

# **RANNSÓKNIR Í GRÍMSVÖTNUM ÁRIÐ 2000**

**Magnús T. Guðmundsson  
Finnur Pálsson  
Þórdís Högnadóttir  
Kirsty Langle  
Helgi Björnsson**

**Raunvísindastofnun Háskólans  
Desember 2001  
RH-30-2001**



## Ágrip

Í skýrslunni eru raktar breytingar á Grímsvötnum milli árána 1999 og 2000 en í kjölfar eldgossins í desember 1998 hafa þar orðið hraðari breytingar en menn hafa orðið vitni að áður. Kortlagning á yfirborði jökulsins í júní 2000 leiddi í ljós að helstu breytingar frá árinu áður eru myndun stórs lóns við vesturenda gosstöðvanna og áframhaldandi dýpkun rásar gegnum ísstífluna austan vatnanna. Hæsti punktur á ísstíflunni í júní 2000 var rúmlega 1490 m yfir sjó og er það lækkun um 5 m frá 1999 og um 55 m frá því fyrir umbrotin í Gjálp og Grímsvötnum haustið 1996. Vatnshæð var lág á árinu, lengst af 1360 m eða lægri. Smáhlaup varð um mánaðarmótin júlí-ágúst og lækkaði yfirborð íshellunnar um 20-30 m. Í kjölfar hlaupsins féll þrýstihæð við botninn um 70 m niður fyrir yfirborð íshellunnar. Hélt þessi staða fram undir árslok. Á þeim tíma voru Grímsvötn tóm að öðru leyti en því að vatn stóð uppi í vökinni norðan gosstöðvanna og í lóninu vestan þeirra. Hvorki vökin né lónið voru því í þrýstisambandi við vatn undir íshellunni. Þessi staða kom líka upp í nóvember 1999 en ekki er vitað til að Grímsvötn hafi tæmst fullkomlega fyrir þann tíma. Íssjármælingar á íshellu Grímsvatna sýna að hellan þykknaði um allt að 20 m milli árána 1997 og 1998 og 5-10 m milli 1998 og 2000. Stafar þykkunin af aflögun vegna aukinnar lárétrar spennu. Hún er tilkomin vegna aukins álags frá ísnum í brekkunum kringum íshelluna. Þessi aukning í álagi eftir 1996 skýrist af meiri bratta niður í vötnin að norðan vegna mun lægri vatnshæðar en áður var. Jarðhitaafli Grímsvatna 1999-2000 er talið rúmlega 3000 MW, nokkru lægra en var fyrst eftir gosið en mun hærra en var fyrir umbrot. Hluti varmaafli Grímsvatna tapast nú beint til andrúmsloftsins með uppgufun og geislun. Það afl nýtist ekki til bræðslu íss. Stærð þessa aflþáttar er erfitt að meta en hann er talin vera af stærðargráðunni 150 MW. Vesturhluti gígsvæðisins hélt áfram að síga og aflagast á árinu 2000. Því veldur hæg bráðnun og hörfun ísveggjarins sem heldur að gígnum að norðan. Töluverður jarðhiti er í vesturhluta gígsvæðisins. Lónið við vesturenda þess stækkaði úr 200-300 m breidd og 400 m lengd í júní 1999, í um 500 m breidd og 700 m lengd í júní 2000. Hitastig í vatninu við yfirborð var rúmlega 5 °C en rúmlega 4 °C neðar. Varmi flyst til yfirborðs í lóninu með hræringu vatnsins.

**Efnisyfirlit**

1. Inngangur .....	5
2. Yfirborð Grímsvatna 2000 .....	8
3. Vatnshæð .....	10
4. Íssjármælingar 1997-2000 .....	11
5. Rúmmál Grímsvatna .....	15
6. Varmaafli .....	15
7. Rannsóknir á Gígsvæðinu .....	18
7.1. Þróun gígsins .....	18
7.2. Jarðhiti .....	20
7.3. Lónið .....	20
7.4. Ísskrið inn að vök .....	20
8. Samandregnar niðurstöður .....	22
9. Heimildir .....	23
Viðauki A: DGPS mælingar .....	24
Viðauki B: Íssjármælingar 1997-2000 .....	25

**Myndalisti**

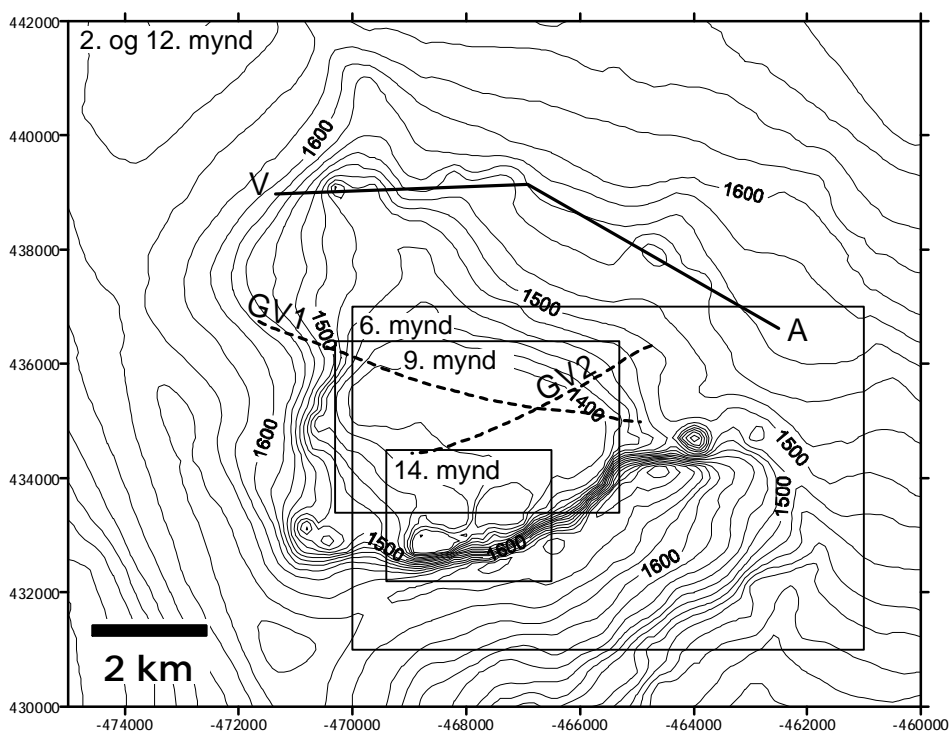
1. mynd.	Útmörk korta á myndum í skýrslunni	5
2. mynd.	Yfirborð Grímsvatna 2000	6
3. mynd.	Ljósmynd af gosstöðvum í júní 1999	7
4. mynd.	Ljósmynd af gosstöðvum í júní 2000	7
5. mynd.	Snið yfir jarðhitakatla í norðurhluta Grímsvatna	8
6. mynd.	Snið gegnum jarðhitadædir norðan Grímsfjalls	9
7. mynd.	Vatnshæð Grímsvatna árið 2000	10
8. mynd.	Hæð yfirborðs Grímsvatna í nóvember 2000	11
9. mynd.	Þykkun íshellu	12
10. mynd.	Breytingar í rúmmáli íshellu	12
11. mynd.	Flatar- og rúmmálsdreifing í Grímsvötnum árið 2000	14
12. mynd.	Breytingar í hæð yfirborðs milli 1999 og 2000	14
13. mynd.	Varmaafli Grímsvatna	17
14. mynd.	Gosstöðvarnar frá 1998	19
15. mynd.	Snið gegnum gíginn frá 1998	19
16. mynd.	Hitamælingar á gosstöðvum	21
17. mynd.	Hitastig á jarðhitasvæði sem fall af dýpi	21
18. mynd.	Vatnshiti í lóni	22



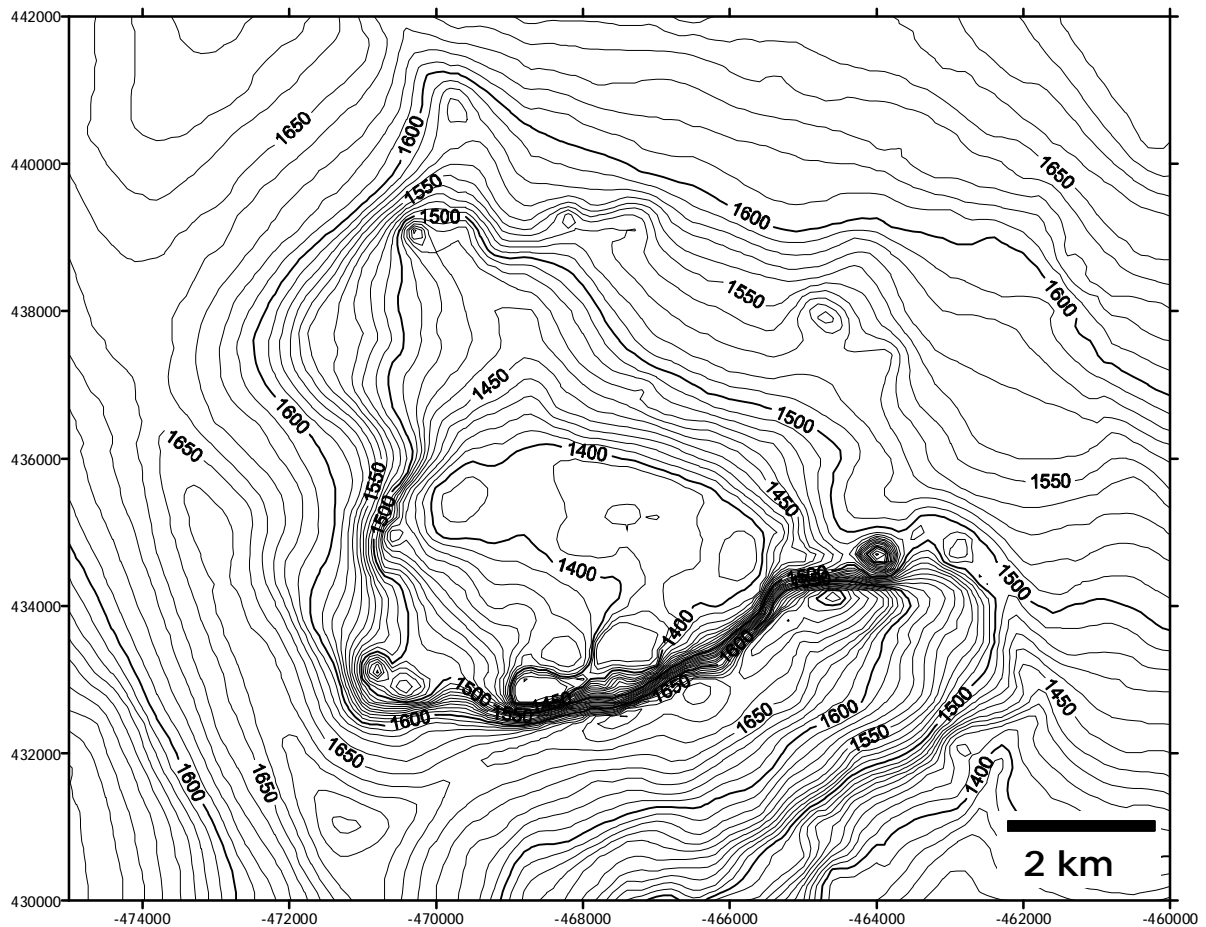
## Inngangur

Í kjölfar eldgosanna 1996 og 1998 hafa orðið umtalsverðar breytingar í Grímsvötnum. Set barst í Grímsvötn með bræðsluvatni frá Gjálpi og í hlaupinu sem fylgdi í kjölfarið lækkaði ísstífla Grímsvatna vegna bráðunar við botninn. Síðan hefur vatnshæð verið fremur lág og hegðun vatnanna einkennst af tíðum smáhlaupum og leka. Sumarið 1998 varð vart við aukinn jarðhita í Grímsvötnum, var það undanfari eldgossins í desember það ár. Við gosið jókst jarðhitavirkni, einkum með norðurhlíð Grímsfjalls og lækkaði ísstíflan enn við þá virkni. Þær breytingar sem orðið hafa síðustu árin eru mun hraðari en menn hafa áður orðið vitni að í Grímsvötnum. Þær gefa innsýn í samspil jökulsins við eldstöðina og áhrif breytinga í jarðhitavirkninni á hegðun jökulhlaupa. Því hefur verið talin full ástæða til að fylgjast náið með framvindu mála í Grímsvötnum.

Á jarðeðlisfræðistofnu Raunvísindastofnunar Háskólans hefur verið unnið að rannsóknum á hegðun Grímsvatna í allmörg ár. Eftir Gjálpargosið voru unnar umfangsmiklar athuganir í vötnunum og eldgosíð 1998 kallaði á enn frekari rannsóknir. Hefur Vegagerðin styrkt þessar rannsóknir en þær hafa að mestu verið unnar í ferðum Jökларannsóknafélagsins og með hjálp sjálfboðaliða þess. Landsvirkjun hefur einnig lagt rannsóknunum lið með þátttöku í ferðum og flutningum þeim tengdum.



1. mynd. Útmörk korta á myndum í skýrslunni. Kortin eru í hnitakerfi Lamberts, miðja í  $65^\circ N$ ,  $18^\circ V$ , þar er  $x = -500\,000$  m og  $y = 500\,000$  m.



2. mynd - Yfirborð Grímsvatna í júní 2000, vatnshæð 1358 m y.s. Byggt á mælingum á hæð jökulyfirborðs með DGPS (Viðauki A).

Í fyrri skýrslu (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000) var fjallað um mælingar og niðurstöður frá 1997-1999, um breytingar á botni Grímsvatna vegna gosanna í Gjalp og Grímsvötnum, gangur gossins 1998 var rakin og greint var frá helstu áhrifum þess á vötnin. Ennfremur var lagt mat á áhrif gossins 1998 á jarðhitafl Grímsvatna. Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir mælingum ársins 2000 auk þess sem niðurstöður íssjármælinga 1997-2000 um þykknun íshellunnar eru settar fram. Þá er fjallað um breytingar á jöklinum vegna jarðhita, þróun gígsins frá 1998 og jarðhitaaflið metið. Mælingar þær sem hér er um fjallað voru aðallega gerðar í vorferð JÖRFÍ í júní og haustferð í september árið 2000. Auk skýrsluhöfunda unnu sjálfboðaliðar Jöklarannsóknafélagsins að mælingunum. Kaflar 2, 6 og 7 eru einkum byggðir á mælingum og úrvinnslu gagna sem aflað var af Magnúsi T. Guðmundssyni og Þórdísi Högnadóttur en kaflar 3, 4 og 5 á gögnum og úrvinnslu Finns Pálssonar, Helga Björnssonar og Kirsty Langley.

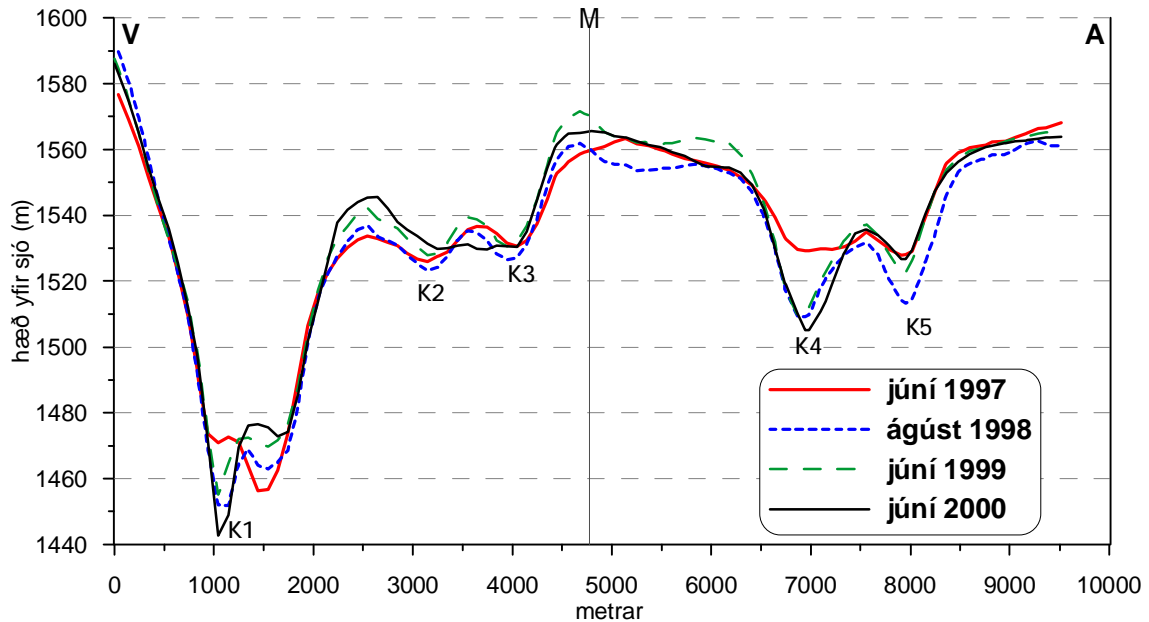




3. mynd. Gígsvæðið í Grímsvötnum í júní 1999, hort úr vestri. Lónið vestan gosstöðvanna var byrjað að myndast.



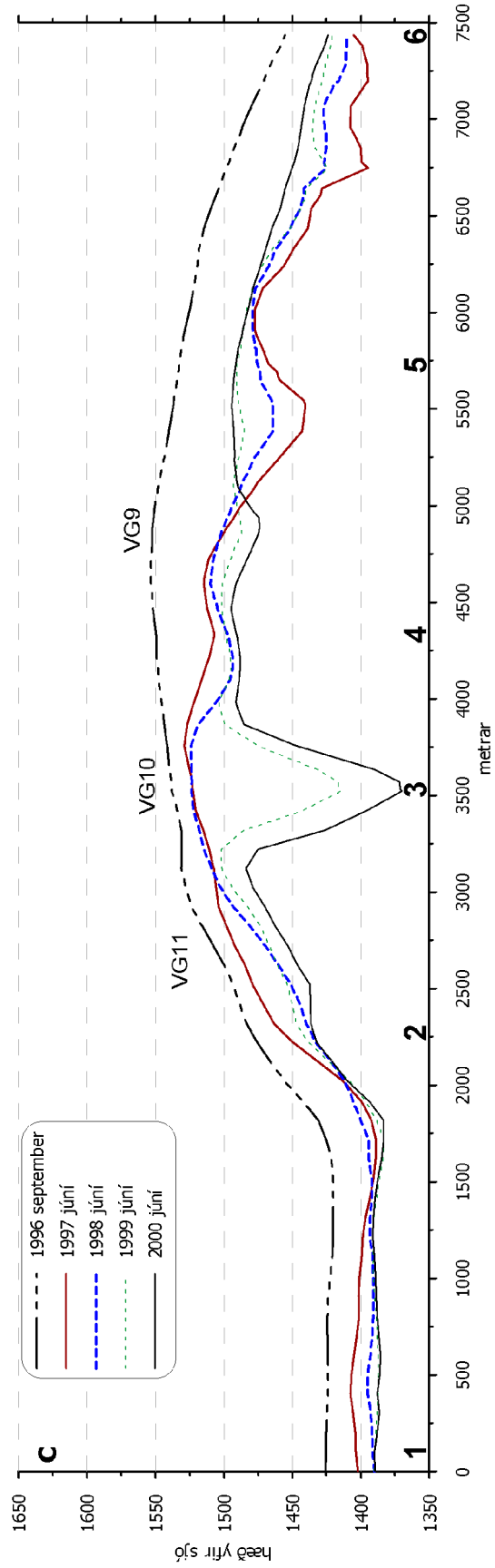
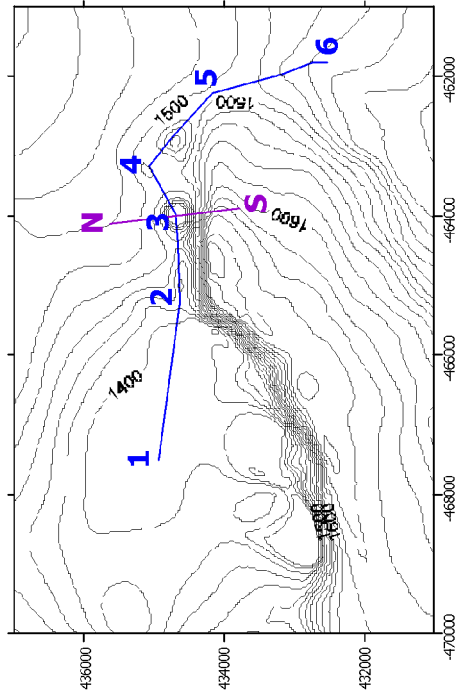
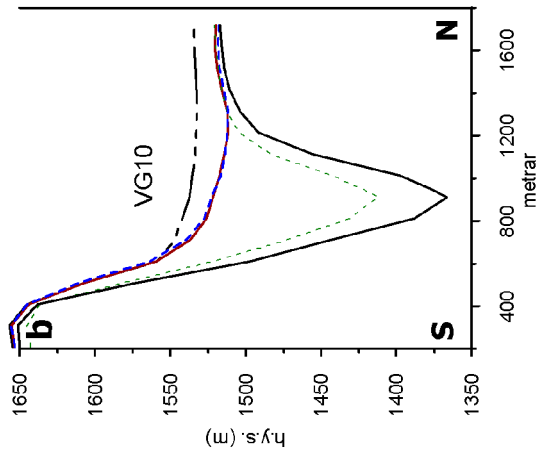
4. mynd. Gígsvæðið í júní 2000, myndin er tekin á sama stað og 3. mynd. Lónið var orðið um 500 m breitt.



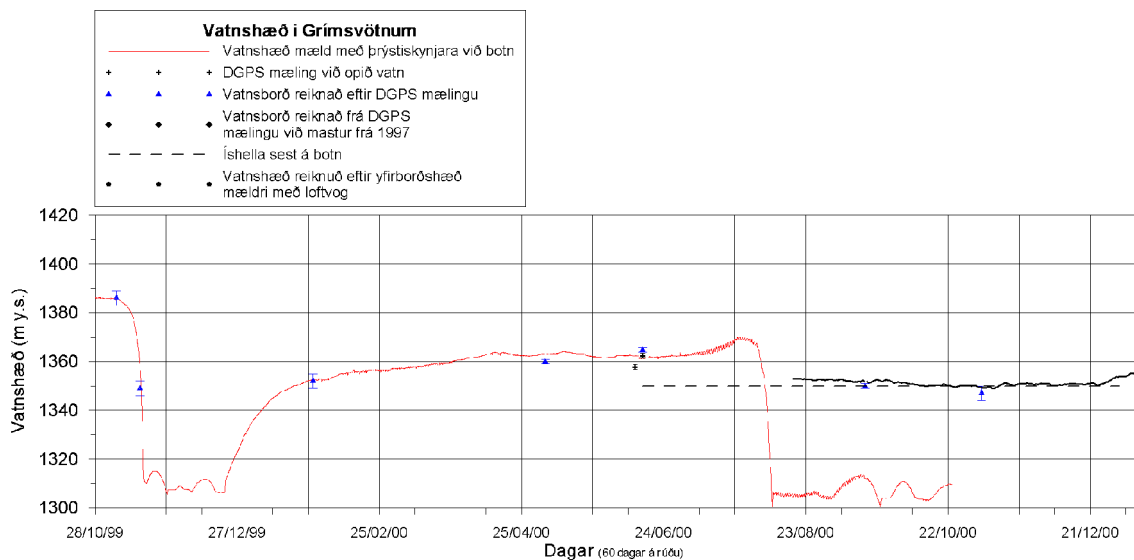
5. mynd. Snið yfir jarðhitakatla norðan til í Grímsvötnum 1997-2000. Staðsetning, sjá 1. mynd.

## 2. Yfirborð Grímsvatna 2000

Gögn um breytingar á Grímsvötnum frá 1999 til 2000 eru einkum mælingar með DGPS á hæð yfirborðs vatnanna í júní 2000 (Viðauki A). Að auki voru gerðar mælingar í september og snið mæld yfir vötnin úr flugvél 4. nóvember. Á 2. mynd er kort af yfirborðinu í júní 2000, byggt á DGPS mælingunum. Stórar breytingar áttu sér ekki stað milli 1999 og 2000. Mesta breytingin var stækkun lónsins vestan gosstöðvanna frá 1998 (3. og 4. mynd). Jarðhitinn bræddi sig inn í ketil sem lá vestan gosstöðvanna og breidd vakarinnar frá norðri til suðurs jókst úr um 300 m í 500 m. Norðan til í Grímsvötnum urðu fremur litlar breytingar (5. mynd). Austasti ketillinn grynkaði þó um 10 m frá fyrra ári, sem þýðir að jarðhitavirkni undir honum hefur minnkað. Rásin meðfram Grímsfjalli til austurs, gegnum ísstífluna hélt áfram að dýpka (6. mynd). Lægsti punktur í rásinni lækkaði úr rúmlega 1500 m í júní 1999 í rúmlega 1490 í júní 2000 (staður merktur með tölunni 4 á mynd 6c). Ljóst er því að ísskrið inn að rásinni náði ekki jafnvægi við aukningu jarðhitans á árinu; bráðnun var meiri en ísskrið.



6. mynd. b) Þversnið yfir stóra ketilinn norðaustan í Grímsfjalli (VG10). c) Langsníð austur með Grímsfjalli að norðan 1996-2003.

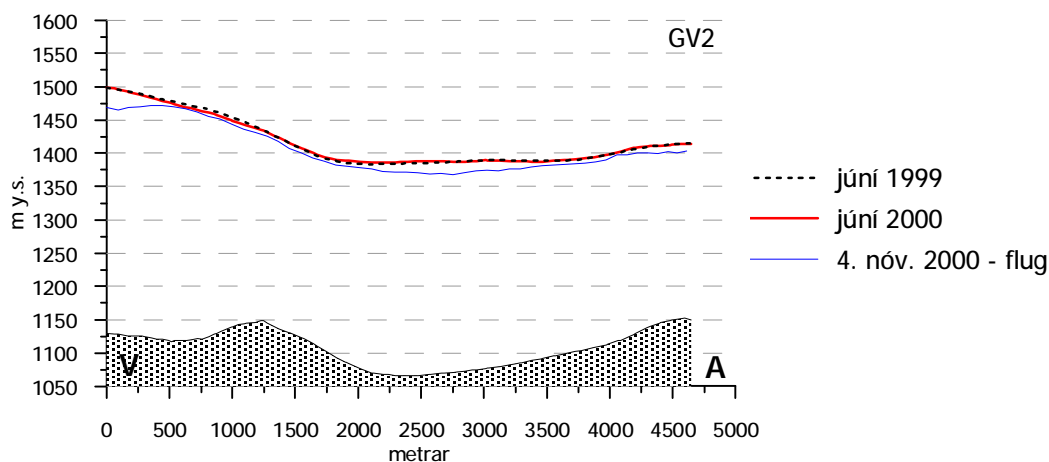
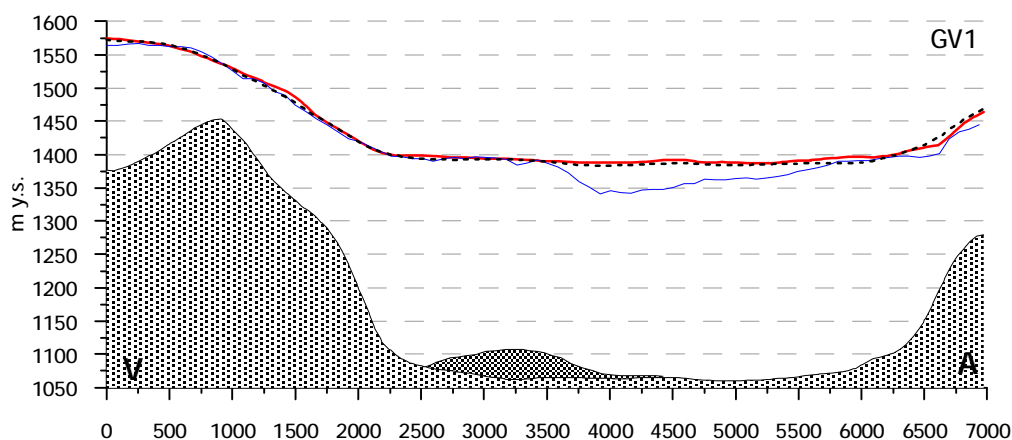


7. Mynd. Vatnshæð í Grímsvötnum árið 2000.

### 3. Vatnshæð

Þrýstimælir á botni vatnanna sem komið var fyrir í júní 1999 skráði vatnshæðina til loka október 2000 en þá slitnaði kapallinn frá þrýstimælinum upp til yfirborðs. Hæð jökulyfirborðsins á borstaðnum var einnig mælt með loftvog þ.a. samfelldar mælingar eru til fyrir allt árið. Einnig eru nokkrar mælingar á vatnshæð með DGPS, bæði á borstað og við gosstöðvarnar.

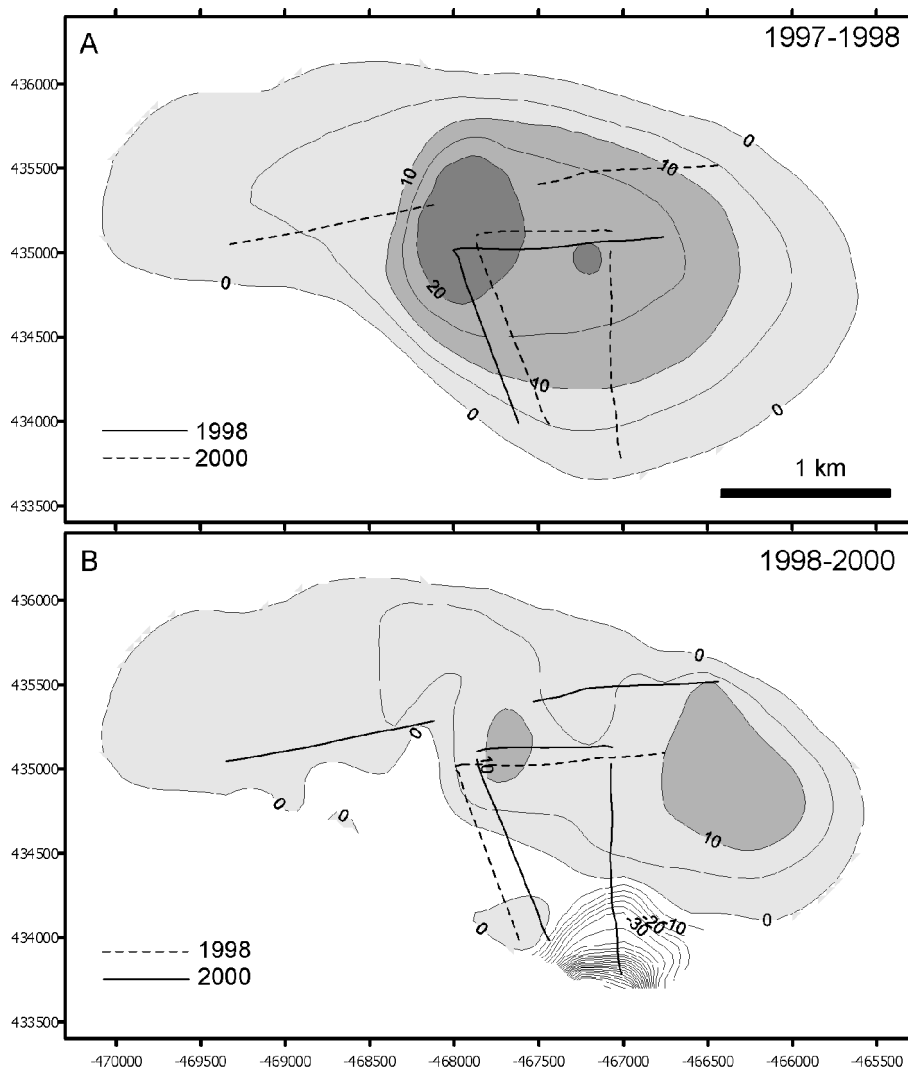
Vatnshæð hélst lág allt árið (7. mynd). Hæst fór hún í tæplega 1370 m í lok júlí en um mánaðarmótin júlí-ágúst varð smáhlaup þar sem íshellan seig um 20-30 m. Í kjölfar hlaupsins í nóvember 1999 og síðan aftur í ágúst-nóvember 2000 féll þrýstihæðin niður í 1305-1310 m y.s., sem samsvarar því að vatnshæðin hafi verið um 70 m neðan við yfirborð hellunnar. Í nóvember 2000 voru mæld tvö snið með radarhæðarmælingu yfir Grímsvötn (8. mynd). Þau sýna hvernig íshellan lá á botninum. Lægsti punktur á norðanverðri íshellunni, á þeim stað þar sem vötnin eru hvað dýpst, var tæplega 1350 m y.s. Ljóst er því að íshellan lá í botni á þessum tímabilum og vötnin voru tóm, nema hvað vatn stóð uppi í vökinni norðan gosstöðvanna og í lóninu vestan þeirra. Þetta þýðir að vatnið við gosstöðvarnar hafa á þessum tíma ekki verið í þrýstisambandi við botn Grímsvatna annarstaðar. Vatnsborði í vökunum hefur verið haldið uppi með ísstíflum, þ.e. íshellan hefur allstaðar legið í botni umhverfis þær. Svipaðir atburðir hafa ekki gerst áður svo vitað sé á því tímabili sem athuganir ná yfir, þ.e. eftir 1934.



8. mynd. Hæð yfirborðs Grímsvatna samkvæmt flugmælingum í nóvember 2000.

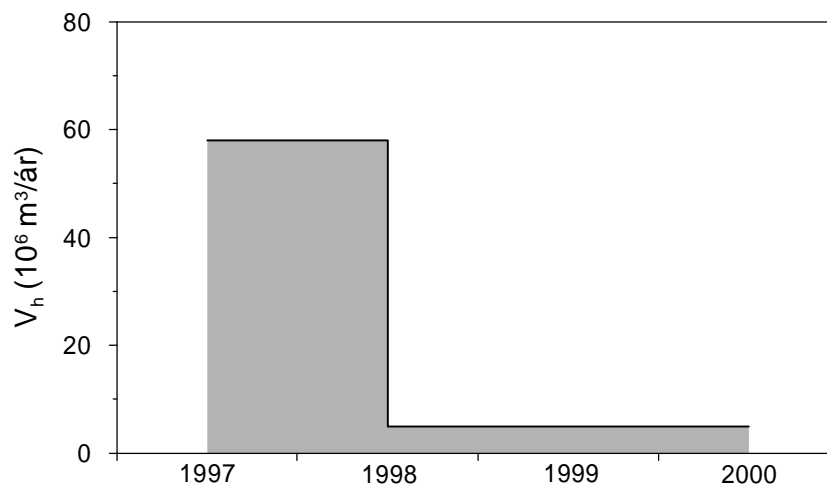
#### 4. Íssjármælingar 1997-2000

Vorið 1997 var þykkt íssins í Grímsvötnum og nágrenni þeirra mæld með íssjá (Viðauki B). Tilgangur mælinganna var að kanna hvort breytingar hefðu orðið á botninum á því svæði sem varð fyrir áhrifum af Gjálpargosinu og umbrotunum samfara því. Aftur voru gerðar íssjármælingar á nokkrum línum 1998 og 2000. Þessar mælingar eru nákvæmari en fyrri mælingar úr Grímsvötnum. DGPS staðsetningarnar hafa um 1 m óvissu meðan Loran-C staðsetningartæknin hafði um 100 m óvissu. Að auki voru 1997-2000 notuð hærri tíðni sem gefur betri upplausn en í mælingunum 1987 þegar svæðið var kortlagt (Helgi Björnsson, 1988; Helgi Björnsson og fl. 1992). Misræmi í þykkt milli mælinganna 1997 og 1987 er nokkurt á stöku stað, en það má að mestu skýra með ónákvæmum staðsetningum í eldri mælingunum. Unnið er að lagfæringum á botnkortinu en þær munu ekki leiða til stórvægilegra breytinga á eldri kortum. Einnig mun sú lagfæring leiða til nákvæmari myndar af lögun og þykkt setbunka úr Gjálpargosinu sem sagt var frá í fyrri skýrslu (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000). Umfjöllun um íssjármælingarnar hér takmarkast af mælingum á þykkun íshellu frá 1997. Þær upplýsingar eru mikilvægar vegna mats á rúmtaki vatnanna og vegna mats á varmaafli Grímsvatna.



9. mynd. Þykkun íshellu Grímsvatna (a) 1997-1998, og (b) 1998-2000. Þéttar mælingar á ísþykkt voru gerðar 1997 og eru kortin byggð á frávikum mælinga 1998 og 2000 frá 1997.

10. mynd. Breytingar í rúmmáli íshellunnar 1997-2000.

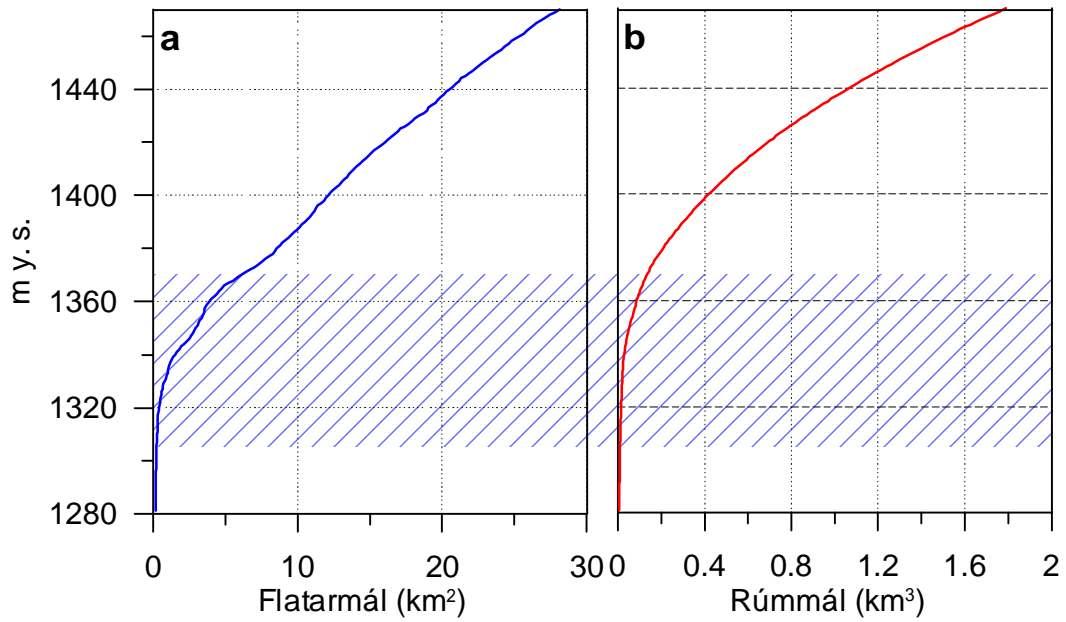


Á 9. mynd er sýnd breyting á þykkt íshellunnar, (a) milli árána 1997 og 1998 (b) milli 1998 og 2000. Auk hinna beinnu þykktarmælinga er við gerð kortanna stuðst við þær skorður sem flotmörk íshellunnar veita, en þykkunin er greinilega bundin við það svæði sem var á floti. Einnig er sú skorða sett að þykktarbreytingar séu reglulegar. Hún styðst við það að hellan er allstaðar nærri því að vera í flotjafnvægi, sem þýðir að umtalsverð þykkun ætti að koma fram sem hækkun yfirborðsins miðað við vatnshæðina. Kortin á 9. mynd sýna að íshellan hefur þykknað verulega 1997-2000. Langmest var þykkunin fyrsta árið. en í miðjum vötnunum var hún yfir 20 m 1997-1998, og allt að 10 m til viðbótar 1998-2000. Að svo miklu leyti sem gögnin leyfa slíkan samanburð, verður ekki séð annað en að hægt sé að skipta hellunni í tvö svæði. Það austara hefur verið á floti allan tímann frá 1997, og þar hefur hellan náð að þykkna mun meira en á vestara svæðinu, sem aðeins hefur farið á flot öðru hvoru. Þynningin við suðurjaðar íshellunnar á tímabilinu 1998-2000 stafar af bráðnun í kjölfar gossins í desember 1998. Þessi staður er syðst í vötnunum, við norðurjaðar vakarinnar úr gosinu í desember.

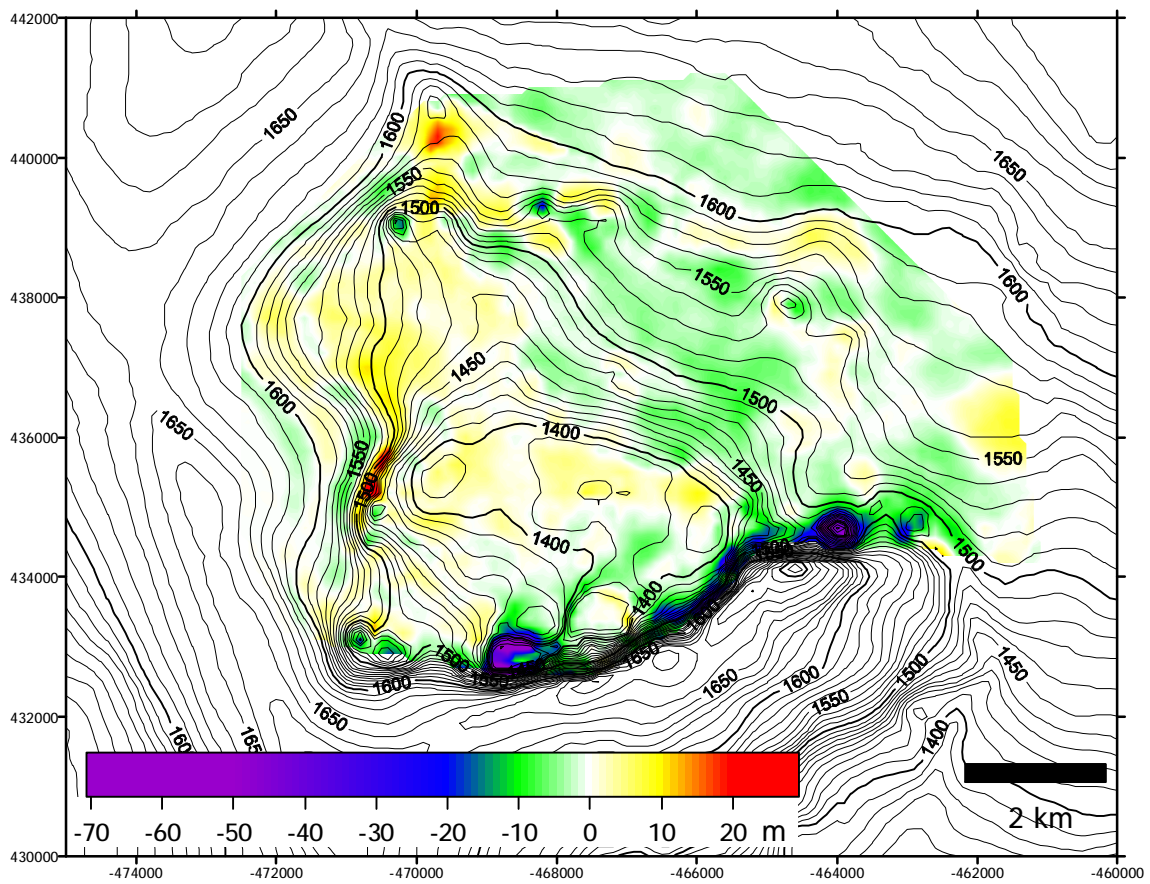
Þykkun íshellunnar má rekja til þess að allt frá Gjálpargosi hefur vatnsstaðan verið miklu lægri en var áratugina á undan. Á þeim áratugum hafði jökullinn hækkað og íþykkt þar með aukist umhverfis íshelluna frá því sem var fram yfir miðja 20. öld (Magnús T. Guðmundsson og fl. 1995). Við þessa lágu vatnsstöðu eru brekkurnar upp úr vötnunum að norðan mun brattari en var fyrir umbrotin 1996. Lárétt spenna í íshellunni hefur því aukist vegna aukins álags frá ísnum norðan vatnanna. Hellan hefur svarað aukinni láréttri spennu með því að kýtast saman og þykkna. Ástæða þess að þykkun er mun minni í vesturhlutanum er líklegast sú að það svæði hefur langtímum saman legið á setbunkanum úr Gjálpargosinu. Við það hefur viðnám gegn aðstreymi íss verið meira en í austurhlutanum. Einnig er halli frá norðri niður til vesturhluta íshellunnar mun minni en í austurhlutanum, sem gæti þýtt að minni breyting hafi orðið þar í láréttri spennu.

Á 10. mynd er rúmmálsaukning íshellunnar sýnd sem fall af tíma. Ekki var gert ráð fyrir þessum breytingum í fyrri skýrslu (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000) en ekki var búið að vinna úr mælingunum þegar hún var skrifuð. Sú þróun sem þar var lýst um þynningu íshellunnar og svæðisins umhverfis var því ekki allskostar rétt. Hið rétta er að jökullinn umhverfis vötnin hefur lækkað, væntanlega vegna aukins ísskriðs inn í vötnin. Á sama tíma hefur sú þynning að hluta verið upphafin af þykkun íshellunnar. Eftir stendur að til lengri tíma litið mun þykkt íshellunnar ráðast af því hvort bráðnun vegna veðurþátta og jarðhita er meiri eða minni en nemur heildarákomu á Grímsvatnasvæðið.

Þykkun íshellunnar hefur svo til engin áhrif á fyrra mat á varmaafli en lækkar mat á rúmmáli vatnsgeymisins um nálægt  $0.1 \text{ km}^3$  frá því sem áður var gert ráð fyrir (11. mynd).



11. mynd. Flatar- og rúmmálsdreifing í Grímsvötnum árið 2000.



12. mynd. Breytingar í hæð yfirborðs Grímsvatna milli 1999 og 2000. Vatnshæð var nánast sú sama bæði árin eða 1360 m 1999 og 1358 m 2000.



## 5. Rúmmál Grímsvatna

Á 11. mynd er rúmmál og flatarmál Grímsvatna sýnt sem fall af vatnshæð. Þykknun íshellunnar frá 1997 veldur því að rúmmálastölur eru nokkru lægri en reiknaðar voru fyrir 1999 með öðrum forsendum (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000). Mismunurinn er 0.1-0.2 km<sup>3</sup>. Ef vatnshæð gæti náð 1455 m hæð, eins og var fyrir hlaupið í apríl 1996, yrði rúmmál vatns í geyminum 1.4 km<sup>3</sup>, en var áætluð 1.55 km<sup>3</sup> 1996 (Helgi Björnsson, 1997). Rúmmálsdreifingin sýnir að við hæstu vatnsstöðu á árinu 2000 (um 1370 m) voru aðeins 0.14 km<sup>3</sup> í vötnunum og rann mestur hluti þess vatns fram í smáhlaupinu um mánaðarmótin júlí-ágúst.

Þrátt fyrir verulega lökkun íss á nokkru svæði umhverfis íshelluna, sem lýst var í fyrri skýrslu (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000), veldur staðbundin þykknun íshellunnar því að minnkun í rúmmáli íss á svæðinu vegna aukins jarðhita og eldgosa kemur ekki fram í stækkun vatnsgeymis. Til lengri tíma litið gæti geymirinn þó stækkað aftur. En til þess þyrfti jarðhiti á ísstíflunni að minnka en haldast töluverður annarstaðar í vötnunum.

## 6. Varmaafli

Þrálátur leki úr Grímsvötnum eftir 1996 hefur gert fyrri aðferð við mælingu á varmaafli svæðisins (Helgi Björnsson og Magnús T. Guðmundsson, 1993) ónothæfa. Hún fólst í því að reikna vatnssöfnun milli hlaupa út frá vatnsborðshækkun að teknu tilliti til breytinga í þykkt íshellu. Þar var gert ráð fyrir að vötnin væru lokuð milli hlaupa og vatnssöfnin væri summa tveggja þátta: 1) bráðnunar vegna jarðhita við botn og 2) sumarleysingar á yfirborði. Til að meta jarðhita nú þarf að kortleggja yfirborð jökulsins á mismunandi tímum og mæla þykktarbreytingar í íshellunni þar sem hún er á floti. Síðan þarf að taka tillit til rúmmálsbreytinga vegna mismunandi vatnshæðar. Að lokum þarf að meta áhrif afkomu jökulsins. Heildarafkoma svæðisins ræðst af samspili ársafkomu vegna veðurþátta og ísbáðnun vegna jarðhita. Hæðarbreytingar jökulyfirborðsins utan íshellunnar stafa af mismun á þessu tvennu. Ef jarðhitinn nær ekki að bræða sem nemur ársafkomu (mismun vetrarafkomu og sumarafkomu á yfirborði), vex rúmmál íss á svæðinu. Ef ísbráðnun vegna jarðhita er meiri en ársafkoman, minnkar rúmmál íssins. Ekki hafa verið gerðar nægilega umfangsmiklar afkomumælingar í ísasvæði Grímsvatna til að hægt sé að beita þessari aðferð að fullu. Í staðinn eru metnar breytingar frá áætluðu grunnafli svæðisins út frá breytingum á ísþykkt. Í þeim tilgangi er yfirborðið kortlagt árlega, að vori áður en leysingar tekur að gæta. Þættir varmaflsins eru hér taldir þessir.

i) Grunnafl svæðisins  $P_0$ . Ef vatn lekur út úr Grímsvötnum er erfitt að meta þennan þátt. Hann er hér talinn 1800 MW; afl vatnanna á tímabilinu 1991-1996 (Helgi Björnsson, 1997).

ii) Afl sem fer í að bræða ís umfram það sem grunnaflið gerir,  $P_i$ . Rúmmál þess íss er metið út frá breytingum í yfirborðshæð utan þess svæðis sem er á floti að teknu tilliti til þykktarbreytinga íshellunnar með tíma. Ef hellan þykknar, þó svo jökullinn lækki umhverfis, er ísbráðnun umfram bráðnun vegna grunnafls minni sem nemur þykknuninni.

iii) Afl sem ekki nýtist til ísbræðslu  $P_a$ , þ.e. varmi sem tapast til andrúmsloftsins vegna uppgufunar og geislunar.

Heildaraflíð verður þá:

$$P_{heild} = P_0 + P_i + P_a \quad (1)$$

Þar sem  $P_i$ , afl sem kemur fram sem breytingar í rúmmáli íss, er fengið með:

$$P_i = \frac{(V_i - V_h)\rho_i L}{t} \quad (2)$$

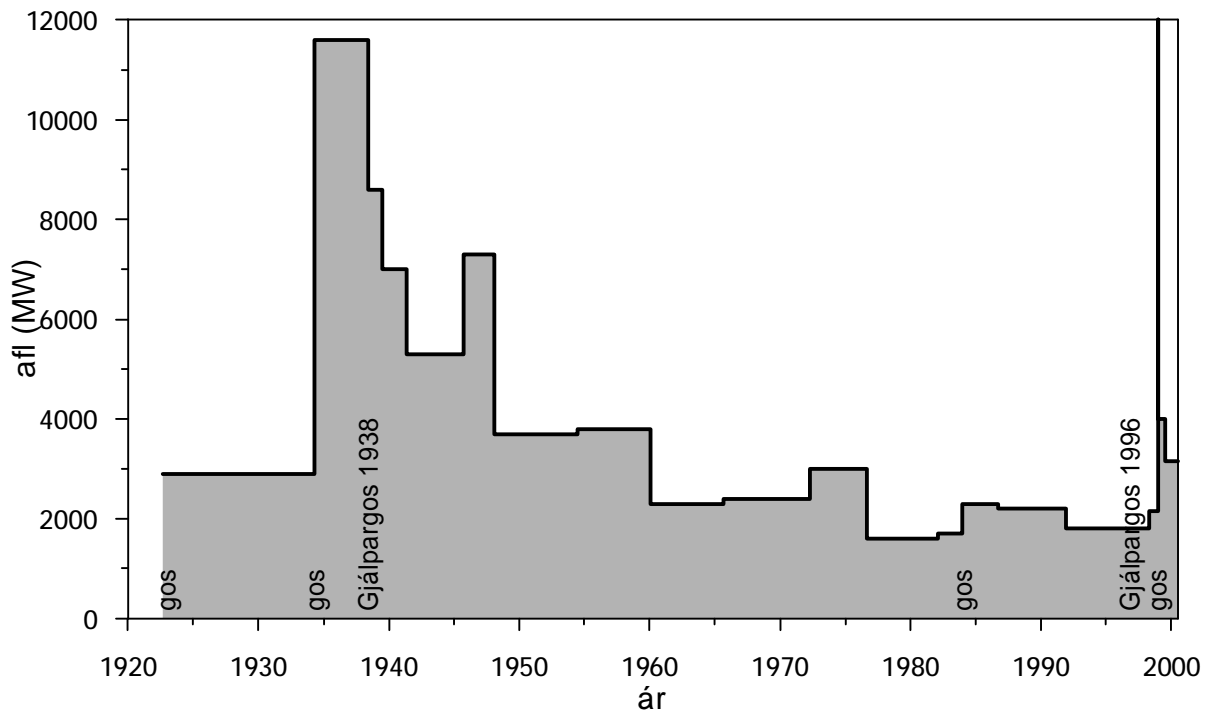
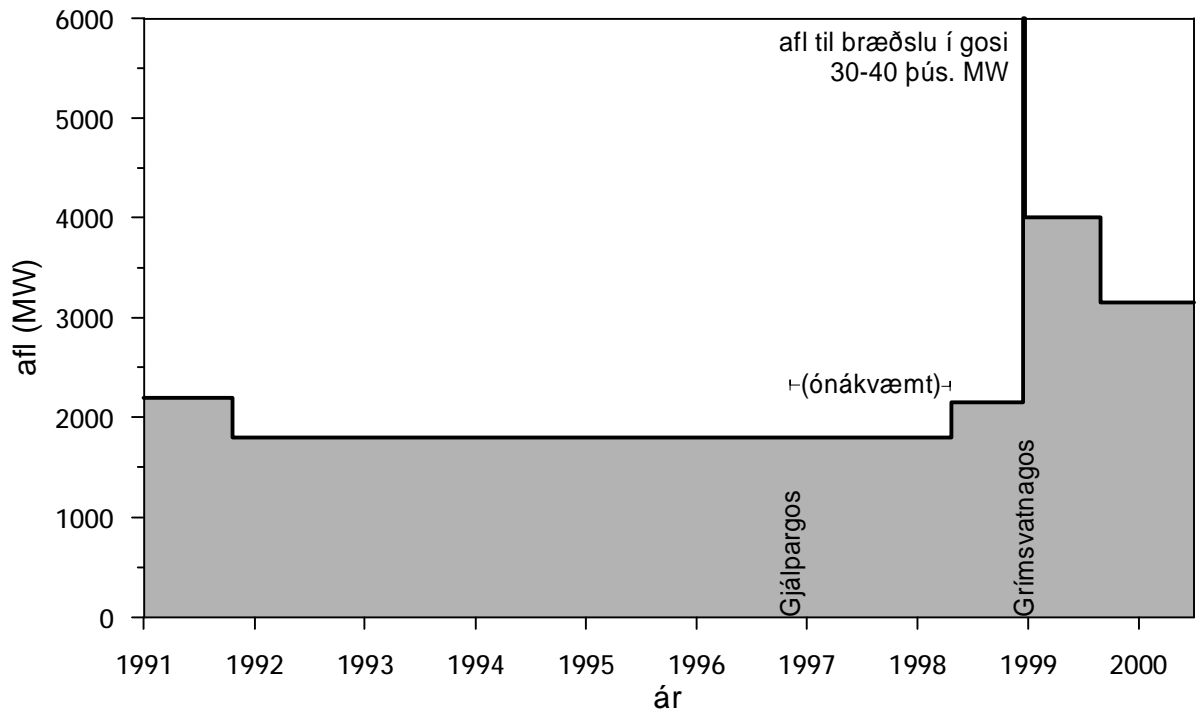
Hér er  $V_i$  rúmmál íss sem bráðnar á tímanum  $t$  (hér er  $t$  eitt ár) samkvæmt mælingum á yfirborðshæð,  $V_h$  rúmmálsbreytingar íshellunnar (aukning í rúmmáli skilgreind jákvæð),  $\rho_i$  er eðlismassi jökulsins,  $910 \text{ kg m}^{-3}$  og  $L$  er bræðsluvarmi vatns,  $3.35 \cdot 10^5 \text{ J kg}^{-1}$ .

**1. tafla. Rúmmálsbreytingar íss 1999-2000**

Svæði	Rúmmál ( $10^6 \text{ m}^3$ )
Norðan og norðaustan íshellu	36
Gígsvæði og norðurhlíð Grímsfjalls	79
Lón vestan gígs, bráðnun neðan vatnsborðs	13
Þykknun íshellu ( $V_h$ )	-5
Samtals ( $V_i - V_h$ )	<b>123</b>

Hæðarbreytingar í jökulyfirborðinu milli árána 1999 og 2000 eru sýndar á 12. mynd. Rúmmálsbreytingar eins og þær skiptast á einstök svæði eru í 1. töflu. Ef niðurstöður um ísbráðnun samkvæmt 1. töflu eru settar inn í jöfnu (2) fæst  $P_i = 1200 \text{ MW}$ .

Þriðja lið jöfnu (1),  $P_a$ , afl sem tapast til andrúmsloftsins, er erfitt að meta. Verkefni sem franskur nemi, Jerome Blondel (2001) vann við raunvísindadeild HÍ sumarið 2001 fjallaði um varmabúskap lóns sem að hluta er í skugga frá fjallshlíð. Jerome mat stærðir einstakra orkuþátta (stuttbylgjugeislunar, langbylgjugeislunar, lofthita, loftraka, uppgufunar) og fékk út að tap vegna útgeislunar væri stærðargráðu minna en sú orka sem færi í ísbræðslu í lóninu í Grímsvötnum. Lauslega má áætla að nokkrir tugir MW tapist til andrúmsloftsins frá lóninu. Aðrir þættir í varmatapi til andrúmslofts eru varmageislun og uppgufun frá heitum svæðum í gígnum, norðurhlíð Grímsfjalls og við Eystri Svíahnúk. Stærðargráða þess varmataps er um 100 MW, en



13. mynd. (a) Varmaafli Grímsvatna 1991-2000. (b) Varmaafli 1922-2000 (fram til 1991 samkvæmt Helga Björnssyni og Magnúsi T. Guðmundssyni, 1993).

ekki hefur verið lagt í nákvæmt mat, enda ekki gerðar sérstakar mælingar til að ákveða þennan þátt. Hér er því gert ráð fyrir að  $P_a = 150$  MW, en eins og fram kemur hér að framan er óvissan mjög mikil.

Heildarafl Grímsvatna 1999-2000 samkvæmt jöfnu (1) verður 3150 MW, þar af nýtast 3000 MW til bræðslu (13. mynd). Nokkur lækking hefur orðið í varmaafli frá meðaltali fyrri hluta árs 1999 en þá var það metið 4000 MW. Er slík lækking sennileg því með tímanum kólna gosefnin og varmaflæði frá þeim minnkar

Samanburðurinn milli fyrri hluta árs 1999 og 1999-2000 er marktækur en nokkur óvissa er í heildartölunni. Stafar það einkum á óvissu í mati grunnaflsins. Við núverandi aðstæður væri hægt að meta betur heildaraflið yfir nokkurra ára tímabil með því að bera saman afkomumælingar á yfirborði, við breytingar í massa íss á svæðinu.

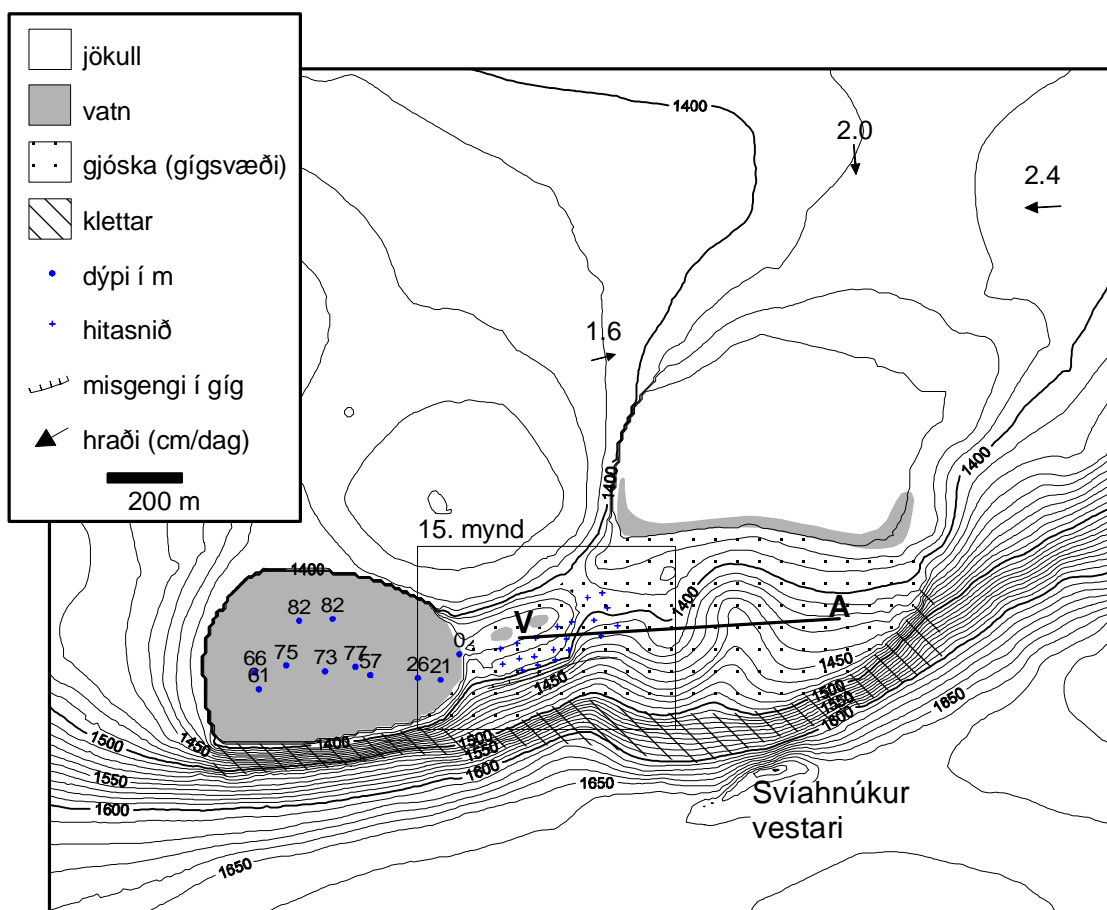
## 7. Rannsóknir á gígsvæðinu

Rannsóknir á gosstöðvunum frá 1998 voru gerðar í júní. Þær fólust í athugun á sigi vesturhluta gosefnahaugans, mælingum á hitastigi í gjóskunni og mælingum á dýpi og hitastigi lónsins við vesturenda gosprungunnar. Ennfremur var mælt ísskrið inn að vökinni norðan gosstöðvanna 14. mynd sýnir gígsvæðið, ísskriðsvektora, dýptir í lóninu og staði þar sem hiti í gjósku var mældur á jarðhitasvæðinu milli megingígsins og lónsins.

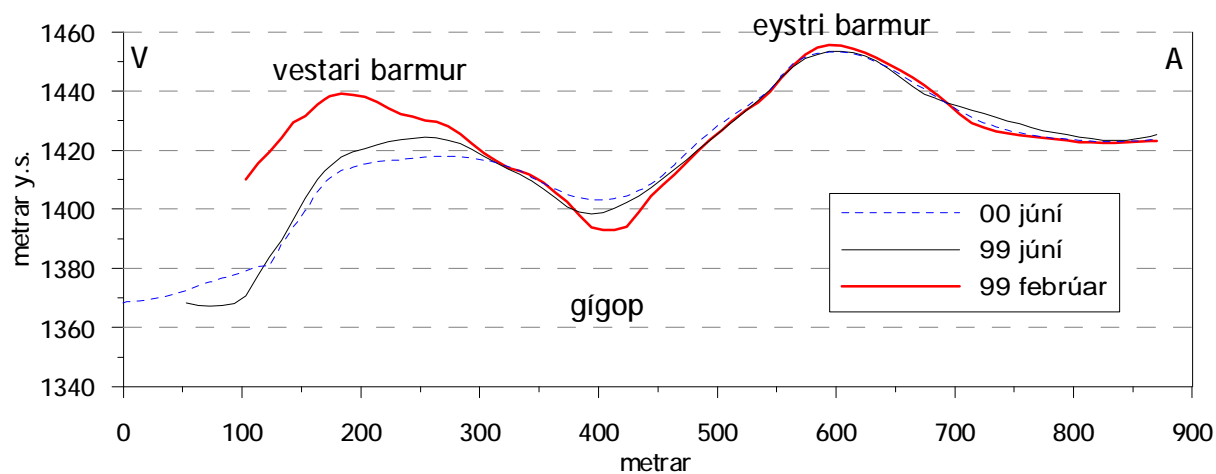
### 7.1. Þróun gígsins

Vesturbarmur megingígsins gosefnin í vesturenda sprungunnar hlóðst upp að ísvegg að norðan. Eftir gosið hefur barmurinn og gosefnahaugurinn vestan hans sigið fram til norðurs þar sem ísveggurinn hefur smám saman hörfað. Varmi flæðir úr heitum gosefnahaugnum og bræðir ísinn og orsakar þannig hörfun hans. Þróuninni árið 1999 var lýst í fyrri skýrslu (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000), en þá lækkaði vestari barmurinn um rúma 15 metra frá febrúar fram í júní. Þessi þróun hélt áfram árið 2000 og seig nyrðri hluti barmsins um tæpa 10 m frá júní 1999 til júní 2000 (15. mynd). Misgengisstallur, samsíða norðurhlíð Grímsfjalls myndaðist í vesturbarminn og nær hann að vesturenda gosstöðvanna. Heildarsig norðan við þennan stall nam a.m.k. 10-15 m í júní 2000. Norðan megin, nær ísveggnum, voru tvær víðar holur eða niðurföll, og í þeim vatnsborð í sömu hæð og í lóninu.

Í samanburði við vesturhluta gosstöðvanna, hefur aflögun austurhlutans verið lítil. Sá hluti gosstöðvanna stóð að hluta ofan á kollinum frá gosinu 1983 og hafði ekki stuðning af ísvegg. Þessar athuganir varpa nýju ljósi á varðveislumöguleika gíga í íspöktum eldfjöllum. Áframhaldandi athuganir munu leiða í ljós að hve miklu leyti gígurinn frá 1998 mun varðveitast. Ennfremur auka þær skilning á myndun kolla og hæða sem víða er að finna í Grímsvötnum og vænanlega eru leifar gíga og eldvarpa úr fyrri gosum.



14. mynd. Gosstöðvarnar frá 1998. Ísskrið inn að vök og dýptarmælingar í lóni.



15. mynd. Snið frá vestri til austurs gegnum megingíginn í gosinu. Staðsetning sniðs er sýnd á 14. mynd.

## 7.2. Jarðhiti

Gerðar voru mælingar á hitastigi í gjóskunni á jarðhitasvæðinu í vesturhluta gosstöðvanna (16. mynd). Grafnar voru 20 holur og hiti mældur á yfirborði og á 35 cm, 70 cm og 105 cm dýpi. Hiti í yfirborði er á bilinu 1° - 46°C og vex hann víðast hratt með dýpi (17. mynd). Meðalhitastigull er 26°C/m. Þar sem hiti er mestur er suðumarki (~93°C í 1400 m hæð yfir sjó) náð á 70 cm dýpi. Lögun margra hitaferlanna er þannig að hiti vex hratt efst en hægar neðar. Þetta er dæmigert fyrir staði þar sem varmaflutningur fer að mestu fram hræringu (Robertson og Dawson, 1964) en varmaleiðing er tiltölulega lítil þáttur þrátt fyrir háan hitastigul. Varminn flyst því til yfirborðs með uppstreymi gufu. Nokkuð var um útfellingar við gufuaugu. Hins vegar voru lítil merki um ummyndun gjóskunnar; hún var hvergi orðin samlímd og þétt.

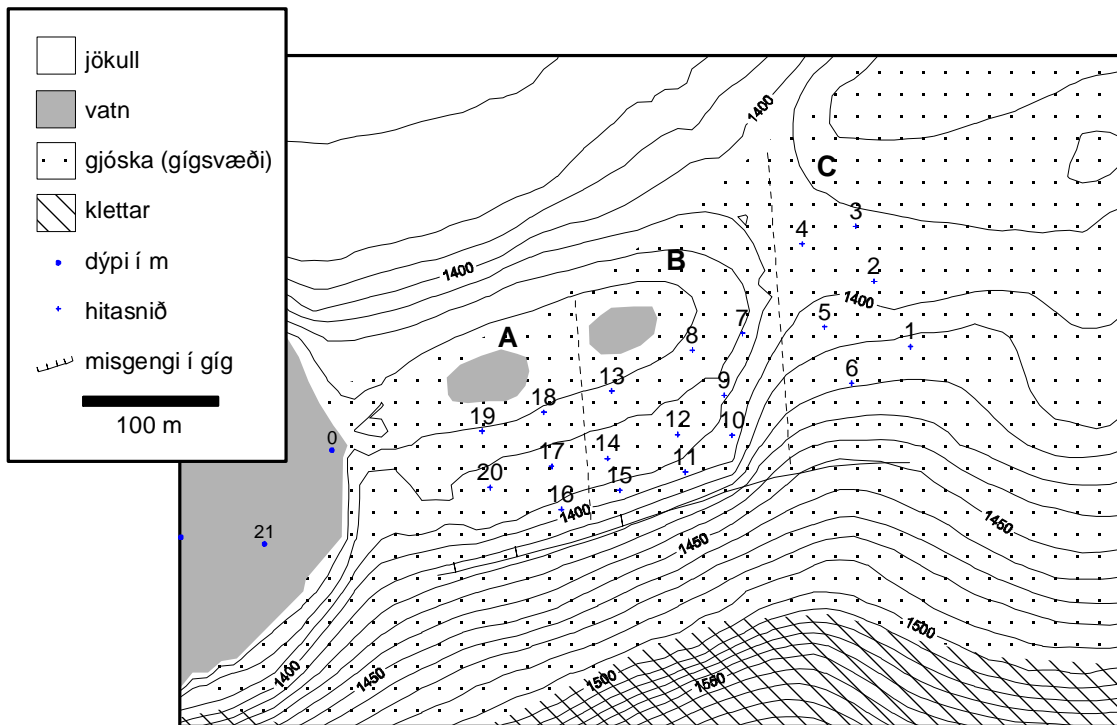
## 7.3. Lónið

Lónið vestan gosstöðvanna hóf að myndast vorið 1999. Á einu ári frá júní 1999 til júní 2000 stækkaði það mjög (3. og 4. mynd) og ketill sem að lá vestan við vesturenda gossprungunnar í lok gossins rann saman við í lónið. Í janúar 2000 var töluverður hluti lónsins undir lagnaðarís en nokkurt svæði næst gossprungunni var autt, þó svo lofthiti á vetrum sé langtímum saman -10° til -20°C.

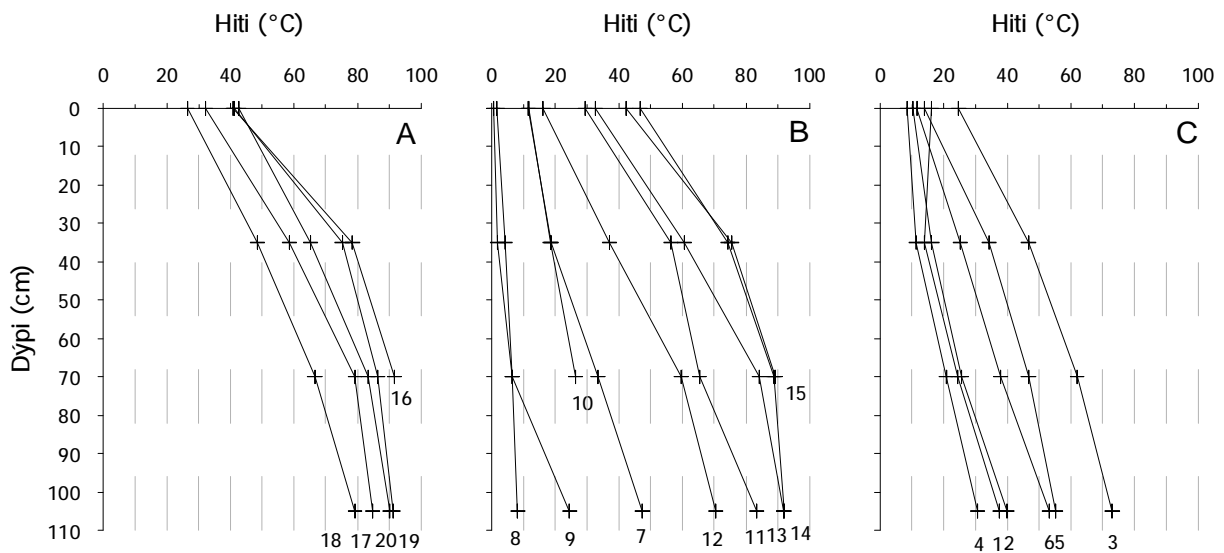
Í júní var farið með gúmmibát á lónið og dýpi og yfirborðshitastig mælt á allmörgum stöðum (14. mynd). Einnig var mældur vatnshiti sem fall af dýpi í lóninu (18. mynd). Hiti við yfirborð var 5.4°C en lækkaði síðan í rúmlega 4°C neðar. Hitaferlillinn bendir til hræringar í lóninu: Vatnið hitnar við botninn og stígur upp, kólnar við yfirborð og sekkur síðan. Alloft hrundu stór ísstykki úr ísveggjunum niður í lónið. Þegar það gerðist lagðist íshroði yfir hluta þess. Ef ekki hrundi að ráði í 1-2 tíma bráðnaði íshroðinn þó svo að hann þekti allt að 1/4 hluta lónsins eftir mikil og endurtekin hrun. Ekki varð vart við að þessi ísbráðnun hefði teljandi áhrif á hitastig lónsins. Þetta sýnir öflugan varmastraum að neðan upp í lónið. Vatn var snarpheitt í fjöruborðinu við vesturenda gossprungunnar, en kólnaði hratt með dýpi.

## 7.4. Ísskrið inn að vök

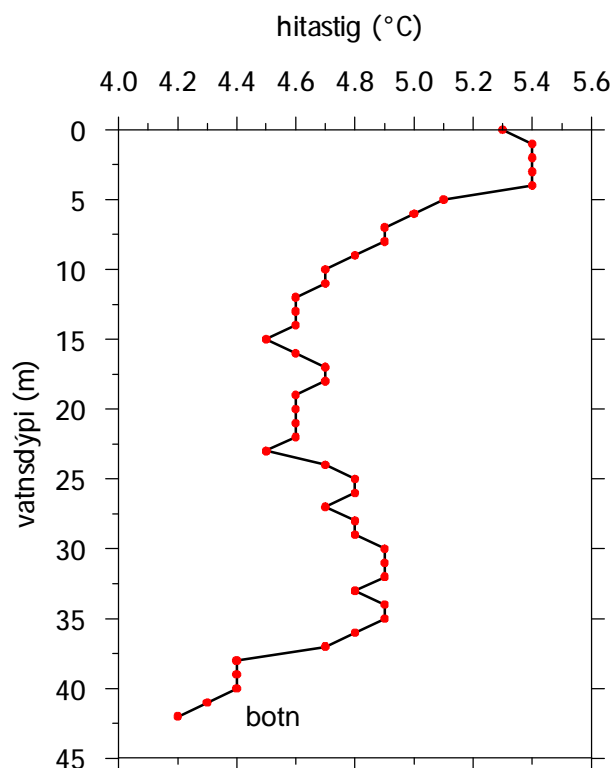
Hraði ísskriðs að vökinni norðan gosstöðvanna var mjög lítil, aðeins 2 cm/dag (~7 m/ár), sem er þriðjungur þess sem mældist sumarið 1999 ((Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000). Ísskrið og kelfing inn í vökina var því óveruleg, væntanlega vegna þess að jökullinn stóð í botni og halli yfirborðsins inn að vökinni er lítil. Búast má við mun hraðara skriði og fyllingu vakarinnar ef vatnsborð rís það mikið að hellan umhverfis færi á flot.



16. mynd. Staðir þar sem hitastig var mælt í gjóska á jarðhitasvæðinu á vestanverðum gosstöðvunum.



17. mynd. Hitastig sem fall af dýpi á svæðum A, B og C (16. mynd). Hitastig er hæst næst lóninu og lækkar síðan til austurs.



18. mynd. Vatnshiti í lóni.

## 8. Samandregnar niðurstöður

- Breytingar á yfirborði jökulsins á Grímsvatnasvæðinu vegna aukins jarðhita í kjölfar gossins 1998 héldu áfram á árinu 2000. Jökullinn sigur og bráðnar með norðurhlíð Grímsfjalls allt austur fyrir ísaskil á ísstíflunni austan vatnanna. Mikið lón myndaðist vestan við gosstöðvarnar á tímabilinu frá vori 1999 til sumarsins 2000.
- Vatnshæð var mjög lág allt árið 2000. Lítið hlaup með sigi íshellu upp á 20-30 m varð um mánaðarmótin júlí-ágúst. Vötnin voru tóm í um mánuð eftir hlaupið í nóvember 1999 og frá ágústbyrjun 2000 fram undir árslok. Ástæðan fyrir þessu var stöðugur leki undir rennunni sem jarðhitinn hefur brætt gegnum ísstífluna.
- Íshellan yfir Grímsvötnum þykknaði um allt að 20 m milli árana 1997 og 1998. Eftir það hægði á þykkun og nam hún 5-10 m 1998-2000. Ástæða þykkunar er lág staða íshellunnar miðað við það sem var fyrir umbrot. Meiri hæðarmunur milli íshellu og jökulsins umhverfis veldur auknu ísskriði inn í vötnin.



- Varmaafli Grímsvatna jökulárið 1999-2000 var rúmlega 3000 MW. Aflið minnkaði frá því sem var fyrri hluta árs 1999, fyrst eftir gosið. Jarðhitaaukningin frá 1998 kemur fyrst og fremst undir norðurhlíð Grímsfjalls.
- Sig og aflögun vesturhluta gígsvæðisins, sem hófst strax eftir gosið 1998, hélt áfram á árinu 2000. Mikill jarðhiti var í vesturhluta gosstöðvanna.
- Ekki er ljóst hvenær Grímsvötn þróast aftur til þess horfs sem var fyrir umbrotin 1996. Áður en það gerist þarf jarðhitavirkni að minnka austan vatnanna en það er skilyrði þess að ísstíflan fari hækkandi á ný.

## 9. Heimildir

Blondel, J. 2001. *Heat budget of an open lake at Grímsvötn, Iceland*. Raunvísindadeild Háskóla Íslands, sérverkefni (útgefið). 36 bls.

Helgi Björnsson. 1988. *Hydrology of ice caps in volcanic regions*. Societas Scientiarum Islandica, rit 40. 139 bls.

Helgi Björnsson. 1997. *Grímsvatnahlaup fyrr og nú*. Í: Hreinn Haraldsson (ritsj.): Vatnajökull. Gos og hlaup 1996, Vegagerðin, Reykjavík. 61-78.

Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 1992. *Vatnajökull, Norðvesturhluti*. 8 kortblöð, 1:100 000. (*Gagnasafnskort, Jökulyfirborð, Jökulbotn, Ísþykkt, Mætti, Ísaskil, Vatnaskil og Ísa- og vatnaskil*). Landsvirkjun og Raunvísindastofnun Háskólans.

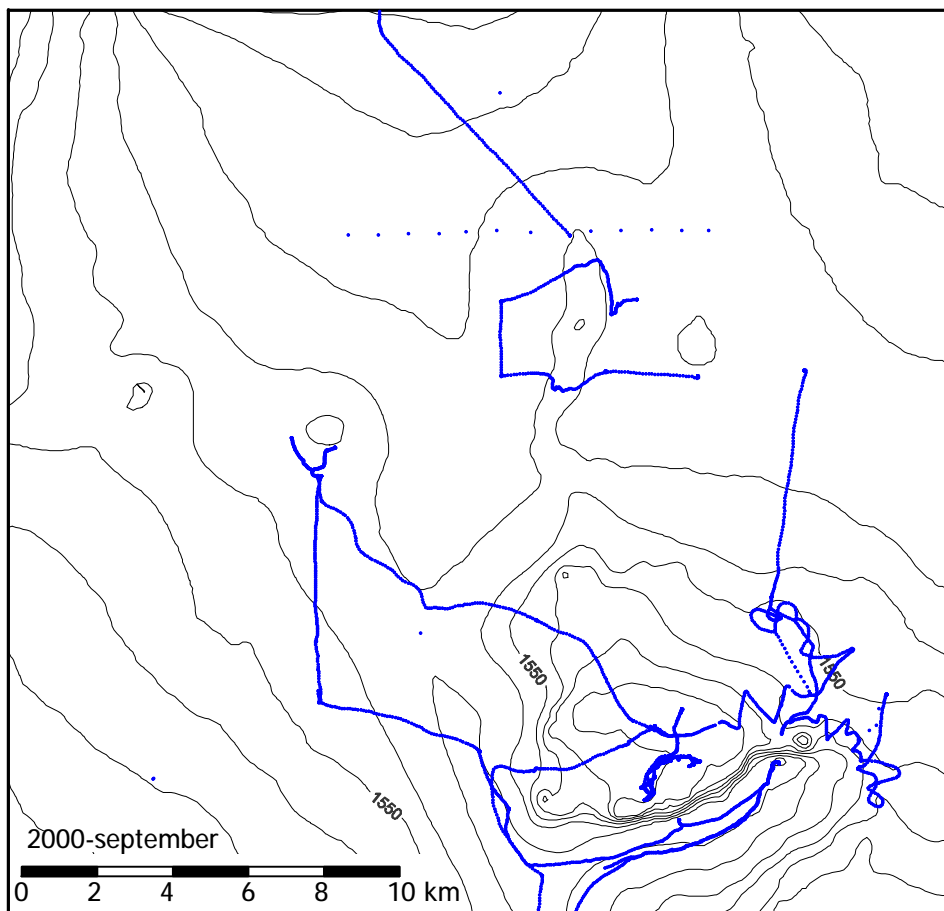
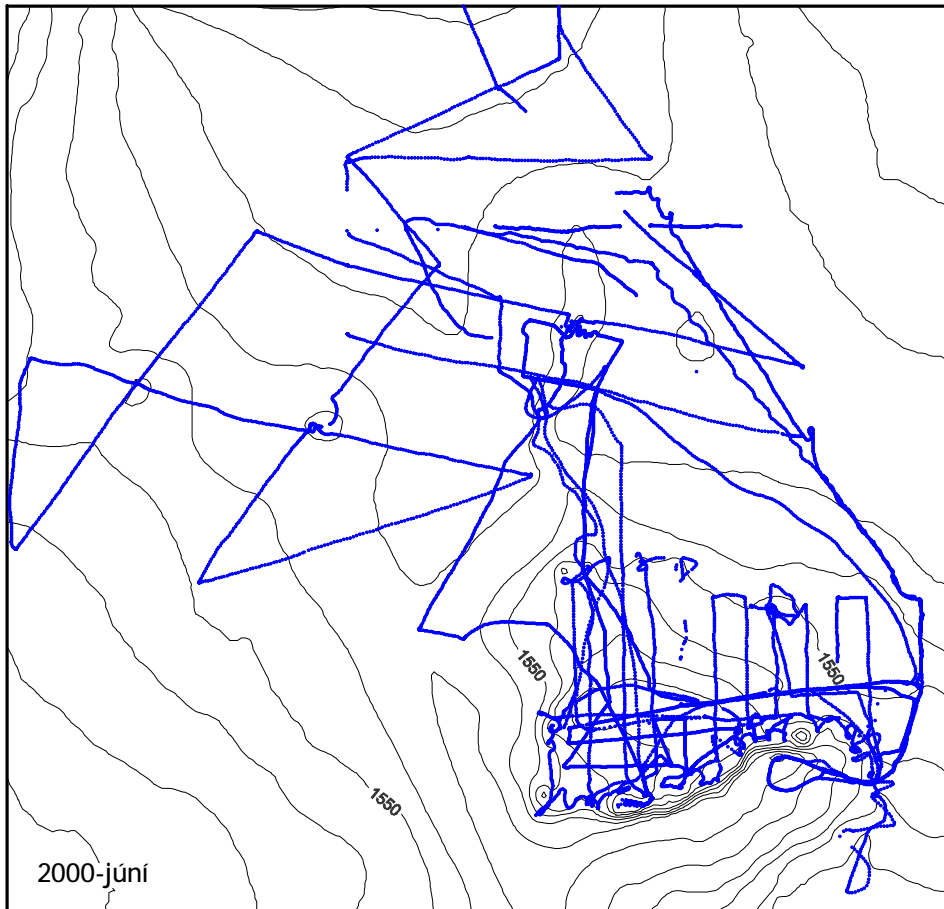
Helgi Björnsson og Magnús T. Guðmundsson. 1993. *Variations in the thermal output of the subglacial Grímsvötn Caldera, Iceland*. Geophysical Research Letters, 20, 2127-2130.

Magnús T. Guðmundsson, Helgi Björnsson og Finnur Pálsson. 1995. *Changes in jökulhlaup sizes in Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland, 1934-1991, deduced from in situ measurements of subglacial lake volume*. Journal of Glaciology, 41, 263-272.

Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Finnur Pálsson og Helgi Björnsson. 2000. *Grímsvötn: Eldgosið 1998 og breytingar á botni, rúmmáli og jarðhita 1996-1999*.

Robertson, E.I., og G.B. Dawson. 1964. *Geothermal heat flow through the soil at Wairakei*. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 7, 134-143.

**Viðauki A: DGPS sniðmælingar vor og haust 2000.**



**Viðauki B: Íssjár sniðmælingar 1997, 1998 og 2000**

