

Greinargerð um könnun á legu útfalla og farvega fallvatna frá Síðujökli og stöðugleika þeirra þegar jökullinn hörfar.

Finnur Pálsson

Eyjólfur Magnússon

Helgi Björnsson

Ágúst Þór Gunnlaugsson

Júní 2014



HÁSKÓLI ÍSLANDS
JARÐVÍSINDASTOFNUN

Efnisyfirlit:

Inngangur	1
Mælingar	2
Gagnavinnsla	3
Stafræn hæðarlíkon	5
Afmörkun vatnasviða og niðurstöður	8

Viðaukar:

I. Mælisnið frá íssjá	10
II. Fjárhags skilagrein	11

Myndir:

1. mynd. Lega íssjárnsniða á Síðujökli. Svörtu línurnar sína mælisnið frá árunum 1990, 1991 og 2003. Lituðu línurnar sýna mæli línur 4. maí 2013. Í bakgrunni er kort með 5 m möskvum, byggt á LiDAR mælingum úr flugvél síðsumars 2012 (hluti svæðisins utan jökuls var ekki kortlagður með LiDAR en í þær eyður er fyllt með ýmsum öðrum kortagögnum).	2
2. mynd. Íssjarmælisnið 0 (efra) og 1 (neðra) (sjá legu sniða á 1. Mynd). Jökulyfirborð sýnt með blárri línu en jökulbotn með brúnni línu.	3
3. mynd. Íssjarmælisnið 6	3
4. mynd. Íssjarmælisnið 2 (efra) og 3 (neðra) (sjá legu sniða á 1. mynd).	4
5. mynd. Íssjarmælisnið 4 (efra) og 5 (neðra) (sjá legu sniða á 1. mynd).	4
6. mynd. Yfirborð Síðujökuls árin 1998, 2003, 2010, 2012 og metin lögum yfirborðs 5 og 10 árum síðar.	5
7. mynd. Botn Síðujökuls unninn eftir íssjarmælingum frá 1990, 1991, 2003 og 2013. Utan jökuljaðars er landhæðarlíkan að mestu LiDAR. Í botni og yfirborði eru hæðarlínur á 10 m fresti, í botni er hæðarlínur á heilu hundraði þykkari. Bláu línurnar eru jafnhæðarlínur yfirborðs 2012, LiDAR hæðarlíkan.	6
8 mynd. Farvegir og kvíslar frá Síðujökli. Með bláum línunum eru sýndir farvegir sem hnitaðir voru af Landsat 8 gervitunglamynd frá 29. júní 2013. Grænu línurnar sýna farvegi og kvíslar af AMS kortum (eftir flugmyndum frá sumrinu 1946). Lega jaðars 1998 (yst), 2003, 2010 og 2012 (innst) er sýnd með gulri, bleikri, fjólublárra og rauðri línu. Skyggt hæðarlíkan 2012 (LiDAR) er í bakgrunni.	7
9. mynd. Vatnsvið Skaftár, Hverfisfljóts, Brunnár og Djúpár unnin eftir mætti vatns við jökulbotn (utan jökuls ræður halli lands eingöngu). Yfirborð hvers árs er sýnt sem skuggamynd í bakgrunni. Bláa boxið afmarkar svæði þar sem vatnaskil Skaftár og Hverfisfljóts verða óljós.	8
10. mynd. Nærmynd af LiDAR hæðarlíkani 2012 af svæði þar sem skil milli Skaftár og Hverfisfljóts verða óljós þegar jökullinn hörfar. Gula boxið afmarkar svæði þar sem hugsanlegt er að renna myndist með jökuljaðri ef jökullinn hörfar verulega.	9

Inngangur.

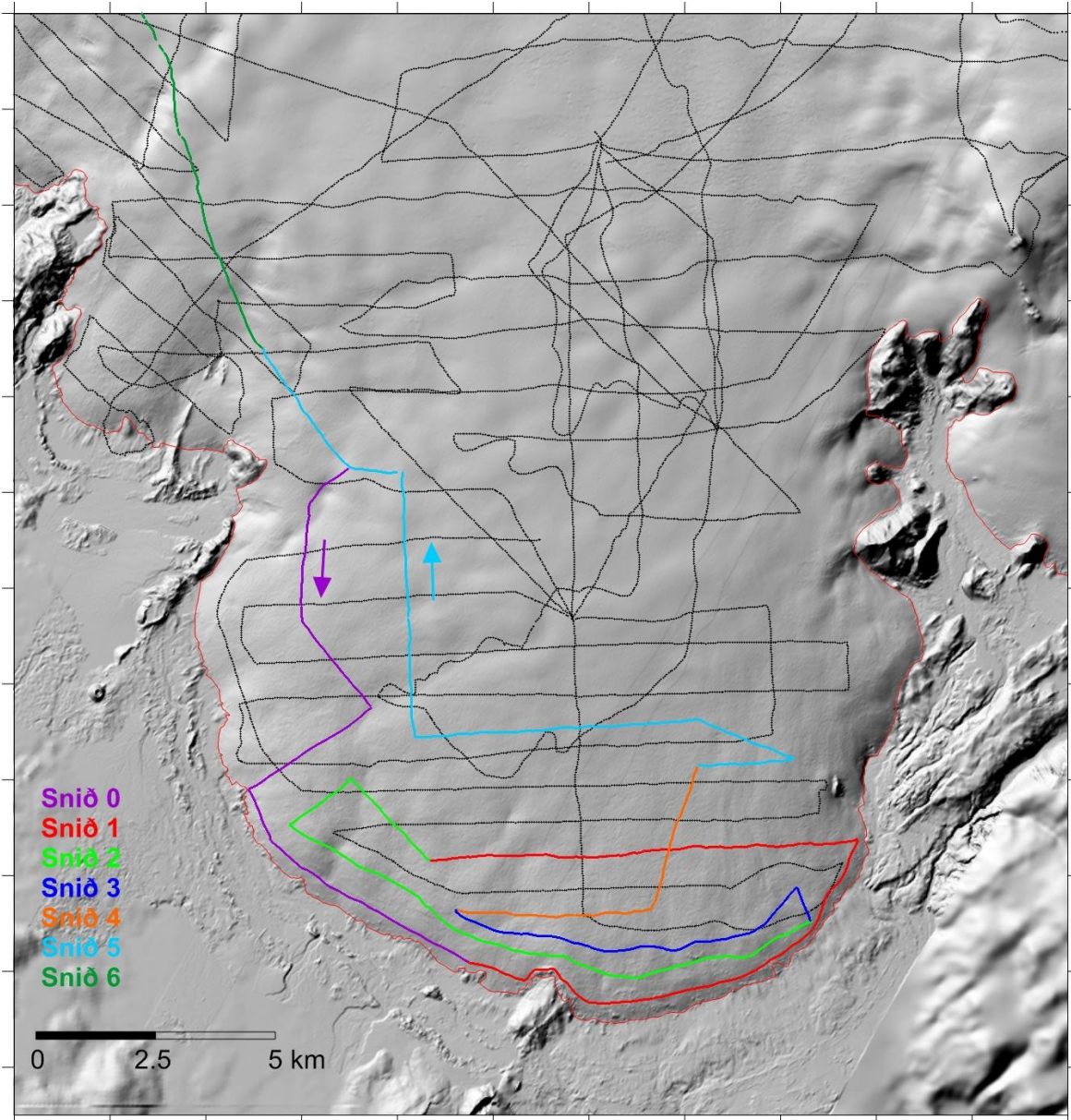
Vel þekkt er að vatnsföll sem spretta undan jökli geta fluttst til þegar jökull hörfar, bæði getur landslag sem undan jökli kemur beint vatni annað en einnig getur breyting ísfargs breytt rennislisleiðum undir jökli og þá einnig útfall við jökuljaðar flutst til. Vegagerðin hefur byggt brýr á þjóðvegum yfir vatnsföll (Hverfisfljót, Brunná og Djúpa) sem eiga uppruna í Síðujökli. Það getur valdið verulegum vandræðum ef stór vatnsföll flytjast til, fara í nýjan farveg eða sameinast öðrum. Þetta getur bæði orðið til þess að brýr standi yfir þurrum farvegi, eða verði skyndilega of litlar fyrir mjög aukið vatnsmagn.

Einar Hafliðason verkfræðingur hjá Vegagerðinni kom að máli við Jöklahóp Jarðvísindastofnunar í árslok 2102. Erindið var að kanna hvaða þekking og gögn lægju þegar fyrir til að meta líkindi þess að fallvötn frá Síðujökli flyttu sig til í nálægri framtíð. Upplýst var að jöklahópur kortlagði megindrætti landslags við botn Síðujökuls með íssjá árin 1990, 1991 og Skaftárjökul 2003, en smáatriði botns nærri jökuljaðri eru ekki vel þekkt. Með verkinu sem hér er kynnt var bætt úr þessu. Mæld voru vorið 2013 nokkur ísþykktarsnið meðfram jökuljaðri Síðujökuls til að auka upplausn og nákvæmni botnkortsins þar. Uppfært botnkort ásamt nýjum yfirborðskortum (Jöklahópur vann nýlega kort af yfirborði gerð eftir SPOT5 gervitunglagögnum og mjög nákvæmu LiDAR kort af yfirborði og landinu næst framan við jökulinn frá sumrinu 2012 voru notuð til að kanna rennislisleiðir vatns við jökulbotn. Einnig var einföldum aðferðum (sem byggja á þekkingu á rýrnun Síðujökuls síðustu ár) beitt til að meta lögun jökulyfirborðsins eftir 5 og 10 ár frá síðasta melda yfirborði (~2017 og 2022). Þessi kort botns og yfirborðs eru notuð til að meta mætti vatns við botn og rekja eftir þeim rennislisleiðir vatns við botn. Núverandi farvegir helstu jöklulvatna sem falla frá Síðujökli voru hnitúð af Landsat-8 háupplausnar gervitunglamynd, en eldri lega farvega hnitúð af landakortum bandaríska hersins (AMS kort) sem gerð voru eftir flugljósmyndum frá árunum 1945 og 1946.

Jöklahópur hefur þegar unnið allmörg verk af þessum toga, t.d. fyrir nokkrum árum (2008-2009) var unnið svipað verk fyrir Vegagerðina vegna Skeiðarár.

Mælingar

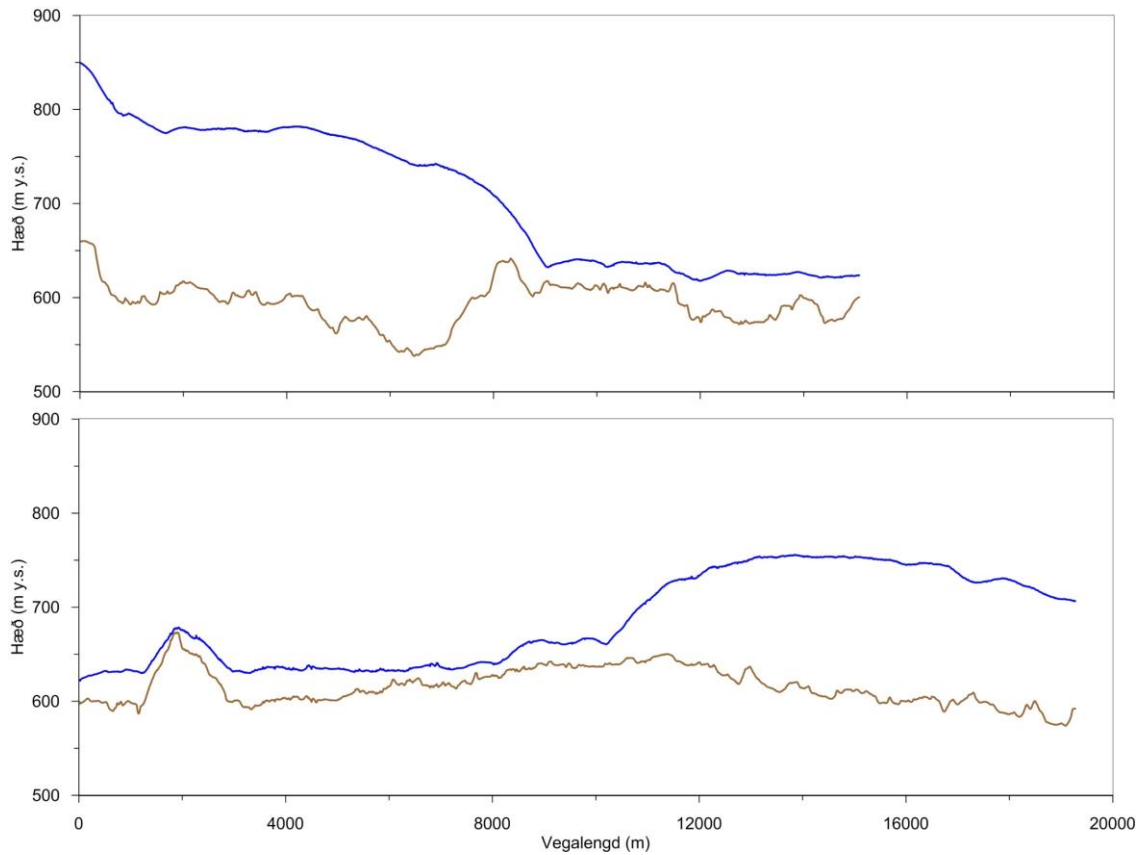
Mælingar á ísþykkt voru gerðar með íssjá. Búnaðinum var komið fyrir á tveim sleðum sem dregnir voru með vélsleða eftir jökulyfirborði. Með þessum búnaði var ísþykkt mæld á samfelldum sniðum. Yfirborðshæð sniðanna er mæld jafnóðum með landmælinga GPS tækjum. Um mælingarnar sáu Eyjólfur Magnússon og Ágúst Þór Gunnlaugsson. Til að halda kostnaði í lágmarki slógust þeir í för með afkomumælingahópi, ýmiss búnaður var samnýttur og ferðakostnaði var haldið í lágmarki. Mæld voru um 102 km löng mælisnið á einum degi, 4. maí 2013. Mælingar tókust vel.



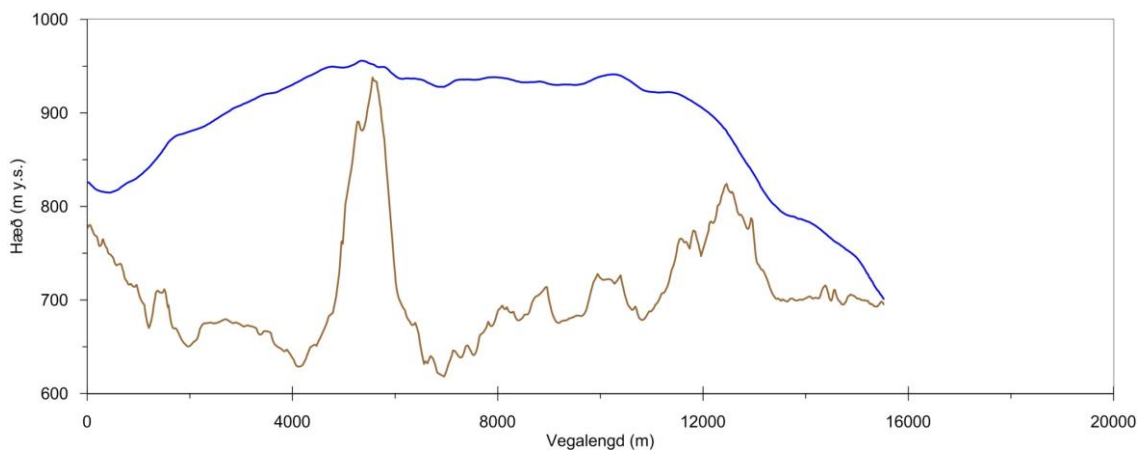
1. mynd. Lega íssjárnsniða á Síðujökli. Svörtu línurnar sína mælisnið frá árunum 1990, 1991 og 2003. Lituðu línurnar sýni mælinúr 4. maí 2013. Í bakgrunni er kort með 5 m möskvum, byggt á LiDAR mælingum úr flugvél síðsumars 2012 (hluti svæðisins utan jökuls var ekki kortlagður með LiDAR en í þær eyður er fyllt með ýmsum öðrum kortagögnum).

Gagnavinnsla

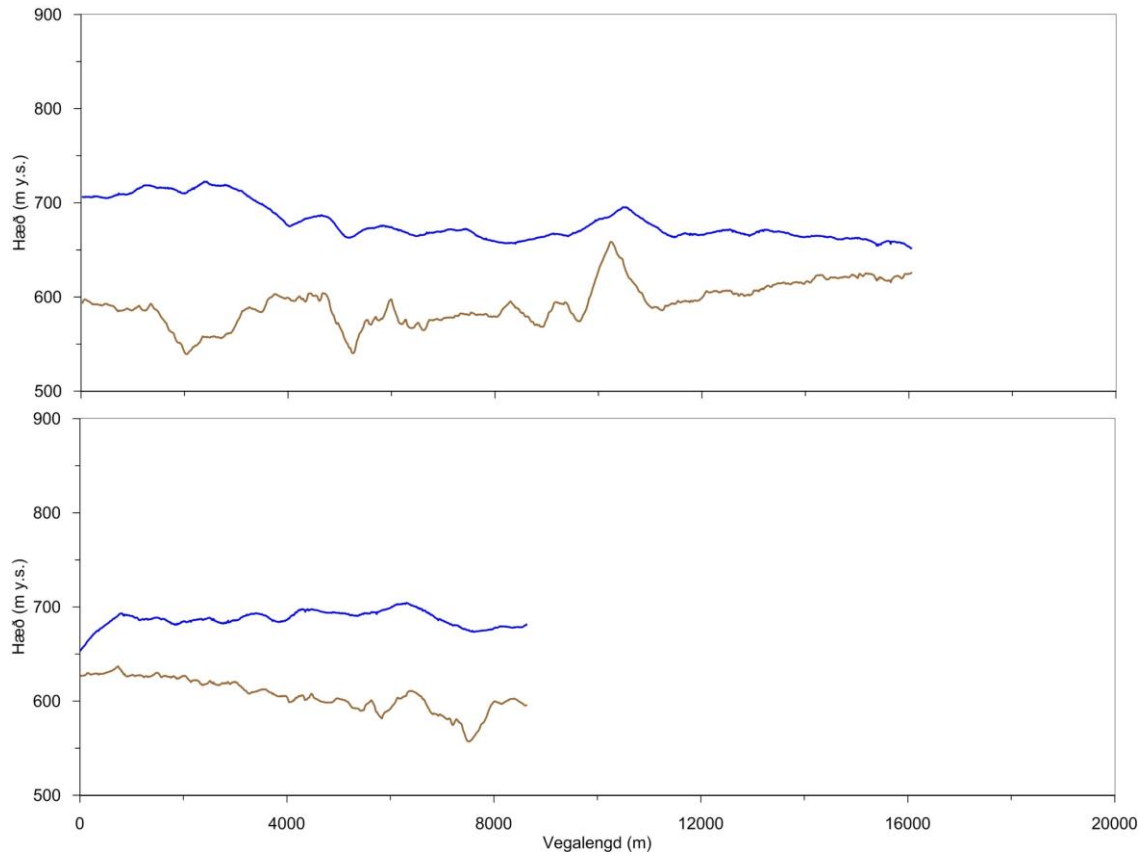
Úrvinnsla yfirborðs (GPS mælingar) og botnsniða íssjárniðanna er að nokkru leyti tímaflek handavinna, smáatriðum verður ekki lýst hér. Yfirlitsmyndir mælisniða úr íssjárni er að finna í viðauka I. en í úrvinnslu nú var einungis leitað eftir botnendurköstum en ekki skeytt um ýmis forvitnileg innri endurköst sem sjá má í íssjárniðunum, sum eflaust frá öskulögum sem grafist hafa í jökulinn. Yfirborðs og botnsnið eru sýnd á myndum 2 til 4.



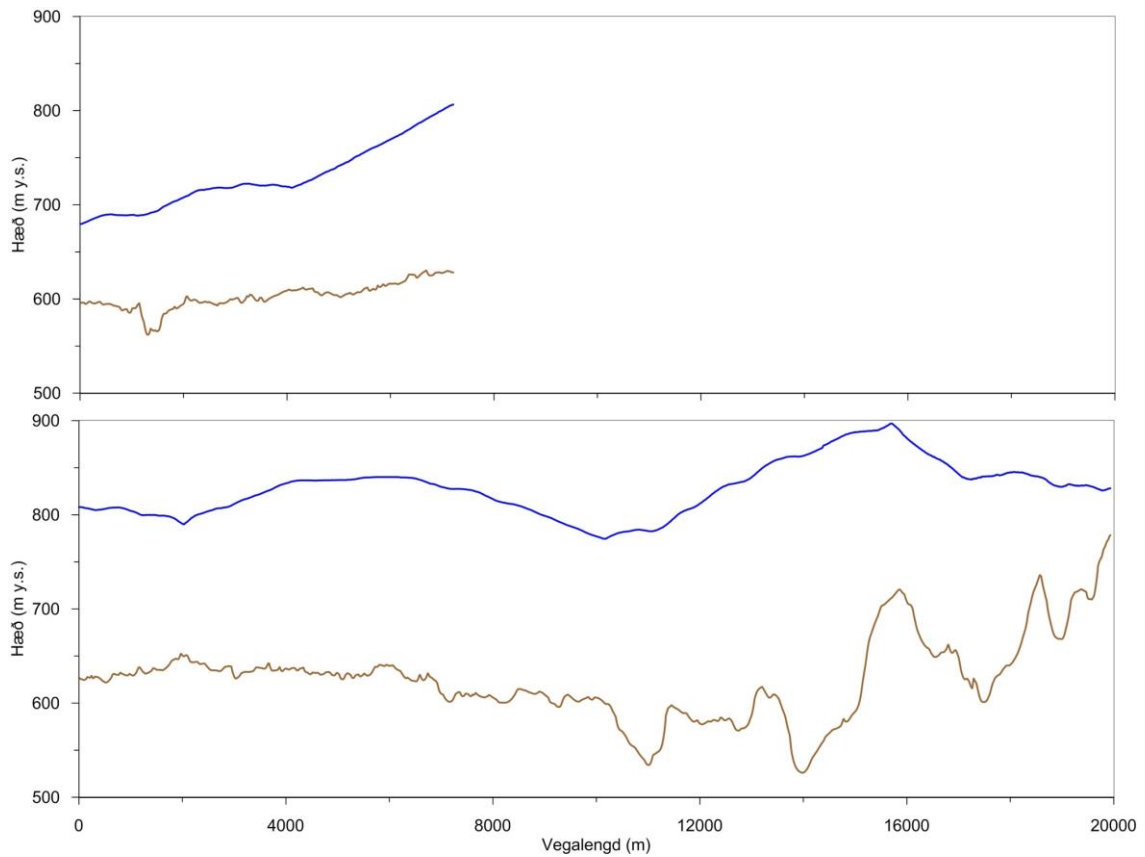
2. mynd. Íssjarmælisnið 0 (efra) og 1 (neðra) (sjá legu sniða á 1. mynd). Jökulyfirborð sýnt með blárri línu en jökulbotn með brúnni línu.



3. mynd. Íssjarmælisnið 6 (sjá legu sniðs á 1. mynd).



4. mynd. Íssjármælisnið 2(efra) og 3(neðra) (sjá legu sniða á 1. mynd).



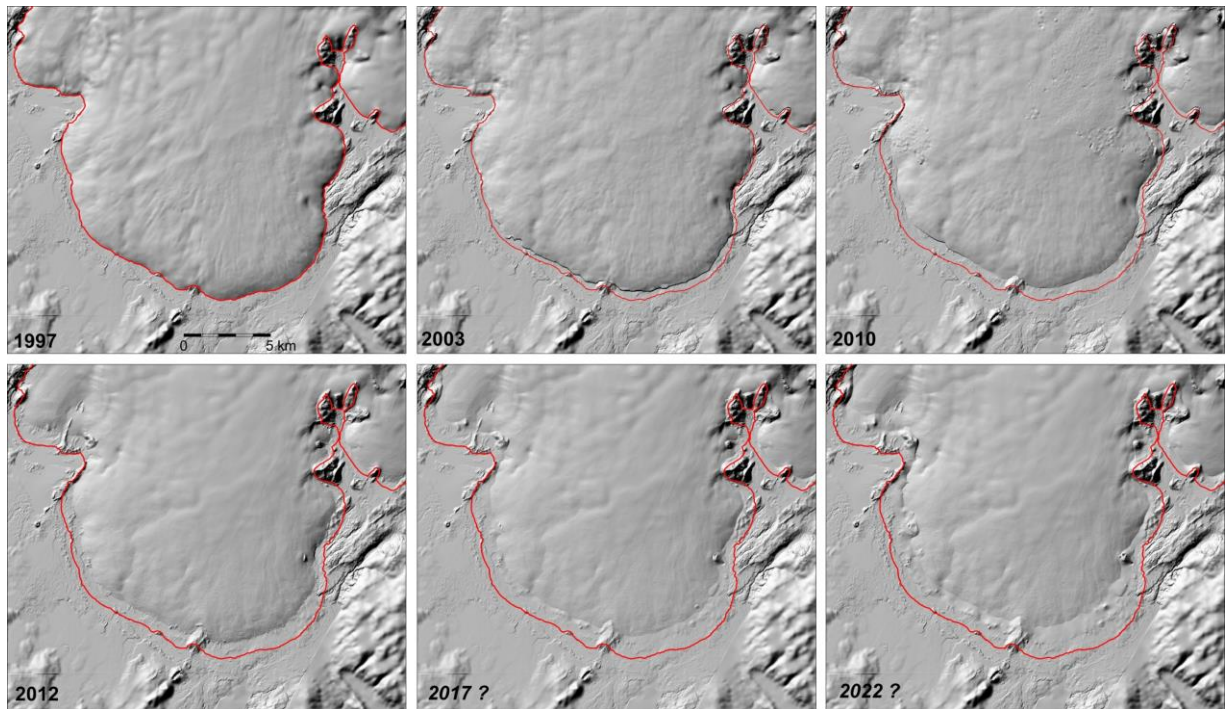
5. mynd. Íssjármælisnið 4(efra) og 5(neðra) (sjá legu sniða á 1. mynd).

Stafræn hæðarlíkön (kort)

Yfirborð:

Jöklahópur hafði þegar aflað eða unnið nokkur stafræn kort af yfirborði Síðujökuls. Elsta kortið sem hér er notað var unnið sem hluti MS-náms Eyjólf Magnússonar efir EMI-SAR radargögnum úr flugvél, kort unnið eftir SPOT5 gervitunglamyndum frá árinu 2003 var unnið af samstarfsmanni jöklahóps Etienne Berthier og kort unnin eftir SPOT5 myndum frá árinu 2010 fengust ófullgerð frá SPOT Image fyrirtækinu sem hlut SPIRIT samvinnuverkefnis, en Finnur Pálsson endurskoðaði og lagfærði villur og eyður í báðum kortunum. LiDAR kortið fékkst sem hluti samvinnuverkefni Jöklahópa Jarðvísindastofnunar og Veðurstofu auk Landmælinga Íslands um nær samtíma nákvæma kortlagningu yfirborðs allra íslenskra jökla, en Vegagerðin er einn margra stuðningsaðila þess verkefnis.

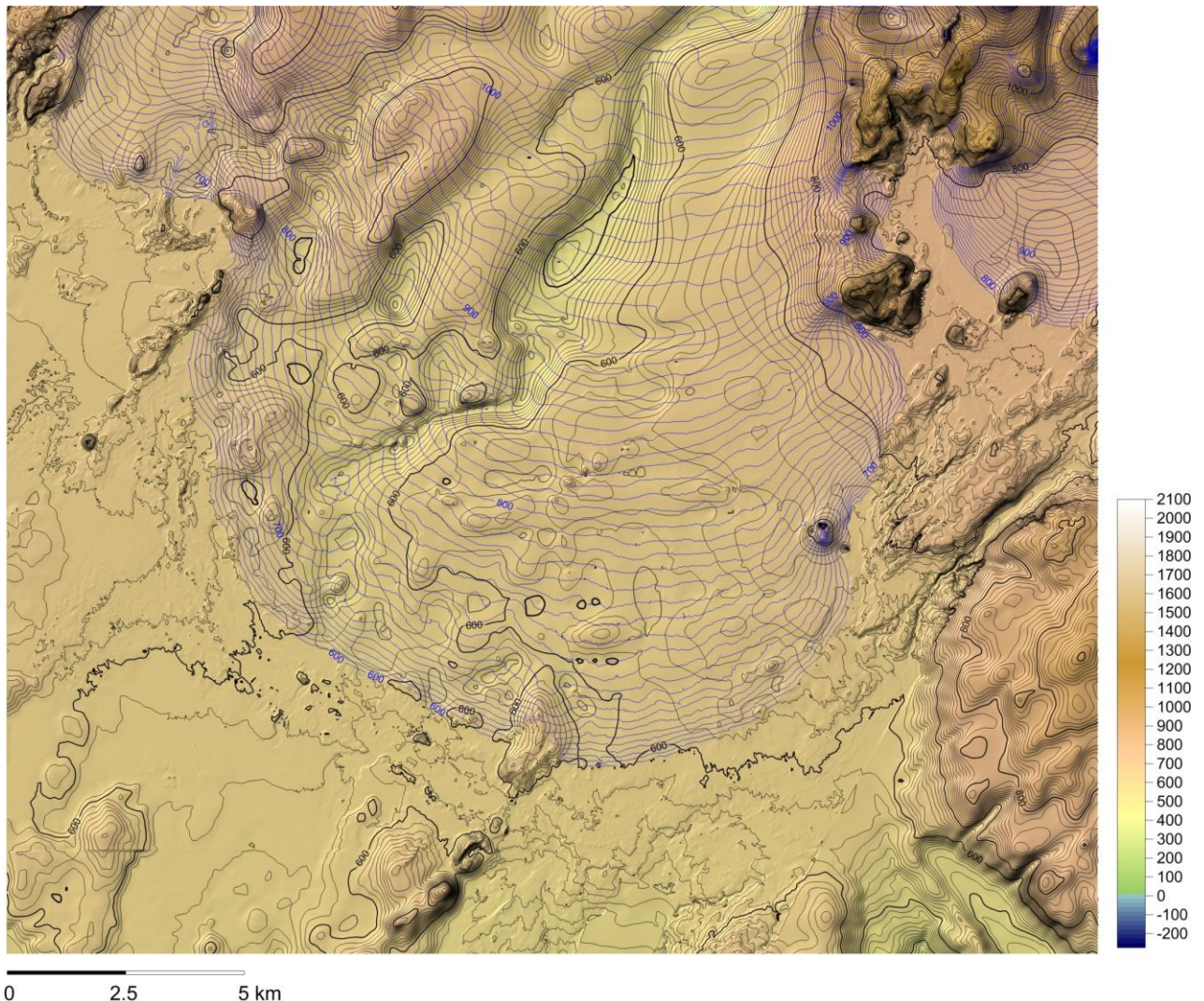
Auk þessara korta voru unnin stafræn kort sem líta má á sem tilgátur um lögun jökulsins á árunum 2017 og 2022 (5 og 10 árum eftir síðasta melda korti). Ekki ber að líta á þetta sem spá um þróun jökulsins. Þessi yfir borð eru metin þannig að fundin var hæðarbreyting (nálgæð með tveimur beinum línubútum, stigull afkomu breytist í um 900 m hæð) sem fall af yfirborðshæð út frá hæðarmismuni yfirborðanna 2003 og 2012, meðalhæðarbreyting á ári er 1/9 hluti þessa (tímabilið er 9 ár). Nú var yfirborð 2012 lækkað sem þessu nam, og litið á það sem yfirborð 2013; það yfirborð lækkað gaf 2014 og þannig koll af kalli. Þessi aðferð er mjög einföld en gefur hugmynd um þróun jökulsins ef loftslag (og þá einnig afkoma) verður svipað næstu 10 ár og síðasta áratug. Síðujökull er framhlaupsjökull með framhlaupslotu um 30 ár, síðasta framhlaup var 1993-94 og því má gera ráð fyri næsta framhlaupi nærri miðjum þriðja áratug aldarinnar.



6. mynd. Yfirborð Síðujökuls árin 1998, 2003, 2010, 2012 og metin lögun yfirborðs 5 og 10 árum síðar.

Botn:

Þegar hafði verið unnið stafrænt botnkort af Síðujökli eftir eldri íssjármælingum (1990, 1991 og 2003) en nú var bætt við upplýsingum um botnhæð á nýju mælisniðunum auk nákvæmra upplýsinga um botnhæð við jökuljaðar (af LiDAR kortinu). Endurgerð botnkorts var að mestu unnin þannig að sá hluti botns sem breyta átti var skorinn burt (stafrænt) nýju sniðgögnin ásamt þeim gömlu höfð þar. Þessi gögn ásamt rönd úr óbreytta hlutanum og gögnum um landhæð við jökuljaðar notuð til að reikna hæðargildi í rétthyrndu mælineti með 50 metra möskvum með Kriging brúunaraðferð. Þar sem nokkurt innra ósamræmi er í mæligögnunum (mælióvissa í botnhæð er talin nokkrir metrar í nýju mælitækjunum, 2013, en allt að 20 m í þeim gömlu vegna eldri tækni og meiri ósvissu um staðsetningu mælitækja á yfirborði) og einnig vegna þess að þéttleiki mælinga er mun meiri eftir mælinunum en milli þeirra, verður reiknað kort óreglulegt og með óraunverulegum hlykkjum. Þess vegna er bætt inn hnitum hæðargildum, teiknaðar eru hæðarlínur sem styðjast við reiknaða kortið og lega þeirra hnitum. Þessum hnitsettu línur er bætt í gagnasafnið og nýtt kort reiknað. Þetta þarf að ítreka alloft og snyrta. Að lokum fæst kort þar sem mismunur hæða í korti og á mælinum er lítill (~1-5 m) en lögun hæðarlína eðlileg.



7. mynd. Botn Síðujökuls unninn eftir íssjármælingum frá 1990, 1991, 2003 og 2013. Utan jökuljaðars er landhæðarlíkan að mestu LiDAR. Í botni og yfirborði eru hæðarlínur á 10 m fresti, í botni er hæðarlínur á heilu hundraði þykkari. Bláu línurnar eru jafnhæðarlínur yfirborðs 2012 skv. LiDAR hæðarlíkani.

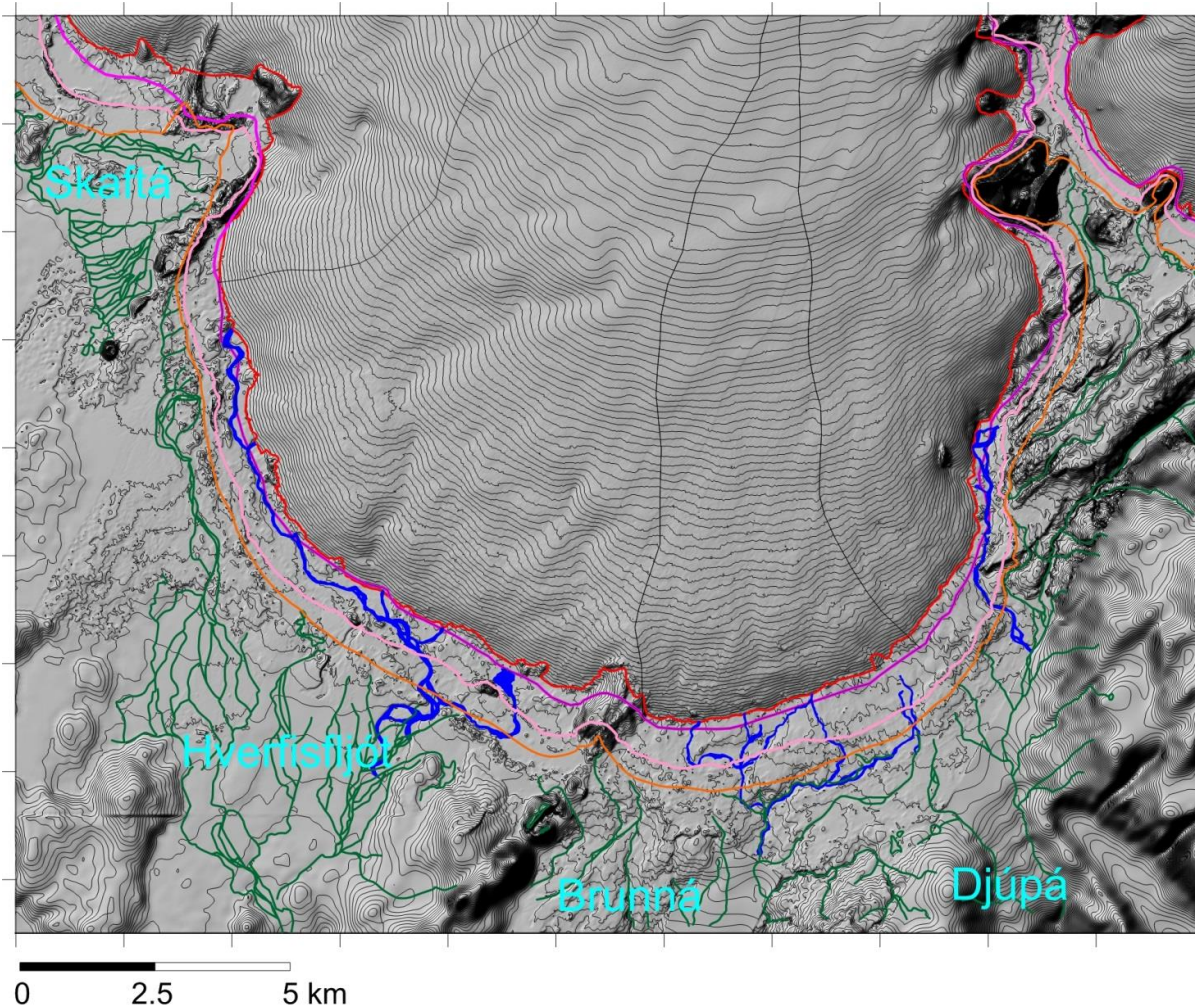
Botn Síðujökuls er í aðalatriðum hallandi plata frá ANA (í um 800 m hæð) til VSV (um 600 m hæð), en rofin sundur af djúpri lægð í stefnu NNA – SSV frá Pálsfjalli. Að öðru leyti er landslagið ávalir ásar og nokkrir stakir kollar, væntanlega eldstöðvar líkar þeim sem sjást utan jökuls. Nokkrar þessara hæða gætu verið hluti eldvarpa á gossprungum sem jafnvel má tengja út fyrir jökulinn.

Afmörkun vatnasviða

Þó að fræði um rennislísiðir vatns við jökulbotn séu enn ófullkomin er vitað að rennsli við botn stjórnast af þyngdarafli og vatnsþrýstingi. Gera má ráð fyrir að þrýstingur ráðist einkum af þykkt íss sem yfir liggur. Mætti (potential) vatns við jökul botn á þessum forsendum má meta sem

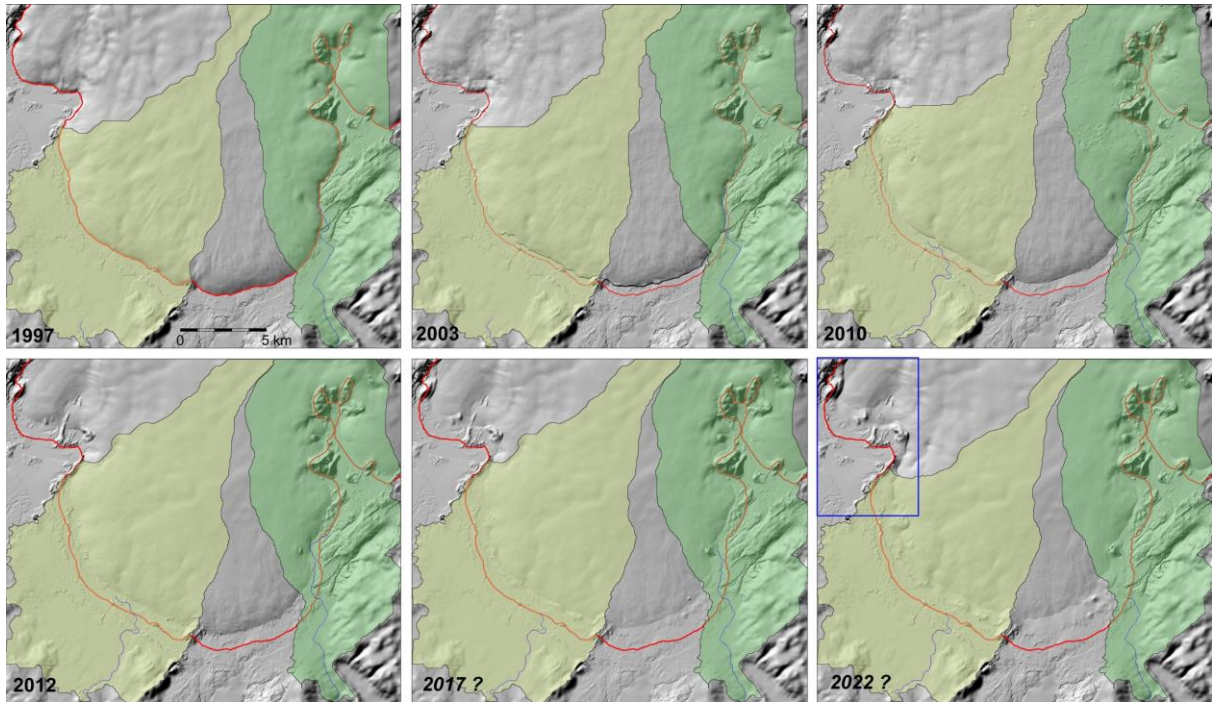
$$\Phi = \rho_{\text{ís}} * g * z_y + (\rho_{\text{vatn}} - \rho_{\text{ís}}) * g * z_b$$

Þar sem g er þyngdarhröðunin (9.82 ms^{-2}), $\rho_{\text{ís}}$ er eðlismassi íss (900 kgm^{-3}), ρ_{vatn} er eðlismassi vatns (1000 kgm^{-3}), z_b er botnhæð og z_y er yfirborðshæð.



8. mynd. Farvegir og kvíslar frá Síðujökli. Með bláum línunum eru sýndir farvegir sem hnitaðir voru af Landsat 8 gervitunglamynd frá 29. júní 2013. Grænu línurnar sýna farvegi og kvíslar af AMS kortum (eftir flugmyndum frá sumrinu 1946). Lega jaðars 1998 (yst), 2003, 2010 og 2012 (innst) er sýnd með gulri, bleikri, fjólublárrí og rauðri línu. Skyggt hæðarlíkan 2012 (LiDAR) er í bakgrunni.

Af mættisjöfnunni má ráða að yfirborðshalli hefur um nífalt vægi á við halla botns. Stafræn kort mættis fyrir nýja botninn og þau mismunandi yfirborðskort sem lýst var hér á undan voru reiknuð. Þar sem kortin lýsa mætti vatns við jökulbotn og vatn rennur frá hærra mætti til lægra rennur það hornrétt á jafnmættislínur. Vatnaskil milli einstakra fallvatna má þá finna með því að draga línu frá jökuljaðri við mót þeirra upp jökul hornrétt á mættislínur. Til að kanna hvar skil eru milli fallvatna við jökuljaðar var lega farvega með vatni hnitúð af Landsat 8 gervihnattamynd frá 29. júní 2013 (frá NASA), en lega eldri farvega var hnitúð af AMS kortum bandaríska hersins (AMS series C762, blöð 5819-I og II og 5919-I, III og IV). Þessir farvegir eru sýndir á 8. mynd. Greinileg eru skýr skil milli



9. mynd. Vatnsvið Skaftár, Hverfisfljóts, Brunnár og Djúpár unnin eftir mætti vatns við jökulbotn (utan jökuls ræður halli lands eingöngu). Yfirborð hvers árs er sýnt sem skuggamynd í bakgrunni. Bláa boxið afmarkar svæði þar sem vatnaskil Skaftár og Hverfisfljóts verða óljós.

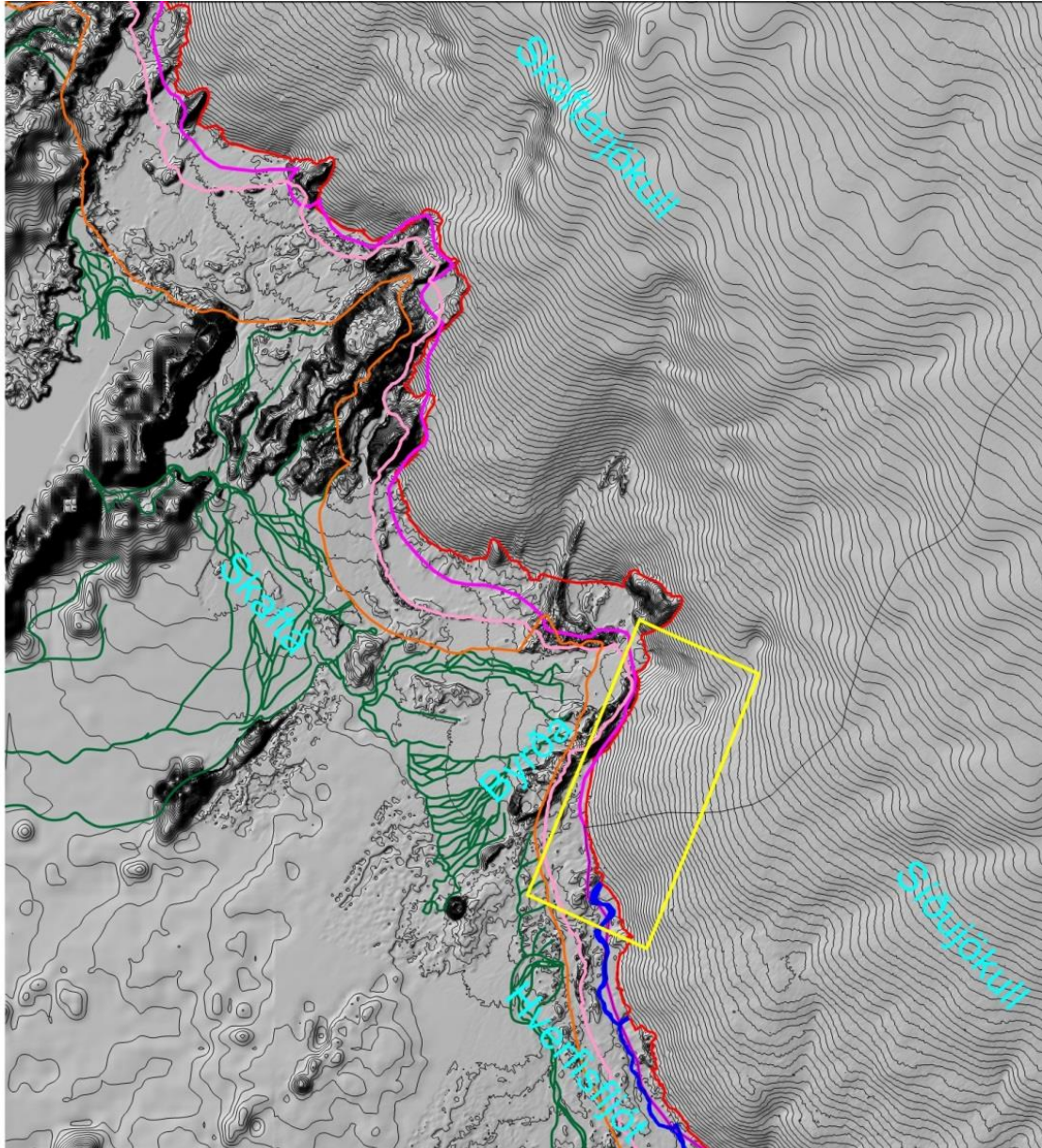
kvísla sem tilheyrir Skaftá, Hverfisfljóti, Brunná og Djúpá. Á jökli eru ísaskil sem afmörkuð voru eftir mætti vatns við botn reiknuðu út frá eldra botnkorti og yfirborði 2010.

Á 9. mynd eru sýnd vatnasvið Skaftár, Hverfisfljóts, Brunnár og Djúpár eins og þau afmarkast út reiknuði mætti vatns við jökulbotn árin 1998, 2003, 2010 2012 og loks um 5 og tíu árum síðar (eftir 2012). Þessi kort eru unnin með tólinu „watershed“ í SURFER hugbúnaði sem Jöklahópur hefur notað til kortagerðar í ártugi. „watershed“ rekur rennslisleiðir í landslagi út frá halla og tengir saman kvíslar til meginfarvega.

Á 9. mynd er valið að sýna vatnasvið sem afmarkast ef notuð eru óbreytt mæld yfirborðskort við mættisreikninga, en vegna þess að ísinn hefur styrk er farg á hverjum stað við botninn háð meðalísþykkt yfir svæði með radíus af stærðargráðu ísþykktar á hverjum stað. Eftir þessu má líkja með því að sía (draga úr breytileika) yfirborðs, t.d. með því að reikna hlaupandi meðaltal yfir svæði á yfirborði með radíus ~500 m. Mætti reiknað fyrir síað yfirborð gefa mjög svipaða niðurstöðu, en greinileg vik (lægðir) í yfirborði sem líklega fylgja legu vatnsganga við botn verða ógreinilegri.

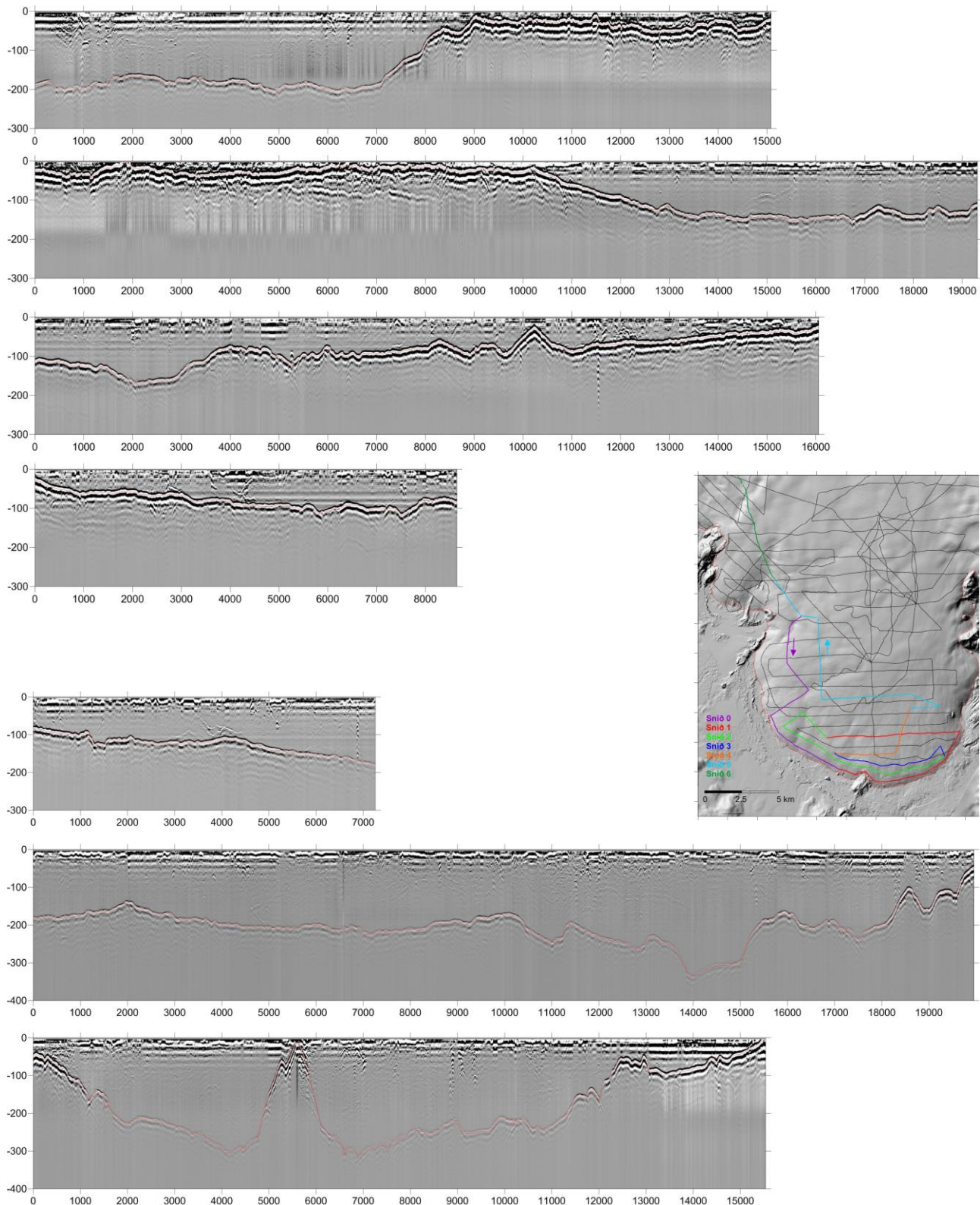
Skilin milli Hverfisfljóts-Brunnár og Brunnár-Djúpár eru mjög stöðug bæði undir jökli og utan hans nærri jökulsporði. Það á einnig við milli Skaftár og Hverfisfljóts þar til jökull fer að hörfa verulega frá

goshrygg (Byrða) sem nú liggur við jökuljaðar (10. mynd). Óljóst er hvað gerist þegar jökull hörfar þaðan, lægð gæti myndast við jökuljaðar sem beinir vatni suður til Hverfisfljóts ef ekki fellur til nægjanlegt set sem fyllir jafnóðum í. Þarna gætu nokkrir metrar í landhæð skipt máli. Enn fremur gæti vatn runnið undir jökuljaðrinum til Hverfisfljóts. Aðstæður þarna eru ekki ólíkar því sem var við Skeiðarárjökul þegar vatn fór að renna til Gígju í stað Skeiðarár 2009. Vel þarf að fylgjast með þessu og kanna í komandi Skaftárhlaupum hvort hluti hlaupvatns fer þessa leið þegar jökullinn hörfar frá Byrðu. Rétt er að nefna að líklegt er að hörfun og lækkun jökuls á þessum slóðum sé líklega ofmetin í mati á lögum jökulyfirborðs ~2017 og ~2022 sem hér eru notaðar, því jökullinn þarna er þykkur við sporðinn og því líklegur til að hreyfast (aflagast) meira og hörfa hægar en þegar sunnar dregur.



10. mynd. Svæði þar sem skil milli Skaftár og Hverfisfljóts verða óljós þegar jökullinn hörfar (nærmynd af LiDAR hæðarlíkani 2012). Gula boxið afmarkar svæði þar sem hugsanlegt er að renna myndist með jökuljaðri ef jökullinn hörfar verulega.

Viðauki I.



Mælisnið frá íssjá; sníð0 er efst og sníð6 er neðst. Lega sniðanna er sýnd á innfeldri mynd. Rauða lína sýnir legu endurkasts frá botni. Á lóðréttum ás er dýpi í metrum en vegalegn eftir yfirborði á láréttum ás.

Viðauki II.

Fjárhags skilagrein

Styrkur til þess verks 1500 þ.kr .

Kostnaður notkunar vélsleða reyndist 95 þ.kr.

Vegna samlegðar við önnur verkefni lækkaði kostnaður vegna notkunar á torfærubíl

Jarðvísindastofnunar, reyndist 75þkr.

Kostnaður vegna vinnu við mælingar var lægri en áætlað var, verkið var að mestu unnið af tveim mönnum í stað þriggja vegna þess að leiðangrar voru tvinnuðir saman: 480 þ. kr.

Kostaður vegna mælibúnaðarbúnaðar var 60 þkr.

Kostnaður við mælingar var því 710 þ. kr.

Laun vegna úrvinnslu og ritun skýrslu um niðurstöður 1.5 mannmánuðir, 675 þ.kr.

Umsjónargjald Jarðvísindastofnunar er 12.5% , 188 þ.kr.

Heildarkostnaður **1573 þ.kr.**

