



Skýrsla nr. R16:01

Besta nýting jarðhitakerfis

September 2016

HAGFRÆÐISTOFNUN



HÁSKÓLI ÍSLANDS

Formáli

Þessi skýrsla er unnin upp úr meistaraverkefni Sigurðar Björnssonar. Meistaraverkefnið var unnið í samstarfi við Landsvirkjun og snýst um að meta bestu nýtingu jarðhitaauðlindar og hvernig auðlindin og hagrænir þættir spila saman. Vægi verkefnisins er 30 ECTS einingar í meistaranámi í hagfræði við Hagfræðideild Háskóla Íslands. Leiðbeinendur voru, innan Háskóla Íslands, Brynhildur Davíðsdóttir, Ph.d. í umhverfis- og orkufræðum og prófessor í umhverfis- og auðlindafræði og Egill Júlíusson, Ph.d í orkuauðlindaverkfræði og forðafræðingur hjá Landvirkjun. Verkefnið er samstarfsverkefni Hagfræðistofnunar Háskóla Íslands og Landsvirkjunar.

Þessi skýrsla fer yfir efnið á einfaldari hátt þar sem ekki er farið í líkanið sjálft nema í viðaukum. Ítarlegri yfirferð og útleiðslu á líkani, yfirlit yfir stöðu þekkingar hámmörkunarlíkana með áherslu á jarðhita og fleira ítarefni er að finna í meistararitgerð Sigurðar Björnssonar, en vísað er í hana nokkrum sinnum í skýrslunni.

Reykjavík, 10.10.2016

Sigurður Jóhannesson

Ágrip

Ísland er ríkt af jarðvarma og jarðhitaauðlindin er Íslendingum mikilvæg. Jarðvarmi er bæði nýttur beint, til dæmis til húshitunar, og til rafmagnsframleiðslu. Á Íslandi er um 18% framleiddrar raforku seld á raforkumarkaði en um 77% er bundin í samningum við stórfyrirtæki, að mestu leyti álver.

Tilgangur þessa verkefnis er að veita frekari innsýn inn í ýmis lykilatriði varðandi ákvarðanatöku í uppbyggingu og rekstri jarðhitavirkjunar og samspil auðlindarinnar og efnahagslegra þátta. Það er gert með því að bæta eftirfarandi þáttum við grunnlíkan af hagnaðarhámörkun jarðhitavirkjunar vegna raforkuframleiðslu: Möguleika á breytilegu raforkuverði, möguleika á að semja við nýjan aðila um raforkukaup utan markaðar og möguleika á kaupum raforku á heildsölumarkaði til að uppfylla hið umsamda magn. Þannig einskorðast orkusala ekki við samkeppnismarkað og sveigjanleiki virkjunar í að uppfylla gerðan samning eykst.

Grunntilfelli hins útvíkkaða líkans er leyst þar sem notast er við forsendur sem þykja líklegar og/eða eðlilegar. Til viðbótar eru sett fram nokkur tilfelli þar sem könnuð eru áhrif breytinga á samningi við nýjan aðila, heildsöluverði og fórnarkostnaði lands og kostnaði vegna úthrifa á hagnað, varmaforða jarðhitakerfis og sölumynstur. Hærra heildsöluverð veldur því að frekar er gengið á varmaforða kerfis og hagnaður minnkar. Hve mikið selt er á markaði fer eftir samanburði á framleiðslukostnaði og markaðsverði. Hve hár framleiðslukostnaður er fer aftur eftir hve mikið hefur gengið á varmaforða kerfis. Því meira sem gengið hefur á forðann, því hærri er framleiðslukostnaður og því ólíklegra að mikið sé framleitt umfram umsamið magn og selt á markaði. Þar sem hinn nýi aðili fær alltaf sitt umsamda magn hefur umsamið magn þar af leiðandi mikið að segja um hve mikið selt er á markað. Svipað gildir um hve mikið framleitt er upp í umsamið magn og hve mikið er þar af leiðandi keypt á heildsölumarkaði. Því lægra sem heildsöluverð er og því hærri sem framleiðslukostnaður er, því meira er keypt á heildsölumarkaði og minna framleitt úr jarðhitakerfi.

Efnisyfirlit

Formáli	2
Ágrip	3
Efnisyfirlit	4
Myndaskrá	6
Töfluskrá.....	7
1 Inngangur.....	8
1.1 Jarðvarmi	8
1.2 Jarðhitakerfi.....	9
1.2.1 Endurnýjanleiki	11
1.2.2 Sjálfbærni	13
1.2.3 Óvissa	13
1.3 Virkjun jarðhita.....	13
1.4 Orkuframleiðsla og -notkun á Íslandi og samanburður við önnur lönd.....	14
1.5 Orkusala á Íslandi	17
1.6 Rannsóknarefni	18
1.7 Uppbygging skýrslu	20
2 Aðferðir.....	21
2.1 Hin ýmsu markmið auðlindanýtingar	21
2.2 Hugmynd Hotellings	23
2.3 Grunnlíkan af jarðhitavinnslu	23
2.4 Útvíkkað líkan	24
2.4.1 Nýr kaupandi og heildsölumarkaður.....	25
2.4.2 Markaðsverð	25
2.4.3 Umræður um útvíkkað líkan, takmarkanir og varnaglar.....	27
2.4.3.1 Skaðabætur og skert afhending raforku	27

2.4.3.2	Forsendur markaða	28
2.4.3.3	Samningar við nýjan kaupanda og ýmsar takmarkanir	29
2.4.3.4	Óvissa	30
2.5	Fórarkostnaður lands og úthrif	31
2.5.1	Fórarkostnaður lands	31
2.5.2	Úthrif	32
2.5.3	Viðbót við líkan	33
3	Niðurstöður – Dæmi um notkun líkans	35
3.1	Grunntilfelli	35
3.2	Tilfelli 1: Jafn hagnaður ólíkra leiða	38
3.3	Tilfelli 2: Eigin framleiðsla eða kaup á heildsölumarkaði	40
3.4	Tilfelli 3: Samspil umsamins verðs og verðs á almennum markaði	43
3.5	Fórarkostnaður lands og úthrif	47
4	Umræða	49
4.1	Grunntilfelli	49
4.2	Tilfelli 1: Jafn hagnaður ólíkra leiða	50
4.3	Tilfelli 2: Eigin framleiðsla eða kaup á heildsölumarkaði	51
4.4	Tilfelli 3: Samspil umsamins verðs og verðs á almennum markaði	53
4.5	Fórarkostnaður lands og úthrif	55
4.6	Almennar umræður um niðurstöður	56
5	Lokaorð	58
	Viðauki A: Útvíkkað líkan	60
	Viðauki B: Fórarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa	67
	Heimildaskrá	68

Myndaskrá

Mynd 1. Kort af Íslandi sem sýnir gosbeltið, heita reitinn og möttulstrókinn (Keck Junior Research Project, 2003).....	9
Mynd 2. Staðsetning háhita- og lághitakerfa og aldur berggrunns á Íslandi (Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson, 2009).....	10
Mynd 3. Yfirlitsmynd af háhitakerfi (Kristján Sæmundsson, Guðni Axelsson og Benedikt Steingrímsson, 2011).	11
Mynd 4. Einföld mynd af framleiðsluferli jarðhitavirkjunar (The Renewable Energy Website, á.á.).	14
Mynd 5. Þróun raforkuvinnslu á Íslandi þar sem framleiðsla er brotin niður eftir uppruna (Hagstofa Íslands, 2014).	15
Mynd 6. Jarðhitavirkjanir og þróun raforkuframleiðslu með jarðhita á Íslandi (Orkustofnun, 2015c).	15
Mynd 7. Frumorkunotkun á Íslandi frá 2001-2014 (Hagstofa Íslands, 2015a).....	17
Mynd 8. Raforkunotkun á Íslandi eftir flokkum árið 2014 (Hagstofa Íslands, 2015c).....	18
Mynd 9. Myndræn framsetning á framboðs- og eftirspurnarföllum.	26
Mynd 10. Breyting á jafnvægi á raforkumarkaði ef Q_0 eykst með tíma í takt við aukna eftirspurn.	29
Mynd 11. Niðurstaða grunntilfellis.....	38
Mynd 12. Niðurstöður fyrir samning í tilfelli A.	39
Mynd 13. Tilfelli A: Umsamið verð óbreytt en hátt heildsöluverð.	41
Mynd 14. Tilfelli B: Umsamið verð hátt en óbreytt heildsöluverð.	41
Mynd 15. Tilfelli C: Bæði umsamið verð og heildsöluverð hátt.	42
Mynd 16. Tilfelli D: Bæði umsamið verð og heildsöluverð óbreytt en umsamið magn hátt.	42

Mynd 17. Tilfelli A: Umsamið verð eins og í grunntilfelli en umsamið magn mikið.....	45
Mynd 18. Tilfelli B: Umsamið verð hátt og umsamið magn eins og í grunntilfelli.	45
Mynd 19. Tilfelli C: Umsamið verð hátt og umsamið magn mikið.	46
Mynd 20. Tilfelli D: Ekki samið við nýjan aðila utan markaðar heldur allt selt á markaði.....	46
Mynd 21. Breytilegur fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa er sambærilegur framleiðslukostnaði.	48
Mynd 22. Hár breytilegur fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa.....	48
Mynd 23. Myndræn framsetning á nettó tekjum af orkusölu þegar tekið hefur verið tillit til kaupa á heildsölumarkaði.	63
Mynd 24. Myndræn útleiðsla á falli fyrir markaðsverð (bil á milli ferla endurspeglar ekki raunverulegt bil).	65

Töfluskrá

Tafla 1. Samanburður á framleiðslu raforku með jarðhita og heildarframleiðslu árið 2012 fyrir þau 10 lönd sem framleiða mesta raforku með jarðhita (Bertani, 2015), (Central Intelligence Agency, á.á.).	16
Tafla 2. Munur á almennum raforkumarkaði og heildsölumarkaði.	25
Tafla 3. Forsendur og niðurstöður grunntilfellis.....	37
Tafla 4. Samanburður á ólíkum tilboðum sem gefa sambærilegan samanlagðan núvirtan hagnað.	39
Tafla 5. Áhrif heildsöluverðs á niðurstöðu og samspil heildsöluverðs og umsamins verðs.	40
Tafla 6. Samanburður á sölu raforku eftir breytingum á samningi.	44
Tafla 7. Samanburður á ólíkum fórnarkostnaði og kostnaði vegna úthrifa.	47

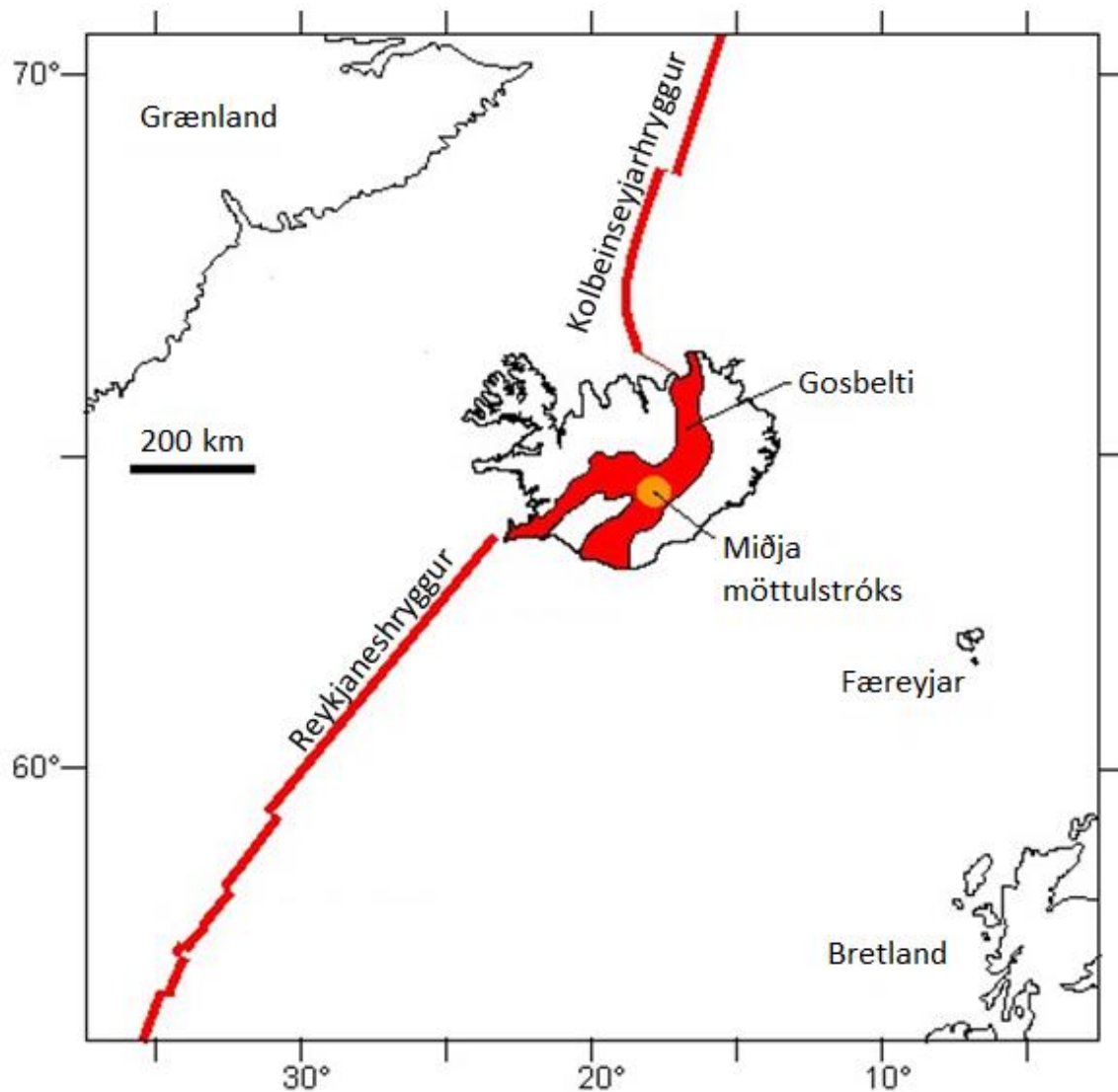
1 Inngangur

1.1 Jarðvarmi

Jarðvarmi er sú varmaorka sem jörðin geymir og framleiðir. Uppruni hennar er í grófum dráttum tvíþættur. Annars vegar er um að ræða varma sem varð til þegar jörðin myndaðist í árdaga sólkerfisins við stöðuga árekstra efnisagna og brota, og hins vegar varma sem myndast við niðurbrot geislavirkra efna. Geimurinn umhverfis jörðina er umtalsvert kaldari en jörðin og þetta kerfi sem jörðin og umhverfi hennar mynda leitast við að ná jafnvægi í hitastigi, rétt eins og kaffibolli kólnar niður í stofuhita fáir hann að standa óáreittur. Til að koma á jafnvægi losar jörðin stöðugt varma út í umhverfið og hefur gert frá því hún myndaðist. Eftir því sem hitamunur jarðarinnar og geimsins minnkar hægist smátt og smátt á þessum varmaflutningi. Það þýðir að almennt verða eldsumbrot sífellt fátíðari og minni eftir því sem jörðin eldist. Þessar breytingar gerast hins vegar afar hægt (Marshak, 2008).

Jarðvarmi er ekki jafndreifður í jarðskorpunni en Ísland er afar ríkt af jarðvarma. Ástæða þess er að Ísland liggur á flekaskilum þar sem Norður-Ameríkuflekinn og Evrasíuflekinn fjarlægjast hvorn annan. Vegna hreyfinga á og undir jarðskorpunni streymir heitt efni upp á við á flekaskilum, þrýstingur lækkar og bráðnun efnis getur átt sér stað. Bráðin getur svo leitað enn lengra upp á við og annað hvort stöðvast og storknað í jarðskorpunni, stöðvast tímabundið og haldið áfram síðar, eða náð alla leið til yfirborðs sem eldgos og losar með því mestan varma út í umhverfið. Með þessu móti stækkar Ísland smám saman þar sem nýtt efni kemur upp á gosbeltinu sem gengur yfir landið, gróflega frá suðri til norðurs, en eftir því sem fjær dregur frá því eldist bergið. Ísland er einnig talið sitja ofan á svokölluðum möttulstrók sem er flæði sérstaklega varmaríks efnis frá iðrum jarðar í átt til yfirborðs. Eftir því sem efnið rís lækkar þrýstingurinn og þegar það er komið í námunda við yfirborðið getur bráðnun efnis átt sér stað. Möguleg örlög bráðarinnar eru þau sömu og áður. Vegna þessa er jarðhitastigull (hitastigsbreyting með dýpi) á Íslandi sérstaklega hár og mikinn varma því að finna á tiltölulega litlu dýpi. Varmalosun jarðar inni á jarðskorpuflekum þar sem ekki er möttulstrókur undir er mun minni og jarðvarmi sjaldnast jafn mikill á litlu dýpi og á

Íslandi (Marshak, 2008). Á heitum svæðum á Íslandi, til dæmis á og nærri gosbeltinu er hitastigullinn um og yfir $150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson, 2008) en til samanburðar er meðaltal jarðskorpunnar talið vera um $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (World Energy Council, 2013). Flekaskilin og áætlaða miðju möttulstróksins undir Íslandi má sjá á mynd 1.

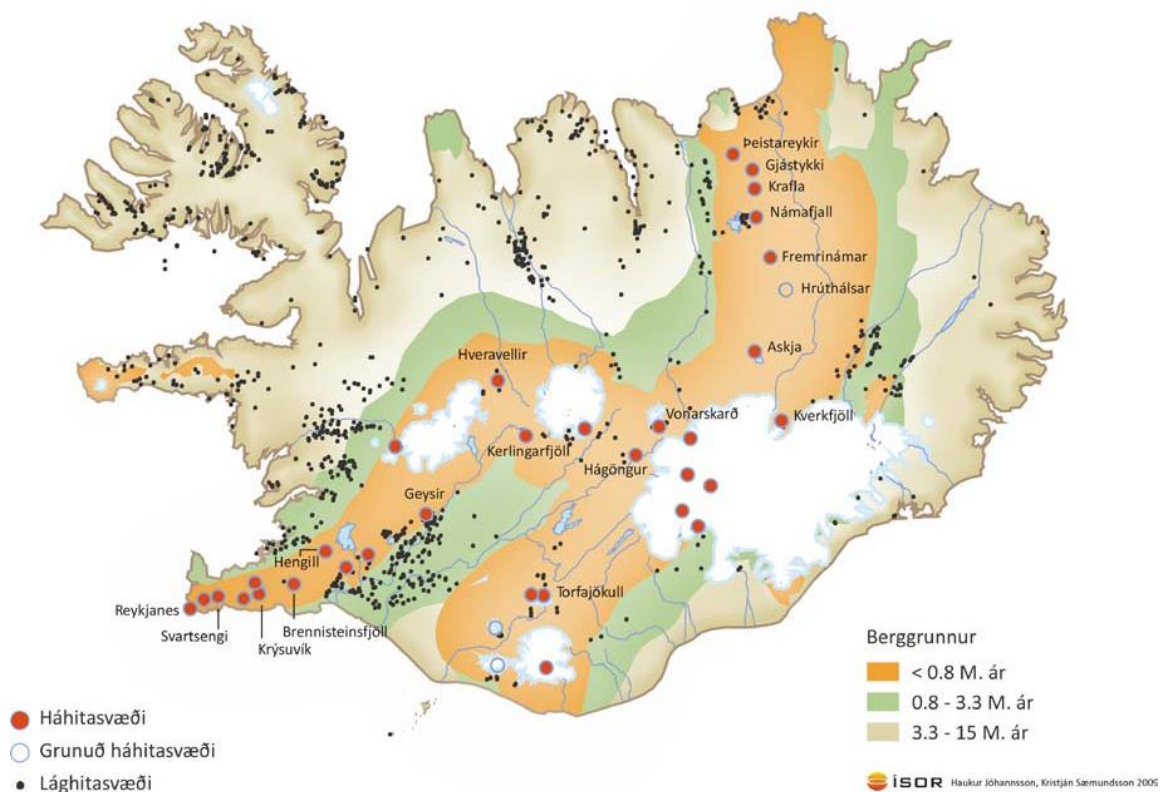


Mynd 1. Kort af Íslandi sem sýnir gosbeltið, heita reitinn og möttulstrókinn (Keck Junior Research Project, 2003).

1.2 Jarðhitakerfi

Jarðhitakerfi er skilgreint sem „afmarkað rúmmál í jarðskorpu þar sem hræring grunnvatns á sér stað. Það inniheldur alla þætti kerfisins, þ.e. aðrennsli, uppstreymisrás, lauga- og hverasvæði og afrennsli.“ (Orkustofnun, 2015a). Jarðhitakerfum er skipt í háhita- og lághitakerfi. Háhitakerfi eru kerfi þar sem hitastig jarðhitavökvans er hærra

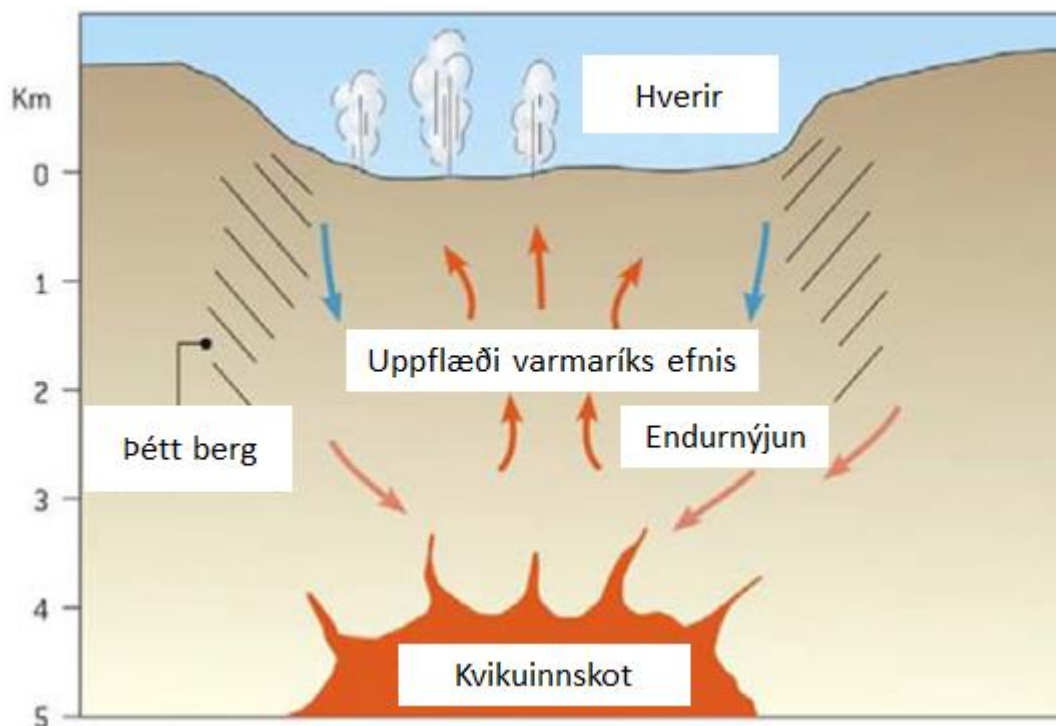
en 200°C á innan við 1 km dýpi en í lághitakerfum er hitastigið lægra en um 150°C á meira en 1 km dýpi (Stefán Arnórsson o.fl., 2008). Á Íslandi eru flest háhitakerfi staðsett á miðju gosbeltisins sem liggur þvert yfir landið en þar er jarðhitastigullinn hæstur. Þrjú kerfi liggja á jöðrum gosbeltisins. Raforkuframleiðsla með jarðhita á Íslandi fer fram á háhitasvæðum. Lághitakerfin eru staðsett utan gosbeltisins og varminn frá þeim er aðallega nýttur með beinum hætti, til dæmis til húshitunar (Stefán Arnórsson o.fl., 2008). Á mynd 2 má sjá staðsetningu háhita- og lághitasvæða á Íslandi og aldur bergsins sem þau eru í, en aldurskiptingin afmarkar gosbeltið.



Mynd 2. Staðsetning háhita- og lághitakerfa og aldur berggrunns á Íslandi (Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson, 2009).

Grunnvatn í jarðhitakerfum er kallað jarðhitavökví og getur verið hvort tveggja vatn og gufa (Stefán Arnórsson o.fl., 2008). Sumar virkjanir í háhitakerfum nýta jarðhitavökvann ekki aðeins til raforkuframleiðslu heldur einnig til beinnar framleiðslu á varmaorku. Til dæmis er uppsett afl Nesjavallavirkjunar 120 MW af raforku og 300 MW af varmaorku (Orkuveita Reykjavíkur, 2013). Dæmigert háhitakerfi er sýnt á mynd 3. Varmagjafi slíks kerfis er talinn vera kvikuinnskot, en það er efni sem hefur bráðnað í námunda við yfirborð jarðar en ekki náð alla leið upp heldur stöðvast í jarðskorpunni. Ef

bergið ofan við og í námunda við innskotið er nógu gljúpt og grunnvatn til staðar fer varmaburður/hræring af stað þar sem vökvir ofan við innskotið hitnar og streymir upp á við, en kaldara vatn utar streymir niður (Stefán Arnórsson o.fl., 2008).



Mynd 3. Yfirlitsmynd af háhitakerfi (Kristján Sæmundsson, Guðni Axelsson og Benedikt Steingrímsson, 2011).

Til að hagnýta jarðvarma þarf varminn að komast til yfirborðs. Í jarðhitakerfum á Íslandi flyst varminn úr gljúpu bergi upp á yfirborð með jarðhitavökva. Boraðar eru holur og annað hvort streymir vökvinn af sjálfsdáðum til yfirborðs eftir þessari nýju, greiðfæru leið eða honum er dælt upp ef þrýstingur er ekki nægur. Þetta er þó ekki eina leiðin til að fá varma upp á yfirborð á nýtanlegu formi. Í Svíþjóð, þar sem jarðhiti eins og hér hefur verið lýst er af skörnum skammti, eru varmadælur sem nýta hitamismun á jörð og andrúmslofti til dæmis mikilvægar. Slíkar varmadælur auka nýtni við hefðbundna húshitun með rafmagni og eru nýttar til þess að hita um 20% bygginga í Svíþjóð (International Renewable Energy Agency, 2013; Lund og Boyd, 2015).

1.2.1 Endurnýjanleiki

Hægt er að flokka orkuauðlindir á margan hátt. Ein flokkun skiptir orkuauðlindum í óendurnýjanlegar og endurnýjanlegar. Ef auðlind á rætur sínar í forða sem minnkar sífellt þegar tekið er af honum án þess að við bætist er hún óendurnýjanleg. Ef aftur á

móti forðinn endurnýjar sig á viðunandi hraða er hún endurnýjanleg (Bhattacharyya, 2011). Þessi flokkun er háð samhengi milli hraða endurnýjunar og tímaskala. Ef tímaskalinn er rýmkaður getur óendurnýjanleg auðlind orðið endurnýjanleg. Sama gildir ef hraði endurnýjunar eykst. Dæmi um orkuauðlindir sem við skilgreinum sem óendurnýjanlegar eru kol, jarðolía og jarðgas, en lífoldsneyti sem til dæmis er unnið úr ræktuðu korni, sólgeislun, vindur, fallvötn og jarðvarmi eru allt skilgreindar endurnýjanlegar orkuauðlindir.

Jarðvarmi er skilgreindur sem endurnýjanleg orkuauðlind vegna þess að „honum er viðhaldið af samfelldum náttúrulegum varmastraumi“ (Jónas Ketilsson o.fl., bls. 58, 2011) og því er talið eðlilegra að flokka jarðvarma með endurnýjanlegum orkuauðlindum en óendurnýjanlegum. Þessi flokkun er þó ekki augljós því jarðvarmi í tilteknu rúmmáli jarðskorpu getur endurnýjað sig með tvennum hætti. Annars vegar er um að ræða varma sem berst með varmaleiðni annað hvort djúpt að eða frá nærumhverfi og hins vegar varma sem berst í átt til yfirborðs með efnisflutningi (varmaburði) sem er annað hvort flutningur eða hræring kviku í jarðskorpunni eða hræring grunnvatns. Ef endurnýjun varma í þessu tiltekna rúmmáli verður með varmaleiðni eingöngu er hún svo hæg að á mannlegum tímaskala er oft eðlilegra að skilgreina varma rúmmálsins sem endanlega stærð. Varmaleiðni getur, þó hæg sé, samt staðið undir einhverri endurnýjun ef áhrifasvæðið umhverfis rúmmálið er stórt og því hægt að draga mikinn varma frá því. Endurnýjun varma með kvikuhreyfingum eða grunnvatni er hraðari. Hvor tegund endurnýjunar er ráðandi í þessu tiltekna rúmmáli jarðskorpu fer eftir nærumhverfi þess. Ef til dæmis kvikuinnskot er nálægt og bergið gljúpt og fullt af grunnvatni er varmaburður/hræring með jarðhitavökva ráðandi. Ef um er að ræða einsleita jarðskorpu er varmaleiðni ráðandi þar sem bergið dregur til sín varma frá umhverfi sínu (Jónas Ketilsson o.fl., 2011). Hvers eðlis endurnýjun varma er fer því eftir hvernig þetta rúmmál er skilgreint. Ef það er skilgreint sem lítill hluti hræringarsvæðis í jarðhitakerfi fer endurnýjun varma að langmestu leyti fram með hræringu jarðhitavökva. Ef rúmmálið er skilgreint sem allt hræringarsvæðið fer endurnýjun fram með leiðingu í gegnum tiltölulega þunnt leiðnilag á milli hræringarsvæðis og varmagjafa (Stefán Arnórsson o.fl., 2008).

1.2.2 Sjálfbærni

Guðni Axelsson o.fl. (2001) skilgreina sjálfbæra jarðhitavinnslu á eftirfarandi hátt:

Fyrir sérhvert jarðhitasvæði, og sérhverja vinnsluaðferð, er til ákveðið hámarksvinnslustig, E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu frá kerfinu 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. (Guðni Axelsson o.fl., bls. 481, 2001).

Yfirleitt verður einhvers konar endurnýjun að eiga sér stað ef kerfið á að standa undir vinnslu í langan tíma (eða ná nýju jafnvægi eftir að nýting hefst) og vinnsla úr kerfinu að teljast sjálfbær. Vinnsla í jarðhitakerfum getur því bæði verið sjálfbær þar sem vinnslan er um það bil jöfn endurnýjun varma í hinu tiltekna rúmmáli jarðhitakerfisins, og ósjálfbær þar sem endurnýjun er ekki næg til að standa undir sjálfbærri vinnslu. Ef vinnsla er mjög lítil miðað við stærð forðans í kerfinu sjálfu og í nágrenni þess getur vinnsla þó talist sjálfbær án mikillar endurnýjunar ef sjálfbær vinnsla jarðhita er skilgreind á þennan hátt (Jónas Ketilsson o.fl., 2011).

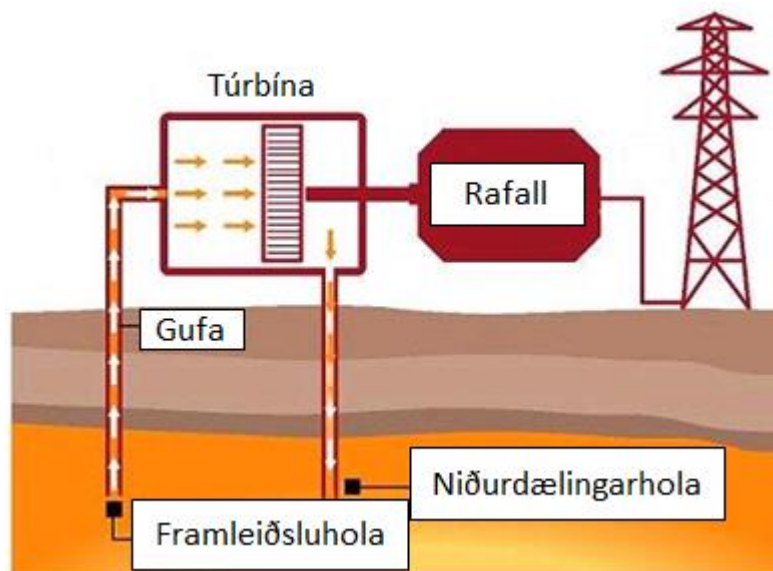
1.2.3 Óvissa

Þó tiltekið svæði falli undir skilgreiningu á háhitakerfi er erfitt að fá nákvæmt mat á möguleika svæðisins til raforkuframleiðslu. Umfang nýtanlegrar orku í kerfinu, hvernig kerfið bregst við nýtingu (til dæmis hvernig flæði um borholur breytist eftir því sem varmaforðinn minnkar) og endurnýjun varma í kerfinu eru þættir sem mikil óvissa ríkir um (Egill Júlíusson o.fl., 2011). Þegar vinnsla hefur staðið yfir í nokkurn tíma og reynsla komin á nýtingu svæðis er hægt að meta þessa þætti með meiri nákvæmni, þó óvissa sé enn til staðar. Jarðhitaauðlindin er að þessu leyti frábrugðin til dæmis vatnsaflí vegna þess að minni óvissa ríkir um vatnsmagn í uppistöðulóni, rennsli straumvatna í lónið, rennsli í gegnum virkjun, affall og fleira því þessa þætti er auðveldara að mæla. Óvissa um vinnslugetu er því minni þó óvissa sé vissulega til staðar, til dæmis varðandi vatnsbúskap jökla, rennsli í ám og fleira.

1.3 Virkjun jarðhita

Nokkrar leiðir eru til þess að virkja jarðhita til raforkuframleiðslu. Allar eiga þær ákveðna þætti sameiginlega. Boraðar eru framleiðsluholur í jarðhitakerfið og vatn eða gufa (eða

bæði eftir atvikum) er leitt úr þeim inn í orkuver. Þar knýr þrýstingur vökvans hjól sem tengt er við rafal, ekki ósvipað og þegar fallvatn er virkjað og vatn látið renna niður í gegnum hverfil. Þetta er hægt að gera annað hvort beint með upprunalega jarðhitavökvum eða óbeint þar sem upprunalegi vökvinn er notaður til að hita annan vökva sem knýr hjólið. Upprunalega vökvum er svo að minnsta kosti að hluta dælt aftur ofan í jarðhitakerfið til að viðhalda þrýstingi og vökvamagni í kerfinu. Þær holur sem fyrir eru dvína að afli með tímanum þar sem þrýstingur minnkar í jarðhitakerfinu. Þess vegna þarf sífellt að bora nýjar holur til þess að viðhalda framleiðslustigi orkuvers. Að lokum er raforkan svo leidd út í flutningskerfið til kaupenda (Gehring og Loksha, 2012). Á mynd 4 má sjá einfaldað framleiðsluferli jarðhitavirkjunar.

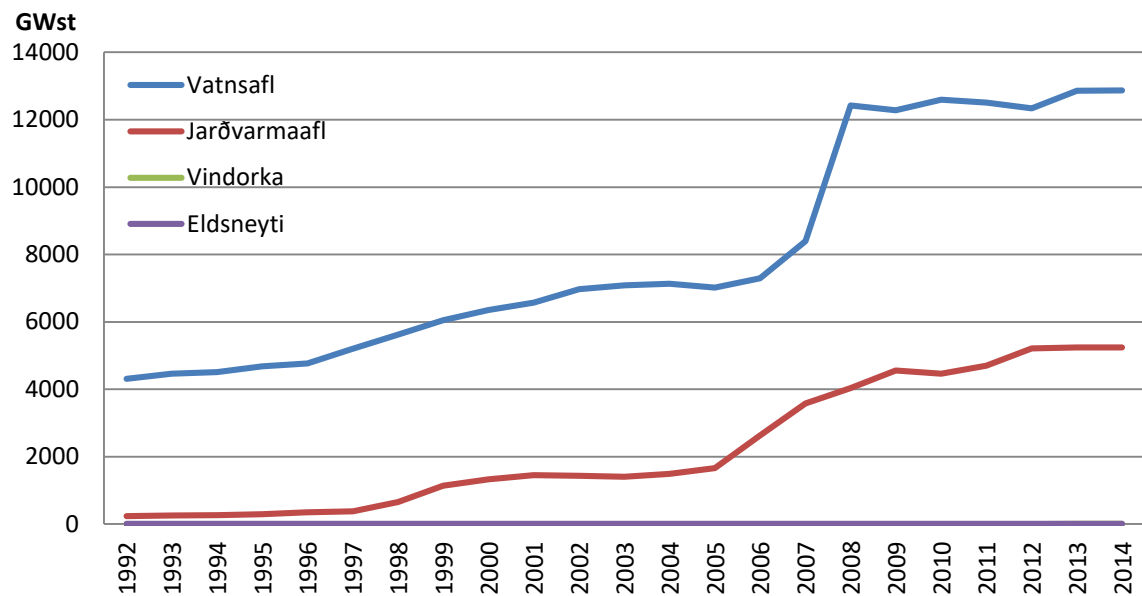


Mynd 4. Einföld mynd af framleiðsluferli jarðhitavirkjunar (The Renewable Energy Website, á.á.).

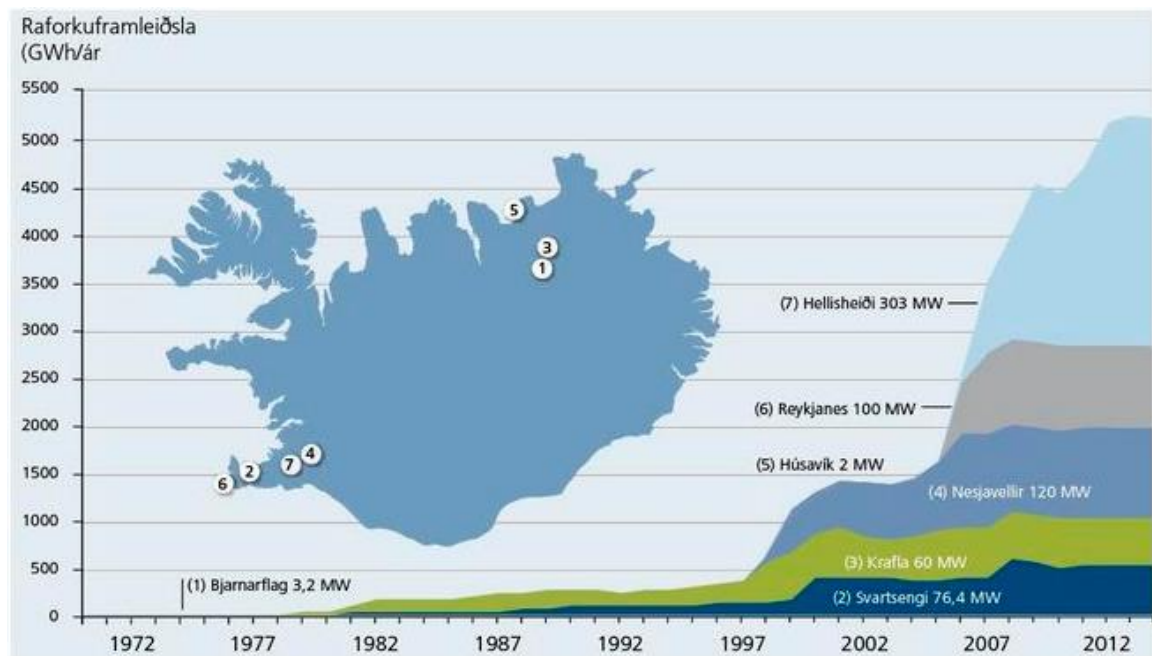
1.4 Orkuframleiðsla og -notkun á Íslandi og samanburður við önnur lönd

Ísland er ríkt af orkuauðlindum. Uppruni framleiddrar raforku á Íslandi er að langmestu leyti tvíþættur, fallvötn og jarðhiti eins og sjá má á mynd 5. Framan af virkjanasögu Íslands voru fallvötn mun fyrirferðarmeiri, en á 10. áratugnum fór jarðhiti að gera sig meira gildandi með tilkomu Nesjavallavirkjunar og stækkunar Kröfluvirkjunar eins og sjá má á yfirliti yfir jarðhitavirkjanir á Íslandi á mynd 6. Bein nýting jarðhita er mun eldri og hefur líklega verið við líði frá landnámi þar sem opnir hverir voru til dæmis nýttir til baða og afslöppunar eftir hinar ýmsu svaðilfarir (Grettis saga, 1994; Laxdæla saga, 1970). Uppsett afl jarðhita til raforkuframleiðslu á Íslandi árið 2014 var um 5200 GWh (660

MW) sem samsvarar um 30 % af allri virkjaðri raforku eins og sjá má í töflu 1. Þar má einnig sjá samanburð milli þeirra 10 landa sem framleiða mest rafmagn með jarðhita.



Mynd 5. Þróun raforkuvinnslu á Íslandi þar sem framleiðsla er brotin niður eftir uppruna (Hagstofa Íslands, 2014).



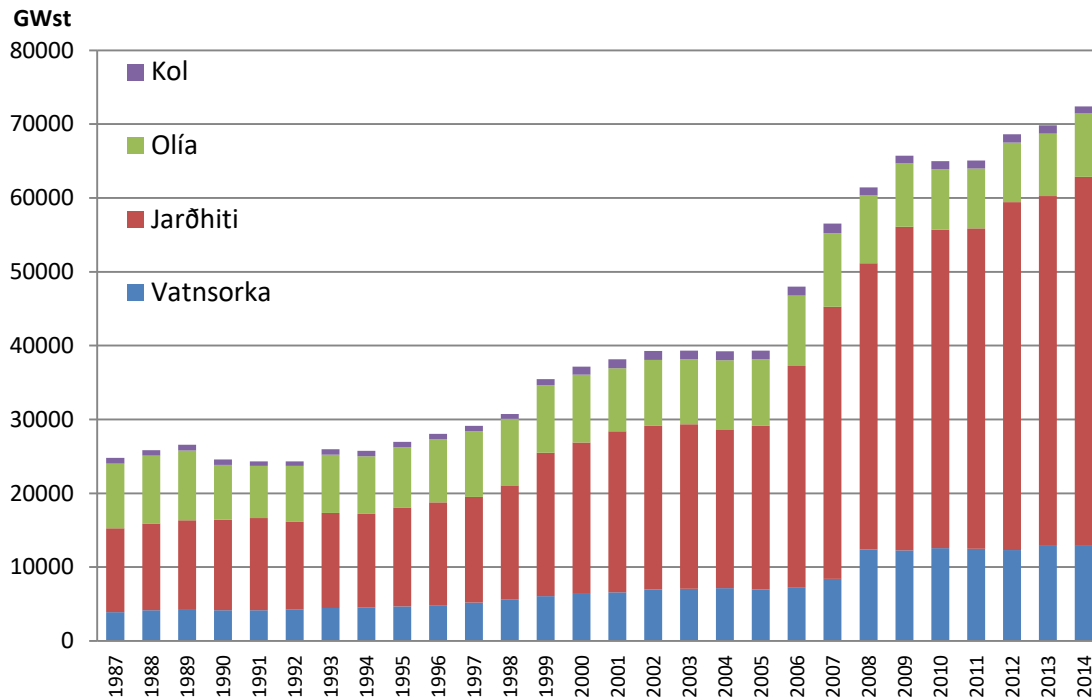
Mynd 6. Jarðhitavirkjanir og þróun raforkuframleiðslu með jarðhita á Íslandi (Orkustofnun, 2015c).

Tafla 1. Samanburður á framleiðslu raforku með jarðhita og heildarframleiðslu árið 2012 fyrir þau 10 lönd sem framleiða mesta raforku með jarðhita (Bertani, 2015), (Central Intelligence Agency, á.á.).

	Raforkuframleiðsla með jarðhita (GWst)	Heildarraforku- framleiðsla (GWst)	Hlutfall jarðhita af heildarframleiðslu (%)
Bandaríkin	15562	3166000	0,5
Filippseyjar	10250	75270	31,6
Indónesía	9417	185300	5,1
Nýja-Sjáland	6194	43280	14,3
Mexíkó	5817	278700	2,1
Ítalía	5592	281000	2,0
Ísland	5209	17430	29,9
Japan	2069	966400	0,3
Kenía	1599	8123	19,7
El Salvador	1535	6180	24,8

Áhugavert er að skoða frumorkunotkun Íslendinga eftir uppruna. Frumorka er orka sem enn er á sínu upprunalega formi en hefur ekki verið komið á annað orkuform. Þannig er jarðhiti sem nýttur er til húshitunar notkun á frumorku þar sem varminn í jarðhitavökvanum er notaður beint, en raforka frá kolaorkuverum ekki. Framleidd raforka með vatnsafli er meiri en með jarðhita en hlutur jarðvarma er stærstur þegar kemur að frumorkunotkun eins og sjá má á mynd 7 þar sem frumorkunotkun Íslendinga árin 1987 til 2014 er skoðuð. Þess ber að geta að munurinn stafar ekki eingöngu af því að varmaorka til húshitunar og annarrar beinnar nýtingar telst til frumorkunotkunar og er því tekin með. Þessi munur stafar einnig af því að orkunýtni jarðhitavirkjana er ekki góð þar sem einungis 10 til 12 % varmaorkunnar er breytt í raforku (Stefán Arnórsson o.fl., 2008). Einnig er vert að geta þess að árið 2014 var hlutfall endurnýjanlegra orkugjafa í endanlegri orkunotkun (e. final energy use) 73,1% (Hagstofa Íslands, 2015a; Orkustofnun, 2015b, 2015d). Það er nokkru lægra en hlutfall endurnýjanlegra orkugjafa í frumorkunotkun árið 2014 sem var 86,8% (Hagstofa Íslands, 2015a) og talsvert lægra en

hlutfall endurnýjanlegra orkugjafa í raforkuframleiðslu, en það var um 99,98% árið 2014 (Orkustofnun, 2015d).

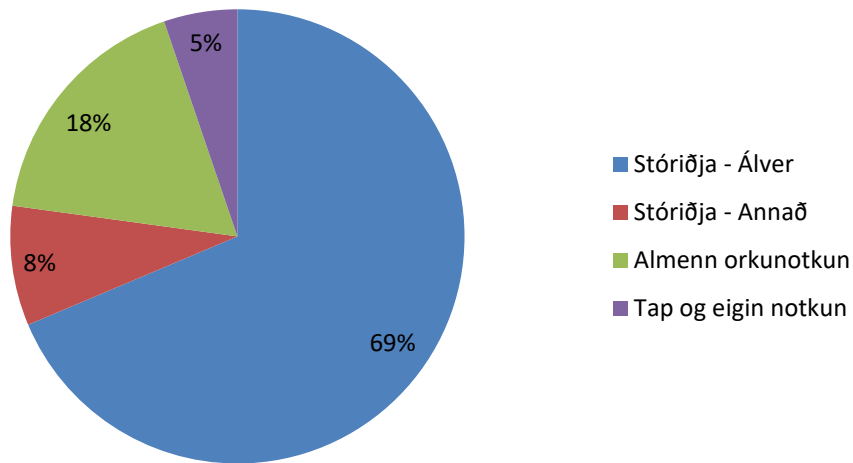


Mynd 7. Frumorkunotkun á Íslandi frá 2001-2014 (Hagstofa Íslands, 2015a).

1.5 Orkusala á Íslandi

Á mynd 8 sést hvernig raforkunotkun á Íslandi skiptist eftir notkunarflokkum árið 2014. Heildarnotkun var 18122 GWst. Stóriðja notar mest af framleiddri orku eða tæplega 77%, álver þar af um 69%. Sú orka er bundin í samningum. Þá er yfirleitt samið til 20 ára eða lengur, að hámarki til 65 ára, og verð er ákveðið en ræðst ekki á markaði (Vilhjálmur Þorsteinsson o.fl., 2011). Algenzt er þó að slíkir samningar innihaldi einhvers konar tengingar raforkuverðs við til dæmis álverð eða raforkuverð á mörkuðum erlendis, en álverðstengingar eru þó á undanhaldi (Landsvirkjun, 2016), (Landsvirkjun, 2010). Önnur stóriðja samanstendur af málmblendi (5%), álþynnuframleiðslu (3%) og gagnaverum (<1%). Almenn notkun samanstendur af heimilum, þjónustu, landbúnaði, sjávarútvegi og öðrum iðnaði utan stóriðju, samtals 18%. Orkunotkun virkjananna sjálfra og tap við flutning og dreifingu er svo um 5% af heildarnotkun (Hagstofa Íslands, 2015b), (Hagstofa Íslands, 2015c). Raforka sem fellur undir almenna notkun er keypt á almennum raforkumarkaði þar sem neytendur hafa val um að kaupa frá fyrirtækjum sem selja

raforku inn á kerfi og raforkuverð er því ekki bundið í langtíma samningum á sama hátt og hjá stóriðjufyrirtækjum.



Mynd 8. Raforkunotkun á Íslandi eftir flokkum árið 2014 (Hagstofa Íslands, 2015c).

1.6 Rannsóknarefni

Almennt ætti ákvörðun um hve mikið fyrirtæki framleiðir á hverjum tíma að ráðast af því hvað er best fyrir fyrirtækið og eigendur þess. Ekki er eitt algilt markmið sem hægt er að skilgreina sem hið eina rétta í öllum tilfellum, en í hagfræði er algengt að gera ráð fyrir að markmið fyrirtækis sé að fá sem mestan hagnað með rekstrinum (umræðu um það markmið og fleiri möguleg markmið er að finna í kafla 2.1). Með þetta markmið að leiðarljósi eru sett upp líkön sem hámarka hagnað fyrirtækisins. Þegar slíkum líkönum er beitt fæst hve mikið er best að framleiða á hverju tímabili, en sú framleiðsla hámarkar hagnað fyrirtækisins yfir líftíma þess verkefnis sem um ræðir. Þegar svona líkan er sett upp fyrir jarðhitavirkjun er ekki óeðlilegt að við fyrstu nálgun sé gert ráð fyrir að raforkuverð sé ytri stærð og að öll framleiðsla seljist á því verði. Með öðrum orðum er gert ráð fyrir að öll framleiðsla seljist á samkeppnismarkað þar sem virkjunin er verðþegi (framleiðsluákvæðanir þess hafa ekki áhrif á markaðsverð). Hve mikið virkjunin framleiðir á hverjum tíma fer þá eingöngu eftir því hvað hentar henni best miðað við það verð sem fæst á markaðnum. Þessari grunnnálgun verður lýst nánar í kafla 2.3. Grunnnálgunin gæti virkað ágætlega víða í Evrópu eða Bandaríkjunum til dæmis þar sem selt er beint inn á stóran samkeppnismarkað þar sem seljendur eru verðþegar. Nálgunin er aftur á móti ekki raunsæ ef viðbótarrafamagnið sem þessi virkjun selur á markaði er

mikið í samanburði við stærð markaðarins vegna þess að þá getur verðlækkun orðið umtalsverð. Ef raforkuverð lækkar mikið er mögulega hagkvæmara fyrir eigendur virkjunarinnar að finna kaupanda sem bætir við heildarnotkun í landinu og samið yri við utan almenns markaðar. Sá kaupandi væri mögulega tilbúinn til að borga hærra verð en markaðsverð eftir að bæst hefur við framboðið. Erfitt gæti hins vegar reynst fyrir eigendur að finna aðila sem er tilbúinn til að kaupa orku í því magni sem hentar þeim best á hverjum tíma því það magn er ekki endilega heppilegt fyrir kaupandann eða líklegt til að vera stöðugt yfir tíma. Stöðugleiki er rekstri fyrirtækja mikilvægur svo ólíklegt er að kaupandi myndi samþykkja bindingu við orkuframleiðsluferil virkjunar sem getur verið breytilegur og ófyrirsjáanlegur. Þar sem gert er ráð fyrir að virkjun sé rekin sem stök eining hefur hún einnig ekkert svigrúm utan eigin framleiðslu til að uppfylla samning. Af þessum ástæðum þurfa framleiðsluákvörðanir virkjunarinnar að geta tekið tillit til mögulegra verðbreytinga á raforkumarkaði og auka þarf sveigjanleika í orkusöluferlinu til að fyrirtækið geti betur mætt þörfum mögulegra kaupenda sem samið er við utan markaðar og tryggt sér þannig hagstæðari kjör og þar með betri afkomu en ella.

Markmið þessa verkefnis er að skilja betur tengsl nýtingar jarðhita og hagrænna þátta. Það verður gert með því að láta ákvarðanatökuferli eigenda jarðhitavirkjunar, sem samanstendur af líkani þar sem hagnaður af raforkuframleiðslu er hámarkaður, ná utan um flóknari möguleika varðandi markaðsaðstæður og orkusölu. Tekið verður tillit til mögulegra verðbreytinga á raforkumarkaði vegna aukins framboðs, sveigjanleiki í orkusöluferli verður aukinn þannig að hægt verður að semja aukalega við stóran kaupanda utan almenns markaðar og hægt verður að kaupa orku á heildsölumarkaði svo virkjun er ekki bundin af eigin framleiðslu. Þannig er möguleikum eigenda virkjunar á að mæta þörfum kaupandans fjölgað. Lausn grunntilfellis líkans verður sýnt og tekin verða dæmi um notagildi þess. Könnuð verða áhrif breytinga á forsendum um samning við aðila utan markaðar og forsendum um heildsölumarkað á lausn líkansins með áherslu á hagnað, varmaforða jarðhitakerfis og sölumynstur. Að lokum verður kannað hvaða áhrif fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa hefur á bestu lausn.

1.7 Uppbygging skýrslu

Í öðrum kafla verða forsendur fyrir notkun hagnaðarhámörkunarlíkans ræddar og farið yfir aðrar mögulegar nálganir. Síðan verður líkanið sem notað er hér til að skilja betur tengsl nýtingar jarðhita og hagrænna þátta útskýrt. Í þriðja kafla eru niðurstöður kynntar. Fyrst verður sýnd niðurstaða grunntilfellis þar sem líkleg eða raunveruleg gildi á stikum eru notuð. Því næst eru sýndar niðurstöður fyrir þau tilfelli sem valin voru til þess að sýna notagildi líkans. Fyrst er sýnt hvernig hægt er að fá sama hagnað með ólíkum forsendum varðandi umsamið magn og verð. Síðan verða áhrif af breytingum á heildsölumarkaði könnuð. Að því loknu verður skoðað hvernig breytingar á samningi við nýjan kaupanda hafa áhrif á sölu á almennan raforkumarkað. Að lokum verða könnuð áhrif fórnarkostnaðar lands og úthrifa á bestu lausn. Í fjórða kafla verður líkanið og niðurstöður tilfella ræddar og ályktanir dregnar. Í viðaukum er svo farið með ítarlegri hætti yfir líkanið.

2 Aðferðir

Fyrst verður fjallað almennt um markmið sem koma til greina þegar finna á bestu nýtingu auðlindar. Grunnhugmynd Hotellings um bestu nýtingu auðlinda verður lýst og í kjölfarið útvíkkun sem hægt er að hugsa sér sem einfaldaða mynd af framleiðsluferli jarðhitavirkjunar. Því næst verður endurbættu líkani lýst. Það tekur tillit til lítils markaðar sem er næmur á verðbreytingar, að raforka geti líka verið seld stökum stórnotanda, ekki bara á raforkumarkað, og að seljandi hafi aðgang að heildsölumarkaði. Farið verður yfir takmarkanir líkansins og að lokum verða rædd áhrif fórnarkostnaðar lands og úthrifa, en þau eru tekin fyrir í sér tilfelli.

2.1 Hin ýmsu markmið auðlindanýtingar

Líklegt er að eigandi auðlindar vilji einfaldlega hámarka þann hagnað sem hún getur gefið af sér. Hámörkun hagnaðar af auðlind í almannaeigu er vel réttlætanlegt markmið að uppfylltum ákveðnum skilyrðum. Þar ber helst að geta að rétt er að almenningur njóti góðs af nýtingu auðlindarinnar. Þannig þyrfti hagnaður af virkjun, eða arður sem greiddur er út úr nýtingarfyrirtæki til hins opinbera, að renna til dæmis í innviðauppbýggingu, fara í lækun opinberra skulda, almennar skattalækkanir eða annað sem gagnast almenningi.

Ef auðlind er aftur á móti í einkaeigu hefur eigandi ekki eins ríkum skyldum að gegna gagnvart almenningi. Þessi hugsun virðist þó vera að breytast. Ef auðlind er í eigu einkaaðila, sem hefur ekki aðeins áhuga á eigin velsæld heldur líka á því að bæta samfélagið, gæti farið svo að markmið rekstar yrði ekki eingöngu hámörkun hagnaðar. Markmiðið yrði einnig nytjahámörkun þessa tiltekna aðila, en þegar fólk hámarkar nyt sín hagar það málum þannig að það upplifi sem mesta vellíðan eða hamingju. Elon Musk, forstjóri rafbílaframleiðandans Tesla, hefur til dæmis mikinn áhuga á sjálfbærum samgöngum. Hann ákvað í júní 2014 að gefa frá sér einkaleyfi á tækni bíla sinna til að flýta fyrir þróun sjálfbærra samgangna. Allir mega nota tæknina að því gefnu að það sé í góðum tilgangi (Musk, 2014).

Afstaða Elon Musk er ekki einsdæmi. Fyrirtæki eru í vaxandi mæli að fara eftir sjónarmiðum samfélagslegrar ábyrgðar fyrirtækja (e. corporate social responsibility, CSR). CSR snýst um að fyrirtæki eru meðlimir hins siðferðislega samfélags (e. moral community) en standa ekki fyrir utan það. Fyrirtækin hafa sambærilegar skyldur og aðrir meðlimir samfélagsins og verða því að taka tillit til hagsmuna þess. Angi af CSR, sem á ensku nefnist „triple bottom line“ snýst ennfremur um að fyrirtæki eigi að skoða gjörðir sínar í ljósi þriggja mælikvarða, hagræns, félagslegs og umhverfislegs. Ekki eigi að hugsa eingöngu um hagnað (Matteson og Metivier, 2016).

Fleiri markmið en hámarkun hagnaðar koma til greina þegar finna á bestu nýtingu jarðhitakerfis. Lágmarkun kostnaðar við tiltekna framleiðslu, hámarkun neytenda- eða heildarábata og hámarkun framleiðslu eru allt dæmi um markmið (Varian, 1993).

Ef markmiðið er að tryggja öllum borgurum nægt eða eitthvert tiltekið magn framleiðslunnar er það gert með því að lágmarka kostnaðinn við þá tilteknu framleiðslu. Framleiðslan yrði þá mögulega seld á lægra verði en því verði sem fengist fyrir framleiðsluna á markaði. Ef markmiðið er að vænka hag neytenda eða samfélagsins í heild sem mest getur hámarkun neytenda- eða heildarábata verið fýsilegt markmið. Í tilfelli neytendaábata er málum hagað þannig að neytendur halda eftir eins miklu og hægt er af mismun þess sem þeir eru tilbúnir að borga fyrir tiltekna vöru og því sem þeir þurfa raunverulega að borga. Ef heildarábati er hámarkaður er til viðbótar tekið tillit til ábata framleiðanda þannig að þeir halda eftir sem mestu af því sem munar á framleiðslukostnaði og verði fyrir hverja einingu sem þeir selja. Ef markmiðið er aftur á móti að auka umsvif gæti verið heppilegt að framleiða eins mikið úr auðlindinni og hægt er. Þetta markmið er réttlætanlegt ef auðlindin er í eigu sveitarfélags eða einkaaðila sem vill gera vel við sína heimasveit. Erfitt er að rökstyðja slíkt markmið ef auðlindin er í eigu ríkisins þar sem almenn aukning umsvifa sem koma með virkjanaframkvæmdum og kaupanda orkunnar yrði líklega að mestu leyti staðbundin. Stór hluti ávinnings af virkjanaframkvæmdum yrði þannig látinn íbúum tiltekens svæðis í té og eigandi auðlindarinnar nyti því ekki góðs af eign sinni á sanngjarnan hátt.

Þessi stutta umfjöllun sýnir hve fjölbreytt flóra markmiða fyrirfinnst í raunveruleikanum. Eins og sést á tilfelli Elon Musk og þeirra sem aðhyllast CSR er oft stýrt frá hinum þröngu hefðbundnu markmiðum þar sem einblínt er á hámarkun

hagnaðar. Hefðbundin hagnaðarhámörkun er þó oft ágæt nálgun á raunveruleikann. Ef líkja á eftir öllum smáatriðum í tilverunni verður líkanið fljótt flókið svo oft er þeim sleppt eða þau einfölduð verulega. Líkanið sem hér er notað veitir innsýn inn í ýmis lykilatriði varðandi ákvarðanatöku í uppbyggingu og rekstri jarðhitavirkjunar, eðli auðlindar og samspil hennar og efnahagslegra þátta. Þessi skýrsla er unnin upp úr lokaverkefni til meistaragráðu og takmarkaðist umfang þess af því. Hagnaðarhámörkunarlíkon eru tiltölulega einföld miðað við aðra kosti sem taldir hafa verið upp og því hentugt hér. Við hámörkun neytendaábata þarf til dæmis að meta eftirspurnarfall sérstaklega. Einfaldleiki þarf ekki að vera galli.

2.2 Hugmynd Hotellings

Til að svara því hvernig framleiðsluákvarðanatökuferli jarðhitavirkjunar verður þegar tekið er tillit til aukinnar fjölbreytni orkusöluferlis og mögulegra verðbreytinga á raforkumarkaði, er notast við líkan sem hægt er að líta á sem formlega uppsetningu á hugmynd Harold Hotelling, en með ýmsum viðbótum. Hotelling setti fram líkan þar sem samanlagður núvirtur hagnaður (tekjur að frádregnum kostnaði) af vinnslu óendurnýjanlegrar auðlindar er hámarkaður þegar ákveðin skilyrði eru uppfyllt. Þegar líkanið er leyst fæst hve mikið er best að taka af auðlindinni á hverjum tíma yfir líftíma verkefnis svo lausnin endurspeglar besta nýtingarferil auðlindarinnar. Grunnlíkan Hotelling eitt og sér er tiltölulega takmarkað að getu til greininga og spágerða þar sem marga mikilvæga þætti vantar sem hafa áhrif á lausn líkansins. Grunnlíkanið gerir til dæmis ráð fyrir að verð sé fast og að kostnaður sé einungis einfalt línulegt fall af framleiðslu.

Nokkur skilyrði, sem geta sett bestu lausn skorður, verða að halda. Þau eru kölluð hliðarskilyrði. Skilyrði sem hægt er að kalla forðaskilyrði segir að það sem eftir er af auðlind í ár verður aldrei meira en það sem eftir var af henni í fyrra að frádregnu því sem framleitt var í fyrra. Önnur skilyrði segja til dæmis að framleiðsla, forði, kostnaður og fleira geti ekki tekið neikvæð gildi (Medlock, 2009; Sweeney, 1993).

2.3 Grunnlíkan af jarðhitavinnslu

Ýmis konar viðbætur eru nauðsynlegar til að hugmynd Hotellings nái utan um hagnaðarhámörkun jarðhitavirkjunar. Egill Júlíusson o.fl. (2011) ásamt síðari

uppfærslum fyrir Landsvirkjun (Egill Júlíusson, persónuleg samskipti, ágúst 2016) bæta við hina almennu framsetningu Hotellings. Þær viðbætur gera það að verkum að nú er kostnaður ekki bara fall af framleiddu magni heldur skiptist í fimm hluta: Rekstrarkostnaður á framleiðslueiningu, rekstrarkostnaður vegna borhola, kostnaður vegna borunar viðbótarhola, kostnaður við uppbyggingu orkuvers og annar fastur kostnaður. Hliðarsilyrði eru sjö talsins. Við forðaskilyrðið bætist nú liður sem lýsir endurnýjun varmaforða jarðhitakerfisins, en þessi endurnýjun er fast hlutfall af þeim varmaforða sem vantar upp á að kerfið sé fullhlaðið orku á viðkomandi tíma. Það þýðir að endurnýjun eykst eftir því sem meira vantar upp á að kerfið sé fullhlaðið orku. Þessi liður gerir líkanið sérstakt miðað við líkön sem notuð eru til að lýsa óendurnýjanlegum auðlindum. Tvö önnur mikilvæg skilyrði bætast við. Annað segir að vinnslugeta svæðis geti ekki verið minni en sem nemur því magni sem ákjósanlegt er að framleiða. Í þessu skilyrði er fólgin meðalframleiðslugeta borhola, en hún minnkar með minni varmaforða jarðhitakerfis. Hitt skilyrðið segir að ekki er hægt að framleiða meira en sem nemur uppsettu afli orkuvers. Önnur hliðarskilyrði gefa til kynna að breytur geti ekki tekið neikvæð gildi. Í grunnlíkaninu er gert ráð fyrir að öll framleiðsla seljist á verði sem framleiðandi hefur engin áhrif á. Þannig er hægt að túlka þá sölu sem sölu inn á samkeppnismarkað þar sem virkjun er verðþegi. Nákvæma útlitun á þessari grunnútgáfu líkans má sjá í rannsókn Egils Júlíussonar o.fl. (2011) og meistararitgerð Sigurðar Björnssonar (2016).

2.4 Útvíkkað líkan

Taka á tillit til þess að nýtingaraðili hafi val um að selja annað hvort á almennan raforkumarkað eða nýjum kaupanda sem bætir við markaðinn, að hann sé ekki bundinn af eigin framleiðslu þegar samið er við þennan nýja kaupanda og að framleiðsluákvörðanir nýtingaraðila geti haft áhrif á verð á raforkumarkaði. Þar með þarf að útvíkka grunnlíkanið. Hér verða viðbæturnar kynntar og ræddar, en uppsett líkan og skýringar er að finna í viðauka A. Nánari útskýringar á útvíkkaða líkaninu og þeim líkönum og viðbótum sem rætt hefur verið um er að finna í meistararitgerð Sigurðar Björnssonar (2016). Þar er bætt við hugmynd Hotellings stig af stigi þar til hið útvíkkaða líkan fæst.

2.4.1 Nýr kaupandi og heildsölumarkaður

Til þess að auka sveigjanleika í orkusöluferlinu eru tvenns konar viðbætur við grunnlíkanið kynntar til sögunnar. Í fyrsta lagi hefur virkjun nú bæði möguleika á að selja á raforkumarkaði og til nýs aðila utan markaðar þar sem samið er um að hafhenda tiltekið magn á tilteknu verði. Virkjun er ekki einskorðuð við annað hvort, en alltaf er byrjað á að framleiða til að uppfylla umsamið magn. Ef framleitt er umfram það, selst sú framleiðsla á markaði og fyrir hana fæst markaðsverð.

Í öðru lagi hefur virkjun aðgang að heildsölumarkaði þar sem hún getur keypt orku ef hún framleiðir ekki nóg til þess að uppfylla umsamið magn við hinn nýja notanda. Mikilvægt er að munurinn á raforkumarkaði, sem hingað til hefur eingöngu verið rætt um, og heildsölumarkaði sé skýr. Hugtökin eru útskýrð í töflu 2.

Tekjur virkjunar taka nú tillit til kostnaðar vegna mögulegra kaupa á heildsölumarkaði og eru því ekki einfalt margfeldi verðs og framleidds magns. Á heildsölumarkaði er orka fánæg á tilteknu einingaverði. Virkjun kaupir aðeins orku í heildsölu sem vantar upp á til að uppfylla umsamið magn. Sú orka er svo endurseld til nýja kaupandans á umsömdu verði og gert er ráð fyrir að heildsöluverð sé alltaf hærra en umsamið verð. Ef virkjun kaupir á heildsölumarkaði lækka því tekjur hennar. Ef virkjunin sér um að uppfylla samning að fullu með sinni framleiðslu verður enginn frádráttur á tekjum vegna kaupa á heildsölumarkaði.

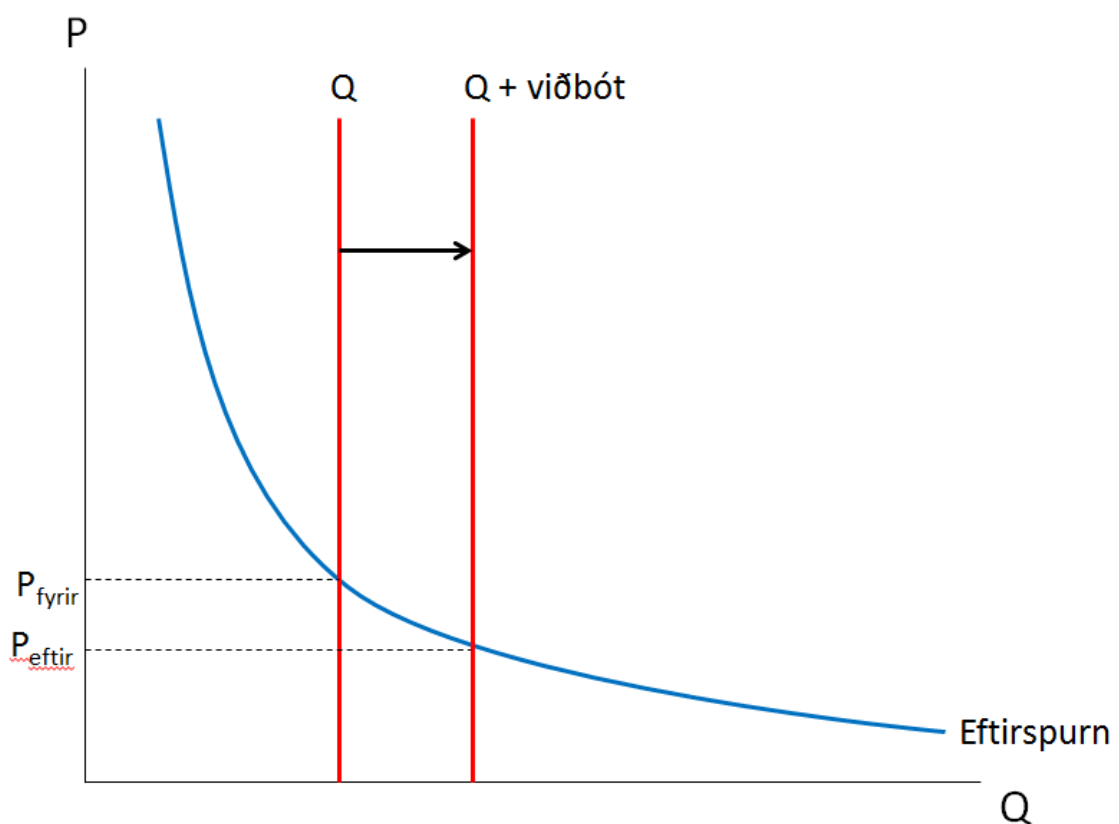
Tafla 2. Munur á almennum raforkumarkaði og heildsölumarkaði.

Raforkumarkaður	Heildsölumarkaður
Markaður þar sem framleiðendur raforku selja heimilum, fyrirtækjum og öðrum orku til eigin nota	Markaður þar sem framleiðendur raforku kaupa raforku af öðrum framleiðendum til að endurselja.

2.4.2 Markaðsverð

Markmiðið er að fá mat á umfang breytinga á markaðsverði vegna framleiðslu frá þessari virkjun sem mögulega yrði seld á raforkumarkaði og myndi bæta við hann. Byrjað er á að skilgreina eftirspurnarfall raforku á þessum markaði. Gert er ráð fyrir að fallform eftirspurnarinnar tryggi fasta eftirspurnarteygni (e. constant elasticity demand function). Út frá því er leitt fall þar sem markaðsverð er fall af því sem þessi tiltekna

virkjun kann að bæta við markaðinn. Til einföldunar er gert ráð fyrir að framboð sé lóðrétt. Það þýðir að framboð er fast og breytist ekki með verði. Lóðréttur framboðsferill getur þó hliðrast ef þættir sem hafa áhrif á framboðið breytast, eins og til dæmis aðfangaverð. Lóðrétt framboð hefur þær afleiðingar að jafnvægismagn, þar sem framboð er jafnt eftirspurn, er alltaf jafnt framboði svo ef framboð eykst, eykst jafnvægismagn sem því nemur. Þetta má sjá á mynd 9. Gert er ráð fyrir að það magn sem fyrir er á markaðinum áður en bætist við frá virkjuninni sé fast og tekið er tillit til þess sem kann að vera afhent nýjum kaupanda. Einnig er gert ráð fyrir að engar aðrar virkjanir séu á döfinni sem gætu selt á raforkumarkað og að annað sem gæti haft áhrif á raforkuverð haldist óbreytt. Þannig verður markaðsverð aðeins fall af viðbót þessarar virkjunar við markaðinn og hægt að reikna nýtt jafnvægisverð út frá framboðsaukningu þessarar virkjunar. Ef virkjun framleiðir umfram umsamið magn aukast tekjur hennar sem nema þeirri framleiðslu sem seld er á raforkumarkaði sinnum markaðsverð. Nánari skýringar á fallinu fyrir markaðsverð og myndræna framsetningu þess má sjá í viðauka A og nákvæma útleiðslu fallsins má finna í meistararitgerð Sigurðar Björnssonar (2016).



Mynd 9. Myndræn framsetning á framboðs- og eftirspurnarföllum.

2.4.3 Umræður um útvíkkað líkan, takmarkanir og varnaglar

Öll líkön eru einföldun á raunveruleikanum og eru hagnaðarhámörkunarlíkön engin undantekning. Þær einfaldanir sem gerðar eru og þær takmarkanir sem eru á líkaninu breyta þó ekki hugmyndafræði þess eða því innsæi sem það skilar.

2.4.3.1 Skaðabætur og skert afhending raforku

Ein frumforsenda líkansins og allra greininga er að gert er ráð fyrir að samningur um orkusölu sé uppfylltur, hvort sem það er með framleiðslu úr eigin jarðhitakerfi eða kaupum á heildsölumarkaði. Í raunveruleikanum eru takmörk fyrir því hve hátt verð virkjun væri tilbúin til að greiða á heildsölumarkaði. Til dæmis gæti verið ákvæði í samningi sem kveður á um skaðabætur ef umsömdu magni er ekki skilað til kaupanda. Þannig væri virkjun ekki tilbúin að greiða meira fyrir orku á heildsölumarkaði eða framleiða með meiri tilkostnaði en sem nemur þessum skaðabótagreiðslum. Ekki er tekið tillit til slíkra skaðabóta hér heldur gert ráð fyrir að verð á heildsölumarkaði verði ekki svo hátt. Ennfremur gætu verið ákvæði í samningi um að honum sé hægt að rifta ef ófyrirséðir hlutir valda því að virkjun getur ekki með góðu móti skilað umsömdu magni til kaupanda.

Í raunveruleikanum er ekki hægt að ábyrgjast með fullkominni vissu að kaupandi fái þá raforku sem samið var um. Þar af leiðandi þyrfti að taka tillit til mögulegra skerðinga á afhendingu raforku. Aðstæður í raforkuframleiðslu geta orðið þannig að ekki tekst að framleiða nóg til að uppfylla samninga og ekki er víst að næg orka sé alltaf í boði á heildsölumarkaði eins og gert er ráð fyrir hér. Það getur gerst til dæmis ef vatnsár er lélegt og því ekki hægt að keyra vatnsaflsvirkjanir á fullum afköstum eða ef framleiðslugeta jarðhitavirkjunar fellur með ófyrirséðum hætti. Ekki er tekið tillit til slíkra skerðinga í þessari athugun með beinum hætti.

Heildsölumarkaður er hér einungis endurspegladur með einu föstu verði. Ef Ísland er tekið sem dæmi hefur Landsvirkjun líklega ein bolmagn til að selja raforku frá sér á heildsölumarkaði. Miðað við fjölda virkjana sem hún hefur yfir að ráða er hægt að ímynda sér að hún geti hlaupið undir bagga með virkjunum sem vanhagar um hóflegt magn raforku svo í íslensku samhengi er þessi eini stiki líklega ekki svo slæm nálgun. Ef Ísland yrði hins vegar tengt við raforkumarkaði erlendis eða virkjunin staðsett erlendis

er líklegt að einhvers konar samkeppnismarkaður yrði raunin sem mögulega þyrfti að taka tillit til. Ef eftirspurn á heildsölumarkaði er nógu mikil er einnig líklegt að krafa seljanda um verð hækki ef það verður erfiðara fyrir hann að anna eftirspurn vegna aukins framleiðslukostnaðar.

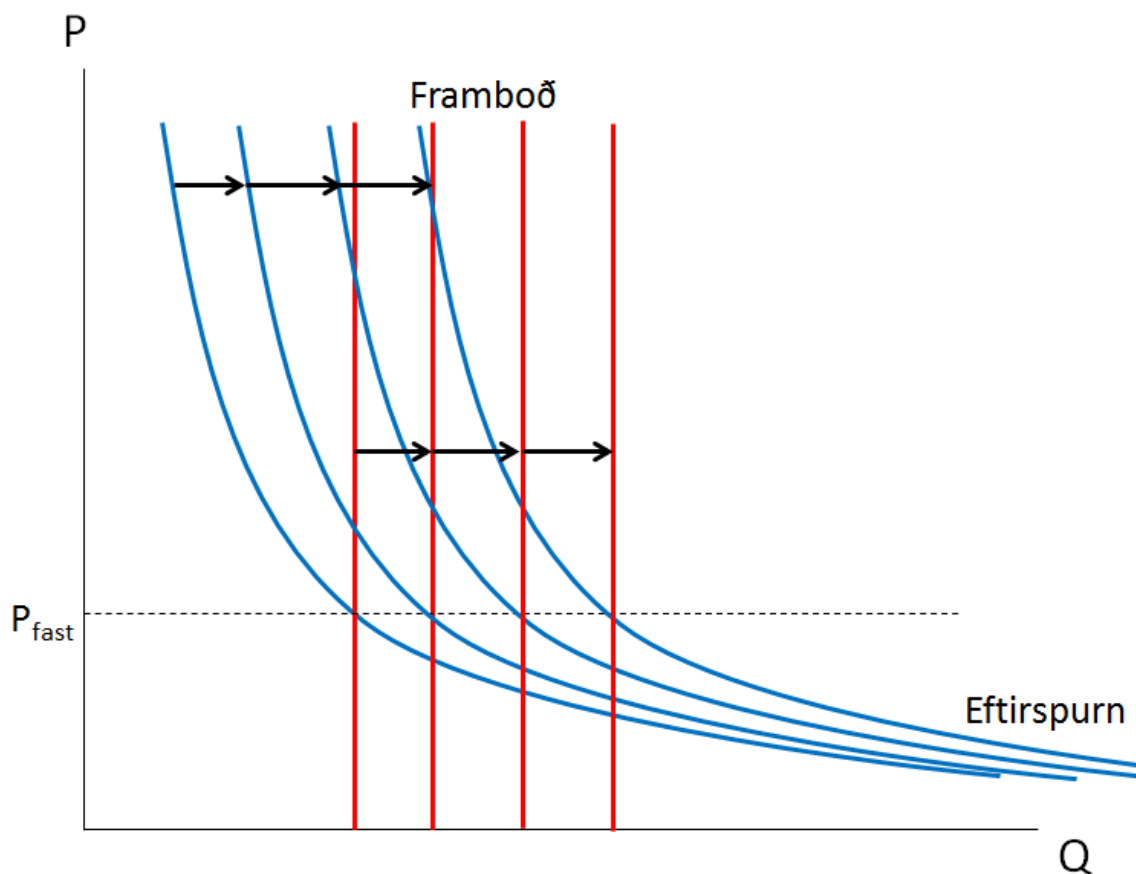
2.4.3.2 Forsendur markaða

Gert er ráð fyrir að virkjun kaupi að hámarki það sem vantar upp á til að uppfylla samning. Þannig er einungis mögulegt að kaupa á heildsölumarkaði til að endurselja stórnotanda, ekki er gert ráð fyrir að virkjunin geti keypt á heildsölumarkaði og endurselt á raforkumarkaði. Hvorki er heldur mögulegt fyrir virkjun að kaupa raforku á raforkumarkaði og endurselja stórkaupanda, né að selja inn á heildsölumarkað. Með öðrum orðum getur virkjun einungis keypt á heildsölumarkaði og selt á almennum raforkumarkaði. Gert er ráð fyrir að aðstæður á almennum raforkumarkaði, afstæð verð milli almenns markaðar og heildsölumarkaðar og aðrar forsendur tengdar mörkuðum séu almennt innan eðlilegra marka. Þessar forsendur útiloka ýmis jaðartilfelli sem annars gætu litið dagsins ljós, til dæmis þegar verð á heildsölumarkaði lækkar svo mikið að raforkan fæst nánast gefins, mögulega vegna of mikillar framleiðslu virkjunar.

Ef framboðsfall á raforkumarkaði yrði metið sérstaklega yrði það örugglega upphallandi en ekki lóðrétt. Um leið og framboð verður upphallandi er ekki lengur hægt að vinna eingöngu með eftirspurnarfallið til þess að fá fall fyrir markaðsverð eins og gert er hér. Hægt er að rökstyðja forsendu um fullkomlega óteygið framboð til skamms tíma með því að erfitt er að auka framboð vegna mikillar fjárfestingarþarfar og langs uppbyggingartíma orkuvera. Ef orkuver eru nálægt sinni hámarks framleiðslugetu er ekki raunhæft að auka framboðið í litlum einingum. Aftur á móti er ekki ólíklegt að eitthvað ónýtt afl sé til staðar í þeim virkjunum sem eru starfandi. Enn fremur er líklegt að síðar sjái einhver sér hag í því að auka við framboð á markaði í framtíðinni ef eftirspurn eykst og markaðsverð hækkar. Það þarf þó að gera að vel ígrunduðu máli og er háð forsendum um orkuverðsspár. Af þessu sést að lóðrétt framboð er nokkur einföldun, en þó ágæt fyrsta nálgun sem gott er að vinna með.

Til einföldunar er hér upphaflegt jafnvægisbálg á markaðnum, haft fast með tíma. Raunverulegra væri að gera ráð fyrir að það vaxi með tíma í takt við aukna eftirspurn og líkleg aukin umsvif í samfélaginu. Framleiðendur myndu líklega bregðast við og auka

framboð. Ef bæði framboð og eftirspurn aukast í takt þannig að jafnvægisverð helst fast yrði engin breyting á áhrifum aukins framboðs vegna stakrar virkjunar á verð eins og markaðurinn er settur upp hér. Myndræna framsetningu á þessu má sjá á mynd 10. Jafnvægisverð fæst þar sem framboð og eftirspurn mætast. Eins og sést er stöðu ferla einungis hliðrað, engin breyting verður á lögun ferla. Þetta er ekki rökrétt þar sem verðbreytingar vegna aukins framboðs frá stakri virkjun ættu að minnka eftir því sem markaðurinn stækkar og hið aukna framboð verður minna hlutfall af markaðinum. Til þess að fá raunhæfari mynd af raforkumarkaðinum þyrfti því að setja upp föll sem taka þessa hluti til greina. Enn fremur þyrfti raunhæfari mynd af raforkumarkaði að taka tillit til fleiri þátta en bara aukins framboðs frá stakri virkjun.



Mynd 10. Breyting á jafnvægi á raforkumarkaði ef Q_0 eykst með tíma í takt við aukna eftirspurn.

2.4.3.3 Samningar við nýjan kaupanda og ýmsar takmarkanir

Samningar við stóra aðila utan markaða geta verið flóknir. Hér er þeim lýst með umsömdu verði og magni. Í raunveruleikanum geta slíkir samningar innihaldið tengingar umsamins verðs til dæmis við afurðaverð eins og álverð eða raforkuverð erlendis. Slíkar

tengingar valda því að umsamið verð og þar af leiðandi tekjur og hagnaður sveiflast meira vegna þátta sem virkjunin hefur ekki stjórn á.

Þó hið útvíkkaða líkan gefi betri mynd af raunveruleikanum en grunnlíkanið er það enn einföldun. Til viðbótar við það sem þegar hefur verið nefnt er ýmislegt fleira hægt að tína til. Í raunveruleikanum eru lántökur yfirleitt hluti af fjármögnun virkjana. Hér er hins vegar gert ráð fyrir 100% eiginfjármögnun. Það veldur því að hagnaður er meiri en hann yrði, sérstaklega á fyrri hluta tímabils þegar verið væri að greiða lánið upp. Engir skattar eða önnur opinber gjöld eru lögð á framleiðanda eða kaupendur. Það leiðir einnig til aukins hagnaðar yfir allt tímabilið. Oft er gert ráð fyrir að einingakostnaður sé fastur en ekki breytilegur með framleiðslustigi. Eftir því sem framleiðsla eykst er ekki óalgengt að hver framleidd eining sé dýrari en fyrri einingar svo kostnaður ætti að vaxa og hagnaður þar af leiðandi að minnka með óbreyttum tekjum.

2.4.3.4 Óvissa

Í raunveruleikanum er að minnsta kosti einhver óvissa um flest sem tengist jarðhitavinnslu. Mikil óvissa liggur í jarðhitakerfinu sjálfu, til dæmis stærð varmaforðans og viðbrögðum kerfisins við vinnslu. Ekki er gert ráð fyrir óvissu í jarðhitakerfinu í þessari athugun. Líkan er einungis keyrt einu sinni í hverju tilfelli þannig að ein stök niðurstaða fæst. Þannig er í raun gert ráð fyrir að nýtingaraðili hafi fulla vitneskju um eðli auðlindarinnar, stærð hennar og þróun. Öll óvissa er slæm fyrir rekstur fyrirtækja og þau kosta oft einhverju til til þess að minnka hana, til dæmis með frekari rannsóknum og gagnaöflun. Þannig má segja að líkan án óvissu sé líklegt til að ofmeta raunverulegan hagnað.

Óvissa minnkar mesta mögulega hagnað hvort sem jarðhitakerfi bregst betur eða verr við nýtingu miðað við það sem upphaflega var talið. Hér er mesti mögulegi hagnaður skilgreindur sem sá hagnaður sem hægt er að ná ef raunveruleg viðbrögð jarðhitakerfis eru þekkt fyrirfram. Ef óvissa er til staðar og jarðhitakerfi bregst verr við nýtingu en talið var verður hagnaður minni en væntingar stóðu til. Líklegt er að stjórnendur virkjunar geri einhvers konar ráðstafanir til að lágmarka neikvæðar afleiðingar óvissu, til dæmis með tryggingum eða öðru sem minnkar hagnað. Ef kerfið bregst aftur á móti betur við nýtingu en talið var getur varfærin uppbygging, sem líklegt er að raunin verði ef óvissa er til staðar, gert það að verkum að hagkvæm framleiðsla er

minni en hún hefði verið ef hin jákvæðu viðbrögð kerfisins hefðu verið þekkt. Þannig verður hagnaður minni en ef þessi jákvæðu viðbrögð hefðu verið þekkt fyrirfram því þá hefði uppbygging ekki verið varfærin heldur hæfileg fyrir hina miklu hagkvæmu framleiðslu.

Í þessari athugun er jarðhitakerfi lýst með magni nýtanlegs varma í kerfinu, endurnýjun varma og hámarksframleiðslugetu meðal borholu. Meiri varmaforði og hraðari endurnýjun forðans leiða alltaf til betri afkomu virkjunar. Meiri varmaforði, á sama hátt og stærri olíulind, leiðir bæði til meiri hagnaðar vegna þess að nú er meira til af auðlindinni og til þess að afkastageta borhola eykst svo hraðar er hægt að ná varma úr kerfinu. Þannig er hægt að framleiða meira snemma á nýtingartíma svo samanlagður núvirtur hagnaður eykst enn frekar. Aukin hámarksframleiðslugeta meðal borholu leiðir sömuleiðis til aukins hagnaðar að öðru óbreyttu, en í lok nýtingartíma er aftur á móti minna eftir af varma í kerfinu, en það eru verðmæti sem ekki má horfa framhjá.

2.5 Fórarkostnaður lands og úthrif

Fórarkostnaður lands og úthrif koma ekki inn í útvíkkaða líkanið nema í sér tilfelli sem tekið verður fyrir í lok niðurstöðukafla. Þar af leiðandi var fjallað um útvíkkaða líkanið án þeirra þátta sem notaðir verða til þess að ná utan um fórarkostnað lands og kostnað vegna úthrifa. Þeim þáttum er einungis bætt við í þessu sér tilfelli.

2.5.1 Fórarkostnaður lands

Í öllum tilfellum nema þessu tilfelli, þar sem gert er ráð fyrir fórarkostnaði lands og kostnaði vegna úthrifa, er gert ráð fyrir að nýtingaraðili eigi landið sem auðlindin er á og réttinn til að nýta hana. Þar með þarf hann ekki að greiða leigu af landinu. Í raunveruleikanum er aftur á móti algengt að annar aðili eigi landið svo nýtingaraðili þarf að greiða fyrir afnot. Ef nýtingaraðili þarf að greiða einhvers konar leigu ætti sú upphæð ekki að vera lægri en sem nemur hagnaði af næst bestu notum svæðisins. Ef auðlindin sem um ræðir skilar eiganda tekjum í núverandi ástandi, til dæmis vegna ferðaþjónustu, er líklegt að landeigandi verði af að minnsta kosti hluta þessara tekna ef virkjað er. Ef valið stendur einungis milli þess að virkja auðlind og halda henni í óbreyttri mynd yrði leigan að vera í það minnsta sú upphæð sem nemur töpuðum hagnaði af hinum notunum, annars myndi landeigandi ekki leyfa virkjun á landi sínu.

Á Ísland er enn sem komið er ekki tryggt að landeigendur fái markaðsverð fyrir nýtingarrétt á auðlindum. Í apríl 2016 lagði ESA, eftirlitsstofnun EFTA, til að nýtingarfyrirtæki á Íslandi sem hafa í hyggju að nýta annað hvort vatns- eða jarðhitaauðlindir greiði markaðsverð fyrir þann rétt (ESA, 2016). Greiði nýtingarfyrirtæki ekki fullt markaðsverð er það ígildi ríkisaðstoðar fyrir fyrirtækið ef landið er í ríkiseigu. Gangist íslensk stjórnvöld ekki við þessum tillögum mun ESA setja málið í rannsóknarferli.

Jafnvel þó nýtingaraðili eigi auðlindina þarf hann að taka glataðan hagnað af öðrum notum með í reikninginn. Hann virkjar ekki nema hagnaður af því sé meiri en tapaður hagnaður af öðrum notum við sömu áhættu. Með öðrum orðum þyrfti að taka tillit til fórnarkostnaðar landsins (það virði sem tapast vegna þess að ein leið er valin fram yfir aðra) til að fá sem réttasta mynd þegar hagnaður af virkjun er hámarkaður.

2.5.2 Úthrif

Í þessari athugun tekur grunntilvik líkans ekki tillit til úthrifa, en úthrif eru áhrif ákvarðanatöku á þá sem ekki eru beinir þátttakendur í ákvarðanatökunni, oft kallaðir þriðju aðilar. Úthrif geta bæði verið jákvæð og neikvæð. Tekjur af ferðamönnum sem vilja skoða virkjun og aukið aðgengi að svæði með tilkomu nýrra vega eru dæmi um jákvæð úthrif virkjanaframkvæmda. Til neikvæðra úthrifa telst til dæmis hvers konar mengun eins og loftmengun, sjónmengun og hljóðmengun. Mengun frá jarðhitavirkjunum getur haft margvíslegar neikvæðar afleiðingar, en skemmdir á viðkvæmum tækjabúnaði, líkamleg einkenni og almenn óþægindi og hlýnandi loftslag vegna útblásturs brennisteinsvetnis og koldíoxíðs má nefna sem dæmi. Ekki er eðlilegt að fólk sem hefur engin áhrif á ákvarðanatöku þurfi að bera kostnaðinn sem hlýst af þessari mengun.

Margs konar önnur úthrif er hægt að nefna. Áhrif á gróður, dýralíf, heildareftirspurn í hagkerfinu, byggð, uppbyggingu innviða og orkuöryggi eru allt dæmi um úthrif af virkjunum. Þegar þau verða að veruleika getur hlotist af kostnaður eða ábati.

Dæmi um afleiðingu neikvæðra úthrifa vegna virkjunar orkuauðlindar er verri upplifun fólks af náttúru. Landsvæði breytast oft mikið við virkjanaframkvæmdir þannig að möguleikar svæðis til annarra nota skerðast. Fólk sem vill njóta óspilltrar náttúru nýtur hennar ekki eins vel ef komnar eru borholur, stíflur eða önnur mannvirki á svæðið.

Í verri upplifun fólks er falið tapað virði sem taka ætti tillit til við hagnaðarhámörkun. Ef Ísland er tekið sem dæmi er það sérstaklega mikilvægt nú þegar ferðamennska er orðin einn stærsti atvinnuvegurinn á Íslandi og helsta aðdráttaraflið er óspillt náttúra (Ferðamálastofa, 2014). Ennfremur er hægt að færa rök fyrir því að virði óspilltrar náttúru sé almennt að aukast eftir því sem tíminn líður og slíkum svæðum fækkar (Krutilla, 1967).

Þó ýmis jákvæð úthrif geti fylgt virkjanaframkvæmdum er líklegt að neikvæð úthrif hafi meira vægi. Þar af leiðandi er líklegt að hagnaðarhámörkun fyrir virkjanakost sem tekur einungis tillit til rekstrarkostnaðar en ekki úthrifa ofmeti hagnað vegna þess að heildarkostnaður er vanmetinn. Þannig er líklegt að virkjanakostur sem skilar miklum rekstrarhagnaði verði tekinn fram yfir kost sem skilar minni rekstrarhagnaði ef ekki er tekið tillit til úthrifa. Kostnaður vegna úthrifa af fyrri kostinum gæti hins vegar verið svo mikill að síðari kosturinn er, þegar allt kemur til alls, hagkvæmari (Sigurður Jóhannesson, 2016a).

Fórarkostnaður lands og úthrif eru ekki aðskild fyrirbæri. Ef landeigandi til dæmis rúkkar aðgangsgjald að auðlindinni og hækkar það skyndilega má segja að virði flytjist frá gestum (neytendum) til landeiganda þar sem nú halda neytendur minna eftir af ábata sínum. Hvort sem virðið liggur hjá gestum eða landeiganda getur að minnsta kosti hluti þess tapast við virkjanaframkvæmdir.

2.5.3 Viðbót við líkan

Líklegt er að lausn hagnaðarhámörkunar verði bjöguð ef einblínt er á þá þætti sem auðvelt er að meta til fjár (framleiðslan sjálf, boranir hola og fleira) en ekki tekið tillit til alls sem framkvæmdin hefur í för með sér. Ef tekið er tillit til allra úthrifa, fórnarkostnaðar lands og annars sem taka þarf tillit til og hægt er að verðleggja allt með viðunandi hætti, fæst betra mat á heildarkostnaði vegna framkvæmda. Þar af leiðandi fengist betra mat á samanlagðan, núvirtan hagnað framkvæmdarinnar. Líkan án fórnarkostnaðar lands og kostnaðar vegna úthrifa er því takmarkað og taka verður niðurstöðum þess með þeim fyrirvara.

Tekið er fyrir sérstakt tilfelli þar sem tekinn er með fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa. Það er gert með svipuðum hætti og Hasan (2013) gerði, eða með því að bæta línulegum kostnaðarlið við í markmiðsfalli hins útvíkkaða líkans þar

sem kostnaður er vaxtandi fall af framleiddu magni og fjölda borhola. Gert er ráð fyrir að í þessum kostnaðarlið sé fólgin nettó kostnaður úthrifa þar sem tekin eru með jákvæð úthrif sem vega að einhverju leyti upp neikvæðu þættina. Gengið er út frá því að neikvæðu úthrifin séu sterkari svo nettó kostnaður verður jákvæður. Stærðfræðilega útfærslu og umræður um kostnaðarlið sem á að ná utan um fórnarkostnað lands og kostnað vegna úthrifa má sjá í viðauka B og í meistararitgerð Sigurðar Björnssonar (2016).

Fyrir marga er fyrsta rask á svæði, sem hægt er að skilgreina sem óspillta náttúru, yfirleitt verra en viðbótarrask. Þegar búið er að bora eina holu sem losar gufu út í andrúmsloftið með tilheyrandi sjónmengun, er að sama skapi ekki eins slæmt að fá þá næstu. Þar af leiðandi má búast við að aukin framleiðsla og fleiri holur hafi minni áhrif á sjónaræna upplifun gesta samanborið við áhrif af upphaflegum framkvæmdum og raski. Öðru máli gegnir um áhrif aukinnar framleiðslu á heilsu. Aukin loftmengun getur haft meira en línuleg áhrif vegna þess að aukinn styrkur hennar getur haft vaxandi neikvæð áhrif á heilsu fólks og verið hættuleg í mjög háum styrk. Þessvegna getur hin línulega nálgun sem notast er við hér vanmetið áhrif loftmengunar.

Þessi viðbót er notuð til þess að kanna hvers konar breytingar eru líklegar til að verða á lausn líkans þegar tekið er tillit til fórnarkostnaðar lands og kostnaðar vegna úthrifa. Til þess að fá gott mat á þann kostnað þarf umfangsmeiri rannsóknir en hafa verið gerðar hingað til. Meta þyrfti til fjár öll úthrif virkjunar, bæði áhrif á alla aðra notkun sem og áhrif á tilvistargildi svæðisins, en það er virði svæðis í huga fólks sem hefur ekki í hyggju að heimsækja það og hafa af því bein not. Margir myndu til dæmis ekki vilja að kóralrifin undan ströndum Ástralíu eyðileggist, en fæstir munu nokkurn tímann heimsækja þau.

3 Niðurstöður – Dæmi um notkun líkans

Fyrst verður útikoma grunnlíkans sýnd, en þá er gert ráð fyrir að forsendur endurspegli venjuleg, eðlileg eða fyrirsjáanleg gildi á þeim þáttum sem greiningin tekur tillit til. Síðan verða tekin nokkur dæmi um hvernig hægt er að nota hið útvíkkaða líkan þar sem forsendum er breytt frá því sem telst eðlilegt eða venjulegt. Útkoma grunntilfellis verður borin saman við annað tilfelli sem gefur sambærilegan hagnað. Því næst verður skoðað samspil umsamins verðs og heildsöluverðs. Skoðað verður hvernig samspil markaðsverðs og samnings við kaupanda utan markaðar hefur áhrif á sölu á markað. Að lokum verður skoðað hvaða áhrif fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa hefur á niðurstöðu líkansins. Allar greiningar voru gerðar í forritinu python(x,y) 2.7.10.0. Greiningar voru gerðar númerískt með hámarkunarfallinu „scipy_slsqp“.

3.1 Grunntilfelli

Forsendur grunntilfellis má sjá í efri hluta töflu 3. Hér eru gildi valin sem talin eru líkleg eða eðlileg miðað við fyrirbyggjandi gögn og heimildir og eru því talin lýsa venjulegu eða eðlilegu ástandi. Í síðari tilfellum verður ýmsum forsendum breytt miðað við grunntilfelli og athugað hvernig niðurstöður breytast.

Gildi fyrir forsendur sem lýsa kostnaði við uppbyggingu og rekstur orkuvers voru valin með hliðsjón af rannsókn Egils Júlíussonar o.fl. (2011) ásamt uppfærslum frá fulltrúa Landsvirkjunar (Egill Júlíusson, persónuleg samskipti, ágúst 2016). Forsendur sem lýsa jarðhitakerfinu miðast við mat fulltrúa Landsvirkjunar (Egill Júlíusson, persónuleg samskipti, ágúst 2016).

Til að fá mat á umsamið magn var skoðað hve mikið afl er til reiðu á fyrirhuguðum virkjanasvæðum á Þeystareykjum og í Bjarnarflagi, en það eru um 40-60 MW (Landsvirkjun, á.á.-b, á.á.-c). Hér var ákveðið að miða við 60 MW. Til að fá mat á umsamið verð var skoðað hvaða verð er talið vera í nýlegum samningum Landsvirkjunar og Orku náttúrunnar við kísilver. Meðalverð er talið vera nálæggt 40 \$/MWst án dreifingar- og flutningskostnaðar (Haraldur Guðjónsson, 2015; Orka náttúrunnar, 2015a) og notast var við það gildi.

ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program), undirstofnun Alþjóðabankans, skilgreinir nýtingartíma jarðhitavirkjana sem 30 ár (Gehring og Loksha, 2012) og er það gildi notað hér. Þó tímalengd raforkusamninga sé yfirleitt um og yfir 20 ár (Vilhjálmur Þorsteinsson o.fl., 2011) er lengd þeirra misjöfn í raunveruleikanum. Framlenging samnings Landsvirkjunar og Norðuráls er til fjögurra ára (Kári Gylfason, 2016), samningur Orku náttúrunnar og Silicor Materials er til 15 ára (Orka náttúrunnar, 2015b) og endurnýjun samnings Landsvirkjunar við Rio Tinto frá árinu 2010 gildir til 2036 (Landsvirkjun, 2010). Enn lengri samningar hafa verið gerðir, til dæmis samningur Landsvirkjunar og Alcoa sem var til 40 ára (Vilhjálmur Þorsteinsson o.fl., 2011). Af þessu sést að ekki er augljóst hvaða tímalengd raforkusamnings skuli nota í grunntilfelli. Hér var notað sama gildi og fyrir samnigstíma eða 30 ár. Til að fá mat á heildsöluverð var gert ráð fyrir að það væri rúmlega helmingi hærra en umsamið verð í grunntilfelli, svo heildsöluverð var skilgreint sem 62,8 \$/MWst.

Afvöxtunarvextir voru valdir sem efra mark vegins fjármagnskostnaðar (e. weighted average cost of capital, WACC) vegna virkjana í ársreikningi Orkuveitu Reykjavíkur fyrir árið 2015, eða 7,5 % (Orkuveita Reykjavíkur, 2016). Efra gildið var valið vegna þess að hér er gert ráð fyrir að virkjun sé sjálfstæð en ekki undir opinberu eignarhaldi með því öryggi sem því fylgir. Jarðhitavirkjanir eru einnig tiltölulega áhættusamar fjárfestingar. Þess vegna er líklegt að gerð verði krafa um hærri ávöxtun.

Gildi á eftirspurnarteygni raforku var áætlað út frá fyrirliggjandi rannsóknum. Samkvæmt þeim getur eftirspurnarteygnin verið á afar breiðu bili, frá 0 niður í um það bil -2 (Labandeira, Labeaga og López-Otero, 2010). Til viðbótar við fyrirliggjandi rannsóknir var því stuðst við drög athugunar Hagfræðistofnunar á verðteygni eftirspurnar íslenskra heimila. Frumniðurstöður bentu til þess að verðteygnin sé um það bil -0,5 (Sigurður Jóhannesson, 2016b) og var það gildi notað.

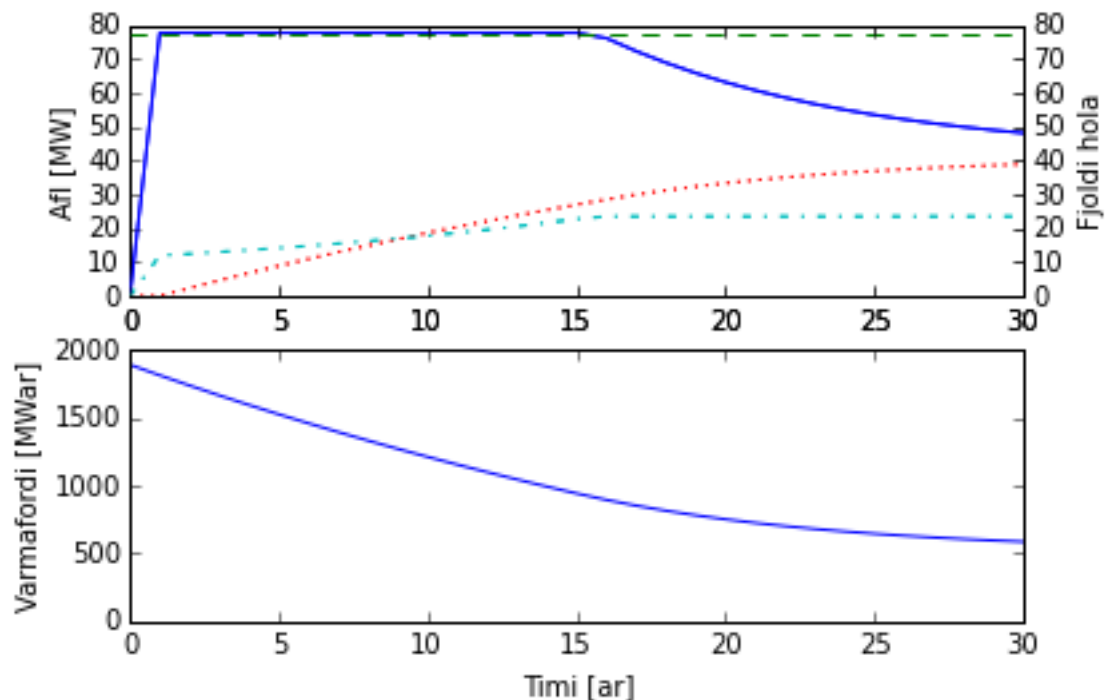
Til að fá mat á framboði á almennum raforkumarkaði var notkun ársins 2014 notuð, en hún var 3197 GWst (Orkustofnun, 2015e) eða um 350 MWár og var það gildi notað. Verð á raforkumarkaði áður en nokkuð bætist við framboð, P_0 , var áætlað sem meðaltal smásöluverðs tveggja framleiðslufyrirtækja, Orku náttúrunnar og Orkusölnunar án dreifingar- og flutningskostnaðar samkvæmt núgildandi verðskrá, eða 48 \$/MWst (Orka náttúrunnar, 2016a, 2016b; Orkusalan, 2016).

Tafla 3. Forsendur og niðurstöður grunntilfellis.

Forsenda	Gildi	Eining	Stiki	Gildi	Eining
Almennur rekstrarkostnaður	1,14	\$/MWst	Heildsöluverð	62,8	\$/MWst
Rekstrarkostnaður borhola	0,09	M\$/holu/ár	Umsamið verð	40	\$/MWst
Kostnaður við borun	6,1	M\$/holu	Samningstími	30	ár
Fjárfestingarkostnaður orkuvers	1,0	M\$/MW	Nýtingartími virkjunar	30	ár
Fastur kostnaður	28	M\$	Afvöxtun	7,5	%
Endurnýjun varma í jarðhitakerfi	0,03	1/ár	Verðteygni eftirspurnar	-0,5	
Hámarsafkastageta með borholu	6,5	MW	Upphafsverð á raforkumarkaði	48	\$/MWst
Varmaforði jarðhitakerfis	1893	MWár	Framboð á raforkumarkaði	350	MWár
Umsamið magn	60	MW			
Niðurstöður					
Hagnaður	71,4	M\$			
Varmaforði kerfis í lok nýtingartíma	587,2	MWár			
Uppsett afl orkuvers	77,7	MW			
Framleiðsla í lok nýtingartíma	48,1	MW			
N _T	~24	Holur			

Niðurstöðu grunntilfellis má sjá í neðri hluta töflu 3 og á mynd 11. Á efri hluta myndar 13 táknar blá lína framleitt magn, græn brotin lína uppsett afl orkuvers, rauð brotin lína endurnýjun varmaforða í kerfinu og ljósblá brotin lína fjölda borhola á

hverjum tíma. Á neðri hluta myndar 11 sést hvernig varmaforði kerfisins þróast. Sama framsetning gildir um sambærilegar myndir í öðrum tilfellum.



Mynd 11. Niðurstaða grunntilfellis.

Í öllum tilfellum sem tekin eru til viðbótar við grunntilfelli eru forsendur um rekstrarkostnað og kostnað vegna uppbyggingu orkuvers, jarðhitakerfið, líftíma virkjunar, lengd samningstíma, afvöxtunarvexti og almennan raforkumarkað eins og í grunntilfelli og því ekki getið frekar í umfjöllun um tilfelli. Í töflum eru framvegis aðeins gildi þeirra stuðla sem taka breytingum í viðkomandi tilfelli eða eru ólíkir gildum í grunntilfelli. Sé stuðla ekki getið er gert ráð fyrir að þeir séu eins og í grunntilfelli.

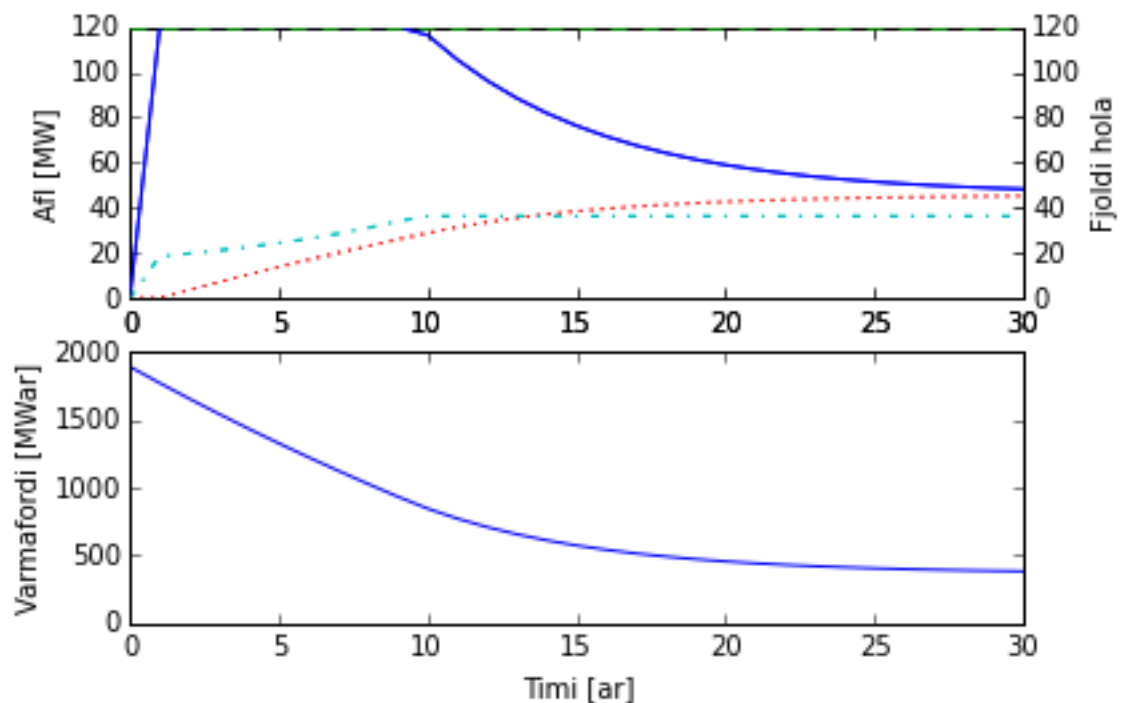
3.2 Tilfelli 1: Jafn hagnaður ólíkra leiða

Markmið nýtingar hér er að hámarka hagnað. Þegar unnið er innan þess ramma með þann sveigjanleika í sölu á rafmangi sem hefur verið lýst, er hægt að haga forsendum á margvíslegan hátt þannig að sambærilegur hagnaður fáiist. Sett er upp tilfelli (A) þar sem annars konar samningur frá kaupanda raforku en í grunntilfelli, er sýndur. Kaupandinn býður tiltölulega hátt raforkuverð en gerir kröfu um mikið magn, mögulega svo mikið að jarðhitakerfi af þessari stærð og gerð ráði illa við það magn, að minnsta kosti til lengri tíma. Yfirlit yfir forsendur hins mögulega samnings og niðurstöður líkans sem og

sambærilegar forsendur og niðurstöður fyrir grunntilfelli má sjá í töflu 4. Niðurstöður má sjá myndrænt á mynd 12.

Tafla 4. Samanburður á ólíkum tilboðum sem gefa sambærilegan samanlagðan núvirtan hagnað.

	Grunntilfelli	A
Forsendur		
Umsamið magn (MW)	60	120
Umsamið verð (\$/MWst)	40	47,1
Niðurstöður		
Hagnaður (M\$)	71,4	71,3
Varmaforði í lok nýtingartíma (MWár)	587,2	383,9
Stærð virkjunar (MW)	77,7	120
Framleiðsla í lok nýtingartíma (MW)	48,1	48,2
Fjöldi hola í lok nýtingartíma	~24	~38



Mynd 12. Niðurstöður fyrir samning í tilfelli A.

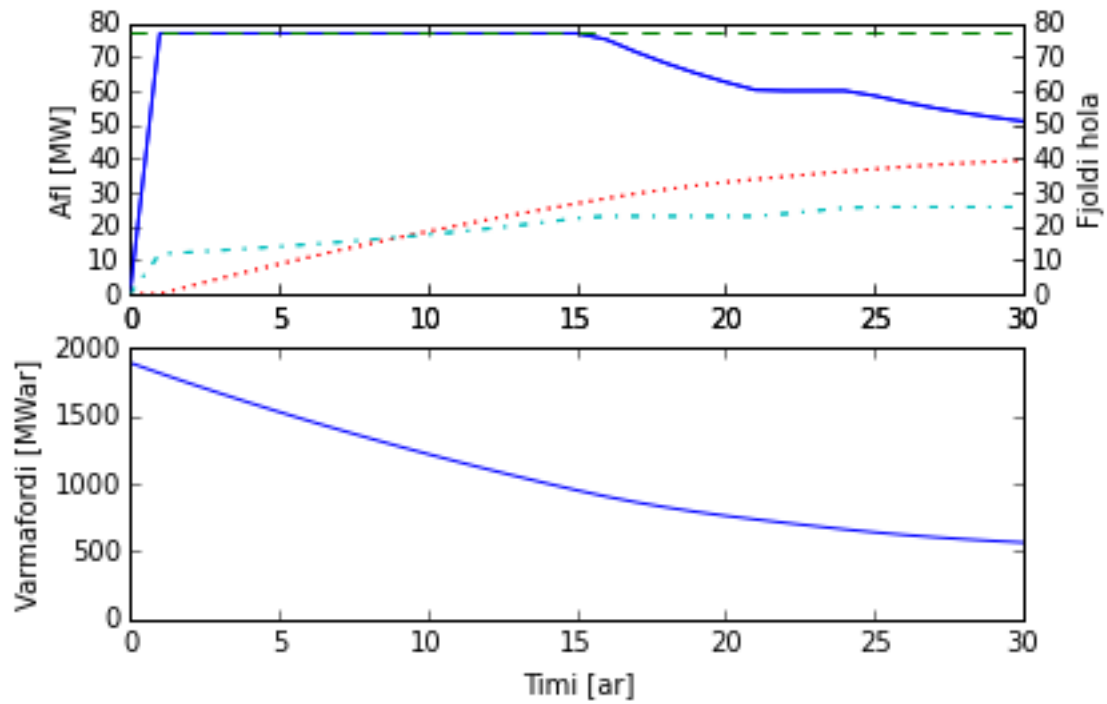
3.3 Tilfelli 2: Eigin framleiðsla eða kaup á heildsölumarkaði

Ein stærsta viðbótin við útvíkkaða líkanið er möguleiki virkjunar á að kaupa raforku á heildsölumarkaði til að standa við gerðan samning við kaupanda. Þannig er virkjun ekki bundin við eigin framleiðslu. Til að varpa frekara ljósi á hlutverk heildsölumarkaðar verður kannað hvernig hagnaður virkjunar og sá varmaforði sem eftir er í kerfinu breytist þegar forsendur um verð á heildsölumarkaði, umsamið verð og umsamið magn breytast.

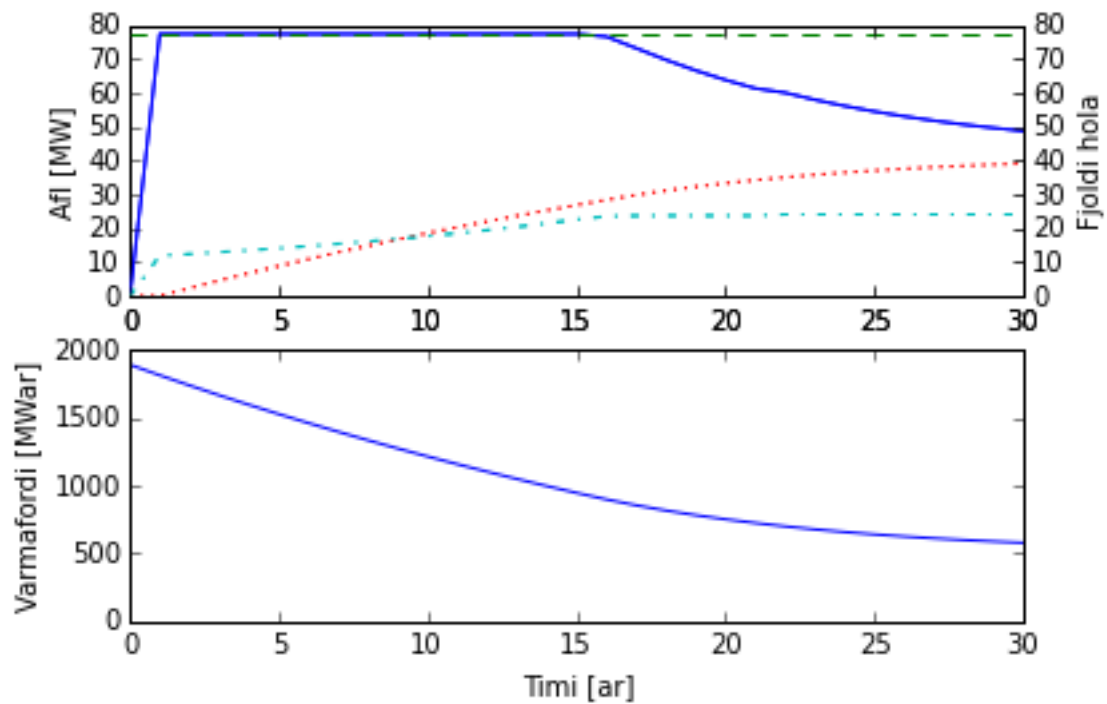
Fjögur tilfelli til viðbótar við grunntilfelli eru skoðuð. Fyrst er umsamið verð óbreytt miðað við grunntilfelli en heildsöluverð hátt. Þar á eftir er umsamið verð hátt en heildsöluverð eins og í grunntilfelli. Því næst er umsamið verð hátt og heildsöluverð hátt. Að lokum kemur tilfelli þar sem allt er eins og í grunntilfelli nema nú er umsamið magn meira. Samantekt á forsendum og niðurstöður tilfella A til D má sjá í töflu 5 og á myndum 13 til 16.

Tafla 5. Áhrif heildsöluverðs á niðurstöðu og samspil heildsöluverðs og umsamins verðs.

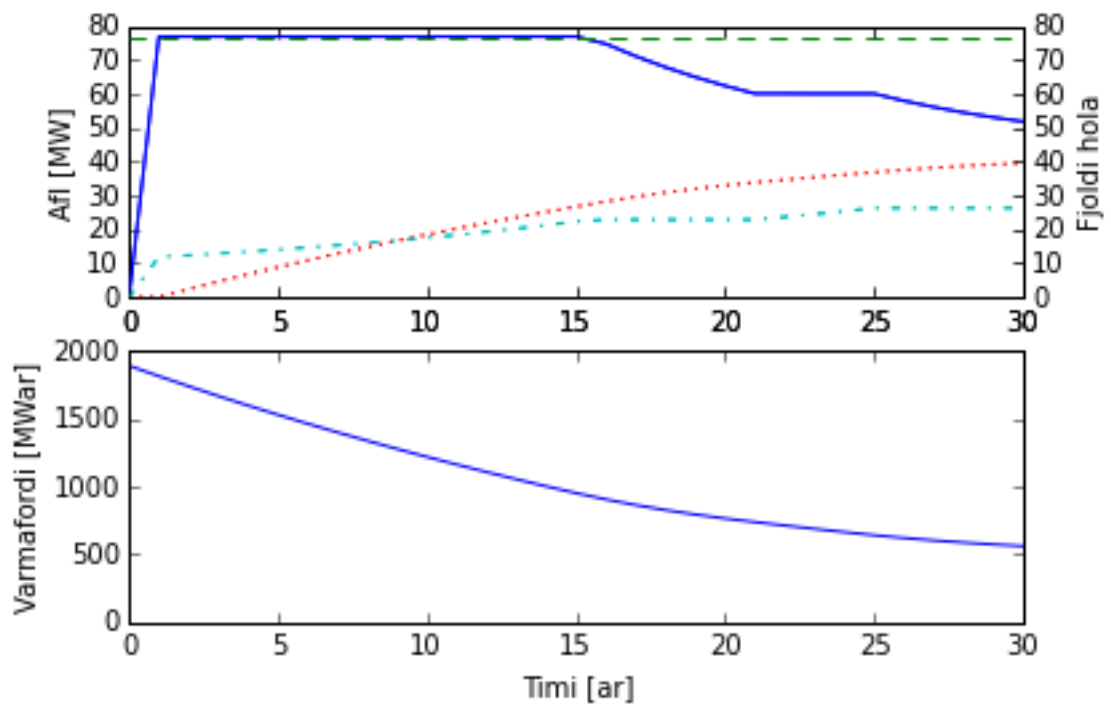
	Grunn- tilfelli	A	B	C	D
Forsendur					
Umsamið magn (MW)	60	60	60	60	100
Umsamið verð (\$/MWst)	40	40	45	45	40
Heildsöluverð (\$/MWst)	62,8	85,6	62,8	85,6	62,8
Niðurstöður					
Hagnaður (M\$)	71,4	70,1	102,2	101,1	35,2
Varmaforði í lok nýtingartíma (MWár)	587,2	566,4	579,4	562,2	446,8
Stærð virkjunar (MW)	77,7	77,0	77,3	76,9	100,0
Framleiðsla í lok nýtingartíma (MW)	48,1	51,0	48,7	51,8	48,4
Fjöldi hola í lok nýtingartíma	~24	~27	~25	~28	~32



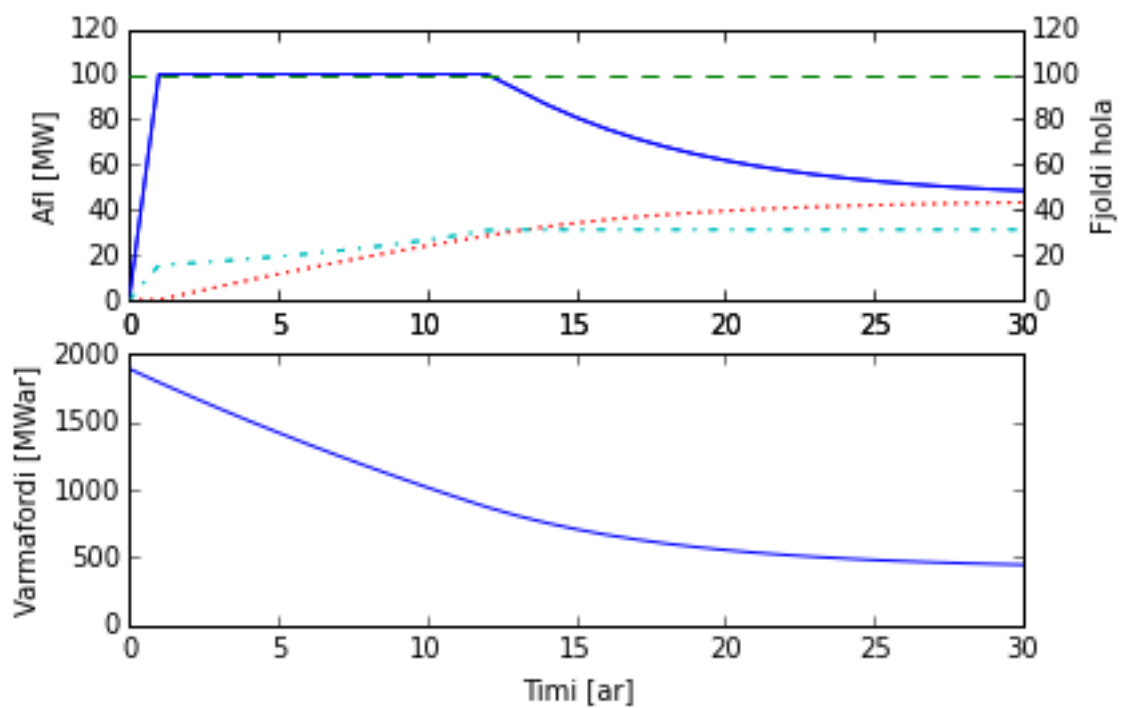
Mynd 13. Tilfelli A: Umsamið verð óbreytt en hátt heildsöluverð.



Mynd 14. Tilfelli B: Umsamið verð hátt en óbreytt heildsöluverð.



Mynd 15. Tilfelli C: Bæði umsamið verð og heildsöluverð hátt.



Mynd 16. Tilfelli D: Bæði umsamið verð og heildsöluverð óbreytt en umsamið magn hátt.

3.4 Tilfelli 3: Samspil umsamins verðs og verðs á almennum markaði

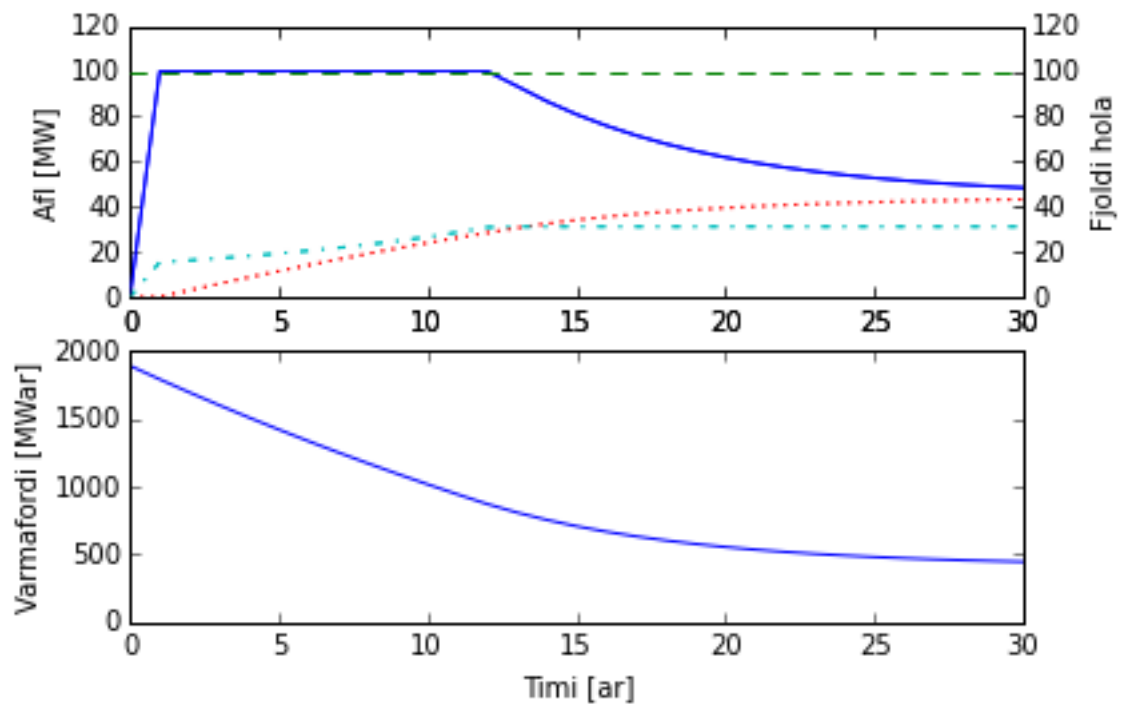
Gert er ráð fyrir að nýr aðili sem hefur í hyggju að reisa virkjun hafi tvo kosti sem þó útiloka ekki hvorn annan. Hann getur selt framleiðsluna inn á markað eða samið við aðila utan markaðar.

Gert er ráð fyrir að raforkumarkaðurinn sé eins í öllum tilfellum. Verðbreyting á markaði er því eins fyrir jafnmikið magn sem bætist við hann. Það fer því eftir öðru hversu mikið er selt á markað og þar af leiðandi hve mikið markaðsverð lækkar.

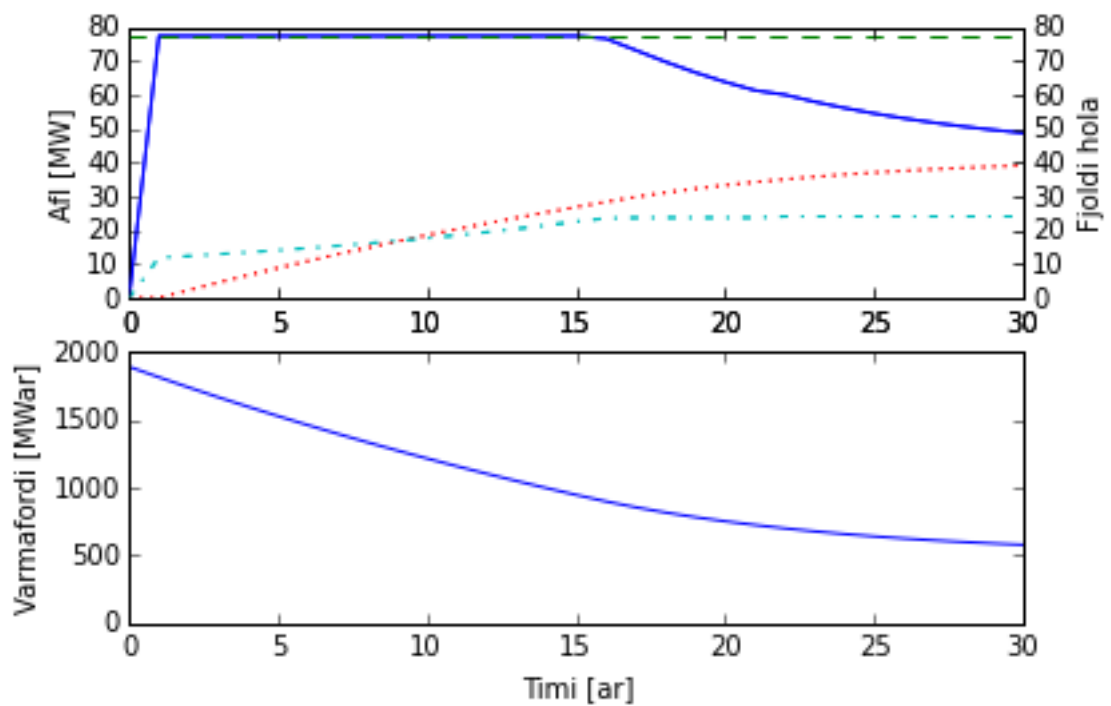
Til þess að fá hugmynd um hvernig framleiðsla er hagað og hvar hún er seld (samkvæmt samningi eða á markað) eftir því hvernig samningur við nýjan kaupanda breytist, eru sett fram nokkur tilfelli sem borin eru saman við grunntilvik. Forsendur þeirra og niðurstöður má sjá í töflu 6 og á myndum 17 til 20. Fremsti dálkur sýnir grunntilfellið þar sem umsamið magn er hóflegt miðað við stærð og getu jarðhitakerfis og umsamið verð telst eðlilegt. Hin tilvikin fela í sér eftirfarandi breytingar í umsömdu verði og magni. Fyrst er umsamið verð hátt miðað stærð og getu jarðhitakerfis en umsamið verð eins og í grunntilfelli. Næst er umsamið magn eins og í grunntilfelli en umsamið verð er hátt. Því næst er hvoru tveggja hátt en að lokum er ekki samið við aðila utan markaðar heldur öll framleiðsla seld á markaði.

Tafla 6. Samanburður á sölu raforku eftir breytingum á samningi.

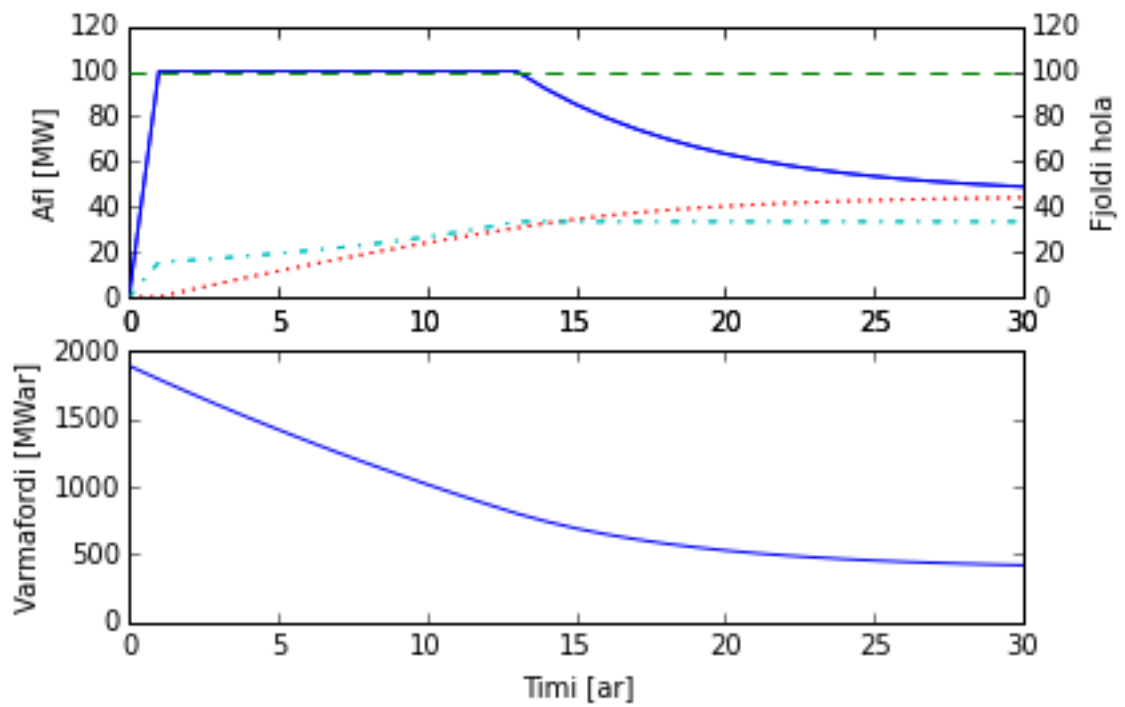
	Grunn- tilfelli	A	B	C	D
Forsendur					
Umsamið magn (MW)	60	100	60	100	0
Umsamið verð (\$/MWst)	40	40	45	45	-
Niðurstöður					
Hagnaður (M\$)	71,4	35,2	102,2	81,6	36,8
Varmaforði í lok nýtingartíma (MWár)	587,2	446,8	579,4	421,5	1002,3
Stærð virkjunar (MW)	77,7	100,0	77,3	100	47,6
Framleiðsla í lok nýtingartíma (MW)	48,1	48,4	48,7	48,9	38,5
Fjöldi hola í lok nýtingartíma	~24	~32	~25	~34	~12
Sala á markað (MW)	Allt að 17,7 MW í 21 ár	0	Allt að 17,7 MW í 21 ár	0	Allt að 47,6 MW í 30 ár



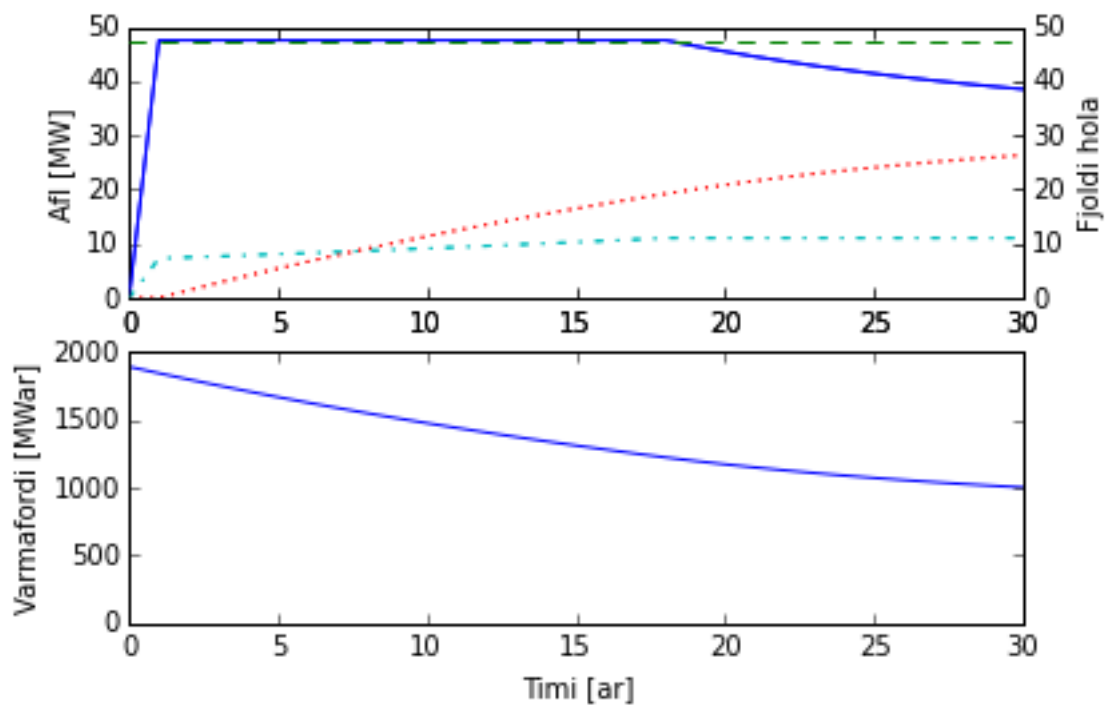
Mynd 17. Tilfelli A: Umsamið verð eins og í grunntilfelli en umsamið magn mikið.



Mynd 18. Tilfelli B: Umsamið verð hátt og umsamið magn eins og í grunntilfelli.



Mynd 19. Tilfelli C: Umsamið verð hátt og umsamið magn mikið.



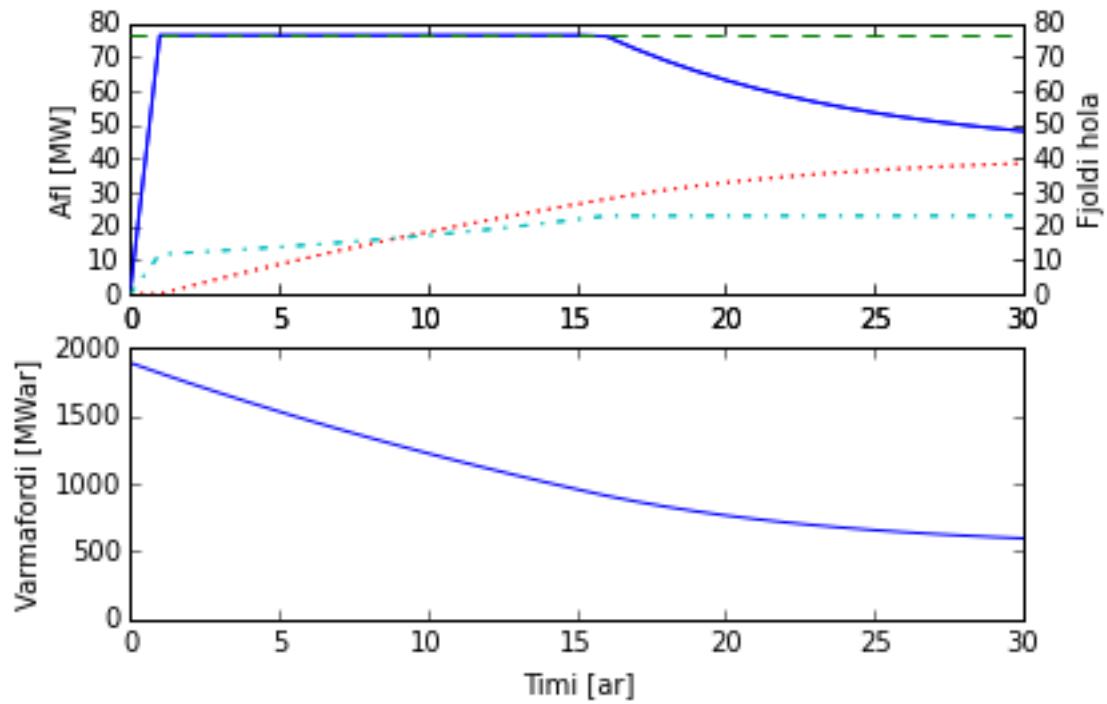
Mynd 20. Tilfelli D: Ekki samið við nýjan aðila utan markaðar heldur allt selt á markaði.

3.5 Fórarkostnaður lands og úthrif

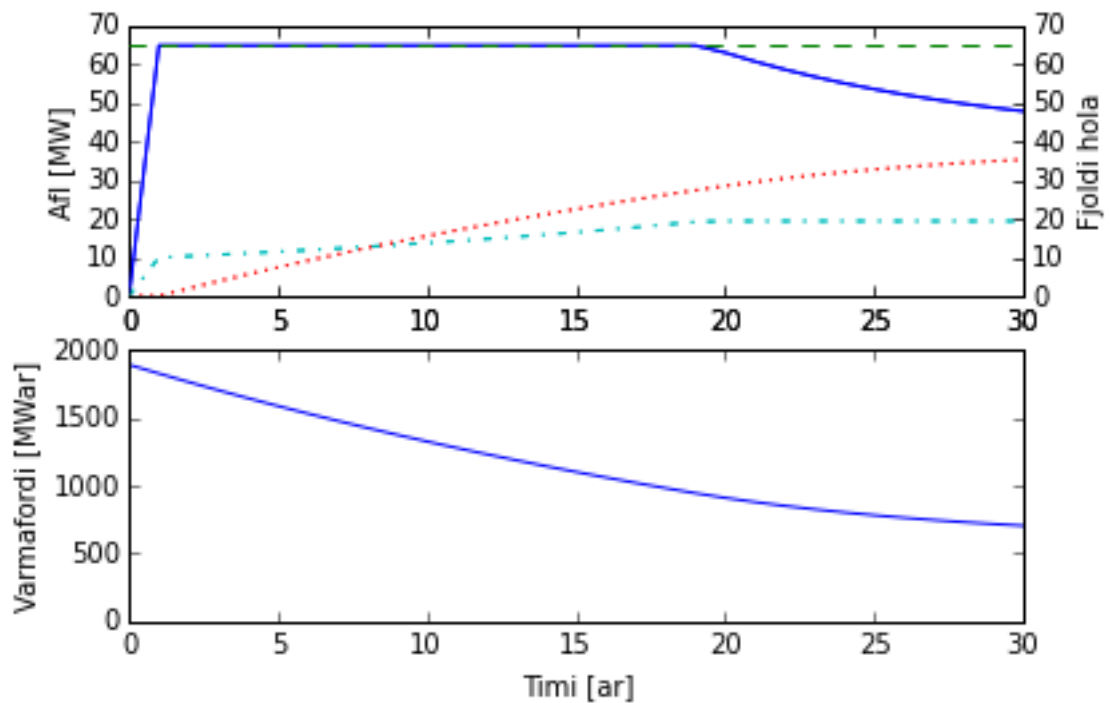
Grunntilfelli líkans og önnur tilfelli sem rakin hafa verið taka ekki tillit til fórarkostnaðar lands eða kostnaðar vegna úthrifa. Til að varpa ljósi á áhrif slíks kostnaðar eru skoðuð tvö tilfelli þar sem breytilegur fórarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa tekur ólík gildi og þau tilfelli borin saman við grunntilfelli. Gildi breytilegs kostnaðar voru valin þannig að þau væru annaðhvort af sömu stærðargráðu og framleiðslukostnaður eða há miðað við framleiðslukostnað. Gildi fasta kostnaðarins var hið sama í báðum tilfellum. Gert er ráð fyrir að aðrar forsendur líkans séu eins og í grunntilfelli og þeirra því ekki getið frekar. Forsendur og niðurstöður má sjá í töflu 7 og á myndum 21 og 22.

Tafla 7. Samanburður á ólíkum fórarkostnaði og kostnaði vegna úthrifa.

	Grunntilfelli	A	B
Forsendur			
Fastur kostnaður (M\$)	0	2	2
Breytilegur kostnaður vegna framleiðslu (\$/MWst)	0	1,14	11,4
Breytilegur kostnaður vegna borhola (M\$/holu/ár)	0	0,02	0,2
Niðurstöður			
Hagnaður (M\$)	71,4	56,7	-44,5
Varmaforði í lok nýtingartíma (MWár)	587,2	597,3	705,4
Stærð virkjunar (MW)	77,7	76,3	64,7
Framleiðsla í lok nýtingartíma (MW)	48,1	48,1	47,7
Fjöldi hola í lok nýtingartíma	~24	~23	~20



Mynd 21. Breytilegur fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa er sambærilegur framleiðslukostnaði.



Mynd 22. Hár breytilegur fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa.

4 Umræða

4.1 Grunntilfelli

Niðurstaða grunntilfellis ber sömu einkenni og niðurstöður Egils Júlíussonar o.fl. (2011) og Lovekin (1998, 2000). Best er að framleiða talsvert meira í byrjun nýtingartímans en sem nemur sjálfbærri framleiðslu, en sjálfbær framleiðsla hér er sú framleiðsla sem er jöfn endurnýjun varma í kerfinu. Ástæða þess er að samanlagður núvirtur hagnaður er meiri eftir því sem framleitt er fyrr á tímabilinu. Þar af leiðandi hefur afvöxtun minna að segja. Ef til dæmis verð myndi hækka með tíma væri síður hvati til að framleiða svona mikið í byrjun. Í þessu líkani hafa afvöxtun og endurnýjun svipuð áhrif svo jafnvel þó afvöxtun sé sleppt heldur ferillinn svipuðu lagi. Það breytir því ekki að afvöxtun hefur þessi áhrif. Einnig má segja að það borgi sig að framleiða umfram sjálfbæra framleiðslu vegna þess að þær tekjur sem fást fyrir framleiðsluna er nægar til að réttlæta þá framleiðslu með tilliti til kostnaðar. Ef framleiðsla yrði takmörkuð við sjálfbært stig yrði virkjun þar af leiðandi af hagnaði. Framleidd eru um 78 MW um það bil fyrstu 15 árin sem er um 18 MW meira en samningurinn hljóðar upp á. Þessi 18 MW eru seld á almennum markaði og fyrir þau fæst markaðsverð. Vegna þessarar 18 MW viðbótar við markaðinn lækkar markaðsverð um tæplega 10 %, úr 48 \$/MWst og er 43,4 \$/MWst fyrstu 15 árin.

Fyrstu um það bil 15 árin þegar framleiðsla helst föst í um 78 MW eru boraðar viðbótarholur til þess að halda framleiðslunni uppi. Eftir þann tíma borgar sig ekki lengur að bora viðbótarholur þar sem hver hola skilar minni orku sem aftur skilar ekki nægum tekjum eftir sölu á raforkumarkaði til að ná upp í kostnað við borun. Með öðrum orðum borgar sig ekki lengur að fullnýta vinnslugetu virkjunar vegna þess að framleiðslan er svo dýr miðað við það verð sem fæst fyrir hana á raforkumarkaði. Þannig minnkar framleiðsla jafnt og þétt í takt við minni forða kerfisins.

Þó framleiðsla fari að dala eftir 15 ár er mismunur framleiðslu og umsamins magns áfram seldur á raforkumarkaði svo lengi sem framleitt er umfram umsamið magn. Þar sem þessi mismunur verður sífellt minni hækkar verð á raforkumarkaði aftur. Framleiðslan minnkar í um 6 ár þar til hún hefur fallið niður að umsömdu magni. Á þeim

tímapunkti er allt framleitt magn selt samkvæmt samningi en sölu á raforkumarkað er hætt svo verð á raforkumarkaði verður aftur 48 \$/MWst. Að þessum 6 árum liðnum eða 21 ári frá upphafi framleiðslu heldur hún áfram að falla og það sem vantar upp á til að uppfylla umsamið magn er keypt á heildsölumarkaði. Eftir því sem meira er gengið á jarðhitakerfið og varmaforði minnkar fæst minna upp úr hverri holu og farmleiðslukostnaður eykst, svo hagstæðara verður að kaupa mismun umsamins magns og eigin framleiðslu á heildsölumarkaði en að framleiða allt umsamið magn úr eigin kerfi. Áhrif heildsölumarkaðar eru rædd frekar í kafla 4.3. Með minnkandi forða eykst endurnýjun varma í kerfinu. Hún eykst og nálgast framleiðslu eftir því sem tíminn líður. Ef vinnslu yrði haldið áfram eftir 30 ára nýtingartímann yrði endurnýjun að lokum jöfn framleiðslu. Þannig má segja að framleiðsla nái því að verða sjálfbær.

4.2 Tilfelli 1: Jafn hagnaður ólíkra leiða

Tilfelli A var búið til með það að markmiði að fá sambærilegan hagnað og í grunntilfelli, en dæmið sýnir hvernig samhengi verðs og umsamins magns virkar í líkaninu. Væntur hagnaður virkjunar er nánast sá sami í báðum tilfellum þrátt fyrir að þau séu ólík. Í A er gerð krafa um magn sem gerir það að verkum að verulega er gengið á varmaforða kerfisins á skömmum tíma. Þar af leiðandi er framleiðsla nú fljótari að verða dýr svo fyrr er farið að kaupa í heildsölu til að uppfylla umsamið magn. Umsamið verð er hinsvegar hærra, svo tekjurnar eru meiri á móti. Framleitt er úr eigin kerfi til að uppfylla öll 120 MW til að byrja með, en eftir um 9-10 ár fer framleiðsla að dala vegna þess að nú er hagstæðara að kaupa á heildsölumarkaði en að framleiða úr eigin kerfi. Í tilfelli A er meira magn keypt á heildsölumarkaði en í grunntilfelli eins og sést til dæmis á því að helmingur umsamins magns eða meira er keyptur á heildsölumarkaði frá og með um 20. ári framleiðslu, sem er tvöföld framleiðsla virkjunar eða meira. Eftir því sem umsamið magn er meira miðað við stærð jarðhitakerfis verður mikilvægara fyrir virkjun að hafa aðgang að heildsölumarkaði. Þar af leiðandi myndi lægra heildsöluverð gagnast kaupanda í tilfelli A betur þar sem eigin framleiðsla verður sífellt dýrari eftir því sem gengið er á jarðhitakerfið.

Margar ástæður geta verið fyrir breytingum í umsömdu verði. Stefnumbreyting seljanda í samningum, pólitískur þrýstingur, breytingar á raforkumörkuðum eða öðrum mörkuðum erlendis eru fáein dæmi.

Einnig ber að geta þess að sá forði sem eftir er í kerfinu að nýtingartíma loknum er meiri í grunntilfelli en A og í því eru fólgin verðmæti sem ekki er tekið tillit til í mati á hagnaði. Munurinn er um 10% af upphaflegum varmaforða S_0 , en á móti kemur að samanburðurinn er gerður í fjarlægri framtíð þar sem afvöxtun hefur mikil áhrif. Þar af leiðandi var ekki farið í að meta þennan mun til fjár þar sem ekki var talið að hann hefði mikil áhrif á niðurstöður og þær ályktanir sem dregnar yrðu.

4.3 Tilfelli 2: Eigin framleiðsla eða kaup á heildsölumarkaði

Nýting í tilfelli A hefst eins og í grunntilfelli, með stöðugri framleiðslu og borun viðbótarhola í upphafi, en dvínandi framleiðslu í kjölfarið vegna þess að markaðsverð er ekki nógu hátt til að það borgi sig að framleiða umfram umsamið magn. Eftir að framleiðsla hefur minnkað niður að umsömdu magni eftir um 21 ár kemur nú hins vegar aftur tímabil þar sem hún helst föst, nú í 60 MW, með tilheyrandi borun viðbótarhola. Þetta gerist vegna þess að ódýrara er að framleiða úr eigin jarðhitakerfi til að uppfylla umsamið magn heldur en að kaupa á heildsölumarkaði. Þegar um 3 ár eru liðin er framleiðslukostnaður hins vegar orðinn það hár að nú borgar sig ekki lengur að uppfylla hið umsamda magn eingöngu úr eigin kerfi. Svipað ferli fer í gang og þegar virkjun hætti að framleiða á fullum afköstum, en nú hefur enn meira verið gengið á jarðhitakerfið, þannig að varmaforði minnkar frekar og enn minna fæst upp úr hverri holu. Framleiðslukostnaður eykst þannig að hagstæðara verður að kaupa mismun umsamins magns og eigin framleiðslu á heildsölumarkaði. Þar með dregst framleiðsla saman aftur.

Þegar grunntilfelli og tilvik A til C í töflu 5 og á myndum 15 til 17 eru skoðuð, sést að hærra heildsöluverð og umsamið verð leiða til þess að frekar borgar sig að ganga á varmaforða kerfisins, að öðru óbreyttu. Þegar hvoru tveggja er hátt er minnst eftir af varmaforðanum í kerfinu. Þegar aftur á móti bæði umsamið verð og heildsöluverð er lágt er mest eftir af forðanum. Þessi munur á stöðu forðans er ekki mikill hér (ef nýtingartími virkjunar er lengdur verður munurinn meiri) vegna þess að þegar heildsöluverð er hátt skapast hvati til að taka meira af varma kerfis í lengri tíma en ef heildsöluverð er lágt. Þar sem sá viðbótarkostnaður fellur til seint á nýtingartíma er ekki líklegt að hann hafi mikil áhrif á samanlagðan núvirtan hagnað vegna þess að afvöxtun hefur mikið að segja.

Lægra heildsöluverð leiðir bæði meiri hagnaðar og meiri varma í kerfinu í lok nýtingartíma. Þar af leiðandi er hægt að álykta að ef verð lækkar á heildsölumarkaði geti hagur svona jarðhitavirkjunar vænkast. Hún hefur nú tækifæri til að kaupa raforku á betri kjörum og þarf síður að reiða sig á eigið jarðhitakerfi út samningstíma með tilheyrandi framleiðslukostnaðarhækkun þegar verulega fer að ganga á forða kerfisins. Með þessari viðbótarorku sem nú er orðin ódýrari gæti virkjunin þannig sparað sér að minnsta kosti hluta þessa háa framleiðslukostnaðar og einnig sparað varmann í eigin jarðhitakerfi.

Hve mikið hagur virkjunar vænkast ræðst þó að töluverðu leyti af því hve mikið umsamið magn er í samanburði við stærð jarðhitakerfisins. Því meira sem umsamið magn er þeim mun verðmætara er að hafa aðgang að ódýrum heildsölumarkaði. Þegar umsamið magn er mikið miðað við stærð og getu jarðhitakerfis eins og í tilfelli D verður framleiðslukostnaður enn hærri þegar líða fer á nýtingartímann vegna þess að varmaforðinn minnkar hraðar, og því meiri líkur á að hagstæðara sé að uppfylla samning með aðkeyptri orku. Ef kerfið ræður vel við umsamið magn er minni ástæða til að kaupa á heildsölumarkaði. Hvort eigin framleiðsla eða kaup á heildsölumarkaði verður fyrir valinu þegar síga fer á seinni hluta nýtingartíma fer því eftir afstæðum kostnaði við leiðirnar tvær. Ef virkjun uppfyllir allt umsamið magn úr eigin jarðhitakerfi bætist enginn aukakostnaður við, en framleiðslukostnaður verður hár.

Í þessu dæmi hefur umsamið verð mun meiri áhrif á hagnað en heildsöluverð. Jafnvel þó umsamið verð sé einungis hækkað um 12,5 % en heildsöluverð hækkað um u.þ.b. þriðjung hefur breyting í umsömdu verði samt mun meiri áhrif á hagnað eins og sést á tilfellum A til C í töflu 5. Þetta er vegna þess að tiltölulega lítil orka er keypt í heildsölu. Einungis er keypt orka til að uppfylla samning, það er það sem vantar upp á eftir að framleiðsla minnkar niður fyrir 60 MW út samningstíma. Í tilfelli D er umsamið magn aukið upp í 100 MW svo mun meiri orka er nú keypt á heildsölumarkaði eins og sést á mynd 18 því eins og áður þarf að uppfylla umsamið magn út samningstíma. Heildsöluverð fer því að skipta meira máli varðandi hagnað. Í tilfelli D má einnig sjá að þar sem umsamið magn er svo hátt er byrjað að framleiða á því stigi strax í byrjun. Ekki er framleitt umfram það og umframframleiðsla seld á markað. Það er vegna þess að framleiðslan er það dýr miðað við markaðsverð að það borgar sig ekki. Ennfremur má

sjá að magn forða í lok nýtingartíma er minnst og hagnaður er lægstur í tilfelli D vegna þess að mikið er framleitt úr kerfinu miðað við stærð þess og getu. Framleiðsla verður dýr og þó meira sé keypt á heildsölumarkaði vegna þess að framleiðsla er dýr þá er líka gengið meira á kerfið til að ná í alla þá orku sem virkjun er búin að skuldbinda sig til að afhenda.

Í því tilfelli sem mest er gengið á jarðhitakerfið er hagnaðurinn þó nokkur. Þegar svo mikið er gengið á forðann vaknar sú spurning hvort slík nýting sé réttlát út frá kynslóðalegu sjónarmiði. Af hverju á þessi kynslóð ríkari rétt en aðrar til að nýta þennan varma í svona miklum mæli? Þegar forðinn er orðinn þetta lítill er þó gengið út frá því að framleiðsla haldist við sjálfbært vinnslustig í langan tíma en svigrúmið sem varmaforðinn gefur virkjuninni er farið að miklu leyti. Þessu er líklega best svarað svipað og í kafla 3.1 þar sem hagnaðarhámörkun nýtingar auðlindar í almannaeigu var rædd. Þar var talað um að hagnað af virkjuninni yrði að nota í eitthvað sem gagnast öllum almenningi. Hér verður að ganga skrefi lengra og gera kröfu um að hagnaður gagnist öllum almenningi, bæði í nútíð og framtíð. Þannig þyrfti hagnaðinum að vera safnað í sjóð, eins og gert er til dæmis með skatttekjur af olíuvinnslu í Noregi, sem hefði það hlutverk að vera varasjóður þjóðarinnar og tæki til sveiflujöfnunar. Ýmis konar innviðauppbýgging væri þó líka réttlætanleg þar sem hún er grundvöllur sterks samfélags sem komandi kynslóðir fæðast inn í.

Ýmislegt getur haft áhrif á heildsöluverð, bæði til hækkunar og lækkunar. Betri tengingar milli raforkumarkaða með fleiri tækifæri á viðskiptum og meiri samkeppni getur stuðlað að verðlækkun. Heildsöluverð gæti aftur á móti hækkað ef tengingar milli raforkumarkaða rofna eða verða verri og ef söluaðilum fækkar sem leiðir til meiri fákeppni.

4.4 Tilfelli 3: Samspil umsamins verðs og verðs á almennum markaði

Eins og sést á niðurstöðum tilvikanna í töflu 6 hafa breytingar á umsömdu verði lítil áhrif á hve mikið af framleiðslu er selt á markað en breytingar á umsömdu magni hafa mun meiri áhrif. Í grunntilfelli eru um 18 MW seld á markað í um 21 ár. Síðan fer framleiðsla að vera dýrari vegna minnkandi varmaforða þannig að ekki verður lengur hagstætt að framleiða umfram umsamið magn til að selja á markaði. Eftir um 21 ár hefur framleiðsla fallið niður að umsömdu magni og sölu á markað hætt. Ef umsamið magn er 100 MW er

ekkert selt á markað lengur heldur fer öll framleiðslan í að uppfylla samning við stórkaupanda. 100 MW er því það mikið magn miðað við stærð og getu jarðhitasvæðis að ekki borgar sig að framleiða umfram það til að selja á markaði. Framleiðslukostnaður er orðinn svo hár vegna enn minni varmaforða.

Ef umsamið magn er 60 MW en umsamið verð hækkað kemur í ljós að umsamið verð hefur lítil áhrif á hve mikið er selt á markaði. Ef umsamið verð hækkar fær virkjun meiri tekjur af samningi og framleiðir úr eigin kerfi örlítið lengur (smá pallur sést á mynd 18, þó ekki nema 1 ár) í stað þess að kaupa á heildsölumarkaði. Það er þó vegna þess að stærð orkuvers og þar af leiðandi framleiðsla framan af nýtingartíma er ögn minni í tilfelli B en í grunntilfelli svo örlítið minna hefur verið gengið á varmaforða kerfisins. Þar af leiðandi er framleiðslukostnaður ögn lægri miðað við sama tímabil í grunntilfelli og því borgar sig að framleiða aðeins lengur úr eigin kerfi en að kaupa á heildsölumarkaði. Magn sem selt er á markað er þó óbreytt miðað við lægra umsamið verð. Hve mikið selt er á markaði fer eftir hve hátt markaðsverð fæst miðað við kostnað af því að framleiða umfram umsamið magn. Ef umsamið magn og umsamið verð er svo hvoru tveggja haft hátt er aftur hætt að selja á markað rétt eins og þegar einungis umsamið magn var haft hátt en nú er hagnaður meiri.

Í tilfelli D var ekkert selt nýjum kaupanda heldur allt á markað. Ef ekki er selt til stórkaupanda heldur einungis á lítinn markað dregst hagnaður saman miðað við grunntilfelli. Hagnaður er hins vegar svipaður og þegar umsamið verð er lágt og umsamið magn mikið miðað við stærð og getu jarðhitakerfis (tilfelli A). Einnig er langmestur forði enn eftir í jarðhitakerfinu í tilfelli D. Markaðsverð hefur lækkað úr 48 \$/MWst áður en nokkuð bætist við, í um 39 \$/MWst í lok tímabils þegar 38,5 MW hafa bæst við markaðinn. Verðlækkunin er enn meiri fyrr á nýtingartíma þegar 47,6 MW bætast við markaðinn eins og gerist framan af nýtingartíma, en þá lækkar markaðsverð niður í um 37 \$/MWst. Eftir því sem markaðurinn er minni því meiri er þessi verðlækkun. Hér er viðbótin um 11-13 % af upphaflegum markaði svo búast má við nokkurri verðlækkun.

Af þessu sést að framleitt er umfram umsamið magn og selt á markaði ef markaðsverð er nógu hátt miðað við framleiðslukostnað. Ef markaðsverð er svo hátt skiptir ekki máli hversu mikið umsamið verð hækkar, það er alltaf framleitt umfram

umsamið magn og selt á markað. Ef umsamið verð lækkar hefur það heldur ekki áhrif á sölu á markað sé markaðsverð nógu hátt. Hvort selt er á markað eða ekki fer meira eftir umfangi umsamins magns miðað við stærð og eðli jarðhitakerfis. Ef gerður er samningur skal virkjun uppfylla hann. Ef umsamið magn er lítið miðað við stærð og eðli jarðhitakerfis er líklegra að markaðsverð sé nógu hátt miðað við framleiðslukostnað þannig að framleitt verði meira en umsamið magn og selt á markað. Ef aftur á móti umsamið magn er mjög mikið miðað við stærð og getu jarðhitakerfis fer öll framleiðslan í að uppfylla umsamið magn. Þannig er framleitt úr eigin jarðhitakerfi til að uppfylla samning, en ekki er framleitt til að selja á markað.

4.5 Fórarkostnaður lands og úthrif

Eins og við var að búast minnkar hagnaður vegna aukins kostnaðar þegar tekið er tillit til fórarkostnaðar lands og kostnaðar vegna úthrifa. Gildi sem notuð eru hér fyrir breytilegan kostnað voru valin þannig að þau væru annaðhvort af sömu stærðargráðu og framleiðslukostnaður eða talsvert hærri en framleiðslukostnaður. Fastur kostnaður hefur ekki áhrif á líkan að öðru leyti en því að leggjast við fastan kostnað vegna framleiðslu og dregst því einungis af heildarhagnaði á sama hátt og sá fasti kostnaður. Þessi tilraun sýnir að ef nettó fórarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa er jákvæður, sem gert er ráð fyrir að hann sé hér (og er líklega í flestum tilfellum), og tekið er tillit til hans við ákvarðanatöku, minnkar hagnaður.

Athygli vekur að framleiðsla minnkar ekki svo mikið þó hagnaður sé neikvæður í tilfalli B. Hagnaður er hámarkaður eftir sem áður, jafnvel þó niðurstaðan sé neikvæð. Sé ekkert framleitt úr eigin kerfi og allt umsamið magn keypt á heildsölumarkaði fæst lægsti mögulegi hagnaður sem virkjun getur fengið. Hér nemur hann föstum kostnaði virkjunar og kostnaði við kaup á heildsölumarkaði til að uppfylla allt umsamda magnið, eða -171,7 M\$. Virkjun skal sem fyrr afhenda umsamið magn, hvort sem það er gert með eigin framleiðslu eða á heildsölumarkaði. Hagnaður verður aldrei lægri en -171,7 M\$ í þessu tilfalli því virkjun hefur alltaf möguleika að framleiða ekkert. Svo lengi sem það að framleiða skilar betri afkomu en sem nemur þessum lágmarkshagnaði, er framleitt. Í tilfalli B er þannig betra að framleiða umsamið magn úr eigin jarðhitakerfi hluta nýtingartíma (og rúmlega það þar sem um 5 MW eru seld á raforkumarkað) en að kaupa allt magnið á heildsölumarkaði vegna þess að heildsöluverð er það hátt miðað við

framleiðslukostnað. Ef fórnarkostnaður og kostnaður vegna úthrifa, eða annar breytilegur kostnaður, er hækkaður eða verð á heildsölumarkaði er lækkað jafnt og þétt kemur að því að ekkert er framleitt og allt umsamið magn keypt á heildsölumarkaði þannig að eftir stendur lægsti mögulegi hagnaður (sem er þó líklega annar en -171,7 M\$ ef forsendur um kostnað hafa breyst). Þess ber þó að geta að orkufyrirtæki kaupa ekki allt umsamið magn á heildsölumarkaði í eðlilegu árferði. Ennfremur er óvíst hvort svo mikið magn sé yfirhöfuð í boði á heildsölumarkaði.

Eins og nefnt var í kafla 2.5.3 er líklegt að fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa vegna fyrstu framkvæmda á svæði sé hár miðað við kostnað vegna frekari nýtingar á sama svæði, að því gefnu að alvarleg áhrif á heilsu séu undanskilin. Í þessu verkefni er einungis eitt jarðhitasvæði til umfjöllunar. Ef virkjanaframkvæmdir eru ekki svo afmarkaðar og verið er að skipuleggja nýtingu fleiri svæða heildstætt hvetur fórnarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa, sé hann hugsaður eins og gert er hér, til þess að svæði sem virkjað er sé nýtt til fulls áður en ráðist er í framkvæmdir á næsta svæði. Hvort þessi hvati er nægur til að svo verði fer eftir framleiðslukostnaði á þeim virkjanasvæðum sem koma til greina. Sé sá framleiðslukostnaður nógu lágur miðað við fórnarkostnað lands og kostnað vegna úthrifa vegna frekari nýtingar á upphaflegu svæði gæti verið hagstæðara að virkja á nýjum stað.

4.6 Almennar umræður um niðurstöður

Niðurstöður bestunar eru mjög næmar fyrir breytingum á sumum forsendum. Til dæmis hafa breytingar í teygni mjög mikil áhrif á hve mikið borgar sig að selja á markað og þar af leiðandi á hagnað. Ef eftirspurnarteygnin er lækkuð í -1,0 eru um 55 MW seld á markaði í stað um 18 MW í grunntilfelli þegar mest lætur. Ennfremur tvöfaldast hagnaður og verður um 145,7 M\$.

Sömu sögu er að segja um afvöxtunarstuðulinn. Sé hann hækkaður eða lækkaður lítillaga breytast niðurstöður mikið. Sé hann til dæmis lækkaður um 1 % eykst hagnaður um tæplega þriðjung. Svipað gildir fleiri stika. Rök hafa verið færð fyrir því hvers vegna þessi gildi voru valin og afleiðingar af breytingum á þeim eru nokkuð ljósar eins og sést á teygni og afvöxtunarstuðli. Þess vegna var ekki ráðist í frekari útlistanir á þeim.

Ekki fundust upplýsingar um heildsölumarkað svo ekki er ljóst hve stór slíkur markaður er og þar af leiðandi hve mikil raforka stæði virkjuninni sem um ræðir til boða.

Þar sem verð á heildsölumarkaði ætti í eðlilegu árferði að vera hærra en bæði umsamið verð og markaðsverð er líklegt að stærri orkufyrirtæki eins og Landsvirkjun myndu sjá sér í hag í að selja á þeim markaði. Í grunntilfelli er þörf virkjunar um 12 MW þegar mest lætur í lok nýtingartíma og í flestum tilfellum er hún í mesta lagi um 10-20 MW. Ekki er ólíklegt að fyrirtæki eins og Landsvirkjun hafi til staðar ónýtt afl í virkjunum sínum af þessari stærðargráðu. Þörfin fer mest í um 70 MW í öfgakenndustu tilfellum, sem er um 3-4 % af heildarframleiðslu Landsvirkjunar (Landsvirkjun, á.á.-a). Einnig er þörfin stigvaxandi með tíma. Hún byrjar ekki strax í tugum MW heldur í örfáum og vex. Vissulega er óvissa varðandi eftirspurn á heildsölumarkaði, sérstaklega þegar horft er langt fram í tímann, en þar sem verð er hátt hlýtur fyrirtæki eins og Landsvirkjun að taka þennan möguleika alvarlega.

Líta má á þessa athugun sem fyrstu nálgun á áhrif raforkumarkaðar og orkusölu á þetta samspil virkjunar, auðlindar og annara hagrænna þátta. Eins og rakið hefur verið varpar athugunin ljósi á samspilið frá ýmsum hliðum og á áhrif þeirra hagrænu þátta sem teknir eru fyrir. Ýmislegt er þó hægt að gera til að fá enn skýrari mynd af samspilinu. Í köflum 2.4.2, 2.4.3 og í viðauka A er uppbyggingu raforkumarkaðar lýst og hverjar takmarkanir hans eru (frekari umfjöllun má sjá í meistararitgerð Sigurðar Björnssonar (2016)). Fyrir virkjun sem hefur hug á að selja á raforkumarkaði er til dæmis mikilvægt að fá eins góða mynd af markaðinum og mögulegri þróun hans eins og kostur er. Gildi eftirspurnarteygni raforku hefur til dæmis mikil áhrif á niðurstöðu svo sérstök athugun á þeim raforkumarkaði sem ætlunin er að selja inn á væri því mikilvæg. Algengt er að orkufyrirtæki framleiði orku úr fleiri en einni tegund auðlindar og er Landsvirkjun nærtækt dæmi. Áhugavert væri að sjá hvernig samspili reksturs, jarðhitaauðlindar og hagrænna þátta breytist ef til dæmis vatnsaflsvirkjun er bætt við líkanið. Einnig má nefna vöntun óvissu. Eðlilegt er að í fyrstu nálgun sé unnið með vænta útkomu, en þar sem umtalsverð óvissa ríkir um stærð og eðli jarðhitakerfa og viðbrögð við nýtingu ætti ákvarðanataka einnig að taka tillit til hennar. Eins og sjá má eru fjölmörg tækifæri til að bæta líkanið enn frekar og færa það nær raunveruleikanum.

5 Lokaorð

Markmið þessarar rannsóknar var að varpa ljósi á áhrif þess að taka frekara tillit til hagrænna þátta við framleiðsluákvörðanir jarðhitavirkjunar. Könnuð voru áhrif möguleika þess að selja til nýs kaupanda utan markaðar, heildsölumarkaðar og verðbreytinga á raforkumarkaði á hagnað virkjunar, framleiðslumynstur, varmaforða jarðhitakerfis og sölu raforku frá virkjun.

Þar sem verð á raforkumarkaði lækkar nú með auknu framboði verður fýsilegt að semja utan markaðar við nýjan kaupanda vegna þess að líklegt er að markaðsverð lækki niður fyrir það verð sem líklegt þykir að samið yrði um.

Hér er gert ráð fyrir að hinn nýi kaupandi fái afhent umsamið magn, það er að engar skerðingar séu á afhendingu raforku. Virkjunin er því skuldbundin til að afhenda þetta magn, hvort sem það er með framleiðslu úr eigin jarðhitakerfi eða með öðrum hætti. Sé samið við aðila utan markaðar kemur mikilvægi heildsölumarkaðar í ljós. Ef umsamið magn er mikið miðað við stærð og getu jarðhitasvæðis verður framleiðslukostnaður fljótt hár og því mikils virði að hafa aðgang að heildsölumarkaði til að lækka kostnað við að uppfylla samning. Ef heildsöluverð er lægra en framleiðslukostnaður er hagstæðara að kaupa á heildsölumarkaði en að framleiða úr eigin jarðhitakerfi. Ekki fundust upplýsingar um heildsölumarkað á Íslandi svo ekki skal fullyrt að þær forsendur sem gefnar eru í þessu verkefni um fast verð á heildsölumarkaði og ótakmarkað magn endurspegli raunveruleikann. Þó þykir sennilegt að verð á heildsölumarkaði sé hærra en bæði umsamið verð og markaðsverð. Þar af leiðandi er mikilvægt að stilla kaupum þar í hóf, þrátt fyrir að hagstæðara geti verið að kaupa orku þar en að framleiða úr eigin jarðhitakerfi þegar líða fer á nýtingartíma.

Rannsókn þessi hefur varpað ljósi á ýmsa þætti í samspili auðlindar, reksturs og hagrænna þátta. Ein helsta lexían er þó sú hve mikilvægt það er að semja ekki um að afhenda meira en samsvarar stærð og eðli jarðhitakerfis. Ef umsamið magn er mikið getur kostnaður aukist verulega þegar líður á nýtingartíma, annað hvort vegna hás framleiðslukostnaðar eða stórfelldra kaupa á heildsölumarkaði. Þó verður að gæta þess

að semja ekki um of lítið magn vegna þess að stórfelld sala á raforkumarkað er ekki eins ábatasöm og sala til nýs notanda. Finna verður hæfilegt magn.

Ætla má að gat sé í þekkingunni sem þessi athugun leitast við að byrja að fylla í vegna þess að ekki fundust athuganir þar sem tekið er tillit til orkusölu, heildsölumarkaðar og verðbreytinga á raforkumarkaði við hagnaðarhámörkun jarðhitavirkjunar. Orkufyrirtæki þurfa að huga vel að ákvarðanatöku varðandi rekstur og uppbyggingu virkjunar og samspili auðlindar og hagrænna þátta, þar með talið raforkumarkaðar, orkusölu og fleiri þátta, svo auðlindin sé nýtt eins vel og kostur er. Samspilið er sérstaklega mikilvægt fyrir íslensk orkufyrirtæki þar sem stór hluti neyttrar orku á Íslandi á uppruna sinn í jarðhita. Þessi athugun er því mikilvægt innlegg sem hægt er að byggja ofan á.

Viðauki A: Útvíkkað líkan

Útvíkkað líkan má sjá hér að neðan. Breytur sem hámarkað er með tilliti til eru þær sömu og í grunnlíkani, en þær eru framleitt magn (E_t), fjöldi borhola (N_t) og uppsett afl orkuvers (E_p). Eitt tímabil er skilgreint sem eitt ár. Í töflu 8 má sjá merkingu allra stika, breyta, og falla.

$$\max_{E_t, N_t, E_p} \sum_{t=0}^T [Tekjur(E_t) - \gamma_E E_t - \gamma_N N_t - \alpha(N_t - N_{t-1})] \frac{1}{(1+r)^t} - \beta E_p - \delta \quad (1)$$

$$\text{með} \quad Tekjur(E_t) = \begin{cases} P_s E_s + \mu(E_t - E_s) & | E_s \geq E_t \\ P_s E_s + P_m(E_t)(E_t - E_s) & | E_s < E_t \end{cases} \quad (1a)$$

$$\text{og} \quad P_m(E_t) = \left(\frac{k}{Q_0 + E_t - E_s} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1b)$$

þannig að

$$S_t \geq 0 \text{ þar sem } S_{t+1} = S_t - E_t + R(S_0 - S_t) \quad (1c)$$

$$E_w(S_t)N_t - E_t \geq 0 \text{ þar sem } E_w(S_t) = W \frac{S_t}{S_0} \quad (1d)$$

$$E_p - E_t \geq 0 \quad (1e)$$

$$E_t, N_t, E_p, N_t - N_{t-1} \geq 0 \quad (1f)$$

Tafla 8. Yfirlit yfir breytur og stika útvíkkaða líkansins.

Breyta /stiki	Eining	Skýring
E_t	MW	Orkuframleiðsla á hverju ári
N_t		Heildarfjöldi borhola
E_p	MW	Uppsett afl orkuvers
S_t	MWár	Varmaforði í jarðkerfi á ári t
γ_E	\$/MWst	Rekstrarkostnaður á hverja framleidda orkueiningu
γ_N	M\$/holu/ár	Rekstrarkostnaður vegna hvernar borholu

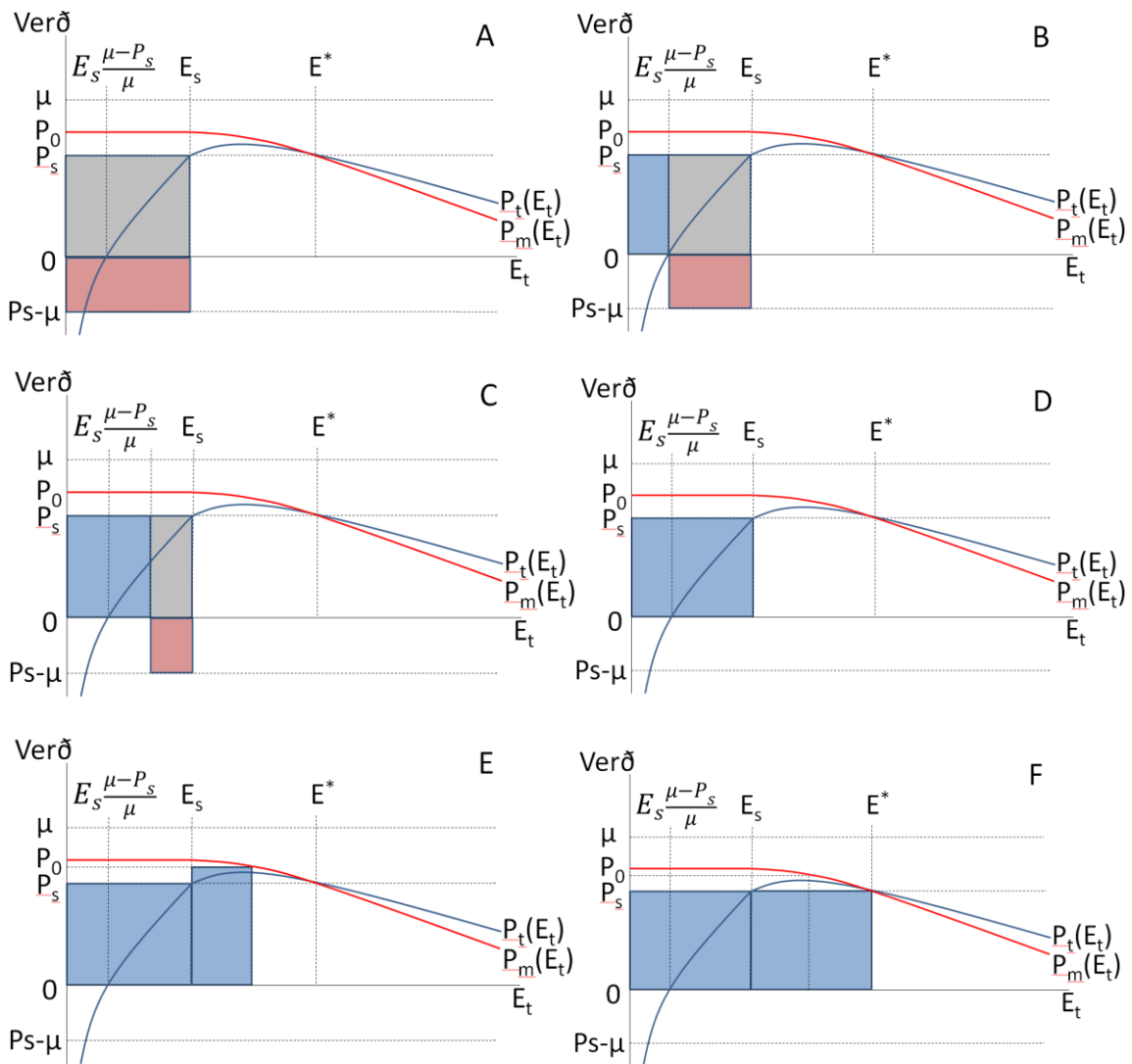
α	M\$/holu	Kostnaður við boranir hola Tafla 6 frh.
β	M\$/MW	Kostnaður við uppbyggingu orkuvers á hvert uppsett MW
δ	M\$	Fastur kostnaður
R	1/ár	Endurnýjunarhraði jarðhitakerfis
S_0	MWár	Varmaforði kerfis í upphafi nýtingartíma (endurspeglar fullt kerfi)
E_w	MW	Orka sem hver hola gefur að meðaltali
W	MW	Hámarksvinnslugeta meðal borholu
E_s	MW	Magn sem samið er um við nýjan kaupanda utan markaðar
P_s	\$/MWst	Verð sem samið er um við nýjan kaupanda utan markaðar
μ	\$/MWst	Orkuverð á heildsölumarkaði
T_s	ár	Tímalengd samnings
T	ár	Nýtingartími virkjunar
t	1 ár	Lengd tímabils
r	%	Afvöxtunarvextir
P_m	\$/MWst	Raforkuverð sem fall af framleiðslu virkjunar
b		Verðteygni eftirspurnar raforku á raforkumarkaði
P_0	\$/MWst	Raforkuverð á markaði áður en nokkuð bætist við hann. Nauðsynlegt fyrir útreikning á fastanum k í eftirspurnarfalli
Q_0	MWár	Upphaflegt framboð á raforkumarkaði
k	$\2 MWár	Fasti í eftirspurnarfalli, reiknaður út frá gefnum gildum á b, P_0 og Q_0

Samanlagður núvirtur hagnaður er hámarkaður. Markmiðsfall samanstendur því af tekjum að frá dregnum kostnaði. Tekjur eru ekki bara verð margfaldað með framleiddu magni heldur taka þær tillit til annarsvegar þess magns sem mögulega er keypt á heildsölumarkaði (efri lína 1a) og þess magns sem mögulega er selt á raforkumarkaði (neðri lína 1a). Þannig verða tekjur annarsvegar mismunur tekna af sölu umsamins magns og kostnaðar við kaup á heildsölumarkaði til að ná upp í hið umsamda magn, og hinsvegar samanlagðar tekjur af sölu samkvæmt samning og á raforkumarkað. Þar sem

aðeins er keypt á heildsölumarkaði til að uppfylla umsamið magn er aðeins tekið tillit til heildsölumarkaðar ef framleitt magn er minna en umsamið magn. Að sama skapi er einungis umframagn miðað við samning selt á raforkumarkaði.

Myndræna framsetningu á tekjum virkjunar að teknu tilliti til sölu samkvæmt samningi, sölu á raforkumarkað og kaup á heildsölumarkaði má sjá á mynd 23. Bláir rétthyrningar tákna tekjur af framleiddri orku, gráir tákna þá upphæð sem virkjun fær fyrir endursölu á því sem keypt var á heildsölumarkaði og rauðir tákna nettó tap af kaupum á heildsölumarkaði, en þar er búið að draga frá tekjur af endursölu raforku frá kostnaði við kaup á heildsölumarkaði. Gert er ráð fyrir hér að heildsöluverð sé alltaf hærra en umsamið verð. Rauð lína, $P_m(E_t)$, stendur fyrir markaðsverð og blá lína, $P_t(E_t)$, stendur fyrir meðalverð sem virkjun fær fyrir hverja framleidda einingu.

Þegar ekkert er framleitt og allt umsamið magn keypt á heildsölumarkaði (mynd 23A) fæst hámarks tap sem nemur margfeldi umsamins magns og mismuni umsamins verðs og heildsöluverðs. Þegar framleiðsla hefst og verður $E_s \frac{\mu - P_s}{\mu}$ (mynd 23B) eru tekjur af framleiðslu orðnar jafnar tapi af kaupum á heildsölumarkaði (blár og rauður rétthyrningur jafnir að flatarmáli). Þannig verður meðalverð á hverja framleidda einingu 0. Þegar framleiðsla eykst umfram $E_s \frac{\mu - P_s}{\mu}$ verður tap af kaupum á heildsölumarkaði sífellt minna þar sem minna er keypt. Nettó tekjur verða jákvæðar og aukast jafnt og þétt (myndir 23C og 23D). Þegar framleitt er umfram umsamið magn hefur heildsölumarkaður ekki áhrif lengur en nú er það sem framleitt er umfram umsamið magn selt á markaði (myndir 23E og 23F). Fyrir það magn fæst markaðsverð sem nú tekur að falla vegna aukins framboðs á raforkumarkaði.



Mynd 23. Myndræn framsetning á nettó tekjum af orkusölu þegar tekið hefur verið tillit til kaupa á heildsölumarkaði.

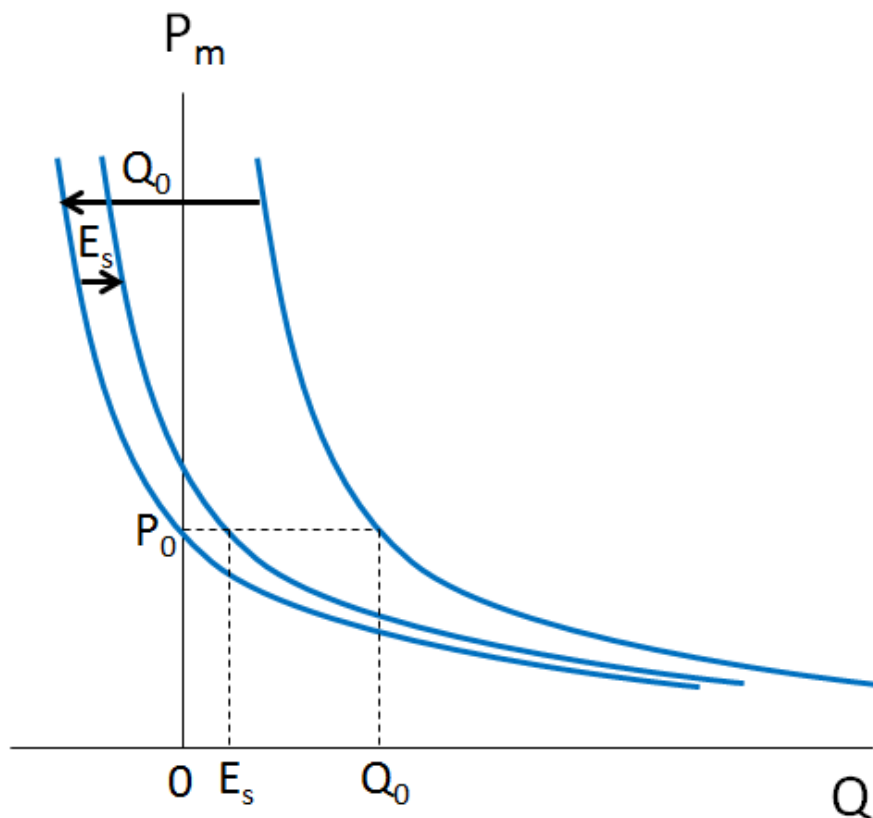
Frá tekjum dregst breytilegur kostnaður sem er rekstrarkostnaður vegna framleiðslu ($\gamma_E E_t$), rekstrarkostnaður vegna borhola ($\gamma_N N_t$) og kostnaður vegna borun nýrra hola, $\alpha(N_t - N_{t-1})$. Þessi mismunur er fundinn fyrir hvert tímabil, hann afvaxtaður og lagður saman. Frá þessu dregst svo kostnaður vegna uppbyggingar orkuvers (βE_p) og annar fastur kostnaður (δ).

Markaðsverð er fall af því sem þessi virkjun bætir við raforkumarkaðinn. Það er fengið með því að byrja á að skilgreina eftirspurnarfall með fasta teygni, snúa því við og setja framboð í stað eftirspurnar. Hægt er að skipta eftirspurn út fyrir framboð vegna þess að gert er ráð fyrir því að framboð væri lóðrétt (magn breytist ekki með verði). Þannig kemur út fall þar sem markaðsverð er fall af heildarframboði. Til að fá

markaðsverð sem fall af viðbótarframboði frá þessari virkjun eingöngu var gert ráð fyrir að það magn sem fyrir var á markaðinum væri fasti. Fallinu fyrir markaðsverð er því hliðrað til vinstri sem því nemur. Fallinu var svo hliðrað til hægri sem nemur umsömdu magni því virkjunin selur einungis viðbótarmagn á markað. Myndræna framsetningu á falli fyrir markaðsverð má sjá á mynd 10. Efsti ferill sýnir markaðsverð sem fall af heildarframboði á markaði, neðsti ferillinn markaðsverð sem fall af framleiðslu ef gert er ráð fyrir að öll framleiðsla seljist á markaði og miðjuferill markaðsverð sem fall af því sem er eftir þegar búið er að uppfylla umsamið magn. Hér að neðan má sjá stærðfræðilega útfærslu falls fyrir markaðsverð.

$$P_m(E_t) = \begin{cases} P_0 & E_s \geq E_t \\ \left(\frac{k}{(Q_0 + E_t - E_s)}\right)^{\frac{1}{b}} & E_s < E_t \end{cases}$$

Framboðið í heild er nú það framboð sem er fyrir, Q_0 , og það sem eftir er af framleiðslu þegar búið er að uppfylla umsamið magn, $E_t - E_s$, að því gefnu að það sé jákvætt. Ef framleitt er umfram umsamið magn er viðbótarframleiðsla seld á markaði og fyrir hana fæst markaðsverð. Markaðsverð er aftur á móti fast (P_0) þar til framleitt hefur verið upp í umsamið magn. Ef ekki er samið við aðila utan markaðar ($E_s = 0$) er öll framleiðsla seld á markað og því koma verðáhrif strax fram. Sú framsetning markaðsverðs sem gefin er hér að ofan kemur ekki í heild sinni inn í hámarksframleiðslu vegna þess að ekki er selt á markað fyrr en framleiðsla verður meiri en umsamið magn. Þar af leiðandi er efri línan óþörf en heildarfallið er gefið hér til glöggvunar.



Mynd 24. Myndræn útleiðsla á falli fyrir markaðsverð (bil á milli ferla endurspeglar ekki raunverulegt bil).

Hliðarskilyrði eru sjö. Hið efsta (1a) er forðaskilyrðið sem segir að magn vinnanlegrar orku í kerfinu á tilteknu ári (S_t) er aldrei neikvætt og að það er jafnt magni vinnanlegrar orku á síðasta ári (S_{t-1}) að frádregnu framleiddu magni og viðbættri endurnýjun varma í kerfinu. Endurnýjun varmans er skilgreind sem hlutfall (R) af þeim forða sem vantar upp á að kerfið sé fullhlaðið orku á viðkomandi tíma ($S_0 - S_{t-1}$), en S_0 er forði kerfis í upphafi nýtingartíma. Endurnýjun vex því í réttu hlutfalli við minnkandi forða. Þessi endurnýjunarliður er viðbót við nálgun Hotellings og gerir þetta líkan sérstakt miðað við svipuð líkön sem notuð eru, til dæmis fyrir vinnslu olíu, námavinnslu og aðrar auðlindir sem ekki endurnýjast á mannlegum tímaskala.

Hliðarskilyrði 1b segir að vinnslugeta á hverju ári, sem er margfeldi þess sem hver hola gefur að meðaltali af orku (E_w) og fjölda hola, þarf að minnsta kosti að vera jöfn því magni sem best er að framleiða á því ári. Með öðrum orðum þarf næg vinnslugeta að vera til staðar miðað við hve mikið stendur til að framleiða. Geta hvernar holu er jöfn hámarksgetu meðal holu (W) sinnum hlutfallið af því sem eftir er í kerfinu (S_t/S_0), en hér

er ætíð gert ráð fyrir að byrjað sé með fullan geymi. Þannig minnkar geta holanna með minnkandi varmaforða kerfis. Kostnaður er ekki beint fall af forða kerfisins, ekki frekar en í grunnlíkani Hotellings, en nú hefur forði kerfisins áhrif á hagnað í gegnum þetta hliðarskilyrði þar sem geta hveirrar holu minnkar með minni forða. Þar með má segja að með minni forða kostar meira að ná sama magni af orku úr kerfinu.

Hliðarskilyrði 1c segir að ekki er hægt að framleiða meira á hverju ári en sem nemur stærð virkjunarinnar. Þau fjögur hliðarskilyrði sem eftir eru segja að vinnsla á hverju ári, heildarfjöldi borhola, stærð orkuvers og fjöldi boraðra hola á hverju ári getur ekki verið neikvæð stærð.

Viðauki B: Fórarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa

Kostnaðarlið vegna fórarkostnaðar lands og úthrifa má sjá hér að neðan.

$$C_{F,U} = \sum_{t=0}^T [\omega E_t + \sigma N_t] \frac{1}{(1+r)^t} + \tau$$

Hér er gert er ráð fyrir að landeigandi leigi nýtingaraðila landið og að landeigandi hafi tekjur af landi sínu í óbreyttri mynd. Fastur kostnaður, annars vegar sá hluti fórarkostnaðar lands sem er óháður framleiðslustigi og hins vegar sá kostnaður vegna úthrifa sem verður af virkjuninni um leið og hún er byggð og framleiðir fyrstu eininguna, endurspeglast í τ . Gert er ráð fyrir að τ sé samanlagður fastur kostnaður út nýtingartíma virkjunar svo hann er ekki afvaxtaður og kemur inn í líkan á sama hátt og fastur kostnaður vegna framleiðslu, δ . Hægt væri að hafa fasta kostnaðinn lægri og láta hann koma fyrir á hverju ári, en það hefði lítil áhrif á niðurstöðu hér. Einfaldast væri að gera ráð fyrir að virkjun eyðilegði alveg önnur not af svæði, þá myndi eingöngu fastinn lýsa fórarkostnaði lands. Hér er hins vegar gert ráð fyrir að landeigandi geti haft tekjur af svæðinu þrátt fyrir virkjanaframkvæmdir, en að þær rýrni eftir því sem framleiðsla eykst og borholum fjölgar svo fórarkostnaður lands eykst með aukinni framleiðslu og fjölda borhola. Kostnaður vegna úthrifa eykst einnig með aukinni framleiðslu og fjölda borhola. Þessi breytilegi kostnaður endurspeglast í ω og σ . Í ω felst sá fórarkostnaður lands og kostnaður vegna úthrifa sem hlýst af aukinni framleiðslu virkjunar en í σ felst sami kostnaður vegna aukins fjölda borhola. Þar sem gert er ráð fyrir að nettó kostnaður sé neikvæður eru stuðlanir τ , ω og σ allir jákvæðir.

Til einföldunar er gert ráð fyrir að í ω og σ felist bein tenging framleiðslu og fjölda borhola við fórarkostnað og kostnað vegna úthrifa. Réttara væri að skipta hvorum stuðli fyrir sig í tvennt, annars vegar umhverfisáhrif vegna framleiðslu og svo kostnað vegna þessara umhverfisáhrifa. Ef gerðar eru ráðstafanir er hægt að auka framleiðslu án þess að auka fórarkostnað eða kostnað vegna úthrifa, til dæmis með því að láta framkvæmdir falla betur að umhverfi eða bæta hreinsibúnað.

Heimildaskrá

- Bertani, R. (2015, 19.-25. apríl). *Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report*. á World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia. Sótt af <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01001.pdf>
- Bhattacharyya, S. C. (2011). Energy Data and Energy Balance. Í *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance* (bls. 9-39). London: Springer. doi:10.1007/978-0-85729-268-1_2
- Central Intelligence Agency. (á.á.). Country comparison: Electricity Production. Sótt af <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2232rank.html>
- Egill Júlíusson, Roland N. Horne, James Sweeney, Matt Hart, Jonathan Rich og Joel Sandler. (2011). *Optimal Extraction of Geothermal Resources*. á Geothermal Research Council.
- ESA. (2016). State Aid: Electricity producers must pay market price for using natural. Sótt af <http://www.eftasurv.int/press--publications/press-releases/state-aid/nr/2681>
- Ferðamálastofa. (2014). *Erlendir ferðamenn á Íslandi*. Reykjavík. Sótt af http://www.ferdamalastofa.is/static/research/files/2014-12-17_ferdamalastofa_erlendirferdamenn_an_vaka_maskinuskyrsla_islenska-pdf
- Gehring, M. og Loksha, V. (2012). *Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation*. Washington: The World Bank Group. Sótt af [file:///C:/Users/sib17/Downloads/FINAL_Geothermal_Handbook_TR002_12%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/sib17/Downloads/FINAL_Geothermal_Handbook_TR002_12%20(1).pdf)
- Grettis saga. (1994). In Örnólfur Thorsson (Ed.). Reykjavík: Mál og Menning.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmarsson, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, . . . Stefánsson, V. (2001). *Um sjálfbæra vinnslu jarðhita*. Reykjavík: Orkustofnun.
- Hagstofa Íslands. (2014). Afl og orkuvinnsla almenningsrafstöðva 1976-2014.
- Hagstofa Íslands. (2015a). Orkunotkun eftir uppruna 1987-2014.
- Hagstofa Íslands. (2015b). Raforkunotkun 1998-2014.
- Hagstofa Íslands. (2015c). Stóriðja og almenn notkun raforku 1990-2014. In Hagstofa Íslands (Ed.).
- Haraldur Guðjónsson. (2015). Töluvert hærra raforkuverð til Thorsil. Sótt af <http://www.vidskiptabladid.is/frettir/toluvert-haerra-raforkuverd-til-thorsil/122456/>
- Hasan, K. N., Saha, T. K., Eghbal, M. og Chattopadhyay, D. (2013). Review of transmission schemes and case studies for renewable power integration into the remote grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 568-582. doi:10.1016/j.rser.2012.10.045
- International Renewable Energy Agency. (2013). *Heat Pumps - Technology Brief*: IRENA. Sótt af <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E12%20Heat%20Pumps.pdf>

- Jónas Ketilsson, Axel Björnsson, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, Bjarni Pálsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson. (2011). *Eðli jarðhitans og sjálfbær nýting hans - Álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita*. Reykjavík: Orkustofnun.
- Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson. (2009). *Mat á vinnslugetu jarðhitasvæða*: Orkustofnun. Sótt af <http://www.os.is/gogn/Skyrslur/OS-2009/OS-2009-009.pdf>
- Kári Gylfason. (2016). Raforkuverð til Norðurla tengt markaðsverði. RÚV. Sótt af <http://www.ruv.is/frett/raforkuverd-til-nordurla-tengt-markadsverdi>
- Keck Junior Research Project. (2003). Geology of an Abandoned Oceanic Rift: The Skagi Area, North-Central Iceland. Sótt af <http://brennanjordan.org/IcelandKeck.html>
- Kristján Sæmundsson, Guðni Axelsson og Benedikt Steingrímsson. (2011). *Geothermal Systems in Global Perspective*. á Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants, Santa Tecla, El Salvador. Sótt af <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-12-02.pdf>
- Krutilla, J. V. (1967). Conservation Reconsidered. *The American Economic Review*, 57(4), 777-786.
- Labandeira, X., Labeaga, J. M. og López-Otero, Z. (2010). *Estimation of Elasticity Price of Electricity with Incomplete Information*: Economics for Energy, Madrid.
- Landsvirkjun. (2010). Samningur Landsvirkjunar og Alcan á Íslandi um orkusölu tekur gildi. Sótt af <http://www.landsvirkjun.is/fyrirtaekid/fjolmidlatorg/frettir/frett/1217/>
- Landsvirkjun. (2016). Norðurlal og Landsvirkjun ná samkomulagi um framlengingu orkusamnings. Sótt af <http://www.landsvirkjun.is/fyrirtaekid/fjolmidlatorg/frettir/frett/nordural-og-landsvirkjun-na-samkomulagi-um-framlengingu-orkusamnings/>
- Landsvirkjun. (á.á.-a). Aflstöðvar. Sótt af <http://www.landsvirkjun.is/fyrirtaekid/aflstodvar>
- Landsvirkjun. (á.á.-b). Bjarnarflag. Sótt af <http://landsvirkjun.atdev.is/Rannsoknirogthroun/Virkjunarkostir/Bjarnarflag/>
- Landsvirkjun. (á.á.-c). Þeistareykir. Sótt af <http://landsvirkjun.atdev.is/rannsoknirogthroun/virkjunarkostir/theistareykir>
- Laxdæla saga. (1970). In Njörður P. Njarðvík (Ed.). Reykjavík: Skálholt.
- Lovekin, J. (1998, 20.-23. 5.). *Sustainable Geothermal Power: The Life Cycle of a Geothermal Field*. á Geothermal Resources Council.
- Lovekin, J. (2000, 28.5.-10.6). *The Economics of Sustainable Geothermal Development*. á World Geothermal Congress, Kyushu - Kohoku, Japan
- Lund, J. W. og Boyd, T. L. (2015). *Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review*. á World Geothermal Congress, Melbourne, Australia. Sótt af <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01000.pdf>
- Marshak, S. (2008). *Earth: A Portrait of a Planet* (3. útgáfa). New York: Norton.
- Matteson, M. og Metivier, C. (2016). Corporate Social Responsibility and the Triple Bottom Line. Sótt af <https://philosophia.uncg.edu/phi361-metivier/module-3-social-responsibility-professionalism-and-loyalty/corporate-social-responsibility-and-the-triple-bottom-line/>
- Medlock, K. B. (2009). The economics of energy supply. Í J. Evans og L. C. Hunt (ritstj.), *International Handbook on the Economics of Energy*. Massachusetts: Edward Elgar Publishing Limited.

- Musk, E. (2014). All Our Patent Are Belong To You. Sótt af <https://www.teslamotors.com/blog/all-our-patent-are-belong-you>
- Orka náttúrunnar. (2015a). Hærra raforkuverð og dregið úr áhættu. Sótt af <https://www.on.is/haerra-raforkuverd-og-dregid-ur-ahaettu>
- Orka náttúrunnar. (2015b). Hærra raforkuverð og dregið úr áhættu. Sótt af <http://www.on.is/haerra-raforkuverd-og-dregid-ur-ahaettu>
- Orka náttúrunnar. (2016a). Fyrirtæki. Sótt af www.on.is/fyrirtaeki
- Orka náttúrunnar. (2016b). Heimili. Sótt af www.on.is/heimili
- Orkusalan. (2016). Verðskrá. Sótt af <https://orkusalan.is/thjonustan/>
- Orkustofnun. (2015a). Flokkun jarðhitakerfa. Sótt af <http://www.orkustofnun.is/orkustofnun/hafa-samband/jardhitaaudlindin-a-islandi/flokkun-jardhitakerfa/>
- Orkustofnun. (2015b). Jarðvarmanotkun. Sótt af <http://os.is/jardhiti/jardvarmanotkun/>
- Orkustofnun. (2015c). Jarðvarmavirkjanir. Sótt af <http://www.orkustofnun.is/jardhiti/jardhitanotkun/jardvarmavirkjanir/>
- Orkustofnun. (2015d). Raforkuvinnsla eftir uppruna: Orkustofnun.
- Orkustofnun. (2015e). Tölfræði 2014: Orkustofnun.
- Orkuveita Reykjavíkur. (2013). *Ársskýrsla Orkuveitu Reykjavíkur 2013*: Orkuveita Reykjavíkur. Sótt af https://www.or.is/sites/or.is/files/or_arsskyrsla_2013_isl_vefur.pdf
- Orkuveita Reykjavíkur. (2016). *Ársreikningur 2015*. Reykjavík: Orkuveita Reykjavíkur.
- Sigurður Björnsson. (2016). *Besta nýting jarðhitakerfis: Samþætting auðlindar og hagrænna þátta*. Háskóli Íslands, Reykjavík. Sótt af <http://skemman.is/item/view/1946/26139>
- Sigurður Jóhannesson. (2016a). *Rammaáætlun og þjóðhagsleg afkoma virkjana (óútgefin greinargerð)*. Reykjavík: Hagfræðistofnun Háskóla Íslands.
- Sigurður Jóhannesson. (2016b). *Teygni eftirspurnar íslenskra heimila eftir raforku (verk í vinnslu)*. Reykjavík: Hagfræðistofnun Háskóla Íslands.
- Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson. (2008). Geothermal systems in Iceland. *Jökull*, 58.
- Sweeney, J. L. (1993). Chapter 17 - Economic Theory of Depletable Resources: an Introduction. Í A. V. Kneese og J. L. Sweeney (ritstj.), *Handbook of Natural Resource and Energy Economics* (bls. 759-854): Elsevier. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1573-4439\(05\)80004-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1573-4439(05)80004-1)
- The Renewable Energy Website. (á.á.). Eden Project Geothermal Power Plant. Sótt af <http://www.reuk.co.uk/Eden-Project-Geothermal-Power-Plant.htm>
- Varian, H. R. (1993). *Microeconomic Analysis* (3. útgáfa). New York: Norton.
- Vilhjálmur Þorsteinsson, Bergur Sigurðarson, Brynhildur Davíðsdóttir, Guðni A. Jóhannesson, Guðrún Jóna Jónsdóttir, Gunnar Tryggvason og Salvör Jónsdóttir. (2011). Heildstæð orkustefna fyrir Ísland. In *Iðnaðarráðuneyti* (Ed.). Reykjavík: Iðnaðarráðuneyti.
- World Energy Council. (2013). *World Energy Resources - 2013 Survey*. London: World Energy Council. Sótt af https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf