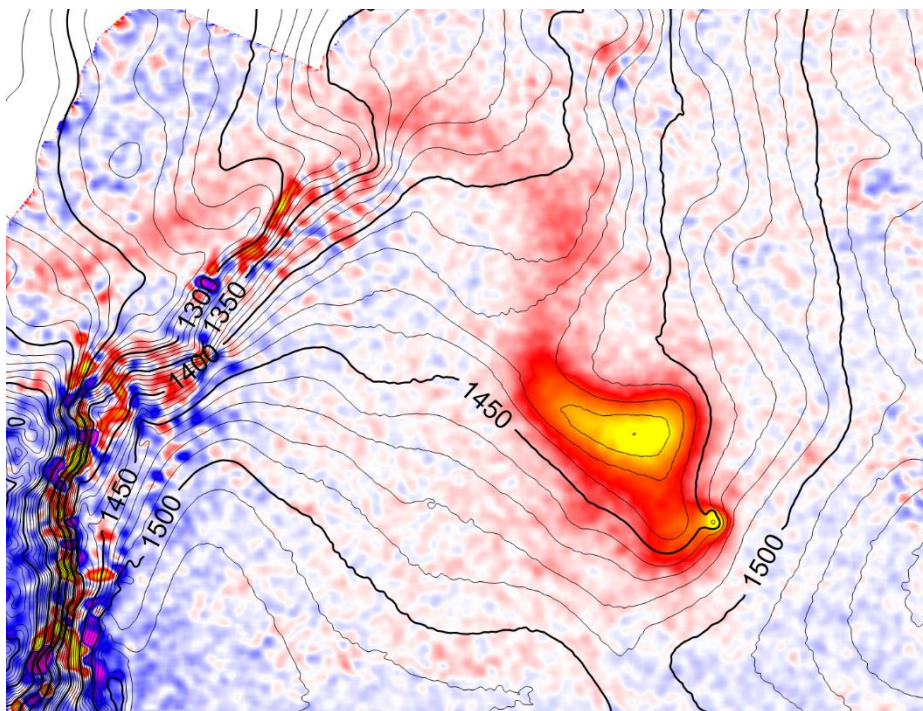


***Jökulhlaup í Sveðju í júlí 2011:
Íssjármælingar við Hamarsketil vorin 2013, 2014 og
2015 og yfirborðshæðarbreytingar í katlinum og
nágrenni hans 1998-2015***



***Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir,
Jarðvísindastofnun Háskólans***

Cristian Rossi, Remote Sensing Institute, German Aerospace Center (DLR)

Jarðvísindastofnun Háskólans

Febrúar 2016

RH-02-2016

Efnisyfirlit

1. Inngangur	5
2. Gögn	6
3. Íssjarmælingar	7
3.1 Úrvinnsla	7
3.2 Niðurstöður	9
4. Yfirborðshæðarbreytingar	9
4.1 Úrvinnsla	9
4.2 Yfirborðshæðarbreytingar fyrir hlaup.....	11
4.3 Yfirborðshæðarbreytingar vegna hlaupsins	12
4.4 Yfirborðshæðarbreytingar eftir hlaup	13
5. Vatnsmætti.....	14
6. Samantekt niðurstaðna.....	15
7. Heimildir	17
8. Myndir	19

1. Inngangur

Síðla kvölds 12. júní 2011 kom snögg og óvænt jökulhlaup undan Köldukvíslarjökli í ána Sveðju og þaðan í Hágöngulón (1. mynd). Áætlað var að heildarrensli hlaupsins hefði verið um 30 Gl og hlaupoppurinn í Hágöngulón nærri 2000 m³/s (Magnús T. Guðmundsson, 2012), milli kl. 2 og 4 um nóttina. Í könnunarflugi þann 13. júlí sáust 2 nýmyndaðir samliggjandi sigkatlar á ákomusvæði Köldukvíslarjökuls (2. mynd) nokkurn vegin miðja vegu milli Hamarsins og Vestari Skaftársketils en á þeim slóðum höfðu mælst nokkrir skjálftar dagana á undan (sbr. vefsíðu Veðurstofunnar, <http://www.vedur.is/um-vi/frettir/nr/2248>). Frá upptökum jökulhlaupsins austan Hamarsins og að jökulrönd eru 8 km og heildarlengd hlaupfarvegs að Hágöngulóni er um 20 km (1. mynd). Tvær stuttar óróahrinur mældust einnig þann 12. júlí auk kröftugrar óróahrinu sem hófst síðdegis sama dag, með hámark um miðnætti, en var að mestu lokið um hádegi (Kristín Vogfjörð o.fl., 2011). Þessi atburðarás kom fólki í opna skjöldu. Hlaup af þessu tagi hafa ekki orðið á vatnasviði Köldukvíslar frá því samfelldar vatnamælingar hófust á um miðjan 7. áratug síðustu aldar. Hlaupið var að mörgu leyti svipað þremur þekktum hlaupum sem komu undan sigkötlum Mýrdalsjökuls árið 1955 (í Múlakvísl), 1999 (í Jökulsá á Sólheimasandi) og í júlí 2011 (í Múlakvísl). Ekki er víska um orsakir þessara hlaupa en lágtíðnióróinn tengdur þessum hlaupum (þar með talið Hamarshlaupinu) telja sumir orsakast af kvikuhreyfingum meðan aðrir tengja hann við vatnsrennsli og suðu í jarðhitakerfinu (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2013). Niðurstöður efnagreininga vatnssýna úr hlaupinu í Múlakvísl 2011 og úr Hágöngulóni í lok Hamarshlaupsins hafa verið túlkaðar út frá efnafræðilíkönunum þannig að hlaupvatn hafi verið undir sigkötlunum í ár eða meira í aðdraganda hlaupanna og því hafi hlaupin frekar tengst jarðhitavirkni en gosvirkni (Iwona Galeczka o.fl., 2014).

Meginmarkmið þeirrar rannsóknar sem hér er greint frá er að kanna hvaða skorður hæðarmælingar á jökulyfirborði og íssjarmælingar af jökulbotni gefa á þá atburðarás sem orsakaði hlaupið í Sveðju árið 2011. Stærstu verkþættir rannsóknarinnar voru: Annars vegar nákvæm kortlagning með íssjá á jökulbotninum undir og í nágrenni Hamarsketilsins. Hins vegar könnun á breytingum í yfirborðshæð jökulsins innan áhrifasvæðis hlaupsins í aðdraganda og kjölfar þess og greining á líklegum orsökum þessara breytinga. Einnig var skoðað hvort breytingar yfirborðs og botngögnum í kjölfar þess sem geti verið forboðar annars jökulhlaups. Yfirborðshæðargögn frá mismunandi tímum og botnhæðargögn eru auk þess nýtt til einfaldra vatnsmættisútreikninga sem gefa grófa mynd af því hvort og hvar vatn er líklegt til að safnast fyrir og eftir hlaupið 2011.

2. Gögn

Meginuppstaða þeirra gagna sem þessi rannsókn er byggð á eru annars vegar íssjármælingar sem gerðar voru í Hamarskatlinum og nágrenni hans á árunum 2013-2015 (3.-7. mynd) og hins vegar yfirborðshæðarlíkön og hæðarsnið frá ýmsum tímum milli 1998 og 2015 (8.-15. mynd).

Markmið íssjármælinganna sem gerðar voru í júní 2013 var að afla nægjanlegra gagna til kortlagningar á jökulbotni undir Hamarskatlinum og svæðinu í kring (3. mynd). Ári síðar var bætt við mælisniðum þar sem mælingarnar frá 2013 þóttu ekki fullnægjandi og mjög þétt net sniða mælt yfir meginketilsigið til að fá sem nákvæmasta mynd af botninum undir því. Auk þess voru þrjú snið frá fyrra ári nákvæmlega endurmæld til að meta hvort staðsetning botnendurkasta hefði breyst, og túlka mætti sem tilfærslur á vatnsfleti við neðra borð jökulíssins (4.-5. mynd). Vorið 2015 voru einungis endurtekin þessi 3 mælisnið (4.-5. mynd).

Yfirborðshæðargögnin spanna mun lengri tíma og fleiri dagsetningar. Það elsta er EMISAR hæðarlíkan frá ágúst 1998 unnið út frá ratsjárbylgjuvíxlæmningum úr flugvél (Eyjólfur Magnússon, 2003). Tvö hæðarlíkön frá 2003 og júní 2010 eru unnin út frá gervihnattaljósmyndum frá SPOT5 gervitunglinu sem Spot Image gerði jöklahópi Jarðvísindastofnunar aðgengileg gegnum SPIRIT verkefnið. Þrjú hæðarlíkön eru gerð með leysihæðarskönnun (Lidar) úr flugvél (Tómas Jóhannesson o.fl. 2012); eitt frá júlí 2010 og tvö frá því í ágúst 2011 (eftir hlaup). Einnig var unnið með fimm TanDEM-X hæðarlíkön unnin úr ratsjárbylgjuvíxlmyndum frá TerraSAR-X gervitunglum Þýsku geimvísindastofnunar (DLR), en þau voru fengin frá DLR í gegnum verkefnið NTI_BIST6868. Hið fyrsta þeirra líkana er frá 6. júlí 2011 (sex dögum fyrir hlaup) en hin eru frá september 2013, júní 2014, júní 2015 og loks september 2015. Auk hæðarlíkana var unnið með hæðarsnið mæld með ratjánhæðarmæli og landmælinga GPS úr TF-FMS, flugvél Ísavia í nóvember 2011 og landmælinga GPS-snið mæld á snjósleðum í júní 2012 og júní 2013 í vorferðum Jöklarannsóknafélags Íslands.

Auk íssjár- og hæðargagna voru nýtt í þess rannsókn niðurstöður afkomumælinga á Vatnajökli (sjá t.d. Finnur Pálsson o.fl., 2015) unnar í samstarfi Landsvirkjunar og Jöklahóps Jarðvísindastofnunar Háskólans.

3. Íssjármælingar

3.1 Úrvinnsla

Frumniðurstöður íssjármælinga sem gerðar voru 2013 voru kynntar á fundi hjá Landsvirkjun í mars 2014 og í stuttri greinargerð sem send var Landsvirkjun í apríl sama ár (Eyjólfur Magnússon o.fl, 2014). Nú hafa þau gögn sem þá hafði verið aflað og þau sem aflað hefur verið síðan verið unnin með bættum úrvinnsluaðferðum. Frumgögn úr íssjárniðmælingum eru mæling útslags endurkastaðrar ratsjárbylgju sem fall af ferðatíma (að frádregnum ferðatíma bylgjunnar eftir jökulyfirborði milli sendi- og móttökulofneta, oftast á bilinu 10-50 m). Þessi gögn eru oft sýnd á myndum með ferðatíma á y-ás og númer mælingar (með þekktri tímasetningu) á x-ás og útslag sýnt með grátónum eða lit. Að gefnum föstum bylgjuhraða (170 m/ μ s) og með samtengingu íssjármælinga og samtíma GPS-mælingum er íssjárniðunum varpað yfir í myndir þar sem x-ás er ekin vegalengd eftir yfirborði þegar mæling er gerð og y-ás er yfirborðshæð að frádreginni fjarlægð í endurkastsfleti fyrir mælinga á hverjum stað í sniðinu. Einnig er landfræðilegri staðsetningu fyrir gefna vegalengd í endurkastmyndum (x-ás) haldið til haga. Þessar myndir (sjá 4. mynd) eru ómígreraðar sem þýðir að sjónræn framsetning gefur til kynna að endurkastfletir séu alltaf beint undir íssjá á dýpi sem svarar til ferðatíma endurkastaðrar rafsegulbylgju og þar með að y-ás myndanna gefi hæð endurkastflata yfir sjávarmáli sem ekki er alls kostar rétt. Helsta endurbótin sem gerð hefur verið á úrvinnsluaðferðum felst í því að nú eru þessar íssjárendurkastsmýndir mígreraðar (enska: migrated), þ.e. reynt er að leiðrétta fyrir því að ratsjargeislinn er ~300 – 500 m víður og því getur endurkast sem mælt er verið hvaðan sem er innan þess geisla frá nokkurn vegin kúlalaga fleti sem svara til fjarlægðar í endurkastflötinn. Mígrering er stöðluð aðferð við að draga saman orku úr mælingum frá mörgum stöðum (t.d. mörgum mælistöðvum eftir mælilínu) á rétt staðsettan endurkastsflöt. Tvívíð mígrering á íssjárniðmyndum gefur leiðrétta staðsetningu endurkastsflata (sjá 4. mynd) að gefinni þeirri einföldun að mæld endurköst séu frá flötum sem eru lóðrétt undir mældu yfirborðssniði en ekki frá endurkastflötum til hliðar við sniðið. Í eldri úrvinnsluaðferðum var túlkað botnendurkast hnitsett af ómígreraðri mynd en síðan var sá endurkastsflötur mígreraður með ákveðnum einföldunum. Nýja úrvinnsluaðferðin einfaldar túlkun á staðsetningu botnflatar og gefur nákvæmari hæð á honum.

Við botnkortlagningu með íssjárniðmælingum var staðseting botnendurkasts rakin með hálfsvíðvirku algrími sem rekur endurkastsflöt frá gefnum stað sem síðan er yfirfarin og

samþykkt eftir atvikum og endurkeyrt eins oft og þurfa þykir þar til greinanleg botnendurköst hafa öll verið rakin (dæmi sýnd á 4. og 5. mynd). Með samtengingu við skráðar staðsetningar fást nú skrár sem innihalda staðsetningu (austur og norðurhnit) ásamt hæð botns og jökulyfirborðs. Sú skrá er síðan yfirfarin með hliðsjón af því hvort skráðar mælingar séu þar sem krappar beygjur eru á sniðum. Tvívíð mígrering er ekki möguleg á mælingum sem gerðar eru í slíkri beygju og því verður mæling á botnhæð bjöguð og þess vegna eru slíkar mælingar ekki nýttar til botnkortlagningar. Þetta var gert við öll gögnin frá 2013, viðbótarsniðin frá 2014 utan meginketilsins auk hluta þéttu sniðmælinga sem gerðar voru 2014. Á sniðum frá 2013 sem voru endurmæld 2014 og 2015 yfir Hamarskatlinum voru eingögnu nýttar þær mælingar þar sem hæð botnendurkast virtist eins í öllum mælingunum. Botnhæðarlíkan með 50mx50m möskvastærð var reiknað út frá mæligögnum með kringing brúanaralgrími í Surfer 12 (frá Golden Software). Til að tryggja samfellu við eldra botnhæðarlíkan (Helgi Björnsson o.fl., 1992) voru gögn um botnhæð gamla botnlíkans á mörkum gamla og nýja líkansins höfð með í inntaksgögnum fyrir brúanaralgrímið (3. mynd).

Auk notkunar við gerð botnkorts voru endurmældu sniðin (4. og 5. mynd) könnuð sérstaklega. Ákveðið var að nota mælinguna frá 2014 sem grunnmælingu og varpa sniðunum frá 2013 og 2015 yfir í lengdarás hennar þannig að staður í sniði eins árs svaraði til nokkurs vegins sama staðar með sama lengdarhnit í sniði annars árs. Þetta er mikilvægt þar sem lítilsháttar frávik í endurtekningum á línun getur orsakað uppsafnaðan lengdarmismun á sniðum sem flækir samanburð. Sniðin voru síðan borin saman til að greina hvort einhvers staðar á sniðunum mætti greina tilfærslur í legu endurkastflata nærri botni sem gefið gæti vísbendingar um vatnssöfnun eða losun milli ára.

Megintilgangur með mælingu þéttu sniðanna var að búa til gagnasafn sem mígrera mætti í þrívídd, þ.e. að leiðrétta í hverjum punkti ekki eingöngu fyrir endurköstum frá fyrirbærum sem eru framan og aftan við íssjána í sniðinu heldur einnig þeim sem eru til hliðar við gefið íssjárnsnið. Með þessu mót fæst þrívíð heilmýnd (enska: hologram) innri endurkastflata frá jökulyfirborði niður á botn. Ekki hefur enn unnist tími til að útbúa eða aðhæfa hugbúnað annarra að íssjarmæligögnum jöklahópsins sem mígrerar mælingarnar á þennan hátt. Það stendur hins vegar til (vonandi á þessu ári) og þá verða þessar íssjarmælingar mígreraðar í þrívídd.

3.2 Niðurstöður

Niðurstöður af eldri úrvinnslu á gögnunum frá 2013 var sú að þá um vorið hefði líklega aftur safnast fyrir 5-10 milljón m³ vatni við jökulbotn undir Hamarskatlinum (Eyjólfur Magnússon o.fl. 2014). Þetta var niðurstaðan vegna sterkrar endurkastsbólur sem sást í ómígreruðu endurkastmyndunum undir miðjum katlinum (efsta snið til vinstri á 4. mynd). Við mígreringu íssjármælinganna verður endurkastsbólur sem túlkuð var sem vatnsöfnun í mælisniðum frá 2013 að þröngu kassalaga formi (efstu snið til hægri á 4. mynd). Þetta form er horfið í mælingunum 2014 en breytingar eru til hliðanna undir katlinum sem mögulegt er að túlka sem tilfærslu á vatni. Þau form eru horfin í mælingunum frá 2015.

Á 3., 6. og 7. mynd sjást niðurstöður botnkortlagningar af jökulbotni undir Hamarskatlinum og í nágrenni hans. Þær sýna flókið landslag með hryggjum og hæðum sem bera vitni um eldri gosvirkni á svæðinu (3. mynd). Ef eingöngu er horft til botnsins undir katlinum, þá er nokkuð djúp lægð undir honum sem er að einhverju marki lokuð og getur stuðlað að vatnssöfnun (sjá 5. kafla um vatnsmættisreikninga). Ísþykkt yfir þessari lægð er allt að 430 m (6. mynd). Undir miðjum katlinum, svo til beint undir lægsta punkti hans eins og hann var fyrst eftir hlaupið, gefa íssjármælingarnar til kynna þúst sem stendur allt að ~50 m yfir nágrennið (7. mynd). Heildarrúmmál þessarar þústar er gróft metin um ~3 milljón m³. Ólíkt endurkastbólunni sem sást í 2013 mælingunum virðist þessi mishæð vera stöðug í íssjármælingunum milli ára og því er ólíklegt að vatnsgeymir skapi þessa þúst, mun líklegra er að um fastan botn sé að ræða.

Vorið 2014 var ákveðið að kortleggja betur botninn undir yfirborðslægð austur af Hamarskatlinum. Þær mælingar leiddu í ljós dal milli tveggja fjallshryggja (sjá austurhorn kortlagðs svæðis á 3. mynd) en einnig fyrirbæri við botn sem gætu verið vísbendingar um vatnsgeymi við botn (11. mynd) og rædd verður frekar í 4. kafla.

4. Yfirborðshæðarbreytingar

4.1 Úrvinnsla

Þau hæðarlíkön sem nýtt voru í þess rannsókn eru flest sýnd á 8. og 9. mynd. Þau hæðarlíkön sem unnið var með í 5mx5m möskvastærð (Lidar og TanEM-X) hafa flest verið síuð með 50-100 m breiðum Gaussískum síum (gaussbjöllum laga hlaupandi meðaltal, breidd bjöllumnar fer

eftir gæðum upprunalega líkansins) til að eyða háttíðnibreytileika, áður en hæðarlínur á myndum voru teiknaðar. Í tilfalli Tandem-X hæðarlíkananna (sem voru frumunnin af Cristian Rossi hjá DLR) er þetta gert vegna hæðarvillu sem myndar suð sem síun dregur verulega úr. Í tilfalli Lidar gagna frá 2011 eru hæðarlíkönin síuð þar sem yfirborðið var raunverulega mjög óslétt vegna misbráðunar sem öskudreif úr Grímsvatnagosinu um vorið olli. Sá hæðarbreytileiki er hins vegar ekki áhugaverður fyrir þessa rannsókn. Sum hæðarlíkananna eru byggð á hæðarsniðmælingum en þá eru sniðmælingarnar bornar saman við hæðarlíkön sem eru nærri í tíma og reiknuð hæðarbreyting í sniðunum. Þessi hæðarbreyting er síðan brúuð með kringing algríminu í Surfer og bætt við samanburðarhæðarlíkanið. Hæðarlíkan fyrir nóvember 2011 (ekki sýnt á 8. og 9. mynd) var unnið á þennan hátt með samanburði við síað Lidar hæðarlíkan frá 27. ágúst 2011. Yfirborðslíkan fyrir vorið 2013 var gert á þennan hátt með samanburði við síað TanDEM-X hæðarlíkan frá 27. september 2013. Í tilfalli GPS mælisniðanna frá vorinu 2012 var reiknað yfirborð á þennan hátt bæði með samanburði við hæðarlíkanið frá 27. ágúst, 2011 og 27. september, 2013 og síðan reiknað og notað meðaltalsyfirborð af þessum tveimur yfirborðslíkönum. Hæðarlíkanið sem byggt er á SPOT5 myndum frá 2003 er ekki nýtt frekar við athugun hæðarbreytinga þar sem gæði þess virðast nokkru verri en annarra hæðarlíkana. Það er hins vegar með á 8. mynd til að sýna að lögun lægðarinnar þar sem Hamarsketillinn myndaðist var mjög svipuð í öllum hæðarlíkönum sem tiltæk eru fyrir hlaupið.

Á 10.-16. mynd má sjá mismun hæðarlíkana. Við vinnslu mismunakorta þar sem nýtt voru háupplausnarlíkón (5m x 5m möskvastærð) var mismunur fyrst reiknaður út frá upprunalegum líkónunum og síðan var mismunur hæðarlíkananna síaður með 50-100 m breiðum Gaussískum síum af sömu ástæðum og áður eru nefndar. Ef annað kortið var í grófari upplausn var það fyrst línulega brúað í sömu upplausn og háupplausnar hæðarlíkanið áður en ósíaði mismunurinn var reiknaður. Á 11.-16. mynd þar sem horft er til hæðarbreytinga í katlinum og nágrenni hans er sýndur mismunur að frádregnum jafnaðarmismun utan meginketilsins. Með þessu fæst tvennt. Annars vegar dregur þetta úr áhrifum hliðrunarvilla í hæð líkananna sem alltaf getur verið til staðar að vissu marki. Hins vegar dregur þetta fram breytingar sem afmarkast við ketilinn sjálfan og orsakast ekki af „venjulegum“ yfirborðsbreytingum jökulsins sem að öllu jöfnu eru svipaðar frá einum stað til annars yfir stuttar vegalengdir.

4.2 Yfirborðshæðarbreytingar fyrir hlaup

Hæðarbreytingar á suðurhluta Köldukvíslarjökuls frá 1998 til 2010 (10. mynd) sýna að svæðið austur af Hamrinum hefur almennt lækkað um 5-10 m. Suðurhlíðar lægðarinnar þar sem Hamarsketill myndaðist sýna lækkun upp á röska 10 m. Lækkun á efri hluta jökulsins á þessu slóðum gæti tengst framhlaupi í jöklinum en um miðbik jökulsins má greina 5-15 m hækkun á tímabilinu meðan neðsti partur hans lækkaði verulega og sporður hans hopaði umtalsvert. Merki um framhlaup greindust á suðurhluta Köldukvíslarjökuls bæði árið 1975 og 1992 (Helgi Björnsson o.fl., 2003) og því myndi framhlaup á tímabilinu 1998-2010 passa vel að framhlaupslotu nálægt 17 árum. Ef þessar hæðarbreytingar voru tengdar framhlaupi í jöklinum hefur framhlaupsbylgjan þó ekki náð sporði en merki um framhlaupsbylgjur sem ná ekki sporði hafa áður sést t.d. á Vestari Hagafellsjökli í Langjökli, 1997-1998 (Helgi Björnsson o.fl., 2003).

Tvö hæðarlíkön eru til frá 2010, annars vegar líkan gert út frá SPOT5 ljósmyndum teknar 6. júní, sem ná yfir stóran hluta Vatnajökuls og hins vegar Lidar hæðarlíkan frá 21. júlí sem nær yfir stóran hluta Hamarsketilsins og svæðið austur af honum. Frá 2011 er til hæðarlíkan út frá TanDEM-X gögnum sem mælt var 6 dögum fyrir hlaup. Ef skoðaður er hæðarmismunur út frá þessum þremur hæðarlíkönum (11. mynd) sjást engar markverðar hæðarbreytingar á ketilstæðinu sem tengja má við vatnssöfnun við botn árið á undan hlaupinu. Hæðarmismunur í ketilstæðinu er raun ekkert frábrugðin þeim breytileika sem sést í hæðarmismun utan ketilsins sem líklega er að mestu tilkominn vegna smávægilegra villa í hæðarlíkönunum. Ef hæðarbreytingarnar áttu sér stað sem tengdar voru vatnssöfnun og náðu yfir verulegan hluta ketilstæðisins hafa þær að öllum líkindum verið innan við metri að jafnaði.

Það vekur einnig athygli í samanburði hæðarlíkananna frá 2010 (11. mynd) að austur af lægðinni þar sem ketillinn myndaðist greinist staðbundin yfirborðlækkun upp ~7 m (að frádregnum jafnaðarmismun) á tímabilinu 6. júní - 21. júlí. Slík staðbundin lækkun að sumarlagi getur varla tengst öðru en verulegri botnbráð, tæmingu vatnsgeymis við botn eða samblandi af því tvennu. Á þessu svæði, sem tilheyrir vatnasviði Sveðju, sést einnig umtalsvert meiri lækkun en í nágrenninu á tímabilinu 1998-2010 (10. mynd). Á sömu slóðum sjást sérkennileg fyrirbæri í íssjarmælisniðum frá 2014 (sýnt neðst á 11. mynd). Um er að ræða mjög slétta og bjarta (sterkt endurkast) fleti við jökulbotn utan í fjallshlíð; þetta gætu verið vatnsfletir (afmarkað með bláum línum á yfirborði). Austan við megin lækkunina sumarið 2010 er flöturinn nálægt því að vera láréttur en endar í mjög skörpum stalli að sunnanverðu en í afgerandi hallabreytingu við fjallshlíðina að norðanverðu. Vestari flöturinn hallar meira og er ekki eins afgerandi en hann

deyfist verulega í suðurendann en endar eins og austurflöturinn með skarpri hallabreytingu við fjallshlíðina að norðan. Austasti hluti sniðsins sem er sýndur á 11. mynd sýnir mjög sterkt endurkast niður í dalbotni sem einnig gæti verið vísbending um vatnsflöt (afmarkað með fjólublárrí línu á yfirborði).

4.3 Yfirborðshæðarbreytingar vegna hlaupsins

Á 12. mynd sjást hæðarbreytingar frá 6. júlí 2011, 6 dögum fyrir hlaup, til 11./27. ágúst (samsett líkan þar sem austasti partur ketilsins og svæðið austan hans er frá 11. ágúst, annars frá 27. ágúst) um mánuði eftir hlaup. Hæðarbreyting kringum ketilinn svarar til rösklega 25.5 ± 2.1 milljón m^3 (óvissa svarar til mögulegrar 0.5 metra hliðrunarskekkju í hæðarbreytingu fyrir skilgreint lækunarsvæði ketils) af ís. Ef gert er ráð fyrir að það svari til rúmmáls íss sem bráðnaði undir katlinum og skilaði sér sem hlaupvatn gerir það um 23 ± 2 milljón m^3 (23 ± 2 GJ). Á 12. mynd sést einnig veruleg hæðarbreyting á jökulyfirborði yfir flóðfarvegi hlaupsins (farvegurinn er við jökulbotn). Sú breyting svarar til um 2 metra lækunar að jafnaði yfir þann hluta hlaupfarvegsins sem bæði hæðarlíkönin spanna (um 6 km af um 8 km löngum farvegi). Rúmmál þessarar hæðarbreytingar er um 7.6 ± 1.9 milljón m^3 (óvissa svarar til mögulegrar 0.5 metra hliðrunarskekkju hæðarbreytingar fyrir skilgreint lækunarsvæði spors). Þetta svarar til 7 ± 2 milljón m^3 af vatni ef hæðarbreytingin orsakast eingöngu af bráðnun íss. Heildarafrennsli ketils og farvegs upp á 30 ± 4 GJ er í góðu samræmi við áætlað innrennsli í lónið (Magnús T. Guðmundsson, 2012). Ólíklegt er að rof jökulbotns valdi nemi litlu broti þeirrar lækunar sem sést yfir farveginum (ísinn sígur í sárið og far myndast á yfirborði). Einnig að ljóst að núningsvarmi sem meta má út frá stöðuorkutapi hlaupvatns og brætt hefur ís við jökulbotn eftir farveginum getur aðeins valdið litlum hluta af lækunarinnar. Til að bræða ís sem svarar til þessa rúmmáls þyrfti hlaupvatnið að hafa umtalsverða varmaorku í upphafi. Sú orka svarar til þess að vatn sem rann við botninn hafi að jafnaði kólnað um $15\text{-}31^\circ\text{C}$ (efri og neðri mörk fengin út frá óvissum í ofangreindum rúmmálstölum) yfir þann hluta farvegarins sem hæðarlíkönin spanna en ekki er vitað hvort vatnið hafði náð frostmarki þegar 2 km voru eftir niður að sporði. Því má segja að lágmarksmeðalhiti vatnsins sem fór af stað sé ekki undir 15°C en meðalhiti vatnsins gæti vel hafa verið talsvert hærri.

4.4 Yfirborðshæðarbreytingar eftir hlaup

Fyrsta mælingin á hæðarbreytingum í Hamarskatlinum eftir hlaup fæst út frá mismun tveggja Lidar hæðarlíkana frá 11. og 27. ágúst. Skörun þeirra nær einungis yfir suðaustur enda ketilsins (13. mynd) en þar má greina afgerandi lækkun upp á ~1.5 m (~10 cm/dag). Næsta mæling fæst út frá samanburði Lidar hæðarlíkans frá 27. ágúst og ratsjárnsniðmælingum úr flugvél Ísavia þann 30. nóvember, 2011 (13. mynd). Þær sýna hækkun yfir stóran hluta ketilsins um 1-3 m en þó öllu meiri (~6 m) í ketilstromp sem myndaðist upp í suðausturhlíð ketilsins í hlaupinu. Líklegasta skýringin á þessari hækkun á yfirborði ketilsins er flæði íss inn að honum vegna yfirborðshalla sem jafnar út lögðina og mögulega einnig skafrenningur. Ef skoðuð er breyting yfir allan veturinn 2011-12 (samanburður Lidar hæðarlíkans frá 27. ágúst og GPS sniða frá 5.júní, 2012) fæst nokkurn veginn sama form á hæðarbreytingu í katlinum, tölurnar eru bara hærri og svara til 7 m hækkunar í miðju meginketilsins en allt að 15 m í ketilstrompinum.

Enn lengra eftir hlaupið (14. mynd) sýna mismunakort yfir tímabil sem spanna vetur jafnan yfirborðshækkun í þeirri hlíð ketilsins sem vísar móti suðvestri en litla breytingu eða jafnvel lækkun á þeirri hlíð sem snýr móti norðaustri. Þetta er líklega til marks um ríkjandi skafrenningsátt úr norðaustri. Þetta er sérstaklega áberandi veturinn 2013-14 en þá er hækkun í bröttum hlíðum sem vísa í suðvestur áberandi víða á ákomusvæði Tungnaár- og Köldukvíslarjökuls, samkvæmt samanburði TanDEM-x hæðarlíkana. Mismunakort sem spanna einungis sumar (sumrin 2013 og 2015) sýna lítils háttur lækkun (~1 m að frádregnum jafnaðmismun) yfir stóran hluta ketilsins. Þetta gæti verið vísbending um botnbráðnun vegna varmastreymis undir katlinum en einnig gæti þetta mögulega orsakast af staðbundnum breytileika yfirborðsbráðar. Vert er að benda á afgerandi lækkun (1-3 m, miðað við umhverfið) tímabilið 7. júní 2014 - 27. júní 2015 (neðst til vinstri á 14. mynd) austur af Hamarskatlinum á sömu slóðum og lækkun sást sumarið 2010 (12. mynd).

Heildarhæðarbreytingar eftir hlaupið fram til september 2015 (15. mynd) sýna umtalsverða yfirborðshækkun á stærstum hluta ketilsins. Líklegasta skýringin á því er ísflæði inn að miðju hans og uppsöfnun skafrennings. Þó er athyglisvert að í suðvestur hlíð ketilsins mælist allt að 6 m lækkun sem gæti bent til staðbundinnar bráðnunar við botn. Ef horft er til þess hvernig dýpi ketilsins hefur þróast (16. mynd) sést að ketillinn grynnaði mest fyrsta árið eftir hlaup, eftir það frekar hægt, en mögulega eilítið hraðar síðasta árið. Þetta gæti verið til marks um að botnbráð, sem nú sé farið að draga úr, hafi viðhaldið dýpi ketilsins. Í mati á dýpi ketils (14.

mynd) er notaður botn ketilsins og söðulpunktur í lægðinni frá katlinum til norðurs. Hafa ber í huga að söðullinn hefur einnig breyst á tímabilinu (vegna ísflæðis).

Mældar hæðarbreytingarnar eftir hlaup (13.-15. mynd) sýna engar skýrar vísbendingar um vatnssöfnun undir eða rennsli undan Hamarskatlinum eftir hlaupið. Þær útiloka þó ekki að slíkt hafi átt sér stað í einhverjum mæli.

5. Vatnsmætti

Með því að nýta botnkort og yfirborðskort sem greint er frá hér að framan má reikna æstætt mætti vatns við jökulbotn. Þó svo að um einföldun sé að ræða hafa slíkir reikningar nýst vel til að draga vatnasvið á jökli, meta helstu rennislíleiðir við botn og til að meta hvar vatn er líklegt til að safnast fyrir við jökulbotn (t.d. Helgi Björnsson, 1988). Oftast er gert ráð fyrir að jökulísinn liggja með fullum þunga á botni. Þá er vatnsmættið á hverjum stað gefið sem

$$\varphi = g\rho_i z_y + g(\rho_v - \rho_i)z_b$$

þar sem $g = 9.82 \text{ m/s}^2$ er þyngdarhröðun, z_y og z_b yfirborðs og botnhæð og ρ_v og ρ_i eðlismassi vatns og íss. Slík vatnsmætti voru reiknuð með 50mx50m möskvastærð fyrir 4 jökulyfirborð fyrir hlaup og 7 yfirborð eftir hlaup og eru sýnd á 17.-18. mynd; gert er ráð fyrir að jökulbotn sé sá sami fyrir og eftir hlaup. Á þessum myndum eru lokaðar hakaðar jafnmættislínur til marks um mættispolla þar sem vatn gæti haft tilhneigingu til að safnast fyrir. Fyrir hlaup sjást í öllum tilfellum grunnir mættispollar þar sem Hamarsketillinn myndaðist sem túlka má sem veika tilhneigingu til vatnssöfnunar. Eftir hlaup eru þessir mættispollar hins vegar umtalsvert dýpri sem er eðlileg afleiðing þeirrar staðbundnu yfirborðslækkunar sem varð við myndun ketilsins. Einnig sést á þessum myndum viðvarandi pollur í vatnsmætti austur af Hamarskatlinum. Sá pollur er nokkru vestar en sá staður þar sem mesta yfirborðsbreytingin varð sumarið 2010 og þar sem íssjárnið gefa vísbendingar um vatnssfleti, en á þeim slóðum sýnir vatnsmættið nokkuð ákveðinn halla til vesturs sem mælir þess vegna gegn því að þar sé líklegur vatnssöfnunarstaður.

Vatnsmættið frá ágúst 2011 var notað til að draga upp vatnasvið Hamarsketilsins og það síðan notað til að meta árlega yfirborðsleysingu sem runnið hefur til Hamarsketilsins (19. mynd) með því að nýta sumarafkomumælingar jöklahóps Jarðvísindastofnunar og Landsvirkjunar (sjá t.d. Finnur Pálsson o.fl., 2015). Vatnasvið ketilsins er umtalsvert eða tæpir 14 km^2 . Frá 1996 má

ætla að ~14 Gl af yfirborðsleysingarvatni hafi að jafnaði runnið til Hamarsketilsins á hverju sumri. Þessi tala fer niður fyrir 13 Gl ef sumarið 2010 er ekki tekið með en þá var ofsabráðnun á þessum slóðum vegna ösku á yfirborði frá gosinu í Eyjafjallajökli og hlýinda. Sumarið 2010 er áætlað að yfirborðsleysing á þessu svæði hafi verið röskir 45 Gl.

6. Samantekt niðurstaðna

Hið nýja botnkort sýnir flókinn jökulbotn undir og í nágrenni Hamarsketilsins. Íssjármælingarnar sýna að undir miðju megingetilsins sem myndaðist við jökulhlaupið er hóll sem metin er ~3 milljónir rúmmetra. Ef hann myndaðist í eldgosu við jökulbotn og snöggri ísbráð sem olli jökulhlaupinu í júlí 2011, gætu gosefnin sem hlóðu hann upp borið með sér varma sem nægði til að mynda það vatn sem skilaði sér niður í hlaupinu (~30 Gl) ef varmi gosefnanna er að mestu nýttur til bræðslu íss fyrir og í hlaupinu. Vel má vera að slíkt gos hafi skilið eftir sig meira en þennan hól innan lægðarinnar undir katlinum.

Þær athuganir sem hér eru settar fram styðja ekki þá tilgátu að hlaupvatnið hafi verið í geymi undir katlinum í umtalsverðan tíma fyrir hlaupið (Iwona Galeczka og fleiri, 2014) þó ekki sé hægt að útiloka þann möguleika. Það sem helst mælir gegn því er að engar hæðarbreytingar greinast á ketilstæðinu þann tíma sem tiltæk hæðarlíkon fyrir hlaup spanna, þ.e. yfir 13 mánuði þar til 6 dögum fyrir hlaup öfugt við það sem varð í kötlunum sem jökulhlaupið í Múlakvísl kom úr fjórum dögum fyrr. Það hlaup átti upptök í sigkötlum þar sem jarðhiti hefur verið þekktur áratugum saman auk þess sem hæðarsnið mæld þremur dögum fyrir hlaupið sýndu skýr merki um grynnkun katlanna frá árinu áður (Guðrún Larsen o.fl., 2013). Ef um slíkar hæðarbreytingar var að ræða sem náðu yfir stóran hluta Hamarsketilsins voru þær tæpast meira en 1 m. Á sama tíma er áætlað að umtalsvert meira yfirborðsleysingarvatn hafi runnið til Hamarsketilsins en heildarrennsli hlaupsins. Ef það vatn hefði að einhverju marki safnast fyrir undir ketilstæðinu hefði það greinst sem yfirborðshækkun. Því er ljóst að svo til öll yfirborðsleysing sem kom af vatnasviði ketilsins sumarið 2010 rann fram hjá ketilsvæðinu. Það er erfitt að skýra af hverju botnbráð mynduð beint undir katlinum hefði átt að vera eftir þegar svo virkt gegnumrennsli undir ketilstæðinu var í gangi. Ef vatnsgeymir undir ketilstæðinu var þegar til staðar vorið 2010 hefði sá geymir þurft að vera í rennslisjafnvægi þ. a. vatnsborð hans væri stöðugt þrátt fyrir breytilekt rennsli gegnum hann. Þó höfundar þessarar skýrslu viti ekki til að slíkir vatnsgeymar hafi fundist undir þíðjökklum treystum þeir sér ekki til að útiloka slíkt.

Hins vegar verður að teljast ólíklegt að slíkur vatnsgeymir myndi ná að vera í því jafnvægi sem yfirborðshæð svæðisins gefur til kynna þegar gegnumstreymið um hann að sumarlagi er nálægt fjórföldu meðal sumarrennsli. Þær athuganir sem hér eru settar fram benda því til að mest af vatninu sem kom niður í hlaupinu hafi verið staðbundin botnbráð myndað 0-6 dögum fyrir hlaup.

Eftir hlaupið höfum við engar óyggjandi vísbendingar um vatnssöfnun eða vatnslosun undan Hamarskatlinum. Þær yfirborðsbreytingar sem greinast eru líklega að mestu eða öllu leyti til komnar vegna víxlverkunar íssflæðis, yfirborðsafkomu og lækkunar vegna botnbráðar sem í það minnsta var til staðar fyrst eftir hlaupið. Líklega hefur botnbráð varað lengur miðað við hvað ketilinn er enn djúpur röskum fjórum árum eftir hlaupið og að suðvesturhlíð ketilsins hefur lækkað nokkuð síðustu ár. Hvort verulegt varmastreymi hafi verið undir katlinum árin eftir hlaupið verður hins vegar ekki endanlega svarað nema með ítarlegri líkanagerð af samspili ísflæðis, yfirborðsafkomu og bráðunar við botn. Í íssjármælingunum sjást vísbendingar um minniháttar vatnsgeyma og hugsanlega tilfærslu vatns undir Hamarskatlinum á árunum 2013-2015. Túlkun þessara gagna er engan vegin einhlít, en ef um vatnssöfnun var að ræða var hún tímabundin og í það litlum mæli að ekki stóð nein hætta af henni og vatnsgeymirinn hafði annað hvort minnkað eða horfið vorið 2015.

Ef frá er talið hlaupið 2011, þar sem ljóst er að verulegt vatnsmagn skilaði sér undan Hamarskatlinum, má segja að í raun séu sterkari vísbendingar um vatnsgeymi, röska 2 km austur af Hamarskatlinum, bæði í yfirborðshæðarbreytingum (10., 11. og 14. mynd) og íssjármælingunum (11. mynd). Þetta svæði sem er á vatnasviði Sveðju þarf að kanna betur á næstu árum.

Lækkun jökulyfirborðs í hlaupinu yfir farvegi þess er erfitt að skýra öðruvísi en að hlaupvatnið sem fór frá katlinum hafi verið að minnsta kosti 15°C heitt. Nærtækasta skýringin á svo miklum hita á hlaupvatninu er að gosið hafi undir katlinum þó hér verði aðrar skýringar ekki útilokaðar. Sú skýring er í samræmi við túlkun þeirra (m.a. Páls Einarssonar) sem hafa haldið því fram að lágtíðnióróinn í aðdragaganda og samfara hlaupinu hafi tengst kvikuhreyfingum. Verksummerki hlaupsins utan jökuls voru þó allt önnur en til að mynda eftir hlaupin frá Eyjafjallajökli, 2010, sem báru með sér gríðarlegt magn gosefna (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2012). Af myndum að dæma hefur set og aurburður Hamarshlaupsins verið óverulegur í þeim samanburði sem bendir til að ef um gos var að ræða tvístraðist ekki kvikan sem kom upp við jökulbotn, nema mögulega að óverulegum hluta. Óverulegur aurburður styður einnig að botnrof geti ekki útskýrt lækkunina sem var yfir farveginum.

7. Heimildir

Iwona Galeczka, Eric H. Oelkers og Sigurdur R. Gislason. The chemistry and element fluxes of the July 2011 Múlakvísl and Kaldakvísl glacial floods, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 273, 41–57, 2014.

Eyjólfur Magnússon, Magnús T. Guðmundsson, Matthew J. Roberts, Gunnar Sigurðsson, Friðrik Höskuldsson og Björn Oddsson. Ice-volcano interactions during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, as revealed by airborne imaging radar. *Journal of Geophysical Research* 117, B07405, 2012.

Eyjólfur Magnússon. Airborne SAR data from S-Iceland: analyses, DEM improvements and glaciological applications. Meistararitgerð í jarðeðlisfræði frá Raunvísindadeild Háskóla Íslands, 130 bls., 2003.

Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Magnús Tumi Guðmundsson og Alexander H. Jarosch. Greinargerð vegna íssjarmælinga á upptakasvæði jökulhlaups úr í Sveðju í júlí 2011. Jarðvísindastofnun Háskólans, 2 bls., 2014.

Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Þorsteinn Jónsson, Sveinbjörn Steinþórsson, Hlynur Skagfjörð Pálsson. Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2014_15. Institute of Earth Sciences, University of Iceland and National Power Company, RH-06-2015, 2015.

Guðrún Larsen, Magnús Tumi Guðmundsson, Olgeir Sigmarsson. *Katla*. Í: Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): Náttúruvá á Íslandi, Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 211-233, 2013.

Helgi Björnsson. Hydrology of ice caps in volcanic regions. *Vísindafélag Íslendinga*, rit 45, 139 bls., 21 kort, 1988.

Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson og Gwenn E. Flowers. Surges of glaciers in Iceland. *Annals of Glaciology*, 36, 82-90, 2003.

Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. Vatnajökull, norðvesturhluti, Jökulbotn, 1:100 000. Raunvísindastofnun Háskólans og Landsvirkjun, Gagnasafnskort, 1992.

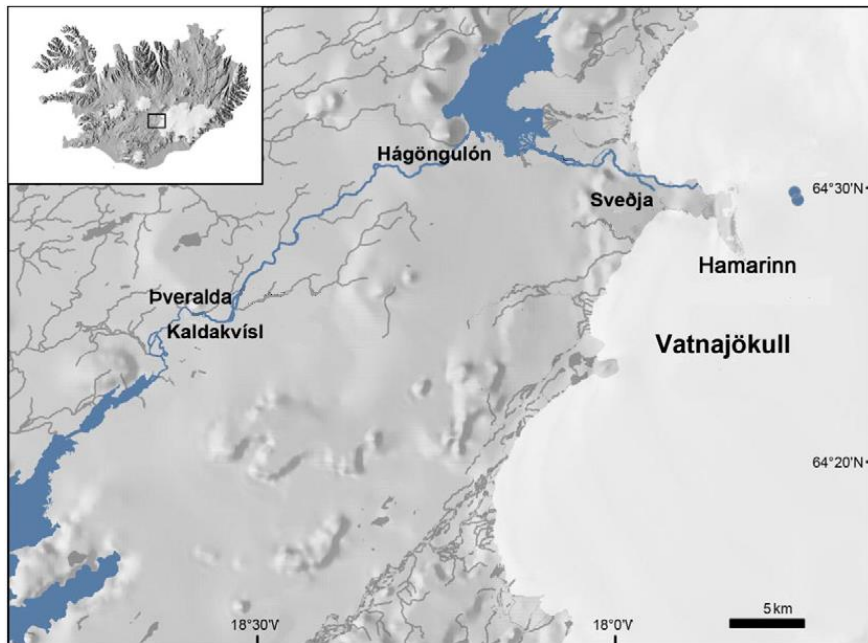
Kristín Vogfjörð, Óðinn Þórarinnsson og Steinunn Jakobsdóttir. Órói við Lokahrygg í Vatnajökli. Vefsíða VÍ: <http://www.vedur.is/um-vi/frettir/nr/2237>, 2011.

Magnús Tumi Guðmundsson. Sigkatlar við Hamarinn og atburðirnir í júlí 2011: Minnisblað um stöðu þekkingar og hugsanlegar endurbætur á vöktun. Jarðvísindastofnun Háskólans, 5 bls., 2012.

Magnús T. Guðmundsson, Þorvaldur Þórðarson, Guðrún Larsen, Páll Einarsson, Ármann Höskuldsson og Páll Imsland. Undir Vatnajökli. Í: Júlíus Sólmes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): Náttúruvá á Íslandi, Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 263-277, 2013.

Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Thorsteinn Thorsteinsson og Etienne Berthier. Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface Icelandic glaciers, *Annals of Glaciology*, 54(63), 63–74, doi:10.3189/2013AoG63A422, 2013.

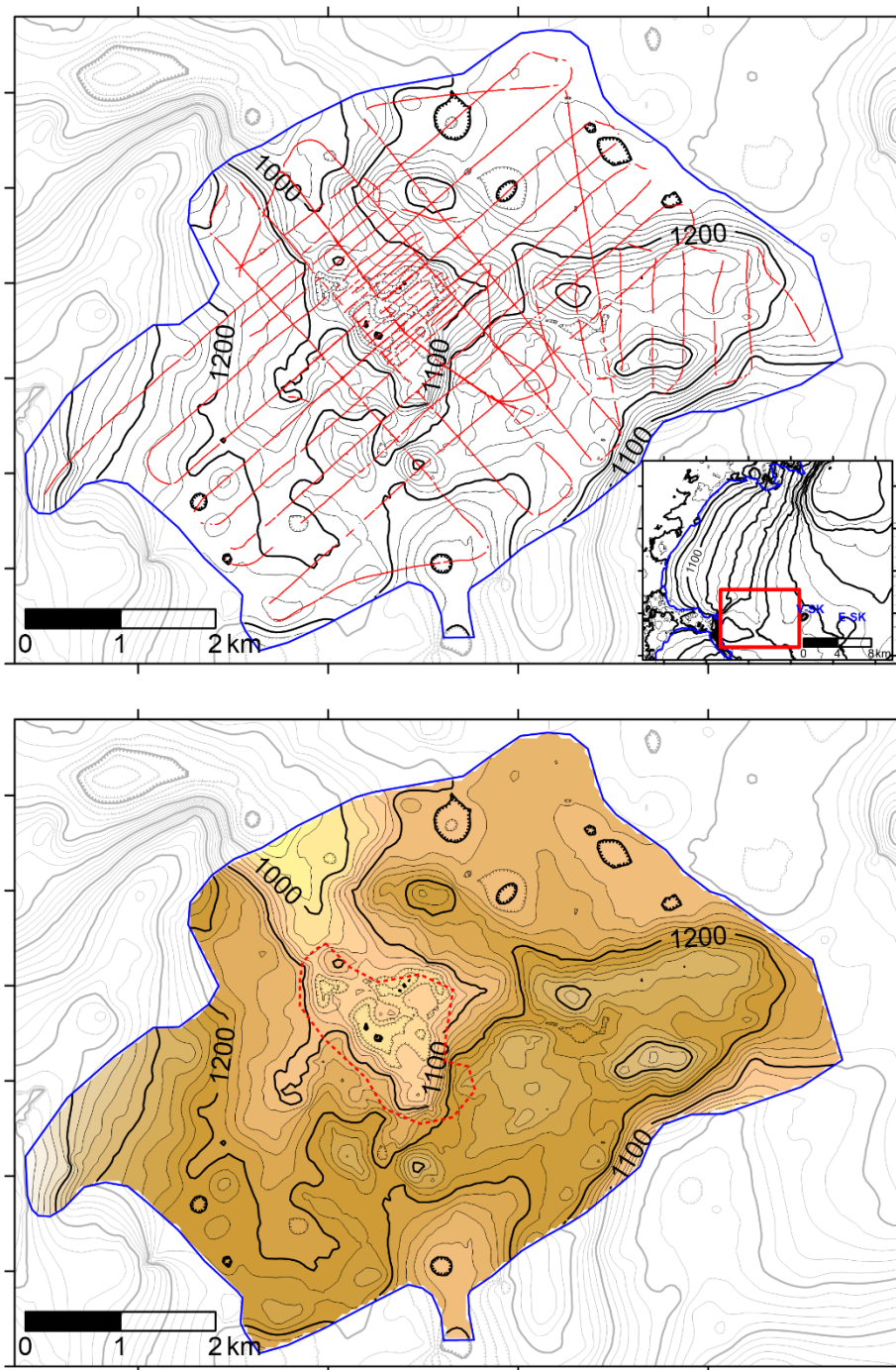
8. Myndir



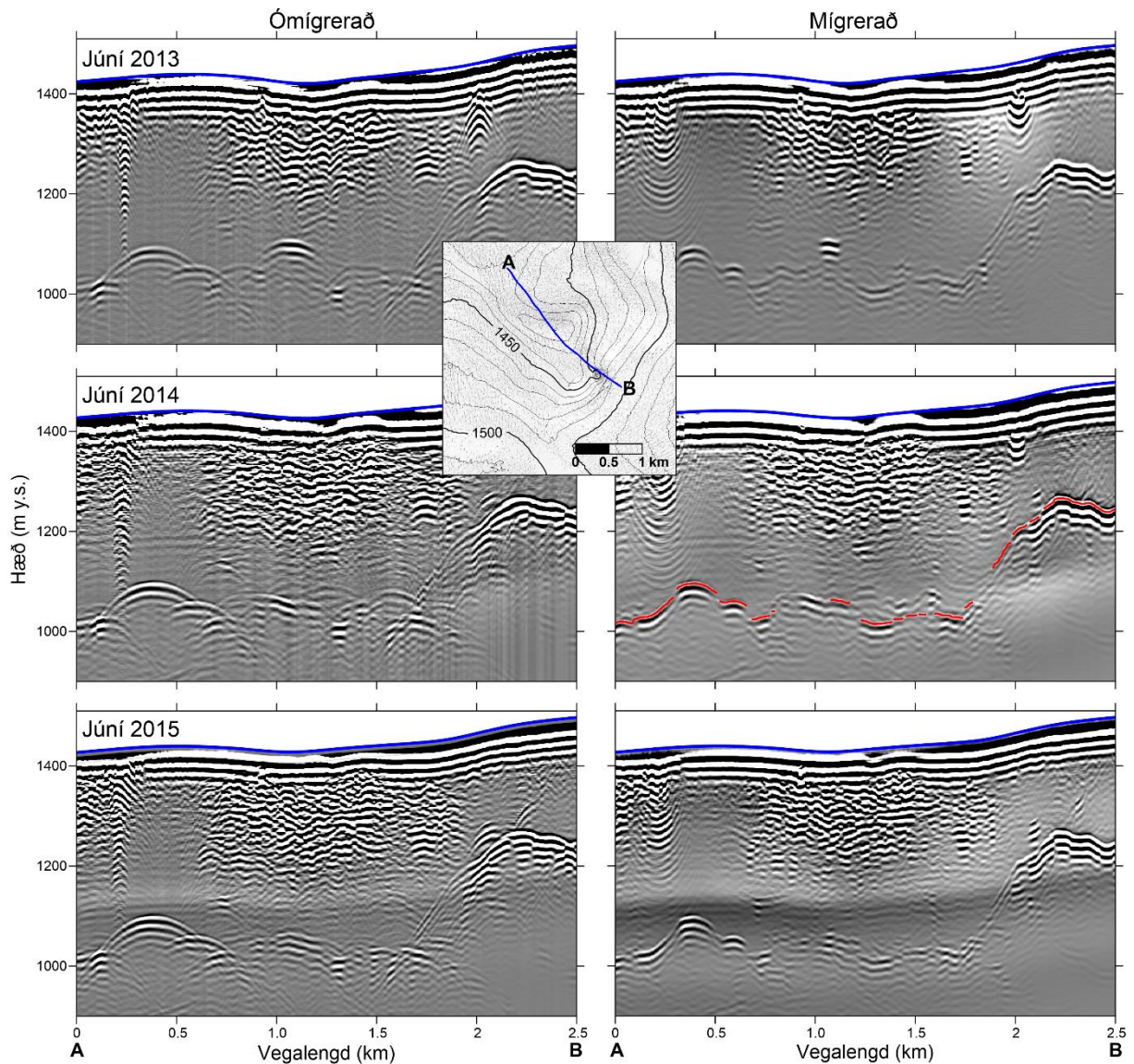
1. mynd. Megináhrifasvæði Hamarshlaupsins 12.-13. júlí 2011 sem rann eftir farvegi Sveðju í Hágöngulón og þaðan í Köldukvísl (breytt mynd úr grein Iwona Galeczka o.fl., 2014). Staðsetning tveggja samliggjandi sigkatla á upptakasvæði hlaupsins austur af Hamrinum eru sýnd með bláum hringlaga punktum.



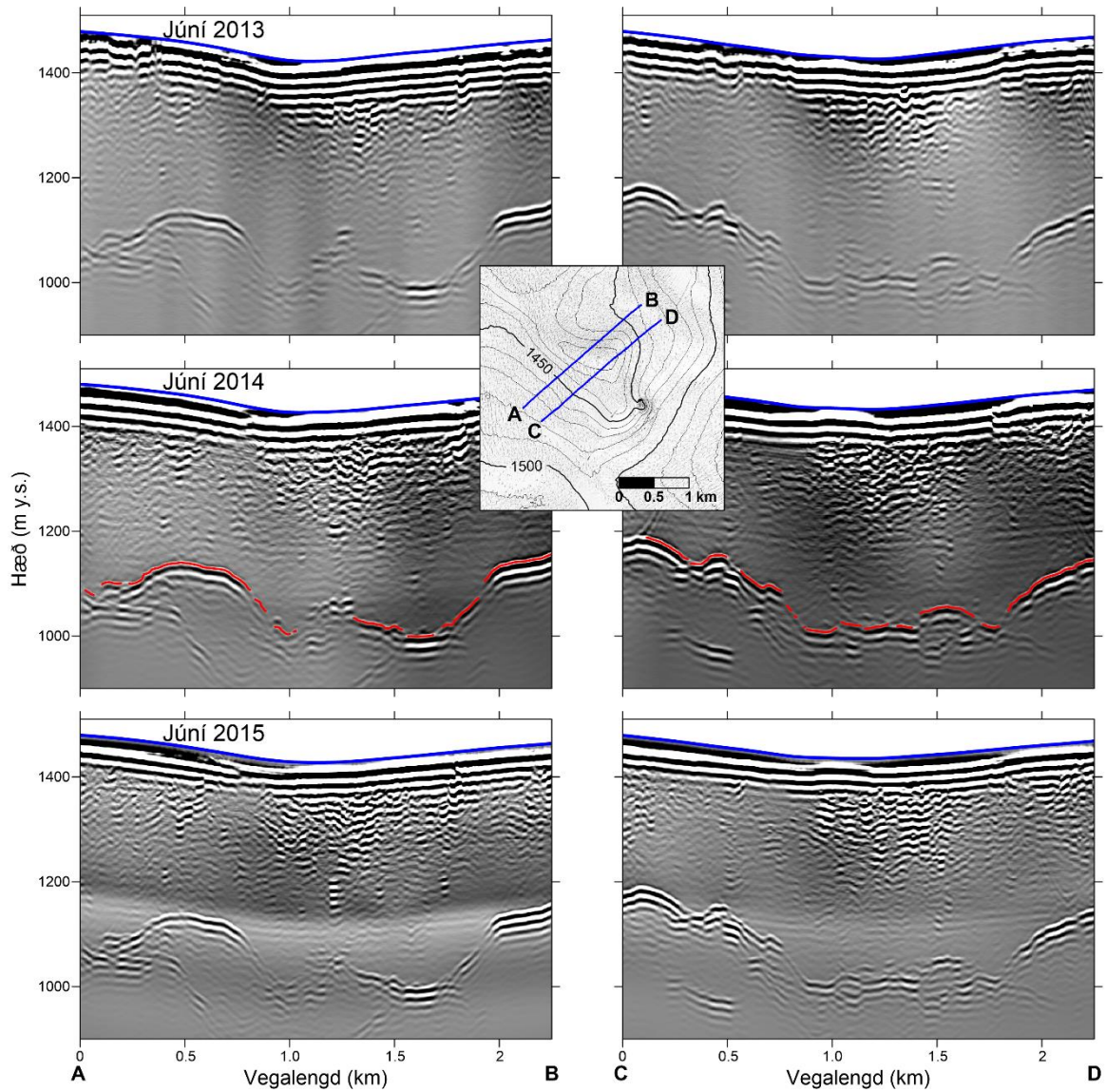
2. mynd. Upptakasvæði Hamarshlaupsins í könnunarflugi í 13. júlí, 2011 (ljósmynd Björns Oddssonar). Sprungur kringum sigkatlana tvo sem mynduðust hlaupinu sjást á miðri myndinni en fjær má greina Hágöngulón og hluta Sveðju.



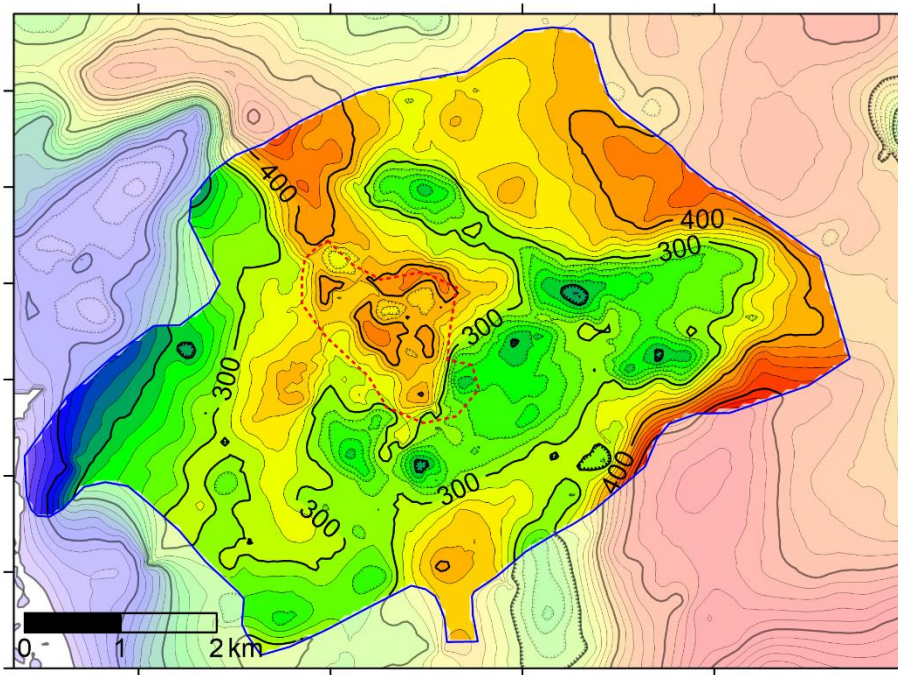
3. mynd. Botnhæðarkort (20 m milli hæðarlína) af undirlagi Hamarsketilsins og nágrenni. Rauður kassi á innskotsmynd sýnir svæðið sem botnkortsmyndir sýna. V-SK og E-SK sýna staðsetningu Vestari og Eystri Skaftárketils. Á efri myndinni er sýnt með rauðum línunum lega íssjármælinga sem nýttar voru við gerð botnhæðarlíkans. Bláa línan afmarkar þann hluta botnkortsins sem var endurunninn í þessari rannsókn. Svæðið utan hennar sýnt með daufum hæðarlínum er úr eldra botnhæðarlíkani af svæðinu (Helgi Björnsson o.fl., 1992). Á neðri mynd sýnir rauð brotalína megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu 2011.



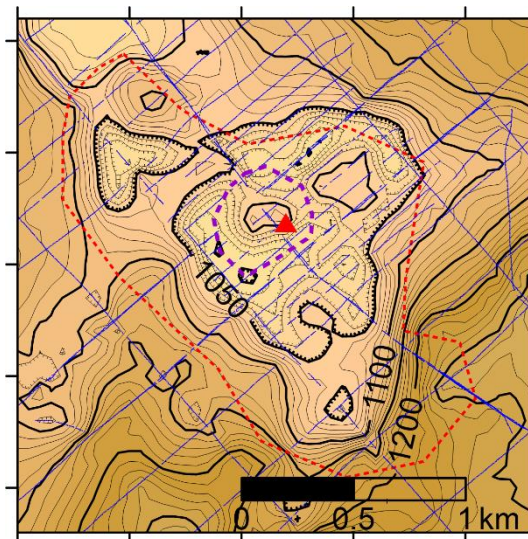
4. mynd. Dæmi um endurtekið íssjármælisnið mæld vorið 2013, 2014 og 2015. Lega sniðanna yfir ketilinn mælt frá A til B er sýnt á innskotsmynd. Mælisniðin eru sýnd bæði fyrir (vinstri) og eftir tvívíða mígreringu (hægri) en í báðum tilfellum gefa myndásar vegalengd eftir sniðinu og hæð endurkastsflata yfir sjó. Bláar línur sýna mælda yfirborðshæð. Á miðri mynd efst til vinstri má sjá bjart bólulaga form sem túlkað var sem vatnsuppsöfnun skv. Eyjólf Magnússyni o.fl. (2014). Við mígreringu þjappast þessi bóla saman í kassalaga form. Ef um vatnsgeymi var að ræða var hann talsvert minni en 5 milljón m³ sem var uppgefin lágmarks tala fyrir rúmtak hans skv. Eyjólf Magnússyni o.fl. (2014). Þetta form er horfið í seinni mælingum. Nokkrar breytingar á staðsetningu endurkasta eru þó sjáanlegar nærri botni undir katlinum á meðan breytingar annars staðar við jökulbotn eru óverulegar. Rauðar línur á miðju mynd hægra megin sýnir svæði sem túlkuð eru sem fastur botn.



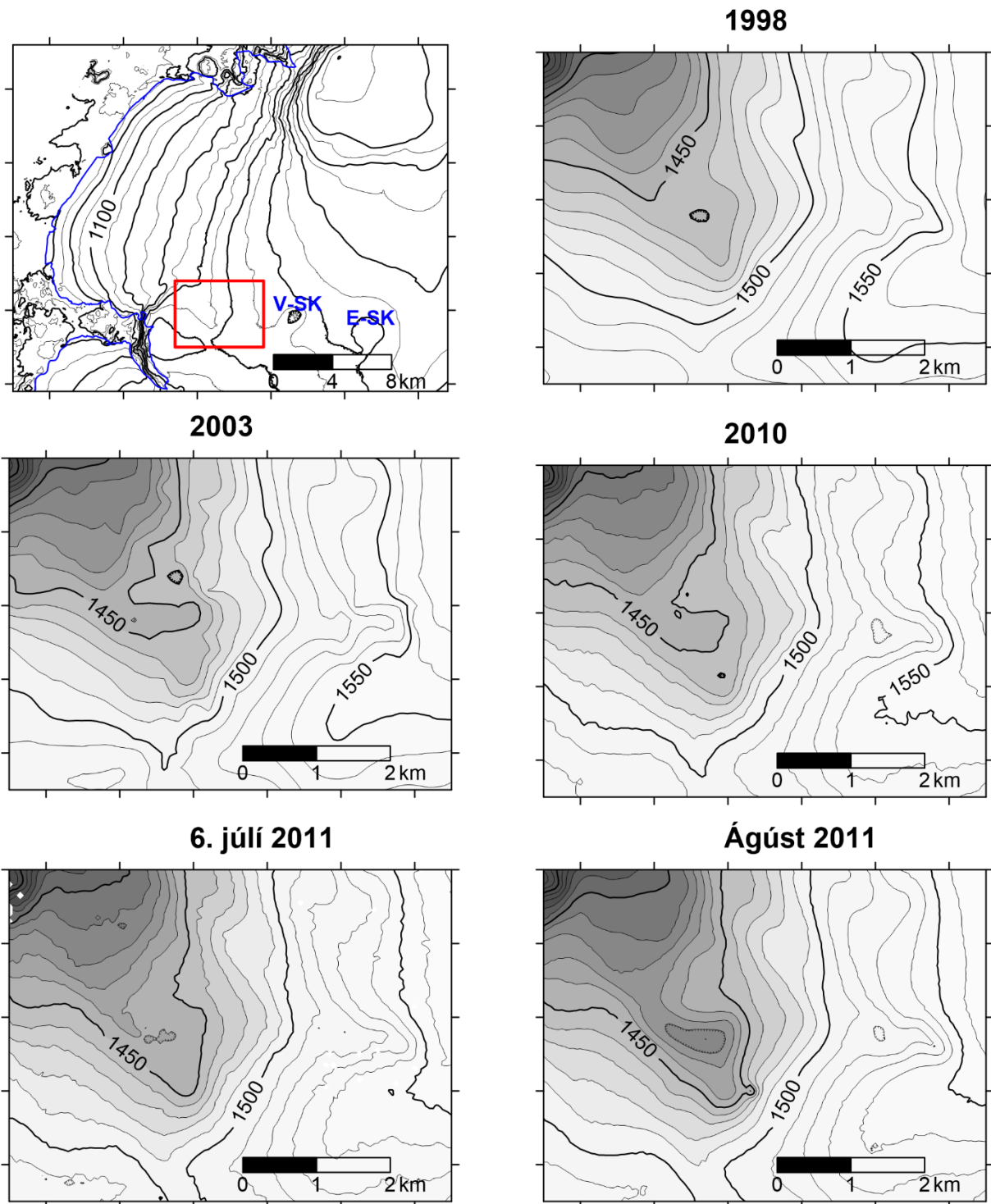
5. mynd. Endurtekin mígreruð íssjarmælnisnið mæld vorið 2013, 2014 og 2015. Lega sniða yfir ketilinn mæld frá A til B og C til D eru sýnd á innskotsmynd. Bláar línur sýna mælda yfirborðshæð. Rauðar línur á miðju myndunum sýna legu endurkasta sem talin eru frá föstum botni.



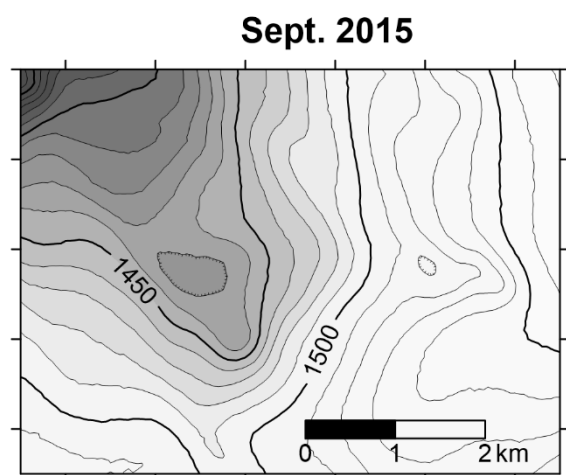
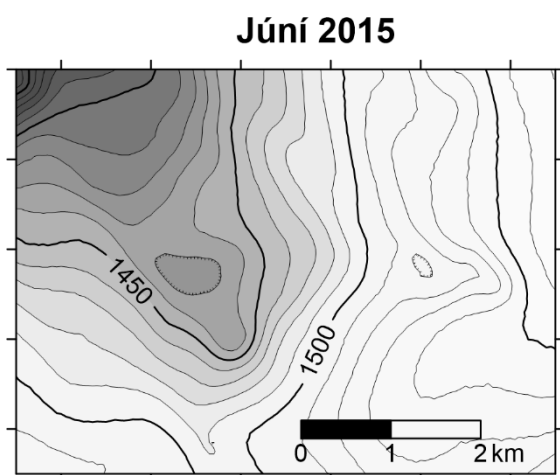
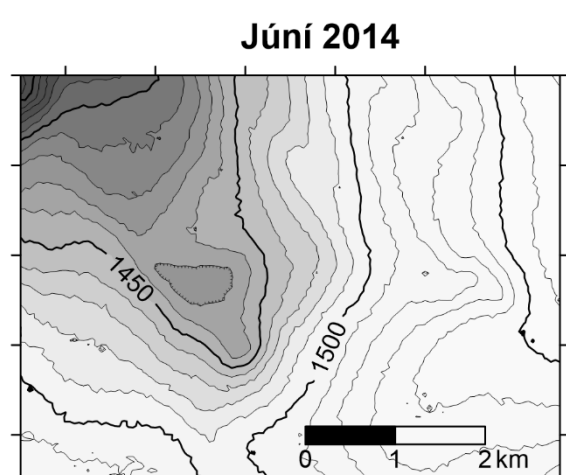
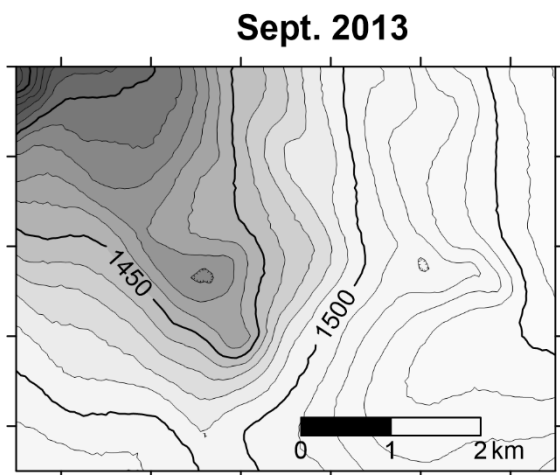
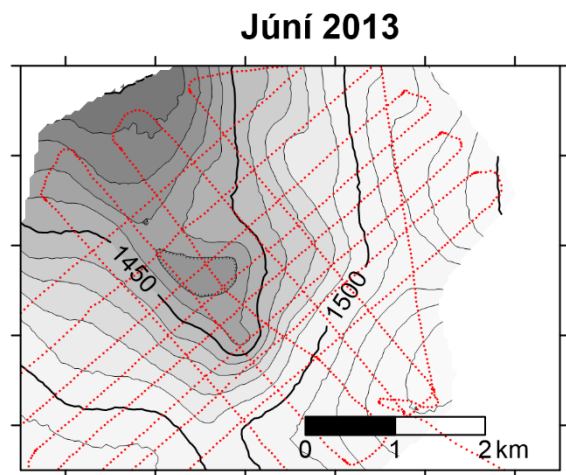
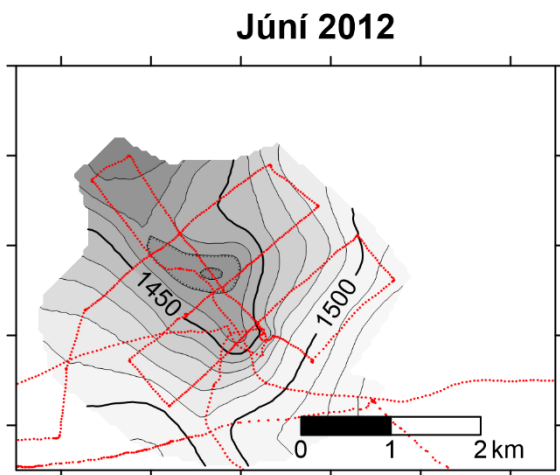
6. mynd. Ísþykktarkort (20 m milli jafnþykktarlína) af jöklinum undir Hamarskatlinum og nágrenni m.v. yfirborð úr Lidar hæðarlíkaninu frá ágúst 2011, eftir hlaup. Svæðið utan bláu línunnar, sýnt með deyfðum lit og jafnþykktarlínum, er byggt á eldra botnhæðarlíkani af svæðinu (Helgi Björnsson o.fl., 1992). Rauð brotalína sýnir megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu 2011.



7. mynd. Botnhæðarkort (10 m milli hæðarlína) af undirlagi Hamarsketilsins. Bláar línur sýna legu íssjármælinga sem nýttar voru við gerð botnhæðarlíkansins. Rauð brotalína sýnir megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu 2011. Fjólublá brotalína afmarkar þúst í botnlandslagi og rauður þríhyrningur staðsetningu lægsta punkt sigketilsins fyrst eftir hlaupið.

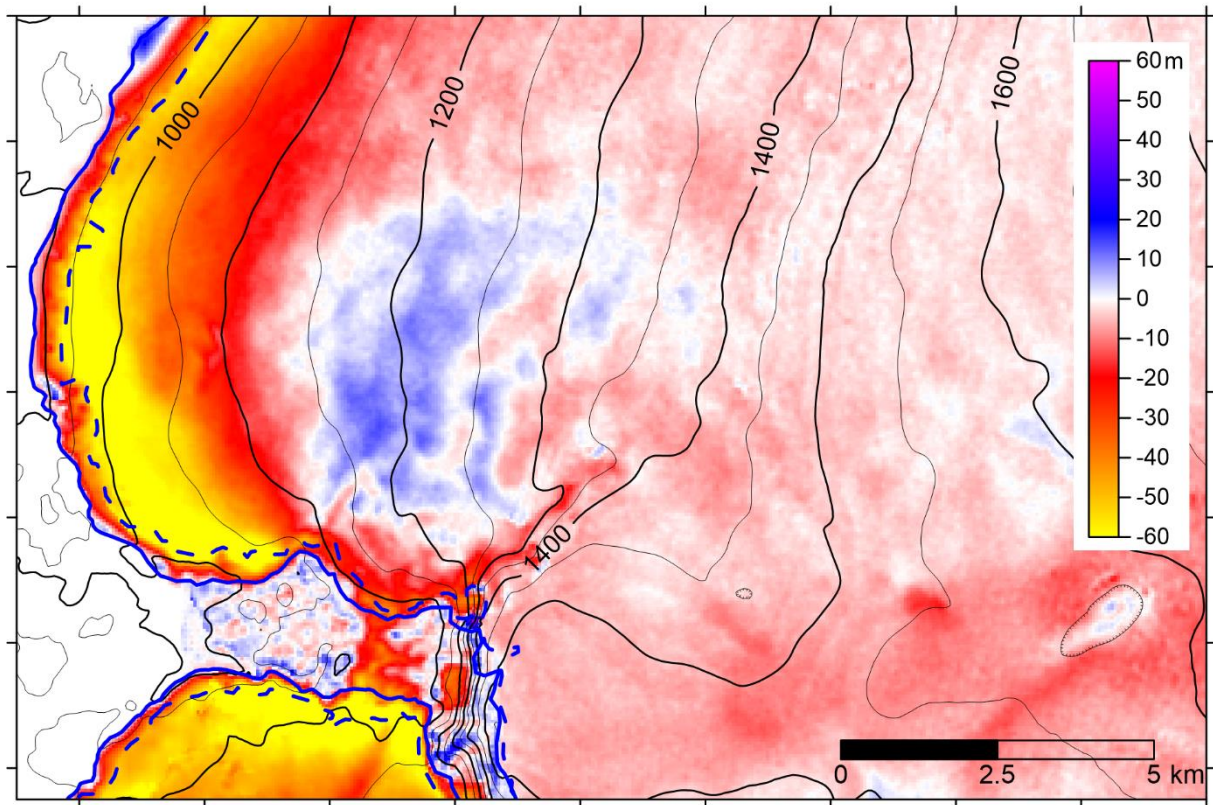


8. mynd. Hæðarkort (10 m milli hæðarlína) af lægðinni þar sem Hamarsketillinn myndaðist og nágrenni hennar, frá 1998 (EMISAR, Eyjólfur Magnússon, 2003), 2003 (SPOT5), 2010 (SPOT5), 6. júlí 2011 (TanDEM-X) og ágúst 2011 (Lidar, Tómas Jóhannesson o.fl., 2012). Efsta myndin til vinstri sýnir hæðarkort (50 milli hæðarlína) Köldukvíslarjökuls byggt á Lidargögnum frá 2011 og 2012 (Tómas Jóhannesson o.fl., 2012). Blá lína sýnir jökuljaðar frá 2012, byggðan á Lidar hæðarlíkani. Rauður kassi á efstu myndinni til vinstri afmarkar svæðið sem hinar myndirnar (hér og á 9. mynd) ná yfir en V-SK og E-SK sýna staðsetningu Vestari og Eystri Skaftársketils.

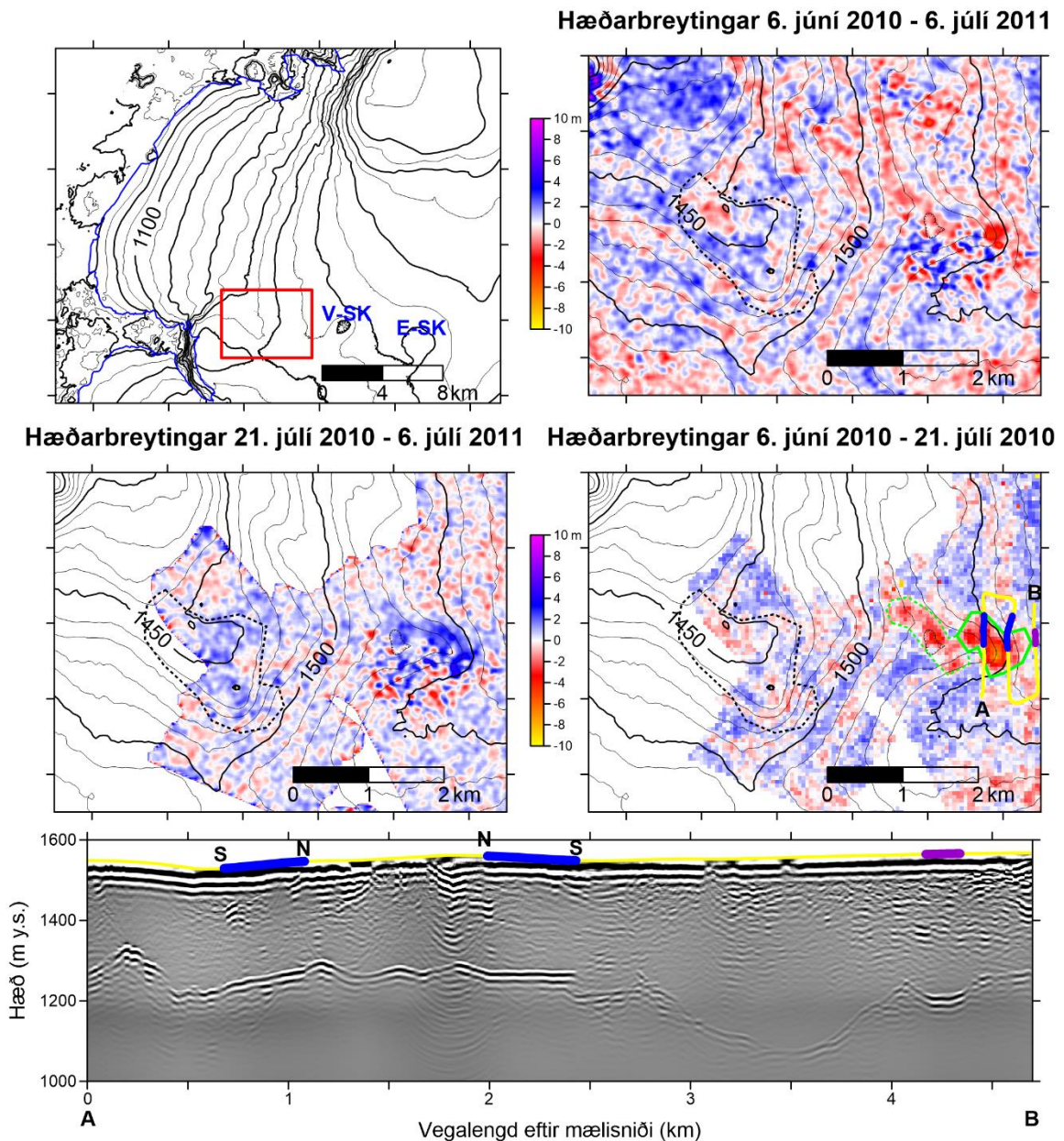


9. mynd. Hæðarkort (10 m milli hæðarlína) af lægðinni þar sem Hamarsketillinn myndaðist og nágrenni hennar, frá júní 2012 og júní 2013 byggt á GPS sniðum (lega hæðarsniða sýnd með rauðum punktum) og september 2013, júní 2014, júní 2015 og september 2015 byggt á TanDEM-X gögnum.

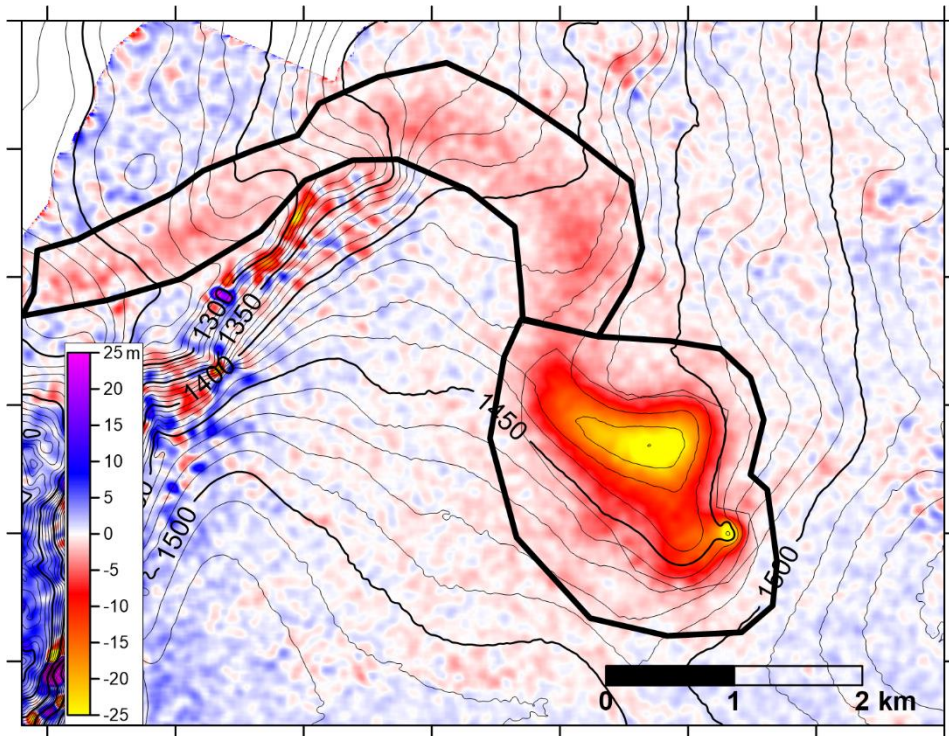
Hæðarbreytingar 1998-2010



10. mynd. Hæðarbreytingar á suðurhluta Köldukvíslarjökuls frá 1998 (EMISAR) til 2010 (SPOT5). Hæðarlínur með 50 m millibili eru frá 1998 (EMISAR). Samfelld blá lína sýnir legu jökuljaðars árið 1998 en blá brotalína jaðarinn árið 2010.

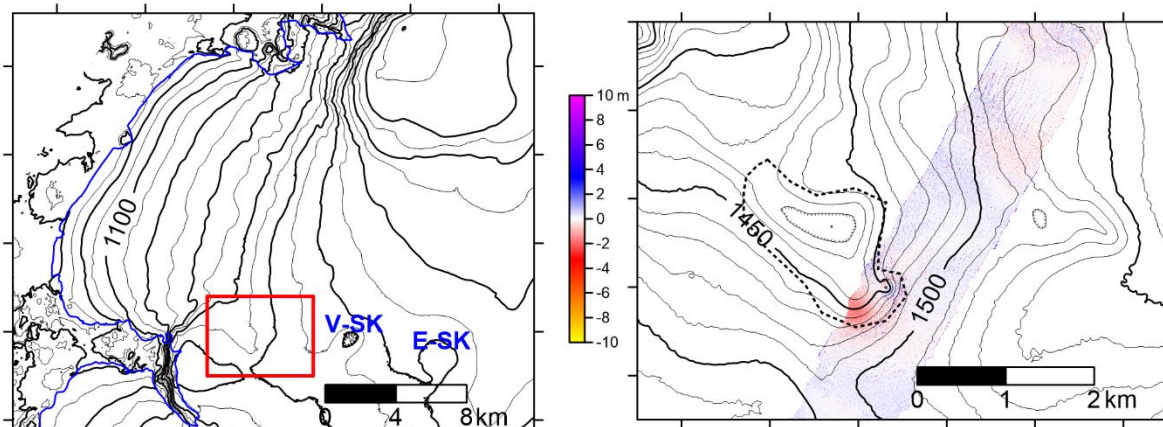


11. mynd. Litmyndir (efst til hægri og miðju myndir) sem sýna hæðarbreytingar í aðdraganda hlaupsins í lægðinni þar sem Hamarsketillinn myndaðist og í nágrenni hennar (rauður kassi á efstu mynd til vinstri afmarkar svæðið). Til að draga fram hæðarbreytingar í ketilstæðinu hefur meðalhæðarmismunur á svæðum utan þess verið dregin frá mismunakortunum. Myndirnar eru byggðar á SPOT5 (6. júní, 2010), Lidar (21. júlí, 2010) og TanDEM-X gögnum (6. júlí, 2011). Hæðarlínur (10 m milli lína) yfir litmyndunum sýna í öllum tilfellum hæð jökuls skv. SPOT5 hæðarlíkaninu frá 2010. Svört brotalína afmarkar megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu. Á miðjumynd hægra megin afmarkar samfelld græn lína svæði þar sem umtalsverð yfirborðslækkun greinist sumarið 2010. Græna brotalínan afmarkar svæði sem gæti hafa sigið líka en nokkru minna (mögulega hæðarvilla). Gul lína á sömu mynd sýnir legu íssjárnsniðs frá A til B, sýnt mígreað á neðstu mynd. Fjólublá lína og bláar línur á báðum myndum sýna legu og afmarka tilsvareandi hluta íssjárnsniðs. Norður og suðurendar bláu línanna eru auðkenndir með N og S á íssjárnsniðmynd.

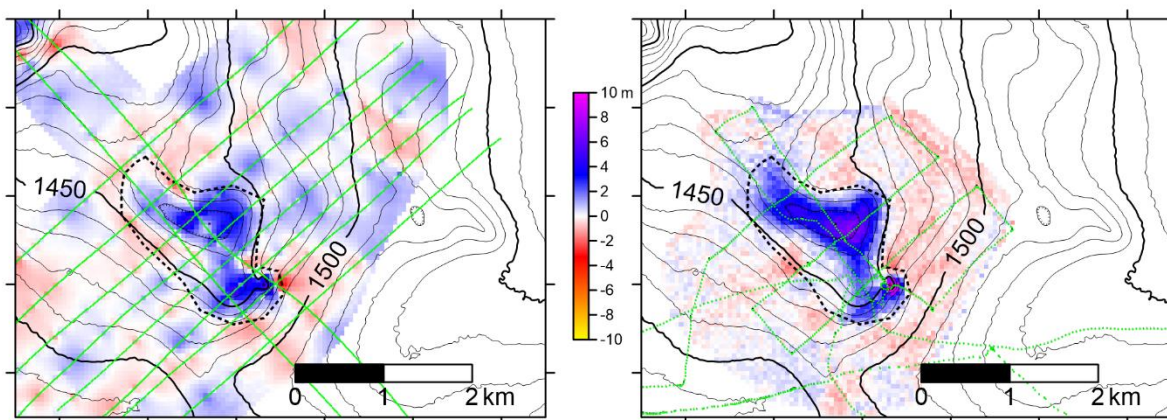


12. mynd. Hæðarbreytingar á upptakasvæði jökulhlaupsins 2011 og nágrenni þess frá 6. júlí 2011 (Tandem-X) til 11./27. ágúst (samsett Lidar hæðarlíkan þar sem austasti partur ketilsins og svæðið austan hans er frá 11. ágúst, annars frá 27. ágúst) sama ár. Til að draga fram hæðarbreytingar í tengslum við hlaupið hefur meðalhæðarmismunur á svæðum þar sem áhrifa hlaupsins gætir ekki verið dregin frá mismunakortinu. Svörtu þykku línurnar aðgreina þau svæði sem skilgreind eru sem ketilsigsvæði og hlaupfarvegur sem rúmmálstölur í meginþexta eru gefnar upp fyrir. Hæðarlínur sýna yfirborðshæð svæðisins í ágúst 2011 skv. Lidar hæðarlíkani.

Hæðarbreytingar 11.-27. ágúst 2011

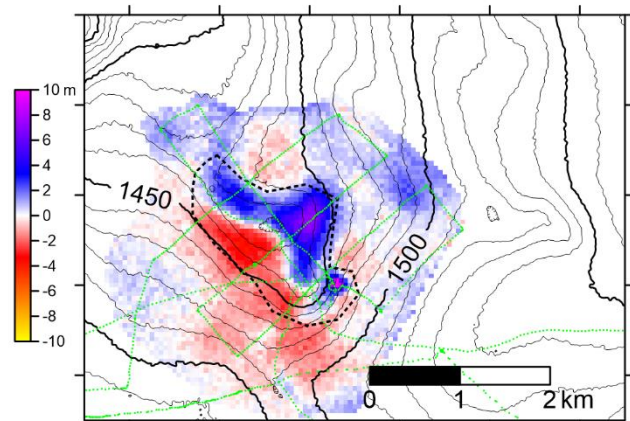
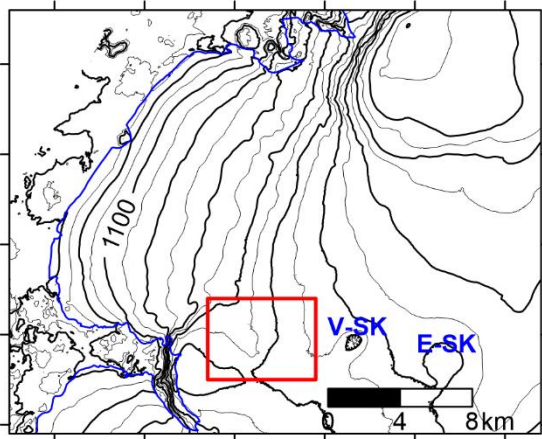


Hæðarbreytingar 27. ágúst - 30. nóv. 2011 Hæðarbreytingar 27. ágú. 2011 - 5. júní 2012



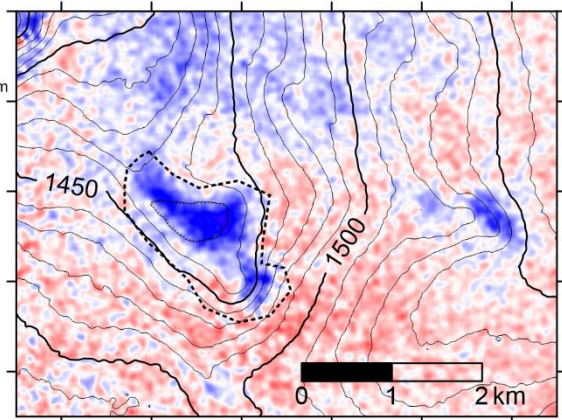
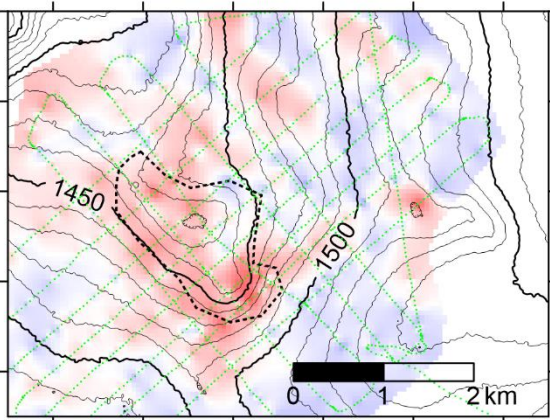
13. mynd. Hæðarbreytingar í Hamarskatlinum og nágrenni hans (rauður kassi á efstu mynd til vinstri afmarkar svæðið) fyrst eftir hlaupið. Til að draga fram hæðarbreytingar í katlinum hefur meðalhæðarmismunur á svæðum utan hans verið dregin frá mismunakortunum. Myndirnar eru byggðar á Lidar hæðarlíkönunum (11. og 27. ágúst, 2011), ratsjánhæðarsniðum frá TF-FMS, flugvél Ísavia (30. nóvember, 2011) og GPS sniðmælingum (5. júní, 2012). Grænar línur á neðri myndunum sýna legu ratsjár og GPS-sniða. Hæðarlínur (10 m millibili) ofnan á litmyndunum sýna í öllum tilfellum hæð jökulsins skv. samsettu Lidar hæðarlíkani frá ágúst 2011. Svört brotalína afmarkar megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu.

Hæðarbreytingar 5. júní 2012-27. sept. 2013



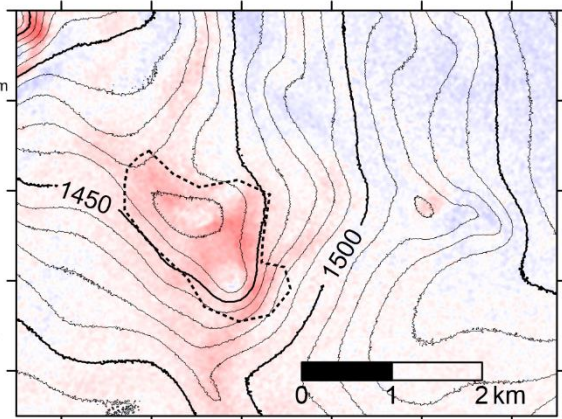
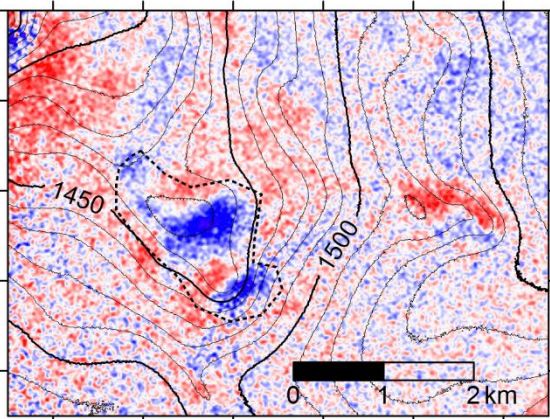
Hæðarbreytingar 2. júní - 27. sept. 2013

Hæðarbreytingar 27. sept. 2013 - 7. júní 2014



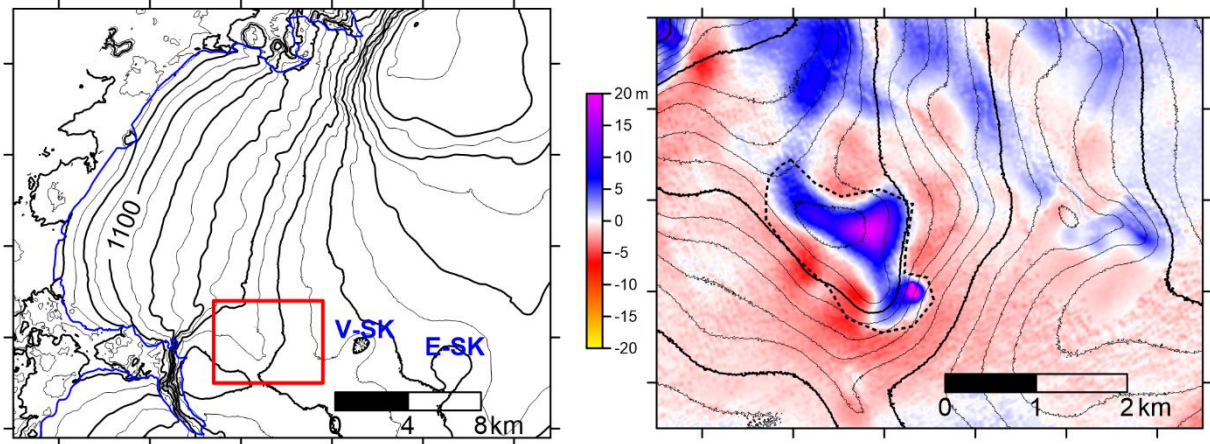
Hæðarbreytingar 7. júní 2014- 27. júní 2015

Hæðarbreytingar 27. júní - 23. sept. 2015

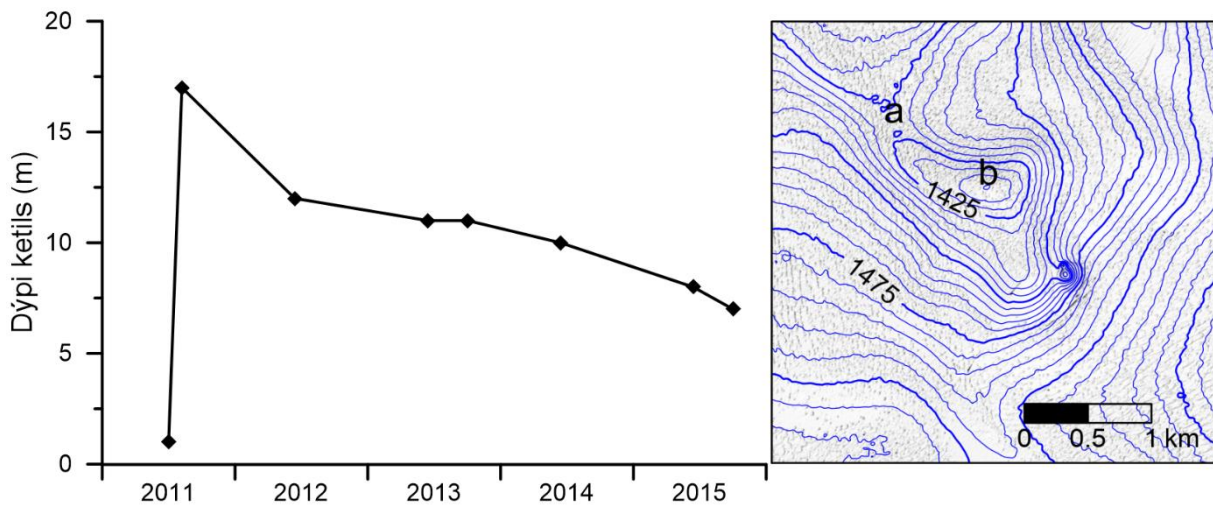


14. mynd. Hæðarbreytingar í Hamarskatlinum og nágrenni hans (rauður kassi á efstu mynd til vinstri afmarkar svæðið) frá 2012 til 2015. Til að draga fram hæðarbreytingar í katlinum hefur meðalhæðarmismunur á svæðum utan hans verið dregin frá mismunakortunum. Myndirnar eru byggðar á GPS-sniðmælingum (í júní 2012 og 2013 sýnd með grænum línunum) og TanDEM-X hæðarlíkönunum (september 2013 og 2015 og júní 2014 og 2015). Hæðarlínur (10 m milli lína) ofnan á litmyndunum sýna í öllum tilfellum hæð jökulsins skv. Því TanDEM-X hæðarlíkani sem svarar til seinni dagsetningar hværrar mismunamyndar. Svört brotalína afmarkar megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu.

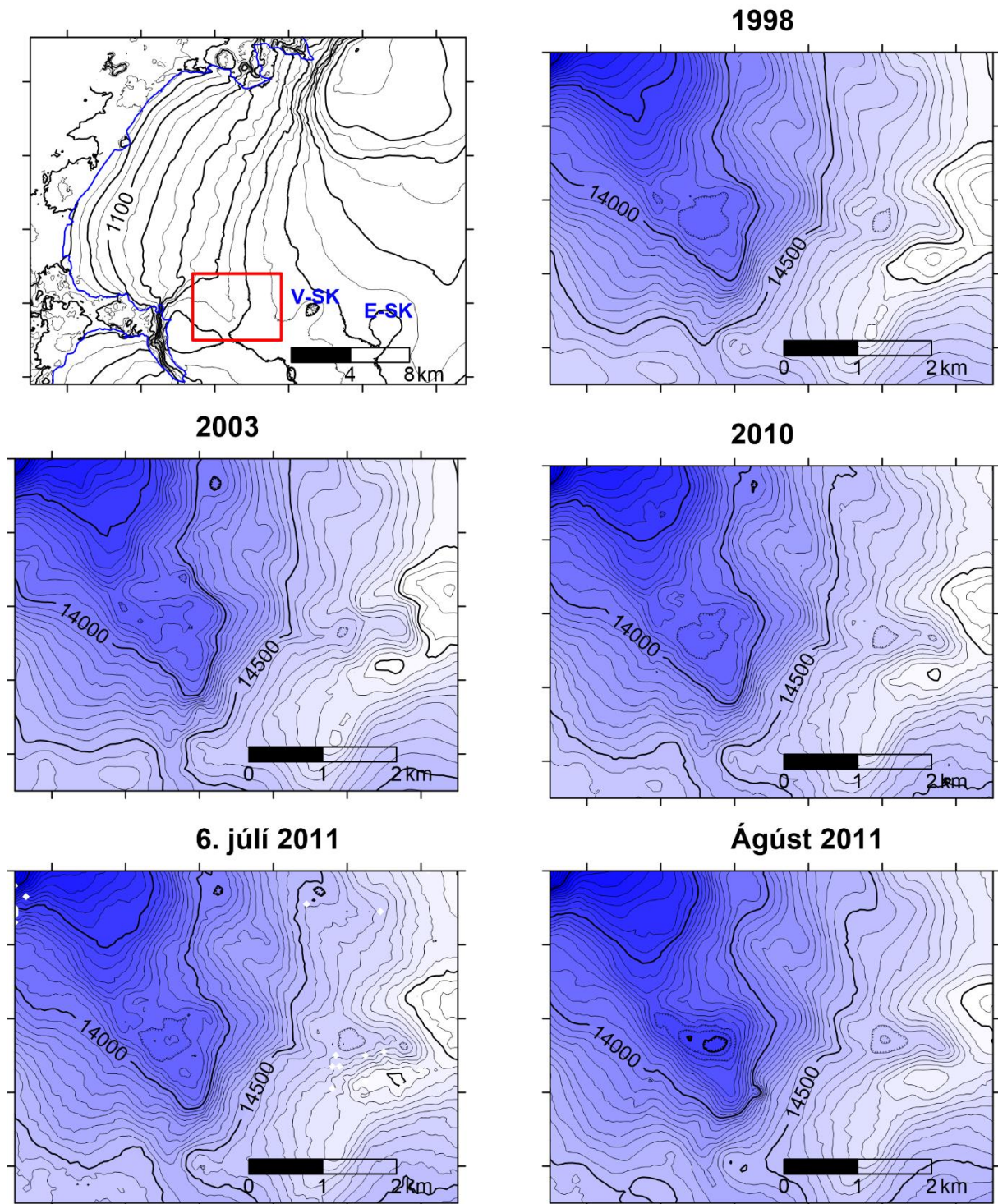
Hæðarbreytingar ágúst 2011- sept. 2015



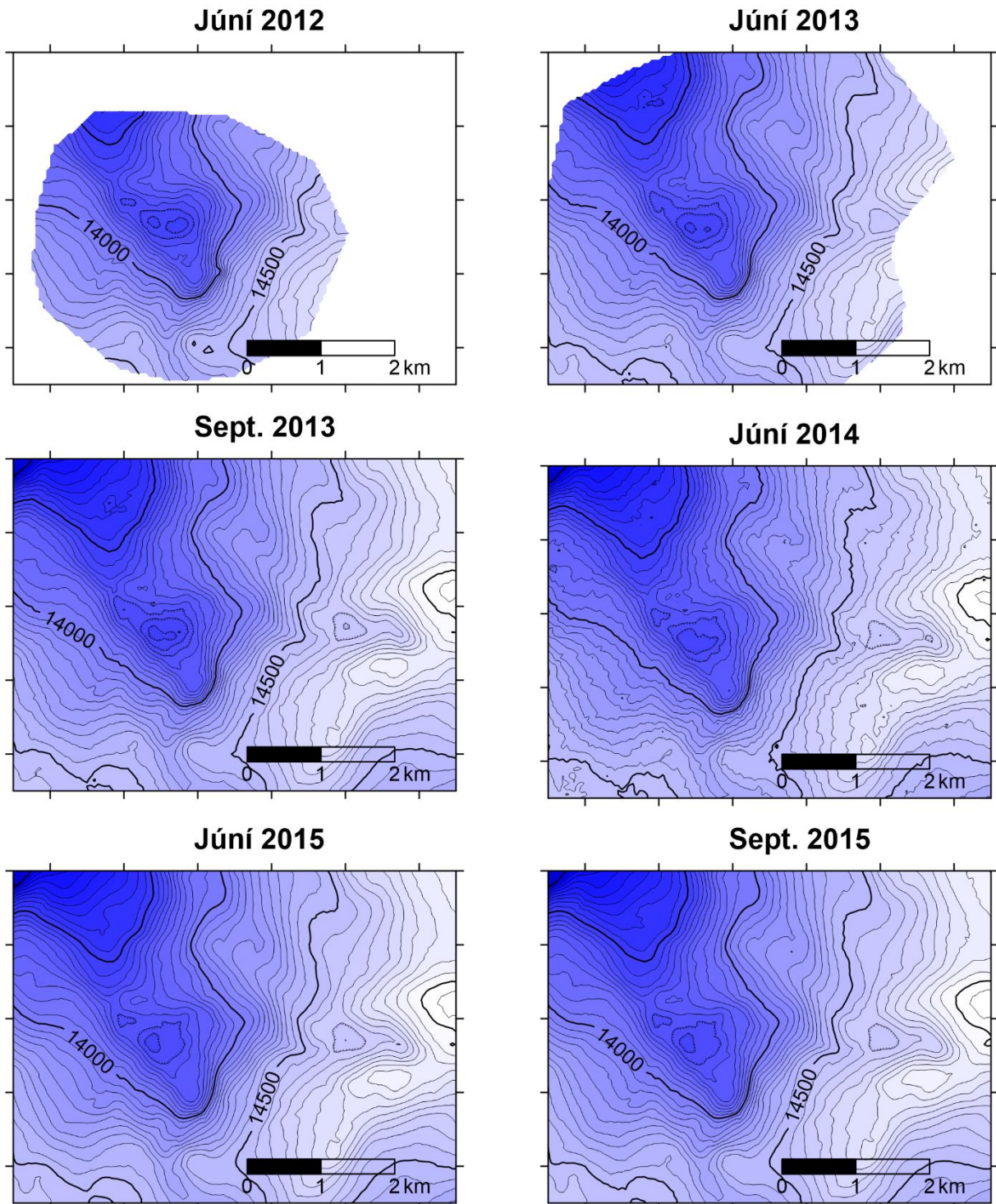
15. mynd. Hægri: Heildarhæðarbreytingar í Hamarskatlinum og nágrenni hans (rauður kassi á vinstri vinstri mynd afmarkar svæðið) frá 2011 til 2015 byggð samsettu Lidar hæðarlíkani (ágúst 2011) og TanDEM-X hæðarlíkani (september 2015). Hæðarlínur (10 m milli lína) ofnan á litmynd sýnir hæð jökulsins skv. TanDEM-X hæðarlíkaninu. Svört brotalína afmarkar megin sigsvæði ketilsins í hlaupinu.



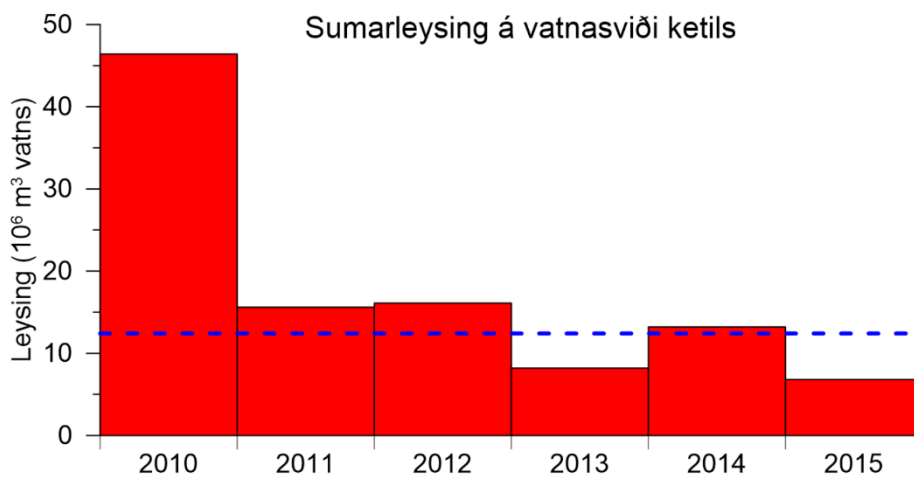
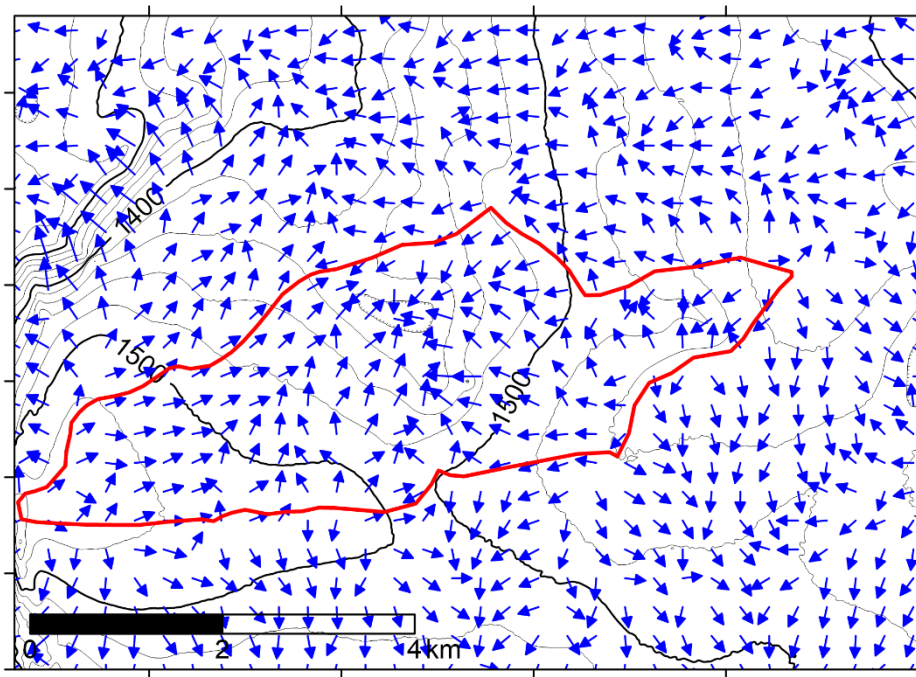
16. mynd. Dýpt Hamarsketilsins frá 2011 til 2015. Dýpi hans er skilgreint sem mismunur í hæð söðulsins út úr ketillægðinni merkt með **a** á hægri mynd og botni ketilsins merkt með **b** (hæðarlínur fengnar úr samsettu Lidar hæðarlíkani frá ágúst 2011). Þess ber að geta að staðsetning bæði söðulpunkts í útfalli og lægstu hæð í botni ketilsins hefur hliðrast lítilsháttar á tímabilinu.



17. mynd. Kort sem sýna æstætt vatnsmætti við botn (50 KPa milli jafnmættislína) fyrir og rétt eftir jökulhlaupið í lögðinni þar sem Hamarsketillinn myndaðist og í nágrenni hennar (rauður kassi á efstu mynd til vinstri afmarkar svæðið). Mætti eru reiknuð út frá á botnhæðarlíkani (3. mynd) og yfirborðshæðarlíkönunum frá 1998 (EMISAR, Eyjólfur Magnússon, 2003), 2003 (SPOT5), 2010 (SPOT5), 6. júlí 2011 (TanDEM-X) og ágúst 2011 (Lidar, Tómas Jóhannesson o.fl., 2012).



18. mynd. Kort sem sýna æstætt vatnsmætti við botn (50 KPa milli jafnmættislína), á nokkurra ára tímabili eftir jökulhlaupið, undir Hamarskatlinum og nágrenni hans (rauður kassi á efstu mynd til vinstri afmarkar svæðið). Mætti eru reiknuð út frá á botnhæðarlíkani (3. mynd) og yfirborðshæðarlíkönunum frá júní 2012 og júní 2013 byggt á GPS sniðum og September 2013, júní 2014, júní 2015 og september 2015 byggt á TanDEM-X gögnum.



19. mynd. Efri mynd sýnir sem vigrakort hallastefnu æstæðs vatnsmættis í ágúst 2011. Út frá því var vatnasvið Hamarsketilsins dregin (rauð lína). Neðri mynd sýnir heildarrúmmál sumarleysingar á vatnasviði ketilsins frá 2010 til 2015 áætlað út frá afkomumælingum á Vatnajökli (sjá t.d. Finnur Pálsson o.fl. 2015). Bláa brotalínan sýnir áætlað meðalrúmmál sumarleysingar frá 1996 til 2015 að frátöldu sumrinu 2010 sem var algjörlega einstakt hvað leysingu varðar á þessu svæði.