

**RANNSÓKNIR Á JARÐHITA Í GRÍMSVÖTNUM  
ÁRIÐ 2003**

**Magnús Tumi Guðmundsson  
Þórdís Högnadóttir**

**Raunvísindastofnun Háskólans  
Febrúar 2004  
RH-02-2004**



## ÁGRIP

Í skýrslunni er fjallað um athuganir og mælingar í Grímsvötnum sumarið 2003. Mælingarnar eru framhald vinnu síðustu ára en tilgangur þeirra er að varpa ljósi á samspil jarðhita og vatnssöfnunar og meta getu vatnanna til að valda hlaupum. Yfirborð Grímsvatna og næsta nágrennis var kortlagt með DGPS. Kortið var borið saman við samskonar kort frá árinu 2002 og breytingar reiknaðar. Í ljós kom að jarðhiti hefur aukist á tveimur svæðum. Annarsvegar á gosstöðvunum frá 1998, hinsvegar í sigkötlum þeim sem á síðustu árum hafa myndað rennu gegnum Grímsvatnaskarð norðaustan Grímsfjalls. Ísinn í skarðinu stíflar Grímsvötn en jarðhitinn veldur því að vatn lekur niður til Skeiðarár þ.a. ekki hafa orðið teljandi hlaup síðustu árin. Líkur á vatnssöfnun vegna jarðhita í Grímsvötnum eru því litlar í næstu framtíð. Jarðhitaafli óx nokkuð milli 2002 og 2003, eða úr 1400 MW í 2300 MW. Aukningin helst í hendur við stöðuga kvikusöfnun undir Grímsvötnum. Þessi þróun sýnir að líkur á eldgos í Grímsvötnum á næstu misserum fer vaxandi. Vatnsmagn í Grímsvötnum er nú miklu minna en algengast var fyrir umbrotin 1996. Þekktir gosstaðir innan Grímsvatna eru nærri öskjujaðrinum. Við þá lágu vatnssstöðu sem nú ríkir liggur ísinn á botni á flestum þessara staða. Því gæti gos nú valdið skyndilegri hækkun vatnsborðs. Í ljósi þess að ísstíflan heldur litlu gæti eldgos við núverandi aðstæður því valdið snöggu Skeiðarárhlaupi. Stærð slíks hlaups færi eftir gosstað og afli goss. Ef aftur gýs á sama stað og 1998 yrði bráðnun lítil. Ef hinsvegar gýs undir norðaustanverðu Grímsfjalli, þar sem jarðhiti hefur vaxið mest á síðustu árum, gæti það valdið töluverðri ísbráðnun og hlaupi.

**Efnisyfirlit**

Ágrip .....	1
1. Inngangur .....	3
2. Yfirborð Grímsvatna .....	4
3. Varmaafli .....	4
4. Breytingar á gígsvæði .....	10
5. Samantekt .....	12
6. Heimildir .....	12
Viðauki A .....	14

## 1. INNGANGUR

Rannsóknir á jarðhita í Grímsvötnum hafa staðið yfir í allmörg ár. Eftir gosið í Grímsvötnum 1998 var þó farið út í mun nákvæmari athuganir en áður. Tilgangur rannsókna er einkum sá að kanna áhrif eldgosa og ísbráðnun þeim samfara og hvernig breytingar á jarðhita í kjölfar eldgosa hafa áhrif á lón undir jöklum og líkur á jökulhlaupum frá þeim. Eins og málum er nú háttað eru rannsóknirnar unnar af Raunvísindastofnun Háskólans en styrktar af Vegagerð Ríkisins. Einnig kemur Jökларannsóknafélag Íslands (JÖRFÍ) að vinnunni með því að leggja til farartæki, aðstöðu og mannafla í ferðum sínum. Niðurstöður rannsókna síðustu ára á gosstöðvum í Vatnajökli hafa birst í greinum og skýrslum (Hreinn Haraldsson, ritsj. 1997, margir höfundar; Guðrún Larsen og fl. 1998; Helgi Björnsson og fl. 2001; Sverrir Guðmundsson og fl. 2002; Magnús T. Guðmundsson og fl. 1997, 2000; 2001; 2002; 2003a, 2003b).

Þessi skýrsla er framhald fyrri skýrslna (Magnús T. Guðmundsson og fl. 2000, 2001, 2003) en mælingarnar snúast að verulegu leyti um að búa til tímaröð fyrir varmafl og áhrif breytileika í því á vatnsgeyminn. Í þeim skýrslum voru raktar breytingar sem urðu á Grímsvötnum í kjölfar Gjalpar- og Grímsvatnagoss, auk þróunar í stærð vatnsgeymis, vatnshæð, hæð ísstíflu og afli jarðhita.

Mælingar í Grímsvötnum 2003 voru svipaðar að umfangi og árin á undan. Þó var svæði það sem kortlagt var heldur minnkað. Upplýsingagildi mælinganna nú ætti þó að vera svipað, því áherslan er lögð á þann hluta Grímsvatnasvæðisins þar sem jarðhiti er áberandi. Mælingarnar fóru fram í vorferð Jökларannsóknafélags Íslands í júní og var hluti verksins unnin af sjálfboðaliðum þess. Yfirborð Grímsvatna og nágrennis þeirra var kortlagt með DGPS, breytingar á gígsvæði frá fyrra ári voru kannaðar og hiti mældur í vesturbarmi gígsins frá 1998.

Á grundvelli gagnanna var:

- (a) Gert kort af Grímsvötnum eins og þau voru í júní 2003
- (b) Þróun gígsvæðisins skoðuð, hvernig gígurinn frá 1998 breytist, sígur til og hugsanlega ummyndast.
- (c) Varmafl Grímsvatnasvæðisins metið fyrir 2002-2003
- (d) Þróun og ástand ísstíflunnar metið, sér í lagi hvaða áhrif jarðhitinn hefur á hana og möguleika á vatnssöfnun í Grímsvötnum.

Rannsóknir á jökulhlaupum, vatnshæð og stærð vatnsgeymis á hverjum tíma tengjast þeim verkefnum sem hér er fjallað um. Þær rannsóknir eru á hendi Helga Björnssonar og Finns Pálssonar á Raunvísindastofnun. Samvinna hefur verið við Helga og Finn um gagnaöflun og frumúrvinnslu.

## 2. YFIRBORÐ GRÍMSVATNA

Kort af Grímsvötnum eins og þau voru í júní 2003 er á 1. mynd. Ekki urðu stórar breytingar milli árána 2002 og 2003. Þversniðið yfir katlana norðan vatnanna (2. mynd) sýnir þó að jarðhitakatlar á því svæði hafa heldur grynnað og yfirborðið hækkað heldur. Ekki er víst að þessi hækkun segi mikið um jarðhita, því vetarákoma í Grímsvötnum var yfir 7 metrar, 3 metrum meiri en árin tvö næstu á undan. Í ljósi þess að ekki urðu tilsvareandi sveiflur í leysingu 2001 og 2002 ætti svæðið allt að vera um 3 m hærra í júní 2003 en var 2002, þó svo engin breyting hafi orðið í botnbráðnun vegna jarðhita.

Samanburður milli 2002 og 2003 leiðir í ljós (3. og 4. mynd) að vökin vestast á gígsvæðinu hefur stækkað og ísinn umhverfis hana sigið. Röð ljósmynda af vökinni og gígsvæðinu (5. mynd) sýnir þróunina síðustu ár. Þá hafa katlar í Grímsvatnaskarði (í rennunni gegnum ísstífluna) haldið áfram að stækka og dýpka. Hæsti punktur í rennunni er nú austan við ketil VG9 og hæðin tæpir 1500 m.

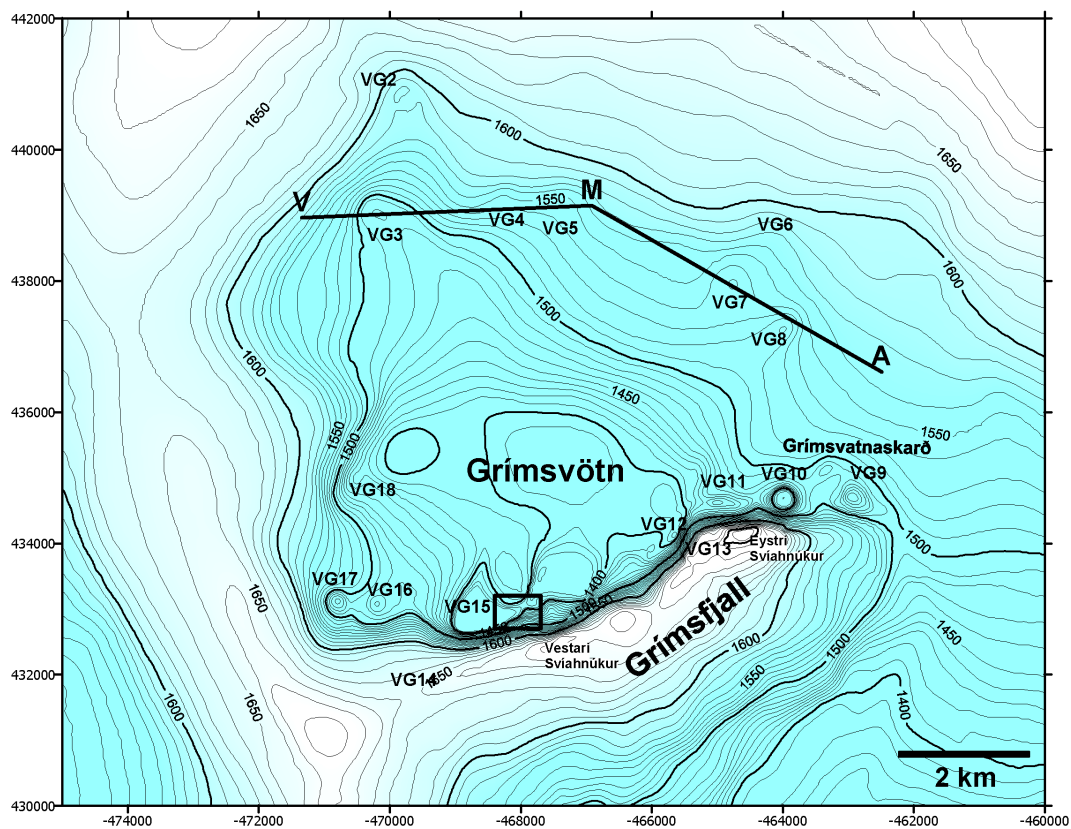
## 3. VARMAAFL

Varmafl Grímsvatna var metið á sama hátt og undanfarin ár (Magnús T. Guðmundsson og fl., 2001, 2003a), en aðferðin er nokkuð öðru vísi en gert var lengst af fram til 1996, en þær byggðust á því að vötnin væru lokuð og allt bræðsluvatn kæmi fram í jökulhlaupum (Helgi Björnsson, 1988; Helgi Björnsson og Magnús T. Guðmundsson, 1993, Helgi Björnsson, 1997). Vegna leka úr vötnunum kemur minnsti hluti vatnsins nú fram í hlaupum. Til að komast kringum það er nú gengið út frá að greina megi aflið í þrjá þætti (sjá einnig fyrri skýrslur): (1)  $P_0$ : Grunnafl, samsvarar því varmafli sem var áður en umbrot hófust. Grunnaflið er hér talið 1800 MW en nokkur óvissa er í þeirri tölu. Hún skiptir þó ekki máli þegar meta á breytingar milli ára. (2)  $P_i$ : Afl sem nýtist til bræðslu íss umfram grunnaflið. (3)  $P_a$ : Varmafl sem fer beint út í andrúmsloftið með gufu og nýtist ekki til bræðslu íss. Heildarafl er því

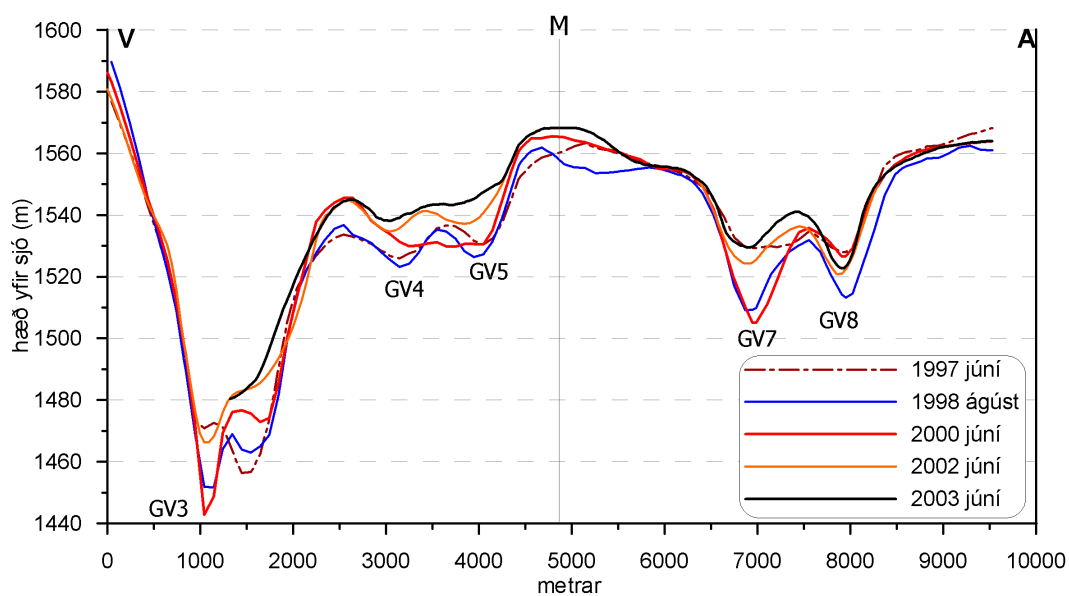
$$P_{heild} = P_0 + P_i + P_a \quad (1)$$

Umframaflið  $P_i$  er fengið með því að mæla breytingar í ísmagni, þ.e. með því að bera saman kort sem gerð eru á mismunandi tímabilum. Til að forðast áhrif sumarsbráðnunar á yfirborði er hér notuð sú aðferð að bera saman kort sem gerð eru á sama tíma ár hvert, þ.e. að vori áður en leysing hefst. Undanskilin eru svæði á floti, þ.e. íshella Grímsvatna. Breytingar í þykkt hennar er hægt að mæla með endurteknum íssjármælingum. Aflið  $P_i$  er þá

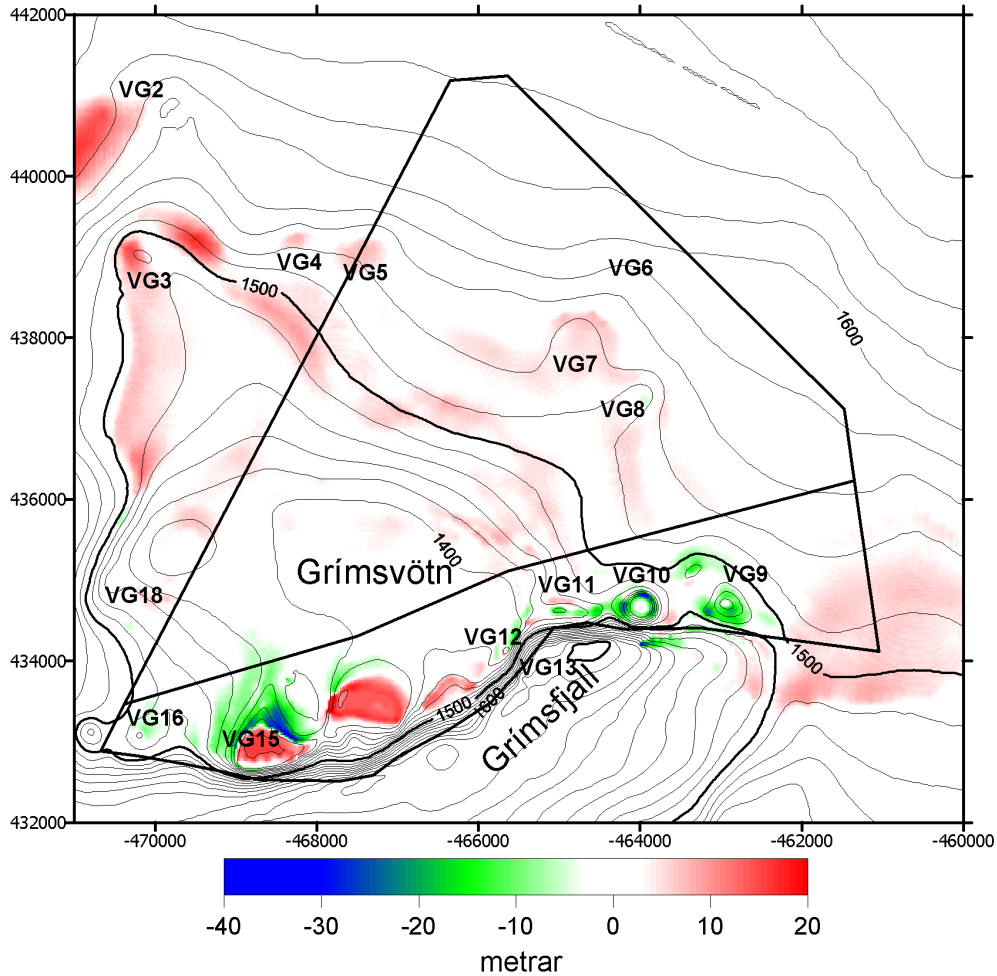
$$P_i = \frac{(V_i - V_h) \rho_i L}{t} \quad (2)$$



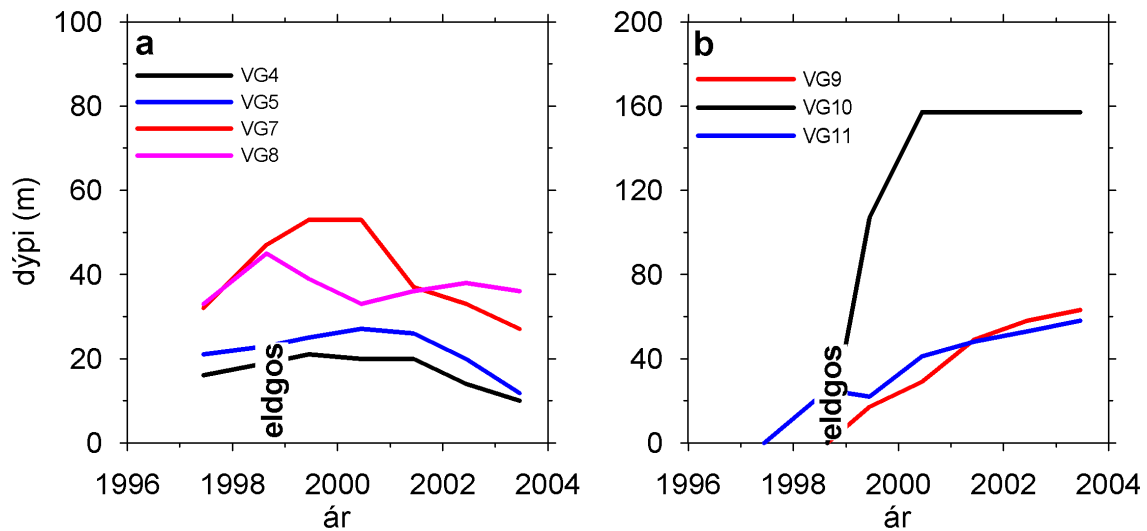
1 mynd. Grímsvötn - yfirlitskort, katlar VG2-VG18 og snið á 2. mynd merkt inn á kortið. Svarti ramminn við gosstöðvarnar sýnir útmörk á 8. mynd.



2. mynd. Snið yfir jarðhitakatla norðan við Grímsvötn 1997-2003. Mælingum frá 1999 og 2001 er sleppt en þær falla inn í heildarmyndina; katlar dýpka 1997-2000 en grynna eftir 2000.

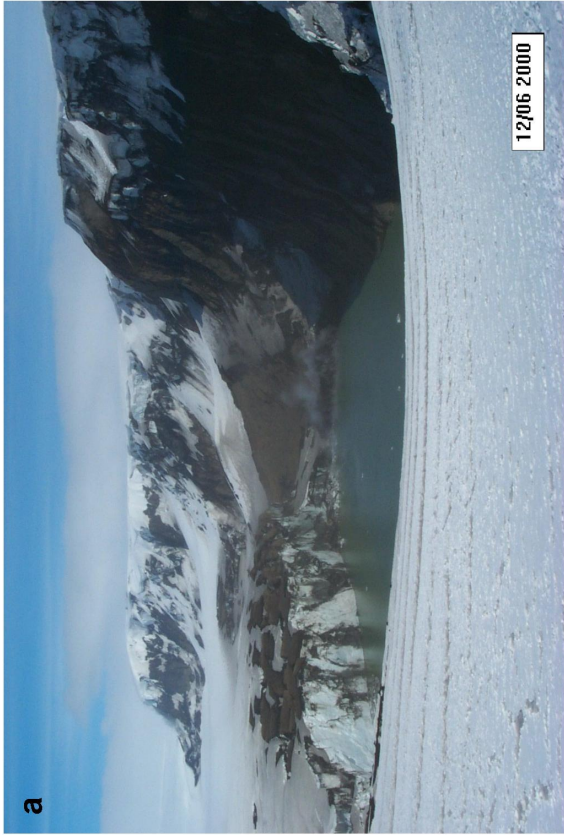


3. mynd. Hæðarbreytingar milli 2002 og 2003. Lokuðu ferlarnir afmarka svæðið norðan og norðaustan íshellu annarsvegar og gígsvæði með norðurhlíð Grímsfjalls hinsvegar (1. tafla).

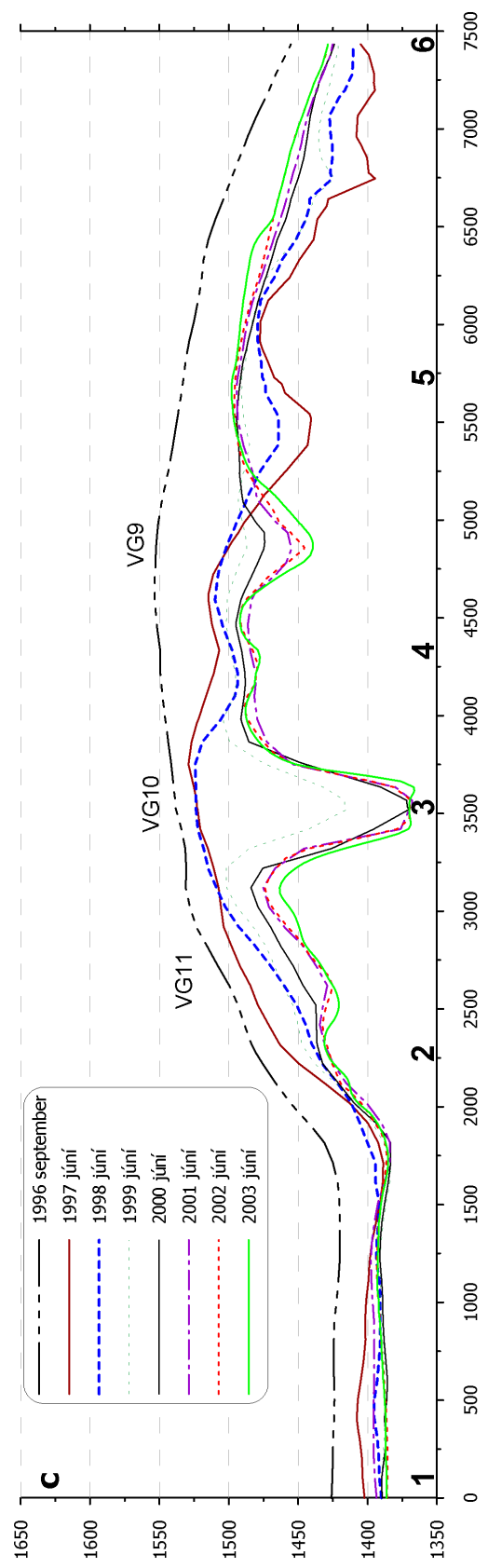
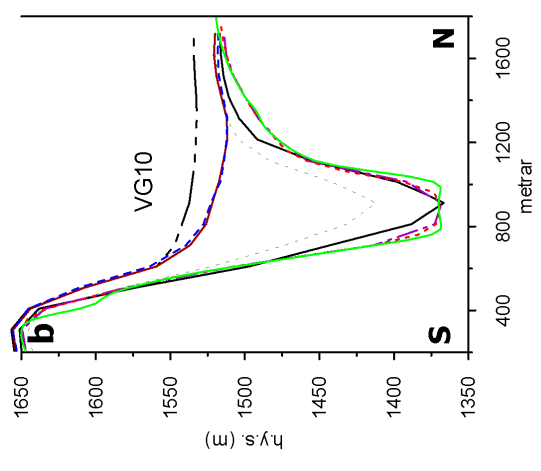


4. mynd. Dýpi katla sem fall af tíma: a) norðan til á svæðinu, b) í Grímsvatnaskarði (rás gegnum ísstíflu).





5. mynd. Gosstjóðavarnar a) 2000, b) 2001, c) 2002, d) 2003. Horft úr vestri, í baksýn er norðurhlíð Grímsfjalls austur að Gríðarhorni.



- 1996 september
- 1997 júní
- - - 1998 júní
- · - 1999 júní
- 2000 júní
- · - 2001 júní
- · - 2002 júní
- 2003 júní

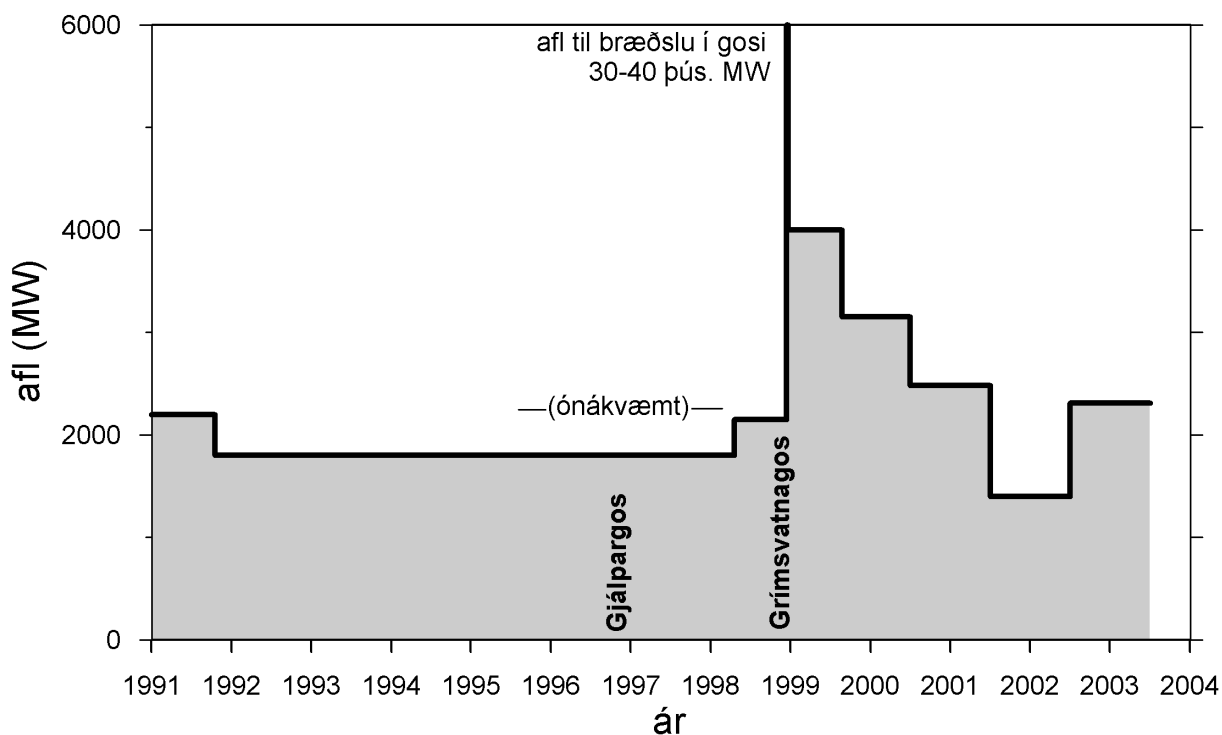
6. mynd b) Þversnið yfir stóra ketilinn norðaustan í Grímsfjalli og Grímsfjalli að norðan 1996-2003.

Hér er  $V_i$  rúmmálsbreyting íss utan íshellu (lækkun yfirborðs metin sem jákvæð stærð)  $V_h$  er rúmmálsaukning íshellu vegna þykkunar (getur verið neikvæð stærð ef hellan þynnist),  $\rho_i = 910 \text{ kg m}^{-3}$  er eðlismassi íss,  $L=335 \text{ KJ kg}^{-1}$  er bræðsluvarmi íss og  $t$  tími milli mælinga (1 ár).

$V_i$  er reiknað sem rúmmál milli yfirborðs jökulsins á kortum fyrir 2003 og 2002. Hér er mismunur á vetrarákomu 2002 og 2003 (3 metrum meiri 2003) tekin með í reikninginn og kortið fyrir 2003 lækkað um 3 metra áður en það er dregið frá yfirborði 2002.

Í 1. töflu eru tölur um rúmmálsbreytingar íss og afltölur frá og með árinu 2000. Tölurnar eiga við meðal afl fyrir heilt ár, frá júní árið áður. Matið á afli Grímsvatna 1991-2003 er sýnt á 7. mynd. Gögnin benda til þess að jarðhitaafli hafi minnkað jafnt og þétt frá hámarki í gosinu í árslok 1998 og náð lágmarki 2002 (~1400 MW). Jarðhiti hafi svo aftur tekið við sér eftir mitt það ár og náð 2300 MW. Þessi aukning í jarðhita kemur fyrst og fremst fram á gígsvæðinu og í rennunni gegnum ísstífluna. Hins vegar kemur ekki fram aukning í kötlum VG3-VG8 norðan til í vötnunum (2. og 4. mynd) eins og varð 1998-1999. Þrátt fyrir verulega óvissu í afltölum eru breytingarnar marktækar.

Aukningin nú helst í hendur við stöðuga útpenslu og kvikusöfnun sem fram kemur í GPS mælingum (Sturkell og fl., 2003). Mælingarnar hafa verið gerðar árlega frá 1999 á fastmerki á Saltaranum við Eystri Svíahnúk. Þekkt er að aukið hitaústreymi fylgi kvikusöfnun og aflögun eldfjalla. Greinileg aukning í jarðhita var komin fram sumarið 1998, hálfu ári fyrir síðasta gos í Grímsvötnum. Í ljósi þessa er eðlilegt að álykta að aukning í jarðhita nú eigi sér sömu orsök. Þetta bendir til að líkur á gosi í Grímsvötnum á næstu misserum fari vaxandi.



7. mynd. Varmaafli Grímsvatna 1991-2003

### 1. tafla. Rúmmálsbreytingar og umframafli 2000-2003

Svæði	2000 $10^6 \text{ m}^3$	2001 $10^6 \text{ m}^3$	2002 $10^6 \text{ m}^3$	2003 $10^6 \text{ m}^3$
Norðan og norðaustan íshellu	36	13	-59	0
Gígsvæði og norðurhlíð Grímsfjalls	79	42	1	37
Lón vestan gígs	13	0	0	0
Þykkun íshellu	-5	0	0	0
Samtals ( $V_i - V_b$ )	123	55	-58	37
Afl:				
Umframafli, $P_i$ (MW)	1190	530	-560	360
Tap til andrúmslofts, $P_a$ (MW)	150	150	150	150
<b>Heildarafli, <math>P_{\text{heild}}</math> (MW)</b>	<b>3140</b>	<b>2480</b>	<b>1390</b>	<b>2310</b>

Óvissa í umframafli er ~400 MW en það myndi samsvara 1 m heildarskekkju í kortunum.

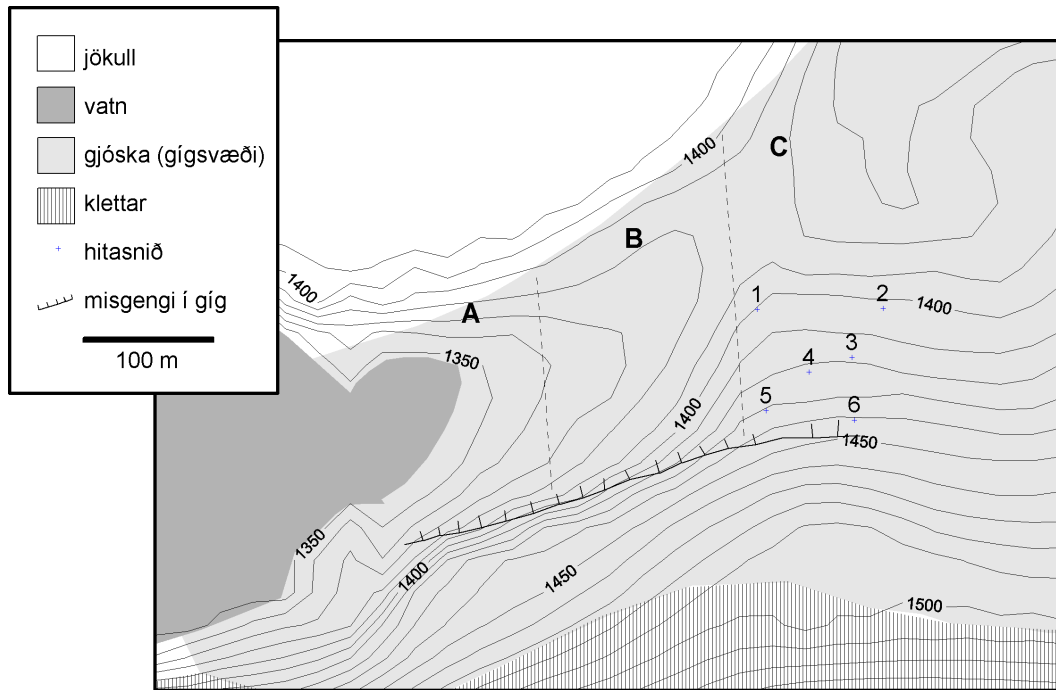
### 4. BREYTINGAR Á GÍGSVÆÐI

Eins og áður sagði eru komin fram merki um aukinn jarðhita á gígsvæðinu. Auk aukinnar ísbráðunar var lónið vestast mun opnara nú en var 2002. Þá þakti margra metra þykk samfelld hjarnhella alla vökina nema á um 100 m breiðu svæði næst gígnum. Í júní 2003 var hjarnhellan mun þynnri og töluvert brotin upp (5. mynd c og d). Þetta er ekki síst marktækt í ljósi þess að ákoma var með mesta móti veturinn 2002-2003 svo reikna má með að mun meiri snjór hafi borist ofan í lónið en árið áður.

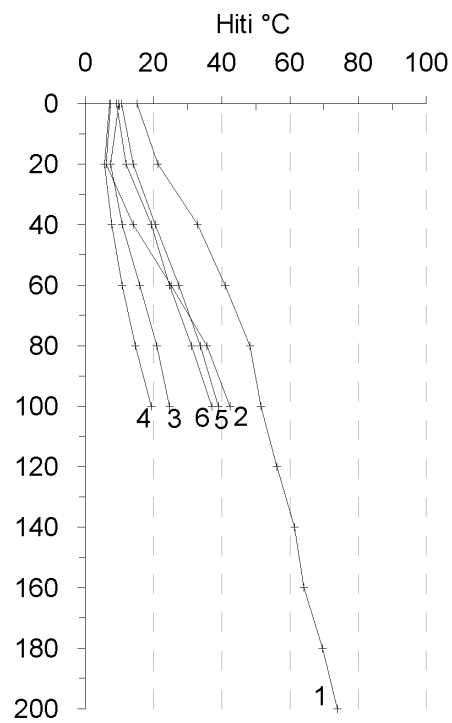
Athuganir sýndu að ekki er venjulegur lagnaðaris á lóninu, heldur flýtur á því hjarnhella. Hún er væntanlega mynduð með ofankomu og skafrenningi að vetri. Þegar úrkoma er mikil og skafrenningur safnast snjór í miklu magni í lónið. Snjórinn annaðhvort leggst ofaná þunnan lagnaðaris eða myndar krapahjúp sem flýtur ofan á lóninu. Í báðum tilfellum lokar hjarnhellan lóninu. Síðastliðið voru þessi hjarnhella 4-8 m á þykkt (Þykktin var metin út frá hæð yfirborðs yfir vatnsborð).

Í júní 2003 var svo komið að ekki var lengur fært um vestasta hluta gígsvæðisins. Þar voru nú hengjur í brúnum og hlíðin niður í vökina mjög brött. Ekki var hægt að mæla hvort enn hafi hrunið úr gosefnahaugnum niður í lónið.

Hitastig var mælt í gryfjum í gjóskunni í vesturbarmi gígsins eins og undanfarin ár. Mælingarnar ná þó yfir mun takmarkaðra svæði en áður, því ekki var fært um svæði A og B (8. mynd). Hitamælingarnar sýna svipaða niðurstöðu og árið áður. Þó hefur gígarmurinn heldur kólnað. Hitastigull er nú  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}\text{C}/\text{m}$  (9. mynd) þ.a. suðumark vatns næst á 3-4 m dýpi. Ekki fundust óræk merki um móbergsmýndun í holunum. Svæðið þar sem samlímingar varð vart 2002 er nú óaðgengilegt vegna snjóhengja og því ekki hægt að kanna það nú.



8. mynd. Staðir þar sem hitastig var mælt í gjósku á jarðhitasvæðinu á vestanverðum gosstöðvunum 2003.



9. mynd. Hitastig sem fall af dýpi.

## 5. SAMANTEKT

Jarðhiti óx á ný milli 2002 og 2003, eftir að hafa minnkað allt frá 1999 en þá náði hann hámarki eftir síðasta gos. Í ljósi þess að GPS mælingar benda til stöðugar kvikusöfnunar undir Grímsvötnum verður að telja auknar líkur á eldgosi á næstu misserum.

Jarðhitinn meðfram Grímsfjalli norðaustanverðu, gegnum ísstíflu Grímsvatna hefur heldur aukist milli 2002 og 2003. Rennan sem þessi jarðhiti hefur myndað hefur haldið áfram að dýpka. Skilyrði til vatnssöfnunar í Grímsvötnum er því varla fyrir hendi nú og ekki líkur á umtalsverðum hlaupum í Skeiðará að óbreyttu.

Ef gýs í Grímsvötnum við núverandi aðstæður má vera að áhrif slíks goss yrðu með nokkuð öðrum hætti en áður hefur verið reiknað með um gos innan vatnanna. Þar sem ísstíflan er veik fyrir, gæti bræðsluvatn frá eldgosi leitað út úr Grímsvötnum án teljandi viðstöðu. Þetta gæti valdið sneggra hlaupi en vanalegt er um Grímsvatnahlaup. Ísþykkt á gosstað og kraftur gossins myndi ráða hversu mikil og hröð ísbráðnun yrði. Erfitt er að segja til um stærð slíks hlaups. Þó má nefna að gos á sama stað og 1998 við núverandi aðstæður myndi að líkindum valda lítilli bráðnun, því jökull hefur ekki lagst aftur yfir gosstöðvarnar. Gos undir norðaustanverðu Grímsfjalli, þar sem mest aukning hefur orðið í jarðhita síðustu árin gæti aftur á móti valdið töluverðri bráðnun og hlaupi niður til Skeiðarár.

## 6. HEIMILDIR

Guðrún Larsen, Magnús T. Guðmundsson og Helgi Björnsson. 1998. *Eight centuries of periodic volcanism at the center of the Iceland hot spot revealed by glacier tephrostratigraphy*. *Geology*, 26, 943-946.

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

Helgi Björnsson. 1988. Hydrology of ice caps in volcanic regions, *Societas Scientiarum Islandica*, 45, Reykjavík. 139 bls.

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

Helgi Björnsson, Helmut Rott, Sverrir Gudmundsson, Andrea Fischer, Andreas Siegel and Magnús T. Gudmundsson. 2001. *Glacier-volcano interactions deduced by SAR interferometry*. *Journal of Glaciology*, 47, 58-70.

Hreinn Haraldsson (ritstj.). 1997. *Vatnajökull. Gos og hlaup 1996*, Vegagerðin, Reykjavík.

Magnús T. Guðmundsson, Freysteinn Sigmundsson og Helgi Björnsson. 1997. *Ice-volcano interaction of the 1996 Gjálp subglacial eruption, Vatnajökull, Iceland*. *Nature*, 389, 954-957.

- Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Finnur Pálsson og Helgi Björnsson. 2000. *Grímsvötn: Eldgosið 1998 og breytingar á botni, rúmmáli og jarðhita 1996-1999*. Raunvísindastofnun Háskólans RH-03-2000. 32 bls.
- Magnús T. Guðmundsson, Finnur Pálsson, Þórdís Högnadóttir, Kirsty Langley og Helgi Björnsson. 2001. *Rannsóknir í Grímsvötnum árið 2000*. Raunvísindastofnun Háskólans, RH-30-2001. 25 bls.
- Magnús T. Gudmundsson, Finnur Pálsson, Helgi Björnsson, og Þórdís Högnadóttir. 2002. *The hyaloclastite ridge formed in the subglacial 1996 eruption and Gjálp, Vatnajökull, Iceland: present day shape and future preservation*, in Volcano-Ice Interaction on Earth and Mars, Geological Society London Spec. Publ., 202 ritstj: J.L. Smellie og M. Chapman, pp. 319-335.
- Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Kirsty Langley. 2003a. *Jarðhiti, gosstöðvar og skilyrði til vatnssöfnunar í Grímsvötnum 2001-2002*. Raunvísindastofnun Háskólans, RH-30-2001. 30 bls.
- Magnús T. Gudmundsson, Freysteinn Sigmundsson, Helgi Björnsson og Þórdís Högnadóttir. 2003b. *The 1996 eruption at Gjálp, Vatnajökull ice cap, Iceland: efficiency of heat transfer, ice deformation and subglacial water pressure*. Bulletin of Volcanology, 66:46-65 (2004). Netútg. 20. júlí 2003. DOI: 10.1007/s00445-003-0295-9.
- Sturkell, Erik, Páll Einarsson, Freysteinn Sigmundsson, Sigrún Hreinsdóttir og Halldór Geirsson. 2003. *Deformation of Grímsvötn volcano, Iceland: 1998 eruption and subsequent inflation*. Geophysical Research Letters, 30, no. 4, 1182. doi:10.1029/2002GL016460.
- Sverrir Gudmundsson, Magnús Tumi Gudmundsson, Helgi Björnsson, Freysteinn Sigmundsson, Helmut Rott og Jens Michael Carstensen. 2002. *Three-dimensional glacier surface motion maps at the Gjálp eruption site, Iceland, inferred from combining InSAR and other ice displacement data*. Annals of Glaciology, 34, 315-322.

VIÐAUKI A: DGPS SNIÐMÆLINGAR Í JÚNÍ 2003.

