

# HLÝNANDI VEÐURFAR OG ORKUVINNSLA

---

HNATTRÆN HLÝNUN OG ÁHRIF Á ORKUGETU  
VATNSAFLSTÖÐVA LANDSVIRKJUNAR

Reykjavík 6. Maí 2009

Elias B Elíasson, verkfræðingur

Skúli Jóhannsson, Annað veldi ehf.



## Samantekt

Talið er að Landsvirkjun hafi eignast umtalsverða innistæðu í formi vaxandi rennslis frá jöklum vegna hlýnandi veðurfars.

Skýrslan fjallar um hvernig framleiða mætti hámarks orku með lágmarks áhættu í orkukerfi Landsvirkjunar og auka þannig verulega verðmæti fyrirtækisins. Farið er yfir loftslagsbreytingar í heiminum og líklega framtíðarþróun þeirra á Íslandi. Bent er á að sveiflur í veðurfari á Íslandi geta orðið miklar og nýta má rennslisaukninguna betur með virkri umhverfisvöktun.

Nýútreiknaðar rennslisraðir sem koma við sögu eru skoðaðar og metnar. Hin almenna niðurstaða er sú, að raðirnar eru yfirleitt taldar trúverðugar.

Orkuspá er sett upp og orkumarkaðurinn túlkaður með ákveðnum reglum og markaðshlutdeild Landsvirkjunar við ríkjandi markaðsaðstæður þannig metin.

Vatnsgildi vatnasvæða eru einnig metin. Við hermun rekstrar er vatnsmiðlunum að venju stýrt með verðlagningu á annarri orku en frá vatnsafli og mati á skaða vegna orkuskorts. Töp í flutningi eru reiknuð í hermuninni, en takmörkunum í flutningskerfinu sleppt.

Með hlýnandi veðurfari og auknu rennsli vatnsfalla eykst rennslisorka kerfisins. Kerfisathugun leiðir í ljós að orkugeta kerfisins vex þá að sama skapi, en hægar. Nýting aukinnar rennslisorku takmarkast bæði af uppsettu afli og stærð miðlana. Í skýrslunni eru þessir þættir leiddir í ljós.

Stöðvun vélbúnaðar virkjana vegna fyrirbyggjandi viðhalds hefur veruleg áhrif á nýtingu aukinnar rennslisorku. Leitt er í ljós, að sveigjanleg viðhaldsáætlun gæti skapað svigrúm í erfiðum vatnsárum.

## Efnisyfirlit

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Inngangur og helstu niðurstöður                           | 1  |
| Inngangur                                                 | 1  |
| <i>Almennt</i>                                            | 1  |
| <i>Veðurfarsbreytingar og aðferðafræði</i>                | 3  |
| <i>Markaður</i>                                           | 5  |
| <i>Orkukerfi</i>                                          | 5  |
| <i>Virkjanir</i>                                          | 5  |
| <i>Lónstýring</i>                                         | 6  |
| <i>Flutningskerfi</i>                                     | 6  |
| <i>Viðhald</i>                                            | 6  |
| <i>Kerfisathuganir</i>                                    | 6  |
| Helstu niðurstöður                                        | 7  |
| Hlýnun Jarðar                                             | 13 |
| Fortíð                                                    | 13 |
| Framtíð                                                   | 16 |
| Ályktanir varðandi Ísland næstu áratugi                   | 18 |
| Rennsli                                                   | 22 |
| Markaður                                                  | 31 |
| Orkukerfi                                                 | 34 |
| Almennt                                                   | 34 |
| Virkjanir í hermilíkani                                   | 34 |
| Lónstýring                                                | 37 |
| Flutningskerfi                                            | 38 |
| Viðhald                                                   | 39 |
| Kerfisathuganir                                           | 39 |
| Almennt                                                   | 39 |
| Orkugeta                                                  | 40 |
| Dreifing kostnaðar                                        | 42 |
| Viðhaldsáætlun                                            | 43 |
| Vatnsgildi                                                | 46 |
| Nýting virkjana og miðlana                                | 47 |
| Skuggaverð reiðuafis á jarðvarmasvæðunum og túlkun þeirra | 51 |
| <i>Viðauki 1</i>                                          | 57 |

# HLÝNANDI VEÐURFAR OG ORKUVINNSLA

HNATTRÆN HLÝNUN OG ÁHRIF Á ORKUGETU  
VATNSAFLSTÖÐVA LANDSVIRKJUNAR

## INNGANGUR OG HELSTU NIÐURSTÖÐUR

### INNGANGUR

#### ALMENNT

Í skýrslum um afleiðingar af hlýnun andrúmslofts er yfirleitt mest fjallað um áhættur af því að gera ekki neitt. Ef gripið væri til mótvægisaðgerða yrði það með tilheyrandi kostnaði sem í flestum tilvikum gæti orðið himinhár. Í sumum löndum á norðurslóðum eins og á Íslandi geta aftur á móti í vissum tilvikum falist ný tækifæri til hagsældar með hlýnandi veðurfari.

Þeirri athugun sem hér er greint frá var frá upphafi ekki ætlað að vera nákvæmt mat á orkugetu þess kerfisins sem tekið er til umfjöllunar. Ætlast var til, að hún gæfi hugmynd um aukningu orkugetu, lýsti þeim takmörkunum sem verða tilfinnanlegastar í rekstri kerfisins ef uppbygging þess yrði með þeim hætti sem lýst er og þjónaði sem upplegg fyrir þær athuganir sem gera þarf.

Landsvirkjun hefur fram að þessu miðað mat á orkugetu við það, að rennsli framtíðar yrði eins og rennsli fortíðar. Með því að nýta vatnamælingar á þennan hátt er orkugetan vanmetin, ef rétt er að jörð fari hlýnandi og þar með fari afrennsli jökla landsins vaxandi.

Í ljósi þess hvað kenningin um hnattræna hlýnun af mannavöldum nýtur orðið almenns fylgis meðal vísindamanna, er eðlilegt að Landsvirkjun kjósi að leggja á

hana trúnað. Fyrirtækið þarf þá að bæta aðferðir sínar til að áætla framleiðslugetu vinnslukerfis síns með það fyrir augum, að endurbættar aðferðir taki eðlilegt tillit til áhættu á vatnspurrð í vatnsmiðlunum með tilheyrandi orkuskorti og alvarlegum fjárhagslegum afleiðingum.

Nauðsynlegt er að hægt verði að sannfæra viðskiptavini fyrirtækisins um, að þrátt fyrir að tillit sé tekið til nefndra umhverfisbreytinga, þá verði hagsmunir þeirra jafnan tryggðir í samræmi við gæðastefnu Landsvirkjunar.

Í því verkefni sem hér blasir við, er fjallað um nýtingu tækifæra til tekjuaukningar með auknum möguleikum til orkuvinnslu við aukið rennsli til vatnsaflsvirkjana vegna hlýnunar og þar af leiðandi hraðari bráðnun jökla. Þá mætti auka raforkumarkaðinn nokkuð án samsvarandi fjárfestinga í virkjunum. Skoða þarf hve langt Landsvirkjun mætti ganga í því að hagnýta sér hnattræna hlýnun og hækka mat á orkugetu vinnslukerfisins til samræmis við það. Með auknu álagi á vinnslukerfið verða áhætturnar töluvert öðru vísi en áður og þarf að taka það fyrir sérstaklega.

Til að ramma það inn, hve mikið skal taka tillit til hlýnunar, þarf að nálgast málið frá tveim hliðum. Annars vegar þarf að gera sér grein fyrir því hve mikil líkleg aukning orkugetu er og hins vegar hve mikið af þeirri hækkun raunhæft er að nýta í þeim viðskiptatækifærum sem í athugun eru.

Með þessari aðkomu að málinu er sá hagur sem felast kann í hlýnun andrúmslofts og aukinni jökulbráð nýttur í áföngum og á þeim hraða sem bæði alþjóðlegar vísindalegar rannsóknir og viðskiptatækifæri gefa tilefni til.

Raforkukerfi Íslands samanstendur af vatnsafls- og jarðvarmavirkjunum. Hlýnandi veðurfar hefur engin áhrif á jarðvarmavirkjanir, sem sækja varmaorku

niður á 2-3 km dýpi þar sem náttúrulegt aðstreymi að borholum hefur tímastuðul upp á tugi, ef ekki hundruði ára. Í skýrslunni er athyglinni því beint að vatnsaflinu. Landsvirkjun er lang stærsti vatnsaflsframleiðandi á Íslandi með hlutdeild, sem stefnir í 97% á næstu árum. Landsvirkjun á því mest undir í því, og ber reyndar skylda til í ljósi markaðsráðandi stöðu, að rannsóknir á hlýnandi veðurfari hér á landi leiði til hagkvæmustu nýtingar á kerfinu í takt við breytt umhverfisáhrif.

#### VEÐURFARSBREYTINGAR OG AÐFERÐAFRÆÐI

Í reiknilíkönunum Landsvirkjunar hafa jafnan verið notaðar sögulegar rennslisráðir það sem rennsli hefur verið reiknað af sérfræðingum Verkfræðistofunnar Vatnaskil. Til þessa verks hefur verið notað vatnafræðilíkan, AQUAFLOW, og það stillt þannig að rennslismælingar og grunnvatnsmælingar endurspeglar sem best. Reikningarnir byggja á sögulegum gögnum fyrir tímabilið 1. september 1950 til 31. ágúst 2005. Þessar ráðir hafa verið nefndar grunnráðir.

Í athugun þeirri sem hér liggur fyrir þarf að áætla rennsli í framtíðinni, þar sem hlýnandi veðurfar hefur haft sitt að segja. Á fundum með forsvarsmönnum Landsvirkjunar Power var ákveðið að taka viðmiðunarárin 2010, 2015, 2025, 2035 og 2050 til samanburðar við það grunntilvik að reikna ekki með hlýnun veðurfars.

Í skýrslunni er farið er yfir helstu niðurstöður um loftslagsbreytingar í fortíð frá iðnbyltingu og framtíð til næstu 40 ára. Gengið er út frá forsendum um veðurbreytingar úr alþjóðlegum verkefnum og áætlunum um stærð og flatarmálsdreifingu jökla eftir hæð á hverjum tíma. Gert er ráð fyrir hlýnuninni

0,75°C/öld á árabílinu 1950–1975, 1,55 °C/öld 1975 – 2000 og 2,35°C/öld eftir 2000.

Verkfræðistofan Vatnaskil hefur með þessum forsendum varpað mældum veðurfarsröðum til nefndra viðmiðunarára. Þessar nýju raðir ásamt áætlaðri stærð og flatarmálsdreifingu jökla eru síðan notaðar í vatnafræðilíkaninu til að reikna nýjar rennslisraðir. Þannig verða til rennslistilvik sem sýnd eru í töflu 1.

*Tafla 1 Rennslistilvik*

| Rennslistilvik | Veðurfar | Tímabil rennslis        | Fjöldi vatnsára |
|----------------|----------|-------------------------|-----------------|
| Grunnraðir     | Sögulegt | 01.09.1950 – 31.08.2004 | 55              |
| Grunn20raðir   | Sögulegt | 01.09.1985 – 31.08.2004 | 20              |
| 2010-raðir     | 2010     | 01.09.1950 – 31.08.2004 | 55              |
| 2015-raðir     | 2015     | 01.09.1950 – 31.08.2004 | 55              |
| 2025-raðir     | 2025     | 01.09.1950 – 31.08.2004 | 55              |
| 2035-raðir     | 2035     | 01.09.1950 – 31.08.2004 | 55              |
| 2050-raðir     | 2050     | 01.09.1950 – 31.08.2004 | 55              |

Rennslistilvikið Grunn20raðir hefur undanfarin 2-3 ár verið notað af Landsvirkjun við að ákvarða orkugetu. Það var hugsað sem millistig, en með því að taka einungis síðasta hluta grunnraðarinnar, sem er með meira rennslis en öll grunnröðin, þá er verið að taka mið af hlýnun sem þegar er komin fram. Með þessu verður orkugeta lægri en ef tekið er fullt tillit til hlýnunar. Af varfærnisástæðum ákvað Landsvirkjun á sínum tíma að ganga ekki lengra í bili.

Það er eitt að stilla reiknilíkan eins og AQUAFLOW af þannig að mælingar endurspeglar sem best og annað að stilla það af þannig að það skili sem trúverðugustum niðurstöðum varðandi framtíðina, þegar annað veðurfar verður ríkjandi. Því voru reiknaðir líkindafræðilegir eiginleikar nokkurra raða, þær teiknaðar upp og lauslega dæmdar og bornar saman. Við þá skoðun kom fátt í ljós sem skýra þarf, og þykja raðirnar nokkuð trúverðugar. Þar sem rennslislíkan Vatnaskila er í endurskoðun, sem lýkur innan skamms, þótti að þessu sinni rétt



að bíða með nákvæmari yfirferð. Af þessum sökum verða tölulegar niðurstöður þessarar athugunar væntanlega endurreiknaðar síðar meir.

#### MARKAÐUR

Í skýrslunni er almenna markaðnum stillt upp á grundvelli orkuspár Orkuspárnefndar og upplýsinga frá Orkusviði Landsvirkjunar auk þess sem tekið er tillit til spár frá Magnúsi Sigurðssyni ehf sem var unnin fyrir Orkusvið. Í þessari athugun er notuð spá ársins 2015.

Stóriðjuspá er unnin á grundvelli upplýsinga frá Orkusviði Landsvirkjunar. Til að jafna orkuspá við orkugetu þegar rennsli vex með aukinni hlýnun er bætt við stóriðjumarkaði sem hæfir fyrir hverja þá rennslisröð sem er í athugun.

Markaðnum er skipt milli Landsvirkjunar og annarra með þeirri reglu, að Landsvirkjun selur til þeirra um 70–80 GWh/ár meir en hún kaupir af þeim. Með þessu móti færist árssveifla af markaði annarra að hluta yfir á Landsvirkjun og hún fær markað þegar vélar annarra eru úti í viðhaldi. Með þessu fæst skilgreining á markaðshlutdeild Landsvirkjunar sem er talin endurspegla núverandi markaðsaðstæður.

#### ORKUKERFI

Í skýrslunni er raforkukerfinu lýst í stórum dráttum með eftirfarandi hætti:

#### VIRKJANIR

Virkjanir eru listaðar upp og farið yfir kröfur um reiðuafl (varaafli í gangi) eins og þær eru settar upp í athuginni.

## LÓNSTÝRING

Lauslega er farið yfir það hvernig vatnsgildi eru ákveðin og lónum er stýrt. Verð þau sem lögð eru til grundvallar þessum útreikningum eru samkvæmt hefð ákveðin út frá þjóðhagslegum sjónarmiðum. Aðal breytingin frá því sem áður hefur gilt, sem sé að olíustöðvar verði gangsettar áður en gripið sé til sérstakrar skerðingar stóriðju, þá er þessi sérstaka skerðing hjá stóriðjunni núna gerð á undan gangsetningu olíustöðva. Einnig er þjóðhagslegur kostnaður vegna þeirrar stóriðjuskerðingar upp að ákveðnu marki metinn út frá heimsmarkaðsverði þeirrar álframleiðslu sem álfyrirtækin hefðu ella orðið af.

## FLUTNINGSKERFI

Flutningskerfi er í stórum dráttum eins og núverandi nema hvað flutningsmörk eru rýmkuð svo að þau hafa ekki áhrif. Flutningskerfið skerpir á nauðsyn þess, að reikna út vatnsgildi vatnasvæða í reiknilíkaninu, jafnframt því að takmörk þess og töp eru hluti af eðlilegum forsendum þeirrar skiptingar. Vatnasvæði með miðlunum eru þrjú, Þjórsársvæði, Blöndusvæði (Norður) og Kárahnjúkasvæði (Austur).

## VIÐHALD

Reiknað er með að hver vél í virkjunarkerfinu sé tekin út til viðhalds eina viku í senn og því dreift þannig að aflskortur verður sem minnstur.

## KERFISATHUGANIR

Kerfisathuganir eru unnar með hermilíkaninu Hyena, sem Annað veldi ehf hefur gert fyrir Landsvirkjun og rekur.

Orkugeta er ákveðin fyrir hverja rennslisröð og markaður stóriðju stilltur af til samræmis.

Rekstur kerfisins er greindur fyrir hvert rennslistilvik, lykilniðurstöður birtar og þær skýrðar. Farið er yfir kostnað, tiltækt afl, vatnsgildi, skuggaverð, langæislínur virkjana og rekstur lóna.

#### HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Mjög sterkar líkur eru á, að sú hlýnun jarðar sem sést í mælingu stafi af aukningu gróðurhúsagasa á andrúmsloftinu og sé því viðvarandi. Niðurstöður loftslagslíkana gefa góða mynd af hugsanlegri hlýnun á heimsvísu. Niðurstöður úr þessum líkönum byggja á gögnum sem eru svona þriggja til 5 ára gömul þegar úrvinnslu líkur og þær þarf að nota til að móta stefnu til næstu 5 eða 10 ára.

Ísland hefur nokkuð sérstæða legu við mörk Golfstraumsins í Norður-Atlantshafinu, sem veldur því að náttúrulegar veðurfarssveiflur eru hér miklar. Búast má við kuldaskeiðum sem koma fyrirvaralítið og vara í nokkur ár. Eitt slíkt tímabil sést í mælingum hér á landi, sem hófst á hafísárum sjöunda áratugar tuttugustu aldar og stóð á annan áratug. Í kerfisathugunum ræður þetta tímabil mestu um mat á orkugetu og eykur það trúverðugleika niðurstaðna að það skuli vera inni á mælitímabilinu.

Landsvirkjun þarf, bæði sjálfrar sín vegna og viðskiptavina, að setja upp umhverfisvöktun þar sem fylgst er með ástandi sjávar og veðurfari í grennd við landið. Þá mætti hanna viðbragðsáætlanir sem grípa mætti til með skömmum fyrirvara ef tímabundin kólnun virðist í uppsiglingu. Hluti af þeim viðbragðsáætlunum getur verið frestun viðhalds, sem hefur veruleg áhrif á breytilegan kostnað í orkukerfinu. Trúlega er með þessu skilyrði meira öryggi fólgið í því að nota langar rennslisraðir úr rennslislíkani, þar sem umrætt kuldaskeið er inni, en að nota ætíð síðustu 20 mæld ár.

Rennslisraðir þær sem fyrir liggja virðast eftir þá skoðun sem lýst er í þessari skýrslu að mestu vera trúverðugar, en á vegum Landsvirkjunar er endurskoðun rennslislíkana í gangi og er verkið unnið af Vatnaskilum ehf. Bæði er um að ræða endurbætur og ný gögn. Af þessum sökum ber að túlka niðurstöður skýrslunar afstætt, en ekki túlka þær sem raunverulega getu til afhendingar á markað.

Eins og Tafla 2 sýnir, þá vex möguleg orkuvinnsla Landsvirkjunarkerfisins nokkuð á hverju ári vegna hlýnunar loftslags. Í greinargerð OGS og EBE [8] er mælt með þeirri stefnu, að nota rennslisraðir reiknaðar með leiðréttingu fyrir hlýnun 3 til 5 ár fram í tímann. Með því að hafa virka umhverfisvöktun og tilbúna viðbragðsáætlun er ekki óeðlilegt að miða áætlanagerð á þessu ári, 2009, og næsta, sem krefst nákvæms mats á orkugetu, við hlýnun sem ætlað er að verði raunhæf árið 2015. Þá er tekin takmörkuð áhætta næstu árin eftir að áætlunum sem nú eru í bígerð hefur verið hrint í framkvæmt og fram til 2015.

*Tafla 2 Niðurstöður kerfisathugana um mögulega orkuvinnslu vatnsorkukerfis Landsvirkjunar.*

| Ár                  | Orkuvinnsla<br>LV-kerfis<br>Gwh/ár | Aukning frá<br>grunnröðum<br>GWh/ár | Aukning frá<br>grunn20röðum<br>GWh/ár |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Grunnraðir</b>   | 15.163                             |                                     |                                       |
| <b>Grunn20raðir</b> | 15.831                             | 668                                 |                                       |
| <b>2010</b>         | 16.137                             | 974                                 | 306                                   |
| <b>2015</b>         | 16.264                             | 1.101                               | 433                                   |
| <b>2025</b>         | 16.519                             | 1.356                               | 688                                   |
| <b>2035</b>         | 16.756                             | 1.593                               | 925                                   |
| <b>2050</b>         | 17.058                             | 1.895                               | 1.227                                 |

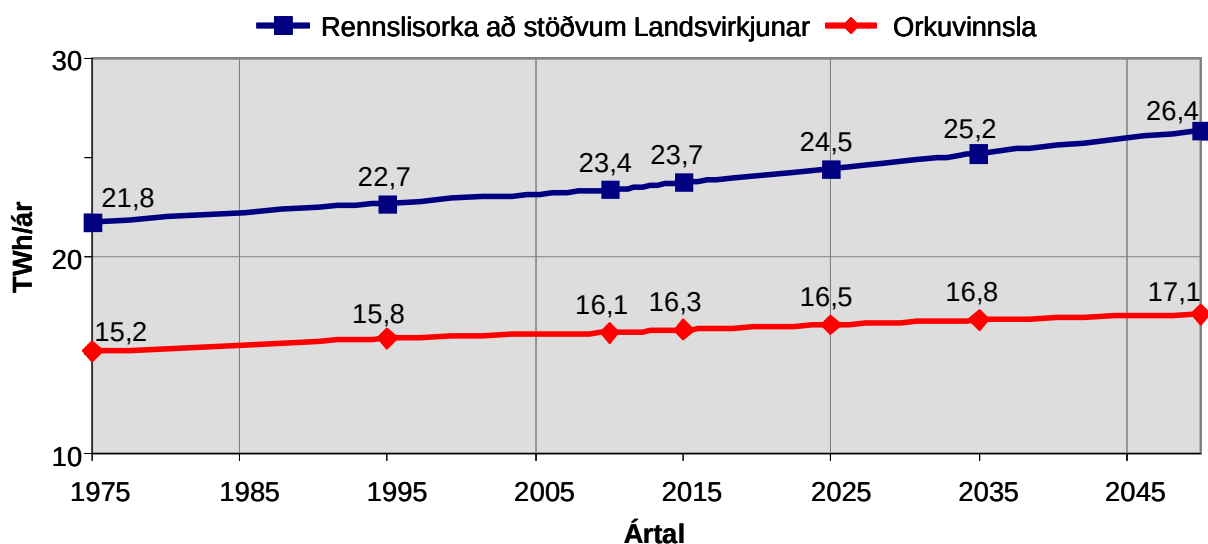
Landsvirkjun getur þá með framangreindum ráðstöfunum notað áætlaða hlýnun til 2015 og ætti þá að fá um 1100 GWh/ár meiri orkuvinnslu í áætlunum sínum nú en fengjust með því að nota grunnraðir. Aukning frá áætlun sem byggja á grunn20röðum er um 430 GWh. Þessar tölur sem aðrar í skýrslunni gilda fyrir

orku inn á flutningsnet og eru háðar því að flutningsgeta þess sé næg til að miðlunarlón nýtist vel.

Án umhverfisvöktunar og viðbragðsáætlana væri eðlilegt að nota rennslisraðir reiknaðar út frá hlýnun 1 til 2 ár fram í tímann. Miðað við að ganga í áætlanagerð nú út frá hlýnun til 2010 fengjust um 970 GWh/ár meiri orka en út frá grunnröðum og um 300 GWh/ár meira en út frá grunnröðum.

Vegna atriða sem bent er á í umfjöllun í þessari skýrslu um rennslisraðirnar er erfitt að mæla með því, að lengra sé gengið en reikna með hlýnun til 2005 meðan óendurskoðað líkan er notað í áætlanagerð. Sýn Landsvirkjunar á markaðsaðstæður og mat á raunkostnaði sínum vegna vatnsskorts getur einnig haft áhrif í þessu samhengi.

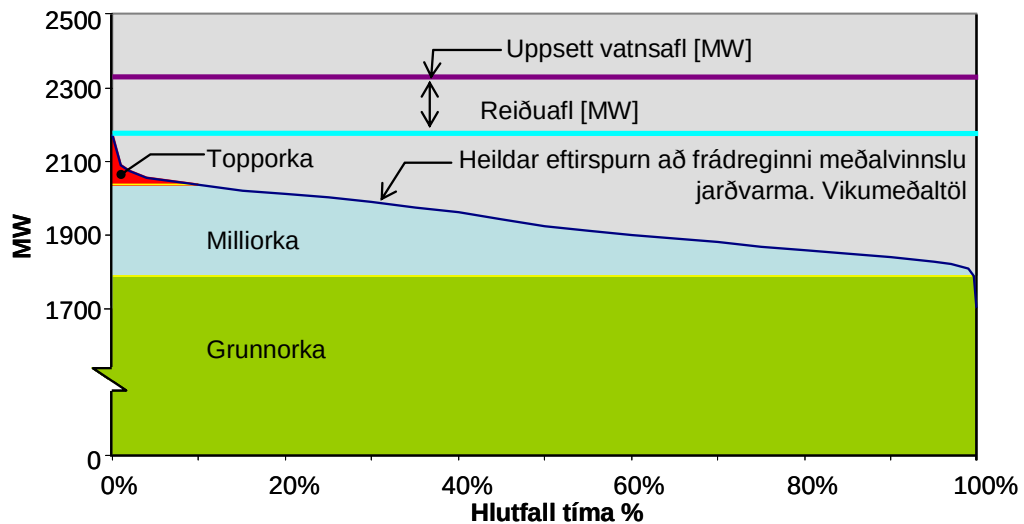
Mynd 1 lýsir orku í rennsli við virkjanir Landsvirkjunar sem vænta má í framtíðinni og þá orkuvinnslu sem ná má úr vatnsorkukerfinu við þær aðstæður sem gert er ráð fyrir. Aðstæðurnar markast meðal annars af þeirri sýn á markaðinn sem gengið er út frá í þessari athugun. Þarna er til dæmis reiknað með að hluti af markaði fyrir vatnsorkuver sé ársveifla almenna álagsins sem jarðvarmaver Landsvirkjunar og annarra sjá ekki fyrir. Þá er einnig reiknað með að öll aukning á eftirspurn, sem sett er inn til að fylla upp í orkugetu landskerisins sé á stóriðjumarkaði, sem er ekki endilega það sem verður næstu áratugi. Sem stendur virðist þó aukinn stóriðjumarkaður vera það sem helst veitir ný markaðstækifæri. Erfitt er að sjá hvernig verðmyndun á samkeppnismarkaði hér á landi hvetji til fjárfestinga fyrir markað með mikið lægri nýtingartíma.



Mynd 1 Rennslisorka og orkuvinnsla vatnsorkukerfis Landsvirkjunar í orkugetu fyrir reiknaðar rennslisraðir. Niðurstöður fyrir grunnraðir eru settar við ártal 1975, sem er um miðbik mælitímans og grunn20raðir við 1995.

Yfirleitt er álitð, að aukið rennsli geri minni kröfur til miðlunar, en í þessari athugun koma fram vísbendingar í átt til hins gagnstæða hvað jökulrennsli áhrærir.

Niðurstöður þessarar skýrslu benda eindregið til að þegar svigrúm til markaðsaukningar, sem nú þegar er fyrir hendi, er fullnýtt fyrir stóriðju, þá verði kerfið eftir það illa í stakk búið til að takast á við markaðsaukningu með árssveiflu og lágan nýtingartíma. Afl virðist þannig of takmarkað til að rennslisaukning nýtist vel en niðurstöður benda eigi að síður til þess að miklar fjárfestingar í auknu afli muni skila sér illa.



Mynd 2 Langæislína sem gefur innsýn í dreifingu markaðar fyrir vatnsorku Markaður fyrir 2015-raðir.

Mynd 2 gefur nokkra innsýn í það hvernig aflsetning íslenska vatnsorkukerfisins verður, ef svo fer fram sem horfir með áframhaldandi uppbyggingu eftir hönnunarviðmiðum sem mótast af harðri samkeppni erlendis frá um orkusölu til stóriðju. Ef orkugetan er fullnýtt verður nýtingartími vatnsorkukerfisins orðinn afar hár. Framboð grunnorku er mjög hlutfallsleg mjög stór, en þar veitir jarðgufan mikla samkeppni. Hagkvæmast verður að fjárfesta í stöðvum fyrir jarðefnaeldsneyti (Gastúrbínur) til að auka framboð á toppafli og reiðuafli, en af tæknilegum og fjárhagslegum ástæðum er vatnsafl heppilegast til að sinna þessum hluta markaðarins meðan það er fyrir hendi. Fyrir milliorkuna má segja að vatnsafl sé svo til einráða hér á landi.

Niðurstöður þessarar athugunar benda því til, að með þeim viðmiðunum sem notuð eru í kerfishönnun og leiða af núverandi markaðshorfum verði sveigjanleiki orkukerfisins til að bregðast við öðrum markaðstækifærum en stóriðjumarkaði fljótlega takmarkaður. Ástæða er til að athuga hvaða tækifæri eru til að fjárfesta í auknum sveigjanleika og líta þá bæði á aukið afl og miðlun.

Þó viðurkennt sé, að aflskortur sé á næsta leiti í kerfi Landsvirkjunar hefur fyrirtækið aldrei þurft að starfrækja kerfi með jafn miklum takmörkunum og verða ef farið verður eftir markaðs- og kerfisforsendum þessarar skýrslu.

Eins fram kemur í skýrslunni er verð annarra orkuforma og skerðingar reiknað út frá þjóðhagslegum sjónarmiðum. Þá er litið svo á, að kostnaður falli að mestu leyti á vatnsorkukerfið og þar með Landsvirkjun eins og hún sé enn eini raforkuframleiðandinn til þrautavara. Þessi aðferð hefur hingað til tryggt viðunandi afhendingaröryggi forgangsorku og eðlilega afhendingu afgangsortu. Niðurstöður athugunarinnar benda hinsvegar til, að þegar fram líða stundir muni þurfa að skerða afgangsortu meira eða minna á hverju ári og spurning hvort þær horfur séu ásættanlegar fyrir viðskiptavinum. Ástæða er því til að marka stefnu um það hve oft og lengi í einu megi skerða orku án þess að viðskiptavild tapist.

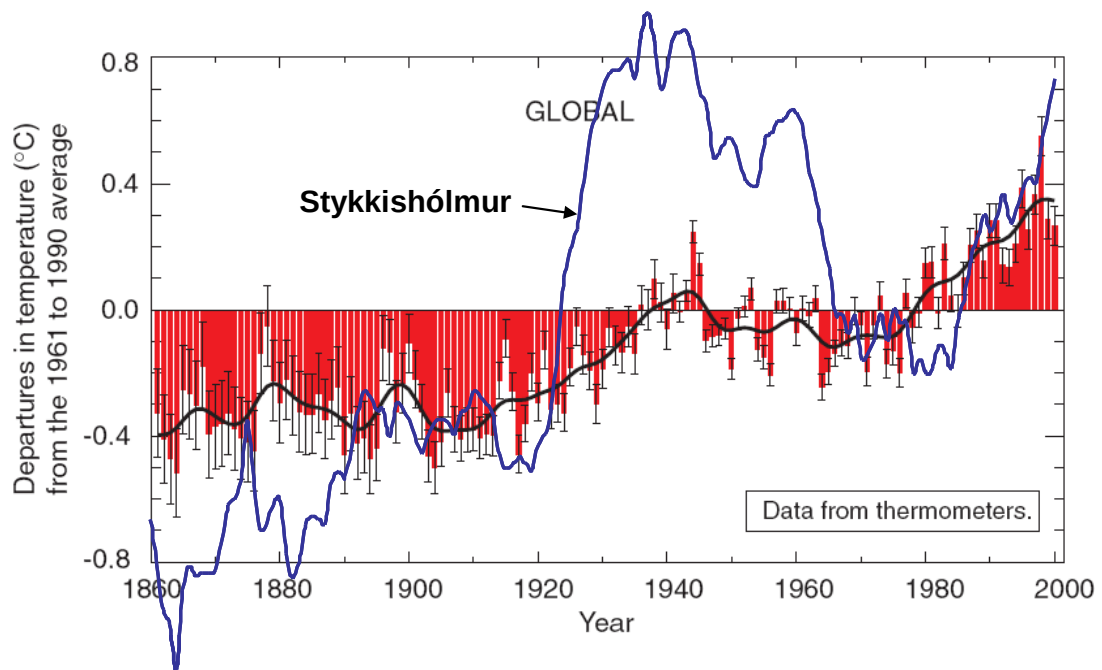


### FORTÍÐ

Það að heimur fari hlýnandi vegna gróðurhúsaáhrifa, sem orsakast af mengandi starfsemi mannfólksins, er nú orðin almennt viðurkennd staðreynd. Aðeins tiltölulega fáir vísindamenn eru enn á öndverðri skoðun. Töluverð óvissa er um umfang.

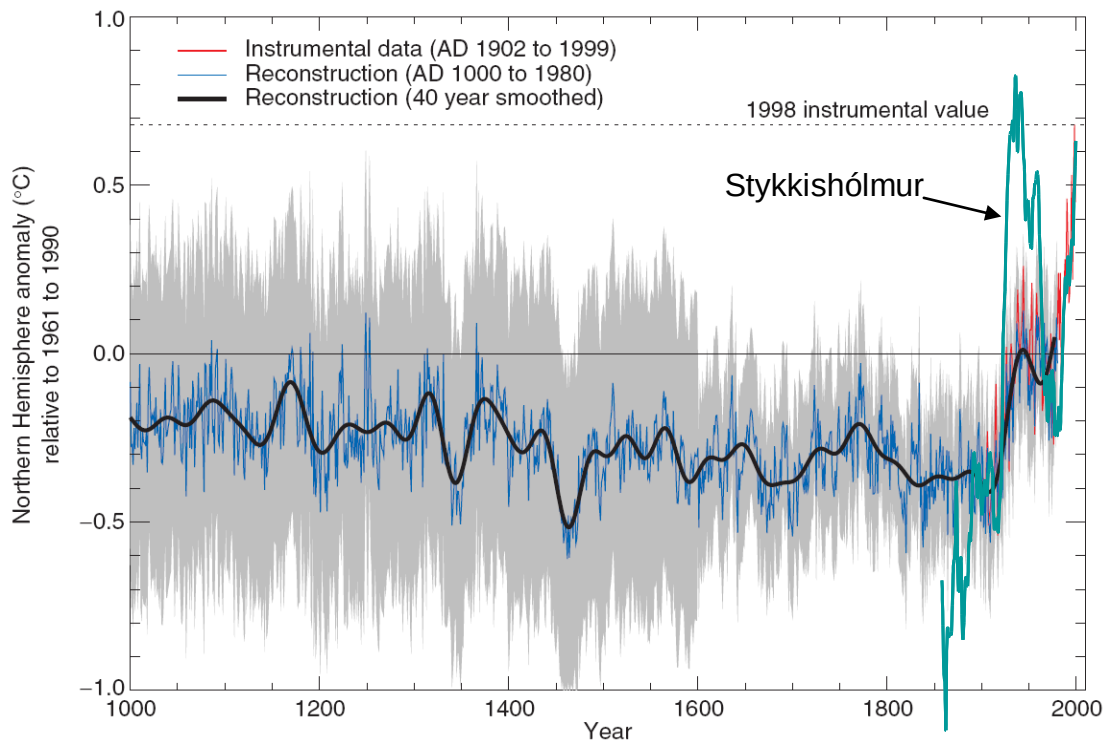
Úrvinnsla mælinga frá undanfarinni hálfa annarri öld, sem er að vísu skammur tími í þessu samhengi, sýna ótvírætt að heimur hefur farið hlýnandi. Dæmi um slíka úrvinnslu má sjá á Mynd 3 þar sem þróunin hitastigs á heimsvísu er borin saman við hitafar í Stykkishólmi. Höfum í huga að því lengra sem maður lítur tilbaka þeim mun hæfari verður maður til að spá í framtíðina.

Eins og Mynd 3 sýnir er hækkun hita í Stykkishólmi í góðu samræmi við mælda alheims hlýnun og heldur meiri en reiknilíkön hafa sýnt að eigi að gilda fyrir norðlæg svæði. Þó sker sig úr hlýskeiðið hér á landi frá 1920 fram á miðjan sjöunda áratuginn. Þessu hlýskeiði lauk þegar kaldur heimskaufsjór úr pólstraumnum þrengdi sér suður með Austurlandi þar sem Golfstraumurinn vék og hafís náði betur til landsins (Svend Aage Malmberg haffræðingur: Símtal 1969).



Mynd 3 Heimsmeðaltöl hitafrávik á árunum 1860 til 2000 við yfirborð lands og sjávar [°C] miðað við meðalhita 1961 til 1990. Tvö staðalfrávik eru sýnd með lóðréttum strikum við súlurnar fyrir árleg hitafrávik. (Heimild IPCC [1] ) Til samanburðar er lína sem sýnir á sama skala samskonar hitafrávik í Stykkishólmi lögð yfir mynd IPCC.

Mynd 4 sýnir endursköpun hitafars síðustu 1000 ára á norðurhveli jarðar. Myndin sýnir greinilega stöðuga leitni í átt til kólnunar fram til 1920, en þá hlýnar verulega og hitinn er síðan greinilega meiri en nokkurn tíma áður. Þetta styður það að heimur fari hlýnandi um þessar mundir, en segir ekki til um ástæðuna. Hitafar frá Stykkishólmi sýnir eins og áður mun stærri breytingar en gengur og gerist á norðurhveli.



Mynd 4 Endursköpun hitafars á norðurhveli jarðar frá árinu 1000 til 1999 (blátt – trjáhringir, kórallar, ískjarnar og sögulegar skrár) og mælingar (rautt). Jöfnuð lína (svart) og tvö staðalfrávik (gráskyggt) er einnig sýnt. (Heimild IPCC [1] ) Hitafar Stykkishólms eins og á Mynd 3 lagt yfir (grænt).

Þær miklu sveiflur sem eru á hitafari á Íslandi geta verið afleiðing af legu landsins á mótum hins kalda íshafsstraums og Golfstraumsins. Þau mót kunna að vera háð sveiflum sem tengjast Norður- Atlantshafs sveiflunum (NAO) og valda veðurfarsbreytingum í ætt við þær sem þekkjast í Mið- og Suður-Ameríku og tengjast El Nino fyrirbærinu í veðurfari. Þó þessi ágiskun segi lítið, þá bendir hún til að áfram megi búast við miklum breytingum á veðurfari, sem gætu gerst hratt, en gangi ekki til baka fyrr en eftir þó nokkurn tíma. Líta verður á þannig sveiflur sem hluta af náttúrulegum breytileika veðurfars á Íslandi. Umhverfisvöktun sem byggir á mælingum á hafstraumum og sjávarhita í grennd við Ísland gæti haft forspárgildi um þessa atburði og jafnvel um minni veðursveiflur [8].

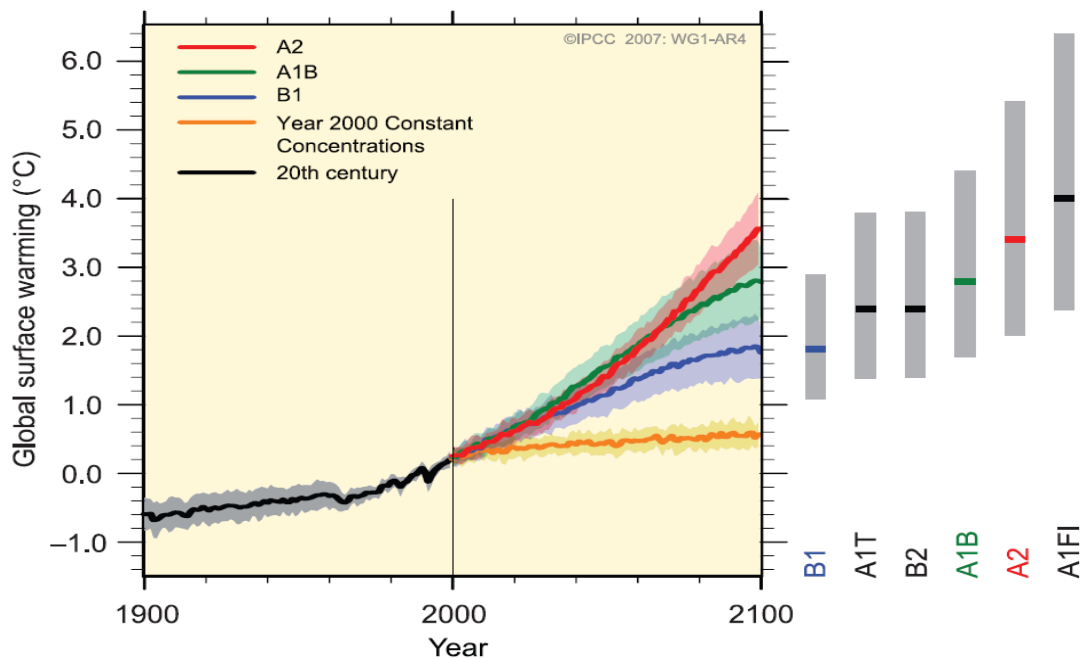
## FRAMTÍÐ

Fjölmargar stofnanir hafa sett upp reiknilíkön af lofthjúpi jarðar til að áætla umfang hinna veðurfarslegu breytinga. Útkomurnar hafa verið misjafnar eða hækkun hitastigs allt frá 1°C til 7°C á öld. Um hitt er ekki deilt, að magn lofttegunda í andrúmslofti sem valda hlýnun hefur aukist frá því sem svarar 280 ppm (parts per million) CO<sub>2</sub> í andrúmslofti á dögum iðnbyltingar til 430 ppm nú til dags, en aukningin hefur verið hröðust eftir 1950. Þessa staðreynd og undirliggjandi athuganir hafa stofnanir notað óspart til að stilla af reiknilíkön sem reikna áhrif breytinga á samsetningu andrúmslofts á veðurfar. Þetta magn er talið, með 95% öryggi, að valdi hlýnun um 1°C þegar frá líður, hvar af trúlega ½°C er þegar komin fram ([2], [1]). Líkönin voru í fyrstu nokkuð gróf, en hafa farið batnandi með auknu tölvuafli og svo mun væntanlega verða áfram. IPCC (International Panel on Climate Change) er nefnd á vegum Sameinuðu Þjóðanna sem tekur saman hinar ýmsu rannsóknir á þessu sviði og leggur fram niðurstöður og samræmdar ályktanir um framtíðina. Almenn er litið svo á að skýrslur IPCC endurspegli ráðandi skoðanir innan vísindasamfélagsins og sem einnig hafa hlotið almenna viðurkenningu.

Mynd 5 er frá IPCC TAR [4] og sýnir breytingu á hitafari í heiminum inn í framtíðina samkvæmt mati nefndarinnar og þá óvissu sem þar er á.

Eins og myndin sýnir eru mörg líkön í gangi og margar sviðsmyndir. sem IPCC hefur skilgreint. Þessar sviðsmyndir fjalla helst um mögulega pólitíska stefnumörkun. Sviðsmyndirnar A1 og B1 gera ráð fyrir verulegri samleitni í heiminum hvað varðar efnahag og fjölskyldumynstur, ólíkt A2 og B2, sem gera ráð fyrir meiri mismun milli svæða hvað þetta varðar. A2 og B2 virðast þannig meir í samræmi við þróun mála það sem af er þessari öld. B2 endurspeglar heldur hraðari efnahagslegar framfarir en A2 og því eðlilegt að menn horfi fremur á þá

sviðsmynd meðan efnahagslegur uppgangur ríkir eins og var þegar CE og VVO verkefnin (sjá síðar) voru unnin. Með kreppu í fjármálum eins og komin er upp þegar þetta er ritað má ætla að vægið færist í átt að A2, sérstaklega þegar fyrri hluti 21. aldar er skoðaður. Í viðauka 1 eru sýndar (á ensku) skilgreiningar IPCC [1] á þeim sviðsmyndum sem koma fram á myndinni.



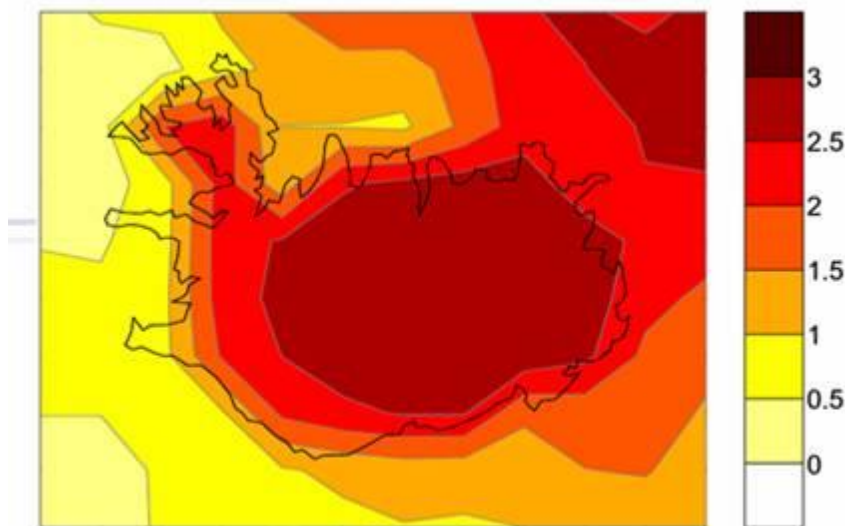
Mynd 5 Meðaltöl niðurstaðna margra líkana um aukningu yfirborðshita jarðar (viðmiðun við 1980 – 1999) fyrir sviðsmyndir A2, A1B og B1, sýnt í framhaldi af tuttugustu aldar hermunum og staðan árið 2100 fyrir aðrar. Skygging táknar  $\pm 1$  staðalfrávik frá árlegu meðaltali einstakra líkana. Gula línan(merkt “Year 2000 ...”) er fyrir það tilfelli að styrkleikahlutföllum mengandi lofttegunda er haldið stöðugum frá árinu 2000. Gráu strikin hægra megin sýna bestu áætlun (þverlína) og líklegt svið reiknað fyrir hin 6 SRES sviðsmyndir. Nánari skýringar í [4].

Þrátt fyrir öflugri tölvukost, endurbætt líkön og viðameiri rannsóknir hafa niðurstöður rannsókna hin síðari ár ekki breyst mikið. Rannsóknir undanfarinna ára hafa meira og minna staðfest eldri niðurstöður og treyst þær þannig að þær eru nú ítarlegri, settar fram af meira öryggi og betri fráviksmörk fylgja. Þetta sést með samanburði á niðurstöðum úr IPCC TAR [1] og IPCC FAR [4].

## ÁLYKTANIR VARÐANDI ÍSLAND NÆSTU ÁRATUGI

Á ráðstefnunni Eurenw 2006, sem haldin var í Reykjavík í byrjun júní 2006, komu fram niðurstöður og aðferðir sem gerðu kleift að meta mögulegt umfang væntanlegrar aukningar á mældu aðrennsli vatnsorkuvera á Íslandi. Á þessari ráðstefnu var gerð grein fyrir niðurstöðum samnorræns verkefnis, “Climate and Energy”, en sérstök skýrsla um niðurstöður verkefnisins var einnig gefin út 2007 ([6]). Verkefnið er á vegum stofnana, sem annast veður- og vatnafarsrannsóknir á Norðurlöndum, í samráði við orkufyrirtæki. Verkefnið hlaut styrk frá Norræna orkusjóðnum. Landsvirkjun styrkti þetta verkefni beint og fékk mótframlag frá Orkusjóði á hverju ári. Landsvirkjun átti fulltrúa (Elías B. Elíasson) í tengslahópi, sem jafnframt vann með stýrihópi verkefnisins að mótun þess.

Mynd 6 sýnir dæmi um niðurstöður CE verkefnisins um þá hlýnun á Íslandi sem ætla má að verði milli tímabilanna 1961-’90 og 2071–2100. Sú breyting hitastigs sem myndin sýnir bætist við hverja þá breytingu sem verður af öðrum orsökum, svo sem af geislun sólar.



Mynd 6 Áætluð hlýnun á Íslandi milli tímabilanna 1961-’90 og 2071–2100 fyrir sviðsmynd A2 Eitt líkan HIRHAM-H-A260) (Rummukainen [5], sjá einig [6])

Í tengslu við CE verkefnið var sett upp samhliða sér íslenskt verkefni um sama efni og skýrsla gefin út um rannsóknir innan þess [7]. Í tengslum við það verkefni unnu sérfræðingar á Veðurstofu Íslands og Reiknistofu í veðurfræði landsmeðaltöl fyrir bæði hitastig og úrkomu (Tafla 3). Hlýnun á Íslandi verður samkvæmt þessu 2,75°C fyrir 110 ára tímabilið 1975 til 2085.

Tafla 3 Breyting á veðurfari 1975 til 2085 (Unnið fyrir [7], tekið úr [12])

| Mán | Breyting úrkomu frá 1961-1990 til 2071–2100 eftir landshlutum [í %/áratug] |       |       |       |          | Hlýnun °C/öld |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|----------|---------------|
|     | SV                                                                         | NV    | NA    | SA    | Meðaltal |               |
| 1   | -0,45                                                                      | 0,00  | 1,82  | 0,15  | 0,38     | 1,0           |
| 2   | -0,96                                                                      | -0,15 | 1,97  | 0,45  | 0,33     | 1,3           |
| 3   | -0,81                                                                      | -0,30 | 0,91  | 0,45  | 0,06     | 2,8           |
| 4   | -0,40                                                                      | -0,15 | 0,45  | 0,61  | 0,13     | 2,8           |
| 5   | -0,05                                                                      | -0,15 | -0,45 | 0,30  | -0,09    | 2,2           |
| 6   | 0,10                                                                       | 0,15  | 0,30  | 0,30  | 0,21     | 1,7           |
| 7   | 0,45                                                                       | 0,15  | -0,30 | -0,61 | -0,08    | 1,7           |
| 8   | 0,96                                                                       | 0,91  | 0,00  | -0,45 | 0,36     | 2,8           |
| 9   | 1,72                                                                       | 1,21  | -0,15 | 0,15  | 0,73     | 3,7           |
| 10  | 1,92                                                                       | 1,97  | 0,91  | 1,21  | 1,50     | 3,7           |
| 11  | 1,57                                                                       | 1,36  | 1,36  | 1,06  | 1,34     | 3,5           |
| 12  | 0,51                                                                       | 0,91  | 1,82  | 0,45  | 0,92     | 3,0           |

Fyrir liggur að draga ályktanir af framangreindum rannsóknum varðandi þróun hitafars á Íslandi næstu áratugi. Nákvæmni loftslagslíkana er enn ekki talin nægilega góð til að taka niðurstöður sem annað og meira en meðaltöl í rúmi og tíma eins og Tafla 3 í reynd sýnir. Þeir vísindamenn sem unnu að CE verkefninu treystu sér heldur ekki til að setja fram marktækar niðurstöður varðandi þróun hitafars innan einstakra svæða til skemmri tíma litið, þó notuð væri sama aðferðafræði og liggur til grundvallar IPCC FAR [4]. Auk þess byggja forsendur um losun gróðurhúsalofttegunda á tiltölulega veikum grunni, meðal annars hvað varðar viðbrögð mannkyns við áframhaldandi hlýnun af völdum mengunar.

Hvað næstu áratugi varðar er þess ekki að vænta að hækkun hitastigs verði háð því hvaða sviðsmynd lendi næst sannleikanum til lengri tíma litið. Mælt rennsli vatnsfalla á Íslandi hefur að meðaltali farið vaxandi í nokkra áratugi eins og eðlilegt ætti að vera þegar veðurfar hlýnar og jökulvatn er jafn stór þáttur í rennsli og raun ber vitni hér á landi. Almennt séð ætti rennsli við stöðugt veðurfar jafnframt að vera stöðugt.

Í innanhússkýrslu Landsvirkjunar frá 2006, [8], voru skoðaðar hinar ýmsu áhættur sem upp gætu komið við mismunandi sviðsmyndir af hlýnun fyrir það tímabil sem rennsli vatnsfalla hefur verið mælt. Komist var að þeirri niðurstöðu að minnst áhætta ætti að felast í því gildi sem leiddi af sér stöðugt rennsli.

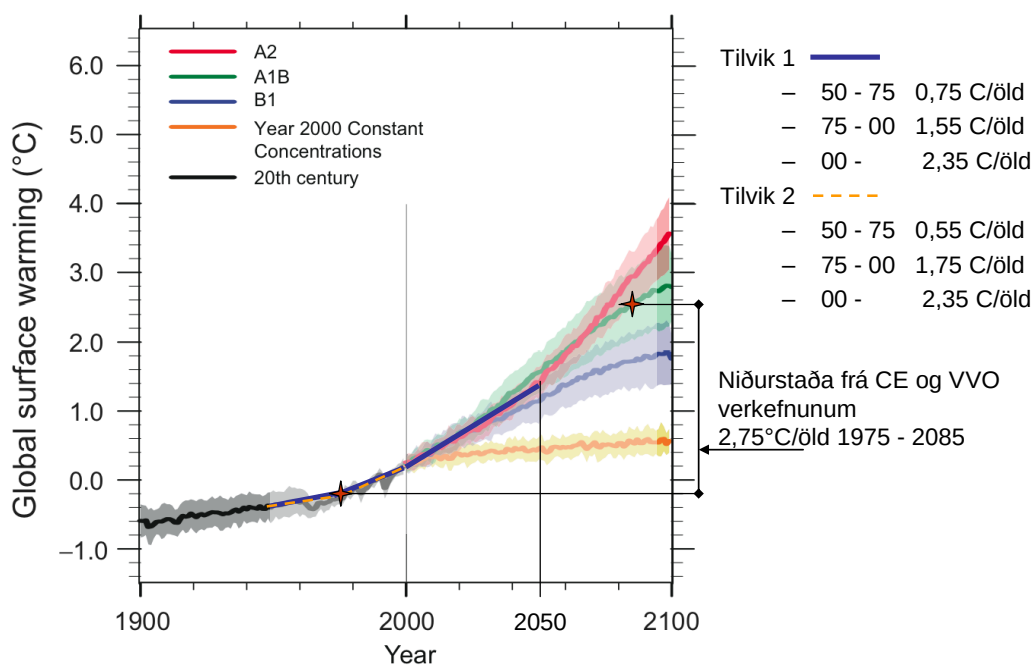
Aðferðin er einnig skýrð í [7]. Á það skal bent hér, að með því að velja með rökum innanhússkýrslunnar [8] rennslisröð, sem er stöðug, er ekki verið reyna að nálgast það meir hver hin raunverulegu áhrif hinnar hnattrænu hlýnunar hafa verið hér á landi á tímabili rennslismælinga. Aðeins er verið að velja þann kost innan frávíksmarka, sem er áhættuminnst að reikna með. Ef hægt væri að reikna vísindalega hina kórréttu tímaröð mundi hún nær örugglega mælast með einhverja leitni á hinu tiltölulega stutta tímabili sem hér um ræðir, það er að segja stuttu í vatnafræðilegu samhengi.

Hvað Ísland varðar, þá liggur það á mörkum heimskautasvæðis, sem á víst að hlýna meira en nemur heimsmeðaltali og jafnvel meira en nemur hlýnun kaldtempraða beltisins. Enn fremur liggur Ísland á mótum hafstrauma þar sem annar er kaldur og hinn hlýr og hér er því óvissa ef til vill meiri en annar staðar. Varúðarreglan mælir því með, að draga heldur úr væntingum, en með því að greina áhættuna betur en gert hefur verið, væri hugsanlega hagkvæmt að hafa í frammi meiri væntingar en ella. Heildarniðurstaðan, sem notuð er við athuganir



á orkukerfinu hér á eftir er því eins og tilvik 1 á Mynd 7 sýnir, en það fylgir nánast heimsmeðaltali samkvæmt sviðsmynd A2 fram til 2050.

Við vinnslu þessarar skýrslu var tilvik 2, sem sýnt er á mynd 6, einnig skoðað en eftir nánari athugun var niðurstaðan sú að nota frekar tilvik 1.



Mynd 7 Niðurstaða um hlýnun á Íslandi fram til 2050. Í tilviki 1 hækkar hitinn eftir 1950 heldur meira en fyrir tilvik 2 og hækkunin til 2005 leiðir af sér rennslisraðir sem hafa leitni nálægt 0. Tilvik 2 var notað til næmigreiningar og breytti litlu.

Á grundvelli áætlaðrar loftslagshlýnunar til ákveðins árs samkvæmt tilviki 1 (Sjá Mynd 7) voru reiknaðar nýjar rennslisraðir fyrir hvert það ár í framtíðinni sem tekið er til viðmiðunar [15]. Þetta verk annast Verkfræðistofan Vatnaskil og notar rennslislíkan (AQUAFLOW) sem þróað hefur verið fyrir Landsvirkjun [11] og markaðsfært víðar. Auk grunnraða voru reiknaðar raðir fyrir 2010 (tvennar raðir, A fyrir tilvik 1 og B fyrir tilvik 2), 2015, 2025, 2035 og 2050. Verkinu er gerð nánari skil í [12] og [15].

Þessari aðferðafræði hefur verið lýst í inngangi hér að framan.

Umrætt rennslislíka Vatnaskila er mjög vel sundurliðað, getur vel brúað götóttar mælingar og lengt raðir bæði fram og aftur í tímann á trúverðugan hátt. Það er einnig notað til að áætla rennslisraðir á virkjanastöðum þar sem enginn mælir er eða hefur áður verið. Líkanið þarf að stilla af eins og önnur vatnafræðileg líkön, en þar er um viðamikið og flókið verk að ræða enda hægt að stilla ótalmargar stærðir. Við afstillingu líkansins eru nýttar allar tiltækar mælingar á veðurfari, rennsli og grunnvatnshæð. Á fundum með fulltrúum Lv-Power og Vatnaskila um gerð þeirra rennslisraða sem hér eru notaðar, kom hinsvegar fram ákveðin ónákvæmni í meðferð vatnasviða við hopandi jökulrönd. Þrátt fyrir þetta hafa rennslisraðir frá líkaninu, í samanburði við tiltækar mælingar, reynst afar trúverðugar. Í því verki sem hér um ræðir er hinsvegar verið að láta líkanið reikna töluvert langt út fyrir það mælisvið sem liggur fyrir og hægt er að stilla sig inn á. Undir þeim kringumstæðum rýrir nefnd ónákvæmni gildi niðurstaðna. Það þarf því að skoða útkomuna og skýra þá hluti sem hugsanlega stinga í augu þannig að trúverðugleiki haldist. Það gerir þetta verk vandasamara, að rennslisgæfar vatnshæðarmælingar eru full götóttar til að hægt sé að finna með nákvæmni þá

líkindafræðilegu eiginleika þeirra sem nota þarf sem grundvöll til samanburðar. Í eftirfarandi yfirliti væri einnig æskilegt að athuga raðirnar í samhengi við úrkomu og hitastig, en því er sleppt hér.

Hér á eftir er litið á nokkrar rennslisraðir, en nöfn þeirra og helstu kennitölur koma fram í töflunni hér á eftir (Tafla 4).

*Tafla 4 Rennslisraðir og kennistærðir þeirra. Efri Þjórsá er náttúrulegt rennsli Efri Þjórsár við Sultartanga og Tungnaár neðan Búðarhálsvirkjunar. Náttúrulegt innrennsli í önnur efstu lón Þjórsársvæðis er nefnt eftir viðkomandi lóni og annað innrennsli neðan Bjallavirkjunar og ofan Urriðafoss er nefnt N-Tungnaá –Þjórsá. Skaftárveita er afrennsli Skaftárjökuls og Sog er innrennsli í Þingvallavatn. Blönduvirkjun nefnist innrennslið í skurðinn frá Blöndulóni, en önnur nöfn fyrir rennsli norðan og austan heiða skýra sig sjálf.*

| Rennsli                   | Efri Þjórsá | Háganga | Þórisvatn | Tungnaárlón | Skaftárveita | N-Tungnaá -Þjórsá | Sog   | Blöndumiðlun | Blönduvirkjun | Hraunaveita | Ufsalón | Hálsalón |
|---------------------------|-------------|---------|-----------|-------------|--------------|-------------------|-------|--------------|---------------|-------------|---------|----------|
| <b>Grunnröð</b>           |             |         |           |             |              |                   |       |              |               |             |         |          |
| Meðaltal kl/s             | 139,1       | 17,4    | 28,9      | 47,6        | 17,4         | 112,1             | 104,8 | 41,6         | 0,8           | 6,4         | 23,0    | 102,2    |
| Staðalfrávik kl/s         | 14,1        | 2,8     | 3,1       | 4,2         | 4,7          | 9,8               | 8,9   | 6,4          | 0,2           | 1,3         | 3,6     | 19,2     |
| Leitni kl/s/10 ár         | 2,9         | 0,8     | 0,5       | -0,1        | 0,9          | 1,2               | 2,5   | 0,8          | 0,0           | 0,5         | 1,2     | 3,0      |
| Vikmörk leitni kl/s/10 ár | 1,1         | 0,2     | 0,3       | 0,4         | 0,4          | 0,8               | 0,7   | 0,5          | 0,0           | 0,1         | 0,3     | 1,6      |
| <b>2010-raðir</b>         |             |         |           |             |              |                   |       |              |               |             |         |          |
| Meðaltal kl/s             | 144,2       | 23,0    | 30,0      | 52,2        | 22,5         | 111,5             | 106,9 | 44,1         | 0,8           | 6,5         | 25,7    | 117,3    |
| Staðalfrávik kl/s         | 14,0        | 2,6     | 3,2       | 4,6         | 5,1          | 10,0              | 9,1   | 6,4          | 0,2           | 1,3         | 3,4     | 19,3     |
| Aukning frá grunnröð %    | 3,7%        | 31,8%   | 4,0%      | 9,7%        | 29,7%        | -0,5%             | 2,1%  | 6,1%         | -2,9%         | 2,4%        | 11,3%   | 14,8%    |
| Leitni kl/s/10 ár         | 1,3         | 0,1     | 0,5       | -0,8        | -0,4         | 1,1               | 2,7   | 0,1          | 0,0           | 0,4         | 0,7     | -0,4     |
| Vikmörk leitni kl/s/10 ár | 1,2         | 0,2     | 0,3       | 0,4         | 0,4          | 0,8               | 0,7   | 0,5          | 0,0           | 0,1         | 0,3     | 1,7      |
| <b>2050-raðir</b>         |             |         |           |             |              |                   |       |              |               |             |         |          |
| Meðaltal kl/s             | 150,4       | 32,2    | 33,2      | 60,4        | 31,7         | 110,4             | 109,9 | 44,7         | 0,8           | 6,7         | 30,4    | 149,2    |
| Staðalfrávik kl/s         | 14,6        | 3,0     | 3,4       | 5,0         | 6,1          | 10,2              | 9,9   | 6,6          | 0,2           | 1,3         | 3,8     | 21,6     |
| Aukning frá grunnröð %    | 8,1%        | 84,3%   | 15,0%     | 26,9%       | 82,7%        | -1,5%             | 4,9%  | 7,4%         | -9,6%         | 6,0%        | 31,9%   | 46,1%    |
| Leitni kl/s/10 ár         | 1,2         | 0,3     | 0,5       | -0,9        | -0,8         | 1,1               | 3,5   | 0,0          | 0,0           | 0,4         | 0,7     | -0,7     |
| Vikmörk leitni kl/s/10 ár | 1,2         | 0,3     | 0,3       | 0,4         | 0,5          | 0,9               | 0,7   | 0,6          | 0,0           | 0,1         | 0,3     | 1,9      |

Krossfylgni (cross correlation) milli rennslisraða er einn af þeim eiginleikum sem hefur áhrif á það, hvernig best væri að haga samspili milli lóna til að ná fram sem hagkvæmustum rekstri orkukerfisins. Tafla 5 og Tafla 6 sýna krossfylgni raðanna sem Tafla 4 sýnir.

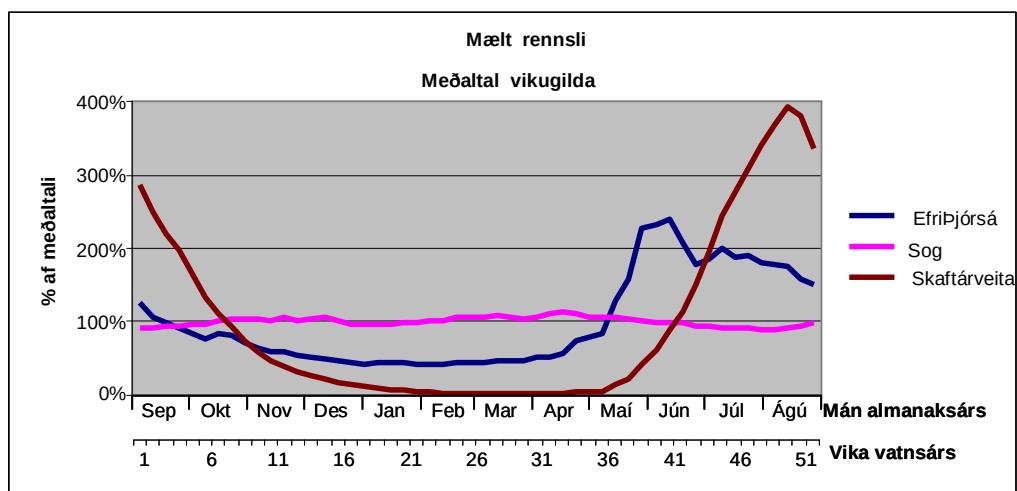
Tafla 5 Krossfylgni ársmeðaltala í grunnröðum.

| Grunnraðir<br>Ársmeðaltöl | Efri Þjórásá | Háganga | Þórisvatn | Tungnaárlón | Skaftárveita | Neðri- Tungnaá -Þjórásá | Sog  | Blöndumiðlun | Blönduvirkjun | Hraunaveita | Ufsalón | Hálsalón |
|---------------------------|--------------|---------|-----------|-------------|--------------|-------------------------|------|--------------|---------------|-------------|---------|----------|
| Efri Þjórásá              | 1            |         |           |             |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Háganga                   | 0,74         | 1       |           |             |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Þórisvatn                 | 0,54         | 0,12    | 1         |             |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Tungnaárlón               | 0,74         | 0,70    | 0,24      | 1           |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Skaftárveita              | 0,57         | 0,87    | -0,21     | 0,61        | 1            |                         |      |              |               |             |         |          |
| Neðri- Tungnaá -Þjórásá   | 0,67         | 0,20    | 0,94      | 0,38        | -0,08        | 1                       |      |              |               |             |         |          |
| Sog                       | 0,64         | 0,35    | 0,56      | 0,40        | 0,18         | 0,69                    | 1    |              |               |             |         |          |
| Blöndumiðlun              | 0,65         | 0,58    | 0,18      | 0,58        | 0,59         | 0,34                    | 0,50 | 1            |               |             |         |          |
| Blönduvirkjun             | 0,17         | -0,10   | 0,31      | 0,13        | -0,12        | 0,43                    | 0,34 | 0,61         | 1             |             |         |          |
| Hraunaveita               | 0,34         | 0,34    | 0,26      | 0,36        | 0,21         | 0,33                    | 0,57 | 0,27         | 0,04          | 1           |         |          |
| Ufsalón                   | 0,56         | 0,63    | 0,12      | 0,55        | 0,59         | 0,25                    | 0,58 | 0,52         | 0,02          | 0,83        | 1       |          |
| Hálsalón                  | 0,67         | 0,71    | 0,06      | 0,63        | 0,71         | 0,17                    | 0,43 | 0,67         | 0,07          | 0,35        | 0,75    | 1        |

Tafla 6 Krossfylgni ársmeðaltala rennslisraða reiknaðra fyrir hitastig 2050.

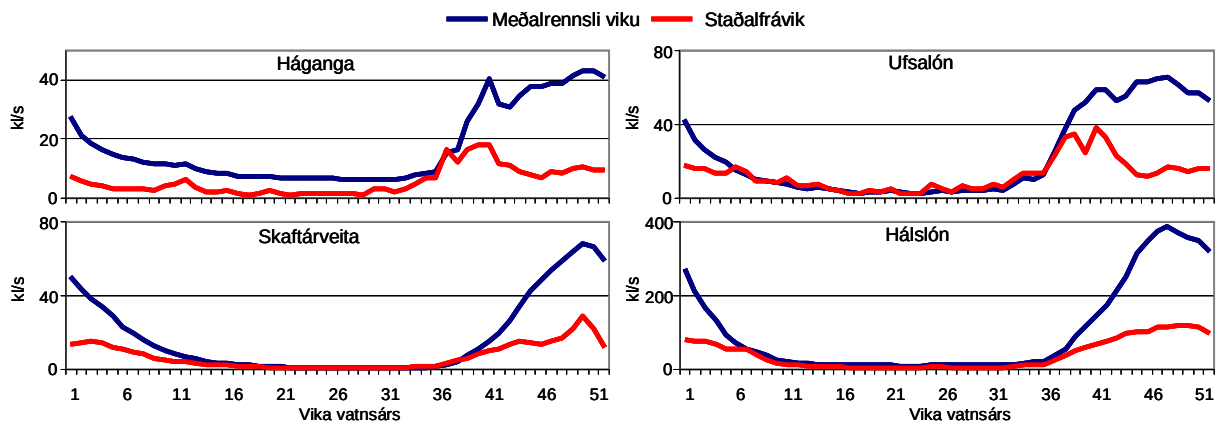
| Raðir fyrir 2050<br>Ársmeðaltöl | Efri Þjórásá | Háganga | Þórisvatn | Tungnaárlón | Skaftárveita | Neðri- Tungnaá -Þjórásá | Sog  | Blöndumiðlun | Blönduvirkjun | Hraunaveita | Ufsalón | Hálsalón |
|---------------------------------|--------------|---------|-----------|-------------|--------------|-------------------------|------|--------------|---------------|-------------|---------|----------|
| Efri Þjórásá                    | 1            |         |           |             |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Háganga                         | 0,75         | 1       |           |             |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Þórisvatn                       | 0,49         | 0,14    | 1         |             |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Tungnaárlón                     | 0,66         | 0,74    | 0,08      | 1           |              |                         |      |              |               |             |         |          |
| Skaftárveita                    | 0,48         | 0,74    | -0,34     | 0,68        | 1            |                         |      |              |               |             |         |          |
| Neðri- Tungnaá -Þjórásá         | 0,68         | 0,26    | 0,92      | 0,27        | -0,15        | 1                       |      |              |               |             |         |          |
| Sog                             | 0,57         | 0,25    | 0,61      | 0,15        | -0,13        | 0,70                    | 1    |              |               |             |         |          |
| Blöndumiðlun                    | 0,67         | 0,59    | 0,09      | 0,58        | 0,52         | 0,31                    | 0,33 | 1            |               |             |         |          |
| Blönduvirkjun                   | 0,28         | 0,00    | 0,33      | 0,16        | -0,12        | 0,46                    | 0,31 | 0,64         | 1             |             |         |          |
| Hraunaveita                     | 0,28         | 0,21    | 0,22      | 0,25        | -0,04        | 0,31                    | 0,58 | 0,19         | 0,06          | 1           |         |          |
| Ufsalón                         | 0,53         | 0,55    | 0,01      | 0,55        | 0,47         | 0,19                    | 0,44 | 0,48         | 0,00          | 0,73        | 1       |          |
| Hálsalón                        | 0,64         | 0,71    | -0,08     | 0,69        | 0,77         | 0,10                    | 0,23 | 0,66         | 0,07          | 0,27        | 0,78    | 1        |

Dreifing rennslis yfir árið hefur áhrif á miðlunarþörf í orkukerfinu og er því mikilvægur eiginleiki. Þessar rennslisraðir hafa flestar blönduð einkenni jökuláa, dragáa og lindáa, en í misjöfnum hlutföllum þannig er Skaftárveita sem næst hrein jökulá, Sogið hrein lindá og Efri Þjórsá með sterkum dragaréinkennum (Mynd 8) þótt jökuleinkennin verði sterkari í 2050-röðinni. Jökull hefur samt einhver áhrif á allar raðir gegnum grunnvatn.



Mynd 8 Rennslisraðir með dæmigerðum einkennum Íslenskra vatnsfalla.

Hægt er að flokka rennslisraðirnar niður eftir þessum einkennum eins og sést á myndum (Mynd 9 til Mynd 15).

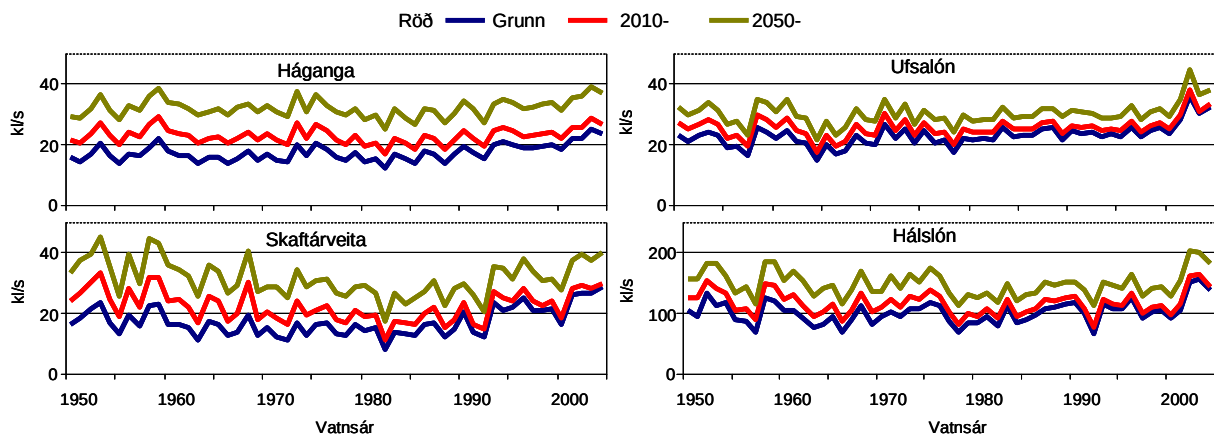


Mynd 9 Rennslismynstur raða með ríkust jökuleinkenni.

Mynd 9 Sýnir vikumeðaltöl og staðalfrávik þeirra raða sem hafa ríkust jökuleinkenni. Jökulárnar hafa yfirleitt sín á milli krossfylgni í hærri kantinum. Í grunnröðum nær Háslón fylgnistuðli rúmlega 0,7 gagnvart öllum hinum (Tafla 5) og hækkar heldur í 2050-röðunum. Þetta virðist eðlileg hegðun. Ufsalón er með heldur lægri fylgnistuðul kringum 0,6 gagnvart röðunum á Vestur-Vatnajökli og lækkar niður í 0,5 í 2050-röðunum. Háganga og Skaftárveita ná tæplega 0,9 sín á milli í mældu röðunum, sem virðist skera sig úr, sérstaklega þar sem hér er um að ræða þær raðir þar sem önnur hefur verulegan dragárþátt og hin ekki merkjanlegan. Stuðullinn fellur síðan (niður í rúmlega 0,7) í 2050-röðunum öfugt við það sem gerist á austurhlutanum þar sem fylgnin hækkar.

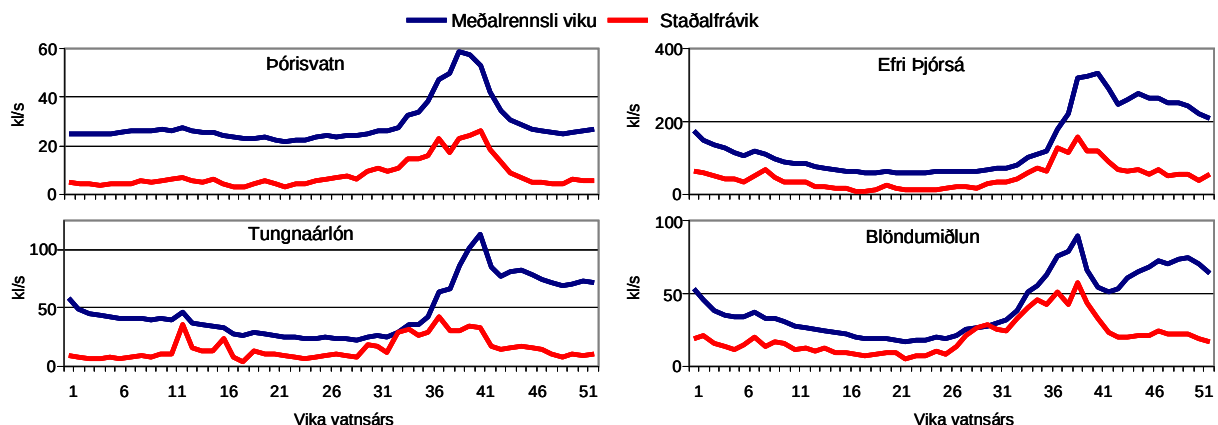
Mynd 10 sýnir ársmeðaltöl sömu rennslisraða og Mynd 9. Hér vekur athygli hvað rennslisaukning er mikil frá grunnröðum við Hágöngu eða 84,3%, jafn mikil og aukning Skaftárveitu (82,7%) og miklu meiri en við Háslón þar sem aukningin er 46,1% (Tafla 4). Þetta er þrátt fyrir að rennslismynstur við Hágöngu sýnir bæði mun meiri dragáreinkenni og lindáreinkenni en hinar tvær (Mynd 9). Leiða má að því getum, að ástæðan liggi í því hvað vatnasvið Hágöngu á jökli liggur lægra en hinna og lindárþátturinn sé að stofni til ættaður úr jökli, en þetta

mætti skýra. Ufsalón fær minnsta aukningu þessara raða eða 31,9%, enda með mest áberandi dragáreinkenni eins og sést best á staðalfrávikinu.



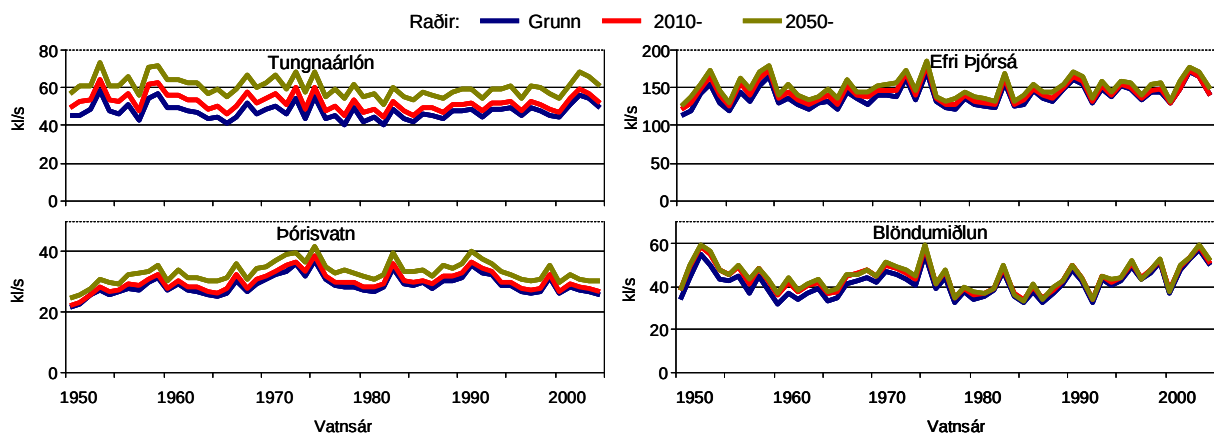
Mynd 10 Breyting ársrennslis raða með ríkust jökuleinkenni.

Mynd 11 sýnir rennslismynstur raða með minna áberandi jökuleinkenni en þær fjórar sem áður eru greindar og Mynd 12 sýnir feril ársrennslis og aukningu þess. Tungnaárlón mætti teljast með þeim fjórum, en hún hækkar minna í 2050-röðunum en þær (27%: Tafla 4). Krossfylgnin gagnvart þeim er svipuð og Ufsalón sýnir, kringum 0,6 (Tafla 5) og hæst gagnvart nábúanum Hágöngu (0,7), en hækkar heldur í 2050-röðunum (Tafla 6) í öllum tilfellum nema gagnvart Ufsalóni, þar sem fylgnin stendur í stað. Allt virðist þetta eðlilegt.



Mynd 11 Rennslismynstur raða með minni jökuleinkenni.

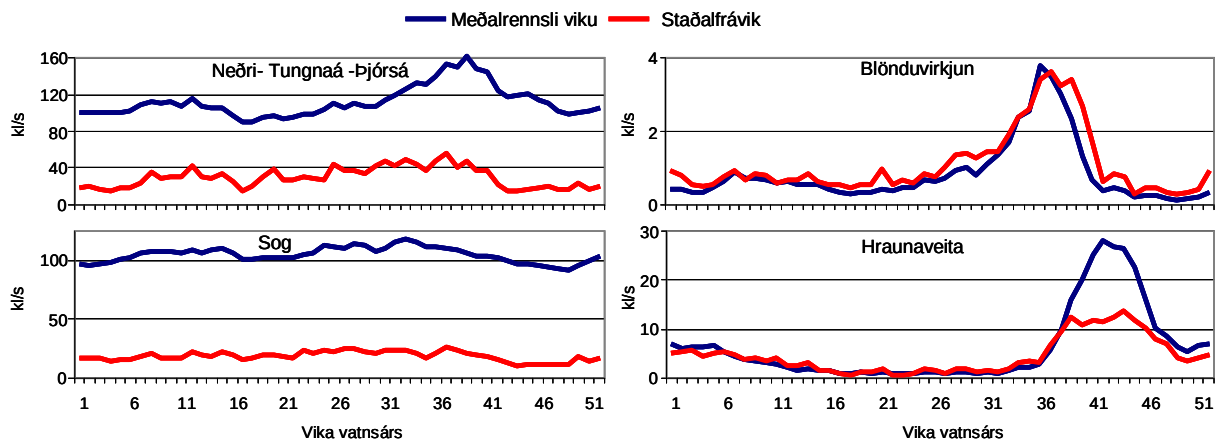
Þórisvatn er sett á þennan stað þótt jökulþátturinn greinist ekki á myndinni, enda miðlast hann gegnum afar stóran jarðvatnsgeymi. Hækkun milli grunnraða og 2050-raðanna upp á 15% (Tafla 4), sýnir að hér er um allverulegan jökulþátt að ræða. Það vekur hinsvegar athygli, að rennslið virðist hafa tilhneigingu til að vera hæst um miðbik mælitímans og lækka til beggja enda öfugt við flestar aðrar rennslisraðir, sérstaklega jökulraðirnar. Fylgni Þórisvatns gagnvart öðrum röðum er einnig athygli verð (Tafla 5), en hún er afar há gagnvart Neðri-Tungnaá -Þjórsá (0,94). Gagnvart Efri-Þjórsá og Sogi er hún 0,55, en annars óveruleg og neikvæð (-0,2) gagnvart Skaftárveitu. Í 2050-röðunum lækka tölurnar í flestum tilfellum heldur, en myndin helst nokkurn vegin óbreytt.



Mynd 12 Breyting ársrennslis raða með minni jökuleinkenni.

Efri-Þjórsá hækkar um 8% frá grunnröðinni til 2050-raðanna, svipað og Blöndumiðlun (Tafla 4). Fylgni Efri Þjórsár er hæst gagnvart Hágöngu og Tungnaárlóni, yfir 0,7, gagnvart öðrum röðum kringum 0,6 nema gagnvart Blönduvirkjun og Hraunaveitu þar sem hún er óveruleg (Tafla 5). Blöndumiðlun sýnir svipaða mynd, nema þar er fylgni við röðina Blönduvirkjun um 0,6, en verður óveruleg gagnvart Þórisvatni og Neðri-Tungnaá –Þjórsá. Myndin helst í báðum tilfellum svipuð í 2050-röðunum.



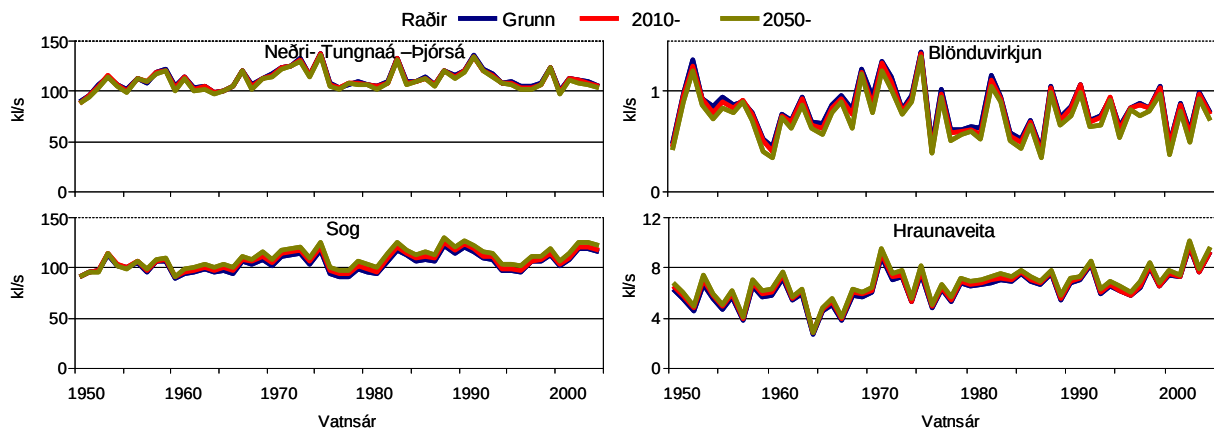


Mynd 13 Rennslismynstur raða án jökuleinkenna

Mynd 13 sýnir rennsliseinkenni og Mynd 14 ársrennslisferil raða án jökuleinkenna. Af þessum hækkar Sog um 5% og Hraunaveita um 6% (Tafla 4). Fylgni þessara raða við aðrar er oftast óveruleg og Sogið fylgir helst röðum með mikið grunnrennsli á Suðurlandi, stuðull yfir 0,6 gagnvart Efri-Þjórsá, Þórisvatni og Neðri-Tungnaá-Þjórsá. Vekur þar ekkert athygli.

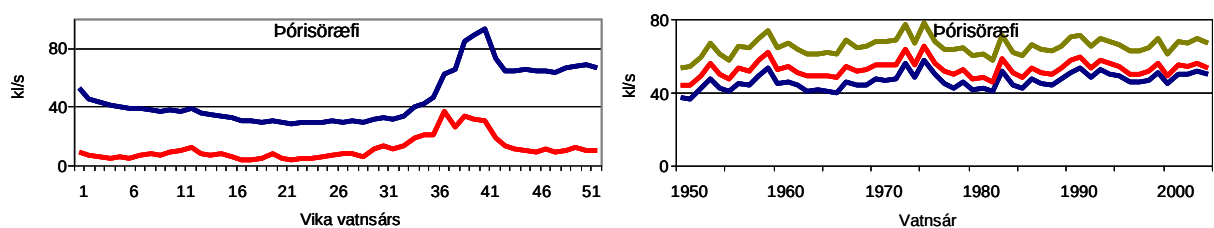
Neðri-Tungnaá-Þjórsá lækkar um 1,5% (vegna uppgufunar: Hjalti Sigurjónsson, munnlegar upplýsingar), og fylgir Þórisvatnsröðinni afar vel eins og áður er getið. Að öðru leyti vekur krossfylgnin ekki athygli. Hún er hinsvegar eina röðin sem svipar til Þórisvatns með það að sýna hækkun rennslis um miðbik mælitímabilsins þó í minna mæli sé.

Blönduvirkjun lækkar um 9,6% frá grunnröðum til 2050-raða og fylgnin við aðra staði lág nema gagnvart Blöndumiðlun eins og eðlilegt er.



Mynd 14 Breyting ársrennslis raða án jökuleinkenna.

Þau atriði sem vekja sérstaka athygli og getið er hér að framan tengjast mest röðunum Háganga og Þórisvatn. Atriðin eru þess eðli, að sé hér um ónákvæmni að ræða, þá eigi hún fremur uppruna í mælingum og grunnögnum en í líkaninu sjálfu. Nú má einu gilda fyrir þá athugun sem hér er sagt frá hvora leiðina vatn nær til Þórisvatnsmiðlunar og því var athugað hvernig summa þessara raða, hér nefnd Þórisöræfi, lítur út eins og sýnt er á Mynd 15. Enn gætir hér hækkunar um miðbik mælitímabilsins eins og í Þórisvatni og hækkunin frá grunnröðum til 2050-raða virkar í hærra lagi, sem gæti að minnsta kosti að hluta skýrst af lágt liggjandi jökulvatnasviði. Röðin virðist þó trúverðugri en Háganga og Þórisvatn hvor í sínu lagi.



| Þórisöræfi<br>Aukning frá<br>grunnröðum<br>til 2050-raða<br>41,3% | Efriþjórsá | Tungnaárlón | Skafárveita | Neðri- Tungnaá-<br>þjórsá | Sog  | Blöndumiðlun | Blönduvirkjun | Hraunaveita | Ufsalón | Hálsalón | Þórisöræfi |
|-------------------------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|---------------------------|------|--------------|---------------|-------------|---------|----------|------------|
| Grunnröð                                                          | 0,85       | 0,61        | 0,40        | 0,79                      | 0,62 | 0,50         | 0,16          | 0,40        | 0,49    | 0,49     | 1          |
| 2050-röð                                                          | 0,81       | 0,52        | 0,22        | 0,81                      | 0,59 | 0,43         | 0,24          | 0,28        | 0,34    | 0,39     | 1          |

Mynd 15 Rennslismynstur, breyting ársrennslis og krossfylgni raðarinnar Þórisöræfi, sem er summa Hágöngu og Þórisvatns.

---

## MARKAÐUR

---

Í hinu Íslenska orkukerfi er það enn svo, þrátt fyrir markaðsvæðingu, að eftirspurnin á veitusvæðum þeirra orkufyrirtækja sem eiga dreifiveitur ásamt stóriðjusamningum ræður því í stórum dráttum hvað hvert fyrirtæki framleiðir mikið. Erlendis, í stórum kerfum þar sem markaðurinn er fullkomnari og næg umframgeta fyrir hendi, er það markaðsverð og tilboðsverð fyrirtækisins sem ráða mestu. Í þessari athugun er ráð fyrir því gert, að raforkufyrirtækin haldi því áfram hvert fyrir sig, að virkja ekki meir en þau geta fyrirfram samið um.

Orkuspár eru gefnar út sem tímaraðir með ársgildum (GWh/ár) og þarf að breyta þannig að henti þeirri tímaeiningu, sem er notuð í reiknilíkani. Þeir útreikningar eru hluti af orkulíkaninu sjálfu.

Árleg orkuspá fyrir Landsvirkjun, almennur markaður og núverandi stóriðja, er gerð í samræmi við gögn frá Orkusviði Landsvirkjunar, einkum áætlun um sölu ársins 2008 og orkusamninga. Einnig er unnið úr áætlun frá Magnúsi Sigurðssyni um álag ársins 2008. Ekki gert ráð fyrir að heildsölusamningar Landsvirkjunar við almennar veitur verði endurnýjaðir þegar þeir renna út.

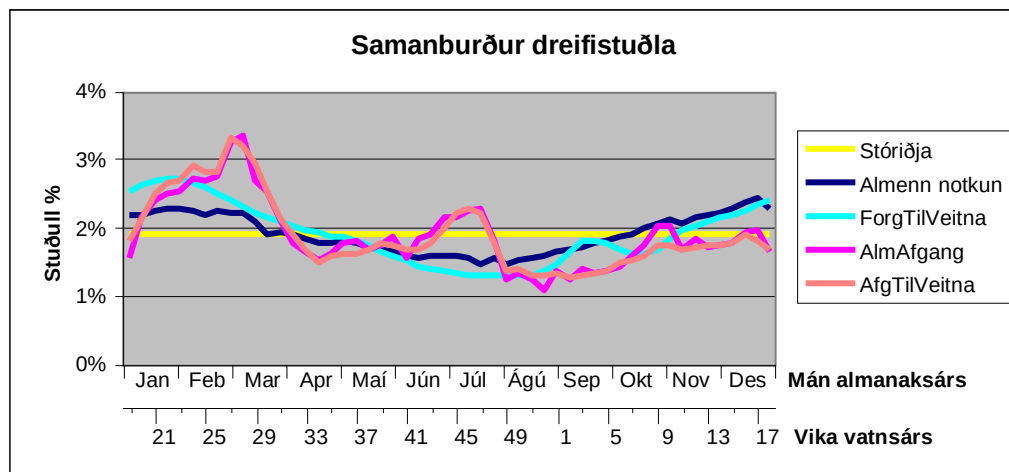
Heildar orkuspáin tekur mið af spá Orkuspárnefndar. Endurreikningur á spá frá 2005 út frá nýjum gögnum og breyttum forsendum (OS- 2007/006).

Ný stóriðja á Norðausturlandi og Reykjanesi er sett upp eftir upplýsingum frá Landsvirkjun Power.

Í spána fyrir Landsvirkjun vantar skammtímasamninga, sem eru taldir verða af stærðargráðunni 70 GWh/ár. Hér er um að ræða orkuviðskipti, sem eiga sér stað

Þegar viðskiptavinir Landsvirkjunar skortir afl vegna t.d. viðhalds í eigin orkustöðvum og koma fram í hermunum þegar orkuvinnsla Landsvirkjunarkerfisins er sértalin. Þessar um það bil 70 GWh/ár koma fram sem mismunur þeirrar orku sem Landsvirkjun selur til keppinauta sinna og þeirra sem hún kaupir frá þeim. Verð þessara orkuskipta er haft svo lágt í líkaninu, að heildarmyndin breytist lítið.

Dreifistuðlar eru notaðir til að breyta ársmeðaltölum í vikugildi og eru þeir sýndir á myndinni hér á eftir (Mynd 16). Í ljós kemur að stuðlarnir, sem gefa dreifingu afgangsráfmagns, eru stórt séð þeir sömu, enda selur Landsvirkjun mest alla orku af þeirri tegund á almennum markaði. Í ljósi þess, að stuðlarnir AfgTilVeitna eru nýrri, var ákveðið að nota þá eingöngu.



Mynd 16 Dreifistuðlar orkunotkunar. Stuðlar merktir “Almenn notkun” og AlmAfgang” eru frá Orkuspárnefnd, en “ForgTilVeitna” og “AfgTilVeitna” frá Magnúsi Sigurðssyni.

Hitastig hefur nokkur áhrif á almenna markaðinn og til að endurspegla þau er eftirspurn þar látin breytast línulega með hitastigi í Reykjavík. Þessi nálgun er gróf og þyrfti að athuga hana betur.

Til viðbótar orkuspá, sem gerð er samkvæmt lýsingunni hér að ofan er bætt við stóriðjumarkaði, sem fullnýtir allar nýjar virkjanir og fyllir upp í orkugetu þegar

rennsli eykst vegna hlýnunar. Þessari orku er skipt niður á Landsvirkjun og aðra orkuframleiðendur þannig að áður nefndar 70 GWh/ár halda sér. Fyrir því eru þau rök, að við mikið meiri orkukaup annarra framleiðanda umfram það sem Landsvirkjun kaupir til baka er kominn hvati fyrir þá til að reisa nýja virkjun. Með þessu er Landsvirkjun látin sjá fyrir árssveiflu á almennum markaði fyrir aðra framleiðendur.

Í orkuspánni er stóriðjumarkaður yfirgnæfandi og ársdreifing álags orðin tiltölulega jöfn en smávegis breyting á almennum markaði breytir þarna litlu. Því var ákveðið til einföldunar að miða almenna notkun við spá fyrir árið 2015 við athuganir á öllum rennslisröðum.

---

## ORKUKERFI

---

### ALMENNT

Athugun sú, sem þessi skýrsla fjallar um, beinist fyrst og fremst að orkukerfi Landsvirkjunar og er þetta endurspeglað í hermilíkaninu með því að greina stöðvar Landsvirkjunar frá öðrum hlutum heildarkerfisins og halda sérstaklega utan um vinnslu þeirra.

Hermilíkanið endurspeglar einnig almennar kröfur, sem eru gerðar til allra orkukerfa, um að afhending raforku sé tryggð að eðlilegum mörkum við breytilega eftirspurn. Þar sem raforka verður ekki sett á lager eru ekki önnur ráð til að koma til móts við þessar kröfur en að setja upp umframafl í orkuöflunarkerfinu (enska: Redundant Capacity), sem ekki er gripið til nema eitthvað bili eða eftirspurn breytist óvænt. Þá er gerð krafa um, að hluti þessa varaafls sé ætíð í gangi án þess að framleiða, þ.e. reiðuafl (enska: Spinning Reserve.) Af ýmsum ástæðum er vatnsafl helst notað í þessu skyni.

### VIRKJANIR Í HERMILÍKANI

Kerfið er samsett af núverandi virkjunum ásamt þeim sem helst kemur til greina að reisa á komandi árum. Tafla 7 listar allar virkjanir landsins eins og þær eru teknar inn í hermilíkanið. Þar sést hvort virkjanir teljast tilheyra Landsvirkjun eða öðrum. Í töflunni er einnig greint hvaða varaflsvæði virkjanirnar tilheyra.

*Tafla 7 Virkjanir í orkuöflunarkerfi í hermilíkani. Núverandi virkjanir eru Lv merktar \*.*

| Virkjanir Landsvirkjunar |                                           |          | Virkjanir annarra |                                                 |          |
|--------------------------|-------------------------------------------|----------|-------------------|-------------------------------------------------|----------|
| Nr.                      | Nafn                                      | Stærð MW | Nr.               | Nafn                                            | Stærð MW |
|                          | <u>VATNSORKUVER</u><br>Varaflsvæði Þjórsá |          |                   | <u>VATNSORKUVER</u><br>Varaflsvæði<br>Suðvestur |          |

| Virkjanir Landsvirkjunar |                                 |               | Virkjanir annarra |                                 |             |
|--------------------------|---------------------------------|---------------|-------------------|---------------------------------|-------------|
| Nr.                      | Nafn                            | Stærð MW      | Nr.               | Nafn                            | Stærð MW    |
| 1                        | Vatnsfell *                     | 91,6          | 1                 | VL Smávirkjanir                 | 11,5        |
| 2                        | Bjallavirkjun                   | 60            | 2                 | VF Smávirkjanir                 | 14,6        |
| 3                        | Sigalda *                       | 160           | 3                 | HS Smávirkjanir                 | 5           |
| 4                        | Hrauneyjafoss *                 | 210           |                   | <i>Varaflsv.: Jarðv. Norður</i> |             |
| 5                        | Búðarháls                       | 100           | 4                 | NL Smávirkjanir                 | 11,3        |
| 6                        | Sultartangi *                   | 134           |                   | <i>Varaflsvæði Suðvestur</i>    |             |
| 7                        | Búrfell *                       | 282           | 5                 | Lagarfoss                       | 28          |
| 8                        | Hvammsvirkjun                   | 80            | 6                 | AL Smávirkjanir                 | 4,2         |
| 9                        | Holtavirkjun                    | 54            |                   | Alls vatnsorka                  | 74,6        |
| 10                       | Urriðafossvirkjun               | 124           |                   |                                 |             |
|                          | <i>Varaflsvæði Suðvestur</i>    |               |                   |                                 |             |
| 11                       | Sogsstöðvar *                   | 89            |                   | <u>JARÐVARMAVER</u>             |             |
|                          | <i>Varaflsvæði Norður</i>       |               |                   | <i>Varaflsv.: Jarðv. Suðv.</i>  |             |
| 12                       | Blönduvirkjun *                 | 150           |                   |                                 |             |
| 13                       | Laxa I-III *                    | 27,5          | 7                 | Nesjavellir 1                   | 120         |
|                          | <i>Varaflsvæði Austur</i>       |               | 8                 | Hellisheiði 1.90                | 90          |
| 14                       | Fljótsdalsstöð *                | 690           | 9                 | Svartsengi 2                    | 30          |
|                          | Alls vatnsorka                  | 2252,1        | 10                | Svartsengi lághiti              | 45          |
|                          | <u>JARÐVARMAVER</u>             |               | 11                | Hellish.1 lágh.                 | 33          |
|                          | <i>Varaflsv.: Jarðv. Norður</i> |               | 12                | Hellisheiði 2                   | 90          |
|                          |                                 |               | 13                | Hverahlíð                       | 90          |
| 16                       | Krafla 1 *                      | 60            | 14                | Hverahlíð lághiti               | 47          |
| 17                       | Krafla 2                        | 100           | 15                | Bitruvirkjun                    | 135         |
| 18                       | Bjarnarflag *                   | 5             | 16                | Svartsengi                      | 44,4        |
| 19                       | Bjarnarflag 2                   | 100           | 17                | Reykjanes                       | 100         |
| 20                       | Þeystareykir                    | 135           | 18                | Reykjanes 2                     | 100         |
| 21                       | Gjástykki                       | 90            | 19                | Reykjanes lághiti               | 47          |
|                          | Alls jarðvarmi                  | 490           |                   | Alls jarðvarmi                  | 971,4       |
|                          | <b>Alls Landsvirkjun</b>        | <b>2742,1</b> |                   | <b>Alls aðrir</b>               | <b>1046</b> |

Tafla 8 sýnir skilgreind varaflsvæði í hermilíkaninu og lágmarks reiðuafl í hverju þeirra. Reiðuafl er í hermilíkaninu skilgreint sem prósentu af tiltæku afli á viðkomandi svæði og minnkar því þegar vél er tekin út til viðhalds. Í töflunni sést

meðal annars, að bæði fyrir austan og norðan er reiðuaflskrafan skilgreind sameiginlega fyrir stöðvar Landsvirkjunar og lítilla raforkuvera í eigu annarra. Þá er gengið út frá því, að raforkumarkaður framtíðarinnar sé þannig upp settur, að viðskipti með reiðuafli geti fari fram á frjálsan hátt milli raforkufyrirtækja án þess að öryggi eða hagkvæmni minnki nokkuð af þeim sökum. Í dag selur Landsvirkjun reiðuafli frá stórvirkjunum sínum á Þjórsársvæði, Blönduvirkjun og Kárahnjúkavirkjun. Engu að síður er sett reiðuaflskrafa á allar virkjanir, svo sem jarðgufuvirkjanir, sem taka þá sem því nemur minni markað með sér (sjá umfjöllun um markað fyrir í þessari skýrslu). Þetta er gert bæði til þess að geta skoðað áhrif slíkrar kröfu og gæta samræmis.

Tafla 8 Varaflsvæði

| Nr | Varaflsvæði |        | Reiðuafli |     |
|----|-------------|--------|-----------|-----|
|    | Heiti       | Afl MW | %         | MW  |
| 1  | Thjorsa     | 1296   | 8,0       | 111 |
| 2  | GeoSW       | 971    | 2,2       | 21  |
| 3  | Swest       | 120    | 3,0       | 4   |
| 4  | North       | 189    | 3,0       | 6   |
| 5  | East        | 718    | 4,0       | 29  |
| 6  | GeoNorth    | 494    | 2,2       | 11  |

Hermilíkanið tekur tillit til helstu miðlunarlóna orkukerfisins, sem öll eru í eigu Landsvirkjunar. Virkjanir sem ekki hafa miðlunarlón reiknast sem rennslisvirkjanir, það er þær vinna jafnóðum úr því vatni sem til þeirra berst. Smávirkjanir hafa yfirleitt einhver miðlunarlón sem, þótt þar sé ekki um mikla miðlun að ræða, nægja til að þær ættu að geta aukið vinnslu í nokkurn tíma í kjölfar bilunar annarstaðar og þannig selt reiðuafli ef á þyrfti að halda.

Tafla 9 sýnir lónrými í líkaninu og varamiðlun sem sett er á hvert lón.



Tafla 9 Miðlunarlón í hermilíkani

| Nr. | Name          | Lónrými GL | Varamiðlun GI |
|-----|---------------|------------|---------------|
| 1   | Háganga       | 322        | 0             |
| 2   | Þórisvatn     | 1512       | 50            |
| 3   | Tungnaárlón   | 600        | 0             |
| 4   | Blöndumiðlun  | 420        | 0             |
| 5   | Háslón        | 2088       | 80            |
| 6   | Sultartanglón | 93         | 0             |
| 7   | Krókslón      | 113        | 0             |
| 8   | Hraunaveita   | 60         | 0             |

Varamiðlun er skilgreind í tveimur lónum. Mest er í Háslóni þar sem bæði er æskilegt að minnka vatnsborðssveiflur af umhverfisástæðum og einnig hefur það alvarlegar afleiðingar ef lónið tæmist vegna þess hve grunnrennsli er lítið í Jöklu. Stærð Þórisvatns var upphaflega þannig skilgreint að botn var settur þar sem hæðarmunur yfir útrennsislöku rétt nægði til að koma 50 m<sup>3</sup>/s þar í gegn. Þetta rennsli er of lítið til að halda Vatnsfellsvirkjun á fullum afköstum og þær takmarkanir sem verða á útrennslinu þegar miðlunin er nálægt því tóm valda því, að hleypa þarf vatni framhjá Kvíslaveitu svo virkjanir Neðri Þjórsár hafi nægt vatn. Því er nokkur varamiðlun einnig höfð í Þórisvatni.

#### LÓNSTÝRING

Orkugeta orkukerfisins er háð því hvernig miðlunum þess er stýrt og verður að líta á þær stjórnunaraðferðir sem beytt er í þessu skyni sem mikilvægan hluta af orkukerfinu.

Orkukerfinu er skipt í svokölluð vatnasvæði og hermilíkanið reiknar hefðbundið vatnsgildi fyrir hvert þeirra, sem síðan er notað til að stjórna því

hvaðan vatn er tekið til vinnslu eftir því sem uppsett afl virkjana og önnur takmörk leyfa. Sérstök vatnasvæði eru skilgreind fyrir Þjórsársvæðið, Norðurland og Austurland þar sem miðlanir Landsvirkjunar eru. Þar til viðbótar eru sérstök vatnasvæði fyrir jarðvarmaver á Suðvesturlandi, aðrar virkjanir á Suður- og Vesturlandi og jarðvarmaver á Norðausturlandi, en virkjanir á þessum þremur svæðum teljast í hermilíkaninu ekki hafa miðlanir og eru því reiknaðar sem rennslisvirkjanir.

Grundvöllur vatnsgildisreikninga er skammtíma jaðarverð á öðrum tegundum orku en vatnsorku eða ágiskaður þjóðhagslegur kostnaður af því ef orkuskömmun á sér stað. Aðrar tegundir orku eru olíustöðar (tæp 130 MW, olíukostnaður áætlaður 30 kr/kWh) og orka frá jarðvarmastöðvum (skammtímajaðarverð 0 kr/kWh). Afgangsorka er einungis reiknuð samkvæmt núverandi samningum Landsvirkjunar (um það bil 200 MW, verðlögð á 1,8 kr/kWh). Hörgull er skilgreindur sem skerðing til álvera umfram afgangsorkuskerðingar. Hörgull er settur að hámarki um það bil 10% af núverandi samningum Landsvirkjunar við álver. Þjóðhagslegur kostnaður hörguls er reiknaður út frá því að álverin yrðu að bæta sér upp skerðinguna með kaupum á áli á frjálsum markaði, en erfitt er að meta þjóðhagslegan kostnað hærri en þetta. Þannig verða til u.þ.b. 140 MW, sem hér eru verðlögð á 11 kr/kWh. Skerðing forgangsorku umfram framangreint er verðlögð á 60 kr/kWh.

#### FLUTNINGSKERFI

Flutningskerfið í hermilíkaninu er í stórum dráttum eins og núverandi kerfi, nema hvað flutningsgetan er augin þannig að takmörk verða ekki á flutningi milli landshluta. Takmörk flutningskerfisins hafa því ekki áhrif á vatnsgildi og lónstýringu eins og raunin er í núverandi kerfi, en hinsvegar hafa töp í kerfinu svolítil áhrif. Til að ná þessu fram var meðal annars gert ráð fyrir að nokkur hluti

byggðalína frá Kröflu og suður um til Þjórsársvæðisins væri endurbyggður sem 220 kV línur.

#### VIÐHALD

Gert er ráð fyrir, að hver einstök vél í virkjunum, bæði vatnsafls- og jarðvarmavirkjunum, sé tekin út í eina viku á ári til viðhalds og eftirlits. Reynt er að gera þetta á þann hátt, að ætíð sé nægt afl fyrir hendi til að fullnægja eftirspurn þrátt fyrir hækkun hennar vegna lægra hitastigs. Einnig er leitast við að sem minnstur breytilegur kostnaður verði í kerfinu, þar með talið kostnaður vegna aflskorts. Í þessu efni er þó ekki gengið svo langt, að hægt sé að tala um bestun.

---

#### KERFISATHUGANIR

---

##### ALMENNT

Kerfisathuganir eru unnar með hermilíkaninu Hyena, sem Annað veldi ehf hefur gert fyrir Landsvirkjun og rekur. Þetta líkan er eitt það fullkomnasta sem Landsvirkjun hefur völ á eins og er.

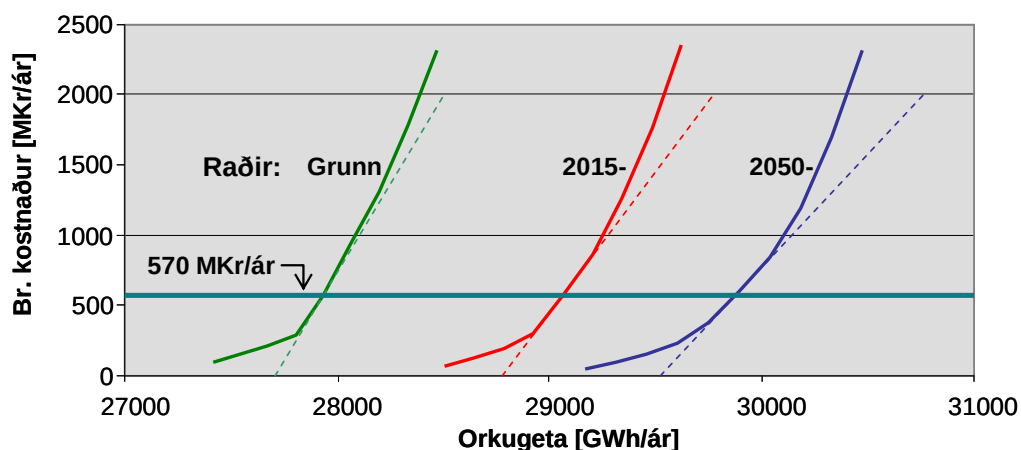
Sambærilegar kerfisathuganir eru hvarvetna í heiminum notaðar til að skipuleggja rekstur vatnsorkukerfa. Hver athugun fer fram í tveimur áföngum. Sá fyrri horfir til framtíðar og reiknar líkur á vatnspurrð og kostnað fyrir hverja stöðu lóna sem hugsanleg er á hverjum árstíma. Þannig er fundið framvirt verðmæti vatns í miðlunarlónum, það er vatnsgildi. Í seinni áfanganum er reiknað hvernig orkuvinnslu er háttað þegar vatnsgildið er látið stjórna því hve mikið vatn er tekið úr hverju miðlunarlóni og hvenær afhending vatnsorku víkur fyrir öðrum orkugjöfum eða hvenær möguleikar til orkuskerðingar eru nýttir.

Í fyrirbyggjandi athugun beinist athyglin að því að finna, hvaða áhrif aukið rennsli við virkjanir af völdum hlýnunar á heimsvísu hefur á orkugetu þess orkukerfis sem lýst hefur verið hér að framan og hvað helst takmarkar orkugetuna. Fyrir hvert rennslistilvik sem lýst er hér að framan, þarf því að ákvarða hæfilega orkugetu og greina fyrirkomulag rekstrar í orkulíkaninu.

Að einu leyti reyndist þó nauðsynlegt að aðlagða orkukerfið að rennslisröðunum, en það var viðhaldsáætlunin, sem er innbyggð í orkulíkanið, en því er lýst nánar hér á eftir.

### ORKUGETA

Verkefnið er að bera saman virkni sama orkukerfis við mismunandi rennsli. Þá er eðlilegt að nota kostnaðarmark eða fast kostnaðarviðmið við ákvörðun orkugetu. Með lauslegri hliðsjón af verðlagi og jaðarkostnaði afls í virkjunum var valið að nota þarna meðalkostnað 570 MKr/ár. Þessi kostnaður er verulega hærri en rauntölur rekstrar fyrir kerfi Landsvirkjunar undanfarin 30 ár.



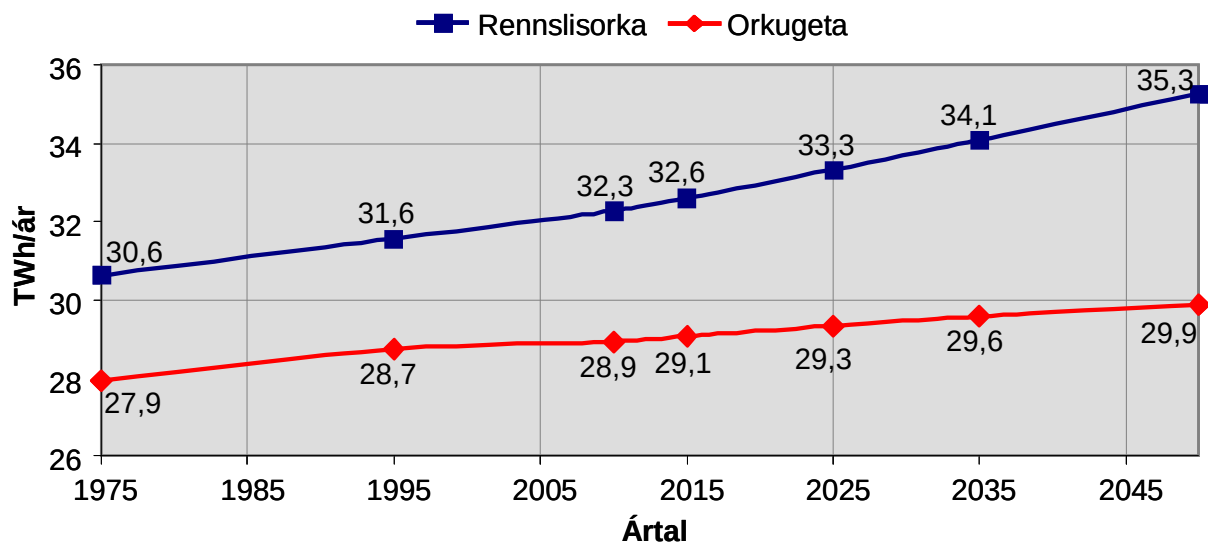
Mynd 17 Samanburður kostnaðarferla fyrir þrjár rennslisraðir, kostnaður móti eftirspurn (heildregnar línur), ásamt jaðarkostnaði við kostnaðarmark, (halli á brotnum línur).

Mynd 17 sýnir kostnaðarferla fyrir þrjár rennslisraðir og jaðarkostnað eftirspurnar sem kemur fram sem snertill á ferlana við kostnaðarmark. Jaðarkostnaður lækkar greinilega með vaxandi rennsli, en eins og sjá má munar

ekki miklu í orkugetu hvort sem miðað er við kostnaðarmark eða fastan jaðarkostnað. Tafla 10 sýnir þennan jaðarkostnað, og þar er einnig reiknaður jaðarkostnaður á MW til samanburðar við jaðarkostnað virkjana og reiðuafls hér á eftir.

Tafla 10 Jaðarkostnaður orku og afls við orkugetu fyrir þrjú rennslistilvik.

|                        | Grunnraðir | 2015-raðir | 2050-raðir |
|------------------------|------------|------------|------------|
| Jaðarkostnaður MKr/GWh | 2,50       | 2,00       | 1,61       |
| Nýtingartími Klst/ár   | 7853       | 8154       | 8281       |
| Jaðarkostnaður MKr/MW  | 19,6       | 16,3       | 13,3       |



Mynd 18 Rennslisorka og orkugeta landskerfis fyrir öll rennslistilvik. Af orkugetu falla 0,5 TWh á virkjanir aðrar en Landsvirkjunar. Rennslisorka er heildaraðstreymi vatns að virkjunum margfaldað með viðeigandi orkustuðli. Niðurstöður fyrir grunnröð eru settar við ártal 1975, sem er um miðbik mælitímans og grunn20raðir við 1995.

Mynd 18 sýnir niðurstöður orkugetureikninga.

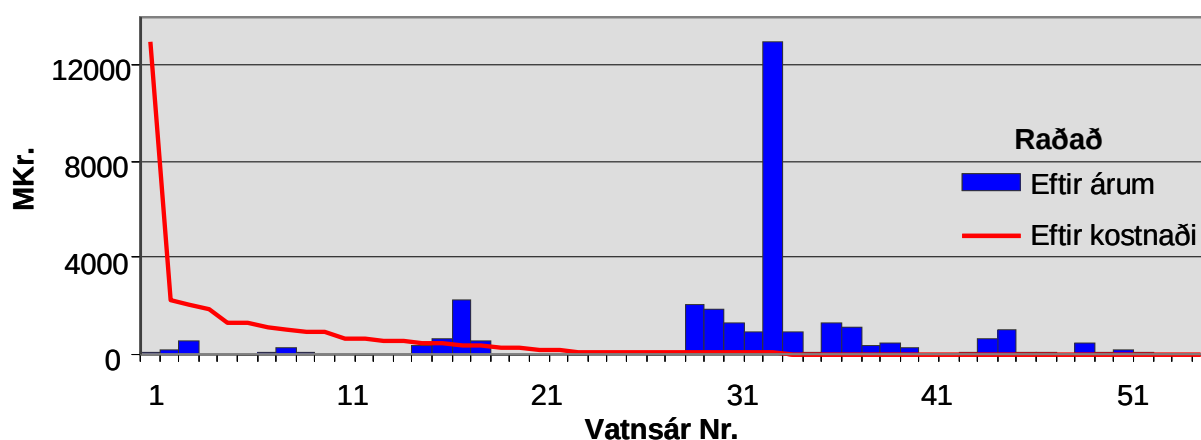
Blái ferillinn sýnir að aukning rennslisorku frá grunnröðinni er veruleg eða frá 1,7 TWh/ár með rennsli 2010 og upp í 4,7 TWh/ár með 2050-röðunum. Þessi aukning nýtist hinsvegar ekki nema takmarkað til aukningar orkugetu samanber rauða ferilinn.

Meðalnýting fyrir grunnraðir er 91% og minnkar með auknu rennsli. Nýtingin á rennslisaukningu frá grunnröðum í 2010-raðir er 84% og fellur niður í 42% fyrir 2050-raðir. Heildarnýting er þá komin í 85%.

Þess ber að geta, að ekki er tekið tillit til dags- og vikusveiflu álags í þessum útreikningum.

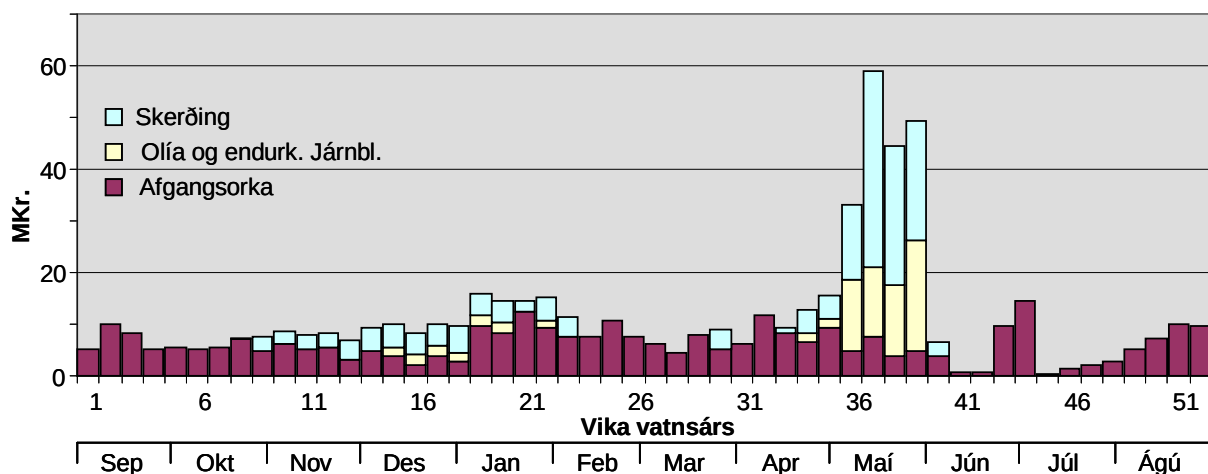
#### DREIFING KOSTNAÐAR

Sá kostnaður sem verður vegna notkunar annarra orkugjafa eða orkuskerðingar fellur misjafnt á vatnsárin og tímabil innan árs.



Mynd 19 Reiknaður kostnaður fyrir kerfi keyrt í orkugetu með 2015-röðum. Mestur kostnaður er á 33. ári, sem er vatnsár 1982.

Mynd 19 sýnir hvernig reiknaður kostnaður dreifist á vatnsárin. Mestur reiknast hann um miðbik mælitímabilsins og er það í samræmi við útlit flestra rennslisraða eins og það er sýnt í kaflanum hér á undan.



Mynd 20 Meðaltal reiknaðs kostnaðar eftir vikum vatnsárs fyrir kerfi keyrt á orkugetu með 2015-röðum. Kostnaður vegna aflskorts kemur hér ekki fyrir.

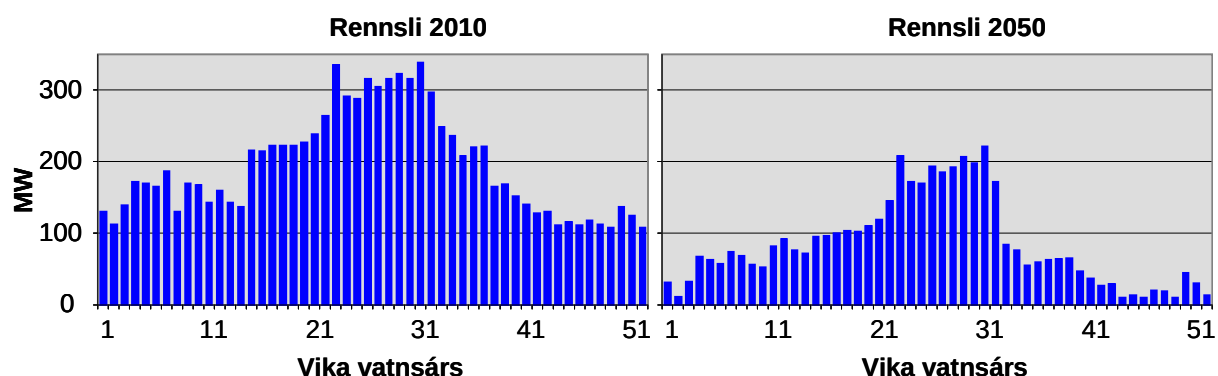
Mynd 20 sýnir hvernig þessi kosnaður dreifist á vikur vatnsársins. Það vekur athygli, að kostnaður fellur til í öllum vikum vatnsársins.

#### VIÐHALDSÁÆTLUN

Ein af forsendum sem notaðar eru í hermilíkaninu er viðhaldsáætlun. Í ljós kom að niðurstöður geta verið verulegar háðar því, að aflskortur valdi ekki orkuskerðingu.

Upsett afl virkjana í kerfi Landsvirkjunar var upphaflega ákveðið út frá mældum röðum, þar sem kuldaskið á hafísárum sjöunda áratugarins var einna mest ráðandi um áætlaða orkugetu. Að jafnaði er talið best að taka vélar út til viðhalds á sumrin og fram á haust, þegar vatn er yfirfljótandi, en halda sem mestu svigrúmi á veturna til að auðvelda samspil virkjana og miðlana. Í þessari athugun er eftirspurn aukin með stóriðjumarkaði með jafnri ársdreifingu til að fylla upp í orkugetu þegar rennsli vex. Það verður þá æ erfiðara að finna heppilegan tíma til að taka vélar út til viðhalds.

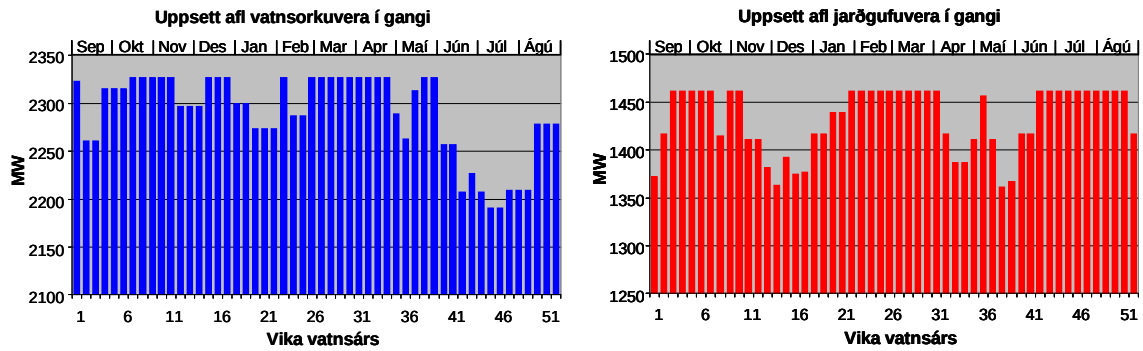
Mynd 21 sýnir tiltækt afl umfram eftirspurn fyrir 2010- og 2050-raðir þegar eftirspurn samsvarar orkugetu.



Mynd 21 Meðaltal tiltæks afls umfram eftirspurn þegar kerfið er keyrt á orkugetu miðað við rennsli 2010 og 2050. Eftirspurn innifelur töp og tiltækt afl er uppsett afl, sem ekki er úti vegna viðhalds, leiðrétt fyrir vatnshæð miðlunarlóna þar sem það á við og reiðuafl dregið frá.

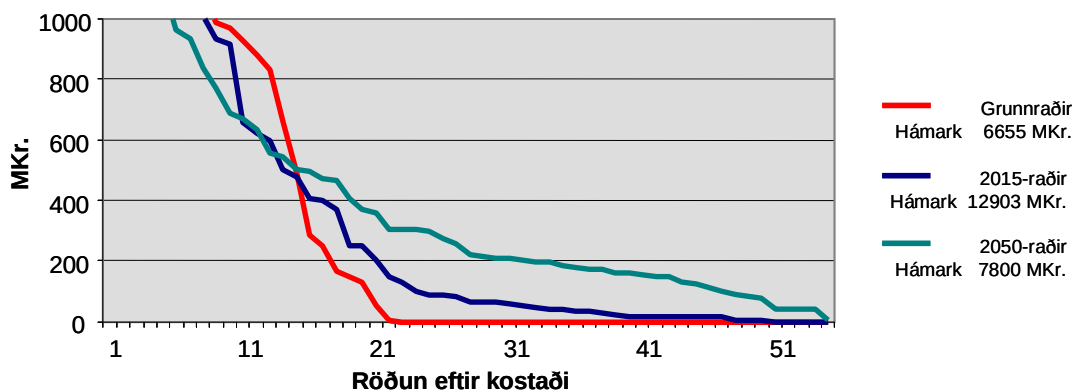
Mynd 22 sýnir þá viðhaldsáætlun sem er notuð í kerfisathugunum fyrir allar raðir nema 2035 raðir og 2050 raðir. Við útreikninga var notuð sama viðhaldsáætlun fyrir allt rennsli frá grunnröðum upp í 2025-raðir, en breytt smávegis í reikningum fyrir 2035- og 2050-raðir. Við ákvörðun viðhaldsáætlunar var ekki leitað að bestu lausn, en leitast við að halda sæmilegu svigrúmi fyrir samspil miðlana á tímanum frá því þær fyllast á hausti fram á vor og þess jafnframt gætt að aflskortur kæmi helst hvergi fyrir. Nauðsynlegt reyndist að miða við álag eins og það reiknast eftir þá hitastigsleiðréttingu sem er innbyggð í hermilíkanið. Þessa leiðréttingu gæti þurft að skoða nánar þegar fara skal út fyrir það mælisvið sem markast af árunum 1950 til 2004 eins og hér er verið að gera. Í raunverulegum rekstri mundi viðhaldsáætlun hvers árs ekki vera föst eins og kerfisathuganir gera ráð fyrir, heldur taka mið af horfum í vatnsbúskap.





Mynd 22 Viðhaldsáætlun í hermílikani notuð fyrir allar raðir nema 2035 og 2050. Athugið að mælikvarðar eru eins, en misjafnt skorið neðan af lóðrétta ásnum.

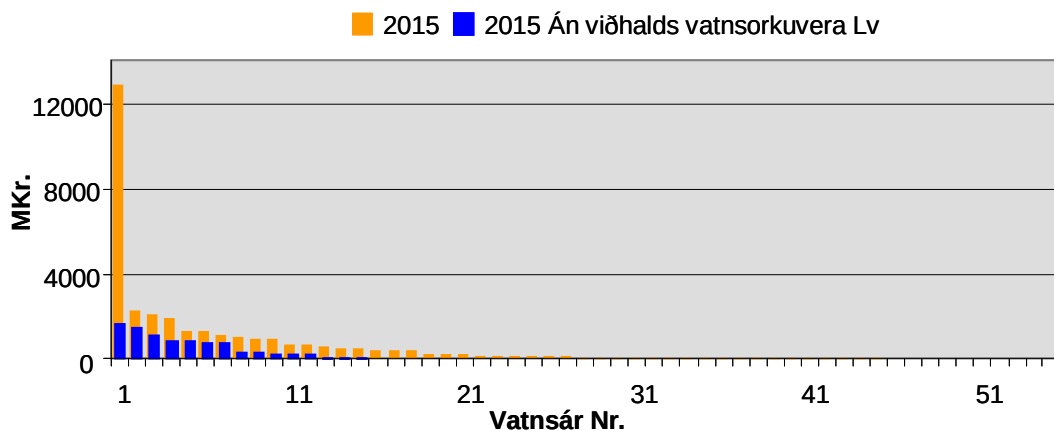
Með því að ákveða viðhaldsáætlun á þennan hátt verður það skýrara, að þegar mikið umframafl er í orkukerfinu í hlutfalli við rennsli leggst kostnaðurinn á færri ár en toppur breikkar eins og Mynd 23 sýnir og gagnstætt því dreifist kostnaður á fleiri ár og toppur þrengist þegar rennsli vex. Áhrif miðlana skipta hér einnig máli.



Mynd 23 Dreifing kostnaðar, vatnsárum rennslisraða fyrir grunn-, 2015- og 2050-raðir, raðað eftir kostnaði.

Mynd 24 Sýnir áhrif þess að sleppa viðhaldi á vatnsorkuverum Landsvirkjunar. Meðalkostaður lækkar úr 570 í 160 MKr/ár og erfiðasta árið mest þannig að það sker sig ekki lengur úr. Sýnilega hefur viðhaldið mikil áhrif og það að fresta viðhaldi getur fleytt kerfinu yfir stök erfið ár, sérstaklega ef hægt er að sjá

erfðleikana fyrir með því að vakta umhverfi landsins og spá fyrir um veðurfar til langs tíma.



Mynd 24 Áhrif þess aðsleppa viðhaldi á öllum vatnsorkuverum Landsvirkjunar.

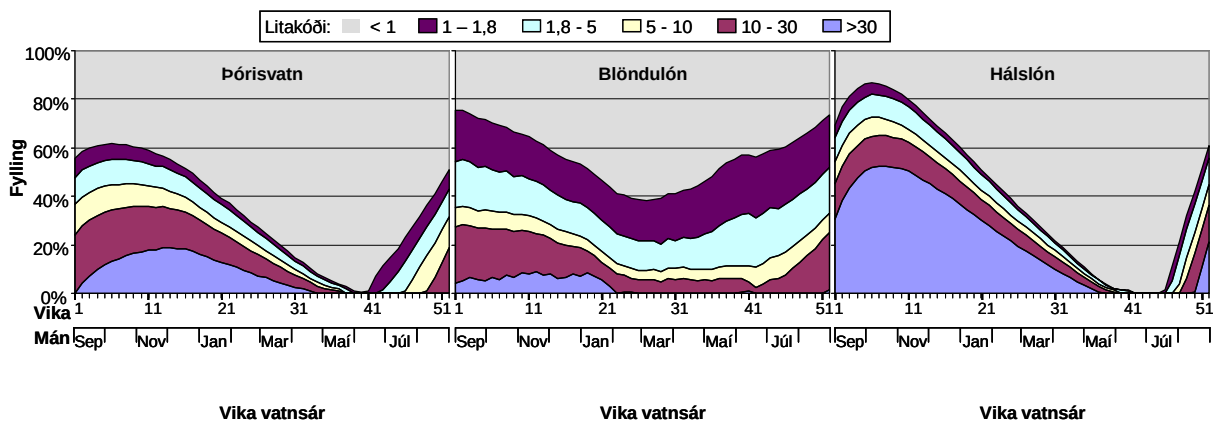
#### VATNSGILDI

Í þessari athugun var ákveðið, í samráði við verkkaupa, að reikna ekki með takmörkunum í flutningskerfinu. Þar með verður uppsett afl virkjana takmarkandi um orkuflutninga milli landshluta og kveður á um hvar orka verði framleidd hverju sinni. Vatnsgildi miðlunarlóna þar sem virkjanir koma orkunni ekki frá sér vegna aflskorts hefur tilhneigingu til að lækka með vaxandi rennsli.

Eins og kerfisathuganirnar sýna er mestur aflskortur í Kárhnjúkavirkjun, en einnig verulegur á Þjórsársvæði. Vatnsgildi á þessum tveim stöðum er því hæst í byrjun vetrar, þegar eftirspurn er í hámarki og rennsli lítið, en fellur síðan fram á mitt sumar og verður í lágmarki þegar rennsli er með mesta móti (Mynd 25).

Blönduvirkjun á auðvelt með að framleiða úr tiltækri orku og þegar aflskorts gætir á hinum tveimur vatnasvæðunum, þá tekur hún á sig það sem á vantar. Orka norðursvæðisins er mun minna en hinna tveggja svo álagssveiflur, sem eru litlar í hlutfalli við orku Kárhnjúka og Þjórsársvæðið verða miklar í hlutfalli við orku

Blönduvirkjunar Afl Blönduvirkjunar er hinsvegar meira í hlutfalli við tiltækt vatn. Álagssveiflurnar sem verða þegar annað hinna tveggja svæðanna hrindir frá sér álagi vegna vatnsskorts og hitt vegna aflskorts hafa því mikil áhrif á vatnsgildi Blöndulóns. Það nær því hámarki í lok sumars, lágmarki fyrir vetrarlok og er að útliti fremur ólíkt hinum tveim.

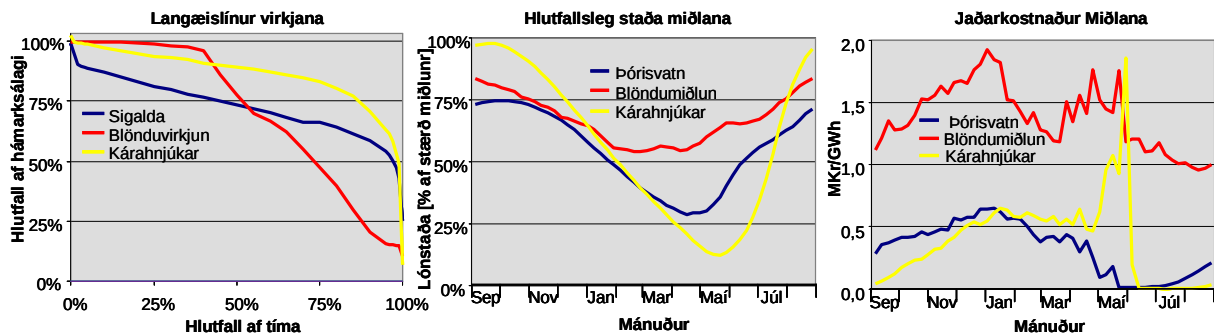


Mynd 25 Vatnsgildi helstu miðlunarlóna. Rennslisraðir reiknaðar fyrir árið 2015.

#### NÝTING VIRKJANA OG MIÐLANA

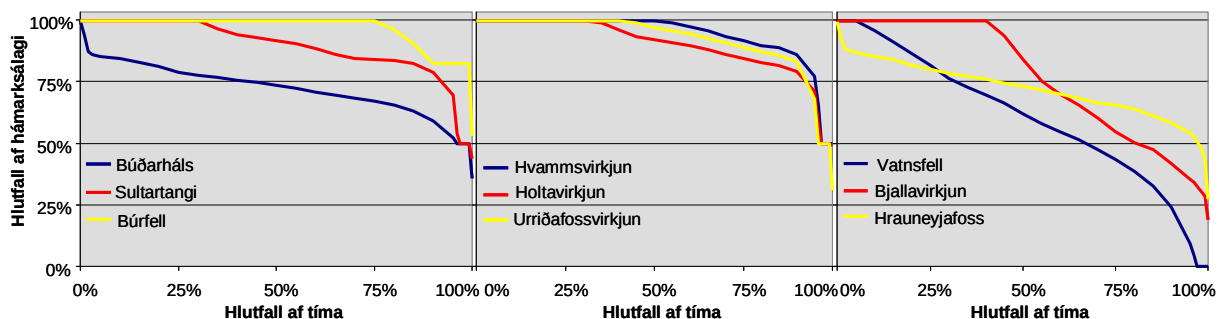
Blönduvirkjun, sem í upphafi var hönnuð fyrir 5000 stunda nýtingatíma og átti að hafa yfrið nóg afl fyrir þann markað sem menn sáu fyrir (50% stóriðja og 50% almennur markaður) fær því nýtt hlutverk við þær aðstæður sem hér eru skoðaðar. Virkjunin bætir upp aflskort á Þjórsársvæði og Austurlandi. Hún þarf því að ganga æði mikið á fullu afli og láta smávirkjanir á Norðurlandi sjá fyrir reiðuafli, sem þær geta samkvæmt forsendum þessarar athugunar. Á móti þarf að slaka á álagi á virkjunina á öðrum tímum, enda aukning rennslis til Blöndulóns margfalt minna en til þeirra miðlana sem fá vatn úr Vatnajökli. Mynd 26 sýnir hvernig langæislína Blönduvirkjunar verður af þessum ástæðum í samanburði við langæislínu Sigöldu, sem er helsti varaafgjafi á Suðurlandi og hefur svipaðan nýtingartíma. Rekstur Blönduvirkjunar verður því sveiflukenndur og spurning

hvernig það samrýmist hagsmunum neðar við ána. Kárahnjúkar hafa mun hærri nýtingartíma, en minna afl samanborið við rennsli og er því keyrð á jafnara álagi. Þessi keyrslumáti er að sjálfsögðu ekki mögulegur með því flutningskerfi sem nú er uppi og orkugetan yrði nokkuð lægri ef raunveruleg flutningsmörk giltu.



Mynd 26 Langæislínur virkjana, staða miðlana og vatnsgildi (jaðarkostnaður) sem keyrt er að jafnaði á hinum þremur vatnasvæðum Landsvirkjunar með 2015-röðum. Aths: Álag er sýnt sem hlutfall af uppsettu afli án leiðréttingar fyrir vatnshæð.

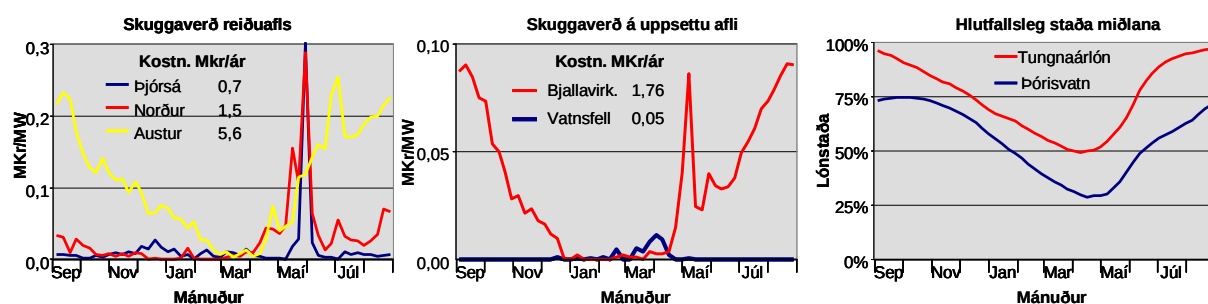
Hermilíkanið sem notað er (HYENA) nær fram hagkvæmni við þann rekstrarmáta sem hér er lýst með því að hækka vatnsgildi Blöndulóns (Mynd 25) þannig að það keyrir að jafnaði á mun hærri vatnsgildi en hinar miðlanirnar (Jaðarkostnaður miðlana á Mynd 26) og hefur minni árssveiflu. Á myndinni sést einnig hvernig jaðarkostnaður Kárahnjúka stekkur upp í lok maí og fellur síðan aftur. Ástæðan fyrir þessum áberandi toppi er sú að ef Hálslón tæmist stöðvast Fljótsdalsstöð nær alveg, því grunnrennsli er lítið og afleiðingin verður afar dýr orkuskerðing. Þarna þarf hugsanlega að hyggja betur að stærð varamiðlunar.



Mynd 27 Langæislínur virkjana á Þjórsársvæði með 2015-röðum. Aths: Álag er sýnt sem hlutfall af uppsettu afli án leiðréttingar fyrir vatnshæð.

Mynd 27 sýnir langæislínur annarra virkjana á Þjórsárvæði en Sigöldu sem er á Mynd 26. Virkjanirnar Sigalda, Hrauneyjafoss og Búðarháls hafa nánast sama langæi, en sú síðastnefnda er ekki með miðlun í reiknilíkaninu, þannig að það eru hinar tvær sem leggja til þann sveigjanleika sem þarf til að sinna aflsveiflum, en Búðarháls leggur til reiðuafli. Virkjanir í Neðri-Þjórsá og þá sérstaklega Búrfellsvirkjun ganga langtímum saman á fullu álagi. Virkjanirnar Vatnsfell og Bjallavirkjun, sérstaklega sú síðarnefnda, ganga nær óslitið. Það vekur spurningu um það hvort afl Bjallavirkjunar (hér 60 MW) sé ekki full mikið skorið við nögl. Það er reyndar spurning hvort ekki sé best að hafa þessar tvær virkjanir vel aflsettar, þannig að þær geti skipst á að leggja til toppa og reiðuafli eftir stöðu miðlana.

Skuggaverð reiðuafis sýnir hver lækkun kostnaðar verður ef reiðuafskrafa er minnkuð um 1 MW. Það er því mælikvarði á það hvaða áhrif reiðuafskrafan hefur á vinnslugetu viðkomandi varafisvæðis. Skuggaverð á uppsettu afli virkjana sýnir hver lækkun kostnaðar verður ef afl tiltekinnar virkjunar er hækkað um 1 MW.



Mynd 28 Skuggaverð reiðuafis á vatnasvæðum ásamt skuggaverði ("dual values of the variables") uppsetts afis Bjallavirkjunar og Vatnsfellsvirkjunar og stöðu helstu miðlunarlóna á Þjórsárvæði 2015-röðum.

Mynd 28 sýnir að Tungnaárlón er að jafnaði rekið á hlutfallslega herra innihaldi en Þórisvatn og skuggaverð á uppsettu afli Bjallavirkjunar er að jafnaði

mun herra en Vatnsfellsvirkjunar. Þetta styður tilgátu um það, að Bjallavirkjun megi vera stærri til að gegna hlutverki sínu á sama hátt og Vatnsfellsvirkjun þannig að Tungnaárlón nýtist betur. Til dæmis, þá er áberandi toppur á Skuggaverði Bjallavirkjunar í maí, sem fellur saman við sams konar topp í skuggaverðum reiðuafli bæði á Þjórsársvæði og Norðurlandi og topp í jaðarkostnaði Hálslóns. Það vekur athygli þarna, að þessi toppur sést ekki, hvorki í jaðarkostnaði Þórisvatns né skuggaverði Vatnsfells. Þarna er um að ræða mjög flókið samspil takmarkandi þátta. Hálslón er tóm, það vantar orku á markaðinn og Þórisvatn er svo lágt, að þar verður takmörkun á útrennsli. Skuggaverðið á innhaldi Þórisvatna verður þá jafnt vatnsgildinu, sem er mjög lágt á þessum tíma, en kostnaður vegna skerðingar á markaði kemur á takmörkin (“Dual values (Reduced Costs) of the variables”), Vatnsfellsvirkjun kemst ekki á fullt afl vegna rennslistakmarkana, skuggaverð afli þar hækkar þá ekki og það þarf að hleypa framhjá Bjallavirkjun til að hafa nægt vatn í aðrar Tungnaárvirkjanirnar, meðan vatn rennur framhjá Þjórsárvirkjunum. Það er því greinilegt ójafnvægi í aflsetningu virkjana á Þjórsársvæðinu, en hvort hagkvæmt sé að leggja í þær fjárfestingar sem þarf til að breyta því er efni í aðra athugun.

Það vekur einnig athygli á Mynd 28, að skuggaverð reiðuafli á Þjórsársvæði er lægra en á Norðurlandi. Hér verður að athuga skuggaverð reiðuafli í samhengi við aflskort virkjana, sam er tilfinnanlegur á Þjórsársvæði eins og Mynd 27 sýnir.

Tafla 11 Skuggaverð uppsetts afli (“reduced costs”) fyrir virkjanir Landsvirkjunar með 2015-röðum.

| Virkjun | Vatnsfell | Bjallavirkjun | Sigalda | Hrauneyjafoss | Búðarháls | Sultartangi | Búrfell | Hvammsvirkjun | Holtavirkjun | Urriðafossvirkjun | Sog | Blönduvirkjun | Laxa I-III | Kárahnjúkar |
|---------|-----------|---------------|---------|---------------|-----------|-------------|---------|---------------|--------------|-------------------|-----|---------------|------------|-------------|
|---------|-----------|---------------|---------|---------------|-----------|-------------|---------|---------------|--------------|-------------------|-----|---------------|------------|-------------|

|                                                                                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Skuggaverð afls.<br/>MKr/ár</b>                                                                      | 0,05 | 1,76 | 0,24 | 0,09 | 0,14 | 1,02 | 3,78 | 0,73 | 0,32 | 0,61 | 0,12 | 0,40 | 0,30 | 0,00 |
| Skuggaverð virkjana lagt við skuggaverð reiðuafls og reknað sem hlutfall af jaðarkostnaði eftirspurnar. |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Hlutfall af jaðark.<br/>eftirspurnar</b>                                                             | 5%   | 15%  | 6%   | 5%   | 5%   | 11%  | 27%  | 9%   | 6%   | 8%   | 3%   | 12%  | 11%  | 34%  |

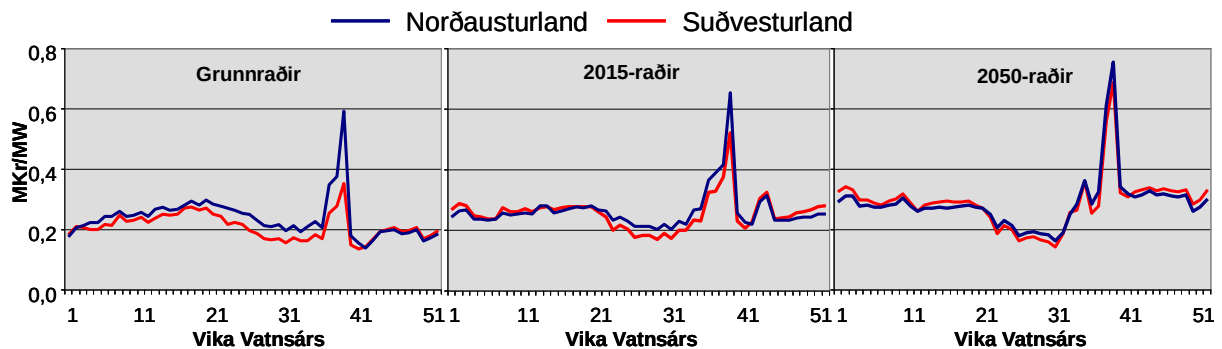
Tafla 11 sýnir skuggaverð á uppsettu afli virkjana, en gróft reiknað má bæta skuggaverði reiðuafls við þessar tölur. Taflan sýnir að á Þjórsársvæði er aflskortur tilfínanlegastur í Bjallavirkjun og virkjunum í Þjórsá, þar sem Búrfellsvirkjun stendur upp úr. Í Vatnsfelli kemur fyrir rennslistakmörkun sem lækkar þennan kostnað. Kárhnjúkar skera sig þó úr öllum þegar skuggaverði reiðuafls (5,6 samkvæmt Mynd 28) hefur verið bætt við. Blönduvirkjun er einnig nokkuð há að teknu tilliti til skuggaverðs reiðuafls (1,5 samkvæmt Mynd 28). Í heildina virðast þessi skuggaverð í lægra lagi í samanburði við jaðarkostnað orku, sem ætti að merkja, að varla hefði borgað sig að aflsetja þær meir í upphafi. Þarna verður þó að túlka hlutina varlega. Uppsett afl hefur áhrif á vatnsgildið og skuggaverðin eins og þau eru reiknuð mæla ekki þau áhrif. Eins er það, að þegar lón tæmast, þá getur það haft áhrif eins og dæmið hér að framan með Vatnsfell sýnir. Þessi skuggaverð sýna því hvar aflskortur kemur sér verst, en eru ekki jafn nothæf til að finna rétta tímasetningu stækkana. Niðurstöður útreikninga á þessum kostnaði með 2050 röðunum eru fyrir Kárahnjúka 80% af jaðarkostnaði eftirspurnar og um það bil 60% fyrir Búrfell.

Rétt er að minna enn og aftur á dægursveiflu álags

#### SKUGGAVERÐ REIÐUAFLS Á JARÐVARMASVÆÐUNUM OG TÚLKUN ÞEIRRA

Skuggaverð reiðuafls á jarðvarmasvæðunum leggur saman áhrif þess að bæta við afli og hleypa meiri orku inn á kerfið, sem þar að auki er jafndreifð yfir árið.

Þau eru því verulega hærri eins og Mynd 29 sýnir. Gildin fyrir svæðin tvö fylgjast vel að, en það eru töpin í flutningskerfinu sem skilja á milli, þannig að ekki er þörf á að greina milli þeirra þegar árgildin eru reiknuð. (Tafla 12).



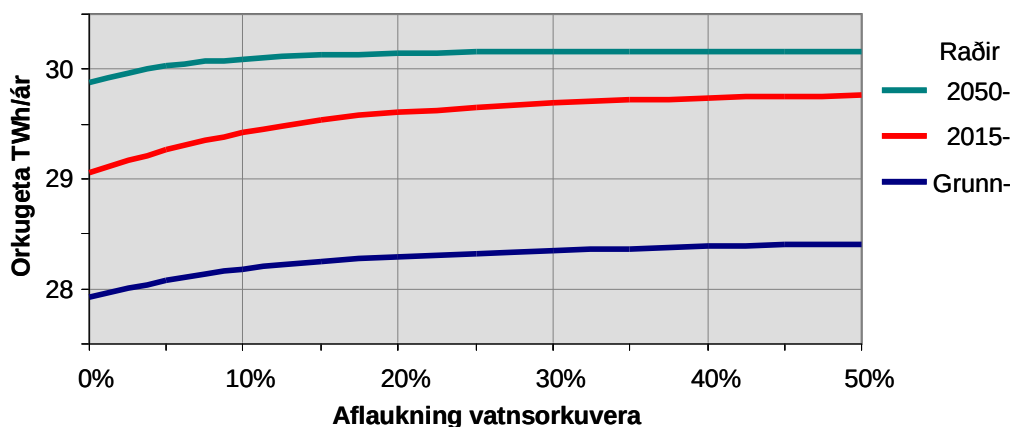
Mynd 29 Skuggaverð reiðuafls á jarðvarmasvæðum

Tafla 12 Skuggaverð reiðuafls. Árgildi fyrir jarðvarmasvæði, meðaltöl Suðvestur- og Norðausturlands.

|                                  | Grunnröð 2015-raðir 2050-raðir |      |      |
|----------------------------------|--------------------------------|------|------|
| Skuggaverð afls. MKr/ár          | 117                            | 13,5 | 15,1 |
| Hlutfall af jaðark. eftirspurnar | 60%                            | 83%  | 113% |

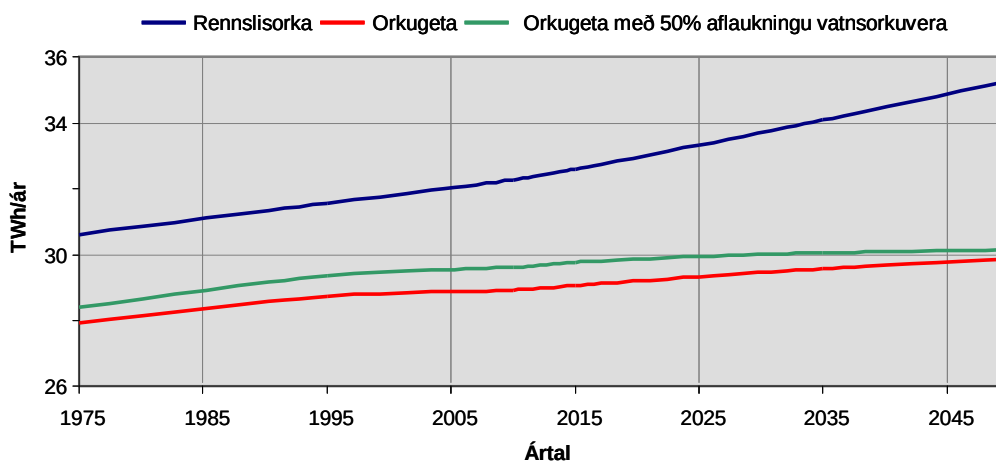
Það vekur athygli hvað árgildi skuggaverðs reiðuafls á jarðvarmasvæðum fara hátt með röð 2050 í hlutfalli við jaðarkostnað eftirspurnar. Fyrirfram hefði ef til vill mátt búast við, að verðmæti aukins aðstreymis orku færi minnkandi með auknu vatnsrennsli. Þetta háa gildi fyrir 2050-röðina kallar því fram þá spurningu hvort það, að þetta aukna aðstreymi jarðvarma er jafndreift og þarf litla miðlun sé svona hagstætt.





Mynd 30 Áhrif þess að auka afl allra vatnsorkuvera um sömu prósentu.

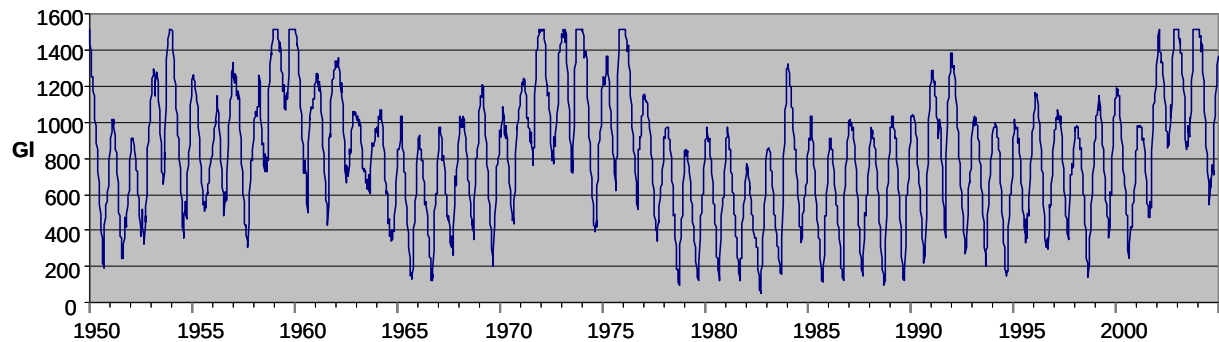
Mynd 30 sýnir áhrif þess að auka afl allra vatnsorkuvera landsins um sama hlutfall. Greinilegt er, að þegar 2050 raðirnar eru notaðar þá ná áhrifin af þessari aðgerð mettun mun fyrr en ef grunnraðirnar eru notaðar, en þessi mettun er ekki komin í ljós við 50% aukningu með 2015-röðunum og áhifin eru þar meiri. Ástæðan gæti verið sú, að jökulrennslið, sem er megin hluti aukningarinnar, krefst meiri miðlunar þegar fram í sækir. Grunnröðin hefur innbyggða allmikla leitni sem gerir hana ekki fyllilega sambærilega við hinar.



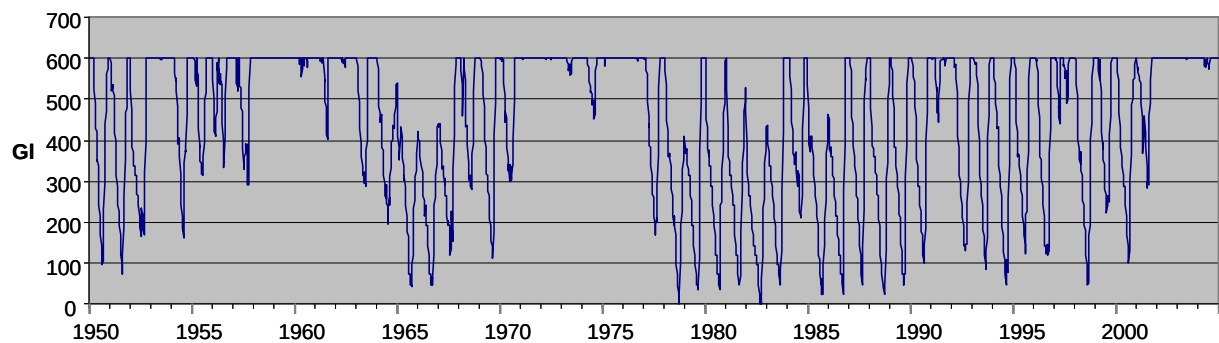
Mynd 31 Áhrif aukins afls vatnsorkuvera á orkugetu Landskerfisins

Eins og Mynd 31 sýnir næst fram lítið betri nýting rennslisorkunnar með því að auka afl virkjana og því minna sem rennsli vegna hlýnunar vex meira.

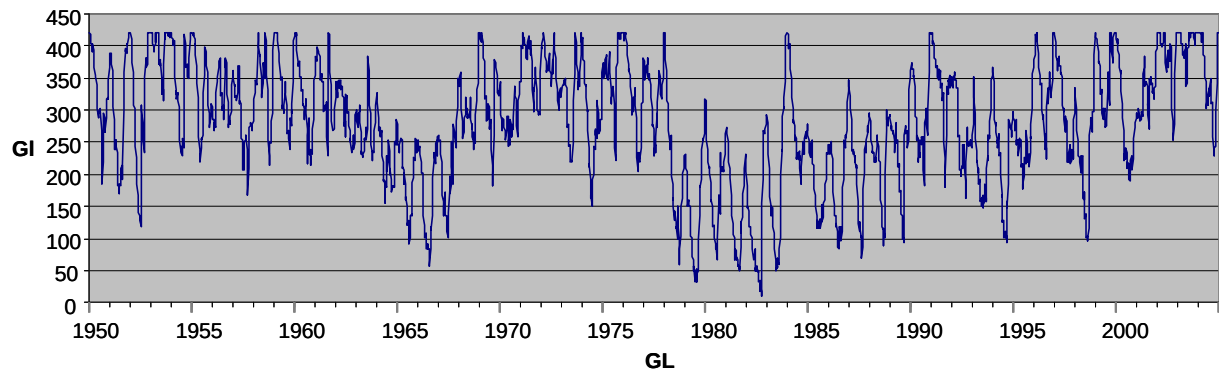
Hér á eftir eru til glöggvunar sýndar myndir (Mynd 32 til Mynd 37) af miðlunar-hreyfingum lóna eins og þær koma út í hermunum. Athugið að Krókslón og Sultartangalón eru við virkjanir sem missa afl ef lækkar í lónunum og er því haldið meir uppi en öðrum.



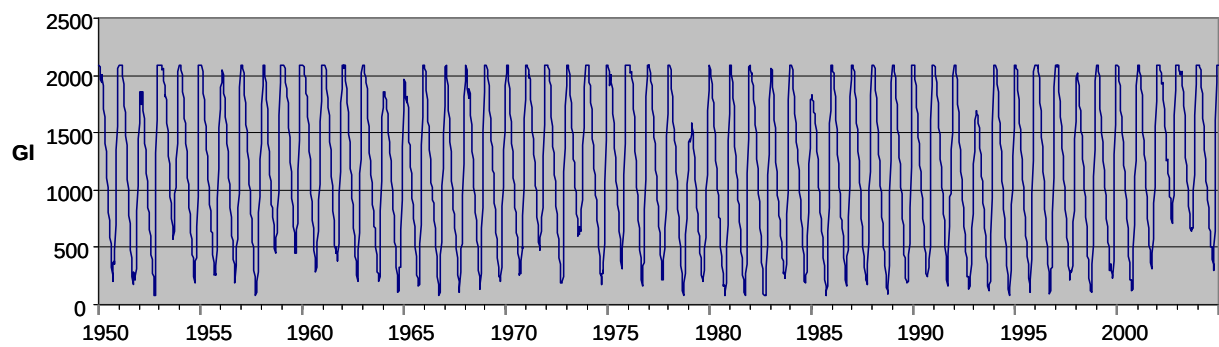
Mynd 32 Miðlunarhreifingar Þórisvatns



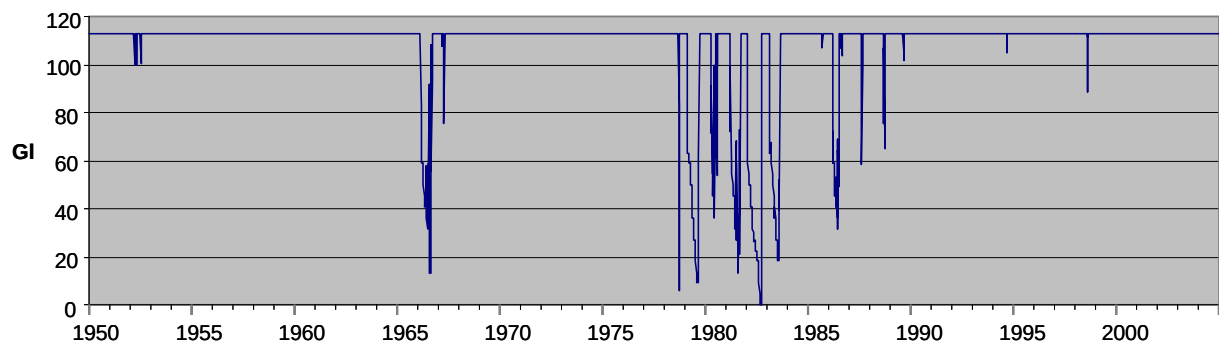
Mynd 33 Miðlunarhreifingar Tungnaárlóns



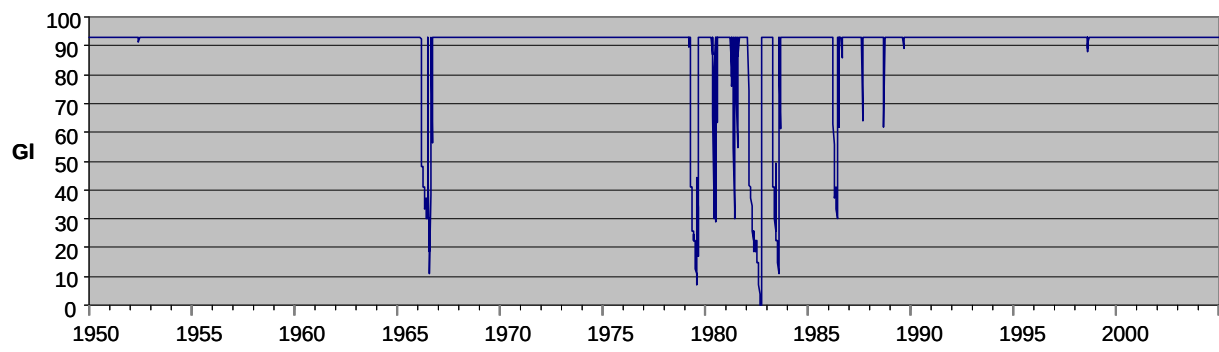
Mynd 34 Miðlunarahreifingar Blöndulóns



Mynd 35 Miðlunarahreifingar Háslóns



Mynd 36 Miðlunarahreifingar Krókslóns



Mynd 37 Miðlunarhreifingar Sultartangalóns

*IPCC [1] The Emissions Scenarios of the Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*

***A1.** The A1 storyline and scenario family describes a future world of very rapid economic growth, global population that peaks in mid-century and declines thereafter, and the rapid introduction of new and more efficient technologies. Major underlying themes are convergence among regions, capacity building and increased cultural and social interactions, with a substantial reduction in regional differences in per capita income. The A1 scenario family develops into three groups that describe alternative directions of technological change in the energy system. The three A1 groups are distinguished by their technological emphasis: fossil intensive (A1FI), non-fossil energy sources (A1T), or a balance across all sources (A1B) (where balanced is defined as not relying too heavily on one particular energy source, on the assumption that similar improvement rates apply to all energy supply and end-use technologies).*

**A2.** *The A2 storyline and scenario family describes a very heterogeneous world. The underlying theme is self reliance and preservation of local identities. Fertility patterns across regions converge very slowly, which results in continuously increasing population. Economic development is primarily regionally oriented and per capita economic growth and technological change more fragmented and slower than other storylines.*

**B1.** *The B1 storyline and scenario family describes a convergent world with the same global population, that peaks in mid-century and declines thereafter, as in the A1 storyline, but with rapid change in economic structures toward a service and information economy, with reductions in material intensity and the introduction of clean and resource efficient technologies. The emphasis is on global solutions to economic, social and environmental sustainability, including improved equity, but without additional climate initiatives.*

**B2.** *The B2 storyline and scenario family describes a world in which the emphasis is on local solutions to economic, social and environmental sustainability. It is a world with continuously increasing global population, at a rate lower than A2, intermediate levels of economic development, and less rapid and more diverse technological change than in the A1 and B1 storylines. While the scenario is also oriented towards environmental protection and social equity, it focuses on local and regional levels.*

- [1] IPCC Third Assessment Report, Technical summary: Accepted by working group I in 2001
- [2] *Stern Review Report on the Economics of Climate Change*, pre-publication edition: [www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm)
- [3] *IPCC Third Assessment Report – Climate Change 2001*: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- [4] Working Group I contribution to the IPCC Fourth Assessment Report: Summary for Policymakers; Nov. 2007: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>
- [5] Rummukainen, Markku, Rossby Centre/SMHI & the CE Climate Group (2006). *The CE regional climate scenarios*, Presented at the European Conference on Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources, Reykjavik, Iceland, June 5-9.
- [6] Jes Fenger, Editor: *Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources*, A comprehensive report resulting from a Nordic Energy Research project; Nord 2007:003
- [7] Tómas Jóhannesson et al., *Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland*, A report of the VO project; Orkustofnun, OS-2007/011.
- [8] Óli Grétar Sveinsson, Elías B Elíasson, *Viðbrögð Landsvirkjunar við gróðurhúsaáhrifum*; Landsvirkjun innanhússkýrsla, 2006.
- [9] Skúli Jóhannsson, (2006) *Rennslisraðir til rekstrarhermana. Tölfræðilegir eiginleikar vatnsár 1950-2004*
- [10] Skúli Jóhannsson, (2006) *Orkugeta raforkukerfisins og hlýnandi veðurfar*, Annað veldi ehf fyrir Landsvirkjun
- [11] Verkfræðistofan Vatnaskil (2003), *Aquaflow Combined surface water and groundwater flow model*
- [12] Verkfræðistofan Vatnaskil (2006), *Future flow in Icelandic rivers*, Prepared for the Climate and Energy project.
- [13] Verkfræðistofan Vatnaskil 14. nóv. 2006, Bréf: Rennslisraðir fyrir árið 2010.



- [14] Verkfræðistofan Vatnaskil 14. nóv. 2006 Bréf: Rennslisraðir fyrir árið 2010, nýtt viðmið um hitabreytingu
- [15] Verkfræðistofan Vatnaskil 16.mars 2009 Bréf með fylgiskjöllum: Framtíðarrennslisraðir fyrir raforkukerfi Landsvirkjunar 2. þáttur. Árin 2010, 2015, 2025, 2035 og 2050.