

GPS mælingar á jarðskorpuhreyfingum við Öræfajökul



Ásta Rut Hjartardóttir

Halldór Geirsson

Ágrip

Í verkefninu „GPS mælingar á jarðskorpuhreyfingum við Örfafajökul“ voru átta GPS landmælingapunktur í nágrenni Örfafajökuls mældir haustið 2017. Mælingarnar voru bornar saman við fyrri mælingar: síðast árin 2003-2005 og þar áður 1996. Stærsti hluti færslanna sem mældust voru vegna flekahreyfinga og fargbreytinga (bráðnunar) jökla. Þegar leiðrétt var fyrir flekahreyfingum og fargbreytingum komu í ljós færslur í stefnu út frá Örfafajökli. Færslurnar voru litlar, mest um 2 cm við Sléttubjörg. Langt var liðið frá síðustu mælingu og því töluverð óvissa sem fylgdi niðurstöðunum. Síðari (2018) mælingar á jarðskorpuhreyfingum með radargervitunglum (InSAR) og GPS niðurstöður frá Rótarfjallshnúki styðja niðurstöður mælinganna. Beinast liggur við að túlka niðurstöður á þann veg að kvika hafi verið að safnast fyrir undir Örfafajökli og eldfjallið því bólgað út. Miðja landrissins vegna kvikunnar virðist hafa verið í miðri eða sunnanverðri öskju Örfafajökuls, og dýpi u.þ.b. 2-5 kílómetrar. Þessar niðurstöður eru í samræmi við aukna jarðskjálftavirkni og jarðhita í Örfafajökli árin 2016-2018. Jarðskjálftavirkni í Örfafajökli hefur minnkað til muna árið 2019 og landris vegna kvikuinnskots er nú vart greinanlegt (í september 2019). Niðurstöður verkefnisins hafa bæði nýst til aukins skilnings á því hvað er að gerast í Örfafajökli, og fyrir vísindamenn og Almannaþingir til að bæta vöktun á svæðinu, ef frekari umbrot eiga sér stað þar í náinni framtíð.

Inngangur

Eldstöðin Öräfajökull hefur ekki gosið oft á sögulegum tíma miðað við margar aðrar eldstöðvar Íslands, en þó hafa þar orðið tvö öflug eldgos, árin 1362 og 1727 [*Sigurður Þórarinnsson, 1958*]. Öräfajökull fór að sýna merki um aukna jarðskjálftavirkni árið 2016. Jarðskjálftavirkni undir jöklinum jókst síðan umtalsvert árið 2017, sérstaklega á haustmánuðum [*Kristín Jónsdóttir o.fl. 2018*]. Slík hegðun eldfjalla getur bent til að kvika sé farin að safnast fyrir undir þeim, og því var ákveðið að sækja um styrk til Kvískerjasjóðs árið 2017 til þess að endurmæla GPS stöðvar við Öräfajökul, en slíkar mælingar geta gefið til kynna hvort eldstöð sé farin að tútna út vegna innstreymis kviku. Fyrir verkefninu stóðu Ásta Rut Hjartardóttir og Halldór Geirsson hjá Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, en niðurstöður verkefnisins voru einnig nýttar í BS verkefni Maggýjar Lárentínusdóttur í jarðeðlisfræði í Háskóla Íslands [*Maggý Lárentínusdóttir, 2018*].

Eldgos hefur ekki átt sér stað í Öräfajökli frá því vöktun eldfjalla með mælitækjum hófst. Því er margt óljóst varðandi hegðun eldstöðvakerfis Öräfajökuls. GPS mælingarnar sem gerðar voru árið 2017 eru einn liður í því að auka skilning á eldstöðinni sjálfri, og að útskýra þá auknu jarðskjálftavirkni sem vart hefur orðið við síðustu ár.

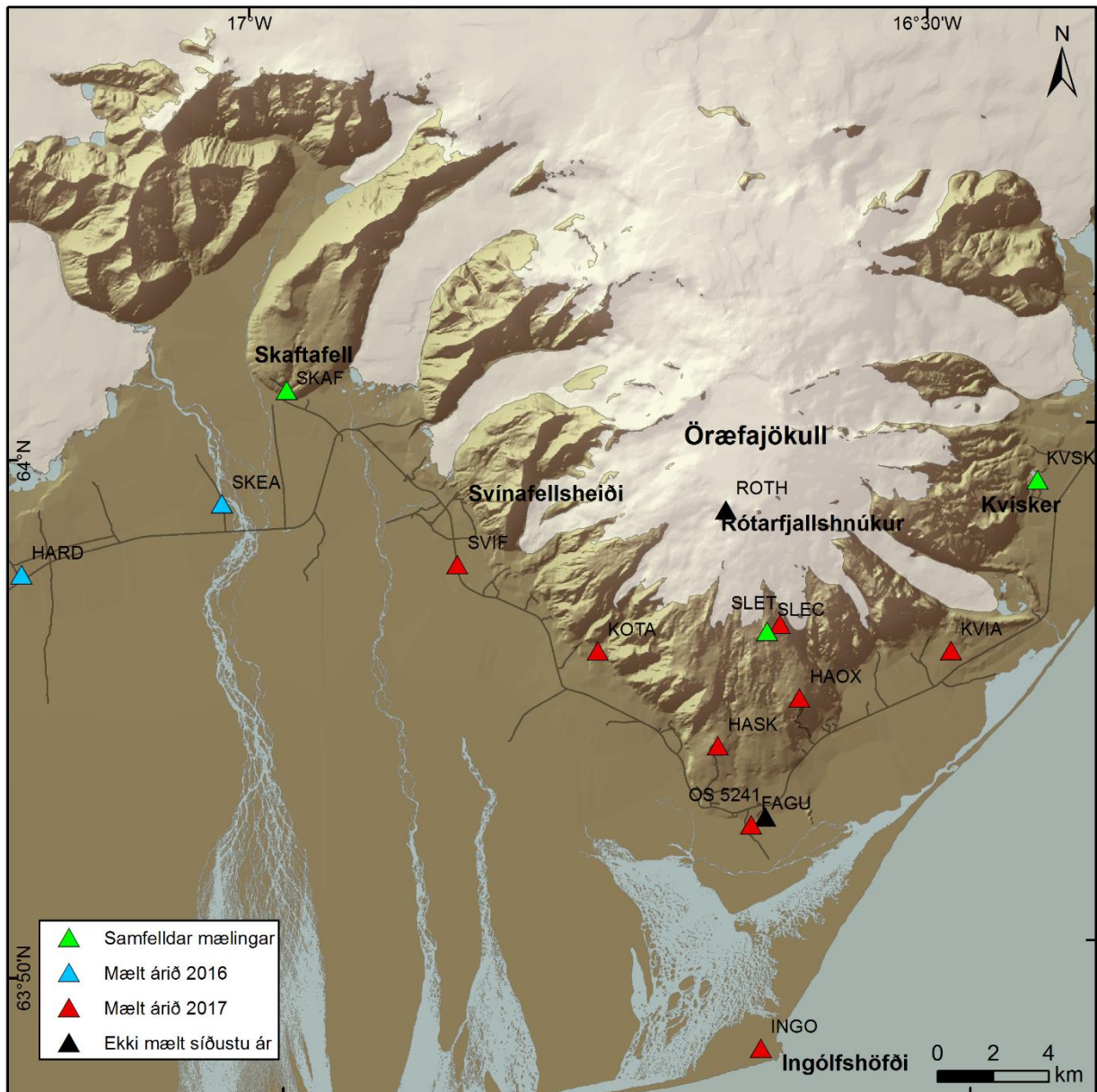
Aðferðir

Dagana 30.-31. ágúst 2017 voru sett upp GPS landmælingatæki á sjö mælipunktum við Öräfajökul (FAGU, HAOX, INGO, KOTA, KVIA, SLET, SVIF; myndir 1 og 2). Í þeim leiðangri voru Ásta Rut Hjartardóttir og Maggý Lárentínusdóttir. Dagana 8.-9. september sóttu Halldór Geirsson og Ásta Rut Hjartardóttir tækin.

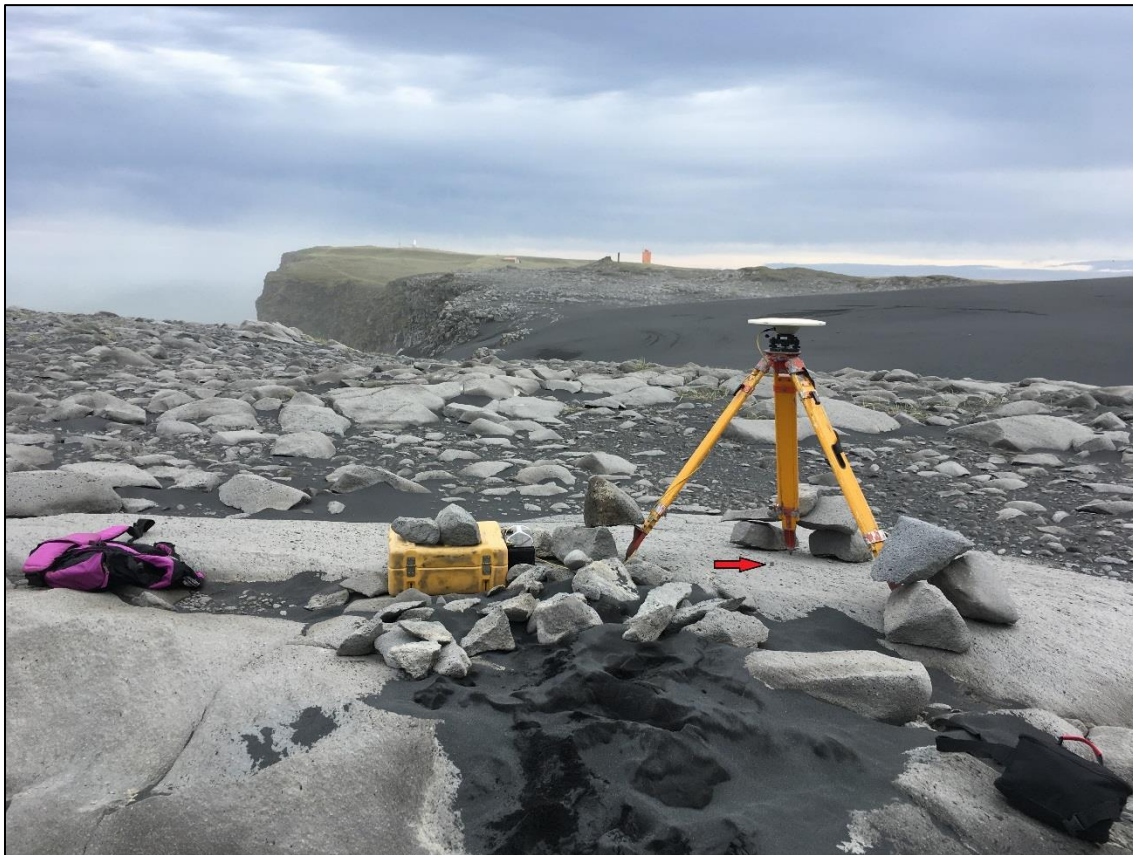
Jarðskjálftavirkni í Öräfajökli jókst eftir því sem á leið árið 2017 og því var ákveðið að fara aftur í október og mæla nokkra mælipunkta, sérlega eftir að jarðskjálfti upp á 3,5 stig mældist þann 3. október 2017. Sumir punktanna sem mældir voru í ágúst/september voru mældir aftur (FAGU, HAOX, SLET), og öðrum punktum var bætt við (HASK, BREM). Í þeirri ferð voru Þorsteinn Jónsson og Sveinbjörn Steinþórsson hjá Jarðvísindastofnun Háskólans.

Tækin sem notuð voru í þessum mælingum voru annars vegar Trimble 5700 tæki með Trimble Zephyr Geodetic I loftneti og hins vegar Septentrio PolaRx5 tæki með NavXperience loftneti. Mælt er með því að tækin mæli að lágmarki í tvo heila sólarhringa. Þetta markmið náðist á öllum stöðvum nema á GPS stöðinni SLET, þar sem tækið náði einungis að mæla í

einn sólarhring vegna bilunar í loftneti. Samfellda GPS stöðin SLEC var þó sett upp af Veðurstofu Íslands um 514 m suð-suðvestur af SLET (mynd 1) síðar árið 2017. Því koma nú góðar mælingar frá því svæði, enda sendir stöðin daglega gögn um nákvæma staðsetningu sína til Veðurstofu Íslands og Jarðvísindastofnunar Háskóla Íslands.



Mynd 1. GPS mælistöðvar við Öræfajökul og mælingar á þeim. Árið 2017 voru átta GPS stöðvar mældar, auk þess að Veðurstofa Íslands setti upp samfellda GPS mælistöð SLEC í desember 2017.

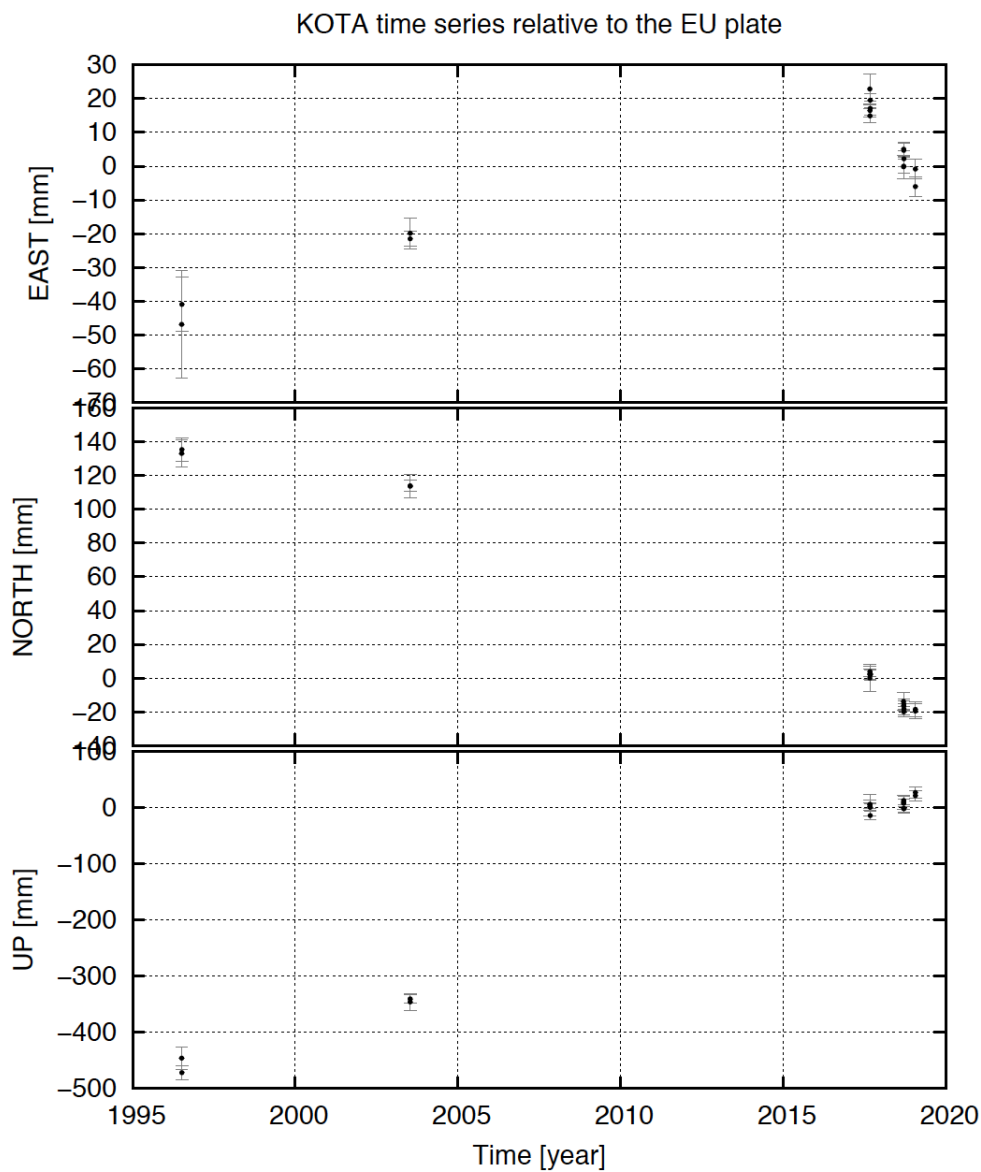


Mynd 2. GPS mæling á Ingólfshöfða (INGO). Rauða örin bendir á mælipunktinn.

Unnið var úr gögnunum með hugbúnaðinum GIPSY/OASIS II [Zumberge *et al.*, 2007]. Niðurstöður mælinga fást í hnitakerfinu ITRF2014, en varpað yfir í hnitakerfi fasts Evrasíufleka skv. Kreemer *et al.* [2014], sjá nánari lýsingu á úrvinnslu í BS ritgerð Maggýar Lárentínusdóttur [2018].

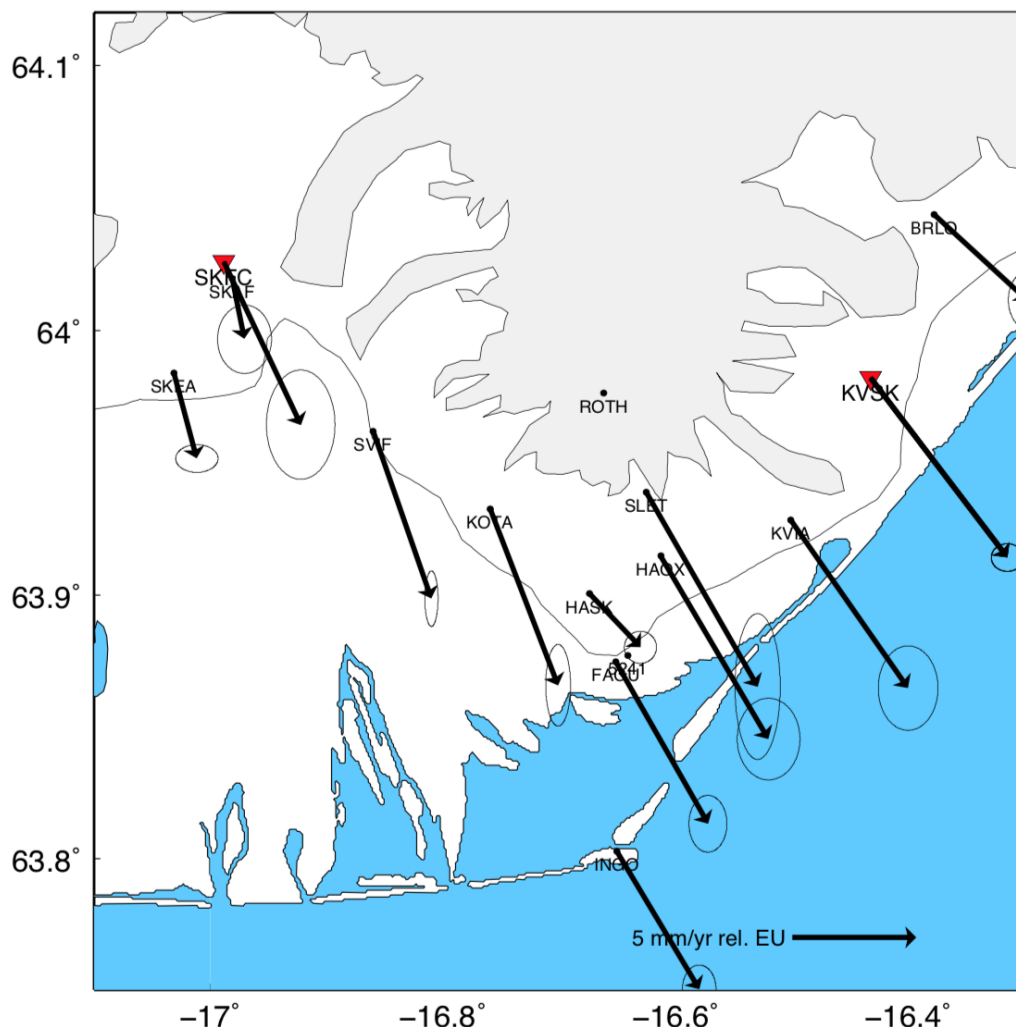
Niðurstöður

Niðurstöður mælinga má skoða fyrst og fremst á tvenna vegu: sem tímaraðir mælinga, eða sem færslu- eða hraðavigra yfir ákveðin tímabil. Tímaraðirnar sýna hvernig staðsetning mælipunkts breytist með tíma, í gefnu viðmiðunarkerfi (t.d. mynd 3). Slíkar tímaraðir voru teiknaðar fyrir allar mælistöðvar.



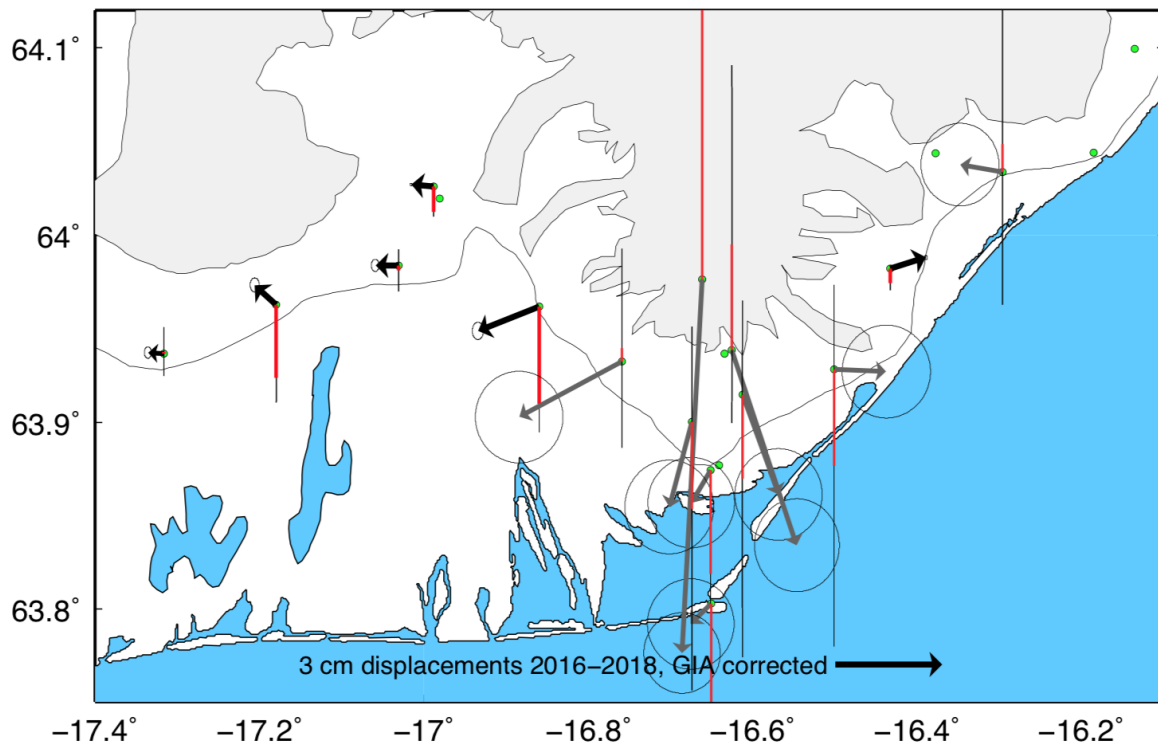
Mynd 3. GPS tímaröð mælinga við Kotá. Myndin sýnir breytingar í staðsetningu stöðvarinnar í austur, norður og upp miðað við Evrasúflekann. Einn dagur af mælingum liggur bak við hvern punkt. Síðustu mælingar fyrir árið 2017 voru gerðar árið 2003. Nýjustu mælingar á myndinni eru frá ársbyrjun 2019. Breyting í færsluhraða (halli ímyndaðrar línu milli punktanna) eftir 2017 er merki um þenslu í Örafajökli.

Langtímahreyfing stöðvanna, miðað við Evrasíuflekann, ræðst af miklu leyti af rýrnun jöklanna. Fargið sem bráðnar af jarðskorpunni veldur hreyfingum upp og út frá miðju fargbreytinga. Við Örefajökul nema þessar hreyfingar um 1,5 til 2,0 cm af landrasi á ári, og um 0,5-0,7 cm á ári af láréttum hreyfingum (mynd 4). Það er ekki einfalt að leiðrétta fyrir færslum vegna fargbreytinga því að fargbreytingarnar og svörun þeirra eru breytileg með tíma [Compton o.fl., 2015; Halldór Geirsson o.fl., 2019]. Á tíunda áratugnum var landris hægt, jókst mjög eftir árið 2004, en frá 2014 hægði um 15% á landrisinu samanborið við 2004-2014 [Halldór Geirsson o.fl., 2019]. Fyrir sumar stöðvar voru til nógu góðar mælingar fyrir árið 2017 til að áætla fargbreytingar, en annars var notuð breytt (sköluð) útgáfa af landrislíkani Auriac et al. [2013].



Mynd 4. Meðalfærsluhraðar GPS stöðva 1993-2017 miðað við Evrasíuflekann. Færslusvið stöðvanna ræðst af miklu leyti af fargbreytingum jökla.

Eftir að búið er að leiðrétta fyrir fargbreytingum sýnir færslusviðið kringum Örafajökul færslur út frá eldstöðinni, eins og dæmigert má teljast fyrir kvikuinnskot. Á kortinu sem sýnt er á mynd 5 eru einnig notaðar mælingar frá 2018 sem og samfelldar mælingar á svæðinu. Stærstu færslurnar eru á stöðinni á Rótarfjallshnúki, um 10 cm. Á láglendi nema færslurnar allt að 3 cm, og virðast sjást allt vestur á Skeiðarársand. Líkön af mælingum má skýra með kvikuinnskoti á 2-5 km dýpi [Parks o.fl., 2018].



Mynd 5. Heildarfærsla á GPS stöðvum nærri Örafajökli á árunum 2016-2018. Þessar færslur eru miðaðar við Evrasíuflekann ásamt því að búið er að leiðrétta fyrir lóðréttum og láréttum hreyfingum sem stafa af rýrnun jökla. Svörtu og gráu örvarnar tákna láréttar færslur, en rauðu örvarnar lóðréttar færslur. Fyrir stöðvar með svörtum örvum var hægt að meta áhrif fargbreytinga út frá gögnum, en fyrir stöðvar með gráum örvum var beitt líkani Auriac o.fl. [2014]. Svartir hringir tákna óvissu láréttra færsla, svartar línur (í framhaldi af rauðum strikum) tákna óvissur í lóðréttu átt.

Lokaorð

GPS mælingarnar árið 2017 voru mjög mikilvægar til að kortleggja aflögun við Örafajökul. Aflögunarmerkið sást víða á láglandi og var til dæmis staðfest með svokölluðum bylgjuvíxlmælingum. Niðurstöður mælinganna, ásamt síðari mælingum, gáfu mikilvægar upplýsingar um þá þenslu sem átti sér stað í kvikuhólfi Örafajökuls, auk þess að varpa enn betur ljósi á það landris sem á sér stað vegna hörfunar jökla. Niðurstöður verkefnisins hafa verið kynntar víða; með samstarfsfólki á Veðurstofu Íslands og Almannavörnum, á íbúafundi í Örafum, á haustfundi Jöklarannsóknarfélagssins, erlendis á alþjóðlegum ráðstefnum, auk þess að vera aðalviðfangsefni BS verkefnis.

Jarðskjálftavirknin og þenslan sem mældist í Örafajökli á árunum 2016-2018 var óvanaleg, og ljóst er að slík jarðskjálftavirkni hefur ekki mælst við Örafajökul frá því að jarðskjálftamælingar hófust á svæðinu árið 1976. Vísbendingar eru um að virkni í Örafajökli hafi minnkað til muna haustið 2018. Þannig hafa mun færri jarðskjálftar mælst, og þensla í eldfjallinu er vart greinanleg þegar þetta er skrifað (í september 2019). Óvíst er þó hvað framtíðin ber í skauti sér, enda er þekkt að virkni í eldstöðvum getur verið hviðubundin, þegar þær eru á annað borð farnar að sýna merki um óróleika. Í því sambandi má nefna Eyjafjallajökul, en þar áttu sér stað ítrekuð kvikuinnskot á árunum 1992-2010, í aðdraganda eldgosanna þar árið 2010 [t.d. *Páll Einarsson og Ásta Rut Hjartardóttir, 2015*].

Þakkir

Við kunnum Kvískerjasjóði bestu þakkir fyrir að styrkja mælingarnar. Okkur langar einnig að þakka Einari Rúnari Sigurðssyni frá Hofsnesi í Örafum (mynd 6), eiganda Örafuferða, en hann aðstoðaði mælingafólk við að komast með tæki til og frá Ingólfshöfða og veitti ýmsar mikilvægar upplýsingar sem nýttust við mælingarnar. Sömuleiðis þökkum við Vatnajökulspjóðgarði og starfsfólki hans í Skaftafelli fyrir veitta aðstoð. Við þökkum einnig Maggýju Lárentsínusdóttur, Sveinbirni Steinþórssyni og Þorsteini Jónssyni fyrir aðstoð við mælingar og úrvinnslu gagna.



Mynd 6. Einar Rúnar Sigurðsson og Halldór Geirsson bera GPS tæki niður frá Ingólfshöfða. Öræfajökull í baksýn.

Heimildir

Auriac, A., Spaans, K. H., Sigmundsson, F., Hooper, A., Schmidt, P., & Lund, B. (2013). Iceland rising: Solid Earth response to ice retreat inferred from satellite radar interferometry and viscoelastic modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4).

Compton, K., Bennett, R. A., & Hreinsdóttir, S. (2015). Climate-driven vertical acceleration of Icelandic crust measured by continuous GPS geodesy. *Geophysical Research Letters*, 42, 10.1002/2014GL062446.

Einarsson, P., & Hjartardóttir, Á.R. 2015. Structure and tectonic position of the Eyjafjallajökull volcano, S-Iceland. *Jökull*, 65, bls. 1-17.

Geirsson, H., Parks, M. M., Ofeigsson, B. G., Drouin, V., Li, S., Sigmundsson, F., Árnadóttir, Th., Hjartardóttir, A. R., Lárentínusdóttir, M., Einarsson, P., Schmidh, P., Pálsson, F., Hooper, A., &

Jónsdóttir, K. (2018). Reawakening of the Örfajökull volcano in Iceland: deformation signals of stress triggers and intrusive activity. EGU General Assembly, ágríp: EGU2018-15438, Vínarborg.

Geirsson, H. o.fl., Ókyrrð í Örfajökli - jarðskorpuhreyfingar (“aflögun”). Haustfundur JÖRFÍ, Askja, 6. nóvember 2018.

Geirsson, H. o.fl., Örfajökull - jarðskorpuhreyfingar (“aflögun”). Íbúafundur í Örfæum, 24. október 2018.

Geirsson, H., Pálsson, F., Ófeigsson, B.G., Sturkell, E. Sigmundsson, F., Árnadóttir, Þ., Friðriksdóttir, H.M., Valsson, G., Hreinsdóttir, S., Einarsson, P., Drouin, V., Þorsteinsson, Þ., Magnússon, E., Aðalgeirsdóttir, G., Björnsson, H., Reynisdóttir, S., LaFemina, P., Lund, & B., Schmidt (2019). Breytilegt landris á Íslandi 1993-2019 (e. Variable uplift rates in Iceland 1993-2019). Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands, Reykjavík, 8. mars 2019.

Jónsdóttir, K., Gudmundsson, M. T., Pfeffer, M., Stefánsson, A., Parks, M., Lecocq, T., Thrastarson, R., Geirsson, H., Barsotti, S., Magnússon, E., Pálsson, F., Roberts, M., Belart, J. M. C., Vogfjord, K., Sigmundsson, F., Hjaltadóttir, S., Ófeigsson, B., Larsen, G., Hognadóttir, Th., Oddsson B., and the Glacier & Volcano Monitoring Team at IMO (2018). Reawakening of Örfajökull volcano monitored using a multidisciplinary approach. EGU General Assembly, Abstract EGU2018-17969, Vínarborg.

Kreemer, C., Blewitt, G., & Klein, E. C. (2014). A geodetic plate motion and global strain rate model. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15, bls. 3849–3889.

Parks, M.M., Ófeigsson, B.G., Barsotti, S., Jónsdóttir, K., Vogfjörð, K., Hjaltadóttir, S., Guðmundsson, G., Geirsson, H., Drouin, V., Li, S., Sigmundsson, F., Hjartardóttir, A.R., Trasatti, E., Pfeffer, M., Stefánsson, A., Roberts, M., Þrastarson, R.H., Gudmundsson, M.T., Hognadóttir Th., Magnússon, E., Pálsson, F., Belart, J.M.C., Oddsson, B. (2018). The re-awakening of Örfajökull volcano, Iceland – determining the cause of unrest at a previously quiescent, undermonitored volcano. Ágríp 392, *Cities on Volcanoes 10*, Napolí, Ítalíu.

Lárentínusdóttir, Maggý (2018), GPS landmælingar við Örfajökul, BS ritgerð við Háskóla Íslands, 39 bls., <https://skemman.is/handle/1946/29532>.

Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., & Webb, F. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), bls. 5005–5017.