

Stofnkostnaður jarðvarmavirkjana

Valgarður Stefánsson, Orkustofnun,

Ágrip

Áfangaskipt uppbygging jarðvarmavirkjana á hverju háhitasvæði er heppileg aðferð til þess að tryggja hagkvæma fjárfestingu við nýtingu jarðhita til raforkuvinnslu. Á síðasta áratug hefur íslenskur jarðhitaíðnaður í reynd notað þessa aðferðarfræði við uppbyggingu jarðvarmavirkjana í landinu. Hver áfangi í uppbyggingunni er 20 – 30 MW, og hver áfangi tekur um 6 ár. Til að anna miklum virkjunarhraða á landsvísi er nauðsynlegt að leggja undir samtímis nokkur háhitasvæði. Stofnkostnaði jarðvarmavirkjana er skipt í tvo hluta, annars vegar kostnað við mannvirki ofanjarðar og hins vegar kostnað við mannvirki neðanjarðar. Kostnaðarþættir ofanjarðar eru atriði eins og yfirborðsrannsóknir, virkjunin sjálf og gufuleiðslur. Kostnaður við neðanjarðarmannvirki er borkostnaður og annar kostnaður sem tengist borunum. Hægt er að áætla kostnað við yfirborðsmannvirki jarðvarmavirkjana með sömu nákvæmni og aðra mannvirkjagerð (byggingar, vegir, brýr o.s.frv.), en meiri óvissa getur verið fyrir hendi um borkostnað. Athugun á kostnaði yfirborðsmannvirkja við 5 jarðvarmavirkjanir á bilinu 20- 60 MW á Íslandi sýnir að kostnaður vex línulega með stærð. Kostnaðurinn er um 100.000 kr/kW með 10% hlutfallslegum skekkjumörkum. Fyrir liggja tölfræðilegar athuganir á borárangri á 31 háhitasvæði víðsvegar um heim (Stefánsson, 1992). Með því að nota þessar niðurstöður um árangur borana er hægt að meta væntanlegan borkostnað með skekkjumörkum sem gilda almennt fyrir háhitasvæði. Niðurstöðurnar sem gilda fyrir stærðarbilið 20 – 60 MW eru þessar:

	Væntanlegur kostnaður Kr/kW	Mörk meðalfráviks kr/kW
Eingöngu yfirborðsmannvirki	97.700	72.200 – 119.200
Heildarkostnaður á “þekktu” jarðhitasvæði	126.700	106.200 – 169.200
Heildarkostnaður á “óþekktu” jarðhitasvæði	144.000	112.200 – 199.200

1. Inngangur

Tiltölulega sjaldan er fjallað um stofnkostnað jarðgufuvirkjana á opinberum vettvangi. Stundum er því brugðið við að ómögulegt sé að áætla kostnað slíkra virkjana vegna mikillar óvissu um borkostnað fyrir virkjunina. Annar útbreiddur misskilningur er sá að borkostnaður sé aðalhindrunin við virkjun jarðhita.

Með tilliti til þess að borkostnaður er yfirleitt ekki nema 10-20% af heildarkostnaði nýrrar hitaveitu á lághitasvæði, en 20-50% af heildarkostnaði jarðvarmavirkjunar á háhitasvæði, gefur það auga leið að ekki er hægt að kenna borkostnaði alfarið um óvissu í áætlunargerð.

Í greininni er fjallað um kostnaðarþætti jarðgufuvirkjana og sýnt fram á hvernig hægt er að meta væntanlegan stofnkostnað slíkra virkjana bæði á þekktum og óþekktum jarðhitasvæðum.

2. Aðferðarfræði

Áður fyrr var algengt að miða við að virkja eins stórt og jarðhitasvæðið leyfði. Þá var lögð fram mikil vinna og miklir fjármunir til þess að meta vinnslugetu jarðhitasvæðisins áður en ráðist var í virkjun, og var stærð virkjunar ákveðin með hliðsjón af væntanlegri vinnslugetu svæðisins. Margir gallar eru á slíku fyrirkomulagi og hér eru rakin fjögur óheppileg atriði við þessa undirbúningsaðferð:

- a) Það skiptir miklu máli fyrir fjárhagslega afkomu virkjunar að sem skemmstur tími sé á milli borana og þess tíma sem tekjur byrja að myndast (vinnsla hefst). Borkostnaður er oft 20-50% af heildarkostnaði svo það skiptir máli að sú fjárfesting liggji sem skemmstan tíma ónotuð. Fyrir mat á vinnslugetu svæðisins er það á hinn bóginn heppilegt að bora og reynslukeyra sem flestar holur löngu áður en kemur til virkjunar. Erfitt getur orðið að samræma þessi tvö sjónarmið við undirbúning jarðhitavirkjana.
- b) Raunhæft mat á vinnslugetu og vinnslueiginleikum jarðhitasvæðis fæst einungis með því að athuga hvernig jarðhitakerfið bregst við nokkurra ára vinnslu. Ef gert er ráð fyrir því að jarðhitavirkjunin verði reist í einum áfanga þýðir það að reynsluvinnsla verður að fara fram á svæðinu í nokkur ár áður en hægt er að ákveða stærð virkjunar. Það þýðir að mjög verulegur rannsóknarkostnaður er nauðsynlegur löngu áður en hægt er að hefja raforkuvinnslu á svæðinu. Ef virkjun jarðhitasvæðisins er á hinn bóginn gerð í þrepum, má nota vinnslu fyrsta þrepsins til athugunar á viðbrögðum jarðhitakerfisins og þar með áætla vinnslugetu jarðhitasvæðisins.
- c) Fáein erlend dæmi eru um það að byggðar hafa verið virkjanir sem eru stærri en vinnslugeta viðkomandi jarðhitasvæðis. Hægt er að komast hjá slíkri offjárfestingu með því að virkja jarðhitasvæðið í áföngum.
- d) Mjög oft er það svo að vermi (varmainsnihald, entalpía) breytist með aukinni vinnslu á jarðhitasvæði. Þetta getur leitt til þess að eiginleikar gufunnar passa illa við hverfla virkjunarinnar. Með því að virkja jarðhitasvæðið í nokkrum þrepum er auðveldara að viðhalda samræmi milli eiginleika gufunnar og hönnunarforsenda virkjunarinnar.

Þessi listi sýnir að það eru ýmsir kostir samfara því að virkja jarðhitasvæði í þrepum. Meginatriði í þessu samhengi er að ekki er hægt að meta vinnslueiginleika jarðhitasvæðis nema með því að athuga vinnsluna frá þessu sama jarðhitasvæði. Með því að velja tiltölulega litla einingu sem fyrsta þrep við virkjun svæðisins, má nota viðbrögð jarðhitakerfisins við þeirri vinnslu til þess að meta vinnslueiginleika svæðisins. Sú niðurstaða er síðan notuð til að ákveða stærð og tímasetningu næsta áfanga virkjunar, og þannig má halda áfram þar til öll vinnslugeta svæðisins hefur verið virkjuð. Strangt tekið þýðir það að vinnslugeta svæðisins er ekki þekkt fyrr en búíð er að fullvirkja svæðið.

Upphaflega var gert ráð fyrir því að 20 MW væri heppileg stærð fyrir fyrsta virkjunarþrep á háhitasvæði. Á þeim tíma (1990) var þetta stærsta fánlega sleðaeiningin (skid mounted) og gengið var út frá því að æskilegt væri að hafa möguleika á því að geta flutt vélbúnað á annað svæði ef í ljós kæmi að upphaflega svæðið reyndist óheppilegt til raforkuvinnslu. Nýrri hönnun vélbúnaðar með yfirliggjandi gufuúttaki er meðfærligri en eldri vélar þannig að nú eru stærri einingar (30 MW) oft notaðar sem fyrsta þrep í virkjun háhitasvæðis.

Þessi nýja aðferðarfræði, að virkja öll háhitasvæði í 20-30 MW þrepum, getur þýtt að leggja verði undir nokkur jarðhitasvæði samtímis ef virkjanahraði er mikill í landinu. Heppileg tímaeining fyrir fyrsta virkjunarþrep er 6 ár sem skiptist þannig:

Forrannsókn	1 ár
Yfirborðsrannsókn	1 ár
Rannsóknarboranir	1 ár
Vinnsluboranir og virkjun	3 ár
Heildartími	6 ár

Gert er ráð fyrir að ákvörðun um virkjun verði byggð á niðurstöðum tveggja rannsóknarhola sem eru boraðar á þriðja ári verkefnisins. Vinnsluboranir verði gerðar samtímis því að virkjunin er reist.

Þegar raforkuvinnsla hefst, 6 árum eftir byrjun verkefnisins, er fylgst náið með viðbrögðum jarðhitakerfisins í 3 ár eða svo og á grundvelli forðafræðilegra athugana er svo gert ráð fyrir að hægt verði að ákveða hvort ráðlegt sé að ráðast í næsta 20-30 MW þrep. Vinnsluboranir og virkjun taka 3 ár eins og í fyrra þrepinu þannig að önnur vinnslueiningin ætti að verða tilbúin 6 árum eftir að fyrsta vélin fór í gang og svo framvegis. Sex ár eru þannig heppilegur tími bæði fyrir fyrsta og seinni þrep virkunar.

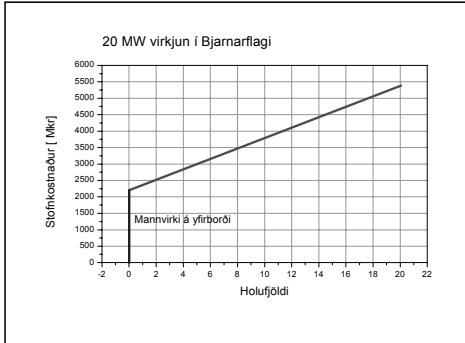
Athugun á fjárhagslegri afkomu þrepavirkjana sýnir að til langs tíma litið er heildarstofn-
kostnaður lægri þegar jarðhitasvæðið er virkjað í þrepum en þegar svæðið er virkjað í einu þrepi. Tiltölulega skammur tími líður frá því að fjárfestingin er gerð þar til fjármagnið fer að skila arði og framleiðslukostnaður raforkunnar verður lægri en ella.

3. Kostnaðarþættir

Heppilegt er að skipta stofnkostnaði jarðhitavirkjana í tvo hluta. Annars vegar er kostnaður yfirborðsmannvirkja (sjálf virkjunin og gufulagnir) og hins vegar kostnaður við mannvirki sem eru neðanjarðar (borkostnaður). Kostur við þessa skiptingu er m.a. sá að skekkjumörk í kostnaðaráætlunum yfirborðsmannvirkja jarðhitavirkjana eru þau sömu og við önnur mannvirki (byggingar, vegir, brýr) en búast má við að hlutfallsleg skekkjumörk í áætlunargerð fyrir boranir séu nokkuð hærri vegna þess að erfitt er að sjá fyrir hver verður árangur borana og þar með hve margar holur þarf að bora fyrir virkjun af vissri

stærð. Mynd 1 sýnir hvernig heildarkostnaður 20 MW virkjunar í Bjarnarflagi er háður þeim holufjölda sem bora þarf fyrir þessa virkjun. Myndin er byggð á verkhönnun virkjunarinnar sem gerð var 1994 (Orkustofnun og VGK, 1994).

Reynsla fyrri borana í Bjarnarflagi bendir til að vænta megi að meðaltali um 4 MW af raforku úr hverri nýrri holu á svæðinu (Stefansson, 1992). Því má ætla að þessi 20 MW virkjun þurfi 5-6 vinnsluholur. Einnig er gert ráð fyrir að 2 holur þurfi fyrir niðurdælingu á svæðinu. Ef gert er ráð fyrir að alls þurfi 8 holur fyrir virkjunina sést á mynd 1 að heildarkostnaður virkjunarinnar er um 3,5 milljarðar, eða 175 þús. kr á uppsett kW.



Mynd 1. Stofnkostnaður 20 MW virkjunar í Bjarnarflagi

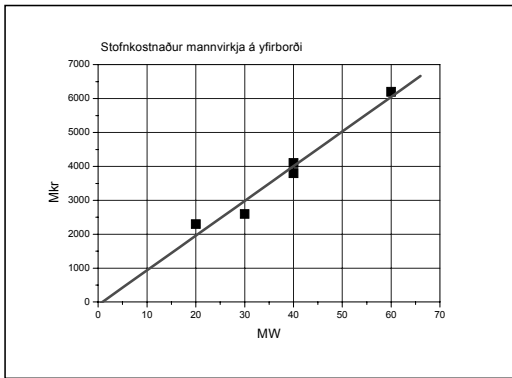
Rétt er að benda á að borkostnaður fyrir 20 MW virkjun í Bjarnarflagi er áætlaður 1,3 milljarðar, sem er 37% af heildarkostnaði. Hlutfallsleg skekkjumörk í boráætlun eru hærri en skekkjumörk í áætlun fyrir yfirborðsmannvirki. Ef gert er ráð fyrir að skekkjumörk í áætlun yfirborðsmannvirkja sé 15%, en 40% fyrir borkostnað verða hlutfallsleg skekkjumörk heildarframkvæmdar 24%.

Kostnaður við boranir er í réttu hlutfalli við stærð virkjunar og gæfni jarðhitasvæðisins.

Ef hagkvæmni stærðar er fyrir hendi í jarðhitavirkjunum ættu þau áhrif að koma fram í kostnaði yfirborðsmannvirkja (mynd 1). Kostnaður yfirborðsmannvirkja fimm virkjana er sýndur í töflu 1.

Tafla 1. Kostnaður yfirborðsmannvirkja fyrir 5 jarðhitavirkjanir

Staður	Stærð vélbúnaðar MW	Kostnaður yfirborðsmannvirkja miljónir	Kostnaðarmat	Ár
Svartsengi	30	2616	Raunkostnaður	1999
Nesjavellir	60	6238	Raunkostnaður	1998
Bjarnarflag	20	2300	Verkhönnun	1994
Bjarnarflag	40	3880	Verkhönnun	1994
Krafla	40	4189	Verkhönnun	1999



Mynd 2. Stofnkostnaður mannvirkja á yfirborði

Í Svartsengi og á Nesjavöllum er unnið bæði heitt vatn og raforka, en kostnaður uppgefinn í töflu 1 tekur einungis til nauðsynlegra yfirborðsmannvirkja vegna raforkuvinnslunnar. Virkjanir í Kröflu og Bjarnarflagi eru einungis ætlaðar til raforkuvinnslu, en þar er á sama hátt einungis miðað við kostnað yfirborðsmannvirkja.

Mynd 2 sýnir að það er gott línulegt samband á milli stærðar virkjunar og kostnaði við yfirborðsmannvirki. Jafna bestu línu í gegnum punktana á myndinni er:

$$\text{Yfirborðsmannvirki (mill-jónir)} = (-90 \pm 460) + (100 \pm 10) * \text{MW} \quad (1)$$

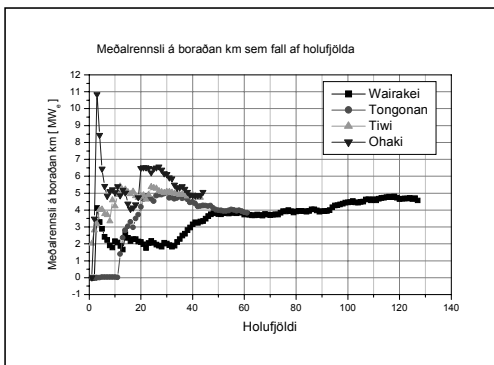
Með leitnistuðul $R^2 = 0,97$. Þessi jafna gildir á bilinu 20-60 MW.

Mynd 2 sýnir að hagkvæmni stærðar kemur ekki fram í kostnaði við þessar fimm virkjanir sem tafla 1 tekur til.

4. Borkostnaður

Jafna (1) skilgreinir meðalkostnað yfirborðsmannvirkja jarðhitavirkjana á stærðarbilinu 20-

60 MW. Til þess að meta kostnað við mannvirki neðanjarðar eru notaðar tölfræðilegar niðurstöður um borárangur á 31 háhitasvæði víðsvegar um heim (Stefansson, 1992). Í þessari samantekt er sýnt fram á að meðalborárangur á hverju háhitasvæði breytist mjög lítið eftir að vissum þekkingarþröskuldi um eiginleika jarðhitakerfisins hefur verið náð. Þessi þekkingarþröskuldur er skilgreindur sem fjöldi borhola sem bora þarf á hverju svæði þar til þekkingin á jarðhitakerfinu er orðin nægileg til þess að mest í mögulegi árangur verði við borun hvorrar nýrrar holu á svæðinu.



Mynd 3. Meðalrennsli á boraðan km á fjórum háhitasvæðum.

Mynd 3 er dæmi um niðurstöður sem komu út úr athuguninni á borárangri (Stefansson, 1992). Sýnt er meðalrennsli á boraðan kílómetra sem fall af holunúmeri á hverju svæði. Á þessum jarðhitasvæðum á Filippseyjum og í Nýja Sjálandi samsvarar meðalrennsli úr holum 4-5 MW raforkuvinnslu

fyrir hvern boraðan km á hverju svæði. Myndin sýnir einnig að þó borárangurinn stefni á sama gildið á öllum svæðunum, þá hefur þurft mismikinn fjölda hola á svæðunum þar til holur fara að skila mesta mögulega árangri. Tafla 2 sýnir meðalgildin fyrir svæðin sem athuginin frá 1992 náði til.

Tafla 2. Meðalgildi og meðalfrávik á borárangri (úr Stefansson, 1992)

Meðal MW (raforku) á boraða holu	4,2 ± 2,2
Meðal MW (raforku) á boraðan km á jarðhitasvæði	3,4 ± 1,4
Meðalholufjöldi þar til þekkingarþröskuldi er náð	9,3 ± 6,1

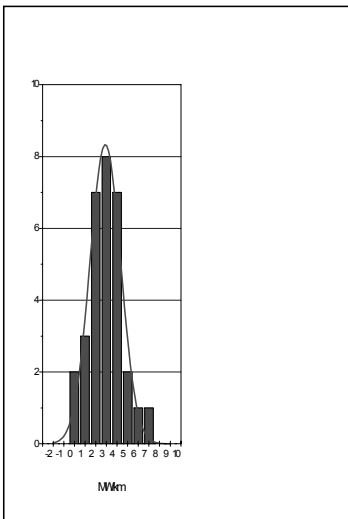
Mynd 4 sýnir dreififall rennslis á boraðan km fyrir þau 32 jarðhitasvæði sem athuginin frá 1992 náði til (Stefansson, 1992).

Meðalborárangur á Íslandi er heldur hærri en meðaltalið fyrir heiminn (Stefansson, 1992). Heimsmeðalgildið er hins vegar notað hér til þess að undirstrika alþjóðlegt gildi aðferðarinnar.

Til að meta meðalkostnað við neðanjarðarmannvirki er reiknað með að meðaldýpt hola sé 1500 m og að borkostnaður slíkrar holu sé 150 miljónir (Stefansson 2000). Meðalrennslí úr holunni er $1,5 \cdot (3,4 \pm 1,4) = (5,1 \pm 2,1)$ MW. Kostnaður á MW er þá $150 / (5,1 \pm 2,1) = 29 (+21/-9)$ miljónir króna. Kostnaðarbilið er þannig frá 20 til 50 miljónir á MW en líklegasta gildið er 29 miljónir á MW. Hér er rétt að benda á að þessi kostnaður á MW er tiltölulega ónæmur fyrir bordýpt (og borkostnaði) vegna þess að borárangur er miðaður við bordýpt. Það kostar meira að bora djúpa holu en grunna, en rennslí úr djúpu holunni er líka meira en rennslíð úr þeirri grunna.

Með því að bæta þessum niðurstöðum við jöfnu (1) fæst stofnkostnaður jarðhitavirkjunar á þekktu jarðhitasvæði (annað eða seinni þrep í virkjun jarðhitasvæðis) sem:

$$\text{Kostnaður (miljónir kr)} = (-90 \pm 460) + (129 + 31/-19) \cdot \text{MW} \quad (2)$$



Þetta þýðir að líklegasti stofnkostnaður 40 MW virkjunar á þekktu jarðhitasvæði er 5070 miljónir og með einu meðalfráviki verða efri og neðri vikmörk stofnkostnaðar 6770 og 4250 miljónir. Vikmörk stofnkostnaðar eru þannig 106 – 169 þús. kr á kW en líklegasta gildið er 127 þús. á kW.

Við virkjun fyrsta áfanga á óþekktu jarðhitasvæði bætist við kostnaður við að læra á svæðið. Þessi kostnaður tengist því að bora verður nægilega margar holur á svæðinu til þess að ná þeirri þekkingu á jarðhitakerfinu að hægt sé að staðsetja borholur þannig að þær gefi mesta mögulega rennslí fyrir virkjunina. Að meðaltali þarf að bora $9,3 \pm 6,1$ holu til þess að ná þessum þekkingarþröskuldi. Gera má ráð fyrir að á meðan á þessu lærdómstímabili stendur verði meðaltalsrennslí úr holum um helmingur af því sem

Mynd 4. Dreififall fyrir meðalrennslí á boraðan km.

fæst þegar þekkingarþröskuldinum er náð. Það þýðir að í reynd bætist við aukakostnaður vegna þessarar þekkingaröflunar samsvarar kostnaði við að bora $4,6 \pm 3,0$ holur. Ef miðað er við að borkostnaður hvernar holu sé 150 miljónir, verður aukakostnaðurinn 690 ± 450 miljónir króna.

Fyrir fyrsta áfanga jarðhitavirkjunar á óþekktu jarðhitasvæði má meta stofnkostnað þannig:

$$\text{Stofnkostnaður (miljónir kr)} = (600 \pm 910) + (129 + 31/-19) * \text{MW} \quad (3)$$

Líklegasti stofnkostnaður 40 MW virkjunar í þessu tilviki er 5760 miljónir. Efri vikmörk eru 7910 miljónir en neðri vikmörk 4490 miljónir. Þetta gefur stofnkostnaðsbilið 112-199 þús. kr á kW og líklegasta gildið er 144.000 kr/kW.

5. Niðurstöður

Tölfræðilegar aðferðir eru notaðar til að meta væntanlegan stofnkostnað jarðhitavirkjana þegar virkjun jarðhitasvæða er gerð í þrepum eða áföngum. Kostnaðartölur eru dregnar saman í töflu 3.

Tafla 3. Stofnkostnaður jarðhitavirkana á stærðarbilinu 20-60 MW

	Væntanlegur kostnaður kr/kW	Vikmörk meðalfrávíks kr/kW
Eingöngu stofnkostnaður á yfirborði	97.700	76.200-119.200
Heildarstofnkostnaður á þekktu jarðhitasvæði	126.700	106.200-169.200
Heildarstofnkostnaður á óþekktu jarðhitasvæði	144.000	112.200-199.200

Þakkir

Sveinbiri Björnssyni er þakkað fyrir að ritrýna handrit þessarar greinar.

Heimildir

Hitaveita Suðurnesja, Ársskýsla fyrir 1999

Orkustofnun og VGK, 1994, Jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi. Verkhönnun. Skýrsla Landsvirkjunar og Orkustofnunnar. Febrúar 1994.

Stefansson, V. 2000, Competitive status of geothermal energy in the 21st century. Framsöguerindi á Plenary Session III á World Geothermal Conference 2000.

Stefansson, V. 1992, Success in geothermal development. *Geothermics*, **21**, 823-834.

VGK, Rafeikning og Orkustofnun 2000, Stækkun Kröfluvirkjunar. Verkhönnun. Skýrsla Landsvirkjunar.