

# **Breytingar á austanverðum Skeiðarárjökli og farvegi Skeiðarár 1997-2009 og framtíðarhorfur**

Eyjólfur Magnússon

Helgi Björnsson

Finnur Pálsson

Jarðvísindastofnun Háskólans

Maí 2009

RH-08-2009

## Inngangur

Miklar breytingar hafa orðið á sporði Skeiðarárjökuls (1. mynd) undanfarin ár. Í kjölfar Gjálpargossins voru efldar rannsóknir á Skeiðarárjökli og því eru til loftmyndir og hæðarlíkön af sporði jökulssins frá árinu 1997 (2. mynd). Síðan hefur jökulinn hopað mikið og jaðarlón byrjað að myndast. Einnig hefur útfall Skeiðarár breyst þannig að í stað þess að renna beint í austur frá austurhorni jökulsins (2. mynd) er meginútfall hennar nú nokkru sunnar og rennur áin þaðan í suðvestur (sjá 1. og 3. mynd). Við núverandi loftslag má vænta frekari breytinga á Skeiðarárjökli og farvegi Skeiðarár. Í þessari skýrslu er birt nýtt botnkort af austanverðum jöklinum og greint frá þeim breytingum sem orðið hafa á honum síðan 1997. Að lokum er reynt að meta hvort frekari breytinga sé að vænta á farvegi Skeiðarár á næstu árum.

## Gögn

Á árunum 1993-1998 var Skeiðarárjökull íssjármældur. Þær mælingar samanstanda af sniðmælingum (1993-1994) þar sem þeim var við komið og punktmælingum af neðsta og ógreiðfærasta hluta jökulsins (1997-1998). Þéttleiki þessara mælinga var ekki nægjanlegur til að gera þá könnun sem hér er útlistuð og því voru frekari punktmælingar gerðar á austursporði jökulssins í desember 2008 (3. mynd). Auk þess að gera GPS-mælingar í íssjármælipunktum (nákvæmni í hæð um 1 m) voru mæld GPS-snið utan með jökuljaðri og ströndum lóna (nákvæmni í hæð um 2 m). Einnig voru mældar vatnshæðir lóna (LON1 og LON2 punktar á 3. mynd) og hæð meginútfalls Skeiðarár (LON4 á 3. mynd, nákvæmni sú sama og íssjármælipunktum). Önnur gögn sem notast var við voru; **a)** hæðarlíkön Loftmynda ehf. frá 1997 og 2003 (4. mynd) í 20m x 20m upplausn sem ná yfir hluta rannsóknarsvæðis, **b)** hæðarlíkan byggt á hæðarlínum hnituðum af korti Loftmynda ehf. af Skaftafelli og nágrenni frá 2003 reiknað í 20m x 20m upplausn (5. mynd), **c)** hæðarlíkan byggt á leysihæðarmælingum frá 2007 í 1m x 1m upplausn gert af Háskólanum í Newcastle (6. mynd), **d)** upprétt loftmynd frá Loftmyndum ehf. af sporði Skeiðarárjökuls frá 2007 (1. og 3. mynd).

## Úrvinnsla

Út frá botnhæð í íssjármælipunktum og sniðum (34 nýjir punkta auk eldri punkta og sniða, sjá 7. mynd), hæð við jökuljaðar og lónstrendur (fengið út frá hæðarlíkani frá 2007 og GPS-mælingum) og botnhæð á samskeytum við eldra botnlíkan var reiknað frumuppkast að botnlíkani í Surfer frá Golden Software með kringing aðferð. Það líkan var síðan haft til hliðsjónar þegar nýjar botnhæðarlínur með 20 m millibili voru dregnar. Hver hæðarlína var síðan hnituð með 50 m bil á milli punkta. Hnituðu hæðarlínurnar ásamt jaðarhæðargildum og botnhæðargildum á samskeytum voru síðan notaðar til að reikna endanlegt botnlíkan í Surfer með kringing aðferð. Leitarradíus var skilgreindur sem 5 km, leitarskífu skipt í fernt, með 64 sem hámarksfjölda punkta (3 sem lágmark) í hverju leitarsvæði og 256 sem hámarksfjölda (8 sem lágmark) fyrir skífuna í heild. Landið utan jökuls var felld saman úr tiltækum hæðarlíkönum í eftirfarandi forgangs röðun; 2007 (6. mynd), 2003 (4. mynd B), 1997 (4. mynd A) og 2003 (5. mynd). Nánar er fjallað um þessi hæðarlíkön síðar í þessum kafla.

Jaðar fyrir árið 1997 (8. mynd) var hnitaður af hæðarlíkni þess árs frá Loftmyndum ehf. með því að skoða það sem skuggamynd í Surfer með hæðarlínur lagðar ofan á. Jaðarinn kemur yfirleitt nokkuð skýrt fram með þessum hætti sem hallabreyting yfirborðs. Jökuljaðar frá 2003 var hnitaður upp af korti Loftmynda ehf. af Skaftafelli og nágrenni. Jökuljaðar frá 2007 er dreginn upp með því að nýta sér bæði upprétta loftmynd frá 2007 (1. og 3. mynd) og leysihæðarlíkanið frá Háskólanum í Newcastle (6. mynd), skoðað sem skuggamynd í Surfer.

Við samanburð á hæðarlíkönum var gengið út frá því að engin hæðarhliðrun væri í hæðarlíkaninu frá 1997 þar sem það líkan er vel skorðað með GPS-landmælingum (skv. munnlegum upplýsingum frá Halldóri S. Haukssyni hjá Vegagerðinni). Með því að bera saman hæðarlíkan Loftmynda frá 2003 (4. mynd B) við hæðarlíkanið frá 1997 á svæðum þar sem gera má ráð fyrir að ekkert rof hafi átt sér stað var líkaninu frá 2003 hliðrað um 1.4 m niður á við. Hæðarlíkanið sem reiknað er út frá hæðarlínunum af Loftmynda frá 2003 (5. mynd) er byggt á sama gagnagrunni og líkanið á 4. mynd B. Það nær yfir mun stærra svæði og var mismunur hæðarlína og kortsins frá 1997 það breytilegur að ekki var réttlætanlegt að yfirfæra sömu hæðarhliðrun yfir á hæðarlínurnar af korti Loftmynda ehf. Ekki var reiknuð leiðrétting fyrir það kort. Hæðarviðmiðunarkerfi hæðarlíkanins 2007 var ekki þekkt með vissu.

Eftir að dregið hafði verið frá því geóíðuhæð var það borið saman við líkanið frá 1997 á sama hátt og áður sem gaf að hæðarlíkanið frá 2007 skyldi hliðrast niður um 1.8 m. Útreiknaðar hliðranir á 2003 og 2007 hæðarlíkönun samræmast ágætlega GPS-mælingum í desember 2008 utan jökuls.

Við útreikninga á hæðabreytingum var notast við hæðarlíkön frá 1997, 2003 (byggt á hæðarlínum, óhliðarað) og leiðrétt hæðarlíkani frá 2007. Niðurstaðan sem birt er á 9. mynd er beinn mismunur tveggja fyrstnefndu hæðarlíkananna, deilt yfir tímabilið. Þar sem hæðarlíkanið frá 2007 er ekki samfellt var brúað í eyður fyrir mismun líkana með kriging aðferð í Surfer. Hæðarbreytingin, deilt yfir tímabilið frá 2003 til 2007 sem sýnd er á 10. mynd, hefur einnig verið síuð með 220 m x 220 m (11x11 punkta) meðaltalssíu. Hin litla lækkun neðst á austasta hluta jökulsins skýrist líklega af tveimur aðstæðum. Annars vegar er hluti jökulsins líklega á floti og hins vegar eru sumir hlutar þessa svæðis komnir með svo þykka aurkápu að hún er farin að einangra jökullinn og þar með draga úr bráðnun.

Mætti var reiknað sem

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

Fyrri liðurinn er þyngdarmætti, þar sem  $\rho_v$  er eðlismassi vatns,  $g$  er þyngdarhröðun og  $z_b$  er hæð botns. Seinni liðurinn er vegna vatnsþrýstings þar sem  $\rho_i$  er eðlismassi íss,  $z_y$  yfirlæðshæð og  $k$  er fargstuðull þar sem  $k = 1$  jafngildir því að vatnsþrýstingur sé jafn ísfargi. Vatnsmættið er síðan umreiknað yfir í tilsvareandi vatnsmættishæð:

$$\phi_z = \frac{\rho_v g z_b + k \rho_i g (z_y - z_b)}{\rho_v g} = z_b + \frac{k \rho_i (z_y - z_b)}{\rho_v}$$

sem gefur vatnsmættishæð jafna landhæð þar sem enginn ís er. Útreiknuð mætti voru síðan lagfært þannig að þar sem lokaðar lægðir voru í vatnsmætti myndast pollar svo að það fljóti úr þeim. Því geta lón myndast bæði undir og við jökuljaðar í reiknilíkaninu og vatnshæð þeirra verið breytileg. Miðað er við að vestur útfall svæðisins sé út í lón í 87 m y. s. sem er sú hæð sem leiðrétt leysihæðarlíkan gefur fyrir vatnshæð Gígjúlóns (við suðvestur enda rannsóknarsvæðis, sjá 1. mynd).

Á 11. og 12. mynd má sjá spár fyrir vatnsmættishæð og rennslisleiðir fyrir tvö tilfelli,  $k = 1$  og  $k = 0.9$ . Mögulega ætti fargstuðullinn að vera lægri. Myndum fyrir þau tilfelli er hins vegar sleppt þar sem þróunin á þeim er í grófum dráttum sú sama og 11. og 12. myndir sýna, einungis hraðari. Til að áætla þessi vatnsmætti þarf að spá fyrir yfirborð jökulssins á hverjum tíma. Það er gert með því að nota hæðarlíkanið byggt á hæðarlínunum frá 2003 (5. mynd) sem grunn. Jökulyfirborð fyrir hvert ár er síðan framreiknað frá því með því að nota meðalaársbreytingu frá 2003 til 2007. Kortið frá 2007 ætti því að vera nokkuð rétt og GPS-mælingarnar frá 2008 falla nokkuð vel að áætluðu yfirboðri sama árs og skeikar þar aldrei meir en um 5 metrum. Þó svo þau yfirborð sem fengin eru fyrir seinni hluta tímabilsins 2009 til 2014 sé í raun ekki hægt líta á nema sem grófa nálgun gefa reiknuð mætti nokkuð glögga mynd af þeim beytingum sem búast má við á rennslileiðum Skeiðarár undir og við jökulsporð.

## Niðurstöður

Skipta má þeim hluta Skeiðarárjökuls sem hér er rannsakaður í fernt út frá þeim jökulhöftum sem liggja milli lóna og rennslisleiða. Á 13. mynd eru merkt þrjú höft. Haft **I** er milli Gígjulóns (glittir í enda þess í suðvestur horni myndar) og lítils lónaklasa. Þegar þessi mynd var tekin má gera ráð fyrir að vatnshæð þeirra hafi staðið í um 103 m y.s. (hæð af leysihæðarlíkani frá 2007). Í desember 2008 var lónhæðin hinsvegar 109 m (LON1 á 3. mynd) og því ekki um lónaklasa að ræða heldur eitt samfellt lón. Þar sem meginkvísl Gígju rennur úr Gígjulóni hefur lónhæð þess í desember 2008 ekki verið hærri en sumarið 2007 eða um 87 m y.s. (af leysihæðarlíkani) og því var að minnsta kosti 16 m fallhæð yfir þetta haft í desember 2008. Lónið austan hafts **II** (það stærsta á 13. mynd) var einnig í 109 m hæð í desember 2008 (LON2 á 3. mynd) og hafði þá lækkað nokkuð frá 2007 en þá var það í 115 m hæð. Við norðurenda þess lóns er hryggur merktur með **a** á 13. mynd sem virðirst að mestu gerður úr árseti. Upp af honum er haft **III** en það er í raun óvirkt þar sem áin hefur rofið skarð í hrygginn og rann þó nokkuð vatnsmagn í desember 2008 frá austri til vestur út í lónið. Þó svo gert sé ráð fyrir því að hryggurinn sé heill í útreikningum á 11. og 12. mynd er ekki hægt að líta á haft **III** sem virkt nema stífluð verði rásin í hryggnum. Að sama skapi er ekki gert ráð fyrir neinu árrofi við

meginútfall Skeiðarár (merkt **b** á 13. mynd) frá því sem orðið var sumarið 2007 og því ekki gert ráð fyrir þeim möguleika að það lækki af þeim sökum þó svo það hafi í raun lækkað úr rúmum 113 m sumarið 2007 í 111 m í desember 2008 (LON4 á 3. mynd). Eins og sést af 14. mynd sem sýnir landbreytingar utan jökuls frá 1997 til 2007 er slík lækkun vel raunhæf.

Lónin sín hvoru megin við haft **II** eru líklega nú þegar samtengd þar sem vatnshæðin í þeim var sú sama í desember 2008, sem samræmist mættisreikningum á 12. mynd sem gera ráð fyrir  $k = 0.9$  en útreiknuð lónhæð fyrir það tilfelli passar einnig við þá mældu (109 m). Af 11. og 12. mynd sést að stór mættispollur hefur myndast austan hafts **III** sem þýðir að vatn safnast fyrir undir stórum parti jökulsporðsins og er vatnmættishæð hans nú stjórnað af meginútfalli árinna. Þessi pollur mun halda áfram að vaxa þar til hann finnur sér lægra útfall við haft **III**. Ef rásin í hryggnum neðan hans yrði stíflað myndi haft **III** halda í 4 til 5 ár skv. líkani. Árrof við meginútfall Skeiðarár gæti seinkað þessu lítillega í viðbót. Að þeim tíma liðnum verður lónið suður af hryggnum líklega fallið niður í nálægt 90 m hæð og vatn farið að flæða upp fyrir hrygginn. Vatnsrennslið myndi líklega rjúfa sig hratt niður í hrygginn ofanverðan og valda því að vatn hætti að drífa upp í núverandi meginútfall Skeiðarár.

Það sem veldur því að meginútfall Skeiðarár er enn á þeim stað sem það er nú hinn litli hæðarmunur milli núverandi meginútfalls Skeiðarár og lóns sunnan hryggs (~2 m). Eins og sjá má á 11. og 12. mynd má gera ráð fyrir vatnshæðin í þessum lónum falli hratt á næstu árum. Ef rásin í hryggnum yrði ekki stífluð mun áin rjúfa sig dýpra niður í hrygginn (að því gefnu að hann sé allur úr seti). Þar sem áin þarf að rjúfa mun styttri vegalengd í gegnum hrygginn heldur en þar sem hún rennur núna mun árrof lækka þetta útfall mun hraðar en núverandi meginútfall árinna. Því eru yfirgnæfandi líkur á því að meginhluti Skeiðarár muni fara að flæða vestur í Gígju á allra næsta árum (líklega á næsta 5 árum).

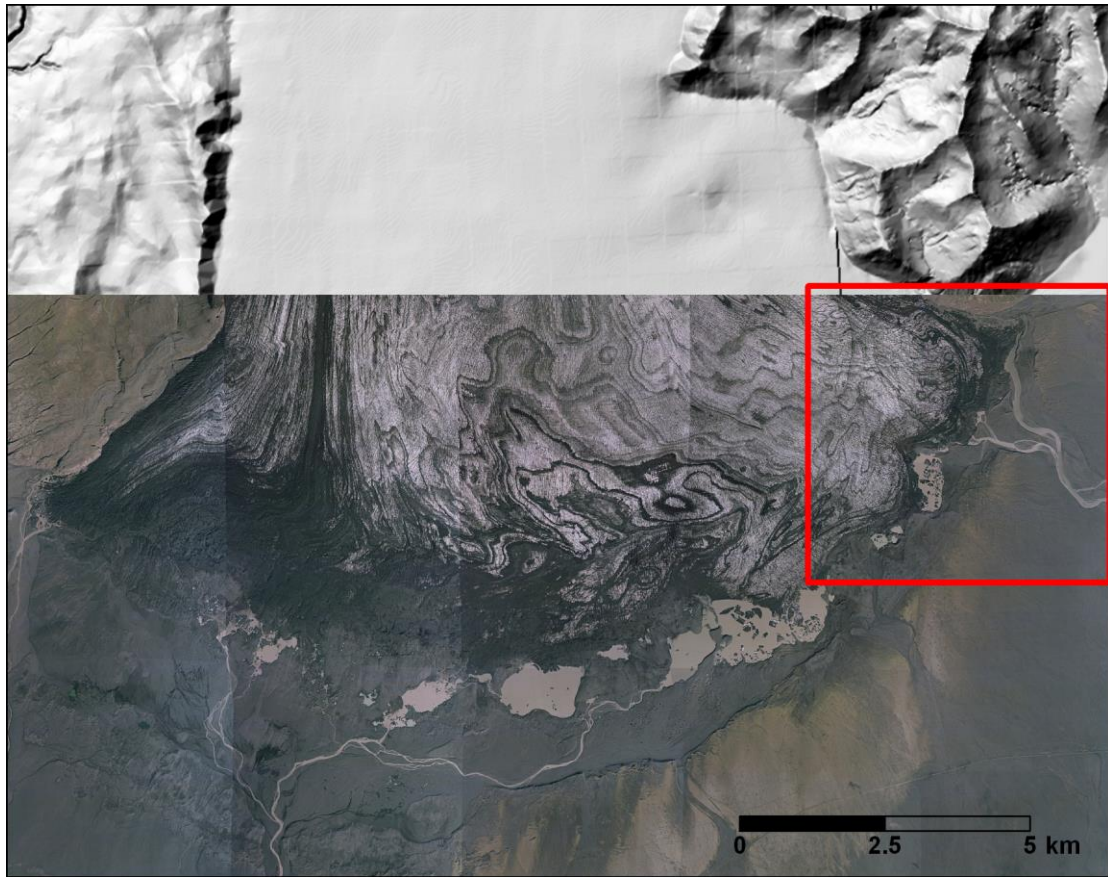
## **Þakkir**

Þessi skýrsla er unnin fyrir og kostuð af Vegagerðinni. Helgi Jóhannesson og Halldóri S. Haukssyni eru þakkaðar ráðleggingar og aðstoð við gagnaöflun. Andy Russel og Meridith Williams við Háskólann í Newcastle er þakkað fyrir að veita aðgang að leysihæðarlíkani frá 2007 af rannsóknarsvæði. Sveinbirni Steinþórssyni er þökkuð aðstoð við feltevinnu.

## **Heimildir**

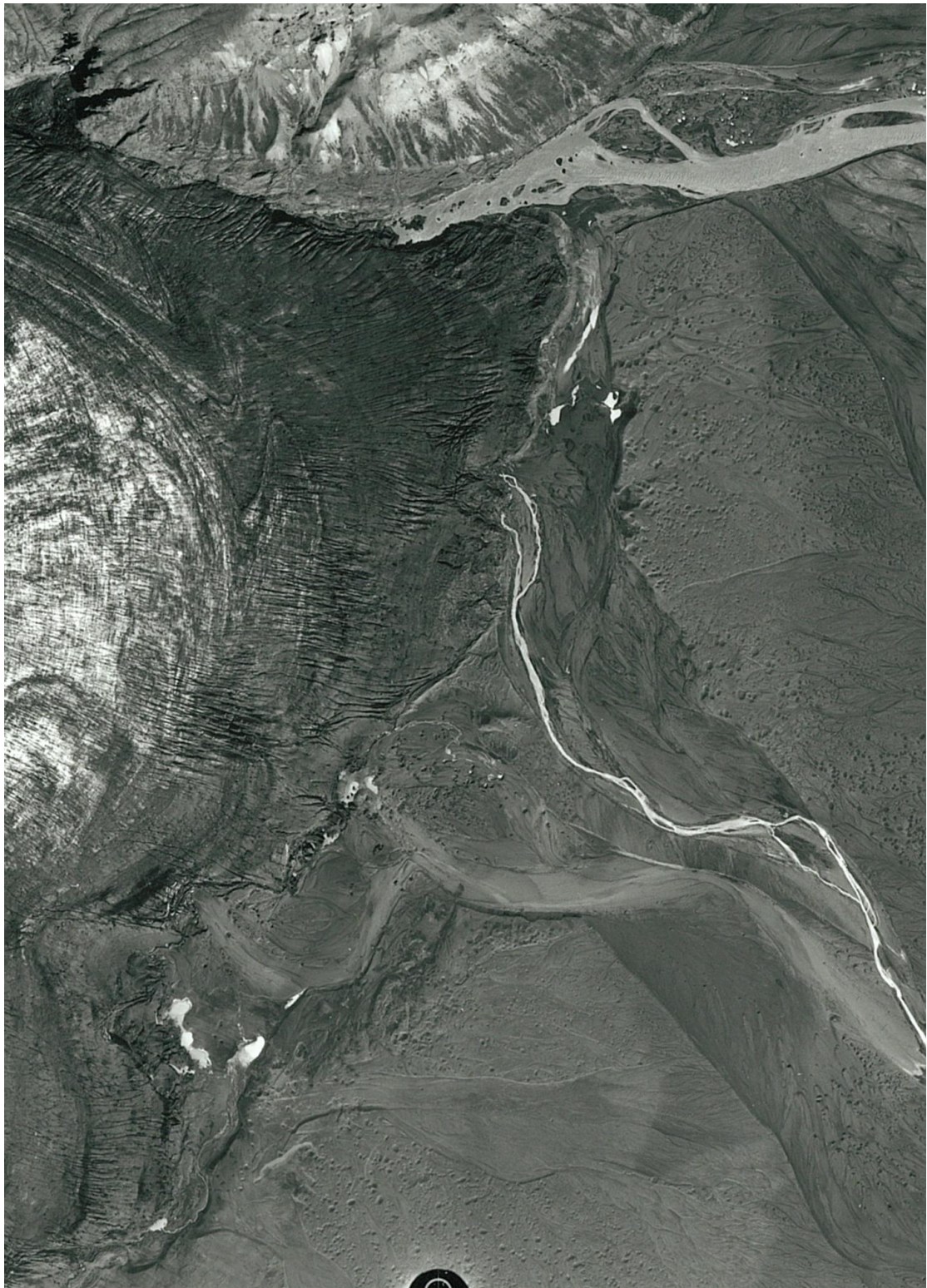
Bacher, U., S. Bludovsky, E. Dorrer and U. Münzer. 1999. Precision aerial survey of Vatnajökull, Iceland by digital photogrammetry, paper presented at Third Turkish German Joint Geodetic Days –Towards a Digital Age. Istanbul Tech. Univ., Istanbul, 1-10.

Loftmyndir ehf. Myndkort, Skaftafell, 1:24.000. Loftmyndir ehf., Reykjavík.



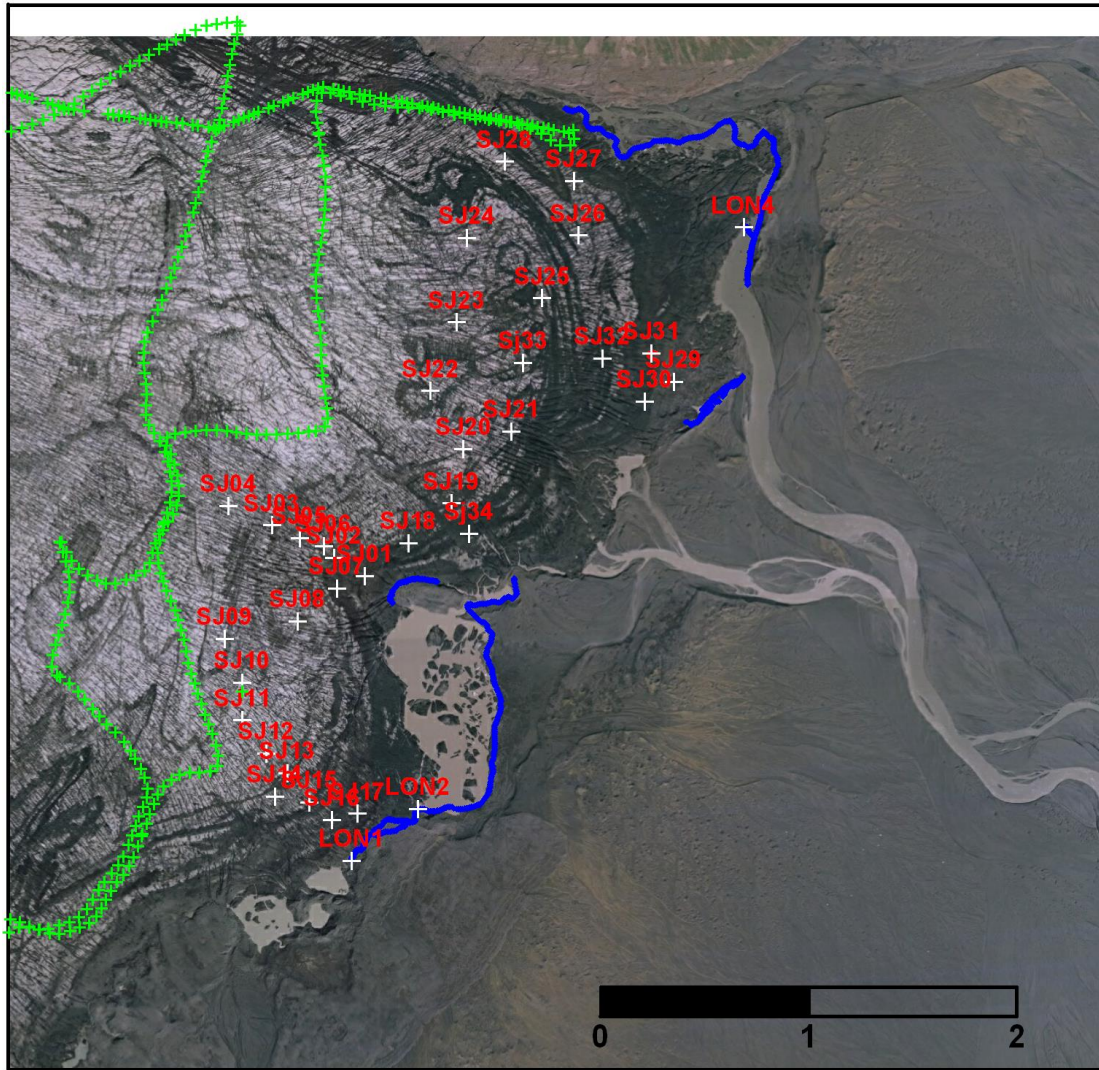
**1. mynd.** Sporður Skeiðarárjökuls. Ljósmynd af neðri hlutanum er upprétt loftmynd frá Loftmyndum ehf. af jöklinum sumarið 2007. Efri hlutinn er skuggamynd úr Surfer byggða á hæðarlíkani sem unnið var út frá loftmyndum frá 1997 af Bacher og fleirum (1999). Rauði kassinn sýnir rannsóknarsvæði verkefnisins.



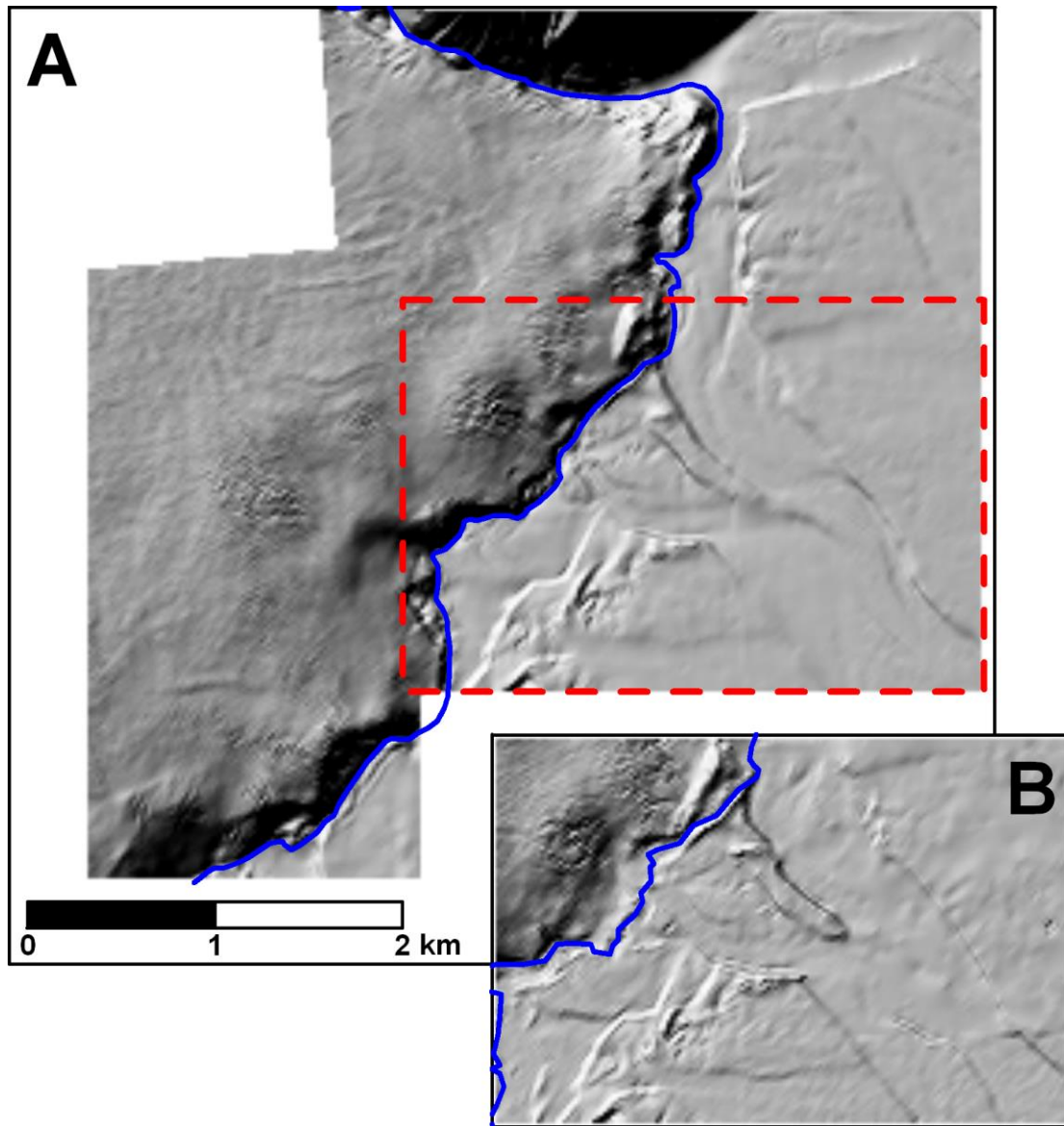


**2. mynd.** Loftmynd af austurhorni Skeiðarárjökuls og meginútfall Skeiðarár árið 1997.

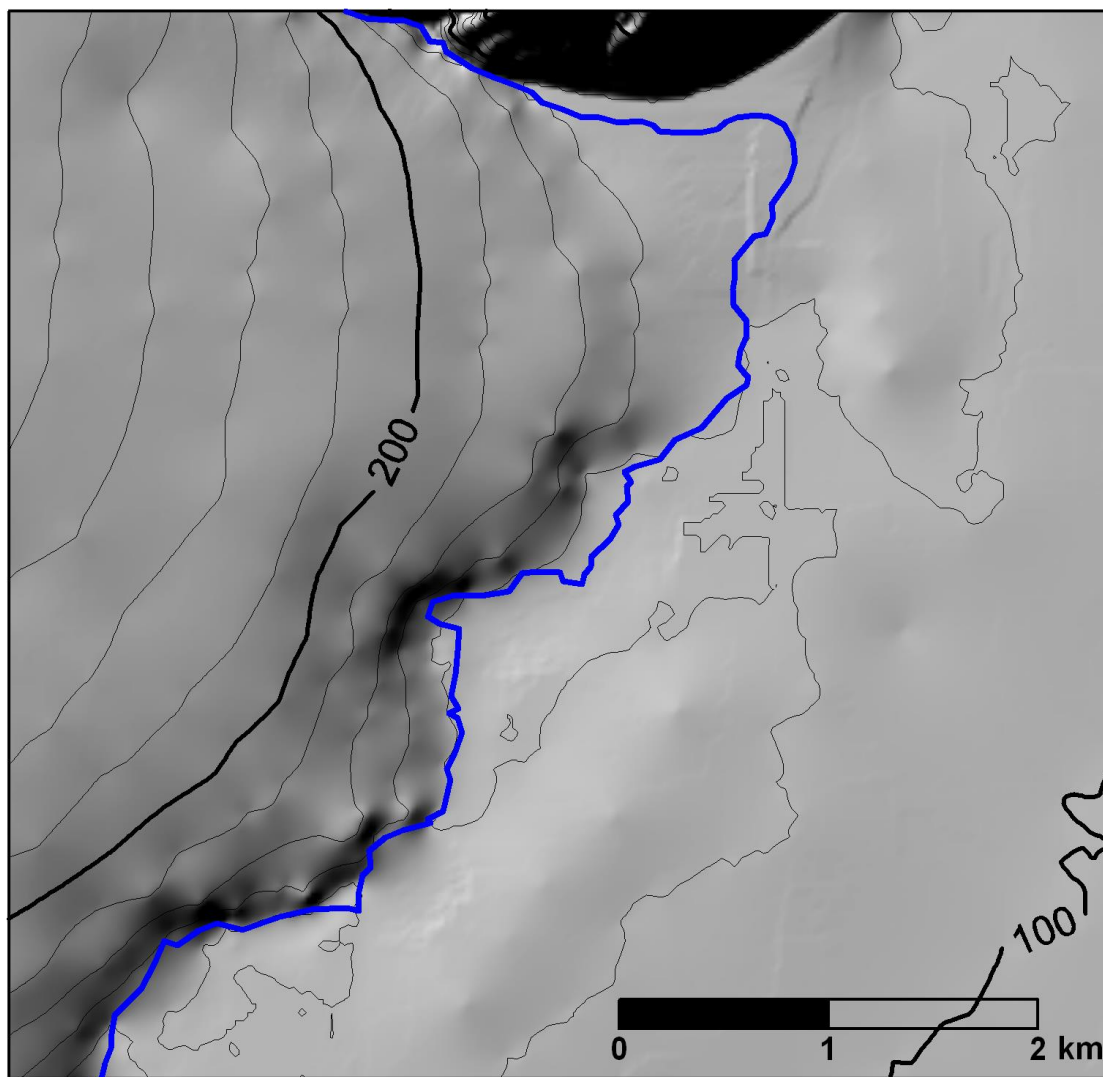




**3. mynd.** Upprétt loftmynd frá Loftmyndum ehf. af austurhorni Skeiðarárjökuls og meginútfall Skeiðarár árið 2007 (sama og á 1. mynd). Merktu punktarnir sýna staðsetningu 34 nýja íssjármælipunkta (SJ01-SJ34, sjá 1. tafla) þriggja vatnshæðamælipunkta (LON1, LON2 og LON4, sjá 1. tafla) frá því í desember 2008. Bláu línurnar sýna GPS-snið mæld við sama tækifæri. Grænu krossarnir sýna staðsetningu eldri íssjármælinga.

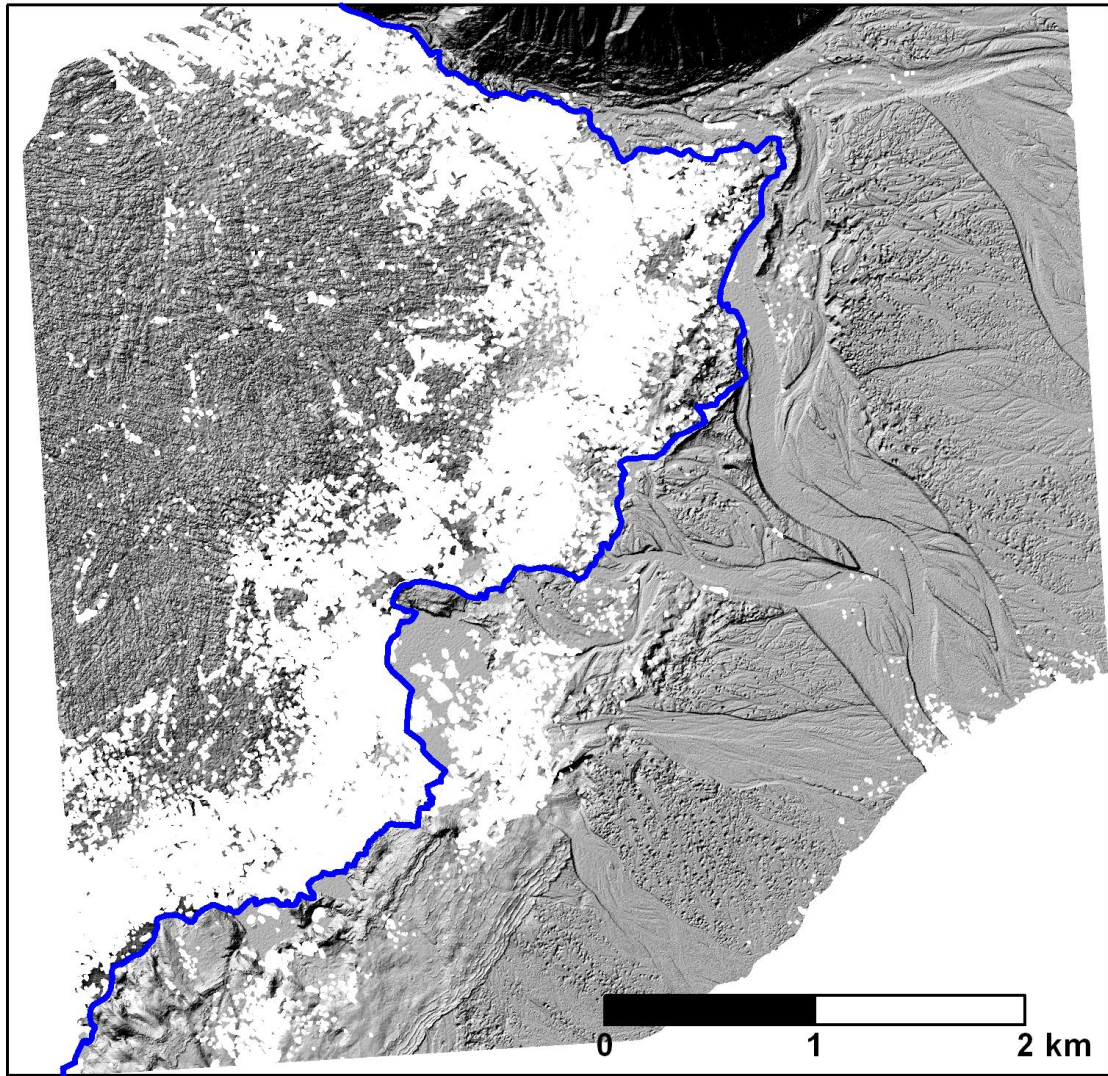


**4. mynd.** Hæðarlíkön Loftmynda ehf. sem fáanleg voru af rannsóknasvæði frá 1997 (A) og 2003 (B) sýnd sem skuggamyndir. Rauða hálfbrotna línan á mynd A sýnir svæðið sem mynd B nær yfir. Jaðrar frá samsvarandi árum eru sýndir með blárri línu.

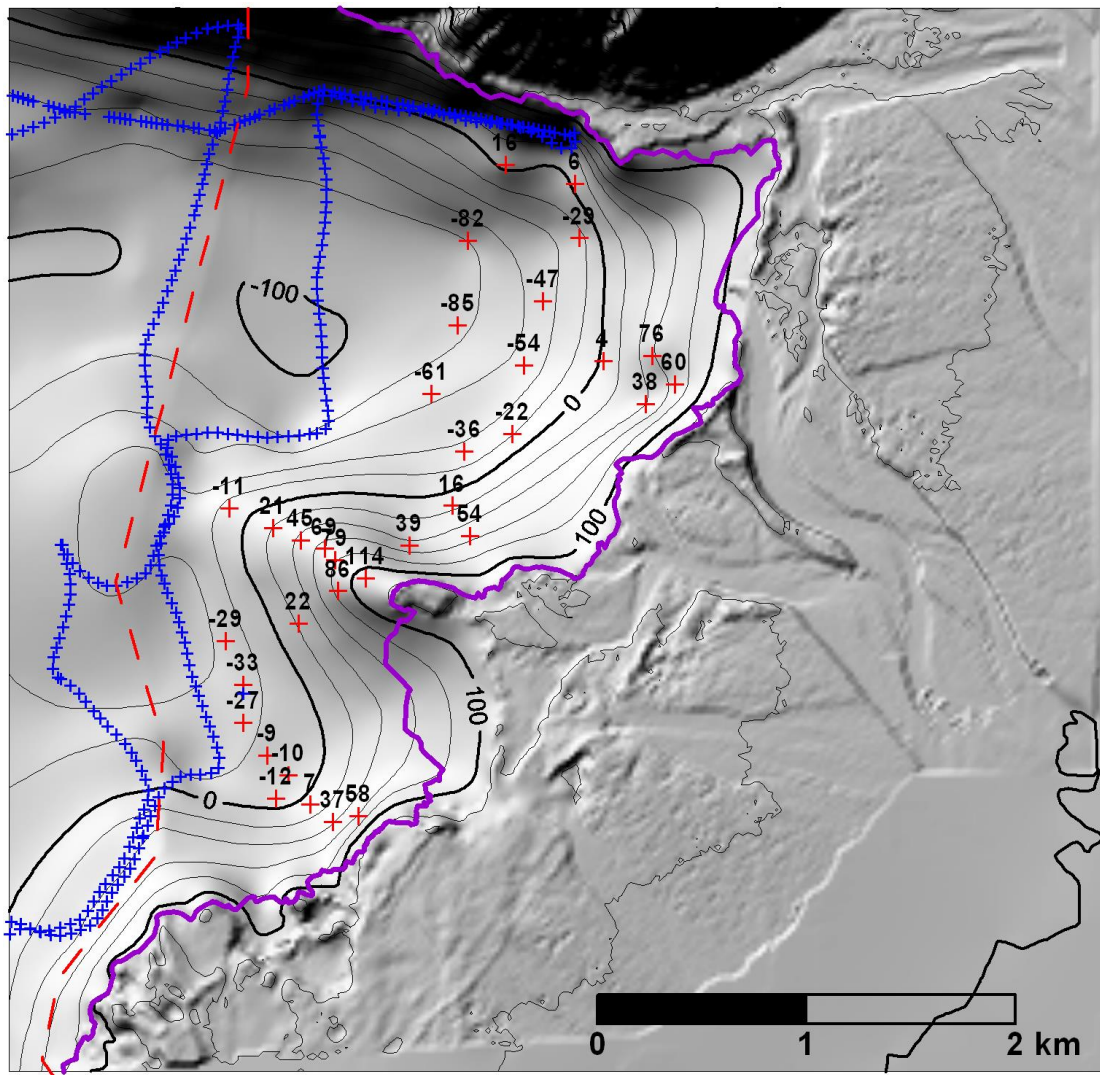


**5. mynd.** Hæðarlíkan af rannsóknasvæði byggt á hæðarlínum hnituðum af korti Loftmynda ehf. af Skaftfelli og nágrenni frá 2003, sýnt sem skuggamynd og sem hæðarlínukort með 20 m á milli hæðarlína. Jökuljaðar frá 2003 er sýndur sem blá lína.



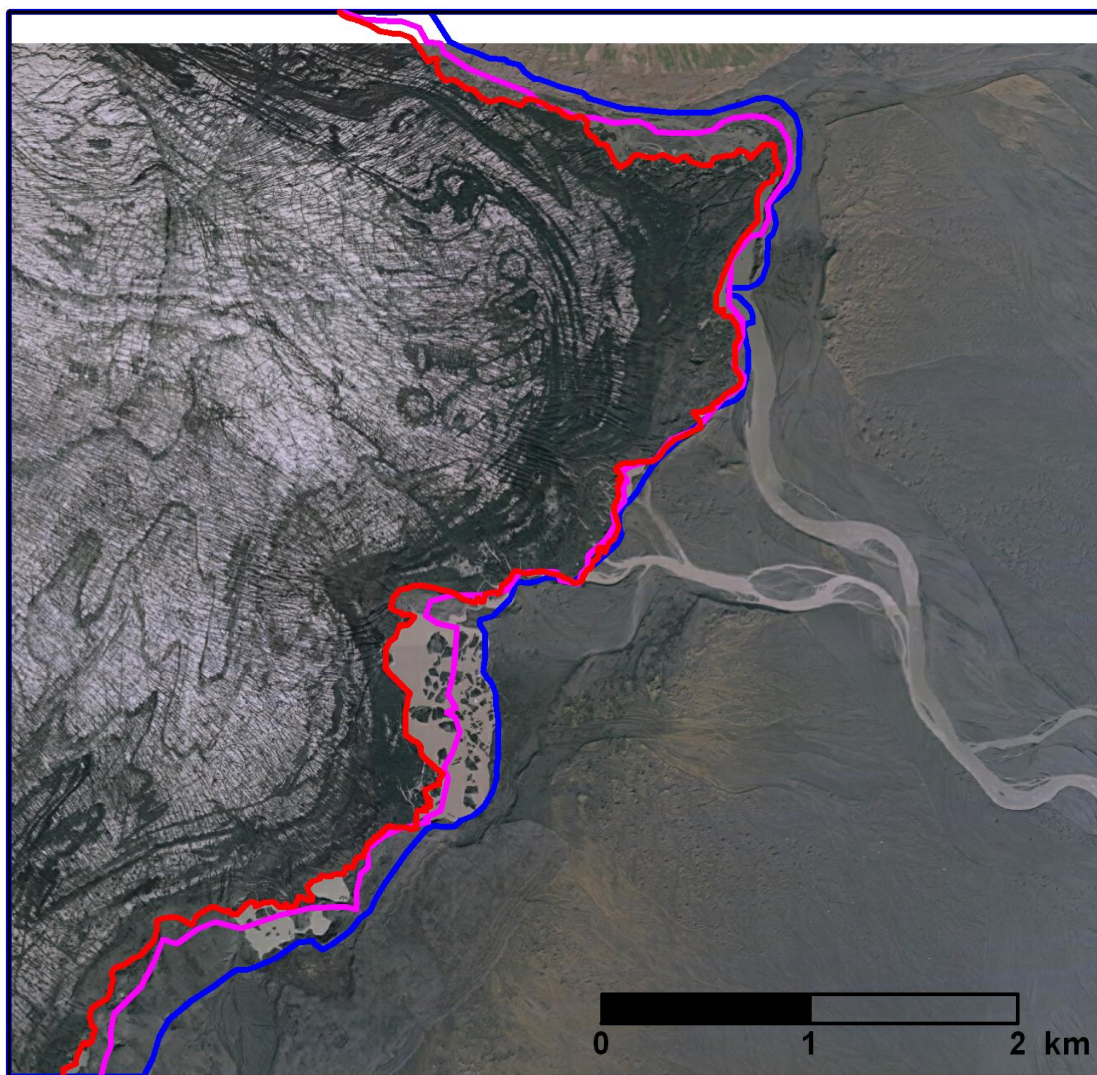


**6. mynd.** Hæðarlíkan frá 2007 mælt með leysi af Háskólanum í Newcastle, sýnt sem skuggamynd. Jökuljaðar frá 2007 er sýndur sem blá lína.

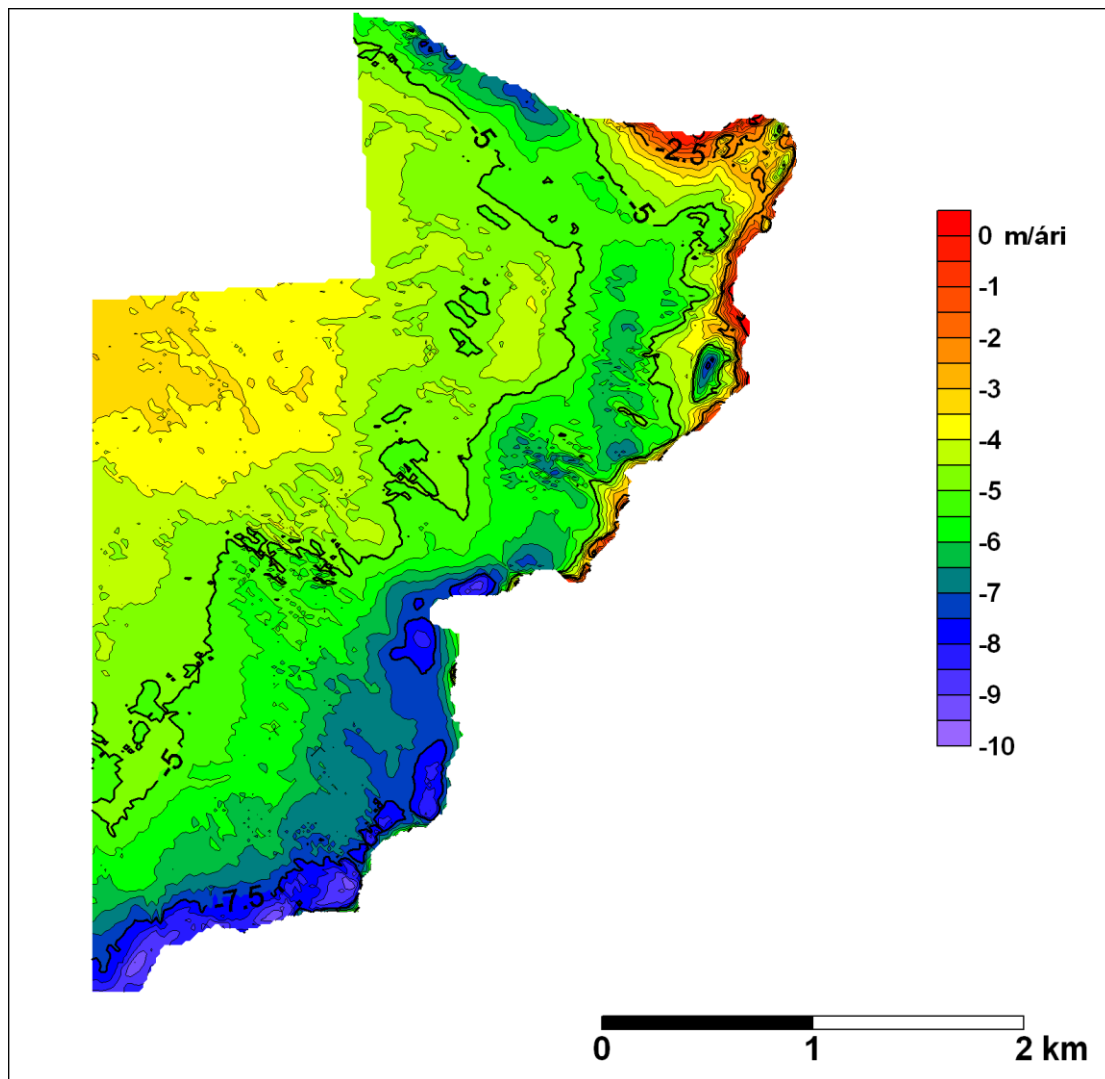


**7. mynd.** Botnhæðarlíkan felld við hæðarlíkan utan jökuls, sýnt sem skuggamynd og sem hæðarlínukort með 20 m á milli hæðarlína. Mæld botnhæð í nýju íssjárpunktunum er sýnd með rauðum krossum. Bláir krossar sýna staðsetningu eldri mælinga. Brotin rauð lína sýnir samskeyti við eldra botnlíkan (óbirt). Fjólublá lína sýnir jökuljaðar árið 2007.



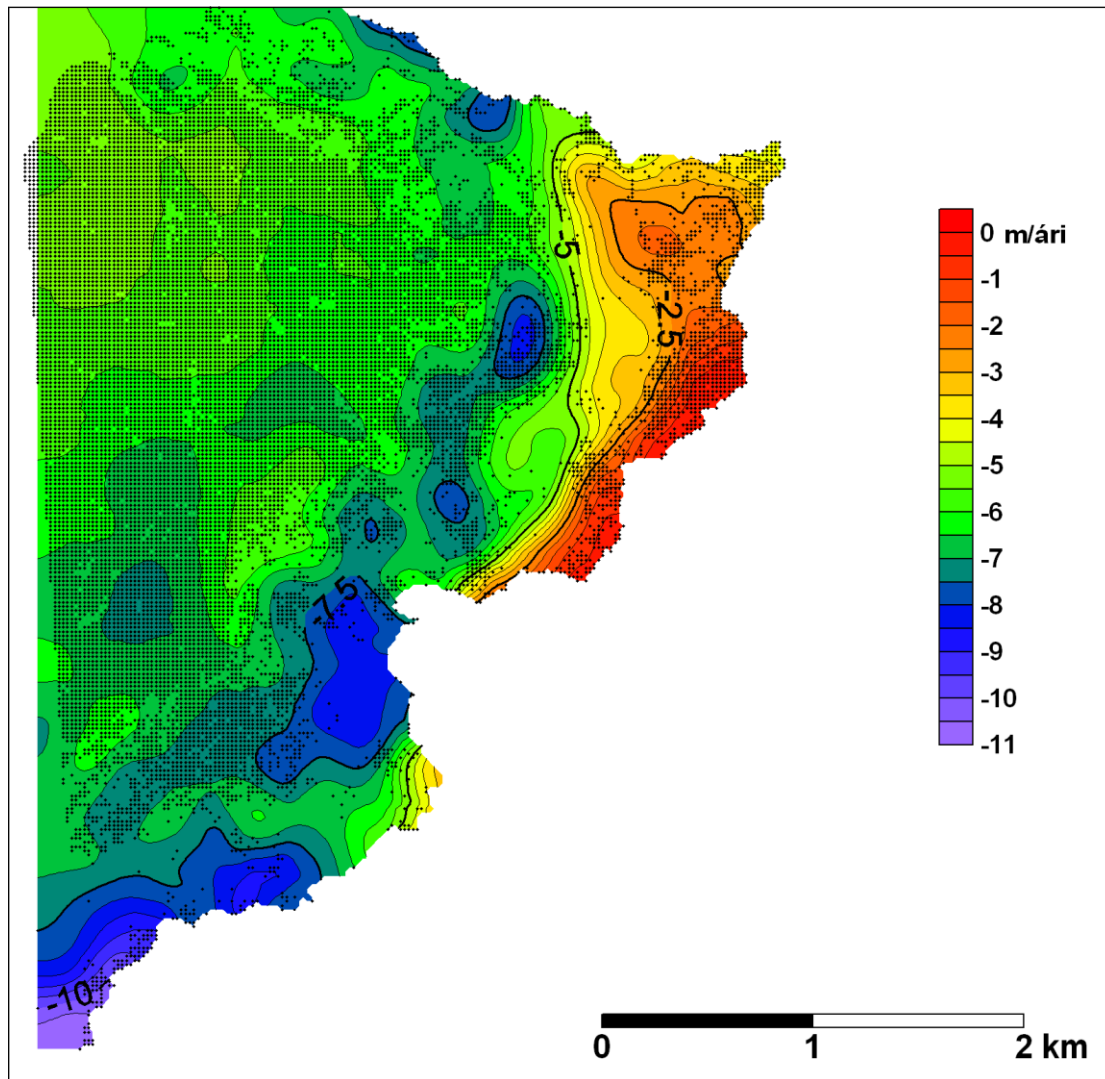


**8. mynd.** Þróun jökuljaðars síðan 1997. Jökuljaðrar eru sýndir fyrir árið 1997 (blá), 2003 (bleik) og 2007 (rauð). Myndin undir er frá 2007 (sama og á 1. og 3. mynd).

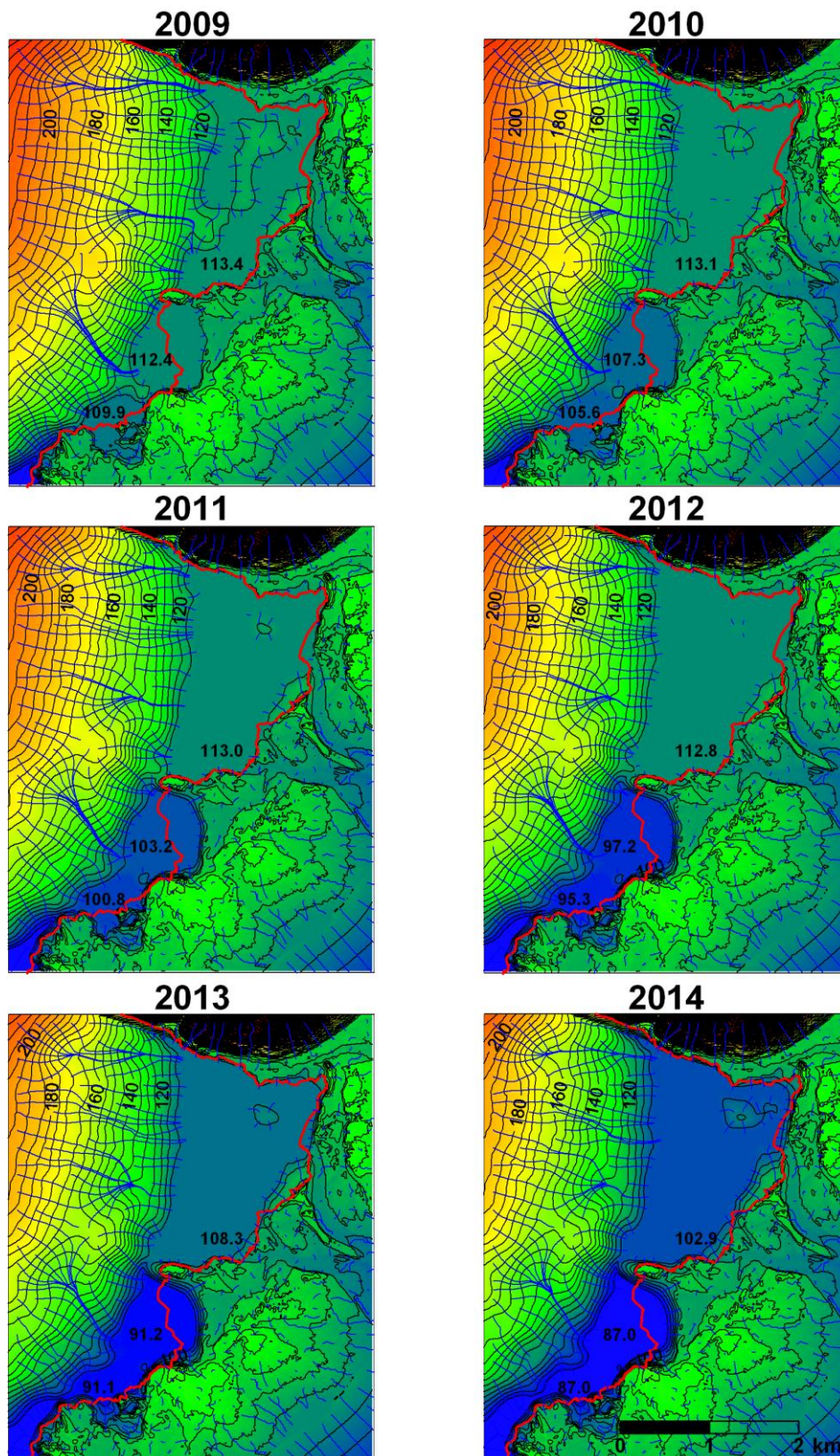


**9. mynd.** Meðalyfirborðslækkun á ári frá 1997 til 2003. Aðeins er sýnt það svæði þar sem enn var jökull árið 2003.



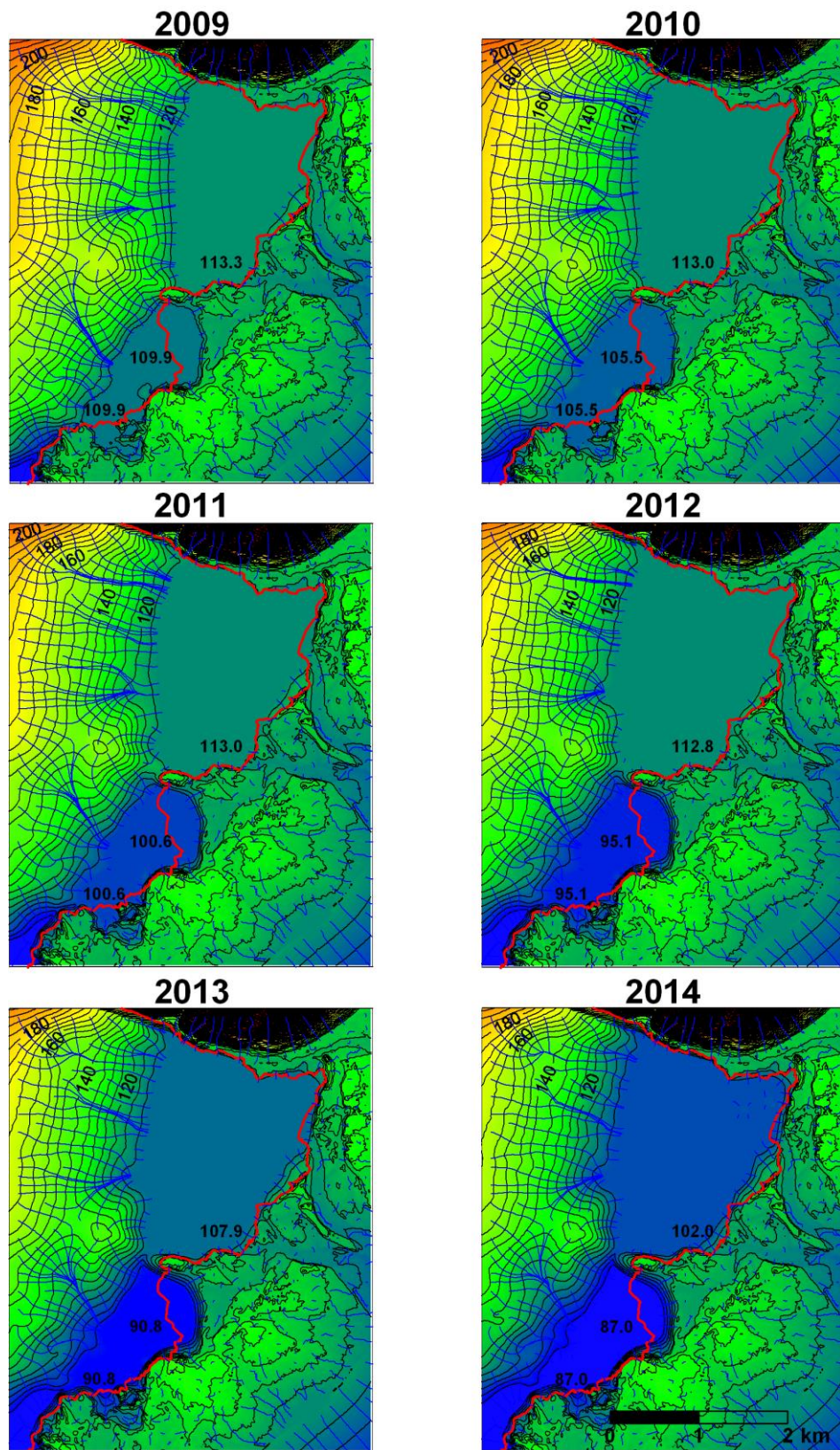


**10. mynd.** Meðalyfirborðslækkun á ári frá 2003 til 2007. Aðeins er sýnt það svæði þar sem enn var jökull árið 2007. Svörtu punktarnir sýna þau svæði þar sem hæðarmæling er til frá 2007, en brúað hefur verið í eyðurnar.



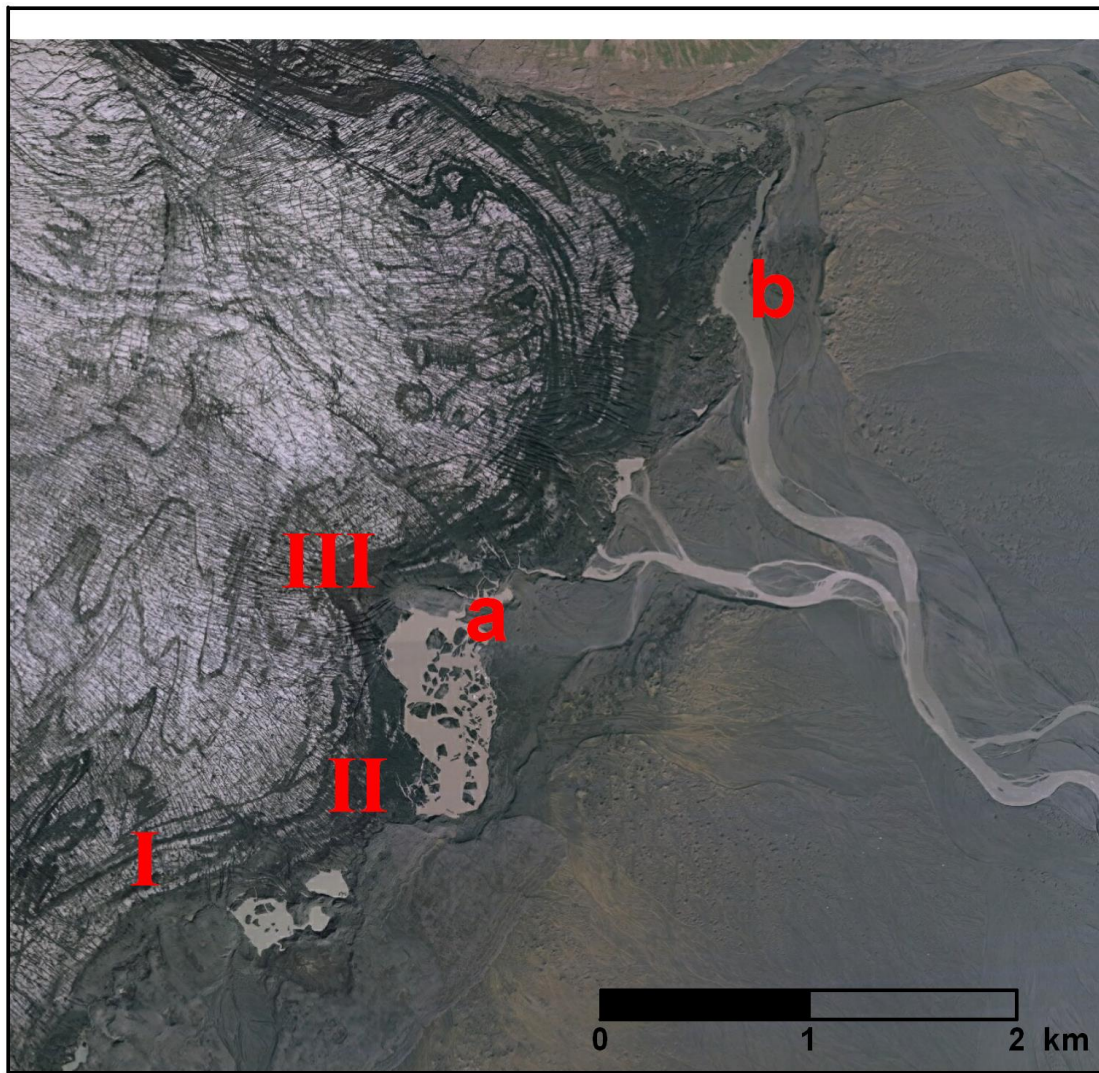
**11. mynd.** Vatnsmættishæð (svartar jafnhæðalínur) og rennslisleiðir (bláar) fyrir fargstuðul  $k = 1$ , áætlað fyrir árin 2009-2014. Hæð jaðarlóna og mættispolls austast á jöklinum er merkt sérstaklega. Jaðar frá 2007 (rauður) er sýndur til viðmiðunar.





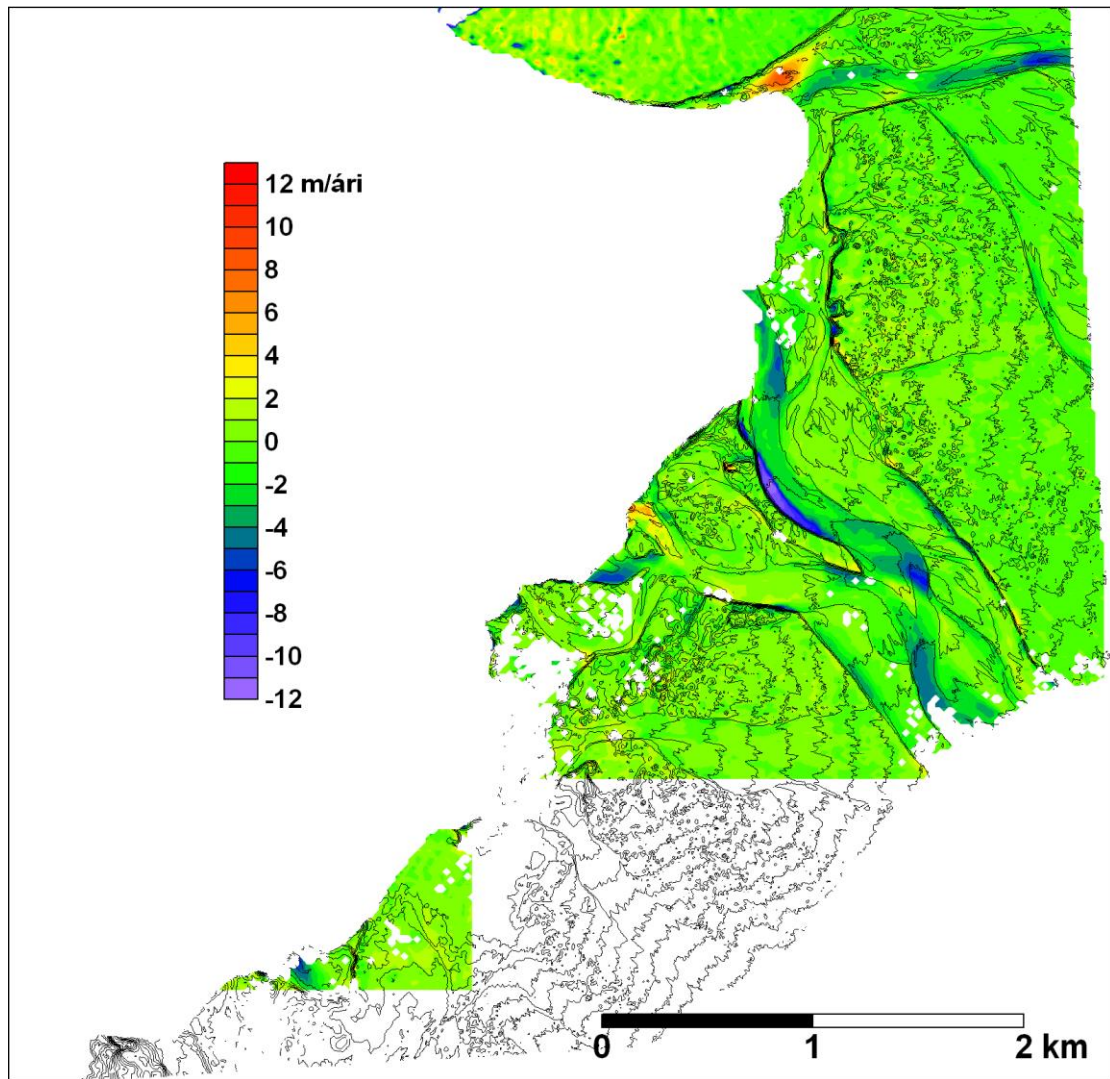
**12. mynd.** Vatnsmættishæð (svartar jafnhæðalínur) og rennslisleiðir (bláar) fyrir fargstuðul  $k = 0.9$ , áætlað fyrir árin 2009-2014. Hæð jaðarlóna og mættispolls austast á jöklinum er merkt sérstaklega. Jaðar frá 2007 (rauður) er sýndur til viðmiðunar.





**13. mynd.** Þrjú jökulhöft milli lóna og útfalla Skeiðarár (**I-III**) sem halda aftur af rennsli í vesturátt. Einnig er merkt inn á sandhryggur (**a**) og núverandi meginútfall Skeiðarár.





**14. mynd.** Landbreytingar utan jökuls frá 1997 til 2007. Hæðarlínur frá 2007 með 2 m millibili eru lagðar ofan á. Umtalsvert árrof hefur átt sér stað í utanverðum svigðum árinna. Af samanburði hæðarlíkana frá 2003 (4. mynd B) og 2007 sést að rofið í nýja aðalfarvegi Skeiðarár hefur að mestu átt sér stað eftir 2003.

**1. tafla.** Ísnet93 lamberts hnit (x,y), yfirborðshæðir (zy), ísþykktir (D) og botnhæðir (zb) í íssjármæli- og lónhæðarpunktum.

| x      | y      | nafn | zy    | D     | zb    |
|--------|--------|------|-------|-------|-------|
| 592012 | 392426 | SJ01 | 135,8 | 21,4  | 114,3 |
| 591866 | 392514 | SJ02 | 153,1 | 73,7  | 79,4  |
| 591568 | 392670 | SJ03 | 191,9 | 170,8 | 21,0  |
| 591360 | 392763 | SJ04 | 203,0 | 213,5 | -10,6 |
| 591700 | 392609 | SJ05 | 182,2 | 136,7 | 45,5  |
| 591816 | 392569 | SJ06 | 165,4 | 96,7  | 68,8  |
| 591881 | 392366 | SJ07 | 141,6 | 55,2  | 86,4  |
| 591690 | 392210 | SJ08 | 161,8 | 140,3 | 21,5  |
| 591342 | 392127 | SJ09 | 183,4 | 212,9 | -29,5 |
| 591425 | 391916 | SJ10 | 170,4 | 203,4 | -33,0 |
| 591426 | 391737 | SJ11 | 161,4 | 188,2 | -26,7 |
| 591541 | 391578 | SJ12 | 144,6 | 153,2 | -8,5  |
| 591641 | 391484 | SJ13 | 136,7 | 146,8 | -10,1 |
| 591582 | 391371 | SJ14 | 140,2 | 151,9 | -11,7 |
| 591748 | 391343 | SJ15 | 136,4 | 129,4 | 7,0   |
| 591856 | 391260 | SJ16 | 129,9 | 93,1  | 36,8  |
| 591978 | 391290 | SJ17 | 133,0 | 74,9  | 58,1  |
| 592222 | 392585 | SJ18 | 136,5 | 97,4  | 39,0  |
| 592427 | 392775 | SJ19 | 126,1 | 110,5 | 15,6  |
| 592486 | 393036 | SJ20 | 137,9 | 174,4 | -36,4 |
| 592715 | 393120 | SJ21 | 146,1 | 167,9 | -21,7 |
| 592328 | 393313 | SJ22 | 152,2 | 212,8 | -60,6 |
| 592453 | 393641 | SJ23 | 152,1 | 236,7 | -84,7 |
| 592503 | 394046 | SJ24 | 149,3 | 230,9 | -81,6 |
| 592864 | 393757 | SJ25 | 131,1 | 178,0 | -46,9 |
| 593036 | 394057 | SJ26 | 130,1 | 159,1 | -29,0 |
| 593016 | 394316 | SJ27 | 128,9 | 123,0 | 5,9   |
| 592682 | 394410 | SJ28 | 136,7 | 120,7 | 16,0  |
| 593494 | 393358 | SJ29 | 120,8 | 61,0  | 59,8  |
| 593354 | 393262 | SJ30 | 121,9 | 84,4  | 37,6  |
| 593387 | 393493 | SJ31 | 118,3 | 42,5  | 75,8  |
| 593151 | 393470 | SJ32 | 137,5 | 133,8 | 3,8   |
| 592772 | 393448 | SJ33 | 132,0 | 186,0 | -54,0 |
| 592514 | 392630 | SJ34 | 118,0 | 64,4  | 53,6  |
| 591949 | 391065 | LON1 | 109,5 |       |       |
| 592267 | 391312 | LON2 | 109,4 |       |       |
| 593828 | 394095 | LON4 | 111,8 |       |       |