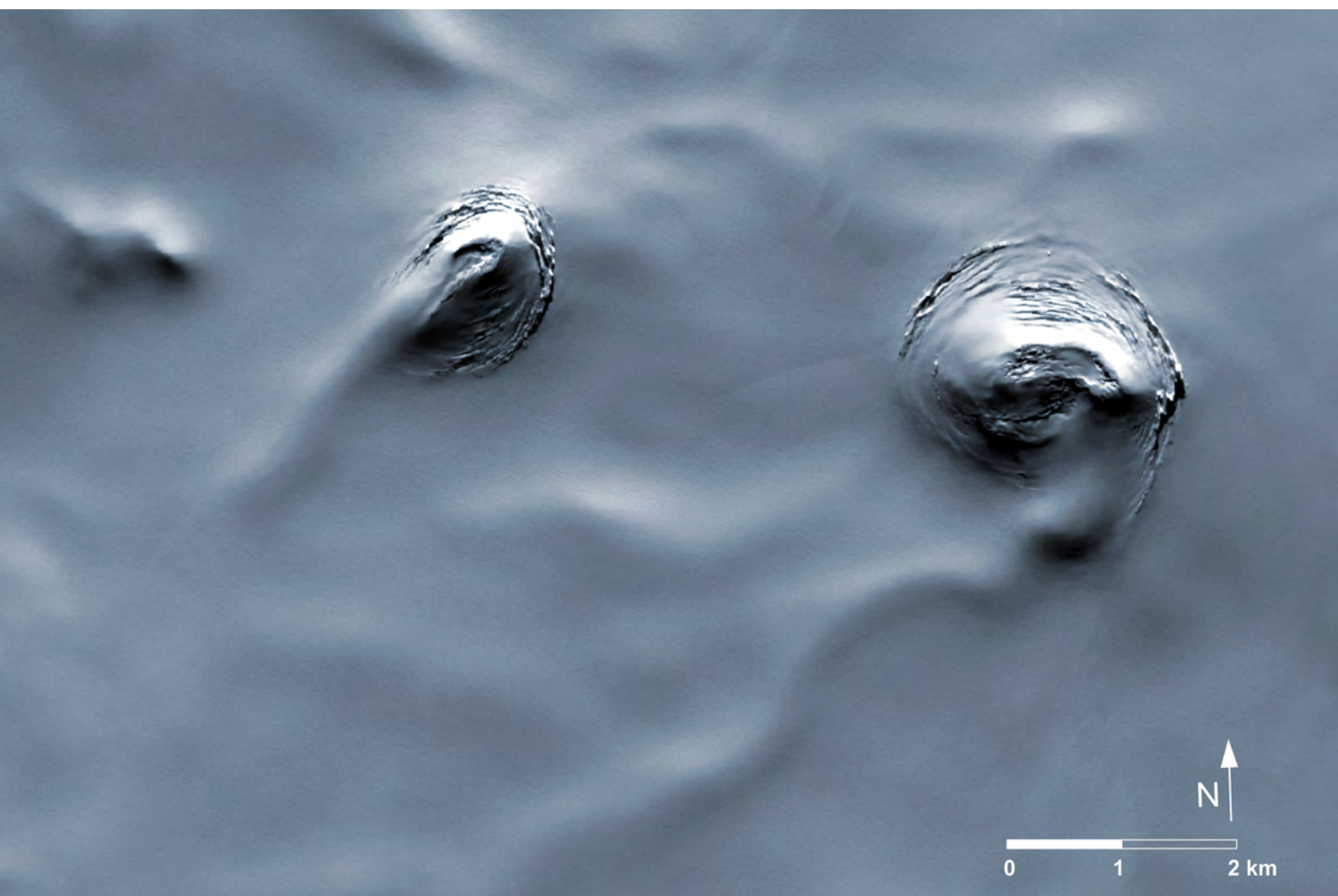


# Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá

Skaftárkatlar – saga og þróun 1938–2018





HÁSKÓLI ÍSLANDS  
JARÐVÍSINDASTOFNUN



# Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá

## Skaftárkatlar – saga og þróun 1938–2018

---

Magnús Tumi Guðmundsson<sup>1</sup>, Eyjólfur Magnússon<sup>1</sup>, Þórdís Högnadóttir<sup>1</sup>,  
Finnur Pálsson<sup>1</sup> og Cristian Rossi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jarðvísindastofnun Háskólans

<sup>2</sup> Remote Sensing Institute, German Aerospace Center (DLR)

Lykilsíða

<b>Skýrsla nr.</b> VÍ 2018-017	<b>Dags.</b> Desember 2018	<b>ISSN</b> 1670-8261	<b>Opin</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Lokuð</b> <input type="checkbox"/> <b>Skilmálar:</b>
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá Skaftárkatlar: Saga og þróun 1938–2018		<b>Upplag:</b> 30 <b>Fjöldi síðna:</b> 62 <b>Framkvæmdastjóri sviðs:</b> Jórunn Harðardóttir	
<b>Höfundar:</b> Magnús Tumi Guðmundsson, Eyjólfur Magnússon, Þórdís Högnadóttir, Finnur Pálsson og Cristian Rossi		<b>Verkefnisstjóri:</b> Matthew J. Roberts <b>Verknúmer:</b> 3721-0-0006	
<b>Gerð skýrslu/verkstig:</b>		<b>Málsnúmer:</b> 2016-134 / 2018-0171	
<b>Unnið fyrir:</b> Ofanflóðasjóð			
<b>Samvinnuaðilar:</b> Jarðvísindastofnun Háskólans og Remote Sensing Institute, German Aerospace Center (DLR)			
<b>Útdráttur:</b> Í skýrslunni er greint frá þróun Skaftárkatla síðustu átta áratugi. Þó svo heimildir séu um lítil hlaup aftur á 18. öld, kemur í ljós þegar gögn eru skoðuð að Eystri-Skaftárketill var tiltölulega lítill allt fram á 5. áratug 20. aldar, óx mjög fram til 1970 en breyttist lítið eftir það fram til 2010. Vestari-Skaftárketill var ekki til 1945, sést fyrst á loftmyndum árið 1960 en var um 1970 farinn að nálgast mjög núverandi stærð. Þróunin skýrir af hverju Skaftárhlaup voru lítil en nánast árviss á fyrri hluta 20. aldar. Þau áttu upptök undir Eystri-Skaftárkatli og stækkuðu mjög samfara vexti ketilsins um miðja öldina. Hlaupa úr vestari katlinum fór að gæta um 1970. Umtalsverðar breytingar urðu á Eystri-Skaftárkatli 2010–2015 þegar hann víkkaði til suðausturs, vesturs og norðurs. Leki, 1–2 m <sup>3</sup> /s, var undan honum á þessu tímabili, sennilega vegna víkkunar ketilsins út yfir svæði þar sem berggrunnur er mjög lekur. Afl jarðhitans óx úr fáum hundruðum megawatta 1940 upp í 1400–1600 MW 1970 og hefur haldist svipað síðan. Víkkun Eystri-Skaftárketils 2010–2015 eru ekki talin stafa af auknu jarðhitaafli heldur eigi hún skýringu í tilfærslu uppstreymissvæða jarðhitans undir katlinum. Erfitt er að segja til um þróun næstu ára en engar vísbendingar eru þó um að dragi úr jarðhita á svæðinu.			
<b>Lykilorð:</b> Skaftárkatlar, Skaftárhlaup, jökulhlaup, hættumat, loftmyndir, fjarkönnun, íssjarmælingar		<b>Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:</b>  <b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b>  <b>Yfirfarið af:</b> SG o.fl.	



## Ágrip

Í skýrslunni er greint frá þróun Skaftárkatla síðustu átta áratugi. Leiðangrar fóru um eða mjög nærri því svæði þar sem Skaftárkatlar eru í dag árin 1875 og 1951 en urðu katlanna ekki varir. Eystri-Skaftárketill sást á mynd sem tekin var í fyrstu flugferð inn yfir Vatnajökul, í lok maí 1938. Hann var þá grunnur og sprungulaus og alls ólíkur því sem varð síðar. Ketillinn óx hratt á tímabilinu 1945 til 1970 en stóð síðan í stað og dróst síðan aðeins saman á árunum 1985–2010. Loftmyndir frá 1945 og 1946 sýna að þá var enginn ketill þar sem vestari ketillinn er í dag. Ketillinn kemur hinsvegar fram á loftmynd frá 1960. Eftir það hefur hann heldur stækkað allt fram á þennan dag. Á árunum 2010 til 2015 stækkaði eystri ketillinn verulega. Flatarmál þess svæðis sem markast af jökulsprungum umhverfis ketilinn í hlaupum óx úr 2,5 km<sup>2</sup> í 5,5 km<sup>2</sup>. Þessi stækkun ketilsins er sennilegasta skýringin á því hve rennsli var mikið í hlaupinu í október 2015. Skýring á löngum tíma milli hlaupanna 2010 og 2015, sem er u.þ.b. tvöfaldur meðaltími milli hlaupa, er talin vera tilfærsla í jarðhitauppstreymi og afleiðingar þeirra breytinga. Talið er að uppstreymi jarðhita og þar með bráðnun við botn hafi aukist við jaðra ketilsins og að um 40% af bræðsluvatninu hafi runnið sem leki úr katlinum niður í grunnvatnskerfið í berginu undir jöklinum. Hins vegar eru engar vísbendingar um að afl jarðhitans hafi aukist á þessu tímabili. Leka gætti einnig 2015–2018. Engin merki eru um leka af þessu tagi fyrir 2010, hvorki í því hvernig ketillinn reis milli hlaupa né koma fram vísbendingar um slíkt þegar ísbráðnun er borin saman við rennsli í hlaupum.

Á árabílinu frá 1940 til 1970 þróuðust Skaftárkatlar úr því að vera lítið jarðhitasvæði undir eystri katlinum, sem sennilega bræddi 15–25 GL á ári, yfir í að verða eitt öflugasta jarðhitasvæði landsins. Samanlagt afl jarðhitans undir kötlunum hefur undanfarin 50 ár verið 1400–1600 MW. Eystri ketillinn er stærr og hefur afl hans sveiflast á bilinu 800–1200 MW á sama tímabili. Jarðhitasvæðið undir vestari katlinum hefur á saman tíma vaxið úr um 400 MW í yfir 700 MW. Sé horft til áratuga, eru frekar vísbendingar um að afl jarðhitans vaxi en minnki. Þó alls óljóst sé hver framtíðin verður er eðlilegt að miða áætlanir og viðbúnað við að ísbráðnun geti aukist frá því sem nú er. Erfiðara er að segja til um möguleg áhrif aukinnar bráðnunar á stærð hlaupa, en þau lúta flóknu samspili milli þess hvar jarðhita gætir, hvert aflið er og hvaða aðstæður eru til vatnssöfnunar. Sigketill getur bæði breitt úr sér við aukna bráðnun eða þá að hann dýpkar samhliða tíðari hlaupum.

## Summary in English

*This report describes the evolution of the two geothermally sustained Skaftá Cauldrons over an 80-year period since 1938. The cauldrons (Eystri- and Vestari-Skaftárketill) are 2–3 km wide and 50–150 m deep depressions in the 400–500 m thick ice of NW-Vatnajökull, between Grímsvötn and Hamarinn. Minor jökulhlaups in river Skaftá that did not cause damage in the lowlands occurred almost every year in the first half of the 20<sup>th</sup> century. The first link between the cauldrons and the Skaftá jökulhlaups was made in 1955 when a jökulhlaup occurred that was much larger than previously observed. The draining of water from beneath the large depression that later become known as the Eystri-Skaftárketill (Eastern Skaftá Cauldron) was identified as the cause of the jökulhlaup. In the period 1955 to 2018, 27 jökulhlaups have drained from this cauldron. The second and smaller western cauldron has released 28 jökulhlaups since 1968.*

*Systematic analysis of written sources and oblique and vertical photographs from aircraft has thrown light on the evolution of two cauldrons. Expeditions that passed through this area in 1875, 1935 and 1951 did not notice the cauldrons. The first aerial photos showing the eastern cauldron were taken in 1938, when it was only a crevasse-free shallow depression, about 1 km in diameter. It grew fast in the period 1945–1970 but then remained similar in size for about 40 years. Aerial photographs from 1945 and 1946 show that the western cauldron did not exist at this time; the oldest known observation is from an aerial photograph taken in 1960. The eastern cauldron changed after 2010 when the area delineated by major crevasses in jökulhlaups grew from 2.5 km<sup>2</sup> to 5.5 km<sup>2</sup> in five years. This growth of the cauldron helps explaining the high discharge observed in the jökulhlaup in October 2015. The five-year interval between the jökulhlaups in 2010 and 2015 is the longest observed. This long interval is considered to have been caused by changes in the location of geothermal upflow at the base of the glacier and the onset of leakage as the water body under the cauldron expanded out to highly permeable bedrock. About 40% of the meltwater was lost through leakage into the groundwater system under the glacier while there are no indications of increased geothermal power. Before 2010 there was no evidence of a similar leakage.*

*In the period 1940–1970 the combined Skaftá Cauldrons area grew from being a relatively small geothermal area with a single cauldron into one of the most powerful found in Iceland, with a combined geothermal power of 1400–1600 MW. The eastern cauldron is larger with a power of 800–1200 MW while the western cauldron has grown from about 400 MW in 1970 to 700 MW. On a decadal timescale, the overall trend is towards slightly increasing geothermal power. The future influence of a possible increase in geothermal activity on the size of jökulhlaups is dependent on a complicated interplay between the location of geothermal upflow, the geothermal power and conditions for water accumulation at the glacier base. A cauldron may expand in area in response to migration of geothermal upflow zones, possibly leading to larger and less frequent jökulhlaups. In contrast, concentrated melting at a central location may lead to thinner ice cover and a deeper cauldron, but little or no lateral expansion. That situation may lead to more rapid filling and higher frequency of jökulhlaups.*

# Efnisyfirlit

Ágrip .....	5
Summary in English.....	6
1 Inngangur .....	11
2 Aðferðir .....	17
2.1 Greining loft- og flugmynda .....	17
2.2 Mælingar á hæð yfirborðs á jörðu niðri .....	17
2.3 Sniðmælingar með TF-FMS .....	18
2.4 Hæðarkort byggð á samfelldum fjarkönnunarmælingum .....	19
2.5 Íssjarmælingar .....	20
3 Skaftárkatlar og Skaftárhlaup 1938–2010.....	21
3.1 Heimildir um Skaftárhlaup fyrir 1955.....	21
3.2 Ferðir um Vatnajökul nærri Skaftárkötlum fyrir 1955.....	21
3.3 Myndataka úr lofti 1938–1955.....	23
3.4 Skaftárkatlar á loftmyndum 1945–1997.....	25
3.5 Hæðarbreytingar og sig í hlaupum eftir 1997 .....	29
3.6 Hlaup í Skaftá frá 1955 .....	30
4 Eystri-Skaftárketill 2010–2018 .....	31
4.1 Greining hæðarbreytinga og úrvinnsla íssjarmælinga.....	31
4.1.1 Hæðarkort 2010–2015.....	31
4.1.2 Hæðarsniðmælingar 2016–2018 .....	33
4.1.3 Afkoma og afl .....	35
4.1.4 Aðferð við mat á leka Eystri-Skaftárketils 2010–2015 .....	38
4.1.5 Hæðarbreytingar í hlaupinu 2018.....	41
4.1.6 Íssjarmælingar í og við Eystri-Skaftárketil 2014–2018 .....	42
4.2 Niðurstöður og túlkun .....	49
4.2.1 Hæðarbreytingar 2010–2015.....	49
4.2.2 Hæðarkort af jökulbotni .....	51
4.2.3 Umfang og lögun vatnsgeymis við botn .....	52
4.2.4 Þróun 2015 til 2018.....	52
5 Umræða og samantekt.....	55
5.1 Stærð katlanna undanfarin 80 ár .....	55
5.2 Leki úr Eystri-Skaftárkatli .....	55

5.3	Jarðhitaafli .....	56
5.4	Möguleg þróun næstu áratugi.....	57
6	Niðurstöður.....	59
7	Pakkir .....	59
8	Heimildir .....	60

## Myndir

Mynd 1.	Vesturhluti Vatnajökuls og farvegir Skaftárhlaupa undir jökli.....	12
Mynd 2.	Ljósmyndir úr flugvélum af Skaftárkötlum á ýmsum tímum. ....	14
Mynd 3.	Kort af Skaftárkötlum sumarið 2010 skömmu eftir að hlaup .....	16
Mynd 4.	Þversnið af Skaftárkötlum ásamt ágiskaðri legu og umfangi jarðhita í efsta hluta jarðskorpunnar undir þeim. ....	18
Mynd 5.	Hæð jökulyfirborðs í botni Skaftárkatla 1994-2018 samkvæmt mælingum á jörðu niðri og flugmælingum úr TF-FMS.....	19
Mynd 6.	Stærðir Skaftárhlaupa 1955-2018. ....	20
Mynd 7.	Leiðir Watts og samferðamanna yfir Vatnajökul 1875 og leiðangurs sem farin var vorið 1951 til að bjarga skíðaflugvél af Bárðarbungu.....	22
Mynd 8.	Ljósmynd Steinþórs Sigurðssonar 28. maí 1938 af þeim stað þar sem gaus 1938 og síðar hlaut nafnið Gjálpi. ....	24
Mynd 9.	Ljósmynd Steinþórs Sigurðssonar yfir norðurhluta Grímsvatna 4. október 1945 að loknu Grímsvatnahlaupi. ....	25
Mynd 10.	Kort af Skaftárkötlum, skyggt án hæðarlína, byggt á Lidar frá 2010–2011. Loftmynd AMS tekin 30. ágúst 1945 lögð ofan á lidarkortið. ....	26
Mynd 11.	Loftmyndir 30. og 31. ágúst 1946 lagðar ofan á Lidarkort frá 2010.....	27
Mynd 12.	Loftmynd frá 15. september 1954.....	28
Mynd 13.	Eystri ketillinn skömmu eftir hlaup 1972.. ....	29
Mynd 14.	Tímasetning og upprunni hæðarkorta sem nýtt voru til að skoða hæðarbreytingar á tímabilinum 2010–2015.....	31
Mynd 15.	Hæðarbreytingar í Skaftárkötlunum og næsta nágrenni þeirra frá vori 2010 til hausts 2013.....	32
Mynd 16.	Hæðarbreytingar í Skaftárkötlunum og næsta nágrenni frá hausti 2013 til hausts 2015 rétt fyrir hlaup úr eystri katlinum .....	32
Mynd 17.	Hæðarbreytingar í Eystri Skaftárkatlinum og næsta nágrenni frá hausti 2013 til hausts 2015.....	33



Mynd 18. Hæð GPS-sniðmælinga frá júní 2016, júní 2017 og desember 2017 borin saman við TanDEM-X hæðarkort frá 10. október 2015 .....	34
Mynd 19. Hæð GPS-sniðmælinga frá júní 2018 borin saman við TanDEM-X hæðarkort frá 10. október 2015. ....	35
Mynd 20. Hæðarbreytingar á ísasviði Eystri Skaftárketilsins frá 1998–2010 og 2010–2015. ....	36
Mynd 21. Samanburður á heildarvatnsmagni sem rann undir Eystri Skaftárketilinn frá hausti 2010 til hausts 2015 og vatnsmagni sem kom frá katlinum í hlaupinu 2015.....	38
Mynd 22. Hæðarbreytingar í Eystri Skaftárkatlinum og næsta nágrenni í hlaupinu 2010.....	39
Mynd 23. Hæðarbreytingar í Eystri Skaftárkatlinum og næsta nágrenni í hlaupinu haustið 2015 .....	40
Mynd 24. Staðsetning rakinna botnendurkasta í íssjárnsniðum og útmörk vatnsgeymis undir Eystri Skaftárkatlinum áætluð út frá breytingum í botnendurköstum fyrir árin frá 2014 til 2018.....	41
Mynd 25. Lega íssjárnsniða sem mæld voru í Eystri Skaftárkatlinum vorið 2014.....	43
Mynd 26. Samskonar og 25. mynd. Myndhlutar sýna tvívítt varpað íssjarmælisnið frá 2016 og 2017.....	44
Mynd 27. Samskonar og 25. mynd. Myndhluti b sýni tvívítt varpað íssjarmælisnið frá 2018 eftir sömu línu og fyrst var mæld 2014.....	45
Mynd 28. Samskonar og 25. mynd fyrir vorið 2015 og 2017. Með samanburði þessara íssjárnsniða má áætla ytri mörk vatnsbólú fyrir vorið 2015. ....	46
Mynd 29. Útmörk vatnsgeymis undir Eystri Skaftárkatli 2014 til 2018 í júní ár hvert og lega íssjargagna sem þau byggja á.....	47
Mynd 30. Botnhæðarkort sem brúað var út frá botnhæðargögnum .....	47
Mynd 31. Hæðarkort af jökulbotninum undir Eystri Skaftárkatlinum.....	49
Mynd 32. Samanburður útbreiðslu og þykktar vatnsgeymis undir eystri katlinum vorið 2015 skv. íssjarmælingum. ....	50
Mynd 33. Þversnið af jökli fyrir hlaupin 2015 og 2018.....	51
Mynd 34. Niðurstöður íssjarmælinga á flatarmáli, rúmmáli og meðalþykkt vatnsgeymis undir Eystri-Skaftárkatlinum í tímabilinu, mælt árlega frá vori 2014 til vors 2018.. ....	53
Mynd 35. Þvermál Skaftárkatla 1938–2015.....	54
Mynd 36. Afl jarðhitans undir Skaftárkötlum frá því á fjórða áratugnum fram til 2015 .....	57



# 1 Inngangur

Skaftárhlaup koma undan Skaftárkötlum í norðurvesturhluta Vatnajökuls milli Grímsvatna og Hamarsins (1. mynd). Katlarnir eru tveir, Eystri- og Vestari-Skaftárketill (2. mynd). Eystri ketillinn er stærrí og hlaupin sem úr honum koma eru meiri en hlaup sem koma frá vestari katlinum (Helgi Björnsson, 1977; Snorri Zóphóníasson, 2002; Auður Atladóttir o.fl., 2013). Skaftárkatlar skilja sig frá öðrum sigkötlum sem nú eru virkir í jöklum hér á landi sakir stærðar sinnar, reglulegrar vatnssöfnunar og stærðar hlaupanna sem frá þeim koma. Yfirborð jökulsins umhverfis Skaftárkatla liggur í 1500–1700 m hæð yfir sjó og er ísinn víðast hvar 400–600 m þykkur (Helgi Björnsson & Páll Einarsson, 1991; Helgi Björnsson, 2009). Báðir katlarnir hafa sjálfstæð ísasvið þar sem ís flæðir úr norðri og norðaustri inn í katlana (Helgi Björnsson, 1988; Finnur Pálsson o.fl., 2002). Skilgreina má útmörk hvors ketils fyrir sig út frá sprungum sem myndast við hlaup (3. mynd). Í hlaupum sígur sá eystri um 100–160 metra og sprungumynstrið á jöðrum hans afmarkar svæði sem er 2–3 km í þvermál. Samsvarandi tölur fyrir vestari ketilinn eru 70–100 metrar og um hálfur annar kílómetri. Báðir katlarnir sitja síðan í grunnum og víðum dældum sem eru um 5 km breiðar í austur-vestur stefnu. Til norðurs og norðausturs frá þeim teygjast ísasvæðin upp í átt að Bárðarbungu (1. mynd).

Undir Skaftárkötlum eru öflug jarðhitasvæði (4. mynd). Jarðhitinn bræðir ísinn stöðugt og lægð myndast í yfirborðið. Á bergbotninum undir lægðinni safnast bræðsluvatnið fyrir. Þetta bræðsluvatn sleppur út í jökulhlaupum sem verða þegar vatnsþrýstingur við botn nægir til að yfirvinna farg íssins umhverfis dældina. Jökulyfirborðinu hallar til suðvesturs og sameiginleg áhrif ísfargsins og halla jökulbotnsins stýra rennislíleið hlaupanna þar til þau koma undan jökuljaðri í útfalli Skaftár ofan við Langasjó. Auk botnbráðar vegna jarðhita safnast yfirborðsleysing að sumarlagi innan vatnasviða katlanna einnig í vatnshvelfinguna undir þeim. Borað hefur verið í gegnum jökulinn niður í vatnið undir báðum kötlunum. Í boruninni sumarið 2006 reyndist hiti vatnsins undir Vestari-Skaftárkatli 4–5°C og efnasamsetning þess benti til þess að hiti jarðhitakerfisins væri 310–320°C (Tómas Jóhannesson o.fl., 2007).

Skaftárhlaup úr eystri katlinum eru að jafnaði stærrí en hlaup sem koma úr vestari katlinum. Á tímabilinu 1994 til 2018 (5. mynd) komu 17 hlaup undan vestari katlinum en 11 frá þeim eystri (Auður Atladóttir o.fl., 2013 og nýrri gögn). Fyrsta Skaftárhlaupið sem verulega kvað að varð í september 1955 (Sigurður Þórarinnsson & Sigurjón Rist, 1955). Þá var nýlega kominn vatnshæðarmælir í Skaftárdal og til eru mælingar fyrir öll hlaup sem orðið hafa síðan (6. mynd) (Snorri Zóphóníasson, 2002; Auður Atladóttir o.fl., 2013). Ljóst er af heimildum að hlaup komu í Skaftá fyrir 1955 (Helgi Björnsson, 1977). Flest bendir þó til þess að þau hlaup hafi verið miklu minni en hlaupið 1955 og mörg þeirra sem síðar hafa komið. Skaftárhlaup koma fram í Skaftá eftir ungum og fremur óþroskuðum farvegi sem liggur að hluta ofan á og meðfram Eldhrauninu sem varð til í Skaftáreldum 1783–1784. Hlaupin bera fram aur sem sest meðal annars til í Eldhrauni (Esther Hlíðar Jensen o.fl., 2018). Umtalsvert rof hefur orðið í farvegi Eldvatns við Ása. Brýr yfir Eldvatnið hafa skemmst eða eyðilagst í Skaftárhlaupum (1965, 2015) þegar hlaupin hafa grafið undan stöplum.

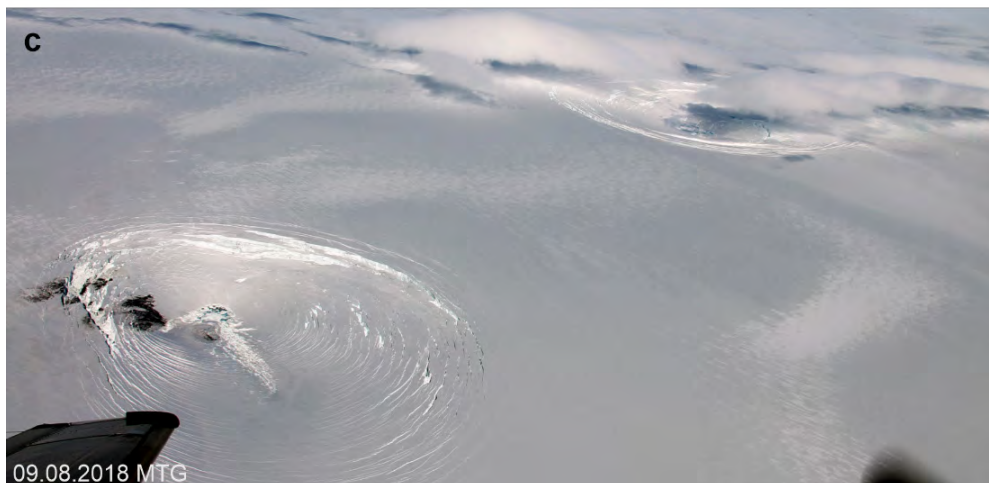


Mynd 1. Vesturhluti Vatnajökuls og farvegir Skaftárhlaupa undir jökli að jaðri ofan Langasjávar. Ramminn sýnir útmörk 10.–13. myndar.

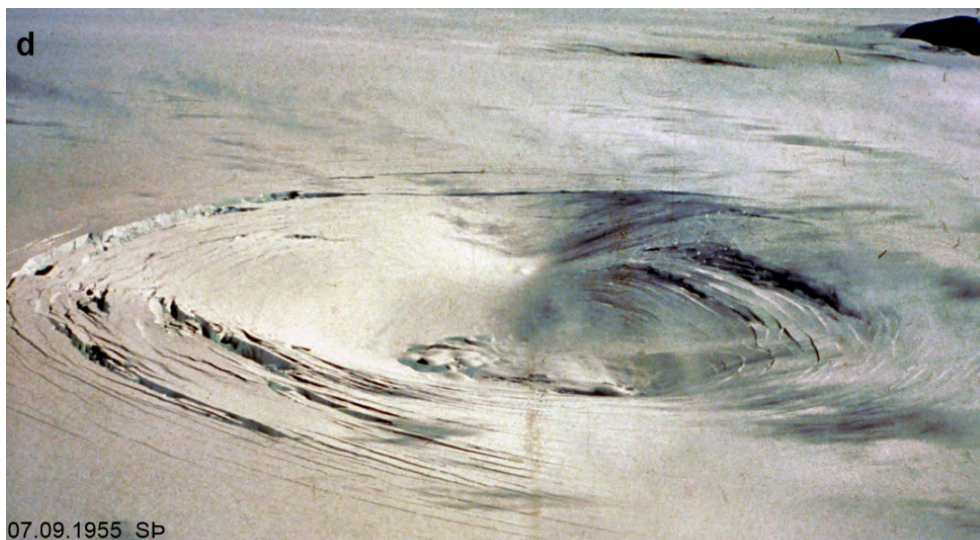
Í Skaftárhlaupinu um mánaðarmótin september-október 2015 var hámarksrennsli við Sveinstind tæplega 3000 m<sup>3</sup>/s, sem var mun meira en áður hafði mælst í Skaftárhlaupum. Jafnframt flæmdist hlaupið víðar en dæmi eru um úr fyrri hlaupum (Emmanuel Pagneaux o.fl., 2018a). Tíminn frá næsta hlaupi á undan, sem varð í júlí 2010, var einnig sá lengsti sem vitað er um eftir 1955, eða rúmlega fimm ár og tvöfalt lengri en að meðaltali undanfarin 60 ár. Jafnframt kom í ljós að ketillinn hafði stækkað verulega frá 2010. Eystri-Skaftárketill hljóp síðan aftur í byrjun ágúst 2018. Sá vestari hljóp samtímis og er þetta í fyrsta skipti sem vitað er til þess að það gerist, en áður hefur komið fyrir að flóð úr öðrum fylgi flóði úr hinum en þá með aðskildum flóðtoppi. Vatnsmagnið frá eystri katlinum var minna 2018 en 2015, en hlaupið í heild var eigi að síður með stærstu Skaftárhlaupum. Jafnframt var ljóst að stækkun eystri ketilsins hefur ekki gengið til baka.

Stærð hlaupsins 2015 og sú stigmögnun í áhrifum í byggð sem fylgir stækkun ketilsins kallar á endurmat á mögulegum áhrifum og þróun Skaftárhlaupa. Því varð ákveðið eftir samráð stýrihóps GOSVÁR, verkefnis um heildarhættumat vegna eldgosa á Íslandi, sveitarfélagsins Skaftárhrepps, Lögreglustjórans á Suðurlandi, Umhverfis- og auðlindaráðuneytisins og Ofanflóðasjóðs að leggja til fjármuni í gerð hættumats vegna Skaftárhlaupa (Davíð Egilsson o.fl. 2018). Þessi skýrsla er einn þáttur þess verkefnis. Skýrslan fjallar um Skaftárkatlana og þróun þeirra undanfarin 80 ár, eða aftur til ársins 1938 en engin gögn eru til um sjálfa katlana fyrir þann tíma. Tiltækar upplýsingar eru notaðar til að meta stærð katlanna á mismunandi tímum og mat er lagt á hvernig afl jarðhitasvæðanna undir kötlunum hefur þróast á undangengnum áratugum. Þær umtalsverðu breytingar sem urðu á eystri katlinum á árunum 2010–2015 eru skoðaðar nokkuð ítarlega út frá sniðmælingum á yfirborðshæð, gervitunglagögnum og endurteknum íssjarmælingum. Að lokum eru settar fram skýringar á hegðun Skaftárkatla frá 2010 til 2018 og stillt upp sviðsmyndum um mögulega þróun á næstu árum og áratugum. Heildaryfirlit er að finna í Davíð Egilsson o.fl. (2018) og um aðra þætti hættumatsins má lesa í Emmanuel Pagneaux o.fl., 2018a, 2018b; Esther Hlíðar Jensen, 2018a, 2018b; Matthías Ásgeir Jónsson o.fl., 2018.

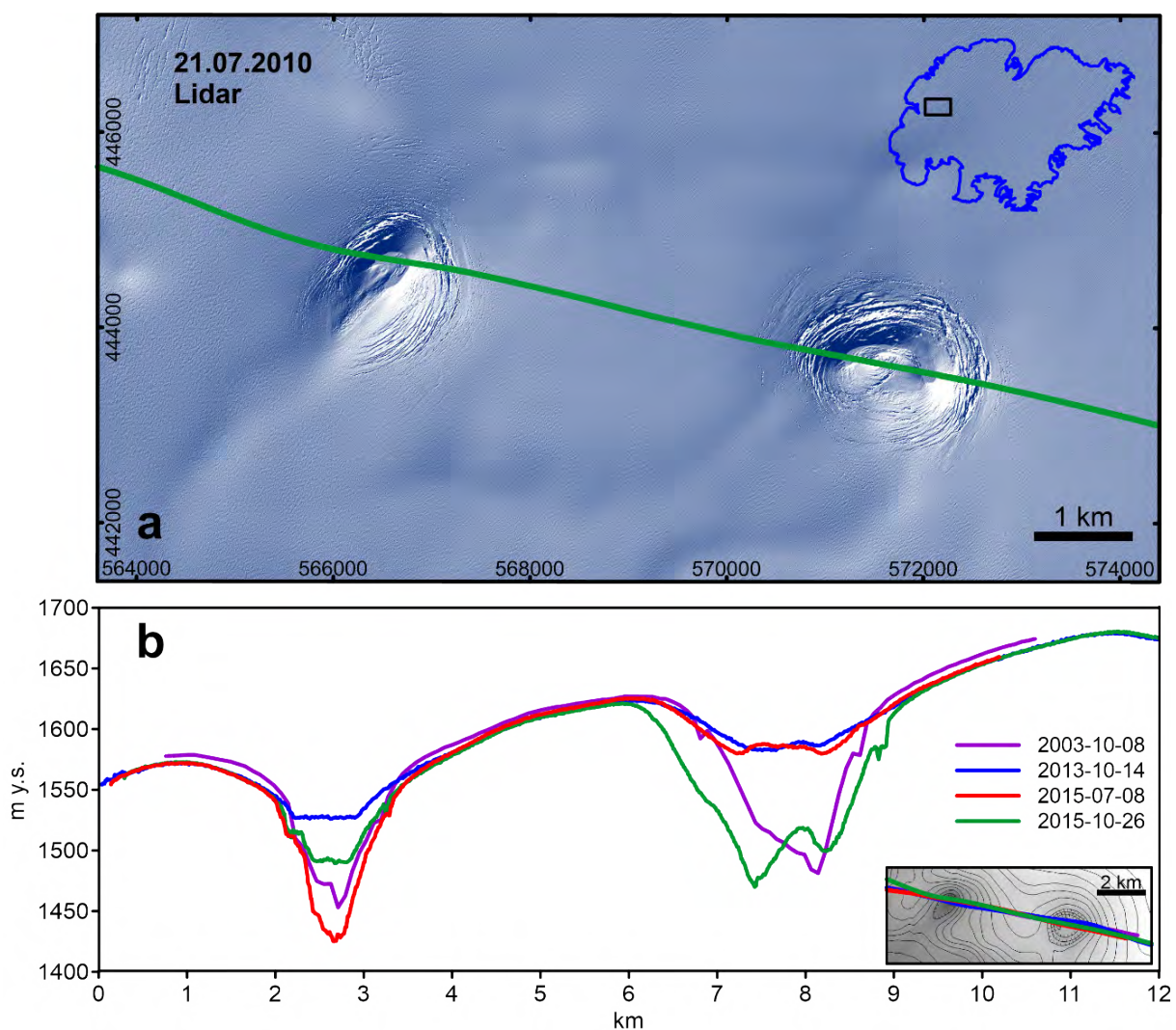
Skýrslan er unnin af starfshópi á Jarðvísindastofnun Háskólans. Hún byggist að miklu leyti á rannsóknum sem farið hafa fram undanfarin aldarfjórðung á stærð og umfangi Skaftárkatla og þróun þeirra undanfarin ár. Verulegur hluti mælinga hefur verið unnin í vorferðum Jökla-  
rannsóknafélags Íslands.



Mynd 2. Ljósmyndir úr flugvélum af Skaftárkötlum á ýmsum tímum. (a) Í október 1996. Nær er Vestari-Skaftárketill en sá eystri fjær. Í fjarska Grímsvötn. Ljós. Oddur Sigurðsson. Í apríl 2006 en þá hljóp Eystri-Skaftárketill (fjær). Ljós. MTG (c) Í ágúst 2018, Vestari-Skaftárketill í forgrunni. Báðir katlarnir hlupu þá samtímis. Ljós: MTG.



*(d) Eystri-Skaftárketill í september 1955, í fjarska sér í austurenda Grímsfjalls. Ljós: Sigurður Þórarinnsson. (e) Mynd tekin skömmu eftir hlaup úr eystri katlinum í september 2002. Horft úr austri, nær er Eystri-Skaftárketill. Ljós: Oddur Sigurðsson. (f) Eystri-Skaftárketill í október 2015. Sjónarhornið er svipað og á (e). Ljós: MTG.*



Mynd 3. (a) Kort af Skaftárkötlum sumarið 2010, skömmu eftir að hlaup hafði komið úr báðum kötlunum (Lidar-mæling, Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). (b) Þversnið af yfirborði Skaftárkatla fyrir og eftir hlaupin 2003 og 2015. Mælingar gerðar með flughæðaratsjá úr flugvél Ísavía, TF-FMS.



## 2 Aðferðir

Á fyrri hluta tímabilsins sem til umfjöllunar er þarf að styðjast við ljósmyndir, lýsingar og aðrar heimildir. Á tímabilinu eftir 1990 hafa bæst við margvíslegar aðferðir sem hafa gerbreytt möguleikum á mælingu jökulyfirborðs. Þetta eru m.a. nákvæmar GPS sniðmælingar á jörðu niðri, sniðmælingar úr flugvél, kortlagning úr flugvél með lidar (Light detection and ranging, stundum nefnt leysiskanni), gerð landlíkana eftir venjulegum ljósmyndum sem teknar eru úr flugvél eða dróna og landlíkön sem unnin úr gögnum frá gervitunglum. Að auki eru íssjarmælingar en með þeim má mæla þykkt íssins yfir vatninu (eða bergbotni ef ekkert vatn er) undir sigkötlunum. Kortlagning með gervitunglum hefur þann kost að heildstætt kort fæst af kötlunum og umhverfi þeirra. Hins vegar geta enn sem komið er liðið margir dagar eða vikur milli þess að gögn fái frá gervitunglum sem hægt er að nota til kortlagningar. Kostur sniðmælinga úr flugvél er að þær eru fljótvirkar og hægt að mæla í fyrsta veðurglugga sem heimilar lágflug. Þær gegna því lykilhlutverki í hraðri atburðarás eins og eldgosum í jökulum og jökulhlaupum ef þörf er á.

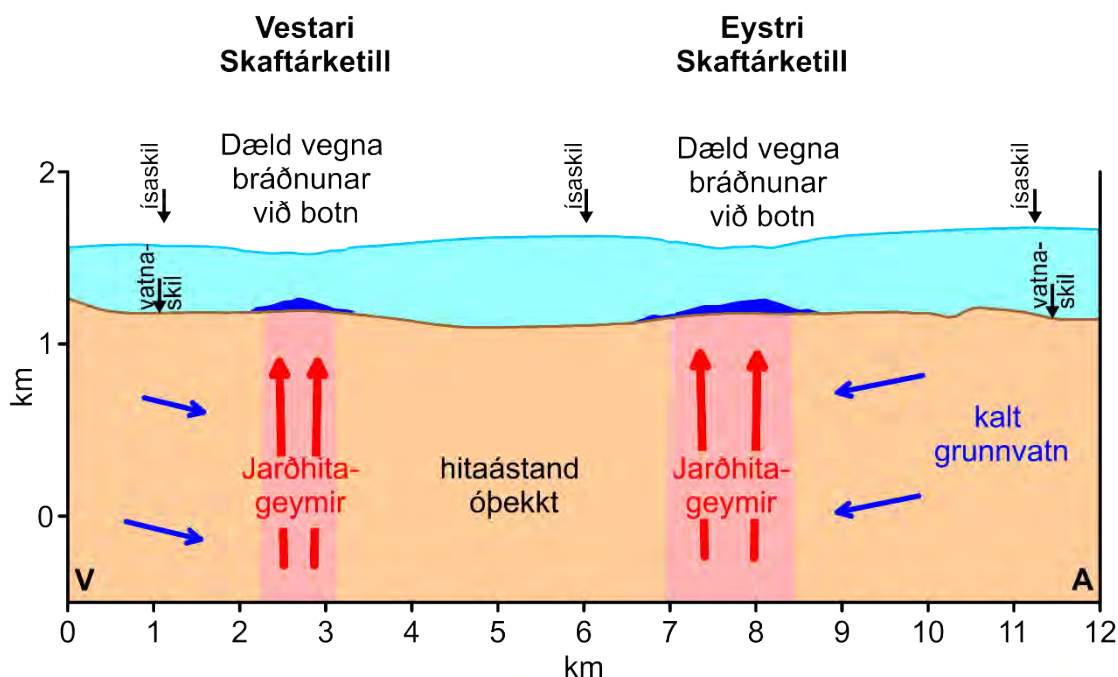
### 2.1 Greining loft- og flugmynda

Ljósmyndir úr flugvélum sem nýttar eru í rannsókninni eru annarsvegar skámyndir teknar með venjulegum myndavélum. Þær eru einu beinu heimildirnar sem hægt er að nota fram til 1945. Séu kennileiti á myndunum sem gera það kleift að ákvarða staðsetningu flugvélarinnar og sjónarhorn er hægt er að meta án mikillar óvissu stærðir eins og vídd sigkatla. Á myndum sem notaðar voru er staðsetning og sjónsvið myndarinnar sýnt á korti.

Lóðréttar loftmyndir sem geta nýst til kortagerðar eru teknar með sérstökum myndavélum sem yfirleitt horfa niður um gat í botni flugvélar. Myndir af þessu tagi voru fyrst teknar hér á landi 1945–1946 af bandaríska hernum (AMS). Til eru myndir sem sýna að hluta eða öllu leyti Skaftárkatla eða svæðið þar sem þeir eru nú allt frá 1945. Vegna skorts á fastmerkjum eða öruggum kennileitum af þekktri hæð er mjög erfitt að gera hæðarlínukort af svæðum inni á jöklinum og slík kort geta verið verulega skekkt. Til að mæta því hafa kennileiti í jöklinum umhverfis katlana (merki um mishæðir og sprungur) verið notuð til að fella loftmyndirnar að kortunum. Myndirnar eru notaðar óleiðréttar, þ.e. ekki uppréttar. Gróflega má áætla að nákvæmni í staðsetningu sé betri en 300 m í grennd við kennileiti en varla betri en 500 m annarstaðar.

### 2.2 Mælingar á hæð yfirborðs á jörðu niðri

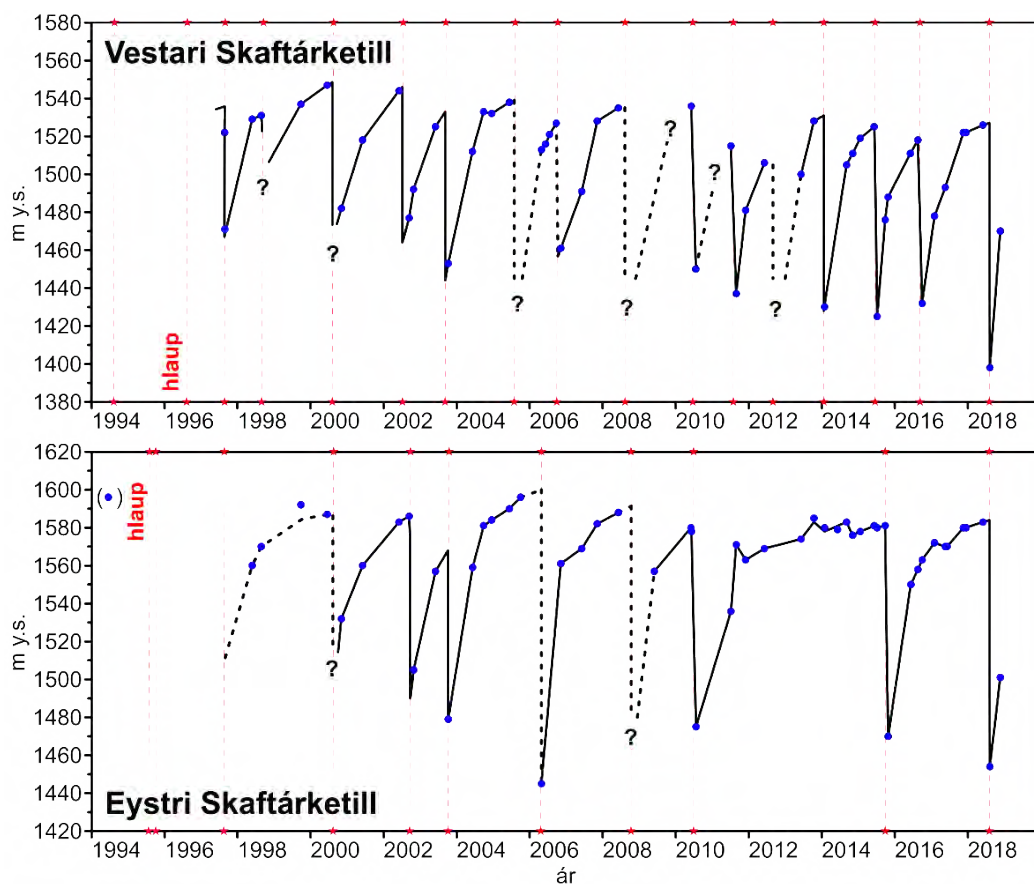
Frá því snemma á 10. áratug 20. aldar hafa mælingar með DGPS (Differential Global Positioning System) og síðar KGPS (Kinematic Global Positioning System) gert það kleift að mæla hæðir á jökli með tiltölulega auðveldum hætti. Fyrsta slík mæling með DGPS (nákvæmni 2–3 m) í Skaftárkötlum var gerð í júní 1994. Frá 2004 hefur KGPS (nákvæmni í hæð ~10 cm) verið notuð og fjölmörg snið og einstakir punktar verið mældir í og við Skaftárkatla. Veðurstofa Íslands hefur með hléum rekið síritandi GPS tæki í Eystri-Skaftárkatli undanfarnin ár. Afkoma jökulsins á vesturhluta Vatnajökuls hefur verið mæld reglubundið frá 1992 (Helgi Björnsson o.fl., 1998, 2013).



Mynd 4. Þversnið af Skaftárhöfudunum ásamt ágiskaðri legu og umfangi jarðhita í efsta hluta jarðskorpunnar undir heim. Þekking á eiginleikum og umfangi jarðhitakerfanna er takmörkuð meðan afl þeirra er tiltölulega vel þekkt.

### 2.3 Sniðmælingar með TF-FMS

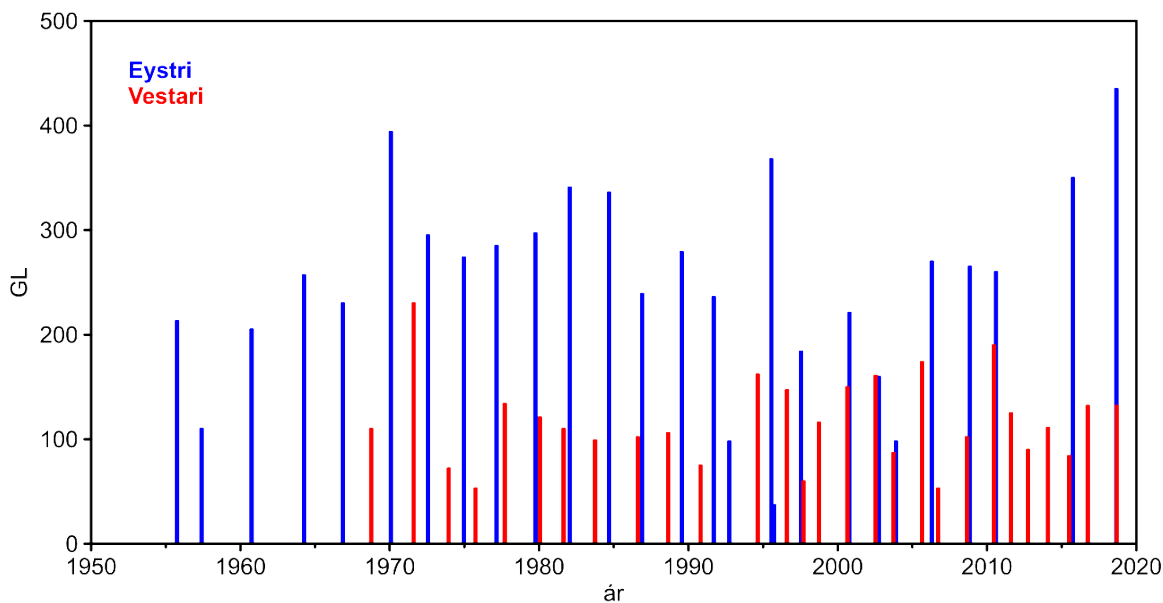
Flugvél Ísavía, TF-FMS er búin ratsjá sem nýttist sem flughæðarmælir auk nákvæms flugmælingakerfis sem tengt er við DGPS. Byrjað var að nota flugvélina til mælinga á breytingum á jökulyfirborði í Gjalpargosinu 1996. Hún hefur verið notuð síðan í öllum helstu umbrotum sem orðið hafa í jöklum landsins til að mæla yfirborðssnið, s.s. eftirlit með sigkötum í Mýrdalsjökli, Grímsvatnagosum 1998, 2004 og 2011, Bárðarbungu 2014–2015, Örafajökli frá 2017 og við óvænta myndun sigkatla samfara jökulhlaupum í Mýrdalsjökli 1999 og 2011 (t.d. Magnús T. Guðmundsson, o.fl., 1997, 2007, 2016). Flughæðarratsjain hefur tíðni 4,2 MHz (C-band) og fótspor á yfirborði jökuls þegar flogið er í 70–100 m hæð er um 4 m í þvermál (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2007). Hæðarnákvæmni er þá um 2 m. Aflestur er tekinn fjórum sinnum á sekúndu, algengur flughraði er 70–80 m/s og því 17–20 m milli mælinga. Þegar jökulyfirborð er frosið getur endurkastflöturinn verið undir yfirborði og kemur þá fram kerfisbundin skekkja sem hliðrar mælingu niður á við. Endurteknar mælingar á Bárðarbungu veturinn 2014–2015 benda til þess að þessi skekkja geti numið 3–7 metrum seinni hluta vetrar ofan 1600 metra hæðar á Vatnajökli (sjá m.a. Magnús T. Guðmundsson, 2016, supplementary information). Við sniðmælingar á breytingum kemur þetta ekki að sök, því hliðrunin er yfirleitt sú sama fyrir allt mælisvæðið á jöklinum.



Mynd 5. Hæð jökulyfirborðs í botni Skaftárkatla 1994-2018 samkvæmt mælingum á jörðu niðri og flugmælingum úr TF-FMS. Á þessu tímabili urðu 10 hlaup úr eystri katlinum og 18 úr þeim vestari (JH, [http://jardvis.hi.is/skaftarkatlar\\_yfirbord\\_og\\_vatnsstada](http://jardvis.hi.is/skaftarkatlar_yfirbord_og_vatnsstada)).

## 2.4 Hæðarkort byggð á samfelldum fjarkönnunarmælingum

Notast var við samfelld hæðarkort mæld með fjarkönnun við rannsóknir á hæðarbreytingum. Stærstur hluti þessara korta er unninn úr mælingum frá gervitunglum. Þetta eru annars vegar TanDEM-X hæðarkort (Rossi o.fl., 2016; Dirscherl o.fl., 2018) frá 2011 til 2015 unnin úr bylgjuvígjafarmyndum sem fengust frá Þýsku geimvísindastofnunni (DLR) og hæðarkort unnin úr SPOT-5 stereó-ljósmyndum (Berthier & Toutin, 2008), teknum sumarið 2010, sem Spot Image gerði jöklahópi Jarðvísindastofnunar aðgengileg gegnum SPIRIT verkefnið (Korona o.fl., 2009). Einnig er hluti hæðarkortanna gerður eftir mælingum úr flugvél; annars vegar bylgjuvígjafarmyndir teknar með EMISAR ratsjá Danska Tækniháskólans (DTU) frá 1998 (Eyjólfur Magnússon, 2003) og með lidar. Hæðarkortlagning nær allra íslenskra jökla með lidar var unnin í sameiginlegu átaki jöklarannsóknahópa Veðurstofu Íslands (VÍ) og Jarðvísindastofnunar Háskólans (JH), auk annara (sjá Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). Markmiðið var að til yrði kortagrunnur um lögun yfirborðs íslenskra jökla með 5x5 metra flatarupplausn og hæðarnákvæmni betri en 1 m. Þetta verk var unnið á árabílinu 2008 til 2013 og var Skaftárkatlasvæðið kortlagt þrisvar, í fyrsta skiptið 2010, öðru sinni 2011 og síðast 2013.



Mynd 6. Stærðir Skaftárhlaupa 1955-2018. Rúmmál í gígalítrum (1 Gl = 106 m<sup>3</sup>) að frádregnu rúmmáli gunnrennslis (byggt á Snorra Zóphóníassyni, 2002; Auði Altadóttur o.fl., 2013; og óbirtum gögnum frá Veðurstofu Íslands).

## 2.5 Íssjármælingar

Íssjármæling er unnin þannig að ratsjá með sendi og móttakara ásamt loftnetum er dregin á sleða í beinni línu á eftir vélsleða sem búinn er GPS-landmælingatæki (KGPS). Íssjárseindirinn sendir frá sér rafsegulbylgjur á lágrí tíðni (~2 MHz) en móttakarinn mælir útslag og ferðatíma þeirra í ísnum. Að gefnum ferðahraða rafsegulbylgna í jökulís (hér gert ráð fyrir 1.68x10<sup>8</sup> m/s) og með samtengingu við staðsetningarmælingar (úr landmælinga GPS-tæki) fást íssjárnið, en dæmi um þau eru í undirkafla 4.1.6. Úrvinnslan felst m.a. í því að varpa endurkasti frá þeim stað þar sem þau koma fram sem merki á þann stað sem þau komu frá (enska: migration). Þessi vörpun fer fram í tveimur víddum en með því er reynt að leiðrétta fyrir því að ratsjárgeislinn er ~500 m víður. Vídd geislans veldur því að mæld endurkast getur átt upptök sín hvar sem er innan þess geisla frá nokkurn veginn kúlulaga fleti sem svarar til fjarlægðar í endurkastsflötinn.

Vörpunin dregur saman orku úr mælingum frá mörgum mælistöðvum eftir mæli línu á nákvæmar staðsettan endurkastsflöt. Tvívíð vörpun á íssjárniðmyndum gefur leiðrétta staðsetningu endurkastsflata að gefinni þeirri einföldun að mæld endurköst séu frá flötum sem eru lóðrétt undir mældu yfirborðssniði en ekki frá endurkastsflötum til hliðar við sniðið. Botnendurköst í íssjármyndum eru rakín með hálf-sjálfvirku algrími sem rekur endurkastsflöt frá gefnum stað. Endurköstin eru svo yfirfarin og samþykkt eftir atvikum. Þetta er endurkeyrt eins oft og þurfa þykir þar til öll greinanleg botnendurköst (frá neðri mörkum jökulíss) hafa verið skilgreind (sjá dæmi á myndum í 4.1.6). Frekari lýsingu á úrvinnsluáðferðum íssjármælinga er að finna í grein um botnkortlagningu Drangajökuls og í rannsókn á Hamarskatlinum á vatnasviði Köldukvíslar (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2016a og 2016b).

## 3 Skaftárkatlar og Skaftárhlaup 1938–2010

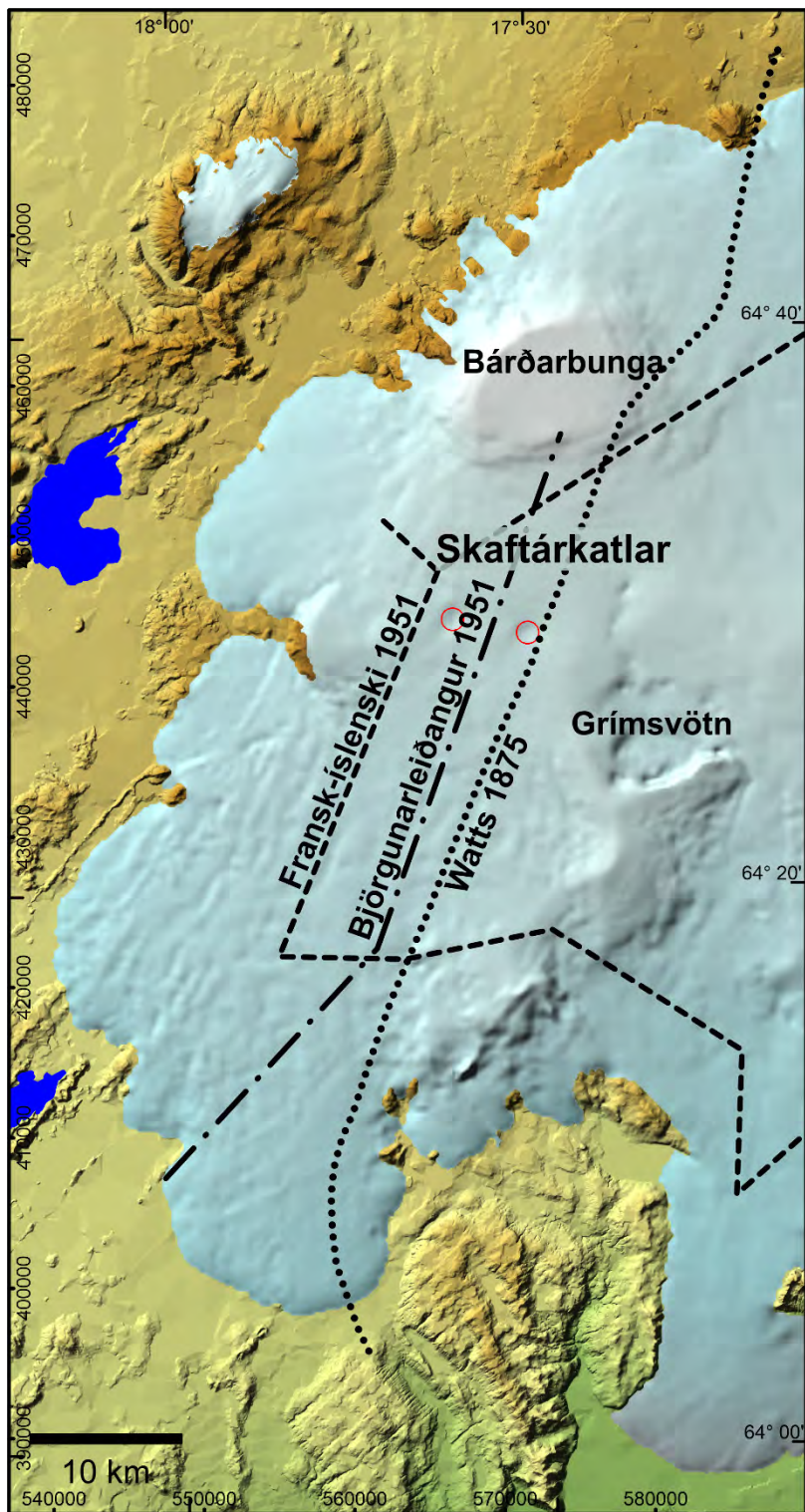
### 3.1 Heimildir um Skaftárhlaup fyrir 1955

Heimildir eru um jökulhlaup í Skaftá löngu fyrir fyrsta mælda hlaupið í september 1955. Haft er eftir Gísla Sigurðssyni bónda á Búlandi að hlaup hafi verið nær árleg á fyrri hluta 20. aldar, en að þau hafi verið miklu minni en hlaup frá og með 1955. Þessi hlaup voru ekki meiri en svo að áin var yfirleitt væð hestum daginn eftir að hlaup hófst (Helgi Björnsson, 1977). Sigurjón Pálsson sem átti heima á Söndum í Meðallandi á árunum 1919–1945 (Morgunblaðið, 1997) getur hlaupa í Kúðafljóti en segir að rennsli í hlaupum hafi oftast nær ekki verið tiltakanlega meira en í vatnavöxtum vegna úrkomu. Sérstaklega tiltekur hann hlaup í september 1938 sem hafi verið stærri en hin (Sigurjón Pálsson, 1968).

### 3.2 Ferðir um Vatnajökul nærri Skaftárkötlum fyrir 1955

Engar beinar heimildir eru til um stærð og legu Skaftárkatla fyrr en langt var liðið á fjórða áratug 20. aldar. Þess ber þó að gæta að mjög fáförukt var um Vatnajökul lengst af. Leiðangur William Lord Watts og fimm íslenskra félaganna hans yfir Vatnajökul sumarið 1875, sem er fyrsta þekktu ferð yfir jökulinn, fór leið sem talin er hafa legið austanhallt við Eystri-Skaftárketil en dældar eða ketils er ekki getið í ferðalýsingunni (Watts, 1962). Sumarið 1935 fóru tveir hópar fjallamanna frá Bárðarbungu til Grímsvatna en ekki er víst að leið þeirra hafi legið nærri þar sem Skaftárkatlar eru nú (Jón E. Ísdal, 1998). Fransk-íslenski leiðangurinn (Jón Eyþórsson, 1951) fór norðan við katlana og síðan rétt vestan vestari ketilsins á leið suður eftir jöklinum um miðjan í apríl 1951. Skyggni var takmarkað og er katlanna ekki getið. Um sama leyti fór leiðangur frá Síðujökli á Bárðarbungu. Tilgangur þeirrar ferðar var að grafa upp og flytja af jökli skíðaflugvélinu sem snjóaði inni haustið áður, en landing vélarinnar var liður í tilraun til að bjarga af jöklinum áhöfn flugvélarinnar Geysis sem brotlenti á Bárðarbungu 14. september 1950. Ekkert kemur fram um að hópur björgunarmanna hafi orðið var við katlana, en leið þeirra virðist þó hafa legið nærri því þar sem katlarnir eru nú (Andrés Kristjánsson, 1963; Jakob F. Ásgeirsson, 1985). Leiðir nokkurra þeirra leiðangra sem fjallað er um hér að ofan eru sýndar á 7. mynd, en eðli málsins samkvæmt eru staðsetningar æði ónákvæmar.

Árlegar vorferðir Jöklarannsóknafélagsins hófust 1953 en leiðir hópanna lágu ekki að Skaftárkötlum fyrstu árin (Sigurður Þórarinnsson, 1953, 1955, 1956; Jón Eyþórsson, 1954, 1955). Í lýsingum þessara leiðangra allra er Skaftárkatla hvergi getið né kemur fram að orðið hafi vart við dældir í jöklinum. Vert er þó að taka fram að þó engra dælda sé getið í frásögnum af ferðum fyrir 1960, sannar það ekkert um hvort sigkatlar hafi verið á þessu svæði. Þó er vandséð að hægt væri að fara endurtekið um þetta svæði nú án þess að verða rækilega var við Skaftárkatla. Til þess eru þeir of stórir og áberandi. Því er líklegt að katlarnir hafi verið mun minni um sig langt fram eftir 20. öld en þeir hafa verið síðustu áratugi. Mun ótvíræðari ályktanir er hinsvegar hægt að draga af myndum teknum úr flugvélum, loft- og skámyndum.



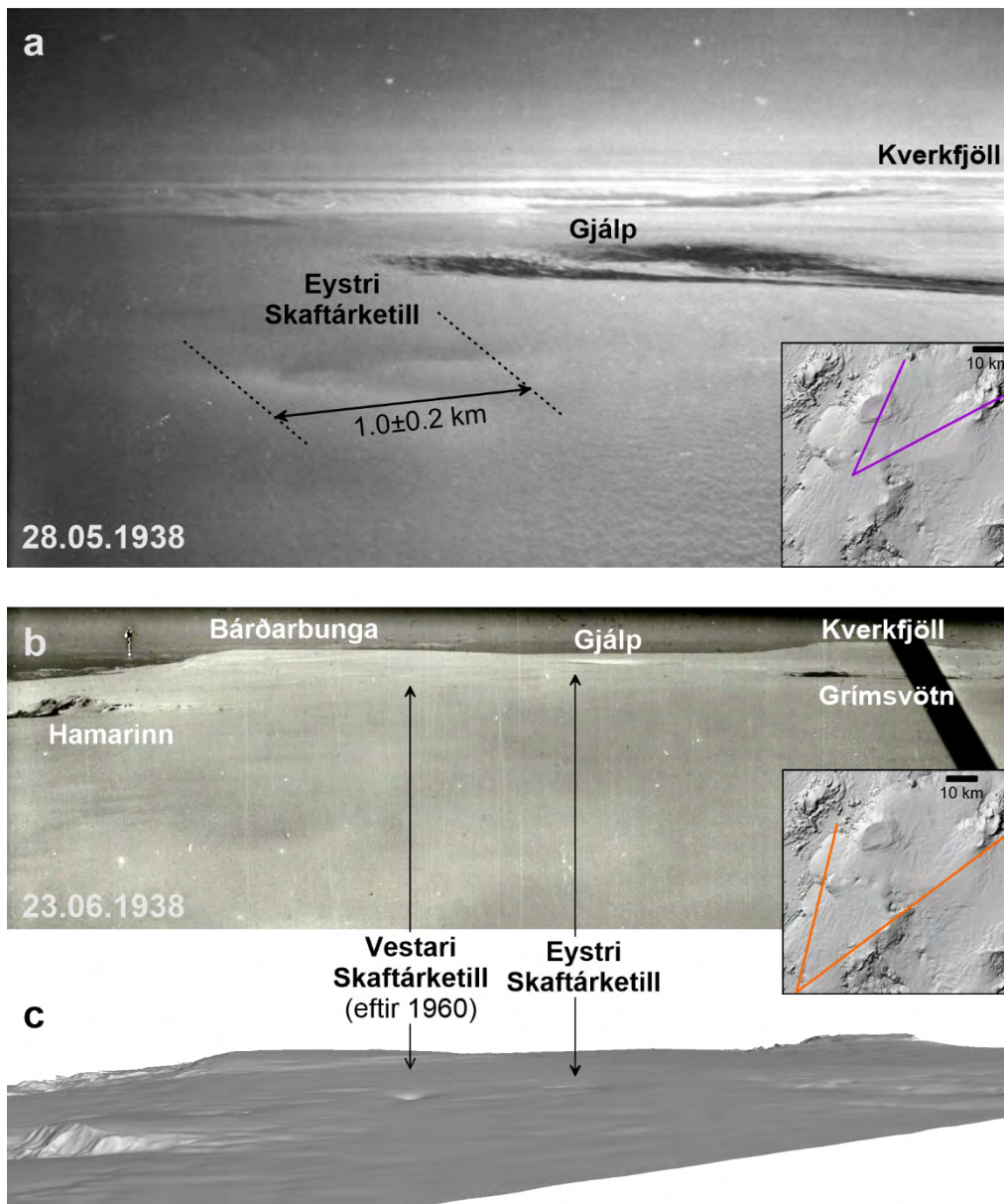
Mynd 7. Leiðir Watts og samferðamanna yfir Vatnajökul 1875; Fransk-íslenska leiðangursins 1951; og leiðangurs sem farin var vorið 1951 til að bjarga skíðaflugvél af Bárðarbunga. Óvissa í staðsetningu er veruleg. Allar leiðirnar liggja nærri þar sem Skaftárkatlar eru í dag, en katlanna er ekki getið í lýsingum.

### 3.3 Myndataka úr lofti 1938–1955

Fyrsta þekkta flugferð inn yfir Vatnajökul var farin í maí 1938, en þá var flogið yfir Grímsvötn og svæðið norðan og vestan þeirra til að kanna upptök óvænts Skeiðarárhlaups (Thorarinsson & Sigurðsson, 1947). Ferðina fóru Steinþór Sigurðsson, Pálmi Hannesson og Agnar Kofoed-Hansen í afbragsgóðu skyggni. Þeir náðu góðum myndum af sigdældinni sem varð til í Gjálpi við gos undir jökli norðan Grímsvatna (Magnús T. Guðmundsson & Helgi Björnsson, 1993), á sama stað gaus svo aftur í október 1996. Á einni mynda Steinþórs úr þessu flugi er horft til Gjálpar úr suðvestri (8. mynd). Á henni sést sigdæld þar sem Eystri-Skaftárketill er nú. Dældin er ósprungin og mun minni um sig en seinna varð. Er þetta fyrsta mynd sem vitað er um af katlinum og fyrsta beina sönnunin um sigketil á þessum stað.

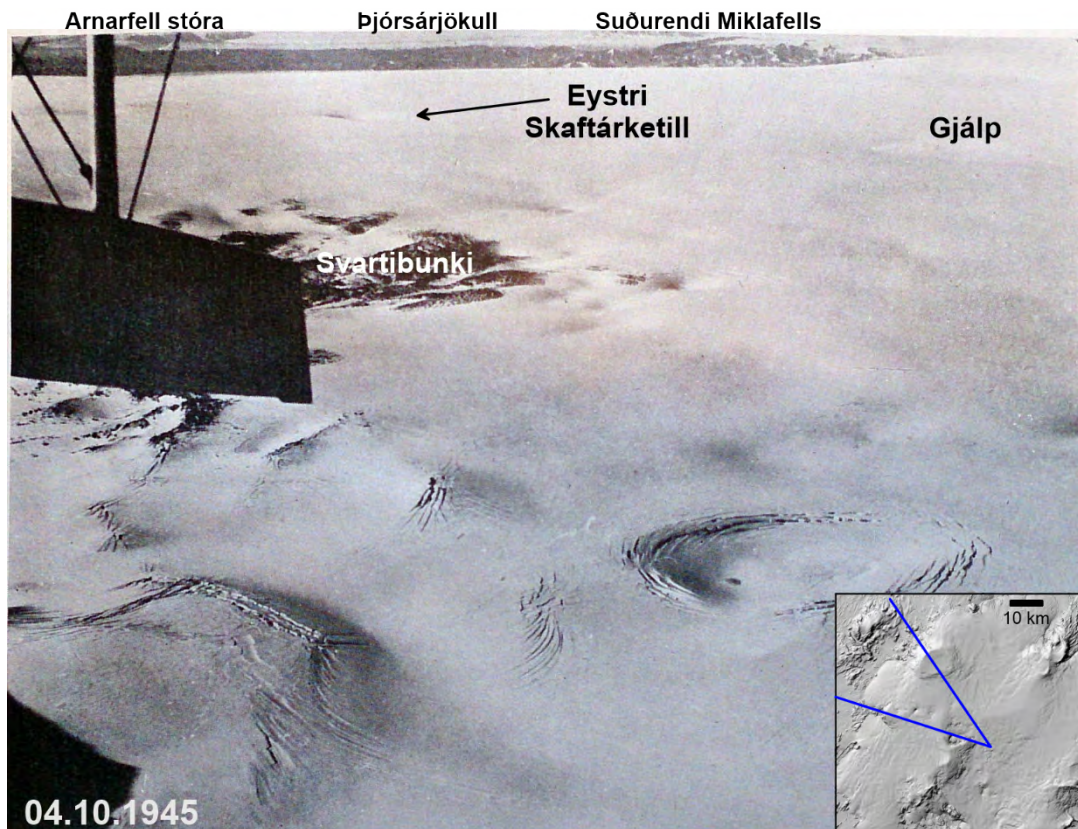
Sumarið 1938 voru teknar skámyndir úr flugvél af Vatnajökli og fleiri svæðum til að nota við gerð korta af landinu (Nørlund, 1944). Til eru myndir frá 23. júní sem voru teknar í góðu skyggni og var flugvélin staðsett u.þ.b. yfir sporði Skaftárjökuls. Á einni myndinni (8. mynd) sést Hamarinn, Bárðarbunga, Gjálpi, Kverkfjöll og Grímsvötn en ekki er hægt að greina Skaftárkatla. Á 8. mynd er sýnd tölvugerð þrívíddarmynd af jöklinum um 2010 undir sama sjónarhorni og með skyggingu sem fellur að sólarhæð þegar ljósmyndin var tekin. Skaftárkatlar eru áberandi á þrívíddarmyndinni en ekki hægt að greina þá á ljósmyndinni frá 1938. Þetta verður varla skýrt öðruvísi en að miklar breytingar hafi orðið og katlarnir mjög færst í aukana eftir 1938.

Þann 4. október 1945 fór flugvél yfir Vatnajökul til að kanna ummerki í Grímsvötnum vegna hlaupsins sem þá var nýafstaðið. Á einni af myndum Steinþórs Sigurðssonar (9. mynd) sér yfir norðanverð Grímsvötn og jökulinn milli Hamarsins og Bárðarbungu (Thorarinsson & Sigurðsson, 1947). Á myndinni sést móta fyrir Eystri-Skaftárkatli. Pálmi Hannesson var einnig í þessari flugferð og nefnir hann þetta ketilsig í dagbók sinni. Jafnframt tekur hann fram að í flugi sem farið var í september í sömu erindagerðum hafi þetta sig ekki sést. Einnig segir hann að sigið hafi ekki sést í flugferð yfir jökulinn 1941 (Pálmi Hannesson, 1958). Í dagbókum Jóns Eyþórssonar um flugferð yfir Vatnajökul 1954 er að finna teikningu af Eystri-Skaftárkatli. Í lok Skaftárhlaupsins í september 1955 var flogið inn á Vatnajökul til að grennslast fyrir um upptökin. Þá tók Sigurður Þórarinnsson ljósmyndir af katlinum (2. mynd d) og var þar með í fyrsta sinn ljós tenging milli Skaftárkatla og hlaupa í Skaftá.



Mynd 8. (a) Ljósmynd Steinþórs Sigurðssonar 28. maí 1938 af þeim stað þar sem gaus 1938 og síðar hlaut nafnið Gjalp. Í forgrunni er grunn sigdæld, um 1 km í þvermál þar sem Eystri-Skaftárketilinn er núna. (b) Ljósmynd Herforingjaráðsins af vesturhluta Vatnajökuls, tekin 23. júní 1938. Horft er til Hamarsins, Bárðarbungu og til hægri mótara fyrir dældinni yfir Gjalp, en þar gaus undir jökli vorið 1938. Lengst til hægri eru Kverkfjöll og Grímsvötn. (c) Þrívíddarmynd af lidar-landlíkani af Vatnajökli frá 2010–2011 frá sama sjónarhorni og mynd Herforingjaráðsins.



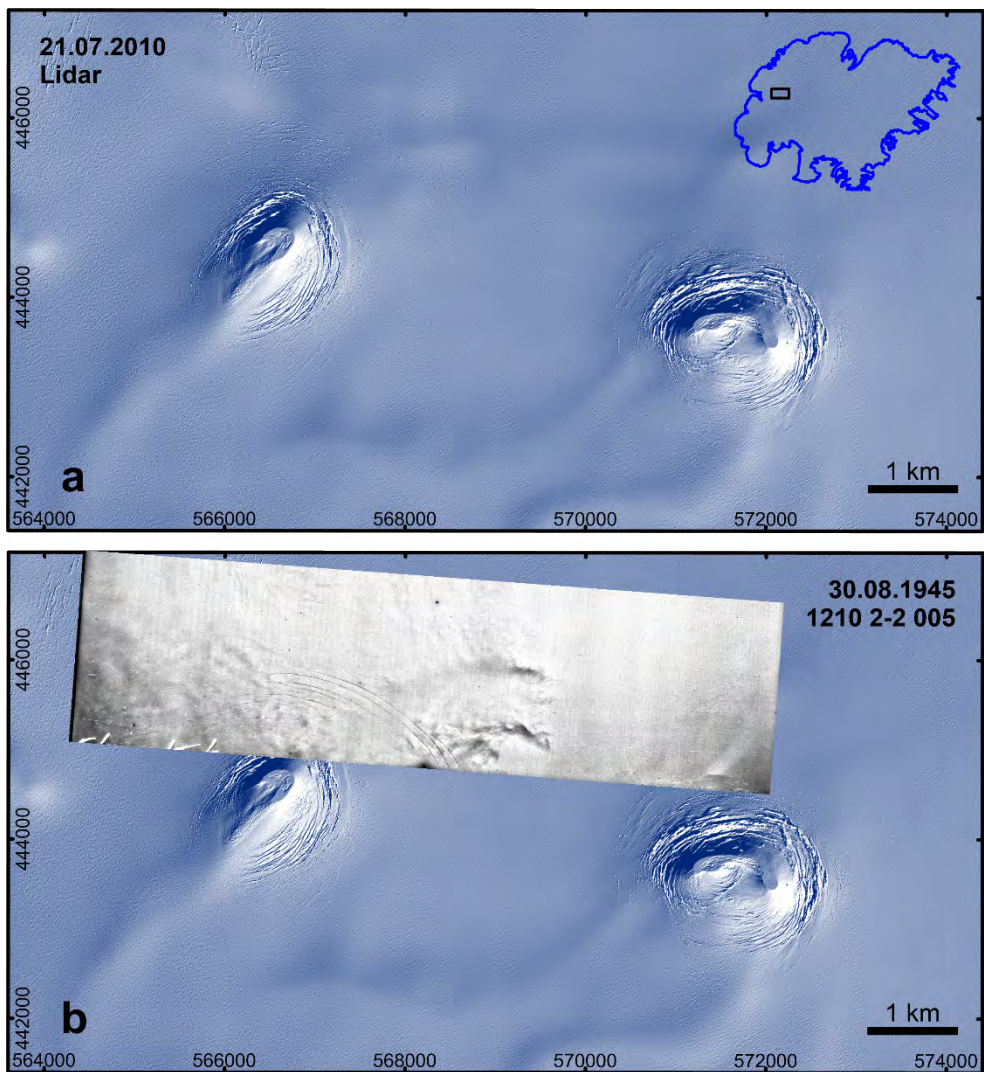


Mynd 9. Ljósmynd Steinþórs Sigurðssonar yfir norðurhluta Grímsvatna 4. október 1945 að loknu Grímsvatnahlaupi. Nær eru sigkatlar í Grímsvötnum. Fjær er svæðið milli Hamarsins og Bárðarbungu. Eystri Skaftárketill er ofarlega vinstra megin við miðja mynd. Þvermál ketilsins er um 1 kílómetri á myndinni, en samkvæmt dagbók Pálma Hannessonar var ketillinn þá nýsiginn.

### 3.4 Skaftárkatlar á loftmyndum 1945–1997

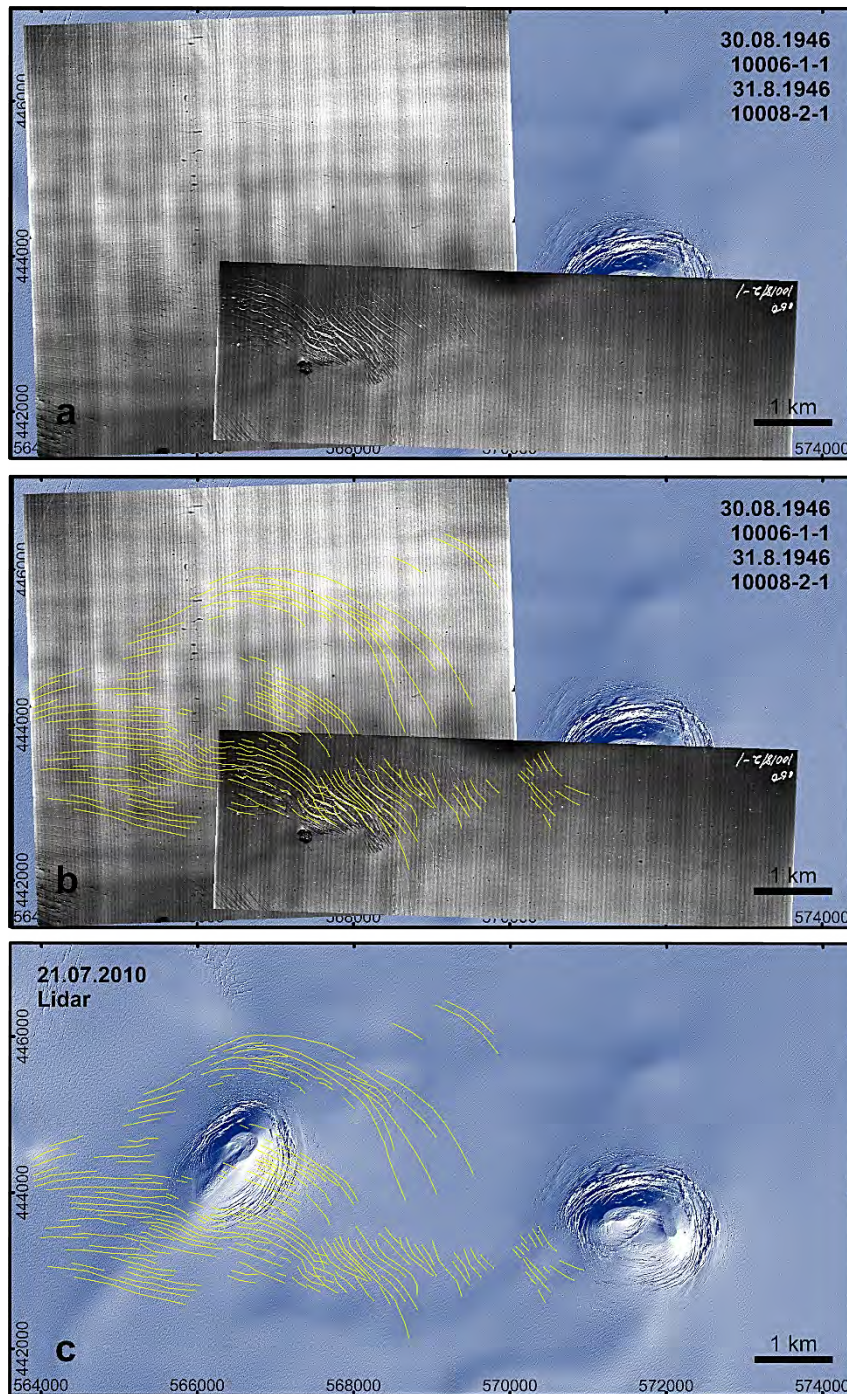
Lóðréttar loftmyndir sem ná yfir Skaftárkatla að hluta eða öllu leyti hafa verið teknar öðru hvoru allt frá 1945. Fyrstu myndirnar eru frá 1945 og 1946. Næst voru myndir teknar 1954 og 1960 og síðan aftur 1972 og 1984. Ekki ná allar þessar myndir yfir báða katlana en a.m.k. hluti þeirra sést í öll skiptin. Hluti loftmyndanna er sýndur hér (10.–13. mynd).

Fyrstu myndirnar, frá 30. ágúst 1945 ná að hluta yfir svæðið þar sem Skaftárkatlar eru nú. Ein myndin nær yfir nyrsta hluta Vestari-Skaftárketils (10. mynd, b). Ketillinn sést ekki á myndinni, en miklar bogadregnar sprungur með meginstefnu VNV-ASA eru norðan hans. Þessar sprungur tengjast framhlaupi Tungnaár- og Sylgjujökuls en ekki katlinum sjálfum. Myndin nær ekki yfir eystri ketilinn. Næstu myndir voru teknar réttu ári síðar, 30. ágúst 1946 (11. mynd, a og b). Þær þekja m.a. vel það svæði þar sem vestari ketillinn er nú. Svæðið allt er fremur

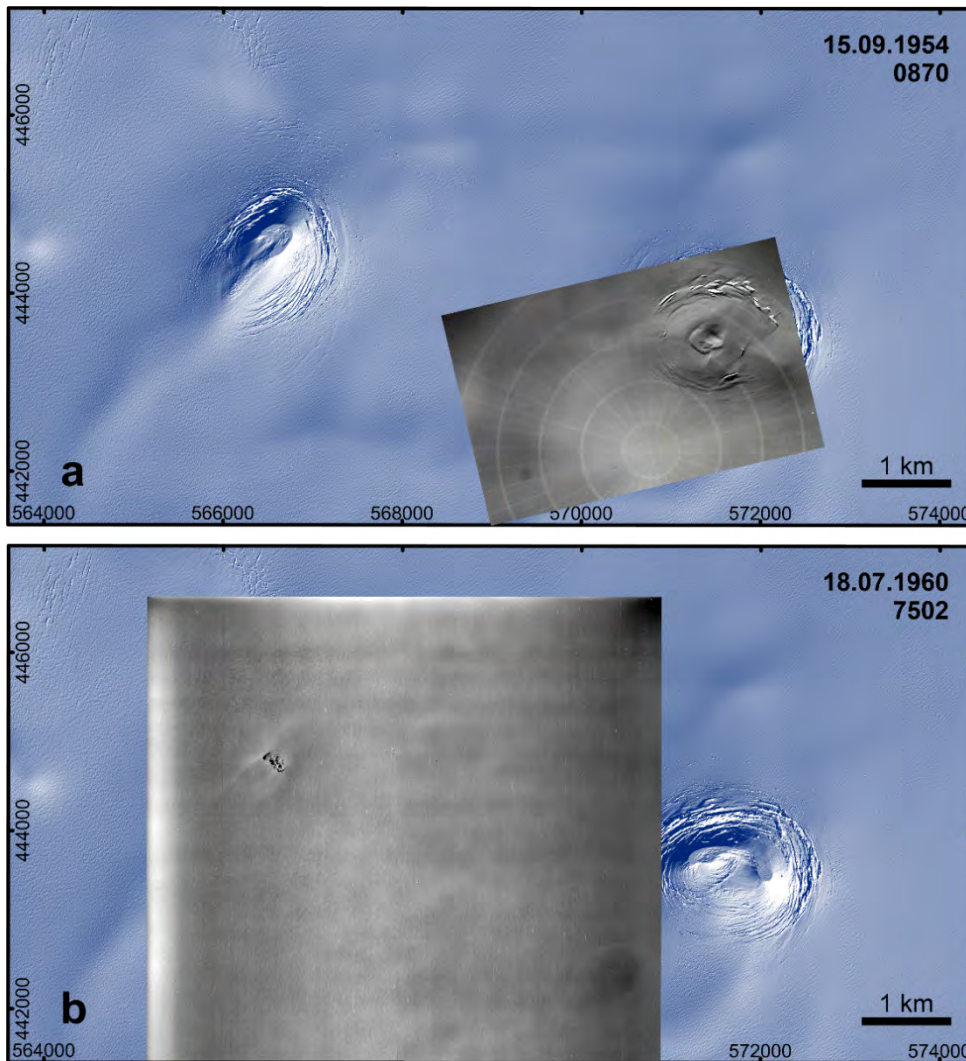


Mynd 10. (a) Kort af Skaftárkötlum, skyggt án hæðarlína, byggt á Lidar frá 2010–2011. (b) Loftmynd AMS tekin 30. ágúst 1945 lögð ofan á lidarkortið. Suðurhluti myndar nær yfir það svæði þar sem norðurjaðar vestari ketilsins er í dag. Bogadregnar langar sprungur tengjast framhlaupi Tungnaár- og Sylgjujökuls en ekki katlinum (sjá 9. mynd).

sprungið á myndinni og sömu sprungur og 1945 sjást einnig hér. Þar sem vestari ketillinn er nú, er fremur sprungulítið yfirborð, en þó liggja VNV-ASA sprungur yfir það. Ekki mótast fyrir dæld, hvað þá mynstri hring sprungna. VNA-ASA sprungurnar tengjast framhlaupi Tungnaárjökuls, Sylgjujökuls og Skaftárjökuls 1945–1946 og orsakast ekki af jarðhita. Fínlegar sprungur með bogamynstri eru í suðvesturjaðri Eystri-Skaftárketils á myndunum frá 1946.



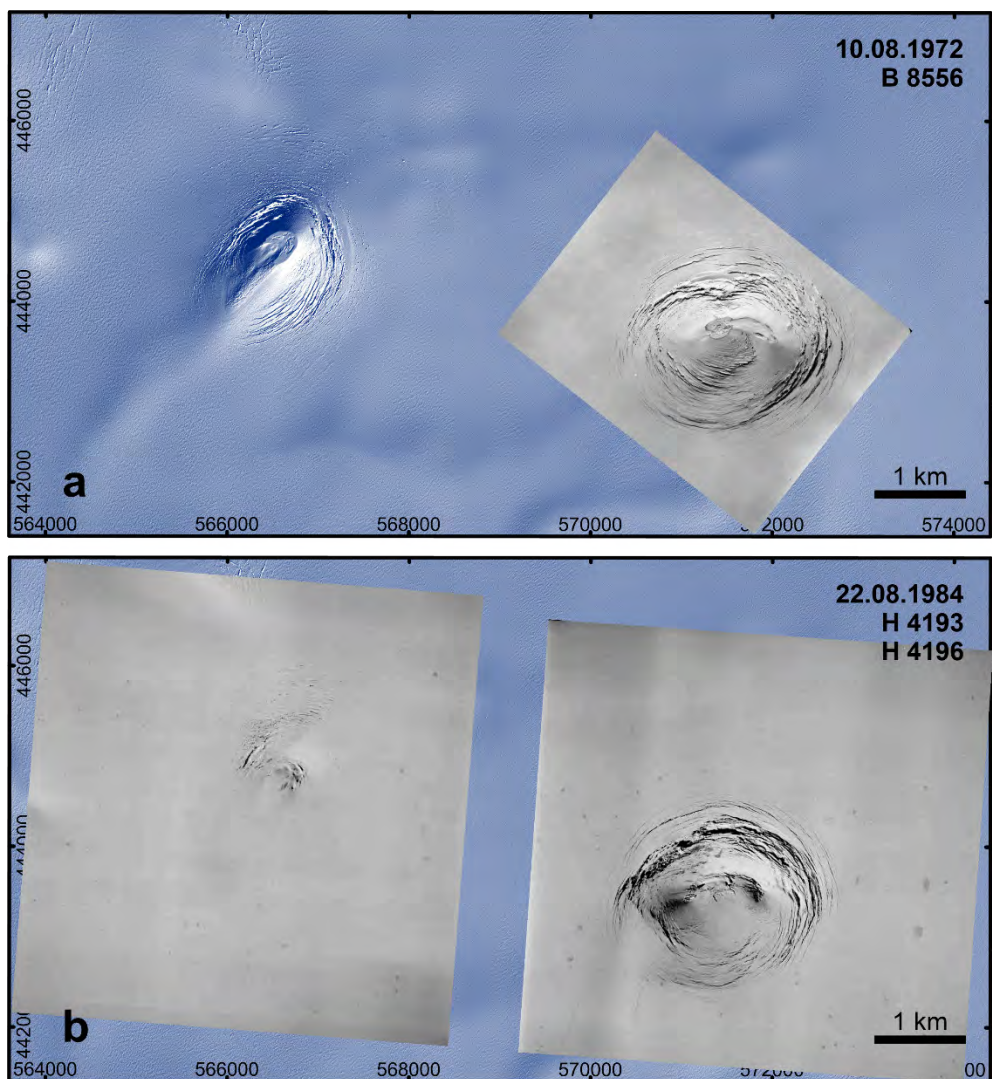
Mynd 11. Loftmyndir 30. og 31. ágúst 1946 (a) lagðar ofan á Lidarkortið frá 2010. Sprungumynstrið á myndunum frá í ágúst 1946 sýnir engin merki eru um hringsprungur þar sem vestari ketillinn er nú, aðeins bogadregnar langar sprungur sem tengjast framhlaupi Tungnaár- og Sylgjujökuls. Litlar boglaga sprungur eru í suðvesturjaðri eystri ketilsins. (b) Sprungumynstrið á loftmyndunum er dregið fram með gulum línun. (c) Sprungumynstrið 1946 lagt ofan á lidarkortið frá 2010. Vestari ketillinn kemur ekki fram í mynstrinu og því ljóst að hann var ekki til á þessum tíma. Loftmyndin sem sprungumynstrið er teiknað eftir nær aðeins yfir syðsta hluta eystri ketilsins.



Mynd 12. (a) Loftmynd frá 15. september 1954. Hér er eystri ketillinn orðinn greinilegur í jöklinum, en hann hljóp um ári síðar, í byrjun september 1955. (b) Fyrstu öruggu merkin um vestari ketilinn, á loftmynd frá 18. júlí 1960.

Landmælingar Íslands tóku loftmyndir af Grímsvötnum 15. september 1954 auk þess að taka myndir af Eystri-Skaftárkatli og Pálsfjalli og nágrenni þess. Eystri ketillinn er á þessum myndum mun stærri en 1938 og 1945 (12. mynd, a). Jafnframt er farið að móta fyrir stórum sprungum með lóðréttum stalli mót suðri í norðurjaðri ketilsins.

Fyrsta loftmyndin þar sem Vestari-Skaftárketill sést var tekin 18. júlí 1960 (12. mynd, b). Ljóst er að umskipti hafa orðið frá 1946. Greinilega sést móta fyrir dældinni 1960 en hún er sprungulaus. Greinilegur ketilbotn sést með vísi að kolli eða þrýstihrygg í miðju og litlum leysingapollum umhverfis. Eystri-Skaftárketill hefur á myndum frá 1972 tekið á sig það form sem hann hélt að mestu fram að hlaupinu 2015 (13. mynd, a). Sama er uppi á teningnum fyrir myndirnar frá 1984 (13. mynd, b). Þar er vestari ketillinn einnig nokkurn veginn í þeirri mynd sem hann hefur haldið undanfarna áratugi.



Mynd 13. (a) Eystri ketillinn skömmu eftir hlaup 1972. Hér er ketillinn mun stærri en 1955 og hefur náð sömu stærð og hann hafði fram til 2015. (b) Skaftárkatlar í maí 1984. Hér sjást báðir katlarnir og stærð beggja nærri því sem var fyrir 2015.

### 3.5 Hæðarbreytingar og sig í hlaupum eftir 1997

Frá og með 1997 hefur hæð í botni Skaftárkatla verið mæld a.m.k. einu sinni eða tvisvar á ári ef frá er talið árið 2009 (sjá 5. mynd). Línuritið sýnir að dýpt Vestari-Skaftárketils vex með tímanum og heildarsig í hverju hlaupi virðist fara vaxandi. Botn ketilsins var yfir 1460 m y.s. fram yfir aldamótin 2000, fer síðan heldur lækkandi og endar í 1420–1430 m á árunum 2012–2016. Á sama tíma lækkar sú hæð sem ketilbotninn rís í áður en hleypur undan katlinum úr 1540–1550 m y.s. í 1520–1530 m y.s. Veruleg breyting verður síðan 2018, þegar botninn sígur 20–25 m dýpra en áður var þekkt. Þetta bendir til þess að þykkt íssins yfir miðju ketilsins hafi heldur minnkað á

tímabilinu 1997–2016 en síðan hafi hellan þynnst verulega milli 2016 og 2018. Algengt er að mesta sig í katlinum í hlaupum sé 70–100 m fram til 2016, en það nær 125 m 2018.

Í eystri katlinum er þróunin ekki eins eindregin hvað varðar sig í hlaupum (5. mynd). Botninn rís oftast upp í 1580–1590 m y.s. fyrir hlaup en sígur síðan niður í 1440–1480 m. Mesta sig mældist 2006; úr um 1600 m y.s. niður í 1445 m eða um 155 m. Í þessu hlaupi færðist útfallið frá suðvesturhluta ketilsins í suðausturhlutann. Mesta hæð í upphafi hlaupa fer úr 1595–1600 m y.s. niður í 1580–1585 m y.s. Fjallað er um hvernig þykkt íshellu hefur breyst á tímabilinu 2010–2018 hér á eftir (4.2.3).

### **3.6 Hlaup í Skaftá frá 1955**

Á 6. mynd er sýnt rúmmál vatns sem rann fram í hverju hlaupi frá 1955 að frádregnu grunnrennsli. Grafið er byggt á mælingum Vatnamælinga Orkustofnunar og síðar Veðurstofunnar (Snorri Zóphóniásson, 2002; Auður Atladóttir o.fl., 2013; gögn frá VÍ). Fyrsta hlaupið sem kom í Skaftá eftir að vatnshæðarmæli var komið fyrir við Skaftárdal kom í september 1955 (Sigurður Þórarinsson & Sigurjón Rist, 1955). Næsta hlaup kom 1957 og síðan 1960. Svo er að sjá að milli 1970 og 1985 komi fremur tíð og rúmtaksmikil hlaup frá eystri katlinum (6. mynd), síðan komi heldur minni hlaup eftir það að undanteknu hlaupinu 1995 og hlaupinu 2015. Samtals hefur hlaupið 26 sinnum úr eystri katlinum frá 1955

Hlaup sem eignað er vestari katlinum varð 1968 en fyrsta staðfesta hlaupið varð 1971 (Helgi Björnsson, 1977) en þá voru teknar ljósmyndir af katlinum úr flugvél. Síðan hafa hlaup undan vestari katlinum verið tíð en 28 hlaup eru eignuð honum á 50 ára tímabili frá 1968.

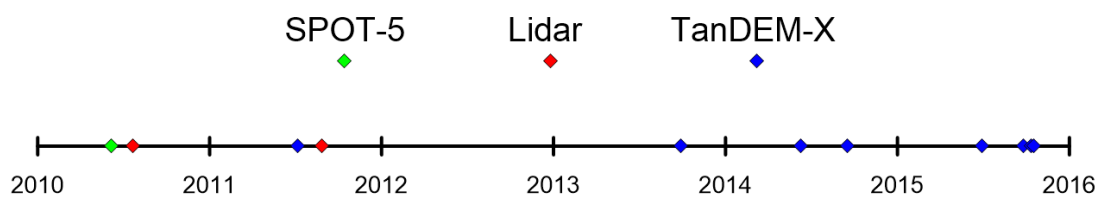
## 4 Eystri-Skaftárketill 2010–2018

### 4.1 Greining hæðarbreytinga og úrvinnsla íssjármælinga

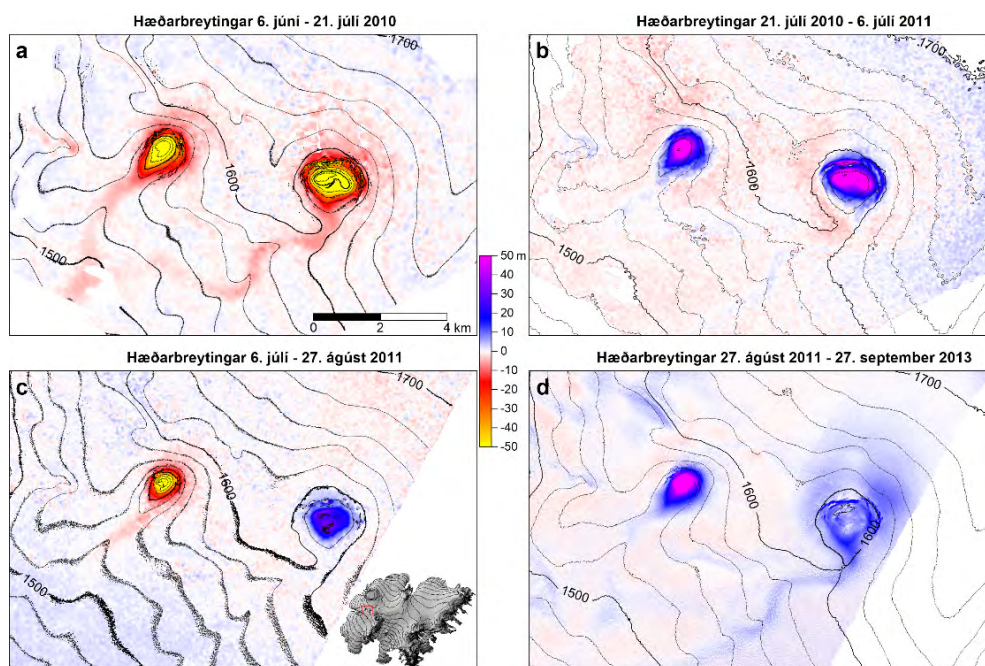
Hér er gerð grein fyrir því hvernig samfelld hæðarkort voru nýtt til að rannsaka þróun yfirborðs Skaftárkatla, einkum þess eystri, á tímabilinu 2010–2015 og hvernig þau gögn voru nýtt til að draga fram upplýsingar um afl Eystri-Skaftárketilsins og leka frá honum á tímabilinu 2010 til 2015. Einnig er greint frá því hvernig hæðarsniðmælingar (GPS og flugratsjárnið) af yfirborði eystri ketilsins nýtast til að skoða þróun hans á tímabilinu 2015–2018. Að lokum er því lýst hvernig íssjármælingar voru nýttar bæði til að gera hæðarkort af jökulbotninum undir Eystri-Skaftárkatli og nágreppi sem og kortleggja vatnsbóluna undir katlinum á hverju vori frá 2014 til 2018. Niðurstöður eru settar fram í kafla 4.2. Þar eru tölur um breytilega stærð vatnslags við botninn, jarðhitaafli og leka undan katlinum.

#### 4.1.1 Hæðarkort 2010–2015

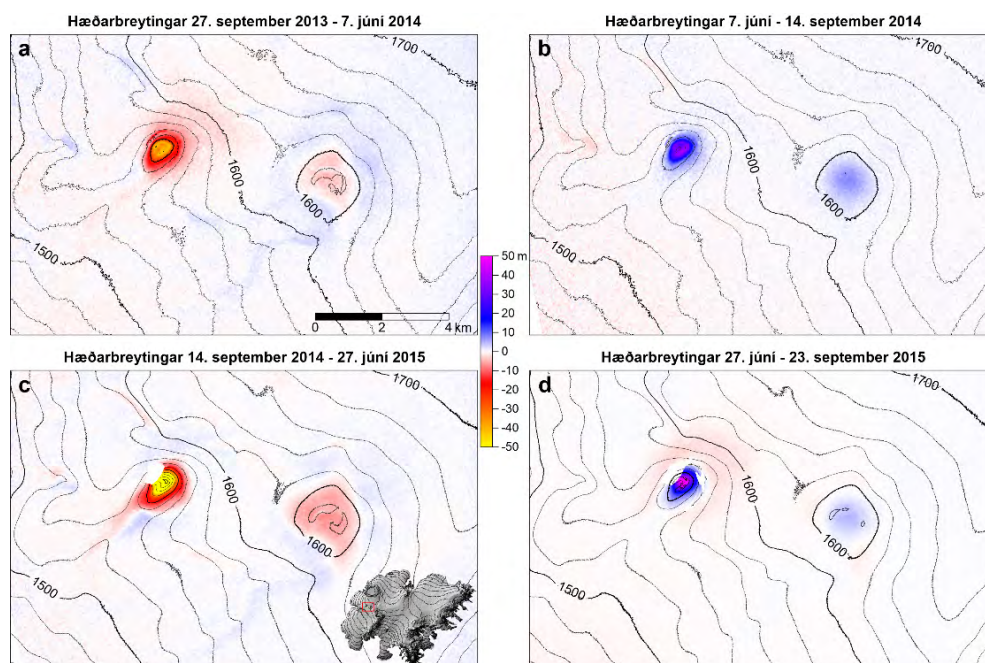
Greining á hæðarbreytingum í hlaupunum úr eystri katlinum 2010 og 2015 og þróun Skaftárkatla á milli þessara hlaupa, byggir á 10 hæðarkortum af ólíkum uppruna (14. mynd). Til að draga fram breytingar sem einskorðast við katlana sjálfa var hæðarkortið frá miðju tímabilinu (september 2013) leiðrétt með fastri hæðarhliðrun. Hliðrunin var ákvörðuð þannig að kortið félli sem best að hæð GPS-landmælingasniða í nágreppi katlanna sem mæld voru í afkomumælingaferð á Vatnajökli í október 2013. Öll hin hæðarkortin voru síðan leiðrétt með fastri hliðrun þannig að landhæð utan katlanna er nokkurn veginn sú sama í öllum hæðarkortum. Með þessu móti nást fram hæðarbreytingar í kötlunum (15.–17. mynd) sem eru að mestu óháðar árstíðabundnum sveiflum í yfirborðshæð jökulsins.



Mynd 14. Tímasetning og upprunni hæðarkorta sem nýtt voru til að skoða hæðarbreytingar á tímabilunum 2010–2015. Þau eru gerð eftir SPOT-5 gervihnattaljósmyndum, skönnun með leisi úr flugvél (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013), oft kallað lidar, og TanDEM-X hæðarkort sem unnin er eftir radarbylgjuvíxlmyndum frá TerraSAR-X gervitunglum þýsku geimferðastofnunarinnar (DLR).

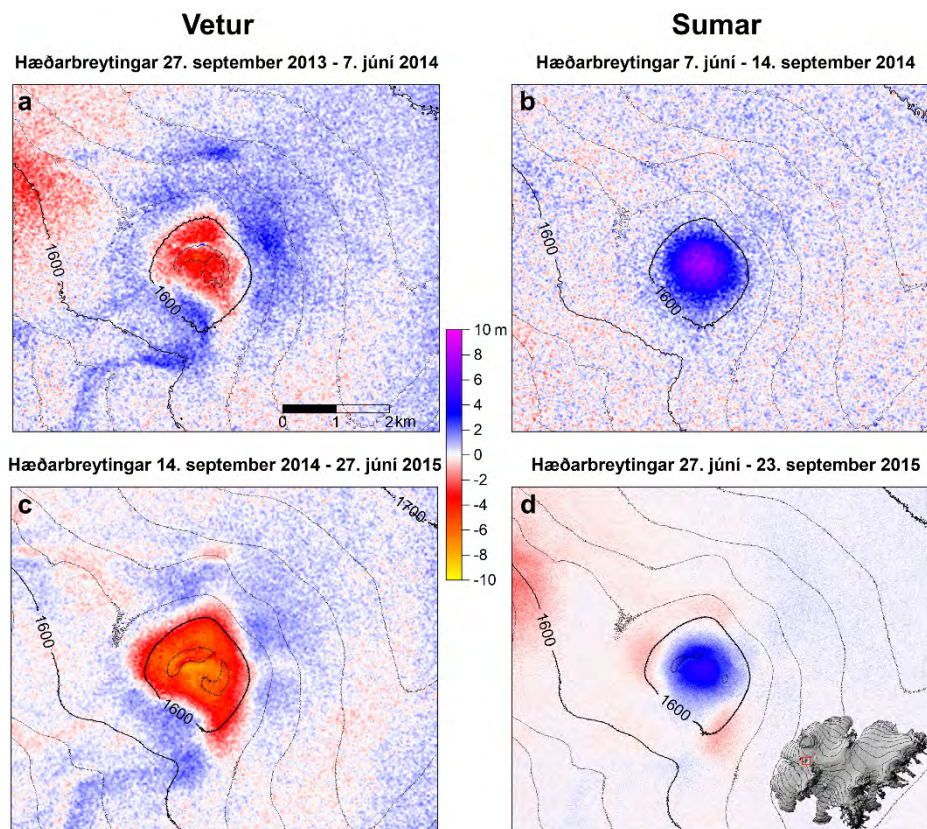


Mynd 15. (a-d) Hæðarbreytingar í Skaftárkötunum og næsta nágrenni þeirra frá vori 2010 til hausti 2013, sundurliðað í fjögur tímabil, að frádregnum jafnaðar-hæðarbreytingum utan katlanna. Ofan á hverja mynd hefur verið lagt hæðarlínukort (20 m milli lína) sem svarar til seinni dagsetningar hvers tímabils. Á þeim má sjá hæðarbreytingar vegna hlaupa úr báðum kötunum sumarið 2010 (a) og úr vestari katlinum sumarið 2011 (c).



Mynd 16. (a-d) Hæðarbreytingar í Skaftárkötunum og næsta nágrenni frá hausti 2013 til hausti 2015 rétt fyrir hlaup úr eystri katlinum, sundurliðaðar í vetur (a og c) og sumur (b og d).



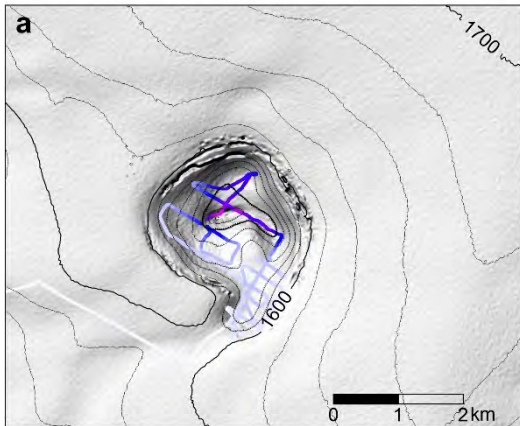


Mynd 17. (a-d) Hæðarbreytingar í Eystri Skaftárkatlinum og næsta nágrenni frá hausti 2013 til hausts 2015 með þrengri litakvarða en á 16. mynd. Hæðarbreytingar eru sundurliðaðar í vetur (a og c) og sumar (b og d).

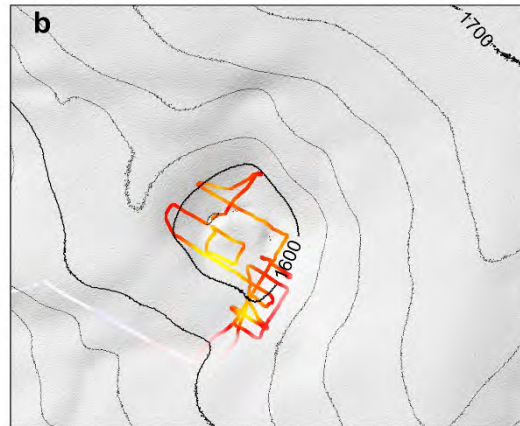
#### 4.1.2 Hæðarsniðmælingar 2016–2018

Síðasta tiltæka samfellda hæðarkortið af Eystri-Skaftárkatli er frá því í október 2015, rétt eftir jökulhlaup. GPS-mælingar sem gerðar hafa verið í tengslum við árvissar íssjármælingar eru sem stendur bestu fáanlegu gögnin til að skoða hæðarbreytingar í katlinum milli tveggja síðustu jökulhlaupa (18.–19. mynd). Einnig voru mæld GPS-snið innan ketilsins þann 15. desember, 2017 og 18. maí, 2018.

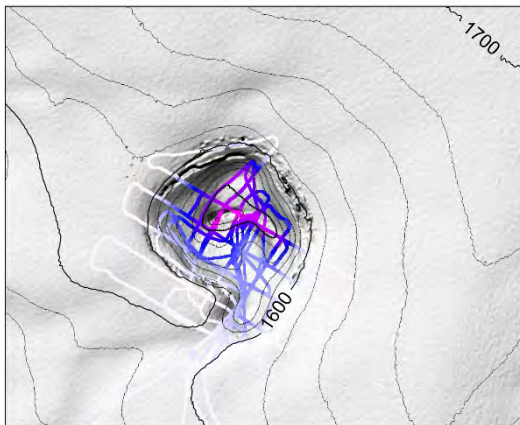
Hæðarbreytingar 10. október 2015 - 9. júní 2016



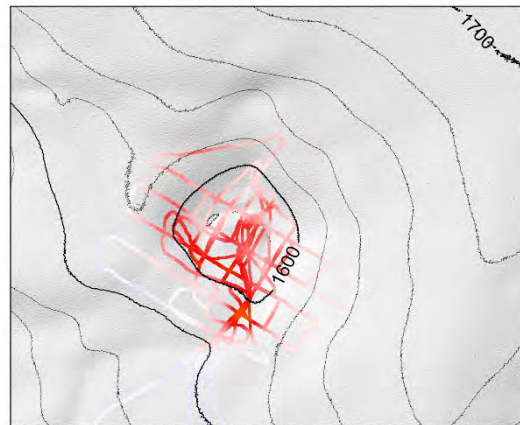
Hæðarbreytingar 23. september 2015 - 9. júní 2016



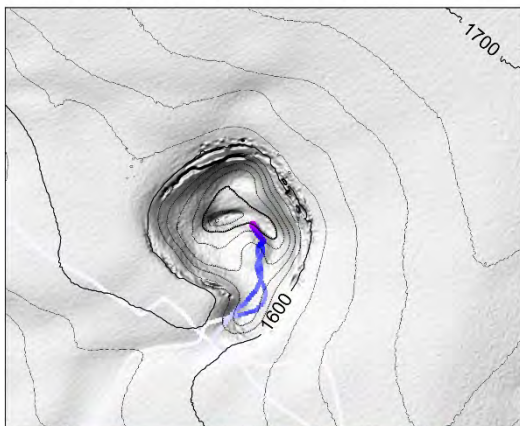
Hæðarbreytingar 10. október 2015 - 7. júní 2017



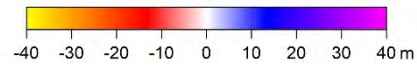
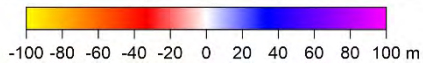
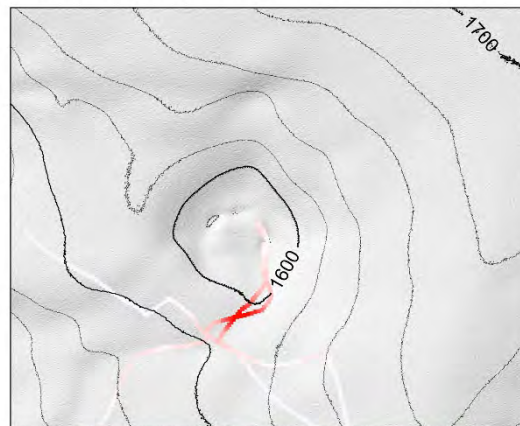
Hæðarbreytingar 23. september 2015 - 7. júní 2017



Hæðarbreytingar 10. okt. 2015 - 15. des. 2017

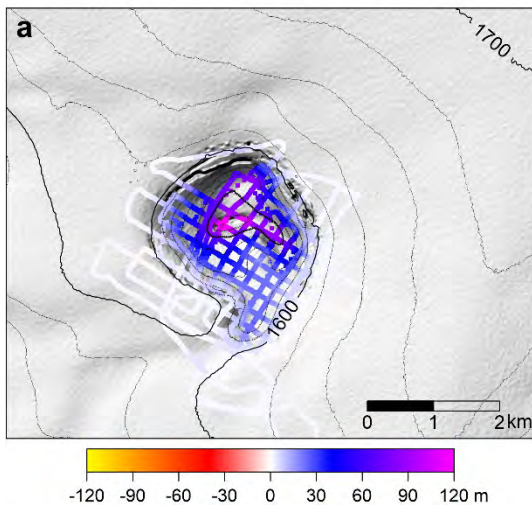


Hæðarbreytingar 23. sept. 2015 - 15. des. 2017

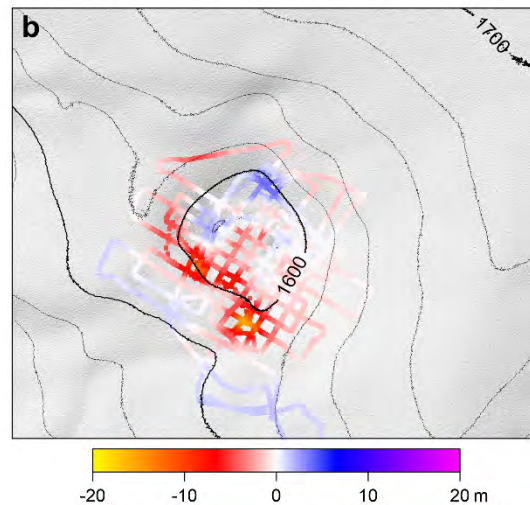


Mynd 18. Hæð GPS-sniðmælinga frá júní 2016, júní 2017 og desember 2017 borin saman við TanDEM-X hæðarkort frá 10. október 2015, rétt eftir síðasta hlaup (a) og 23. september 2015, rétt fyrir síðasta hlaup (b). Bæði hæðarkort eru leiðrétt með samanburði við GPS snið frá hausti 2015. Vínrautt og blátt sýna nettó hækkun yfir gefið tímabil, rauðleitt og gult nettó lækkun.

Hæðarbreytingar 10. október 2015 - 4. júní 2018



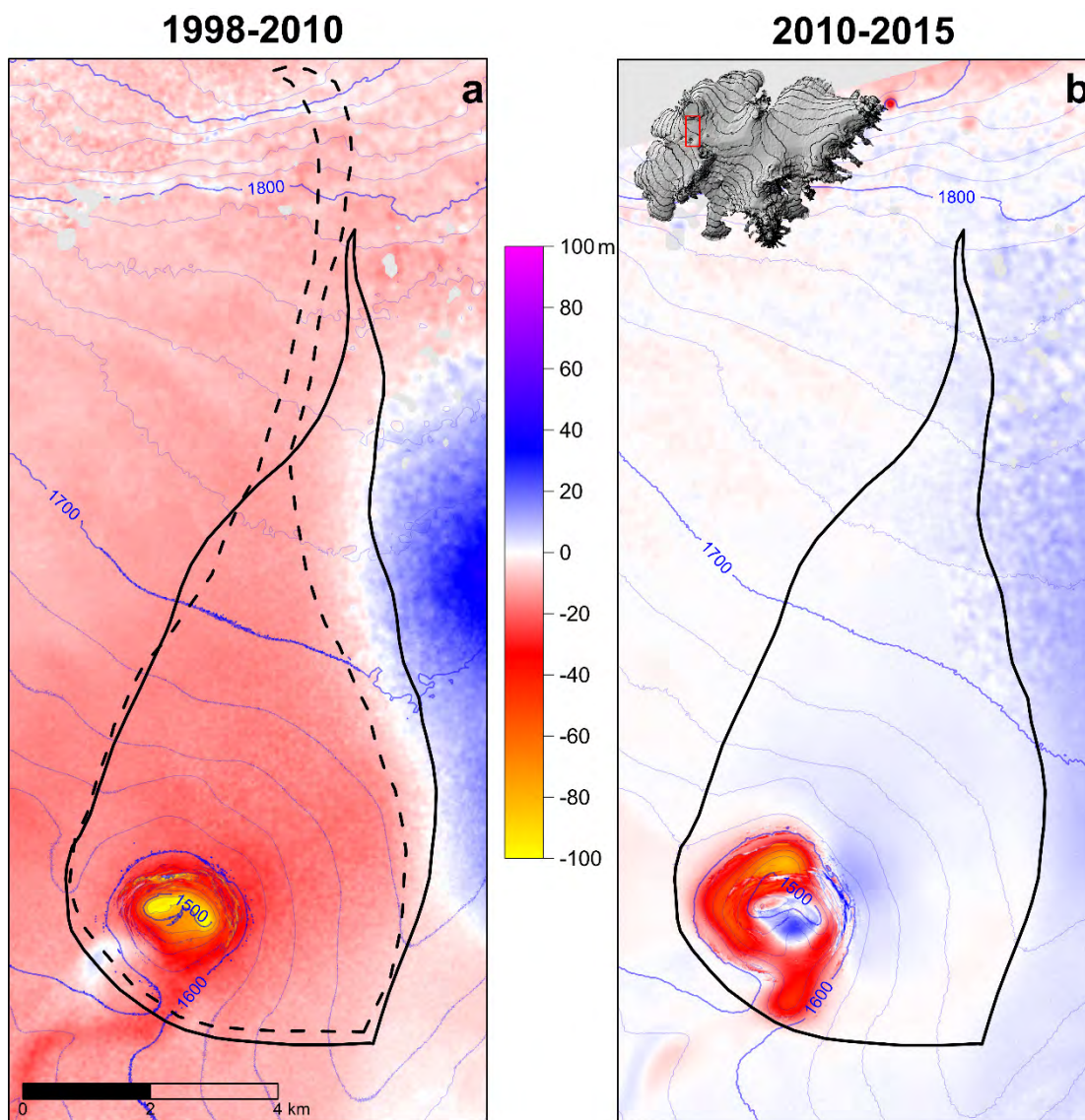
Hæðarbreytingar 23. september 2015 - 4. júní 2018



Mynd 19. Hæð GPS-sniðmælinga frá júní 2018 borin saman við TanDEM-X hæðarkort frá 10. október 2015, rétt eftir hlaup (a), og 23. september 2015, rétt fyrir hlaup (b). Bæði hæðarkort eru leiðrétt með samanburði við GPS snið frá hausti 2015. Vínrautt og blátt sýna nettó hækkun yfir gefið tímabil, rauðleitt og gult nettó lækkun. Athugið að litakvarðar eru aðrir en á 19. mynd, þ.e. víðari á a en þrengri á b.

### 4.1.3 Afkoma og afl

Heildarafkoma á ísasviði Skaftárkatla frá 2010 til 2015 er metin út frá hæðarbreytingu yfirborðs yfir það tímabil. Gert var kort af yfirborði ísasviðs Eystri-Skaftárketils árið 2010, samsett úr lidarhæðarkorti frá 21. júlí 2010, (af meginhluta ísasviðs um 3 vikum eftir hlaup) og SPOT-5 hæðarkorti einnig frá sumri 2010 (norðurendi ísasviðs). Yfirborðskort 2015 er TanDEM-X hæðarkort (mæling frá gervitungli) frá 10. október 2015 (um viku eftir hlaup). Þessi hæðarkort voru leiðrétt að hæð GPS-sniðmælinga utan katla haustið 2010 annars vegar og 2015 hins vegar að fráreginni þykkt nýsnævis þegar GPS mælingar voru gerðar (20. mynd). Heildarrúmmálsbreyting jökulsins á tímabilinu, innan ísasviðs ketilsins, þegar leiðrétt hefur verið fyrir því vatnsmagni sem var undir katlinum í hvort skipti þegar hæðarkortin voru mæld, gefur heildarafkomu ( $B_h$ ) ísasviðs ketilsins 2010 til 2015. Afkoma svæðisins ræðst af yfirborðsafkomu ísasviðsins ( $B_y$ ) og afkomu við jökulbotn ( $B_b$ ), þ.e.  $B_h = B_y + B_b$ . Botnafkoman (botnbráð vegna jarðhita, því neikvæð),  $B_b = B_h - B_y$ , er í réttu hlutfalli við meðal afl jarðhitans undir katlinum á tímabilinu. Yfirborðsafkoma svæðisins frá hausti 2010 til hausts 2015 er áætluð út frá árlegum afkomukortum (t.d. Finnur Pálsson o.fl., 2017) sem brúuð eru út frá stökum afkomumælipunktum í grennd ketilsins. Í 1. töflu má sjá rúmmálsstölur sem úr þessu mati fást ásamt áætluðum óvissum. Óvissa meðalhæðarbreytingar ísasviðsins á tímabilinu er metin 0.5 m. Óvissa yfirborðsafkomu er metin 1 m vatnsígildis ( $m_{vg}$ ) að jafnaði yfir íssviðið eða 0.2  $m_{vg}/ár$ .



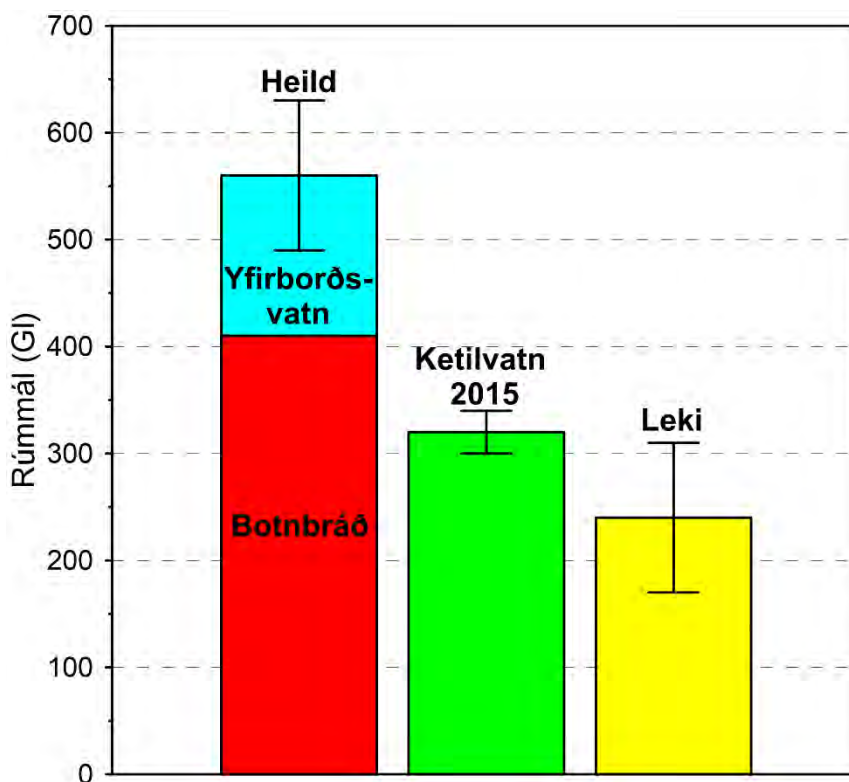
Mynd 20. Hæðarbreytingar á ísasviði Eystri Skaftárketilsins frá 1998–2010 (a) og 2010–2015 (b). Samfelld svört lína afmarkar áætlað ísasvæði ketilsins á tímabilinu 2010–2015 en brotalína (á a) eins og það var áætlað fyrir árið 1998 (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2004).

Gert er ráð fyrir tveimur möguleikum varðandi vatnssöfnun undir katlinum eftir hlaup. Annars vegar að vatn hafi ekki verið byrjað að safnast fyrir þegar yfirborðshæðarmælingar voru gerðar en hins vegar að strax eftir hlaup hafi byrjað að safnast fyrir undir honum. Mögulegt vatnsmagn undir katlinum ( $30 \pm 30$  Gt) þegar 2010 hæðarkortið af katlinum var mælt, getur verið töluvert mikið þó að stutt sé frá hlaupi úr katlinum þar sem yfirborðsleysing var sérstaklega mikil vegna öskufalls frá Eyjafjallajökli; efri mörk svara til um helmings af heildarleysingu á vatnasviði ketilsins sumarið 2010 (Finnur Pálsson o.fl., 2013).

	Tilfelli A		Tilfelli B	
	1998-2010	2010-2015	1998-2010	2010-2015
Rúmmálsbreyting íssasviðs (Gl íss)	-600±80	-75±20	-600±80	-75±20
Vatn í katli fyrra ár (Gl)	80±40	30±30	80±40	0
Vatn í katli seinna ár (Gl)	30±30	5±5	0	0
B <sub>n</sub> ; rúmmálsbreyting leiðrétt fyrir vatnsgeymslu í katli (Gl vatns)	-500±90	-45±35	-470±80	-70±20
B <sub>y</sub> ; yfirborðsafkoma íssasviðs (Gl vatns)	630±150	350±40	630±150	350±40
B <sub>b</sub> ; botnafkoma (Gl vatns)	-1130±170	-395±50	-1100±170	-420±45
Afl (MW)	990±150	810±110	970±150	860±90

*Tafla 1. Heildarafkoma íssasviðs Eystri Skaftárketilsins (B<sub>n</sub>) út frá mismuni hæðarkorta (1. lína fengin af 21. mynd) og leiðréttingarliðum (2-3. lína) auk yfirborðsafkoma (B<sub>y</sub>), botnafkomu (B<sub>b</sub>) og meðalafli jarðhitans á íssasviði hans. Reiknað er fyrir tvö tilfelli: A: Gert ráð fyrir að vatn byrji að safnast fyrir í katlinum strax eftir að hlaupi lýkur. B: Gert er ráð fyrir að ekkert vatn safnist fyrir fyrstu vikurnar eftir hlaup.*

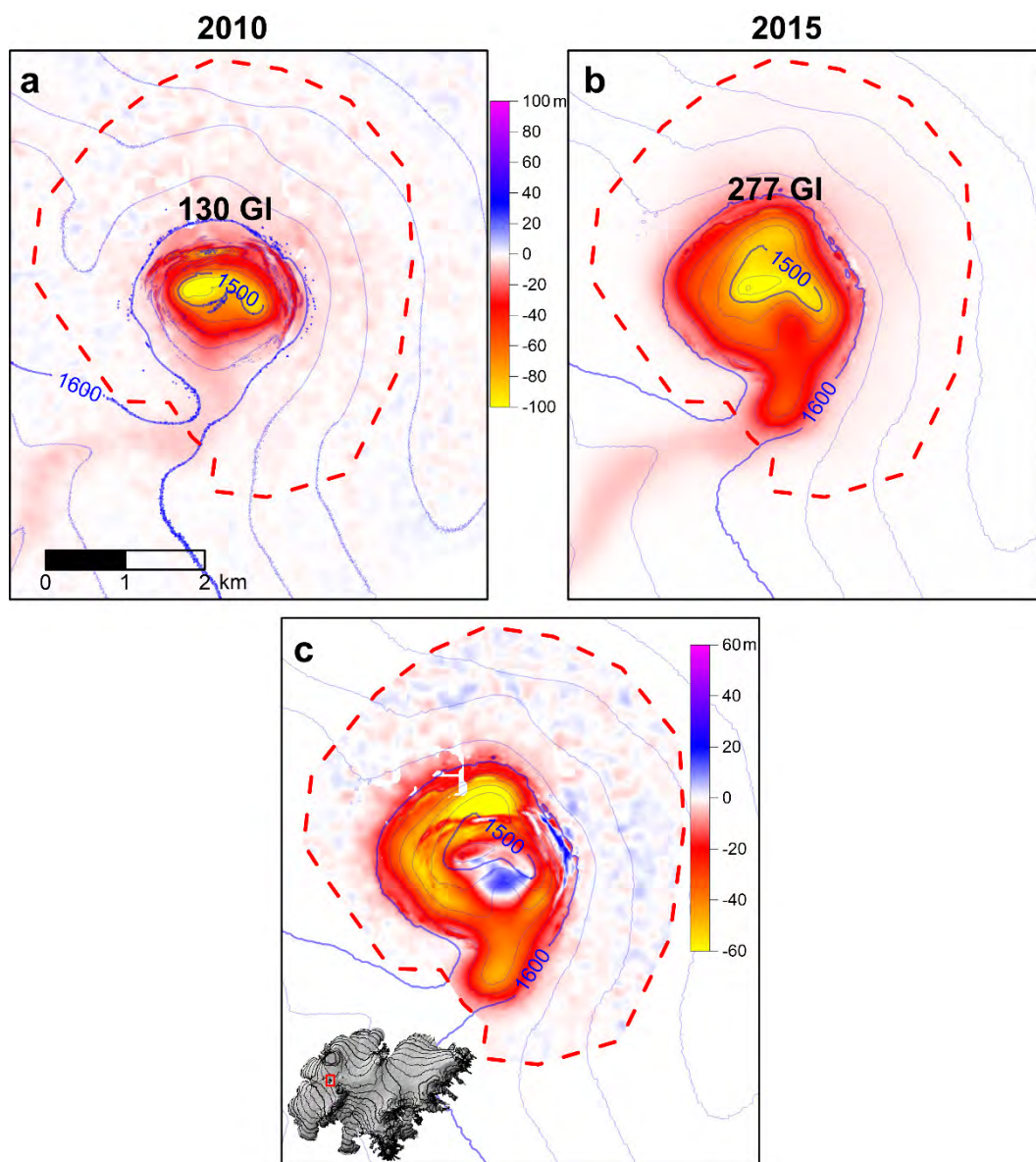
Í 1. töflu má einnig sjá meðalafli sem metin botnbrað gefur, auk samanburðar við metið afl á tímabilinu 1998–2010. Mat afkomu og afls fyrir tímabilið 1998–2010 er unnið á sama hátt og fyrir 2010–2015. Fyrir yfirborðshæð 1998 er notað samfellt yfirborðshæðarkort mælt með ratsjá úr flugvél sumarið 1998 (Eyjólfur Magnússon, 2003) leiðrétt á sama hátt og hin hæðarkortin með GPS-sniðmælingum frá hausti 1998. Óvissa meðalhæðarbreytingar tímabilisins 1998–2010 (20. mynd) er áætluð 2 m og óvissa yfirborðsafkomu tímabilisins er metin 2.4 m<sub>vg</sub> (vg: vatnsgildi) að jafnaði yfir íssasviðið (0.2 m<sub>vg</sub>/ár líkt og fyrir og 2010–2015). Vegna breytinga á stærð íssasviðsins á tímabilinu, var rúmmálgildi hvers ár metið þannig: Afkoma hvers árs var tegruð bæði yfir íssasvið ketilsins árið 1998 og 2010 (20. mynd) og síðan notast við vegið meðaltal þar sem vigt 1998-gildis breytist línulega með tíma frá 1 fyrir 1998 til 0 fyrir 2010 og öfugt fyrir 2010-gildið. Stærstu breytingar á íssasviði ketilsins á tímabilinu eru vegna ísflæðis til lægðarinnar sem myndaðist í Gjálpargosinu 1996 austur af katlinum. Myndun Gjálparlægðarinnar sneiddi um 10 km<sup>2</sup> af austanverðu vatnasviði ketilsins. Síðan þá hefur þessi breyting verið að ganga til baka. Vegna óvissunnar í legu ísaskila á tímabilinu var bætt við óvissulið upp á 50 Gl í yfirborðsafkomu íssasviðs Eystri-Skaftárketils fyrir tímabilið 1998–2010. Kortið frá 1998 er mælt ári eftir hlaup úr eystri katlinum. Áætlað rúmmáls vatns undir katlinum á þeim tíma er 80±40 Gl, þ.e. um þriðjungur af stærð næsta hlaups tveimur árum síðar (Snorri Zóphóníasson, 2002). Við mat á meðalafli jarðhitans fyrir bæði tímabilin er litið fram hjá þeirri orku sem falin er í því að vatnið undir katlinum er líklega nærri 4°C í báðum kötlunum (Bergur Einarsson o.fl., 2017). Sú viðbót hækkar aflmatið um fáein prósent en álíka mikið fyrir bæði tímabilin.



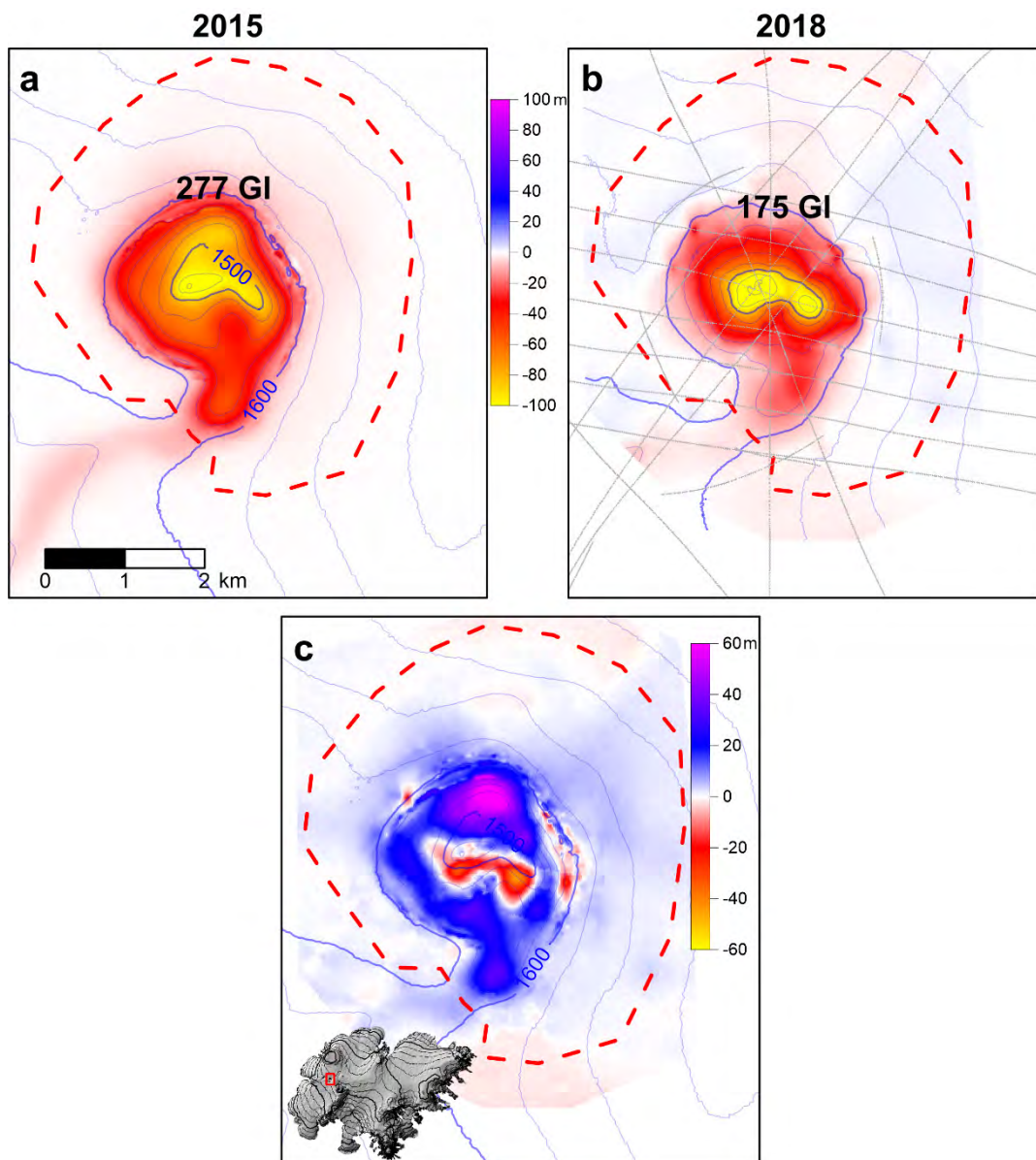
Mynd 21. Samanburður á heildarvatnsmagni sem rann undir (botnbráð og yfirborðsvatn) Eystri Skaftárketilinn frá hausti 2010 til hausts 2015 við vatnsmagn sem kom frá katlinum í hlaupinu 2015 (rúmmál frá 23. mynd a að viðbættu mati á rúmmáli sprungumyndunar í hlaupi). Mismunur á heildarvatnsmagni og ketilvatni gefur magn vatnsleka á tímabilinu. Áætlaðar óvissur eru sýndar fyrir hverja súlu.

#### 4.1.4 Aðferð við mat á leka Eystri-Skaftárketils 2010–2015

Áætluð botnbráð,  $B_b$ , tímabilið 2010–2015 að viðbættu yfirborðsvatni sem berst niður að jökulbotni er mat á heildargegnumflæði vatns um ketilinn á tímabilinu (21. mynd). Heildarsumarafkoma vatnasviðs ketilsins fyrir tímabilið 2010–2015 er metin út frá sumarafkomukortum (t.d. Finnur Pálsson o.fl., 2017) líkt og fyrir yfirborðsafkomuna hér að ofan. Gert er ráð fyrir því að neikvæð sumarafkoma hvers árs skili sér sem yfirborðsvatn niður á jökulbotn auk úrkomu sem fellur að sumarlagi (bæði rigning og snjór sem fellur og bráðnar) á vatnasvið ketilsins. Meðalsumarúrcoma yfir vatnasviðið er áætluð sú sama og mæld er á úrkomumæli á Grímsfjalli (t.d. Finnur Pálsson, 2014). Til að meta hvort og þá hve mikið lak undan katlinum á tímabilinu frá hausti 2010 til hausts 2015 er heildargegnumflæðið borið saman við það vatnsmagn sem kom undan katlinum í hlaupinu 2015. Hér er notast við það gildi sem mismunur hæðarkorta skömmu fyrir og eftir hlaup gefur (22. mynd) að viðbættu grófu mati á rúmmáli sprungna sem mynduðust í hlaupinu og hæðarlíkönin ná ekki að greina. Það mat ( $40 \pm 20$  Gl) gerir ráð fyrir að í sprungukrans ketilsins sem var um 8 km að ummáli og 300–400 m breiður eftir 2015 hlaupið, sé samanlögð breidd sprungna á yfirborði 100 m og þrengist línulega niður í 0 m á 100 m dýpi.

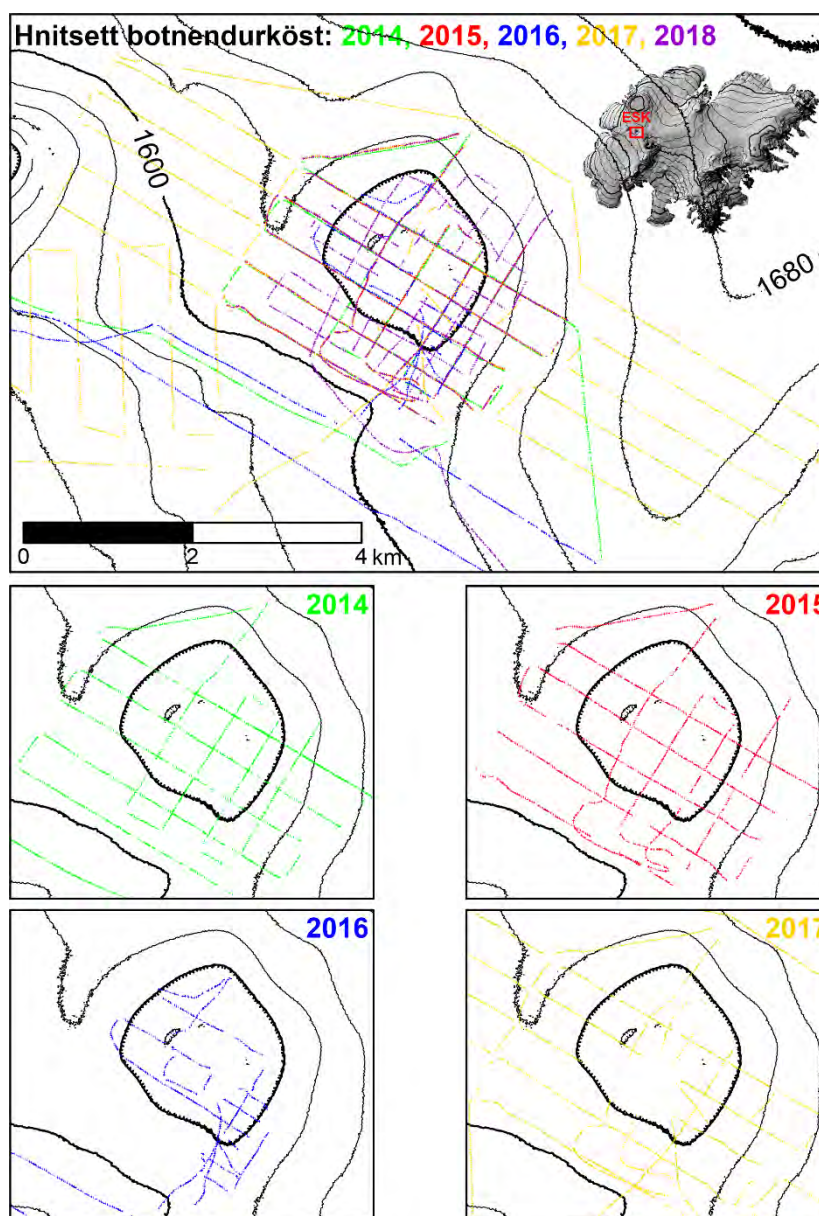


Mynd 22. Hæðarbreytingar í Eystri Skaftárkatlinum og næsta nágrenni í hlaupinu 2010 (a; út frá SPOT-5 hæðarlíkani 6. júní og lidar hæðarlíkani 21. júlí það ár) og haustið 2015 (b; út frá TanDEM-X hæðarlíkönunum, 23. september og 10. október það ár). Meðaltal hæðarmismunar korta utan ketilsins hefur verið dregin frá til að draga fram hæðarbreytingar vegna hlaupanna sjálfra. Rúmmálstölur á a og b eru tegrud rúmmál hæðarbreytinga innan rauðu brotlínunnar sem afmarkar það svæði þar sem hæðarbreyting er greinanleg í hlaupinu 2015. Mismunur hæðarbreytinga beggja hlaupa er sýnd á c. Kaldir litir (bláleitir) á c sýna hvar lækkun var meiri 2010 en heitir litir (rautt og gult) hvar lækkunin var meiri 2015. Ofanáliggjandi hæðarlínukort hafa hér verið leiðrétt að hæð GPS-sniðmælinga utan katla að hausti 2010 (fyrir a) og 2015 (fyrir b og c) að frádreginni þykkt nýsnævis þegar GPS mælingar voru gerðar.



Mynd 23. Hæðarbreytingar í Eystri Skaftárkatlinum og næsta nágrenni í hlaupinu haustið 2015 (a; út frá TanDEM-X hæðarlíkönum, 23. september og 10. október það ár) og sumarið 2018 (b; út frá GPS sniðum mæld 4. júní og flugradarsniðum, sýnd sem gráar línur, mæld 9. ágúst það ár). Meðaltal hæðarmismunar korta utan ketilsins hefur verið dregin frá til að draga fram hæðarbreytingar vegna hlaupanna sjálfra. Rúmmálstölur á a og b eru tegrud rúmmál hæðarbreytinga innan rauðu brotlínunnar sem afmarkar það svæði þar sem hæðarbreyting er greinanleg í hlaupinu 2015. Mismunur hæðarbreytinga beggja hlaupa er sýnd á c. Kaldir litir (bláleitir) á c sýna hvar lækun var meiri 2015 en heitir litir (rautt og gult) hvar lækunin var meiri 2018. Ofanáliggjandi hæðarlínukort frá 2015 (a og c) hafa hér verið leiðrétt að hæð GPS-sniðmælinga utan katla að hausti 2015 (fyrir a) að frádrögninni þykkt nýsnævis þegar GPS-mælingar voru gerðar.





Mynd 24. Staðsetning rakinna botnendurkasta í íssjárnsniðum og útmörk vatnsgeymis undir Eystri Skaftárkatlinum áætluð út frá breytingum í botnendurköstum fyrir árin frá 2014 til 2018. Staðsetningar nýjustu mælinga (2018) liggja víða ofan á þeim eldri innan ketils og því er hvert ár fyrir sig frá 2014 til 2017 sýnt fyrir ketilinn sjálfan á neðri myndunum.

#### 4.1.5 Hæðarbreytingar í hlaupinu 2018

Til að meta hæðarbreytingar í Eystri-Skaftárkatli í hlaupinu í ágúst 2018 var fyrst búið til kort af yfirborði ketilsins fyrir hlaupið. Í þeim tilgangi var TanDEM hæðarkort sem sýnir yfirborð ketilsins frá 23. september 2015, rétt fyrir hlaup, borið saman við GPS-yfirborðshæðarsnið frá 4. júní 2018 (23. mynd). Hæðarmismunur korts og sniða var síðan brúaður með „kriging“ brúunaralgrími í Surfer 12 (frá Golden Software) og brúuðu hæðarmismunarkorti síðan bætt

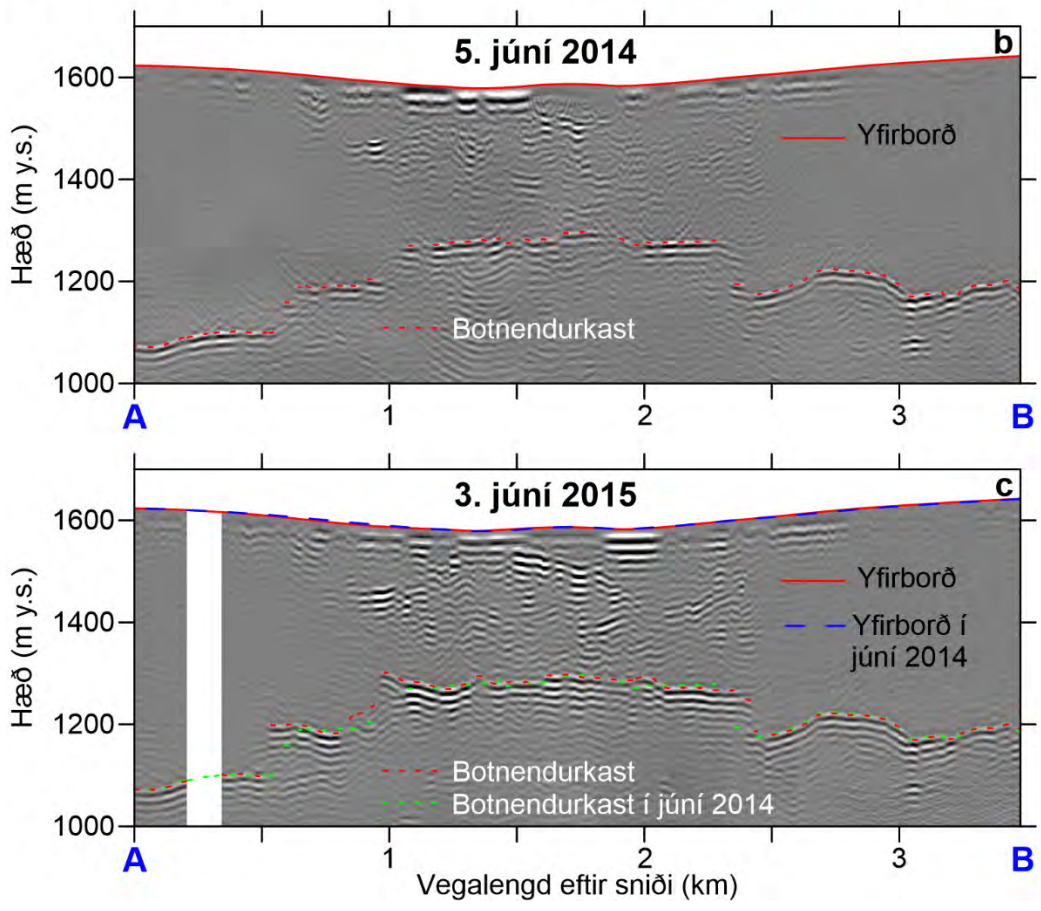
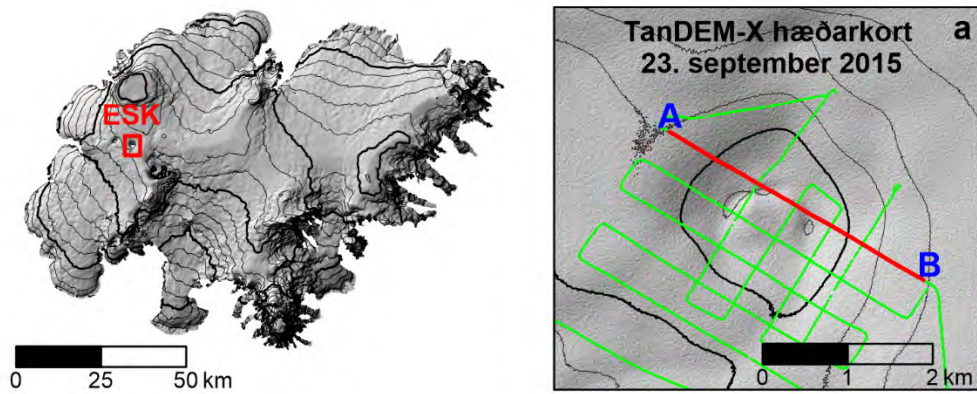
við hæðarkortið frá 2015 til að fá fram hæðarkort fyrir 4. júní 2018. GPS-snið voru þétt mæld voríð 2018 og breytileiki í hæðarmismun (milli 2015 hæðarkorts og GPS-sniða) frekar lítill og því má gera ráð fyrir að þetta kort sé að jafnaði rétt upp á 1–2 m innan sjálfs ketilsins en síðra utan hans þar sem mælingar frá 2018 skortir. Þar var notast við GPS-sniðmælingar gerðar samhliða íssjármælingum í júní 2017 (24. mynd) við gerð hæðarmismunarkorts. Svæðið norður af katlinum var hvorki mælt 2017 né 2018 og var gert ráð fyrir að hæðarbreyting þar á tímabilinu væri með svipuðum hætti og austur af katlinum. Hæðarkort fyrir yfirborð ketilsins í júní 2018 var síðan borið saman við flugratsjárnsnið mæld 9. ágúst, skömmu eftir hlaup. Hæðarmismunur ratsjárnsniða og júní-hæðarkorts var einnig brúaður með kringing í Surfer og honum bætt við júní-hæðarkortið til að fá yfirborðskort af jöklinum 9. ágúst, rétt eftir hlaup. Meðalgildi hæðarmismunar utan katla var dreginn frá brúaða hæðarmismunarkortinu til að draga fram hæðarbreytingar sem tengdust hlaupinu sjálfu (23. mynd). Samskonar frádráttur var gerður til að draga fram hæðarbreytingar tengdar hlaupunum 2010 og 2015 (22.–23. mynd).

#### 4.1.6 Íssjármælingar í og við Eystri-Skaftárketil 2014–2018

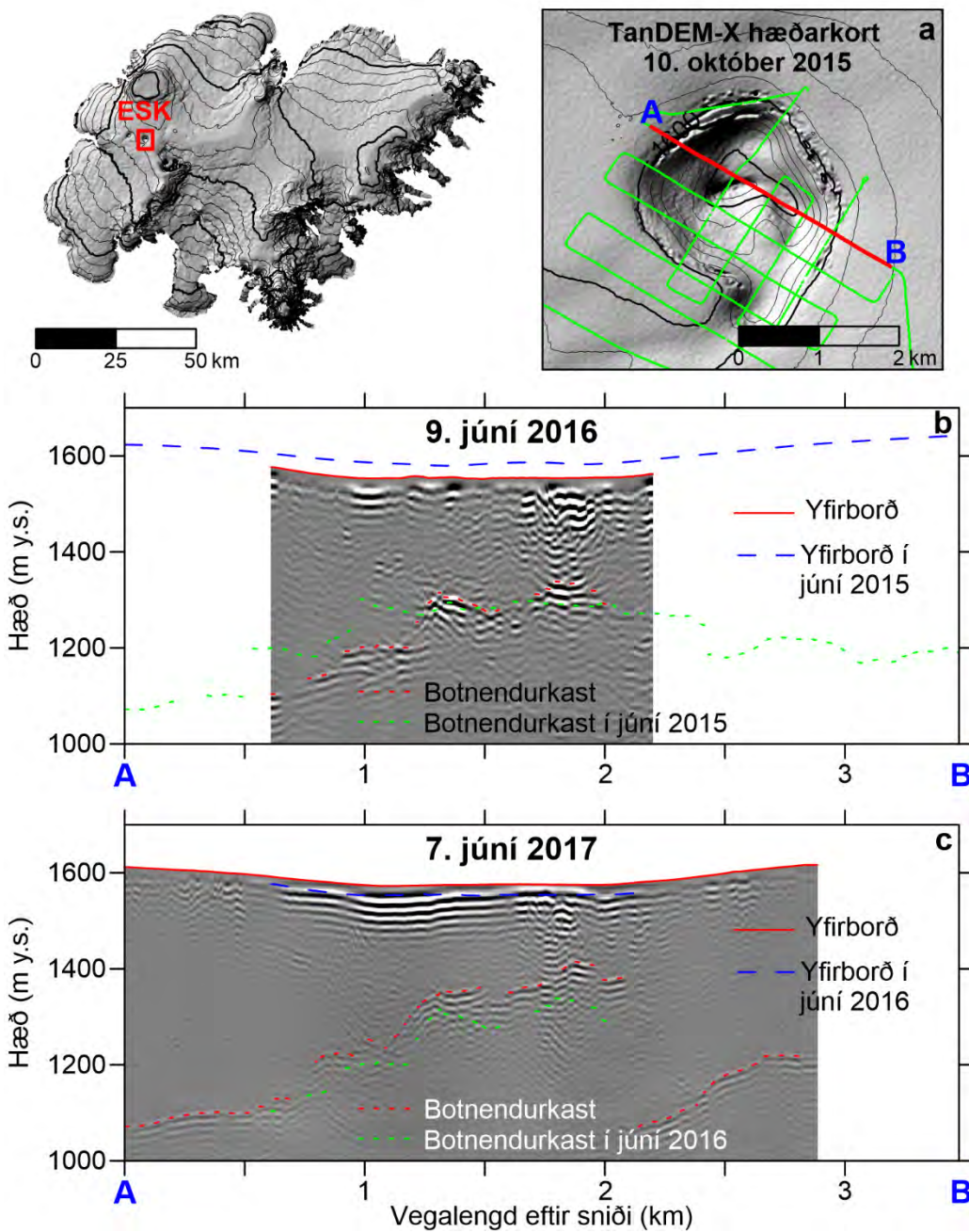
Á 24. mynd sést lega íssjármælisniða sem mæld hafa verið í og við Eystri-Skaftárketil í vorferðum Jökklarannsóknafélagsins síðan 2014. Markmið íssjármælinganna er tvíþætt. Annars vegar að fá eins greinargott botnhæðarkort og unnt er af svæðinu. Hins vegar að greina breytingar við jökulbotn sem tengjast þróun vatnsgeymis við bergbotninn undir katlinum. Til þess að ná báðum markmiðum voru snið þar sem líkur voru taldar á uppsöfnun vatns endurmæld ár eftir ár eins vel og kostur var. Þegar engar breytingar á legu botnendurkasta koma fram við endurtekna mælingar yfir sama snið, óháð vatnsmagni í katlinum, eru talda yfirgnæfandi líkur á að botnendurkastið komi frá föstu bergi (25.–28. mynd). Breytingar í hæð rakinna botnendurkasta í endurteknum sniðum benda hins vegar til að vatnsgeymir sé við botn þegar eitt eða fleiri snið voru mæld. Með samanburði allra sniða með endurteknum mælingum var hægt að meta útbreiðslu vatnsgeymis fyrir árin 2014, 2015, 2016, 2018 og að stórum hluta 2017 (29. mynd og dæmi á 30. mynd). Að því loknu var hægt að skipta röktu botnendurkasti í tvo flokka. Annars vegar endurkast sem eru utan við mörk vatnsgeymis á hverjum tíma og því líklega frá föstum botni. Hins vegar endurkast sem eru innan við uppdregin útmörk vatnsgeymis á hverjum tíma og eru því að öllum líkindum frá þaki vatnsgeymis milli bergbotns og íss.

Rakin endurköst frá föstum botni (frá öllum árum) voru tekin ásamt mældri botnhæð í tveimur borholum sem Veðurstofa Íslands og samstarfsaðilar boruðu (gögn frá Þorsteini Þorsteinssyni), sett í kortahnit og út frá því reiknað botnhæðarkort með kringing brúun í Surfer. Vegna borholumælinganna og lítillar útbreiðslu vatnsgeymis undir katlinum 2016 og 2017 er svæði berggrunnskorts sem er illa skorðað með gögnum frekar lítið (30. mynd).

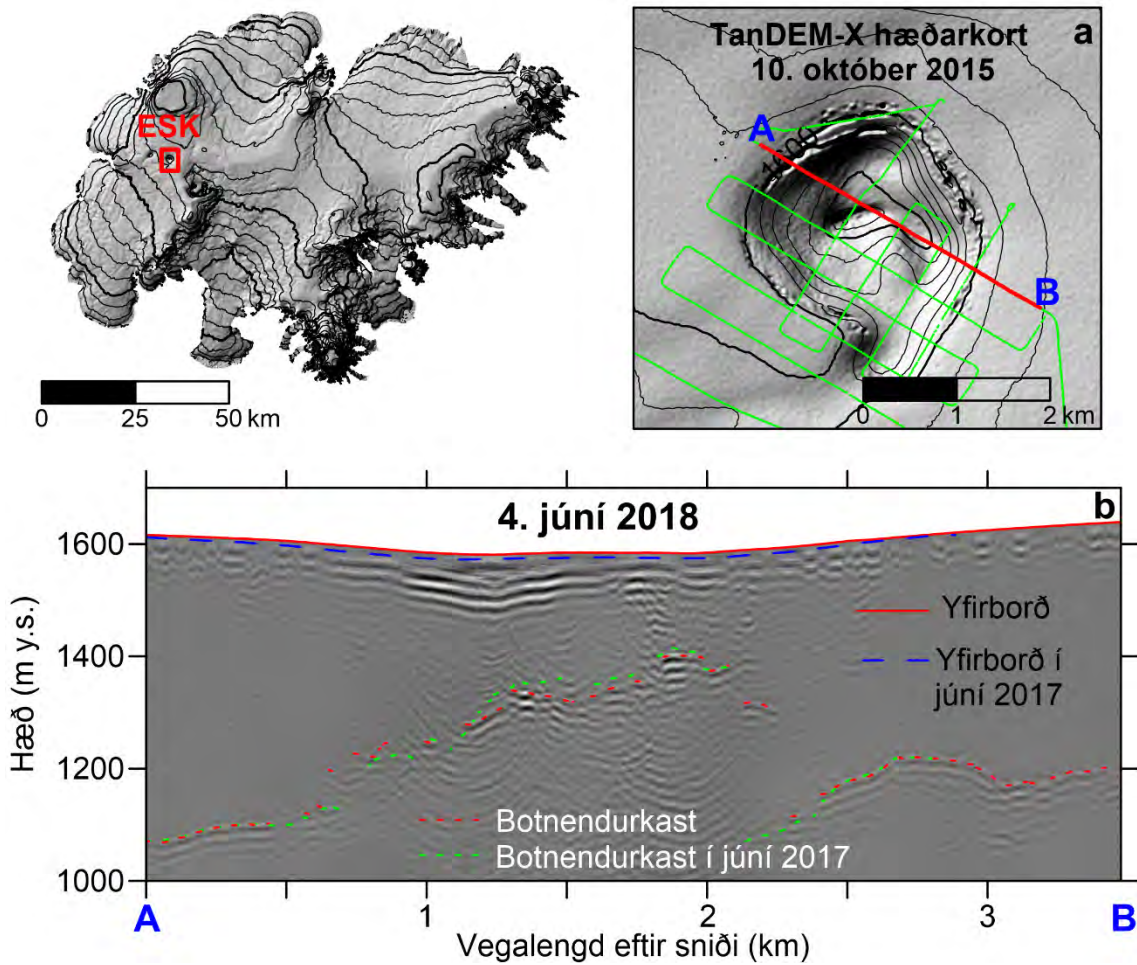
Rakin endurköst innan vatnsgeymis á hverjum tíma voru einnig sett í kortahnit og hæðir í þeim hnitum borin saman við botnhæðarkort. Með þessu fæst áætluð þykkt vatnslags á milli jökulíss og bergbotns fyrir hvert hnitsett endurkast. Þessi hnitsettu gildi ásamt hnituum útmörkum vatnsgeymis með 0 m vatnslagsþykkt, voru sett saman í eina skrá fyrir hvert ár og síðan var þykktarkort fyrir vatnslagið brúað með kringing algrími á sama hátt og botnhæðarkort. Út frá þykktarkortum vatnslags fæst mat á rúmmáli vatnsgeymis hvers árs þegar mælingin var gerð (31. mynd).



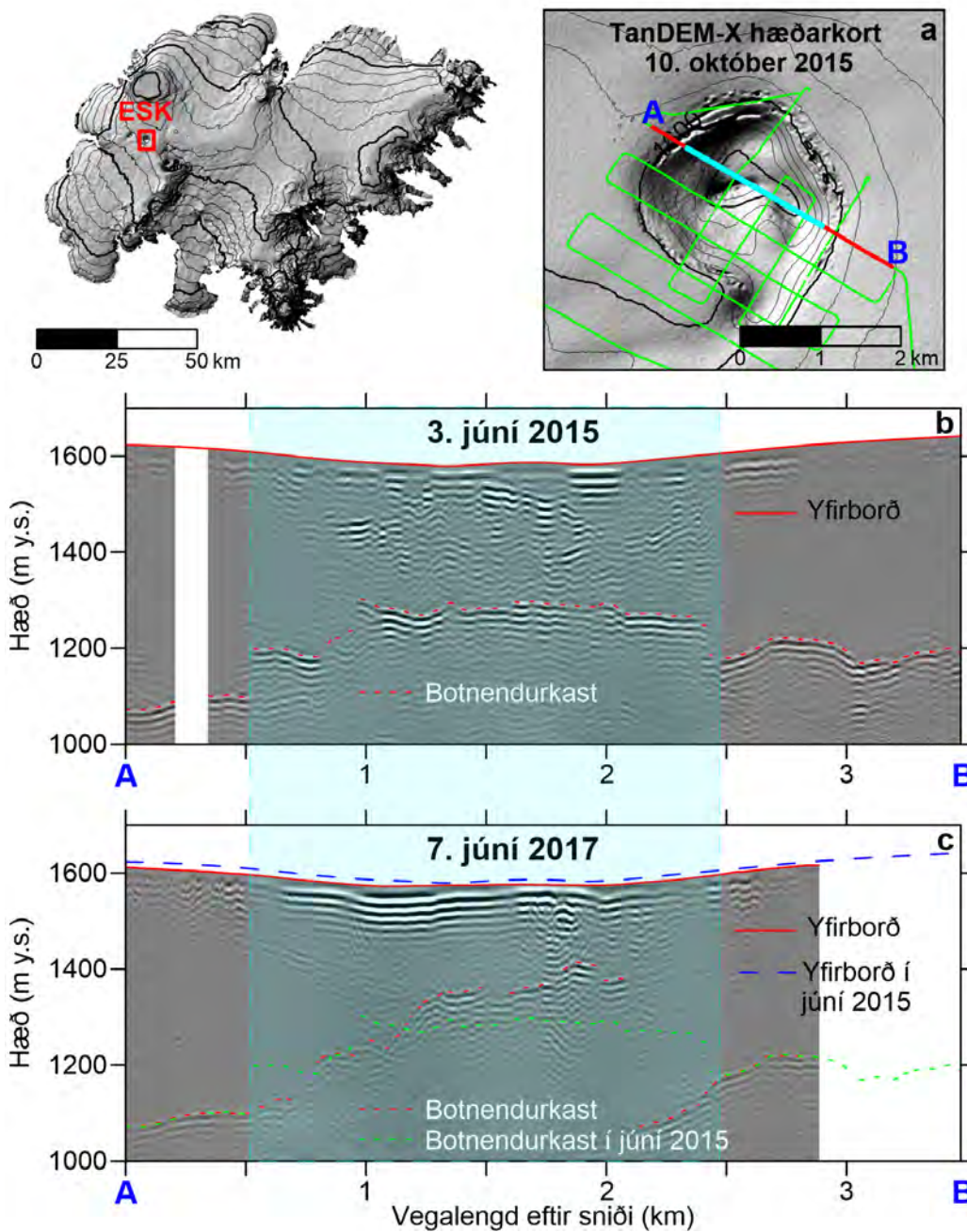
Mynd 25. a) Lega íssjárnsniða sem mæld voru í Eystri Skaftárkatlinum vorið 2014 (græn). b) Dæmi um tvívítt varpað (enska: migrated) íssjarmælisnið frá 2014 frá A til B (sjá rauð lína á a). Rauð heil lína sýnir yfirborðshæð, rauð punktalína rakir botnendurköst. c) Sama snið mælt vorið 2015 ásamt yfirborðshæð og röktum botnendurköstum, borin saman við yfirborðshæð (ósamfelld blá lína) og rakir botnendurköst (græn punktalína) frá 2014.



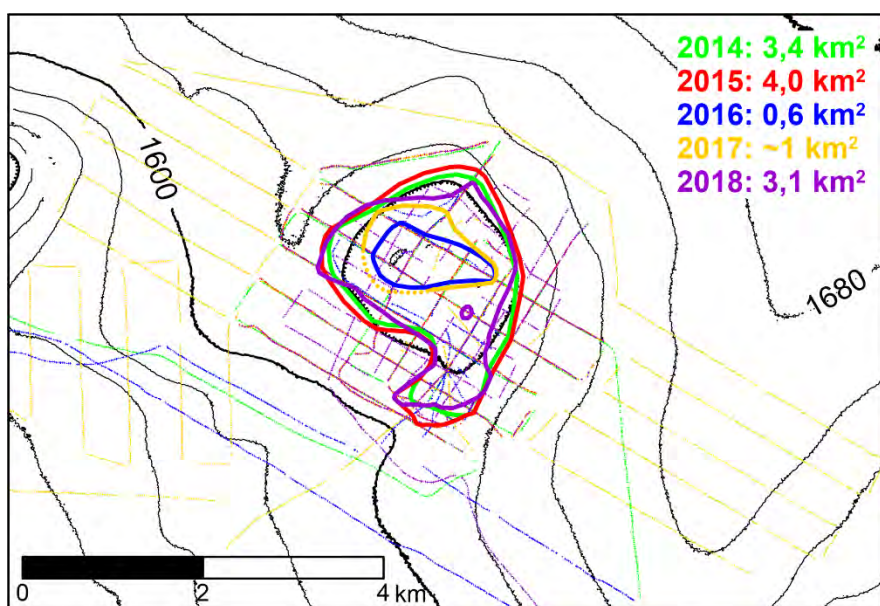
Mynd 26. Samskonar og 25. mynd. Myndhlutar b og c sýna tvívítt varpað íssjarmælisnið frá 2016 og 2017 eftir sömu línu og fyrst var mæld 2014 milli A og B (sjá rauð lína á a). Ekki tókst að mæla allt upphaflega sniðið vegna jökulsprungna. Rauð heil lína sýnir yfirborðshæð hverrar mælingar, rauð punktalína rakin botnendurköst en til samanburðar er yfirborðshæð og rakin botnendurköst frá árinu áður.



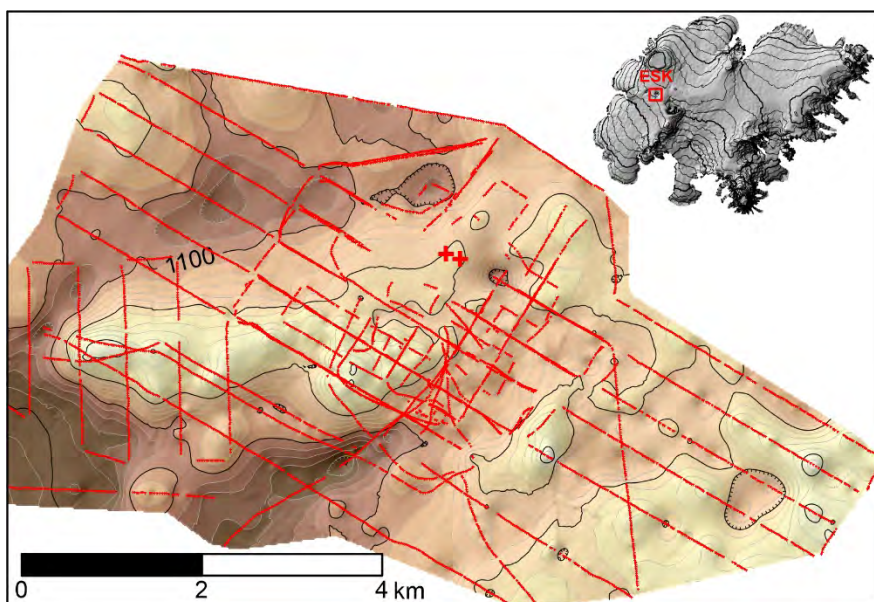
Mynd 27. Samskonar og 25. mynd. Myndhluti b sýni tvívítt varpað íssjármælisnið frá 2018 eftir sömu línu og fyrst var mæld 2014 milli A og B (sjá rauð lína á a). Rauð heil lína sýnir yfirborðshæð mælingar, rauð punktalína rakin botnendurköst en til samanburðar er yfirborðshæð og rakin botnendurköst frá árinu áður.



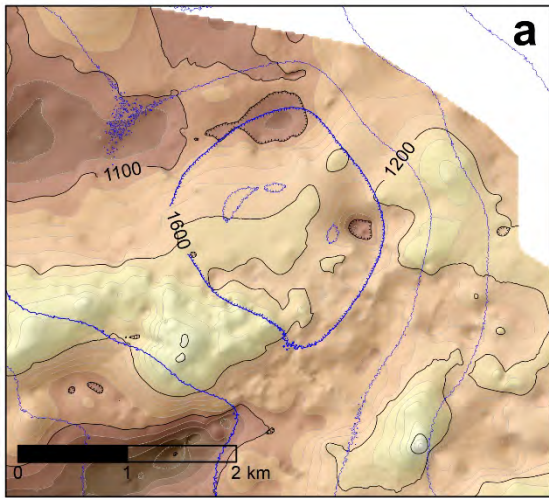
Mynd 28. Samskonar og 25. mynd fyrir vorið 2015 og 2017. Með samanburði þessara íssjárnsniða má áætla ytri mörk vatnsbólul fyrir vorið 2015 í þessu sniði út frá því hvar rakir botnendurköst falla saman á c (skyggt svæði á b og c og ljósbláa lína á a).



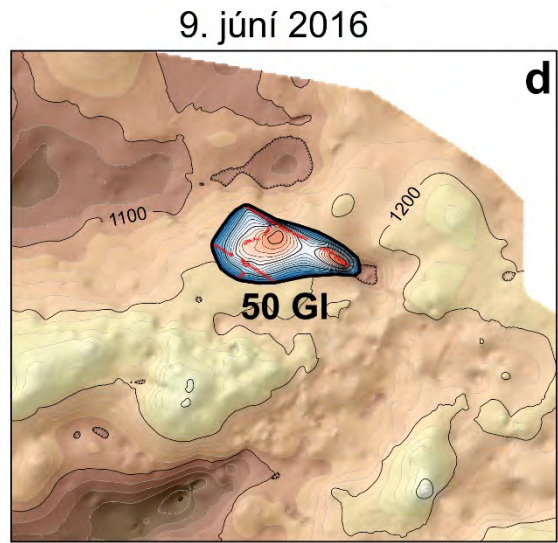
Mynd 29. Útmörk vatnsgeymis undir Eystri Skaftárkatli 2014 til 2018 í júní ár hvert og lega íssjargagna sem þau byggja á. Tilsvarandi flatarmálstölur eru sýndar í efra horni hægra megin. Vegna gagnaeyðu eru útmörk vatnsgeymis suðvestan til vorið 2017 illa þekkt og því sýnd sem áætluð punktalínu. Flatarmál vatnsgeymis er að sama skapi ver skorðað vorið 2017 miðað við hin árin.



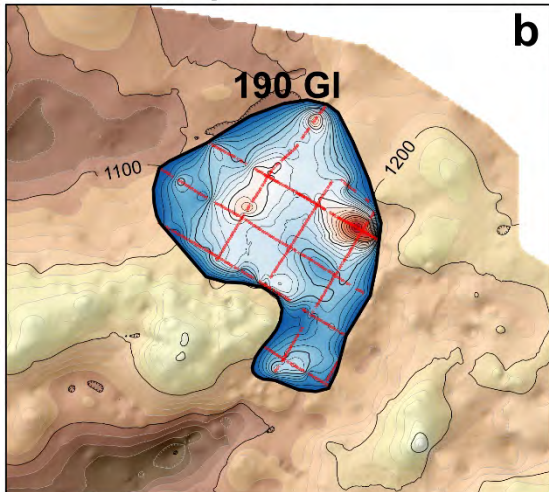
Mynd 30. Botnhæðarkort (20 m milli hæðarlína) sem brúað var út frá botnhæðargögnum sem samanstanda af: a) Röktum botnendurköstum af svæðum utan við vatnsgeymi Eystri Skaftárketilsins af íssjarmælisniðum árin 2014-2018 (rauðar línur). b) Botnhæð í borholum (mælingar Veðurstofu Íslands fengnar frá Þorsteini Þorsteinssyni) en staðsetning þeirra er sýnd með stórum rauðum krossum.



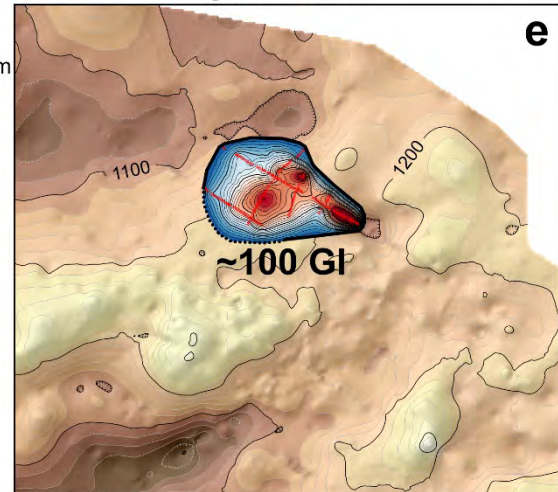
5. júní 2014



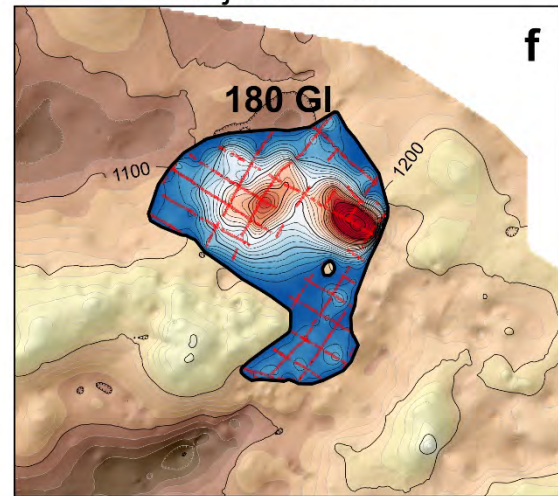
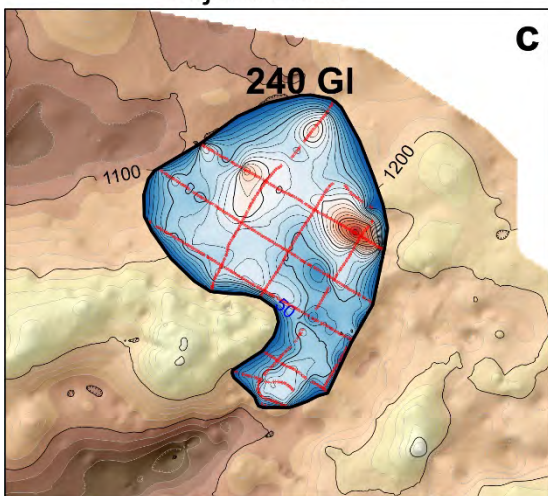
7. júní 2017



3. júní 2015



4. júní 2018





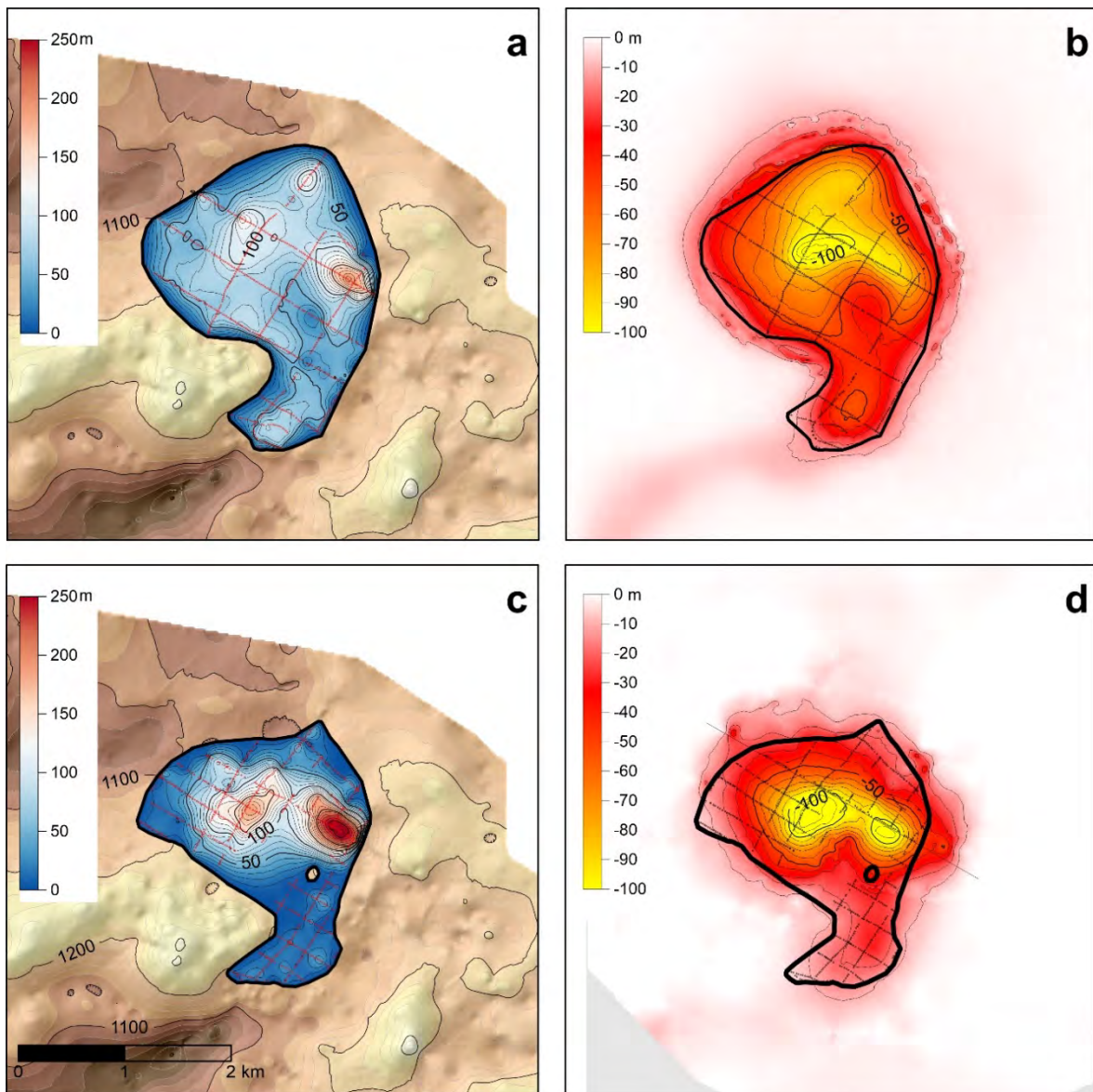
## 4.2 Niðurstöður og túlkun

### 4.2.1 Hæðarbreytingar 2010–2015

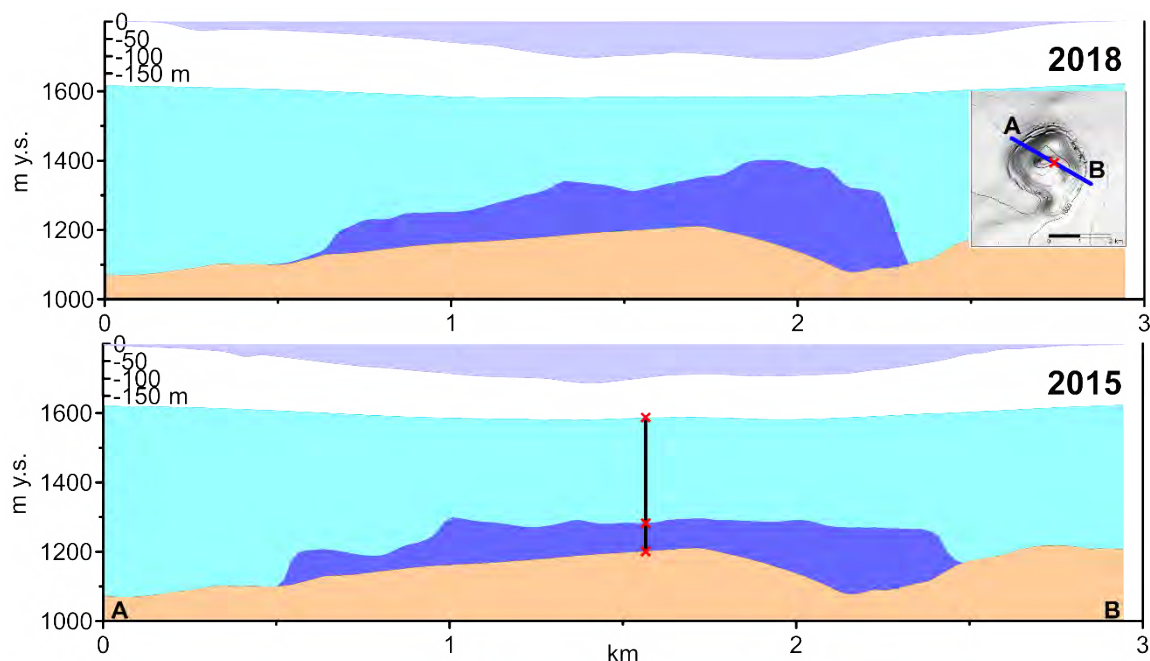
Hæðarbreytingar í eystri katlinum í hlaupunum 2010 og 2015 og á milli hlaupa, ásamt samtúlkun við afkomugögn af svæðinu og hæðarkort frá 1998 sýna að:

- a) Vatnsgeymir undir katlinum í jökulhlaupinu 2015 náði yfir mun stærra svæði en í jökulhlaupinu 2010. Hann stækkaði milli hlaupa í allar áttir, mest til norðurs og suðausturs en minnst til austurs (31. mynd). Flatarmálsbreyting ketilsins skýrir verulega aukningu rúmtaks hans, en undir katlinum miðjum var meiri lökkun í hlaupinu 2010 en 2015 (31. mynd c), sem gefur til kynna að vatnsgeymirinn hafi þá verið þykkari undir ketilmiðjunni. Tilfærslur á uppstreymissvæðum jarðhitans skýra að öllum líkindum breytingar í útbreiðslu og þykkt vatnslags undir katlinum. Séu hæstu og lægstu gildi afls úr 1. töflu notuð (úr lægstu óvissumörkum upp í þau hæstu) fæst varlegt mat á meðalafli jarðhitans undir Eystri-Skaftárkatli áætlað út frá samtúlkun hæðarbreytinga og yfirborðsafkomugagna. Þessar tölur eru 700–950 MW fyrir tímabilið 2010–2015, en 820–1140 MW tímabilið 1998–2010. Mat bendir því ekki til þess að afl jarðhitans hafi aukist samfara breytingum í staðsetningu hans.
- b) Verulegur hluti þess vatns sem barst til Eystri-Skaftárketils á tímabilinu 2010–2015 lak úr honum (án jökulhlaups), eða um 170–310 Gl á tímabilinu frá hausti 2010 til hausts 2015 (1–2 m<sup>3</sup>/s). Þetta er á bilinu fjórðungur til helmingur af heildarinnkomu vatns (bráðnun við botn og innrennsli frá vatnasviði) ketilsins á tímabilinu (32. mynd). Árstíðabundinn breytileiki í hæð ketilmiðjunnar, sem hækkar að sumarlagi en lækkar að vetrarlagi, og staðfest er a.m.k. frá hausti 2013 til hausts 2015 (18. mynd), er einnig afleiðing þessa leka. Á veturna er innrennsli yfirborðsvatns svo til ekkert og lekinn það mikill að yfirborð ketilsins lækkar en á sumrin nær innrennsli yfirborðsvatns að yfirvinna þessa lökkun og gott betur þannig að ketilmiðjan hækkar. Það má gera ráð fyrir að þessi afgerandi leki frá katlinum á tímabilinu 2010–2015 fari sem grunnvatn. Ef leki af þessari stærðargráðu væri um rennislisleiðir við jökulbotn er mjög ólíklegt að hann myndi haldast þetta stöðugur og ekki þróast yfir í jökulhlaup. Athugun á vatnsbússkap Eystri-Skaftárketils sem gerð var fyrir tímabilið 1996–2001 (Finnur Pálsson & Helgi Björnsson, 2002) gaf ekki til kynna leka úr katlinum. Lekinn á tímabilinu 2010–2015 er því líklega vegna breytinga á grunnvatnsrennsli frá katlinum af völdum aukins umfangs vatnsgeymisins. Hann hafi einfaldlega teygt sig inn á svæði sem er mun sprungnara og því lekara en það svæði sem vatnsgeymirinn var áður einskorðaður við. Vegna lekans hljóp mun seinna undan katlinum en annars hefði orðið. Nánar er fjallað um lekann og skýringar á honum í 5.2.

*Mynd 31. a) Hæðarkort af jökulbotninum undir Eystri Skaftárkatlinum (sama og á 30. mynd). Hæðarlínukort af yfirborði (20 m milli blárra lína) frá 23. september 2015 (TanDEM-X) er lagt yfir. b-f) Sama botnkort að viðbættu korti sem sýnir þykkt og útbreiðslu vatnsgeymis undir katlinum á fimm mismunandi tímum, ásamt metnu heildarvatnsmagni í honum á hverjum tíma. Rauðar línur sýna hvar mælingar gáfu vatnsþykktargildi sem kortin eru brúuð út frá. Erfitt var að ákvarða útbreiðslu vatnslags undir suðvestanverðum katlinum vorið 2017 (áætluð útbreiðsla sýnd þar með svartri punktalínu). Heildarvatnsmagn er því talsvert óvissara vorið 2017 en hin árin.*



Mynd 32. a og b) Samanburður útbreiðslu og þykktar vatnsgeymis undir eystri katlinum vorið 2015 skv. íssjármælingum (a; samskonar og 31 mynd e en með öðrum litakvarða) og lækkun yfirborðs ketilsins í hlaupinu 2015, út frá mismuni á TanDEM-X hæðarkortum frá 23. september og 10. október (b). Lega íssjárnsniða og ytri mörk vatnsgeymis skv. íssjármælingum eru sýnd til viðmiðunar á báðum myndum. c og d) Samskonar samanburður fyrir hlaupið í ágúst 2018.



Mynd 33. Þversnið af jökli fyrir hlaupin 2015 og 2018 frá A til B skv. íssjár og GPS mælingum, sjá staðsetningu á smámynd hægra megin. Til samanburðar er hæðarbreyting (efra graf hvorrar myndar) í tilsvareandi hlaupi. Allir ásar (hæð, vegalengd og hæðarbreyting) eru í sömu hlutföllum. Lína fyrir miðri neðri mynd sýnir staðsetningu borholu Veðurstofu Íslands og mælda hæð botns, lagmót íss og vatns og yfirborðs (fengnar frá Þorsteini Þorsteinssyni) fjórum dögum eftir íssjármælingu vorið 2015 (staðsetning sniðs og borholu er á smámynd). Staðbundið misræmi milli vatnsbólupykktar og hæðarbreytingar getur orsakast af ýmsum þáttum, en almennt má búast við að lækkun sé minni nærri ketilmiðjunni en vatnsbólupykkt segir til um vegna ísflæðis frá hliðum ketilsins inn að miðju. Meiri lækkun í miðju ketilsins í hlaupinu 2015 en vatnbólupykkt vorið áður gæti verið til marks um að bráðnun hafi verið við botn frá vori 2015 þar til að hæðarkort fyrst eftir hlaupið var mælt (10. október).

#### 4.2.2 Hæðarkort af jökulbotni

Íssjármælingar sem gerðar voru 2014 til 2018 í og við Eystri-Skaftárketil hafa skilað tvennum mikilvægum niðurstöðum. Í fyrsta lagi botnhæðarkorti af undirlagi ketilsins og næsta nágrenni hans (30. mynd). Í öðru lagi, tímaröð sem sýnir þróun í umfangi (31. mynd), lögun og rúmtaki vatnsgeymisins undir katlinum, bæði síðustu tvö vor fyrir hlaupið 2015 og vorin 2016 til 2018 fyrir hlaupið í ágúst 2018 (32. mynd). Það skal tekið fram að botnkortið er forsenda þess að hægt er að meta vatnsmagn undir katlinum á hverjum tíma. Botnkortið er frekar vel skorðað með íssjargögnum sem aflað var 2016 til 2017, þegar umfang vatnsgeymis var lítið, og mæling á botnhæð um borholu í katlinum miðjum (frá Veðurstofunni). Botnkortið er einnig lykilmagn ef farið yrði í gerð reiknilíkans um þróun ketilsins og vatnsgeymisins undir honum.

### 4.2.3 Umfang og lögun vatnsgeymis við botn

Þegar umfang og þykkt vatnsgeymis vorið 2015 er borin saman við hæðarbreytingar sem urðu í katlinum í hlaupinu haustið 2015 (32. mynd a og b) fæst mjög gott samræmi sérstaklega hvað varðar umfang vatnsgeymis. Það sama gildir um 2018 hlaupið (32. mynd c og d). Í stórum dráttum er einnig gott samræmi milli lögunar vatnsgeymisins og hæðarbreytinganna í hlaupunum. Ekki er þó við því að búast að hæðarbreytingar í hlaupi gefi beina samsvörun við lögun og þykkt vatnsbólul sem tæmist. Ísflæði inn að miðju krapps ketils hefur áhrif á hæðarbreytingar til viðbótar við lækkunina sem verður þegar vatnið rennur undan katlinum. Staðbundnar breytingar í þykkt vatnsbólul frá íssjármælingu fram að hlaupi gætu líka skapað misræmi milli lækunar og mældrar vatnsbólulþykktar (33. mynd).

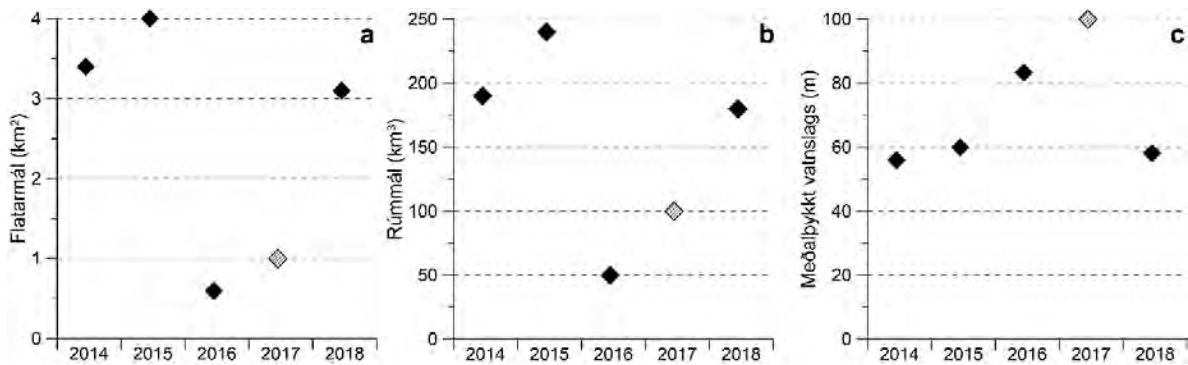
Nokkur munur er á rúmmálinu sem fékkst úr íssjármælingunum vorið 2015 (240 Gl) og þeim  $320 \pm 20$  Gl sem áætlað er að hafi komið hafi undan katlinum í hlaupinu um haustið. Það rúmmál er fengið út frá hæðarbreytingum í hlaupinu að viðbættu áætluðu rúmmáli sprungna sem mynduðust við sigið. Hluti þessa munar getur falist í ofmati á botnhæð þar sem gagnaeyður eru í botnkorti (27. mynd), sem leiða til vanmats á rúmmáli vatnsgeymisins. Einnig gæti takmörkuð dekkun íssjármælinga á norðurhluta ketilsins valdið vanmati. Þá má vera að þróun vatnsgeymisins gerist í ójöfnum skrefum og að hann hafi stækkað hraðar sumarið 2015 en vormælingarnar 2014 og 2015 gefa til kynna. Hluti af því vatnsmagni sem skilaði sér undan katlinum í hlaupinu gæti einnig verið vegna aukinnar bráðnunar undir katlinum í hlaupinu sjálfa samfara þrýstingsbreytingum í jarðhitakerfinu undir katlinum.

Rúmmálstölum fyrir hlaupið 2018 ber betur saman. Rúmmál vatnsbólul um vorið var um 180 Gl samkvæmt íssjármælingum. Ef skoðaðar er hæðarbreytingar í katlinum í hlaupinu svara þær til um 175 Gl en ef bætt er við rúmmálsmati á sprungumyndunum (sambærilegt við mat fyrir 2015 hlaupið) og tekið tillit til óvissu (bæði í hæðarbreytingum og sprungumati) má áætla að vatnsmagnið sem kom undan katlinum hafi verið  $205 \pm 25$  Gl. Betra samræmi milli rúmmáls- talna fyrir hlaupið 2018 gæti skýrst af þéttara mælineti en vorið 2015.

Niðurstöður íssjármælinga síðustu ára í Eystri-Skaftárkatli og gott samræmi þeirra við yfirborðshæðarbreytingar í hlaupunum 2015 og 2018 sýna eindregið notagildi þeirra við vöktun ketilsins. Íssjármælingar virðast vera eina raunhæfa leiðin til þess að vakta rúmmál og umfang vatnsgeymisins undir katlinum milli hlaupa.

### 4.2.4 Þróun 2015 til 2018

Ef GPS sniðmælingar frá 2016–2018 eru bornar saman við hæðarkort af katlinum rétt eftir hlaupið 2015 (18.–19. mynd a) sést að miklar hæðarbreytingar urðu í katlinum veturinn eftir hlaup, líkt og vænta mátti þegar hækkun vegna innflæðis íss er mest. Mesta mælda hækkunin til vors 2016 var nálægt 90 metrum, á því svæði þar sem mest lækun varð í hlaupinu (um 125 m). Frá hlaupi til vors 2017 hafði það svæði hækkað um 115 m en önnur svæði minna. Hæðarsnið mæld í júní 2018 sýna víða 5–15 m hækkun til viðbótar frá vori 2017. Mesta mælda heildarhækkun frá hlaupinu 2015 til vors 2018 er 120 m (19. mynd a). Ef GPS-sniðin frá júní 2017 eru borin saman við hæðarkort frá 23. september 2015, rétt fyrir hlaupið 2015 (18. mynd b) sést að yfirborð ketilsins var víðast hvar 10–20 m lægra en fyrir hlaupið. Mælingin í júní

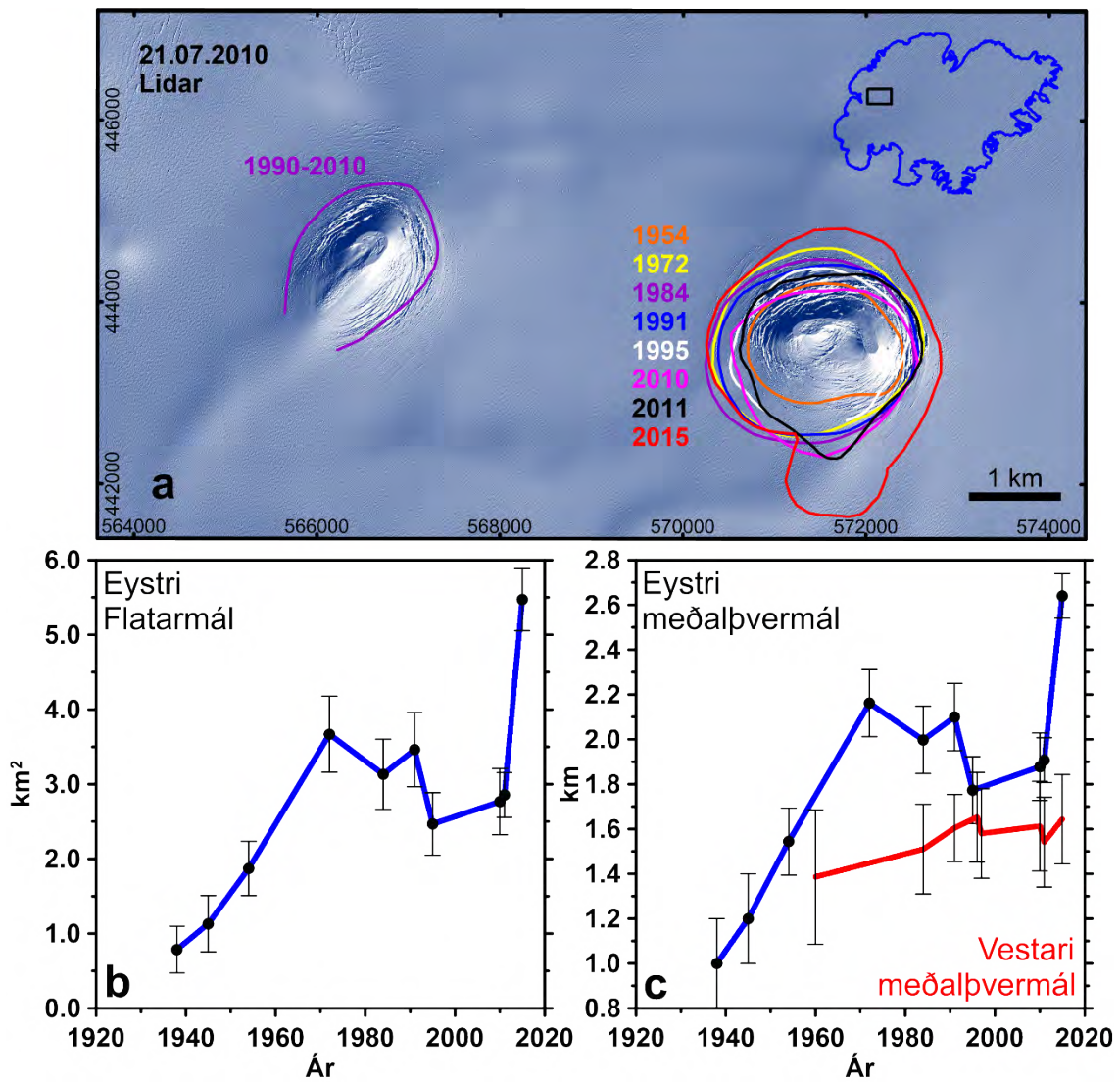


Mynd 34. Niðurstöður íssjármælinga á flatarmáli (a), rúmmáli (b) og meðalþykkt (c) vatnsgeymis undir Eystri-Skaftárkatlinum í tímabilinu, mælt árlega frá vori 2014 til vors 2018. Annar litur á 2017 punktum gefur til kynna að óvissa þeirra er meiri vegna skorts á gögnum (32. mynd).

2018 sýnir yfirborð almennt innan við 10 metra frá yfirborðshæðinni rétt fyrir hlaupið 2015; á stöku stað er yfirborðshæðin hærri en fyrir 2015 hlaupið. Suðurtunga ketilsins, sem myndaðist í hlaupinu 2015, og suðvestur kantur ketilsins voru einu staðirnir þar sem jökulyfirborðið var enn meira en 10 m lægra en fyrir hlaupið 2015.

Á seinni hluta tímabilsins milli hlaupanna 2010 og 2015 urðu frekar litlar breytingar á yfirborði Eystri-Skaftárketils ef frá er taldar árstíðabundnar sveiflur (17. mynd). Líklega er ein aðal ástæða þess að það hljóp svona seint undan katlinum umtalsverður leki í gegnum grunnvatnskerfið undir honum. GPS-snið mæld í desember 2017 og júní 2018 (18.–19. mynd) gefa til kynna sig upp á 2–3 metra sig í miðju ketilsins. GPS-stöð sem Veðurstofa Íslands rekur í miðju ketilsins staðfestir þetta (upplýsingar frá Benedikt Ófeigssyni). Þetta er sterk vísbending að einnig hafi lekið undan katlinum milli hlaupanna 2015 og 2018.

Íssjármælingarnar sýna að umfang og rúmmál vatnsgeymisins óx frá vori 2014 til vors 2015 og þessar stærðir héldust nokkurn vegin í hendur því að á sama tíma er óveruleg breyting í meðalþykkt vatnsgeymisins undir katlinum (34. mynd). Eftir hlaupið óx umfang vatnsbólunnar frekar hægt en hún var að jafnaði mun þykkari 2016 og 2017. Frá vori 2017 til vors 2018 þrefaldaðist umfang bólunnar en á sama tíma varð innan við tvöföldun í rúmtaki hennar og meðalþykkt vatnsbólunnar var þá aftur sambærileg við meðalþykktina 2014 og 2015. Vatnið var hins vegar mun jafndreifðara 2014 og 2015. Vorið 2018 var langmestur hluti vatnsins undir katlinum miðjum. Mun minna vatn var t.d. í suðausturtotu ketilsins og norður af ketilmiðjunni en vorið 2015 (31. mynd c og f). Þetta staðfestist í hlaupinu um sumarið því þá var talsvert meiri lækun í miðjum katlinum en í hlaupinu 2015 meðan jaðarsvæðin lækkuðu mun minna (23. mynd c). Að þessu leyti má segja að hlaupið í ágúst 2018 hafi verið visst afturhvarf til hlaupsins 2010 (22. mynd a) og eldri hlaupa.



Mynd 35. Þvermál Skaftárkatla 1938–2015. Þvermálið miðast við ystu umtalsverðu sprungur í katlinum eftir sig.

## 5 Umræða og samantekt

### 5.1 Stærð katlanna undanfarin 80 ár

Þvermál og flatarmál Eystri-Skaftárketils og þvermál þess vestari eru sýnd á 35. mynd. Gögn um vestari ketilinn eru fátæklegri a.m.k. fram til 1990 og því er þróun flatarmáls ekki metið fyrir hann, aðeins þvermál. Í ljósi þess að lögun ketilsins hefur lítið breyst þar sem hann hefur verið sporöskjulaga með langás norðaustur-suðvestur a.m.k. frá því eftir 1970 má reikna með að flatarmálið hafi þróast með sama hætti og þvermálið.

Eystri-Skaftárketill óx hratt frá 1940 til 1970. Á árunum 1985–2010 eru tiltölulega litlar breytingar en ketillinn minnkar þó heldur. Síðan kemur mikið stökk á árunum 2010 til 2015 og eins og áður hefur komið fram er sennilegast að þessi breyting stafi af tilfærslu jarðhita undir honum.

### 5.2 Leki úr Eystri-Skaftárkatli

Hegðun Eystri-Skaftárketils á árunum 1997 til 2010 bendir ekki til þess að leki hafi haft umtalsverð áhrif á vatnssöfnun undir honum (5. mynd og 1. tafla). Í 1. töflu er afl Eystri-Skaftárketils metið út frá yfirborðsafkomu og hæðarbreytingum í katlinum fyrir tímabilið 1998–2010. Niðurstaða þess mats er svipað jarðhitaafli 1998–2010 (~980 MW) og fæst með óháðri aðferð sem byggir á stærð hlaupanna (sjá 5.3, 800–900 MW). Þetta bendir eindregið til þess að leki á þessu tímabili hafi verið óverulegur miðað við það sem var á tímabilinu 2010 til 2015. Svipuð vísbending er einnig í þróun yfirborðshæðarinnar (5. mynd). Á árunum 1997–2010 líða eitt til þrjú ár á milli hlaupa og botn ketilsins rís með svipuðum hætti, um marga tugi metra fyrsta árið eftir hlaup en síðan 1–1.5 m/mánuði næstu 1–2 ár fram að næsta hlaupi. Eins og fram kemur hér að framan jókst flatarmál ketilsins mikið á árunum 2012–2015 á sama tíma og leka verður vart en hann er metinn um 1–2 m<sup>3</sup>/s á árunum 2010–2015 (23. mynd). Á þessum fimm árum víkkaði ketillinn til vesturs og norðurs en einkum til suðausturs (22. og 29. mynd). Líklegast verður að telja að lekinn verði um þennan nýja botn, vestan eða austan megin. Lækkun yfirborðs ketilsins veturinn 2017–2018 er vísbending um að þá hafi einnig lekið úr katlinum.

Berggrunnur í gosbeltinu er víða mjög lekur. Þá geta jarðskorpuhreyfingar orsakað verulegar breytingar á grunnvatnsstöðu, t.d. eins og sjá mátti í Kleifarvatni eftir jarðskjálftana 2000 þegar sprungur opnuðust í vatnsbotninum. Engar vísbendingar eru reyndar um umtalsverðar sprunguhreyfingar við Skaftárkatla á síðustu árum. Lekt hefur verið metin í ungum jarðmyndunum, t.d. á Tungnaárvæðinu þar sem innri lekt (permeability) fyrir nútímahraun var af stærðarþrepinu  $1\text{-}5\cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup> (lektarstuðull  $K=0.0015\text{-}0.003$  m/s) (Jón Ingimarsson, 1980; Bjarni Kristinsson, 1981). Við mat á vatnafari Skaftárvæðisins voru notaðar tölur sem samsvara innri lekt  $1\text{-}5\cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup> fyrir bólstraberg og sprungulekt af stærðargráðunni  $1\cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup> (Ríkey Hlín Sævarsdóttir, 2002a, 2002b).

Til að meta stærðargráðu rennslis með grunnvatni þarf að áætla sennilegan halla grunnvatnsborðs á svæðinu. Fyrsta nálgun á þann halla er að hann hafi verið álíka og halli jökulyfirborðsins, þ.e. um 100 m lækkun á 5 kílómetra bili og að þar með hafi fallandi grunnvatnsborðsins verið 0.02 með stefnu niður til suðvesturs. Fyrir innri lekt  $1\cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>, fæst að þversnið

grunnvatnsgeymis sem gæti flutt 1–2 m<sup>3</sup>/s er álíka og flötur sem væri 100 m breiður og næði 100 m niður í berggrunninn Ef notuð er berglektin  $3 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup> frá Tungnaársvæðinu þarf breidd svæðis sem nær 100 m niður að vera 300 m. Breidd þessara reiknuðu lekasvæða er minni en nemur breikkun Eystri-Skaftárketils milli 2010 og 2015.

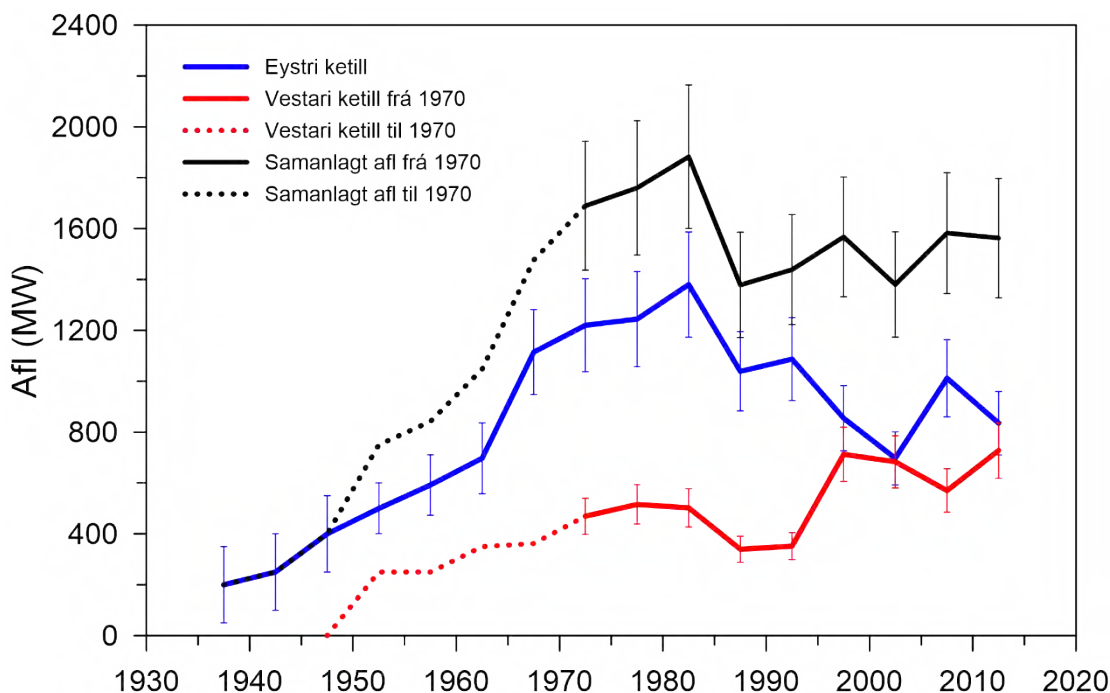
Telja verður sennilegt að botn Skaftárkatlanna sé þakinn þéttu lagi sem samanstendur af leir og silti sem berst inn í ketilinn með ísskriði og efnunum sem falla út úr jarðhitavatni þegar það kólnar. Slík þekja myndi þetta botninn og gera hann nokkurn veginn vatnsheldan. Hinsvegar er raunhæft að telja að við víkkun ketilsins, e.t.v. samfara tilfærslu í jarðhitauppstreymi, hafi jökullinn lyfst af stöðum þar sem berggrunnur er bæði sprunginn og óþéttur og engin þekja fínefnis þéttir botninn. Það er því líklegast að lekasvæðin séu við jaðrana. Ef ekki koma til aðrar breytingar, s.s. eins og jarðskorpuhreyfingar, og ef víkkun ketilsins yrði varanleg, má búast við botninn þéttist og að með tímanum dragi úr lekanum.

### 5.3 Jarðhitaafli

Ein athyglisverðasta niðurstaða þessarar samantektar er vöxtur varmaafli katlanna á undanförmum 80 árum. Á 36. mynd er sýnd þróun jarðhitaafli beggja katla yfir tímabilið frá því fyrir 1940. Metið er afl fyrir hvert fimm ára tímabil. Notaðar eru niðurstöður mælinga á stærð Skaftárhlaupa 1955–2017 (sjá 6. mynd, Auður Atladóttir o.fl., 2013; Veðurstofa Íslands, óbirtar mælingar 2012–2017). Hlaupvatninu er skipt niður á tímabilin og reiknað með að vatnssöfnun og jarðhitaafli sé það sama milli hverra tveggja hlaupa. Ekki er gert ráð fyrir áhrifum leka nema að niðurstaða úr 1. töflu um afl Eystri-Skaftárketils á tímabilinu 2010–2015 er notuð í stað rúmmáls hlaupvatns í hlaupinu 2015. Hluti vatnsins sem safnast í katlana er sumarafkoman, þ.e. leysing á yfirborði innan vatnasviðs hvors ketils. Til að meta sumarafkomuna fyrir hvert ár er notað líkan Philippe Crochet og Tómasar Jóhannessonar (2011) fyrir sumarhita á Kirkjubæjarklaustri. Gert er ráð fyrir að sumarafkoman í kötlunum sé línulega háð sumarhita á Kirkjubæjarklaustri en líkanið var kvarðað með samanburði við mældu sumarafkomu í Grímsvötnum 1992–2016 (Finnur Pálsson o.fl., 2015 og óbirt gögn). Þó sumarafkoman sé mjög breytileg er hún reyndar tiltölulega lítil þáttur í vatnssöfnuninni flest árin. Því er niðurstaðan um afl katlanna ekki næm fyrir því hvaða aðferð er notuð við að meta hana, t.d. gefur föst sumarafkoma yfir allt tímabilið mjög svipaða niðurstöðu og sýnd er á 36. mynd.

Eins og 36. mynd leiðir í ljós, vex afl eystri ketilsins úr 200–300 MW kringum 1940 í 1100–1300 MW um 1970. Það lækkar aftur á árunum 1985–2000 niður í 700–900 MW. Svo er að sjá að frá og með 2005 hafi afl ketilsins verið nokkuð stöðugt. Vestari ketillinn kemur fram einhvern tíma eftir 1946 og hafði náð nokkurri stærð um 1960 (11. mynd). Afl hans fer síðan vaxandi og nálægt 600–700 MW undanfarin 20 ár. Samanlagt afl katlanna hefur verið 1400–1600 MW undanfarna finn áratugi. Þetta afl dugar til að bræða 130–150 GJ á ári.





Mynd 36. Afl jarðhitans undir Skaftárkötllum frá því á fjórða áratugnum fram til 2015. Frá 1935-1950 er aflíð byggt á grófu mati á stærð Eystri-Skaftárketils og reiknað með að hann hafi náð að fylla sig á einu ári. Milli 1950 og 2010 er aflíð byggt á mældu rúmmáli hlaupvatns (5. mynd) og dregin frá metin sumarafkoma (sumarleysing) innan ísasviðs ketilsins. Á tímabilinu 2010–2015 er aflíð byggt á mati á bráðnun undir katlinum.

## 5.4 Möguleg þróun næstu áratugi

- Skaftárkatlar hafa á síðustu 80 árum vaxið úr því að vera lítið jarðhitasvæði sem á árunum kringum 1940 bræddi sennilega 15–25 GJ á ári hverju, yfir í að verða eitthvert öflugasta jarðhitasvæði á landinu þrjátíu árum síðar. Engar vísbendingar eru um að jarðhitavirkni minnki. Meðan vestari ketillinn hefur þróast í átt að heldur stærri og tíðari hlaupum á síðustu 20 árum er breytingar þar fremur hægar. Eystri ketillinn sýnir af sér mun flóknari hegðun eins og hér hefur komið fram með víkkun og nokkurri stækkun vatnsgeymis, auk þess að leki hefur verið umtalsverður frá 2010.
- Engin leið er að segja til um hvernig þróunin verður næstu ár og áratugi. Mögulegt er þó að skoða mismunandi sviðsmyndir:
- Jarðhiti undir kötlunum helst að mestu stöðugur miðað við það sem nú er, stærð katlana héldist svipuð og nú er og sennilegt er að hlaup yrðu svipuð og nú.
- Afl vestari ketilsins vex en sá eystri helst stöðugur. Sennilegt er að vestari ketillinn bregðist við með tíðari hlaupum og að sig í hverju hlaupi aukist, a.m.k. þar til ísflæði inn að katlinum, hefur aukist nægilega samhliða stækkun ísasvæðisins, til að ná jafnvægi við aukna bráðnun. Hlaup myndu stækka eitthvað en í ljósi þess að lögun ketilsins hefur lítið breyst í a.m.k. 30 ár, er ekkert sem bendir til að stökkbreytingar yrðu.

- E. Afl eystri ketilsins vex. Hér gæti vatnsgeymirinn stækkað enn frá því sem nú er. Sennilegt er að á meðan ketillinn víkkar verði leki verulegur. Það getur þýtt að tími milli hlaupa verði langur (3–5 ár) og að hlaupin fari stækkandi.
- F. Afl eystri ketilsins helst svipað frá því sem nú er en jarðhiti færir til og leitar út í jaðrana. Við þessar aðstæður má búast við að ketillinn víkki og vatnsgeymirinn stækki. Áhrifin eru færri og stærri hlaup.
- G. Jarðhiti í eystri katlinum leitar meira til suðurs en nú er. Þróun af þessu tagi gæti leitt til þess að ísstíflan sem lokar katlinum myndi þynnast og vatn færi að leka út eða hlaupa við lægri vatnsstöðu. Sennilegast er að afleiðing þessarar hegðunar yrði að tíðari en smærri hlaup, jafnvel stöðugur leki. Grímsvötn hafa á undanförunum 20 árum þróast yfir í þessa stöðu þar sem jarðhiti hefur lækkað ísstífluna í Grímsvatnaskarði mikið en jarðhitaafli hafi heldur aukist þar undanfarin 20 ár (Reynolds o.fl., 2018).
- H. Uppstreymi jarðhita undir eystri katlinum leitar aftur í fyrra horf, umfang ketilsins minnkar og hann verður aftur svipaður því sem var fyrir 2010. Hugsanlega má finna vísbendingu um slíka þróun, því miðja ketilsins seig meira 2018 en 2015 meðan jaðarsvæðin lækkuðu mun minna (24. mynd c).

Ýmsir fleiri möguleikar eru í stöðunni. Það er t.d. ekki óhugsandi að jarðhiti komi upp á milli katlanna eða að svæðin sameinist. Við það gæti orðið bein tenging milli katlanna. Sennilega myndi það leiða til þess að mjög myndi draga úr vatnssöfnun í eystri katlinum, hlaup yrðu sennilega minni og tíðari.

Eins og ofangreindar sviðsmyndir benda til ræðst möguleg flóðahætta af mörgum breytum sem ógerningur er að segja fyrir um. Þær undirstrika jafnframt hve nauðsynlegt það er að hugað sé að vöktun Skaftárkatla á hverjum tíma, að hæð í botni katlanna sé þekkt og að til sé mat hversu mikið vatn er í hvorum katli á hverjum tíma.

## 6 Niðurstöður

- Eystri-Skaftárketill var miklu minni 1938 en síðar varð. Flatarmál ketilsins óx úr <1 km<sup>2</sup> í 3,5 km<sup>2</sup> milli 1938 og 1970. Ketillinn minnkaði aðeins aftur (í 2,5–3 km<sup>2</sup> þar til hann stækkaði skyndilega í 5,5 km<sup>2</sup> 2015.
- Engin merki sjást um Vestari-Skaftárketil 1938, 1945 og 1946 og líklegt að hann hafi ekki farið að myndast fyrr en á 6. áratug 20. aldar.
- Á loftmyndum frá 1960 er vestari ketillinn kominn fram, nokkru minni en hann er nú.
- Eystri ketillinn breytist ekki mikið milli 1970 og 2010, minnkar aðeins ef eitthvað er.
- Stækkun Eystri-Skaftárketils 2015 var ekki tengd auknu afli hans heldur breytingum í dreifingu varmaústreymis jarðhitasvæðisins undir katlinum.
- Á tímabilinu 2010–2015 lak rösklega 40% þess vatns sem barst til eystri ketilsins frá honum áður en til hlaups kom.
- Þróun katlanna frá 1938 fellur vel að því að fyrir 1955 hafi aðeins komið lítil hlaup í Skaftá, þau hafi verið því sem næst árleg, hafi yfirleitt komið seinni hluta sumars eða að hausti.
- Ástæða fyrir stækkun Skaftárkatla er aukin jarðhitavirkni. Skaftárkatlar eru nú eitt öflugasta jarðhitasvæði landsins með heildarafl 1400–1600 MW.
- Mögulegar sviðsmyndir af þróun eru margar, en aukin jarðhitavirkni í eystri katlinum samfara víkkun hans gæti leitt til þess að hlaup yrðu stærri en hlaupið 2015. Erfitt er að segja um hvaða áhrif vaxandi virkni myndi hafa á vestari ketilinn, en vísbendingar síðustu ára eru þær að hann bregðist við auknu afli með tíðari hlaupum.

## 7 Þakkir

Verkið byggir að stórum hluta á safni margvíslegra gagna sem orðið hefur til undanfarin aldarfjórðung. Öflun þeirra gagna hefur verið styrkt af mörgum aðilum. Verulegur hluti mælinganna hefur verið unninn í vorferðum Jöklarannsóknafélags Íslands með aðstoð sjálfboðaliða félagsins. Áhöfn TF-FMS, mælingaflugvélar Isavia, á stóran þátt í að tekist hefur að ná gögnum um hæðarbreytingar í kötlunum í mörgum hlaupum undanfarin 18 ár. TandemX gervitunglagögn fengust gegnum verkefnið NTI\_BIST6868. Afkomumælingar á Vatnajökli hafa frá 1992 að stærstum hluta verið kostaðar af Landsvirkjun, en Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar hefur stutt við afkomumælingar og aðra gagnaöflun nærri Skaftárkötlum. Veðurstofa Íslands lagði til óbirt gögn um rennsli í Skaftárhlaupum auk gagna um boranir í Skaftárkatla. Carsten Jón Kristinsson hjá Landmælingum Íslands skannaði eldri loftmyndir sem notaðar eru í skýrslunni. Hluti vinnunnar var kostaður af rannsóknarverkefninu Katla kalda sem styrkt er af Rannsóknasjóði Vísinda- og tækniráðs. Oddur Sigurðsson, Tómas Jóhannesson, Davíð Egilson, Þorsteinn Þorsteinsson, Matthew Roberts og Sigurlaug Gunnlaugsdóttir lásu yfir og komu með margar gagnlegar ábendingar um það sem betur mætti fara.

## 8 Heimildir

- Andrés Kristjánsson (1963). *Geysir á Bárðarbungu*. Reykjavík: Skuggsjá.
- Auður Atladóttir (ritstj), Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Oddur Sigurðsson, Bergur Einarsson, Gunnar Sigurðsson & Jórunn Harðardóttir. (2013). *Handbók um Skaftárhlaup Viðbragðsáætlun*. Skýrsla VÍ 2013-003. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Bergur Einarsson, T. Jóhannesson, T. Thorsteinsson, E. Gaidos & T. Zwinger (2017). Subglacial flood path development during a rapidly rising jokulhlaup from the western Skafta cauldron, Vatnajökull, Iceland. *Journal of Glaciology*, 63, 670-682,
- Berthier, Ethienne & Thierry Toutin (2008). SPOT5-HRS digital elevation models and the monitoring of glacier elevation changes in North-West Canada and South-East Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2443-2454.
- Bjarni Kristinsson (1981). Grunnvatnsathuganir á svæði Sultartangavirkjunar. Reykjavík: Orkustofnun, Vatnsorkudeild, BK-81/01, 39 bls.
- Crochet, Philippe, & Tómas Jóhannesson (2010). A dataset of daily temperature in Iceland for the period 1949-2010. *Jökull*, 61, 1-17, 2011.
- Davíð Egilson, Matthew J. Roberts, Emmanuel Pagneux, Esther Hlíðar Jensen, Magnús Tumi Guðmundsson, Tómas Jóhannesson, Matthías Ásgeir Jónsson, Snorri Zóphóníasson, Bogi B. Björnsson, Tinna Þórarinsdóttir og Sigrún Karlsdóttir (2018). Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá. Samantekt. Veðurstofa Íslands, VÍ 2018-016, 63 bls.
- Dirscherl, Mariel, & Rossi, C. 2018. Geomorphometric analysis of the 2014-2015 Bárðarbunga volcanic eruption, Iceland. *Remote Sensing of the Environment*, 204, 244-259.
- Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson & Davíð Egilson (2018a). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Útbreiðsla og flóðhæð Skaftárhlaupsins haustið 2015*. Skýrsla VÍ 2018-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Emmanuel Pagneux, Matthías Á. Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson & Matthew J. Roberts (2018b). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Hermun flóðasviðsmynda*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands. Reykjavík.
- Esther Hlíðar Jensen, Davíð Egilson, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Snorri Zóphóníasson, Snorri Páll Snorrason, Ingibjörg Jónsdóttir, Ragnar H. Þrastarson, Oddur Sigurðsson & Matthew J. Roberts (2018a). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Mat á setflutningi með sögulegu yfirliti*. Skýrsla VÍ 2018-005. Reykjavík: Veðurstofa Ísland
- Esther Hlíðar Jensen, Davíð Egilson, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Snorri Zóphóníasson, Ingibjörg Jónsdóttir, Matthías Á. Jónsson, Ragnar H. Þrastarson & Matthew J. Roberts (2018b). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Set í hlaupi haustið 2015*. Skýrsla VÍ 2018-006. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Eyjólfur Magnússon (2003). Airborne SAR data from S-Iceland: analyses, DEM improvements and glaciological applications. M.Sc. ritgerð frá Raunvísindadeild Háskóla Íslands, 130 bls.
- Eyjólfur Magnússon, H. Björnsson, F. Pálsson & Dall, J. (2004). Glaciological application of InSAR topography data of western Vatnajökull acquired in 1998. *Jökull*, 54, 17-36.
- Eyjólfur Magnússon, J. M. -C. Belart, F. Pálsson, L. S. Anderson, Á. Þ. Gunnlaugsson, E. Berthier, H. Ágústsson & Á. Geirsdóttir (2016a). The subglacial topography of Drangajökull ice cap, NW-Iceland, deduced from dense RES-profiling. *Jökull*, 66, 1-26.
- Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir & Cristian Rossi (2016b). Jökulhlaup í Sveðju í júlí 2011: Íssjármælingar við Hamarsketil vorin 2013, 2014 og 2015 og yfirborðshæðarbreytingar í katlinum og nágrenni hans 1998-2015, febrúar 2016, RH-02-2016

- Finnur Pálsson, Helgi Björnsson & Hannes Haraldsson (2002). Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2000-2001. RH-02-2002.
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Þorsteinn Jónsson, Sveinbjörn Steinþórsson & Hlynur Skagfjörð Pálsson (2013). Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2012\_13. Institute of Earth Sciences, University of Iceland and National Power Company, december 2013, RH-26-2013 54 bls
- Finnur Pálsson (2014). Greinargerð vegna styrks árið 2013 af tilraunafé til samvinnu um rannsóknir á Grímsvatnahlaupum. Mars 2014, 12. bls.
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Þorsteinn Jónsson, Sveinbjörn Steinþórsson & Hlynur Skagfjörð Pálsson (2015). 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
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Ágúst Þór Gunnlaugsson, Gestur Jónsson, Hlynur Skagfjörð Pálsson, Sveinbjörn Steinþórsson, Þorsteinn Jónsson (2017). VATNAJÖKULL: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2016\_17. Institute of Earth Sciences University of Iceland and National Power Company, RH-07-2017
- Helgi Björnsson (1977). The cause of jökulhlaups in the Skaftá river, Vatnajökull. *Jökull*, 27, 71-78.
- Helgi Björnsson (1988). Hydrology of ice caps in volcanic regions. *Vísindafélag Íslendinga*, rit 45, 139 s, 21 maps. Reykjavík.
- Helgi Björnsson (2009). *Jöklar á Íslandi*. Reykjavík: Bókaútgáfan Opna.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Magnús T. Guðmundsson & Hannes H. Haraldsson (1998). Mass balance of western and northern Vatnajökull, Iceland, 1991-1995. *Jökull*, 45, 35-38.
- Helgi Björnsson, F. Pálsson, S. Gudmundsson, E. Magnússon, G. Adalgeirsdóttir, T. Jóhannesson, E. Berthier, O. Sigurdsson, & Th. Thorsteinsson (2013). Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: Trends and variability since the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, 1-5, doi:10.1002/grl.50278
- Helgi Björnsson & Páll Einarsson (1990). Volcanoes beneath Vatnajökull, Iceland: Evidence from radio echo-sounding, earthquakes and jökulhlaups. *Jökull*, 40, 147-168.
- Jakob F. Ásgeirsson (1984). *Alfreðs saga og Loftleiða*. Reykjavík: Iðunn.
- Jón Eyþórsson (1951). Fransk-íslenski Vatnajökulsleiðangurinn, marz-apríl 1951. *Jökull*, 1, 10-14.
- Jón Eyþórsson (1954). Vatnajökulsleiðangur 1954. *Jökull*, 4, 33.
- Jón Eyþórsson (1955). Vatnajökulsför 1955. *Jökull*, 5, 23-27.
- Jón Ingimarsson (1980). Sultartangavirkjun. Dæluþrófanir 1980. JI-80/06 Greinargerð. 18 bls.
- Jón E. Ísdal (1998). Ferðir um Vatnajökul. *Jökull*, 45, 59-88.
- Korona J., Berthier, E., Bernard, M., Remy, F. & Thouvenot, E. (2009). SPIRIT. SPOT 5 stereoscopic survey of Polar Ice: Reference Images and Topographies during the fourth International Polar Year (2007-2009). *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 64, 204-212. doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.10.005.
- Magnús T. Gudmundsson, & Helgi Björnsson (1993). Eruptions in Grímsvötn 1934-1991. *Jökull*, 41, 21-46.
- Magnús T. Gudmundsson, F. Sigmundsson & H. Björnsson (1997). Ice-volcano interaction of the 1996 Gjalp subglacial eruption, Vatnajökull, Iceland. *Nature*, 389, 954-957.
- Magnús T. Gudmundsson, Högnadóttir, Þ., Kristinsson, A.B. & Guðbjörnsson, S. (2007). *Geothermal activity in the subglacial Katla caldera, Iceland, 1999-2005, studied with radar altimetry*. *Annals of Glaciology*, 45, 66-72.

- Magnús T. Gudmundsson, K. Jónsdóttir, A. Hooper, E.P. Holohan, S.A. Halldórsson, B.G. Ófeigsson, S. Cesca, K.S. Vogfjörð, F. Sigmundsson, Th. Högnadóttir, P. Einarsson, O. Sigmarsson, A.H. Jarosch, K. Jónasson, E. Magnússon, S. Hreinsdóttir, M. Bagnardi, M.M. Parks, V. Hjörleifsdóttir, F. Pálsson, T.R. Walter, M.P.J. Schöpfer, S. Heimann, H.I. Reynolds, S. Dumont, E. Bali, G.H. Gudfinnsson, T. Dahm, M.J. Roberts, M. Hensch, J. M.C. Belart, K. Spaans, S. Jakobsson, G.B. Gudmundsson, H.M. Fridriksdóttir, V. Drouin, T. Dürig, G. Adalgeirsdóttir, M.S. Riishuus, G.B.M. Pedersen, T. van Boeckel, B. Oddsson, M.A. Pfeffer, S. Barsotti, B. Bergsson, A. Donovan, M.R. Burton & A. Aiuppa (2016). Gradual caldera collapse at Bárðarbunga volcano, Iceland regulated by lateral magma outflow. *Science* 353, aaf8988. doi: 10.1126/science.aaf8988.
- Matthías Ásgeir Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson, Tómas Jóhannesson & Matthew J. Roberts (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Kvörðun straumfræðilíkans*. Skýrsla VÍ 2018-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Morgunblaðið, 5. apríl 1997. Sigurjón Pálsson, minningarorð.
- Nørlund, N.E. (1944). Islands Kortlægning. En historisk fremstilling. *Geodetisk Instituts publikasjoner* 7. København: Ejnar Munksgaard.
- Pálmi Hannesson (1958). Skeiðarárhlaupið 1945. Í: *Frá Óbyggðum*. Reykjavík: Bókaútgáfa Menningarsjóðs, 293-320.
- Ríkey Hlín Sævarsdóttir (2002a). Berglektarkort af Skaftárvæðinu. Orkustofnun, vatnamælingar, OS-2002/035, 20 bls.
- Ríkey Hlín Sævarsdóttir (2002b). Sprungulektarkort af Skaftárvæðinu. Orkustofnun, vatnamælingar, OS-2002/039, 20 bls.
- Rossi, Cristian, Minet, C., Fritz, T., Eineder, M. & Bamler, R. (2016). Temporal monitoring of subglacial volcanoes with TanDEM-X – Application to the 2014-2015 eruption within the Bárðarbunga volcanic system, Iceland. *Remote Sensing of the Environment*, 181, 186-197.
- Sigurður Þórarinsson, (1953). The Grímsvötn expedition June-July 1953. *Jökull*, 3, 6-22.
- Sigurður Þórarinsson (1956). Vatnajökulsleiðangur 1956. *Jökull*, 6, 38-46.
- Sigurður Þórarinsson & Sigurjón Rist (1955). Skaftárhlaup í sept. 1955. *Jökull*, 5, 36-40.
- Sigurjón Pálsson (1968). Kúðafliót. *Goðasteinn*, 7, 2, 32-40.
- Snorri Zóphóníasson (2002). Rennsli í Skaftárhlaupum 1955–2002. Reykjavík: Orkustofnun, vatnamælingar. Greinargerð SZ-2002-01.
- Thorarinsson, S. (1953). The Grímsvötn expedition 1953. *Jökull*, 3, 6-23.
- Thorarinsson, S. & Sigurðsson, S. (1947). Volcano-glaciological investigationw in Iceland during the last decade. *The Polar Record*, 5 (33-34), 60-66.
- Tómas Jóhannesson, Þorsteinn Þorsteinsson, Andri Stefánsson, Eric J. Gaidos & Bergur Einarsson (2007). Circulation and thermodynamics in a subglacial geothermal lake under the Western Skaftá cauldron of the Vatnajökull ice cap, Iceland. *Geophys. Res. Letters*, 34, L19502.
- Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson & Ethienne Berthier (2013). Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Annals of Glaciology*, 54, 63, 63-74.
- Watts, W.L. (1962). *Norður yfir Vatnajökul 1875*. Reykjavík: Bókfellsútgáfan.

## Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá Skaftárkatlar – saga og þróun 1938–2018

Veðurstofa Íslands  
Bústaðavegi 7–9  
108 Reykjavík  
[www.vedur.is](http://www.vedur.is)  
Sími: 522 6000

Jarðvísindastofnun Háskólans  
Sturlugata 7  
101 Reykjavík  
[www.jardvis.hi.is](http://www.jardvis.hi.is)  
Sími: 525 4800

Forsíðumynd: Skaftárkatlar 1. nóvember 2018  
Frá Sentinel-2B gervihnetti ESA (European Space Agency)