



ORKUSTOFNUN

Aukning jökulþáttar vegna hlýnunar. Ýmis
gögn og niðurstöður einfaldra líkanreikninga
fyrir rekstrareftirlíkingu raforkukerfis
Landsvirkjunar við hækkandi hita

**Tómas Jóhannesson,
Kristinn Einarsson**

Greinargerð TJ-KE-92-01

AUKNING JÖKULPÁTTAR VEGNA HLÝNUNAR

Ýmis gögn og niðurstöður einfaldra líkanreikninga fyrir
rekstrareftirlíkingu raforkukerfis Landsvirkjunar við hækkandi hita

1. INNGANGUR

Landsvirkjun og Verkfraðistofan Strengur hyggjast meta afleiðingar hugsanlegrar hlýnunar af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa á rekstur raforkukerfis Landsvirkjunar. Í þessu skyni verður rekstarlíska af raforkukerfinu keyrt og líkt á einfaldan hátt eftir áhrifum hækkandi hita á rekstur kerfisins og tímasetningu nýrra virkjana.

Á fundi fulltrúa Landsvirkjunar, Verkfraðistofunnar Strengs og Orkustofnunar 15. janúar 1992 var ákveðið að taka breytingar í jökulþætti rennslisins fyrir sérstaklega, á mjög einfaldan hátt í fyrstu umferð, svo og breytingar á raforkupörf vegna hærri hita; og líta á þessu stigi framhjá öðrum breytingum (svo sem í úrkому og grunnvatnsþætti rennslisins). Allar líkur eru á því að breytingar í jökulþættinum verði mikilvægustu breytingar sem vaxandi gróðurhúsaáhrif hafa í för með sér fyrir rekstur vatnsafsvirkjana á Íslandi þó aðrar breytingar geti einnig haft mikið að segja.

Breytingar á jökulþættinum verða eins og fyrri segir tilgreindar með mjög einföldum hætti í þessari athugun.

1. Metið verður með vatnafræðilegum líkanreikningum fyrir nokkrar jökulár hvernig aukið rennsli við hlýrra loftslag mun dreifast innan ársins. Dreifingin sem þannig faest verður notuð til þess að dreifa auknum jökulþætti á öllum árum fyrir alla rennslisstaði sem koma við sögu í rekstarlískanu.
2. Hlutfallsleg aukning jökulþáttar (eða öllu heldur aukið rennsli frá þeim landsvæðum sem nú eru jöklar hulin) með tíma verður metin með hliðsjón að hug-

myndum manna um hlýnun af völdum gróðurhúsaáhrifa. Notaðir verða þrí mismunandi ferlar sem spenna í grófum dráttum þá rennslisaukningu með tíma sem líklega má telja. Sömu ferlar yfir hlutfallslega aukningu verða notaðir fyrir alla rennslisstaði í líkaninu.

3. Á hverjum rennslisstað verður núverandi hlutfall jökulþáttar í rennslinu metið. Aukning jökulþáttar vegna hærri hita verður fundin með því að margfalda þann jökulþátt sem óbreyttar rennslisraðir gefa fyrir heilt vatnsár með hlutfallslegri aukningu jökulrennslis þess árs skv. lið 2. og aukningunni síðan dreift innan ársins skv lið. 1.

Hér að neðan er gerð grein fyrir útreikningum á þessum liðum út frá gögnum Vatnamælinga Orkustofnunar og hitamælingum frá Veðurstofu Íslands.

Talið er að hlýnun vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa muni verða meiri á veturna en á sumrin. Þetta er þó mikilli óvissu undirorpíð. Þess vegna var dreifing rennslis innan ársins reiknuð út frá tveimur mismunandi forsendum. Annars vegar er gert ráð fyrir jafnri hlýnun allt árið. Hins vegar er gert ráð fyrir að hlýnum breytist innan ársins þannig að mesta hlýnum að vetri sé um helmingi meiri en minnsta hlýnun að sumri. Í síðara tilfellini var hlýnunin látin breytast línulega með meðalhita innan ársins milli vetrarhámarksins og sumarlágmarksins.

2. JÖKULPÁTTUR

Jökulþáttur vatnsfalla sem koma við sögu í rekstarlískeni Strengs og Landsvirkjunar af

raforkukerfinu var metinn á grundvelli vatnafræðilegra lískana sem keyrð hafa verið fyrir þessi vatnsföll, þar sem slískir reikningar hafa verið gerðir, og gróflega út frá flatarmáli jökuls sem hlutfalli af heildarflatarmáli vatnsviðs þar sem vatnafræðileg lískon vantaði. Niðurstöður koma fram í eftirfarandi töflu.

Rennslis-staður	Vatns-hæðar-mælir	Jökul-páttur	Flatarm. jökuls (hlutf.)
R001	vhm 097	0,19	0,16
R101	—	—	—
R102	—	—	—
R103	vhm 125	(0,38)	0,32
R104	—	—	—
R105	vhm 096	0,19	0,16
R106	—	—	—
R107	—	—	—
R108	—	—	—
R109	—	—	—
*	Kv.M.	0,13	0,18
R110	Kv.M. - Kv.m.	0,38	0,26
*	vhm 216	0,20	0,16
*	vhm 100	0,28	0,21
R111	vhm 216 - Kv.M.	0,23	0,13
R113	—	—	—
R115	vhm 030	0,16	0,14
R117	vhm 054	0,23	0,12
R004/R128	—	—	—
R008/R126	—	—	—
R011/R127	vhm 017	0,10	0,05
R045/R129	—	—	—
Eyjab.lón	vhm 234	0,66	0,51
Milli Ebl og Fdv	—	—	—
*	vhm 109	0,43	0,30
R029/R132	vhm 144/5+Δ	(0,17)	0,11

Tölur sem eru gróflega metnar án þess að stuðst sé við vatnafræðileg lískon eru hafðar í svigum. Aukaupplýsingar sem ekki eru notaðar í rekstarlískani raforkukerfisins eru merktar með "*" í fremsta dálk töflunnar. Rennslisstaðir sem ekki hafa neinn jökulpátt (oft vegna þess að allt vatn frá jöklum kemur fram sem grunnvatn) eru auðkenndir með "—". Skammstafanirnar "Kv.M." og "Kv.m." vísa til Kvíslaveita meiri og minni en "Ebl" og "Fdv" er skammstöfun á Eyjabakkalóni og Fljótsdalsvirkjun.

Rennslisstaðirnir í töflunni að ofan eru nauðsynlegir fyrir rekstarlískan af raforkukerfi Landsvirkjunar skv. bréfi dagsettu 21.01.92 frá Magnúsi Sigurðssyni á Streng. Í bréfinu eru einnig tilteknir rennslisstaðir sem e.t.v.

verða notaðir við lískanreikningana og verða teknar saman upplýsingar um þá síðar ef á þarf að halda.

3. VATNAFRÆÐILEGIR LÍKANREIKNINGAR

Við útreikninga á dreifingu aukins jökulpáttar innan ársins var notast við einfalt vatnafræðilegt lískan fyrir rennslí jökuláa (Árni Snorrason, 1986; Árni Snorrason og Kristinn Einarsson, 1986). Lískanið reiknar tímaröð rennslisfrávika P_t , út frá tímaröð gráðudagafrávika G_t , með eftirfarandi jöfnu

$$P_t = \beta + \delta_1 P_{t-1} + \omega_0 G_t .$$

β , δ_1 og ω_0 eru stuðlar sem fundnir eru með aðferð minnstu kvaðrata fyrir ákveðið kvörðunartímabil þar sem bæði rennslis- og gráðudagatímaraðir eru tiltækar. Frávakin eru reiknuð með því að draga meðaltal og árssveiflu frá upprunalegum rennslis- og gráðudagatímamaröðum. Árssveiflan var reiknuð með því að fella summu sin og cos liða (lota 1, 1/2 og 1/3 ár) að tímaröðum kvörðunartímabilinsins eftir að meðaltalið hafði verið dregið frá. Próskuldur fyrir gráðudagareikninga var fundinn með því að reikna út lískon fyrir nokkur mismunandi próskuldsgildi og velja próskuldinn sem gaf besta lískanið (þ.e. minnstan óskýrðan varíans σ_r^2). Í reikningum er notast við tveggja vikna summur rennslis og gráðudaga, alls 26 gildi í vatnsári.

Rennslisraðir frá Jöklum við Hjarðarhaga (vhm 110), Jökulsá í Fljótsdal við Hól (vhm 109) og Blöndu við Lögumýri (vhm 54) voru athugaðar og gráðudagaraðir reiknaðar með hitagönum frá Hallormstað (V.I. nr. 580) (Jöklum og Jökulsá í Fljótsdal) og Nautabúi í Skagafirði (V.I. nr. 366) (Blanda). Sama kvörðunartímabil, 1974 til 1982, var notað fyrir allar árnar til þess að niðurstöður væri sambærilegar við fyrri reikninga fyrir þessar ár (sbr. Árni Snorrason, 1986; Árni Snorrason og Kristinn Einarsson, 1986). Stuðlar lískanna koma fram í eftirfarandi töflu:

	Prösk- uldur (°C)	β (GI/2v)	δ_1 (1)	ω_0 (GI/°C/d)	σ_r^2 (%)
Jökla (110)	5	0,0178	0,2774	4,5193	38
Jökulsá (109)	3	0,0124	0,1834	0,7852	46
Blanda (54)	2	0,0095	0,1584	0,8222	71

Í síðasta dálknum er gefinn upp óskýrður varfans sem hlutfall af varfans í upprunalegu rennslisfrávikunum.

Líkön voru reiknuð fyrir önnur kvörðunar-tímabil og hafði það lítil áhrif á gildi stuðlanna í töflunni hér að ofan. Líkönin voru einnig keyrð fyrir nokkur tímabil þar sem til voru gögn um bæði rennsli og hita og ekki skoruðust við kvörðunartímabilið og reyndist σ_r^2 hafa svipað gildi og á kvörðunartímabilið sjálfa. Stuðlar líkananna eru því ekki bundnir við kvörðunartímabilið 1974 til 1982.

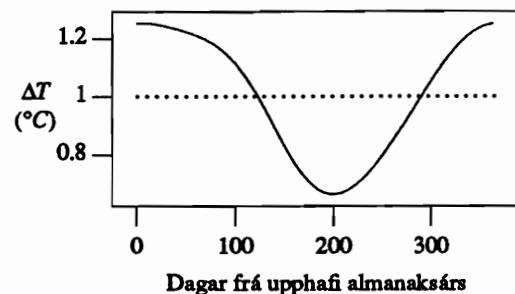
Í stuðlinum ω_0 felast upplýsingar um hversu mikil áhrif hitabreytingar á kvörðunartímabilið hafa haft á rennsli viðkomandi árs. Því má meta áhrif hlýnunar á rennslið með því að leggja ákveðna hlýnun við hitatímaðirnar og reikna nýtt rennsli með óbreyttu líkani. Þetta var gert fyrir tímabilið 1950 til 1989 og fundin rennslisaukning sem svarar til mismunandi hlýnunar.

4. DREIFING RENNSLISAUKNINGAR

Dreifing rennslisaukningarárinnar innan vatnsársins var fundin eins og lýst er í hér að framan og tekið meðaltal fyrir hvert tveggja vikna tímabil vatnsársins yfir allt árabilið frá 1950 til 1989.

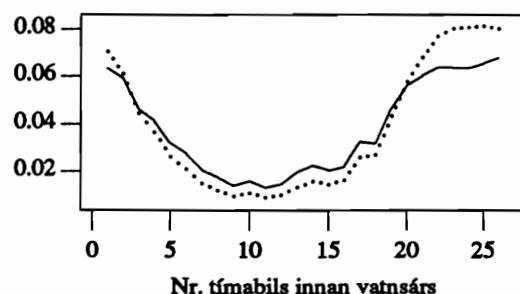
Rennslisaukningin er ekki límulega háð hlýnuninni (gráðudagar eru ekki límulegt fall af hita) en engu að síður er dreifing rennslisaukningarárinnar fyrir mismikla hlýnun tiltölulega nærrí því að vera sú sama fyrir hverja á (þegar deilt er í rennslisaukninguna með heildarrennslisaukningu yfir árið). Hins vegar hefur það nokkur áhrif á dreifingu rennslisaukningarárinnar hvort hlýnunin er jöfn allt árið eða mest á veturna og minni á sumrin (sjá að ofan). Í lokaútreikningum var miðað við hlýnum sem að meðaltali var $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ yfir

árið. Myndin hér að neðan sýnir hlýnunina sem miðað var við (breytileg hlýnun með heildregnun ferli, jöfn hlýnun með punktum).



Dreifing rennslisaukningarárinnar reyndis dálst-ið mismunandi eftir því hver áin er. Þetta helgast einkum af því að jökulþáttur er minni hluti heildarrennslis í Jökulsá í Fljótsdal og Blöndu en í Jöklu. Því er talið að Jökla gefi besta hugmynd af þessum premur ám um aukningu jökulþáttarins eins í íslenskum ám vegna hlýnunar.

Dreifing rennslisaukningar í Jöklu innan vatnsársins er sýnd á myndinni hér að neðan. Myndin sýnir hversu mikill hluti rennslisaukningar ársins kemur í hlut hvers tveggja vikna tímabils vatnsársins (heildregnun ferill miðar við breytilega hlýnun, punktar miðast við jafna hlýnun). Summa allra 26 gilda vatnsársins er 1,0.

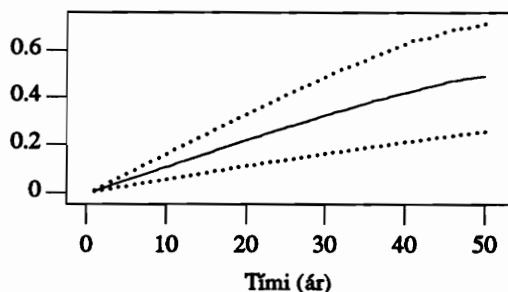


Þó ferlar myndarinnar miðist við hlýnun um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ að meðaltali yfir árið þá eru þeir góð nálgun fyrir bæði meiri og minni hlýnun.

5. AUKNING JÖKULPÁTTAR

Aukning jökulþáttar með tíma vegna hlýnunar er að sjálfsögðu mjög óviss. Ákveðið var að miða við reikninga sem gerðir hafa verið á

rennslisaukningu frá því svæði sem Hofsjökull þekur nú við línulega hækjun jafnvægislinu um 200 m á 50 árum (Tómas Jóhannesson, 1991). Þessi hækjun jafnvægislinunnar svarar til hlýnumar um 1-1,5 °C á 50 árum. Afrennsli vegna rýrnunar Hofsjökuls í hlutfalli við núverandi afrennsli frá jöklínnum (u.p.b. 80 m³/s að meðaltali yfir árið) er sýnt á myndinni hér að neðan. Auk afrennslis vegna rýrnunar jökulsins sem svarar til 200 m hækjunar jafnvægislinu á 50 árum (heildreginn ferill) sýnir myndin afrennsli sem svarar til 100 m (0,5-0,75 °C) (neðri punktalína) og 300 m (1,5-2 °C) (efri punktalína) hækknar jafnvægislinu. Þessir ferlar spanna lægri helming þess bils sem oft er nefnt í sambandi við hlýnum af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa (mat á hlýnum vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa hefur farið heldur lækkandi á síðustu árum og er því ekki ástæða að nota mestu hlýnum sem vísindamenn hafa nefnt).



Það er all mikil einföldun að yfirlægja hlutfallslega rennslisaukningu sem reiknuð er fyrir Hofsjökull á alla aðra jöklum sem koma við sögu í rennslisröðum sem notaðar eru í rekstarískani af raforkukerfi landsins alls. Þetta stafar einkum af mismunandi stærð jöklanna og mismunandi dreifingu flatarmáls þeirra með hæð yfir sjó. Á móti kemur að þeir jöklar, sem ná niður á láglendi og eru því ólökastir Hofsjökli hvað varðar hæðardreifingu, skipta litlu máli fyrir vatnsafsvirkjanir landsins. Litlir jöklar, sem ætla má að bregðist allt öðru vísni við en Hofsjökull og hverfi jafnvel á örfáum áratugum, skipta einnig litlu máli fyrir vatnsafsvirkjanir. Raunar er um jökulrennslu frá Hofsjökli að ræða í fimm rennslisröðum af þeim tfl sem nefndar eru í töflunni hér að framan. Annað atriði sem

þvíssu veldur eru framhlaup jöklanna. Í þessu sambandi er rétt að hafa í huga að mikil óvissa er óhákvæmileg við mat á rennslisaukningunni vegna óvissa um sjálfar lofslagsbreytingarnar sem valda rennslisaukningunni. Reiknaðar breytingar fyrir Hofsjökul gefa hugmynd um stærðarþrep breytinga á jökulafrennsli sem í vændum eru ef hlýnum vegna gróðurhúsaáhrifa gengur fram sem horfir en ekki er hægt að líta á þær sem beina spá um þessar breytingar fyrir landið allt.

6. SPJALL

Í lokin er rétt að nefna nokkur atriði sem máli skipta varðandi túlkun gagnanna sem hér hafa verið tekin saman.

Eingöngu er tekið tillit til aukins jökulþáttar (eða öllu heldur aukins afrennslis frá því landsvæði sem nú er jöklum hulið) vegna rýrnunar jöklum. Aukningu afrennslis frá jöklum, sem kemur fram sem grunnvatn, er sleppt. Einnig er litið framhjá rennslisbreytingum vegna breytinga á úrkomu, svo og breytingum á rennslisdreifingu innan ársins vegna hlýnumar á jökulvana landsvæðum (snjóbráð og vorflöð ættu að koma fram fyrir eftir því sem hlýnar). Almennt er gert ráð fyrir úrkomuaukningu samfara hlýnum af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa. Þessir atriði ættu þess vegna að valda því að rennslisaukningin sem hér er reiknað með er fremur vanáætuð en ofmetin.

Eins og nefnt var þá eru gráðudagar ekki línulegt fall af hita og það veldur skekkju þegar ein og sama dreifingin er notuð til þess að dreifa rennslisaukningu ársins á tímabil innan ársins óháð því hversu mikil rennslisaukningin (eða hlýnumin) er. Skekkjan hlýst af því að þegar hlýnum er lítil þá eru gráðudagar fáir að haust-, vetrar- og vorlagi (svipad og nú er) og því eykst summarrennslu mun meira en rennsli á öðrum árstímum. Þegar hlýnum er meiri þá verða gráðudagar fleiri á þeim árstímum þegar kalt er í veðri samanborið við minni hlýnum og því dreifist rennslisaukningin jafnar yfir árið við meiri hlýnum en minni. Dreifing rennslisaukningarárinnar við hlýnum á bilinu 0,5-2,0 °C er þó mjög

svipuð og skekkja sem hlýst af þessu atriði er ekki mikil miðað við aðra óvissu í þessum gögnum.

Jöklar hopa og flatarmál þeirra minnkar þegar þeir rýma vegna hlýnandi veðurfars. Þegar flatarmál jökulhulins lands á vatnsvíði minnkar þá fellur stærri hluti úrkomu á jöklavana land en áður og þetta getur haft í för með sér að eiginlegur jökulþáttur vatnsfallsins sem um ræðir minnki samhliða stöðugri rýrnun jöklusins (heildarafrénnslí frá því svæði sem jökullinn þakti í upphafi er þó að öðru óbreyttu meira en áður vegna þess að sí-fellt gengur á ísforðann). Í reikningunum hér að ofan er litið framhjá þessu atriði og rennslí vegna rýrnunar jöklar dreift innan ársins svipað og jökulþáttur rennslis dreifist nú án tillits til þess að í hlýnandi loftslagi mun vægi af-rennslis frá jöklivana landi fara vaxandi vegna hops jöklanna. Minnkun á flatarmáli jöklar hefur ekki úrslitaáhrif á dreifingu afrennslisaukningar fyrstu 50 árin eftir að hlýna fer í veðri (sjá Tómas Jóhannesson, 1991) en þegar rýrnun jöklanna er orðin umtalsvert hlutfall af númerandi rúmmáli þeirra þá getur þetta atriði skipt miklu máli. Hægt er að taka tillit til minnkandi flatarmáls jöklanna með tíma í rennslislíkönum af NAM og HBV gerð þegar henta þykir.

7. GÖGN

Gögnin sem sýnd eru á myndunum hér að framan eru geymd (og þeim dreift) í eftirtöldum skrám.

Skrá	Innhald
jdreifing.dat	Hlutfallsleg dreifing jökulþáttar fyrir jafna hlýnun. 26 tölur sem samanlagðar eru 1.0 og gefa það hlutfall rennslisaukningar ársins sem fellur á hvert tveggja vikna tímabil vatnsársins.
bdreifing.dat	Hlutfallsleg dreifing jökulþáttar fyrir breytilega hlýnun.
raukning100.dat	Árleg rennslisaukning vegna rýmunar jöklus í hlutfalli við númerandi heildarafrénnslí frá jöklinum við 100 m hækjun á jafnvægislinu á 50 árum.
raukning200.dat	Sama og raukning100.dat nema hvað miðað er við 200 m hækjun á jafnvægislinu á 50 árum.
raukning300.dat	Sama og raukning100.dat nema hvað miðað er við 300 m hækjun á jafnvægislinu á 50 árum.
jthattur.dat	Hlutfallslegur jökulþáttur á rennslisstöðum sem koma við sögu í rekstrarlíkani af raforkukerfinu.

8. HEIMILDIR

- Árni Snorrason. 1986. Analysis of river flow data from glaciated basin in Iceland. In Shen, H. W., J. T. B. Obeysekera, V. Yevjevich and D. G. Decoursey. Eds. *Multivariate Analysis of Hydrologic Processes*, Proc. of Fourth International Hydrologic Symposium. Fort Collins, Colorado, USA, 651-663.
- Árni Snorrason and Kristinn Einarsson. 1969. Transformation of input to a stochastic model using a distributed deterministic model. *Nordic Hydrology*, 17, 371-382.
- Tómas Jóhannesson. 1991. Modelling the Effect of Climatic Warming on the Hofsjökull Ice Cap, Central Iceland. *Nordic Hydrology*, 22, 81-94.