Jarðhitaleit* (geothermal surface exploration)
2. *Leitarboranir* (exploration drillings)
3. *Borun úthola* (drilling of step-out wells)
4. *Borun reynsluhola* (drilling of appraisal wells)
5. *Forhönnun og hagkvæmniathugun* (preliminary design, prefeasibility study)
6. *Ákvörðun um virkjun* (decision to erect a power plant).

³ Stundum nefnt jarðefnaleit.

Jarðhitaleit felur í sér tiltölulegar ódýrar mælingar á yfirborði sem veita *óbeinar upplýsingar* um stærð jarðhitasvæðis, hita í berggrunni og vatnslekar jarðmyndanir. Hinar óbeinu upplýsingar gætu leitt til þess að ákveðið væri að leggja ekki í leitarboranir. Séu þessar upplýsingar hins vegar metnar jákvæðar eru þær lagðar til grundvallar staðsetningu á leitarholu eða -holum. Þannig hefur jarðhitaleit tvíþætt hlutverk.

Boranir: Næsta stig er að afla beinna upplýsinga með borunum. Skili borun leitarholu árangri (e. discovery well), er næsta stig borun úthola. Slíkar holur eru gjarnan boraðar um kílómetra frá árangursríkri leitarholu þótt engar fastar reglur séu til um það. Að öðru jöfnu er rökréttast að staðsetja allar borholur innan tiltekins svæðis með hliðsjón af strúktúr-jarðfræði. Stefnan á að vera sú að allar boraðar holur séu hannaðar og staðsettar þannig að þær geti nýst sem vinnsluholur.

Tilgangurinn með borun úthola er að afmarka vinnslusvæði (e. wellfield). Skili þessar boranir tilætluðum árangri er næsti áfangi að bora reynsluholur (e. appraisal wells) innan þess svæðis sem afmarkað var með borun úthola. Eftir prófanir á öllum borholum og hermireikningum í kjölfarið fást fyrstu upplýsingar um afkastagetu vinnslusvæðis og þar með er lagður grunnur að ákvörðun um stærð virkjunar. Misjafnt er hvað talið er æskilegt að ná upp mikilli gufu/vökva áður en ákvörðun um virkjun er tekin. Á nýjum svæðum er talan gjarnan 80% en e.t.v. ekki meiri en 50% á jarðhitasvæðum sem eru tiltölulega vel þekkt. Eftir að ákvörðun um virkjun hefur verið tekin er borunum haldið áfram á vinnslusvæðinu uns nægileg gufa/vökvi hefur fengist og er þá gjarnan miðað við 10% umfram gufu/vökva vegna þess að gera verður ráð fyrir að rennsli úr borholum dali með tíma. Niðurstöður vöktunarmælinga eftir að virkjun hefur verið tekin í notkun eru nýttar til að uppfæra hermireikningana. Algengt er að spá um vinnslugetuna 25-30 ár fram í tímann, eða sem svarar til eðlilegs afskriftartíma á mannvirkjum. Meðan vinnslusagan er stutt er spáin tiltölulega óviss en hún styrkist eftir því sem byggt er á lengri vinnslusögu.

Með ofangreindu verklagi ætti öllum að vera ljóst hvar verk fyrir undirbúning að vinnslu jarðhita stendur, jafnt jarðvísindamönnum, verkfræðingum, ráðamönnum fyrirtækis sem stjórnmalamönnum. Það er ótvíræður kostur auk þess sem verklagið lágmarkar áhættu.

Meðan ekki liggja fyrir gögn sem gera það kleift að meta afkastagetu vinnslusvæðis má miða við að vinna megi gufu sem nægir til framleiðslu á 15 MW rafafli á hvern ferkílómetra vinnslusvæðis. Hermireikningar leiða síðar í ljós hvort vinnslusvæðið stendur undir slíkri vinnslu eða meiru. Ef gert er ráð fyrir að þykkt jarðhitakerfis sé 1,5 km (500-2000 m dýpi), poruhluti 10% og hiti 250°C dugar vökvinn í hverjum km² svæðis til að framleiða 15 MW_e í 25 ár. Er þá miðað við að 2 kg/sek af gufuflæði þurfi til framleiðslu á 1 MW_e.

Mynsturlíkan (e. conceptual model)⁴: Mörg fræðasvið jarðvísinda tengjast vinnu við jarðhitaleit og síðari boranir, einkum grunnvatnsfræði, jarðeðlisfræði, jarðefnafræði og jarðfræði, auk verkfræði við hönnun borhola og framkvæmd borana. Eftir hvern undirbúningsáfangi að vinnslu þarf að draga saman allar niðurstöður jarðvísindalegra athugana og mælinga í heildstæða mynd af jarðhitalindinni. Takist það er sett fram mynsturlíkan af jarðhitakerfinu. Þetta líkan er síðan endurskoðað eftir því sem nýrra gagna er aflað. Eftirtaldir þættir mynsturlíkansins eru taldir mikilvægastir:

⁴ Orðið conceptual model hefur verið þýtt yfir á íslensku með hugmyndalíkan. Í orðabókum stendur að orðið concept í þeirri merkingu sem hér um ræðir þýði „skilningur á einhverju fyrirbæri sem hugurinn skapar með því að tengja saman alla eiginleika þess“, „setja eitthvað saman“ (þýð. höfundar). Hér er notað orðið mynsturlíkan sbr. Stefán Arnórsson o.fl. (1992).

1. Flæði úr borholum og vermi borholuvökva
2. Dreifing hita og þrýstings í jarðhitakerfinu
3. Dýpi æða (lekra jarðmyndana) og vensl þeirra við jarðmyndanir
4. Útbreiðsla jarðmyndana og ummyndunarsteinda
5. Efnainnihald vatns og gufu í borholum, m.a. með tilliti til útfellinga, tæringar og umhverfisáhrifa.

Mynsturlíkön eru lögð til grundvallar vinnslulíkani til að spá fyrir um aflgetu og endingartíma vinnslusvæðis. Slíkir reikningar koma þó fyrst til eftir að búið er að bora og prófa leitarholur og aðrar borholur.

6. UMHVERFISÁHRIF

6.1 Helstu áhrif á nær- og fjærumhverfið

Borunum og byggingu jarðvarmavirkjana á háhitasvæðum fylgir umtalsvert jarðrask. Raunar eru vinnslusvæði (borholusvæði) og næsta nágrenni stöðvarhúss undirlögð. Af þeim sökum er talið eðlilegt að ákveða þurfi fyrirfram hvort tiltekið háhitasvæði skuli nýtt til orkuvinnslu eða náttúra svæðisins vernduð frá slíkri nýtingu. Helstu umhverfisáhrif af nýtingu eru:

- (1) Jarðrask
- (2) Þornun vatnshvera, aukin gufuhveravirkni
- (3) Gufumengun
- (4) Hávaða- og sjónmengun
- (5) Efnamengun, bæði með loftbornum og vatnsbornum efnum.

Nýting getur einnig leitt til aukinnar smáskjálftavirkni og landsigs. Áhrif efnamengunar á umhverfið geta rýrt gæði grunnvatns til neyslu og spillt lífríki í ám og vötnum. Loftborin mengunarefni geta haft eituráhrif og tært málma og þannig valdið fjárhagslegu tjóni en auk þess haft neikvæð áhrif á heilsu og lífríki.

Sjálfbær nýting háhitalinda tekur bæði til auðlindarinnar sjálfrar og hins ytra umhverfis ásamt félagslegum þáttum og hagkvæmni. Í ljósi þess að stefna stjórnvalda er sú að nýting skuli vera sem sjálfbærust, sbr. bréf til formanns verkefnisstjórnar rammaáætlunar, Svanfríðar Jónasdóttur, dags. 18. október, 2007, er talið nauðsynlegt að tekið sé tillit til allra umhverfisþátta við byggingu og rekstur varmaorkuvera á háhitasvæðum og að um það gildi sérstök og sértæk lög eða reglugerðir. Núgildandi lög um mat á umhverfisáhrifum frá árinu 2000 (nr. 106) eru ekki sniðin með jarðhitanýtingu í huga. Í 1. gr. laganna, lið a. segir að markmið þeirra sé:

... að tryggja að áður en leyfi er veitt fyrir framkvæmd, sem kann vegna staðsetningar, starfsemi sem henni fylgir, eðis eða umfangs að hafa í för með sér umtalsverð umhverfisáhrif, hafi farið fram mat á umhverfisáhrifum viðkomandi framkvæmdar.

Þannig gera lögin ráð fyrir því að allar forsendur liggi fyrir um boranir og hönnun mannvirkja þegar áform um að nýta háhitasvæði verða að veruleika en það er ekki svo, heldur þarf fyrst að leita með borunum hvar vinnslusvæði skuli vera en lega þess svæðis hefur áhrif á hvað reisa skuli stöðvarhús og leggja gufulagnir. Þörf er á að endurskoða þessi lög m.t.t. jarðhitanýtingar. Stefán Arnórsson (2004) hefur lýst þeim áhrifum sem jarðgufuvirkjanir hafa á umhverfið.

6.2 Leiðir til að draga úr umhverfisáhrifum og stuðla að sjálfbærri þróun

Jarðrask og mannvirki á háhitasvæðum valda sjónmengun. Einnig geta háspennulínur frá virkjun haft umtalsverð sjónræn áhrif. Nýting, a.m.k. ef hún er í verulegum mæli, leiðir til þess að vatnshverir með djúpvatni þorna upp en gufuhveravirkni getur aukist. Í þessu sambandi má nefna að nýting jarðgufu til raforkuvinnslu á Reykjanesi hefur leitt til umtalsverðrar aukningar á virkni gufuhvera. Eins hefur nýting jarðvarma á Reykjum og Reykjahlíð í Mosfellsbæ leitt til þess að allir hverir á svæðinu hafa þornað en þar var áður eitt öflugasta lághitasvæði landsins; rennsli úr hverum var um 120 L/s (Barth, 1950).

Þegar vatn eða gufa eru unnin úr jarðhitakerfi fellur vökvaþrýstingur í því og það leiðir til örvunar á írennsli grunnvatns í svæðið, af kaldara grunnvatni ofan frá og frá hliðum, eða jafnvel heitari vökva að neðan. Draga má úr þrýstifalli með því að farga affallsvatni frá orkuveri og gufuskiljum um borholur niður í lindina. Æskilegt er að slík förgun verði

lögboðin, innan eða utan kerfisins enda er það í samræmi við stefnu stjórnvalda um sjálfbæra þróun. Ef varminn í affallsvatninu er nýttur þarf eftir sem áður að farga hinu kælda affallsvatni. Að öðru jöfnu er best að farga um djúpar borholur niður í vinnslusvæðið. Hér þarf þó að gæta varúðar og heimila verður sveigjanlegar áætlanir því skammhlaup getur orðið á vatni frá förgunarholum yfir í vinnsluholur þannig að vinnsluholurnar skemmist, jafnvel ónýttist.

Förgun affallsvatns um djúpar borholur hefur einnig þann kost að koma nánast í veg fyrir mengun á grunn- og yfirborðsvatni af völdum vatnsborinna mengunarefna. Hins vegar er mengun frá loftbornum efnum í gufu alltaf umtalsverð, a.m.k. fyrir gufuaflstöðvar sem hannaðar eru með hefðbundnum hætti (kæliturenum). Þessi efni (aðallega koltvíoxíð, metan og brennisteinsvetni en stundum erlendis einnig bór og kvikasilfur) berast að langmestu leyti út í andrúmsloftið frá kæliturenum og gufupeysum á stöðvarhúsi. Tæknilega séð má minnka slíka mengun, eða nánast koma í veg fyrir hana með því að þétta gufu með vatnskælingu eins og gert er á Nesjavöllum og á Reykjanesi. Með þessu fyrirkomulagi er unnt að hafa mannvirki á yfirborði eins og lokað kerfi. Þá má farga hinum loftbornu efnum með affallsvatni um borholur eða nýta gösin (Stefán Arnórsson, 2004). Eins er mögulegt að draga mjög úr loftmengun ef kæliturenar eru notaðir með því að skilja gastegundir frá gufunni sem kemur frá gufupeysum og farga þeim eða nýta, a.m.k. sumar þeirra. Ef gufa er þétt með köldu ferskvatni skapast möguleiki til fjölnotkunar jarðhitans.

Virkjun í tiltölulega smáum þrepum á tilteknu svæði (50-100 MW_e eftir stærð svæðanna) dregur úr óvissu um árangur og þar með áhættu um afkomu virkjunar, en þessi aðferð stuðlar jafnframt að því að lágmarka jarðrask og sjónmengun. Að virkja í stórum þrepum eykur ekki aðeins óvissu um árangur, sérstaklega til langtíma lítið, heldur einnig líkur á óþarfa jarðraski og því að boraðar verði fleiri holur en annars þyrfti. Við staðsetningu stöðvarhúss er mikilvægt að huga að vindsveipum þannig að gufu frá kæliturenum slái ekki niður, hún byrgi þannig ekki sýn við jörðu og skapi um leið aukið slit á mannvirkjum og hvítleitt vinnuumhverfi.

Flæði úr borholum dalar með tíma. Því þarf að gera ráð fyrir borun viðbótarholna (e. make-up wells) fyrir hverja virkjun samhliða rekstri. Stækkun vinnslusvæðis með borun slíkra holna verður að vera inni í því virkjunarleyfi sem virkjunaraðili byggir á og styðjast við lög.

6.3 Nýting orkulinda og verndun náttúrusvæða

Faghópur I hefur metið náttúru- og menningarminjar á háhitasvæðum og jafnframt umhverfisáhrif orkunýtingar og raðað virkjunarhugmyndum frá þeirri lökustu til hinnar bestu frá sjónarhóli verndargildis náttúru og menningarminja (sjá einnig kafla 7). Þar verður að hafa í huga að háhitasvæði sem tekin eru til virkjunar eru nánast undirlögð þar sem borað er og mannvirki reist.

Mörg háhitasvæði eru eftirsóttir ferðamannastaðir vegna sérstæðrar náttúru en líka vegna sögulegra minja. Á það einkum við um Geysissvæðið í Haukadal, Hveravelli á Kili, Kerlingarfjöll, Torfajökulssvæðið og Öskju. Ef einhver eða öll þessi svæði og hugsanlega önnur yrðu friðuð gegn orkunýtingu þyrfti eftir sem áður að huga að álagi á náttúru þessara svæða vegna ferðamanna. Fari ferðamannastraumurinn mjög vaxandi í framtíðinni gæti það leitt til þess að takmarka þyrfti aðgang og miða við tiltekinn fjölda ferðamanna hvern dag. Jafnvel þótt svæði yrðu friðuð gegn orkunýtingu í stórum stíl, mætti hugsa sér takmarkaða nýtingu með það að leiðarljósi að bæta aðstöðu fyrir ferðamenn og þar með umgengni. Nýta mætti sjálfrennandi hvergi að einhverju leyti með snyrtilegum frágangi eins og á Geysissvæðinu og Hveravöllum á Kili. Eins ætti að koma til greina að leyfa borun hola þar sem vatnshvergi með djúpvatni er ekki að finna, með ströngum takmörkunum þó.

Ákvörðun um verndun einstakra háhitasvæða eða nýtingu þeirra til orkuvinnslu er ætíð erfið, ekki síst vegna þess að sú ákvörðun er sumpart huglæg en sumpart hlutlæg. Með ákvörðun um nýtingu er tekin stefna sem gerir það að verkum að ekki verður aftur snúið. Af þeim ástæðum mætti hugsa sér að setja fleiri en færri háhitasvæði í biðflokk, lofa náttúrunni að njóta vafans.

7. FLOKKUN VIRKJUNARHUGMYNDA OG SJÁLFBÆR ÞRÓUN

7.1 Röðun virkjunarhugmynda

Hlutverk Faghóps IV var að „að skilgreina þá kosti sem fyrir hendi kunna að vera til að nýta vatnsorku og jarðhita til raforkuvinnslu, meta afl, orkugetu og líklegan orkukostnað hvers þeirra og forgangsraða eftir hagkvæmni“ eins og segir orðrétt í skýrslu hópsins.

Verkefnisstjórn rammaáætlunar hefur samþykkt að nota orðið virkjunarhugmynd í stað virkjunarkosts. Að því er varðar háhitann er ástæðan fyrst og fremst sú að gögn eru mjög takmörkuð um sum þessara svæða, einkum þau sem lítið eða ekki er búið að bora í.

Faghópur IV greindi 44 hugmyndir fyrir virkjun jarðgufu á 20 háhitasvæðum og skipti þeim í sex hagkvæmniflokka. Á grundvelli raunkostnaðar nýjustu jarðgufuvirkjana var áætlað að kostnaður við byggingu nýrra virkjana væri 2,5 milljónir bandaríkjadala á hvert MW_e rafafis. Hér er um meðaltalstölu að ræða. Verulegur hluti kostnaðarins (30-40%) er breytilegur, einkum vegna borkostnaðar og eiginleika hvers svæðis. Eins hlýtur lega háhitasvæða miðað við samgöngukerfi landsins að hafa áhrif á hagkvæmni.

Mat Faghóps IV byggir á mjög einfölduðum forsendum og alhæfingum um vinnslugetu og hagkvæmni virkjana á háhitasvæðum til raforkuvinnslu því gögn leyfa ekki annað. Háhitinn er orkulind sem er allt annars eðlis en fallvötnin. Háhitinn einn og sér hentar ekki vel þegar stórnotendur eru annars vegar. Það er bæði mjög dýrt og tímafrekt að afla fullnægjandi upplýsinga um vinnslueiginleika tiltekins háhitasvæðis áður en unnt er að taka rökstudda ákvörðun um gufuvirkjun, stærð hennar og hagkvæmni. Á hinn bóginn er tiltölulega ódýrt að átta sig með góðri nákvæmni á hagkvæmni tiltekinnar vatnsaflsvirkjunar og á skömmum tíma ef góðar rennismælingar eru fyrir hendi. Það gerir það kleift að gera samninga við stórnotendur áður en framkvæmdir við byggingu virkjunar eru hafnar. Andstætt þessu felur það í sér áhættu að gera samkomulag með viljrðum um raforkusölu frá jarðgufuvirkjun til stórnotenda áður en vinnslueiginleikar háhitakerfis hafa verið staðfestir með borunum. Betur hentar að virkja einstök háhitasvæði í tiltölulega smáum þrepum (50-100 MW_e).

Verkefnisstjórn hefur raðað virkjunarhugmyndum fyrir háhita og fallvötn án þess að gera mun á eðli þessara orkulinda. Taki stjórnvöld ákvörðun um að virkja skuli á næstu áratugum verulegan hluta þeirra fallvatna og háhitasvæða sem nú eru óvirkjuð blasir við að slíkar virkjanir verða aðallega fyrir stórnotendur og að lítið sem ekkert munar um vöxt hins almenna markaðar. Höfundur telur eðlilegt að líta svo á röðun Faghóps IV að háhiti víki fyrir fallvötnum í röðinni ef um virkjun er að ræða sem byggir á sölusamningum fyrir stórnotendur (yfir 50-100 MW_e virkjun). Að öðru leyti verður að velja úr röðinni eftir því hversu mikla raforku virkjun skal framleiða og hvert afl hennar þarf að vera, svo og staðsetning miðað við flutningsgetu háspennukerfisins. Sú skilalína sem draga þarf er milli náttúrusvæða sem friða skal og þeirra sem velja skal til nýtingar orkulindanna. Fáist ekki niðurstaða í slíka skiptingu, t.d. vegna takmarkaðra upplýsinga, má setja slík náttúrusvæði í biðflokk.

7.2 Sjálfbær þróun

Faghópur III fjallaði um félagsleg (þjóðhagsmál, atvinnulíf, byggðaðróun) áhrif af virkjun háhita og fallvatna. Hinn félagslegi þáttur er einn þeirra þriggja þátta sem sjálfbær þróun grundvallast á en hinir tengjast eðli auðlindarinnar og hagkvæmni nýtingar hennar (sjá kafla 4). Nýting jarðgufu til raforkuframleiðslu eingöngu fullnægir vissulega hinum hagræna þætti frá sjónarhóli þess aðila sem rekur orkuver, því raforka er verðmætt orkuform og skapar orkuveri af þeirri ástæðu tiltölulega mestu tekjunnar. Á hinn bóginn er sú heildarvarmaorka sem berst til yfirborðs um borholur illa nýtt þegar gufa er eingöngu nýtt til raforkuframleiðslu, 12-14% af varmaorkunni í gufunni er breytt í raforku. Svo takmörkuð nýting auðlindar getur

ekki talist í anda sjálfbærrar þróunar. Þótt lágvarmi sé ekki verðmætt orkuform, hefur reynslan sýnt engu að síður og ekki hvað síst á Íslandi að nýting hans til húshitunar, gróðurhúsa, sundlauga og iðnaðar hefur skipt íslenskt þjóðarþú miklu máli og líklega hefur enginn þáttur haft meiri áhrif á byggðaðróun í landinu eftir síðari heimstyrjöldina en einmitt nýting jarðhita til húshitunar og gróðurhúsa. Þessi nýting er einmitt hagkvæm neytendanum vegna þess að varmagjafinn er ódýr. Auk þess sanna fjölmörg dæmi að nýting lágvarma getur verið atvinnuskapandi og því áhugaverð frá þjóðfélagslegum sjónarhóli, nefnilega hinum félagslega þætti sjálfbærrar þróunar.

Jarðhitavatn og gufa sem eru nýtt beint eru staðbundin auðlind eins og kalt vatn til neyslu og iðnaðar. Evrópusambandið lítur svo á að kalt vatn (vatnsveitur) falli utan ramma samkeppni vegna þess að henni verður ekki við komið þegar um staðbundnar auðlindir er að ræða. Sama gildir um beina notkun jarðvarma.

Byggðarlög sem eiga þess kost að nýta jarðhitavatn til húshitunar þurfa að hugsa langt fram í tímann um skipulag byggðar með tilliti til þekktra eða hugsanlegra jarðhitasvæða og vinna spár um aukna varmaþörf vaxandi byggðar. Þessi hugmynd er ekki ný af nálinni. Jóhannes Zoëga, fyrrverandi forstjóri Hitaveitu Reykjavíkur (nú Orkuveita Reykjavíkur), taldi rétt að íbúar og fyrirtæki á höfuðborgarsvæðinu ættu að hafa forgangsrétt að nýtingu nærliggjandi jarðhitasvæða til húshitunar, háhitasvæði þar með talin. Í ljósi samþykka Evrópusambandsins þarf að skoða það vandlega hvort ekki væri rétt að staðfesta eða setja í lög að jarðhitavökvi til húshitunar sé staðbundin auðlind og að vinnsla hans eigi því ekki að vera í höndum samkeppnisaðila. Í 30. gr., V. kafla Orkulaganna nr. 58/67 segir svo um hitaveitur: „Ráðherra er heimilt að veita sveitarfélögum eða samtökum þeirra einkaleyfi, með þeim skilyrðum, sem lög þessi ákveða, til þess að starfrækja hitaveitur, sem annist dreifingu eða sölu heits vatns eða gufu til almenningsþarfa á tilteknu veitusvæði frá jarðhitastöðvum...“. Eins og orðið hitaveitur er skilgreint hér, og löggin eru skilin, getur hver sem er aflað vatns eða gufu með borunum fyrir hitaveitna. Söluaðili hefði þannig einokunaraðstöðu sem tæplega gæti samræmst tilgangi samkeppni eða almannahagsmunum.

Í raforkulögunum frá 2003 segir m.a að tilgangur laganna sé að

... skapa forsendur fyrir samkeppni í vinnslu og viðskiptum með raforku, með þeim takmörkunum sem nauðsynlegar reynast vegna öryggis raforkuafhendingar og annarra almannahagsmuna ...

Á Íslandi, hjá Evrópusambandinu og víðar hefur raforkugeiranum verið skipt niður í fjórar megin einingar, frjálsa framleiðslu, háspennunet, dreifikerfi og smásölu. Þessi skipting er rökrétt að því er Evrópusambandið varðar. Þar er raforka mest framleidd með kolum, jarðgasi og kjarnorku. Orkugjafarnir eru keyptir á heimsmarkaði og fluttir þangað sem markaðurinn þarfnast þeirra. Við þessar aðstæður á samkeppni um raforkuframleiðslu við sem aðhaldsaðgerð til að stuðla að lágu raforkuverði í almannapágu. Þessu er öðruvísi farið á Íslandi vegna þess að orkugjafarnir eru annars eðlis og þá sérstaklega háhitinn vegna fjölnotkunarmöguleika hans. Verð á raforku sem framleidd er með fallvötnum og jarðgufu er að hluta háð eiginleikum auðlindanna. Þeir eru ekki vitaðir fyrirfram fyrir einstök háhitasvæði og það skekkir samkeppnisstöðu. Veðurfar getur haft áhrif á afkomu vatnsaflsvirkjana en ófyrirséð ofnýting til langs tíma á afkomu jarðgufuvirkjana. Vert er að benda á að samrekstur jarðgufu- og vatnsaflsvirkjana hjá sama fyrirtæki er áhugaverður til að skapa rekstraröryggi. Í slæmum vatnsárum mætti ofnýta háhitasvæði tímabundið en spara þau í góðum vatnsárum. Í raforkulögunum er komið inn á þetta öryggisatriði.

Ætla mætti að árekstrar geti orðið milli þjónustufyrirtækja um beina nýtingu jarðvarma annars vegar og samkeppnisfyrirtækja um raforkuframleiðslu hins vegar. Slíka árekstra mætti hugsanlega leysa með tvennum hætti, annars vegar með því að opinber aðili (ríki, sveitarfélag) ætti og virkjaði háhitasvæði fyrir beina nýtingu en seldi jarðgufu til

raforkuframleiðslu til annars fyrirtækis líkt og orkugjafar eins og kol og jarðgas eru seldir. Einnig mætti hugsa sér að í landinu væru orkufyrirtæki sem þjónuðu þeim aðilum markaðarins sem ekki gerðu beina samninga um raforkuverð. Slík fyrirtæki væru þjónustufyrirtæki.

Lög um mat á umhverfisáhrifum eru ekki sniðin fyrir jarðhitanýtingu. Þau taka ekki mið af því að óvissa ríkir um árangur borana þegar áformum um nýtingu er hrint í framkvæmd, svo og um stærð virkjunar og fyrirkomulag mannvirkja. Um leið og virkjunaraðilar ættu að fá aukið svigrúm til að leita að sem hentugustum vinnslusvæðum innan einstakra háhitasvæða þyrftu lög að setja þeim hömlur um alla umgengi. Virkjunaraðili ætti að sýna fram á aflgetu afmarkaðs vinnslusvæðis með prófunum á borholum og hermireikningum og þar með hver sé æskileg stærð virkjunar áður en virkjunarleyfi væri veitt. Nálgun sem þessi tryggir best að ofnýting eigi sér ekki stað öllum til hagsbóta og um leið að nýtingin verði sem sjálfbærust og hafi sem minnst umhverfisáhrif. Breyta þyrfti lögum um mat á umhverfisáhrifum þannig að þau tækju eðlilegt tillit til undirbúnings virkjana á jarðhitasvæðum.

8. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Eiginleikar háhitakerfa

- Á undanförunum áratugum hefur byggst upp haldgóður skilningur á jarðfræðilegum eiginleikum háhitasvæða, bæði með borunum og athugunum á fornum háhitasvæðum. Eftir sem áður er undirbúningur virkjunar á nýju svæði ætíð nýtt verkefni en ekki endurtekning á undirbúningi virkjunar á þegar nýttum svæðum.
- Varmagjafi háhitakerfa á flekaskilum virðist yfirleitt vera kvika eða storknuð innskot sem eru að kólna. Yfir kvikuhólfum má búast við að jarðhitavökvinn sé súr og jafnvel gasríkur. Þessir efnaþættir skapa rekstrarleg vandamál og rýra gæði gufu.
- Tveir eiginleikar háhitakerfa (á veraldarvísu) hafa orðið þess valdandi að áform um nýtingu hafa ekki ræst, efnaeiginleikar borholuvökva og léleg lekt.
- Borholugögn benda til þess að lekt sé góð í háhitakerfum sem liggja í virkum sprungusveimum á Reykjanesskaga nema á Krísuvíkursvæði, a.m.k hefur góð lekt ekki enn fundist með borunum á því svæði. Annars staðar í gosbeltunum utan megineldstöðva er lekt einnig góð en ætla mætti að hún sé í heildina lakari innan megineldstöðvanna vegna mikillar tíðni innskota eins og reynslan frá Kröflu sýnir.

Nýting

- Þótt varmaflæði út um yfirborð jarðar (geothermal heat flux) sé endurnýjanleg orkulind eru einstök jarðhitakerfi endanleg auðlind, a.m.k. ef nýting er umfangsmikil. Einstök kerfi eru nánast varmanáma.
- Það er háð stærð þessara kerfa og umfangi nýtingar hversu lengi þau endast.
- Beinar upplýsingar skortir yfirleitt um stærð einstakra háhitakerfa og aðra vinnslueiginleika þeirra þegar áform um nýtingu verða að veruleika. Því er mjög mikilvægt að fylgja hefðbundnu verklagi við undirbúning að nýtingu til að hámarka árangur en lágmarka áhættu. Það er gert með því að áfangaskipta undirbúningi (sjá kafla 5) og reisa fyrst tiltölulega smáa virkjun, sjá hvernig jarðhitakerfið bregst við vinnsluálaginu og stækka virkjunina eða byggja aðra nýja í því ljósi. Með þessu móti gæti það tekið einn til tvo áratugi að fullvirkja eitt háhitasvæði.
- Æskilegt er að skilja eftir óborað belti við jaðra háhitasvæða til þess að draga úr hættu á áköfu írennsli af köldu grunnvatni í vinnslusvæði.
- Því fylgir áhætta að reisa stórar jarðgufuvirkjanir í einum áfanga. Af þeim sökum henta háhitakerfi ekki vel til raforkuframleiðslu eigi hún að þjóna stórnotendum einum og sér.

Sjálfbær þróun

- Meðal fjölmargra ríkja veraldar þykir sú siðfræði sjálfsögð að aðhyllast sjálfbæra þróun. Slík þróun tekur alltaf mið af þremur þáttum, hagkvæmni, félagslegum hagsmunum og eðli auðlinda.
- Sjálfbær þróun miðar við að auðlindir jarðar séu sem best nýttar.
- Fjölnotkun háhitasvæða er æskileg í ljósi sjálfbærrar þróunar. Hún miðar að því að hámarka nýtingu varmaorku sem kemur frá borholum. Fjölnýting bætir hagkvæmni virkjana.
- Fjölnotkun eykur fjölbreytni nýtingar, nýsköpun og atvinnutækifæri og hefur með því þjóðhagslegt gildi.

Reynslan

- Nýting varma á háhitasvæðum hérlendis með borunum og bygging orkuvera hefur sýnt sig að geta verið mjög hagkvæm, hvort sem um er að ræða beina notkun til

húshitunar og baða, rafmagnsframleiðslu eða önnur not. Það sanna dæmin í Svartsengi og á Nesjavöllum. Árangurinn stafar að hluta af eiginleikum þessara háhitasvæða.

- Virkjun í Kröflu og virkjanir reistar á þessari öld segja aðra sögu. Meginástæðan er sú að ekki var stuðst við hefðbundið verklag við undirbúning þessara virkjana.

Umhverfisáhrif

- Virkjun háhita í stórum stíl leiðir til mikillar röskunar á landi á virkjunarstað.
- Þegar áformum um virkjun er hrint í framkvæmd, er ætíð til staðar nokkur óvissa um árangur vegna þess að upplýsingar skortir um eiginleika auðlindarinnar. Eðlilegt er að virkjunaraðili búi við það frelsi að mega leita að þeim stað innan hvers háhitasvæðis sem hentar best sem vinnslusvæði.
- Vegagerð vegna borana og seinna meir gufulagna, ásamt byggingu stöðvarhúss og efnistaka, gera það að verkum að háhitasvæði sem tekið er til orkunýtingar er nánast undirlagt.
- Mengun frá háhitavirkjunum orsakast langmest af loft- og vatnsbornum eiturefnum. Önnur umhverfisáhrif eru sjón-, hávaða- og gufumengun. Fjölnotkun varmans býður upp á möguleika á að draga úr umhverfisáhrifum. Sama gerir förgun skiljuvatns og þéttivatns gufu um borholur.

Virkjun og friðun

- Friðun og virkjun á sama háhitasvæði fara yfirleitt ekki vel saman.
- Eðlilegt er að skipta háhitasvæðum í tvo meginflokka, nýtingarflokk (svæði sem taka skal til orkunýtingar) og verndunarflokk (svæði sem friða skal frá slíkri nýtingu).
- Heimila mætti nýtingu í smáum stíl á svæðum sem yrðu friðuð, að því marki að hún þjóni friðuninni og stuðli að bættri umgengni ferðamanna um hin friðuðu svæði.
- Vegna skorts á gögnum er ekki talið unnt að skipta öllum þekktum háhitasvæðum í flokkana tvo á grundvelli raka. Setja mætti svæði í biðflokk uns fullnægjandi gagna hefur verið aflað. Að öðrum kosti má hugsa sér að láta komandi kynslóðum eftir að ákveða hvort nýta skuli orku þessara svæða eða friða þau.

Lagarammi

- Lög um mat á umhverfisáhrifum eru ekki sniðin fyrir jarðhitanýtingu. Þau taka ekki mið af því að óvissa ríkir um árangur borana þegar áformum um nýtingu er hrint í framkvæmd, svo og um stærð virkjunar og fyrirkomulag mannvirkja. Mælt er með endurskoðun þessara laga þannig að þau tryggi sem best að umhverfisáhrif af jarðhitanýtingu verði í lágmarki.

9. TILVITNANIR

- Angcoy, E. C. (2010). *Geochemical modelling of the high-temperature Mahanagdong geothermal field*. Mastersritgerð, Háskóli Íslands.
- Ágúst Guðmundsson (1987). Formation and mechanics of magma reservoirs in Iceland. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **91**, 27-41.
- Barth, T. F. W. (1950). *Volcanic geology, hot springs and geysers of Iceland*. Carnegie Institution of Washington, rit 587.
- Bixley, P. F. (1986). Cooling of the Wairakei reservoir during production. Í ráðstefnuriti *Eleventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, Kalifornía, SGP-TR-93.
- Björn Þ. Guðmundsson og Stefán Arnórsson (2002). Geochemical monitoring of the Krafla and Námafjall areas, N-Iceland. *Geothermics*, **31**, 195-243.
- Davis, J. H. og Davis, R. D. (2010). Earth's surface heat flux. *Solid Earth*, **1**, 5-24.
- Dunstan, M. (1999) Small power plants. Recent developments in geothermal power generation in New Zealand. *Geo Heat Center Bulletin*, desember 1999, 5-12.
- European Union (2009). *Official Journal of the European Union*, 1, 140-16-62.
- Giroud, N. G. (2008). *A chemical study of arsenic, boron and gases in high-temperature fluids in Iceland*. Doktorsritgerð, Háskóli Íslands.
- Glover, R. B. og Bacon, L. (2000). Chemical changes in natural features and well discharges at Wairakei, New Zealand. Í ráðstefnuriti *World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000*, 2081-2086.
- Glover, R. B og Mroczek, E. K. (2009). Chemical changes in natural features and well discharges in response to production at Wairakei, New Zealand. *Geothermics*, **38**, 117-133.
- Guðmundur Pálmason (1973). *Crustal structure of Iceland from explosion seismology*. Societas Scientiarum Islandica, **XL**.
- Guðmundur Pálmason (2005). *Jarðhitabók – eðli og nýting auðlindar*. Reykjavík, Hið íslenska bókmenntafélag.
- Guðmundur Pálmason, Gunnar V. Johnsen, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Karl Ragnars, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gisli Karel Halldórsson (1985). *Mat á jarðvarma Íslands*. Orkustofnun, skýrsla OS-85076/JHD-10.
- Gunnar Böðvarsson (1961). Physical characteristics of natural heat resources in Iceland. *Jökull*, **11**, 29-38.
- Gunnar Böðvarsson (1982). Terrestrial energy currents and transfer in Iceland. Í: Guðmundur Pálmason (ritstj.), *Continental and oceanic rifts. Geodynamic Series, 8, Am. Geophys. Union*, 271-282.
- Halldór Ármannsson, Ásgrímur Guðmundsson og Benedikt S. Steingrímsson (1987). Exploration and development of the Krafla geothermal area. *Jökull*, **37**, 13-30.
- Helgi Björnsson, Sveinbjörn Björnsson og Þorbjörn Sigurgeirsson (1982). Penetration of water into hot rock boundaries of magma at Grímsvötn. *Nature*, **295**, 580-581.
- Hjalti Franzson (1995). Geological aspects of the Svartsengi high-temperature field, Reykjanes Peninsula, Iceland. Í: Kharaka, Y. og Chudaev, O. (ritstj.), *Water-Rock Interaction*, Balkema, Rotterdam, 498-500.
- Hjalti Franzson (1998). Reservoir geology of the Nesjavellir high-temperature field, SW-Iceland. Í ráðstefnuriti *19th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference*, Manila, Philippines, 13-20.
- Hjalti Franzson (2000). Hydrothermal evolution of the Nesjavellir high-temperature system, Iceland, *World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000*, 2075-2080.
- Hjalti Franzson (2004). *Reykjanes high-temperature geothermal system. Geological and geothermal model*. Skýrsla Íslenskra orkurannsókna ISOR-2004/012.
- Hjalti Franzson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Ásgrímur Guðmundsson og Elsa Vilmundardóttir (1997). *Forðafraeðistuðlar. Staða bergfraeðirannsókna í lok 1997*. Skýrsla Orkustofnunar OS-97077.

- Hjalti Franzson, Guðmundur H. Guðfinnsson og Margrét H. Helgadóttir (2010). Porosity, density and chemical composition relationships in altered Icelandic hyaloclastites. Í: Birkie og Torres-Alvarado (ritstj.) *Water-Rock Interaction*, Taylor & Francis Group, London, 199-202.
- Hjalti Franzson, Zierenberg, R. og Schiffman, P. (2008). Chemical transport in geothermal systems in Iceland. Evidence from hydrothermal alteration. *J. Volc. Geothermal Res.*, **173**, 217-229.
- Hofmeister A. M. og Criss, R. E. (2005). Earth's heat flux revised and linked to chemistry. *Tectonophysics*, **395**, 159-177.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2005). *Use of isotope techniques to trace the origin of acidic fluids in geothermal systems*. IAEA Report IAEA-TECDOC-1448.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2010).
- Ingvar Birgir Friðleifsson (1979). Geothermal activity in Iceland. *Jökull*, **29**, 47-56.
- Jens Tómasson og Gísli Karel Halldórsson (1981). The cooling of the Selfoss geothermal area, SW Iceland. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, **5**, 209-212.
- Jón Örn Bjarnason og Magnús Ólafsson (2000). *Í Torfajökli: Efni í jarðgufu og vatni*. Skýrsla Orkustofnunar OS-2000/030.
- Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson (2009). *Mat á vinnslugetu háhitavæða*. Orkustofnun, skýrsla OS-2009/09.
- Kristján Sæmundsson (1991). Jarðfræði Kröflukerfisins. Í: Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstj.) *Náttúra Mývatns*, Hið íslenska náttúrufræðifélag, 25-95.
- Mannington, W. I., O'Sullivan, M. J. O., Bullivant, D. P. og Clotworthy, A. W. (2004). Í raðstefnuriti *Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, Kaliforníu, 26-28. janúar, 2004, STP-TR-175.
- Mineral Commodity Summaries 2010* (2010). U. S. Department of the Interior, U.S. Geol. Survey (minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf).
- Ólafur Jónsson (1945). *Ódáðahraun*. Bókaútgáfan Norðri hf.
- Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Hjalti Franzson, Steinar Þ. Guðlaugsson og Valgarður Stefánsson (2000). Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems, status and unexpected results. Í raðstefnuriti *World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000*, 2881-2886.
- Pollack, H. N., Huerte, S. J. og Johnson, J. R. (1993). Heat-flow from the Earth's interior – Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.*, **31**, 267-280.
- Pope, E. C., Bird, D. K., Stefán Arnórsson, Þráinn Friðriksson, Elders, W. og Guðmundur Ó. Friðleifsson (2009). Isotopic constraints on ice age fluids in active geothermal systems: Reykjanes, Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 4468-4488.
- Sinton, J., Karl Grönvold og Kristján Sæmundsson (2005). Postglacial eruptive history of the western volcanic zone, Iceland. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G³)*, **12**, 1-34.
- Stefán Arnórsson (1995). Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models – I. High-temperature areas. *Geothermics*, **24**, 561-602.
- Stefán Arnórsson (2004). Environmental impact of geothermal energy utilization. Í: Gieré, R. og Stille, P. (ritstj.) *Energy, Waste and the Environment: a geochemical perspective*, Geological Society, London, Special Publication, **236**, 297-336.
- Stefán Arnórsson, Andri Stefánsson og Jón Örn Bjarnason (2007). Fluid-fluid interaction in geothermal systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **65**, 259-312.
- Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson (2008). Geothermal Systems in Iceland. *Jökull*, **58**, 269-302.
- Stefán Arnórsson, Sveinbjörn Björnsson, Haukur Jóhannesson og Einar Gunnlaugsson (1992). Vinnslueiginleikar lághitasvæða Hitaveitu Reykjavíkur. Í: *Árbók Verkfræðingafélags Íslands 1991/1992*, Reykjavík, 344-366.

- Survey of Energy Resources 2010* (2010). World Energy Council – For sustainable energy (www.worldenergy.org/publications/3040.asp).
- Sveinbjörn Björnsson (1980). Jarðhiti, grunnvatn og varmi. *Náttúrufræðingurinn*, **50**, 271-293.
- Valdimar K. Jónsson og Matthías Matthíasson (1974). Hraunkæling á Heimaey – framkvæmdir. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, **59**, 71-82.
- Valgarður Stefánsson (2000). The renewability of geothermal energy. Í ráðstefnuriti *World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000*, 883-888.
- Valgarður Stefánsson, Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson, Hjalti Franzson, Guðmundur Ó. Friðleifsson og Helga Tulinius (1997). Core measurements and geothermal modelling. Í ráðstefnuriti *Second Nordic Symp. on Petrophysics. Fractured reservoir. Nordic Petroleum Series: One*: 198-220.
- Walker, G. P. L. (1963). The Breiddalur central volcano, eastern Iceland. *Quart. J. Geol. Soc., London*, **119**, 29-63.
- Walker, G. P. L. (1974). Eruptive mechanisms in Iceland. Geodynamics of Iceland and the North Atlantic Area. Í: Leó Kristjánsson (ritstj.), *NATO ASI Series*, 189-201.
- Þráinn Friðriksson, Bjarni Reyr Kristjánsson, Halldór Ármannsson, Eygerður Margrétardóttir, Snjólaug Ólafsdóttir og Chiodini, Giovanni (2006). CO₂ emissions and heat flow through soil, fumaroles, and steam heated mud pools at the Reykjanes geothermal area, SW Iceland. *Applied Geochemistry*, **21**, 1551-1569.

APPENDIX C

A Resource/Reserve Classification for Minerals¹

INTRODUCTION

Through the years, geologists, mining engineers, and others operating in the minerals field have used various terms to describe and classify mineral resources, which as defined herein include energy materials. Some of these terms have gained wide use and acceptance, although they are not always used with precisely the same meaning.

The U.S. Geological Survey (USGS) collects information about the quantity and quality of all mineral resources. In 1976, the USGS and the U.S. Bureau of Mines developed a common classification and nomenclature, which was published as USGS Bulletin 1450-A—*“Principles of the Mineral Resource Classification System of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey.”* Experience with this resource classification system showed that some changes were necessary in order to make it more workable in practice and more useful in long-term planning. Therefore, representatives of the USGS and the U.S. Bureau of Mines collaborated to revise Bulletin 1450-A. Their work was published in 1980 as USGS Circular 831—*“Principles of a Resource/Reserve Classification for Minerals.”*

Long-term public and commercial planning must be based on the probability of discovering new deposits, on developing economic extraction processes for currently unworkable deposits, and on knowing which resources are immediately available. Thus, resources must be continuously reassessed in the light of new geologic knowledge, of progress in science and technology, and of shifts in economic and political conditions. To best serve these planning needs, known resources should be classified from two standpoints: (1) purely geologic or physical/chemical characteristics—such as grade, quality, tonnage, thickness, and depth—of the material in place; and (2) profitability analyses based on costs of extracting and marketing the material in a given economy at a given time. The former constitutes important objective scientific information of the resource and a relatively unchanging foundation upon which the latter more valuable economic delineation can be based.

The revised classification system, designed generally for all mineral materials, is shown graphically in figures 1 and 2; its components and their usage are described in the text. The classification of mineral and energy resources is necessarily arbitrary, because definitional criteria do not always coincide with natural boundaries. The system can be used to report the status of mineral and energy-fuel resources for the Nation or for specific areas.

RESOURCE/RESERVE DEFINITIONS

A dictionary definition of resource, “something in reserve or ready if needed,” has been adapted for mineral and energy resources to comprise all materials,

including those only surmised to exist, that have present or anticipated future value.

Resource.—A concentration of naturally occurring solid, liquid, or gaseous material in or on the Earth’s crust in such form and amount that economic extraction of a commodity from the concentration is currently or potentially feasible.

Original Resource.—The amount of a resource before production.

Identified Resources.—Resources whose location, grade, quality, and quantity are known or estimated from specific geologic evidence. Identified resources include economic, marginally economic, and sub-economic components. To reflect varying degrees of geologic certainty, these economic divisions can be subdivided into measured, indicated, and inferred.

Demonstrated.—A term for the sum of measured plus indicated.

Measured.—Quantity is computed from dimensions revealed in outcrops, trenches, workings, or drill holes; grade and(or) quality are computed from the results of detailed sampling. The sites for inspection, sampling, and measurements are spaced so closely and the geologic character is so well defined that size, shape, depth, and mineral content of the resource are well established.

Indicated.—Quantity and grade and(or) quality are computed from information similar to that used for measured resources, but the sites for inspection, sampling, and measurement are farther apart or are otherwise less adequately spaced. The degree of assurance, although lower than that for measured resources, is high enough to assume continuity between points of observation.

Inferred.—Estimates are based on an assumed continuity beyond measured and(or) indicated resources, for which there is geologic evidence. Inferred resources may or may not be supported by samples or measurements.

Reserve Base.—That part of an identified resource that meets specified minimum physical and chemical criteria related to current mining and production practices, including those for grade, quality, thickness, and depth. The reserve base is the in-place demonstrated (measured plus indicated) resource from which reserves are estimated. It may encompass those parts of the resources that have a reasonable potential for becoming economically available within planning horizons beyond those that assume proven technology and current economics. The reserve base includes those resources that are currently economic (reserves), marginally economic (marginal reserves), and some of those that are currently subeconomic (subeconomic resources). The term “geologic reserve” has been applied by others generally to the reserve-base category, but it also may include the inferred-reserve-base category; it is not a part of this classification system.

¹Based on U.S. Geological Survey Circular 831, 1980.

Inferred Reserve Base.—The in-place part of an identified resource from which inferred reserves are estimated. Quantitative estimates are based largely on knowledge of the geologic character of a deposit and for which there may be no samples or measurements. The estimates are based on an assumed continuity beyond the reserve base, for which there is geologic evidence.

Reserves.—That part of the reserve base which could be economically extracted or produced at the time of determination. The term reserves need not signify that extraction facilities are in place and operative. Reserves include only recoverable materials; thus, terms such as “extractable reserves” and “recoverable reserves” are redundant and are not a part of this classification system.

Marginal Reserves.—That part of the reserve base which, at the time of determination, borders on being economically producible. Its essential characteristic is economic uncertainty. Included are resources that would be producible, given postulated changes in economic or technological factors.

Economic.—This term implies that profitable extraction or production under defined investment assumptions has been established, analytically demonstrated, or assumed with reasonable certainty.

Subeconomic Resources.—The part of identified resources that does not meet the economic criteria of reserves and marginal reserves.

Undiscovered Resources.—Resources, the existence of which are only postulated, comprising deposits that are separate from identified resources. Undiscovered resources may be postulated in deposits of such grade and physical location as to render them economic, marginally economic, or subeconomic. To reflect varying degrees of geologic certainty, undiscovered resources may be divided into two parts:

Hypothetical Resources.—Undiscovered resources that are similar to known mineral bodies and that may be reasonably expected to exist in the same producing district or region under analogous geologic conditions. If exploration confirms their existence and reveals enough information about

their quality, grade, and quantity, they will be reclassified as identified resources.

Speculative Resources.—Undiscovered resources that may occur either in known types of deposits in favorable geologic settings where mineral discoveries have not been made, or in types of deposits as yet unrecognized for their economic potential. If exploration confirms their existence and reveals enough information about their quantity, grade, and quality, they will be reclassified as identified resources.

Restricted Resources/Reserves.—That part of any resource/reserve category that is restricted from extraction by laws or regulations. For example, restricted reserves meet all the requirements of reserves except that they are restricted from extraction by laws or regulations.

Other Occurrences.—Materials that are too low grade or for other reasons are not considered potentially economic, in the same sense as the defined resource, may be recognized and their magnitude estimated, but they are not classified as resources. A separate category, labeled other occurrences, is included in figures 1 and 2. In figure 1, the boundary between subeconomic and other occurrences is limited by the concept of current or potential feasibility of economic production, which is required by the definition of a resource. The boundary is obviously uncertain, but limits may be specified in terms of grade, quality, thickness, depth, percent extractable, or other economic-feasibility variables.

Cumulative Production.—The amount of past cumulative production is not, by definition, a part of the resource. Nevertheless, a knowledge of what has been produced is important in order to understand current resources, in terms of both the amount of past production and the amount of residual or remaining in-place resource. A separate space for cumulative production is shown in figures 1 and 2. Residual material left in the ground during current or future extraction should be recorded in the resource category appropriate to its economic-recovery potential.



Torfajökulssvæði, Austur-Reykjadalir.
Mynd tekin sumarið 2008 á vegum *Íslenska landslagsverkefnisins*