

BRÚARJÖKULL

Framhlaupið 1963-1964 og áhrif þess
á rennsli Jökulsár á Brú

Magnús T. Guðmundsson
Þórdís Högnadóttir
Helgi Björnsson

Raunvísindastofnun Háskólans
Desember 1996
RH-11-96

ÁGRIP

Í Brúarjökli verða stærstu framhlaup á Íslandi og má ætla að áhrif þeirra á afrennsli séu meiri en í flestum öðrum framhlaupsjöklum. Lota framhlaupa í Brúarjökli er 70-100 ár en nú eru liðin rúmlega 30 ár frá síðasta framhlaupi. Hér er gerð tilraun til að meta áhrif framhlaupsins á rennsli Jökulsár á Brú og hvernig líklegt sé að jökulþáttur rennslisins breytist næstu áratugi, að óbreyttu veðurfari.

Á tímabilinu 1890 til 1963 hopaði Brúarjökull mest í Kringilsárrana, um 11 km. Framhlaup hófst haustið 1963 og tók sporðurinn að ganga fram eftir miðjan október. Um áramót var framskið að mestu um garð gengið en það nam þá 9.5 km í Kringilsárrana. Gekk sporðurinn þar fram um 100 m/dag að meðaltali meðan á framhlaupinu stóð. Brúarjökull stækkaði úr 1580 km² í 1740 km² og varð aukningin öll á leysingarsvæðinu sem stækkaði úr 420 km² í 580 km². Í framhlaupinu fluttust um 70 km³ af ís niður á leysingarsvæði Brúarjökuls frá ákomusvæðinu sem lækkaði um 60 m að jafnaði.

Breytingarnar á jöklinum í framhlaupinu höfðu mikil áhrif á afrennsli. Breytingar frá langtíma grunnrennsli vegna framhlaupa eru greindar í tvo þætti. Í fyrsta lagi vegna breytinga á flatarmáli jökulsins og dreifingu flatarmáls með hæð (ΔQ_f). Í öðru lagi vegna aukinnar virkni orkustrauma við yfirborð jökulsins sem stafar af auknum hrjúfleika jökulyfirborðsins (jökulsprungur, ísborgir) fyrstu árin eftir framhlaup (ΔQ_h). Með samanburði rennslis í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum eru sveiflur vegna framhlaupa aðgreindar frá sveiflum vegna veðurfars. Áhrif framhlaupsins á rennsli eru síðan fundnar fyrir meðalár. Í ljós kemur að þáttur sumarafkomu í meðalársrennsli Jökulsár á Brú jókst um 12-13 m³s⁻¹ (400 Gl/ár) vegna aukins flatarmáls fyrstu árin eftir framhlaupið. Úr þessum rennslisauka hefur dregið jafnt og þétt síðan um 1970 vegna hops jökulsins. Aukning í ársmeðalrennsli vegna hrjúfleika jökulyfirborðsins var um 20 m³s⁻¹ (630 Gl/ár) í nokkur ár frá 1964 og var þessi rennslisauki ekki að fullu horfinn fyrr en eftir miðjan áttunda áratuginn. Fyrir meðalár gæti þáttur sumarafkomu í ársrennslinu því hafa aukist úr 60m³s⁻¹ 1960 í um 90 m³s⁻¹ milli 1964-1970. Haldist veðurfar óbreytt frá því sem nú er, ætti þáttur sumarafkomu í rennsli í Jökulsá á Brú að minnka jafnt og þétt á næstu áratugum úr 65 m³s⁻¹ í 55-60 m³s⁻¹ fyrir meðalár.

Þegar leiðrétt hefur verið fyrir rennslisaukanum í Jökulsá á Brú vegna framhlaupsins á árunum 1964-1991, má finna langtímahlutfall grunnrennslis í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum. Þetta hlutfall, ásamt áætluðum breytingum á rennsli Jökulsár á Fjöllum vegna framhlaups Dyngjujökuls 1951, er notað til að meta rennsli Jökulsár á Brú á tímabilinu 1940-1963. Niðurstöðurnar benda til að meðalrennslið 1940-1963 hafi verið um 15 m³s⁻¹ (470 Gl/ár) lægra en meðalrennsli tímabilsins 1964-1991.

EFNISYFIRLIT

1. Inngangur	4
2. Áhrif framhlaupa á afrennsli	4
3. Gögn	6
3.1. Skráðar heimildir	6
3.2. Loftmyndir	7
3.3. Kort	7
3.4. Afkomumælingar	7
4. Framhlaupið 1963-1964	8
4.1. Gangur framhlaupsins	8
4.2. Líkan af yfirborði fyrir og eftir framhlaup	9
5. Áhrif framhlaupsins á afrennsli	14
5.1. Rennslisgögn	14
5.2. Mælt rennsli 1940-1991	17
5.3. Reiknað rennsli vegna stækkunar Brúarjökuls í framhlaupi	17
5.4. Samband rennslis í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum	19
5.5. Rennslisauki vegna úfins jökuls að loknu framhlaupi	22
5.6. Reiknað rennsli Jökulsár á Brú 1940-1963	26
6. Samandregnar niðurstöður	28
7. Lokaorð	29
8. Heimildir	30
Viðauki A. Reiknað rennsli Jökulsár á Brú 1940-1991	32
Viðauki B. Loftmyndir notaðar við ákvörðun jaðars Brúarjökuls	34

MYNDSKRÁ

1. mynd	Staðsetningarkort.	5
2. mynd	Yfirborð Brúarjökuls. .	7
3. mynd	Lega jökuljaðars Brúarjökuls á ýmsum tímum frá 1890-1995.	8
4. mynd	Hæðarbreytingar á yfirborði Brúarjökuls 1988-1995.	10
5. mynd	Mæld og áætluð hæð Brúarjökuls 1960, 1964, 1988.	11
6. mynd	Líkan af yfirborði Brúarjökuls 1960.	12
7. mynd	Líkan af yfirborði Brúarjökuls 1964.	12
8. mynd	Hæðarbreytingar jökulyfirborðs í metrum milli 1964 og 1960.	13
9. mynd	Staðsetning vatnshæðarmæla.	15
10. mynd	a) Mælt ársmeðalrennsli Jökulsár á Brú og Jökulsá á Fjöllum. b) Hitastig á Teigarhorni 1940-1991.	16
11. mynd	Sumarafkoma á Brúarjökli 1994.	18
12. mynd	Flatardreifing, líkan af yfirborði Brúarjökuls 1960 og 1964.	18
13. mynd	Þættir rennslis í jökulá sem rennur frá framhlaupsjökli.	20
14. mynd	Rennsli Jökulsár á Brú sem hlutfall af rennsli Jökulsár á Fjöllum.	23
15. mynd	Reiknaður rennslisauki í Jökulsá á Brú.	23
16. mynd	Myndmælt snið upp sporð Brúarjökuls í júní 1964.	24
17. mynd	Mat á flangtíma rennslissveiflum Jökulsár á Brú vegna framhlaupa.	26
18. mynd	Reiknað og mælt rennsli Jökulsár á Brú og mælt rennsli Jökulsár á Fjöllum.	27

TÖFLUSKRÁ

1. tafla	Þekkt framhlaup Brúarjökuls.	10
2. tafla	Framhlaupið Brúarjökuls 1963-1964.	13
3. tafla	Vatnshæðamælar í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum.	16
4. tafla	Reiknað afrennsli frá Brúarjökli.	19
5. tafla	Loftmyndir af Brúarjökli - áferð jökulyfirborðs	25
6. tafla	Loftmyndir af Dyngjujökli - áferð jökulyfirborðs	25

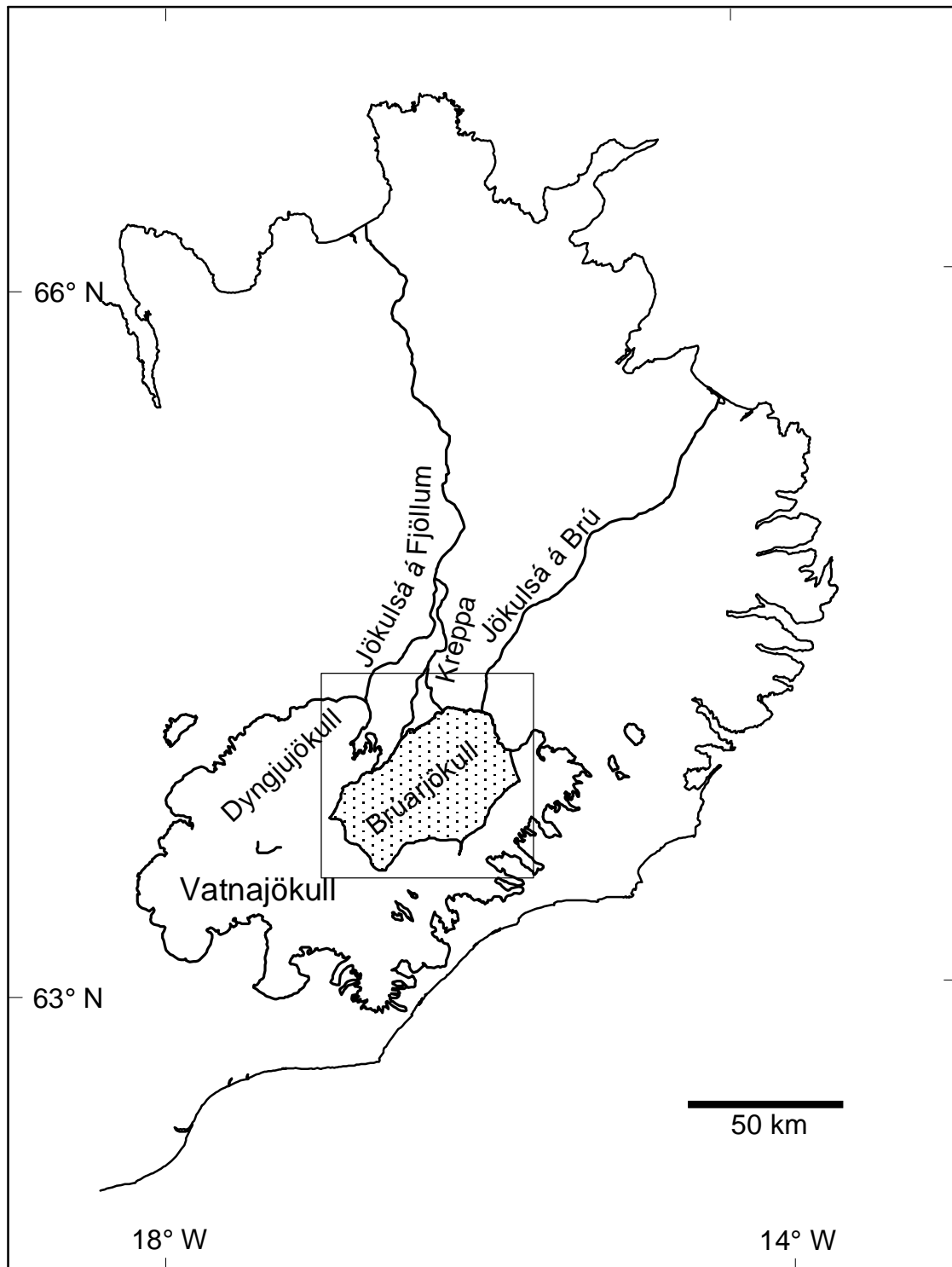
1. INNGANGUR

Stór hluti rennslis í Jökulsá á Fjöllum og Jökulsá á Brú kemur úr skriðjöklunum í norðanverðum Vatnajökli, Brúarjökli og Dyngjújökli (1. mynd). Framhlaup verða í báðum jöklunum og eru framhlaup Brúarjökuls þau stærstu sem verða hér á landi. Í framhlaupunum vex flatarmál skriðjöklanna, yfirborðshæð þeirra breytist og jökullinn verður úfinn með jökulsprungum og ísborgum. Þessar breytingar á stærð og yfirborði valda breytingum í jöklaleysingu og afrennsli frá jöklunum sem ekki eru tengdar veðurfari. Framhlaup jökla má hins vegar sjá fyrir og mikilvægt er við nýtingu jökulvatns að kunna skil á þeim langtímasveiflum í afrennsli sem þau valda. Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir framhlaupi Brúarjökuls 1963-64 og lagt mat á áhrif breytinganna á jöklinum á langtímarennsli Jökulsár á Brú. Til þess eru notuð gögn um jöklabreytingar, mælingar á afkomu og skriðhraða og mælt rennsli í jökulánum. Verkefnið er hluti af samstarfi Raunvísindastofnunar Háskólans og Landsvirkjunar og hefur Landsvirkjun greitt mestan hluta kostnaðar við verkið.

2. ÁHRIF FRAMHLAUPA Á AFRENNSLI

Afrennsli frá jöklum er háð veðurfari, einkum sumarhita. Enn er ekki hægt að sjá fyrir breytingar á loftslagi svo að spá megi með vissu um rennslisbreytingar af þeim orsökum. Hins vegar eru framhlaup í mörgum stærstu skriðjöklum Vatnajökuls lotubundin og sjá má fyrir áhrif þeirra á rennsli jökuláa sem renna frá jöklunum. Þar er um eftirtalda þætti að ræða:

1. Í framhlaupum er mikill ísmassi á hraðri hreyfingu. Núningur við botn jökulsins auk núnings vegna innri aflögunar veldur töluverðri bráðnun. Hitastig íslenskra jökla er við bræðslumark vatns, og því ætti stöðuorkubreyting jökulsins öll að nýtast til bræðslu. Þetta bræðsluvatn skilar sér í ár að jafnaði kringum lok framhlaups og veldur að öðru leyti ekki breytingum á afrennsli.
2. Fyrir kemur að framhlaup loki dölum og til verði jökulstífluð lón sem síðan tæmast í jökulhlaupum. Þetta hefur sjaldan áhrif á heildarafrennsli en getur breytt rennslisháttum þeirra áa sem frá jöklinum renna.
3. Í flestum framhlaupum gengur jaðarinn fram svo að jökullinn nær yfir aukið svæði að loknu framhlaupi. Ísmassi flyst frá efri hluta jökulsins (forðasvæði) niður á neðri hlutann (jökultunguna) og meðalhæð jökulsins lækkar. Hvort tveggja veldur aukinni leysingu. Að sama skapi minnkar leysing jafnt og þétt þegar lengra líður frá framhlaupi vegna þess að jökullinn hopar (minnkar) og hækkar. Þessa breytingu í afrennsli táknum við hér sem ΔQ_f .



1. mynd. Staðsetningarkort. Ramminn markar svæðið sem sýnt er á 2., 6.-8. mynd.

4. Jökulyfirborðið brotnar upp og springur í framhlaupum svo snertiflötur íss og lofts verður mun meiri fyrst eftir framhlaup en var fyrir það. Þetta veldur því að þeir orkuþættir sem valda leysingu (sólgeislun, loftraki og lofthiti) nýtast betur en ella vegna aukins iðustraums og lækkunar endurkastsstuðuls. Mishæðir sem þannig myndast á leysingarsvæðinu, eru mun hærri en sem nemur vetrarákomunni og standa því uppúr strax að vori fyrstu árin eftir framhlaup. Því vex leysing framan af sumri miðað við það sem áður var. Breytingu í afrennsli vegna þessa táknum við sem ΔQ_n .

5. Við framhlaup geta vatnaskil í jöklinum flust til vegna breytinga í lögum hans. Tilfærsla vatnaskila innan jökuls breytir ekki heildarafrennsli frá jöklinum en getur breytt verulega hlutföllum milli jökuláa. Þá er hugsanlegt að vatnsþrýstingur við botninn sé lægri fyrst eftir framhlaup en þá ræður lögum botnsins mestu um rennslisleiðir vatnsins. Þetta getur skipt miklu máli á stöðum þar sem halli jökulyfirborðs er annar en jökulbotns (Helgi Björnsson, 1988).

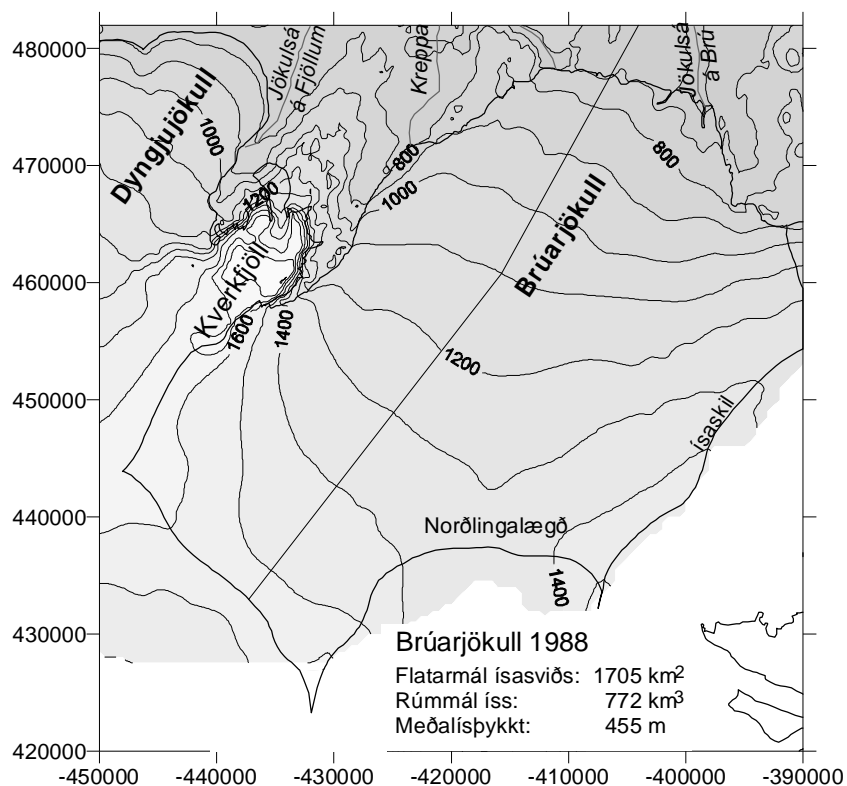
Stækkun jökulsins og aukinn virkni orkustrauma við yfirborð ættu að auka leysingu eftir framhlaup. Hingað til hefur lítið verið gert til að meta þessi áhrif framhaupa á bráðnun og afrennsli. Magnús T. Guðmundsson og Helgi Björnsson (1992) mátu áhrif framhlaupsins í Tungaárjökli og Sylgjujökli 1945 á afrennsli frá jöklunum. Niðurstöðurnar bentu til þess að afrennsli vegna jöklaleysingar hefði minnkað um 14-17% frá 1945 til 1992. Voru þá aðeins metin áhrif vegna minnkunar jökulsins, engin gögn voru tiltæk um áhrif framhlaupsins á virkni orkustrauma við yfirborð.

Í þessari skýrslu er lýst breytingum sem urðu á Brúarjökli við framhlaupið 1963-64 (4. kafli). Í öðru lagi er metið hvaða áhrif aukin stærð jökulsins hefur haft á afrennsli (5.3. kafli). Í þriðja lagi eru rennslisgögn fyrir Jökulsá á Fjöllum og Jökulsá á Brú notuð til að leggja mat á áhrif aukinnar virkni orkustraums fyrstu árin eftir framhlaupið (5.4. og 5.5. kaflar). Í fjórða lagi eru rennslisgögn fyrir Jökulsá á Fjöllum og Jökulsá á Brú ásamt niðurstöðum um áhrif framhlaupsins notuð til að áætla rennsli síðartöldu árinna á árunum 1940-1963 (5.6. kafli).

3. GÖGN

3.1. Skráðar heimildir

Nokkrar ferðir voru farnar til mælinga á framskriði Brúarjökuls haustið og veturinn 1963-64 og settar niður stikur við jaðarinn auk þess sem flogið var yfir hann (Jón Eypórsson, 1963, 1964; Sigurður Þórarinnsson, 1964, 1969). Þá lýsti E. Todmann (1955) Brúarjökli og staðsetti jaðar hans á 4. og 6. áratugnum



2. mynd. Yfirborð Brúarjökuls samkvæmt íssjarmælingum vorið 1988 ásamt helstu einkennisstærðum. Kort RH og LV (Helgi Björnsson og Finnur Pálsson, 1991).

3.2. Loftmyndir

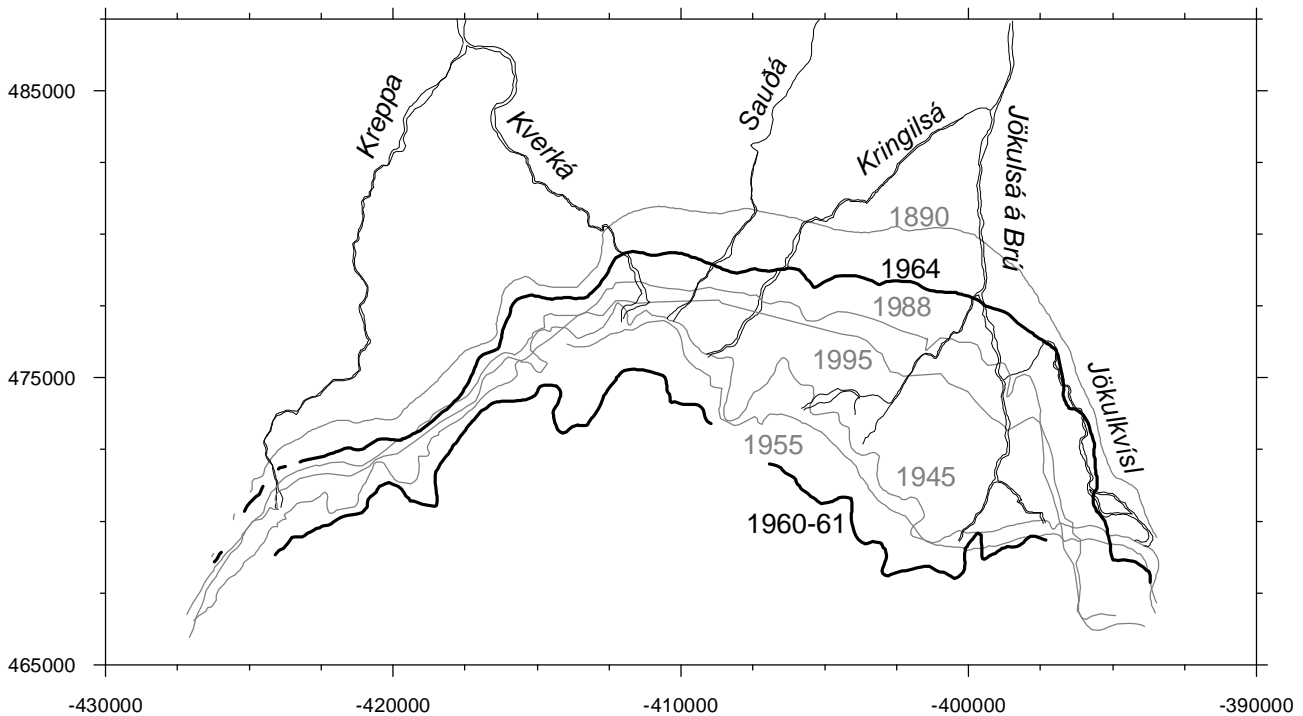
Til eru loftmyndir af Brúarjökli, hluta hans eða honum öllum, frá árunum 1945/46, 1960, 1961, 1964, 1967 og 1970, auk síðari myndatöku.

3.3. Kort

Kort eru til byggð á mælingum 1938 (LMÍ), 1945/46 (AMS) og á kortum Orkustofnunar sem teiknuð eru eftir loftmyndunum frá 1967 sést jaðar jökulsins en hæðarlínur ná aðeins rétt inn fyrir jaðarinn. Kort Raunvísindastofnunar og Landsvirkjunar af Brúarjökli (Helgi Björnsson og Finnur Pálsson, 1991) sýnir yfirborð og botn jökulsins árið 1988 (2. mynd).

3.4. Afkomumælingar

Afkomu- og skriðhraðamælingar Raunvísindastofnunar og Landsvirkjunar (Helgi Björnsson og fl. 1994, 1995) fyrir árin 1993, 1994 og 1995 gefa upplýsingar um sumarleysingu og breytingar í lögum jökulsins frá kortlagningunni 1988.



3. mynd. Lega jökuljaðars Brúarjökuls á ýmsum tímum. Byggt á loftmyndum Lí frá 1960, 1961 og 1964, korti AMS, korti RH og LV, upplýsingum frá Oddi Sigurðssyni (jaðar 1995) og Todtmann (1955)

4. FRAMHLAUPIÐ 1963-1964

Loftmyndir frá 1960, 1961 og 1964 hafa verið notaðar til að staðsetja jaðar jökulsins fyrir og eftir framhlaupið (3. mynd). Á loftmyndunum frá 1960 og 1961 er sporðurinn sléttur og hallalítill og samanburður við kort frá 1945 sýnir sumstaðar yfir 2 km hop á 15 árum. Því getur verið að jaðarinn við upphaf framhlaups haustið 1963 hafi legið 200-300 m innar. Í ljósi þess að í framhlaupinu skreidd jökullinn fram um marga kílómetra breytir þessi hugsanlega 200-300 m skekkja litlu um mat á breytingum í framhlaupinu.

4.1. Gangur framhlaupsins

Frá framhlaupinu 1890 (1. tafla) fram til 1963 hogaði Brúarjökull (Todtmann, 1955) og 1960 nam mesta hop um 11 km í austanverðum Kringilsárrana. Framhlaupið hófst haustið 1963 og var gangur þess rakinn af Jóni Eyþórssyni (1963, 1964) og er það sem hér fer á eftir byggt á lýsingu hans (sjá einnig 2. töflu).

Þann 14. október 1963 var jökullinn úfinn að sjá en ekki farinn að ganga fram. Brestir heyrðust á Jökuldal þann 16. október en óljóst og reyndar ólíklegt að þeir brestir hafi stafað frá jöklinum. Líklegra er að þota hafi rofið hljóðmúrinn yfir Austurlandi. Mánuði síðar, eða 14. nóvember, var

1. tafla. Þekkt framhlaup Brúarjökuls.

Ár	Gögn, upplýsingar, atburðir	Heimildir
1625	Flóð í Jökulsá á Brú, brú tók af	Jón Eypórsson (1963)
1720-30	Óljósar frásagnir	Jón Eypórsson (1963)
1810	Lýsingar Jökuldælinga og jökulgarðar. Gekk 1-1.6 km skemmra fram í Kringilsárrana en 1890	Þorbjörn Kjerúlf (1962) Todtmann (1955)
1890	Lýsing Þorbjarnar Kerúlf. Mesti framgangur Brúarjökuls frá lokum síðasta jökulskeiðs	Þorbjörn Kjerúlf (1962) Sigurður Þórarinsson (1969) Todtmann (1955)
1963-64	Skráðar heimildir, kort, loftmyndir. Gekk um 2 km skemmra fram en 1890 og nokkur hundruð metrum skemmra en 1810	Jón Eypórsson (1963, 1964) Sigurður Þórarinsson (1969)

2. tafla. Framhlaup Brúarjökuls 1963-64.

flatarmál jökuls fyrir framhlaup	1580 km ²
flatarmál jökuls eftir framhlaup	1740 km ²
stækkun jökuls við framhlaup	160 km ²
stærð leysingasvæðis fyrir framhlaup	420 km ²
stærð leysingasvæðis eftir framhlaup	580 km ²
mesta framskrið	9-9.5 km
tími framskriðs	3-6 mánuðir
mesti hraði framskriðs	>100 m/dag
mesta þykktaraukning á leysingasvæði	260 m
rúmmál íss sem skreið af ákomusvæði til leysingasvæðis	69 km ³
meðallækkun ákomusvæðis	60 m

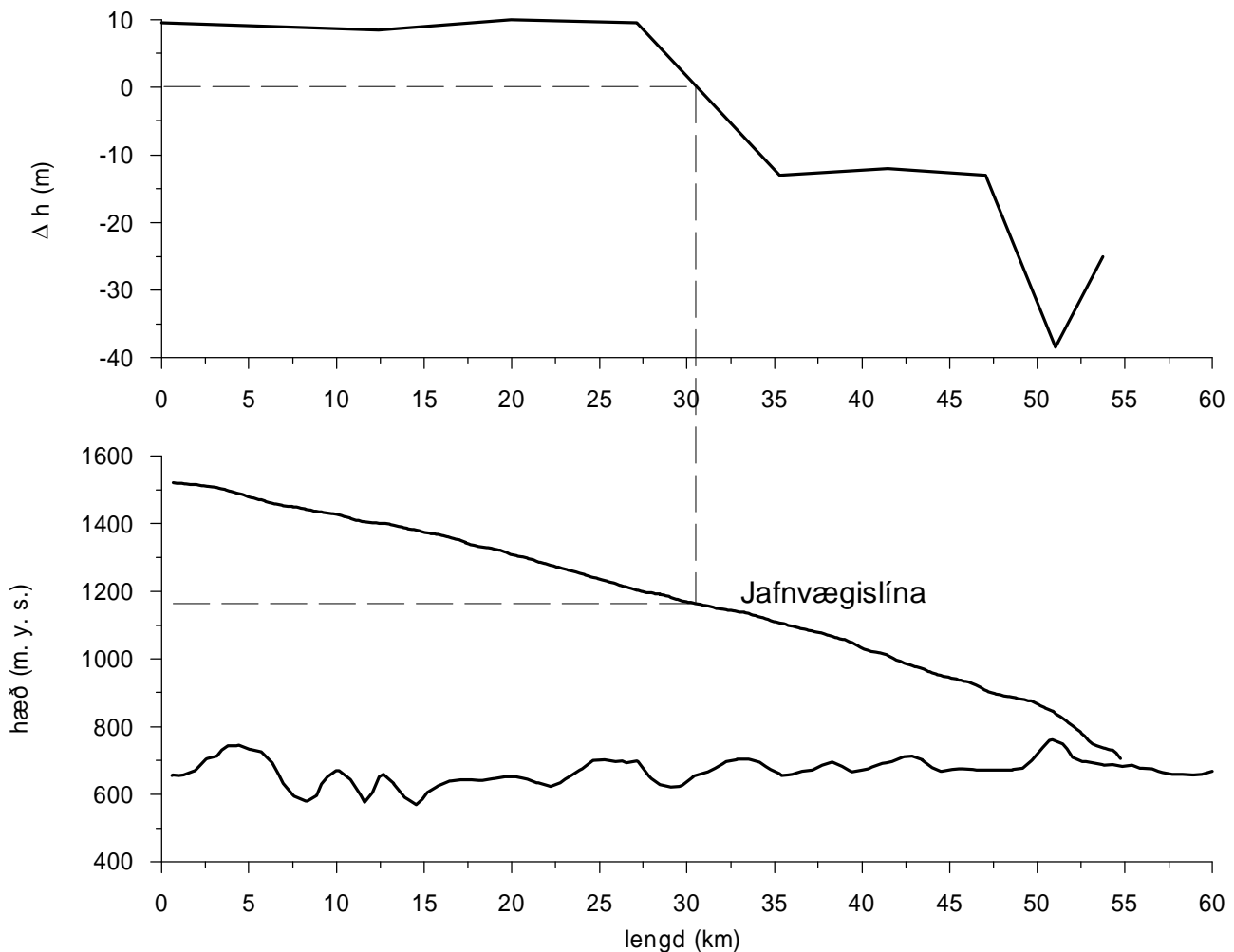
jaðarinn genginn fram um 2-3 km í Kringilsárrana. Þann 4. janúar 1964 mældist skriðhraði um 1 m /klst. en þá var mesta framskriðið um garð gengið; við Sauðá gekk jökullinn fram um 4-5 km fyrir 4. janúar en alls 276 m síðar. Í flugferðum 12. janúar og 11. mars sást að jökullinn var sprunginn suður á ísaskil norðan Esjufjalla og vestan frá Kverkfjöllum. Þann 10. mars vantaði 2-3 km á að framhlaupið næði að Hraukum (jökulgörðunum frá framhlaupinu 1890) í Kringilsárrana. Flugmyndir af Brúarjökli frá 16. júní 1964 sýna að jökullinn var þá orðinn kyrrstæður sem má einkum sjá af því að nokkur snjór frá vetrinum var í sprungum víðast hvar.

Engin gögn eru tiltæk um Brúarjökul frá síðsumri 1961 (loftmyndir) til hausts 1963. Ef atburðarás

hefur verið með líkum hætti og á öðrum framhlaupsjöklum í Vatnajökli, varð til framhlaupsbylgja í Brúarjökli í síðasta lagi sumarið 1963 eða snemma það haust. Um miðjan október var bylgjan við það að ná jaðri. Mestur hluti framskriðsins virðist hafa orðið á 2-3 mánuðum eftir miðjan október. Við Sauða skreið jökullinn fram um nálægt 4 km eða 45-70 m/dag að jafnaði. Í Kringilsárrana austanverðum varð mesta framskriðið, rúmlega 9 km. Hafi það framskrið allt orðið á þremur mánuðum, var meðalhraðinn rúmlega 100 m/dag. Í framhlaupinu stækkaði Brúarjökull um 160 km², úr 1580 km² 1960 í 1740 km² sumarið 1964.

4.2. Líkan af yfirborði fyrir og eftir framhlaup

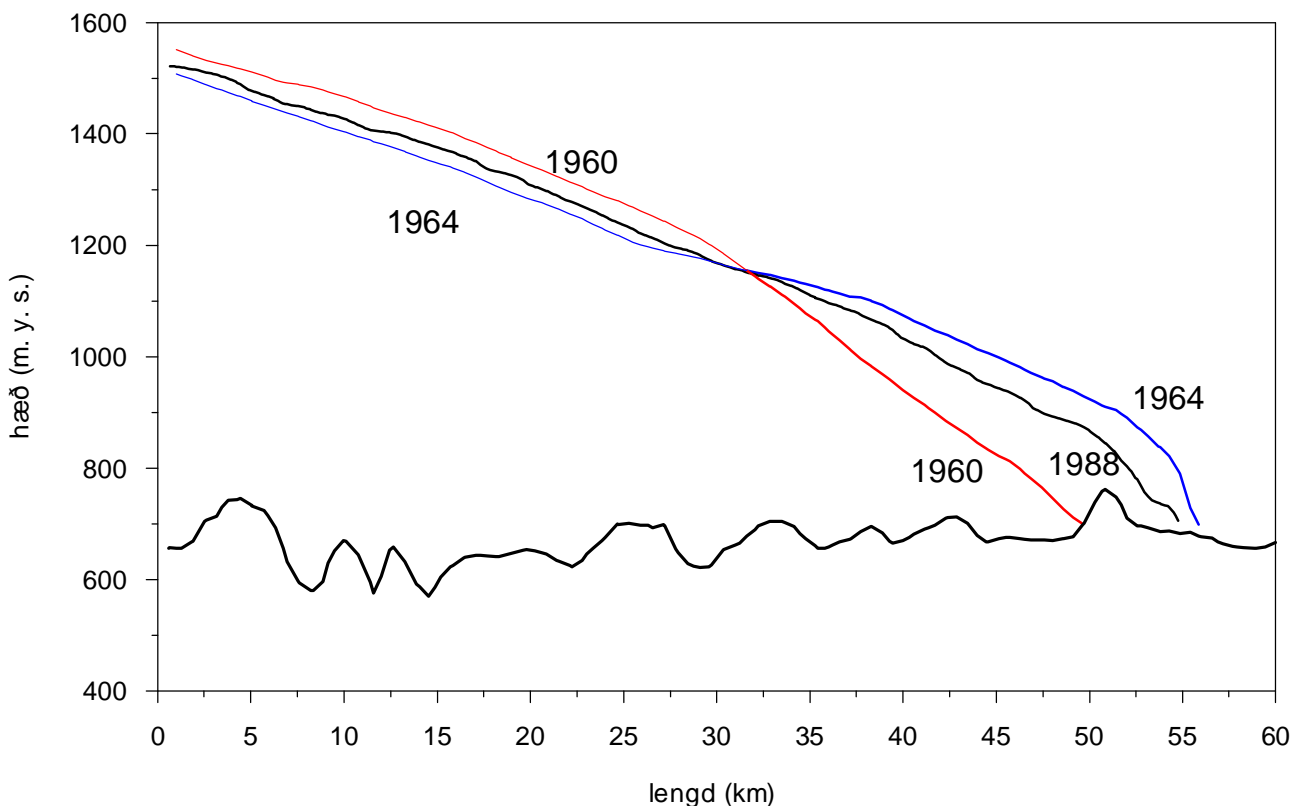
Framhlaupsjöklum er skipt í tvö svæði: forðasvæði (reservoir area) þar sem yfirborðið hækkar á milli framhlaupa á meðan framhlaupstungan (receiving area) rýrnar og lækkar. Í framhlaupunum snýst dæmið við, ís berst frá forðasvæði niður á framhlaupstungu. Á Tungnaárjökli lætur nærri að jafnvægislínan marki skilin milli þessara tveggja svæða (Magnús T. Guðmundsson og Helgi Björnsson, 1992) og mælingar síðustu ára á afkomu og hreyfingu (Helgi Björnsson og fl. 1994,



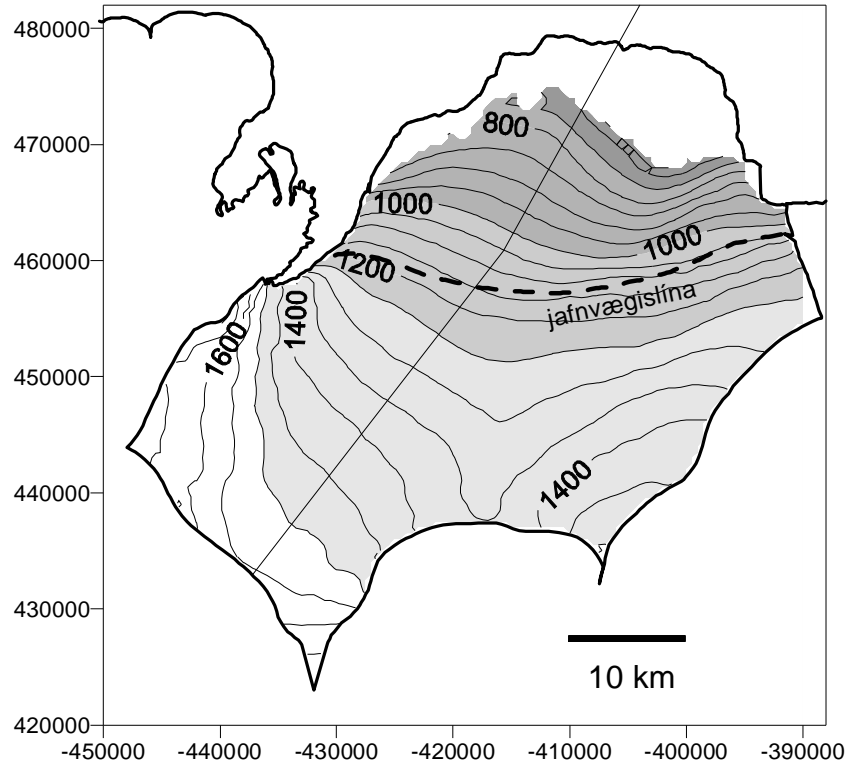
4. mynd. Hæðarbreytingar (deltah) á yfirborði Brúarjökuls 1988-1995 (sjá staðsetningu sniðs á 2. mynd). Byggt á korti RH og LV og GPS mælingum (Helgi Björnsson of fl. 1994, 1995)

1995) benda til þess að svo sé einnig með Brúarjökul (4. mynd) og reyndar aðra framhlaupsjökla í vestan- og norðanverðum Vatnajökli. Við gerum því ráð fyrir því hér að forðasvæðið samsvari ákomusvæðinu og framhlaupstungan leysingasvæðinu. Í framhlaupum þessara jökla má því búast við að hæðarbreytingar séu litlar sem engar við jafnvægislínuna. Út frá þessu var gengið hér við mat á ísflutningi og breytingum í hæð jökulyfirborðsins.

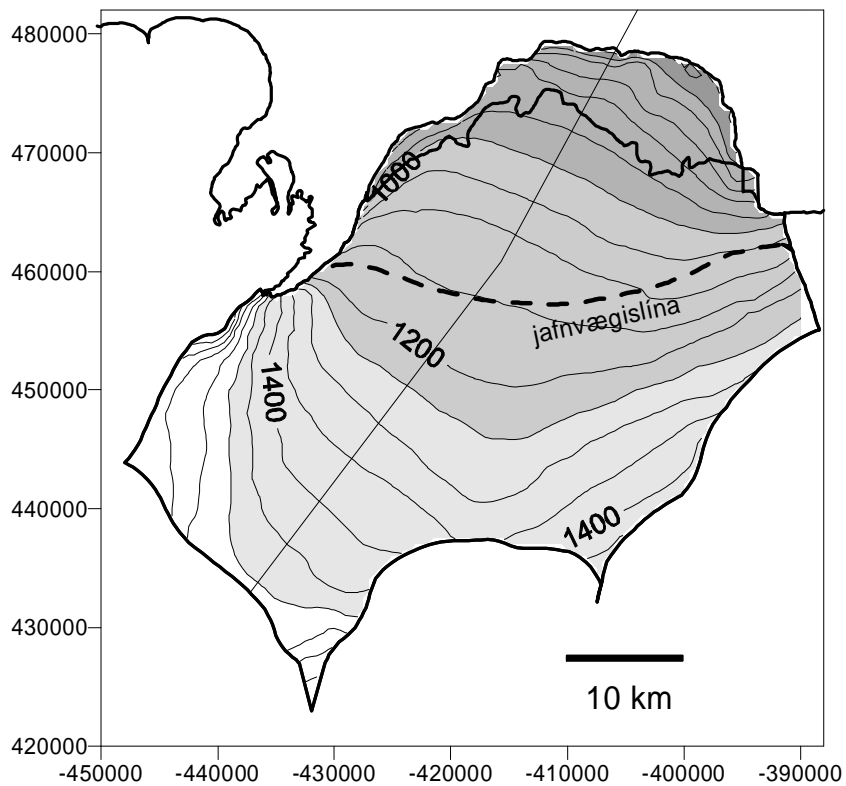
Hæð og lögun sporðsins í júní 1964 var myndmæld á nokkrum sniðum af Verkfræðistofunni Hnit. Voru þau gögn notuð til að gera kort af neðsta hluta jökulsins eftir framhlaupið. Lega jafnvægislínunnar á Brúarjökli var metin út frá breytingum í yfirborðshæð á árunum 1988 til 1995 (4. mynd) auk þess sem gervitunglamyndir voru hafðar til hliðsjónar. Hæð jökulyfirborðsins nærri jaðri jökulsins í lok framhlaups 1964 er byggð á myndmælingu Verkfræðistofunnar Hnit. Hæð jökulsins við jafnvægislínuna er talin sú sama og á kortinu frá 1988. Milli myndmælds svæðis og jafnvægislínu var halli yfirborðs áætlaður jafn enda benda ljósmyndir af jöklinum ekki til annars. Á loftmyndunum frá 1960 var sporður jökulsins sléttur og hallalítill. Við höfum því áætlað að jökulyfirborðið sumarið 1960 hafi haft nokkuð jafnan halla frá sporði upp að jafnvægislínu. Óvissa er hér töluverð í lögun jökulsins en ekki var hlaupið að því að beita myndmælingu þar sem nokkurra kílómetra breið landræma sem lá meðfram jöklinum árið 1960 hefur verið undir honum allt frá 1964. Því eru engin þekkt kennileiti næst jöklinum sem hægt hefði verið að nota til hæðarviðmiðunar.



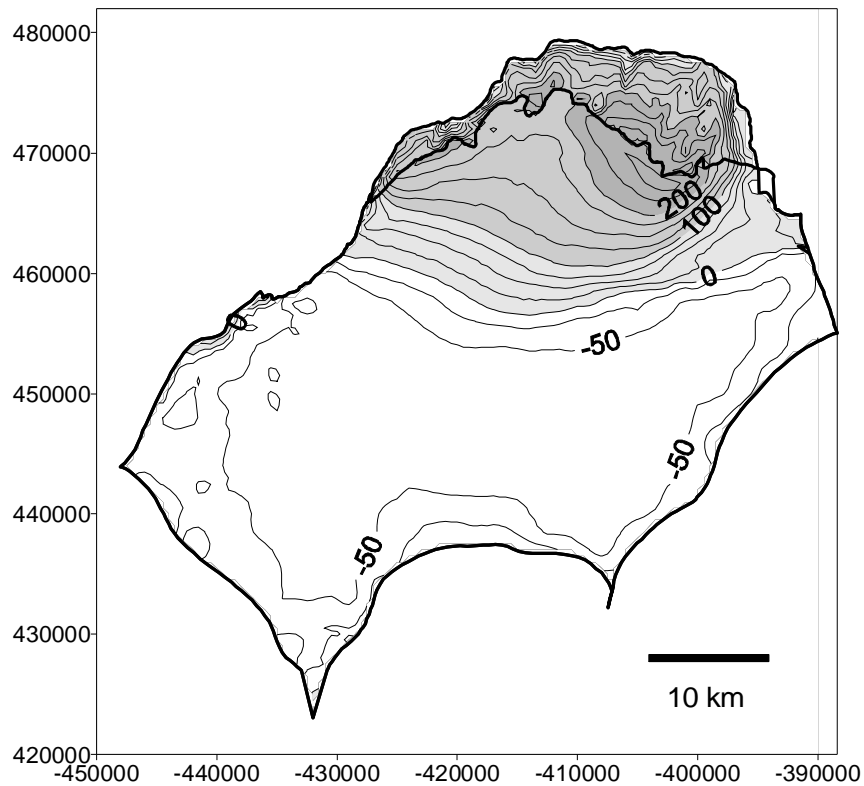
5. mynd. Mæld og áætluð hæð Brúarjökuls 1960, 1964 og 1988 (sjá staðsetningu sniðs á 2. mynd)



6. mynd. Líkan af yfirborði Brúarjökuls 1960, skömmu fyrir framhlaup. Byggt á legu jaðars og jafnvægislínu auk þess sem rúmmál jökulsins er talið hafa verið það sama 1960 og 1964.



7. mynd. Líkan af yfirborði Brúarjökuls 1964, í lok framhlaups. Byggt á myndmælingum Verkfræðistofunnar Hnit, legu jafnvægislínu og áætlaðri hæðarbreytingu á ákomusvæði milli 1964 og 1988.



8. mynd. Hæðarbreytingar jökulyfirborðs í metrum milli 1960 og 1964. Mismunur líkana á 6. og 7. mynd.

Erfiðara er að meta með nákvæmni hæð ákomusvæðisins fyrir og eftir framhlaupið. Engar hæðarmælingar eru til og var því stuðst við óbeinar aðferðir við mat á líklegum hæðarbreytingum ákomusvæðisins á þeim 24 árum sem liðu frá framhlaupinu 1964 og þar til jökullinn var íssjármældur 1988. Fyrstu árin, meðan ísskrið var nær ekkert hefur hækkingun yfirborðsins numið ársafkomunni. Síðustu árin hefur ísskrið flutt 10-50% ársafkomu ákomusvæðisins niður á leysingasvæðið (Helgi Björnsson og fl., 1994, 1995) þannig að hækkingun á safnsvæðinu er nú hægari. Meðaltal ársafkomu á ákomusvæðinu var 1.3 m af ís 1993-1995. Sé gert ráð fyrir að ísskrið hafi nánast ekkert verið fyrstu 12 árin, en að það hafi flutt burtu að meðaltali 30% ársafkomunnar næstu 12 ár, fæst 26 m meðalhækkingun ákomusvæðisins á árunum milli 1964 og 1988. Þetta grófa mat var notað til að reikna hæðarmun ákomusvæðis 1988 og 1964.

Til að meta hæð ákomusvæðisins fyrir framhlaupið og meðalhækkingun þess í hlaupinu, gerum við ráð fyrir að rúmmál jökulsins hafi ekki breyst meðan á framhlaupinu stóð svo að rúmmál íss sem hvarf af ákomusvæðinu er jafnt aukningu íss á leysingasvæðinu. Þetta er nærri lagi því rýrnun vegna núningvarma var aðeins brot úr prósentu af heildarrúmmáli.

Af framansögðu er ljóst að vegna skorts á mælingum eru 6. og 7. mynd ekki raunveruleg kort af yfirborði jökulsins heldur líkön byggð á ofangreindum forsendum um afkomu og hreyfingu jökulsins eftir framhlaupið fram að gerð korts árið 1988. Þau eru nógu nákvæm til að meta rúmmálsflutninga í framhlaupinu og ættu að vera nærri lagi hvað varðar breytingar í flatarmálsdreifingu yfirborðsins við framhlaupið. Þær hæðarbreytingar, ásamt auknu flatarmáli, skipta höfuðmáli við mat á áhrifum framhlaupsins á afrennsli frá jöklinum.

5. ÁHRIF FRAMHLAUPSINS Á AFRENNSLI

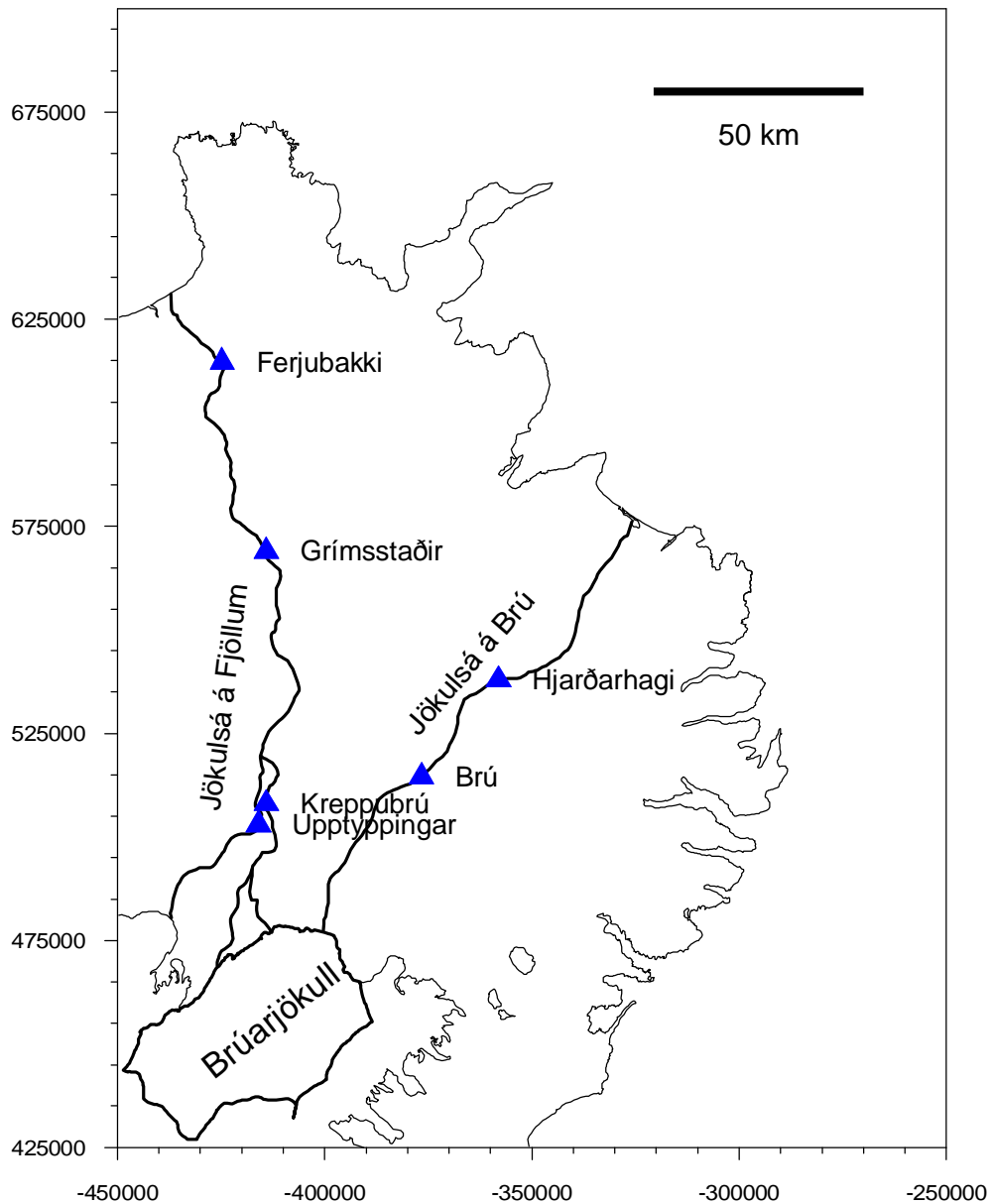
Vatn frá Brúarjökli rennur til Jöklsár á Brú og Jökulsár á Fjöllum. Árið 1988 var samanlagt vatnasvið Kreppu og Kverkár á jökli 303 km² en Jökulsár á Brú 1410 km² (Helgi Björnsson og Finnur Pálsson, 1991). Áhrif framhlaupa í Brúarjökli koma því að einhverju leyti fram í Jökulsá á Fjöllum auk Jökulsár á Brú. Til samanburðar mældist vatnasvið Jökulsár á Fjöllum í Dyngjujökli 1144 km² 1989 (Helgi Björnsson og fl. 1992). Lauslega áætlað er því um einn fimmti hluti jökulþáttarins í Jökulsá á Fjöllum ættað úr Brúarjökli en fjórir fimmtu úr Dyngjujökli.

Breytingar á afrennsli frá Brúarjökli eru hér skoðaðar á tvennan hátt. Í fyrsta lagi eru rennslisgögn fyrir Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum skoðuð og reynt að greina þátt framhlaupa í rennslinu. Í öðru lagi er breyting í stærð og hæðardreifingu yfirborðs Brúarjökuls ásamt mældum gögnum um leysingu á jöklinum í meðalári notuð til að reikna afrennsli vegna jöklaleysingar fyrir og eftir framhlaupið. Þannig fæst mat á áhrifum stærðar og flatardreifingar jökulsins. Síðan er mælt afrennsli og reiknað borið saman og út frá þeim samanburði reynt að meta þátt aukinnar virkni orkustrauma við jökulyfirborð í afrennsli frá jöklinum. Að lokum er rennsli Jökulsár á Brú á tímabilinu 1940-1963 metið út frá rennsli Jökulsár á Fjöllum og áhrifum framhlaupanna í Brúarjökli 1963-1964 og Dyngjujökli 1951.

5.1. Rennslisgögn

Síritandi rennslismælar hafa verið í Jökulsá á Fjöllum frá 1955 og í Jökulsá á Brú frá 1963. Reglubundnar mælingar í Jökulsá á Fjöllum hófust þó 1939, með aflestri á kvarða. Samskonar mælingar voru gerðar við Jökulsá á Brú frá 1950 en þau gögn munu ekki hafa skilað sér til Vatnamælinga nema að mjög litlu leyti. Á 9. mynd eru staðsetningar sírita í ánum sýndar og í 3. töflu er listi yfir reglubundnar vatnamælingar og sírita í Jökulsánum tveimur.

Við höfum notað Hjarðarhaga (vhm 110) í Jökulsá á Brú en Ferjubakka (vhm 020) í Jökulsá á Fjöllum. Þessir mælar eru vissulega mjög fjarri jökli og áhrif afrennslis af jökulvana svæðum því meiri en í öðrum mælum. En þetta eru einu mælarnir sem ná til alls tímabilsins sem liðið er frá framhlaupi Brúarjökuls. Þá sýnir samanburður við aðra mæla í sömu ám, að einkenni rennslisins haldast svo til óbreytt þ.a. sveiflur vegna jöklaleysingar koma fram á svipaðan hátt og í mælum sem liggja nær jökli.

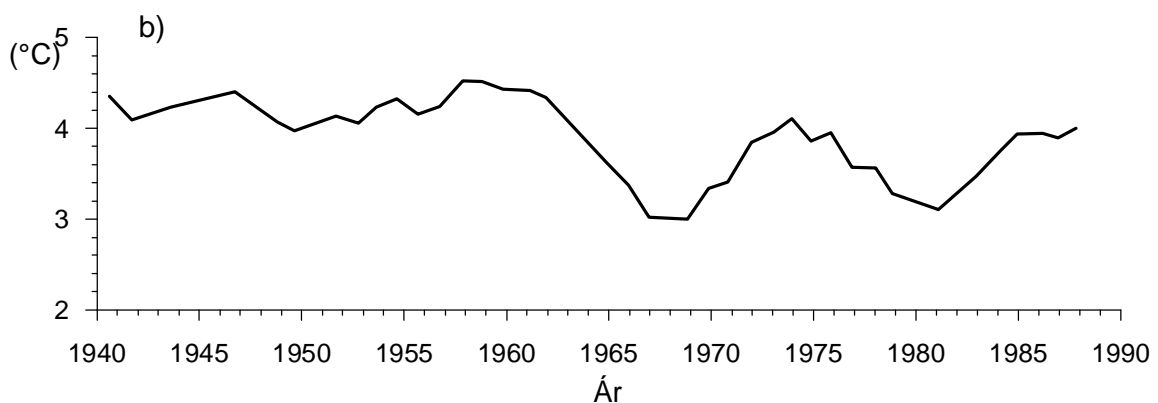
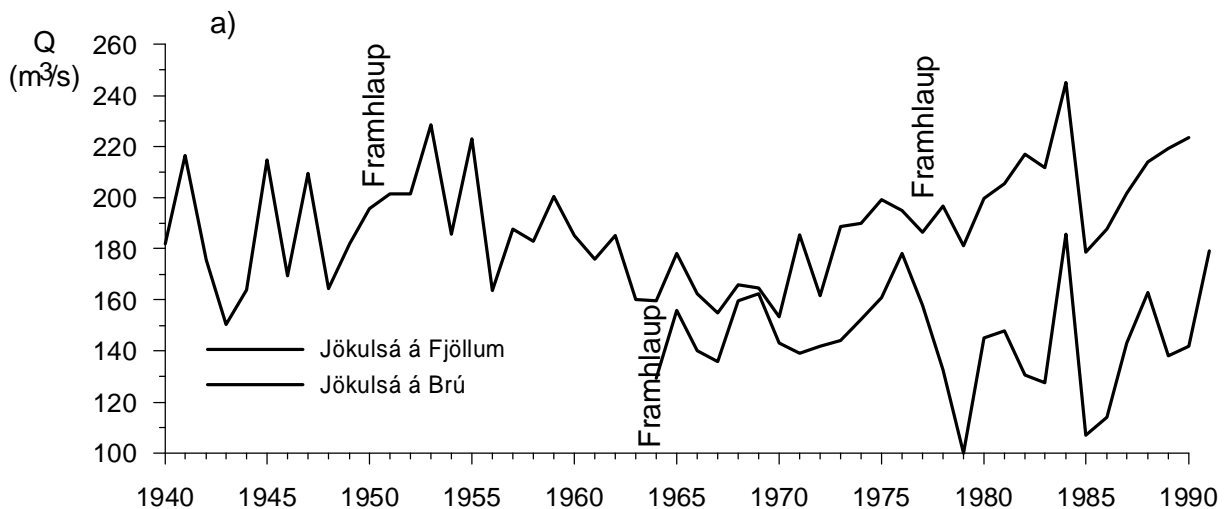


9. mynd. Vatnshæðarmælar Orkustofnunar í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum.

Lindavatn er stór hluti stór hluti rennslis í Jökulsá á Fjöllum. Strax við Upptýppinga er lindavatn yfir helmingur rennslisins og ljóst að stór hluti jöklaleytingar hripar niður í grunnvatn sunnan Dyngjufjalla. Lindapátturinn er hins vegar hverfandi í Jökulsá á Brú. Vegna þessa má búast við að sveiflur vegna jöklaleytingar séu dempaðar í Jökulsá á Fjöllum og skili sér því á lengri tíma.

3. tafla. Vatnshæðarmælir í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum (heimildir um vatnasvið: Sigurjón Rist, 1990, Helgi Björnsson og Finnur Pálsson, 1991).

Vatnshæðarmælir	Vatnasvið alls, km ²	Vatnasvið á jökli 1988-1989, km ²	Upphaf mælinga
020 Jökulsá á Fjöllum, Ferjubakki	7227	1447	1939, aflestur af kvarða fram til 1955
063/102 Jökulsá á Fjöllum, Grímsstaðir	4100	1447	1966
162 Jökulsá á Fjöllum, Upptypingar	1825	1144	1972
163/233 Kreppa, Kreppubrú	835	303	1972
110 Jökulsá á Brú, Hjarðarhagi	3317	1410	1963
164/236 Jökulsá á Brú, Brú	2111	1410	1971



10. mynd. a) Mælt rennsli Jökulsár á Brú og Jökulsár á Fjöllum milli 1940 og 1991 (Orkustofnun, Vatnamælingar 1996. Gagnabanki Vatnamælinga, afgreiðsla 96/2) b) Hitastig á Teigarhorni 1940-1991 (Markús Á. Einarsson, 1991)

5.2. Mælt rennsli 1940-1991

Á 10. mynd sést ársmeðalrennsli í Jökulsánum tveimur á árunum 1940 til 1991. Á myndina eru einnig merkt framhlaup Dyngjújökuls 1951 (Sigurður Þórarinnsson, 1964) og 1977 og Brúarjökuls 1963-1964. Einnig er á myndinni ársmeðalhiti á Teigarhorni á sama tímabili (Markús Á. Einarsson, 1991). Rennsli í Jökulsá á Fjöllum var í lágmarki á árunum 1965-1970 sem einnig var kaldasti hluti þessa tímabils. Engin lægð í úrkomu á Norðausturlandi fylgdi kuldanum á þessum árum (Veðráttan, 1940-1990) svo rekja má rennislægðina til minni sumarleysingar á jöklum vegna kuldans. Athyglisvert er að áhrif seinna kuldatímabilsins, um 1980, eru ekki sjáanleg í rennsli Jökulsár á Fjöllum. Greinilegt er að milli 1964 og 1970 var rennsli Jökulsár á Brú hlutfallslega meira en seinna á tímabilinu. Andstætt við 1964-1970, kemur kuldakastið kringum 1980 vel fram í rennsli Jökulsár á Brú og ekki er talið að úrkomudreifing norðan Vatnajökuls hafi breyst. Séu þessar rennslissveiflur skoðaðar með framhlaup í huga, virðist myndin skýr: Rennsli Jökulsár á Brú var mikið frá framhlaupinu 1964 fram yfir 1970 en rennsli Jökulsár á Fjöllum óx í kjölfar framhlaups Dyngjújökuls haustið 1977. Þá er rennsli Jökulsár á Fjöllum mikið milli 1951 og 1956 eða í 5 ár eftir framhlaup Dyngjújökuls. Gögnin sýna sveiflur í rennsli þessara tveggja áa, sem ekki verða raktar til veðurfars, heldur stafa þær af framhlaupum.

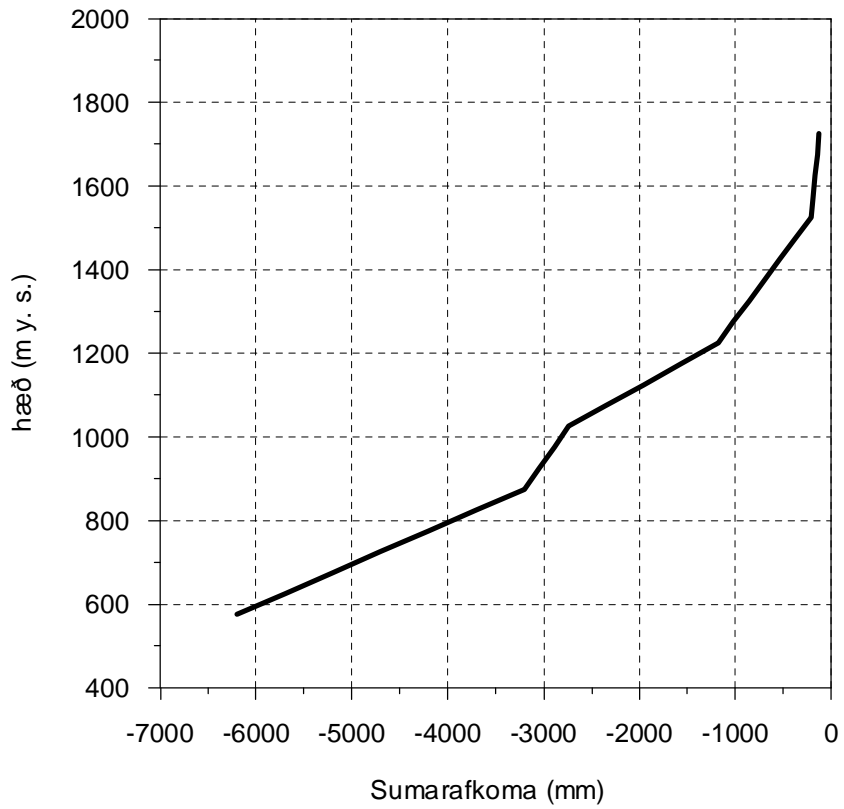
5.3. Reiknað rennsli vegna stækkunar Brúarjökuls í framhlaupi

Sumarveðráttta þau þrjú ár sem afkomumælingar hafa verið gerðar á Brúarjökli (1993-1995) hefur verið misjöfn frá einu ári til annars eins og sést á afkomutölunum (Helgi Björnsson og fl. 1994 og 1995). Sumarið 1993 var kalt og leysing lítil, sumarið eftir var trúlega nærri meðallagi en leysing var frekar mikil sumarið 1995. Því höfum við valið sumarafkomuna sem fall af hæð fyrir 1994 (11. mynd) sem dæmigert meðaltal til að reikna áhrif á afrennsli vegna breytinga í stærð og flatarmálsdreifingu. Afrennslið reiknast sem

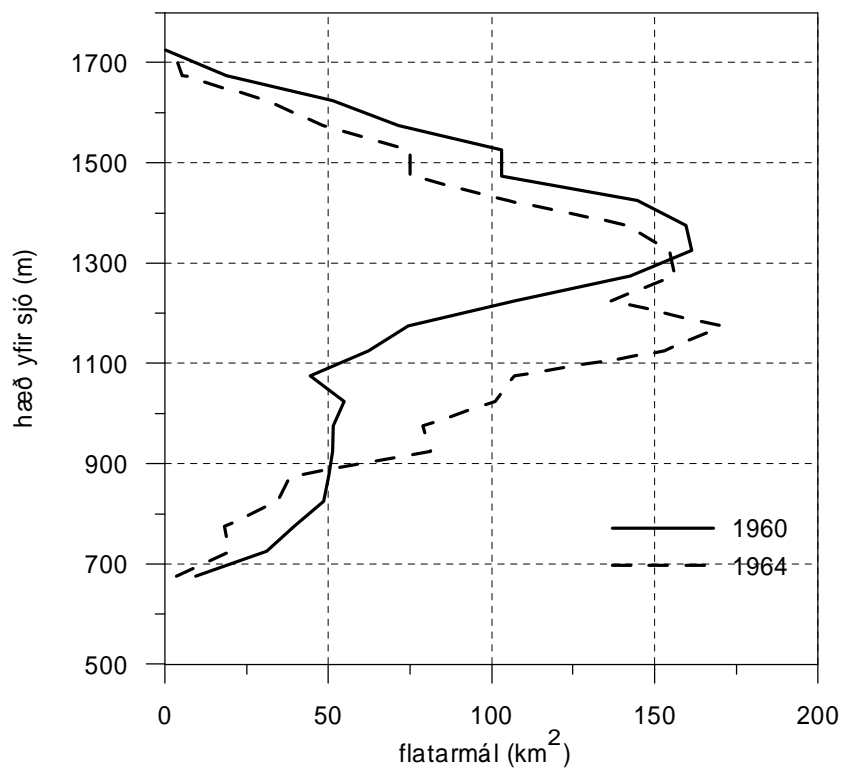
$$B_s = \sum_i b_s(z_i)A(z_i) \quad (1)$$

þar sem $b_s(z_i)$ er sumarafkoma í metrum vatns fyrir hæðarbilið með miðgildi z_i og $A(z_i)$ er flatarmál hæðarbilsins.

Flatarmálsdreifingar fyrir líkönin af Brúarjökli 1960 og 1964 eru á 12. mynd. Reiknað afrennsli fyrir árin 1945, 1960, 1964, 1969 og 1988 er í 4. töflu. Ekki er hér lagt mat á sumarúrkomu á jökulinn og framlag hennar til afrennslis. Verkfræðistofan Vatnaskil (1995) áætla að sumarúrkoma á Brúarjökli sé 30% af ársúrkomu. Sú tala er mjög óviss því mælingar skortir. Sé hins vegar gert ráð fyrir að sumarúrkoman sé 30% af ársúrkomu, gildir fyrir jökul í jafnvægi að sumarafkoman er 70% af afrennsli frá jöklinum.



11. mynd. Sumarafkoma á Brúarjökli 1994 (Helgi Björnsson og fl., 1995)



12. mynd. Flatardreifing líkana af yfirborði Brúarjökuls 1960 og 1964.

4. tafla. Reiknað afrennsli (B_s) frá Brúarjökli vegna sumarafkomu jökulsins. Q_s er ársmeðalrennsli vegna sumarafkomu.

Ártal	Tími frá framhlaup i (ár)	Brúarjökull allur		Jökulsá á Brú		Kreppa og Kverká	
		flatarmál km ²	B_s 10 ⁶ m ³	B_s 10 ⁶ m ³	Q_s m ³ s ⁻¹	B_s 10 ⁶ m ³	Q_s m ³ s ⁻¹
1945	-18	1638	2288	1858	58.9	429	13.6
1960	-3	1563	2183	1773	56.2	410	13.0
1964	1	1720	2672	2155	68.3	517	16.4
1969	6	1713	2677	2159	68.5	518	16.4
1988	25	1688	2489	2017	64.0	479	15.2

Í 4. töflu er reiknað framlag sumarafkomu (B_s) til rennslis (Q_s) Jökulsár á Brú og Kreppu fyrir nokkur ár þegar upplýsingar eru til um stærð jökuls og hæðardreifingu. Ekkert mat er lagt á breytileg áhrif veðurs á leysingu og því réttara að líta á reiknaða afrennslið sem mat á leysingu í meðalári á jöklinum fyrir stærð og flatardreifingu jökulsins þessi tilteknu ár. Talan fyrir 1969 er fengin með því að reikna nýja flatarmálsdreifingu jökulsins eftir að bráðnun 5 ára hefur verið dregin frá yfirborði árið 1964. Reikningarnir benda til þess að jökulleysing vegna aukins flatarmáls jökulsins eftir framhlaupið gæti hafa aukið heildarafrennsli til Jökulsár um 380-400·10⁶ m³ á ári (380-400 GI) eða 20%. Meðalrennsli Jökulsár á Brú ætti því að hafa aukist af þessum ástæðum um 12-13 m³s⁻¹ 1964 og Kreppu um 3-4 m³s⁻¹.

Séu tölurnar í 4. töflu bornar saman við mælt rennsli eftir 1964, kemur í ljós að breytingarnar í rennsli eru mun meiri en svo að hægfare minnkun jökulsins og tilsvarandi lækkun meðalrennslis um 4-5 m³s⁻¹ geti skýrt þær. Einnig er ljóst að veðurfarsseiflur hafa mikil áhrif á rennslið og til að greina rennslisbreytingar vegna framhlaupa verður að reyna að skilja frá þessi áhrif veðurfarsins.

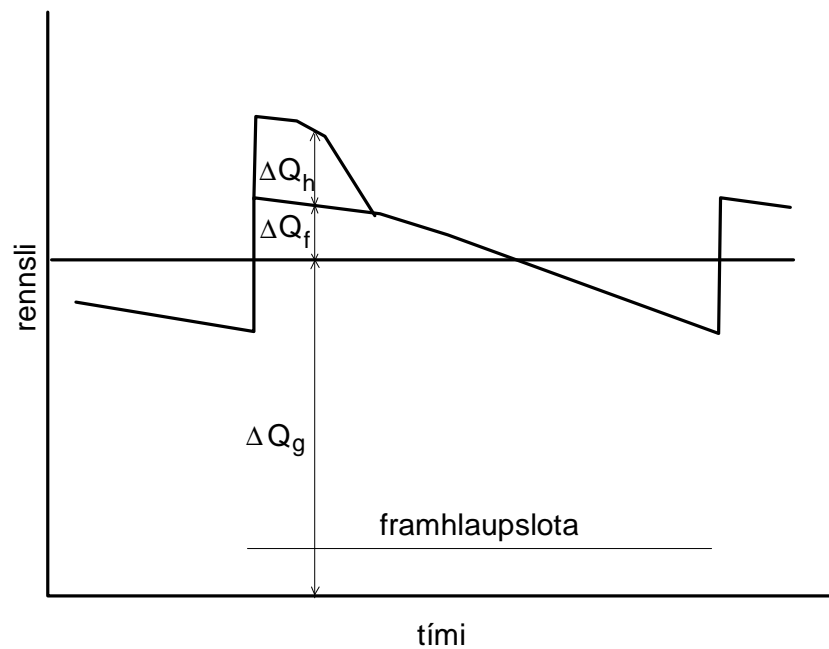
5.4. Samband rennslis í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum

Hér er gert ráð fyrir að veðurfar hafi til langs tíma svipuð áhrif á meðalrennsli beggja Jökulsáanna norðan Vatnajökuls og kannað hvort framhlaup dugi til að skýra þann mismun sem fram kemur í rennsli þeirra.

Greina má jökulþátt ána í fjóra hluta (13. mynd):

Q_g : Langtíma grunnrennsli frá jöklinum sem svar við langtímameðaltali veðurfars.

ΔQ_v : Frávik frá grunnrennslinu Q_g sem rekja má til fráviks veðurfars frá langtímameðaltali. Reiknað er með að ΔQ_v komi fram með sama hætti í nálægum jöklum norðan úr Vatnajökli.



13. mynd. Þættir rennslis í jökulá sem rennur frá framhlaupsjökli.

ΔQ_f : Frávik frá grunnrennsli vegna breytinga í stærð og hæð jökuls með tíma að gefinni meðalsumarafkomu við meðalveðurfar. Yfir heila framhlaupslotu (tími frá því framhlaupi líkur og þar til það næsta hefst) er meðaltal $\Delta Q_f = 0$ (jákvætt á fyrri hluta tímabils og neikvætt á seinni hluta). Hér er gert ráð fyrir að lega vatnaskila í jöklinum breytist ekki við framhlaup.

ΔQ_h : Rennsli vegna fráviks frá meðalsumarafkomu sem stafar af breytingum á yfirborðseiginleikum jökulsins svo sem hrjúfleika og endurkaststuðli fyrst eftir framhlaup. Þó svo þessi áhrif vari aðeins fyrst eftir framhlaup er meðaltal $\Delta Q_h > 0$ fyrir heila framhlaupslotu því aukin hrjúfleiki og lækkun endurkaststuðuls valda aukinni leysingu.

Fyrir hverja jökulá er því meðalrennslið Q_m yfir eitthvert tiltekið tímabil

$$Q_m = Q_g + \Delta Q_v + \Delta Q_f + \Delta Q_h \quad (2)$$

Til að meta ΔQ_h fyrir Brúarjökul ($\Delta Q_{h,B}$) eftir 1963 og reyndar Dyngjujökul ($\Delta Q_{h,F}$) eftir 1977, er litið á hlutfall rennslis í ánum tveimur (hér vísar hnétáknið F til Jökulsár á Fjöllum en B til Jökulsár á Brú)

$$\frac{Q_{m,B}}{Q_{m,F}} = \frac{(Q_g + \Delta Q_v + \Delta Q_f + \Delta Q_h)_B}{(Q_g + \Delta Q_v + \Delta Q_f + \Delta Q_h)_F} \quad (3)$$

Sú forsenda að veðurfarssveiflur hafi sömu áhrif á grunnrennslis jökulþáttar í báðum ánum jafngildir

$$\frac{Q_{g,B}}{Q_{g,F}} = \frac{\Delta Q_{v,B}}{\Delta Q_{v,F}} \quad (4)$$

Skilgreinum nú k sem hlutfall langtímarennslis í ánum tveimur:

$$k = \frac{(Q_g + \Delta Q_v)_B}{(Q_g + \Delta Q_v)_F} = \text{fasti} \quad (5)$$

Hlutfallið k þarf að reikna út úr rennslisgögnunum en áður en það er hægt þarf að gera grein fyrir öðrum stærðum í jöfnu (3). Tímabilið 1963-1991 nær yfir heila framhlaupslotu Dyngjujökuls en innan við helming af framhlaupslotu Brúarjökuls. Því er augljóst að bæði $\Delta Q_{f,B} > 0$ og $\Delta Q_{h,B} > 0$ þar sem stutt er liðið af 70-100 ára lotu framhlaupa í Brúarjökli. Fyrir Jökulsá á Fjöllum er ekki fjarri lagi að álykta að $\Delta Q_{f,F} = 0$ því framhlaupslotu Dyngjujökuls virðist vera 20-25 ár og framhlaup varð á miðju tímabilinu. Í kaflanum hér að framan var rennslisaukinn í Jökulsá á Brú milli 1960 og 1964 vegna breytingar í stærð ($2 \cdot \Delta Q_{f,B}$) metinn sem $12-13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Eftir 24 ár (1988) var hann kominn niður í $8-9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($\Delta Q_{f,B} = 2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) og að meðaltali yfir tímabilið var rennslisaukinn um $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Fyrir tímabilið er $\Delta Q_{f,B}$ helmingur þessarar tölu eða $\Delta Q_{f,B} = 4-6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Ekki er ósennilegt að $\Delta Q_{h,F}$ eftir framhlaup Dyngjujökuls 1977 sé svipað að stærð og $\Delta Q_{h,B}$ eftir framhlaup Brúarjökuls 1963-64 því vatnasvið á jökli eru af svipaðri stærð. Sé enn fremur gert ráð fyrir að um meðaltöl tímabilsins gildi að $Q_{g,F} \gg \Delta Q_{h,F}$ og $Q_{g,F} \gg \Delta Q_{h,B}$ fæst að

$$k \approx \frac{(Q_g + \Delta Q_v + \Delta Q_h)_B}{(Q_g + \Delta Q_v + \Delta Q_h)_F} = \frac{(Q_{m,B} - \Delta Q_{f,B})}{Q_{m,F}} \quad (6)$$

þar sem $Q_{m,B}$, $Q_{m,F}$ og $\Delta Q_{f,B} = 5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ eru meðaltöl fyrir tímabilið 1963-1991.

Á meðan aukins rennslis vegna úfins jökulyfirborðs Brúarjökuls gætir (frá 1964 fram yfir 1970) er $\Delta Q_{h,F} = 0$. Einnig má gera ráð fyrir að $\Delta Q_{f,F} \approx 0$ því tímabilið fellur nærri miðri framhlaupslotu Dyngjujökuls auk þess sem sporður Dyngjujökuls gengur mun minna fram en Brúarjökull svo að jafnaði er $\Delta Q_{f,F} < \Delta Q_{f,B}$. Fyrir þetta tímabil einfaldast því jafna (3) og verður

$$\frac{Q_{m,B}}{Q_{m,F}} = \frac{(Q_g + \Delta Q_v + \Delta Q_{f,B} + \Delta Q_h)_B}{(Q_g + \Delta Q_v)_F} \quad (7)$$

eða

$$\frac{Q_{m,B} - \Delta Q_{f,B}}{Q_{m,F}} = k + \frac{\Delta Q_{h,B}}{Q_{m,F}} \quad (8)$$

Þar sem $\Delta Q_{f,B}$ er þekkt má með jöfnu (8) reikna $\Delta Q_{h,B}$, t.d. fyrir hvert ár og væru þá $Q_{m,B}$ og $Q_{m,F}$ ársmeðaltöl rennslis.

Hér að framan er ekki tekið tillit til þess að um 20% af rennslisauka vegna framhlaups Brúarjökuls hafi farið í Kreppu en 80% til Jökulsár á Fjöllum. Þetta leiðir til óverulegs ofmats á grunnrennslis Jökulsár á Fjöllum en í samanburði við aðra óvissuþætti er þessi skekkja lítil.

5.5. Rennslisauki vegna áhrifa úfins yfirborðs á virkni orkustrauma

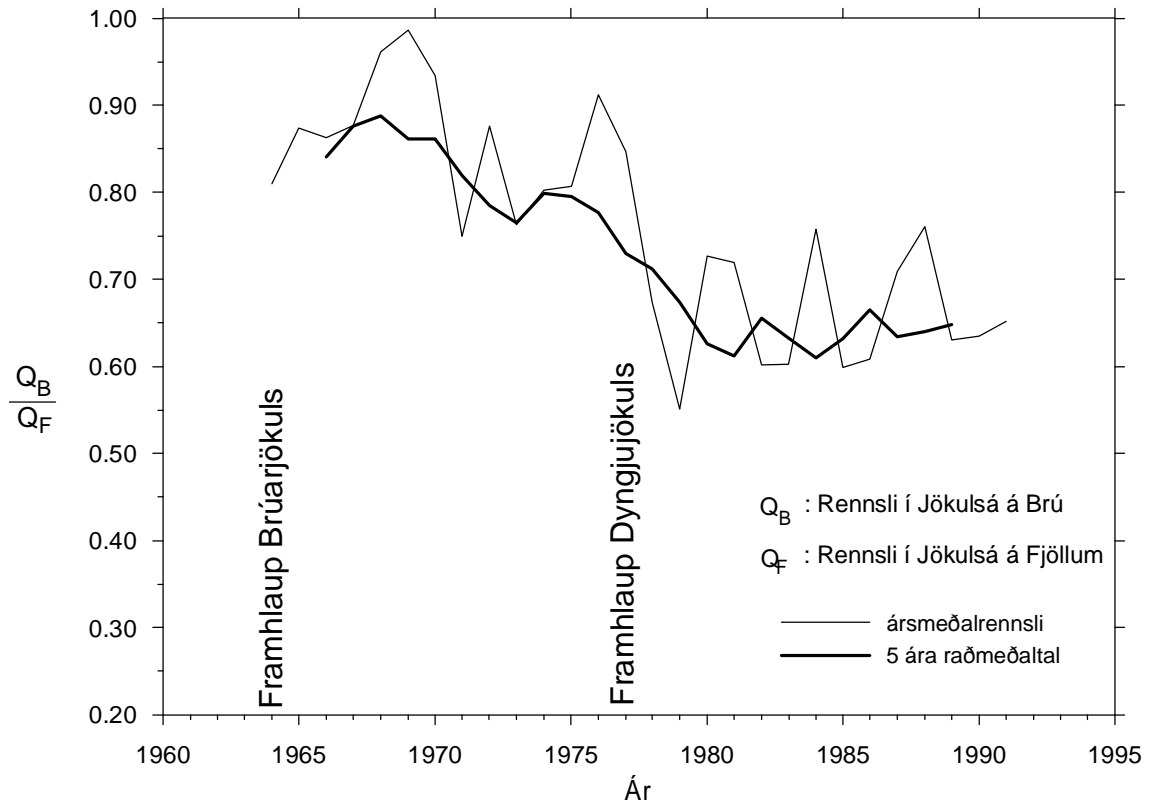
Á 14. mynd er hlutfall ársmeðalrennslis (Q_B/Q_F) í ánum tveimur sýnt fyrir 1964-1991. Nokkur breytileiki er í hlutfallinu en það er heldur lækkandi eftir 1970 og síðan verður stórt stökk 1977-1979, um og eftir framhlaup Dyngjujökuls. Milli 1980 og 1991 dregur síðan Jökulsá á Brú heldur á Jökulsá á Fjöllum. Á 15. mynd hefur breytileikinn í hlutfallinu verið reiknaður yfir í rennslis. Frá hlutfallinu Q_B/Q_F hefur verið dregið meðaltalshlutfallið k og leifarliðurinn

$$\Delta k = \frac{Q_B}{Q_F} - k \quad (9)$$

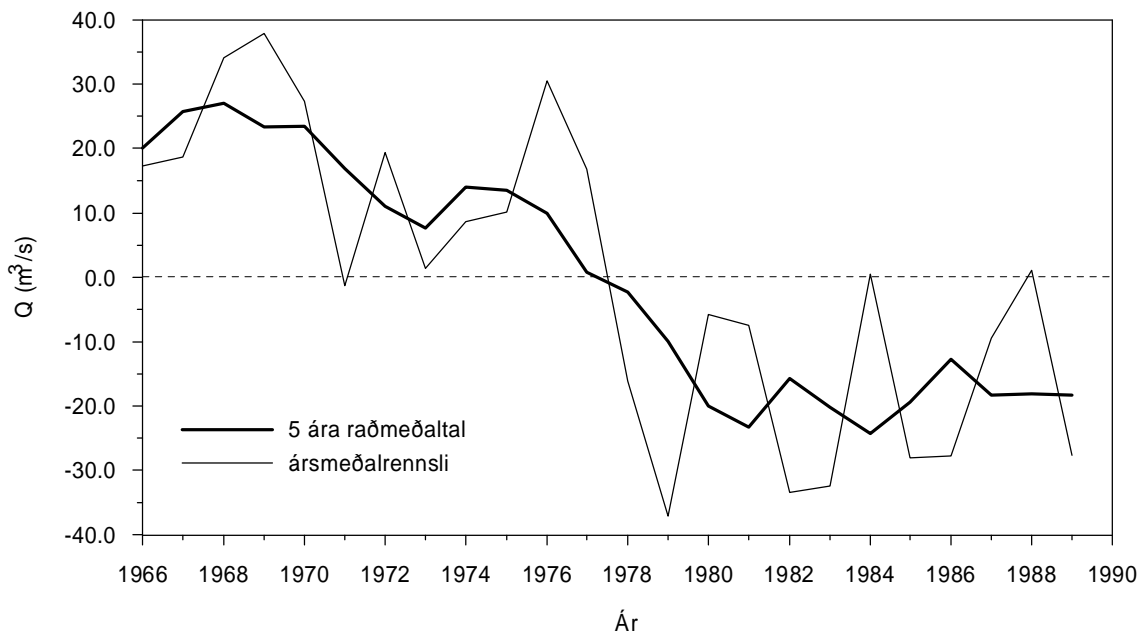
notaður til að reikna

$$\Delta Q = \Delta k \cdot Q_F \quad (10)$$

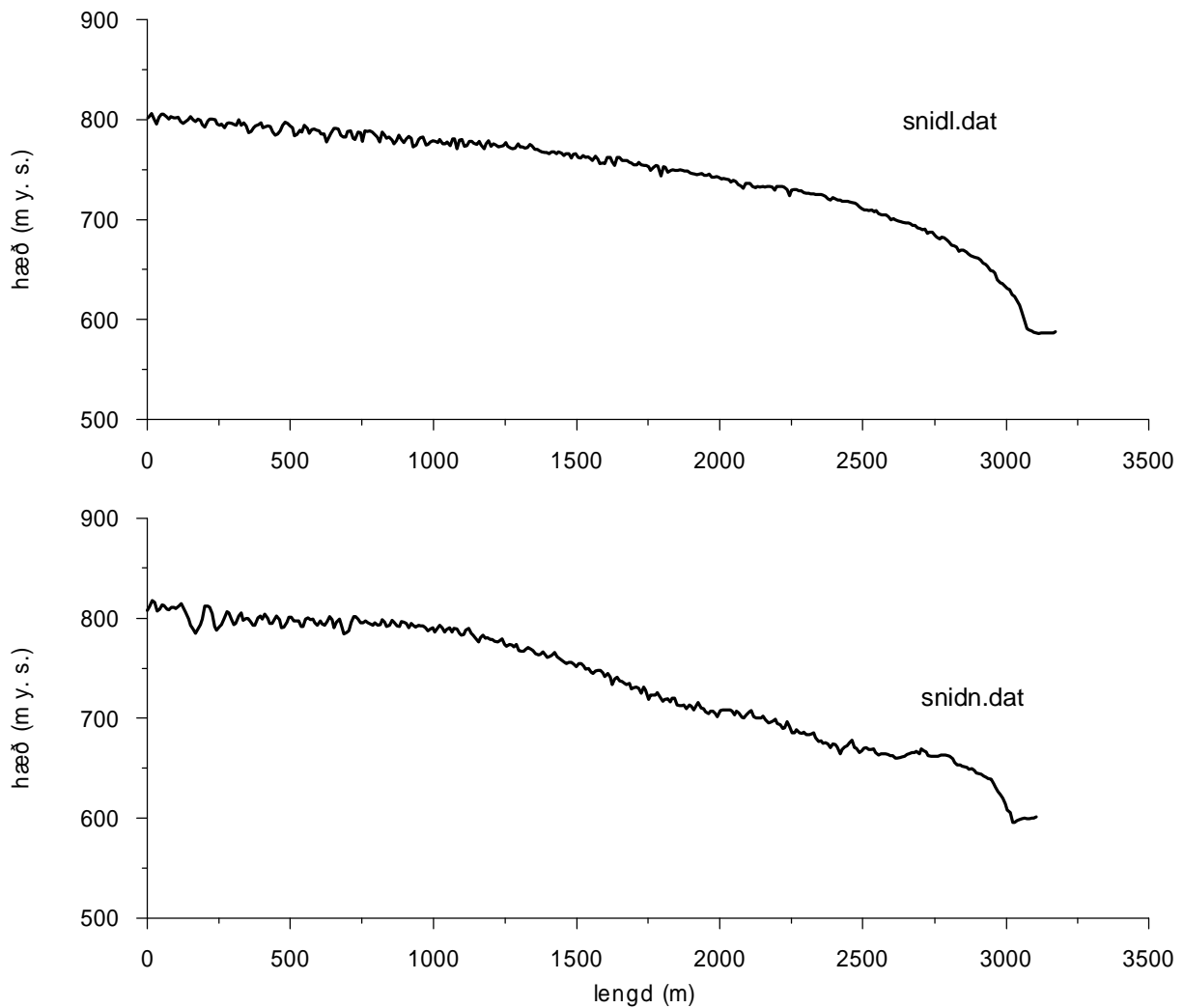
Þær rennslisbreytingar sem fram koma á 15. mynd stafa að öllum líkindum af aukinni virkni orkustrauma við yfirborð jökulsins vegna aukins hrjúfleika. ΔQ er jákvætt fram til 1977 en neikvætt eftir það. Er svo að sjá að rennslisaukinn í Jökulsá á Brú ($\Delta Q_{h,B}$) hafi numið 20-30 m³s⁻¹ á árunum 1965-1970 en fara svo lækkandi eftir það. Á sama hátt bendir línuritið til þess að samskonar rennslisauki ($\Delta Q_{h,F}$ af stærðargráðunni 20 m³s⁻¹) hafi orðið í Jökulsá á Fjöllum árin eftir 1977 vegna framhlaups Dyngjujökuls.



14. mynd. Rennslí í Jökulsá á Brú við Hjarðarhaga sem hlutfall af rennsli Jökulsár á Fjöllum við Ferjubakka.



15. mynd. Reiknaðir rennslisauki í Jökulsá á Brú sem talinn er stafa af aukinni leysingu vegna úfins yfirborðs. Byggt á ferlinum á 14. mynd og að því að langtímameðaltal rennslis í Jökulsá á Brú (Harðarhagi) og Jökulsá á Fjöllum (Ferjubakki) sé 0.75. Neikvæður rennslisauki eftir 1978 er talinn stafa af auknu rennsli í Jökulsá á Fjöllum eftir framhlaup Brúarjökuls 1977



16. mynd. Myndmælt snið upp Brúarjökul í maí 1964. Gert af verkfræðistofunni Hnit. Sprungurnar eru 10-30 m djúpar þegar komið er 1-1.5 km inn fyrir jaðar.

Rennslisauki um $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nemur 630 Gl á ári og á 5 árum rúmlega 3000 Gl sem jafngildir því að af 1400 km^2 vatnasvæði bráðni 2.4 m þykkt lag af ís. Verði þessi bráðnun aðeins á neðri helmingi jökulsins bráðna þar á 5 árum tæpir 5 m af ís að meðaltali (tæpl. 1 m/ár). Þessi bráðnun yrði þá til viðbótar þeirri sem nú mælist á Brúarjökli. Þetta er ekki ósennilegt, því leysingasvæðið var mjög úfið með 10-30 m djúpum sprungum (16. mynd) fyrst eftir framhlaupið. Svo stórar ójöfnur á leysingasvæði Brúarjökuls fara ekki á kaf í vetrarákomuna og því má gera ráð fyrir að skítugur jökulís leysingasvæðisins standi víða uppúr strax að vori. Albedó íssins er mjög lágt (Lister, 1959) svo bráðnun verður mun meiri þess vegna, einkum framan af sumri. Þá má reikna með að ójöfnurnar valdi auknu iðustreymi í loftinu næst jökulyfirborðinu en það eykur leysingu vegna loftraka og lofthita.

Athugun á þeim loftmyndum sem teknar hafa verið af Brúarjökli og Dyngjujökli síðan 1960 sýnir að miðbik og efri hluti leysingasvæðanna varð ekki slétt fyrr en allnokkrum árum eftir framhlaupin (5. og 6. tafla). Hvað Brúarjökul varðar sýna myndirnar að 6 árum eftir framhlaupið 1963-64 var efri hluti leysingasvæðisins ennþá úfinn en eftir 17 ár var jökullinn orðinn sléttur. Myndir vantar milli 1970 og 1981 svo nákvæmari tímasetning er ekki möguleg út frá þessum gögnum. Loftmyndirnar af Dyngjujökli benda til að allt að 10 ár hafi liðið áður en leysingasvæðið náði að sléttast.

Á 17. mynd eru sýnd líkleg heildaráhrif framhlaupsins á rennsli Jökulsár á Brú að óbreyttu veðurfari. Verður að telja það mjög athyglisverða niðurstöðu að rennslisauki vegna aukinnar virkni iðustrauma og lægri endurkaststuðuls sólgeislunar (ΔQ_h) var mun stærri fyrstu árin en vegna aukins flatarmáls og breyttrar hæðardreifingar (ΔQ_f). Miðað við meðalár virðist þáttur jöklaleysingar í rennsli Jökulsár á Brú hafa aukist um rúmlega 50%, úr 55-60 m^3s^{-1} í yfir 90 m^3s^{-1} , fyrstu árin eftir framhlaupið. Úr rennslisaukanum dró þegar frá leið.

5. tafla. Loftmyndir af Brúarjökli - áferð jökulyfirborðs.

Dagsetning	Flughæð, m	Brennivídd	Lýsing
19. 07. 1960	5490	152,39	Sléttur.
16. 06. 1964	5100	115,06	Mjög úfinn.
05. 09. 1967	5100	115	Jökullinn ennþá úfinn, en farinn að sléttast við sporð.
21. 08. 1970	5100	115	Breiðara belti vð sporð orðið slétt, en ennþá greinilega úfinn er ofar dregur.
19. 08. 1981	5486	151,78	Ein fluglína vestarlega á jöklinum, sléttur.

6. tafla. Loftmyndir af Dyngjujökli - áferð jökulyfirborðs.

Dagsetning	Flughæð, m	Brennivídd	Lýsing
15. 09. 1967	5100	115	Sléttur jökull með fínöldóttum dökkum flötum.
19. 08. 1981	5486	151,78	ATH. fluglínan er austar en aðrar myndir, liggur beint yfir útfalli Jökulsár á Fjöllum. Jökullinn virðist öldóttur ofarlega, en mishæðalítil fram á sporðinn.
22. 08. 1984	5486	151,78	Bylgjumynstur sést betur en á mynd frá 1981, áberandi meira mynstur í dekkri flötum.
18. 08. 1986	5486	151,78	Öldur fylgja eingöngu dökkum flötum, en jökullinn virðist jafn sprunginn og 1984.
06. 08. 1987	6096	151,78	Jökullinn talsvert sléttari og minna sprunginn en árið áður. Svipar til myndanna frá 1967.

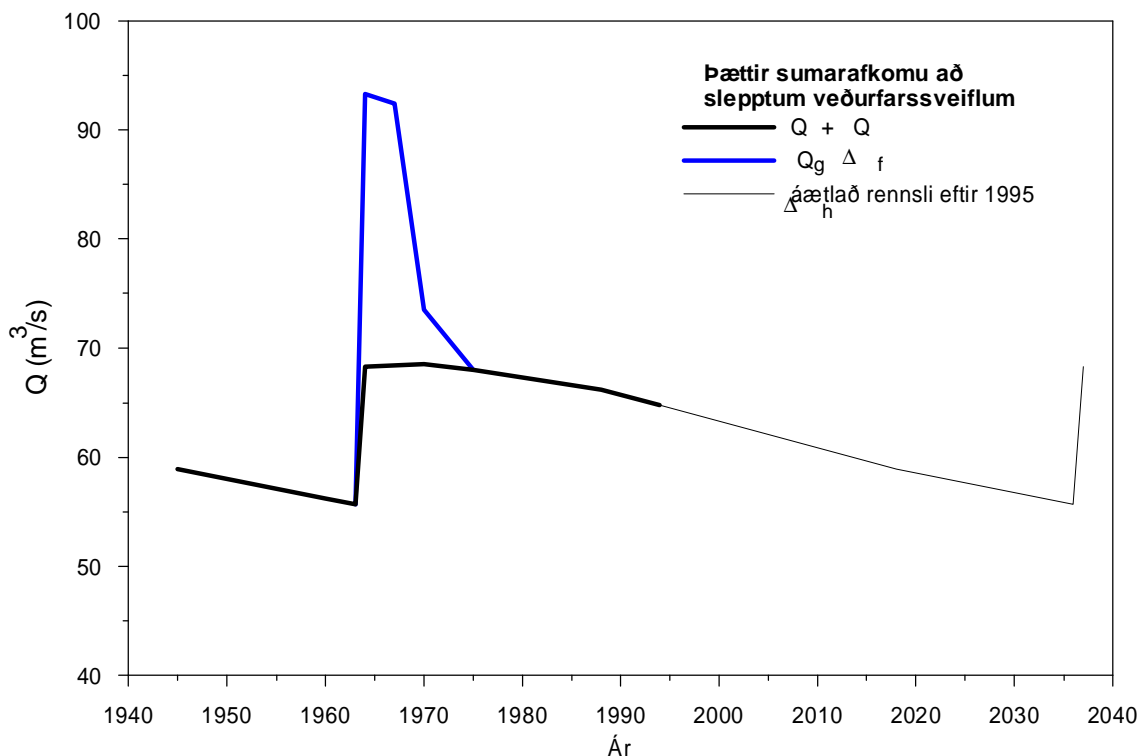
Að óbreyttu veðurfari má búast við að rennsli Jökulsár á Brú fari minnkandi fram að næsta framhlaupi. Á næstu 40-50 árum ætti rennslið að lækka um $5-10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (150-300 Gl/ár). Er þá gert ráð fyrir að framhlaupslofta Brúarjökuls haldist óbreytt, 70-100 ár.

5.6. Reiknað rennsli Jökulsár á Brú 1940-1963

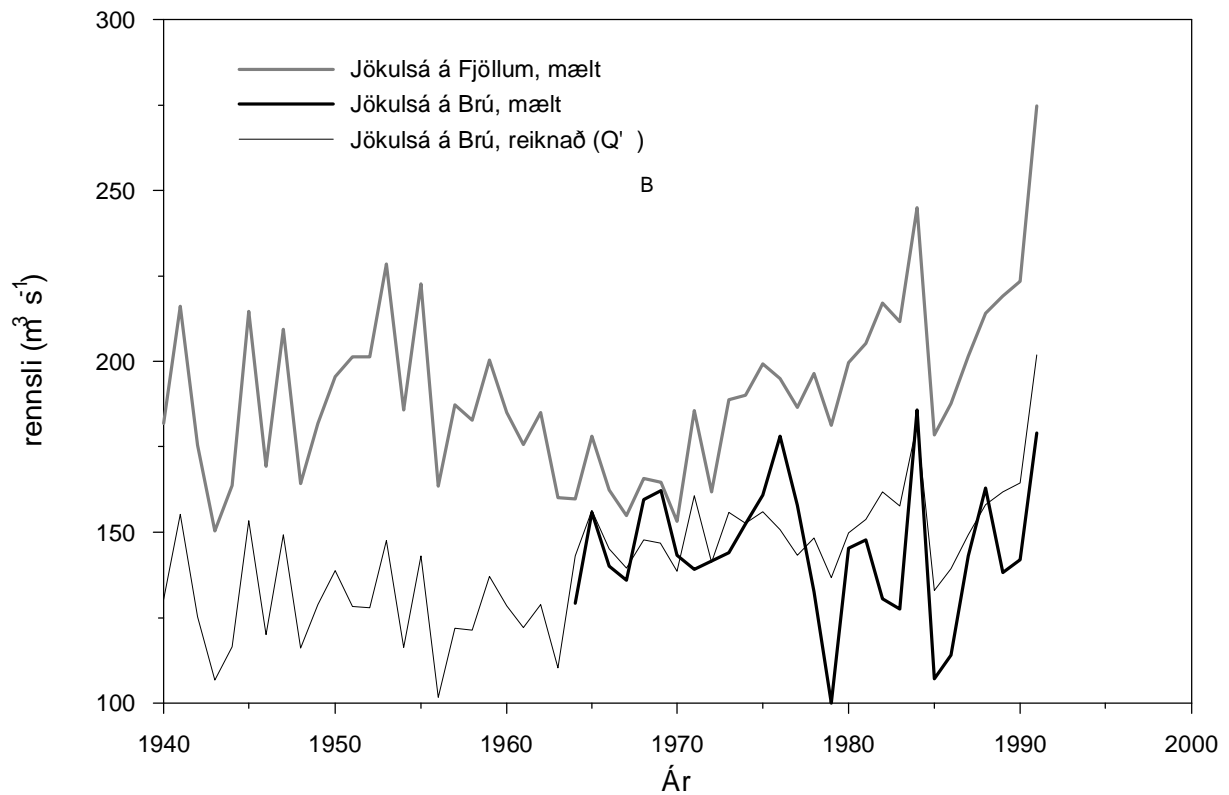
Sambandið milli rennslis Jökulsár á Fjöllum og Jökulsár á Brú má nota til að meta rennsli síðarnefndu árunum fyrir framhlaup Brúarjökuls. Hér að framan hefur verið lagt mat á áhrif framhlaupsins á rennslið í Jökulsá á Brú og vísbendingar fengist um áhrif framhlaupa í Dyngjujökli á rennsli Jökulsár á Fjöllum. Á 18. mynd hefur ársmeðalrennsli Jökulsár á Brú fyrir hvert almanaksár (Q_B') verið reiknað sem

$$Q_B' = k (Q_F - (\Delta Q_f + \Delta Q_h)_F) + \Delta Q_{f,B} + \Delta Q_{h,B} \quad (11)$$

Hér er $k = 0.73$, skv. jöfnu (7) og $-2.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1} > \Delta Q_{f,B} > -6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, fyrri talan á við 1940 og sú seinni við 1963. Stærð $(\Delta Q_{h,F} + \Delta Q_{h,F})$ er lauslega metið fyrir tímabilið 1951-1960 en vegna skorts á gögnum um framhlaup Dyngjujökuls er þar aðeins um stærðargráðumat að ræða. Í viðauka A eru útreiknaðar tölur fyrir ársmeðalrennsli og afrennsli.



17. mynd. Mat á langtíma rennslissveiflum Jökulsár á Brú sem rekja má til framhlaupa miðað við meðaltal veðurfars síðustu áratuga. Inn í Jökulpátt rennslisins vantar framlag sumarútkomu á jökulinn.



18. mynd. Reiknað (Q_s^1) og mælt rennsli Jökulsár á Brú og mælt rennsli Jökulsár ár Fjöllum. Ofmat í reiknaða rennsli Jökulsár á Brú eftir 1978 má rekja til þess að ekki er gerð tilraun til að fjarlægja áhrif framhlaups Dynngjujökuls á reiknaða rennslið.

Meðalrennsli við Hjarðarhaga er talið hafa verið $125\text{--}130\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($3900\text{--}4100\text{ Gl/ár}$). Mælt meðalrennsli árána 1964–1975, sem var mun kaldara tímabil, var hins vegar $147\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (4640 Gl/ár). Til samanburðar lækkaði mælt meðalrennsli Jökulsár á Fjöllum við Ferjubakka úr $188\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ í $172\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ á sama tíma.

Árni Snorrason (1983) áætlaði rennsli Jökulsár á Brú fyrir tímabilið 1950–1963 með því að skoða samhengi veðurganga og rennslis eftir 1963. Þá gerði Verkfræðistofan Vatnaskil (1995) svipaða athugun með NAM líkaninu fyrir þetta tímabil. Vegna áhrifa framhlaupsins var rennsli Jökulsár á Brú 1963–1980 ekki notað til að stilla af líkanreikninga Vatnaskila. Okkar niðurstöður benda til þess að rennsli í Jökulsá hafi verið nokkru lægra á tímabilinu 1950–1963 en hinar fyrri athuganir gáfu til kynna.

6. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

1. Brúarjökull stækkaði um 160 km² í framhlaupinu 1963-1964. Talið er að stækkunin hafi öll orðið neðan jafnvægislínu og að leysingarsvæðið hafa stækkað úr 420 km² í 580 km². Um 70 km³ íss færðust niður á leysingarsvæðið frá ákomusvæðinu sem lækkaði að jafnaði um 60 m. Mesta framskrið var nálægt 9.5 km í Kringilsárrana.
2. Rennslisbreytingar vegna framhlaupa í Brúarjökli eru aðallega af tvennum toga. Í fyrsta lagi vegna breytinga í yfirborðsflatarmáli og flatardreifingu með hæð (ΔQ_f). Í öðru lagi vegna aukinnar virkni orkustrauma (geislunar, lofthita og loftraka) við yfirborð jökulsins meðan það er óslétt eftir framhlaupið (ΔQ_h). Miðað við meðalveðurfar síðustu áratuga jókst rennsli vegna breytingar í yfirborðsflatarmáli um 12-13 m³s⁻¹ milli 1960 og 1964. Sá rennslisauki hélst fram um 1970 en síðan hefur dregið úr honum. Til viðbótar kom síðan rennslisaukinn vegna aukinnar virkni orkustrauma (ΔQ_h), um 20 m³s⁻¹ fyrstu árin frá 1964. Jökullinn var orðinn sléttur og $\Delta Q_h=0$ á árunum 1975-1980.
3. Miðað við meðalveðurfar ætti þáttur sumarafkomu (grunnrennsli að viðbættum áhrifum framhlaupsins) í rennsli Jökulsár á Brú að hafa aukist um rúmlega 50% fyrstu árin eftir framhlaupið, úr 55-60 m³s⁻¹ um 1960 í 90 m³s⁻¹ 1964-1970 (úr 1750-1900 Gl/ár í 2800 Gl/ár).
4. Rennsli Jökulsár á Brú á árunum 1940-1963 hefur verið metið út frá sambandi rennslis í Jökulsá á Brú og Jökulsá á Fjöllum og áhrifum framhlaupa. Meðalrennsli við Hjarðarhaga er talið hafa verið 125-130 m³s⁻¹ (3900-4100 Gl/ár). Mælt meðalrennsli árunum 1964-1975, sem var mun kaldara tímabil, var hins vegar 147 m³s⁻¹ (4640 Gl/ár). Til samanburðar lækkaði mælt meðalrennsli Jökulsár á Fjöllum við Ferjubakka úr 188 m³s⁻¹ í 172 m³s⁻¹ á sama tíma.
5. Að óbreyttu veðurfari má búast við að rennsli Jökulsár á Brú fari minnkandi fram að næsta framhlaupi. Á næstu 40-50 árum ætti rennslið að lækka um 5-10 m³s⁻¹ (150-300 Gl/ár). Er þá gert ráð fyrir að framhlaupslota Brúarjökuls haldist óbreytt, 70-100 ár.

7. LOKAORÐ

Í þessari skýrslu hafa verið dregin saman gögn um framhlaup Brúarjökuls 1963-1964. Rannsóknin hefur leitt í ljós veruleg áhrif framhlaupsins á rennsli Jökulsár á Brú. Áður hefur verið bent á þau áhrif (Árni Snorrason, 1983; Vatnaskil, 1995) en hér hefur í fyrsta skipti verið reynt að meta þessi áhrif á rennsli.

Sú niðurstaða sem hvað mest hefur komið á óvart í þessari athugun er hve aukinn hrjúfleiki jökulyfirborðsins virðist valda mikill aukningu í leysingu. Þessi áhrif vara í allmörg ár eftir að framhlaupi lýkur og stafa af lækkuðum endurkastsstuðli sólarljóss og auknu iðustreymi í lofti næst yfirborði. Síðustu ár hafa framhlaup orðið í öllum skriðjökulum í suðvestanverðum Vatnajökli. Þar gefst tækifæri til að mæla beint bráðnun á leysingarsvæði jökuls fyrst eftir framhlaup. Þá er einnig vert að kanna þessi áhrif fræðilega, skoða áhrif ójafna á iðustreymi í orkuskiptunum milli íss og lofts. Slíkar athuganir ættu að leiða til aukins skilnings á samspili framhlaupa og afrennslis og gera spár um afrennsli frá jökulum nákæmari en nú er.

8. HEIMILDIR

- Björnsson, Helgi. 1988. Hydrology of ice caps in volcanic regions. Soc. Sci. Isl., 45. 139 bls.
- Björnsson, Helgi og Finnur Pálsson. 1991. Vatnajökull, norðausturhluti, 1:100 000, jökulyfirborð.
- Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 1992. Vatnajökull, norðvesturhluti, 1:100 000, jökulyfirborð.
- Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 1995. Afkoma, hreyfing og afrennsli á vestan- og norðanverðum Vatnajökli jökulárin 1992-1993 og 1993-1994. Rauvísindastofnun Háskólans, RH-95-2, 62 bls.
- Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 1995. Afkoma, hreyfing og afrennsli á vestan- og norðanverðum Vatnajökli jökulárið 1994-1995. Rauvísindastofnun Háskólans, RH-23-95, 33 bls.
- Einarsson, Markús Á. 1991. Temperature Conditions in Iceland 1901-1990. Jökull, 41, 1-19.
- Eyþórsson, Jón. 1963. Brúarjökull hlaupinn. Jökull, 13, 19-21.
- Eyþórsson, Jón. 1964. Brúarjökulsleiðangur 1964. Jökull, 14, 104-107.
- Guðmundsson, Magnús T. og Helgi Björnsson. 1992. Tungnaárjökull I, framhlaupið 1945-1946. Rauvísindastofnun Háskólans, RH-92-17, 27 bls.
- Kjerúlf, Þorbjörn. 1962. Vatnajökull hlaupinn. Jökull, 12, 47-48.
- Lister, H. 1959. Micro Meteorology over Dirt Coned Ice. Jökull, 9, 1-5.
- Orkustofnun, Vatnamælingar 1996. Gagnabanki Vatnamælinga, afgreiðsla 96/02.
- Rist, Sigurjón. 1990. Vatns er þörf. Bókaútgáfa Menningarsjóðs, 1990. 248 bls.
- Snorrason, Árni. 1983. Rennslisgreining og lenging rennslisraða. Tölfræðileg aðferðafræði. Orkustofnun. Vatnsorkudeild. OS-83081/VOD-09. 30 bls.
- Todtmann, E.M. 1955. Kringilsárrani, das Vorfeld des Brúarjökull, am Nordland des Vatnajökull. Jökull, 5, 9-10.
- Veðráttan. 1940-1990. Veðurstofa Íslands
- Verkfræðistofan Vatnaskil. 1995. Austurlandsvirkjun. Rennslislíkan II. Jökulsá á Brú. 30 bls. og 43 myndir.

Pórarinsson, Sigurður. 1964. Sudden Advance of Vatnajökull outlet glaciers 1930-1964. *Jökull*, 14, 76-89.

Pórarinsson, Sigurður. 1969. Glacier surges in Iceland, with special reference to surges of Brúarjökull. *Can. J. Earth Sci.*, 6, 875-882.

VIÐAUKI A. Reiknað rennsli í Jökulsá á Brú 1940-1991

Q_F : Mælt rennsli Jökulsár á Fjöllum.

$\Delta Q_{f,B}$: Breytileiki í rennsli Jökulsár á Brú vegna breytilegrar stærðar og flatarmálsdreifingar Brúarjökuls með hæð.

$\Delta Q_{h,B}$: Rennsliauki í Jökulsá á Brú vegna aukinnar virkni orkustrauma við yfirborð eftir framhlaup.

Q_B' : Reiknað ársmeðalrennsli Jökulsár á Brú:

$$Q_B' = k (Q_F - (\Delta Q_f + \Delta Q_h)_F) + \Delta Q_{f,B} + \Delta Q_{h,B}$$

$\sum Q_B'$: Reiknað ársrennsli í gígalítrum.

ár	Q_F	$(\Delta Q_f + \Delta Q_h)_F$	$\Delta Q_{f,B}$	$\Delta Q_{h,B}$	Q_B'	$\sum Q_B'$
	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	$10^6 m^3/ár$
1940	181.9	(0)	-2.5	0	130.3	4108
1941	216.3	(0)	-2.7	0	155.1	4894
1942	175.5	(0)	-2.8	0	125.3	3951
1943	150.4	(0)	-3.0	0	106.7	3367
1944	163.8	(0)	-3.1	0	116.4	3673
1945	214.7	(0)	-3.3	0	153.4	4838
1946	169.4	(0)	-3.5	0	120.1	3789
1947	209.4	(0)	-3.6	0	149.2	4707
1948	164.3	(0)	-3.8	0	116.1	3662
1949	181.9	(0)	-4.0	0	128.7	4061
1950	195.6	(0)	-4.1	0	138.6	4373
1951	201.5	(20)	-4.3	0	128.1	4042
1952	201.4	(20)	-4.5	0	127.9	4034
1953	228.6	(20)	-4.7	0	147.5	4654
1954	185.9	(20)	-4.8	0	116.3	3667
1955	222.8	(20)	-5.0	0	143.0	4511
1956	163.6	(17)	-5.2	0	101.8	3210
1957	187.4	(13)	-5.3	0	122.0	3847
1958	182.7	(9)	-5.5	0	121.3	3825
1959	200.5	(5)	-5.7	0	137.0	4320
1960	185.1	(1)	-5.9	0	128.4	4052
1961	175.7	(0)	-6.1	0	122.1	3852
1962	185.1	(0)	-6.3	0	128.8	4062
1963	160.0	(0)	-6.5	0	110.3	3478
1964	159.7	(0)	6.5	20	143.0	4512
1965	178.0	(0)	6.5	20	156.4	4933
1966	162.4	(0)	6.6	20	145.1	4577
1967	154.9	(0)	6.6	20	139.6	4404
1968	165.8	(0)	6.7	20	147.7	4658
ár	Q_F	$(\Delta Q_f + \Delta Q_h)_F$	$\Delta Q_{f,B}$	$\Delta Q_{h,B}$	Q_B'	$\sum Q_B'$

	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	m^3s^{-1}	$10^6 \text{ m}^3/\text{ár}$
1969	164.5	(0)	6.7	20	146.7	4629
1970	153.3	(0)	6.6	20	138.5	4368
1971	185.5	(0)	6.4	19	160.8	5071
1972	161.7	(0)	6.2	17	141.2	4454
1973	188.7	(0)	6.0	12	155.7	4911
1974	190.0	(0)	5.8	8	152.5	4809
1975	199.3	(0)	5.5	5	155.9	4919
1976	195.1	(0)	5.3	3	150.7	4753
1977	186.5	-	5.0	2	143.1	4514
1978	196.6	-	4.7	0	148.2	4674
1979	181.4	-	4.4	0	136.8	4314
1980	199.7	-	4.1	0	149.8	4726
1981	205.4	-	3.8	0	153.7	4848
1982	217.0	-	3.5	0	161.9	5105
1983	211.7	-	3.2	0	157.7	4974
1984	245.0	-	2.9	0	181.7	5731
1985	178.6	-	2.6	0	132.9	4193
1986	187.7	-	2.3	0	139.3	4393
1987	201.6	-	2.0	0	149.1	4704
1988	214.0	-	1.8	0	158.0	4983
1989	219.3	-	1.6	0	161.6	5099
1990	223.4	-	1.4	0	164.4	5187
1991	274.9	-	1.2	0	201.8	6366

VIÐAUKI B. Loftmyndir notaðar við ákvörðun á legu jaðars Brúarjökuls.

16. júní 1964, flughæð = 5100 m
6255-6260*
6262*
6265* - 6266*
6280* - 6285*

19. júlí 1960, flughæð = 5490 m
7000-7002
7003-7004*

12. ágúst 1960, flughæð = 5490 m
10791*
10793*

24. ágúst 1960, flughæð = 5490 m
13224*
13225

4. júlí 1961, flughæð = 9150 m
15402
15403*
15404 - 15405

7. ágúst 1987, flughæð = 6096 m
0218 - 0219*

* þær loftmyndir sem jökuljaðar var dreginn af