

Tillaga til þingsályktunar

um rannsóknir og sjálfbæra nýtingu jarðhitasvæða.

Flm.: Álfheiður Ingadóttir, Kolbrún Halldórsdóttir, Árni Þór Sigurðsson.

Alþingi ályktar að fela ríkisstjórninni að skipa starfshóp sem fái það verkefni að leita leiða til að tryggja að umhverfisáhrifum af framkvæmdum á jarðhitasvæðum verði haldið í algjöru lágmarki. Hópurinn semji verklagsreglur fyrir framkvæmdaraðila sem taki mið af Ríó-yfirlýsingunni; meginreglum umhverfisréttar og öðrum skuldbindandi samningum sem Ísland á aðild að með það að markmiði að nýting jarðvarmans uppfylli skilyrði sjálfbærrar þróunar. Þá verði hópnunum falið að semja tillögur að lagabreytingum með framangreind markmið í huga. Starfshópurinn verði skipaður fulltrúum þingflokka á Alþingi, einum fulltrúa iðnaðar-ráðuneytisins og einum fulltrúa umhverfisráðuneytisins, auk eins fulltrúa frá hverri af eftir-töldum stofnunum Orkustofnun, Íslenskum orkurannsóknunum, Jarðfræðistofnun Háskóla Íslands, Náttúrufræðistofnun Íslands og Stofnun Sæmundar fróða. Forsætisráðherra skipi for-mann starfshópsins. Niðurstöður hópsins verði kynntar Alþingi fyrir árslok 2008.

Greinargerð.

Markmiðið með tillögu þessari er að Alþingi fái til skoðunar rökstuddar tillögur um hvernig lágmarka megi umhverfisröskun við nýtingu jarðhita og hvernig hagnýta megi jarðhitasvæði með sjálfbærum hætti. Tillagan var lögð fram á 133. löggjafarþingi en var ekki útrædd. Iðnaðarnefnd Alþingis sendi hana til umsagnar og í umsögn Orkustofnunar var mælt með því að ríkisstjórnin skipaði starfshóp til að undirbúa meginreglur um sjálfbæra nýtingu jarðhita. Sú hugmynd er grunnur þeirra breytinga sem flutningsmenn hafa nú gert á tillög-unni.

Tillögunni fylgdi greinargerð sem hér fylgir nær óbreytt. Tafla sem fylgdi tilvitnuðum texta úr skýrslu auðlindanefndar, um útgefin rannsóknarleyfi fyrir jarðhita, hefur verið upp-færð og flutt aftur fyrir tilvitnuna.

Undanfarið hafa umræður um óafturkræf umhverfisáhrif stórra vatnsaflsvirkjana orðið til þess að menn hafa í auknum mæli beint sjónum að jarðvarmavirkjunum með þá von í brjósti að slíkar virkjanir skilji ekki eftir eins alvarleg sár í viðkvæmri náttúru landsins og vatns-aflsvirkjanirnar. Umhverfisáhrifin sem blasa við á Hellisheiði í tengslum við framkvæmdir við Hellisheiðarvirkjun benda þó ekki til annars en að töluvert rask fylgi slíkum virkjunum. Þá hafa sjónir manna beinst í auknum mæli að því hvort ná megi meiri orku út úr háhita-svæðunum með nýrri tækni, svokölluðum djúpborunum. Þessi sjónarmið komu afar skýrt fram á Orkuþingi Samorku 2006, þar sem möguleg raforkuframleiðsla með jarðvarma-virkjunum fékk sérstaka athygli. Nokkuð ber á því sjónarmiði að um þær geti náðst meiri sátt en nú ríkir um stórar vatnsaflsvirkjanir á borð við Kárahnjúkavirkjun.

Í fyrsta áfanga rammaáætlunar um nýtingu vatnsafls og jarðvarma var megináhersla lögð á mögulegar vatnsaflsvirkjanir og því er aðeins búið að meta gróflega lítinn hluta mögulegra orkuöflunarkosta í jarðvarma. Þær jarðvarmavirkjanir sem þó komust á blað í fyrsta áfanga

rammaáætlunarinnar virðast fremur sakleysislegar að því er varðar áhrif þeirra á náttúru og umhverfi, með þeim fyrirvara þó að ekki lá fullnægjandi þekking og reynsla að baki matinu á þeim, enda skortir tilfinnanlega rannsóknir á lífríki háhitasvæða.

Umhverfisáhrif af jarðvarmavirkjunum eru þó þekkt að ýmsu leyti og vitað að svæðin eru viðkvæm og lengi að ná sér hafi þeim verið raskað. Þar sem vinnsla er hafin á háhitasvæðum blasa við borplön, stórvaxin háspennumöstur og -línur, haugsvæði, slóðar og þéttriðin net uppbyggðra vega og vatnsröra. Umgengni og frágangi framkvæmdaraðila er í ýmsum tilfellum ábótavant og alkunna er að fyrstu rannsóknir, sýnataka og tilraunaboranir spilla ásýnd svæðanna umtalsvert. Til marks um þetta má nefna að í umsögn Náttúrufræðistofnunar Íslands um umsókn orkufyrirtækja um rannsóknarleyfi í Brennisteinsfjöllum segir m.a.: „Eftir jarðhitarrannsóknir, eins og fyrirhugaðar eru í Brennisteinsfjöllum, verður svæðið ekki lengur ósnortið og forsendur fyrir frekari vernd þess breyttar að sama skapi. Rannsóknaleyfi jafngildir því stefnumörkun um framtíðarnýtingu.“

Um umgengni og mannvirkjagerð á jarðhitasvæðum gilda almenn ákvæði náttúruverndarlaga, nr. 44/1999, sjá t.d. 35. gr., og njóta heitar uppsprettur, hrúður og hrúðurbreiður, 100 m² að stærð eða stærri, sérstakrar verndar, sbr. d-lið 37. gr. sömu laga. Framkvæmdir við jarðhitavirkjanir fara fram að undangengnu umhverfismati. Oft er þó vikið frá upphaflegri hönnun og leyfum hvað varðar efnistöku, haugsvæði og vegagerð og stysta og ódýrasta leiðin valin. Eftirliti með frágangi er gjarnan ábótavant. Þannig valda framkvæmdaraðilar oft óþarfaraski á jarðmyndunum, gróðri og ásýnd jarðhitasvæða, sem hindrar síðari tíma nýtingu svæðanna til ferðamennsku.

Ásókn í rannsóknarleyfi.

Stóru orkufyrirtækin, Landsvirkjun, Orkuveita Reykjavíkur og Hitaveita Suðurnesja, hafa að undanförmu att kappi um rannsóknar- og nýtingarleyfi á flestum ef ekki öllum háhitasvæðum landsins. Þessi fyrirtæki undirbúa einnig í sameiningu verkefnið „Íslensk djúpbörun“ sem ætlað er að þrefalda eða fimmfalda orkunýtingu á háhitasvæðum, en þau áform eru skammt á veg komin og mikil óvissa um árangur.

Í skýrslu auðlindanefndar „Framtíðarsýn um nýtingu auðlinda í jörðu og vatnsafls“ sem kynnt var í október 2006 er birt tafla yfir útgefin rannsóknarleyfi á jarðhitasvæðum og taldar upp þær umsóknir um rannsóknarleyfi sem iðnaðarráðuneytinu hafa borist:

„4.1.1. Útgefin rannsóknarleyfi.

Í ágúst 2006 voru í gildi 7 rannsóknarleyfi fyrir jarðhita, en 2 þeirra sérstaklega vegna hitaveitu. Eins og sjá má í töflu 4.1 þá er hér um að ræða rannsóknarleyfi vegna jarðhita á Hengilssvæði, Kröflusvæði, Þeistareykjum, Hágöngum, Trölladyngju og rannsóknarleyfi á jarðhita vegna hitaveitu í Heimaey og á Berserkseyri í Grundarfirði.

[...]

Einnig er í gildi eitt leyfi til rannsókna á jarðefnum, en þar er um að ræða leyfi sem Melmi ehf. hefur til rannsókna á málmum á 14 tilgreindum stöðum á landinu. Engin leyfi til rannsókna á vatnsafla til raforkuframléiðslu hafa verið gefin út, en hafa verið í huga að ekki þurfti slíkt leyfi fyrr en í febrúar 2006 þegar lög nr. 5/2006 tóku gildi.

4.1.2. Umsóknir um rannsóknarleyfi.

Hjá iðnaðarráðuneyti bíða nú afgreiðslu 21 umsókn um rannsóknarleyfi vegna jarðhita og vatnsafls á 15 svæðum, en þar af eru 12 umsóknir vegna jarðhita og 9 umsóknir vegna vatnsafls. Svæðin sem um er að ræða vegna jarðhita eru Brennisteinsfjöll, Fremri-Námar, Gjá-

stykki, Grændalur, Kelduhverfi, Kerlingafjöll, Krýsuvík og Torfajökulssvæði. Vegna vatnsafls er um að ræða Skjálfafljótið, Hólmsá í Skaftártungu, Tungnaá ofan Sigöldustöðvar, Þjórsá neðan Búrfells, Skaftá (efri hluti), Austari- og Vestari-Jökulsár í Skagafirði og Hagavatn. Einnig bíða afgreiðslu 3 umsóknir um rannsóknarleyfi vegna grunnvatns, en svæðin sem þar er um að ræða eru Fagradalur, Kaldárhöfði og Rauðsgil.“

Útgefin rannsóknarleyfi fyrir jarðhita.

Svæði	Rannsóknarleyfishafi	Gildistími	Útgáfudagur	Athugasemd
Grændalur	RARIK/Sunnlensk orka	10.6.2002	10.6.1999	Fallið niður
Hengillssvæði	Orkuveita Reykjavíkur	1.6.2016	7.5.2001	Ölkelduháls, Hverahlíð
Kröflusvæði	Landsvirkjun	31.5.2009	31.5.2002	Krafla II
Gjástykkissvæði	Landsvirkjun	10.5.2010	10.05.2007	
Þeistareykir	Þeistareykir ehf.	31.12.2008	23.1.2004	
Hágöngur/Köldukvísarbotnar	Landsvirkjun	1.8.2008	1.4.2004	
Trölladyngja	Hitaveita Suðurnesja hf.	1.6.2007	2.6.2000	Leyfi framlengt til 2016
Krýsuvík	Hitaveita Suðurnesja hf.	1.12.2016	8.12.2006	
Kelduneshreppur	Orkuveita Húsavíkur	31.12.2008	19.12.2006	Vegna hitaveitu
Heimaey	Hitaveita Suðurnesja	19.12.2009	20.12.2004	Vegna hitaveitu
Berserkseyri	Orkuveita Reykjavíkur	31.7.2010	17.7.2006	Vegna hitaveitu

Sótt af heimasíðu iðnaðarráðuneytis, 2. október 2007.

Lágmörkun umhverfisáhrifa.

Ásókn orkufyrirtækjanna í rannsóknarleyfi á nýjum og viðkvæmum háhitasvæðum veldur áhyggjum þar sem við blasir eyðilegging á ásynnd og landslagi þar sem rannsóknarleyfi hafa verið veitt eins og t.d. á Reykjanesi og Hellisheiði. Hafa ber í huga að rannsóknarleyfi eru ekki nýtingarleyfi og veita því enga heimild fyrir fullvinnslu orku á viðkomandi svæði. Hins vegar segir það sig sjálft að þegar búið er að raska svæði að hluta með rannsóknum er erfiðara að koma í veg fyrir nýtingu í ljósi þess að svæðinu hefur þegar verið raskað með rannsóknunum. Flutningsmenn tillögunnar telja augljóst að áður en fleiri rannsóknarleyfi eru veitt þurfi að setja ströng skilyrði fyrir veitingu þeirra þannig að leyfisveitingin sem slík leiði ekki af sér óafturkræf spjöll í svo miklum mæli sem hingað til hefur tíðkast og að hún sé ekki ígildi nýtingarleyfis í augum framkvæmdaraðila. Mikilvægt er að setja ítarlegar reglur um umgengni og verklag við rannsóknir háhitasvæða sem tryggir að umhverfisáhrifum af rannsóknunum verði haldið í lágmarki. Þannig er mikilvægt að leita leiða til að rannsóknir kalli ekki sjálfkrafa á að ruddir verði eða byggðir upp vegir og önnur mannvirki. Slíkt ætti að vera framkvæmanlegt með því að gera leyfishöfum skylt að flytja bora og önnur tæki í smærri og léttari einingum á staðinn, helst meðan frost er í jörðu, og með farartækjum á breiðum dekkjum eða þyrlum ef þörf krefur. Jafnframt þarf að herða eftirlit með umgengni og frágangi á vettvangi.

Brýnt er að reglur um lágmörkun umhverfisáhrifa á jarðhitasvæðum liggi fyrir áður en farið verður að úthluta nýjum rannsóknarleyfum á grundvelli tillagna auðlindanefndar.

Sjálfbær nýting.

Reglurnar þurfa einnig að taka til umgengni og vinnulags við nýtingu, rekstur og viðhald jarðvarmavirkjana á háhitasvæðum þannig að vinnsluleyfi jafngildi ekki eyðileggingu á náttúru svæðanna. Slíkt er enda óþarft með nútímataækni og -samgöngum svo sem áður er nefnt. Þannig er t.d. ekki þörf á uppbyggðum vegum að og frá háspennumöstrum vegna viðhalds þar sem viðgerða á þeim er helst þörf yfir háveturinn þegar notast má við snjóbíla og vélsleða.

Grundvallaratriði er þó að nýting jarðvarmans á Íslandi sé sjálfbær. Áhrifasvæði jarðvarmavirkjana er að jafnaði ekki þekkt og ekki til svör við því hvort jarðhitageymirinn nær sér aftur að fullu eða hvort efnasamsetning háhitavökvans breytist við nýtingu. Því er erfitt að fullrða að umhverfisáhrif jarðvarmavirkjana séu vægari en vatnsaflsvirkjana. Þekkt eru dæmi um niðurdrátt á ofnýttum jarðhitasvæðum hér á landi. Þá hefur ofnýting valdið jarðfalli á hverasvæðum t.d. á Nýja-Sjálandi þar sem nýir hverir opnuðust og landslag breyttist verulega. Hófleg nýting jarðhitasvæða til orkuframleiðslu þar sem fullt tillit er tekið til viðkvæmrar náttúru þeirra og verndargildis er því mikilvægt markmið. Einnig þarf að huga að orkunýtingunni, því þegar eingöngu er unnin raforka úr jarðvarma á háhitasvæðum nýtast aðeins 10–15% varmans til orkuframleiðslunnar. Ef affallsvatninu er ekki dælt aftur niður í háhitageyminn fara um 85% varmans til spillis. Ef hins vegar er unnt að nota varmann einnig til húshitunar eða iðnaðar næst önnur og betri nýting og virkjanirnar ættu þá jafnframt að verða hagkvæmari. Þá er þess að gæta að við mat á orkugetu jarðhitasvæða er miðað við að nýtingin vari aðeins í 50 ár og við gerð fjárhagsáætlana er yfirleitt miðað við 30 ára rekstrartíma. Hafa ber í huga að unnt er að nýta svæðin með öðrum hætti um langa framtíð, svo sem í ferðamennsku og útivist. Til að unnt verði að leggja grunn að mati á verndargildi jarðhitasvæða þarf að leggja aukna áherslu á rannsóknir á lífríki og jarðfræði svæðanna. Meta þarf svæðin innbyrðis og innan svæða, þannig að greina megi í sundur vissa hluta víðáttumikilla háhitasvæða þar sem heimila mætti sjálfbærar virkjanir en halda öðrum hlutum friðuðum, þannig að eingöngu verði leyfð þar nýting fyrir útivist og ferðamenn.

Nauðsynlegt er að Alþingi hlutist til um að settar verði reglur um sjálfbærni nýtingarinnar og lágmarkun umhverfisáhrifa af rannsóknum, vinnslu og viðhaldi á jarðhitasvæðum þannig að þær komi að notum þegar mörkuð verður framtíðarstefna um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu. Í þeim tilgangi er tillaga þessi flutt.

Fylgiskjal I.

*Sveinbjörn Björnsson,
Orkustofnun:*

Orkugeta jarðhita.

(Erindi flutt á Orkuþingi 2006, 12.–13. október 2006.)

Ágrip.

Mat á nýtanlegri orku í jarðhita er mun flóknara en matið á vatnsorku. Einnig þarf að greina milli varmafls (MW_e) við beina nýtingu jarðhitans til hitunar og rafafls (MW_c) sem fæst við virkjun jarðgufu og heits vatns. Nýtanleg náttúrleg endurnýjun varmans á háhitasvæðum með varmaflutningi úr iðrum jarðar er talin um 3 GW_e . Hún svarar til þess varmanáms sem fylgir rekstri 300 MW_c rafstöðva. Vinnsla jarðhita veldur lökkun á þrýstingi í jarðhitakerfum sem leiðir til aukins aðstreymis frá nánasta umhverfi. Þetta aðstreymi flytur varma

til kerfanna en samt felur vinnslan yfirleitt í sér hraðara varmanám en náttúrleg endurnýjun og aukið aðstreymi gefa. Því getur vinnslan ekki talist sjálfbær nema hlé séu gerð á henni til þess að leyfa jarðhitakerfinu að jafna sig eftir varmanámið. Einnig þarf að huga að endurheimt fyrri landgæða þegar hlé er gert á vinnslu eða henni hætt. Umhverfisáhrif jarðhitavinnslu virðast að jafnaði minni en í stærri virkjunum vatnsafls þar sem þörf er á stórum miðlunarlónum. Hins vegar eru háhitasvæði sérstæð að náttúruferri og röskun þeirra með mannvirkjum getur spillt gildi þeirra fyrir útivist og ferðamennsku.

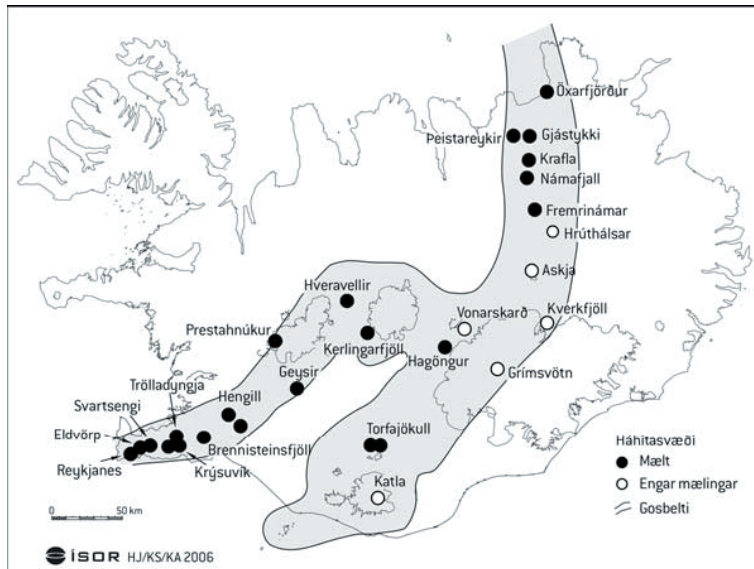
Alls er rafafl jarðhitavirkjana á háhitasvæðum nú 419 MW_e, áformuð aukning nemur 455 MW_e og líkleg viðbót á virkjuðum svæðum og öðrum sem eru í rannsókn er metin 1.105 MW_e. Alls er því líklegt að eftir næsta áratug verði virkjað rafafl frá jarðhita um 2.000 MW_e. Auk þess eru svæði með samanlagt afl um 1.300 MW_e sem hugsanlegt væri að virkja en líklegt er að verði geymd til seinni tíma vegna legu sinnar eða gildis fyrir útivist og ferðamennsku. Það gæti sérstaklega átt við Kerlingarfjöll og Torfajökul, sem er reyndar langstærsta jarðhitasvæði landsins. Aðgengilegur og nýtanlegur varmaforði til raforkuframleiðslu á háhitasvæðum ofan 3 km dýpis reiknast $70 \cdot 10^{18}$ J. Hann dygði til að reka 4.400 MW_e rafstöðvar í 7.000 stundir á ári í 50 ár. Hugsanlegt er að vinna megi tvöfalt meiri raforku en þetta úr varmaforða í efstu 3 km í miðrein gosbeltanna á milli háhitasvæða. Verulegan varmaforða til raforkuframleiðslu er einnig að finna í sjóðandi lágghita á jöðrum gosbeltanna og á heitum svæðum utan þeirra. Ef varmaforði á 3–5 km dýpi reynist tæknilega nýtanlegur er hann ekki minni en forðinn ofan 3 km dýpis. Varmavinnsla utan háhitasvæða og af meira dýpi gæti haft minni umhverfisáhrif en vinnsla á háhitasvæðum og því reynst áhugaverð ef tækni og hagkvæmni leyfa.

Inngangur.

Hér verður fjallað um orkugetu jarðhita til raforkuframleiðslu. Mest er rætt um orkugetu háhitasvæðanna en einnig er minnst á orkuforða og vinnslugetu miðreinar gosbeltanna og heitra svæða á jöðrum gosbeltanna og utan þeirra. Í öðrum erindum þessarar málstofu er fjallað um jarðgufuvirkjanir, þarfir stóriðju, og mat á umhverfisáhrifum jarðhitavinnslu (Þorgeir Þorsteinsson 2006, Agnar Olsen 2006, Auður Andrésdóttir 2006).

Orkugeta háhitasvæðanna.

Þegar rætt er um virkjun jarðhita til raforkuframleiðslu er yfirleitt horft til háhitasvæða í gosbeltunum. Þar er hæstan hita að finna grunnt í bergi og nægilega lekt til þess að vinna megi gufu og vatn með borunum. Óvissa er um orkugetu hvers svæðis meðan aflað er reynslu um viðbrögð jarðhitakerfisins við vinnslunni. Virkjanir eru því byggðar í þrepum og endanleg stærð þeirra ekki vituð í fyrstu (Valgarður Stefánsson 2002). Varmanám við virkjun er yfirleitt mun hraðara en endurnýjun varmans. Þess vegna er stærð virkjunarinnar að miklu leyti undir þeim varmaforða komin sem býr í háhitasvæðinu á því dýpi sem boranir ná til. Orkustofnun birti árið 1985 niðurstöður mats sem byggði á varmaforða í bergi ofan 3 km dýpis á háhitasvæðum, í miðrein og á jöðrum gosbeltanna og á heitum svæðum utan þeirra (Guðmundur Pálmason o.fl. 1985). Matið á varmaforða háhitasvæðanna var notað til að áætla orkugetu þeirra og þá raforku sem þau gætu gefið. Mynd 1 sýnir legu helstu háhitasvæða sem hér eru til umfjöllunar.



Mynd 1. Helstu háhitasvæði (Ísor 2006).

Staða þekkingar á háhitasvæðum er afar misjöfn. Á sumum þeirra hefur farið fram töluverð varmavinnsla í áratugi. Önnur eru aðeins skilgreind eftir yfirborðsmerkjum jarðhita og ummyndunar og legu þeirra innan gosbeltanna. Smáskjálftar eru tíðir á háhitasvæðum og þeir hafa stundum veitt mikilvægar upplýsingar um lekar sprungur og legu varmagjafa. Í fyrsta mati er byggt á jarðfræði, efnunum í vatni og gufu, og mælingum á rafviðnámi bergs en full víska um eiginleika jarðhitakerfanna fæst ekki fyrr en með rannsóknarborunum.

Tafla 1 sýnir stærð háhitasvæðanna og mat á orkugetu þeirra eins og þekking á þeim var við jarðvarmamatið 1985. Í matinu er greint á milli fræðilegrar orku, tæknilega vinnanlegrar orku og hagkvæmrar orku. Einnig þarf að greina milli varmaafls (MW_t) við beina nýtingu jarðhitans til hitunar og rafafls (MW_e) sem fæst við virkjun jarðgufu og heits vatns.

Háhitasvæði	Stærð	Varmaforði 0 – 3 km dýpis	Aðgengi- leiki	Tæknilega vinnanlegur jarðvarmi	
				Varmi 10^{18} J _a	Raforka MW _a ár
	km ²	10^{18} J _a			
Reykjanes	2	4,5	1,0	0,9	1.400 ¹⁾
Svartsengi og Eldvörp	11	22,1	1,0	4,4	5.400
Krýsuvík og Trölladyngja	60	105,0	0,8	16,8	15.100
Brennisteinsfjöll	2	4,0	0,6	0,5	600 ²⁾
Hengill	100	201,0	0,7	28,2	34.500
Geysir	3	6,0	0,9	1,1	1.400
Kerlingarfjöll	11	22,1	0,7	3,1	3.800
Hveravellir	1	2,0	0,9	0,4	450
Prestahnúkur	1	2,0	0,5	0,2	250
Mýrdalsjökull (Kátla)	-	-	-	-	-
Torfajökull	140 ³⁾	281,4	0,7	39,4	48.200
Grímsvötn	65	130,7	0,0	0,0	0
Hágöngusvæði	8	16,1	0,8	2,6	3.200
Vonarskarð	11	22,1	0,6	2,7	3.300
Kverkfjöll	25	50,3	0,2	2,1	2.500
Askja	25	50,3	0,3	3,0	3.700
Hrúthálsar	7	14,1	0,9	2,5	3.100
Fremrinámar	4	8,0	0,9	1,4	1.800
Námafjall	7	15,9	0,9	2,8	4.400
Krafla	30	68,1	0,9	12,3	18.800
Gjástykki	7	14,1	0,8	2,9	3.450
Þeistareykir	19	38,2	0,8	6,1	7.500
Oxarfjörður	30	60,3	0,9	10,9	13.300 ⁴⁾
Samtals	569	1138,3		144,3	176.150

¹⁾ Nú talið 5.000 – 10.000 MW_aár

²⁾ Nú talið 2.000 MW_aár

³⁾ Nú talið 400 km²

⁴⁾ Nú talið sjóðandi lághitasvæði fremur en háhitasvæði

Tafla 1. Stærð helstu háhitasvæða og orkugeta þeirra samkvæmt jarðvarmamati 1985.
(Guðmundur Pálmason o.fl. 1985, Guðmundur Pálmason 2005.)

Háhitasvæði	Víðátta háviðnámskjarna ¹	Tæknilega vinnanlegt afl ²
	km ²	MW _e
Reykjanes	+	200
Svartsengi og Eldvörp	25	120
Krýsuvík og Trölladyngja	105	480
Brennisteinsfjöll	7	40
Hengill	145	600
Geysir	+	
Kerlingarfjöll	+	240
Hveravellir	+	
Mýrdalsjökull (Katla)	-	
Torfajökull	320	1.200
Grímsvötn	-	
Hágöngusvæði	30	120
Vonarskarð	-	120
Kverkfjöll	-	
Askja	-	
Hrúthálsar	-	120
Fremrinámar	+	120
Námafjall	20	90
Krafla	45	240
Gjástykki	10	60
Þeistareykir	45	240
Alls		3.990

¹ + viðnámsmælingar hafa farið fram

- viðnámsmælingar hafa ekki verið gerðar

² Metið eftir víðáttu háviðnámskjarna eða væntingum frá fyrstu könnun þegar niðurstöður viðnámsmælinga liggja ekki fyrir

Tafla 2. Víðátta háviðnámskjarna og tæknilega vinnanlegt afl á helstu háhitasvæðum.

Tafla 2 sýnir nýrra mat á tæknilega vinnanlegu rafafli háhitasvæða. Þar er byggt á víðáttu háviðnámskjarna undir háhitasvæðum þar sem tölur um hana liggja fyrir (Ragna Karlsdóttir, Ísor, pers. uppl. 2006). Annars er byggt á væntingum eftir fyrstu könnun svæðanna með öðrum aðferðum. Einkennandi skipan viðnáms á háhitasvæðum er þannig að undir því svæði sem umlykur jarðhita á yfirborði er lágviðnámskápa. Þar ráða steindir sem þrífast við lægri hita en 240°C og gefa berginu rafviðnám sem er lægra en 10 ohmmetrar. Þegar hiti í berginu fer yfir 240°C víkja þessar steindir fyrir öðrum sem hafa hærra rafviðnám. Undir lágviðnámskápunni erþá háviðnámskjarni og þar er að vænta vatns og gufu með hærri hita en 240°C eins og æskilegt er til raforkuframleiðslu. Í töflu 2 er tilgreind víðátta háviðnámskjarna á 800–1000 m dýpi. Þetta dýpi er valið þar sem borholur nýta yfirleitt ekki vatnsæðar sem liggja grynna. Á Reykjanesi er vökvinn í jarðhitakerfinu jarðsjór og vegnaseltunnar þrífast steindir lágviðnáms þar upp undir 300°C. Lágviðnámskápa á Reykjanesi er um 15 km² en háviðnámskjarninn ekki nema um 1 km². Á Geysissvæði virðist jarðhitinn einnig tengdur uppstreymi um sprungu. Lágviðnámskápa er um 15 km² en háviðnámskjarni mælist ekki. Mælingar hafa verið gerðar í Kerlingarfjöllum og á Hveravöllum en úrvinnsla er ekki lokið. Mælingarhafa ekki enn verið gerðar á Mýrdalsjökli, í Grímsvötnum, Vonarskarði, Kverkfjöllum, Öskju og á Hrúthálsum. Af þessum svæðum er aðeins reiknað með tæknilega vinnanlegu afli á Hrúthálsum. Mælt hefur verið í Fremrinámum en úrvinnsla er ekki lokið. Nýjar mæl-

ingar í Öxarfirði sýna að jarðhitinn er í sprungum en þar virðist ekki vera eiginlegt háhitakerfi.

Háviðnámskjarni er gagnleg vísbending um nýtanlegan háhita en sannprófa þarf með rannsóknarborunum hvort steindasamfélagið (og þar með rafviðnámið) endurspeglar núverandi hita í jarðhitakerfinu eða forsögulegan hita.

Virkjanir á háhitasvæðum.

Hér verður nú stuttlega rakið hvernig mál standa frá sjónarhóli raforkuframleiðslu á þeim háhitasvæðum sem upp eru talin í töflu 1.

Svæðið á Reykjanesi hefur við nánari rannsókn reynst öflugra en áður var talið. Þar er nú rekin 100 MW_e rafstöð og viðbrögð jarðhitakerfisins við þeirri vinnslu munu sýna hvort það getur staðið undir annarri 100 MW_e raforkuframleiðslu. Í Svartsengi er nú auk varmavinnslu til húshitunar 46 MW_e rafstöð og stefnt er að stækkun hennar um 30 MW_e. Hugsanlegt er að raforkuframleiðslan nái síðar 120 MW_e í heild. Rannsóknarboranir fara fram við Trölladyngju innan Krýsuvíkursvæðis en óljóst er enn hvar bestu virkjunarstaðir gætu verið innan svæðisins og hvort það stendur undir þeim væntingum sem jarðhiti á yfirborði gefur. Stærð svæðisins gefur vonir um eina fjóra virkjunarstaði sem hver um sig gæti staðið undir 120 MW_e rafstöð. Nálægð við Kleifarvatn gerir svæðið einnig álitlegt til varmavinnslu fyrir húshitun. Brennisteinsfjöll eru þekkt vegna brennisteinsvinnslu fyrr á öldum en þar eru lítil merki um jarðhita á yfirborði. Lágviðnámskápa er stór en háviðnámskjarni bendir til þess að svæðið gæti staðið undir 40 MW_e rafstöð. Orkufyrirtæki hafa sýnt svæðinu áhuga en andstaða hefur verið við röskun svæðisins vegna þess að þar er að finna óraskaðar eldstöðvar sem eru að verða fágætar í nágrenni höfuðborgarsvæðisins. Hengilssvæðið er nú að hluta virkjað og rannsóknir benda til þess að það standi vel undir þeim væntingum sem til þess hafa verið bornar. Í Nesjavallavirkjun er nú 120 MW_e rafstöð. Hellisheiði I er nýlega tekin til starfa með uppsett afl 90 MW_e og áform eru um Hellisheiði II sem nýtti lágþrýsta gufu og yrði um 35 MW_e og Hellisheiði III með borholur á Skarðsmýrarfjalli sem yrði 120 MW_e. Auk þess eru fyrirhugaðir virkjunarstaðir við Ölkelduháls (135 MW_e) og Hverahlíð (90 MW_e) en líklegt er að Innstadal og Grændal verði hlífð við röskun af umhverfisástæðum. Alls virðist afl rafstöðva á Hengilssvæði geta orðið um 590 MW_e.

Geysisvæðið verður aldrei virkjað en rannsóknir benda til þess að það sé tengt þröngu uppstreymi um sprungu.

Kerlingarfjöll hafa ekki verið mikið rannsökuð en nýlegar viðnámsmælingar á vegum Orkustofnunar hafa staðfest að þar er að vænta hita yfir 250°C. Úrvinnslu mælinga er ekki lokið en stærð svæðisins gæti verið svipuð og í Kröflu. Orkufyrirtæki hafa sýnt svæðinu áhuga en óvíst er um framhald rannsókna þar. Vegna vaxandi gildis Kerlingarfjalla til útivistar gæti virkjun á þessu svæði orðið umdeild. Einnig er til þess horft að svæðið er langt frá háspennulínum nema þær verði lagðar yfir hálendið.

Háhitasvæðið á Hveravöllum er áhugavert vegna gildis þess fyrir ferðaþjónustu. Einnig kann þar að finnast háhiti í nágrenni sem virkja mætti án þess að raska svæðinu á Hveravöllum. Undir Mýrdalsjökli er mikill jarðhiti eins og Jökulsá á Sólheimasandi, Múlakvísl og Skálm bera vitni um. Hann er þó ekki aðgengilegur til nýtingar.

Torfajökulssvæðið er langstærsta háhitasvæði landsins. Merki um jarðhita finnast á svæði sem þekkur um 400 km² og viðnámsmælingar benda til þess að innan háviðnámskjarna mætti koma fyrir 10 virkjunum sem gætu staðið undir 120 MW_e rafstöð hver. Virkjanir á svæðinu munu hins vegar mæta mikilli andstöðu vegna gildis þess fyrir útivist og ferðaþjónustu. Því er líklegt að svæðið verði geymt til síðari tíma og þá ekki virkjað nema að hálfu. Grímsvötn

og Kverkfjöll eru mikil jarðhitasvæði sem verða innan Vatnajökulsþjóðgarðs. Sama gæti orðið um Vonarskarð en Hágöngusvæði sem er að hluta undir Hágöngulóni gæti hugsanlega staðið undir 120 MW_e rafstöð. Hún yrði þó ekki byggð fyrr en háspennulína væri komin yfir Sprengisand. Háhitasvæði í Öskju verður líklega innan stækkaðs Jökulsárþjóðgarðs og tæplega virkjað. Rannsóknir eru hins vegar hafnar á Hrúthálssum og Fremrinámum. Þar gætu verið skilyrði til 120 MW_e virkjunar á hvoru svæði.

Við Námafjall er stefnt að 90 MW_e virkjun. Gufunotkun Kísiliðju er nú hætt en hafinn rekstur baðlóns í svipuðum stíl og í Svartsengi. Svæðið er í viðkvæmu umhverfi Mývatns og reynsla verður að skera úr um frekari virkjanir.

Á Kröflusvæði er nú rekin 60 MW_e rafstöð og næg gufa er til stækkunar hennar í 90 MW_e. Stefnt er að 120 MW_e alls og einnig eru hafnar rannsóknarboranir á vestursvæði Kröflu þar sem menn gera sér vonir um álika virkjun. Ekki er hins vegar líklegt að virkjað verði við Leirhnjúk vegna gildis þess svæðis fyrir útivist og ferðamenn. Rannsóknir á Gjástykki benda til þess að þar sé nýtanlegur háhiti, hugsanlega fyrir 60 MW_e virkjun. Þeistareykjasvæði er mun öflugra enda tengt megineldstöð. Viðnámsmælingar og rannsóknarboranir gefa mönnum vonir um tvo 120 MW_e áfanga í virkjun.

Í Öxarfirði er mikið jarðhitasvæði sem talið var samkvæmt viðnámsmælingum með yfir 250°C hita. Rannsóknarboranir hafa hins vegar ekki fundið hærri hita en um 220°C og ítarlegri viðnámsmælingar benda nú til þess að jarðhitinn sé tengdur sprungum en ekki samfelldur á stærra svæði og almennt ekki heitari en 220°C. Svæðið gæti nýst til verkefna sem nýttu varma beint og hefðu raforkuframleiðslu sem aukagetu.

Niðurstöður þessarar umræðu um álitleg háhitasvæði eru dregnar saman í töflu 3. Fyrst eru tilgreindar þær virkjanir sem nú eru í rekstri, þá áformaðar stækkanir og ágiskun um líklega viðbót sem virkjunarsvæði gætu staðið undir. Alls er afl virkjana á háhitasvæðum nú 419 MW_e, áformuð aukning nemur 455 MW_e og líkleg viðbót á þessum svæðum og öðrum sem eru í rannsókn er metin 1.105 MW_e. Þannig er líklegt að innan skamms verði áhugi á að virkja allt að 1.980 MW_e á þessum svæðum. Hins vegar eru svæði með samanlagt afl um 1.280 MW_e sem hugsanlegt væri að virkja en líklegt er að verði geymd til seinni tíma vegna legu sinnar eða gildis fyrir útivist og ferðamennsku. Það gæti sérstaklega átt við Kerlingarfjöll og Torfajökul.

Háhitasvæði	Virkjað nú MW _e	Áformað nú MW _e	Líkleg viðbót MW _e	Líklegt nú alls MW _e	Hugsanlegt síðar MW _e	Alls MW _e
Reykjanes	100		100	200		200
Svartsengi	46	30		76	44	120
Krýsuvík			480	480		480
Brennisteinsfjöll					40	40
Hengill	210	155	225	590		590
Kerlingarfjöll					240	240
Torfajökull					600	600
Hágöngusvæði					120	120
Hrúthálsar					120	120
Fremrinámar					120	120
Námafjall	3	90		93		93
Krafla	60	60	120	240		240
Gjástykki			60	60		60
Þeistareykir		120	120	240		240
Alls	419	455	1.105	1.979	1.284	3.263

Tafla 3. Virkjanir á háhitasvæðum.

	Varmaforði í bergi ofan 3 km dýpis		Jafngildi í raforkuforða		Rafafl í 50 ár
	Tæknilega nýtanlegur	Þar af yfir 130°C			
	$10^{18} J_t$	$10^{18} J_t$	$10^{18} J_e$	$TW_e h$	MW_e
Háhitavæði	145	70	5,6	1.550	4.400
Miðrein gosbelta	388	166	13,2	3.670	10.500
Jaðrar gosbeltis	2.113	635	38,1	10.600	30.300
Utan gosbeltis	854	207	11,3	3.130	8.900
Allt	3.500	1.078	68,2	18.950	54.100

Tafla 4. Varmaforði í bergi ofan 3 km dýpis og jafngildi í raforkuforða. (Guðmundur Pálmason o.fl. 1985.)

Heildargeta til raforkuframleiðslu.

Tafla 4 dregur saman niðurstöður jarðvarmamatsins frá 1985 á varmaforða til raforkuframleiðslu í heild. Þar er greint á milli varmaforða háhitavæðanna, miðreinar gosbeltanna, jaðra þeirra og svæða utan gosbeltanna.

Varmaforði háhitavæðanna.

Í heild var varmaforðinn ofan 3 km metinn $100.000 \cdot 10^{18} J_t$. Þegar tekið var tillit til aðgengileika og varmaheimtu við vinnslu reiknaðist tæknilega nýtanlegur jarðhiti $3.500 \cdot 10^{18} J_t$, þar af $145 \cdot 10^{18} J_t$ á háhitavæðum. Inni í þessu mati eru flest þekkt háhitavæði landsins en undanskilin eru Grímsvötn og Mýrdalsjökull vegna óaðgengileika. Aðeins hluti af þessum forða er á nægilega háum hita til raforkuframleiðslu. Í matinu var miðað við 130°C sem lægri mörk, fyrir slíka vinnslu. Sá forði reiknaðist $70 \cdot 10^{18} J_t$ á háhitavæðunum. Varma verður aldrei breytt í raforku nema með verulegum afföllum. Þar ræður 2. lögmál varmafræðinnar. Ef miðað er við 130–374°C hita á djúpvatni í bergi er einungis unnt að breyta 3–13% varmans í raforku. Í matinu var notað meðaltalið 8%. Þar með dygði forði háhitavæðanna til að framleiða $5,6 \cdot 10^{18} J_e$ eða 1.550 $TW_e h$ af raforku.

Í þessum reikningum er eingöngu miðað við námavinnslu úr þeim varmaforða sem aðgengilegur er í vatni og bergi. Aflið og orkugetan fara eftir því hversu hröð vinnslan er. Eiginleikar bergs og þrýstingur vatns geta sett vinnslunni efri mörk. Eins getur þótt æskilegt að takmarka vinnsluna í þeim tilgangi að láta forðann endast lengur. Væri forði háhitavæðanna t.d. numinn á 50 árum gæfu þau um 30 $TW_e h/ár$ en eigi vinnslan að endast í 100 ár mætti aðeins taka 15 $TW_e h/ár$. Þetta samsvarar því að reka 4.400 MW_e rafstöðvar í 7.000 stundir á ári í 50 ár, eða 2.200 MW_e í 100 ár.

Þessar tölur eru í góðu samræmi hugmyndir um virkjanir á háhitavæðum samkvæmt töflu 3.

Varmaforði í miðrein gosbeltanna.

Auk vinnslu úr háhitavæðunum er fræðilega mögulegt að vinna varma úr miðrein gosbeltanna á milli háhitavæðanna en þar eru rannsóknir svo skammt á veg komnar að ekki er hægt að telja þá orku tæknilega nýtanlega enn sem komið er. Í matinu var þessi miðrein hugsuð sem 5 km breitt belti eftir endilöngum gosbeltunum og kölluð virkt svæði. Varmaforði

innan hennar yfir 130°C reiknaðist $166 \cdot 10^{18}$ J_t. Með sömu nýtni og á háhitasvæðum gæfu þessi svæði um $3.670 \text{ TW}_e\text{h}$ af raforku, eða um 10.500 MW_e rafstöðvar í 50 ár.

Varmaforði á jöðrum gosbeltanna og utan þeirra.

Verulegan varmaforða með yfir 130°C hita er einnig að finna á jöðrum gosbeltanna utan háhitasvæða og miðreinar og á heitum svæðum utan þeirra. Varmaforði með þennan hita felur í sér fjölbreytta möguleika til nýtingar, þar á meðal til raforkuframleiðslu. Ráfaflíð reiknast tæp 40.000 MW_e í 50 ár en óvíst er um tækni og hagkvæmni.

Varmaforði á 3–5 km dýpi.

Í jarðvarmamatinu 1985 var ekki reiknað með að varmaorka neðan 3 km dýpis væri tæknilega nýtanleg. Óvíst þótti um lekt bergsins og því gæti skort vatn til að flytja varmann. Skjálftar á 3–5 km dýpi benda þó til þess að berg brotni svo langt niður og að þar séu sprungur sem gætu veitt vatni leið niður í heitt bergið. Stefnt er að því að kanna þessar aðstæður með djúpbörðun niður á 5 km. Fyrst yrði borað á háhitasvæðum, þar sem grunnt er talið á kvikuhólf, í von um að ná gufu með $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ hita. Síðar yrði borað í miðrein gosbeltanna, þar sem skjálftar og rafviðnám þykja benda til lektar og hás hita. Ef varmaforði á þessu dýpi reynist tæknilega nýtanlegur er hann ekki minni en forðinn ofan 3 km dýpis.

Náttúrleg endurnýjun.

Í jarðvarmamatinu er ekki gert ráð fyrir neinni náttúrlegri endurnýjun varmans með varmaflutningi að neðan og ekki er heldur reiknað með að þeim afgangsvarma, sem ekki nýtist við raforkuframleiðsluna, sé skilað aftur niður í jarðhitageyminn. Töluverður varmaflutningur er með varmaleiðingu og aðstreymi vatns og kviku úr iðrum jarðar. Gunnar Böðvarsson (1982) mat þennan varmaflutning í heild um 30 GW_t . Þar af kæmu 7 GW_t til yfirborðs í eldgosum, 8 GW_t væru flutt til yfirborðs með rennandi vatni og gufu á háhitasvæðum og 15 GW_t með varmaleiðingu. Á þessum árum var varmaafli Grímsvatna metið 5 GW_t , samkvæmt stærð jökulhlaupa um miðja síðustu öld, en nú er talið að þar hafi gætt áhrifa eldgosa og réttara mat sé um 2 GW_t að jafnaði. Þar með væri varmaflutningurinn í heild 3 GW_t lægri en í tölum Gunnars. Við varmavinnslu úr háhitasvæðum má reikna með að vinnslan geti náð til þess varma sem nú tapast til yfirborðs með rennandi vatni og gufu en hæpið er að hún nái að nokkru marki að nýta þann varma sem nú berst upp og tapast með varmaleiðingu. Ef óaðgengileg háhitasvæði eru undanskilin eins og í jarðvarmamatinu gæti vinnsla á háhitasvæðum nýtt sér um 3 GW_t af náttúrlegri endurnýjun varmans. Þessi endurnýjun nemur um $26 \text{ TW}_t\text{h/ár}$ og með 8% nýtni í raforkuframleiðslu gæfi hún $2,1 \text{ TW}_e\text{h/ár}$. Þetta eru þó aðeins 7% af varmanáminu sem þyrfti til raforkuframleiðslu sem næmi $30 \text{ TW}_e\text{h/ár}$.

Aukið aðstreymi varma.

Vinnsla vatns og gufu úr jarðhitakerfi lækkar þrýsting í kerfinu og eykur aðstreymi til þess frá nánasta umhverfi. Ef vatn og gufa sem streyma að eru álíka heit eða heitari en það sem upp er tekið bætir aðstreymið þann varma sem burt er numinn. Jafnvægi getur náðst þótt vinnslan sé allt að tíföld á við náttúrlegt varmatap svæðisins fyrir virkjun. Glöggd dæmi um þetta eru jarðhitakerfin í Reykjavík og Mosfellssveit. Til lengdar verður þó varmanámið örara en aðstreymið og kerfið kólnar ef það fær ekki að jafna sig með hvíld.

Niðurdæling afgangsvarma.

Ef ekki er unnt að nýta afgangsvarmann frá raforkuframleiðslunni til húshitunar eða iðnaðar er æskilegt að honum sé skilað aftur niður í varmageyminn. Í fyrsta lagi hjálpar niðurdæling afgangsvatns til að halda uppi þrýstingi í jarðhitakerfinu og viðhalda afli í vinnsluholum, auk þess minnkar hún hættu á innrás kaldara vatns frá umhverfi. Varminn í afgangsvatninu bætir einnig fyrir þann varma sem burt var numinn þótt honum sé skilað við lægri hita en þegar hann var tekinn. Í þriðja lagi dregur niðurdæling úr umhverfisspjöllum á landi af völdum afgangsvatnsins, þótt það hafi stundum nýst til baða eins og í Svartsengi og við Námafjall.

Sjálfbær vinnsla og endurheimt landgæða.

Þar sem vinnsla jarðhita felur jafnan í sér varmanám sem er hraðara en endurnýjun varmans með varmaleiðingu eða aðstreymi vatns og gufu, getur vinnslan ekki talist sjálfbær nema hlé séu gerð á henni til þess að leyfa jarðhitakerfinu að jafna sig eftir varmanámið. Um þetta er fjallað í annarri grein á þessu Orkuþingi (Guðni Axelsson o.fl. 2006). Meginniðurstaða hennar er hagkvæmast muni að auka vinnsluna í þrepum en reynist hún of ágeng þurfi að hvíla jarðhitakerfið í álíka eða nokkru lengri tíma en vinnslan hefur staðið. Dæmi um vinnslutíma væri 30 ár en hvíld í 30–50 ár. Ef ágeng vinnsla er stunduð lengi í byrjun getur hún leitt til þess orkugeta kerfisins til lengdar verði minni en það jafnvægi sem næðist með hæfilegum tímabilum vinnslu og hvíldar. Einnig þarf að huga að endurheimt fyrri landgæða þegar hlé er gert á vinnslu eða henni hætt. Um hana má vísa til fyrirmýnda hjá olíuiðnaði og þeirra skilyrða sem hann verður að hlíta um frágang og niðurrif mannvirkja að nýtingu lokinni.

Þakkarorð.

Höfundur vill tileinka þetta erindi minningu Valgarðs Stefánssonar í viðurkenningu á fræðistörfum hans og frumkvæði að rannsókn og nýtingu háhitasvæða.

Hann þakkar Benedikt Steingrímssyni og Rögnu Karlsdóttur gagnlegar ábendingar. Það skal tekið fram að álit og skoðanir í þessu erindi eru á ábyrgð höfundar en ekki Orkustofnunar.

Heimildir.

- Agnar Olsen 2006. Jarðgufuvirkjanir. Orkuþing 2006.
 Auður Andrésdóttir 2006. Mat á umhverfisáhrifum jarðhitavinnslu. Orkuþing 2006.
 Guðmundur Pálmason, Gunnar V. Johnsen, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Karl Ragnars, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gísli Karel Halldórsson 1985. Mat á jarðvarma Íslands. Orkustofnun. OS-85076/JHD-10, 134 bls.
 Guðmundur Pálmason 2005. Jarðhitabók – eðli auðlindar og nýting auðlindar. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík, 298 bls.
 Guðni Axelsson, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson 2006. Hvernig á að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitasvæða? Orkuþing 2006.
 Gunnar Böðvarsson 1982. Terrestrial energy currents and transfer in Iceland. In Continental and ocean rifts. Ed. G. Pálmason, Geodynamics Series 8: 271–282. American Geophysical Union, Washington D.C.
 Valgarður Stefánsson 2002. Virkjun í þrepum. Aðferðafræði við rannsóknir og virkjun háhita til raforkuvinnslu. Málþing Jarðhitafélags Íslands, Norræna húsinu, 21. feb. 2002, 9 bls.
 Þorgeir Þorsteinsson 2006. Þarfir stóriðju. Orkuþing 2006.

Fylgiskjal II.

*Guðni Axelsson,
Sveinbjörn Björnsson og
Valgarður Stefánsson:*

Hvernig á að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitasvæða?

(Erindi flutt á Orkuþingi 2006, 12.–13. október 2006.)

Inngangur.

Hugtakið sjálfbær þróun kom fyrst fram á sjónarsviðið við útgáfu Brundtlandskýrslunnar árið 1987 (World Commission on Environment and Development, 1987). Þar er sjálfbær þróun skilgreind svo að þörfum okkar á líðandi stund eigi að fullnægja þannig að ekki verði gengið á möguleika komandi kynslóða til að uppfylla sínar þarfir. Síðan þá hefur sjálfbær þróun verið mikið í umræðunni og mikilvægi sjálfbærrar nýtingar auðlinda jarðarinnar verður mönnum stöðugt ljósara. Jarðhitinn er ein af þeim orkulindum sem hægt er að nýta á sjálfbæran hátt.

Nokkuð hefur verið fjallað um sjálfbæra nýtingu jarðhitans á undanförunum árum, bæði á innlendum og erlendum vettvangi, einkum vegna þess að hugtakið “sjálfbær” er mjög í tísku um þessar mundir. Samræmda skilgreiningu fyrir jarðhitann hefur þó alveg vantað og menn hafa notað hugtök að eigin geðþótta. Þá má nefna að hugtökunum endurnýjanleika og sjálfbærni er oft ruglað saman, en endurnýjanleiki lýsir eiginleikum orkulindar meðan hugtakið sjálfbær lýsir því hvernig nýtingu hennar er háttað. Sem dæmi um nýlegar umfjallanir má nefna greinar Guðna Axelssonar o.fl. (2005), Valgarðs Stefánssonar og Guðna Axelssonar (2005), Sanyal (2005), Ungemach o.fl. (2005) og O’Sullivan og Mannington (2005) auk greinargerðar Gríms Björnssonar (2005).

Í grein þessari er farið yfir þá skilgreiningu á hugtakinu “sjálfbær vinnsla jarðhita” sem höfundar telja eðlilegasta og raunhæfasta, auk þess að vera í takt við upphaflegu skilgreininguna. Þessi skilgreining er hvorki byggð á fjárhagslegum sjónarmiðum né jarðfræðilegum aðstæðum. Þá er fjallað um hvaða aðferðir koma helst til greina við sjálfbæra jarðhitánýtingu og hvernig megi áætla sjálfbæra vinnslugetu einstakra jarðhitakerfa eða stærri landsvæða. Að síðustu er fjallað um nokkur dæmi um slíkar áætlanir.

Um sjálfbæra vinnslu jarðhitans.

Reynslan af nýtingu fjölmargra jarðhitakerfa síðustu áratugi hefur sýnt að jarðhitavinnslu má haga þannig að jarðhitakerfi, sem áður voru í ótrufluðu náttúrulegu ástandi, ná nýju jafnvægisástandi eftir að stórfelld vinnsla hefst, og henni megi halda í langan tíma. Þrýstingslækkun í jarðhitakerfum vegna vinnslu getur valdið því að innstreymi í kerfin aukist nokkurn veginn í hlutfalli við það magn sem upp er tekið. Guðni Axelsson o.fl. (2001 og 2005) fjalla um nokkur slík dæmi. Eitt besta dæmið er Laugarnessvæðið í Reykjavík, en úr því hefur verið dælt um 5 Mm³ (um 160 l/smeðalvinnsla) að jafnaði árlega síðustu fjóra áratugin á þess að þrýstingur í jarðhitakerfinu hafi lækkað verulega, ef undan eru skilin fyrstu árin. Þannig er talið að innstreymi í jarðhitakerfið sé nú um tífalt það sem var áður en vinnslan hófst. Annað gott dæmi er Matsukawa jarðhitakerfið í Japan, en það hefur einnig verið nýtt í u.þ.b. fjóra áratugi til nokkurn veginn stöðugrar raforkuvinnslu (um 60 kg/s gufuvinnsla að jafnaði). Í öðrum tilfellum hefur jarðhitavinnslan þó verið of ágeng og ekki verið hægt að viðhalda henni til langframa. Nýting Geysers-svæðisins í Kaliforníu er gott dæmi um ágenga vinnslu, en þar var á tímabili meira en 2000 MW raforkuvinnsla, sem síðan hefur orðið að

minnka um nærri helming vegna þess að þrýstingur féll nærri stöðugt í jarðhitakerfinu (Guðni Axelsson o.fl., 2005).

Eðlilegt er að skilgreina sjálfbæra nýtingu jarðhitans sem vinnslu sem á einn eða annan hátt er hægt að viðhalda í mjög langan tíma. Á grundvelli þess og reynslunnar sem vísað er til hér að ofan hafa Guðni Axelsson o.fl. (2001a og 2001b) lagt til eftirfarandi skilgreiningu á hugtakinu „sjálfbær vinnsla jarðhita á einu jarðhitasvæði“:

„Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluaðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttáð að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu frá kerfinu yfir mjög langt tímabil (100–300 ár). Sé vinnsluálag meira en E_0 , er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en eða jöfn E_0 er skilgreind sem sjálfbær vinnsla en vinnsla umfram E_0 er ekki sjálfbær.“

Skilgreining þessi tekur til allrar vinnanlegrar orku, og er því í raun háð eðli viðkomandi jarðhitakerfis. Hún tekur hins vegar hvorki til álagsþátta og nýtni né hagrænna atriða, umhverfismálefna og tækniþróunar, en t.d. má búast við því að E_0 vaxi með tímanum, m.a. vegna dýpri borana. Þá er skilgreiningin einnig háð vinnsluaðferð sem getur falið í sér sjálfrennsli, dælingu, niðurdælingu eða vinnslu með hléum.

Í þessari skilgreiningu er miðað við mun lengri tímakvarða en afskriftartíma jarðhitavirkjana (oft um 30 ár), sem oftast er stuðst við sem tímakvarða þegar vinnslugeta jarðhitakerfa er metin. Á hinn bóginn má hugsa sér tímann frá því Ísland byggðist eða tímakvarða með jarðsögulegri tilvísun, t.d. tímann frá lokum síðustu ísaldar (10.000 ár). Segja má að þetta séu óraunhæfir tímakvarðar ef miðað er við tímakvarða mannegra athafna. Því hefur tímakvarðanum verið valinn staður á milli þessara marka.

Aðferðir við sjálfbæra jarðhitanytingu.

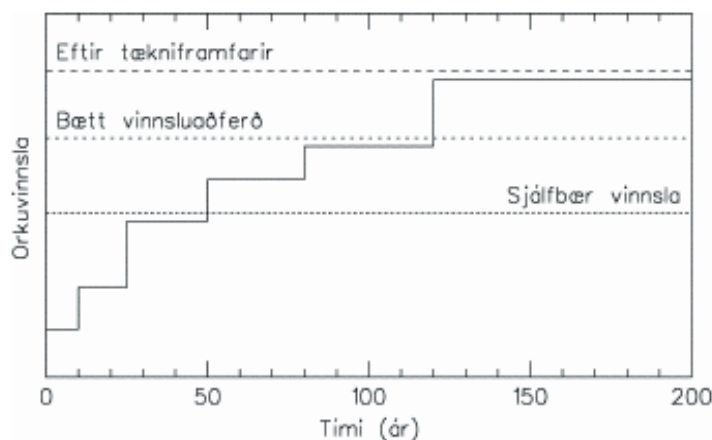
Fyrirsjáanlega má nýta jarðhitakerfi á mismunandi vegu þó miðað sé við skilgreininguna hér að ofan. Í því sambandi þarf að hafa eftirfarandi í huga:

- (A) Sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa er óþekkt við upphaf vinnslu, en hana má meta út frá fyrirbyggjandi gögnum um innri gerð og eðli kerfanna og gögnum um viðbrögð þeirra við vinnslu, eins og fjallað verður um hér á eftir. Slíkar áætlanir verða áreiðanlegri eftir því sem vinnslusaga viðkomandi jarðhitakerfis lengist (meiri gögn safnast um viðbrögð við vinnslu).
- (B) Þá er sjálfbæra vinnslugetan háð vinnslutækninni, jafnt vinnsluaðferðinni sem beitt er og tækniþróunum. Til dæmis má nefna að í flestum tilfellum eykur niðurrennsli/niðurdæling affallsvatns vinnslugetu jarðhitakerfa (Guðni Axelsson, 2004). Þá má reikna með að með dýpri borholum í framtíðinni (4–5 km í stað 2–3 km í dag) megi vinna meiri orku úr mörgum jarðhitakerfum, ekki sist háhitakerfum tengdum eldstöðvakerfum (Guðmundur Ó Friðleifsson o.fl., 2005).

Valgarður Stefánsson og Guðni Axelsson (2005) fjalla um hvernig megi sameina tímalengdina í skilgreiningunni hér að ofan og þá staðreynd að hagkvæmniathuganir sjá að öllu jöfnu aðeins nokkra áratugi fram í tímann. Þeir benda á það að með því að auka orkuvinnslu úr jarðhitakerfi í hæfilegum skrefum megi slá tvær flugur í einu höggi. Annars vegar geti slík skref hæglega verið hagkvæm, vegna hlutfallslega minni upphafsþjárfestingar. Hins vegar nýtast slík skref til þess að meta sjálfbæru vinnslugetuna. Í skrefunum megi áætla hæfilega

stærð næsta skrefs, safna sífellt betri og betri gögnum til áætlana og þannig nálgast sjálfbæru mörkin smátt og smátt.

Mynd 1 er einföld skýringamynd þar sem reynt er að sýna hvernig sjálfbær vinnslugeta er háð vinnsluáðferð og tækniframförum auk þess að sýna dæmi um hvernig auka megir orkuvinnsluna í skrefum upp að sjálfbæru mörkunum (sem breytast með tíma).



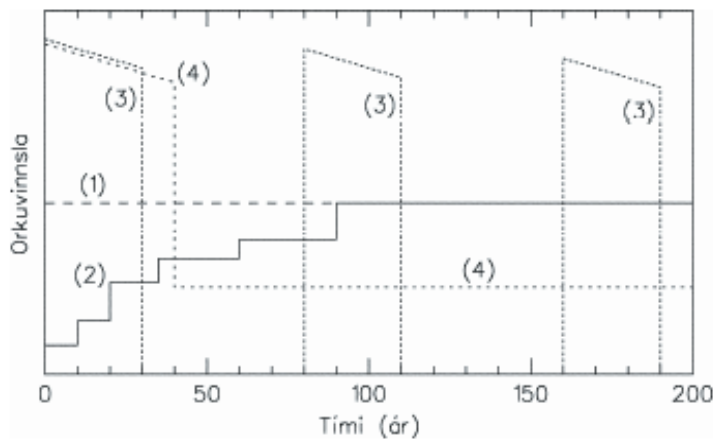
Mynd 1. Skýringarmynd sem sýnir hvernig sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa er háð vinnsluáðferð (t.d. niðurdælingu) og tækniframförum (t.d. dýpri borun). Jafnframt sýnir myndin hvernig hægt er að auka orkuvinnsluna í skrefum samkvæmt hugmyndum Valgarðs Stefáns-sonar og Guðna Axelssonar (2005).

Ofangreind umfjöllun vísar til tveggja sjálfbærra vinnsluáðferða, annars vegar vinnsluaukningar í skrefum upp að sjálfbæru mörkunum og hins vegar nýtingar þar sem vinnslan er stöðug allt frá upphafi. Til viðbótar þessum aðferðum má hugsa sér nýtingu sem er mun ágengari (ekki sjálfbær til lengdar), annað hvort í fyrstu eða þá með hléum. Líkanreikningar hafa sýnt að eftir tímabil ágengrar vinnslu endurheimti jarðhitakerfi að meira eða minna leyti fyrra ástand, þ.e. áhrifin eru að verulegu leyti afturkræf (sjá hér á eftir). Slíkar vinnsluáðferðir eru meira í takt við virkjun margra háhitasvæða í dag. Þau eru virkjuð í stórum skrefum, sem ólíklegt er að séu sjálfbær skv. skilgeiningunni að framan, en eru mjög hagkvæm vegna stærðar sinnar og til þess ætluð að mæta orkuþörf sem vex í stórum skrefum, t.d. vegna stóriðju.

Aðferðirnar til sjálfbærrar jarðhitanytingar sem um er að ræða eru þá þessar helstar:

- (1) Stöðug vinnsla (fyrir utan sveiflur vegna tímabundins álags eins og árssveiflur) í 200 ár. Varla raunhæfur kostur vegna þess að sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa er ekki þekkt fyrirfram. Því þarf í raun e.k. reynslutímabil í upphafi þar til hún hefur verið metin.
- (2) Vinnsla aukin í nokkrum skrefum þar til sjálfbær vinnslugeta hefur verið metin og sjálfbæru mörkunum náð.
- (3) Ágeng vinnsla (ekki sjálfbær) í nokkra áratugi (um 30 ár) með algjörum hléum, e.t.v. nokkru lengri en vinnslutímabilin (um 50 ár), þar sem jarðhitakerfið nær að jafna sig að verulegu leyti í hléunum.
- (4) Ágeng vinnsla í 30–50 ár, síðan stöðug en mun minni vinnsla næstu 150–170 árin. Vinnslan að loknu ágenga tímabilinu yrði þá mun minni en sjálfbær vinnslugeta svæðis við stöðuga vinnslu (aðferð (1)).

Mynd 2 er einföld skýringarmynd fyrir þessar fjórar nýtingaraðferðir.



Mynd 2. Skýringarmynd sem sýnir dæmi um hvernig nýta má jarðhitakerfi sjálfbært á mismunandi vegu. Tölurnar vísa í vinnsluáðferðir sem fjallað er um í textanum.

Aðferðir til að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa.

Líkanreikningar, sem gerðir eru á grundvelli tiltækra upplýsinga um gerð og vinnsluviðbrögð jarðhitakerfa, líka kallaðir hermireikningar, eru öflugasta tækið til þess að meta sjálfbæra vinnslugetu kerfanna. Þeir nýtast einnig til þess að meta þaðhvernig best er að haga vinnslunni í framtíðinni og til þess að meta áhrif mismunandi vinnslutækni, eins og niðurrennsli/niðurdælingar, og hugsanleg áhrif milli nálæggra kerfa við langtíma vinnslu.

Til slíkra líkanreikninga er bæði hægt að nota flókin kubbareiknilíkön eða einfaldari líkön eins og þjöppuð geymslíkön (Guðmundur Pálmason, 2005). Þau fyrrnefndu geta verið mun nákvæmari og hermt jöfnum höndum megin drættina í gerð og eðli jarðhitakerfa sem og viðbrögð þeirra við vinnslu. Þjöppuð líkön eru hins vegar mjög öflug til hermunar á þrýstingsbreytingum, sem eru þær breytingar sem í raun ráða mestu um viðbrögðum jarðhitakerfa við vinnslu til lengri og skemmri tíma. Grundvöllur áreiðanlegra líkanreikninga eru nákvæm og yfirgripsmikil gögn, þ.á.m. gögn um jarðfræðilega byggingu kerfis, eðlisástand þess og ekki síst viðbrögð þess við vinnslu. Síðastnefndu gögnin eru þau sem mikilvægust eru til að meta sjálfbæra afkastagetu jarðhitakerfa og ef matið á að vera áreiðanlegt þurfa viðbragðsgögnin að ná yfir a.m.k. nokkur ár eða jafnvel áratugi, enda þörf á að spá langt fram í tímann.

Ekki er hægt að meta nema mjög gróflaga sjálfbæra afkastagetu jarðhitakerfa, sem ekki hafa enn verið nýtt. Er það vegna þess að í slíkum tilfellum skortir ofangreind gögn um viðbrögð við vinnslu. Þó má styðjast við fyrirliggjandi hugmyndir um stærð jarðhitakerfis og hitaástand auk eiginleika sambærilegra kerfa.

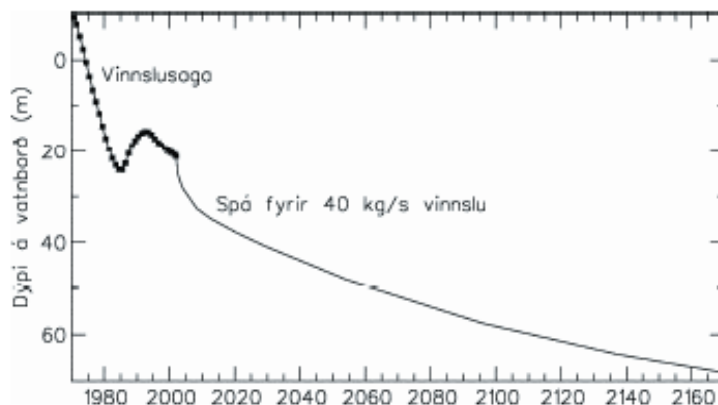
Dæmi um líkanreikninga.

Guðni Axelsson o.fl. (2005) birta niðurstöður líkanreikninga fyrir þrjú jarðhitakerfi, sem gerðir voru til að meta sjálfbæra afkastagetu kerfanna, eða svara spurningum þar að lútandi. Þetta eru jarðhitakerfin við Hamar í Svarfaðardal, sem nýtt er til húshitunar og annarra beinna nota á Dalvík og nágrenni, svokallað Urban jarðhitakerfi undir Beijingborg í Kína, sem nýtt er til beinna nota þar í borg, og að síðustu Nesjavallakerfið á Hengilssvæði austan

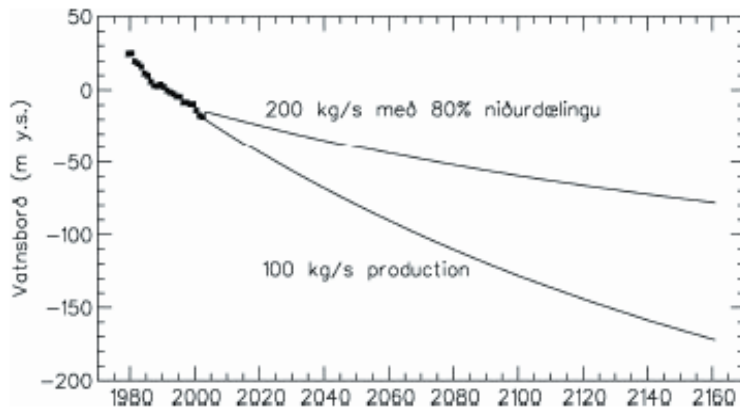
Reykjavík, sem nýtt er bæði til rafmagnsvinnslu og beinna nota. Fyrirnefndu tvö svæðin eru lághitasvæði, en á Nesjavöllum er háhitasvæði, eins og vel er þekkt. Niðurstöðurnar fyrir þessi þrjú svæði eru í stuttu máli eftirfarandi:

Jarðhitasvæðið við Hamar hefur verið nýtt síðan 1969 og síðustu árin hefur ársmeðalvinnslan verið um 30 l/s af 65°C vatni. Við líkanreikningana fyrir Hamarskerfið voru notuð þjappað líkan og einfalt orkuinnihaldslíkan. Niðurstöður reikninganna sýna að sjálfbær vinnslugeta svæðisins er væntanlega nokkru meiri, eða a.m.k. 40 l/s jafnaðarvinnsla (sjá spá um vatnsborðslækkun til ársins 2170 á mynd 3). Hins vegar virðist sem sjálfbær orkuvinnslugeta Hamarskerfisins takmarkist af orkuinnihaldi og smæð kerfisins, en ekki þrýstingslækkun (vatnsbúskap).

Urban jarðhitakerfið er í lekum setlögum (kalksteini) á 1–4 km dýpi undir Beijing og hefur verið nýtt síðan á áttunda áratug síðustu aldar. Ársmeðalvinnslan þar hefur lengst af verið rúmlega 100 l/s af 40–90 °C vatni (aðallega nýtt 4 köldustu mánuði ársins). Viðbrögð jarðhitakerfisins við þessari vinnslu og líkanreikningar með þjöppuðu líkani (sjá vatnsborðsspár á mynd 4) sýna að vinnslugeta Urbankerfisins takmarkast af litlu innstreymi vatns í kerfið (endurnýjun vatnsforðans), en ekki orkuinnihaldi. Vinnslugetan stjórnast einfaldlega af vatnsskorti. Líkanreikningarnir sýna að sjálfbær vinnslugeta kerfisins er lítil, eða innan við 100 l/s ársmeðalvinnsla (fer þó eftir því hvað menn munu setta sig við mikinn niðurdrátt vatnsborðs eftir 100–200 ár). Með breyttri vinnsluaðferð, sem fæli í sér niurdælingu stórs hluta þess vatns sem upp er tekið, væri sjálfbær vinnslugetan þó mun meiri, eða a.m.k. 200 l/s ársmeðalvinnsla. Það er tvöföldun þeirrar vinnslu sem verið hefur úr kerfinu.



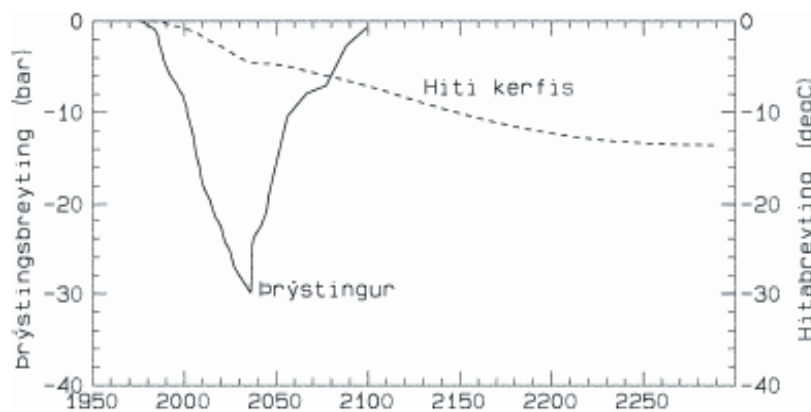
Mynd 3. Spár um vatnsborðsbreytingar (þrýstingslækkun) í jarðhitakerfinu á Hamri í Svarf- aðardal til ársins 2170 fyrir um 30% aukningu frá núverandi meðalvinnslu (Guðni Axelsson o.fl., 2005).



Mynd 4. Spár um vatnsborðsbreytingar (þrýstingslækkun) í Urbanjarðhitakerfinu undir Beijingborg í Kína til ársins 2160 fyrir vinnslutilfelli með og án niðurdælingar (Guðni Axelsson o.fl., 2005).

Nesjavellir eru eitt jarðhitasvæðanna á Hengilssvæðinu og hefur svæðið verið nýtt síðan 1990, fyrst til varmaorkuvinnslu en seinna einnig til raforkuvinnslu. Í dag svarar afkastageta orkuversins á Nesjavöllum til 120 MW rafafls og 400 MW varmafls. Fyrir Nesjavallakerfið hafa bæði verið sett upp flókið kubbalíkan og einfaldara þjappað líkan og er núverandi kubbalíkan hluti af mjög stóru og flóknu kubbalíkani, sem sett hefur verið upp fyrir allt Hengils/Hellisheiðarsvæðið og nágrenni þess. Niðurstöður reikninga með þessum líkönum sýna að núverandi vinnsla er ekki sjálfbær í skilningi skilgreiningarinnar að framan, þ.e. ekki verður hægt að halda vinnslunni óbreyttri í 100–300 ár. Líkanreikningarnir sýna hins vegar að áhrif þeirrar ágengu vinnslu sem nú er í gangi ættu að vera að mestu afturkræf.

Mynd 5 sýnir að þrýstingur í kerfinu mun jafna sig á svipuðum tíma og ágenga vinnslan mun standa. Hitaáhrifin, sem reyndar eru mjög lítil og mun verr ákvörðuð en þrýstiáhrifin, vara hins vegar mun lengur skv. líkanreikningunum. Því ætti að vera hægt að nýta Nesjavallasvæðið skv. vinnsluáferð (3), sem lýst er hér að framan (mynd 2).

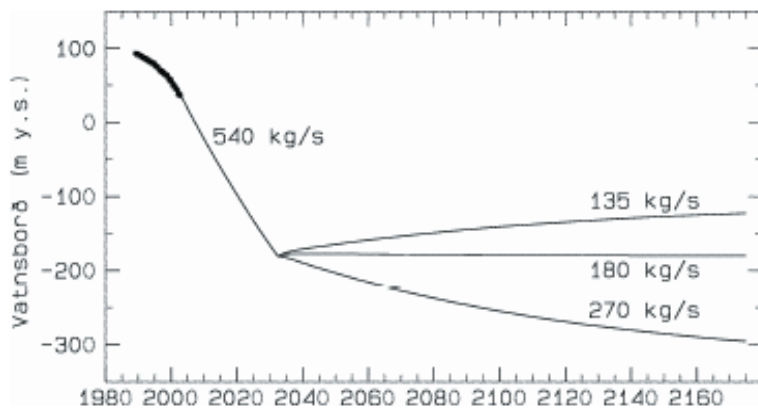


Mynd 5. Reiknaðar breytingar í þrýstingi og hita í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum fyrir ágenga vinnslu til 2036 og hvíld að henni lokinni (Guðni Axelsson o.fl., 2005).

Einnig má hugsa sér að nýta Nesjavallakerfið skv. vinnsluáferð (4), þ.e. með mun minni vinnslu að loknu ágenga tímabilinu. Niðurstöður hermireikninga þar að lútandi eru birtar á mynd 6. Þær sýna að líklega megi viðhalda um 180–200 kg/s vinnslu í 150 ár að loknu ágenga tímabilinu. Þetta er þó aðeins um 1/3 vinnslunnar á Nesjavöllum í dag.

Lokaorð.

Í greininni hefur verið fjallað um hvernig nýta megi jarðhita á sjálfbæran hátt, og hvernig meta má sjálfbæra afkastagetu jarðhitakerfa, ef gengið er út frá skilgreiningu þar sem sjálfbær nýting jarðhitans er skilgreind sem orkuvinnsla sem hægt er að viðhalda í 100–300 ár. Færð eru rök fyrir því að hægt sé að nýta jarðhita á sjálfbæran hátt annað hvort með (1) stöðugri vinnslu undir sjálfbæru mörkunum, (2) þrepauppbyggingu vinnslunnar, (3) ágengri vinnslu og hléum á víxl og (4) skertri vinnslu eftir styttra tímabil ágengrar vinnslu. Niðurstöður líkanreikninga fyrir þrjú ólík jarðhitakerfi sýna að sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa getur bæði takmarkast af orkuinnihaldi kerfis eða þrýstingslækkun vegna takmarkaðs aðstreymis. Í seinna tilfallinu getur niðurdæling/niðurrennsli aukið sjálfbæru vinnslugetuna verulega. Þá sýna líkanreikningar fyrir háhitasvæðið á Nesjavöllum að áhrif tímabundinnar og ágengrar vinnslu, eins og nú stendur yfir þar, ættu að vera afturkræf að verulegu leyti. Því ætti að vera hægt að nýta jarðhitakerfi eins og á Nesjavöllum annað hvort á ágengan hátt með hæfilegum hléum eða með minnkaðri vinnslu eftir ágengt tímabil.



Mynd 6. Spár um þrýstingsbreytingar (birt sem vatnsborðsbreytingar) í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum fyrir 200 ára vinnslusögu með vinnslu skv. vinnsluáferð (4), þ.e. ágengri vinnslu til 2036, en mun minni vinnslu eftir það (Guðni Axelsson o.fl., 2005).

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

- (i) Við langtímvinnslu má reikna með töluverðum áhrifum milli aðliggjandi vinnslusvæða, jafnvel yfir töluverðar vegalengdir (jafnvel tugi km). Þau þarf að taka með í reikninginn.
- (ii) Ef einstök jarðhitakerfi eru nýtt á ágengan hátt um tíma þyrftu helst að vera tiltæk önnur kerfi í sama landshluta, sem nýta mætti meðan þau fyrrnefndu eru hvíld, ef miðað er við sjálfbæra vinnslu jarðhita í landshlutanum sem heild.

- (iii) Ef uppbygging jarðhitavinnslu í ákveðnum landshluta er aftur á móti skv. skrefa-hugmyndinni verður væntanlega þörf á því að uppbyggingin sé samtímis á mörgum svæðum, vegna þess hve skrefin eru lítil.

Um þessar mundir er unnið að 2. áfanga rammaáætlunar um nýtingu vatnsafls og jarðvarma (Hákon Aðalsteinsson, 2006). Þar verður lagt mat á umhverfisáhrif áformaðra virkjana, arðsemi fjárfestingar og heildarhagnað afrekstri. Í samanburði virkjunarhugmynda verður einnig horft til þess hvort framkvæmdin er afturkræf, þ.e. að hve miklu leyti unnt er að færa auðlind og náttúru aftur til fyrra horfs að nýtingu lokinni. Þessir þættir komu nokkuð við sögu í 1. áfanga rammaáætlunarinnar en þá skorti skilgreiningar og aðferðir sem beita mætti í slíku mati.

Að lokum er lögð áhersla á það að áætluð sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfis, eins og hér hefur verið til umfjöllunar, er væntanlega töluvert meiri en náttúrulegt innstreymi í viðkomandi kerfi. Það er vegna þess að miðað er við 100–300 ára tímakvarða í stað hins jarðfræðilega kvarða, sem er mörgum stærðargráðum lengri. Einnig má benda á það að niðurdæling/niðurrennsli gefur viðbót við náttúrulega innstreymið og eykur þannig sjálfbæru vinnslugetuna.

Þakkir.

Hitaveitu Dalvíkur, Orkuveitu Reykjavíkur og Beijing Institute of Geological Engineering eru þökkúð leyfi til að birta gögnin sem hér hafa verið notuð. Þá er Benedikt Steingrímssyni á ÍSOR þakkaður yfirlestur greinarinnar.

Heimildir.

- Grimur Björnsson, 2005: Orðanotkun, aðferðafræði og skilgreiningar við gerð hugmynda- og reiknilíkana af jarðhitakerfum í Hengli. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð ISOR-05203, 16 bls.
- Guðmundur Ó. Friðleifsson, Wilfred A. Elders, Sverrir Þórhallsson og Albert Albertsson, 2005: The Iceland deep drilling project. A search for unconventional (supercritical) geothermal resources. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24.–29. apríl, 8 bls.
- Guðmundur Pálmason, 2005: Jarðhitabók – eðli og nýting auðlindar. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík, 298 bls.
- Guðni Axelsson, 2004: Niðurdæling í jarðhitakerfi – tilgangur, kostir og ókostir. Erindi flutt á málþingi Jarðhitafélags Íslands 10. nóvember, Jarðhitafélag Íslands, rit 10, 5–12.
- Guðni Axelsson, Valgarður Stefánsson og Grímur Björnsson, 2005: Sustainable utilization of geothermal resources for 100–300 years. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24.–29. apríl, 8 bls.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson, 2001a: Um sjálfbæra vinnslu jarðhita. Erindi á Orkuþingi 11.–13. október, Orkumenning á Íslandi: grunnur til stefnumótunar, Samorka, Reykjavík, 478–484.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson, 2001b: Sustainable production of geothermal energy: suggested definition. IGANews, Quarterly No. 43, January–March, 1–2.
- Hákon Aðalsteinsson, 2006: Rammaáætlun um nýtingu vatnsafls og jarðvarma. Erindi fyrir Orkuþing 12.–13. október.
- O’Sullivan, M. And W. Mannington, 2005: Renewability of the Wairakei-Tauhara geothermal resource. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24.–29. apríl, 8 bls.
- Sanyal, S. K., 2005: Sustainability and renewability of geothermal power capacity. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24.–29. apríl, 13 bls.

- Ungemach, P., M. Antics and M. Papachristou, 2005: Sustainable geothermal reservoir management. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24.–29. apríl, 12 bls.
- Valgarður Stefánsson og Guðni Axelsson, 2005: Sustainable utilization of geothermal resources through stepwise development. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Tyrklandi, 24.–29. apríl, 5 bls.
- World Commission on Environment and Development, 1987: Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, 400 bls.