



MŚ ritgerð
Fjármál fyrirtækja

Vindorka - nýr valkostur við raforkuvinnslu á Íslandi

Samanburður við vatns- og jarðvarmaorku

Kristján Gunnarsson

Leiðbeinendur: Sveinn Agnarsson, Viðskiptafræðideild

og Jónas Hlynur Hallgrímsson, Hagfræðistofnun

Viðskiptafræðideild

Júní 2014



HÁSKÓLI ÍSLANDS

Vindorka - nýr valkostur við raforkuvinnslu á Íslandi
Samanburður við vatns- og jarðvarmaorku

Kristján Gunnarsson

Lokaverkefni til MS-gráðu í viðskiptafræði
Leiðbeinendur: Sveinn Agnarsson, Viðskiptafræðideild
og Jónas Hlynur Hallgrímsson, Hagfræðistofnun

Viðskiptafræðideild
Félagsvísindasvið Háskóla Íslands

Júní 2014

Vindorka - nýr valkostur við raforkuvinnslu á Íslandi
Samanburður við vatns- og jarðvarmaorku.

Ritgerð þessi er 30 eininga lokaverkefni til MS prófs við
Viðskiptafræðideild, Félagsvísindasvið Háskóla Íslands.

© 2014 Kristján Gunnarsson

Ritgerðina má ekki afrita nema með leyfi höfundar.

Prentun: Svansprent

Garðabær, 2014

Formáli

Höfundur þessarar ritgerðar hefur unnið hjá Landsvirkjun frá árinu 1985, lengst af á fjármálasviði og síðstu árin sem deildarstjóri fjármáladeildar. Í gegnum árin hefur höfundur fylgst náið með virkjanauppbyggingu Landsvirkjunar og komið að undirbúningi með gerð kostnaðarmata, arðsemigreininga og fjármögnun framkvæmda fyrirtækisins frá byggingu Blönduvirkjunar til Búðarhálsvirkjunar. Á þessum tíma hefur uppsett afl fyrirtækisins aukist um 1.145 MW og árleg orkusala aukist um 9.000 GWst eða um 300 GWst að meðaltali á ári. Á hartnær 30 árum hefur Landsvirkjun því vaxið mikið að umfangi og er nú langstærsta raforkufyrirtæki landsins og með stærstu fyrirtækjum á Íslandi með heildareignir upp á 4,5 milljarða Bandaríkjadollara (Landsvirkjun, e.d.a).

Það hafa verið mikil forrættindi að fá að kynnast og taka þátt í undirbúningi virkjanaframkvæmda, fylgjast með framvindu og fylgja þeim úr hlaði á þessum tíma. Framundan eru spennandi tímar en jafnframt tímamót þar sem takast á sjónarmið þeirra sem vilja áfram nýta orku landsins til að skapa arð fyrir komandi kynslóðir, og þeirra sem telja nóg komið, að náttúran eigi að njóta vafans og umhverfismálin eigi að vera í forgangi.

Við val á efni í lokaritgerð lá beinast við að taka áhugavert verkefni sem gæti gagnast fyrirtækinu. Fljótt kom upp í hugann áhugi á að skrifa um nýjustu viðbótina við orkuöflun Landsvirkjunar, vindorkuna, og kanna hvort hún geti orðið alvöru valkostur við raforkuvinnslu fyrirtækisins. Kann ég forstjóra Landsvirkjunar, dr. Herði Arnarsyni og Rafnari Lárussyni, fjármálastjóra, bestu þakki fyrir að samþykkja efnið og gefa höfundi svigrúm til að skrifa um þetta geysilega áhugaverða efni. Tekið er fram að niðurstöður þessarar ritgerðar eru mat höfundar og endurspeglar ekki endilega skoðanir Landsvirkjunar.

Ritgerðin er að vægi 30 einingar í meistaranámi í fjármálum fyrirtækja. Leiðbeinendur voru Sveinn Agnarsson, dósent við Viðskiptafræðideild Háskóla Íslands og Jónas Hlynur Hallgrímsson frá Hagfræðistofnun Háskóla Íslands. Höfundur þakkar þeim fyrir veitta aðstoð og góðar leiðbeiningar. Þá vill höfundur þakka starfsmönnum Landsvirkjunar og öðrum viðmælendum góðar viðbætur og skoðanir á efni ritgerðinnar.

Að síðustu eru þakkir til Halldóru Jónsdóttur, grunnskólakennara, fyrir yfirlestur og góðar ábendingar.

Útdráttur

Íslendingar hafa notið þess að eiga gnægð endurnýjanlegra orkugjafa og hafa borið til þess gæfu að nýta þá í eigin þágu og til uppbyggingar í iðnaði. Raforka hefur á síðustu árum verið framleidd svo til að öllu leyti með vatns- og jarðvarmaorku og húshitun er nánast öll með hitaveitu og raforku frá þessum sömu endurnýjanlegu orkugjöfum. Þetta er einsdæmi í heiminum, þar sem víða er nú leitað allra leiða til að auka hlut endurnýjanlegra orkugjafa í raforkuvinnslu til að stemma stigu við vaxandi útblæstri gróðurhúsalofttegunda.

Vindorka hefur á síðustu árum rutt sér til rúms sem sá endurnýjanlegi orkugjafi sem, ásamt sólarorku, hefur vaxið hraðast í heiminum. Gríðarleg aukning í uppsettu afli og raforkuvinnslu með þessum orkugjöfum hefur leitt til þess að hlutur þeirra í raforkuvinnslu á heimsvísu hefur vaxið hröðum skrefum á liðnum árum. Hið sama verður ekki sagt um hina hefðbundnari endurnýjanlegu orkugjafa sem Íslendingar eiga að venjast, vatns- og jarðvarmaorku. Sérstaka athygli vekur að hlutur jarðvarmaorku til raforkuvinnslu er lítill og hefur staðið í stað á heimsvísu á liðnum árum (U.S. Energy Information Administration [eia], 2013; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2012).

Í janúar 2013 tók Landsvirkjun í notkun 2 vindmyllur í tilraunaskyni. Rekstur þeirra lofar afar góðu og gefur fyrirheit um að vindorka sé vænlegur kostur til raforkuvinnslu, líkt og verið hefur raunin víðast hvar erlendis. Í samanburði við vatnsafls- og jarðvarmavirkjanir hefur vindorkan ýmsa áhugaverða kosti sem gera það að verkum að virkjun vinds gæti breytt áherslum í virkjanauppbyggingu hér á landi. Að sumu leyti er vindorkan ekki sambærileg og þar af leiðandi ekki samanburðarhæf við þá grunnorku sem fæst með virkjun jarðvarma og stýranlega orku vatnsaflsins. Vindorkan hefur þó ýmsa kosti umfram vatnsorku og jarðvarma sem gera það að verkum að hún er mjög áhugaverð og sérstaklega þegar hún er virkjuð samhliða virkjun vatnsafls.

Megin niðurstaða þessarar ritgerðar er að kostnaðarverð vindorku getur verið samkeppnishæft við jarðvarmavirkjanir en heldur hærra en í vatnsorku. Sé tekið tillit til allra óvissu- og áhættupátta og ekki síst umhverfismála er vindorkan þó nú þegar einn

áhugaverðasti kostur sem Íslendingar eiga til raforkuvinnslu. Með sífellt betri tækni, bættri nýtingu, lægri kostnaði og betri endingu er ljóst að Íslendingar eiga gríðarleg tækifæri í beislun vinds. Vindorka er því augljóslega nýr og spennandi valkostur Landsvirkjunar til raforkuvinnslu líkt og verið hefur erlendis undanfarin ár. Virkjun vatnsafls er og verður áfram þungamiðjan í raforkuvinnslunni og fer einstaklega vel saman við virkjun vindorku.

Jarðvarminn er einnig áhugaverður kostur, sérstaklega þegar um er að ræða fjölbætta notkun hans. Til raforkuvinnslu eingöngu í stórum stíl þarf að hafa í huga og verðleggja með réttum hætti mikla óvissu um kostnað, orkugetu og endingu jarðhitasvæða. Þá hafa umhverfismálin samfara virkjun jarðvarma verið vaxandi áhyggjuefni. Þetta hefur gert það að verkum að virkjun jarðvarma verður að teljast mun áhættumeiri en virkjun vatnsfalla og vinds og hefur ekki þótt eins áhugaverður kostur á heimsvísu og annars mætti ætla. Ekki verður séð að íslenskar aðstæður séu mikið frábrugðnar því sem gerist erlendis ef undan er skilin samnýting jarðvarmans til húshitunar og annarra nota auk raforkuvinnslu.

Efnisyfirlit

Myndaskrá	10
Töfluskrá.....	14
1 Inngangur.....	15
2 Um Landsvirkjun	19
2.1 Stofnun, hlutverk, skipulag.....	19
2.2 Starfsemi.....	21
2.3 Fjárhagur	22
3 Raforkumarkaður.....	25
3.1 Heimurinn.....	25
3.1.1 Þróun.....	25
3.1.2 Horfur.....	29
3.2 Ísland	37
3.2.1 Þróun.....	37
3.2.2 Horfur.....	41
4 Vatnsorka, jarðvarmi og vindorka	44
4.1 Vatnsorka	44
4.1.1 Yfirlit.....	45
4.1.2 Þróun.....	49
4.2 Jarðvarmaorka.....	52
4.2.1 Yfirlit.....	53
4.2.2 Þróun.....	55
4.3 Vindorka	59
4.3.1 Yfirlit.....	60
4.3.2 Þróun.....	61
5 Samanburður	66

5.1	Aðferðafræði	66
5.2	Forsendur	72
5.2.1	Stofnkostnaður.....	73
5.2.2	Rekstrarkostnaður.....	74
5.2.3	Byggingartími	75
5.2.4	Nýtingartími	76
5.2.5	Líftími	78
5.2.6	Reiknivextir	78
5.2.7	Samantekt á forsendum.....	81
5.3	Kostnaðarverð	82
5.3.1	Vatnsorka	83
5.3.2	Jarðvarmi.....	85
5.3.3	Vindorka	87
5.3.4	Samantekt	89
5.4	Ýmis álitamál	93
5.4.1	Reiðuafli	93
5.4.2	Líftími	95
5.4.3	Óvissa, áhætta.....	95
5.4.4	Nýr samanburður	97
5.4.5	Umhverfismál.....	102
5.4.6	Afturkræfni.....	103
5.4.7	Samrekstur	103
6	Lokaorð	106
	Heimildaskrá	109
	Viðauki 1 - Viðmælendur og spurningar	112
	Viðauki 2 - Skilgreiningar.....	113
	Viðauki 3 - Vindorkumælingar	114
	Viðauki 4 - Sýnidæmi.....	115

Myndaskrá

Mynd 1. Skipurit Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.b).....	20
Mynd 2. Uppsett afl eftir fyrirtækjum (Orkustofnun, e.d.b).	22
Mynd 3. Raforkuvinnsla á heimsvísu eftir orkugjöfum 1971-2010 (OECD, 2013).....	26
Mynd 4. Skipting raforkuvinnslu á heimsvísu eftir orkugjöfum 1971-2010 (OECD, 2013).....	26
Mynd 5. Skipting aukningar raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum 2011 (iea, 2013).....	27
Mynd 6. Þróun raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum (OECD, 2013).....	28
Mynd 7. Skipting raforkuvinnslu endurnýjanlegra orkugjafa (OECD, 2013)	28
Mynd 8. Raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum 1991 og 2011 (iea, 2013).....	29
Mynd 9. Þróun raforkuvinnslu eftir sviðsmyndum (iea, 2013)	30
Mynd 10. Þróun raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum eftir sviðsmyndum (iea, 2013)	31
Mynd 11. Hutur endurnýjanlegra orkugjafa eftir sviðsmyndum (iea, 2013)	31
Mynd 12. Áætluð þróun raforkuvinnslu á heimsvísu (iea, 2013).....	32
Mynd 13. Áætluð skipting raforkuvinnslu á heimsvísu eftir orkugjöfum (iea, 2013).....	33
Mynd 14. Áætluð raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013)	33
Mynd 15. Skipting endurnýjanlegra orkugjafa (iea, 2013)	34
Mynd 16. Uppsett afl eftir löndum (eia, 2013).....	36
Mynd 17. Skipting uppsetts afls eftir löndum (eia, 2013)	37
Mynd 18. Uppsett afl á Íslandi til raforkuvinnslu (Orkustofnun, e.d.b)	38
Mynd 19. Þróun raforkuvinnslu á Íslandi (Orkustofnun, e.d.b).....	39
Mynd 20. Skipting raforkuvinnslu eftir orkugjöfum (Orkustofnun, e.d.b)	39
Mynd 21. Uppsett afl eftir fyrirtækjum (Orkustofnun, 2013 eða e.d.b)	40

Mynd 22. Hlutfallsleg skipting uppsetts afls eftir fyrirtækjum (Orkustofnun, 2013 eða e.d.b).....	41
Mynd 23. Uppsett afl nokkurra virkjunarkosta í vatnsafli og jarðvarma (Landsvirkjun, e.d.d)	42
Mynd 24. Búrfellsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c)	44
Mynd 25. Írafossstöð (Landsvirkjun, e.d.c).....	46
Mynd 26. Búðarhálsstöð (Landsvirkjun, e.d.c)	47
Mynd 27. Miðlunarforði Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.b).....	49
Mynd 28. Aukning raforkuvinnslu með vatnsafli eftir sviðsmyndum (iea, 2013)	49
Mynd 29. Hlutfall raforkuvinnslu með vatnsorku í endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013).....	50
Mynd 30. Uppsett afl vatnsaflsvirkjana eftir landsvæðum (eia, 2013)	50
Mynd 31. Skipting uppsetts vatnsafls eftir landsvæðum (eia, 2013)	51
Mynd 32. Vatnsaflstöðvar í athugun hjá Landsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.d)	52
Mynd 33. Bjarnarflagsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c)	53
Mynd 34. Kröfluvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c)	54
Mynd 35. Jarðvarmakostir sem Landsvirkjun er með í athugun (Landsvirkjun, e.d.d).....	56
Mynd 36. Aukning raforkuvinnslu með jarðvarma eftir sviðsmyndum (iea, 2013)	57
Mynd 37. Hlutfall raforkuvinnslu með jarðvarma í endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013).....	57
Mynd 38. Uppsett afl jarðvarmavirkjana eftir landsvæðum (eia, 2013)	58
Mynd 39. Skipting uppsetts jarðvarmaafls eftir landsvæðum (eia, 2013)	59
Mynd 40. Vindmyllur Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.c)	60
Mynd 41. Vinna við uppsetningu á vindmyllum Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.c).....	61
Mynd 42. Aukning raforkuvinnslu með vindorku eftir sviðsmyndum (iea, 2013).....	62
Mynd 43. Hlutfall raforkuvinnslu með vindorku í endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013).....	63

Mynd 44. Uppsett afl vindorku eftir landsvæðum (eia, 2013)	63
Mynd 45. Skipting uppsetts afls vindorku eftir landsvæðum (eia, 2013)	64
Mynd 46. Dæmi um vindmyllugarð í Mojave eyðimörkinni (GWEC, 2013)	65
Mynd 47. Formúla fyrir LCOE (IRENA, 2012)	67
Mynd 48. Dæmi um árlegan kostnað og orkumagn	68
Mynd 49. Dæmi, uppsafnaður núvirtur kostnaður og uppsafnaður núvirt magn	68
Mynd 50. Dæmi um samband LCOE og líftíma	69
Mynd 51. Dæmi um samband LCOE og söluverðs	70
Mynd 52. Samband LCOE, söluverðs og innri vaxta (IRR)	71
Mynd 53. Nýtingartími virkjana Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.c)	76
Mynd 54. Meðalnýtingartími eftir orkugjöfum (IRENA, 2012)	77
Mynd 55. Mat á LCOE verð fyrir vatnsafl	83
Mynd 56. Áhrif 10% í einstökum forsendum á LCOE verð fyrir vatnsafl	84
Mynd 57. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE verð fyrir vatnsafl	85
Mynd 58. LCOE ferill fyrir jarðvarma	86
Mynd 59. Áhrif 10% í einstökum forsendum á LCOE verð fyrir jarðvarma	86
Mynd 60. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE verð fyrir jarðvarma	87
Mynd 61. LCOE ferill fyrir vindorku	88
Mynd 62. Áhrif 10% í einstökum forsendum á LCOE verð fyrir vindorku	88
Mynd 63. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE verð fyrir vindorku	89
Mynd 64. Samanburður á LCOE ferlum eftir orkugjöfum	90
Mynd 65. Áhrif 10% breytinga á LCOE verð eftir orkugjöfum	90
Mynd 66. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE eftir orkugjöfum	91
Mynd 67. Samanburður á LCOE verði eftir orkugjöfum	92
Mynd 68. Erlendur samanburður á LCOE eftir orkuverðum (IRENA, 2012)	92
Mynd 69. LCOE ferill fyrir vindorku að teknu tilliti til þátttöku í kostnaði við reiðuafli	94
Mynd 70. Skipting LCOE verðs fyrir vindorku að teknu tilliti til reiðuafli	95

Mynd 71. LCOE ferlar miðað við nýja sviðsmyndagreiningu	99
Mynd 72. Samsettur LCOE ferill, ferill lægsta verðs	99
Mynd 73. Mat á óvissu einstakra forsenda á LCOE verð eftir orkugjöfum	100
Mynd 74. Mat á óvissu í forsendum á LCOE eftir orkugjöfum	100
Mynd 75. Mat á LCOE eftir orkugjöfum miðað við nýja sviðsmynd	101
Mynd 76. LCOE verð fyrir vindorku m.v. mismunandi stofnkostnað og nýtingartíma	102

Töfluskra

Tafla 1. Vindorkumælingar hjá Landsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c).	77
Tafla 2. Dæmi um útleiðingu reiknivaxta.....	80
Tafla 3. Samantekt á grunnforsendum kostnaðarmats.....	82
Tafla 4. Forsendur 10% sviðsmyndagreiningar.....	91
Tafla 5. Forsendur nýrrar sviðsmyndagreiningar	98

1 Inngangur

Á undanförnum árum hefur samsetning raforkuvinnslu í heiminum breyst tiltölulega lítið á heildina lítið. Enn er notast við jarðefnaeldsneyti að stórum hluta og kjarnorka er enn mikilvæg til að anna sívaxandi eftirspurn eftir orku. Slysín í Chernobyl¹ og Japan² hafa þó leitt til þess að framtíð kjarnorku er óvissu háð og mörg ríki hafa lagt áform um frekari nýtingu kjarnorku á hilluna. Hún mun þó enn um sinn skipa stóran sess í orkubúskap heimsins ásamt gasi og ekki er útséð um endurkomu hennar miðað við þróun síðustu missera (International Energy Agency [iea], 2013).

Auk vandamála við beislun og notkun kjarnorku hafa sífelld hertar umhverfiskröfur leitt menn til að huga að öðrum kostum til orkuöflunar. Auknar áherslur á umhverfismál og hertar reglur um útblástur gróðurhúsalofttegunda hafa leitt til þess að þróun og hlutdeild endurnýjanlegra orkugjafa hefur vaxið hratt á allra síðustu árum. Þar á meðal er beislun vatnsorku sem enn er með um 80% hlut. Mesta aukningin hefur þó verið í óhefðbundnari orkugjöfum þar sem langmesti vöxturinn hefur verið í beislun vindorku og sólarorku (iea, 2013, IRENA, 2012).

Á árinu 2011 var vöxtur á heimsvísu í uppsettu afli alls um 100 GW í endurnýjanlegum orkugjöfum. Til að setja þetta í samhengi þá er uppsett afl Landsvirkjunar samtals um 2 GW eða 2% af aukningu ársins 2011. Langmesta aukningin var í vindorku eða um 40 GW (IRENA, 2012).

Á árinu 2013 var raforkuvinnsla með vindorku 1/3 af allri raforkuvinnslu í Danmörku og í desembermánuði nam framleiðslan yfir 50% sem er met og það langhæsta sem sést hefur í einu landi. Í Bretlandi hefur raforkuvinnsla með vindorku að sama skapi vaxið mikið og sér hún nú fyrir um 10% af raforkuþörfinni. Í desember 2013 var slegið met í vinnslu raforku með vindorku þegar framleiðslan var 17% af allri raforkuvinnslunni³. Gríðarlegur vöxtur vindorku víðs vegar um heiminn er áhugaverður og gefur tilefni til

¹ 26. apríl 1986 í Chernobyl, Úkraínu

² 11. mars 2011 í Fukushima, Japan

³ Sjá <http://cleantechnica.com/2014/01/05/uk-wind-energy-sector-smashed-power-generation-record-december-2013/>

frekari skoðunar. Um tiltölulega einfaldan orkugjafa er að ræða sem með nýrri tækni verður stöðugt hagkvæmari. Umhverfisáhrif eru tiltölulega lítil, stofnkostnaður er lágur, framleiðsla er skalanleg, mannvirki að stærstum hluta endurkræf og eru sífellt að verða tæknilega fullkomnari. Vindorka er einnig aðgengilegur orkugjafi og flest lönd hafa aðstæður til að virkja hann. Það er helst landrými sem takmarkar virkjun vindorku (eia, 2013; The European Wind Energy Association [EWEA], 2014). Það er því ekki að ástæðulausu að vindorka hefur náð athygli íslenskra orkufyrirtækja. Miðað við það sem gerst hefur erlendis á síðustu árum er fátt sem bendir til annars en að hið sama geti gerst hér á landi þar sem aðstæður eru um margt mjög ákjósanlegar (Landsvirkjun, e.d.d).

Íslendingar hafa notið þess að eiga umhverfisvæna orkugjafa í formi vatnsafls og jarðvarma. Svo til öll raforkuvinnsla er nú unnin með þessum orkugjöfum og húshitun er að mestu leyti með hitaveitu. Aðeins í samgöngum er enn notast við jarðefnaeldsneyti. Fjöldi góðra orkukosta hefur e.t.v. gert það að verkum að það hefur ekki þótt ástæða til að kanna að ráði aðra kosti. Aukin umræða um umhverfismál hefur þó vakið menn til umhugsunar og þá liggur vindorkan beinast við. Það hefur lengi verið vitað að auk jarðhita og vatnsfalla hefur vindurinn einnig verið ötull við að móta landið með öllu sínu afli og því ekki að virkja það líka! Íslendingar eiga líka orku í sjávarföllum og straumum en þar hefur þróunin verið hæg og er ekki efni þessarar ritgerðar (Ketill Sigurjónsson, 2009).

Íslendingar eru í afar öfundsverðri stöðu þegar kemur að raforkuvinnslu þar sem nú þegar er öll raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum. Eftirspurn eftir raforku fyrir almenna notkun er lítil eða innan við 2% á ári og frekari raforkuvinnsla í stórum stíl verður því nánast eingöngu til aukningar á sölu til orkufreks iðnaðar (Orkustofun, 2013). Þessu er öfugt farið víðast hvar erlendis. Annars vegar keppast ríki nú við að skipta út hefðbundnari orkugjöfum fyrir endurnýjanlega. Hins vegar er um að ræða uppbyggingu á svæðum sem hafa ekki eða mjög takmarkað aðgengi að orku (eia, 2013; Global Wind Energy Council [GWEC], 2013).

Landsvirkjun setti upp tvær 900 kW vindmyllur í janúar 2013 í tilraunaskyni. Ætlunin er að afla reynslu um rekstur vindmylla við íslenskar aðstæður og kanna hvort vindorka sé nægilega hagkvæm til að verða þriðji valkostur fyrirtækisins til raforkuvinnslu. Virkjun

vindorku virðist líka eiga upp á pallborðið hjá landsmönnum ef marka má niðurstöður nýlegrar könnunar Capacent Gallup⁴. Þar kemur fram að mikill meirihluti þeirra sem svaraði, eða 81% landsmanna, eru hlynntir frekari uppbyggingu vindorku á Íslandi. Þetta er mjög athyglisvert þar sem töluverð andstaða hefur verið gegn frekari virkjun vatnsfalla og jarðvarma. Fyrstu niðurstöður varðandi vindorku lofa góðu með framhaldið og gefa tilefni til bjartsýni (Landsvirkjun, e.d.d).

Í þessari ritgerð verður leitast við að svara því hvort vindmyllur eigi framtíðina fyrir sér við íslenskar aðstæður. Farið verður nokkrum orðum yfir þróun á raforkumarkaði í heiminum og á Íslandi til að lesandinn geti betur áttað sig á helstu atriðum. Áherslan verður sem fyrr segir á þessa þrjá orkugjafa til raforkuvinnslu, vatnsorku, jarðvarma og vindorku sem við Íslendingar erum svo lánsamir að eiga nóg af. Þessir orkugjafar verða bornir saman út frá kostnaði en ekki verður hjá því komist að gera grein fyrir ýmsum álitamálum sem verður að taka tillit til og geta haft áhrif á endanlegt mat.

Höfundur styðst aðallega við heimildir um endurnýjanlega orkugjafa frá eia og IRENA⁵ auk annarra alþjóðlegra stofnana og samtaka sem sérhæfa sig í málefnum orkumarkaðarins (EWEA; GWEC)⁶. Einnig er töluvert efni að finna á heimasíðum íslensku orkufyrirtækjanna, Landsvirkjunar, Orkuveitu Reykjavíkur og HS Orku. Þá er einnig ýmsan fróðleik að finna hjá Orkustofnun og tengdum aðilum. Þá voru tekin viðtöl við aðila hér á landi sem best þekkja til þessara orkugjafa og eru þar aðallega starfsfólk Landsvirkjunar og ráðgjafar.

Í öðrum kafla er farið nokkrum orðum um Landsvirkjun, tilurð, uppbyggingu og starfsemi. Í þriðja kafla er fjallað um raforkumarkaðinn og hann kortlagður á heimsvísu og á Íslandi, gerð grein fyrir þróun undanfarinna ára og horfum. Fjórdi kafla fjallar nánar um þessa þrjá endurnýjanlegu orkugjafa sem eru til umfjöllunar í ritgerðinni, helstu upplýsingar dregnar saman, gerð grein fyrir notkun og þróun næstu ára. Í fimmta og jafnframt viðamesta kaflanum eru svo þessir þrír orkugjafar bornir nánar saman. Þar verður gerð grein fyrir aðferðafræði sem lögð er til grundvallar samanburði á kostnaðarmati þessara þriggja orkukosta. Helstu forsendum verða gerð skil sem

⁴ Viðskiptablaðið (<http://www.vb.is/frettir/95196/>).

⁵ International Renewable Energy Agency, IRENA. U. S. International Energy Agency, iea.

⁶ European Wind Energy Association; Global Wind Energy Council.

aðferðafræðin byggir á og niðurstöður kostnaðarmats verða kynntar. Þá verða ýmis álitamál tekin fyrir og annað tínt til sem getur haft áhrif á niðurstöðurnar. Að lokum verða niðurstöður teknar saman í sjötta kafla.

2 Um Landsvirkjun

Landsvirkjun er langstærsta raforkufyrirtæki landsins með um 75% markaðshlutdeild. Í þessum kafla verða fyrirtækinu gerð nánari skil og fjallað um tilurð þess, hlutverk og starfsemi. Landsvirkjun hefur í undirbúningi allmarga virkjunarkosti bæði í vatnsafli og jarðgufu, en einnig hefur fyrirtækið kannað kosti vindorku.

2.1 Stofnun, hlutverk, skipulag

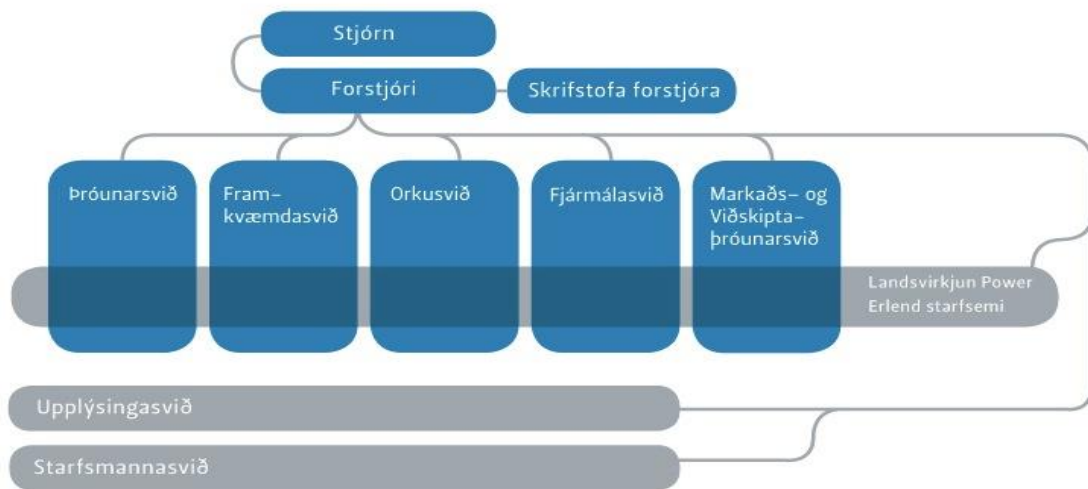
Landsvirkjun var stofnuð þann 1. júlí 1965 og voru eigendur í upphafi íslenska ríkið og Reykjavíkurborg til helminga. Hlutverk Landsvirkjunar var og hefur lengst af verið að virkja fallvötn landsins til raforkuframléiðslu og selja til almenningsnota og iðnaðar. Segja má að Landsvirkjun hafi verið stofnuð utan um það verkefni að virkja Þjórsá við Búrfell og selja orkuna til álvers ÍSAL í Straumsvík (í dag Rio Tinto Alcan). Árið 1983 tók Landsvirkjun yfir rekstur byggðalínukerfisins frá Rarik auk þess að yfirtaka rekstur Laxárvirkjana. Þar með gerðist Akureyrarbær eigandi að Landsvirkjun með 5% hlut á móti 45% hlut Reykjavíkurborgar.

Með yfirtöku Ríkisins á hlut Reykjavíkurborgar og Akureyrar í árslok 2006 er Ríkið nú eini eigandi Landsvirkjunar. Landsvirkjun starfar samkvæmt sérlögum frá 1983⁷ með síðari breytingum. Landsvirkjun er enn rekið sem sameignarfyrirtæki þar sem Eignarhlutir ehf., fyrirtæki í 100% eigu Ríkisins, á 0,1% hlut á móti Ríkissjóði. Ríkissjóður er í einfaldri ábyrgð fyrir skuldbindingum Landsvirkjunar og greiðir Landsvirkjun sérstakt ábyrgðargjald til Ríkisins. Landsvirkjun er með sömu lánshæfiseinkunn og Ríkið hjá Moody's eða Baa3 en tveimur flokkum neðar hjá S&P eða BB- þar sem horfur eru stöðugar.

Fimm manna stjórn Landsvirkjunar er skipuð af eigandanum og er hún pólitískt skipuð að hluta en fulltrúar ríkisstjórnarflokkanna fara með meirihluta. Landsvirkjun samanstendur af fimm megin sviðum: orkusviði, fjármálasviði, framkvæmdasviði, þróunarsviði og markaðssviði auk skrifstofu forstjóra, en starfsmannadeild og upplýsingatæknideild heyra þar undir. Til viðbótar á Landsvirkjun tvö dótturfélög.

⁷ Lög nr. 42 23. mars 1983 með síðari breytingum

Landsvirkjun Power ehf. var áður verk- og framkvæmdasvið en er nú ráðgjafarfyrtæki í 100% eigu Landsvirkjunar.



Mynd 1. Skipurit Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.b)

Landsnet hf. var áður orkuflutningssvið innan Landsvirkjunar en á og rekur nú meginflutningskerfi landsins. Eignarhlutur Landsvirkjunar er um 65% á móti 35% sem er í eigu annarra orkufyrirtækja. Landsnet og Landsvirkjun eiga síðan Orkufjarskipti hf. til helminga hvort fyrirtæki, en Orkusamskipti hf. rekur fjarskiptakerfi samstæðunnar.

Fyrirtækið framleiðir rafmagn úr endurnýjanlegum orkugjöfum, vatnsafli og jarðvarma og nú síðast vindorku í mjög litlum mæli, enn sem komið er. Landsvirkjun vinnur um 75% allrar raforku í landinu og er langstærsti raforkuframleiðandi á Íslandi. Um leið er fyrirtækið leiðandi í sjálfbærri nýtingu orkugjafa og stuðlar að aukinni þekkingu, nýsköpun og tækniþróun. Nýtt hlutverk Landsvirkjunar er að hámarka afrakstur af þeim orkulindum sem fyrirtækinu er trúað fyrir með sjálfbæra nýtingu, verðmætasköpun og hagkvæmni að leiðarljósi⁸. Einnig hafa gildi fyrirtækisins verið endurskilgreind en þau eru að starfsfólk hafi framsækni, ráðdeild og traust að leiðarljósi.

Umhverfismál hafa í gegnum árin fengið aukið vægi í starfsemi fyrirtækisins enda hafa virkjunarframkvæmdir mikil áhrif á næsta umhverfi. Fyrirtækið hefur ávallt lagt mikla áherslu að lágmarka umhverfisáhrif framkvæmda og í kjölfar þeirra reynt eftir fremsta megni að lagfæra rask og koma landi í fyrra horf. Fyrirtækið hefur lagt mikla

⁸ Sjá <http://www.landsvirkjun.is/>

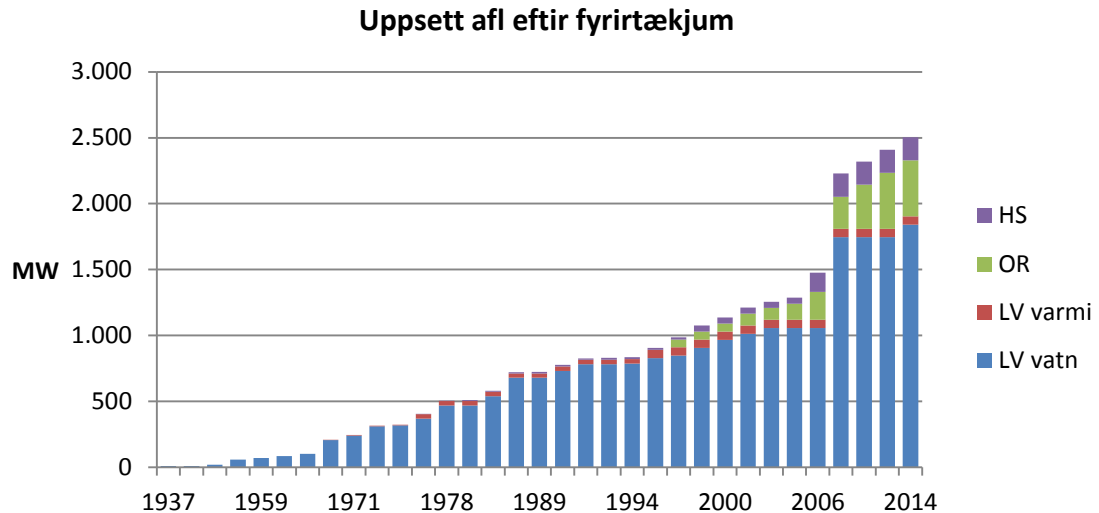
áherslu á samfélagslega ábyrgð og innleiddi nýlega metnaðarfulla stefnu um samfélagsábyrgð sem byggir á því að halda jafnvægi milli efnahags, umhverfis og samfélags í rekstrinum. Við rekstur fyrirtækisins er lögð áhersla á heildræna yfirsýn á hagkvæmni, áreiðanleika og sambýli starfseminnar við umhverfi og samfélag (Landsvirkjun, e.d.b).

2.2 Starfsemi

Landsvirkjun á og rekur nú 16 vatnsaflstöðvar, að Búðarhálsvirkjun meðtalinni, um land allt og tvær jarðvarmaafstöðvar. Uppsett afl er um 1.955 MW og árleg orkusala um 13 TWst. Langstærsta aflstöð fyrirtækisins er Kárahnjúkavirkjun sem framleiðir allt að 700 MW eða um 5.000 GWst árlega fyrir álver Alcoa, Fjarðaál, á Reyðarfirði. Byggingu Búðarhálsvirkjunar er að mestu lokið og var hún gangsett þann 7. mars s.l. Uppsett afl virkjunarinnar er 95 MW og framleiðir hún um 575 GWst á ári. Orkan verður að mestu seld til stækkunar álvers RTA í Straumsvík.

Starfsmenn samstæðunnar eru um 380 með dótturfélögum. Fyrirtækið selur í dag um 75% af öllu rafmagni í landinu og er langstærst í þessum geira.

Orkuveita Reykjavíkur hefur þó vaxið hröðum skrefum á undanförunum árum og með stóraukinni virkjun jarðvarmaafstöðva á Hellisheiði hefur fyrirtækið aukið hlut sinn á raforkumarkaðinum. Þessi tvö fyrirtæki skipta orkumarkaðinum nánast á milli sín en HS Orka framleiðir mun minna (Orkustofnun, e.d.b).



Mynd 2. Uppsett afl eftir fyrirtækjum (Orkustofnun, e.d.b).

Á þessum 48 árum frá stofnun hefur fyrirtækið vaxið stöðugt, viðskiptavinum hefur fjölgað og reksturinn orðinn nokkuð umsvifamikill. Viðskiptavinir Landsvirkjunar eru þó enn fáir og stórir. Landsvirkjun selur raforku í heildsölu til almenningsveitna sem eru Orkuveita Reykjavíkur, Rarik, Orkubú Vestfjarða og Rafveita Akureyrar. Sala til iðnaðarfyrirtækja hefur vaxið hröðum skrefum á undanförunum árum en það eru Rio Tinto Alcan í Straumsvík, Járblendifélagið, Norðurál á Grundartanga og Alcoa Fjarðaál á Reyðarfirði. Landsvirkjum hefur átt í viðræðum við ýmiss fyrirtæki um raforkusölu og hafa menn helst verið að horfa til nýrra viðskiptavina eins og t.d. kísilmálmframleiðslu og gagnavera, sem væri kærkomin viðbót við álfyrirtækin. Landsvirkjun er með starfsstöðvar um allt land sem eru í virkjunum og nágrenni við virkjanir á landsbyggðinni. Höfuðstöðvar fyrirtækisins eru í Reykjavík, þar sem starfa um 120 manns, en aðrir starfsmenn eru dreifðir á starfsstöðvum víða um land (Landsvirkjun, e.d.b).

2.3 Fjárhagur

Fyrir utan grunnstarfsemina sem er að byggja og reka virkjanir þá er Landsvirkjun með umtalsverða fjármálastarfsemi. Hröð uppbygging undanfarinna ára hefur kallað á mikið fjármagn sem að langmestum hluta hefur verið í formi útgáfu skuldabréfa á innlendum og erlendum skuldabréfamörkuðum. Þrátt fyrir hraða uppbyggingu er fjárhagsleg staða Landsvirkjunar þokkaleg á íslenskan mælikvarða. Heildareignir eru um 4,6 milljarðar

dollara og ársvelta um 420 milljónir dollara. Fyrirtækið er þannig með stærstu fyrirtækjum á Íslandi, sérstaklega þegar eignir eru annars vegar en fyrirtækið var með mesta eigið fé allra íslenskra fyrirtækja í árslok 2013 eða um 1,7 milljarða dollara⁹ (Landsvirkjun, e.d.a).

Landsvirkjun innleiddi alþjóðlega reikningskilastaðla á árinu 2007 og hefur í framhaldinu notað Bandaríkjadollar (USD) sem starfsrækslumynt fyrirtækisins. Allar tölur í þessari ritgerð eru því settar fram í USD og á það líka við um orkuverð sem er sett fram sem USD/MWst, nema annað sé tekið fram. Landsvirkjun nýtur ágæts trausts bæði á erlendum fjármagnsmörkuðum og hér heima og hefur tekist að fjármagna sig á síðustu árum þrátt fyrir erfið skilyrði. Fjármögnunin er þó mun dýrari og til skemmri tíma en áður vegna lakara lánshæfismats. Matið er nú BB hjá Standard & Poors og Baa3 hjá Moody's og horfur stöðugar hjá báðum fyrirtækjum. Matið endurspeglar þá staðreynd að ríkið er eigandi fyrirtækisins en stærð þess og mikilvægi fyrir íslenskan orkumarkað hjálpar einnig. Þrátt fyrir það er einkunn S&P tveimur flokkum undir fjárfestingaflokki (spákaupmennskuflokkur) en í lægsta flokki hjá Moody's sem er sama einkunn og íslenska ríkið er með¹⁰.

Fyrirtækið er þó enn nokkuð skuldsett eftir mikil og stöðug framkvæmdatímabil og hefur því takmarkaða burði til að ráðast í ný stór verkefni. Hér vegur þungt bygging Kárahnjúkavirkjunar sem tekin var í notkun árið 2007 en það verkefni jók skuldsetningu fyrirtækisins verulega. Fyrirtækinu hefur þó tekist að bæta fjárhagsstöðuna á undanförunum árum samtímis því að byggja Búðarhálsvirkjun. Eiginfjárhlutfall í árslok 2013 var rétt liðlega 36% sem telst þokkalegt á íslenskan mælikvarða. Hins vegar eru aðrar og meira lýsandi fjárhagskennitölur enn tiltölulega slakar og endurspeglar hlutfallslega lágur tekjur í samanburði við eignir. Hlutfall nettó skulda á móti EBITDA framlegð er um 7,4 og veltufé frá rekstri á móti nettó skuldum er 10,6%. Samanburður við önnur raforkufyrirtæki á Norðurlöndunum leiðir í ljós að fyrirtækið á enn langt í land með að ná sama fjárhagslega styrkleika og þau¹¹. Grunnlánshæfiseinkunn Landsvirkjunar (e. standalone credit rating) er undir fjárfestingaflokki hjá báðum lánshæfisfyrirtækjum

⁹ Sjá heimasíðu Landsvirkjunar; <http://www.landsvirkjun.is/> og Frjáls Verslun, 100 stærstu 2013

¹⁰ Sjá <http://www.landsvirkjun.is/fjarmal/fjarmognun/>

¹¹ Statkraft, Vattenfall, Fortum og Dong m.a.

sem endurspeglar tiltölulega veika fjárhagsstöðu og einhæft viðskiptamódel
(Landsvirkjun, e.d.a).

3 Raforkumarkaður

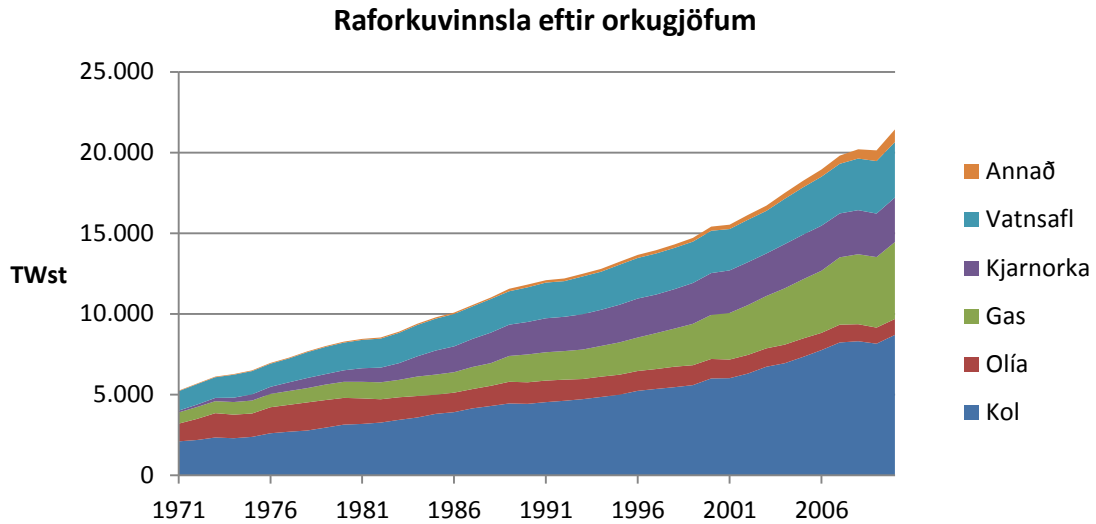
Eftirspurn eftir raforku hefur aukist hratt á undanförunum árum og þar hefur hlutur endurnýjanlegra orkugjafa verið mikilvægur í að stemma stigu við vaxandi mengun. Á Íslandi er þessu öfugt farið þar sem nánast öll raforkuvinnsla er með endurnýjanlegum orkugjöfum sem er einsdæmi. Í þessum kafla verður fjallað um þróun og horfur í raforkuvinnslu á heimsvísu og á Íslandi.

3.1 Heimurinn

Á heimsvísu hefur raforkuvinnsla með kolum og jarðefnaeldsneyti verið allsráðandi en breytingar hafa orðið á undanförunum árum þar sem vægi endurnýjanlegra orkugjafa hefur aukist hratt.

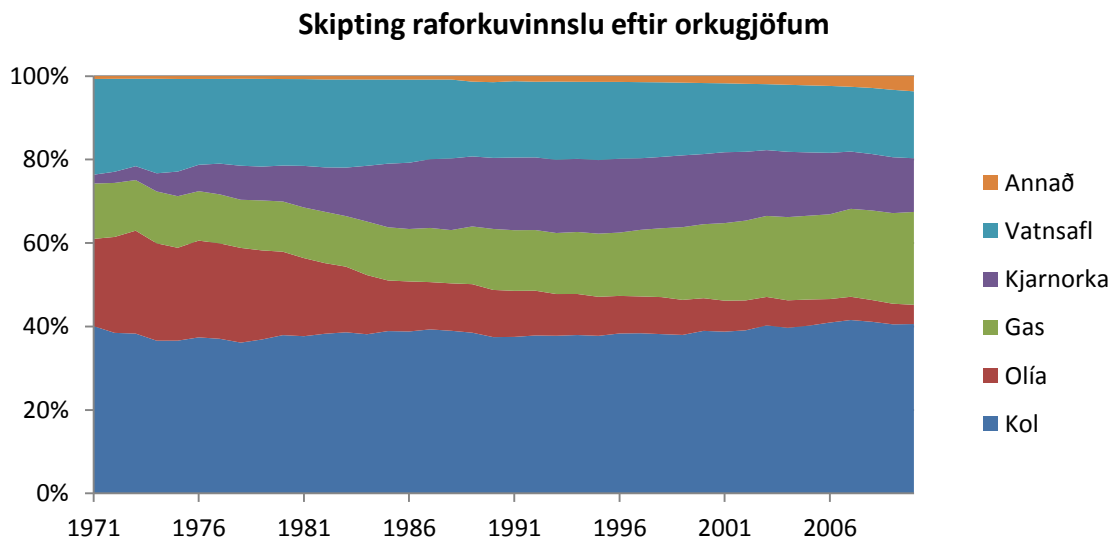
3.1.1 Þróun

Eftirspurn eftir orku hefur vaxið hröðum skrefum á undanförunum árum. Árs raforkuvinnsla er talin vera um 22.000 TWst og fer ört vaxandi. Uppsett afl er talið vera um 5.500 GW (iea, 2013). Til samanburðar er heildar raforkuvinnsla á Íslandi 17,5 TWst og uppsett afl 2,5 GW sem er aðeins örlítið brot af heimsmarkaðinum eða aðeins um 0,1%. Enn er langmest framleitt af orku með kolum, jarðefnaeldsneyti, olíu og gasi og nemur framleiðsla með þessum orkugjöfum enn um 80% (mynd 3) og hefur lítið breyst á heildina lítið. Hlutur kola er enn hæstur og hefur vaxið á meðan orkuvinnsla með olíu hefur dregist mikið saman. Orkuvinnsla með jarðgasi hefur einnig vaxið en hlutur kjarnorku hefur staðið í stað og aðeins minnkað á síðustu árum. Frá 1970 hefur orkuvinnslan fjórfaldast og farið úr um 5.000 TWst í yfir 20.000 TWst.



Mynd 3. Raforkuvinnsla á heimsvísu eftir orkugjöfum 1971-2010 (OECD, 2013)

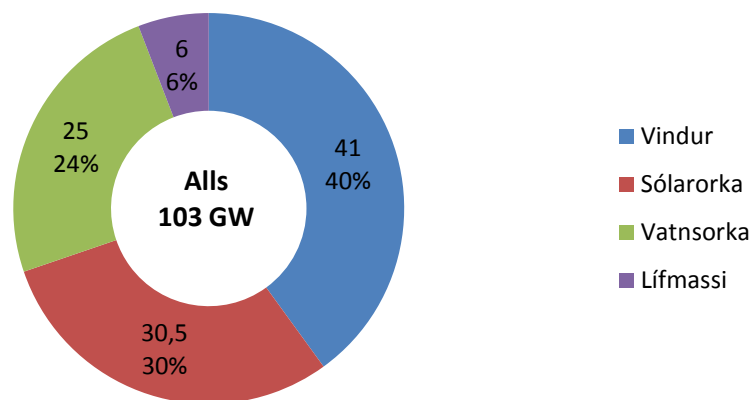
Hlutur kolavinnslu hefur staðið í stað og sama má segja um kjarnorku. Hlutur olíu hefur minnkað mikið og stöðugt. Hlutur endurnýjanlegra orkugjafa hefur staðið í stað að mestu leyti og hefur verið um 20% en innbyrðis skipting hefur verið að breytast. Þar hefur þróunin orðið sú að hlutur vatnsafls sem verið hefur yfirgnæfandi þáttur hefur minnkað. Þess í stað hafa komið inn nýir orkugjafar þar sem langmesta aukningin hefur verið í vindorku og á síðustu árum einnig sólarorku.



Mynd 4. Skipting raforkuvinnslu á heimsvísu eftir orkugjöfum 1971-2010 (OECD, 2013)

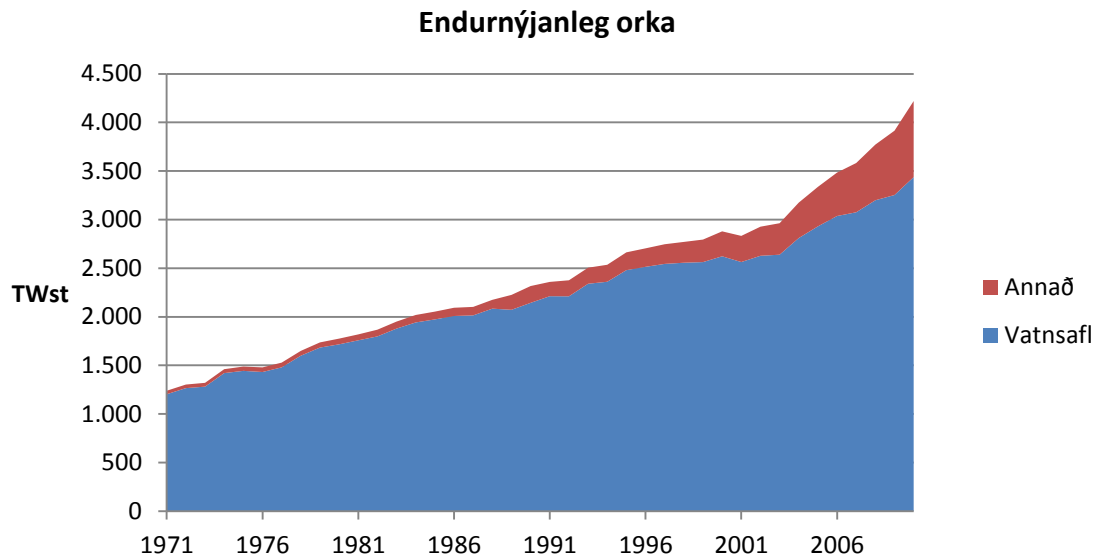
Eftirspurn eftir umhverfisvænni orku hefur aukist hratt og er nú svo komið að aukningin í framleiðslu er langmest með endurnýjanlegum orkugjöfum eins og vindorku og sólarorku. Á árinu 2011 var aukningin ein og sér um 100 GW eða 40 falt meira en uppsett afl á á Íslandi 2012. Af þessari aukningu var hlutur vindorku langmestur eða 40 GW, þá sólarorka með 30 GW og vatnsorka með 25 GW.

Aukning í uppsettu afli endurnýjanlegra orkugjafa 2011



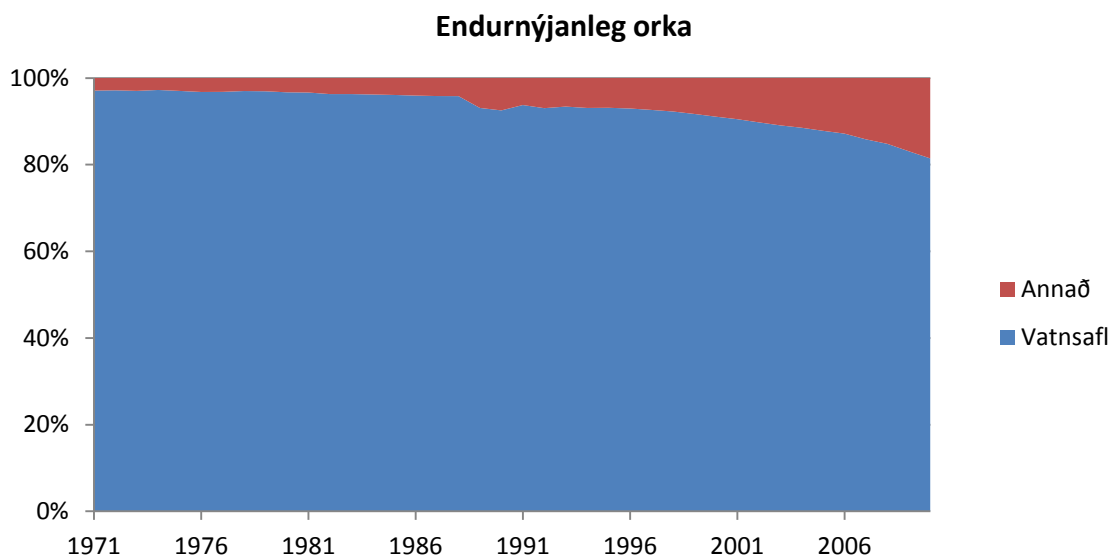
Mynd 5. Skipting aukningar raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum 2011 (iea, 2013)

Hlutur jarðvarma er hverfandi í þessari aukningu eða aðeins 0,1 GW og sést því ekki á myndinni. Til að setja þetta í annað samhengi þá nam aukning uppsetts afls í vindorku á árinu 2011 fjórfalt meiru en heildar uppsett afl í jarðvarma til raforkuvinnslu. Hlutur endurnýjanlegra orkugjafa af heildar aukningu í uppsettu afli er um 50% (IRENA, 2012). Heildarframleiðsla nam 1.360 GW þannig að aukningin er gríðarleg eða nálægt 10% á ári. Vatnsorkan vegur enn lang mest í þessum flokki sem fyrr segir með um 80% hlutdeild en vægi vindorku og sólarorku vex stöðugt á meðan aukningin er mun minni með eldri og þroskuðum (e. mature) aðferðum (IRENA, 2012).



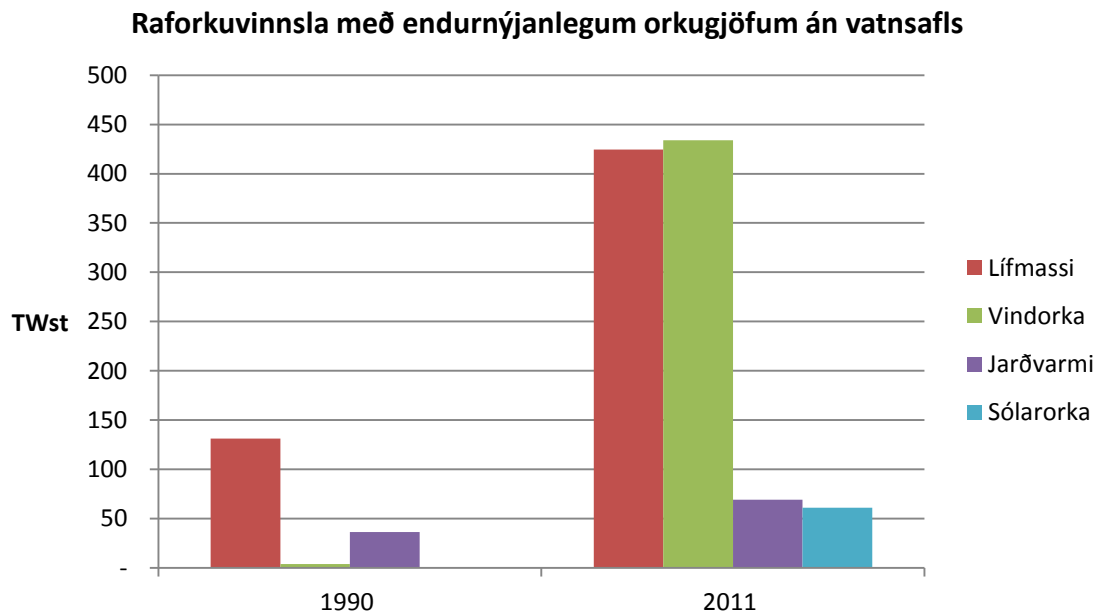
Mynd 6. Þróun raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum (OECD, 2013)

Sjá má að aukning endurnýjanlegra orkugjafa hefur vaxið hratt en þó ekki hraðar en annarra þar sem hlutfallið hefur ekki breyst að ráði síðastliðin 40 ár eða svo. Sjá má stöðuga aukningu annarra endurnýjanlegra orkugjafa en vatnsafls og sem fyrr segir er þar aðallega um vindorku og sólarorku að ræða. Hluttur vatnsafls hefur lækkað úr um 95% í 80% frá 1970 til 2010.



Mynd 7. Skipting raforkuvinnslu endurnýjanlegra orkugjafa (OECD, 2013)

Ef endurnýjanleg orka er skoðuð sérstaklega þá kemur í ljós að þar er sem fyrr segir vatnsorka ráðandi. Án vatnsorku hefur þó vöxtur í vindorku verið gríðarlegur og sem fyrr segir, sólarorku á síðustu árum.



Mynd 8. Raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum 1991 og 2011 (iea, 2013)

Á mynd 8 sést að hlutur jarðvarmaorku er lítil og hefur einnig vaxið afar hægt. Vindorka á árinu 2011 hefur náð raforkuvinnslu með lífefnaeldsneyti og sólarorka hefur þegar náð jarðvarmaorku og vex hratt eins og vindorkan.

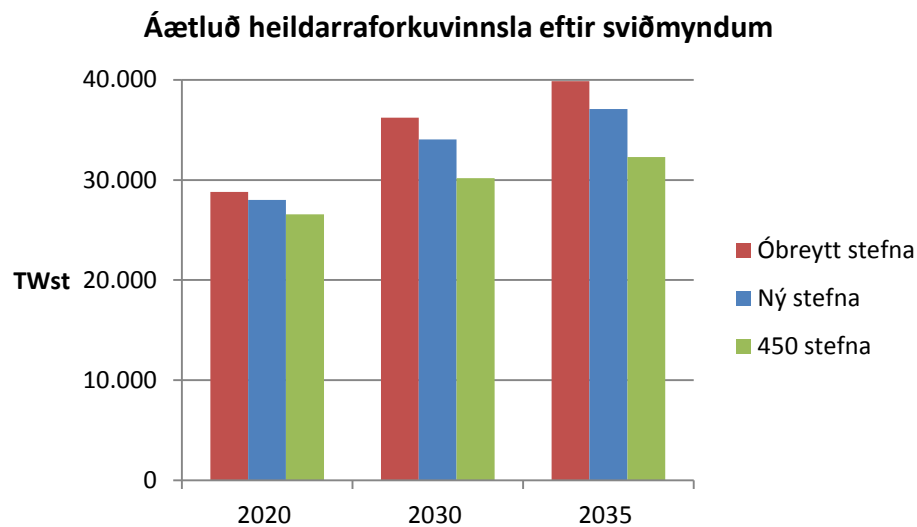
3.1.2 Horfur

Gera má ráð fyrir að aukning í eftirspurn eftir raforku minnki á næstu árum en að orkuframleiðsla með endurnýjanlegum orkugjöfum aukist jafnt og þétt á kostnað annarra orkugjafa. Þegar rætt er um horfur næstu ára er gjarnan talað um ákveðnar sviðsmyndir þar sem mismunandi forsendur og markmið eru sett fram.

Í skýrslu iea¹² eru þrjár sviðsmyndir skilgreindar. Í fyrsta lagi er rætt um óbreytta stefnu (e. Current Scenario) þar sem engar eða litlar breytingar eiga sér stað á þróun raforkumarkaðarins og hann vex í takt við þróun síðustu ára. Í öðru lagi er svokölluð ný

¹² International Energy Agency (iea)

stefna (e. New Policies Scenario) sem gerir ráð fyrir ákveðinni stefnubreytingu frá þróun liðinna ára. Í þessari stefnu hafa mörg ríki sétt sér ákveðin markmið t.d. með að auka hlut endurnýjanlegra orkugjafa í raforkuvinnslu. Í þriðja lagi er nefnd til sögunnar mjög metnaðarfull stefna, svokölluð 450 stefna (e. 450 Scenario¹³). Í forsendum hennar er leitast við að orkumarkaðinum verði stýrt á þann veg að 50% líkur verði á því að aukning meðalhitastigs á heimsvísu verði innan við 2 gráður á Celsius til langs tíma. Ef þessar sviðsmyndir eru skoðaðar nánar má sjá verulegan mun í eftirspurn og hvernig raforkuvinnslan er talin muni þróast frá 2020 til 2035.

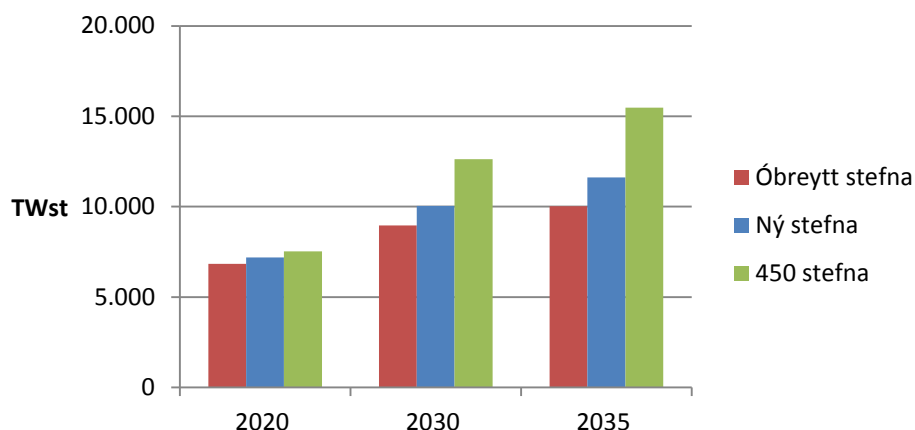


Mynd 9. Þróun raforkuvinnslu eftir sviðsmyndum (iea, 2013)

Við sáum áður að núverandi raforkuvinnsla er talin losa 20.000 TWst og á mynd 9 má sjá hvernig raforkuvinnslan í heild muni þróast á næstu árum. Í metnaðarfyllstu stefnunni er gert ráð fyrir minnstu aukningunni og munar miklu frá óbreyttu ástandi eða allt að 10.000 TWst sem er næstum helmingur af núverandi raforkuvinnslu.

¹³ Nefnd eftir markmiði um útblástur gróðurhúsalofttegunda, takmörkuð við 450 hluta pr. milljón. Sjá nánar; <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2013/>

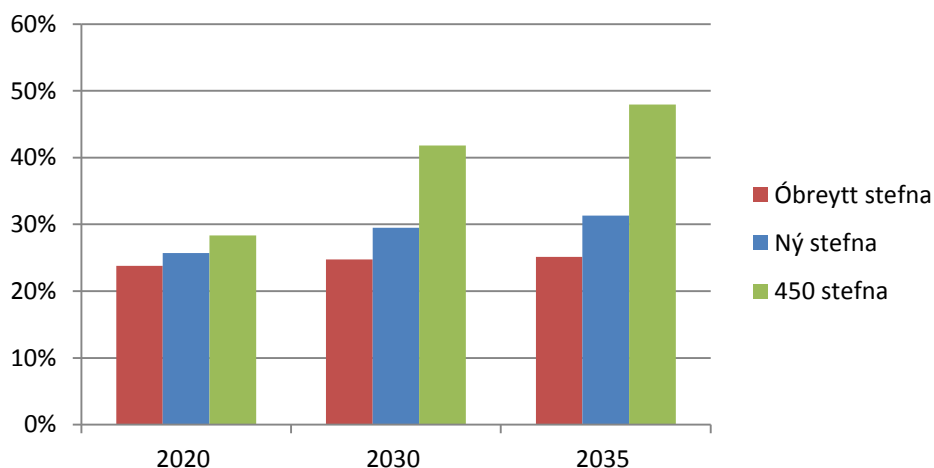
Áætluð raforkuvinnsla endurnýjanlegra orkugjafa eftir sviðsmýndum



Mynd 10. Þróun raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum eftir sviðsmýndum (iea, 2013)

Þegar raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum er skoðuð snýst þetta við þar sem gert er ráð fyrir að þar muni mesta aukningin verða í 450 sviðsmýndinni. Þar er gert ráð fyrir u.þ.b. tvöföldun frá því sem nú er og það þýðir að hlutur endurnýjanlegra orkugjafa eykst mjög frá því sem nú er.

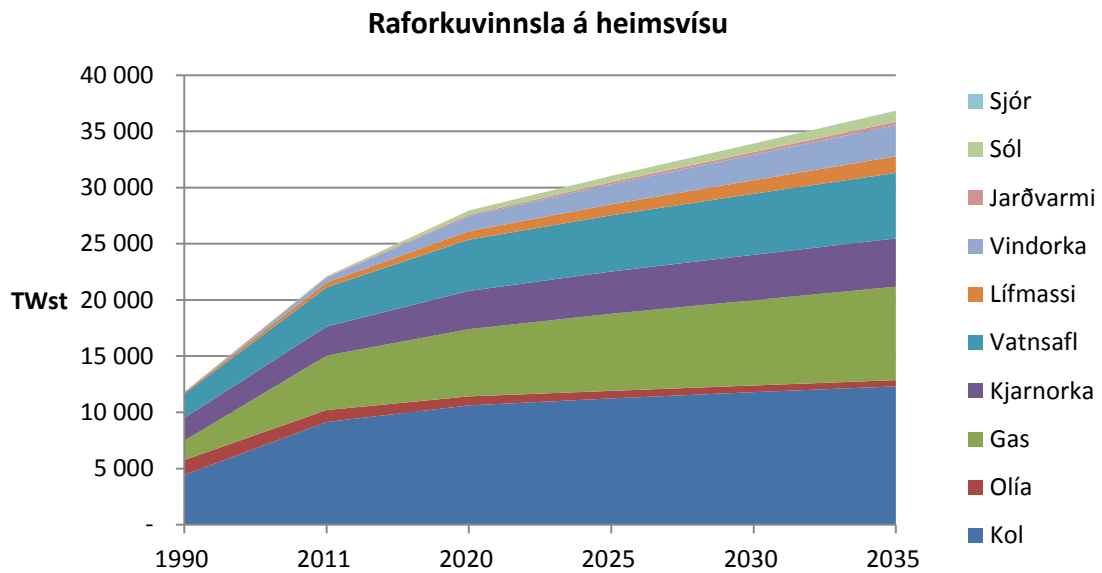
Hlutur endurnýjanlegra orkugjafa eftir sviðsmýndum



Mynd 11. Hlutur endurnýjanlegra orkugjafa eftir sviðsmýndum (iea, 2013)

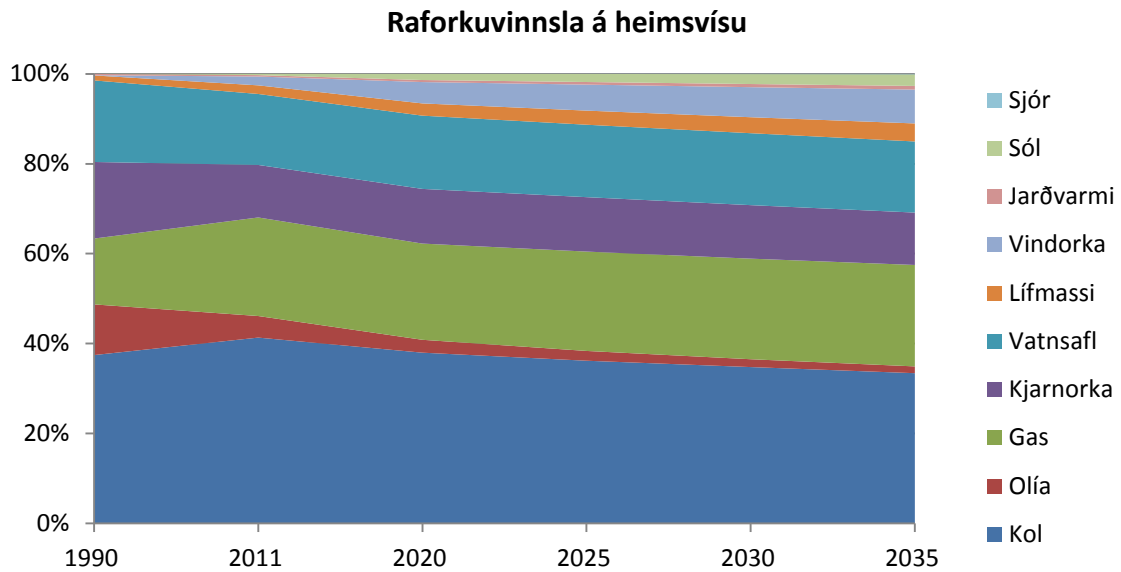
Hér má sjá að hlutfallið eykst frá því að vera um 20% lægst yfir í um 50% ef áform metnaðarfyllstu stefnunnar ná fram að ganga.

Á næstu myndum má sjá áætlaða þróun og skiptingu eftir orkugjöfum til ársins 2035 (iea, 2013). Gert er ráð fyrir „Ný stefnu“ (e. New Policy) sviðsmynd nema annað sé tekið fram. Orkuvinnsla er talin geta aukist úr um 22.000 TWst í yfir 35.000 TWst á árinu 2035 og skiptist eins og fram kemur á mynd 12.



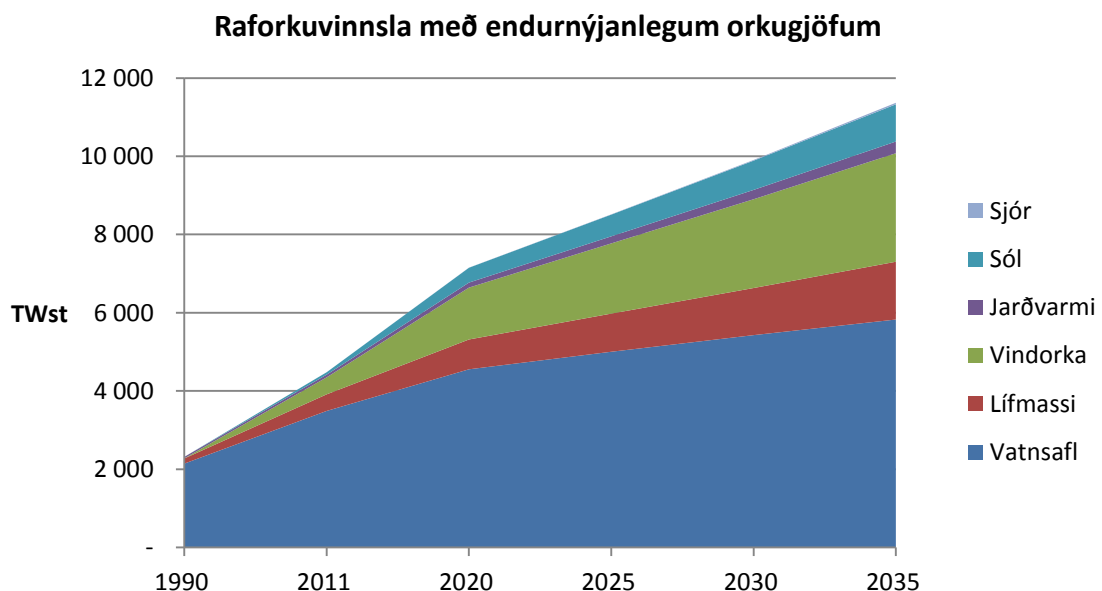
Mynd 12. Áætluð þróun raforkuvinnslu á heimsvísu (iea, 2013)

Mesta aukningin er sem fyrr segir í endurnýjanlegum orkugjöfum og þar eru mest áberandi vind- og sólarorka. Gert er ráð yfir að vatnsorkan standi í stað en jarðvarmaorka kemst varla á blað. Heildaruppsett afl er talið aukast frá um 5.000 GW í 10.000 GW árið 2035.



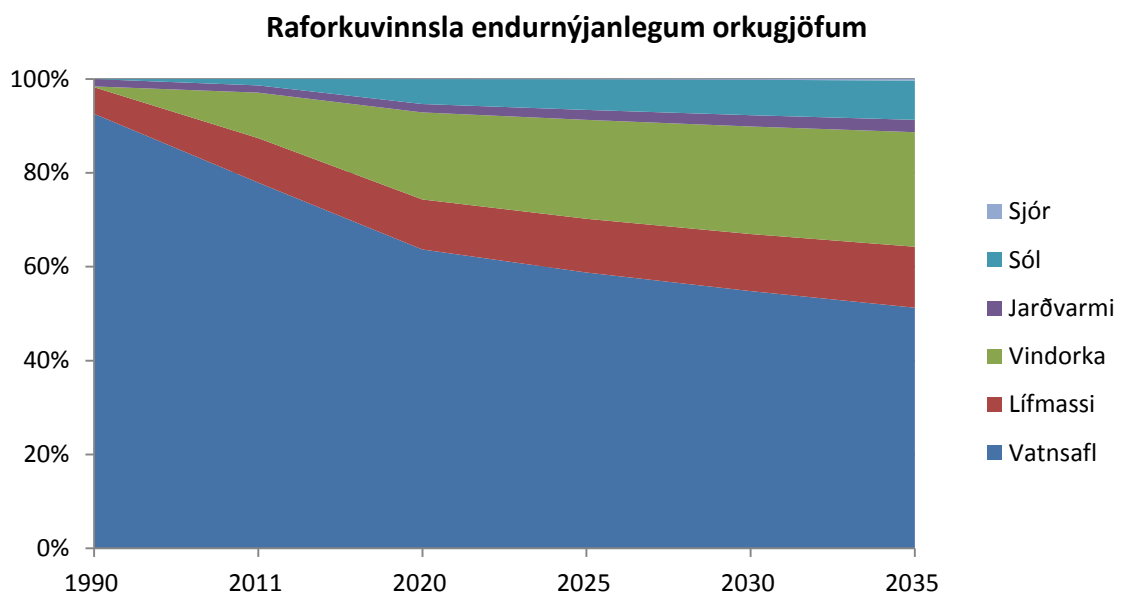
Mynd 13. Áætluð skipting raforkuvinnslu á heimsvísu eftir orkugjöfum (iea, 2013)

Á mynd 13 má sjá að hlutur endurnýjanlegra orkugjafa er talinn aukast úr um 20% í 30% (miðað við New Policy sviðsmynd) eða úr 5.500 TWst í tæpa 12.000 TWst (mynd 14). Vöxtur vind- og sólarorku er áberandi mestur en hlutur vatnsorku minnkar. Þannig er áætlað að raforka framleidd með vind- og sólarorku verði álíka mikil og raforka framleidd með vatnsorku 2035 eða 5-6.000 TWst.



Mynd 14. Áætluð raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013)

Í uppsettu afli fyrir endurnýjanlega orkugjafa fást svipaðar myndir en alls er gert ráð fyrir að uppsett afl aukist úr um 1.500 GW í um 4.000 GW árið 2035. Vöxtur vindorku og sólarorku mun áfram verða mikill. Í Þýskalandi og víðar í Evrópu hefur mikil áhersla verið á uppbyggingu vindorkugarða. Vöxtur í uppsettu afl í vindorku hefur verið ævintýrlegur og nemur nú heildaruppsett afl um 283 GW. Þar af eru Kína og Indland með stærstan hluta eða um 95 GW, Bandaríkin með 60 GW, Þýskaland 30 GW, Spánn 22 GW og Bretland með 8 GW. Aukning á árinu 2012 nam 45 GW þar sem Bandaríkin voru með 13 GW, Kína með svipað eða 12 GW og Þýskaland með 2 GW (GWEC, 2013). Áætlanir um enn frekari stórfellda aukningu raforkuframleiðslu með vindmyllum hafa verið gerðar og ljóst er að hlutur vindorku mun stóraukast.



Mynd 15. Skipting endurnýjanlegra orkugjafa (iea, 2013)

Lítill vöxtur í virkjun jarðvarma vekur athygli. Á meðan miklar vonir eru bundnar við aukna notkun hans hér á landi virðist sem vöxtur á alheimsvísu standi í stað. Í samhengi þá var aukning í uppsettu afli í vindorku í Bandaríkjunum einum meiri en heildar uppsett afl í jarðvarma á heimsvísu. Fyrir þessu geta verið all nokkrar ástæður sem nánar verður vikið að síðar.

Sífelld er verið að gera tilraunir og þróa nýja orkugjafa. Spennandi verður að fylgjast með þróun sjávarfalla- eða sjávarstraumsvirkjana en þróun þessarar tækni hefur verið afar hæg. Ekki er búist við því að sjávarorka verði virkjuð í stórum stíl í náinni framtíð en ljóst er að orkan er gríðarleg.

Kjarnorka er og verður áfram mikilvæg þrátt fyrir stór áföll sem fyrr segir. Athygli vekur nýleg ákvörðun breskra stjórnvalda að byggja nýtt kjarnorkuver í Bretlandi í samvinnu við Kína¹⁴. Þessi samningur kemur á óvart og er þvert á þróun annars staðar eins og í Þýskalandi þar sem ákvarðanir hafa verið teknar um að loka kjarnorkuverum. Þó hafa japönsk yfirvöld nýlega tilkynnt ákvörðun um opnum kjarnorkuvera vegna aukinnar orkuþarfar og mikils kostnaðar vegna innfluttra orkugjafa¹⁵. Þessi dæmi sýna að framtíðarþróun raforkuvinnslu er um margt óráðin og ekki er alveg einfalt að ná markmiðum um næga raforku, raforkuöryggi og samtímis ná metnaðarfullum markmiðum varðandi það að stemma stigu við vaxandi útblæstri gróðurhúsalofttegunda.

Mikil aukning vinnslu endurnýjanlegra orkugjafa hefur gert það að verkum að víða í Evrópu hefur þurft að stöðva tímabundið eða loka hefðbundnum orkuverum og jafnvel vatnsorkuverum sem eru þá notuð sem grunnorka. Þetta hefur leitt til þess að kostnaður við rekstur og stýringu raforkukerfa er flóknari og dýrari en áður. Mikill vöxtur í vind- og sólarorku þar sem framleiðslan er háð veðurfari að hluta krefst þess að ríki hafi aðgang að stýranlegum orkugjöfum. Þar kemur vatnsaflíð sterkt inn en það er þeim eiginleikum búið að þeirri orku er hægt að stýra. Því er ekki eins farið með kjarnorkuna og upp hafa komið tilvik þar sem orkan hefur beinlínis verið gefin eða jafnvel að fyrirtækjum hefur verið greitt fyrir að taka hana þar sem ekki hefur verið hægt að bregðast við í tíma til að takmarka framboð (iea, 2013).

Rannsóknir hafa verið í gangi með að nota Thorium í stað Uraníum eða Plutonium í kjarnorkuver (eia, 2013). Thorium hefur svipaða eiginleika nema mun minni geislavirkni og er því margfalt hættuminna efni. Rannsóknir eru nú gerðar meðal Kínverja, Indverja og Norðmanna með þessa tækni og verður fróðlegt að fylgjast með framvindu mála¹⁶.

Ekki er þó að sjá að veruleg breyting verði á möguleikum til raforkuvinnslu í náinni framtíð. Flestar spár benda til þessa að mesti vöxturinn verði áfram í vind- og sólarorku. Með betri tækni og minni kostnaði er samkeppnishæfni þessara orkugjafa sífellt að batna.

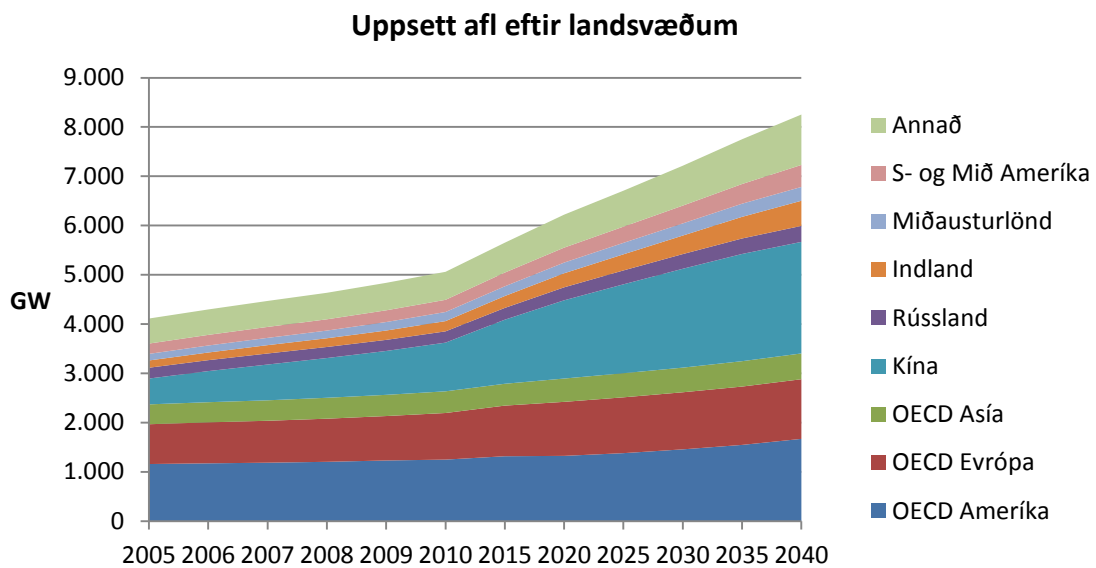
¹⁴ Sjá frétt BBC; <http://www.bbc.com/news/business-24604218>

¹⁵ Sjá nánar frétt Financial Times;

<http://www.ft.com/cms/s/0/3ee7c4f2-9dd6-11e3-83c5-00144feab7de.html#axzz2uo1U0ufX>

¹⁶ Sjá: <http://in.reuters.com/article/2013/12/20/us-breakout-thorium-global-idINBRE9BJORR20131220>

Vatnsafl mun áfram verða nýtt þar sem enn er nóg til af góðum virkjunarkostum eins og á Indlandi og í Brasilíu og að hluta í Bandaríkjunum. Þróun í vatnsaflsorku verður þó hægari þar sem víða er búið að virkja hagkvæmustu kostina svo sem í Evrópu. Ísland er hér undantekning þar sem talið er hagvæmt að virkja umtalsvert meira bæði í vatnsafl og jarðvarma. Þó eru auðvitað skiptar skoðanir um þetta þegar horft er til umhverfisáhrifa. Mesti vöxturinn verður í Kína þar sem gríðarleg eftirspurn er eftir orku þar sem mikil áhersla er á endurnýjanlega orkugjafa vegna vaxandi mengunar. Hlutur Evrópu og Bandaríkjanna lækkar á móti, að sumu leyti vegna orkusparandi aðgerða¹⁷.

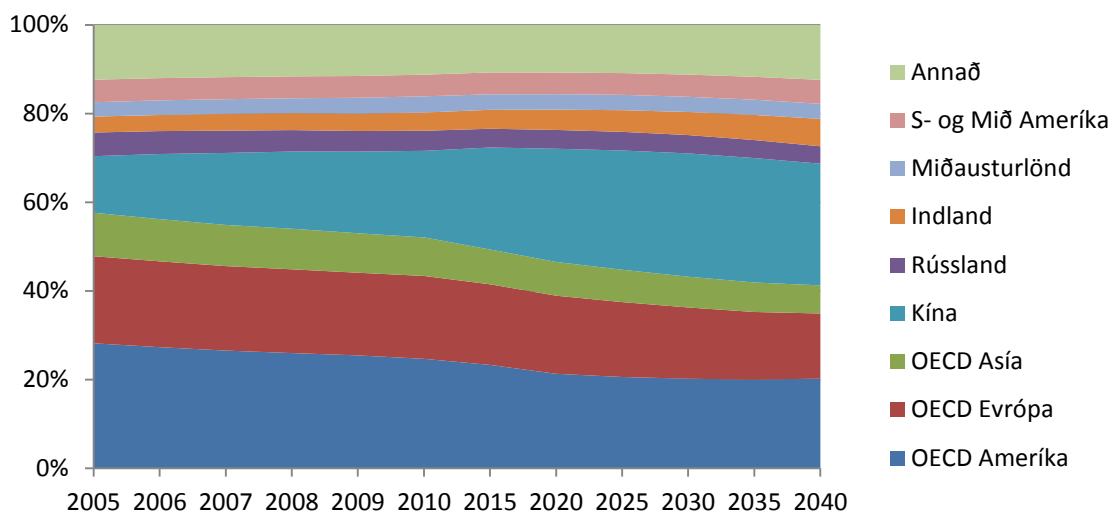


Mynd 16. Uppsett afl eftir löndum (eia, 2013)

Gert er ráð fyrir að uppsett afl í Kína tvöfaldist frá 2010 til 2040 og aukist úr 1.000 GW í um 2.300 GW sem er nálægt uppsettu afli í OECD hluta Evrópu og Bandaríkjunum til samans. Hlutur Kína í uppsettu afli hækkar að sama skapi úr um 15% í 30% á sama tímabili.

¹⁷ U.S. Energy Information Administration (eia), International Energy Statistics database, Nov. 2012

Uppsett afl eftir landsvæðum



Mynd 17. Skipting uppsetts afls eftir löndum (eia, 2013)

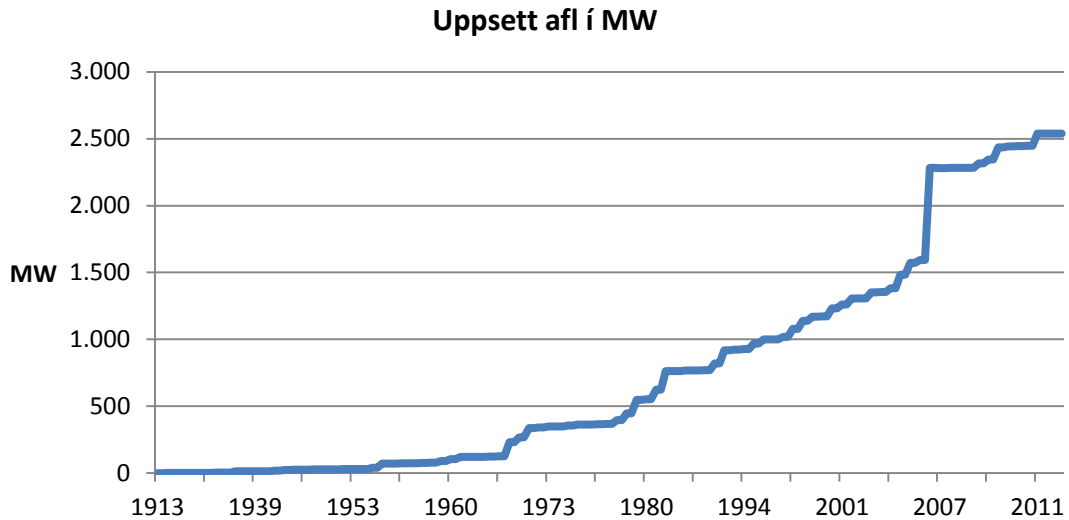
3.2 Ísland

Á meðan flest iðnríki keppast nú við að leysa hefðbundna mengandi orkugjafa af hólmi með endurnýjanlegum orkugjöfum standa Íslendingar frammi fyrir því að ákveða hvort nýta eigi endurnýjanlega orkugjafa til frekari raforkuvinnslu fyrst og fremst til að skapa aukin verðmæti fyrir þjóðina. Raforkuvinnsla er nú langt umfram almennar þarfir og aukin nýting verður einungis gerð í gegnum aukna raforkusölu til orkufreks iðnaðar eða til útflutnings um sæstreng.

Hér á landi er nær öll raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum, vatnsafli að langstærstum hluta og síðan jarðvarma á seinni árum. Vindorka er eins og kunnugt er aðeins til skoðunar hjá Landsvirkjun. Vegna smæðar íslenska raforkumarkaðarins verður notast við MW í uppsettu afli og GWst í raforkuvinnslu í stað TW og TWst í fyrri kafla.

3.2.1 Þróun

Á Íslandi var raforkuvinnsla svo til eingöngu með vatnsafli til að byrja með. Elstu vatnsafsvirkjanirnar eru frá því fyrir 1940 og flestar eldri virkjanir eru enn í fullri notkun. Til að byrja með voru eingöngu byggðar vatnsafsvirkjanir en árið 1969 var jarðvarmavirkjun byggð við Námafjall, nú síðar Bjarnarflagsvirkjun. Árið 1977 var fyrsta virkjun við Svartsengi tekin í rekstur og 30 MW Kröfluvirkju sama ár.

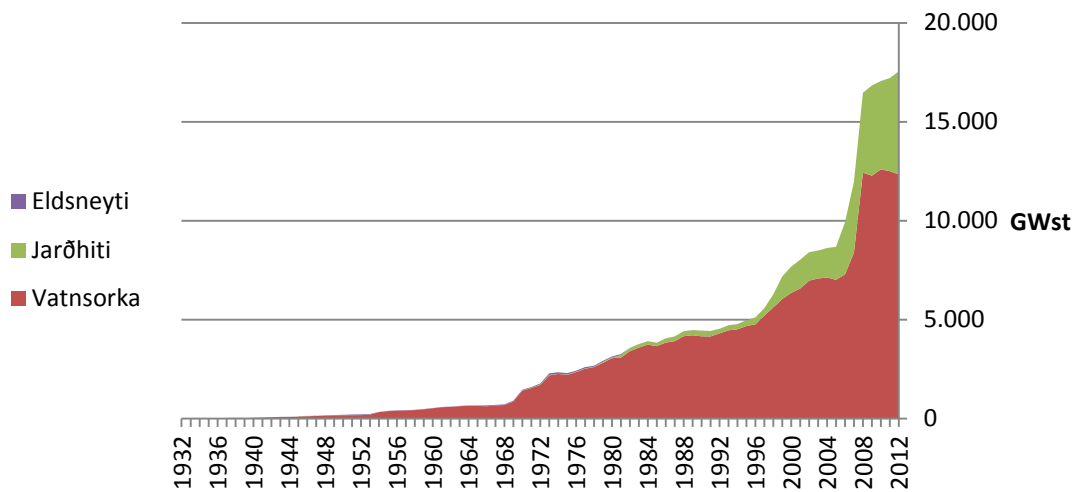


Mynd 18. Uppsett afl á Íslandi til raforkuvinnslu (Orkustofnun, e.d.b)

Á mynd 18 má sjá hægfara aukningu í uppsettu afli framan af en síðan stöðuga aukningu uppsetts afli frá því um 1980 og síðan hina miklu aukningu sem varð með tilkomu Kárahnjúkavirkjunar og virkjana á Hellisheiði og við Svartsengi eftir 2005. Nýjasta vatnsaflsvirkjun Landsvirkjunar var gangsett þann 7. mars 2014 og er sú 6. í röð vatnsaflsvirkjana á Þjórsár- Tungnaárvæðinu og sextánda aflstöð fyrirtækisins.

Raforkuvinnsla hefur að sama skapi aukist mikið og á mynd 19 má sjá þróun raforkuvinnslu frá því um 1930. Vatnsorka er ráðandi fram til um 1980 þegar hlutur jarðvarmavirkjana fer að aukast. Sjá má að raforkuvinnsla mælist varla fyrr en með tilkomu vatnsaflsvirkjana á Sogsvæðinu upp úr um 1950. Vatnsorka er nánast allsráðandi til um 1980 þegar fyrstu jarðvarmavirkjanirnar koma í rekstur (Orkustofnun, e.d.a,b og c).

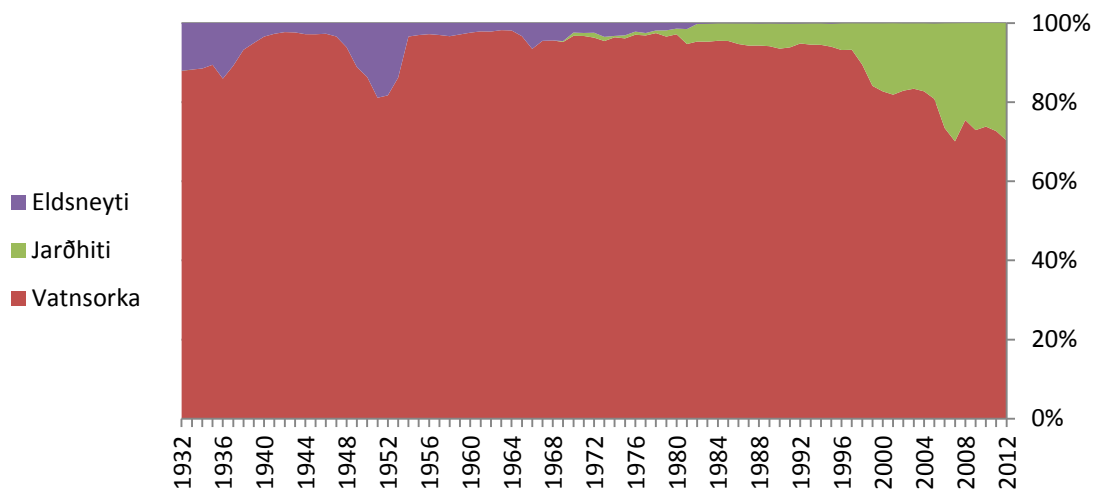
Raforkuvinnsla eftir uppruna á Íslandi



Mynd 19. Þróun raforkuvinnslu á Íslandi (Orkustofun, e.d.b)

Hluttur jarðefnaeldsneytis var fyrir fyrir þennan tíma lítill og hverfur nánast með öllu um 1980 og er þá nánast eingöngu notað sem varaafli.

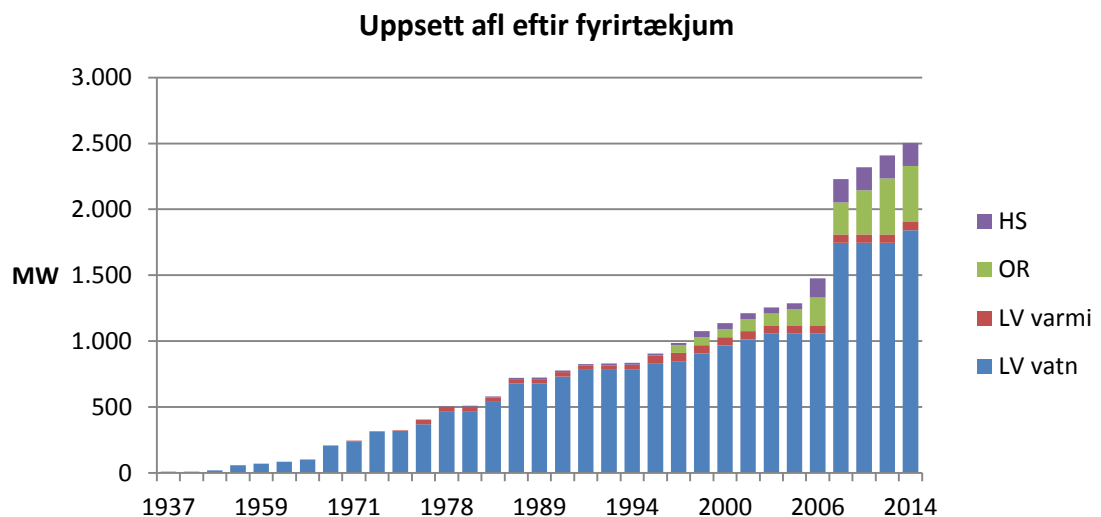
Skipting raforkuvinnslu eftir uppruna á Íslandi



Mynd 20. Skipting raforkuvinnslu eftir orkugjöfum (Orkustofnun, e.d.b)

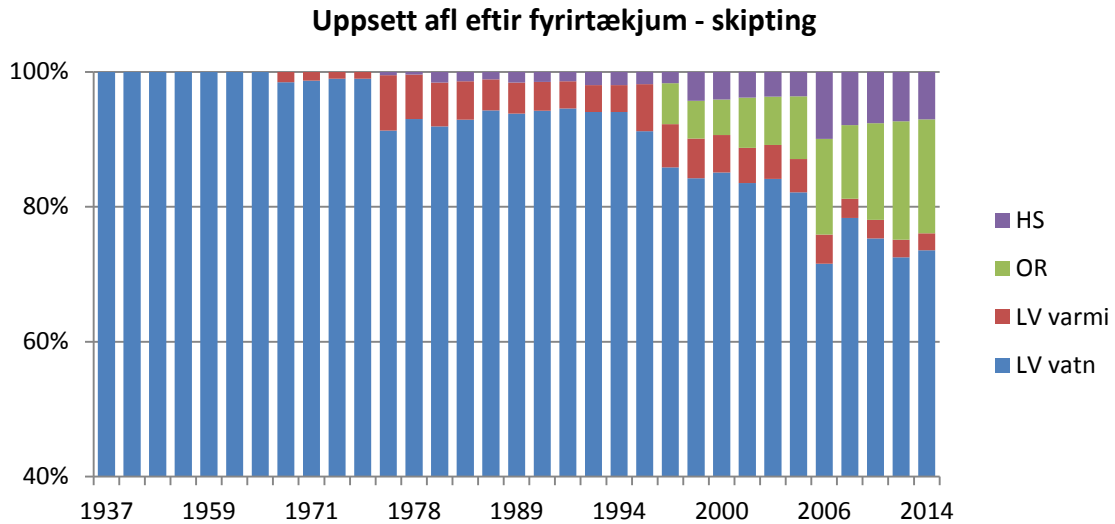
Sjá má að hluttur vatnsafls lækkar jafnt og þétt frá því um 1980 og er nú um 70% af raforkuvinnslunni. Raforkuvinnsla með jarðvarma hefur að sama skapi aukist stöðugt, sérstaklega frá og með stækkun Kröfluvirkjunar 1996 og með tilkomu Nesjavallavirkjunar 1998. Síðan þá hefur Orkuveita Reykjavíkur bætt við Nesjavallavirkjun og byggt virkjanir á Hellisheiði og HS Orka bætt við í Svartsengi.

Áður fyrr voru jarðvarmavirkjanir Orkuveitunnar og HS Orku svo til eingöngu til að ná heitu vatni sem fór aðallega til húshitunar á höfuðborgarsvæðinu og á Suðurnesjum. Með samningum um raforkusölu til stóriðju, einkum til Norðuráls, hefur Orkuveitan og HS Orka virkjað jarðvarma til raforkuvinnslu. Frá 1998 hefur uppsett afl Orkuveitu Reykjavíkur aukist um 423 MW og hjá HS Orku um 160 MW. Á mynd 21 má sjá uppsett afl þessara þriggja orkufyrirtækja (öðrum minni aðilum er sleppt). Upplýsingum um framleiðslu Landsvirkjunar er skipt upp eftir vatnsafl og jarðvarma. Þá má sjá stöðuga aukningu frá 1995 þegar bæði Norðurál og stækkun Alcan álversins urðu að veruleika. Kárahnjúkavirkjun kemur svo árið 2007 með sín 690 MW sem er svipuð tala og samtals hjá Orkuveitu Reykjavíkur og HS Orku frá 1998 (Orkuveita Reykjavíkur [OR], e.d.; HS Orka, e.d.; Orkustofnun, e.d.a,b og c).



Mynd 21. Uppsett afl eftir fyrirtækjum (Orkustofnun, 2013 eða e.d.b)

Á mynd 22 sést markaðshlutdeild orkufyrirtækjanna vel og þar má sjá að hlutur Landsvirkjunar hefur minnkað jafnt og þétt frá því þegar hin tvö fyrirtækin hófu sölu á raforku til stóriðju. Fyrir þann tíma var hlutur Landsvirkjunar um og yfir 95% en er nú um 75%.



Mynd 22. Hlutfallsleg skipting uppsetts afls eftir fyrirtækjum (Orkustofnun, 2013 eða e.d.b)

3.2.2 Horfur

Frekari uppbygging og aukning raforkuvinnslu á Íslandi er háð því hvernig tekst til að selja orkuna. Aukning til heimila og almenns iðnaðar er frekar lítil og nægir núverandi orka til að anna almennri eftirspurn næstu ára (Orkustofnun, 2013). Sala til nýrra stórnotenda hér á landi eða erlendis um sæstreng er því skilyrði fyrir því að frekari virkjunarframkvæmdir eigi sér stað á næstu árum. Landsvirkjun hefur í því skyni verið með nokkra virkjunarkosti í undirbúningi og má þar nefna jarðvarmavirkjanir á NA-landi og vatnsaflsvirkjanir í neðri hluta Þjórsár. Jafnframt hefur fyrirtækið kortlagt virkjunarkosti með vindorku á nokkrum stöðum á landinu.

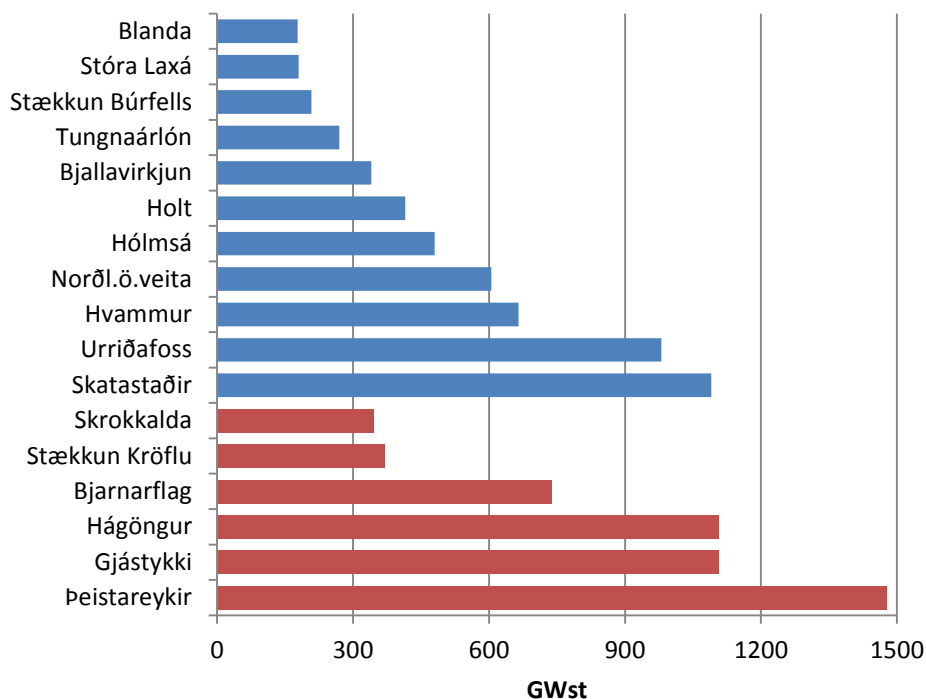
Aðrir orkugjafar hafa ekki verið til alvarlegar skoðunar en þar má nefna sjávarfalla- eða sjávarstraumavirkjanir. Líkt og erlendis hefur þróun með þessa kosti verið afar hæg vegna ýmissa vandamála og mikils kostnaðar og verða ekki til frekari umfjöllunar í þessari ritgerð.

Viðbúið er að vatnsaflsvirkjanir verði áfram besti og hagkvæmasti kosturinn við rafmagnsframleiðslu á Íslandi. Þrátt fyrir að búið sé að virkja um 2.000 MW í vatnsaflri væri hægt að virkja um 600 MW til viðbótar miðað við þá virkjunarkosti sem Landsvirkjun er með til athugunar en auðvitað með fyrirvara um niðurstöðu

Rammaáætlunar¹⁸. Þar fyrir utan er hægt að endurbæta núverandi virkjanir og stækka þær til að ná meira afli eða orku.

Jarðvarmavirkjanir hafa reynst nokkuð vel hér á landi, sérstaklega þegar um er að ræða samhliða nýtingu til húshitunar, jarðgufu til iðnaðar og síðan raforkuvinnslu. Skiptar skoðanir hafa hins vegar verið með raforkuvinnsluna eina og sér en nánar verður fjallað um það hér á eftir. Alls er áætlað að hægt sé að virkja álíka afl eða um 600 MW með jarðvarma. Á heimasíðu Landsvirkjunar má sjá nokkra af þeim virkjunarkostum í vatnsafli og jarðvarma sem kemur til greina að virkja á komandi árum¹⁹.

Aflstöðvar í athugun hjá Landsvirkjun og möguleg orkuvinnsla



Mynd 23. Uppsett afl nokkurra virkjunarkosta í vatnsafli og jarðvarma (Landsvirkjun, e.d.d)

Alls er Landsvirkjun með ellefu vatnsafli og sex jarðvarmakosti á teikniborðinu. Samtals er um að ræða um 1.200 MW í uppsettu afli og 10-11.000 GWst af orku sem skiptist til helminga í vatnsafli og jarðvarma. Þetta samsvarar um 60% af núverandi uppsettu afli og um 75% af raforkuvinnslu fyrirtækisins. Á heimsvísu eru þetta ekki

¹⁸ Sjá nánar á <http://www.rammaaaetlun.is/>

¹⁹ Nokkrir virkjunarkostir: <http://www.landsvirkjun.is/Rannsoknirogthroun/Virkjunarkostir/>

stórar tölur en eins og fram hefur komið var aukning í uppsettu afli endurnýjanlegra orkugjafa í heiminum á einu ári um 100 GW sem jafngildir 100.000 MW. Það er allt að því 100 sinnum meira en uppsett afl þótt allir kostir Landsvirkjunar næðu fram að ganga. Í jarðvarmanum kemst Ísland þó á blað þar sem hér er búið að virkja um 600 MW til raforkuvinnslu með jarðvarma og auðvitað mun meira ef húshitun er tekin með en uppsett afl á heimsvísu er talið nema um 11 GW eða 11.000 MW (iea, 2013; Íslandsbanki, 2012).

Spennandi verður að sjá árangur af rekstri Landsvirkjunar á þessum tveimur vindmyllum sem upp hafa verið settar. Það sem af er lofar reksturinn góðu, nýting hefur verið umfram væntingar eða um og yfir 40% frá uppsetningu þeirra í janúar 2013 (Landsvirkjun, e.d.d). Landsvirkjun vinnur nú að kortlagningu og frekari rannsóknum á aðstæðum á Hafinu svokallaða ofan Búrfellsvirkjunar. Þar eru uppi hugmyndir um vindmyllugarð þar sem áætlanir benda til þess að koma mætti fyrir vindmyllum þar sem uppsett afl gæti numið nokkrum hundruðum MW²⁰. Fátt bendir til annars en að vindorka geti verið fýsilegur kostur til raforkuvinnslu hér á landi líkt og verið hefur erlendis. Nánar um það síðar.

²⁰ Sjá <http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/throunarverkefni/vindmyllur>

4 Vatnsorka, jarðvarmi og vindorka

Í þessum kafla verða þremur endurnýjanlegum orkugjöfum gerð nánari skil en það eru þeir orkugjafar sem Ísland er auðugt af. Aðrir orkugjafar verða ekki til frekari umfjöllunar en eins og áður hefur komið fram er virkjun sólarorku á mikilli uppleið erlendis líkt og vindorkan.

4.1 Vatnsorka

Virkjun vatnsfalla er ein elsta aðferð við framleiðslu raforku sem vitað er um. Elstu heimildir um tilraunir manna til að nota vatnsföll til ýmissa nota má rekja árbúsundir aftur í tímann. Til raforkuvinnslu má segja að Frakkar hafi orðið einna fyrstir til að nota vatnsföll til raforkuvinnslu og er þar nefndur til sögunnar Bernard Forest de Bélidor. Þróunin hélt stöðugt áfram og árið 1882 var fyrsta vatnsaflsvirkjunin tekin í rekstur í Fox River í Wisconsin í Bandaríkjunum²¹.



Mynd 24. Búrfellsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c)

²¹ Sjá US Department of Energy (<http://energy.gov/eere/water/history-hydropower>)

4.1.1 Yfirlit

Aðferðin við virkjun vatnsfalla er í sjálfu sér einföld og hefur ekki mikið breyst mikið á þessum u.þ.b. 130 árum frá gangsetningu fyrstu virkjunarinnar. Vatn er leitt í göngum að túrbínnum sem snúa öxli sem síðan knýr hverfla sem framleiða rafmagn. Afl virkjana fer eftir vatnsmagni og fallhæð. Einn mesti kosturinn við vatnsaflsvirkjanir er sá að afl og orku má reikna nokkuð örugglega fyrirfram þar sem virkjun er hönnuð með ákveðið vatnsmagn og fallhæð í huga. Áætla má vatnsmagn út frá mælingum á rennsli, úrkomu og leysingum (ef um jökulár er að ræða) undanfarinna ára og fá þannig nokkuð góðar líkur á reiknuðu vatnsmagni næstu ára. Þetta er ekki raunin þegar kemur t.d. að jarðvarmavirkjunum þar sem veruleg áhætta er tengd því hversu mikla orku er unnt að ná á ákveðnu svæði. Vindmylla framleiðir þegar vindurinn blæs en miðað við fyrirliggjandi vindmælingar má áætla með nokkurri vissu hvers má vænta. Meira um það síðar.

Þótt aðferð við virkjun vatnsfalla hafi í raun ekki breyst að ráði í aldanna rás hefur tækninni fleygt fram, einkum er kemur að hönnun og framleiðslu vél- og rafbúnaðar. Þá hefur sjálfvirkni aukist í stýringum sem gerir allan rekstur hagkvæmari. Þannig eru nýjar virkjanir alla jafna hagkvæmari og öruggari í rekstri en þær sem eldri eru. Eldri virkjanir hafa hins vegar reynst afar vel og nokkuð auðveldlega má skipta út rafbúnaði og hluta vélbúnaðar líkt og gert hefur verið hjá Landsvirkjun.

Elstu virkjanir Landsvirkjunar starfa enn sem nýjar þrátt fyrir að vera löngu afskrifaðar. Dæmi um það eru Sogsvirkjanir sem í dag framleiða sem nýjar væru þótt þær séu meira hálftrar aldar gamlar. Búrfellsvirkjun er rétt um 50 ára gömul og framleiðir nú mesta orku miðað við uppsett afl af öllum virkjunum Landsvirkjunar.



Mynd 25. Írafossstöð (Landsvirkjun, e.d.c)

En vatnsaflsvirkjun snýst ekki bara um byggingu stöðvarhúss og uppsetningu vél- og rafbúnaðar. Við hönnun og byggingu vatnsaflsvirkjana er tekið tillit til margra þátta sem hafa áhrif á hvernig virkjunin kemur til með að líta út. Bygging Kárahnjúkavirkjunar er t.d. engan vegin sambærileg við byggingu Búðarhálsvirkjunar svo dæmi séu tekin. Fyrir utan stærð og umfang eru þessar virkjanir ágætt dæmi um hversu ólík þessi mannvirki eru að allri gerð þótt þær byggi í grunninn á sömu lögmálum (Landsvirkjun, e.d.c; IRENA, 2012).

Kárahnjúkavirkjun er byggð á nýju svæði á meðan Búðarhálsvirkjun er byggð á þegar virkjuðu svæði í röð annarra virkjana. Virkjunin við Kárahnjúka er dæmi um afar flókna framkvæmd þar sem saman fer mikil gangagerð og stíflumannvirki. Þá er virkjunin reist á svæði þar sem vetrarhörkur ríkja og öll byggingavinna því mun erfiðari. Alls voru boruð og sprengd um 70 km aðrennslisgöng þar sem vatn frá Jökulsá á Brú og Jökulsá í Fljótsdal er leitt til stöðvarhúss virkjunarinnar sem er neðanjarðar. Fallhæð er ein sú mesta sem um getur í heiminum eða um 400 m. Alls eru sex vélasamstæður í virkjuninni

að afli um 115 MW hver. Stíflumannvirkin eru á meðal þeirra umfangsmestu í Evrópu og er Kárahnjúkastífla meðal þeirra stærstu í heimi af sömu gerð²².

Búðarhálsvirkjun er mun einfaldari, umfangsminni og hefðbundnari framkvæmd á íslenskan mælikvarða. Afrennsli Hrauneyjafossvirkjunar, þar sem Tungnaá er beisluð, er ásamt Köldukvísl leitt í um 4 km löngum aðrennslisgöngum gegnum Búðarháls að stöðvarhúsinu sem er ofanjarðar. Vatnið er leitt í fallpípum um 40 m fallhæð í gegnum tvær vélasamstæður og þaðan út í Sultartangalón.



Mynd 26. Búðarhálsstöð (Landsvirkjun, e.d.c)

Vatnsaflsvirkjanir geta því verið afar ólíkar að allri gerð þar sem mismunandi staðsetning, jarðfræði og vatnasvið hafa mikil áhrif. Stærð uppistöðulóna, stíflugerð, jarðgöng, fallhæð og hönnun stöðvarhúsa eru mismunandi. Þannig er ljóst að stofnkostnaður getur verið á nokkuð breiðu bili. Þá skiptir auðvitað máli hvort um er að ræða nýja virkjun á nýju svæði eða stækkun eða breytingu á eldri virkjun.

Umhverfisáhrif geta verið veruleg eins og í tilfalli Kárahnjúkavirkjunar en líka mun minni og ásættanlegri eins og við gerð Búðarhálsvirkjunar. Stofnkostnaður við byggingu vatnsaflsvirkjana er yfirleitt hár en rekstrarkostnaður lágur. Mannvirki eru þekkt fyrir að

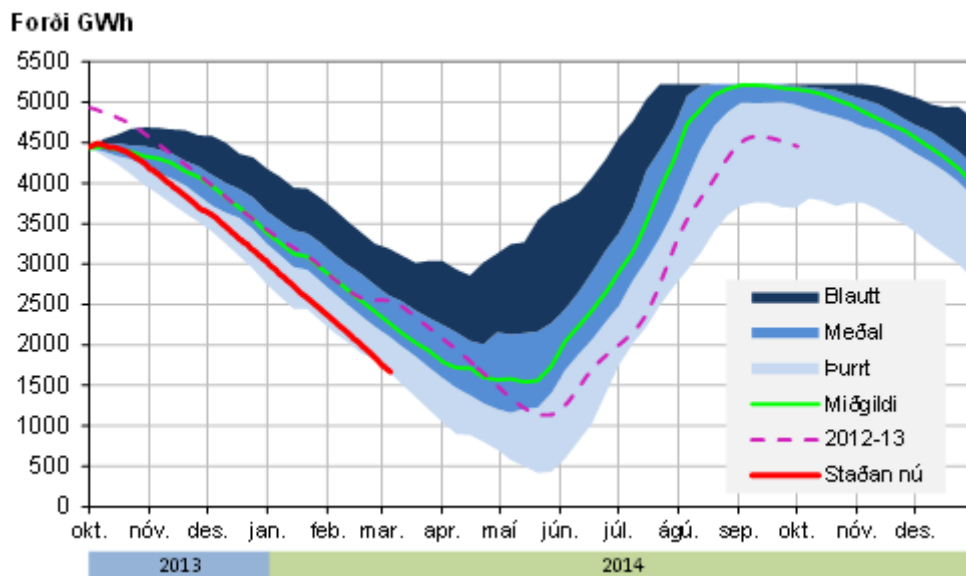
²²Sjá http://www.landsvirkjun.is/Fyrirtaekid/Fjolmidlatorg/Frettir/Frett/857_/

endast lengi og gjarnan er miðað við 40 ára afskriftrartíma að meðaltali. Byggingartími er mismunandi við nýjar virkjanir, hér á landi hefur hann verið 4-6 ár en erlendis eru dæmi um mun lengri tíma (IRENA, 2012). Vatnsaflsvirkjanir krefjast verulegs undirbúnings við rannsóknir á landi, vatnasviðum, jarðfræði, plöntu- og dýralífi og miklar kröfur eru gerðar til umhverfismats.

Vatnsaflsvirkjanir þurfa mikinn undirbúning og vandaða rannsóknarvinnu. Hefðbundin virkjun hefur því oftast nær talsverð umhverfisáhrif þar sem land fer undir vatn og fossar í ám geta horfið eða orðið vatnslitlir. Virkjun getur haft áhrif á dýralíf, bæði í vatni og á landi. Vatnsaflsvirkjanir eru oft við eða nálægt ferðamannastöðum og því þarf að vanda vel til áður en ákvörðun er tekin um framkvæmd.

Þótt óvissu með vatnsmagn og rennsli sé hægt að takmarka með góðum rannsóknum sanna dæmin undantekninguna og upp geta komið ár sem eru úr takti við söguna. Sem dæmi má nefna tvö léleg vatnsár í röð sem Landsvirkjun glímdi við á árunum 2013 og 2014²³. Á fyrstu árum 21. aldar hefur veðurfar almennt farið hlýnandi með meiri jöklabráðnun og þar af leiðandi meira vatnsmagni jökuláa. Því var búist við meiri orku úr raforkukerfi Landsvirkjunar. Tíðarfar árána 2012 og 2013 kom því á óvart þar sem tvö léleg vatnsár komu í röð í kjölfar góðra vatnsára. Afleiðing þess var að Landsvirkjun þurfti að grípa til skerðinga á orkuafhendingu tvö ár í röð með tilheyrandi tekjutapi fyrir fyrirtækið og viðskiptavinum þess.

²³ Sjá <http://www.landsvirkjun.is/fyrirtaekid/fjolmidlateg/frettir/frett/ovenjulitid-innrennsli-in-og-hagstaett-tarfar>

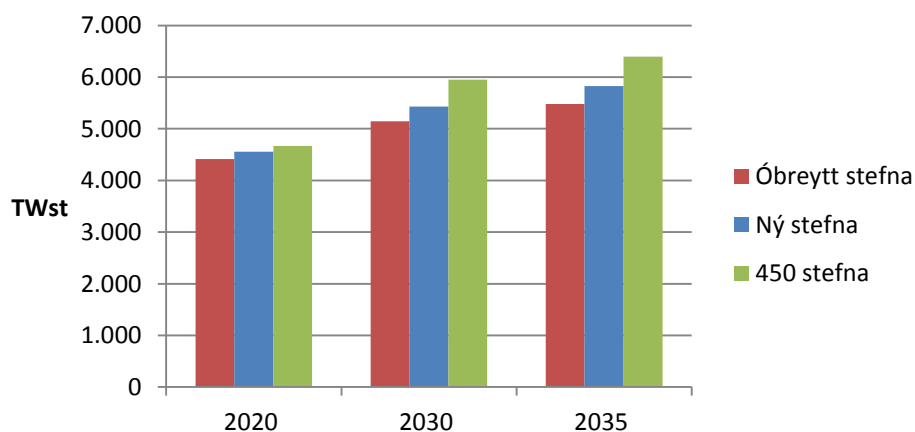


Mynd 27. Miðlunarforði Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.b)

4.1.2 Þróun

Ef hinar þrjár sviðsmyndir sem ræddar voru í kafla 3 eru skoðaðar fyrir vatnsafl er um aukningu að ræða eftir sviðsmyndunum, en minni en ætla mætti. Ekki er ýkjamikill munur á sviðsmyndum og er skýringin sú að þegar er búið að virkja hagkvæmstu kostina, a.m.k. í Evrópu og að hluta til í BNA (iea, 2013).

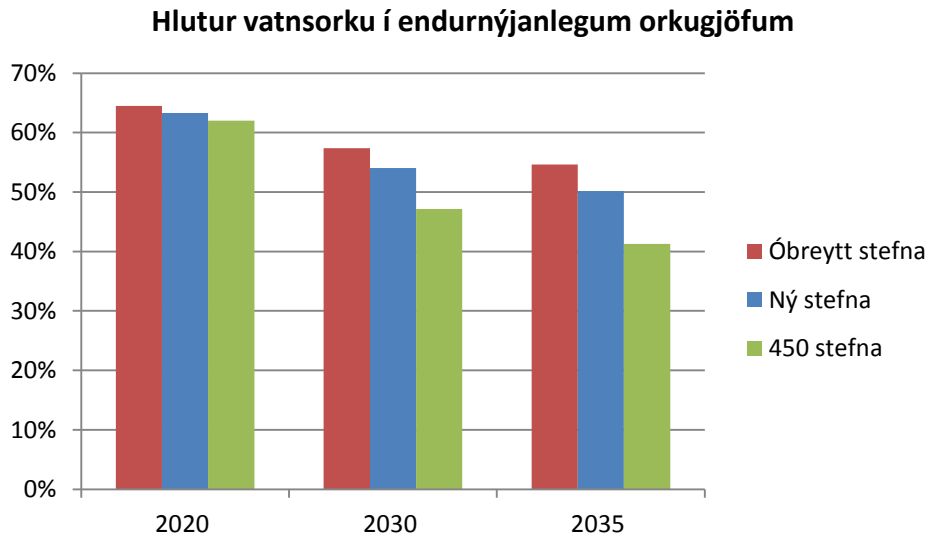
Áætluð raforkuvinnsla með vatnsorku eftir sviðsmyndum



Mynd 28. Aukning raforkuvinnslu með vatnsaflum eftir sviðsmyndum (iea, 2013)

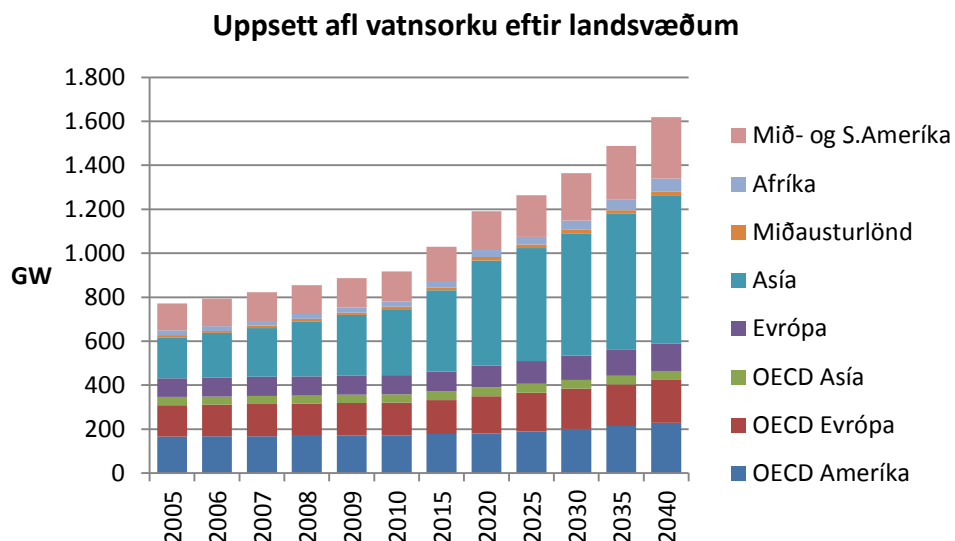
Tiltölulega lítill munur er á sviðsmyndum, aukningin vex til 2030 en síðan er gert ráð fyrir að það dragi heldur úr henni. Þegar svo hlutfall vatnsorku af raforkuvinnslu með

endurnýjanlegum orkugjöfum er skoðað má sjá að hlutfallið fer ört minnkandi og minnkar hraðar eftir því sem strangari markmið eru sett (450 sviðsmynd). Skýringin er sú að aðrir endurnýjanlegir orkugjafar vaxa mun hraðar. Hlutfallið lækkar úr um 80% í rúm 50% miðað við óbreytt ástand en allt niður í 40% í 450 sviðsmyndinni.



Mynd 29. Hlutfall raforkuvinnslu með vatnsorku í endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013)

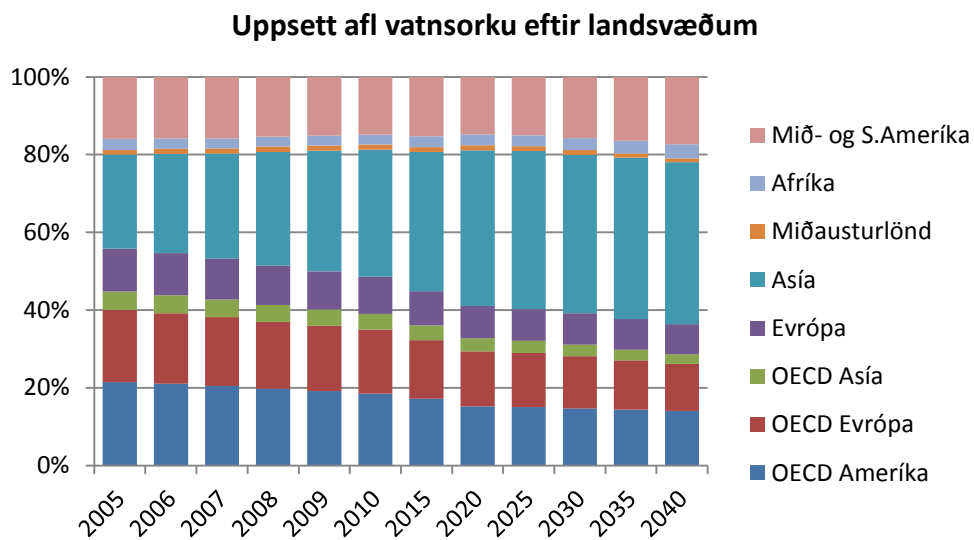
Vatnsorkumannvirki eru allvíða í heiminum en raforkuvinnslan hefur löngum verið mest í Norður- og Suður Ameríku, Evrópu og Kína.



Mynd 30. Uppsett afl vatnsafsvirkjana eftir landsvæðum (eia, 2013)

Asíuríkin, Kína og Indland hafa þó stöðugt verið að auka raforkuvinnslu með vatnsafli og reiknað er með að mesta aukningin eigi sér stað á þeim slóðum. Frá 2005 er áætlað

að uppsett afl muni tvöfaldast og fari úr um 800 GW í 1.600 GW um 2040. Virkjun vatnsafls hefur um árabil verið inn einn besti kosturinn til raforkuvinnslu og hefur verið um 80% af allri endurnýjanlegri orku heimsins eins og fyrr segir. Auknar kröfur til umhverfisverndunar hafa þó gert það að verkum að víða hafa bestu kostirnir þegar verið virkjaðir og þó næg vatnsföll séu til staðar hafa mörg ríki, sérstaklega í Evrópu, staldrað við (eia, 2013; IRENA, 2012). Dæmi um það er Noregur þar sem aukning í nýtingu vatnsafls hefur átt erfitt uppdráttar vegna umhverfissjónarmiða. Líklegt er að framleiðsla í OECD löndum vaxi hægt þar sem víða er búið að virkja hagkvæmstu kostina. Í Kína er búið við aukningu, sem og Indlandi og Brasilíu þar sem enn er hægt að virkja verulegt magn.

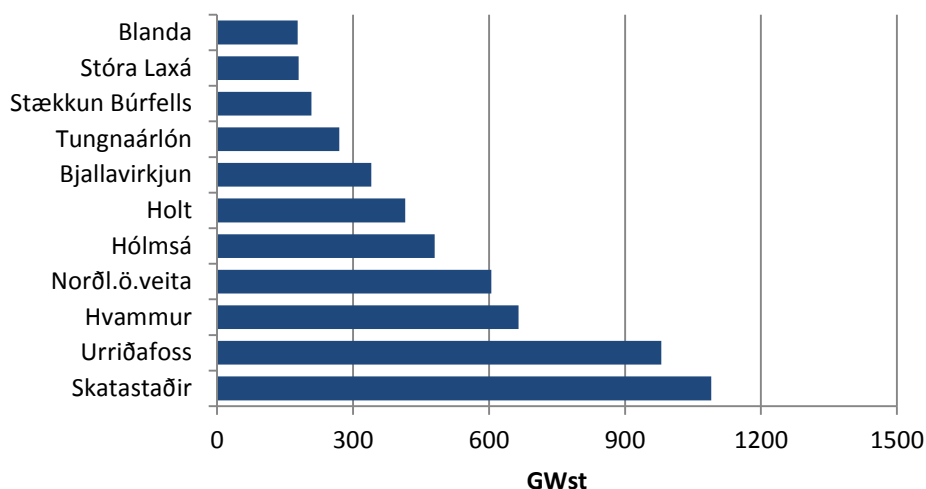


Mynd 31. Skipting uppsetts vatnsafls eftir landsvæðum (eia, 2013)

Sem fyrr segir hefur aðferðafræði við virkjun vatnsafls ekki breyst mikið á síðustu árum en tæknipróun í vél- og rafbúnaði miðar einkum að því að auka nýtni. Þannig má með minna vatni ná meiri orku eða afli úr virkjuninni og þar með lækkar kostnaðurinn á framleidda einingu.

Á Íslandi er uppsett afl um 2 GW í vatnsafl til samanburðar en gert er ráð fyrir að það megi auka verulega. Sem fyrr segir er Landsvirkjun með allmarga kosti til skoðunar sem eru samtals um 600 MW í afli og um 5 TWst í orku. Þessir staðir eru flestir á suðurhluta landsins þar sem hægt er að koma við fleiri virkjunum í neðri hluta Þjórsár.

Aflstöðvar í athugun hjá Landsvirkjun og möguleg orkuvinnsla



Mynd 32. Vatnsaflstöðvar í athugun hjá Landsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.d)

Sem fyrr segir eru sumir þessara orkukosta enn í biðflokki Rammaáætlunar²⁴ og nokkrir það umdeildir (Norðlingaölduveita) að ekki er víst hvort eða hvenær þeir komi til framkvæmda. Aðrir áhugaverðir kostir sem Landsvirkjun er með til skoðunar er að auka afl og orku þeirra virkjana sem fyrir eru eða eru á sama svæði. Það eru yfirleitt ódýrari kostir auk þess sem umhverfisáhrif eru eðlilega lítil.

4.2 Jarðvarmaorka

Virkjun jarðvarma á heimsvísu telst lítil í samanburði við aðra endurnýjanlega orkugjafa en á Íslandi er annað uppi á teningnum. Hér á landi hefur hlutur jarðvarmaorku verið allsráðandi við húshitun auk þess að framleiða um 30% af raforku landsmanna. Virkjun jarðvarmaorku á sér ekki eins langa sögu og virkjun fallvatna. Talið er að Ítalinn Prince Piero Conti hafi verið fyrstur manna til að nota jarðhita til raforkuvinnslu árið 1904 í Larderello á Ítalíu²⁵. Seinna, eða árið 1911, var fyrsta jarðvarmavirkjunin byggð á sama stað og voru Ítalir í forystu til að nota jarðvarma til rafmagnsframleiðslu allt til ársins 1958. Eftir það hafa verið byggð jarðvarmaorkuver all víða, t.d. í Californíu, Japan, Nýja Sjálandi og að ógleymdu Íslandi.

²⁴ Sjá <http://www.rammaaetlun.is/>

²⁵ Sjá t.d. http://www.enelgreenpower.com/enGB/plants/renewable_energy/geothermal ; http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_energy#History;



Mynd 33. Bjarnarflagsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c)

4.2.1 Yfirlit

Hér á landi hefur ríkt mikil framsýni við nýtingu jarðvarma, sérstaklega til húshitunar með nýtingu jarðvarmans á Nesjavöllum og Hellisheiði til húshitunar á Reykjavíkursvæðinu. Skiptar skoðanir eru um nýtingu jarðvarma til raforkuvinnslu eingöngu, þar sem aðeins lítt hluti orkunnar er nýttur. Annað er uppi á teningnum þegar um samþætta nýtingu er að ræða, s.s. til húshitunar, garðyrkju, efnaiðnaðar, þurrkunar og fleira í þeim dúr.

Nýting jarðvarma krefst mikils undirbúnings- og rannsóknarvinnu við að finna út og meta hvar er best að bera niður í von um að fá sem mesta orku með minnstum tilkostnaði. Tilraunaboranir eru dýrar og umfangsmiklar og ekki er vitað fyrirfram hve margar holur þarf að bora né heldur hvað þær skila mikilli orku. Orka sem fæst úr hverri holu er mismunandi og eru bestu holurnar að skila um 5-10 MW orku (Landsvirkjun, e.d.d; OR, e.d.). Dæmigerðar vélæiningar eru um 50 MW og þarf þá 5-10 holur fyrir hverja vél. Gufan er nýtt til að knýja túrbínur sem síðan knýja hverfla sem framleiða rafmagn. Líkt og með vatnsaflsvirkjanir er tæknin nokkuð hefðbundin og hefur ekki breyst mikið í árána rás.



Mynd 34. Kröfluvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c)

Ólíkt vatnsaflí þar sem orkan er fyrirfram þekkt með talsverðu öryggi er ekki hægt að ganga að jarðhitasvæðum og áætla orkumagn með öruggum hætti í upphafi, nema að undangengnum tilraunaborunum. Þannig þarf að verja töluverðum fjármunum í dýrar rannsóknir áður en hægt er að segja til um líkur á orkumagni. Þá er heldur ekki vitað hversu lengi holurnar endast og þær geta skemmst við jarðhræringar á svæðinu sem oftast eru töluvert virk. Algeng viðmið eru að afkastageta borhola rýrni um 2-3% á ári eins og fram kom í samtölum við viðmælendur höfundar við starfsmenn Landsvirkjmunar og ráðgjafa.

Hér á landi hafa vaxandi áhyggjur af umhverfismálum og strangari kröfur um mengunarvarnir gert það að verkum að menn hafa aðeins staldrað við virkjun jarðvarma til raforkuvinnslu í stórum stíl. Með vaxandi raforkuvinnslu á Hellisheiði hefur orðið vart við aukinn styrk brennisteinsvetnis sem þegar hefur farið yfir leyfileg mörk samanber frétt á mbl.is frá júní 2012²⁶. Reglugerð sem tekur gildi á árinu 2014²⁷ setur enn strangari mörk og því þarf að finna leiðir til að bregðast við þessu vandamáli sem enn er

²⁶ Frétt á mbl.is um mengun á Hellisheiði;

http://www.mbl.is/frettir/innlent/2012/06/14/meiri_mengun_en_talid_var/

²⁷ Viðmið fer úr 150 míkrogrömm/rúmmeter gufu í 50 mgr./rumm. Sjá líka á www.or.is

óleyst. Huga þarf að áhrifum vaxandi mengunar á heilsu starfsmanna, tæki, mannvirki og umhverfi eins og á gróðurfar og dýralíf. Þessi atriði hafa m.a. gert það að verkum að virkjun jarðvarma krefst mikillar yfirlegu og vandlegs mats á aðstæðum (Mannvit verkfræðistofa, 2010).

Íslensku orkufyrirtækin bundu vonir við að svokölluð djúpborun gæti skilað árangri en með henni var talið að unnt væri að ná allt að tífalt meiri orku en með hefðbundum borholum eða allt að 50 MW. Aðferðin (IDDP, Iceland Deep Drilling Project²⁸) gekk út á að borað yrði mun dýpra eða allt að 5 km í stað 2-3 km og þar með væri hægt að ná mun meiri orku með margfalt hærri hita. Skemmst er frá að segja að verkefnið hefur ekki gengið sem skyldi. Ýmis vandamál hafa komið upp, erfitt hefur reynst að hemja þann mikla hita og þrýsting sem fæst úr þessum djúpu holum, vökvinn hefur verið tærandi og borað hefur verið niður á kviku. Óvissa er um framhald verkefnisins hjá Landsvirkjun en vonir standa til þess að reynsla af verkefninu nýtist við hefðbundin borholuverkefni og hugsanlega við ráðgjöf erlendis. Verkið er á bið þar til tekist hefur að leysa margvísleg tæknileg vandamál.

Jarðvarmavirkjanir, líkt og vatnsaflsvirkjanir, eru oft staðsettar við eða nálægt vinsælum útivistarsvæðum eða ferðamannastöðum og því þarf að veða og meta áhrif þess að setja niður jarðvarmaorkuver. Það segir sig sjálf að bæði vatnsaflsvirkjanir og jarðgufuvirkjanir eru ekki afturkræfar framkvæmdir. Jarðröskun er það mikil að varla er unnt að færa land aftur til fyrra horfs ef til þess kæmi (Landsvirkjun, 2012).

4.2.2 Þróun

Landsvirkjun yfirtók rekstur Bjarnarflags- og Kröfluvirkjunar árið 1986 og hefur rekið þessar virkjanir með góðum árangri. Kröfluvirkjun var stækkuð úr 30 MW í 60 MW árið 1996 en Bjarnarflagsvirkjun hefur verið 3 MW frá því hún var byggð. Reyndar var Bjarnarflagsvirkjun byggð sem gufuveita og er enn rekin sem slík í dag og er því dæmi um fjölþætt not jarðvarmans. Áform um stækkun virkjunarinnar eru þó vegna fyrirhugaðrar raforkuvinnslu. Landsvirkjun hefur ekki sjálf byggt jarðvarmavirkjun frá grunni en hefur góða reynslu af rekstri slíkra virkjana og af stækkun Kröfluvirkjunar.

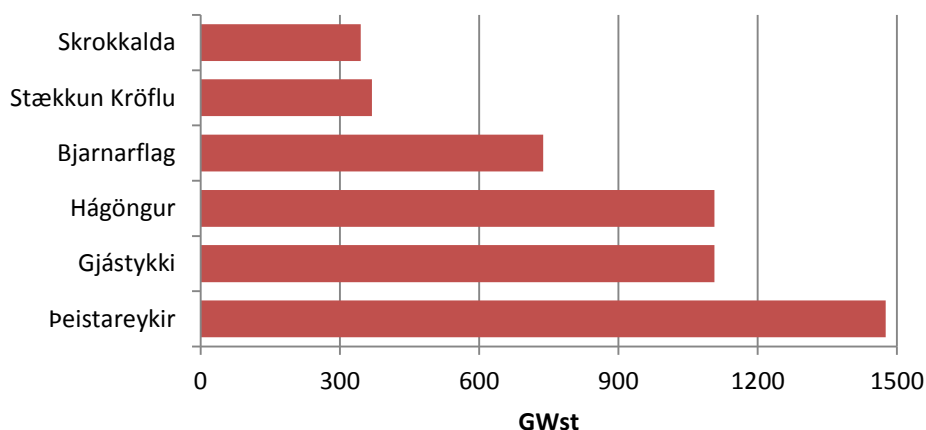
²⁸ Sjá nánari upplýsingar um IDDP verkefni Landsvirkjunar:

<http://www.landsvirkjun.is/rannsokniroghthroun/throunarverkefni/djupborun>

Ólíkt vatnsaflsvirkjunum þar sem Landsvirkjun er með nánast allt uppsett afl á sinni könnu eru Orkuveitan (OR) og HS Orka með mun stærri hluta í jarðvarma. OR er nú með 423 MW í uppsettu afli til raforkuvinnslu og HS Orka 175 MW. Bæði fyrirtækin nýta hluta orkunnar í formi heits vatns til húshitunar en Landsvirkjun notar orkuna eingöngu til raforkuvinnslu. Þessi samnýting gerir vinnslusvæðin mun hagkvæmari og nýting á orkunni verður mun betri en ef þau væru eingöngu nýtt til raforkuvinnslu (OR, e.d.; HS Orka, e.d.).

Landsvirkjun er með nokkur jarðhitasvæði til skoðunar og hefur kortlagt þau með tilliti til raforkuvinnslugetu. Þetta eru svæðin á NA-landi, nánar tiltekið á Þeistareykjum, Bjarnarflagi og við Kröfluvirkjun. Til viðbótar hafa svæði verðið skoðuð vestan Vatnajökuls. Samtals gæti uppsett afl verið um 600 MW og orkugetan um 5.000 GWst á ári.

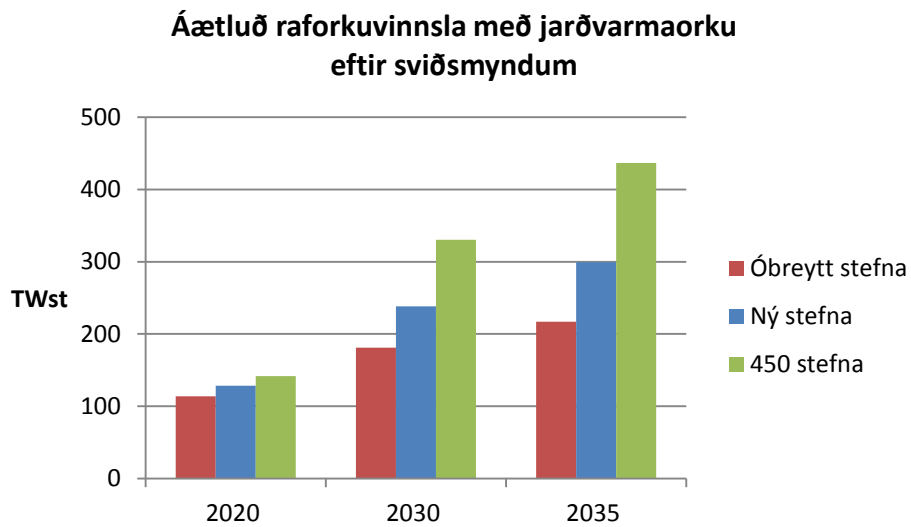
Aflstöðvar í athugun hjá Landsvirkjun og möguleg orkuvinnsla



Mynd 35. Jarðvarmakostir sem Landsvirkjun er með í athugun (Landsvirkjun, e.d.d)

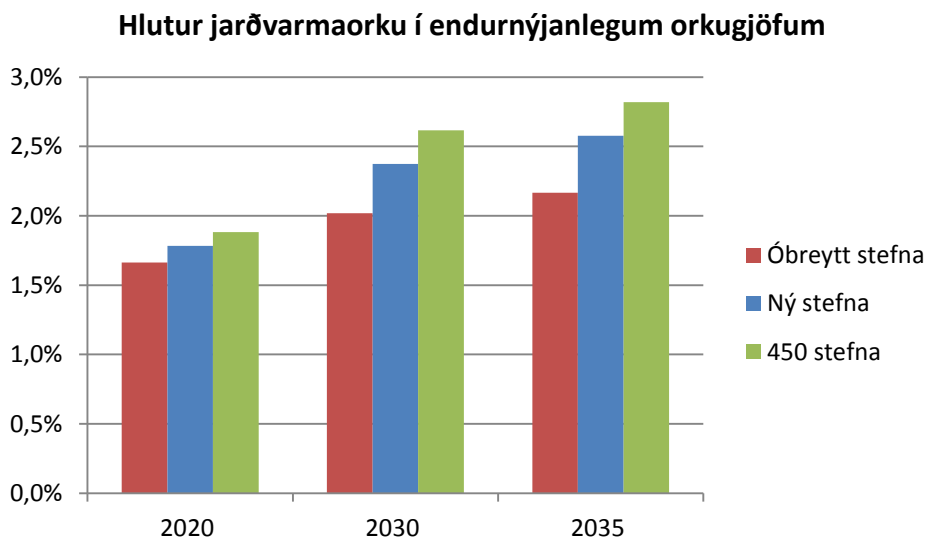
Á heimsvísu er hlutur jarðvarma til raforkuvinnslu hverfandi í samanburði við aðra endurnýjanlega orkugjafa eins og vatnsafl og á síðari árum einnig við vind- og sólarorku. Nú þegar er raforkuvinnsla með sólarorku orðin langt umfram raforkuvinnslu með jarðvarma. Þróun raforkuvinnslu með jarðvarma er afar hæg á heimsvísu sem í fyrstu kemur á óvart og er ekki í samræmi við það sem gerst hefur á Íslandi. Ef þessar þrjár sviðsmyndir í kafla 3 eru skoðaðar fyrir jarðvarmann þá er búist við nokkurri aukningu

Þótt hún sé lítil í stóra samhenginu. Athygli er vakin á kvarðanum á mynd 36 sem er í hundruðum TWst í stað þúsundum TWst eins og var í vatnsaflinu hér á undan.



Mynd 36. Aukning raforkuvinnslu með jarðvarma eftir sviðsmyndum (iea, 2013)

Í samanburði við vatnsafl er jarðvarminn aðeins með um 2,5% af áætlaðri orkuvinnslu. Þetta sést enn betur á mynd 37 þar sem hlutur jarðavarmans í endurnýjanlegri orkuvinnslu er skoðaður en þar er hún á bilinu 1,5-2,5%.

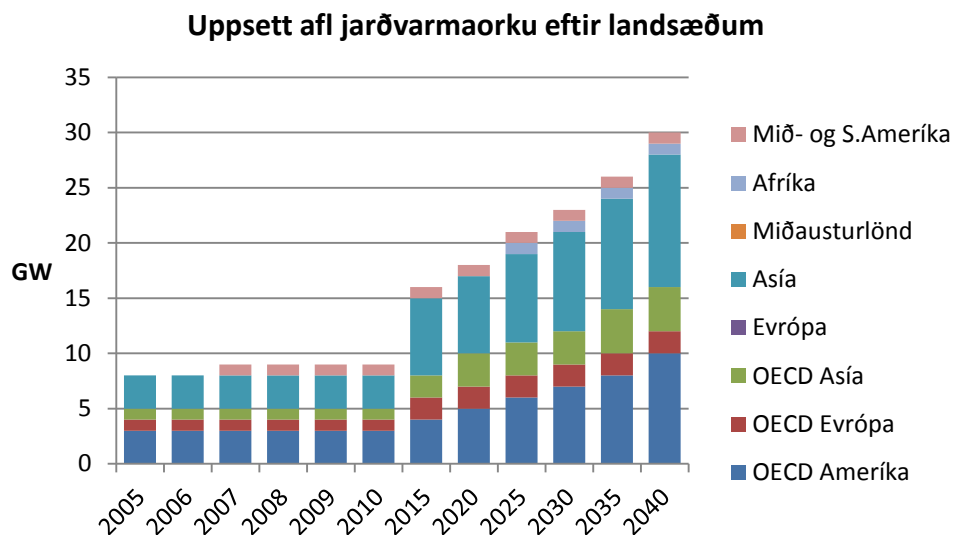


Mynd 37. Hlutfall raforkuvinnslu með jarðvarma í endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013)

Þróun héraendis hefur verið önnur en víðast hvar erlendis. Hér eru miklar vonir bundnar við aukna virkjun jarðvarma fyrst og frest til raforkuvinnslu en einnig er horft til

aukinnar fjölnýtingar. Ekki er ein ákveðin skýring á hægfara þróun jarðvarma á heimsvísu en hluti felst í eðli jarðvarmavirkjunar sem minnst var á hér að framan. Jarðvarmavirkjun er í sjálfu sér áhættusöm framkvæmd vegna mikillar óvissu um orkuöflun og orkuendingu. Þar við bætist að á síðustu árum hafa auknar mengunarkröfur valdið auknum kostnaði framleiðenda. Vegna mikillar óvissu er víða erfitt að fá fjármagn í byggingu jarðhitavirkjana sérstaklega á fyrri stigum þar sem óvissan er mest. Þróun hefur verið sú að fá alþjóðastofnanir til að fjármagna fyrstu og áhættusömustu skrefin eða þar til komin er nokkur víska og reynsla um orkugetu svæðisins (Íslandsbanki, 2012). Því er vænlegast að virkja í áföngum eins og gert hefur verið hér á landi og reynslan nýtt til frekari undirbúnings og ákvarðana um næstu skref.

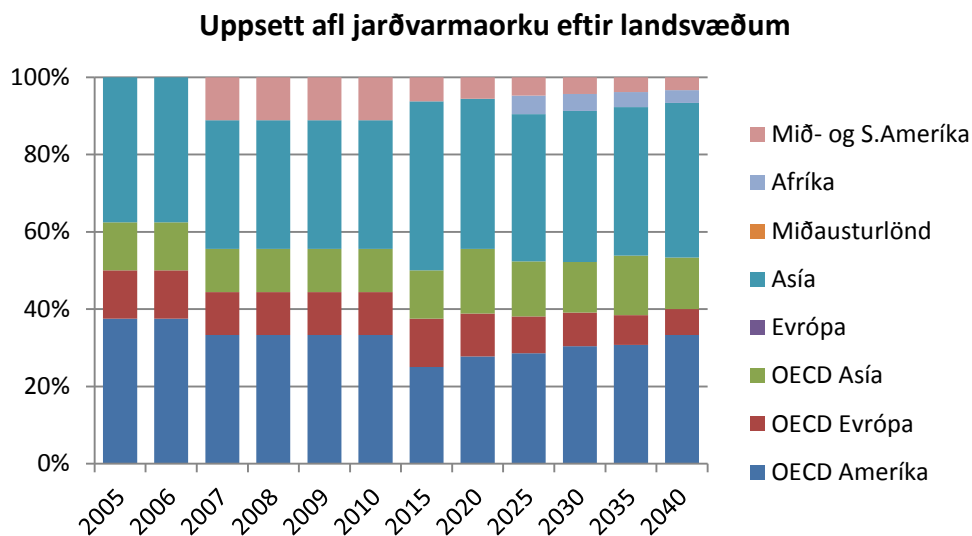
Þróun jarðhitaverkefna á heimsvísu hefur helst verið á stöðum þar sem ekki er að finna aðra orkugjafa eða aðgengi að tengingum við raforkukerfi er ekki fyrir hendi. Í þessu samhengi má nefna áform Reykjavík Geothermal sem vinnur nú að 1.000 MW uppbyggingu jarðvarmavirkjunar í Epíópíu. Þar hefur fyrirtækið nýlega fengið styrk frá alþjóðastofnunum og stjórnvöldum í Epíópíu til að hefja tilraunaboranir. Áætlað er að verkefnið, sem verður eitt hið stærsta sinnar tegundar, kosti um 4 milljarða dollara²⁹. Fróðlegt verður að fylgjast með framvindu þessa verkefnis á næstu misserum.



Mynd 38. Uppsett afl jarðvarmavirkjana eftir landsvæðum (eia, 2013)

²⁹ Reykjavík Geothermal: <http://www.rg.is/>

Mynd 38 sýnir uppsett afl í jarðvarma sem er áætlað aðeins um 30 GW á árinu 2040 en það er svipað uppsett heildarafl eins og aukning sólarorku eingöngu á árinu 2011 og aðeins um 10% af núvarandi uppsettu afli vindorku (GWEC, 2013). Aukningin er nokkuð jafnt dreifð eftir löndum og það er helst að Asíulöndin sækir í sig veðrið, Kína og Indland með langstærstan hluta, auk Bandaríkjanna. Í Bandaríkjunum einum er samtals uppsett afl jarðvarmavirkjana tæp 3,4 GW og aukningin hefur verið um 5% á ári síðustu ár eða um 150 MW (Geothermal Energy Association, 2013).



Mynd 39. Skipting uppsetts jarðvarmaafis eftir landsvæðum (eia, 2013)

4.3 Vindorka

Vindorka hefur átt vaxandi fylgi að fagna og er nú sá endurnýjanlegi orkugjafi ásamt sólarorku sem vex hraðast í heiminum. Nýting vindorku til rafmagnsvinnslu er ekki ný af nálíni. Talið er að fyrstu vindrafstöðvar hafi komið fram um 1890 í Danmörku. Um 1940 voru settar upp vindrafstöðvar í Vermont í BNA sem framleiddu 1,25 MW við mikinn vind og voru þær í gangi á stríðsárunum³⁰. Eftir það má segja að vinsældir vindmylla hafi verið í takt við verð á olíu og gasi. Það er ekki fyrr en um 1970 í olúkreppunni að áhugi jókst á vindmyllum að nýju og fyrirtæki tóku að þróa tæknina áfram. Þróunin var þó hægt lengst af en sem fyrr segir er vindorka nú sá endurnýjanlegi orkugjafi sem vex langhraðast í heiminum í dag og líklega sá útbreiddasti.

³⁰ Sjá <http://energy.gov/eere/wind/history-wind-energy>



Mynd 40. Vindmyllur Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.c)

4.3.1 Yfirlit

Í janúar 2013 reisti Landsvirkjun tvær vindmyllur í tilraunaskyni sem hafa nú verið í rekstri í eitt ár samfelld. Þótt enn sé of snemmt að segja til um reynsluna er árangurinn sem af er umfram væntingar og gefur tilefni til bjartsýni á framhaldið.

Virkjun vinds er í raun afar einföld tækni og í grunninn snýst um sömu eðlisfræði og vatnsorka. Vindurinn snýr spöðum sem snúa hverfli sem framleiðir síðan rafmagn. Tækninni hefur fleygt fram og hefur búnaðurinn verið einfaldaður frá fyrri hönnun. Í stað þess að mótór sé efst og girkassi og drifrás niður eftir mastriinu þá hefur þróunin verið í þá átt að vera með beintengt drif (e. Direct drive) sem er mun einfaldari, öruggari og endingarbetri tækni. Meðalstærð vindmylla í dag er um 1-3 MW en þær stærstu eru 7-8 MW³¹. Langflestar eru staðsettar á landi (e. on shore) eða um 80% (EWEA, 2014; GWEC, 2013). Vindmyllugarðar hafa einnig verið staðsettir úti við strendur (e. off shore) til að fanga yfirleitt meiri og stöðugri vind en þær framkvæmdir eru mun dýrari vegna vandamari vinnu við uppsetningu, undirstöður og tengingar, auk þess sem rekstur þeirra og viðhald er mun dýrara (IRENA, 2012).

³¹ Sjá nánar t.d. á; <http://www.enercon.de/de-de/> og <http://www.vestas.com/>

Á landi er uppsetning og rekstur vindmylla tillölulega einföld framkvæmd. Sem dæmi þá tók það Landsvirkjun aðeins um sex mánuði frá pöntun að setja upp tvær 900 kW vindmyllur. Vindorka hefur ótvíræða kosti fram yfir vatnsafl og jarðvarma þegar kemur að umhverfismálum. Framkvæmdir eru í raun mjög einfaldar eftir að niðurstöður rannsókna á vindaðstæðum liggja fyrir. Uppsetning krefst einungis takmarkaðrar röskunar vegna vinnu við undirstöður sem vindmyllan er boltuð ofan á.



Mynd 41. Vinna við uppsetningu á vindmyllum Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.c)

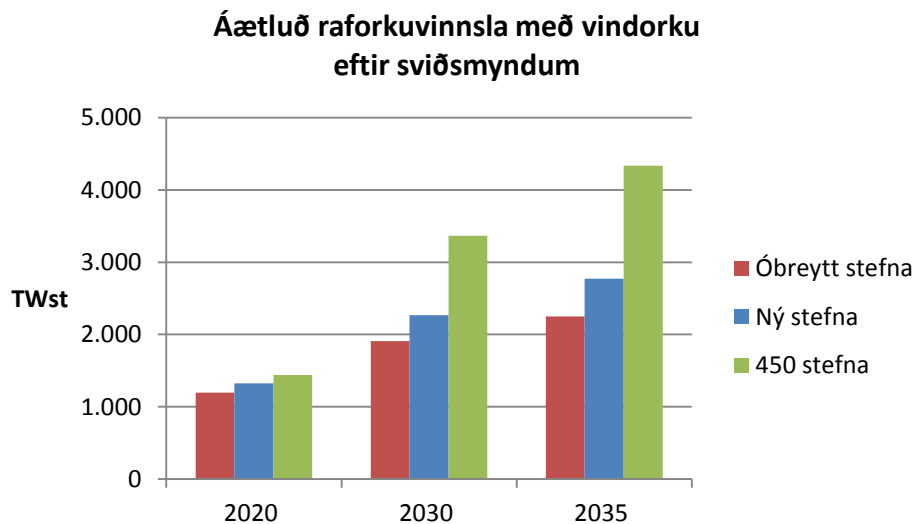
Staðsetning vindmylla eða vindmyllugarða skiptir verulegu máli. Ólíkt vatnsaflsvirkjunum og jarðavarmavirkjunum er hægt að velja stað sem er á berangri fjarri byggð og fjarri ferðamannastöðum eða náttúruperlum. Staðsetning á vindmyllum Landsvirkjunar á Hafinu svokallaða ofan Búrfells er í raun mjög ákjósanleg hvað þessi atriði varðar. Bæði er svæðið þegar mikið raskað, staðurinn er á berangri og svæðið er yfirleitt með stöðugum vindi af norðaustri. Öðrum megin liggur frárennslisskurður frá Sultrartangavirkjun og hinum megin liggja tvær háspennulínur. Landsvirkjun kannar nú önnur svæði á landinu sem hafa svipaða eiginleika.

4.3.2 Þróun

Víða í Evrópu hefur hlutur vindmylla í raforkuvinnslu aukist hratt á síðustu árum. Í Danmörku hefur hlutfallið farið í um 50% og í Bretlandi yfir 10%. Margir nýir

framleiðendur hafa bæst í hóp þeirra sem voru hvað þekktastir eins og Vestas í Danmörku. Kínversk fyrirtæki eru orðin leiðandi í framleiðslu og notkun vindmylla til raforkuvinnslu og hefur orðið gríðarleg aukning þar í landi. Það hefur m.a. leitt til þess að verð á vindmyllum hefur farið hratt lækkandi. Aukning á uppsettu afli hefur verið gríðarleg víðsvegar um heiminn og í Evrópu var aukningin á árinu 2012 um 11 GW sem er jafnmikið og heildar uppsett afl jarðvarmavirkjana. Á heimsvísu var aukningin á árinu 2012 um 45 GW og alls er uppsett afl um 282 GW (GWEC, 2013).

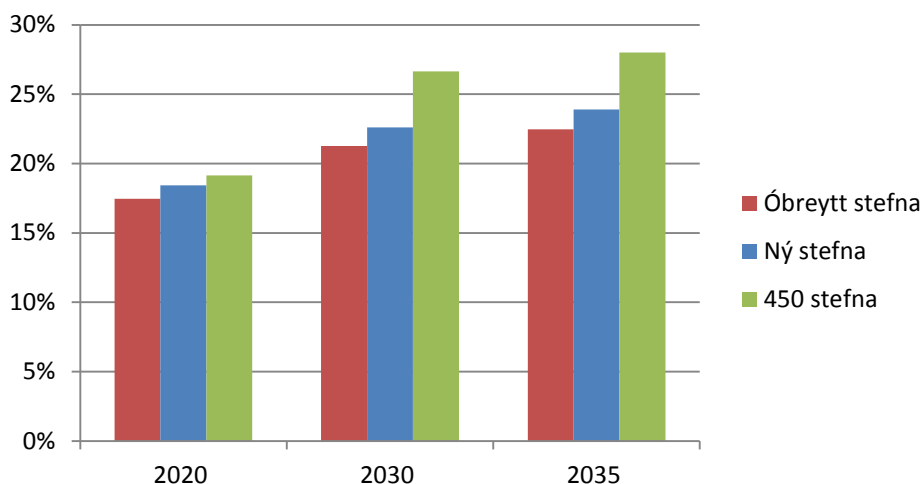
Samkvæmt sviðsmyndagreiningu WEO er áfram búist við mikili aukningu raforkuvinnslu með vindmyllum og munurinn meiri eftir því sem löndin taka metnaðarfullri stefnu. Á árinu 2035 gæti raforkuvinnsla með vindmyllum orðin jafnmikil og með vatnsafli á árinu 2020 eða um 4.000 TWst.



Mynd 42. Aukning raforkuvinnslu með vindorku eftir sviðsmyndum (iea, 2013)

Það leiðir síðan til þess að hlutur vindmylla í raforkuvinnslu endurnýjanlegra orkugjafa eykst verulega og gæti numið yfir 25% árið 2035 m.v. 450 sviðsmyndina.

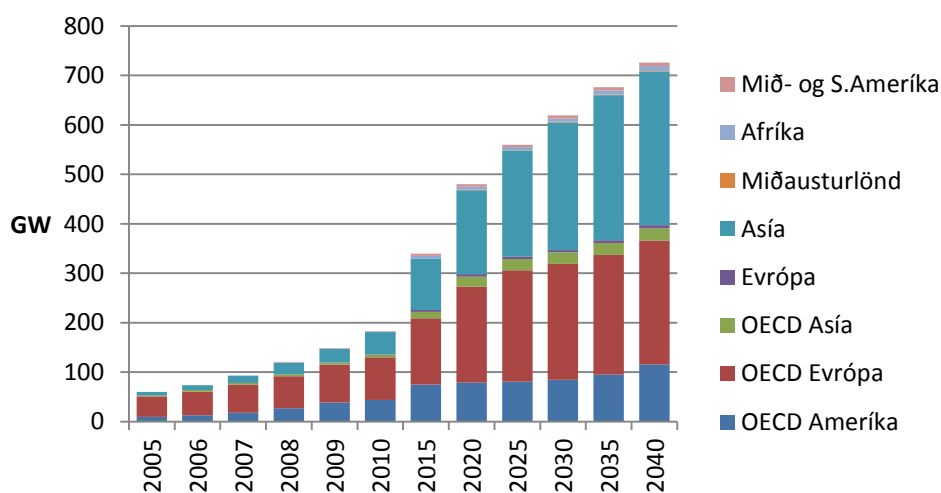
Hluttur vindorku í endurnýjanlegum orkugjöfum



Mynd 43. Hlutfall raforkuvinnslu með vindorku í endurnýjanlegum orkugjöfum (iea, 2013)

Á heimsvísu eru það Asíulöndin sem leiða þróunina, bæði Kína og Indland hafa virkjað vindorku í stórum stíl og hafa uppi áform um mikla aukningu á raforkuvinnslu með vindmyllum.

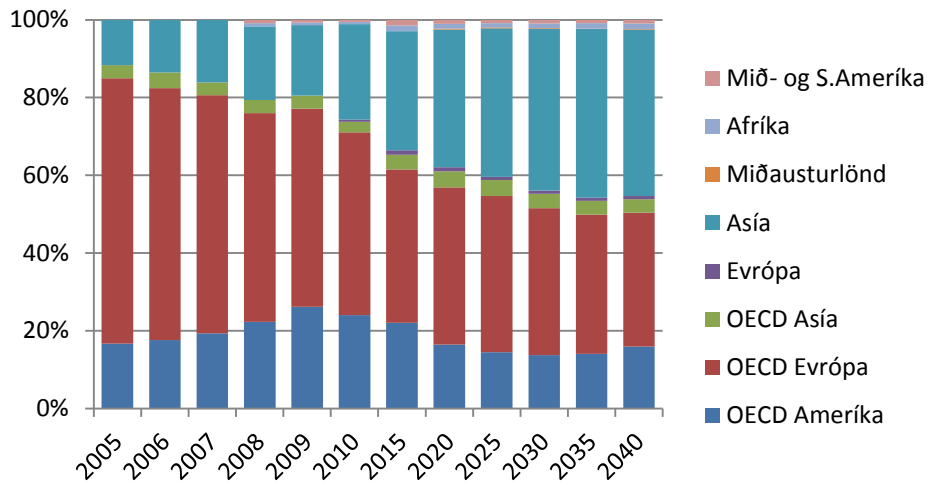
Uppsett afl vindorku eftir landsvæðum



Mynd 44. Uppsett afl vindorku eftir landsvæðum (eia, 2013)

Evrópulöndin hafa verið leiðandi lengi vel eins og sést vel á mynd 44 en búist er við að Asíulöndin taki yfir fljótlega eftir 2015 og verði með allt að helming raforkuvinnslunnar árið 2040 (eia, 2013).

Uppsett afl vindorku eftir landsvæðum



Mynd 45. Skipting uppsetts afls vindorku eftir landsvæðum (eia, 2013)

Einn stór kostur við vindmyllur er að framkvæmdin er að mestu leyti afturkræf. Mjög auðvelt er að fjarlægja vindmyllur eða jafnvel skipta þeim út fyrir nýjar eða stærri. Hið sama verður ekki sagt um vatnsafl eða jarðvarma sem krefjast verulegrar röskunar á umhverfi og framkvæmdir eru í flestum tilvikum óafturkræfar. Menn geta deilt um sjónmengun vindmylla og e.t.v. hávaða, en það fer auðvitað eftir staðsetningu hversu mikil þau áhrif verða. Í samanburði við hina tvo kostina eru þau áhrif hverfandi (EWEA, 2014). Á Íslandi er einnig nægt landrými til staðar þar sem aðstæður eru mjög ákjósanlegar fyrir uppsetningu vindmyllugarða. Ólíkt vatnsafls- og jarðvarmavirkjunum sem oft eru staðsettar við eða nálægt vinsælum ferðamannastöðum eða í fallegu landslagi er hægt að velja vindmyllum stað á berangri, fjarri byggð, utan alfaraleiða eða nærri þegar röskuðum svæðum.



Mynd 46. Dæmi um vindmyllugarð í Mojave eyðimörkinni (GWEC, 2013)

Í úttekt sem Ketill Sigurjónsson gerði fyrir iðnaðarráðherra frá 2009 um virkjun vindorku og sjávarorku á Íslandi var komist að þeirri niðurstöðu að vindorka geti verið áhugaverður kostur samhliða uppbyggingu hefðbundinna orkugjafa í vatnsafli og jarðvarma. Kostir vindorku voru nefndir m.a. að auka fjölbreytni og dreifa áhættu í raforkuvinnslu. Rætt var um mikilvægi þess að fram færu vindmælingar vítt og breitt um landið og að kostnaðargreina orkugjafana nánar.

Þessi atriði skýrsluhöfundar eru að mestu samhljóða því sem hér hefur komið fram og hafa í raun þegar gengið eftir. Vindmælingar hafa verið gerðar vítt og breitt um landið og rekstur tveggja vindmylla hefur gefið mjög góða raun. Í næsta kafla verða þessir þrír orkugjafar bornir saman út frá kostnaði og öðrum þeim atriðum sem skipta máli við val á framtíðaruppbyggingu raforkukerfisins.

5 Samanburður

Í þessum kafla verða umræddir þrjú orkugjafar bornir saman og kostnaðarmat gert. Öllum samanburði ber að taka með fyrirvara þar sem þessir orkugjafar eru ólíkir og ýmsar forsendur eru þess eðlis að niðurstöður geta verið á breiðu bili. Æskilegt er að bera einnig saman önnur atriði sem taka þarf tillit til við samanburð á þessum orkugjöfum. Þar ber að nefna umhverfismál en þau eru afar ólík og mismikil að umfangi. Þá eru ýmsir óvissuþættir mismunandi sem og áhætta sem þarf að taka tillit til.

Rétt er að ítreka að þau kostnaðarverð sem hér eru birt eru fyrst og fremst sett fram til samanburðar en ekki til að meta endanlegt eða líklegt kostnaðarverð þessara orkugjafa. Byrjað verður á að kynna aðferðafræði sem almennt er notuð við samanburð á orkugjöfum, síðan verða forsendur ræddar og loks kostnaðarmat gert.

5.1 Aðferðafræði

Mat á kostnaðarverði orkugjafa er hægt að nálgast með nokkrum aðferðum. Á síðustu árum hefur svokallað núvirt meðalkostnaðarverð (e. Levelized Cost of Energy, LCOE) rutt sér til rúms sem tiltölulega einföld en raunhæf nálgun til að bera saman kostnað milli orkugjafa og einnig einstakra virkjunarkosta innan sama orkugjafa. Höfundur hefur kosið að nota þessa aðferð í því kostnaðarmati sem fram fer hér á eftir. Ekki er alveg auðvelt að þýða heiti þessarar aðferðar yfir á Íslensku og mun því enska skammstöfunin, LCOE, verða notuð hér eftir. Núvirt meðalkostnaðarverð kemst þó nálægt því að fanga lýsingu á aðferðinni og mætti skammstafa sem „NMKV“, en LCOE verður engu að síður notað.

Aðferðin er tiltölulega einföld og byggir á því að núvirða áætlaðan stofnkostnað og rekstrarkostnað frá byrjun til loka reiknitímabilsins. Í þá summu er síðan deilt með núvirtu orkumagni fyrir sama tímabil. Þá fæst svokallað núvirt meðalkostnaðarverð (e. LCOE). Kosturinn við þessa aðferð er að hún er bæði einföld og skýr þar sem aðaláherslan er á samanburð orkugjafa, en aðferðin gefur einnig vísbendingu um lágmarksverð. Á mynd 47 má sjá hvernig LCOE verð er skilgreint (IRENA, 2012; Black & Veatch, e.d.).

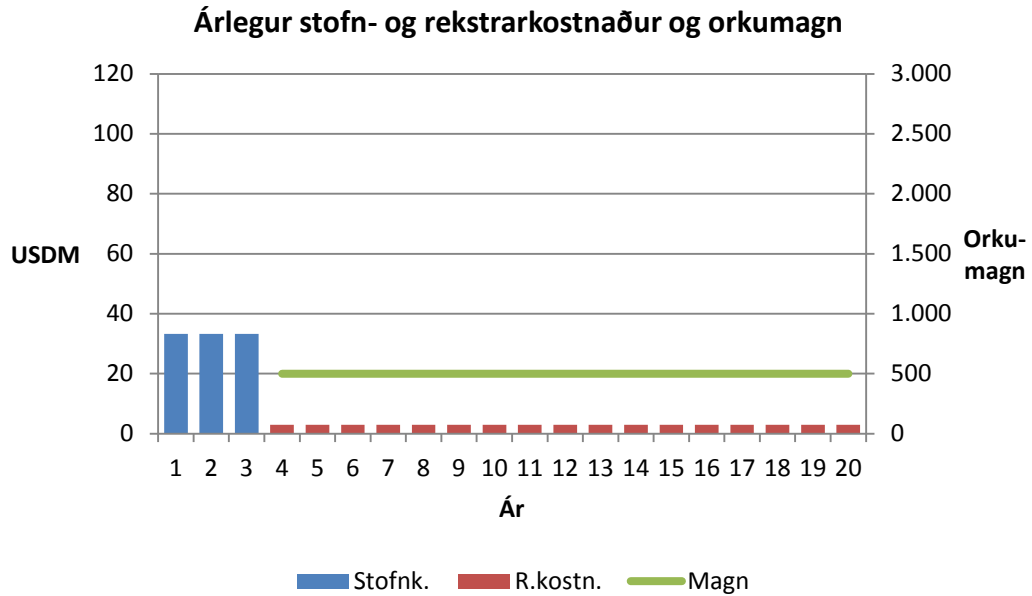
$$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Mynd 47. Formúla fyrir LCOE (IRENA, 2012)

Hér er I = fjárfesting (e. Investment Cost), M = rekstrarkostnaður (e. Operation and Maintenance cost), F = eldsneyti (e. Fuel cost) sem ekki á við hér, r = reiknivextir (e. Discount Rate), E = orkumagn (e. Energy), n = líftími (e. Lifetime). Helstu forsendur jöfnunnar sem hafa áhrif á LCOE verð eru framkvæmdakostnaður og dreifing hans á byggingartíma (ár), árlegur rekstrarkostnaður eftir lok framkvæmda, líftími (reiknitímabil), orkumagn og reiknivextir. Einingaverðið er venjulega sett fram sem US cent/kWst eða USD/MWst. Seinni mælieiningin verður notuð í ritgerðinni.

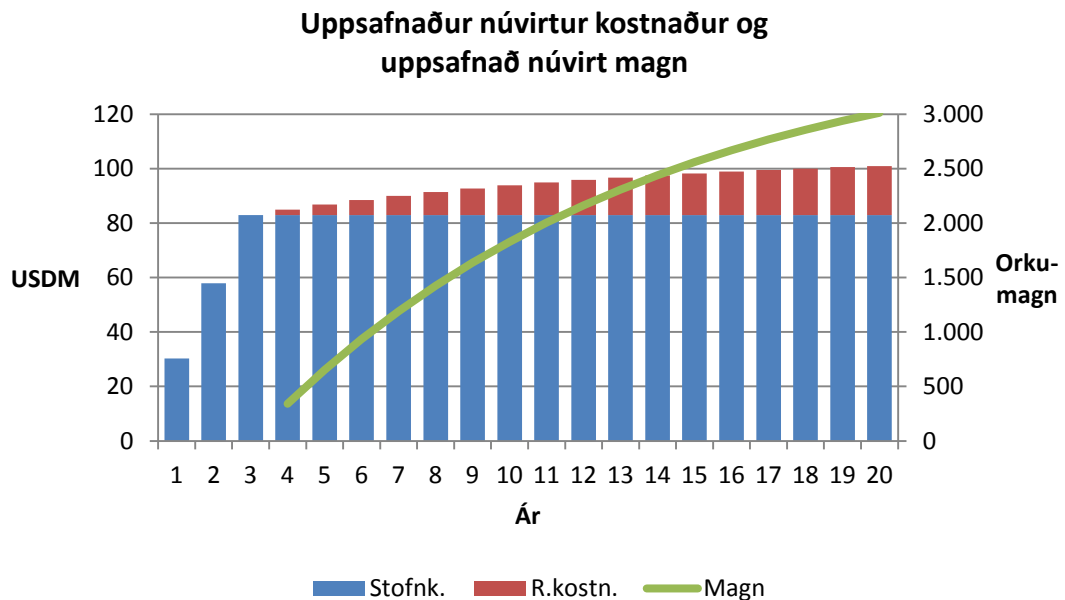
Tökum einfalt dæmi. Gefum okkur að fjárfesting sé USD 100 milljónir sem skiptist jafnt á 3 ár. Árlegur rekstrarkostnaður er 3% eða USD 3 frá og með ári 4. Allar fjárhæðir eru á föstu verðlagi. Gefum okkur einnig að árlegt magn sé 500 GWst frá og með ári 4 og að líftími sé 20 ár³². Á mynd 48 má sjá hvernig þetta er stett fram, á vinstri ás er kostnaðurinn í USD og á hægri ás má sjá magnið.

³² Sjá nánar talnadæmi í viðauka 4



Mynd 48. Dæmi um árlegan kostnað og orkumagn

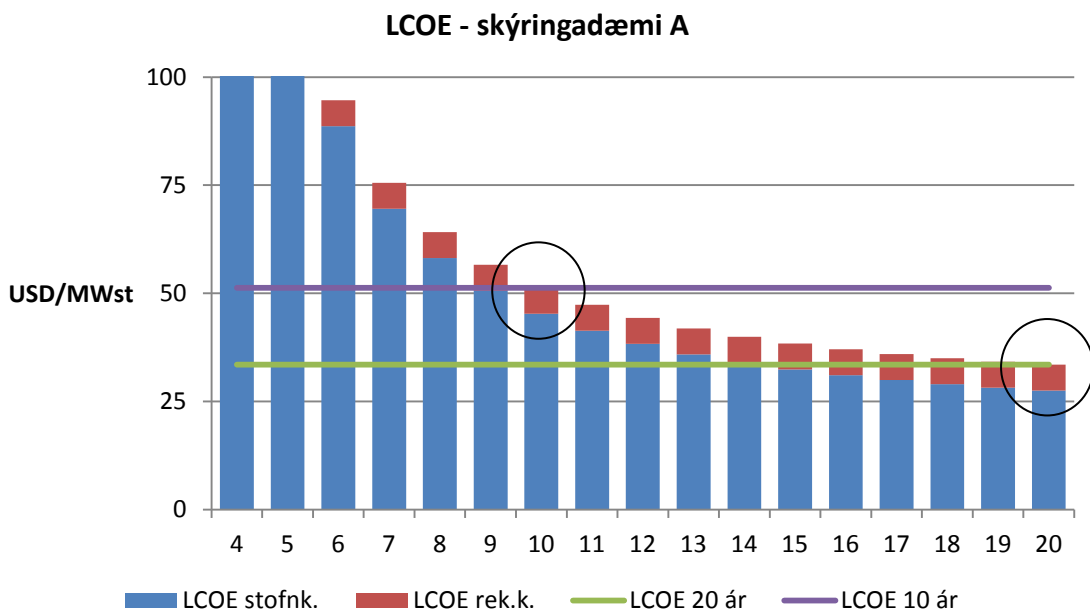
Gefum okkur til viðbótar að reiknivextir séu 10% á ári. Á mynd 49 er búið að reikna uppsafnað núvirði bæði fyrir kostnað og magn frá ári 1 til árs 20 miðað við 10% reiknivexti. Ef núvirtu magni er deilt upp í núvirtan kostnað á hverju ári má finna það einingaverð (LCOE verð) sem gefur 10% reiknivexti frá upphafi að meðaltali til viðkomandi árs.



Mynd 49. Dæmi, uppsafnaður núvirtur kostnaður og uppsafnað núvirt magn

Í lok 20 ára tímabils er núvirði stofnkostnaðar USD 83³³ og rekstrarkostnaðar USD 18 eða samtals USD 101 milljón yfir allt tímabilið (vinstri ás á mynd). Núvirði magnsins er á sama hátt 3.013 GWst (hægri ás). Einingaverðið reiknast þá USD 101M/3.013GWst = USD 0,034M/GWst eða USD 34/MWst (margfaldað með 1.000 til að fá MWst). Túlkunin verður þá að miðað við 20 ára líftíma þarf verðið að vera að meðaltali USD 34/MWst yfir allt tímabilið til að ná 10% reiknivöxtum.

Nánar lítur LCOE verðferillinn út eins og fram kemur á mynd 50 sem sýnir þróun LCOE verðs sem fall af tíma. Sjá má að eftir því sem tíminn líður lækkar einingaverðið þar sem kostnaðurinn eykst lítið en magnið mun meira. Kostnaðarverðið er reiknað og sýnt fyrir stofnkostnað og rekstrarkostnað. Miðað við 10 ár þyrfti verðið að vera um 51 að meðaltali til að ná sömu kröfu (sjá nánar línur á mynd). Verðið er reiknað á sama hátt og áður eða sem USD 94M/1.829GWst*1.000=USD 51/MWst.



Mynd 50. Dæmi um samband LCOE og líftíma

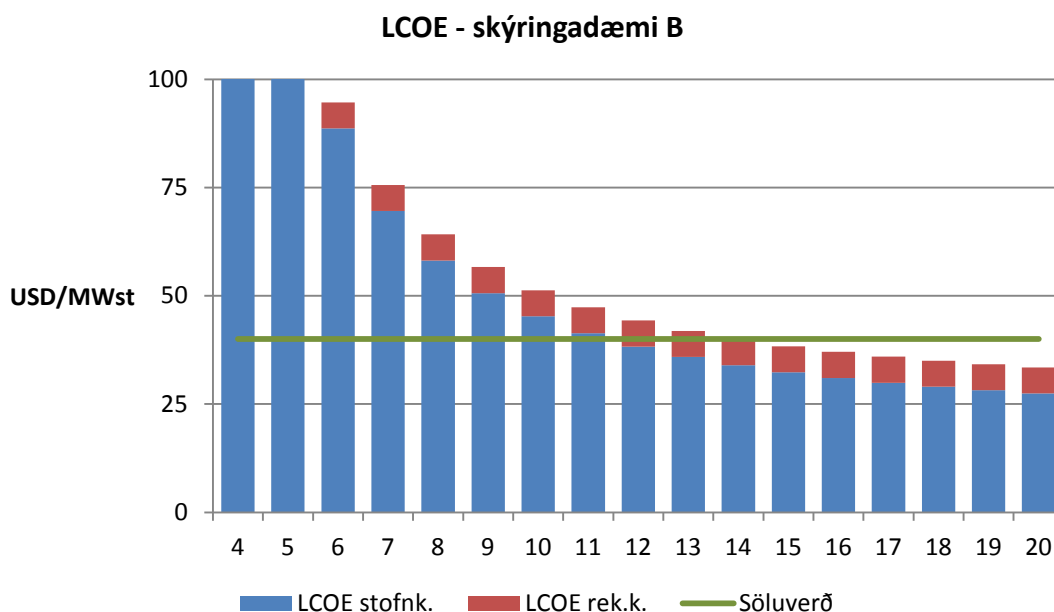
Þannig táknar hver súla núvirt meðalverð frá upphafi til viðkomandi árs og sýna línurnar þá meðalverð yfir 10 og 20 ára tímabil (merkt með hring á mynd). Aðferðin segir til um hvaða lágmarksverð þarf til að framkvæmdin nái að skila viðunandi reiknivöxtum yfir ákveðið tímabil. Aðferðinni svipar til hefðbundinnar núvirðisaðferðar

³³ Fjárfesting á ári 100/3 og reiknivextir 10% fæst : $100/3/1,1^1 + 100/3/1,1^2 + 100/3/1,1^3 = 83$

(e. NPV), þar sem framtíðarstjóðstreymi er núvirt miðað við gefna ávöxtunarkröfu³⁴. Munurinn felst í því að LCOE aðferðin notar eingöngu kostnaðartölur. Aðferðinni er þannig ekki ætlað að meta arðsemi einstakra framkvæmda eins og áður sagði en er hentug til að bera saman einstaka kosti innan sama orkugjafa eða á milli orkugjafa eins og hér verður gert. Til að geta arðsemigreint ákveðin verkefni þarf að liggja fyrir áætlað söluerð orkunnar, auk annarra forsenda, s.s. fjármagnsskipan, skattar o.fl.

LCOE aðferðin byggir engu að síður á sömu lögmálum og hefðbundin sjóðstreymisgreining þar sem framtíðarstjóðstreymi er núvirt yfir tíma með reiknivöxtum. Munurinn er sá að með LCOE er leitast við að finna lágmarksverð en í hefðbundinni arðsemigreiningu er markaðsverðið þekkt og þar með hægt að áætla hreint núvirði (e. NPV) fjárfestingarinnar.

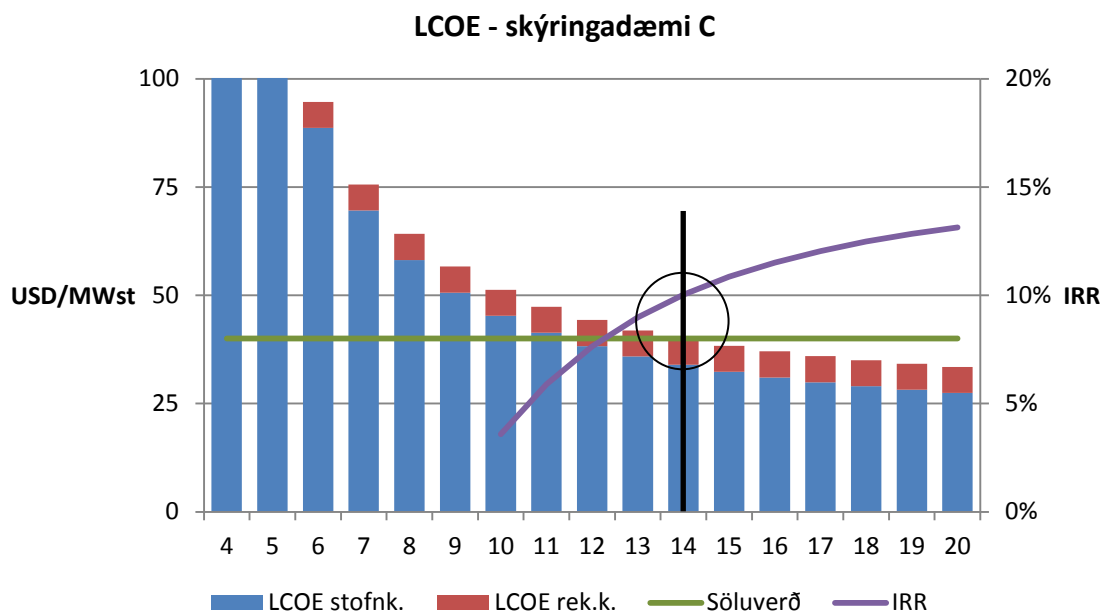
Á mynd 51 er tekið dæmi um hvernig tengja má LCOE aðferðina við hefðbundna sjóðstreymisaðferð. Ef söluerð er t.d. gefið 40 USD (græna línan í dæmi B) má sjá að þar sem söluerðið og kostnaðarverðið skerast er arðsemikröfunni náð og NPV framkvæmdarinnar er jafnt núlli. Sjá má að það gerist á ári 14. Eftir það er söluerðið umfram kostnaðarverðið og má túlkast sem svo að núvirði framkvæmdarinnar er jákvætt.



Mynd 51. Dæmi um samband LCOE og söluerðs

³⁴ Núvirt sjóðstreymi (e. Discounted Cash Flow)

Á mynd 52 (dæmi C) er búið að setja inn línu fyrir reiknaða innri vexti (e. Internal Rate of Return, IRR) sem líkt og kostnaðarverðið (sem lækkar yfir tíma), hækka eftir því sem tímabilið lengist. Þá sést að skurðpunkturinn við verðið 40 er á árinu 14 við kröfuna 10% (sjá hring á mynd). Með öðrum orðum þá næst 10% krafan þar sem LCOE verðið og söluverðið skerast (sjá svörtu lóðréttu línuna). Þar sem líftíminn var metinn 20 ár er kostnaðarverðið þó lægra eða sem fyrr segir 34. Miðað við söluverðið 40 gæfi það arðsemi upp á ca. 13% og jákvætt núvirði miðað við undirliggjandi 10% reiknivexti.



Mynd 52. Samband LCOE, söluverðs og innri vaxta (IRR)

Þannig er LCOE aðferðin í sjálfu sér afbrigði af núvirtu sjóðstreymi þar sem tekjuhliðinni er sleppt og útkoman er núvirt meðalkostnaðarverð frekar en arðsemi. Eðli málsins samkvæmt lækkar LCOE yfir tíma. Í upphafi þegar fjárfesting er nýkomin í rekstur er verðið hátt en lækkar svo hratt yfir tíma með auknu orkumagni. Rekstrarkostnaður nægir ekki til að halda á móti lækkun verðsins enda vegur hann í flestum tilvikum tiltölulega lítið í heildarsamhenginu.

En þótt viðurkenndri aðferðafræði sé beitt þá er niðurstaðan auðvitað háð þeim forsendum sem nauðsynlegt er að meta og aðferðafræðin byggir á. Í næsta kafla verður gerð grein fyrir helstu forsendum.

5.2 Forsendur

Kostnaðarmat er bæði byggt á innlendum og erlendum reynslutölum. Þar sem stutt reynsla er í vindorku hér á landi er aðallega stuðst við erlendar reynslutölur varðandi helstu kostnaðarpætti í vindorku. Hér verður fjallað nánar um helstu forsendur sem skipta máli í kostnaðarmatinu en það eru sem fyrr segir auk stofnkostnaðar, árlegur rekstrar- og viðhaldskostnaður, byggingartími í árum, líftími í árum, nýtingartími sem segir til um orkumagn miðað við uppsett afl og reiknivextir³⁵. Fyrstu fimm forsendurnar eru aðallega metnar með tilliti til reynslutalna en forsendu um reiknivexti þarf í raun og veru að velja eða meta sérstaklega þar sem hún byggir á mati á því hvað sé eðlilegt að krefjast í verkefni miðað við ásættanlega áhættu.

Í þessum samanburði verður reiknað með að uppsett afl samsvari 50 MW í nýrri virkjun til einföldunar. Þetta samsvarar t.d. því að settar verði upp nokkrar vindmyllur í vindmyllugarð og uppsetningar á einni vélasamstæðu í jarðgufu- og vatnsaflsvirkjun. Í jarðvarmavirkjun er þetta nærri lagi en reynslan fyrir vatnsafl hefur verið meira uppsett afl eða nærri 100 MW sbr. Búðarhálsvirkjun (95 MW) og reyndar næstu vatnsaflsvirkjanir Landsvirkjunar gefa til kynna. Í þessum útreikningum skiptir þetta þó litlu máli þar sem sem einstakar forsendur byggja á safni verkefna, stórum og smáum og bera að túlka sem meðaltal. Af þessum sökum verða niðurstöður birtar á víðu bili frekar en einni tölu.

Annað atriði sem vert er að taka fram að vegna eðlis vindorku fæst ekki jafnt afl yfir árið eins og reyndin er með hina tvo orkugjafana. Afleiðing þess er að svokallað reiðuafli³⁶ verður að vera til staðar á hverjum tíma og mikil uppbygging með vindafli kallar á aukið reiðuafli. Þetta getur haft áhrif á samanburðinn þar sem ekki er gert ráð fyrir kostnaði við reiðuaflið við mat á kostnaði við vindorku sem verður að koma annars staðar frá. Þessu verða gerð nánari skil í kafla 5.4 en til að byrja með er kostnaði við reiðuafli sleppt í vindorku til einföldunar.

³⁵ Miðað við 50 MW uppsett afl og 90% nýtingartíma fást; $50 * 8760 * 90\% / 1000 = 394 \text{ GWst/ári}$

³⁶ Sjá nánar t.d. á:

<http://www.landsnet.is/raforkukerfid/kerfisstjornun/hlutverkkerfisstjornar/kerfisthjonusta/>

5.2.1 Stofnkostnaður

Stofnkostnaður og breyting á honum geta haft úrslitaáhrif á endanlegt kostnaðarverð. Hér verður ekki sett fram nákvæmt niðurbrot á einstökum kostnaðarþáttum en það er mjög mismunandi eftir orkugjöfum og einstökum virkjunarkostum. Virkjun vatnsafls krefst umfangsmikillar undirbúningsvinnu, jarðvegs- og steypuvinnu, ganga- og stíflugerðar, byggingar stöðvarhúss auk uppsetningar vél- og rafbúnaðar. Virkjun jarðvarma krefst einnig nákvæmrar undirbúnings- og rannsóknarvinnu, mismikillar vinnu og kostnaðar við tilraunboranir, byggingar stöðvarhúss og uppsetningu vél- og rafbúnaðar. Í vindorku er vélbúnaðurinn hins vegar 70-80% af öllum kostnaði og sker vindorkan sig algerlega úr hvað stofnkostnað varðar.

Til einföldunar er hér ekki gert ráð fyrir að það verði endurfjárfest síðar til að viðhalda orkukostinum. Í staðinn er tekið mið af rekstrarkostnaði viðkomandi orkugjafa og eins líftíma. Eign sem þarf að meira viðhald er þá látin endast skemur. Allar tölur eru settar fram í milljónum USD á uppsett MW (USD/MW) og einingaverð er sett fram í USD/MWst. Í öllum tilfellum er gert ráð fyrir að stofnkostnaður dreifist jafnt á byggingartíma.

Almennt er talið að stofnkostnaður metinn í milljónum USD/MW geti verið svipaður í vatns- og jarðvarma en mun lægri í vindorku. Óvissubíl getur verið umtalsvert eftir aðstæðum, stærð virkjana, staðsetningu og fleiri atriðum. Óvissa er þó talin áberandi mest í jarðgufuvirkjunum þar sem töluverð óvissa er hversu margar borholur þarf að bora, hve miklu þær skila og hversu lengi þær endast. Helst verður miðað við skýrslu IRENA (2012) hvað einstakar forsendur varðar en hún byggir á upplýsingum um safn 8.000 verkefna víðs vegar að úr heiminum.

Samkvæmt skýrslu IRENA má álykta að stofnkostnaður vatnsaflsverkefna geti verið frá USD 2,5 M/MW til 3,5 M/MW (IRENA, 2012). Sum verkefni geta þó verið mun ódýrari ef um er að ræða stækkun á eldri virkjun eða tiltölulega einfalda framkvæmd á eða nálægt þegar virkjuðu svæði. Eins getur kostnaður verið hærri ef verkefnið er mjög flókið og e.t.v. staðsett á erfiðu landsvæði. Reynslutölur frá innlendum verkefnum gefa enn fremur til kynna að kostnaður geti legið á þessu bili. Kostnaður við Búðarhálsvirkjun, nýjustu virkjun Landsvirkjunar, er talinn vera USD 230-240 milljónir sem gerir um USD 2,5 milljón á hvert MW. Samskonar tölur fyrir Kárahnjúkavirkjun má nálgast í

ársuppgjörum Landsvirkjunar frá 2007-2010 og fá út að kostnaður á hvert MW hafi verið um USD 3,0 milljón á MW. Sem grunntilvik verður notast við USD 3,0M/MW fyrir vatnsafl.

Meiri óvissa er talinn vera í stofnkostnaði jarðvarmavirkjana þar sem óvissubíl er mun víðara. Samkvæmt skýrslu IRENA gæti stofnkostnaður legið á bilinu USD 2,5-4,5M/MW en líkt og með vatnsaflíð er hægt að finna lægri og mun hærri kostnað en þetta bil. Tölur fyrir innlend verkefni eru ekki mjög aðgengilegar en skv. Kristjáni B. Ólafssyni³⁷ ráðgjafa sem hefur fylgst náið með framgangi máli í íslenskum jarðhitaverkefnum og verkfræðistofunni Mannviti (Runólfur Maack og Kristinn Ingason, 2011) virðist sem stofnkostnaður innlendra verkefna hafi almennt verið nálægt USD 3-3,5M/MW. Hér verður notast við USD 3,5M/MW sem grunntilvik sem er heldur hærra en í vatnsafl.

Stofnkostnaður við vindorku er mun lægri en í vatnsafl og jarðgufu og óvissa mun minni. Þar er um margt önnur nálgun þar sem 70-80% af stofnkostnaðinum er sjálf vindmyllan (IRENA, 2012; EWEA, 2014). Tæknipróun hefur verið mjög ör eins og fram hefur komið og kostnaður hefur lækkað hratt með aukinni framleiðslu og aukinni samkeppni. Samkvæmt skýrslu IRENA (2012) gæti stofnkostnaður í vindorku legið á bilinu USD 1,25-2,5 M/MW sem hefur þó verið að þrengjast niður á við. Hér verður notast við USD 1,75 M/MW.

5.2.2 Rekstrarkostnaður

Rekstrarkostnaður vegur mun minna í mati á kostnaðarverði en stofnkostnaður en engu að síður er nauðsynlegt að meta hann. Með rekstrarkostnaði er hér átt við árlegan almennan rekstrar- og viðhaldskostnað sem nauðsynlegt er að ráðast í til að viðhalda eiginleikum viðkomandi virkjunarkosts til framtíðartekjuöflunar. Það er því ekki gert ráð fyrir að þurfi að endurfjárfesta á tímabilinu. Þá er ekki heldur gert ráð fyrir svokölluðu hrakvirði í lok tímabilsins þó rökstyðja megi að virði vatnsaflsvirkjana sérstaklega sé umtalsvert í lok reiknitímabils.

Rekstrarkostnaður er oftast metinn sem hlutfall af stofnkostnaði í prósentum eða sem fastur einingakostnaður. Í sumum tilfellum hefur hann verið metinn sem hlutfall af heildareiningakostnaði. Sem fyrr er mesta óvissan í jarðvarmavirkjunum þar sem

³⁷ Kristján B. Ólafsson, rekstrarráðgjafi, einn af viðmælendum höfundar.

töluverð óvissa ríkir um endingu borhola og nauðsyn á fjölda viðhaldsborana og kostnað við þær. Í vatnsafla er þekkt að rekstrarkostnaður er lágur þar sem oft á tíðum er stór hluti mannvirkja í stíflum, jarðgöngum og stöðvarhúsi sem þarfnast lítil viðhalds. Í vindorku hefur rekstrarkostnaður verið að lækka hratt með bættri tækni og vegna nýrrar hönnunar. Í skýrslu IRENA (2012) koma fram nokkur óvissubíl og sem fyrr segir mest í jarðvarma.

Sem grunngildi verður hér miðað við að rekstrarkostnaður sé 1,5% af stofnkostnaði fyrir vatnsafl og 3% fyrir jarðgufu og vindorku.

5.2.3 Byggingartími

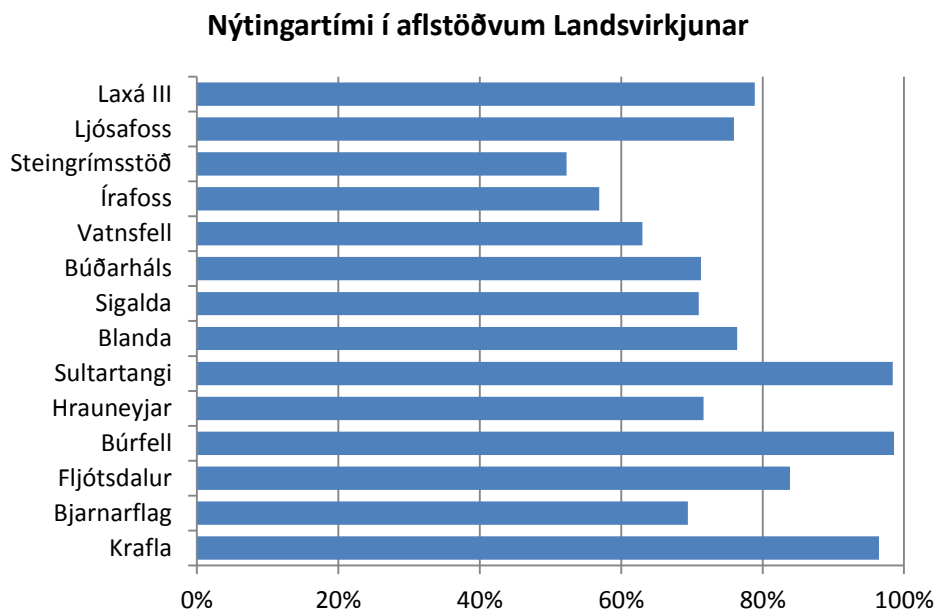
Frá því Landsvirkjun pantaði tvær 900 kv vindmyllur liðu ekki nema sex mánuðir þar til þær voru komnar í rekstur. Það er ótrúlega skammur tími. Gera má ráð fyrir að það taki lengri tíma að koma upp stærri vindmyllum og hvað þá vindmyllugarði með uppsett afl upp á nokkra tugi megawatta. Hér verður reiknað með tveimur árum sem er samt sem áður mun skemmri tími en bæði í vatnsafla og jarðvarma.

Virkjun vatnsafls krefst vandlegs undirbúnings og það fer mikið eftir því hvernig virkjun er hönnuð, staðsetningu og aðstæðum hvað áætlaður byggingartími er langur. Stærsta verkefni Landsvirkjunar, Kárahnjúkavirkjun, var í byggingu frá 2003-2007 eða ca. fimm ár þar til hún var tekin í rekstur. Með öllum undirbúningi og frágangi á virkjunarstað má segja að byggingartíminn hafi verið nær sex árum. Það þykir í raun ekki langur tími þegar þess er gætt hversu stórt (690 MW), viðamikið og flókið verk framkvæmdin var. Nýjasta virkjun Landsvirkjunar, Búðarhálsvirkjun (95 MW), hefur verið í smíðum frá árinu 2010 og var hún gangsett í mars mánuði 2014 eða um fjórum árum síðar. Með öllum undirbúningi og frágangi má bæta við einu ári sem gerir þá fimm ár. Þessi tími getur þó styst mikið ef um er að ræða viðbót eða stækkun á eldri virkjun. Hér verður reiknað með fimm árum.

Í jarðvarmavirkjun getur undirbúningstími verðið nokkuð langur ef um er að ræða ný svæði, en styttri ef um er að ræða viðbót eða stækkun á þegar virkjuðu svæði. Almennt er talið að byggingartími þegar allt er talið sé lítið styttri en í vatnsafla en hér verður reiknað með fjórum árum í grunntilviki.

5.2.4 Nýtingartími

Forsendur um nýtingartíma eru ekki eins umdeilanlegar. Nýtingartími er skilgreindur sem uppitími eða framleiðsla í klukkutímum á ári í hlutfalli við heilt ár. Í einu ári eru $24 \cdot 365 = 8760$ klst. Virkjun sem framleiðir í 8 klst. á dag hefur því $(8 \cdot 365) / 8760$ eða 33% nýtingu. Hér á landi hefur nýtingartími í vatnsafli verið mjög hár eða um og yfir 80%. Áður var fjallað um samband nýtingartíma og uppsetts afls en því meiri sem nýtingartíminn er þeim mun meiri orka fæst fyrir hvert uppsett afl.

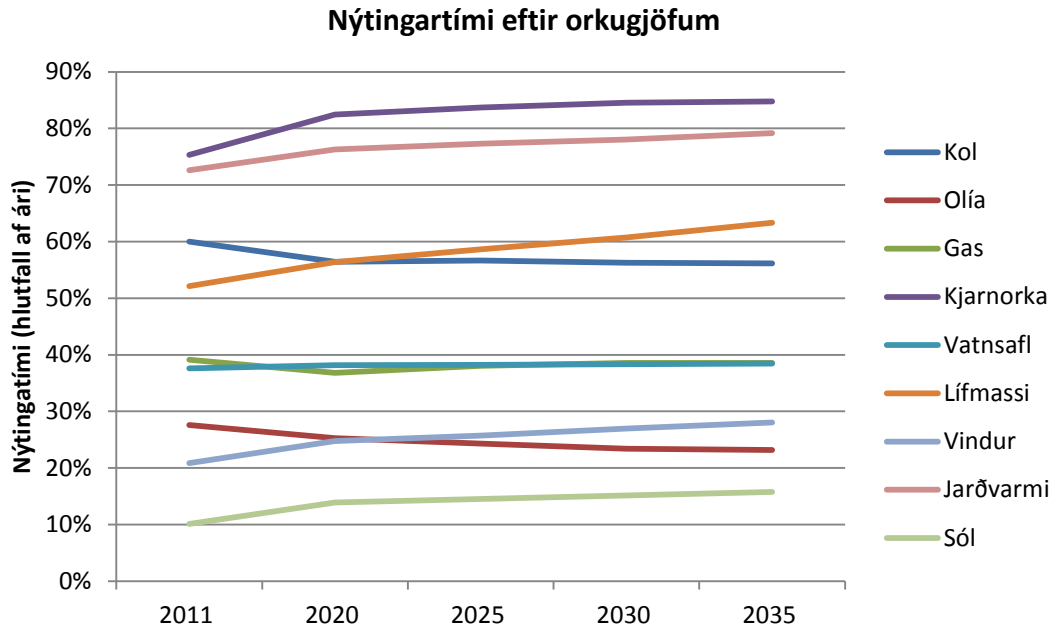


Mynd 53. Nýtingartími virkjana Landsvirkjunar (Landsvirkjun, e.d.c)

Erlendis er þetta hlutfall mun lægra eða um 40% að meðaltali (IRENA, 2012). Hér verður notast við 80% sem er sama og meðaltal vatnsaflstöðva hjá Landsvirkjun og svipað og gert er ráð fyrir í nokkrum nýjum virkjunarkostum fyrirtækisins að meðaltali.

Í jarðgufu er hlutfallið heldur hærra eða um og yfir 90% enda jarðgufuvirkjanir almennt notaðar í framleiðslu á grunnafli. Hér verður notast við 90% hlutfall sem hefur verið reynslan á Íslandi en heldur hærra en víða erlendis.

Í vindorku er hlutfallið eins og gefur að skilja mun lægra og allt niður í um 20%. Með betri tækni og miðað við þokkalegar vindaðstæður hefur nýtingartíminn þó batnað umtalsvert og er nú 30-35% all víða. Í „off shore“ vindgörðum er hlutfallið enn hærra og getur náð allt að 45-50% þar sem best lætur.



Mynd 54. Meðalnýtingartími eftir orkugjöfum (IRENA, 2012)

Reynsla Landsvirkjunar á rekstur tveggja vindmylla í Hafinu ofan Búrfells hefur verið vonum framar og virðast aðstæður þar vera svipaðar og best gerist erlendis. Á einu ári hefur meðalnýtingartíminn verið um og yfir 40% sem er svipað eða betra en gengur og gerist erlendis við rekstur vindgarða í sjó (e. off shore). Í töflu 1 má sjá uppsafnaða raforkuvinnslu þessara tveggja vindmylla og raforkuvinnslu frá upphafi³⁸. Meðalnýting er útreiknuð 44%.

Tafla 1. Vindorkumælingar hjá Landsvirkjun (Landsvirkjun, e.d.c).

Vindorkumælingar - tekið af heimasíðu Landsvirkjunar		
Upphaf rekstrar	21.1.2013	
Nú	5.4.2014	
Fjöldi daga	434	
Klst.	10.416	
Uppsett afl (kv)	1.800	
Alls vinnsla	8.263	MWst
100% nýting	18.749	MWst
Raunnýting	44,1%	

³⁸ Sjá:

<http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/throunarverkefni/vindmyllur/rauntimaupplýsingar>

Með því að fylgjast með heimasíðu Landsvirkjunar má sjá að vindmyllurnar framleiða full afköst við um 14 m/s og um 50% við 9 m/s. Með uppsetningu stærri vindmylla eða 3 MW sem Landsvirkjun er að skoða má búast við enn betri nýtingu og hefur 50% nýting verið nefnd í því sambandi (Landsvirkjun, e.d.c). Hér verður notast við 40% sem grunnildi.

5.2.5 Líftími

Þessi forsenda skiptir töluverðu máli er kemur að mati á kostnaðarverði þar sem lengri líftími án mikils viðhalds lækkar verð að öðru óbreyttu. Algilt er að vatnsaflsvirkjanir endast vel og lengi. Reynsla erlendis frá og hér á landi sýnir svo ekki verður um villst að gera má ráð fyrir 50-60 ára endingartíma. Hér verður engu að síður notast við 40 ár sem er nálægt bókhaldslegum afskriftartíma slíkra mannvirkja þó vitað sé að þau endist mun lengur.

Jarðgufuvirkjanir eru einnig taldar endast vel þó ekki sé komin jafnmikil og löng reynsla á rekstur þeirra. Hér verður notast við 30 ára líftíma fyrir jarðvarma.

Töluverð reynsla er komin á rekstur vindorkustöðva um heim allan og þar er almennt gert ráð fyrir 20-25 ára líftíma. Betri tækni hefur bætt endingu og nýtni og jafnframt dregið úr rekstrarkostnaði. Hér verður miðað við 20 ára líftíma.

Í öllum tilvikum má rökstyðja lengri líftíma eða öllu heldur reiknitímabil en þar sem ekki er gert ráð fyrir að endurfjárfest verði á reiknitímabilinu er frekar stuðst við styttra tímabil. Eftir því sem reiknitímabil er lengra eru áhrif þess að breyta tímabili minni eins og í vatnsafla vegna núvirðisáhrifa. Í sviðsmyndagreiningu hér á eftir verður nánar rætt um áhrif þess að miða við 40 ára tíma fyrir alla orkugjafana með því að endurfjárfesta eftir 30 ár í jarðvarma og eftir 20 ár í vindorku.

5.2.6 Reiknivextir

Fyrri forsendur eru að mestu byggðar á reynslu en því er ekki eins farið með reiknivextina sem byggjast á mati sem oft er huglæg skoðun þeirra sem að lokum taka ákvörðun með framkvæmdir. Val á reiknivöxtum er ein mikilvægasta forsendan auk stofnkostnaðar við mat á kostnaðarverði. Hér verður þó ekki gerð viðamikil greining á reiknivöxtum eins og oft er gert í hefðbundinni arðsemigreiningu þar sem markaður, fjármagnsskipan og skattalegt umhverfi geta haft veruleg áhrif. Þessa vegna kys

höfundur að notast við einfalda nálgun og nota orðalagið „reiknivextir“ frekar en arðsemikrafa eða WACC (e. Weighted Average Cost of Capital). Þetta er gert til að greina á milli þess sem LCOE aðferðin byggir á annars vegar og hefðbundin sjóðstreymisgreining hins vegar. Notast verður við raunreiknivexti og rauntölur í öllum reikningum í þessari greiningu nema annað sé tekið fram.

Við mat á LCOE einingarverði er nokkuð algengt erlendis að miðað sé við 10% raunreiknivexti (IRENA, 2012). Það þykir mörgum ansi vel í lagt þegar þess er gætt að um raunvexti er að ræða. Þetta eru líka mun hærrí vextir en almennt þekkt og er notað hér á landi. Sem fyrr segir er þó ekki aðalatriðið í þessari umfjöllun að meta endanlegt kostnaðarverð heldur er samanburðurinn mikilvægari. Þá skiptir minna máli hverjir endanlegir reiknivextir eru.

Til að setja þetta þó í samhengi þá er hægt að leiða út ávöxtunarkröfu eða reiknivexti eftir hefðbundum aðferðum samkvæmt CAPM aðferðafræðinni³⁹. Hún byggir á mati á ákveðnum markaðsforsendum og útleiðingu á arðsemikröfu eiginfjár ásamt mati á kostnaði við lánsfé. Síðan er þetta vegið saman með fjármögnunarhlutfalli og fæst þá mat á veginni kröfu (e. WACC) eða í okkar tilfalli vegnum reiknivöxtum. Í töflu 2 er sýnt dæmi um útleiðingu á reiknivöxtum skv. CAPM aðferðafræðinni sem endurspeglar markaðsforsendur. Tekið er fram að þetta er eingöngu dæmi og ekki mat á því hverjir reiknivextir ættu að vera. Framsetningin er þó með hefðbundnum hætti og í samræmi við viðurkennda aðferðafræði. Miðað er við útleiðingu í Bandaríkjadóllar sem eins og fyrr segir er starfrækslumynt Landsvirkjunar. Sett eru fram dæmi um 3 tilvik, A, B og C þar sem mismunandi forsendur breyta endanlegum reiknivöxtum.

³⁹ CAPM, Capital Asset Pricing Model, sjá t.d.

<http://people.stern.nyu.edu/ashapiro/courses/B01.231103/FFL09.pdf>

Tafla 2. Dæmi um útleiðingu reiknivaxta

Dæmi um útleiðingu reiknivaxta í USD		A	B	C
1	Áhættulausir vextir	4,0%	4,0%	4,0%
2	Óvogað beta gildi	0,50	0,50	0,50
3	Vogað beta gildi	1,10	0,99	0,90
4	Skuldir/eigið fé	1,50	1,22	1,00
5	Áhættuálag markaðar	6,0%	6,0%	6,0%
6	Alfa - sértækt álag	2,0%	3,5%	5,0%
7	Nafn ávöxtunarkrafa eiginfjár	12,6%	13,4%	14,4%
8	Áhættulausir vextir	4,0%	4,0%	4,0%
9	Skuldaálag	2,5%	3,0%	3,5%
10	Nafn kostnaður skulda fyrir skatt	6,5%	7,0%	7,5%
11	Hlutfall skuldsetningar	60%	55%	50%
12	Hlutfall eiginfjár	40%	45%	50%
13	Skatthlutfall	20%	20%	20%
14	Kostnaður skulda eftir skatt	5,2%	5,6%	6,0%
15	Reiknivextir (Nafn WACC)	8,2%	9,1%	10,2%
16	Verðbólga	2,0%	2,0%	2,0%
	Raunreiknivextir	6,0%	7,0%	8,0%

Ávöxtunarkrafa eiginfjár (7) er samsett af undirliggjandi áhættulausum vöxtum (1), beta gildum (2 og 3), skuldsetningu (11/12), áhættuálagi markaðar (5) auk sérstaks álags (6) sem getur verið smæðarálag eða áhættuálag í verkefnum. Óvogað beta gildi (2) segir til um áhættumat fyrirtækja miðað við enga skuldsetningu og er hér sett 0,5 sem er algengt gildi fyrir raforkufyrirtæki. Vogað beta gildi (3) tekur hins vegar mið af skuldsetningu (11/12) og skatthlutfalli (13).

Miðað við forsendur A í töflu 2 reiknast óvogað beta gildi $0,50 \cdot (1 + 60\%/40\% \cdot (1 - 20\%)) = 1,10$. Ávöxtunarkrafa á eigið fé reiknast þá sem $4\% + 6\% \cdot 1,10 + 2\% = 12,6\%$.

Kostnaður við lánsfé, vaxtakostnaður, reiknast sem undirliggjandi áhættulausir (e. risk free rate) vextir (8) að viðbættu skuldaálagi (e. margin) sem fjárfestar krefjast ofan á áhættulausa vexti (9). Þeir eru metnir hér $4\% + 2,5\%$ eða $6,5\%$. Eftir að tekið hefur verið tillit til skattspörunar vegna skuldsetningar er vaxtakostnaður metinn $6,5\% \cdot (1 - 20\%)$ eða $5,2\%$.

Vegin ávöxtunarkrafa verður þá $40\% \cdot 12,6\% + 60\% \cdot 5,2\%$ eða $8,2\%$ sem er nafnkrafa. Þegar tekið hefur verið tillit til verðbólgu er raunkrafan $6,0\% \cdot ((1 + 8,2\%)/(1 + 2\%) - 1)$.

Í forsendum B og C hefur sérstöku álagi (6) og skuldaálagi (9) verið breytt til hækkingar en á móti er dregið úr skuldsetningu (11) sem lækkar vogaða beta gildið (3). Niðurstaðan þar verður að raun reiknivextir hækka í 7% í B og 8% í C.

Sem fyrr segir er ofangreind útleiðing fyrst og fremst til fróðleiks og dæmi um hvernig mat á reiknivöxtum gæti litið út. Í þessu samhengi má geta þess að Orkustofnun hefur tekið upp svipaða aðferðafræði þar sem mat á WACC fyrir Landsnet er notað til að ákvarða tekjumörk fyrirtækisins⁴⁰. Svokölluð WACC nefnd komst að þeirri niðurstöðu í júlí 2012 að veginn fjármagnskostnaður flutningsfyrirtækisins skyldi vera 6,7% að raungildi vegna flutnings til stóriðju og 5,9% vegna flutnings til dreifiveitna. Byggt á þessu mati úrskurðaði Orkustofnun í október sama ár um leyfða arðsemi flutningsfyrirtækis. Sá úrskurður var reyndar kærður af nokkrum hagsmunaaðilum, þ.á.m. Landsvirkun, þar sem niðurstaðan varð að Orkustofnun var gert að taka nýja ákvörðun að fengnu nýju mati (Pétur Örn Sverrisson, Kristín Haraldsdóttir og Sandra Franks, 2014). Líklegt er að í framhaldinu verði krafan lækkuð.

Annað sem vert er að komi fram er val á reiknivöxtum og viðkomandi orkugjafa og hvort taka eigi tillit til mismunandi áhættuþátta við val á reiknivöxtum. Um þetta eru deildar meiningar og ekki ein rétt aðferð. Bæði sjónarmið eiga rétt á sér þar sem ýmist sama ávöxtunarkrafan er notuð óháð orkugjafa og óvissu- og áhættuþættir metnir með álagi á kostnaðarþætti. Að sumu leyti er eðlilegra að reyna að meta samband ávöxtunarkröfu (reiknivaxta) og áhættu eftir mismunandi orkugjöfum, því meiri áhætta því hærri reiknivextir. Eins eru verkefni mis áhættumikil eftir því hvar þau eru staðsett. Dæmi er um mjög háar kröfur eða reiknivexti ef talið er að aðstæður séu varasamar á tilteknum landsvæðum t.d. af pólitískum ástæðum (IRENA, 2012). Hér verður notast við sömu reiknivexti í grunntilviki en breytingu á þessari forsendu verða gerð betri skil síðar í kafla 5. Í grunntilviki verða 6% raunreiknivextir notaðir óháð orkugjöfum til að sjá betur áhrif á LCOE verð í samanburði milli orkugjafa og við aðrar forsendur.

5.2.7 Samantekt á forsendum

Í töflu 3 eru teknar saman þær grunnforsendur sem notaðar eru til grundvallar útreikningum á kostnaðarverði. Í kaflanum um samanburðinn er þessum forsendum

⁴⁰ Sjá <http://2012.landsnet.is/peningar.php>

breytt og gerðar næmnigreiningar fyrir hvern kost fyrir sig á hverri forsendu til að gera grein fyrir áhrifum einstakra forsenda á kostnaðarverð. Ljóst er að áhrif breytinga í forsendum eru mismiklar og samanlögð frávik geta leitt til þess að kostnaðarmat getur legið á breiðu bili.

Tafla 3. Samantekt á grunnforsendum kostnaðarmats

Samantekt grunnforsendna	Vatn	Varmi	Vindur	
Uppsett afl	50	50	50	MW
Nýtingartími	80%	90%	40%	
Orkuvinnsla	350	394	175	GWst
Kostn. pr. MW	3,00	3,50	1,75	USD/MW
Stofnkostnaður	150	175	87,5	USD/M
Rekstur og viðhald í % af stofnk.	1,5%	3,0%	3,0%	
Líftími	40	30	20	Ár
Byggingartími	5	4	2	Ár
Reiknivextir (raun)	6,0%	6,0%	6,0%	

Hér verður ekki lagt mat á hvaða forsendur eru líklegri en aðrar til að breytast en ljóst er að reiknivextir eru sú forsenda sem leggja þarf sérstakt mat á í hverju tilviki. Aðrar forsendur eru meira og minna byggðar á reynslutölum þar sem óvissa er mismikil.

5.3 Kostnaðarverð

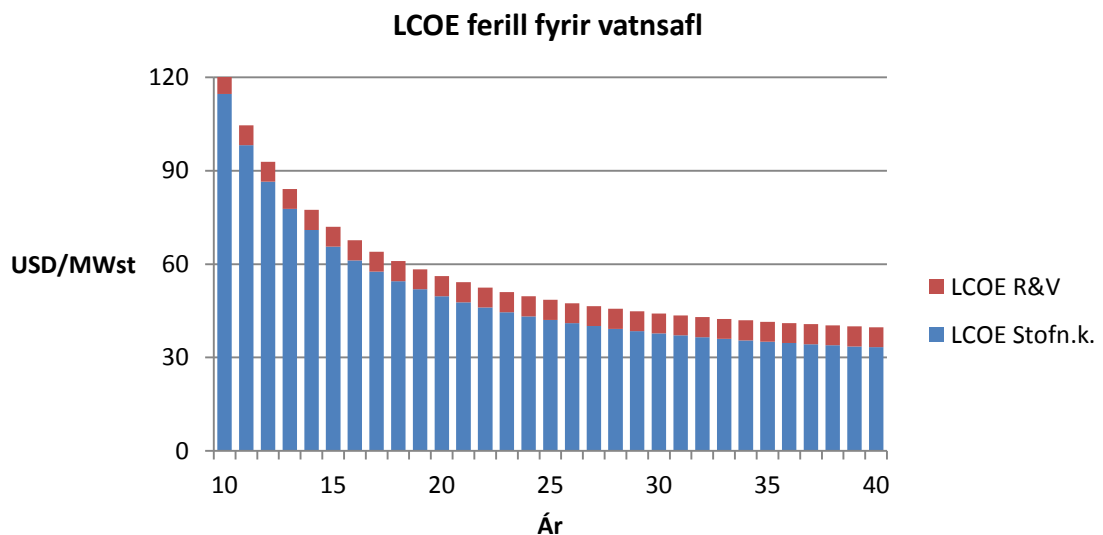
Í eftirfarandi útreikningum er fyrst og fremst um samanburð að ræða á kostnaðarverði milli þessara þriggja orkugjafa. Einingaverð eru þannig eingöngu vísbending eða nálgun á því hvað endanlegt verð geti verið og ber að taka með fyrirvara. Þá skal ítrekað að þessi nálgun er ekki mat á arðsemi eða framlegð þar sem ekkert liggur fyrir um markaðsverð orkunnar sem hér er ekki til umfjöllunar. Það ber því ekki að horfa á endanlegt kostnaðar- eða lágmarksverð heldur miklu frekar á samanburðarverð á þessum þremur orkugjöfum sem getur legið á nokkuð breiðu bili.

Í kafla 5.1 var farið vel yfir aðferðafræðina og helstu forsendur voru síðan kynntar í kafla 5.2. Í þessum kafla verður þetta tvinnuð saman og útkoman kynnt. Byrjað verður á vatnsafli, síðan jarðvarma og loks vindi. Gerðar verða næmnigreiningar á þeim forsendum sem kynntar hafa verið og að lokum verða niðurstöður teknar saman. Þessi

samanburður er gerður án tillits til kostnaðar við reiðuafli í vindorku en það verður skoðað betur í kafla 5.4.

5.3.1 Vatnsorka

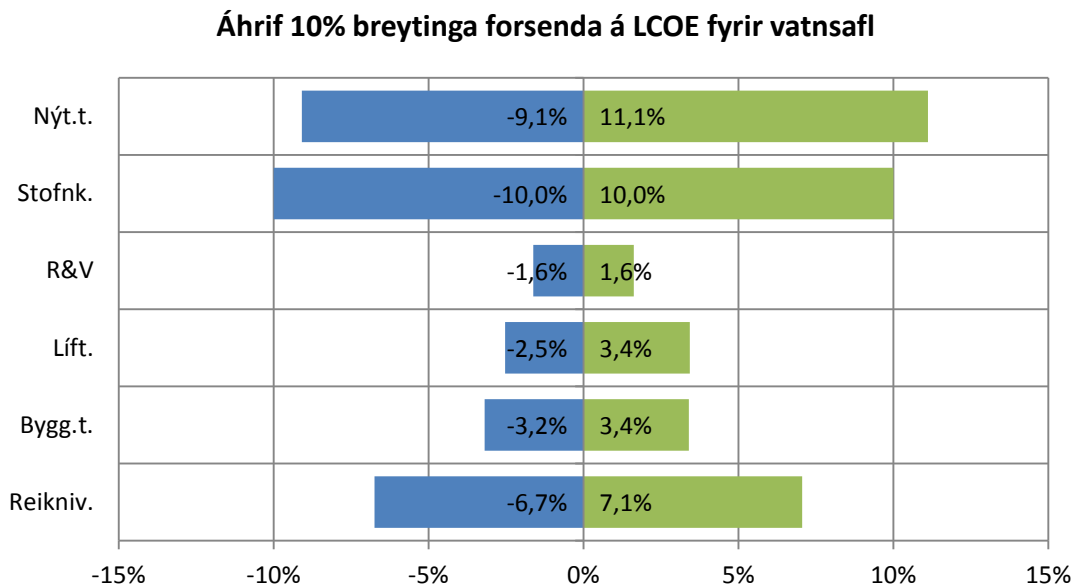
Miðað við áður gefnar grunnforsendur lítur LCOE ferillinn út eins og mynd 55 sýnir. Í lok 40 ára tímabils er hlutur stofnkostnaðar 84% á móti 16% í rekstrarkostnaði sem gefur til kynna tiltölulega lítil áhrif rekstrarkostnaðar eins og við var búist. Túlka ber myndina þannig að byggt á undirliggjandi forsendum og þar með talið reiknivöxtum þarf orkuverð að vera að meðaltali um 40 USD/MWst miðað við 40 ára tímabil. Sé miðað við styttra tímabil þá þarf verðið að vera hærra. Hver súla táknar það meðalverð sem þarf að nást frá upphafi til þess árs sem súlan gildir eins og fyrr segir. Allar tölur eru rauntölur. Fyrstu 10 árunum er sleppt á myndinni.



Mynd 55. Mat á LCOE verð fyrir vatnsafl

Sem fyrr segir eru grunnforsendur metnar úr frá reynslutölum bæði hér á landi og erlendis. En eins og fram hefur komið geta einstök verkefni, einkum í vatnsafl og jarðvarma, verið afar mismunandi. Þannig getur staðsetning haft mikil áhrif, stærð, nálægð við svæði sem þegar hafa verið rannsökuð auk fleiri atriða. Því er mikilvægt að einblína ekki á tölurnar einar sér en þess heldur að gera grein fyrir hvað einstaka forsendur hafa að segja um útkomuna. Áður hefur verið fjallað um þær 6 lykilforsendur sem geta haft mikil áhrif á útkomuna. Til að kanna þau áhrif betur hefur þessum

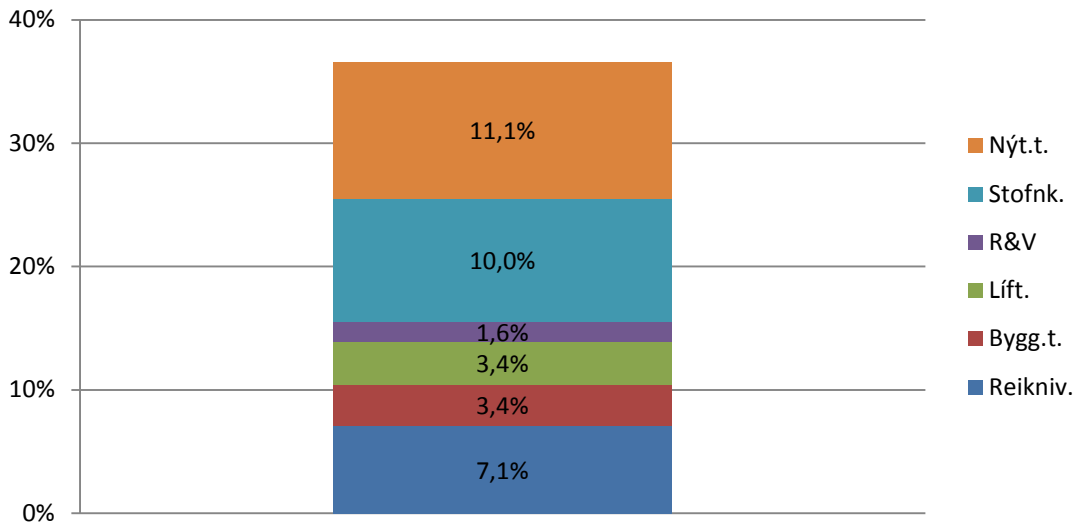
forsendum verið breytt á mynd 56 um 10% jafnt í báðar áttir. Byggingartími er þó látinn breytast um 1 heilt ár til einföldunar.



Mynd 56. Áhrif 10% í einstökum forsendum á LCOE verð fyrir vatnsafl

Myndin sýnir áhrif þess að breyta forsendum um 10% á LCOE verð miðað við grunntilvik. Þannig má sjá að nýtingartími og stofnkostnaður hafa mest áhrif á LCOE verð og reiknivextir koma þar á eftir. Áhrif breytinga í stofnkostnaði á LCOE verð eru línuleg og nánast það sama gildir um breytingar á nýtingartíma eða nálægt 10%. Aðrar forsendur hafa mun minni áhrif en samanlögð áhrif þeirra eru þó svipuð. Samanlögð áhrif af 10% breytinga þessara 6 lykil forsenda á LCOE verð eru +37% til -33% miðað við grunntilvik. Samanlögð áhrif til hækkunar eru sýnd á mynd 57 og sem fyrr vega stofnkostnaður og nýtingartími liðlega helming eða um 20% á grunn LCOE verð.

Uppsöfnuð áhrif 10% hækkun á forsendum á LCOE fyrir vatnsafl



Mynd 57. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE verð fyrir vatnsafl

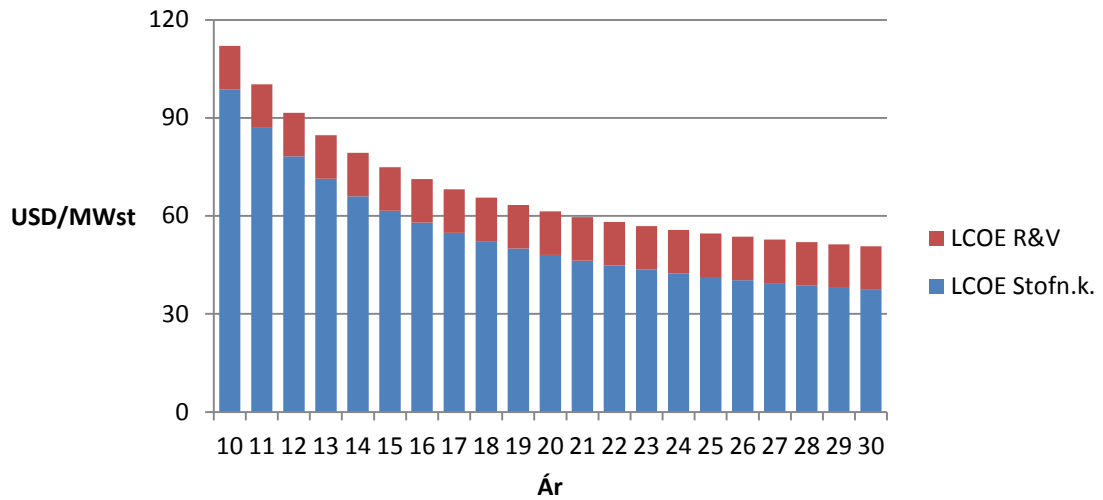
Reiknivextir hafa svipuð áhrif og hinar þrjár forsendurnar til samans. Þannig má greinilega sjá að breytingar í einstökum forsendum hafa mismikil áhrif á reiknað LCOE verðið. Þau eru líka mismikil eftir því hvaða orkugjafi á í hlut. Áherslan er lögð á niðurstöðubil frekar en eina tölu og enn skal ítrekað að aðaláherslan er hér á samanburðinn frekar en einstakar tölur.

Hér á eftir verður gerð samskonar athugun fyrir jarðvarma og vindorku með sömu breytingum á forsendum eða 10% hliðrun í báðar áttir. Eftir það verður síðan umfjöllun um ýmis álitamál, óvissu og áhættu þessara orkugjafa og könnuð áhrif þess að hafa mismunandi óvissubil í forsendum og mismunandi reiknivexti.

5.3.2 Jarðvarmi

Kostnaðarferill fyrir jarðvarma svipar til ferils í vatnsafl en greina má hvað rekstrar- og viðhaldskostnaður er hærra hlutfall af heildar LCOE verði. Annars er ferillinn svipaður nema styttri. Hlutur rekstrar- og viðhaldskostnaðar er um 25% í lok 30 ára tímabils sem er mun hærra hlutfall en í vatnsafl. Einingaverðið er hér metið um 51 USD/MWst m.v. grunntilvik.

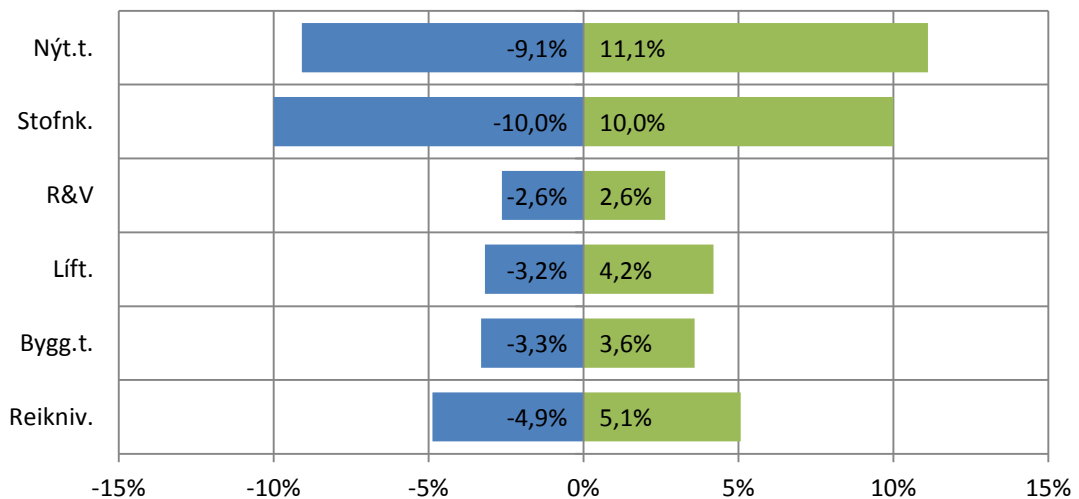
LCOE ferill fyrir jarðvarma



Mynd 58. LCOE ferill fyrir jarðvarma

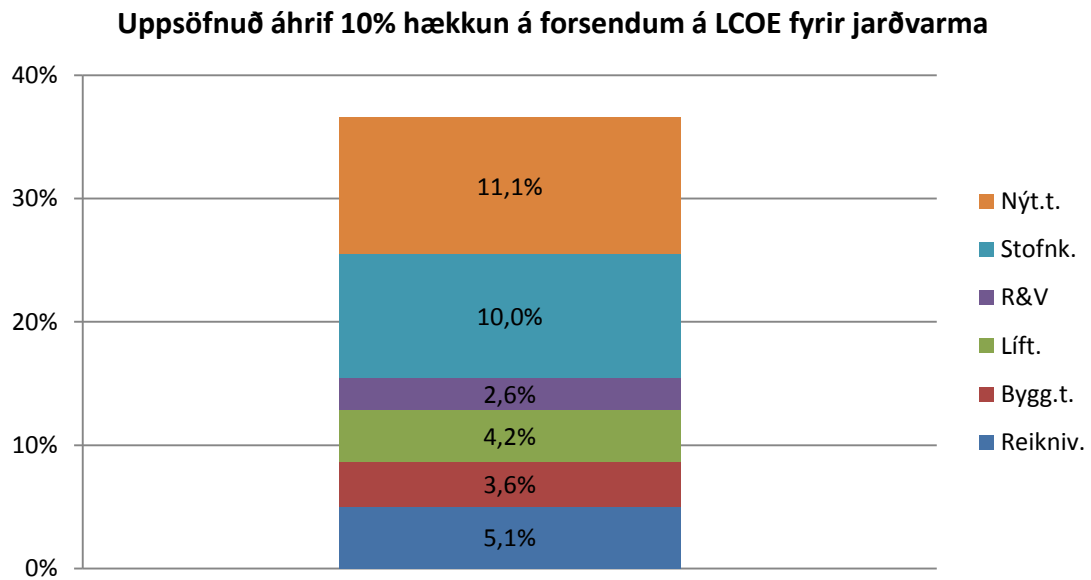
Ef skoðuð er 10% næmnigreining á forsendum fæst svipað munstur og í vatnsafli með lítils háttar áherslumun. Líftími hefur heldur meiri áhrif en reiknivextir minni vegna styttri líftíma. Sem fyrr er samband stofnkostnaðar og nýtingartíma því sem næst línulegt og hefur sömu áhrif og í vatnsafli.

Áhrif 10% breytinga forsenda á LCOE fyrir jarðvarma



Mynd 59. Áhrif 10% í einstökum forsendum á LCOE verð fyrir jarðvarma

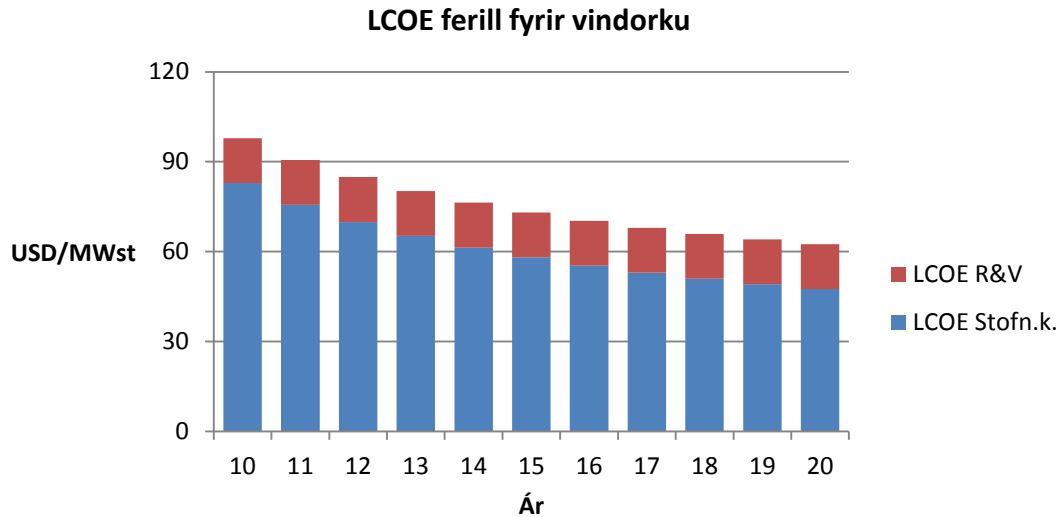
Þegar skipting uppsafnaðra 10% áhrifa eru skoðuð má greinilega sjá að reiknivextir hafa minni áhrif vegna styttri líftíma, líftími og rekstrarkostnaður hafa heldur meiri áhrif en í vatnsafla.



Mynd 60. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE verð fyrir jarðvarma

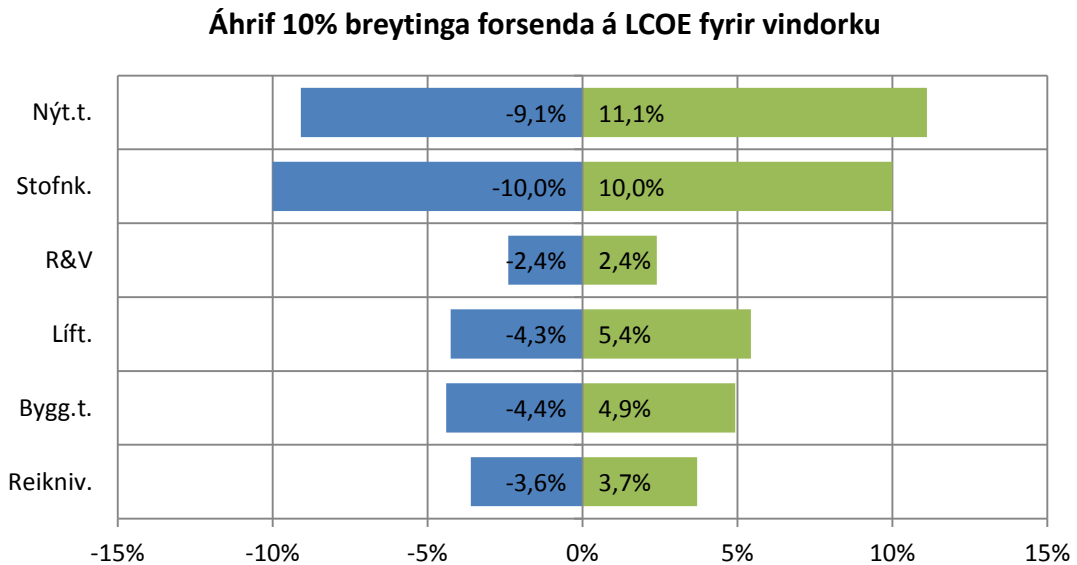
5.3.3 Vindorka

Vindorka sker sig nokkuð úr í þessum samanburði. Hér er miðað við 20 ára tímabil eða helmingi styttra tímabil en í vatnsorku. Hluttur rekstrar- og viðhaldskostnaðar í lok tímabilsins er um 24% eða svipað og í jarðvarma. Verðið er lægst af þessum orkugjöfum eftir 10 ár en hæst ef horft er til loka 20 ára tímabils eða um 62 USD/MWst.



Mynd 61. LCOE ferill fyrir vindorku

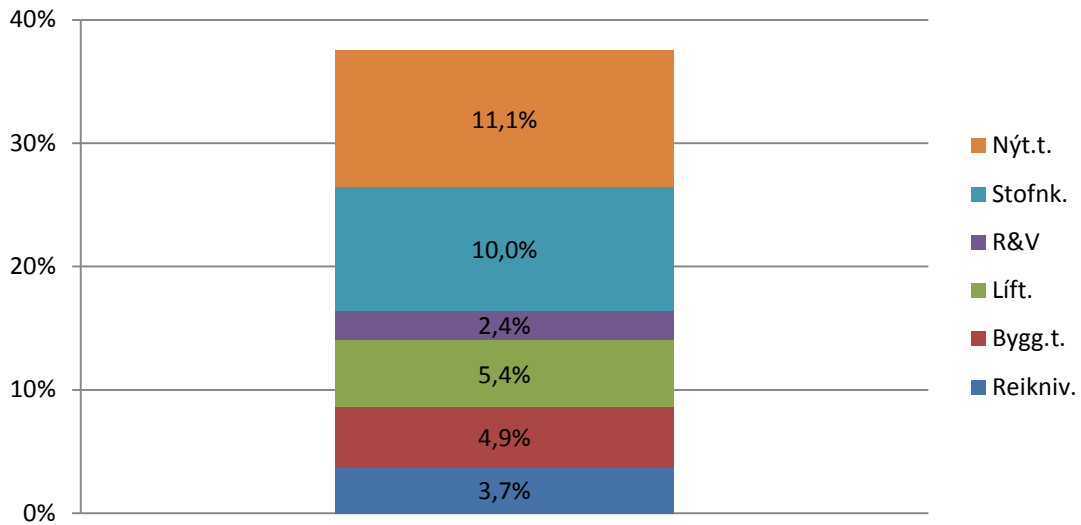
Sem fyrr gildir það sama fyrir stofnkostnað og nýtingartíma, sambandið er nánast línulegt þar sem 10% breyting hreyfir LCOE verð um sama hlutfall. Vegna styttri líftíma hefur breyting á honum hins vegar mestu áhrifin miðað við hina orkugjafana og að sama skapi veða reiknivextir minna sem sést vel á mynd 62.



Mynd 62. Áhrif 10% í einstökum forsendum á LCOE verð fyrir vindorku

Heildaráhrifin eru hér svipuð og í vatnsafli og jarðvarma sem hlutfall af grunnverði LCOE eða +/- 34 til 37% þannig að bilið er sem fyrr nokkuð breitt.

Uppsöfnuð áhrif 10% hækkun á forsendum á LCOE fyrir vindorku



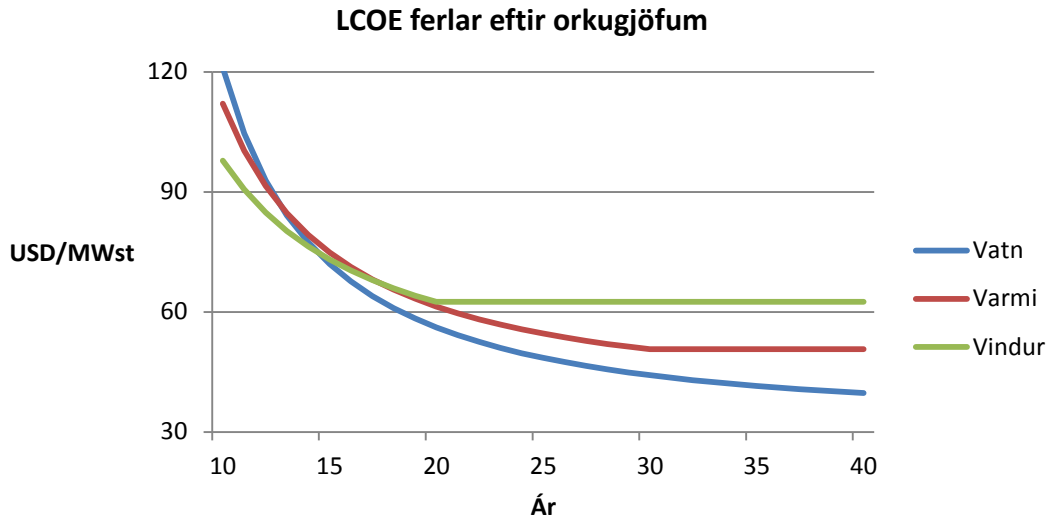
Mynd 63. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE verð fyrir vindorku

Sem fyrr segir þá er ekki gert ráð fyrir kostnaði við reiðuafl en færa má rök fyrir því að taka beri tillit til þess í kostnaði við vindorku. Þetta og fleiri álitamál verða rædd í kafla 5.4 hér á eftir.

5.3.4 Samantekt

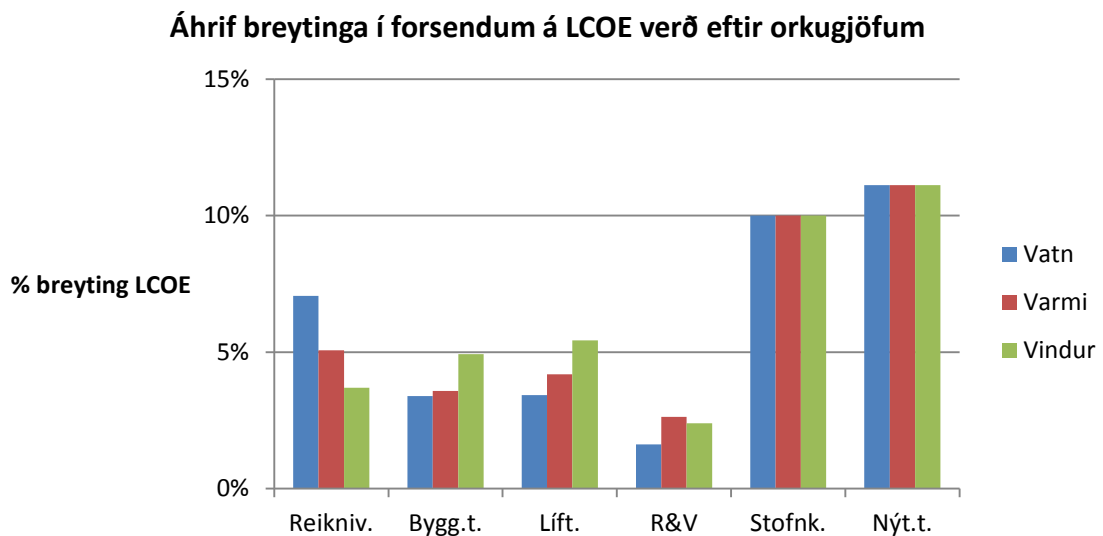
Hér liggja nú fyrir niðurstöður fyrir þessa þrjá orkukosti eina og sér en fróðlegt er að bera þá nánar saman. Niðurstaðan var að lægsta verðið er í vatnsafli, næst lægsta í jarðvarma og hæsta verðið í vindorku miðað við grunnforsendur.

Þetta má sjá nánar á mynd 64 þar sem allir ferlarnir eru teknir saman. Vegna lágs stofnkostnaðar í vindorku er kostnaðarverðið þó lægst í upphafi en verðið lækkar svo mun hægar en í vatnsafli og jarðvarma vegna aukins þunga í solumagni yfir tíma. Vatnsorkan er þyngst í upphafi en vegna langs líftíma lækkar verðið stöðugt yfir 40 ára tímabil. Í lok líftíma í jarðvarma og vindorku er verðið stöðugt þar sem ekki er gert ráð fyrir endurfjárfestingum og áframhaldandi sölu. Þetta verður skoðað nánar í kafla 5.4.



Mynd 64. Samanburður á LCOE ferlum eftir orkugjöfum

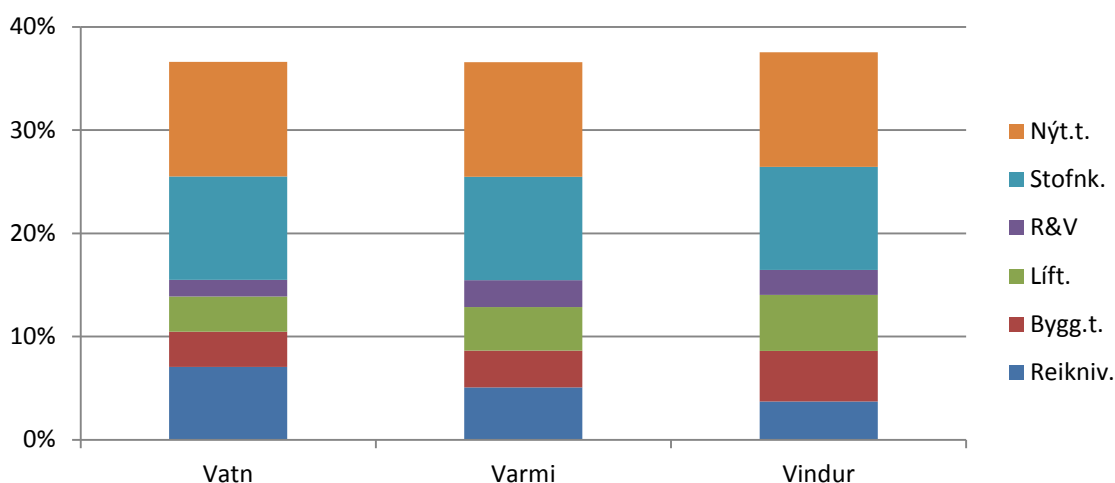
Í öllum tilvikum eru áhrif breytinga í stofnkostnaði og nýtingartíma eins en áhrif annarra forsenda eru mismunandi eins og sýnt er á mynd 65 (áhrif til hækkunar eingöngu). Breyting á stofnkostnaði er línuleg í öllum tilvikum og áhrif breytinga í nýtingartíma eru eins eftir orkugjöfum. Reiknivextir hafa mest áhrif í vatnsafli þar sem reiknitímabil er lengst og núvirðisreiknigar hafa því mest áhrif.



Mynd 65. Áhrif 10% breytinga á LCOE verð eftir orkugjöfum

Uppsöfnuð breyting 10% frávika í forsendum eru svipuð en innbyrðis áhrif eru mismunandi.

Áhrif 10% frávíka í forsendum á LCOE eftir orkugjöfum



Mynd 66. Skipting samanlagðra 10% áhrifa forsenda á LCOE eftir orkugjöfum

Til upprifjunar eru hér tekin saman þau 10% forsendubil sem valin voru jöfn við alla orkugjafana. Byggingartími miðast við +/- 1 ár. Sjá má að með jöfnum frávikum er um að ræða óraunhæfar forsendur fyrir nýtingartíma í vatni og jarðvarma þar sem efri mörkin eru of há, sérstaklega í jarðvarma.

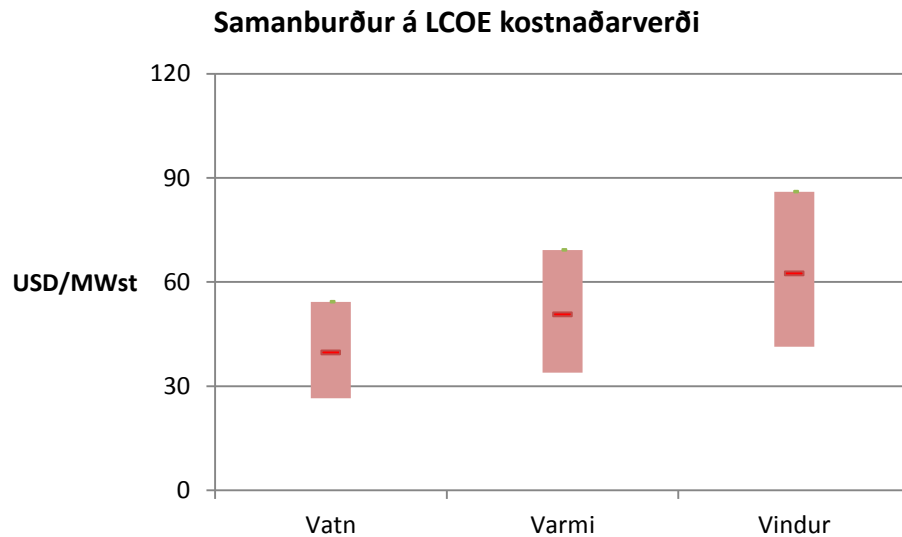
Tafla 4. Forsendur 10% sviðsmyndagreiningar

Sviðsmyndir	Vatn		Jarðvarmi		Vindur	
	Betra	Verra	Betra	Verra	Betra	Verra
10% frávik						
Nýtingartími	88%	72%	99%	81%	44%	36%
Kostn. pr. MW	2,70	3,30	3,15	3,85	1,58	1,93
R&V í % af stofnk. *)	1,4%	1,7%	2,7%	3,3%	2,7%	3,3%
Líftími	44	36	33	27	22	18
Byggingartími	4	6	3	5	1	3
Áhætta (reiknivextir)		6%		6%		6%

*) Rekstrar- og viðhaldskostnaður í % af stofnkostnaði

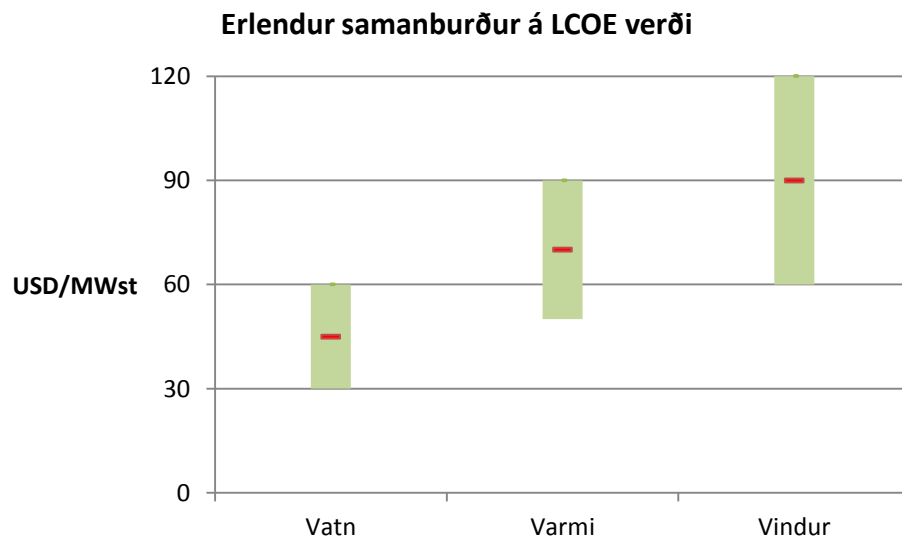
Niðurstöður á kostnaðarverði eru svo sýndar á mynd 67 á nokkuð breiðu bili sem skýrist af breytingum á grunnforsendum um +/- 10% á öllum forsendum til samans. Sem fyrir segir ber að horfa á niðurstöðubilið fyrst og fremst en ekki endilega grunnverðið

eða miðjuna. Eins og fram hefur komið má finna einstök verkefni sem rúmast innan þessara bila í öllum orkugjöfum og jafnvel fyrir utan þau og þá líklega frekar til hækkunar (IRENA, 2012). Sjá má að lægsta gildi í vindi er neðar en hæsta gildi í vatnsafla og lægsta gildi í jarðvarma er neðan miðgildis í vatnsafla. Óvissubil er hér mest í vindorku en minnst í vatnsorku.



Mynd 67. Samanburður á LCOE verði eftir orkugjöfum

Séu þessar niðurstöður bornar saman við erlend viðmið má sjá nokkuð lík bil í skýrslu IRENA frá 2012 um þessa orkugjafa.



Mynd 68. Erlendur samanburður á LCOE eftir orkuverðum (IRENA, 2012)

Ekki er mikill munur á vatnsafla en jarðvarmi og vindur hafa hliðrast talsvert upp á við. Skýringin gæti legið í forsendum um hærri reiknivexti en í erlendum samanburði er oftast miðað við 10% raunreiknivexti en hér á undan var miðað við 6% reiknivexti. Þetta ásamt fleiri atriðum verður skoðað nánar í næsta kafla.

5.4 Ýmis álitamál

Eins og áður sagði eru þessir orkugjafar um margt ókirkir og því ber að taka niðurstöðu um kostnaðarmat með fyrirvara. Þá geta, eins og fram hefur komið, einstakir kostir innan þessara orkugjafa verið mjög mismunandi og því verður niðurstaðan alltaf á nokkuð breiðu bili. Þá geta aðrir þættir haft mikil áhrif á val og kostnaðarmat orkugjafa og verður fjallað um nokkur atriði í þessum kafla þar á meðal sjónarmið um reiðuafli.

5.4.1 Reiðuafli

Ekki er hægt að segja skilið við samanburð á þessum orkugjöfum nema kanna sjónarmið um að taka verði tillit til þess að vindorkan krefst þess að til sé reiðuafli í raforkukerfinu sem grípa má til þegar vindur er ekki nægur.

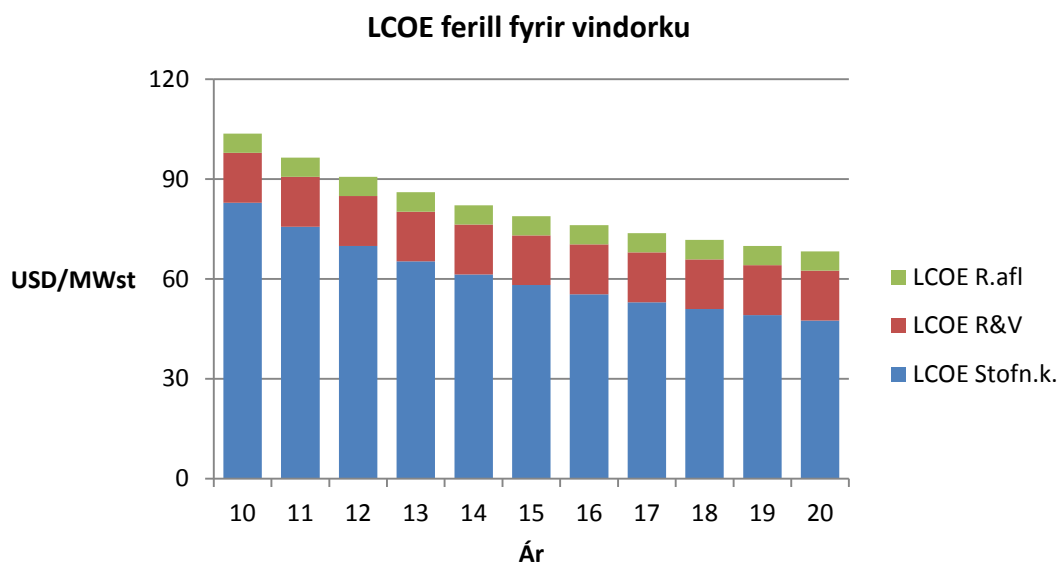
Það hefur áður komið fram að gríðarlegur vöxtur hinna „óstöðugu“ orkugjafa erlendis, sólar- og vindorku, hefur gert það að verkum að þörf fyrir reiðuafli hefur orðið mikilvægari þegar þessir orkugjafar eru ekki að framleiða. Fyrir utan grunnafli sem oftast er ekki fæst með brennslu kola og kjarnorku er þörf á stýranlegum orkugjöfum eins og vatnsorku og gasorkuverum. Í Evrópu hafa endunýjanlegir orkugjafar forgang umfram aðra mengandi orkugjafa en á Íslandi eru auðvitað allt aðrar aðstæður. Spurningin er að hve miklu leyti taka eigi tillit til reiðuafli við samanburð á Íslandi og hvað eigi að greiða fyrir það.

Hér verður ekki farið í viðamikla rannsókn við mat á kostnaði við reiðuafli en hjá Landsvirkjun⁴¹ hefur reiðuafli bæði verið verðlagt sem jaðarkostnaður við uppsett afli í vatnsafla og sem árlegur kostnaður. Landsvirkjun hefur í gegnum tíðina verið það fyrirtæki sem hefur getað selt mest reiðuafli til Landsnets. Önnur not gætu verið að nýta afli í kerfinu að hluta til uppbyggingar í vindorku sem er líklegt að verði raunin við samrekstur fyrirtækisins á rekstri vatns- og vindorku. Í viðtölum við starfsmenn Landsvirkjunar kom fram að áætlað er að til séu 2-300 MW í reiðuafli í raforkukerfinu án

⁴¹ Skv. viðtölum við sérfræðinga hjá Landsvirkjun

Þess að þurfi að virkja. Við samanburðinn verður hér sett upp nálgun á þátttöku vindorku í kostnaði við að hafa tiltækt reiðuafl.

Talið er að jaðarkostnaður við uppsett afl í vatnsafla geti verið USD 0,75M/MW eða sem svarar til USD 0,045M/MW á ári reiknað yfir 40 ára tímabil. Þannig má nálgast kostnað við reiðuafl sem ígildi viðbótarrekstrarkostnaðar vindorku á ári við þátttöku í kostnaði við reiðuafl. Miðað við 50 MW uppsett afl og 40% nýtingartíma er nálgunin sú að vindorkan þurfi að taka þátt í $50 \text{ MW} * 40\% = 20 \text{ MW}$ í uppsettu reiðuafla (Landsvirkjun, viðtöl). Kostnaðurinn telst þá vera USD 0,9M/ári ($20 * 0,045 = 0,9$). Þessi fjárhæð bætist við árlegan rekstrar- og viðhaldskostnað sem eins og áður kom fram var metinn 3% af stofnkostnaði⁴². Þannig hækkar árlegur rekstrarkostnaður úr USD 2,6M í USD 3,5M sem hækkar LCOE verðið um 8% að öðru óbreyttu. Breytingin sést vel á mynd 69 þar sem litið er á kostnað við reiðuafl sem hluta af árlegum kostnaði vindorku.

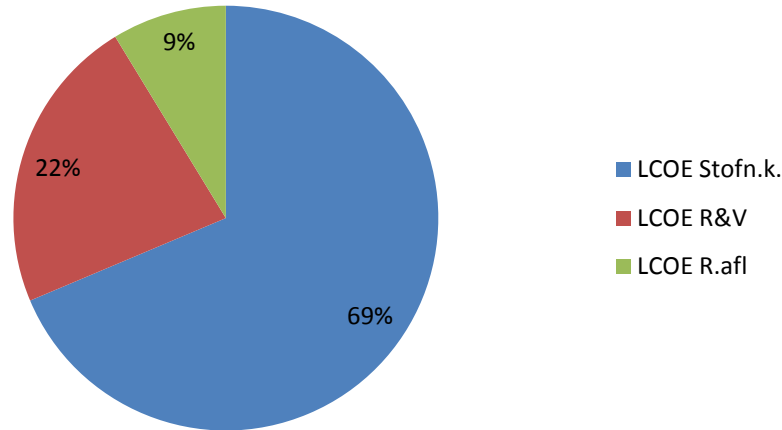


Mynd 69. LCOE ferill fyrir vindorku að teknu tilliti til þátttöku í kostnaði við reiðuafl

Sett í samhengi samsvarar þetta hækkun á rekstrarkostnaði úr 3% í 4% af stofnkostnaði, að stofnkostnaður hækki úr USD 1,75M/MW í um 1,90M/MW eða að reiknivextir hækki úr 6% í 7,3% svo dæmi séu tekin. Skipting LCOE verðs miðað við 20 ára tímabil má sjá á mynd 70 (R&V stendur fyrir rekstur og viðhald).

⁴² USD 1,75M/MW * 50MW = USD 87,5M * 3% = USD 2,6M + 0,9M = 3,5M/ári

Skipting LCOE fyrir vindorku



Mynd 70. Skipting LCOE verðs fyrir vindorku að teknu tilliti til reiðuafis

5.4.2 Líftími

Eins og áður hefur komið fram var miðað við 40 ára líftíma eða reiknitímabil í vatnsorku, 30 ár í jarðvarma og 20 ár fyrir vindorku sem er nálægt bókfærðum afkriftartíma viðkomandi orkugjafa. Í kafla 5.3 mátti sjá áhrif þess að breyta líftíma um +/- 10% að öðru óbreyttu. Rökstyðja má að til að gæta samræmis við vatnsafl þyrfti að endurfjárfesta í jarðvarma eftir 30 ár og í vindi eftir 20 ár. Á móti endurfjárfestingu er eðlilegt að bæta við 10 árum til viðbótar í orkusölu í jarðvarma og 20 árum í vindi með óbreyttu magni. Séu þessar breytingar gerðar kemur í ljós að miðað við 40 ára líftíma hafa þær sáralítill áhrif á LCOE verðið þar sem áhrifin koma seint fram og hafa lítið að segja í núvirðisreikningum. Aukið magn með lengri tíma vegur upp endurfjárfestinguna. Við munum skoða nýja LCOE ferla síðar í kafla 5.4 þegar öðrum álitamálum hafa verið gerð skil.

5.4.3 Óvissa, áhætta

Í þeim samanburði sem gerður var í kafla 5.3 var ekki sérstaklega reynt að meta ýmsa og mismunandi óvissu- og áhættuþætti við undirbúning, framkvæmd og rekstur virkjana með þessum þremur orkugjöfum. Óvissubíl var fengið með því að hliðra öllum

forsendum um 10% frá grunntilviki jafnt í báðar áttir. Hins vegar er áhugavert að reyna að meta þessa þætti með tilliti til þeirra atriða sem þegar hefur verið fjallað um í fyrri köflum.

Það er óumdeilt að veruleg óvissa tengist undirbúningi og framkvæmdum við vatnsafls- og jarðvarmavirkjanir. Að sumu leyti er tekið tillit til hennar við gerð kostnaðaráætlana en ýmislegt getur farið úrskeiðis sem ekki var reiknað með. Dæmi um þetta er stíflu- og jarðgangagerð í vatnsaflsvirkjunum og boranir við jarðvarmavirkjanir. Við bætist svo óvissa í jarðvarma varðandi kostnað við viðhaldsboranir og takmörkun útblásturs. Þessu er ekki til að dreifa við vindorku þar sem tiltölulega fáir óvissuþættir eru til staðar.

Rekstraróvissa er metin frekar lítil nema í jarðvarma þar sem töluverð óvissa getur verið með endingu svæða og þar með þörf á viðhaldsborunum. Fréttir um minnkandi afköst Hellisheiðarvirkjunar⁴³ eru dæmi um óvissu um framtíðarafköst jarðvarmavirkjana án nauðsynlegra viðhaldsborana.

Breytingar á veðurfari geta haft í för með sér breytingar á vatnasviðum vatnsaflsvirkjana eins og dæmin sanna þó almennt sé talið að með hlýnandi veðurfari verði meira innrennsli til vatnsaflsvirkjana. Á þessu geta verið undantekningar eins og hér hefur áður komið fram. Þetta er einnig dæmi um óvissu þó hún sé engan veginn sambærileg við jarðvarmann.

Að lokum má nefna óvissu og áhættu samfara því að reisa og reka virkjanir á svæðum þar sem eldvirkni er til staðar. Eldsumbrot og jarðhræringar eru ávallt varhugaverð og geta leitt til breytinga og skemmda á virkjunarsvæðum og borholum. Þetta getur þó átt við alla orkugjafana en þó ber að geta þess að beislun vindorku getur verið mjög ákjósanlegur kostur með tilliti til dreifingar á þessum áhættuþætti.

Þegar þetta er tekið saman er ljóst að vindorkan hefur marga kosti fram yfir bæði vatnsorku og jarðvarma sem vert er að gefa meiri gaum. En hvernig er hægt að meta það? Venjulega er það gert með því að meta óvissu með sérstöku álagi ofan á kostnað. Alþekkt er að meiri áhættu í verkefnum er mætt með hækkingu á arðsemikröfu eða reiknivöxtum.

⁴³ Sjá frétt RÚV frá 10.6.2013, <http://www.ruv.is/frett/vekur-upp-spurningar-um-virkjanir>

Til að meta mismun á óvissu verður hér miðað við óbreytt +/- 10% óvissubíl varðandi stofn- og rekstrarkostnað í vindorku. Óvissan er aukin í 20% í vatnsaflí og 30% í jarðvarma. Þetta er gert til að meta mismikla óvissuþætti í undirbúningi, byggingu og rekstri þessara orkugjafa í samræmi við það sem áður hefur komið fram. Hér verður miðað við að óvissubíl sé jafnt í báðar áttir en ýmiss rök benda til þess að óvissan sé meiri til hækkunar á kostnaði vegna almennrar tilhneigingar til bjartsýni við áætlanagerð. Þetta á sérstaklega við stærri og flóknari verkefni og kalla mætti „bjartsýnishneigð“ (e. optimism bias)⁴⁴. Þannig mætti t.d. rökstyðja að óvissubíl ætti frekar að vera 5-10%, 10-20% og 15-30% þar sem neðri talan er til lækkunar og sú efri til hækkunar. Erlend tölfræði styður þetta og má nefna að breska ríkið hefur t.d. gefið út leiðbeiningar um þetta efni þar sem áhersla er lögð á mikilvægi þess að áætlanir byggji á reynslutölum svipaðra verkefna og menn læri og taki mið af frávikum sem upp hafa komið í fyrri verkefnum (HM Treasury, 2013).

Til að meta mismunandi áhættu er notast við óbreytta forsendu um reiknivexti fyrir vindorku eða 6% raunvexti. Áhætta í vatnsorku er metin hærrí eða sem svarar til 1 prósentustigs eða 7%. Áhættan er metin hæst í jarðvarma þar sem álagið er metið 2% ofan á vindorku og verða reiknivextir því 8% að raungildi. Dæmi um útleiðingu á mismuandi reiknivöxtum má sjá í töflu 2.

Forsenda um rekstrar- og viðhaldskostnað er látin vera óbreytt frá grunntilviki þar sem hann er metinn sem hlutfall af stofnkostnaði og breytist því í takt við breytingar á honum. Óvissubíl um nýtingartíma er óbreytt frá grunntilviki í vindorku eða 10% en minnkað í 5% í vatnsaflí og jarðvarma þar sem það er talið minna. Forsenda um breytingu á byggingartíma er óbreytt eða +/- eitt ár.

5.4.4 Nýr samanburður

Í kafla 5.3 var grunnforsendum breytt um 10% jafnt í báðar áttir til þessa að gera grein fyrir helstu áhrifaþáttum á LCOE verðið óháð öðrum álitamálum. Hér að ofan var rætt um ýmis álitamál sem ekki var tekið tillit til í grunnsamanburðinum. Þetta voru atriði eins og þátttaka vindorku í reiðuafllskostnaði, samræming á líftíma, mat á óvissu með

⁴⁴ Sjá t.d. http://www.ejtir.tbm.tudelft.nl/issues/2010_01/pdf/2010_01_03.pdf

; <http://www.prismdecision.com/the-planning-fallacy-and-optimism-bias>

mismunandi álagi á stofnkostnað og mat á áhættu með mismunandi reiknivöxtum. Í töflu 5 má sjá samantekt fyrir forsendur nýrrar sviðsmyndagreiningar.

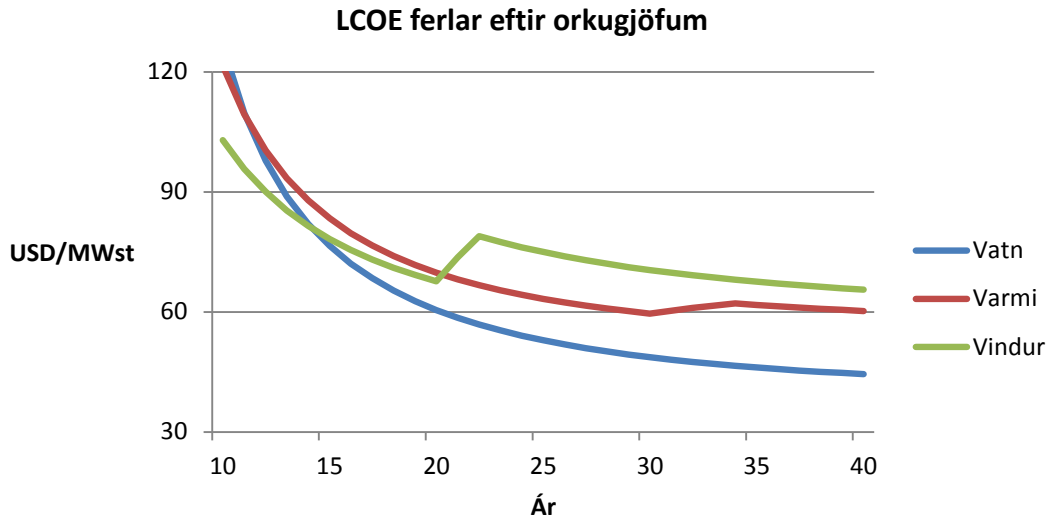
Tafla 5. Forsendur nýrrar sviðsmyndagreiningar

Sviðsmyndir	Vatn		Jarðvarmi		Vindur	
	Betra	Verra	Betra	Verra	Betra	Verra
Nýtingartími	84%	76%	95%	86%	44%	36%
Kostn. pr. MW	2,40	3,60	2,45	4,55	1,58	1,93
R&V í % af stofnk. *)	1,5%	1,5%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Líftími	40	40	40	40	40	40
Byggingartími	5	6	4	5	2	3
Þátttaka í reiðuafli					Já	Já
Áhætta (reiknivextir)		7%		8%		6%

*) Rekstrar- og viðhaldskostnaður í % af stofnkostnaði

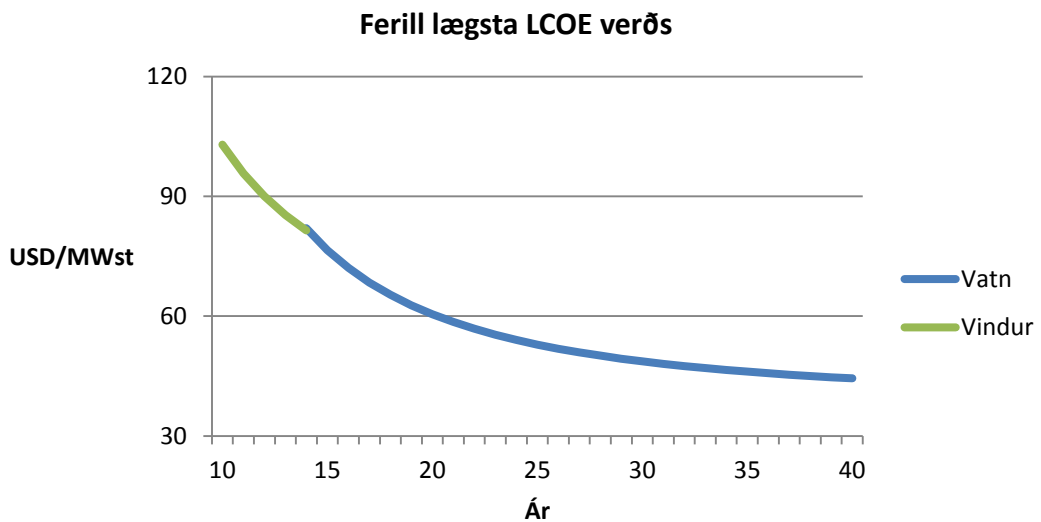
Samkvæmt henni má sjá að bil nýtingartíma er þrengra í vatnsafli og jarðvarma (+/- 5%) en óbreytt í vindorku (+/- 10%). Kostnaðarbíl er hins vegar víðara en áður sem fyrr segir í vatnsorku og jarðvarma en óbreytt fyrir vindorku. Rekstrar- og viðhaldskostnaður er óbreytt hlutfall af stofnkostnaði en líftími er nú samræmdur við vatnsaflið, 40 ár, þar sem endurfjárfest er í jarðvarma eftir 30 ár og 20 ár í vindorku. Á móti er gert ráð fyrir óbreyttu orkumagni til 40 ára. Tekið er tillit til þátttöku vindorku í kostnaði við reiðuafli og tekið hefur verið tillit til aukinnar áhættu með hækkun á reiknivöxtum í vatnsorku og jarðvarma.

Miðað við þessar forsendur líta LCOE ferlar núna út eins og sjá má á mynd 71. Sjá má að öll LCOE verð hafa hækkað frá grunntilviki, annars vegar vegna breytinga á reiknivöxtum og þátttöku vindorku í kostnaði við reiðuafli hins vegar. Samræming líftíma hefur litil áhrif á meðalverð yfir 40 ár þótt endurfjárfest sé að fullu eftir 20 ár í vindorku og 30 ár í jarðvarma. Gert er ráð fyrir sömu upphafsþjárfestingu að raungildi en orkumagn er óbreytt í 40 ár. Greinilega má sjá hækkun á LCOE verði fyrir vindorku þegar endurfjárfestingin kemur inn að fullu eftir 20 ár en áhrifin fjara út og hverfa eftir næstu 20 árin. Áhrifin í jarðvarmanum eru lítt sjáanleg þar sem þau koma enn síðar.



Mynd 71. LCOE ferlar miðað við nýja sviðsmyndagreiningu

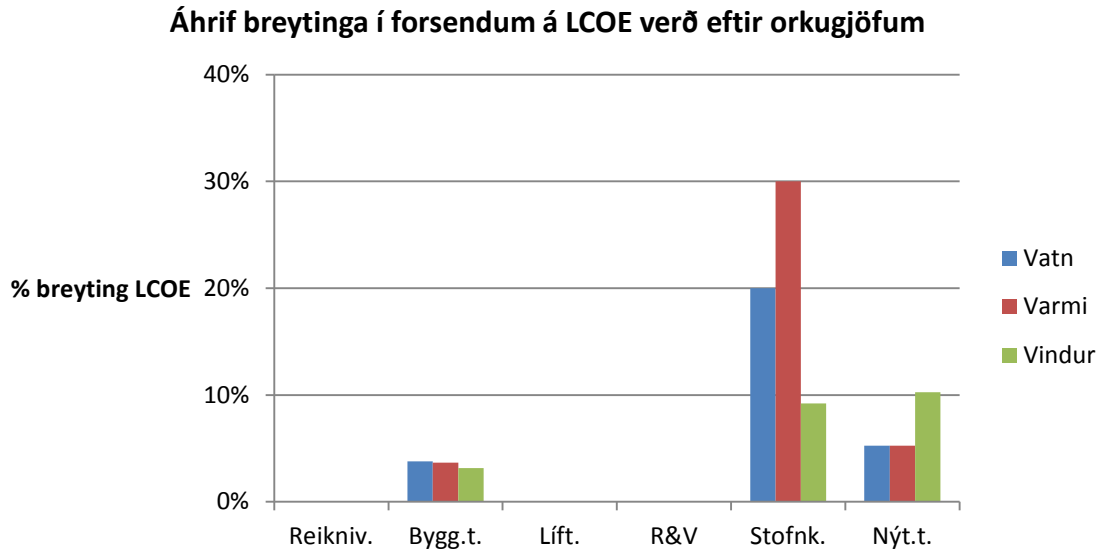
Á mynd 72 er búið að setja inn feril LCOE verðs miðað við lágsta verð hverju sinni. Þar sést að vindorkan er með lágsta verðið fyrstu árin þar til vatnsorkan tekur við. Sem fyrr er fyrstu 10 árunum sleppt. Jarðvarminn er aldrei með lágsta verðið samkvæmt þessari sviðsmyndagreiningu.



Mynd 72. Samsettur LCOE ferill, ferill lágsta verðs

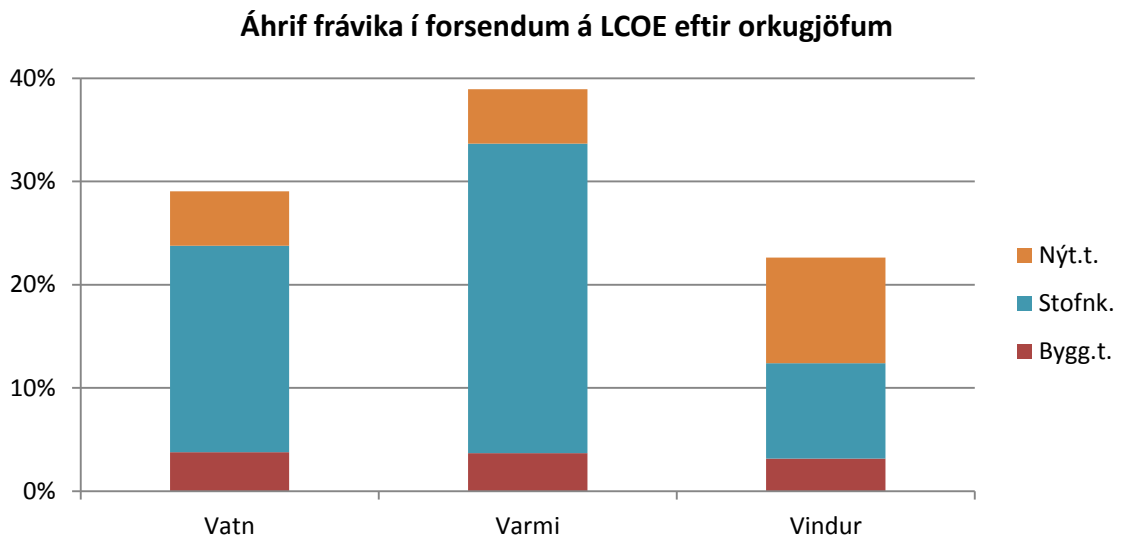
Nánar má sjá áhrif forsenda á LCOE verð eins og fram kemur á myndum 73 og 74 þar sem sjá má áhrif þessara þriggja forsenda einangruð og uppsöfnuð. Áhrif breytinga í

stofnkostnaði á LCOE er sem fyrr línulegur sem og breytingar á nýtingartíma sem er nálægt því að vera línulegur.



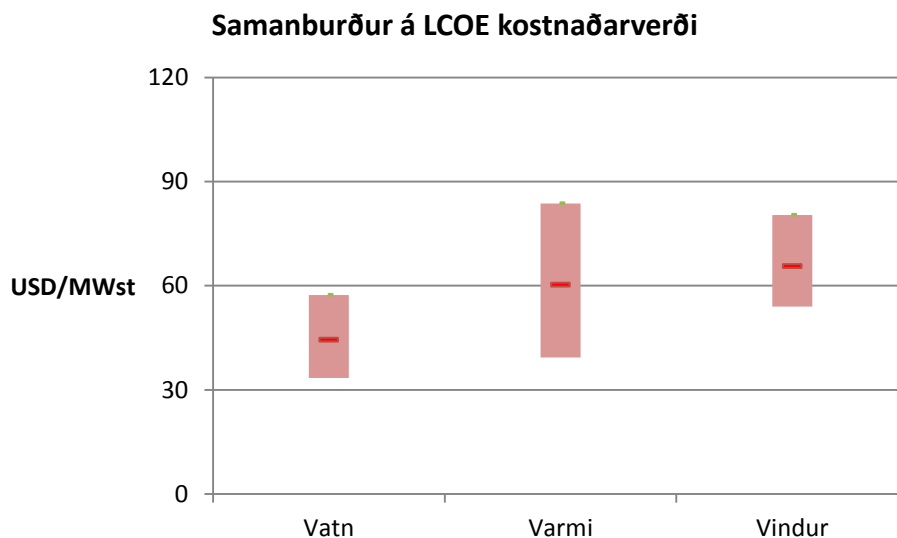
Mynd 73. Mat á óvissu einstakra forsenda á LCOE verð eftir orkugjöfum

Óvissubíl er nú mest í jarðvarma sem er hér metið +/- um 40% frávik en mun minna í vatnsorku (+/- 30%) og minnst í vindorku (+/- 23%). Til að meta áhættuþætti er forsendu um reiknivexti breytt sem fyrr segir sem hliðrar óvissubíli upp á við.



Mynd 74. Mat á óvissu í forsendum á LCOE eftir orkugjöfum

Á mynd 75 má sjá hvernig samanburðurinn á LCOE verði lítur út eftir að tekið hefur verið tillit til fyrrnefndra álitamála auk mats á óvissu og áhættu.

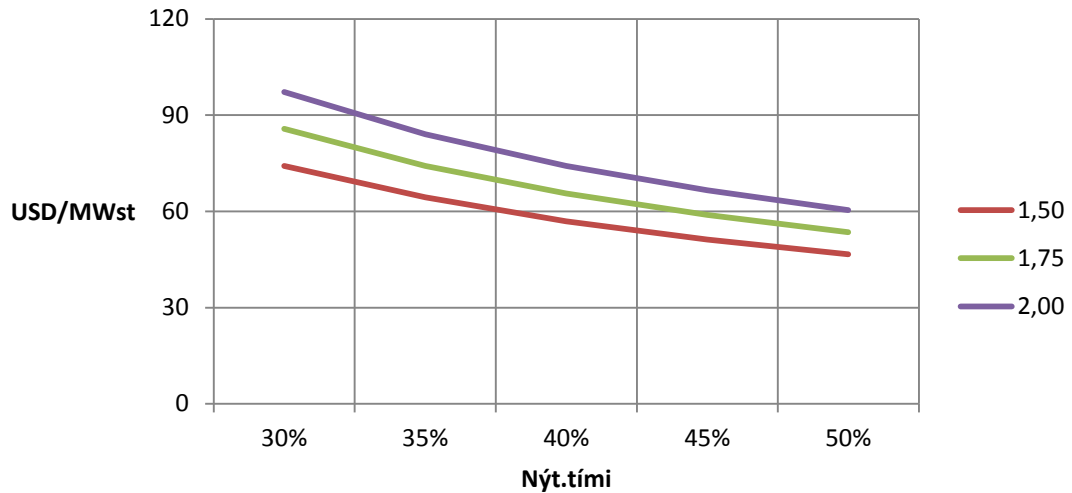


Mynd 75. Mat á LCOE eftir orkugjöfum miðað við nýja sviðsmynd

Miðað við nýja sviðsmyndagreiningu er kostnaður enn lægstur í vatnsorku, næstlægstur í jarðvarma og hæstur í vindorku. Óvissubíl er hins vegar núna metið svipað í vindorku og vatnsorku en mest í jarðvarma. Lægsta gildi í vindorku er lægra en miðgildi í jarðvarma og svipað hæsta gildi í vatnsorku. Óvissubíl vindorku rúmast innan óvissubíls í jarðvarma.

Á mynd 76 má sjá næmnigreiningu fyrir LCOE verð fyrir vindorku miðað við mismunandi nýtingartíma og stofnkostnað. Til að ná miðgildi LCOE fyrir jarðvarma þyrfti nýtingartími að hækka úr 40% í 45% eða stofnkostnaður að lækka úr USD 1,75M/MW í um USD 1,6M/MW. Til að ná miðgildi LCOE fyrir vatnsorku þyrfti nýtingartími að vera um 50% og stofnkostnaður að lækka í um USD 1,5M/MW.

LCOE fyrir vindorku m.v. mismunandi stofnkostnað (USD/MW) og nýtingartíma að teknu tilliti til reiðuafllskostnaðar



Mynd 76. LCOE verð fyrir vindorku m.v. mismunandi stofnkostnað og nýtingartíma

Aðeins tíminn mun leiða í ljós hvernig kostnaðurinn mun þróast við þessa orkugjafa en miðað við þróunina erlendis hingað til og væntingar um framhaldið er líklegt að vindorkan verði sífellt samkeppnishæfari.

5.4.5 Umhverfismál

Óumdeilt er að veruleg röskun verður á umhverfi við bæði vatnsafls- og jarðvarmavirkjanir á meðan mun minni áhrif eru samfara virkjun vindorku. Staðsetningar eru oft við eða nálægt náttúruperlum sem geta verið eftirsóttir ferðamannastaðir. Því þarf að veita og meta fórnarkostnað í hverju tilviki. Það er hins vegar ekki auðvelt og oft er það huglægt mat hvers og eins hvernig beri að meta einstök atriði.

Umhverfismál hafa mikið verið til umfjöllunar þegar kemur að virkjunarkostum. Það er leitun að virkjun sem hefur ekki áhrif á umhverfið með einhverjum hætti og þessir þrír kostir sem eru hér til umræðu hafa vissulega allir áhrif á umhverfið, þó með mismiklum hætti. Hvers virði er ósnortið land og hvernig ber að verðleggja rask á landi og umhverfi sem óneitanlega er fylgifiskur virkjun vatnsfalla og jarðvarma? Við þessu er ekkert einfalt svar. Vindorkan er hins vegar þeim eiginleikum búin að jarðrask vegna undirbúnings og á framkvæmdatíma er hverfandi miðað við hina tvo orkugjafana og hlýtur það að teljast mikill kostur. Þá eru framkvæmdir við beislun vindorku því sem

næst að fullu afturkræfar sem telst vindorku til tekna. Í þeim kostnaðartölum sem hér voru birtar er ekki tekið tillit til verðmætis lands eða landgæða.

Fyrr í þessari ritgerð var fjallað um mengun af völdum útblásturs brennisteinsvetnis frá jarðvarmavirkjunum sem hefur verið vaxandi vandamál vegna virkjana Orkuveitu Reykjavíkur á Hellisheiði. Ekki hefur tekist nægilega vel að draga úr þessum óæskilegu áhrifum auk þess sem þær aðgerðir sem grípa þarf til munu að öllum líkindum skila sér í hækkun kostnaðar. Sé tekið tillit til óæskilegra umhverfisáhrifa hefur vindorkan vinninginn.

5.4.6 Afturkræfni

Þegar einu sinni hefur verið lagt af stað í framkvæmdir við vatnsaflsvirkjun eða jarðvarmavirkjun verður ekki aftur snúið. Þessum framkvæmdum fylgir yfirleitt mikið rask á landi sem í flestum tilvikum verður ekki hægt að færa til fyrra horfs. Með öðrum orðum eru þessar framkvæmdir að stærstum hluta óafturkræfar.

Þetta á hins vegar ekki við um vindorku nema að mjög litlu leyti. Undirbúningur og framkvæmdir við vindorku eru tiltölulega einfaldar í samanburði við hina tvo orkugjafana. Einungis þarf að grafa og steypa undirstöður til að hægt sé að bolta vindmyllumannvirkið ofan á. Ef þurfa þykir síðar er auðvelt að taka vindmyllu niður og farga eða setja upp annars staðar. Þetta verður að teljast enn einn kosturinn við vindmyllur. Við uppsetningu stórra vindmyllugarða geta þó umhverfisáhrifin orðið umtalsverð þó uppsett afl sé ekki meira en 50 MW en til að ná því þyrfti t.d. 17 stykki af 3 MW vindmyllum. Engu að síður yrðu umhverfisáhrif talin lítil miðað við vatns- og jarðvarmaorku og mannvirkin yrðu að stærstum hluta afturkræf eftir sem áður.

Segja má að með því að meta óvissu og áhættu eins og gert var hér á undan með álagi ofan á stofnkostnað og hækkun á reiknivöxtum sé að sumu leyti tekið tillit til umhverfiskostnaðar. En rökstyðja má líka að taka eigi meira tillit til umhverfisáhrifa með einhvers konar mati á landgæðum og fórnarkostnaði við framkvæmdir umfram það sem hér var gert.

5.4.7 Samrekstur

Auk þeirra atriða sem hér hafa komið fram eru álitamál sem þarf að skoða og oft verða ekki metin til fjár, nema kannski óbeint. Fyrir utan umhverfismálin, óvissu, áhættu og

afturkræfni eru eiginleikar þessar orkugjafa mismunandi sem geta enn flækt allan samanburð.

Jarðvarmavirkjanir eru gott dæmi um orkuver sem framleiða svokallaða grunnorku, hafa háan jafnan nýtingartíma yfir allt árið og eru því kjörin fyrir aðila sem taka jafnt magn eins og stóriðju. Raforkuvinnsla með jarðvarma er óháð veðurfari ólíkt því sem gerist með vatnsafl og vindorku. Þá er ónefnt hér að samrekstur jarðvarma til húshitunar og raforkuvinnslu hefur gefist afar vel. Ef hægt er að auka enn frekar samnýtingu jarðvarma til ýmissar iðnaðarframleiðslu er það auðvitað mjög áhugaverður kostur sem vert er að kanna nánar.

Vatnsorkan flokkast sem stýranleg orka og hefur þann mikilvæga eiginleika að hana er hægt að geyma í formi vatns í uppistöðulónum. Lónin eru ígildi rafgeyma sem hlaðast upp í sumarleysingum en koma að notkun yfir vetrartímann. Þetta á einkum við þegar vatnsorka nýtir jökulár eins og gert er hér á landi en auðvitað eru svo dæmi um rennslisvirkjanir þar sem þessi kostur er ekki til staðar.

Einir og sér hafa þessir orkugjafar kosti og galla en saman geta þeir bætt hvern annan upp eins og reyndin hefur verið hér á landi. Vindorka er eðli málsins samkvæmt háð vindi og framleiðir því mismunandi magn orku yfir árið. Eiginleikar vindorkunnar eru engu að síður áhugaverðir í ljósi þess að við Íslenskar aðstæður er almennt vindasamara á veturna þegar vatnsrennsli er minna. Þannig geta vind- og vatnsorka unnið vel saman, á meðan vindur blæs er hægt að spara vatn og öfugt. Sambærilegt erlendis er rekstur sólarorku og vindorku þar sem vindur blæs meir á veturna en sólin skín meira á sumrin (iea, 2013).

Því er það svo að það er ekki endilega val um hvern þessara orkugjafa eigi að vinna. Niðurstaðan gefur fullt tilefni til þess að að kanna rækilega samrekstur þessara orkugjafa og æskilega uppbyggingu þar sem tekið er tillit til umhverfismála, kostnaðar, óvissu- og áhættusjónarmiða. Vindorka getur komið að góðum notum til áhættudreifingar sem orkugjafi en er líka vel til þess fallin að vinna rafmagn á landsvæðum þar sem hvorki er að finna jarðvarma né virkjanleg vatnsföll.

Áhugavert væri að gera svokallaða „Least Cost Study“⁴⁵ fyrir Ísland þar sem markmiðið væri að finna hagkvæmustu samhliða uppbyggingu þessara orkugjafa með tilliti til þeirra sjónarmiða sem hér hafa verið reifuð. Vindorkan getur þar orðið álitlegur kostur við framtíðaruppbyggingu íslenska raforkukerfisins. Í þessu samhengi má geta þess að Landsvirkjun hefur sett upp nokkrar sviðsmyndir þar sem m.a. er gert ráð fyrir samhliða nýtingu þessara þriggja orkugjafa ef sæstrengsverkefnið yrði að veruleika⁴⁶. Nánari greining á þeim sviðsmyndum væri áhugavert efni í aðra ritgerð.

⁴⁵ Sjá t.d. http://www.agora-energiewende.org/fileadmin/downloads/publikationen/Agora_Study_Cost_Optimal_Expansion_of_Renewables_in_Germany_Summary_for_Decision-Makers_web.pdf

⁴⁶ Sjá: <http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/throunarverkefni/saestrengur>

6 Lokaorð

Víðast hvar erlendis eru orkumál í brennidepli og leitast þjóðir nú við að auka hlut endurnýjanlegra orkugjafa í raforkuvinnslu til að stemma stigu við vaxandi útblæstri gróðurhúsalofttegunda. Erendis hefur mesta aukningin verið í vindorku og sólarorku þar sem tækninni hefur fleygt fram. Er nú svo komið að þessir tveir orkugjafar eru ráðandi þegar aukning síðustu ára er skoðuð og eins eru horfurnar á sömu leið. Raforkuvinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum nam 72% af aukningu ársins 2013 í Evrópu eða 25 af 35 GW sem er 70% aukning frá fyrra ári. Vindorkan er þar með stóran hlut eða 32% af aukningu í uppsettu afli 2013 (EWEA, 2014).

Þrátt fyrir gríðarlegan vöxt raforkuvinnslu með endurnýjanlegum orkugjöfum á síðustu árum og ýmsar aðrar aðgerðir og hertar reglur til að takmarka útblástur gróðurhúsalofttegunda eru niðurstöður nýrrar skýrslu loftslagsnefndar Sameinuðu þjóðanna áhyggjuefni. Í fréttatilkynningu Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] frá 13. apríl 2014 kemur fram að útblástur er enn að aukast og er aukningin meiri en verið hefur á fyrri áratugum. Í frétt IPCC kemur fram að til þess að takmarka hækkun hitastigs við tvær gráður á Celsius þarf að draga úr útblæstri gróðurhúsalofttegunda um 40-70% um miðja þessa öld og niður í svipað magn og var á árinu 2010 um næstu aldamót.

Íslendingar eru í allt annarri og betri stöðu en flestar þjóðir er kemur að raforkuvinnslu. Öll raforkuvinnsla er nú þegar með endurnýjanlegum orkugjöfum og möguleikar á frekari vinnslu eru miklir. Þjóðin stendur frammi fyrir því að ákveða frekari raforkuvinnslu, ekki til að anna eigin eftirspurn eða auka hlut endurnýjanlegra orkugjafa, heldur fyrst og fremst til að skapa aukin verðmæti með aukinni raforkusölu til orkufreks iðnaðar innanlands eða með tengingu um sæstreng. Þetta er einstök og öfundsverð staða á heimsvísu.

Þrátt fyrir vindasama eyju hefur vindorka ekki verið til skoðunar hér á landi af alvöru fyrr en nýlega. Ástæðan gæti verið gnægð orkukosta í vatns- og jarðvarma sem taldir hafa verið hagkvæmari auk þess sem vindorka var mun dýrari til skamms tíma. Með uppsetningu tveggja vindmylla Landsvirkjunar í tilraunaskyni vaknar áhugaverð spurning

um hvort þetta sé að breytast. Rekstur þessara tveggja vindmylla gefur sannanlega tilefni til að það sé einmitt raunin. Í samanburði við vatns- og jarðvarmaorku er uppsetning og rekstur vindmylla mjög einfaldur. Umhverfisáhrif eru lítil og framkvæmdir að mestu leyti afturkræfar sem er ekki raunin við beislun vatnsorku og jarðvarma. Einingakostnaður við vindorku virðist vera ágætlega samkeppnishæfur, sérstaklega við jarðvarma, og sé tekið tillit til allra óvissu- og áhættuþátta er vindorkan sérlega áhugaverður orkugjafi.

Aukin tækni við framleiðslu á vindmyllum hefur bætt nýtingu þeirra og endingu og kostnaður hefur lækkað umtalsvert. Því er spáð að þessi þróun haldi áfram og aukning raforkuvinnslu með vindorku verði áfram gríðarleg á heimsvísu. Auknar kröfur í umhverfismálum hafa leitt til þess að vöxtur í virkjun fallvatna hefur dregist saman og áfram er búist við litlum vexti í jarðvarma. Ekki er búist við að hlutdeild jarðvarma í raforkuvinnslu breytist mikið og hann verði áfram lítill í raforkuvinnslu á heimsvísu. Það þykir með ólíkindum að miðað við svipaða aukningu í vindorku og verið hefur á liðnum árum, eða um 10% á ári, þá verði uppsett afl vindorku álíka og helmingur af uppsettu vatnsafli innan fárra ára (iea, 2013; GWEC, 2013).

Á Íslandi hafa verið skiptar skoðanir í virkjanamálum og umhverfismál hafa fengið sífellt meiri umfjöllun. Þegar bygging Kárahnjúkavirkjunar stóð sem hæst voru uppi háværar raddir um að mun vænlegra væri að virkja jarðvarma til raforkuvinnslu. Minna var rætt um jarðhitavirkjanir á Hellisheiði sem voru byggðar samtímis. Á síðustu misserum hefur umræða um umhverfismál jarðvarmavirkjana verið ofarlega á baugi og eru nú einnig vissar efasemdir um stórfellda virkjun jarðvarma til raforkuvinnslu. Samhliða raforkuvinnslu með jarðvarma eru vonir bundnar við ýmsa afleidda starfsemi sem gæti aukið verðmæti jarðvarmans og má nefna ylrækt, ýmsan efnaiðnað og jafnvel eldsneytisframleiðslu. Með djúpbórnarverkefninu hefur verið aflað dýrmætrar reynslu sem vonast er til að nýtist síðar en verkefnið hefur kostað sitt og ekki skilað tekjum.

Viðhorfskannanir sem Landsvirkjun hefur látið framkvæma sýna að stór hluti íslensku þjóðarinnar er tiltölulega hlynntur tilraunum með vindorku en ekki liggur fyrir afstaða gagnvart stórfelldri virkjun með uppsetningu vindgarða. Niðurstöður þessarar ritgerðar eru í flestum tilfellum mjög jákvæðar vindorku og gefa fullt tilefni til þess að hér sé komin þriðji valkosturinn við raforkuvinnslu Landsvirkjunar. Aðeins tíminn mun leiða í

ljós hvort vilji er fyrir hendi að virkja hann í stórum stíl eins og verið hefur með hina tvo orkugjafana.

Miðað við það sem hér hefur komið fram er líklegt að framtíðaruppbygging íslenska raforkukerfisins verði blanda af þessum þremur orkugjöfum þar sem tekið yrði tillit til kostnaðar, óvissu, áhættudreifingar og ekki síst umhverfismála. Það er niðurstaða þessarar ritgerðar að beislun vindorku til raforkuvinnslu eigi sannanlega framtíðina fyrir sér hér á landi líkt og gerst hefur erlendis. Samrekstur með öðrum orkugjöfum er þar sérlega áhugaverður kostur.

Heimildaskrá

Black & Veatch. (e.d). *Levelized Cost of Energy Calculation, Methodology and Sensitivity*. Sótt 15. febrúar 2014 af:
http://csep.efchina.org/report/20112844913435.70772110666485.pdf/Levelized%20Cost%20of%20Energy%20Calculation_BV_EN.pdf

Geothermal Energy Association. (2013). *2013 Annual US Geothermal Power Production and Development Report*. Washington, D.C.: Höfundur. Sótt 10. apríl 2014 af:
http://geoenergy.org/pdf/reports/2013AnnualUSGeothermalPowerProductionandDevelopmentReport_Final.pdf

Global Wind Energy Council. (2013, apríl). *Global Wind Report, Annual Market update 2012*. Sótt 28. mars 2014 af:
http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf

HM Treasury. (2013, apríl). *Green Book supplementary guidance: optimism bias. Supplementary guidance to the Green Book on estimates for a project's costs, benefits and duration on the absence of robust primary evidence*. Sótt 15. apríl 2014 af:
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/191507/Optimism_bias.pdf

HS Orka. (e.d.). *Framleiðsla. Raforka, hitaveita og jarðsjór með jarðgufu*. Sótt 14. febrúar 2014 af:
<http://hsorka.is/HSProduction/HSProductionStartPage.aspx>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014, 13. apríl). *IPCC press release: Greenhouse gas emissions accelerate despite reduction efforts*. Sótt 20. apríl af:
http://www.ipcc.ch/pdf/ar5/pr_wg3/20140413_pr_pc_wg3_en.pdf

International Energy Agency. (2013). *World Energy Outlook 2013*. Paris: International Energy Agency. Sótt 7. febrúar 2014 af:
http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2013/WEO2013_Ch06_Renewables.pdf

International Renewable Energy Agency. (2012). *Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview*. Abu Dhabi: Höfundur. Sótt 7. febrúar 2014 af:
http://costing.irena.org/media/2769/Overview_Renewable-Power-Generation-Costs-in-2012.pdf

Íslandsbanki. (2012). *Íslenski orkumarkaðurinn*. Sótt 15. febrúar 2014 af:
<http://www.islandsbanki.is/library/Skrar/Geothermal-Reports/%C3%8Dslenski-Orkumarka%C3%B0urinn-Skyrlsa.pdf>

- Ketill Sigurjónsson. (2009, apríl). *Virkjun vindorku og sjávarorku á Íslandi. Tækifæri til að efla íslenskt efnahagslíf og auka fjölbreytni á orkumarkaðinum*. Sótt 14. mars 2014 af:
http://www.atvinnuvegaraduneyti.is/media/Rafræn_afgreidsla/Skyrsla_Ketils_Sigurjonssonar.pdf
- Landsvirkjun. (2012). *Umhverfisskýrsla 2012*. Sótt 14. febrúar 2014 af:
http://www.landsvirkjun.is/Media/LV_umhverfisskyrsla_2012_150p_web_OK.pdf
- Landsvirkjun. (e.d.a). *Fjármál. Ársskýrslur*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.landsvirkjun.is/fjarmal/arsskyrslur>
- Landsvirkjun. (e.d.b). *Fyrirtækið*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.landsvirkjun.is/fyrirtaekid>
- Landsvirkjun. (e.d.c). *Rannsóknir og þróun. Aflstöðvar*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/aflstodvar>
- Landsvirkjun. (e.d.d). *Rannsóknir og þróun. Virkjunarkostir*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/virkjunarkostir>
- Landsvirkjun. (e.d.e). *Rannsóknir og þróun. Virkjunarkostir. Rammáætlun*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/virkjunarkostir/rammaaetlun>
- Mannvit verkfræðistofa. (2010, október). *Kröfuvirkjun II. Allt að 150 MW jarðhitavirkjun við Kröflu í Skútustaðahreppi. Mat á umhverfisáhrifum*. Sótt 21. mars 2014 af:
http://www.landsvirkjun.is/Media/Matsskyrsla_krofluvirkjun_II_2010.pdf
- OECD. (2013). *OECD Factbook 2013: Economic, Environmental and Social Statistics*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.oecd-ilibrary.org/sites/factbook-2013-en/06/01/03/index.html?itemId=/content/chapter/factbook-2013-43-en>
- Orkustofnun. (e.d.a). *Jarðhiti*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://os.is/jardhiti/>
- Orkustofnun. (e.d.b). *Raforka. Raforkutölfræði*. Sótt 14. febrúar 2014 af:
<http://os.is/yfirflokkur/raforkutolfraedi/>
- Orkustofnun. (e.d.c). *Vatn. Vatnsaflsvirkjanir*. Sótt 14. febrúar 2014 af:
<http://os.is/vatnsafl/vatnsaflsvirkjanir/>
- Orkustofnun. (2013, október). *Raforkuspá 2013-2015. Endurreikningur á spá frá 2010 út frá nýjum gögnum og breyttum forsendum*. Sótt 4. apríl 2014 af:
<http://os.is/gogn/Skyrslur/OS-2013/OS-2013-02.pdf>

Orkuveita Reykjavíkur. (e.d.). *Um OR. Virkjanir*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.or.is//um-or/virkjanir>

Pétur Örn Sverrisson, Kristín Haraldsdóttir, Sandra Franks. (2014). *Úrskurður úrskurðarnefndar raforkumála í máli nr. 4/2012. Landsvirkjun gegn Orkustofnun*. Sótt 10. apríl 2014 af:
<http://www.urskudir.is/media/skjalasafn/rettarheimild/ivr/4-2012-Landsvirkjun.pdf>

Runólfur Maack og Kristinn Ingason. (2011, desember). *Stofnkostnaður jarðvarmavirkjana á Íslandi og samanburður við önnur lönd*. Erindi á haustfundi Jarðhitafélags desember 2011. Sótt 22. febrúar 2014 af:
http://jardhitafelag.is/media/PDF/Kristinn_og_Runolfur_Mannvit.pdf

The European Wind Energy Association. (2014, febrúar). *Wind in power, 2013 European statistics*. Sótt 10. apríl 2014 af:
http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2013.pdf

U.S. Energy Information Administration. (2013). *International Energy outlook 2013. Electric Power*. Sótt 7. febrúar 2014 af:
<http://www.eia.gov/oiaf/aeo/tablebrowser/#release=IEO2013&subject=4-IEO2013&table=16-IEO2013®ion=0-0&cases=Reference-d041117>

Viðauki 1 - Viðmælendur og spurningar

Viðmælendur:

- Margrét Arnarsdóttir, verkefnisstjóri vindorku á þróunarsviði Landsvirkjunar
- Dr. Bjarni Pálsson, deildarstjóri virkjanadeildar á þróunarsviði Landsvirkjunar
- Sigurður H. Markússon, verkefnisstjóri í nýsköpunarverkefnum á þróunarsviði Landsvirkjunar
- Dr. Egill Júlíusson, sérfræðingur jarðhitakerfum á þróunarsviði Landsvirkjunar
- Björn Stefánsson, yfirverkfræðingur LV Power
- Guðmundur Pétursson, yfirverkefnisstjóri LV Power
- Árni Benediktsson, yfirverkfræðingur orkusviðs Landsvirkjunar
- Kristján B. Ólafsson, rekstrarhagfræðingur og ráðgjafi

Spurningalisti:

1. Helstu kostir/gallar vatnsafls, jarðvarma og vindorku.
2. Helstu áhættu og óvissuþættir varðandi undirbúning, byggingu og rekstur virkjana.
3. Umhverfismál, helstu álitamál eftir orkugjöfum.
4. Þróun/horfur næstu ára, tækniþróun.
5. Samkeppni frá öðrum orkugjöfum?

Viðauki 2 - Skilgreiningar

kW	Kílóvatt (1.000 W)
MW	Megavatt (1.000 kW)
GW	Gígavatt (1.000 MW)
TW	Teravatt (1.000 GW)
KWst	Kílóvattstund
MWst	1.000 KWst
GWst	1.000 MWst
TWst	1.000 GWst
LCOE	Levelized Cost of Energy, núvirt meðalkostnaðarverð orku
Nýtingartími	Fjöldi klukkustunda framleitt á ári / 8760 (1 ár) í %
Kostnaður	USD milljón á hvert MW (samsvarar USD/kW)
Kostnaðarverð	USD/MWst (samsvarar US cent/kWst)

Viðauki 3 - Vindorkumælingar

<http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/throunarverkefni/vindmyllur/rauntimaupplýsingar>.



Tekið af vef Landsvirkjunar 21. mars kl. 20:50.

Viðauki 4 - Sýnidæmi

Útreikningar fyrir sýnidæmi í kafla 5.1 um aðferðafræði og mat á LCOE.

Sýnidæmi	Reiknivextir 10%																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
LCOE																					
USD/MWst																					
Stofnkostnaður	83	33	33																		
Rekstur og viðhald	18	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Orkusala (GWst)	0	0	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
LCOE alls																					
LCOE stofnk.				243	127	89	70	58	51	45	41	38	36	34	32	31	30	29	28	28	
LCOE rek.k.				6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Söluverð				40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Tekjur	121	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Hreint stjórðstreymi	20	-33	-33	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
IRR									4%	6%	8%	9%	10%	11%	11%	12%	12%	13%	13%	13%	
LCOE 20 ár				34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
LCOE 10 ár				51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51