

SKÝRSLA
ferðamála-, iðnaðar- og nýsköpunarráðherra
um nýjar aðferðir við orkuöflun.

(Lögð fyrir Alþingi á 149. löggjafarþingi 2018–2019.)

Lögð fram af ferðamála-, iðnaðar- og nýsköpunarráðherra.

Nóvember 2018.

1. Beiðni Alþingis um skýrslu frá ferðamála-, iðnaðar- og nýsköpunarráðherra um nýjar aðferðir við orkuöflun.

Skýrsla þessi er samin að beiðni Alþingis og fjallar um nýjar aðferðir við orkuöflun, sbr. þingskjal 276 – 197. mál á 148. löggjafarþingi 2017–2018, dags. 20. febrúar 2018. Einkum er fjallað um nýtingu vindorku, sjávarorku og varmaorku með varmadælum. Einnig er stutt umfjöllun um aðra möguleika sem skipt geta auknu máli við orkuöflun á komandi árum.

Gerð er grein fyrir stöðu og líklegri framtíðarþróun hagnýtingar þessara orkugjafa og fjallað um margvísleg tæknileg og umhverfisleg úrlausnarefni sem huga þarf að. Þau snerta m.a. náttúrufar, staðarval, rekstur og förgun. Einnig er fjallað um lög og lagalegt umhverfi leyfisveitinga.

Skýrslan var unnin í atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytinu með aðkomu Nýsköpunar- miðstöðvar Íslands, Orkustofnunar, Sambands íslenskra sveitarfélaga, Samorku og fyrirtækja innan vébanda þeirra.

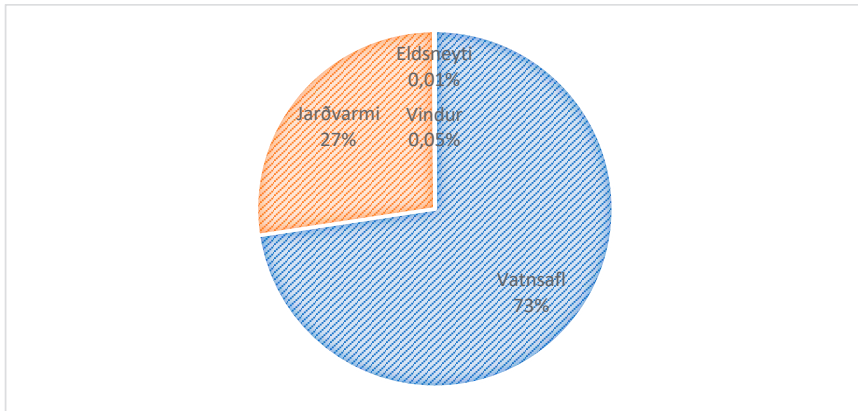
2. Inngangur.

Í stefnuyfirlýsingu ríkisstjórnarinnar er vikið að gerð langtímaorkustefnu fyrir Ísland. Mat á nýjum aðferðum við orkuöflun tengist þeirri stefnumótun. Ráðherra ferðamála, iðnaðar og nýsköpunar skipaði þverpólítískan starfshóp til að vinna að orkustefnu á vordögum 2018. Þættir sem meta þarf í vinnu starfshópsins samkvæmt erindisbréfi eru m.a. eftirfarandi:

- Áætluð orkuþörf til langs tíma.
- Tryggt raforkuframboð fyrir almenning og atvinnulíf.
- Sjálfbær nýting orkuauðlinda.
- Orkuskipti og aukið hlutfall endurnýjanlegrar orku í orkubúskapnum.
- Auknar rannsóknir, m.a. varðandi nýja orkukosti.

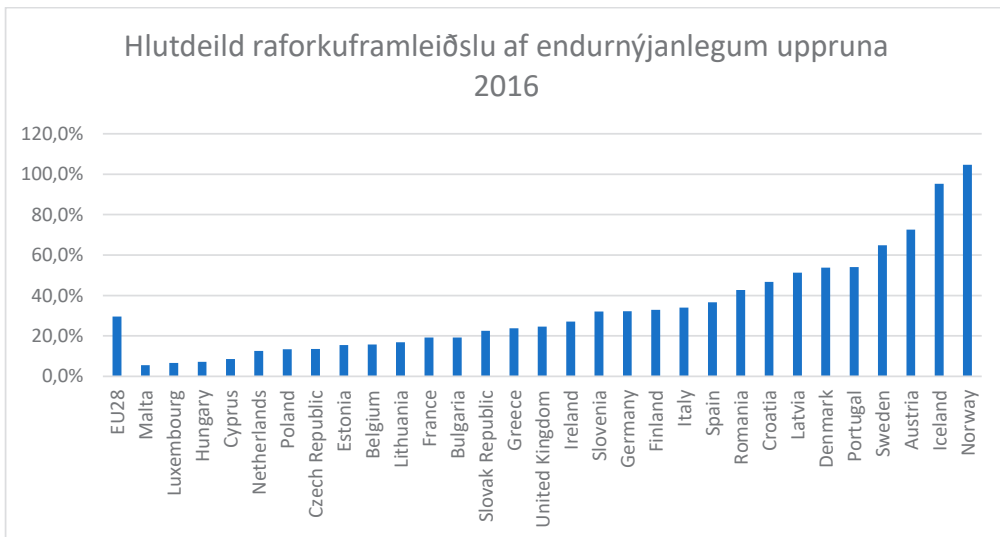
Keppikefli flestra ríkja er að auka sem mest hlutdeild endurnýjanlegrar orku af margvíslegum ástæðum, m.a. til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og auka orkuöryggi með innlendri orkuframleiðslu. Helsti vöxturinn í endurnýjanlegri raforkuframleiðslu í heiminum á undanförunum árum hefur verið í vind- og sólarorku. Tækninni hefur fleygt fram þannig að þessir kostir eru að verða mjög hagstæðir í samanburði við hefðbundnari orkukosti, hvort sem þeir eru af jarðefna- eða endurnýjanlegum uppruna.

Hefðbundin raforkuframleiðsla á Íslandi er nær öll af endurnýjanlegum uppruna, framleidd með beislun vatnsafls og jarðvarma. Mynd 2.1. sýnir raforkuvinnslu eftir uppruna árið 2016. Tæplega 100% hennar byggist á raforkuframleiðslu úr vatnsorku og jarðvarmaorku. Vatnsorkan er stærst með 73% framleiðslunnar og jarðvarmi með 27%. Nýr áfangi í orkuframleiðslu hófst árið 2013 með uppsetningu tveggja vindmyllna á Hafinu ofan Búrfellsvirkjunar. Hlutdeild vindorku er nú aðeins 0,05%. Reynolds af rekstri þeirra hefur komið á óvart og lofar góðu um framtíðarþróun vindorku hér á landi. Fjallað er nánar um vindorku í kafla 6.



Mynd 2.1. Raforkuvinnsla eftir uppruna 2016.¹

Ísland nýtur sérstöðu í alþjóðlegum samanburði þar sem óvíða er að finna orku- og varmaframleiðslu sem er nánast alfarið af endurnýjanlegum uppruna, sbr. mynd 2.2. Skýringin á því að hlutdeild Noregs er yfir 100% er að raforkukerfi Noregs er tengt við önnur ríki og bæði inn- og útflutningur er talinn fram.



Mynd 2.2. Hlutdeild raforkuframleiðslu af endurnýjanlegum uppruna 2016.

Heimild Eurostat

Uppsett afl allra virkjana landsins til raforkuframleiðslu er nú um 2.750 MW². Landsvirkjun er stærsti framleiðandinn með 1.956 MW uppsett afl. Orka náttúrunnar (ON) kemur þar á eftir með 434 MW og síðan HS Orka með 176 MW. Heildarorkunotkun árið 2016 nam 18,1 TWst

² Eitt megavatt (MW) = 1.000 kílóvött (kW). Eitt gígavatt (GW) = 1.000 MW. Uppsett afl í orkuveri er mælt í MW og kW í smáum virkjunum. Orkuframleiðsla er mæld í gígavattstundum (GWst) og í megavattstundum í smærri virkjunum. Þær eru margfeldi af afli og keyrslutíma orkuvers í klst.

og hafði þá ríflega tvöfaldast frá árinu 2005. Þar af notar stóriðjan tæpar 14 TWst eða um 77% raforkunnar.

Samkvæmt uppfærðri raforkuspá Orkuspárnefndar fram til ársins 2050 fer almenn raforkunotkun í landinu jafnt og þétt vaxandi. Spáð er árlegri aukningu notkunar um 1,8% næstu 33 árin, sem þýðir aukningu um 2.815 GWst í orku og 464 MW í afli yfir spátímabilið frá árinu 2017 til ársins 2050. Það má m.a. rekja til aukinnar raforkunotkunar almennings, aukins hraða í orkuskiptum og raforkunotkun í ferðaþjónustu. Þessi spá gerir ráð fyrir um 1.000 GWst raforkunotkun rafbíla og lesta árið 2050. Ekki er reiknað með aukningu í raforkunotkun frá stóriðju umfram það sem búið er að semja um.³

Raforkunotkun annars iðnaðar hefur aukist að undanfögnu. Þannig nota gagnaverin í landinu nú um 260–307 GWst af raforku og er búist við að sú raforkunotkun muni aukast hratt á næstu árum. Verði allur fólksbílafloti landsins rafvæddur mun það leiða til um 3-4% aukningar í raforkuframleiðslu sem svarar til um 730 GWst á ári. Mikilvægur þáttur í þessum orkuskiptum er að nýtni sprengihreyfla sem breyta varmaorku í hreyfiorku er á bilinu 20-30% en nýtni rafbíla sem breyta raforku í hreyfiorku er um 90%. Nýtni rafbíla er því um þrefalt meiri. Til að ná fram markmiðum um orkuskipti í höfnum og tilheyrandi sparnaði í losun CO₂ þarf aukna aflþörf um 17 MW og orkuþörf á ári um 58 GWst.⁴

Ljóst er að raforkueftirspurn fer vaxandi, bæði til almennra notenda og iðnaðar. Hins vegar eru blikur á lofti með mögulegt raforkuframboð hefðbundinna orkukosta. Löggjafinn hefur sett markmið í raforkulög um þjóðhagslega hagkvæmt raforkukerfi sem stuðlar að nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa. Því er nauðsyn að skoða möguleika nýrra orkukosta af endurnýjanlegum uppruna, áhrif þeirra á umhverfið og hvernig regluverk styður við sjálfbæra nýtingu í sátt við samfélagið. Í þessari skýrslu er fjallað um vindorkuver, sjávarorkuver, varmadælur, lágvarmavirkjanir, endurnýjanlegt eldsneyti og djúpborun eftir háhita gufuorku.

3. Samantekt.

Eftirspurn eftir raforku er nú umfram framboð. Ef unnt á að vera að mæta aukinni almennri eftirspurn næstu áratugi vegna fólksfjölgunar, tækniþróunar, nýrra umhverfisvænna atvinnuhátta og orkuskipta þá þarf að auka raforkuframboð. Miðað við orkuspá til ársins 2050 gæti ný orkuþörf orðið um 3.800 GWst á ári umfram það sem nú er. Þetta svarar til um rúmlega einni og hálfri Búrfellsstöð sem er stórt orkuver með 270 MW uppsett afl og 2.300 GWst orkuvinnslugetu á ári. Ef hefðbundnum kostum í jarðvarma og vatnsafla fer fækkandi er tímabært að huga að nýjum endurnýjanlegum kostum til að mæta fyrirsjáanlegri þörf. Miðað við tæknilegan áreiðanleika og upplýsingar um hagkvæmni eru einkum þrír orkukostir sem nú standa öðrum framar og unnt er að hrinda í framkvæmd samhliða á næstu árum. Þetta er orkuframleiðsla með vindorku, litlum vatnsorkuverum og varmadælum. Hver þessara þriggja aðferða hentar best tilteknum aðstæðum en þær geta einnig farið vel saman.

³ Orkuspárnefnd. <https://orkustofnun.is/gogn/Skyrslur/OS-2018/OS-2018-03.pdf>

⁴ Skýrsla ferðamála-, iðnaðar- og nýsköpunarráðherra, 2018. <https://www.althingi.is/alttext/pdf/148/s/0523.pdf>

Vindorka sker sig úr öðrum kostum vegna hagkvæmni og sveigjanleika. Hún getur hentað til orkuframleiðslu þar sem þörf er fyrir lítið uppsett afl, t.d. innan við 10 MW, og einnig til að mæta þörf sem er yfir 200 MW í stóru vindorkuveri. Þarna á milli eru ótal möguleikar, m.a. uppbygging í hagkvæmum áföngum. Allir þættir sem lúta að umhverfisþáttum, hönnun, byggingu, rekstri og förgun vindorkuvera eru vel þekktir og bygging vindorkuvera er afturkræf. Vindorkuver vinna með vindhraða á bilinu 3–25 m/sek. en meðalnýting er um 35% og miðast við fræðilega hámarksnýtingu sem samsvarar því að vindur væri ávallt við hámarksvindhraða.

Ekki er þó hægt að reka raforkukerfi sem byggist eingöngu á vindorku. Annar stöðugur orkugjafi, eins og vatnsorka, þarf að tryggja grunnafli og mæta álagstoppum. Þegar vindorkan kemur inn minnkar vatnsorkuframleiðslan jafnt og þétt. Framboð af vindorku er mest að vetri þegar vatnsstaða í lónum er lág en minnst á sumri til þegar vatnsbúskapur er góður. Þessa tvær framleiðsluadferðir fara því vel saman.

Afhendingaröryggi raforku er ekki nægilega gott. Veikleikar eru í flutningskerfinu og þörf er á aukinni raforkuframleiðslu í nokkrum landshlutum. Aukin nýting vindorku getur gjörbreytt þessari kröppu stöðu með litlum og meðalstórum vindorkuverum. Byggingartími vindorkuvers er tiltölulega stuttur og unnt er að auka orkuframleiðslu í áföngum eins og þörf er á til að mæta aukinni eftirspurn. Sjóðandi lágvarmi og lítil og meðalstór vatnsorkuver geta styrkt þetta samspil orkuöflunar enn frekar.

Um allt land hefur vaknað áhugi á virkjunum vatnsfalla sem eru allt frá nokkrum kW og upp í fáein MW. Tugir hugmynda hafa komið fram enda eru virkjanir undir 1 MW undanþegnar ákvæðum raforkulaga um leyfi til að reisa og reka raforkuver sem einfaldar aðkomu lítilla framleiðenda. Að auki þurfa þær ekki að tengjast flutningskerfi raforku og því getur verið styrkur í því að horfa til staðbundinna lausna og kanna smærri virkjunarkostir sem kunna að vera í boði. Orkufyrirtæki hafa sýnt þessum litlu framleiðendum áhuga enda fara hagsmunir þeirra saman, þ.e. að bæta úr brýnni svæðisbundinni þörf fyrir aukið afhendingaröryggi sem víða stendur í vegi fyrir farsælli atvinnu- og búsetuþróun. Þrátt fyrir að smáar vatnsaflsvirkjanir hafi ekki mikið að segja þegar á heildina er lítið þá er mikilvægi þeirra þeim mun meira í svæðisbundnu samhengi.

Víða um land er að finna jarðhita sem er um og rétt yfir 100°C. Hann hefur verið notaður í staðbundnar hitaveitur en nokkuð lengi hefur verið ljóst að þennan lágghita má einnig nýta til raforkuframleiðslu. Þá eru önnur efni, sem eru með lágt suðumark og mikinn gufuþrýsting við lágt hitastig, nýtt til að bæta afköst. Þetta eru einkum ammoníak og efnasambönd vetnis og kolefnis. Úr verður sjóðandi lágghiti í svokölluðu tvívökvakerfi. Framleiðsla raforku úr lágghita virðist vera að fá aukið vægi sem mun bæta nýtingu jarðhitaauðlindarinnar.

Varmadælur eiga möguleika á að vinna sér veigamikinn sess í svæðisbundnu samhengi og í heildarorkuframleiðslu landsins. Þær geta átt þátt í að tryggja hagkvæma orkuframleiðslu og orkuöryggi. Varmadælur geta t.d. leyst af hólmi rafkyntar hitaveitur sem kosta ríkissjóð nú um 200 millj. kr. á ári. Varmadælur byggjast á þekktri og margþróaðri tækni við framleiðslu hitaorku. Varmi er fluttur frá stórum varmalindum sem búa yfir frekar lágum hita. Með varmadælu er hitinn hækkaður og fluttur til smærri og heitari varmaþega. Þannig er unnt að flytja varmaorku með minni raforku en þyrfti til að hita varmaþegann beint og spara þar með raforku hlutfallslega.

Nýting varmadælna er fyrst og fremst til að mæta kröfu um orkuskipti við húshitun á stöðum þar sem hitaveita er ekki til staðar og hita þarf með niðurgreiddu rafmagni, eða þar sem hitaveita annar ekki aukinni eftirspurn. Síðari kosturinn er sérstaklega hagkvæmur þar sem tiltölulega hátt upphafshitastig lækkar kostnað við hitahækkunina. Sama gildir þar sem unnt er að nýta bakvatn í lokaðri hringrás hitaveitu. Í raun má segja að ekkert upphafshitastig í varmalindinni sé tæknilega útilokað en því lægra sem það er því hærra verður kostnaðurinn við hitahækkunina.

Þróun tækni til að virkja sjávarorku á hagkvæman hátt hefur vaxið fiskur um hrygg síðustu áratugi. Fjöldi þróunarverkefna er í gangi og ótal útfærslur hafa litið dagsins ljós. Sjávarfallavirkjanir sem nýta straum í afmörkuðum farvegi eru einu fullþróðu sjávarorkuverin og eru nokkur slík starfrækt í sjó. Þær byggjast á hreyfiorku þar sem hverfill er settur í straum (straumvirkjun) eða stöðuorku þar sem straumrás er stífluð og hæðarmunur virkjaður (stífluvirkjun). Þótt orka sjávar sé mikil er umhverfið tærandi og slítandi fyrir allan búnað sem setur þróuninni nokkrar skorður auk fleiri þátta. Framtíð sjávarorkuvirkjana er nokkuð óljós vegna samkeppni frá öðrum kostum.

Endurnýjanlegt eldsneyti eins og lífdísill eða metanól eru nokkuð sér á báti í þessari umfjöllun enda ætlað til notkunar í samgöngum fremur en til rafmagnsframleiðslu fyrir heimili eða fyrirtæki. Engu að síður er ljóst að þróa þarf áfram framleiðslu þess hér á landi einkum þegar unnt er að nota innlendar uppsprettur eins og sorphauga og búfjárúrgang. Sama gildir um föngun og hagnýtingu CO₂ sem til verður í málmvinnslu og jarðhitavirkjun. Í framtíðinni munu samgöngutæki líklega verða drifin áfram af endurnýjanlegu eldsneyti, rafmagni og vetni.

Sé litið yfir möguleika nýrra aðferða við orkuöflun getur heildarmyndin litið þannig út:

- Vindorka getur nýst til jafns við bæði vatnsorku og jarðhitaorku til rafmagnsframleiðslu. Hún er fjárhagslega hagkvæm, fullþróuð tæknilega og umhverfislega áhugaverð. Vindorkan er því einn hagkvæmasti orkukosturinn sem við höfum nú þegar og á næstu áratugum.
- Sjávarorka gæti orðið samkeppnisfær er fram líða stundir.
- Smávirkanir geta í mörgum tilfellum verið hagkvæmar. Þær henta vel til að styrkja orkukerfi landsins, einkum þar sem orkuöryggi er ábótavant vegna takmarkana flutningskerfisins. Það á einkum við um vatnsaflsvirkjanir en einnig um lítil vindorkuver og jarðvarmavirkjanir eins og sjóðandi jarðvarma.
- Varmadælnu munu líklega gegna vaxandi hlutverki í orkubúskapnum. Þær eru fyrst og fremst hitagjafar sem geta hraðað orkuskiptum á köldum svæðum. Þær eru ekki síður hitagjafar fyrir margs konar iðnaðarframleiðslu og geta þar af leiðandi stutt við atvinnuþróun víða um land.
- Sólarorka virðist vera fjarlægur kostur fyrir okkur en framleiðslukostnaður fer ört minnkandi og er vert að hafa sólarorku innan sjónsviðsins.
- Íslenska djúpbórunarverkefnið hefur skilað áhugaverðum árangri. Djúpbórun er talin möguleg á háhitasvæðum þar sem kólnandi kvikuinnskot eru á nokkurra km dýpi undir yfirborði jarðar. Markmiðið er að finna og nýta háhitakerfi í yfirmarksástandi⁵. Með

⁵ Algengustu birtingarmyndir (fasar) vatns eru ís, vökvi og gufa. Yfirmarksástand er fjórða birtingarmyndin sem talið að megi finna við þann þrýsting og hitastig sem er neðan við 3.500 m dýpi. Slíkur vökvi gæti fræðilega verið

djúpborun er talið að unnt sé að vinna allt að tíu sinnum meiri orku úr hverri holu en nú fæst með hefðbundinni vinnslu. Djúpborunarverkefnið er sérstaklega áhugavert með tilliti til nýrra aðferða við orkuöflun og afrakstur þess getur orðið mikill ef árangur verður eins og vænst er.

- Þá eru ótaldir möguleikar á framleiðslu eldsneytis úr lífrænum eða ólífrænum efnum, einkum fyrir orkuskipti á landi, lofti og á sjó. Margt hefur áunnist í þróun framleiðslu á endurnýjanlegu eldsneyti sem ásamt raforku og líklega vetni munu á næstu árum leiða orkuskipti í samgöngum á landi og sjó.

4. Lagaumhverfi og leyfisveitingar.

4.1. Raforkulög – virkjunarleyfi.

Leyfi Orkustofnunar þarf til að reisa og reka hvers konar raforkuver. Um veitingu virkjunarleyfis fer að ákvæðum raforkulaga, nr. 65/2003, sbr. einnig reglugerð 1040/2005.

Markmið raforkulaga er að stuðla að þjóðhagslega hagkvæmu raforkukerfi og efla þannig atvinnulíf og byggð í landinu, m.a. með því að skapa forsendur fyrir samkeppni í vinnslu og viðskiptum með raforku, með þeim takmörkunum sem nauðsynlegar reynast vegna öryggis raforkuafhendingar og annarra almannahagsmuna, sbr. einnig ákvæði 75. gr. stjórnarskrárinnar um atvinnufrelsi.

Virkjunarleyfi verður aðeins veitt sjálfstæðum lög- og skattaðila, sbr. 1. mgr. 5. gr. raforkulaga.

4.2. Raforkuver/virkjun – vindorkuver.

Með orðinu raforkuver/virkjun er átt við mannvirki sem notað er til vinnslu raforku. Tvær eða fleiri einingar sem mynda eðlilega heild og tengjast flutningskerfinu eða dreifikerfi gegnum sameiginleg tengivirki teljast ein virkjun, sbr. 15. tölul. 3. gr. raforkulaga. Undir það falla stöðvar sem nýta vindafl til raforkuframleiðslu (vindbú), iðjuver til framleiðslu á rafmagni úr jarðhitasvæðum, jarðvarmavirkjanir og önnur varmaorkuver, sbr. 1. viðauki laga um mat á umhverfisáhrifum, nr. 106/2000, liður 3 um orkuiðnað. Ekki er fjallað sérstaklega um sjávarfallavirkjanir í lögum. Lög um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, nr. 57/1998, taka einungis til rannsókna á vatnsafl til raforkuframleiðslu á landi og innan netlaga á strandsvæðum.

Ákvæði 78. gr. stjórnarskrárinnar kveður á um að sveitarfélög skulu sjálf ráða málefnum sínum eftir því sem lög ákveða. Þegar sótt er um virkjunarleyfi þurfa fyrirhugaðar virkjunarframkvæmdir að vera í samræmi við gildandi skipulagsáætlanir á viðkomandi svæði, sbr. 7. mgr. 5. gr. reglugerðar 1040/2005. Skipulag sveitarfélags um virkjunarkost verður að liggja fyrir þegar sótt er um virkjunarleyfi fyrir umræddan kost. Sveitarfélög hafa skyldu til þess að

um tíu sinnum auðugri af orku en venjuleg jarðgufa. Vökvi í yfirmarksástandi er meðal annars notaður til að auka orku úr streymi hverfla í kola- og kjarnorkuverum.

gera ráð fyrir virkjunum á svæðum sem í rammaáætlun eru sett í nýtingarflokk, sbr. 7. gr. laga um verndar- og orkunýtingaráætlun.

Tengisamningur við viðkomandi dreifiveitu/flutningskerfi þarf að liggja fyrir sbr. 3. mgr. 5. gr. raforkulaga.

Allir virkjunarkostir eru tilkynningaskyldir til Skipulagsstofnunar sbr. lög um mat á umhverfisáhrifum, nr. 106/2000, og eru eftir atvikum háðir umhverfismati þegar þeir geta haft í för með sér umtalsverð umhverfisáhrif vegna umfangs, eðlis eða staðsetningar. Jarðvarmavirkjanir og önnur varmaorkuver með 50 MW uppsett varmaafli eða meira og önnur orkuver, þ.m.t. vindbú, með 10 MW uppsett rafafli eða meira eru alltaf matskyld.

4.3 Ákvæði auðlindalaga varðandi orkurannsóknir gilda hvorki um rannsóknir á vindorku til raforkuframleiðslu, innan eða utan netlaga, né um sjávarorku utan netlaga.

Með orkurannsóknum er átt við rannsóknir sem tengjast virkjun til orkuvinnslu sem fram fara á grundvelli laga um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, sbr. 4. tölul. 2. gr. laga um verndar- og orkunýtingaráætlun, nr. 48/2011.

Lög um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu, nr. 57/1998, taka til auðlinda í jörðu í landi, í botni vatnsfalla og stöðuvatna og í sjávarbotni innan netlaga, m.a. rannsókna á jarðhita til raforkuframleiðslu. Lögin taka ekki til auðlinda í andrúmsloftinu, svo sem vinds. Þau taka hins vegar til rannsókna á vatnsaflum til raforkuframleiðslu, sbr. 1. mgr. 1. gr. laganna. Um leyfi til að virkja vatnsfall fer samkvæmt raforkulögum, sbr. 2. mgr. 49. gr. vatnalaga, nr. 15/1923.

Lög um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu gilda hvorki um rannsóknir til orkuvinnslu úr vindaflum né sjávarorku utan netlaga til raforkuframleiðslu.

4.4 Lög um verndar- og orkunýtingaráætlun, nr. 48/2011.

Gildissvið laga um verndar- og orkunýtingaráætlun, nr. 48/2011, nær skv. 2. gr. laganna til landsvæða þar sem er að finna virkjunarkosti til orkuvinnslu, jafnt innan eignarlanda sem þjóðlendna, þar sem eignarland tekur til landsvæða innan netlaga í stöðuvötnum og sjó, sem er háð einkaeignarrétti þannig að eigandi landsins fer með öll venjuleg eignarráð þess innan þeirra marka sem lög segja til um á hverjum tíma. Lögin vísa til *fallvatns* sem rennandi vatns í afmörkuðum farvegi, þó að tíma- og staðbreytilegur sé, og *háhitavæða* sem jarðhitakerfis þar sem hitastig grunnvatnsfordans er 200°C eða hærra á 1.000 m dýpi eða ofar og *orkurannsókn* sem tengjast virkjun til orkuvinnslu sem fram fara á grundvelli laga um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu.

Lögin taka til landsvæða þar sem er að finna orkulindir. Slíkar orkulindir gætu, aðrar en fallvatn og jarðhiti, verið kol og mór, sbr. t.d. eldri ákvæði 1. gr. nánulaga, nr. 24/1973, sem ákvæði auðlindalaga leystu af hólmi. Á eignarlöndum hefur eigandi rétt til hagnýtingar jarðefna, eins og mós, kola og annarra áþekktra, en á öðrum svæðum er ríkinu áskilinn slíkur réttur. Andrúmsloftið fellur hins vegar undir þau verðmæti sem kölluð eru *res communes* og enginn telst eiga einkarétt á. Vindorka teldist vafalaust til slíkra verðmæta.¹

Gildissvið laga um verndar- og orkunýtingaráætlun víkur hvorki að vind- né sjávarorku samkvæmt ákvæðum laganna og vafasamt er að líta á þessa orkugjafa sem *landsvæði* þar sem er að finna orkulindir, þ.e. virkjunarkosti til orkuvinnslu á sama hátt og fallvatn og/eða jarðhitakerfi á afmörkuðu svæði, sem lögin taka ótvírætt til. Hafa ber í huga að skipuleggja má staðarval fyrir vindorkuver, að höfðu samráði við viðkomandi sveitarfélög í landsskipulagsstefnu þar sem unnt er að samþætta áætlanir opinberra aðila m.a. um náttúruvernd og orkunýtingu og aðra málaflokka sem varða landnotkun skv. 10. gr. reglugerðar 1001/2011, sbr. 2. mgr. 45. gr. skipulagslaga, nr. 123/2010. Rammaáætlun tæki þá einungis til *landsvæða* þar sem er að finna fallvatn og/eða jarðhitakerfi á afmörkuðu svæði en ekki vindorkuvera.

4.5 Málsmæðferð Orkustofnunar vegna virkjunarleyfa.

Málsmæðferð Orkustofnunar tekur tilliti til stjórnisýsluréttarins um andmæli aðila máls og ákvæða raforkulaga sem kveða á um að Orkustofnun skuli kynna umsókn um leyfi með auglýsingu í Lögbirtingabladinu þar sem aðilum er málið varðar er gefið færi á að kynna sér umsóknina og koma á framfæri sjónarmiðum sínum. Í framhaldi af því er umsóknin um virkjunarleyfið metin á hlutlægan, málefnalegan og gagnsæjan hátt. Í því felst að Orkustofnun tekur afstöðu til þeirra sjónarmiða sem fram hafa komið við andmæli þeirra sem láta sig málið varða. Sama á við um þær athugasemdir sem fram koma í álitum Skipulagsstofnunar um umhverfisáhrif fyrirhugaðrar virkjunar í umhverfismati framkvæmdarinnar. Orkustofnun setur virkjunaraðila, eftir atvikum, skilyrði í samræmi við þau sjónarmið sem fram hafa komið í umsagnarferlinu eða samkvæmt álitum Skipulagsstofnunar um umhverfismat framkvæmdarinnar sé talin þörf á því. Með öðrum orðum, Orkustofnun leitast við að uppfylla kröfur stjórnisýsluréttarins um rannsóknarskyldu sína til þess að mál sé nægjanlega upplýst áður en ákvörðun um virkjunarleyfi er tekin.

Samkvæmt ákvæðum raforkulaga getur Orkustofnun sett skilyrði fyrir útgáfu virkjunarleyfis er lúta að því að tryggja nægilegt framboð raforku, öryggi, áreiðanleika o.fl. Enn fremur má setja skilyrði er lúta að umhverfisvernd, landnýtingu og tæknilegri og fjárhagslegri getu virkjunarleyfishafa, sbr. 2. mgr. 5. gr. raforkulaga. Kveðið er á um í raforkulögum að í virkjunarleyfi skuli m.a. tilgreina stærð virkjunar og afmörkun virkjunarsvæðis, öryggis- og umhverfisverndarráðstafanir og önnur atriði er lúta að skilyrðum leyfis og skyldum leyfishafa samkvæmt lögum þessum.

Ákvörðun Orkustofnunar um að hafna beiðni um virkjunarleyfi þarf að vera rökstudd.

Ákvarðanir Orkustofnunar er lúta að veitingu, endurskoðun og afturköllun virkjunarleyfa sæta kæru til úrskurðarnefndar umhverfis- og auðlindamála. Umhverfissamtök sem uppfylla laga-skilyrði um starfsemi sína geta staðið að slíkri kæru.

Þegar virkjunarleyfi liggur fyrir sækir virkjunaraðili um framkvæmdaleyfi til viðkomandi sveitarfélags, m.a. á grundvelli virkjunarleyfisins og skilmála þess.

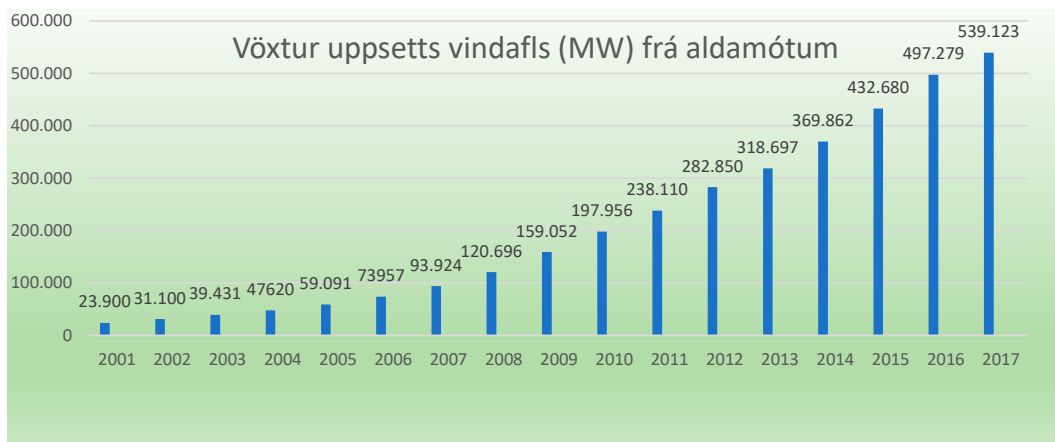
5. Vindorka.

Vindorka er orkan sem fólgin er í hreyfiorku vinds. Vindur er alla jafna meiri að vetri en að sumri og vindáttir ráðast af sólfarsvindum og landslagi auk þeirra veðrakerfa sem eiga leið nærri landinu. Svæðisbundnar breytingar ráðast mest af hæð í landi, en vindur er alla jafna meiri á hálendi en á láglandi og mestur við fjallstinda og í fjallaskörðum. Vindur við fjöll er flókinn því að fjallgarðar geta skapað skjól í sumum vindáttum en magnað vind í öðrum. Þessi áhrif fara eftir vindhraða og stöðugleika loftsins og eru því mismunandi eftir árstíma. Yfirborðsgerð ræður líka nokkru um vindhraða. Yfir kjarrlendi eða úfnu hrauni er vindur oftast minni en yfir sléttlendi eða vötnum. Þetta er vegna mismunandi yfirborðshrýfi. Því meiri hrýfi því meira dregur yfirborðið úr styrk vindsins. Þótt vindur á láglandi sé yfirleitt minni en á hálendi getur verið hvasst við ströndina því að vindur mætir minni fyrirstöðu yfir sjó en landi. Önnur áhrif yfirborðsgerðar stafa af því að land hitnar mismikið þegar sólin skín á það. Þannig hitnar svartur sandur meira en gróið land og vötn hitna hægar en halda varmanum lengur. Misjöfn hitnun á landi getur valdið uppstreymi og haft staðbundin áhrif á vinda.

Við mat á vindafari þarf að hafa í huga hvernig vindur breytist frá einum tíma til annars. Stærsta breytingin er milli árstíða. Að vetri eykst hitamunur frá tempruðum svæðum norðurhvels til heimskautasvæða og þessi aukni hitamunur knýr lægðagang og öflugri lægðir. Vetrarlægðir eru misstórar og miskrappar en mestu hvassviðri á Íslandi eru iðulega tengd þessum veðrakerfum. Að sumarlagi er lægðagangur minni en staðbundnir sólfarsvindar og fallvindar frá jöklum meira áberandi.

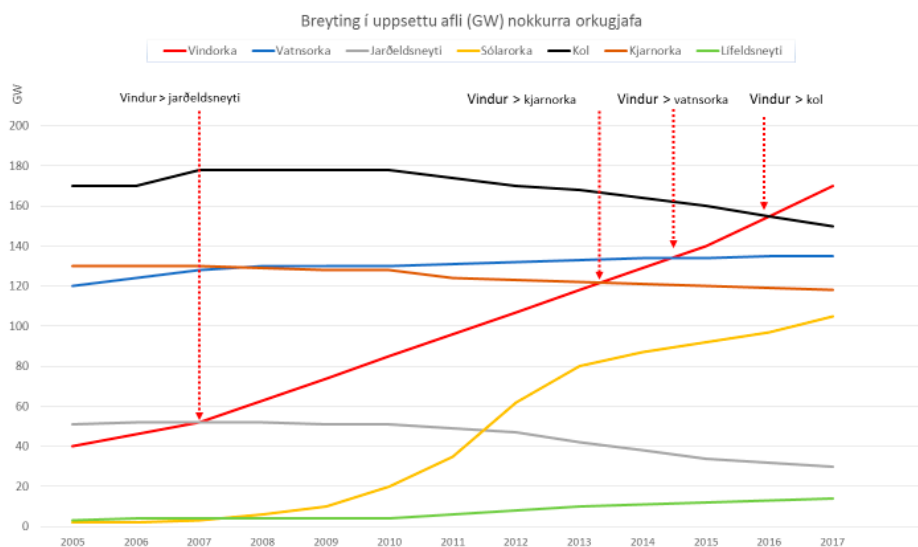
5.1. Nýting vindorku á heimsvísu og horfur fyrir Ísland.

Mesti vöxtur endurnýjanlegra orkukosta á heimsvísu er fólgin í vindorku. Uppsett afl hennar á heimsvísu óx um 10% á árinu 2017 og það ár var nýtt uppsett vindafl yfir 52.000 MW, eins og sést á mynd 5.1.1.



Mynd 5.1.1. Vöxtur uppsetts vindafls frá aldamótum (2001-2017).

Í Evrópusambandinu er uppsett vindafli 168.7 GW og bættust 15.6 GW við 2017 sem var metár. Framleiðsla vindorku er nú næststærst á eftir gasframleiðslu, sbr. mynd 5.1.2.⁶ Tímamót urðu árið 2007 þegar uppsett afl í vindorkuverum fór fram úr jarðeldsneyti sem fimmti stærsti aflgjafi raforku í löndum ESB. Árið 2013 fór vindorkan fram úr kjarnorku og 2015 fór hún fram úr vatnsorku sem þriðji stærsti aflgjafinn og ári síðar fram úr kolaorku sem næststærsti aflgjafi raforku. Vöxtur vindorku hefur verið hraður undanfarin ár og yfir 50 GW hafa bæst við á sl. fjórum árum. Rétt er að geta þess að þrátt fyrir að samanburður á orkuframleiðslu sé oft settur fram í afleiningum (GW) þá breytist samanburðurinn ef miðað er við orkuframleiðslu GWst. Ástæðan er að nýtingarhlutfall afls í vindorkuverum er frekar lágt.



Mynd 5.1.2. Breyting í uppsettu afli (GW) nokkurra orkugjafa á árunum 2005–2017.

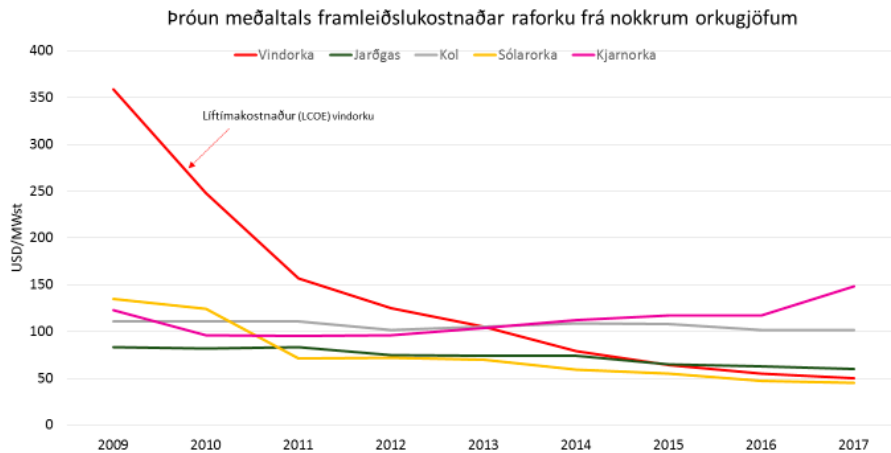
Sólarorka hefur vaxið nokkuð hraðar en vindorka eða úr nánast engu árið 2005 í um 105 GW árið 2017. Þessir tveir orkugjafar skera sig algerlega úr hvað vöxt varðar og markar hann vafalítið þróunina næstu áratugi. Vöxtur vindorku er ótvíræður en skortur á framboði góðmálma gæti hamlað sambærilegri þróun sólarorku. Aðrir orkugjafar standa um það bil í stað á tímabilinu en jarðefnaeldsneyti og kjarnorka minnkar eins og við er að búast. Á myndina vantar sjávarorku enda er framleiðsla sjávarorku nánast engin eins og staðan er nú en það gæti breyst er líður á öldina.

Stöðug kostnaðarlækkun og ýmsar tækniframfarir hafa valdið því að vindorkan er orðin samkeppnishæf við vatnsafl og jarðvarma á Íslandi. Víðast hvar í heiminum er vindorkan nú talinn ódýrasti orkukosturinn.

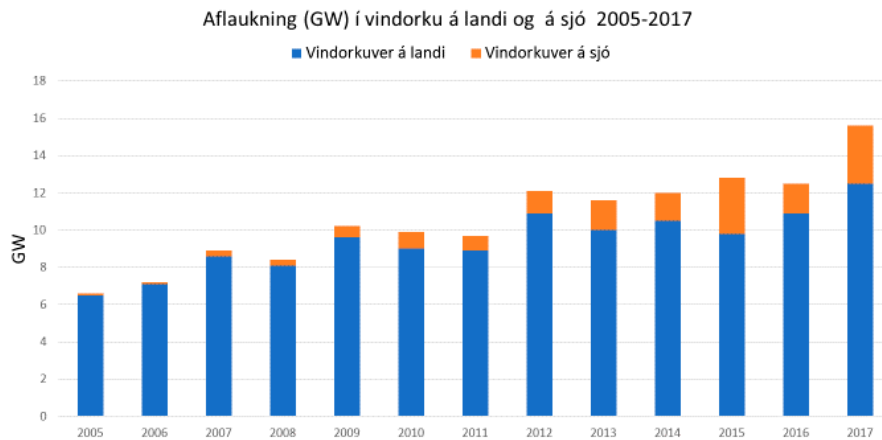
Þekktasta aðferðafræðin til að bera saman hagkvæmni mismunandi orkukosta kallast LCOE, (e. *levelized cost of energy*). Með beitingu hennar er hægt að nota sömu mælistiku við

⁶ <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf>

samanburð á hagkvæmni ólíkra virkjunarkosta. Á mynd 5.1.3. sést hvernig meðaltals framleiðslukostnaður raforku yfir líftíma orkuvers frá mismunandi orkugjöfum (LCOE) hefur þróast undanfarin ár⁷. Kostnaður vindorku nú er einungis hluti þess sem hann var fyrir átta árum. Á þeim tíma hefur hann fallið úr 359 í um 50 USD/MWst.



Mynd 5.1.3. Þróun framleiðslukostnaðar (USD/ MWst) raforku nokkurra orkugjafa.

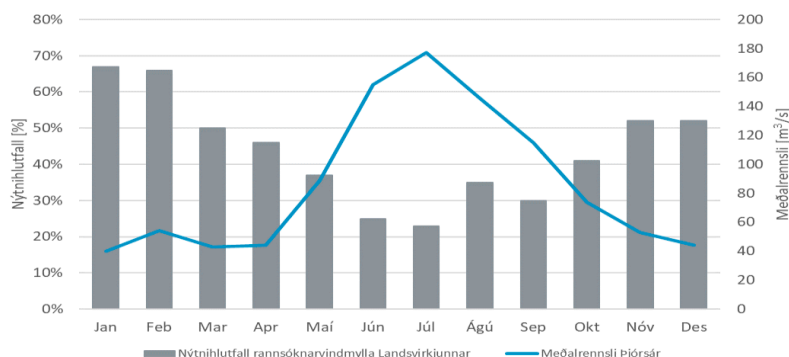


Mynd 5.1.4. Hlutfallsleg þróun framleiðslu vindorku á landi og á sjó undan landi.

⁷ Lazard's levelized Cost of Energy Analysis, Version 11.0, November 2, 2017

Vindorkuver á hafi úti eru vaxandi hluti þess afls sem sett er upp árlega eins og sést á mynd 5.1.4. Kostur þess að virkja vindorku á hafi er að þar er vindhraðinn almennt meiri en á landi. Vindorkuver á hafi eru hins vegar umtalsvert dýrari. Á Íslandi eru kjöraðstæður fyrir vindorkuver á landi vegna mikils vinds og opinna landsvæða. Þeim svipar því á margan hátt til aðstæðna sem sóst er eftir á hafi erlendis. Hins vegar er almennt ekki eftirsóknarvert að reyna að byggja upp vindorkugarða á hafi á Íslandi þar sem dýpi nærri landi er mikið auk þess sem kostnaður við vindorkugarða á hafi úti er umtalsvert meiri en á landi. En nýjar lausnir eins og fljótandi vindorkuver eru í þróun og gætu orðið valkostur í framtíðinni.

Framleiðsla vindorku og vatnsorku spilar sérstaklega vel saman. Vatnsafl er að mestu tengt rennsli jökuláa sem er mest vegna bráðunar jökla að vori og sumri. Vindorkan er mest kaldari mánuði ársins, þegar vindhraði er hár. Þessi samlegðaráhrif vatns og vindorku sjást vel á mynd 5.1.5. sem sýnir mánaðarlegt meðalrennsli Þjórsár og mánaðarframleiðslu rannsóknarvindmyllna ofan Búrfells.

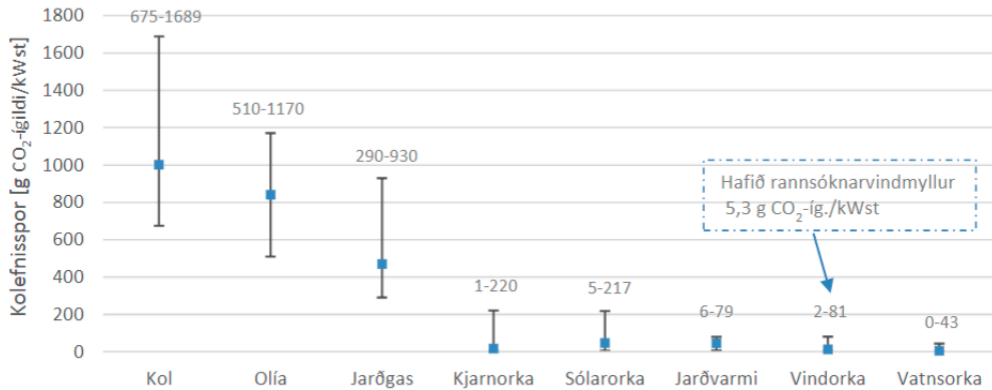


Mynd 5.1.5. Samspil vind- og vatnsorku. Nýtingarhlutfall vindmyllna ofan Búrfells og meðalrennsli Þjórsár.

5.2. Lífsferilsgreining, kolefnisfótspor, endurnýting og förgun.

Lífsferilsgreining á kolefnisfótspori rannsóknarvindmyllna Landsvirkjunar sýnir að kolefnisfótspor vindmyllna á Íslandi er lágt eins og sýnt er á mynd 5.2.1.⁸ Þar sést kolefnisfótspor nokkurra orkugjafa sem grómm af ígildi CO₂ á hverja framleidda kWst. Framleiðsla vindorku losar lítið af kolefnum yfir líftímann í samanburði við aðra orkugjafa. Vindorkan er ásamt vatnsaflri sá kostur sem losar minnst kolefni. Vindorka fellur því vel að skuldbindingum Íslands um að draga úr losun kolefnis hvort sem það er fyrir staðbundin verkefni eða með stærri vindmyllugörðum.

⁸ <http://gogn.lv.is/files/2015/2015-129.pdf>



Mynd 5.2.1. Samanburður á kolefnisfótspori nokkurra orkugjafa.⁹

Líftímagreiningin leiddi einnig í ljós hlutfall endurvinnanlegra og endurnýtanlegra efna sem vindmyllurnar voru byggðar úr. Niðurstöðurnar eru sýndar í eftirfarandi töflu 5.1.¹⁰

Hráefni	Hlutfall efna til endurvinnslu eða nýtingar	Ávinningur af endurunnu efni
Stál í vélarhúsi	80% endurvinnanlegt	37%
Stál í turni	90 % endurvinnanlegt	37%
Ál	95 % endurvinnanlegt	69%
Kopar	95% endurvinnanlegur	81%
Steypujárn	95% endurvinnanlegt	37%
Rafbúnaður	80% endurvinnanlegur	-

Tafla 5.1. Hlutfall efna í vindmyllu til endurvinnslu eða endurnýtingar og hlutfall þess sem reiknast sem ávinningur. Í ávinningi af endurunnu efni felst t.d. að 1 kg af endurunnu stáli kemur í veg fyrir framleiðslu á 0,37 kg af nýju stáli.

Vindmyllur eru aðallega úr stáli og kopar sem að stórum hluta er hægt að endurnýta. Einnig er hægt að endurnýta hluta rafbúnaðar. Nokkuð flóknara er að endurnýta spaða hverfilsins þar sem þeir eru gerðir úr hertum glertrefjum eða koltrefjum. Þeir enda því oft í urðun þar sem lítið er hægt að endurnýta efnin.

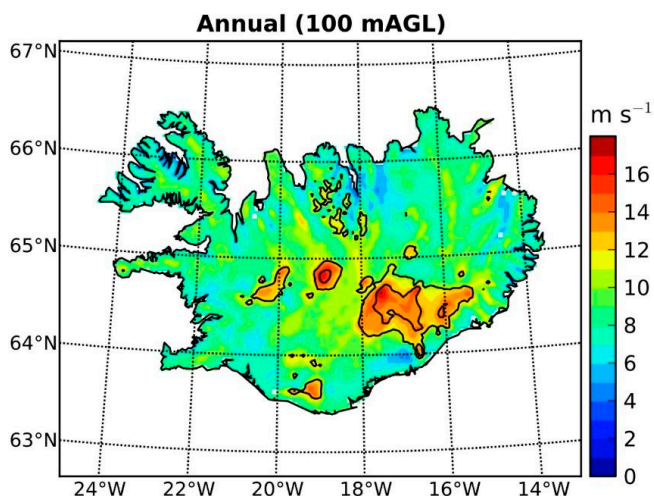
5.3. Vindafar.

Við staðarval þarf að meta samspil margra þátta. Umhverfisþættir geta útilokað hagnýtingu vindorku, t.d. friðlýst svæði, jöklar og stöðuvötn, landhalli, landslag og ásýnd. Tæknilegir þættir sem meta þarf eru t.d. vindorka, nálægð og rýmd flutningskerfis, nálægð við vegi og hafnir og ísingarhætta.

¹⁰ Landsvirkjun. Vistferlisgreining raforkuvinnslu með rannsóknarvindmyllum á hafinu við Búrfell. Skýrsla nr. LV-2015-129, desember 2015.

Mikilvægust er vindauðlind svæðisins. Við forathugun er byggt á veðurmælingum úr lágum möstrum eins og Veðurstofa Íslands og Vegagerðin reka um land allt en þörf er fyrir mælingar úr meiri hæð fyrir frum- og verkhönnun.

Algengast er að veðurfarslíkön séu notuð til að herma vind fyrir stór landsvæði. Á grundvelli þeirra eru líklegir virkjunarstaðir afmarkaðir. Veðurfarslíkön eins og það sem Veðurstofan notar fyrir veðurspár sínar eru oftast notuð fyrir slíka greiningu. Verkefnið ICEWIND¹¹ (e. *improved forecast of wind, waves and icing*) var samnorraent verkefni um vindorku á köldum svæðum sem Veðurstofa Íslands var þátttakandi í.¹² Í tengslum við verkefnið var búinn til vindatlas sem byggðist á endurgreiningu á veðurfari Íslands og kortlagði vindafar Íslands. Niðurstöðu þess má m.a. finna á vefsíðu Veðurstofunnar og í lokaskýrslu Icewind-verkefnisins. Mynd 5.3.1. sýnir gróflega meðalvindhraða í 100 m hæð yfir yfirborði.



Mynd 5.3.1. Meðalvindhraði (m/s) í 100 m hæð yfir yfirborði.¹³

Niðurstöður veðurfarslíkana duga þó ekki til þess að meta virkjanlega vindorku og ákvarða lykilstærðir fyrir hönnun vindorkuvera. Til þess þarf aukreitis staðbundnar vindmælingar upp í nokkurra tuga metra hæð og útreikninga með landslagslíkani þar sem m.a. er tekið tillit til hæðar yfir sjávarmáli, yfirborðsgerðar og hindrana í landslagi.

Veðurfarslíkön eru ekki óbrigðul og þau meta veðurfarslega þætti á mismunandi hátt. Að meðaltali reiknast mismunur milli líkana yfir Ísland um 1 m/s sem svarar til um 20% mismunar í orkuframleiðslu. Það er því varhugavert að einblína á ákveðið líkan við staðarval. Veðurstofa Íslands hefur nýlega tekið í notkun nýtt veðurfarslíkan en vindatlasinn má enn nota til að fá fyrstu vísibendingu um hvar mögulegir virkjunarstaðir fyrir vindorku gætu verið.

¹¹ <http://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/IceWind-final-scientific-report-Oct-2017.pdf>

¹² <http://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/IceWind-final-scientific-report-Oct-2017.pdf>

¹³ <http://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/IceWind-final-scientific-report-Oct-2017.pdf>

Segja má að nýta megi vindorku um allt land en skilyrði eru misgóð. Í þriðja áfanga rammaáætlunar hafa tvær tillögur að vindorkugörðum verið til umfjöllunar. Fyrirhugað er að þeir rísi á Hafinu fyrir ofan Búrfell og við Blönduvirkjun. Út frá almennum ytri skilyrðum teljast þessi svæði mjög ákjósanleg. Á Hafinu er áformað að uppsett afl verði allt að 200 MW sem gæti skilað 705 GWh/ári. Stærð framkvæmdasvæðis yrði allt að 40 km². Áform Landsvirkjunar við Blönduvirkjun hljóða upp á allt að 100 MW í uppsettu afli, orkuframleiðslu um 350 GWh/ári og allt að 20 km² framkvæmdasvæði.

Sveitarfélög eru í auknu mæli farin að huga að möguleikum á nýtingu vindorku í tengslum við gerð aðalskipulags. Fyrir liggur að litlir vindorkugarðar geta framleitt jafnmikla orku á ársgrundvelli og litlar vatnsafls- og jarðvarmavirkjanir. Meðal sveitarfélaga sem eygja áhugaverða möguleika í vindorku eru Snæfellsbær og Rangárþing ytra sem hafa fengið verkfræðistofu til að vinna skýrslu um möguleg sóknarfæri, sem birt er sem fylgiskjal með tillögu að aðalskipulagi sveitarfélaganna. Fleiri sveitarfélög hyggjast fara sömu leið við aðalskipulagsvinnu enda er áhugi á nýtingu vindorku sífellt að aukast. Sveitarfélögin líta svo á að slíkar grunnrannsóknir við gerð aðalskipulags muni nýtast þeim til að flýta málsmeðferð ef þeim berast formlegar umsóknir frá framkvæmdaraðilum sem hyggjast reisa vindorkuver innan þeirra marka.¹⁴

Í viðauka 1 er ítarlegri umfjöllun um staðarval fyrir vindorkuver.

5.4. Niðurstöður.

Vindorka er mjög áhugaverð til rafmagnsframleiðslu. Reynslurekstur tveggja véla á Hafinu ofan við Búrfell sýnir að gangtími (nýtni) þeirra er hærri en gert var ráð fyrir og í raun með því allra besta á heimsvísu. Með örri tækniþróun hefur kostnaður við framleiðslu á hverja orkueiningu farið lækkandi og stefnir í að geta keppt við vatnsorku og jarðhitaorku í verði. Vindorkan hefur þá kosti að vera fyllilega sjálfbær og áhrif á umhverfi eru afturkræf. Umhverfisáhrifin eru fyrst og fremst sjónræn, þótt fleira komi til, sem unnt er að lágmarka, t.d. með staðarvali og landslagsmótun. Vindorkan er einnig tákn nýrra tíma þar sem sjálfbærni og umhverfisvæn tækni er í hávegum höfð. Vindorka hentar sérlega vel í samrekstri með vatnsorku sem byggist á því að hámarks framleiðslugeta vatnsorku er að sumri en vindorkan er í hámarki að vetri til. Framleiðslu vindorku má einnig líta á sem grunnkeyrslu þar sem vatnsorkan kemur inn í eftirspurnartoppa og þegar vind hægir. Samlegðin er í alla staði mjög jákvæð og má segja að samkeyrslan hámarki nýtingu hinna hefðbundnu auðlinda.

6. Sjávarorka.

Í maí 2015 lagði iðnaðar- og viðskiptaráðherra fyrir Alþingi skýrslu um mat á umfangi og nýtingarmöguleikum sjávarorku sem samin var af starfshópi sem ráðherra skipaði. Þessi kafli er viðbót við þá skýrslu. Skýrslan frá 2015 byggðist á þingsályktun um rannsóknir á umfangi

¹⁴ Upplýsingar frá Sambandi íslenskra sveitarfélaga.

og nýtingarmöguleikum sjávarorku með það að markmiði að greina hagkvæmustu nýtingarkosti við strendur Íslands til framtíðar. Jafnframt voru lögð drög að uppbyggingu gagnagrunns um nýtingu sjávarorku og kannað með hvaða hætti Ísland gæti orðið aðili að alþjóðlegu samstarfi um nýtingu sjávarorku.

Sjávarorku má skipta í fimm flokka, þ.e. orku sem virkjuð er úr hafstraumum, sjávarfallastraumum (að- og útfalli sjávarfalla), ölduhreyfingum, hitaflæðiorku sjávar (e. *ocean thermal energy conversion – OTEC*) og efnaorku sem losnar við blöndun ferskvatns og sjávar, svokallaða seltuorku. Eftirfarandi er stutt lýsing á þremur fyrstu flokkunum:

Hafstraumaorka: Hafstraumar sem eiga upptök í varmaflutningi frá miðbaug til heimskautasvæða eru hluti af vinddrifinni hringrás og hitaseltuhringrás jarðar (e. *winddriven, thermohaline ocean circulation*). Á landgrunni Íslands eru þessir straumar að jafnaði 5–20 cm/s eftir staðsetningu og kemur orka þeirra til viðbótar orku í reiknuðum sjávarfallastraumum.

Sjávarfallahreyfiorka: Sjávarföll verða til við samspil aðdráttarkrafta tungls, jarðar og sólar. Lota sjávarfalla er 12 klst. og 25,2 mínútur. Flóð, útfall, fjara og aðfall verður einu sinni á hverri lotu. Flóð og fjara verður því um tvisvar á sólarhring og liggjandi sem er á fallaskiptum um fjórum sinnum á sólarhring. Á liggjanda er enginn straumhraði. Sjávarföll við Ísland eru fremur flókin og mikill munur er á flóði og fjöru á milli landshluta, þannig er mestur munur við Vesturland og minnstur við Austur- og Norðurland.

Möguleg orkuframleiðsla úr sjávarföllum sveiflast innan sólarhringsins í takt við straumhraða og sjávarhæð eftir því hvort hreyfiorka eða stöðuorka er nýtt. Um fjórum sinnum á sólarhring er engin hreyfiorka, tvisvar á sólarhring er engin stöðuorka. Virkjun sjávarfalla stendur því illa ein og sér í raforkukerfinu og þarfnast samkeyrslu með öðrum orkukostum, t.d. vatnsorku.

Ölduorka: Ölduorka er ekki háð sjávarfallastraumum. Vindurinn knýr öldurnar áfram og þar sem opið er fyrir hafi við vindasamar strendur er öldugangur mikill við landið.

Sjór hefur um 830 sinnum meiri eðlismassa en loft og þess vegna er orka sjávarstrauma hlutfallslega miklu meiri en loftstrauma við sama hraða og magn af sjó annars vegar og lofts hins vegar. Sjávarstraumar eru auk þess mjög reglulegir og fyrirsjáanlegir og unnt er að spá nákvæmlega langt fram í tímann um hvernig þeir munu sveiflast.

Fræðilegt heildarmagn hafstraumaorku, sjávarfallahreyfiorku og ölduorku við Ísland er hægt að meta gróft út frá fyrirliggjandi upplýsingum og út frá innlendum og erlendum reiknilíkönum og mælingum. Til að meta umfang nýtilegrar og aðgengilegrar orku í hafinu við Ísland eða á afmörkuðu svæði þarf hins vegar töluvert meiri vinnu.

Vélbúnaður fyrir straumvirkjanir og ölduvirkjanir er enn í þróun og er mislangt á veg komin. Það er því einhver bið í að fullreynd tækni til almennrar orkuvinnslu í sjó verði tiltæk. Haldþætt reynslutölur um nýtni, fjárfestingarkostnað og viðhald liggja ekki fyrir. Ekki er því tímabært að meta hagkvæmni orkuvinnslu úr sjó héraendis, en miðað við áætlaðan

framleiðslukostnað sem fyrirtæki í sjávarorkutækni hafa birt er ljóst að kostnaður við virkjun sjávarorku er umtalsvert hærrí en reynslutölur sýna fyrir aðra virkjunarkosti á Íslandi, þ.m.t. virkjun vindorku. Að svo komnu máli er vandséð að nokkur nýtingarkostur fyrir sjávarorku sé hagkvæmur. Það kann þó að breytast með aukinni þekkingu og þróun tækninnar í átt að lækkandi framleiðslukostnaði. Auðveldara er að meta hagkvæmni stífluvirkjunar sem nýtir hæðarmun sjávarfalla þar sem nokkrar slíkar eru í rekstri í heiminum.

Í skýrslunni frá 2015 var farið yfir helstu þætti sem snerta virkjun sjávarorku og er í sjálfu sér litlu við það að bæta. Heldur hefur þó hægt á þróun tæknilegra sjávarorkulausna vegna mikils kostnaðar og takmarkaðs árangurs. Þróunin heldur engu að síður áfram enda er talið að með hækkandi orkuverði, aukinni þörf fyrir endurnýjanlega orkugjafa, m.a. vegna nauðsynjar þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, og með bættu regluverki muni hlutfallsleg hagkvæmni sjávarorku aukast.

Reglulega er safnað upplýsingum um hafstrauma, sjávarföll og öldur. Hreyfiorku þeirra er hægt að meta gróflega út frá fyrirliggjandi upplýsingum. Sjávarfallalíkan hefur veið keyrt daglega hjá Vegagerðinni frá árinu 1998. Mesta reiknaða hreyfiorka er í mynni Hvammsfjarðar á bilinu 10–100 MWh/m²/ári. Á landgrunninu við Vestfirði og Austfirði, í Breiðafirði og víðar er hún á bilinu 1–10 MWh/m²/ári. Aflið er mest á stórstreymi eða yfir 1.000 W/m² í mestu sjávarfallaröstum umhverfis landið og á bilinu 100–1.000 W/m² víða á Breiðafirði og á landgrunninu við Vestfirði og Austfirði auk nokkurra staða við landið. Á svæði þar sem sjávarstraumur nær mestri hreyfiorku í stórstreymi, þ.e. upp í 1.000 W/m², væri hægt að framleiða árlega rúmlega 0,5 MWst af raforku fyrir hvern fermetra sjávarorkuverfils. Framleidd hreyfiorka er þó háð nýtni véla og búnaðar og því hversu stóru hlutfalli af orkunni er fræðilega hægt að ná út, en það er háð aðstæðum. Þessi orka (0,5 MWh) nemur aðeins um 10% af árlegri raforkunotkun dæmigerðs íslensks heimils (án húshitunar með rafmagni). Út frá þessu má vel gera sér í hugarlund að til þess að virkja sjávarorku sem nemur t.d. 1/10 af orkuframleiðslu Blönduvirkjunar (90 GWh á ári) þarf mjög plássfrekt og stórt orkuver á sjávarbotni.

Þegar ráðist verður í ýtarlegri rannsóknir á nýtingu sjávarorku ætti einkum að beina athygli að stærstu röstum. Haldgóðar upplýsingar og reiknilíkön eru einnig til um vind yfir hafi og öldur hjá Vegagerðinni sem rekur upplýsingakerfi um veður og sjólag. Þær upplýsingar eru taldar fullnægjandi fyrir frummat og frekari úrvinnslu á ölduorku við strendur landsins.

Rannsóknir á orkuauðlindunum eru kostnaðarsamar og er almennt skilið á milli öflunar almennra grunnupplýsinga og sértækari rannsókna sem beinast að afmörkuðum virkjunarstað og beitingu tiltekinnar tækni til orkuvinnslu. Það hefur þá fallið á virkjunaraðila að bera kostnað við sértækar rannsóknir og alla hönnun. Að svo komnu máli er virkjun sjávarorku við Ísland ekki talin hagkvæm þótt svo kunni að verða eftir nokkra áratugi. Þekking á vindorku og virkjun hennar er t.d. mun meiri og rekstrarlegar forsendur betur þekktar og henta m.a. betur til að mæta orkuþörf á afskekktum svæðum sem nú búa við ófullnægjandi orkuöryggi.

Í þessari skýrslu, sem er viðbót við skýrslu iðnaðar- og viðskiptaráðherra frá 2015, er áhersla lögð á að gera grein fyrir tækniþróun, þróun kostnaðar og vistferligreiningu. Að öðru leyti er vísað til framangreindrar skýrslu.¹⁵

6.1 Yfirlit yfir hugmyndir um hagnýtingu sjávarorku.

Fagna ber hverri hugmynd um sjálfbæra nýtingu endurnýjanlegra auðlinda. Undanfarin ár hefur verið unnið við tvö þróunarverkefni um hagnýtingu sjávarorku á vegum Sjávarorku ehf. og Valorku ehf. Sjávarorka var stofnað í Stykkishólmi í apríl 2001 í þeim tilgangi að rannsaka möguleika á virkjun sjávarfallastrauma í Breiðafirði og hafa forystu um virkjun þar. Straummælingar hófust í apríl 2005 en úrvinnsla gagna var í samstarfi við verkfræðistofuna Vista og verkfræðistofuna Verkís. Mælingum í fyrsta áfanga lauk haustið 2007 og var gefin út áfangaskýrsla um orkugetu sjávarfalla í Hvammsfirði vorið 2008.¹⁶

Rannsóknarleyfi var gefið út af Orkustofnun í janúar 2010 sem gildi til 31. desember 2016. Það er fyrsta og eina leyfið sem gefið hefur verið út vegna sjávarorkuvinnslu hér á landi. Leyfið tók aðeins til svæðis innan netlaga, eins og lög kveða á um, og fól ekki í sér fyrirheit um forgang að nýtingarleyfi. Verkefnið hefur verið í biðstöðu eftir að rannsóknarleyfið rann út.

Í innanverðum Breiðafirði er mestur sjávarfallamunur hérlendis og þar er kraftur innstreymis og útstreymis mestur. Heildarflutningur sjávar um mynni Hvammsfjarðar er mestur um 50.000 m³/s og fer um 75% af rennsli út og inn fjörðinn um Röst en til viðbótar er töluverð orka í öðrum sundum. Heildar hreyfiorka í Röst frá botni að yfirborði er áætluð um 800 GWh/ári. Þar fer saman mikill straumhraði og hár meðalhraði. Mest mældi straumhraði er allt að 9 m/s og hámarksmeðalhraði í mælisniði á stórstreymi er um 3,3 m/s. Hreyfiafl og hreyfiorka eru í réttu hlutfalli við hraða í þriðja veldi, þ.e. ef hraðinn tvöfaldast þá áttfaldast hreyfiorkan. Hugmynd Sjávarorku byggist á svonefndum straumhverflum. Stríðir straumar á milli eyja og skerja í mynni Hvammsfjarðar yrðu virkjaðir. Slík virkjun mundi gera stúflugarða óþarfa og hefði takmörkuð áhrif á lífríki.

Valorka hefur í um áratug unnið að tækniþróun fyrir nýtingu sjávarorku. Um er að ræða þróun hverfils sem hentar til virkjunar sjávarfallastrauma og nýtir mun hægari straum en til skoðunar hefur verið í Röst og hefur athyglin einkum beinst að röstum við annes með straumhraða 0,5 til 2 m/s. Meðal annars hefur verið gert ráð fyrir að hverfill lægi við akkeri í miðjum straumi. Þvermál hverfils gæti verið 10–20 m og snúningshraði hans um 10 snúningar á mínútu. Ýmsar útfærslur á þessari grunnhugmynd hafa verið skoðaðar. Nýleg útfærsla er fjölása hverfill (VAL-X) sem yrði mun afkastameiri og einfaldari í útfærslu en fyrri gerðir¹⁷.

Af öðrum hugmyndum sem komið hafa fram eru áhugaverðar útfærslur Vesturorku um vegþverun í mynni Þorskafjarðar milli Árbæjar og Skálaness ásamt sjávarfallavirkjun. Þverun

¹⁵ Skýrsla iðnaðar- og viðskiptaráðherra um mat á umfangi og nýtingarmöguleikum sjávarorku, samin af starfshópi skipuðum af ráðherra og lögð fyrir Alþingi á 144. löggjafarþingi 2014-2015, dags. 20. maí 2015 (þingskjal 1311, 750. mál).

¹⁶ Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen hf. *Sjávarfallastraumar í Breiðafirði, orka í sjávarföllum*, 1. áfangi, apríl 20.

¹⁷ Valorka. *Góður gangur í þróunarstarfi*, fréttir 25.september 2015 (<http://valorka.is/>).

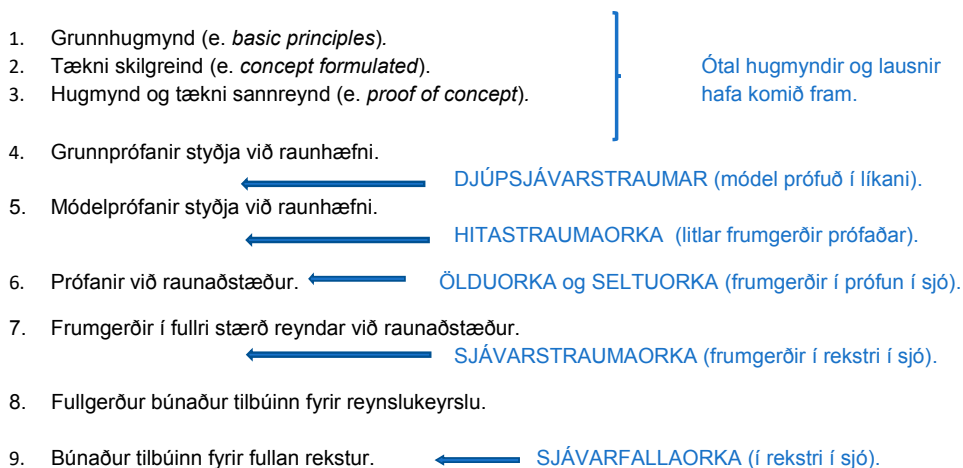
í mynni Þorskafjarðar og aðliggjandi fjarða er talin geta gefið 180 MW hámarksafli samkvæmt útreikningum Bjarna Jónssonar.¹⁸ Raunafl virkjunar á útfalli gæti orðið á bilinu 75–80 MW.

Hugmyndir um staðsetningu sjávarorkuvirkjana hafa að miklu leyti verið bundnar við straumhörðustu rastirnar eins og Látraröst, Straumnesröst, Langanesröst og Reykjanesröst og við þröng sundum á milli eyja. Flest bendir til þess að flutningur raforku frá virkjunum á þessum stöðum inn á flutningskerfið á landi gæti orðið dýr í uppsetningu og rekstri samanborið við virkjunarstaði á landi. Nánar er fjallað um tengingar við raforkukerfið í skýrslunni frá 2015.

6.2. Tækniþróun.

Pegar hagnýting sjávarorku er borin saman við aðrar algengari framleiðsluaðferðir með margra áratuga notendareynslu verður ljóst að þróun sjávarvirkjana stendur frammi fyrir margvíslegum vandasömum áskorunum. Þær snúa einkum að verkfræðilegum lausnum sem þörf er á áður en kostnaður lækkar verulega og forsendur skapast fyrir því að sjávarvirkjanir nái almennri útbreiðslu. Þróun sjávarfallavirkjana í afmarkaðri straumrás er lengst komin og eina aðferðin sem segja má að sé að komast á stig hagnýtingar. Sjávarfallastraumar og sjávarhæð eru tiltölulega fjárfélagleg og auðvelt að reikna orkuspar fyrir langtímahagnýtingu sem auðveldar forskriftir fyrir tæknibúnaðinn.

Til að gera betur grein fyrir stöðu þróunar mismunandi gerða sjávarorkuvera er eftirfarandi stöðumynd dregin upp en hún sýnir 9 þróunarstig og innbyrðis stöðu tækniþróunar helstu gerða sjávarorkuvirkjana¹⁹:



Sjávarfallavirkjun sem nýtir strauma í afmörkuðum farvegi er eina gerð sjávarorkuvera sem er fullþróuð og eru nokkrar slíkar í rekstri í sjó. Þær byggjast á hreyfiorku þar sem hverfill er settur

¹⁸ Bjarni M. Jónsson, *Virkjun sjávarfallaorku á Vestfjörðum*. Meistaraprófsritgerð við Háskólasetur Vestfjarða 2010.

¹⁹ Mofor L, Goldsmith J, Jones F (2014), *Ocean energy*. Technology Readiness Patents, Development Status and Outlook, Paris.

í straum (straumvirkjun) eða stöðuorku þar sem straumrás er stífluð og hæðarmunur virkjaður (stífluvirkjun). Við Ísland er sveiflutími sjávarfallabylgjunnar rúmlega 12,4 klst. Uppsett afl sjávarfallaorkuvera við árslok 2016 er um 536 MW. Stærsti hluti þess eða um 90% uppsetts afls er í tveimur sjávarfallavirkjunum. Sihwa Lake-orkuverið í Suður-Kóreu er með uppsett afl 254 MW (gangsett 2011) og La Rance-orkuverið í Suður-Frakklandi með 240 MW. La Rance er elst þessara stóru virkjana og hefur verið í rekstri frá 1966. Þriðja stærsta sjávarfallavirkjunin er Annapolis Royal í Kanada með 20 MW (gangsett 1984). Byrjað er að reisa sjávarstraumavirkjanir og ýmis áform eru víða á teikniborðinu. Stærsta verkefnið nú á dögum, þar sem raforka er framleidd inn á dreifikerfi, er sjávarstraumavirkjunin MeyGen í Pentlandfirði í Skotlandi. Verkefnið hófst árið 2010. Í upphafi árs 2017 var uppsett afl 6 MW og verður 86 MW í lok árs 2021. Ráðgert er að MeyGen verði í fullri stærð með 398 MW uppsett afl og árlega orkuframleiðslu upp á tæpar 700 GWh. Þótt rætt sé um uppsett afl í sjávarorkuverum eins og í öðrum orkuverum er rétt að hafa í huga að meðalaflíð í reglubundnum rekstri þeirra er almennt undir 25% af uppsettu afli. Þrátt fyrir að talsverð reynsla sé komin á smíði og rekstur sjávarfallavirkjana eru hverflar hannaðir og smíðaðir fyrir hvert einstakt verkefni sem heldur kostnaði uppi.

Sjávarfallavirkjanir krefjast oft mikillar mannvirkjagerðar, t.d. stíflugerðar, sem nær þvert fyrir firði og sund og er vélbúnaði (lokum, túrbínu og rafal) þá komið fyrir í stöðvarhúsi í stíflunni til að framleiða rafmagn við aðstreymi og útstreymi. Í nýjum útfærslum á sjávarfallavirkjunum er stöðvarhús á landi og neðanjarðar, jafnvel neðansjávar til að minnka umhverfisáhrif þeirra. Þegar firðir eru stíflaðir og sjávarstöðu innan stíflu breytt verða alltaf umtalsverð neikvæð og oft alvarleg umhverfisáhrif á vistkerfi fjarðanna.

Straumavirkjun byggist á því að hverfill er settur niður í strauminn og nýtir frjálst gegnumflæði sjávarins. Umhverfisáhrif straumavirkjana eru ekki talin eins mikil og stífluvirkjana. Hugmyndir um virkjun Rastar í Breiðafirði fyrir mynni Hvammsfjarðar byggist á sjávarfallastraumi.

Virkjun sjávarfallastrauma í röstum, eins og Látraröst, Straumnesröst, Langanesröst og Reykjanesröst byggist á því að virkja hreyfiorku sjávarstrauma án þess að hindra streymið með rennisslúringu. Þessi tækni hefur verið talin umhverfissvænni en stífluvirkjanir enda krefst hún lítilla sýnilegra mannvirkja og hefur minni áhrif á vistkerfið.

Ekki eru til góðar kerfisbundnar straummælingar eða mat á virkjanlegu þversniði í stærstu röstunum hér við land. Reiknilíkön gefa engu að síður gagnlegar vísbendingar. Staðhættir, eins og botndýpi, eru breytilegir og því ekki unnt að gefa einhlíta lýsingu á aðstæðum. Út frá þeim upplýsingum sem tiltækar eru má gróflega áætla að stærstu rastirnar geti náð um 10–12 sjómílar út frá landi. Mesti straumhraði gæti verið um 1–1,3 m/sek. á svæðum þar sem dýpi nær 20–40 m. Út frá þessu mætti gróflega áætla fræðilega hreyfiorku en það hefur lítinn tilgang ef staðhættir eru ekki betur þekktir.

Ölduvirkjanir er þriðji kosturinn sem prófaður hefur verið í fullri stærð í sjó við raunaðstæður. Margar gerðir eru í þróun. Algeng tækni byggist á því að tveir eða fleiri hlutar sem tengdir eru

saman með hreyfanlegum lið fljóta í sjó á grunnsævi og hreyfast í takt við öldurnar. Hreyfingu á milli hlutanna er umbreytt í vökvaþrýsting sem síðan er breytt í snúning í vökvamótor sem knýr rafal. Á heildina litið virðast ölduvirkjanir lakari kostur en hinir tveir fyrrnefndu, m.a. vegna þess að framleiðslukostnaður rafmagns með þeirri ölduvirkjunartækni sem nú þekkest yrði hærri. Hins vegar er ölduorka við Ísland mun meiri en sjávarstraumaorka og margt sem bendir til að orkuframleiðsla með ölduvirkjunum yrði jafnari. Þróun annarra gerða sjávarorkuverfla en sjávarfalla- og ölduhverfla er mun skemmra á veg komin.

Fjöl margar útfærslur á þessum gerðum og fleiri er að finna í texta og myndum í fyrrnefndri skýrslu iðnaðar- og viðskiptaráðherra frá 2015.

6.3. Þróun kostnaðar.

Fyrirtæki víða um heim hafa um margra ára skeið unnið að þróun tæknilausna og búnaðar sem tengjast nýtingu sjávarorku. Þrátt fyrir það hefur viðskiptalegur ávinningur þeirrar vinnu látið á sér standa vegna þess að ekki hefur tekist að leysa viðvarandi vanda sem alla tíð hefur fylgt þessari tækni. Hæst ber fjármögnun dýrra og tímafrekra rannsókna og þróunar auk flókinna framkvæmda og rekstrar sem einkennast af mikilli áhættu, óljósum umhverfisáhrifum, ófullkomnu regluverki um skipulagsmál og leyfisveitingar. Meðal umhverfisþátta má nefna áhrif á sjávarlífverur, áhrif hljóðburðar og áhrif á náttúrulega sjávarstrauma. Mörg fyrirtæki sem unnið hafa að þróun hagnýtingar sjávarorku og kostað miklu til hafa hætt starfsemi án þess að hafa náð að raungera hugmyndir sínar. Engu að síður koma stöðugt fram hugmyndir að nýjum lausnum svo að þróunin er jafnt og þétt fram á við.

Samanborið við önnur orkumannvirki er byggingar-, rekstrar- og viðhaldskostnaður sjávarorkuvera hár. Áætlað hefur verið að árlegur rekstrar- og viðhaldskostnaður gæti verið um 3,4–5,8% af stofnkostnaði samanborið við 2,3–3,7% við vindorkuver utan strandar. Gera má ráð fyrir að þessi kostnaður minnki með aukinni rannsóknar- og þróunarsamvinnu framleiðenda og aukinni stöðlu búnaðar og íhluta. Listinn um úrlausnarefni sem leysa þarf til að auka hagkvæmni sjávarorkuvera er langur. Verkefni snúast að mörgu leyti um að verja búnað og mannvirki gegn tærandi umhverfi og breytilegu álagi sjávar, t.d. á burðar- og legumannvirki, vélbúnað, rafbúnað og stjórnkerfi.

Fjárfestingar tengdar hagnýtingu sjávarorku hafa farið minnkandi ár frá ári og hafa þær lækkað úr um 0,8 ma.USD árið 2006 í um 0,2 ma.USD árið 2016.²⁰ Á þessu tíu ára tímabili hafa fjárveitingar til málaflokksins því minnkað niður í um fjórðung frá því sem fyrr var. Þetta er þveröfugt við auknar fjárveitingar til annarra endurnýjanlegra kosta. Fjárfestingar í vindorku hafa vaxið úr 40 ma.USD í 112,5 ma.USD, fjárfestingar í sólarorku úr 22 ma.USD í 114 ma.USD og fjárfestingar í jarðhitaorku úr 1,4 ma.USD í 2,7 ma.USD á þessu tíu ára tímabili. Af þessu má draga þá ályktun að á sama tíma og áhersla á endurnýjanlega orkugjafa fer vaxandi virðist tími sjávarorkunnar ekki vera kominn.

²⁰ Renewable Energy Policy Network for the 21st century – *Global Status Report 2017 – Ocean Energy*.

Staðan í árslok 2016 er sú að uppsett afl í sjávarorku er 0,5 GW (536 MW), sem er aðallega í sjávarfallaorku (99%). Flest orkuverin innan svæðis ESB eru með uppsett afl 0,3 GW. Nokkur vöxtur í sjávarorku er þó fram undan. Í byggingu eða undirbúningi eru til að mynda orkuver sem munu framleiða samtals 1,7 GW. Til samanburðar er uppsett afl í jarðhita 13,5 GW, 303 GW í sólarorku og 487 GW í vindorku. Árið 2017 voru í byggingu þrjár sjávarstraumavirkjanir með 17 MW uppsett afl (tvær í Skotlandi og ein í Frakklandi) og eitt ölduorkuver með 1 MW uppsett afl var þá í byggingu í Svíþjóð.

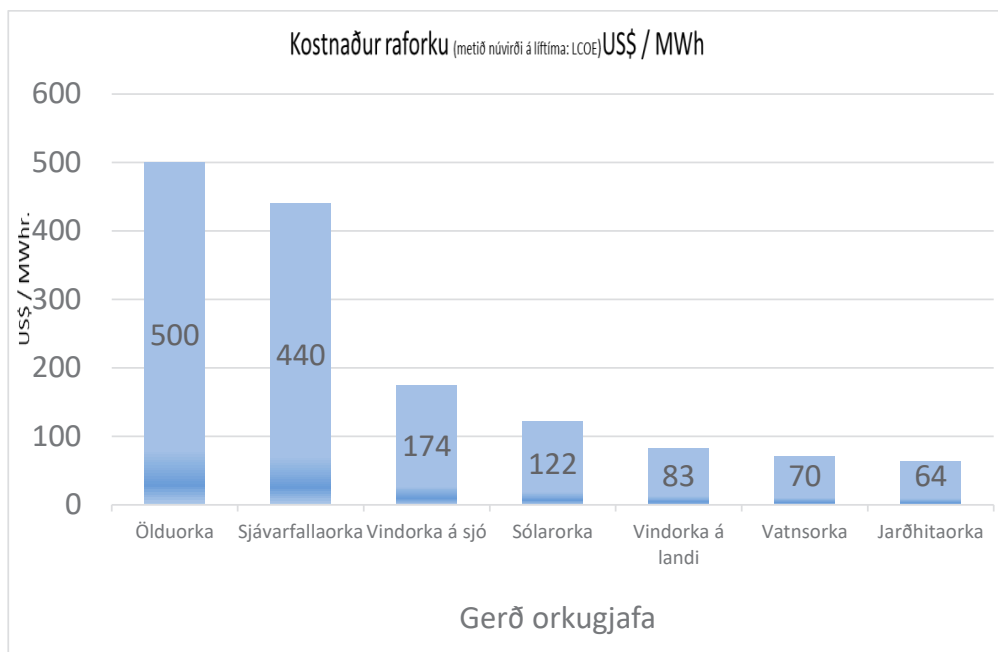
Þrátt fyrir tæknilegar framfarir hafa mörg verkefni á öllum stigum verið lögð á hilluna. Höfuðástæðan er sú að þróunartíminn er mjög langur og fjárfesta hefur skort úthald til að halda verkefnunum gangandi. Þeir sem hafa komið að þessum þróunarverkefnum hafa ekki staðið undir væntingum um að efla tæknilega getu markaðshæfs búnaðar eða tryggja viðunandi fjárhagslega afkomu. Auk þess hefur orkuverð ekki hækkað eins og vænst var, hagkvæmni annarra endurnýjanlegra kosta hefur aukist og hægt hefur á almennum hagvexti. Sé litið til næstu ára virðist sem þróunar-, byggingar- og rekstrarkostnaður við allar gerðir sjávarorkuvera muni verða veruleg hindrun í hagnýtingu sjávarorku. Rannsóknir, þróun og nýsköpunin mun þó halda áfram að bæta lausnir og lækka kostnað.

Samkvæmt World Energy Council²¹ er meðaltalskostnaður við framleiðslu rafmagns víðs vegar að úr heiminum mjög breytilegur eftir framleiðsluaðferðum, eins og sýnt er í meðfylgjandi töflu. Taflan sýnir meðaltöl sem spanna breytt talnasvið og ber að taka tillit til þess. Tölurnar eru því ekki nothæfar sem rauntölur fyrir Ísland. Engu að síður ættu tölurnar að gefa hugmynd um innbyrðis mismun framleiðslukostnaðar á raforku eftir aðferðum. Rétt er að geta þess að ekki er fullt samræmi á milli heimilda um framleiðslukostnað rafmagns á alþjóðavísu en í þessar kostnaðartölur frá Bloomberg er víða vísað og því eru þær birtar hér, sbr. mynd 6.3.1.

Ef kostnaður við raforkuframleiðslu í stærri vatnsorkuverum er tekinn sem viðmið þá sést af þessum alþjóðlega samanburði á meðaltölum að kostnaður við framleiðslu raforku með sjávarfallavirkjun er meira en sex sinnum hærra. Vindorka á landi er til dæmis mun hagkvæmari kostur en sjávarfallaorka. Ef litið er yfir nokkurra ára tímabils hefur munur á framleiðslukostnaði vindorku á landi og vatnsorku jafnt og þétt minnkað með tilkomu hagkvæmari tækni og afkastameiri framleiðslueininga fyrir vindorkuver.

Mesti vöxtur í endurnýjanlegum orkugjöfum hefur verið í sólarorku. Þróun sólarsellna (e. *PV cells, photovoltaics*) er hröð, nýtni er vaxandi og verð hefur lækkað um 80% á tíu árum. Framleiðsla sólarorku hefur einkum verið í þróuðum löndum en sólríkustu löndin, t.d. Afríka og Mið-Austurlönd, hafa enn ekki komist á fullt skrið í hagnýtingu sólarorkunnar. Framleiðsla sólarorku er háð notkun sjaldgæfra málma (t.d. kadmíum, króm, gallín og german). Samkvæmt sömu heimildum frá World Energy Council er LCOE-kostnaður fyrir sólarorku 122 USD/MWh.

²¹ World Energy Council / World Energy Resources / Marine Energy 2016. *Levelized cost and electricity technologies* (USD/MWhr.) Source: Bloomberg New Energy Finance's analysis of energy technologies levelized cost of electricity.



Mynd 6.3.1. Alþjóðlegur meðalkostnaður raforkuframleiðslu nokkurra gerða sjávarorkuvera metinn á núvirði á líftíma mannvirkja (LCOE) í USD/MWst.

Hinn hlutfallslega háí kostnaður raforku frá sjávarorkuverum endurspeglar stuttan þróunartíma sjávarorkutækninnar. Sjávarfallavirkjanir eru komnar lengst í þróuninni enda nær þróunartími þeirra allt aftur til miðrar síðustu aldar. Sjávarorkuverkefni með fyrirhugaða framleiðslu á um 15 GW eru um þessar mundir á mismunandi stigum þróunar. Flest þeirra eru fyrir virkjun sjávarfalla (11,5 GW), virkjun sjávarstrauma (2,6 GW), virkjun ölduhreyfinga (0,8 GW) og virkjun hitaflæðiorku (0,04 GW).

6.4. Líftímagreining.

Sjávarfallavirkjanir og ölduvirkjanir eru þær gerðir sjávarorkuvera sem lengst eru komnar í þróun. Líftímagreining²² á umhverfisáhrifum þeirra byggist á mati á öflun hráefna, framleiðslu alls búnaðar, flutningi efnis og búnaðar, byggingu, uppsetningu, notkun, viðhaldi, niðurrifi og förgun allra efnisþátta. Greiningin byggist á tilmælum ESB í ILCD-handbók um líftímagreiningu.²³

Matið byggist á upplýsingum um 83 sjávarfallavirkjanir sem eru í þróun hjá 36 fyrirtækjum og 103 ölduvirkjunum frá 50 fyrirtækjum. Sjávarfallavirkjanirnar eru af sjó mismunandi gerðum, t.d. með láréttan eða lóðréttan öxul, og ölduvirkjanirnar eru af átta mismunandi gerðum. Áætluð

²² *Life cycle assessment of ocean technologies*. The International Journal of Life Cycle Assessment, October 2016, Vol 21.

²³ ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment. European Union, 1st ed. 2010. JRC 48157, EUR 24708.

uppsett afl þessara véla er í flestum tilfellum á bilinu 500–1.000 kW. Í matinu er gengið út frá keyrslutíma (nýtni) um 34% fyrir sjávarfallavirkjanir og 20% fyrir ölduvirkjanir. Ef nýta á hámarksafl sjávarstraumanna eða ölduhæðarinnar þá sýnir reynslan að keyrslutíminn verður minni.

Gerðir sjávarorkuvera eru fjölmargar og efnishlutar þeirra því ólíkir. Miðað við þær gerðir sem eru á þróunarstigi er gert ráð fyrir að uppsett afl verði allt að 2 MW og þyngd burðarvirkis, vélbúnaðar og rafbúnaðar frá 190 tonnum til 1.270 tonna. Stærstu umhverfisáhrif eru af steiptum mannvirkjum, t.d. í undirstöðum og festingum. Einnig er notuð viðleguakkeri með botnfestu fyrir fljótandi búnað. Reikna má með að notkun vistvæns sements í steypu geti lækkað kolefnisspor steypuvirkja um allt að 10%. Burðarvirki úr stáli, t.d. þrífætur, er umhverfisvænna. Áhrif af framleiðslu, rekstri og förgun vélbúnaðar eru mun minni en af steiptum mannvirkjum. Grunneining matsins byggist á umhverfisáhrifum á hverja kWst sem framleidd er inn á flutningskerfi raforku. Matið byggist á tæknilýsingum fyrir um 180 mismunandi þætti. Meðal þeirra eru helstu einingar vél- og rafbúnaður, byggingarmannvirki og kapall í landstöð sem tengir virkjunina við flutningskerfi raforku. Miðað er við 20 ára líftíma.

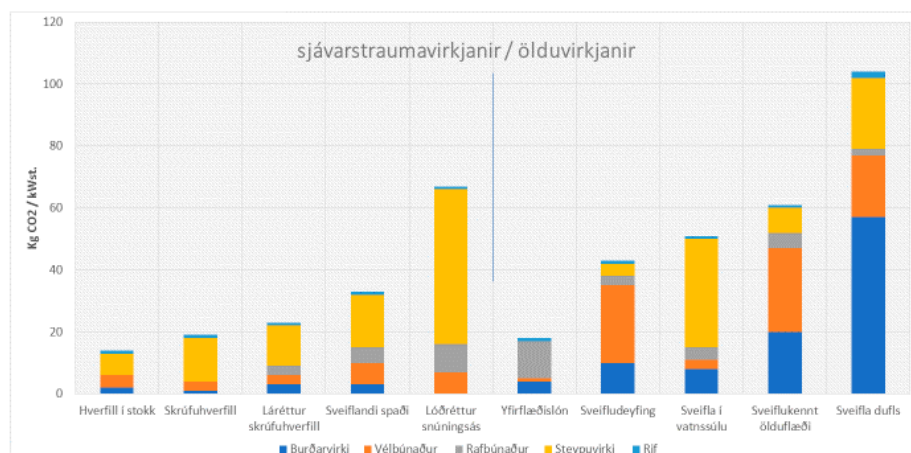
Þar sem lítil eða engin reynsla er af byggingu og förgun sjávarorkuvera er aðeins um grófa áætlun að ræða. Heildarlosun gróðurhúsalofttegunda sjávarorkuvera er áætluð á bilinu 15–105 g CO₂-ígildis/kWst. Meðaltalsgildi er um 53 +- 29 g CO₂-ígildis/kWst. Þessar niðurstöður eru sambærilegar við aðra endurnýjanlega orkulausnir. Þróun sjávarorkuvera er þó skemmra á veg komin en aðrar aðferðir sem eru í notkun við hagnýtingu endurnýjanlegrar orku. Í áframhaldandi þróunarvinnu sjávarorkuvera er lögð áhersla á aukna nýtni framleiðslubúnaðar og lengri líftíma allra hluta sem minnka mun umhverfisáhrif þeirra.

Umhverfisáhrifin sem metin eru skiptast í 10 meginflokka umhverfisáhrifa. Þeir eru: gróðurhúsaáhrif, eyðing ósonlagsins, svifryk, myndun ósons við yfirborð jarðar, súrt regn, næringar-efnaauðgun, visteiturhrif, eituráhrif á fólk, eyðing auðlinda og jónandi geislun. Með vistferilgreiningu má auðkenna hvaða efnisþættir orkuversins hafa mestu umhverfisáhrifin og beina úrbótum að þeim.

Á mynd 6.4.1. eru dæmi um áhrif nokkurra mismunandi gerða sjávarorkuvera á umhverfið. Byggt er á jafngildi fjölda kg CO₂ sem losna við rekstur orkuversins á hverja kWst af framleiddu rafmagni. Tekin eru dæmi af fimm sjávarstraumavirkjunum og fimm ölduvirkjunum. Af sjávarstraumavirkjununum hefur láréttur hverfill (e. *enclosed tips*) sem liggur í trektlaga stökk eða trekt minnst áhrif á loftslag eða rétt innan við 20 kg af CO₂ jafngildi á hverja framleidda kWst af raforku. Stokkurinn beinir straumi að hverflinum sem eykur aflþéttleika flæðisins og framleiðslugetu hans. Næstminnst loftslagsáhrif hefur gormlaga skrúfuhverfill (e. *helical screw*). Skrúfan liggur lóðrétt í straumleysi en hallast undan straumi og snýst undan flæði hans. Þegar straumstefna breytist breytist hallinn til samræmis. Með lítið eitt meiri losun er láréttur skrúfuhverfill (e. *horizontal axis turbine*) sem líkja má við skipsskrúfu. Þessi gerð er algengasta sjávarstraumaorkutæknin og sú sem hefur verið lengst í þróun. Orkunýtni þessarar gerðar er talin vera á bilinu 30–40%, sem er með besta móti.

Sveiflandi spaði (e. *oscillating hydrofoil*) líkir eftir sporði hvals þar sem spaði liggur vænglega þvert á straumstefnuna og gengur upp og niður og knýr áfram vökvatjakk sem knýr aflvélina. Hverfill með lóðréttan snúningsás (e. *vertical axis turbine*) snýst alltaf í sömu átt án tillits til stefnu straumsins sem er kostur þar sem hreyfanlegum hlutum fækkar.

Áhrif mismunandi virkjunargerða á loftslag: kg CO₂ jafngildi / kWst



Mynd 6.4.1. Áhrif mismunandi gerða sjávarorkuvera á losun gróðurhúsalofttegunda mæld sem kg CO₂ jafngildi á hverja framleidda kWst raforku.

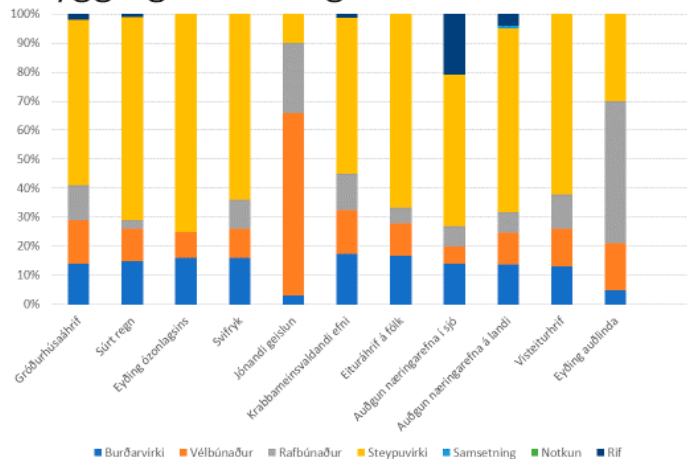
Af ölduvirkjunum hafa yfirflæðislón (e. *overtopping*) minnst umhverfisáhrif og er eina gerð ölduvirkjana sem hefur sambærilega losun CO₂ og betri sjávarstraumavirkjanir. Tæknin byggist á því að öldum er beint upp í manngert lón sem liggur örlítið hærra en sjávarborðið. Hæðarmunurinn er virkjaður með hefðbundnum vatnshverfli. Sveifludreyfing (e. *attenuator*) byggist á sveifluhreyfingu á milli tveggja eða fleiri samtengdra fljóttandi hluta sem ganga upp og niður og knýja þannig áfram vökvakerfi fyrir rafal. Umhverfisáhrif orkuvinnslu með um það bil tvöfalt meiri sveifludreyfingu en áhrif orkuvinnslu sem byggist á yfirflæðislóni.

Sveiflur í vatnssúlu (e. *oscillating water column*) byggjast á því að öldur þrýsta sjó og einkum lofti upp í gegnum lóðrétt göng og færa loftið í gegnum tvívirka vindmyllu á innflæði og soga það út á bakflæðinu. Vindmyllan virkjar þannig loftstrauminn í báðar áttir til framleiðslu rafmagns. Sveiflukennt ölduflæði (e. *oscillating wave surge converter*) byggist á nýtingu öldu sem gengur fram og til baka við ströndina áður en hún brotnar í fjörinni. Sveifla dufls (e. *point absorber*) byggist á fljóttandi dufli sem fest er við sjávarbotn og fylgir ölduhreyfingunni og ýmist slakar eða strekkir á festingunni við botninn.

Nánar er gerð grein fyrir þessum og fleiri gerðum sjávarvirkjana í fyrrnefndri skýrslu iðnaðar- og viðskiptaráðherra frá árinu 2015.

Áhrif mismunandi byggingarluta og búnaðar sjávarorkuvera er mismikil á umhverfisþætti eins og sést á mynd 6.4.2. Steypuvirkin skera sig áberandi frá öðrum byggingarlutum með hlutfallslega langmest umhverfisáhrif. Þannig má rekja áhrif sjávarorkuvers á eyðingu ósónlagsins að $\frac{2}{3}$ til steypuvirkja versins. Áhrif á eyðingu auðlinda má aftur á móti aðallega (um 50%) rekja til rafbúnaðar sem gerður er úr sjaldgæfum málmum.

Áhrif byggingarluta og búnaðar á umhverfisþætti



Mynd 6.4.2. Hlutfallsleg umhverfisáhrif mismunandi byggingarluta.

6.5. Niðurstöður.

Rannsóknir og þróun sjávarorkuvera á sér langa sögu enda er mikilfengleg orka sjávar augljós öllum sæfarendum og þeim sem búa nærri sjó. Þrátt fyrir að sótt hafi verið um fyrsta einkaleyfið til að hagnýta orku sjávar árið 1799 hefur reynst þrautin þyngri að virkja þessa orku. Það var ekki fyrr en 1966 sem fyrsta stóra orkuverið var tekið í notkun og hefur þróunin síðan verið hæg en stöðug enda flestum ljóst að sjávarorkuver er álitlegur kostur í framtíðinni. Miklum fjárhæðum hefur verið varið í rannsóknir og þróun og hafa mörg verkefni dagað uppi þegar tiltækt fjármagn hefur þrotið. Einnig hafa aðrir óvissuþættir flækt stöðuna eins og áhrif sjávarorkuvera á umhverfið. Eins og staðan er nú er framleiðslukostnaður raforku í sjávarorkuveri ekki samkeppnisfær við raforku frá t.d. vatnsorku- eða jarðhitavirkjun. Miðað við framangreindar tölur má ætla að raforka frá sjávarorkuveri geti verið um sex til sjö sinnum dýrari en raforka frá vatnsorkuveri. Með hækkandi orkuverði og aukinni tækniþróun mun þessi verðmunur væntanlega minnka.

7. Varmadælur.

Varmadælur byggja á flutningi varma frá stórum varmalindum til smærri og heitari varmaþega. Tæknin var fyrst skýrð eðlisfræðilega af Kelvin lávarði 1852. Á þeim tíma var eftirspurn eftir

nýjum aðferðum til kælingar á matvælum mikil og fullgerð kælivél hafði nokkrum árum áður náð framleiðslustigi. Í framhaldinu varð umbylting í meðhöndlun og dreifingu matvæla en varmadælur til hitunar byggjast á þeim sama vélbúnaði og notaður er í kælitæki. Í varmadælum fer varmaflutningur þannig fram að beitt er mekanískri orku sem oftast er fengin með rafknúnum vélum. Þannig er unnt að flytja varmaorku með minni raforku en þyrfti til að hita viðkomandi rými beint og spara þar með raforku hlutfallslega. Þjappan í varmadælunni þrýstir saman vinnslumiðlinum þegar hann er í gasfasa sem hækkar hitastig vinnslumiðilsins.

Talið er að varmadælur í heiminum séu um 130–140 milljónir talsins²⁴ með varmaafköst sem námu um 1.300 TWst um síðustu aldamót. Notkunarsviðið var um 57% við húshitun, 27% í ýmiss konar þjónustu og loks um 16% í iðnaði. Mestum árangri hafa Svíar náð með varmadælum sem afla varma sem nú nálgast 6 GW og er að mestu jarðvarmi að uppruna. Til samanburðar er bein jarðvarmanotkun hérlendis um 2 GW.

Varmadælur hafa náð talsverðri útbreiðslu og telur Orkusetrið á Akureyri að 350–400 styrkir hafi verið veittir til kaupa á varmadælum á köldum svæðum á árabílinu 2010–2017. Samkvæmt upplýsingum Tollstjóra og Hagstofunnar voru um 250 varmadælur fluttar til landsins á árunum 2016–2017.

Varmauppspretta við notkun varmadælna getur verið með ýmsu móti. Nota má venjulegar varmauppsprettur eins og jarðhita, t.d. vatn úr borholum eða berghita sem leiða má úr jörð með slöngukerfum. Þá er unnt að nota varma úr andrúmsloftinu eins og tíðkast í loft/loft- eða loft/vatn-varmadælum. Eðlisfræðin býður upp á ýmsa valkosti umfram beina mekaníska notkun því að unnt er að nota efnafræði fasabreytinga í föstu formi til að ná sömu virkni, þ.e. ísog/ásog (e. *desorptionabsorption*).

7.1. Vinnslumiðlar.

Vinnslumiðlar varmadælu eru efnin sem notuð eru í hringrás dælnunnar. Vinnslumiðlar eru blóðrás varmadælnunnar en þjöppur, lagnakerfi og annar búnaður eru eins og líffæri sem sjá til þess að hringrás vinnslumiðilsins gangi. Vinnslumiðill er valinn þannig að hann gefi sem mesta nýtingu tiltekens varma í þeim búnaði sem notaður er.

Vinnslumiðlar eru flokkaðir eftir gerð og blöndun þeirra. Helstu frumefnin sem mynda vinnslumiðla eru kolefni (C), klór (Cl), flúor (F), bróm (Br), nitur (N), vetni (H) og súrefni (O) sem mynda ýmis sambönd sín á milli. Algengir vinnslumiðlar eru ýmis kolvetni en oft er einni eða fleiri vetnisfrumeindum skipt út fyrir ýmist klór og/eða flúor. Kolvetnisvinnslumiðlar eru númeraðir samkvæmt sérstökum lykli sem ekki verður farið nánar út í hér.

Vinnslumiðlarnir hafa verið í mikilli þróun undanfarna áratugi. Nokkur hættu getur stafað af áhrifum þeirra á umhverfið, t.d. losun klórs sem aftur ræðst á ósónlag andrúmsloftsins. Eldfimi er annað atriði sem veldur hættu. Þróun miðla framtíðarinnar stefnir að minnkandi umhverfisáhrifum. Sá miðill sem nú nýtur vaxandi vinsælda er CO₂. Með nýjum samþykktum til varnar hnattrænni hlýnun jarðar er stefnt að því að hættu notkun vinnslumiðla sem innihalda

²⁴ RM Lazzarin, 2007, International Journal of Low Carbon Technology.

flúor, oft nefndir 'f-gös'. Í stað þeirra koma einungis náttúrulegir vinnslumiðlar, t.d. CO₂ og NH₃ (ammoníak) til greina.

Vistferligreining varmadælna leiðir til svipaðra niðurstaðna og fyrir ísskápa og kælrými. Mikilvægast er að hafa í huga að vinnslumiðlana þarf að hafa undir góðu eftirliti og farga með varúð.

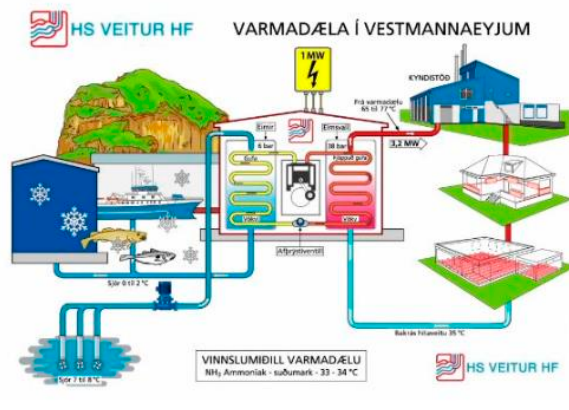
7.2. Tækniþróun.

Framtíðarþróun varmadælna hér á landi mun væntanlega verða töluverð. Vel má hugsa sér að nota kerfi varmadælna í bæjarfélögum þar sem stofnæð sem tengist meginvarmauppsprettunni er leidd um bæinn. Síðan yrði byggt á fjölda smærri varmadælna staðsettum í húsum og húbýlum sem svöruðu staðbundinni þörf fyrir hækkun hita. Líklegur vinnslumiðill er glýkól (C₂H₆O₂). Slík kerfi eru á nokkrum stöðum í Noregi. Ef hefðbundin hitaveita eða dreifiveita er til staðar er skynsamlegt að stærri varmadælur tengist kerfinu þegar bæta þarf varma inn á kerfin eða spara raforkunotkun. Það var gert í Drammen í Noregi og nýlega í Vestmannaeyjum. Nú er verið að skoða svipaða útfærslu fyrir Seyðisfjörð, en með breytingum sem nýta kaldari sjó. Styrkur hefur fengist úr NPA-sjóðnum (*Northern Periphery and Arctic Programme*) til undirbúnings í verkefni sem kallast *SmartRenew*. Markmiðið er að finna hagkvæmar leiðir til að nýta varma úr sjó sem er allt að 0°C og ef vel tekst til má ætla að aðferðin nýtist víðar á Íslandi, svo sem á Vestfjörðum og Austfjörðum, en einnig erlendis, t.d. á Grænlandi og í Danmörku og hugsanlega stærri mörkuðum.

Í viðauka 2 er fjallað um eðlisfræði varmadælna og sýnd hagnýt dæmi um varmadælur.

7.3. Stórar varmadælur og verkefnið í Vestmannaeyjum.

Í Vestmannaeyjum hafa hús verið kynt með jarðefnaeldsneyti, fyrst kolum og síðan olíu. Árið 1962 var rafstrengur lagður til Eyja og tók því rafkynding við upphituninni.



Mynd 7.3.1. Varmadæla í Vestmannaeyjum.

Hinn 23. janúar 1973 hófst eldgos á Heimaey. Ákveðið var að virkja hitann úr hrauninu til upphitunar á húsum. Tvöfalt dreifikerfi var lagt um allan bæinn og dælustöð byggð. Til varð

fyrsta og eina hraunhitaveitan sem starfrækt hefur verið í heiminum svo vitað sé. Með lagningu dreifikerfis um bæinn skapaðist möguleiki að nota fleiri aðferðir við upphitun á hitaveituvatninu.

Árið 1988 var hitinn í hrauninu orðinn það lítil að rekstri hraunhitaveitunnar var hætt og 20 MW rafskautaketill tekinn í notkun. Hann hefur séð um upphitun á hitaveituvatninu síðan. Olúkatlar voru notaðir sem varaafli. Sorpbrennsla fór fram á árunum 1993–2013 og varmi frá henni var notaður til upphitunar. Varmi frá fiskimjölsverksmiðjunum er einnig notaður til upphitunar, sbr. mynd 7.3.1.

Rafkyntar hitaveitur er að finna á sjö þéttbýlisstöðum hér á landi, þar sem ótrygg orka er notuð til að hita upp vatn í lokuðu kerfi. Þrjú fyrirtæki reka þessar veitur, HS Veitur reka veituna í Vestmannaeyjum, Orkubú Vestfjarða rekur veitur á Patreksfirði, Flateyri, Suðureyri, Bolungarvík og Ísafirði, Rarik rekur veitu á Seyðisfirði og á Höfn.

Heildarorkunotkun rafkynta hitaveitna á Íslandi nemur árlega 190 GWst. Um helmingur þessarar orku er niðurgreiddur og ver ríkissjóður um 200 millj. kr. árlega í þann lið. Sé horft til 25 sveitarfélaga sem eru með fleiri en 300 íbúa er heildarraforkunotkunin 360 GWst á ári.

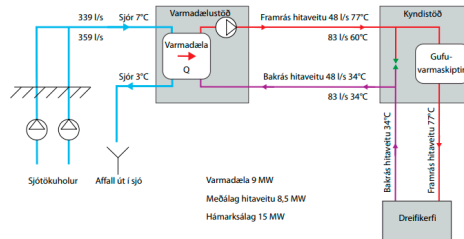
Um nokkurt skeið hefur verið unnið að tæknilegu mati á möguleikum á að tengja stórar varmadælur inn í veitukerfin með tilheyrandi ávinningi. Um verulegan raforkusparnað yrði að ræða eða allt að 100 milljónir kWst. Það samsvarar almennri raforkunotkun um 20.000 heimila eða um 15 MW í uppsettu afli frá vatnsaflsvirkjun. Hér væri um virkjun innan kerfis að ræða sem hvorki þyrfti umhverfismat né uppistöðulón en allar þær kWst sem sparast mætti nota til nýrrar atvinnuuppbyggingar. Í Vestmannaeyjum er nú þegar búið að setja upp stórar varmadælur sem eiga að geta sparað yfir 40 GWst. Sú raforka stendur þá fyrirtækjum og heimilum til boða í Eyjum eða annars staðar á landinu.

Orkusparnaður með varmadælum ætti einnig að vernda notendur að hluta fyrir hækkandi raforkuverði. Nokkur fjárfestingarkostnaður fylgir uppsetningu slíkra varmadælna en lægri orkukostnaður veitnanna ætti að standa undir þeirri fjárfestingu, að því gefnu að orkuverð til veitnanna haldist óbreytt eða hækki.

Málið er ekki einfalt þar sem ólíkir hagsmunir vinna bæði saman og vegast á. Með lækkun á orkuþörf veitna er mögulegur sá kostur að núverandi niðurgreiðslur á húshitun megi nýta sem stofnstyrk fjárfestingarinnar. Mögulega er líka jafnhagstætt fyrir veiturnar að hafa óbreyttar niðurgreiðslur en framtíðarumfang þeirra hefur verið á reiki að undanförunu og eru ýmsar hugmyndir uppi um breytt fyrirkomulag. Eins er óvissa um framtíðarorkukostnað og framboð á ótryggi orku en sparnaður sem breytt fyrirkomulag hefði í för með sér gæfi einmitt það svigrúm sem þarf til að borga upp fjárfestinguna. Uppsetning á stórum varmadælum getur líka minnkað álag á flutningskerfi og skapað möguleika á hagræðingu í fjárfestingum. Það hefur jafnframt áhrif á heildarmyndina hvað verður um orkuna sem losnar og á hvaða verði hún selst til nýrra notenda. Að mörgu er að hyggja og viðfangsefnið umfangsmikið og margslungið.

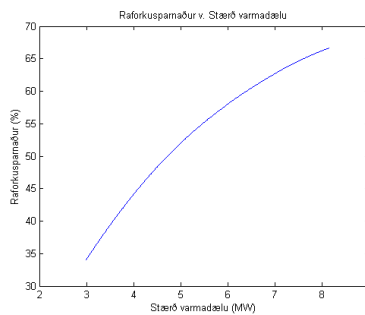
HS Veitur hafa fjárfest í varmadelukerfi fyrir Vestmannaeyjar þar sem orka Golfstraumsins er notuð með því að dæla jarðsjó úr holum á Heimaey. Gangsetning véla er fyrirhuguð í október 2018. 10 MW sjóvarmadælustöð HS Veitna í Eyjum var reist við Hlíðarveg 4. Leggja þurfti hitaveitulagnir og háspennustreng milli núverandi kyndistöðvar og nýju sjóvarmadælustöðvarinnar. Þá þurfti að leggja affallsrör fyrir sjóinn frá sjóvarmadælustöð og út fyrir Eiði. Um er að ræða næststærstu sjóvarmadælustöð í heimi sem notar náttúrulegan vinnslumiðil

(ammoníak) og er áætlaður kostnaður við verkefnið um 1.400 m kr. Stöðin í Drammen er aðeins stærri, eða 13 MW, en pláss er fyrir eina vélsamstæðu í viðbót í sjóvarmadælustöðinni í Eyjum og þá yrðu þessar tvær stöðvar nánast jafnstórar, sjá mynd 7.3.2.



Mynd 7.3.2. Einföld kerfismynd sjóvarmaveitunnar í Eyjum, þá miðað við 9 MW.

Árið 2010 lögðu Varmalausnir ehf. fram tillögur til HS Veitna um sjóvarmadælu sem



Mynd 7.3.3. Útreikningar Varmalausna ehf. á sambandi stærðar og raforkukostnaðar.

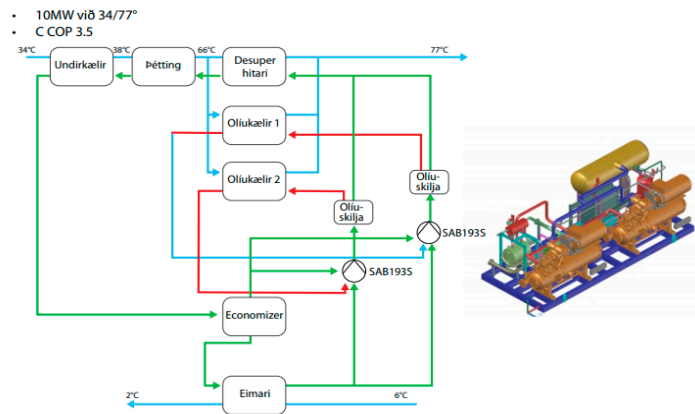
væru á talsvert lægra verði en áður var talið mögulegt. Sparnaður var metinn við mismunandi stærð varmadælu, sjá mynd 7.3.3. Miðað var við að raforkunotkun til hitunar væri 52 GWst en ekki 81 GWst eins og nú er (fjölgun hefur orðið í Eyjum og sorpbrennslu hefur verið hætt). Í kjölfarið fólu HS Veitur verkfræðistofunni Verkís að gera athugun á hagkvæmni þess að nýta sjó til að hita bakvatn hitaveitunnar með varmadælu. Hámarksafliþörf hitaveitunnar var þá um 15 MW og skoðaðar voru ýmsar stærðir og gerðir varmadælna. Niðurstaðan varð sú að hagkvæmasta afl varmadælu væri um 9 MW þar sem $\frac{2}{3}$ orkunnar kæmu úr sjó og um $\frac{1}{3}$ væri rafmagn. Þar sem ávinningurinn af varmadælu er fyrst og fremst rafmagnssparnaður er hagkvæmni hennar háð rafmagnsverði. Árið 2011 var rafmagnsverð það lágt að arðsemi var talin ófullnægjandi auk þess sem Verkís miðaði við mun herra verð á varmadælum en Varmalausnir. Allt benti þó til að rafmagnsverð færi hækkandi og arðsemi mundi aukast og var því ýmsum undirbúningi haldið áfram, t.d. með þátttöku HS Veitna, Nýsköpunarmiðstöðvar og Varmalausna ásamt fleirum sem voru aðilar að verkefninu *Arctic Ocean Heat* sem stutt var af Nordic Innovation á árunum 2014–2016. Sjóvarmaveitur í Noregi voru heimsóttar í tengslum við verkefnið og vakti veitan í Drammen mesta athygli, enda er sjóhitinn þar sambærilegur við sjóhitann í Vestmannaeyjum. Verkís lauk endurskoðun frumhönnunar í júní 2015 og áætlaði arðsemi verkefnisins við mismunandi rafmagnsverð.

Eftir endurskoðun frumhönnunar unnu HS Veitur áfram að ýmsum undirbúningi svo sem samningum um rafmagnsverð, framkvæmd niðurgreiðslna á rafhitun o.fl. Verkís annaðist gerð útboðsgagna og mat á tilboðum í varmadælu og var samið við Varmalausnir um kaup á fjórum Sabroe-varmadælueningum samtals 10 MW. Leitað var tilboða í borun holna fyrir sjótöku og

unnið að samningum um borunina. Hönnun húsbyggingar, pípulagna og rafbúnaðar var næst á dagskrá.

Í gegnum varmadæluna er leiddur sjór sem er kældur og orkan sem fæst með kælingunni er notuð til að hita upp hitaveituvatnið. Mynd 7.3.4. er af frumhönnun og er einfölduð kerfismynd fyrir 9 MW varmadælu. Álagstöðulur á myndinni eru fyrir annars vegar hámarksálag á hitaveituna, 15 MW, og hins vegar fyrir meðalálag, 8 MW. Inn á varmadæluna er leiddur 7°C heitur sjór sem er kældur niður í 3°C. Að varmadælunni er leitt 34°C heitt bakvatn hitaveitu sem er hitað upp í henni. Þegar aflþörf hitaveitunnar er undir uppsettu afli varmadælnnar, 9 MW, er hitaveituvatnið hitað í 77°C sem er framrennslishiði hitaveitunnar.

Varmadælnnar eru alls fjórar, 2,5 MW hver. Þær eru smíðaðar í Árósum í Danmörku, undir vörumerkjum Sabroe sem er vel þekkt hér á landi, sérstaklega sem framleiðandi kæli- og frystivéla í matvælaframleiðslu, aðallega í sjávarútvegi.



Mynd 7.3.4. Varmadælnur í Vestmannaeyjum.²⁵

Ný afurð verður til við Varmadæluna í Vestmannaeyjum. Þegar 6°C heitur sjór er tekinn inn, lækkar hiti hans í fyrstu og út kemur 2°C heitur sjór sem gæti orðið áhugaverð afurð til nota í fiskiðnaði. Slíkur kælisjór gæti verið afar verðmætur, ekki síst þegar hreinleiki hans byggist á síun í gegnum hraunlög neðanjarðar eins og í Eyjum.

Varmadælustöðin í Eyjum hefur nýtnistuðul sem er rétt rúmlega 3, þ.e. 1/3 orkunnar sem fæst úr varmadælunni er rafmagn sem knýr hana, en 2/3 eða rúm 6 MW fást úr sjónum. Sem fyrr segir er rafmagnssparnaður helsti ávinningurinn við varmadæluna. Eftirfarandi tafla sýnir áætlaða rafmagnsnotkun hitaveitunnar með og án varmadælu.

²⁵ Ívar Atlason og Þorsteinn I. Sigfússon 2017, „Heating an Arctic Island with the Gulf Stream“. Erindi á Arctic Circle í Reykjavík, 14. október 2017.

	Án varmadælu GWh/ár	Með varmadælu GWh/ár
Rafmagnsnotkun ketils	78,6	5,3
Rafmagnsnotkun varmadælu	0	20,7
Rafmagn fyrir sjódælingu	0	1,2
Samtals	78,6	27,2

Helstu tækifæri til varmadæluvæðingar til upphitunar á húsnæði á Íslandi eru tvenns konar: Annars vegar er nýting sjávarvarma eins og í Vestmannaeyjum og á fleiri stöðum eins og við Önundarfjörð sem hefur verið kannaður í þessu tilliti og nú er unnið að sambærilegum athugunum á Seyðisfirði. Hins vegar er nýting á volgrum sem ekki teljast nægilega heitar til beinnar húshitunar. Eitt besta tækifærið til slíkrar nýtingar er nú á Tálknafirði þar sem um 42°C heitt vatn rennur nú þegar til bæjarins.

7.4. Niðurstöður.

Varmadælu geta markað sér trausta stöðu í orkubúskap landsins. Þær geta verið frumorkugjafar, t.d. við orkuvinnslu úr sjó, og þær hafa hlutverk við að hækka hitastig í kerfum sem byggjast á annars konar frumorku eins og jarðhitaorku, sem geta verið volgrur allt niður í 4°C. Fyrir hitaveitur sem búa við lágt náttúrulegt hitastig getur verið hagkvæmt að tengja stærri varmadælu við slík kerfi þegar þörf er á að bæta við varma til að svara aukinni eftirspurn eftir hitaorku. Sama gildir um rafkyntar hitaveitur en varmadælu geta sparað heildarraforkunotkun þeirra. Þannig má nota kerfi varmadælna í bæjarfélögum þar sem stofnæð sem tengist meginvarmauppsprettunni er leidd um bæinn. Til viðbótar mætti byggja á fjölda smærri varmadælna staðsettum í húsum og híbýlum sem svöruðu staðbundinni þörf fyrir hækkingu hita. Unnið er að því að finna hagkvæmar leiðir til að nýta varma úr sjó sem er allt að 0°C og ef vel tekst til má ætla að aðferðin nýtist víða á Íslandi svo sem á Vestfjörðum og Austfjörðum.

8. Smávirkjanir – og fleiri staðbundnar lausnir.

Í þessum kafla er í stuttu máli fjallað um litlar vatnsaflsvirkjanir, sjóðandi lágghita, lítil vindorkuver, sólarrafhlöður, íslenska djúpborunarverkefnið og innlenda eldsneytisframleiðslu.

Nýsköpunarmiðstöð Íslands stóð fyrir námskeiðum víða um land á árunum 2011–2014 sem nefnd voru *Orkubóndinn*. Þau voru haldin á 12 stöðum um landið og sótt af yfir þúsund manns. Erindi voru flutt um smávirkjanir og umræður voru um hugmyndir fundarmanna. Afraksturinn var m.a. mikið átak á sviði varmadælna og töluvert var um uppsetningu smávirkjana með vatnshjólum. Veittar voru viðurkenningar til frumkvöðla á sviði smávirkjana. Sem dæmi um hugmyndir frumkvöðla má nefna að árið 2015 kynnti Nýsköpunarmiðstöð á vegum sprotafyrirtækisins XRG Power ehf. litla lágsuðuvél sem gat unnið rafmagn úr heita krananum

frá hitaveitunni. Unnt var að vinna á annað kW úr 67°C heitu vatni. Þá vinnur Orkustofnun að því að stuðla að raforkuframleiðslu í smærri virkjunum víða um land. Verkefnið er til komið vegna áhyggja af stöðu í raforkuöryggismálum landsins.

Virkjanir sem eru minni en 10 MW þurfa ekki að tengjast flutningskerfi raforku og því getur verið styrkur í því að horfa til staðbundinna lausna og kanna smærri virkjunarkostir sem kunna að vera í boði. Víða um land stendur flutningskerfið og takmarkað framboð raforku byggðapróun og uppbyggingu atvinnustarfsemi fyrir þrifum. Markmið smávirkjanaverkefnis Orkustofnunar er að stuðla að aukinni raforkuframleiðslu sem víðast á landsbyggðinni og er verkefnið fjórþætt.

1. Safna saman gagnlegum upplýsingum og miðla þeim áfram.
2. Setja fram frumhugmyndir um smávirkjanir.
3. Veita styrki til meistaraþrófsverkefna um smávirkjanir.
4. Halda fundi og kynningar víða um land.

Á vef stofnunarinnar²⁶ eru margvíslegar gagnlegar upplýsingar um efnið. Upphaflega var smávirkjanaverkefnið hugsað sem stuðningur við uppbyggingu vatnsaflsvirkjana eingöngu. Síðan hefur sjóðandi lághiti bæst við og unnt er að þróa verkefnið á fleiri sviðum, t.d. vindmyllur fyrir smærri notendur og jafnvel nýtingu sólarorku.

8.1. Litlar vatnsaflsvirkjanir.

Í skýrslunni „Vatnsaflsvirkjanir: Leyfi og skilyrði – staðan í árslok 2017“²⁷ er yfirlit um allar vatnsaflsvirkjanir sem tengdar voru flutnings- og dreifikerfinu í árslok 2017. Þar er lýsing á 67 virkjunum sem eru frá því að vera nokkrir tugir kW að stærð og upp í 690 MW. Til viðbótar við þessar virkjanir hafa fjórar virkjanir verið gangsettar árið 2018 og er aðeins ein þeirra tengd við flutningskerfið (Búrfellsvirkjun II). Hinar eru tengdar við dreifikerfi Raríks og Orkubús Vestfjarða. Alls eru því 71 virkjun að framleiða inn á raforkukerfið en stærstur hluti þeirra er minni en sem nemur 10 MW. Uppsett vatnsafl er 2.340 MW og þar af eru 85 MW uppsett afl í virkjunum sem eru minni en 10 MW.

Í tengslum við fundi Orkustofnunar um smávirkjanir og orkuöryggismál vaknaði mikill áhugi á smávirkjunum víða um land. Í ágúst sl. kom út skýrsla SSNV²⁸ „Frumúttekt á smávirkjana-kostum á Norðurlandi vestra“ þar sem stillt er upp hugmyndum að 82 virkjunarkostum á svæðinu með uppsett afl frá nokkrum tugum kW og allt að nokkrum MW. Í listanum eru virkjunarkostir sem flokkaðir eru í hagkvæmniflokk 2 til 4 en langflestir virkjunarkostir í tillögu verkefnisstjórnar þriðja áfanga rammaáætlun eru í kostnaðarflokki 4 og hærri. Þarna er því að finna fjölda virkjunarkosta sem eru vel samkeppnishæfir við virkjunarkosti í rammaáætlun, hvað hagkvæmni varðar.

²⁶ <https://orkustofnun.is/raforka/smavirkjanir/gagnlegur-frodleikur/>

²⁷ <https://orkustofnun.is/gogn/Skyrslur/OS-2018/OS-2018-02.pdf>

²⁸ Samband sveitarfélaga á Norðurlandi vestra.

Aðrar sambærilegar skýrslur sem unnar hafa verið á vegum sveitarfélaga eða atvinnuþróunarfélaga eru skýrslur um smávirkjunarkosti í Eyjafirði, smávirkjanir í Dalvíkurbyggð og tillögur að smávirkjunum á Vestfjörðum. Allar þessar skýrslur má finna á vef Orkustofnunar.²⁹

Hugmyndirnar í þessum skýrslum þarf að útfæra betur áður en hægt er að ráðast í virkjanir. Gera þarf rennslismælingar og skoða landsvæðið sem um ræðir með það fyrir augum að velja inntaki og stöðvarhúsi endanlegan stað og finna nákvæmari gildi fyrir uppsett afl og orkugetu og gera kostnaðar- og arðsemismat með tilliti til aðstæðna.

Til þess að litlar vatnsaflsvirkjanir verði ásættanlega arðbærar má stofnkostnaður á MW ekki vera hærri en 320 millj. kr. á verðlagi 2018. Það þarf því að vanda til vals á stærð vélbúnaðar með tilliti til vatnsmagns, fallhæðar og orkuverðs.

8.2. Sjóðandi lághiti.

Í árána rás hefur fjöldinn allur af borholum verið boraður vítt og breytt um landið. Á skrá hjá Orkustofnun eru tæplega 4.300 borholur þar sem mögulega er að finna nægilega heitt vatn til þess að nýta megi það til raforkuframleiðslu. Tilgangur með borunum á þessum holum var þríþættur. Rúmlega 3.000 holur hafa verið boraðar til að mæla hitastigul, 338 holur hafa verið boraðar til gufuöflunar og 941 til öflunar á heitu vatni.

Hægt er að fá yfirsýn yfir allar borholurnar á vefsíðu Orkustofnunar³⁰ og til að skoða jarðhitaholur er hægt að velja þær sérstaklega.



Mynd 8.2.1. Jarðhitaborholur í kortasjá Orkustofnunar.

Borholuskrá Orkustofnunar inniheldur mikinn fróðleik. Upp úr henni hefur m.a. verið unnin skýrslan „Medium Enthalpy Geothermal Systems in Iceland“. Hún er samin af Birni Má

²⁹ <https://orkustofnun.is/raforka/smavirkjanir/gagnlegur-frodleikur/>

³⁰ <http://map.is/os/>

Sveinbjörnssyni³¹ árið 2016 og fjallar um jarðhitakerfi þar sem berghiti í efstu 2.000 m er milli 100°C og 200°C. Skýrslan var samvinnuverkefni Orkustofnunar og IEA-GIA (Alþjóða Orkumálastofnunar: *International Energy Agency – Geothermal Implementing Agreement*) auk þess að vera framlag til fjölþjóðlegs samstarfs IPGT (*International Partnership for Geothermal Technologies*) á sviði jarðhitánýtingar. Nú hefur fjórði kafli skýrslunnar sem lýsir þeim jarðhitakerfum sem tekin eru fyrir í skýrslunni verið þýddur og heitir sú skýrsla „Meðalvermis-lághitakerfi á Íslandi: Vinnslumöguleikar varma- og raforku“ og er hana að finna á vef Orkustofnunar.³²

Sjóðandi jarðhiti verður til við að gufa er send í gegnum túrbínu sem framleiðir vinnu eða rafmagn. Notaður er varmaskiptir til upphitunar á vökva í lokaðri hringrás sem knýr túrbínu til raforkuframléiðslu og síðan er eimsvali nýttur til kælingar á vökvanum. Unnt er að auka virkni lághita með því að nota vinnslumiðil³³ sem er samsettur úr tveimur mismunandi vökvum t.d. vatni með öðrum efnum eins og ammoníaki og efnasamböndum vetnis og kolefnis (e. *hydrocarbons*) sem eru með lágt suðumark og mikinn gufuþrýsting við lágt hitastig. Margskonar vinnslumiðlar hafa verið reyndir en valið byggist á afköstum vinnsluhringsins og kostnaði en einnig stærð varmaskipta og kælikerfis. Þar sem varmafræðilegir eiginleikar vinnslumiðilsins eru misgóðir ræðst stærð túrbínunnar einkum af vinnslumiðlinum.

Framleiðsla raforku úr lághita í svokölluðu tvívökvakerfi er ekki ný af nálinni. Á Húsavík var í mörg ár framleidd raforka með Kalina-tækni sem notar blöndu af ammoníaki (NH₃) og vatni en hitastig blöndunnar breytist við fasaskipti úr vökva í suðu og aftur við þéttingu í vökvaform, en blanda ammoníaks og vatns (tvíþátta miðill) sýður og þéttist við breytilegt hitastig. Aðferðin byggist á því að framleiða raforku með því að nýta varma úr lághita til suðu á blöndu af ammoníaki og vatni sem streymir í lokaðri rás. Þannig opnast möguleikar til að nýta tilfallandi varma mun betur en með einþátta miðlum. Samanburður á lághita varmahringrásum hefur sýnt að með Kalina-tækninni megi auka vinnsluafköst gufuhverfla um 20%–50%. HS Orka hefur verið með svokallaðar „Ormat“ túrbínur í Svartsengi sem nota lágþrýstigufu sem safnað er frá öðrum vélum orkuversins. Þar er vinnslumiðillinn ísopentan (C₅H₁₂).

Próun kerfa fyrir sjóðandi lághita heldur áfram og nú er unnið að uppsetningu 2 MW lághita jarðhitavirkjunar á Flúðum og gaf Orkustofnun út leyfi fyrir þessari virkjun í maí 2018. Flúðavirkjun notar tækni frá sænska fyrirtækinu Climeon. Byggt er á 150 kW einingum og með breytilegum fjölda þeirra er unnt að auka við eða minnka framleiðsluna, sbr. mynd 8.2.2. Framleiða á raforku úr jarðhita með hitalækkun frá 120°C niður í 70°C en þá má nýta frávatnið til húshitunar eða annarra nota.

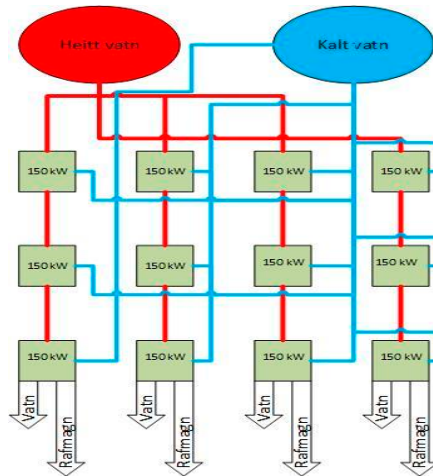
Einingarnar taka inn á sig heitt vatn til raforkuframléiðslu og kalt vatn til kælingar og skila af sér hæfilega rafmagn og vatni með lægra hitastigi. Hægt er að raða einingunum upp í fylki eins og hentar fyrir rennsli og hitastig á hverjum stað. Einingunum fjölgar lárétt í samræmi við

³¹ Björn Már Sveinbjörnsson, „Medium Enthalpy Geothermal Systems in Iceland“, Orkustofnun (National Energy Authority of Iceland), ISOR-2016/008.

³² <https://orkustofnun.is/raforka/smavirkjanir/gagnlegur-frodleikur/>

³³ Vinnslumiðill er vökvi eða blanda fleiri vökva sem notaður er í hringrás varmaskiptis, sbr. freon í frystivélum.

vatnsmagn og lóðrétt í samræmi við hitastig. Forsendur þess að þessi tækni er samkeppnishæf á íslenskum raforkumarkaði er að hagkvæm fjármögnun er í boði í Svíþjóð, auk þess sem varminn sem ekki er nýttur til raforkuframleiðslu verði nýttur til annarra nota. Ekki hafa fengist upplýsingar um vinnslumiðilinn né skýringar á tæknilegum þáttum sem liggja til grundvallar þessarar útfærslu og engin notendareynsla er fyrir jarðvarmavinnslu með aðferðinni.



Mynd 8.2.2. Raða má einingunum upp í fylki eins og hentar fyrir rennsli og hitastig á hverjum stað.

Þessar varmavirkjanir eru dýrari en litlar vatnsaflsvirkjanir en álitid er að unnt verði að reisa þær fyrir u.þ.b. 400 millj. kr. á hvert MW af uppsettu afli. Þetta er u.þ.b. 25% dýrari lausn en hagkvæmstu smávirkjanir í vatnsafl. Hagkvæmni þessarar útfærslu byggist á því að hægt sé að nýta affallsvarmann í hitaveitu, gróðurhús, þurrkun eða til annarra nota til að auka tekjur af verkefninu.

Ef vel tekst til er þó til mikils að vinna því víða um land má finna aðstæður þar sem unnt ætti að vera að vinna sjóðandi lágghita. Ekki er útilokað að hægt verði að setja upp raforkuframleiðslu upp á tugi MW af uppsettu afli með því að nýta borholur sem þegar eru til staðar í landinu, t.d. á stöðum þar sem raforkudreifikerfi er ekki til staðar eins og á Hveravöllum og í Kerlingarfjöllum í stað þess að þjónusta þar byggist á dísilknúnum rafstöðvum.

Glatvarmi er hitaorka sem verður til við aðra framleiðslu, t.d. í iðnaði eins og kísilveri eða við fiskimjölsvinnslu, og tapast út í umhverfið. Tækni til að nýta glatvarma hefur fleygt fram og hefur kostnaður við nýtingu þessa lágghita til raforkuframleiðslu lækkað. Við bestu skilyrði og með hagkvæmri fjármögnun gæti slík raforkuframleiðsla verið samkeppnisfær við annars konar raforkuframleiðslu á Íslandi. Þetta er m.a. áhugaverður kostur þar sem hægt er að nýta affallsvatn frá jarðvarmavirkjun í iðnaðarferli en glatvarmi er nú þegar nýttur fyrir varmadælur.

8.3. Vindorka í smáum stíl.

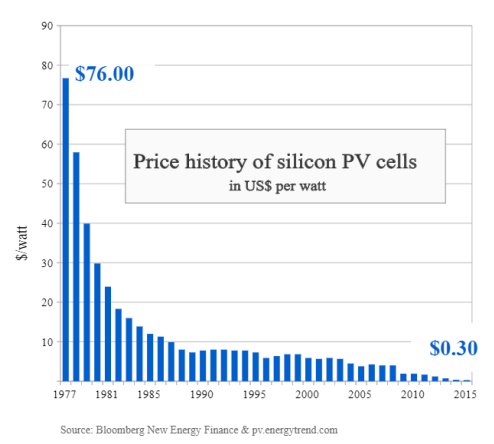
Aðstæður til framleiðslu vindorku á Íslandi eru með því besta sem gerist í heiminum. Tæknin stefnir í að verða meðal hagkvæmstu aðferða til framleiðslu raforku. Auk hagkvæmninnar eru framkvæmdirnar afturkræfar.

Kostnaður við að virkja vind í smáum stíl er enn sem komið er talsvert hærri en sem nemur almennu raforkuverði en á afskekktum stöðum eins og t.d. í Grímsey gæti slík lausn vel komið til greina til að leysa af hólmi dísilrafstöðvar.

Samkeppni um framleiðslu vindrafstöðva er mikil og sækja kínversk fyrirtæki hratt fram til móts við rótgróin fyrirtæki á Vesturlöndum. Kostnaður smárra vindrafstöðva er hlutfallslega hærri en þeirra stærri. Upplýst hefur verið að framleiðsluverð á hverja kWst frá 9 kW rafstöð (Excel 10 frá Begley) sé nærri 20 UScent á líftíma rafstöðvarinnar eða um 25 kr. Það verð er ekki samkeppnishæft við raforkuverð á Íslandi. Á næsta ári er von á nýrri gerð af vindmyllum á markað frá Bergey. Það verður 15,6 kW rafstöð og er uppgefið framleiðsluverð 10 UScent/kWst eða um 12 kr./kWst á líftíma stöðvarinnar.

8.4. Sólarrafhlöður.

Verð á sólarrafhlöðum hefur lækkað mjög hratt og á heimsvísu hefur uppsett afl í orkuverum sem vinna raforku úr sólarorku farið ört vaxandi, sbr. mynd 8.4.1. Á Íslandi eru ekki kjöraðstæður fyrir nýtingu sólarorku en á afskekktum stöðum eins og á hálendinu fjarri dreifikerfi raforku hefur tæknin verið nýtt, t.d. af þeim sem þurfa að framkvæma mælingar og senda gögn fjarri byggð. Óhagstæð lega landsins fjarri miðbaug og halli sólarljóssins á yfirborð þess leiðir til hlutfallslegs óhagræðis. Nýting sólarorku er að auki háð sveiflum sólarorkunnar og skýjafari sem eykur enn óhagræðið. Engu að síður er ástæða til að fylgjast með þróun sólarorkuvera og -rafhlaðna, sem einnig eru í örri þróun, og möguleikum á samspili t.d. lítilla vindrafstöðva, sólarsellna og annarra lítilla orkugjafa.



Mynd 8.4.1. Þróun verðlags á sólarsellum frá 1977, mælt í USD/W.

8.5. Íslenska djúpborunarverkefnið.

Íslenska djúpborunarverkefnið (*IDDP: Iceland Deep Drilling Project*) er alþjóðlegt rannsóknarverkefni sem hefur að markmiði að bora dýpra niður í jörðina en áður hefur verið gert og skila þannig allt að tíu sinnum meiri orku úr hverri holu en hefðbundnar aðferðir.

Djúpborun er talin möguleg á háhitavæðum þar sem kólnandi kvikuinnskot eru á nokkurra km dýpi undir yfirborði jarðar.

Íslenski orkuiðnaðurinn (HS, LV, OR, OS) lagði drög að verkefnum árið 2000 með kynningu á alþjóðaráðstefnunni *World Geothermal Congress* í Japan. Lögð var áhersla á tækifæri til alþjóðlegs samstarfs um rannsóknir og þróun tækni til að finna og nýta háhitakerfi í yfirmarksástandi (e. *supercritical condition*). Í upphafi var gerð hagkvæmniathugun sem tók til jarðfræðilegra forsendna á Reykjanesi, í Kröflu og á Nesjavöllum, ásamt ýtarlegri úttekt á bortækni og nýtingartækni, og var skýrsla þar um gefin út 2003. Skýrsluna og ítarlegt yfirlit um IDDP má finna á heimasíðu verkefnisins.³⁴

Frá upphafi hefur verið leitað eftir styrkjum og stuðningi erlendis frá, og hafa fengist alþjóðlegir styrkir til vinnufunda og síðan kjarnatöku og rannsókna frá 2001. Jafnframt studdi Alcoa við borverkið í Kröflu 2007–2013 og Statoil frá 2008–2012. Statoil kom svo aftur að verkefnum til að styðja við borun á Reykjanesi 2015–2020. Statoil skipti um nafn 2018 og kallast nú Equinor. Grunnframlag til borframkvæmda kom að mestu frá stofnendum verkefnisins með þeim hætti að orkufyrirtækin þrjú (HS, LV, OR) ákváðu að leggja til eina fóðraða borholu hvert, niður í u.þ.b. 3,5 km dýpi, á sínu vinnsluvæði og taka síðar við rekstri þeirra. Stofnendur standa síðan sameiginlega að dýpkun hvernar holu þótt semja þurfi um hvert borverkefni fyrir sig. Framlag Orkustofnunar var upphaflega metið jafngilt efri hluta einnar vinnsluholu. Alcoa studdi við efri hluta holu IDDP-1 í Kröflu með sérsamningi við Landsvirkjun og Statoil studdi við efri hluta holu IDDP-2 á Reykjanesi með sérsamningi við HS Veitur.

Árin 2004–2006 lögðu HS Veitur til eina 3 km djúpa vinnsluholu á Reykjanesi, RN-17, til dýpkunar í 5 km sem IDDP-holu. Holan hrundi hins vegar í blásturstilraun sem gerð var áður en til dýpkunar kom og reyndi því ekki á þátttöku IDDP í það skiptið. HS Veitur skáboruðu síðar út úr holunni í rannsóknarskyni, en hola reyndist þó ekki vinnsluhæf og ónýttist með öllu.

Á árunum 2008–2009 hóf Landsvirkjun borun IDDP-1 í Kröflu og lenti þá óvænt í bráðnu bergi (kviku) á 2,1 km dýpi. Berghiti var þá um og yfir 900°C og var boruninni þar með sjálfhætt. Hins vegar fór betur en á horfðist. Þeir sem stóðu að IDDP-verkefnum ákváðu með Landsvirkjun að bæta við steyptri fóðringu og götuðum leiðara í neðstu 100 m holunnar og reyna tilraunablástur. Úr varð um tíma heitasta vinnsluhola í heimi. Hún blés yfirhitaðri háþrýstigufu um 452°C heitri við 140 bara þrýsting. Varmainihald mældist um 3.200 KJ/Kg og orkugeta upp að 36 MW_e. Vinnslutilraunir voru gerðar á holunni fram á mitt ár 2012 og skilðu þær svo góðum árangri að við lá að holan yrði tengd inn á Kröfluvirkjun. Til þess kom þó ekki því að holulokar þoldu ekki álagið og fóðringar skemmdust síðan við kælingu á holunni sem nauðsynleg var til að geta gert við blástursbúnaðinn. Hins vegar er ekkert því til fyrirstöðu að endurtaka vinnslutilraunir með sterkari og bættum búnaði og bora nokkrar vinnsluholur niður að kvikuhólfinu innan núverandi vinnsluvæða og margfalda orkuvinnslu frá Kröflu. Landsvirkjun lagði til langstærstan hluta kostnaðar við borverkið og tilraunirnar. Það er mat IDDP að tímaspursmál sé hvenær Landsvirkjun sæki aftur á sömu mið og reyni orkuvinnslu rétt ofan kvikuhólfsins.

³⁴ www.iddp.is

Á næstu árum sótti orkuíðnaðurinn með Íslenskum Orkurannsóknum nokkuð stíft eftir rannsóknarfé bæði til innlendra og erlendra rannsóknarsjóða og studdi við rannsóknir af ýmsu tagi á vinnslutækni djúpborana. Má þar nefna stofnun jarðhitaklasans GEORG og verkefna eins og IMAGE sem fékk styrk úr EU FP7-áætluninni. Í framhaldi af því var síðan sótt um styrki til rammaáætlunar ESB Horizon 2020 til að styðja vinnslutækni og tilraunir. Má t.d. nefna verkefnið GEOWELL (2016–2019) og DEEPEGS (2015–2019) í því sambandi. Eitt framsæknasta verkefnið lítur að hönnun og smíði sérstakra fódoringatengja sem eiga að hindra skemmdir á borholufóðringum vegna varmaþenslna svipað og gerðist í IDDP-1 svo og rannsókna á fódringasteypu o.fl.

Árin 2016 og 2017 lagði HS Orka svo til 2,5 km djúpa vinnsluholu, RN-15, til dýpkunar í 5 km dýpi sem IDDP-2 holu. Borteigurinn var fyrst stækkaður umtalsvert, holan tekin úr vinnslu og dýpkuð í 3 km fyrir fódringu. Borun hófst í ágúst og lauk í janúar 2017 á 4.659 m dýpi. Síðan voru gerðar örvunartilraunir fram eftir því ári, m.a. með stuðningi DEEPEGS, og holunni loks lokað til upphitunar í september 2018. Tilraunablástur og vinnslutilraunir byrja fyrri hluta árs 2019.

Það óvenjulegasta sem gerðist með holu IDDP-2 var að yfirmarksástand (426°C við 340 bör) mældist í holunni á um 4,5 km dýpi meðan á borun stóð þann 3. janúar 2017. Mælingin staðfesti að upphaflegum markmiðum með djúpbörnunum var náð. Þá kom einnig á óvart að nánast allt kalda vatnið (50–60 l/sek.) sem notað var við borunina hvarf út í bergið ásamt öllu því bergsvarfi sem losað var. Þetta var mikið eða um 5.000 tonn af vatni á sólarhring og heildarmagn bergs sem losað var nam um 160 tonnum. Reiknað hafði verið með að bergið neðan venjulegs vinnsludýpis (um 2,5 km) yrði fremur þétt og með takmarkaða vatnslekt, nema þá e.t.v. í afmörkuðum rásum sem verið var að leita að með djúpbörnuninni. Þessi mikla lekt kom því þægilega á óvart og stækkaði jarðhitageyminn niður á við um a.m.k. 1 km. Þar er orkuinnihald jarðhitavökvans umtalsvert hærra vegna hærri hita og ávinningur af djúpbörnar-tilrauninni er því ótvíræður hvað Reykjanesjarðhitakerfið varðar og trúlega mesti ávinningur djúpbörnarverkefnisins til þessa. Einnig er alveg ljóst er að dæla má óhemju magni af vatni niður í 400°C – 600°C heitt berg undir vinnslusvæðinu. Afleiðing þess getur ekki orðið önnur en að bæta orkuvinnslu á svæðinu og lengja vinnslutíma þess. Komi til þess að núverandi vinnsluholur á Reykjanesi verði dýpkaðar og nýjar boraðar niður undir 4 km dregur það úr neikvæðum áhrifum borana á yfirborðið, þ.e. borplönun mun fækka. Vinnslutilraunir verða gerðar á árinu 2019 og fást þá skýrari línur í málin. Líklegt er að í framtíðinni teygi vinnsluholur HS Orku sig a.m.k. niður undir 4 km en næsta hola djúpbörnarverkefnisins, IDDP-3, verður á Hengillssvæðinu og er undirbúningur hennar þegar hafinn hjá Orkuveitu Reykjavíkur.

8.6. Innlend eldsneytisframleiðsla.

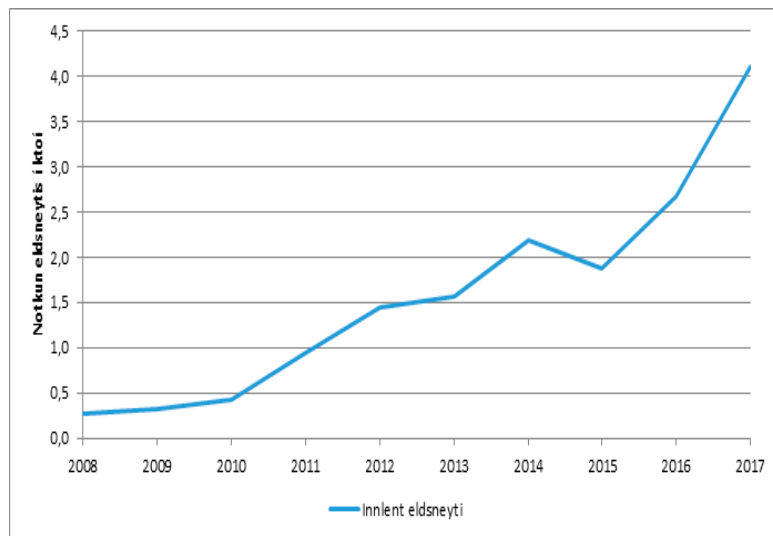
Emdurnýjanlegt eldsneyti (lífeldsneyti) er einkum notað sem eldsneyti í samgöngum. Metan (CH_4) er algengasta lífeldsneytið hér á landi en það myndast þegar lífrænn úrgangur rotnar við loftfirrtar aðstæður, t.d. á urðunarstöðvum sorps. Metanól (CH_3OH) er einfalt alkóhól metanóls. Það hefur verið unnið úr vetni og koltvísýringi (CO_2) sem fanga má úr jarðhitakerfum eins og fyrirtækið Carbon Recycling International gerir í Svartsengi. Einnig hafa verið uppi hugmyndir um að fanga koltvísýring úr kísilmálm- og álvinnslu. Etanól ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) er alkóhól og fimmta algengasta tegund endurnýjanlegs eldsneytis sem notað er í samgöngum á landi en það er innflutt. Það er framleitt úr lífmassa, t.d. sykrungum (kolvetnum), með loftfirtri gerjun örvera.

Þá má enn fremur nefna lífdísil sem er framleiddur úr hráefni sem ræktað er innan lands, eins og repju og lúpínu.

Lífdísill er framleiddur úr jurtaolíu, dýrafitu og fiskúrgangi. Framleiðsla lífdísils hefur verið stunduð um nokkurra ára skeið og hefur t.d. tilraunaframleiðsla á lífdíslu úr vetrarrepju skilað áhugaverðum árangri. Mörg fleiri lífræn efnasambönd hafa verið skoðuð sem mögulegir orkugjafar í samgöngum. Meðal þeirra er dimethyl ether (DME: $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) sem er gas en má auðveldlega flytja í vökvaformi. Það hefur í áratugi verið víða notað sem orkugjafi. DME hefur verið til umfjöllunar sem líklegt eldsneyti fyrir stærri flutningstæki og skip en það brennur við þrýsting í sprengihreyfli eins og dísilolía, en hefur minni umhverfisáhrif. Það má framleiða úr CO_2 sem losnar frá stóriðju en að auki þarf vetni. Framleiðsla á DME hér á landi hefur verið skoðuð í samvinnu við Mitsubishi Motors en það reyndist ekki hagkvæmt vegna hás kostnaðar við framleiðslu vetnis sem þyrfti sérstaklega vegna DME framleiðslu.

Í aðgerðaráætlun um orkuskipti sem var samþykkt af Alþingi 31. maí 2017 er stefnt að því að auka hlutdeild innlendra endurnýjanlegra orkugjafa á kostnað jarðefnaeldsneytis í samgöngum á landi í 10% árið 2020 og 40% árið 2030.

Mynd 8.6.1. sýnir magn endurnýjanlegs eldsneytis (lífdísilolíu, metans og rafmagns) sem fer til samgangna á landi, framleitt á Íslandi 2008–2017 í kílótonnum olíuígilda. Eftir að endurnýjanlegt eldsneyti naut skattvælnana og söluaðilar eldsneytis voru skyldaðir til að selja endurnýjanlegt eldsneyti árið 2013 tók sala endurnýjanlegs eldsneytis stökk og er nú um 5,7% af öllu eldsneyti til samgangna á landi.³⁵



Mynd 8.6.1. Magn endurnýjanlegs eldsneytis sem fer til samgangna á landi, framleitt á Íslandi 2008–2017 í kílótonnum olíuígilda. Áætluð notkun rafbíla, auk framleidds eldsneytis, lífdísilolíu og metans.

³⁵ Orkustofnun: „Endurnýjanlegt eldsneyti í samgöngum á landi árið 2017“. OS-2018-05.

Viðauki 1.

Staðarval fyrir vindorkuver.

Áreiðanlegar langtímamælingar á vindum og öðrum veðurfarslegum þáttum eru mikilvægastir í mati á vindorku og staðarvali fyrir vindorkuver, auk nákvæmra upplýsinga um landfræðilega staðhætti og aðra umhverfisþætti. Á síðustu árum hefur tækninni fleygt fram og vindmyllurnar orðið sífellt stærri og öflugri til að svara kalli eftir aukinni framleiðslu vistvænnar orku.

Vindmyllum til raforkuframleiðslu svipar mjög til hefðbundinna vindmyllna. Þær eru að jafnaði með þrjú blöð sem snúast um láréttan ás framan á turni úr stáli. Flestar vindtúrbínur byrja að framleiða raforku við 3–4 m/s vindhraða og ná hámarksframleiðslu við 13–15 m/s. Undanfarin ár hefur þróunin verið í átt að stærri vindmyllum með meiri framleiðslugetu, sem geta framleitt orku með lægri kostnaði. Stærstu vindmyllurnar nú á dögum eru á turnum sem eru yfir 100 m háir og með spaða sem fara um snúningsflöt sem er yfir 100 m í þvermál. Þessar risavöxnu vindmyllur eru 5–7 MW og miðað við 35% nýtingu geta þær framleitt 15–21 GWh á ári.

Við staðarval er svæðum skipt í þrjá vindafarsflokka (I, II, og III) samkvæmt alþjóðlegum staðli. Flokkur I er sterkur vindur, flokkur II er meðalvindur og flokkur III er lítill vindur. Val á vindmyllum fyrir tiltekið svæði fer að talsverðu leyti eftir þessari flokkun. Fleiri þættir ráða vali á vélbúnaði og þarf m.a. að greina staðhætti út frá landslagi og vindafari þar sem stuðst er við langtímamælingar á vindhraða.

Í leiðbeiningum skoskra stjórnvalda er gert ráð fyrir að gerð verði sýnileikakort við undirbúning vindorkuvera og stærð viðkomandi rannsóknarsvæðis ákvarðist út frá hæð myllnanna. Markmiðið er að draga úr landslags- og áskýndaráhrifum þeirra með því að kortleggja umfang þeirra og áhrif. Vindmyllur geta verið sýnilegar í margra kílómetra fjarlægð. Ásýndin er þó háð því hvernig mannvirkið fellur að landslagi, hvort það ber við himin, fjarlægð og sýnileika annarra mannvirkja. Þannig geta áhrif vindmyllna breyst mikið út frá sjónarhorni og umhverfi. Þótt vindmyllur séu augljósar geta áhrifin verið óveruleg en kortleggja þarf og greina möguleg landslags- og áskýndaráhrif eftir viðurkenndri aðferðafræði.

Nýting vindorku hentar vel með flestri landnotkun. Mjög lítill hluti lands, sem er skilgreindur sem framkvæmdarsvæði vindmyllugarðs, er notaður undir myllurnar sjálfar og þjónustuvegi. Ekkert útilokar aðra nýtingu framkvæmdasvæðisins, t.d. til beitar eða annars landbúnaðar. Á meðfylgjandi mynd V.1.1. má sjá dæmi um hvernig landnýting landbúnaðar og vindorka fellur saman.



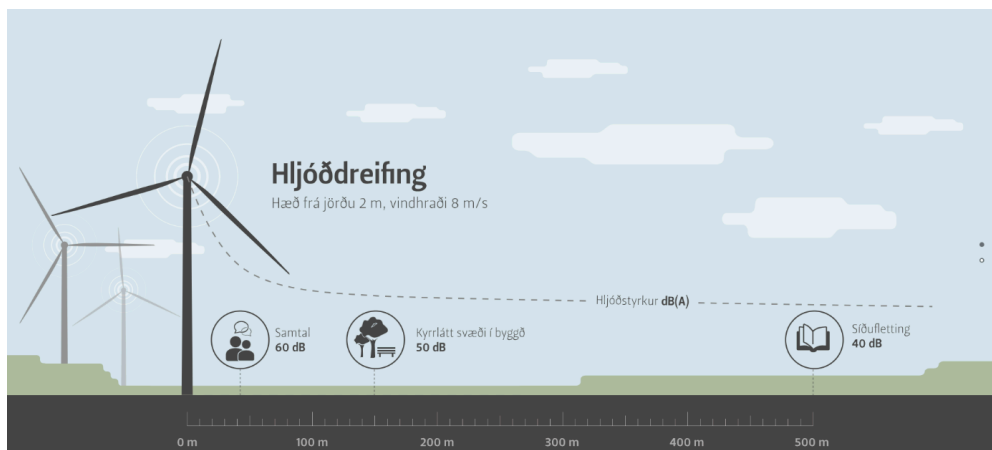
Mynd V.1.1. Landnýting innan afmarkaðs vindorkugarðs .

Við staðarval þarf að taka tillit til fjölmargra áhrifaþátta, t.d. áhrifa mögulegra náttúruhamfara sem geta valdið truflun á rekstri eða skemmdum á mannvirkjum. Þá er horft til mögulegra eldgosa með tilheyrandi hraunstreymi og ösku- og vikurfalli, auk mögulegrar jarðskjálftahættu. Einnig þarf að athuga hvernig flóð og ísing getur haft áhrif á framkvæmdir og rekstur, t.d. hvort þörf sé á afsingarbúnaði [2].

Veigamikill þáttur í staðarvali eru farleiðir og búsvæði fugla. Helstu áhrifaþættir eru áflug, fæling, hindrun á flugleiðum og búsvæðamissir. Áhrifin eru mismunandi eftir tegundum. Áhrif á spörfugla virðast fyrst og fremst bundin við áflug, áhrif á vaðfugla virðast fólgin í fælingu og hindrun á flugleið en endur verða fyrir áhrifum af báðum þáttum. Stórum fuglum, líkt og gæsum, er almennt hættara við áflugi en minni fuglum. Þetta eru þó einungis almennar ályktanir út frá tegundum sem búið er að rannsaka en breytileiki getur verið innan tegundahópa.

Skuggaflökt á sér stað í sólskini einkum þegar sól er lágt á lofti og yfirleitt vara þessi áhrif aðeins fáar klukkustundir á ári. Snúningur spaðanna gerir það að verkum að þeir skyggja reglulega á sólarljósið. Í tilfellum þegar vindmyllur eru reistar nálægt íbúabyggð getur skuggaflökt verið til óþæginda og þarf þá að meta staðsetningu þeirra út frá því. Einfalt er að rannsaka og kortleggja möguleg áhrif skuggaflökts með forritum sem geta kortlagt hvar og hversu margar klst. á ári skuggaflökt er líklegt að vera.

Hljóðvist lýsir áhrifum hljóðs sem berst frá rafbúnaði við snúning spaðanna þegar þeir fara fram hjá mastri. Hljóð frá rafbúnaði heyrst fyrst og fremst næst vindmyllunum en fjær heyrst meira frá spöðunum. Hljóð sem berst frá vindmyllum er því háð tegundinni og eru nýrri gerðir hljóðlátari en eldri. Þegar vindhraði er kominn yfir 8 m/s er veðrið sjálft orðið ráðandi hljóðgjafi og er því lítið á 8 m/s sem versta tilvik hvað hljóðstig varðar. Á mynd V.1.2. má sjá hvernig fjarlægð dregur úr hljóðdreifingu frá vindmyllum.



Mynd V.1.2. Dreifing hljóðs með fjarlægð frá vindmyllu.

Einfalt er að reikna og kortleggja mögulega hljóðmengun frá vindmyllum með viðurkenndum forritum.

Ljós á vindmyllum geta haft áhrif á ásýnd þeirra. Á alþjóðavettvangi er áhersla lögð á að draga úr lýsingu, t.d. að leitast við að lýsa einungis þann hluta þeirra sem stendur á jafri vindmyllugarða. Þetta er í samræmi við evrópskar reglur. Nýjar lausnir fela m.a. í sér að nýta radar til að stýra lýsingu á vindmyllum. Þá eru ljós einungis kveikt þegar flugför eru í nánd. Aðrar lausnir eru t.d. infrarauð lýsing á vindmyllum fyrir flugumferð, skermun á lýsingu frá jörðu og stýring á styrk lýsingar eftir sýnileika. Með slíkum mótvægisáðgerðum er mögulegt að draga verulega úr áhrifum lýsingar á nærumhverfið. Undirbúningur og vinna við uppsetningu á vindmyllum í nágrenni við ratsjár og fjarskiptamöstur getur valdið truflunum sem vert er að hafa í huga við staðarval.

Innviðir þurfa að vera til staðar vegna flutninga þungs og fyrirferðarmikils vél- og rafbúnaðar. Nauðsynlegt er að leggja aðkomuvegi og útbúa kranaplön við hverja vindmyllu til að lyfta búnaðinum. Aðkomuvegir eru lagðir með tilliti til veghönnunarreglna Vegagerðarinnar og eiga að gegna hlutverki þjónustu- og viðhaldsvega í framtíðinni [17].

Meta þarf tengingar við flutningskerfi raforku, t.d. hvort háspennulínur og tengivirki séu til staðar og hvort þau nægi fyrir fyrirhugaðan orkuflutning[3]. Tengivirki þarf að vera í nálægð við vindorkuver til að keyra upp spennu fyrir flutningskerfið.

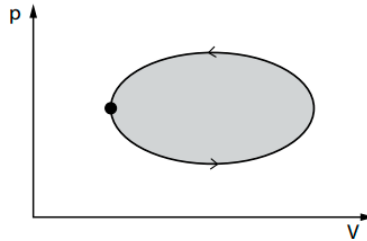
Erlendis hafa efnahags- og samfélagsáhrif vindorku verið metin. Niðurstaða frá Bretlandi sýnir að um 70% heildarfjárfestingar hélst innan lands. Mikil fjárfesting hélst einnig innan þess landshluta þar sem vindmyllan er staðsett og meira en fjórðungur fjárfestingar hélst innan nærsamfélagsins.ⁱ

Í sömu rannsókn var einnig skoðað hversu mörg störf fylgja uppbyggingu vindmyllugarða á Bretlandi og hvenær þessi störf urðu til. Flest störf urðu til á byggingartíma eða 2,5 störf fyrir hvert MW af uppsettu afli, en á rekstrartíma urðu til um 0,43 störf/MW.

Viðauki 2

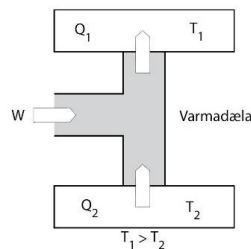
Eðlisfræði varmadælna og hagnýt dæmi.

Handhægt getur verið að hugsa sér ferla í rúmi sem spannst af þrýstingi p og rúmmáli V í ferli sem skrifa má sem hringferli í pV rúminu (mynd V.2.1). Vinnan sem fer fram í ferlinu er í hlutfalli við flatarmál svæðisins sem markast af gráa svæðinu á myndinni. Margfeldi þrýstings og rúmmáls hefur einmitt eininguna *orka* sem er mæld í Joule.



Mynd V.2.1. Hringferli. Eftir hvern hring kemur kerfið aftur á byrjunarreit. Vinnan, margfeldi þrýstings og rúmmáls, er í raun í hlutfalli við flatarmál gráa svæðisins sem myndast.

Í varmadælu (mynd V.2.2.) er vinnan W notuð til að flytja varmann Q_2 frá varmalind með lágan hita T_2 þannig að varminn Q_1 er fluttur í umhverfi með hærri hitann T_1 .



Mynd V.2.2. Varmadæla sem flytur varma frá varmalind til að hita upp heitari varmaþega.

Þjappan í varmadælunni þrýstir saman vinnslumiðlinum þegar hann er í gasfasa og þannig hækkar hitastig vinnslumiðilsins. Meginhluti ytri orkunnar sem notuð er til að knýja varmadæluna fer í þessa þjöppun.

Nýtni; í Carnot-hringferlinu er nýtnistuðullinn, $\square\square\square\square(Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1$

Ársvarmastuðull varmadælu (e. *SPF – Seasonal Performance Factor*) er fundinn á sambærilegan hátt út frá hlutfalli heildarvarmaorku og -raforku á ársgrundvelli. Ársvarmastuðull er ein af forsendum arðsemisútreikninga varmadælu.

Þegar hitabil á milli varmalindar og varmaþega eykst lækkar aflstuðull varmadælu. Lykilstærð varðandi afköst varmadælu er svokallaður coefficient of performance (COP), aflstuðull, en skilgreiningin er:

$COP = \text{kyndivarmi út/raforka inn}$, hlutfall þess varma sem fæst úr dælunni og þeirrar raforku sem notuð er til vinnslu dælunnar.

Hugtakið „varmadæla“ er notað til að lýsa hvoru tveggja tæki sem notað er til hitunar og kælingar. Venjulega er þó með varmadælu átt við tæki sem hitar, en kælivél er tæknilega

sambærilegur búnaður sem kælir eða frýstir. Ísskápur er dæmigerð kælivarmadæla. Á Íslandi er ekki algengt að nota varmadælur til upphitunar sökum þess hve hár stofnkostnaður þeirra er og raforkuverð til húshitunar lágt (oft niðurgreitt). Einnig ber að nefna samkeppni við aðgengilegan jarðhita. Varmadælur eru hins vegar algengar víða erlendis, sérstaklega í Bandaríkjunum, Sviss, Svíþjóð og Þýskalandi. Í nánast öllum nýbyggingum í Svíþjóð eru varmadælur. Í Bandaríkjunum eru þær yfirleitt notaðar til kælingar en til upphitunar á Norðurlöndunum.

Mörg fyrirtæki og verkfræðistofur hér á landi vinna að framgangi varmadælna. Eftir að Nýsköpunarmiðstöðin hóf námskeiðið *Orkubóndann* hefur notkun varmadælna aukist verulega og þeim verið komið fyrir víðs vegar um landið.

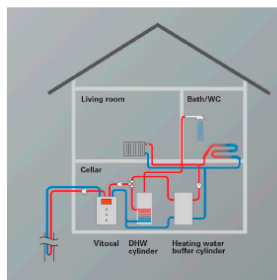
Varmadælukerfi.

Varmadælur byggjast á flutningi varma frá stórum varmalindum við lágt hitastig og skila honum af sér við hærra hitastig til annars varmaþega. Í þessu felst yfirleitt að varmi er tekinn frá náttúrunni, t.d. volgu vatni, lofti, jarðvegi eða sjó, og skilað til upphitunar húsa. Einingar varmadælu eru dælubúnaður, lagnir, þjappa og tveir varmaskiptar í lokuðu kerfi, annar þeirra er eimir en þar eiga varmaskipti sér stað við uppgufun en í hinum (eimsvalanum) eiga varmaskipti sér stað við þéttingu gass í vökva. Þjappan eykur þrýsting gassins í hringrásinni og hækkar hitastig þess.

Hér á eftir eru dæmi um varmadælukerfi sem Efla verkfræðistofa hefur unnið að á tveimur stöðum á landinu.

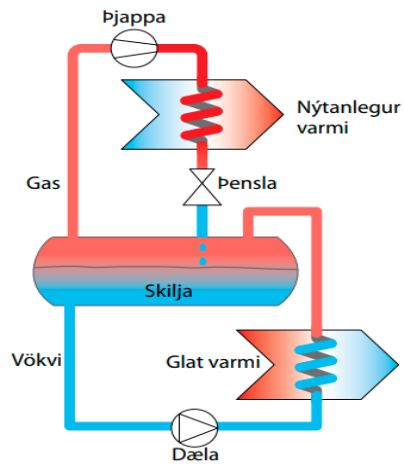
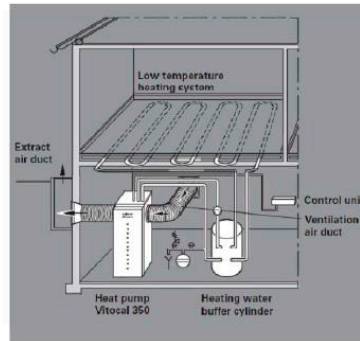
Varmadælukerfi á Grenhól Snæfellsnesi

- Nýtt 180 m² einbýli með gólfhitun
- Varmadæla með glykol/glykol kerfi
- Nafnakost 7,7 kW m.v. 0°C að dælu og 35°C framrásarhita
- Varmi er tekinn úr 150 m djúpri borholu
- Grunnhiti holu í hvíld er 13°C
- Hiti holu lækkar niður í 1°C í vinnslu á veturnum
- Hóla er hvíld í 15 mín á 2 klst fresti
- Mældur aflstuðull, COP, eftir 3 ára notkun er 4,12.



Varmadælukerfi á Litlu Brekku

- Sumarbústaður við Þingvallavatn með gólfhitun
- Varmadæla með loft/vatn kerfi
- Nafnarköst 10,6 kW m.v. 2°C hitastig að dælu og 35°C framrásarhita
- Mældur aflstuðull eftir 3 ára notkun er 3,5



Mynd V.2.3. Varmadæla með vinnslumiðil sem t.d. gæti verið ammoníak.