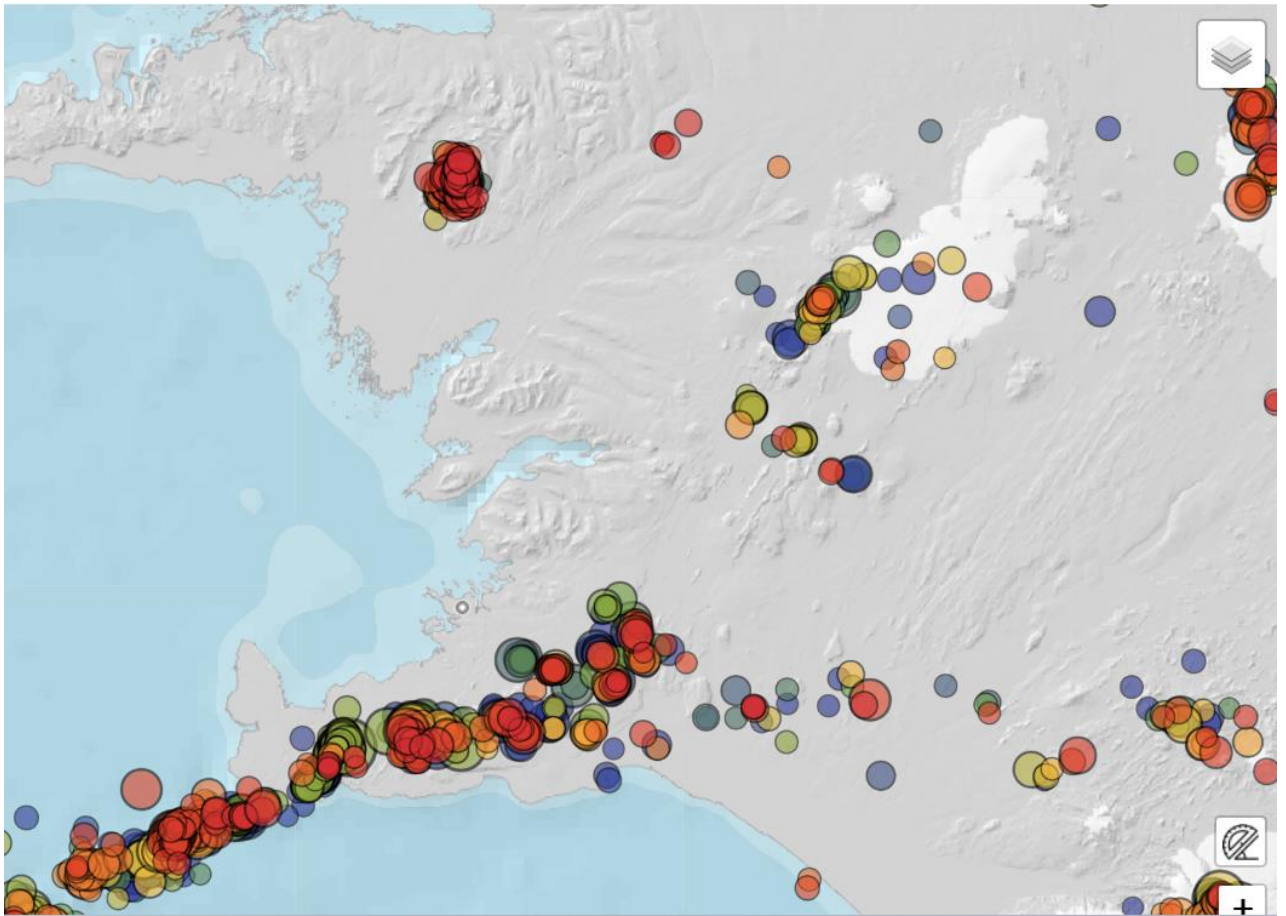


Skjálftavirkni við Grjótárvatn í Mýrasýslu, túlkun og hugsanleg þróun hennar

Páll Einarsson

Jarðvísindastofnun Háskólans



Rannsóknaskýrsla RH-01-2025
unnin fyrir Veðurstofu Íslands

Reykjavík, 6. mars, 2025

Yfirlit

- Aukin skjálftavirkni hefur mælst síðan 2021 innan eldstöðvarkerfis Ljósufjalla, ofan byggðar á Mýrum. Virknin hefur vaxið mjög síðan í ágúst 2024.
- Virknin er mjög staðbundin. Upptök skjálftanna eru öll innan þyrpingar sem er 15 km í þvermál.
- Skjálftarnir eru allir litlir, sá stærsti hingað til var af stærðinni 3,2.
- Dýpi skjálftaupptakanna er, eftir því sem best er vitað, á bilinu 15-20 km.
- Flest rök benda til þess að skjálftar á þessu dýpi stafi af hreyfingum hraunkviku fremur en flekahreyfingum.
- Síðustu mánuðina hafa auk þess komið fram á mælum óróahviður sem einnig virðast eiga upptök á svipuðu dýpi.
- Reikna verður með þeim möguleika að þessi virkni geti verið undanfari eldvirkni á þessum slóðum, þ.e. á svæði sem afmarkast af stöðuvötnunum þremur, Grjótárvatni, Langavatni og Háleiksvatni og nánasta umhverfi þeirra.
- Allmargar gosstöðvar frá seinni hluta ísaldar og tímanum eftir ísöld eru þekktar á þessum hluta eldstöðvarkerfis Ljósufjalla. Þekktar gosmyndanir á svæðinu eru allar frekar litlar og staðbundnar. Dæmigerð eldstöð sem margir þekkja er Grábrók í Norðurárdal. Hún er austasta eldvarpið í þessu eldstöðvarkerfi.
- Síðasta eldgos, sem þekkt er, varð á tíundu öld, þ.e. fyrir um ellefu hundruð árum. Það varð í Rauðhálsi í Hnappadal.
- Setja má fram mismunandi sviðsmyndir fyrir framhald atburðanna. Auk þeirrar sjálfsgöðu sviðsmyndar að kvikuhreyfingar hætti án goss, má setja fram líklegar sviðsmyndir fyrir uppkomu kviku. Þar munar mest um það innan hvaða vatnasviðs gosið kemur upp, Hítardals, Grjótárdals, Hraundals eða Grenjadals. Gera verður ráð fyrir nokkru hraunrennsli niður einhvern þessara dala. Líklegt verður að telja að hraun renni í stöðuvötn eða ár í öllu dölunum og að komið geti til sprengivirkni í sambandi við það.
- Gera má ráð fyrir því að gosuppkoma eigi sér nokkurn undanfara með aukinni skjálftavirkni og mælanlegri aflögun á yfirborði. Það er þó ekki víst að hann sé langur. Minna má á að undanfari gossins í Heimaey 1973 var um 30 klukkustunda langur.
- Mælt er með því að þetta net mælitækja á svæðinu við Grjótárvatn svo fylgjast megi með hreyfingunum betur en nú er unnt. Má þar nefna skjálftamæla, GPS-mælitæki og síritandi hallamæla.
- Mælt er með því að rannsóknir á eldvirkni Ljósufjallakerfisins verði efldar. Afla þarf betri upplýsinga um stærð og umfang gosmyndana, efnasamsetningu þeirra og aldur.
- Bent er á mikilvægi þess að íbúar svæðisins séu upplýstir um atburðarásina sem í gangi er.

Kort á kápu: Upptök jarðskjálfta af stærð 1,5 og stærri á SV-landi á einu ári, tímabilinu 2024 03 14 – 2025 03 13.

Inngangur

Á síðustu fjórum árum hefur athygli beinst að fjalllendinu ofan Mýra á Vesturlandi vegna vaxandi jarðskjálftavirkni. Stakir skjálftar höfðu mælst á þessu svæði áratugin á undan, en virknin jókst og vakti athygli árið 2021 og hélst lítið breytt næstu tvö ár. Í ágúst 2024 urðu þáttaskil og síðan þá hefur skjálftavirknin farið sívaxandi. Upptök skjálftanna eru í tiltölulega þéttri þyrpingu, um 15 km í þvermál og afmarkast upptakasvæðið af þremur stöðvötnum, Grjótárvatni, Háleiksvatni og Langavatni. Svæðið er eldvirkt, hluti af eldstöðvarkerfi sem kennt er við Ljósufjöll, sem er eitt af þremur eldstöðvarkerfum innan eldgosabeltis Snæfellsness. Síðasta eldgos á þessu eldgosabelti varð fyrir um ellefu öldum. Telja verður líklegt að virknin sem nú mælist tengist hreyfingum kviku í jarðskorpunni eða efstu lögum möttulsins, og ekki er óhugsandi að hún leiði til eldgoss. Í þessari skýrslu verður atburðarásin rakin, gerð grein fyrir þróun hennar og dregnar upp líklegar sviðsmyndir um framhaldið. Skýrsla þessi er unnin að beiðni Veðurstofu Íslands.

Yfirlit um jarðfræði

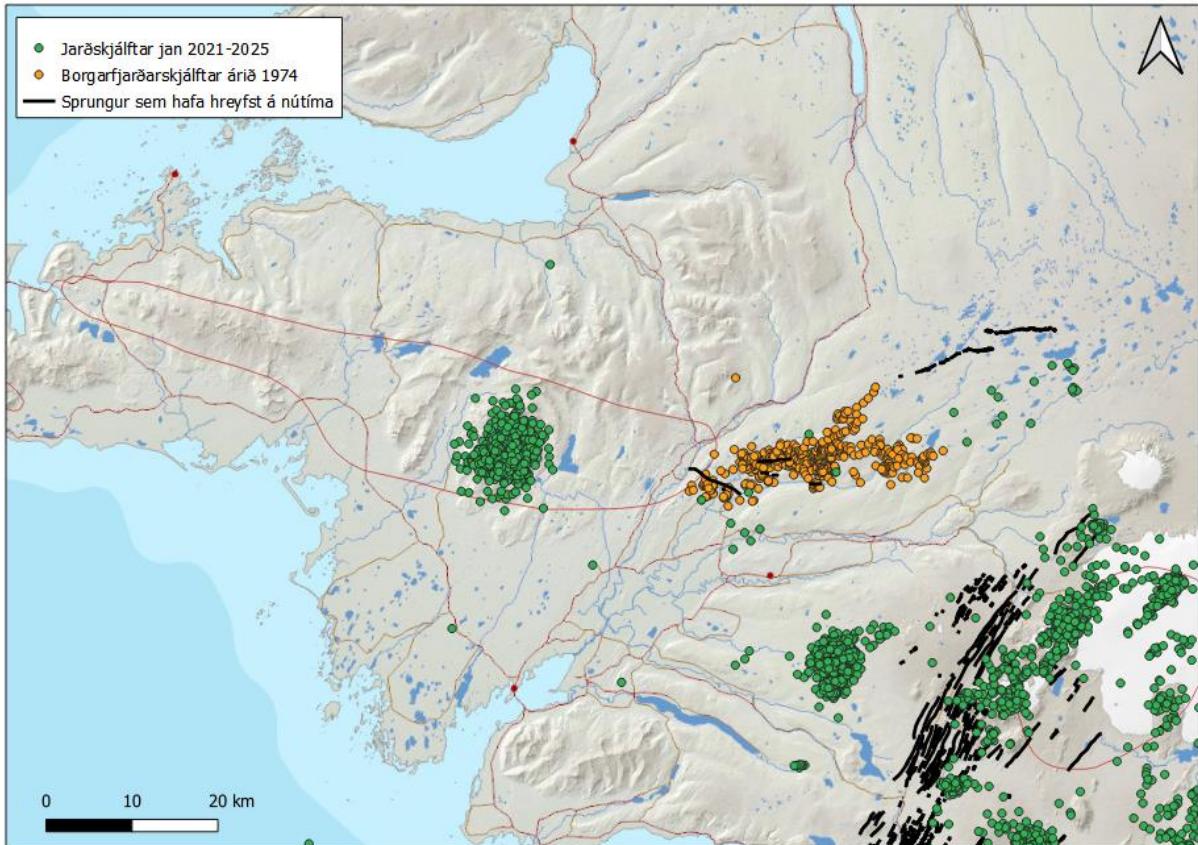
Heitur reitur, flekaskil og jaðarbelti

Ísland er meðal eldvirkustu svæða jarðarinnar. Hér eru að verki að minnsta kosti tvö ferli sem orsaka eldvirkni. Í fyrsta lagi liggur landið á flekaskilum þar sem tvo af meginflekum jarðarinnar rekur í sundur (Einarsson, 2008). Talsverð eldvirkni fylgir ævinlega slíkum fráreksbeltum. Hér á landi liggja fráreksbeltin frá Reykjanestá og austur á Hellisheiði, þaðan liggur grein skilanna um Vesturgosbeltið, um Þingvelli og til Langjökuls. Önnur grein liggur frá Torfajökulssvæðinu, um Austurgosbeltið og Norðurgosbeltið út í Öxarfjörð. Í öðru lagi er Ísland svokallaður heitur reitur, þ.e. svæði þar sem eldvirkni er óvenju mikil og yfirborð stendur hátt miðað við umhverfi sitt. Heitir reitir er taldir liggja yfir möttulstrókum, þ.e. strókum af heitu efni sem stígur hægt upp af miklu dýpi í möttli jarðar. Þegar efnið kemst upp í minni þrýsting verður til í því hlutbráð, hluti þess bráðnar. Bráðin skilur sig frá, stígur upp til yfirborðs og fóðrar eldvirkni. Miðja möttulstróksins undir Íslandi er talin vera undir norðvestanverðum Vatnajökli (Wolfe et al., 1997; Ingi Bjarnason, 2008), en áhrifa hans gætir um stóran hluta landsins. Eldvirknin sem orðið hefur utan fráreksbeltanna verður að skrifast á virkni heita reitsins. Hún er bundin við svokölluð jaðarbelti, s.s. gosbeltið á Suðurlandi (Katla, Eyjafjallajökull, Vestmannaeyjar), Snæfellsnesgosbeltið, og eldvirka svæðið sem afmarkast af Öræfajökli og Snæfelli. Þessi flokkun gosbeltanna endurspeglast í grófum dráttum í efnafræði bergsins sem til verður við virknina. Á fráreksbeltum flekaskilanna verður til tegund basalts sem kallast þóleít, en á jaðarbeltunum alkalí-basalt (Jakobsson, 1979; Sæmundsson, 1979). Bergfræðilegi munurinn er talinn stafa af mismunandi dýpi í jarðskorpunni þar sem kvikan nær síðast jafnvægi áður en hún nær til yfirborðs. Kvikan sem gýs á jaðarbeltunum hefur náð jafnvægi dýpra í jarðskorpunni, jafnvel undir henni. Þó skipta megi eldvirku svæðunum í þessa tvo meginflokka þá er ljóst að skilin milli þeirra eru ekki skörp. Til dæmis er ekki alveg ljóst hvar áberandi eldstöðvar eins og Hekla, Torfajökull og Hofsjökull eiga heima í þessu kerfi. Einnig er ljóst að þessar tvær meginuppsprettur eldvirkinnar, flekaskilin og heiti reiturinn, spila saman og magna hvor aðra. Niðurstaða er sú að eldvirknin er miklu meiri en á öðrum hlutum flekaskila Atlantshafsins. Eldvirknin býr til þykkari jarðskorpu en ella væri, og yfirborð hennar stendur því upp úr sjó. Þannig á Ísland tilveru sína eldvirkninni og möttulstróknum að þakka.

Snæfellsnesgosbeltið og eldstöðvarkerfin þrjú

Jaðarbeltið sem lengst nær út frá flekaskilunum liggur út eftir Snæfellsnesi, að minnsta kosti 200 km út frá þeim flekaskilum sem næst liggja (Einarsson and Sæmundsson, 1987;

Einarsson, 1991). Á þessu beltum er að finna gosmyndanir frá síðustu milljón árum sem liggja ofan á talsvert eldri berggrunni (Haukur Jóhannesson 1982a,b, 1994, 2013). Myndanirnar tilheyra þremur eldstöðvarkerfum sem eru hvert öðru ólík að gerð. Virkasta kerfið er vestast og þar hefur hlaðist upp myndarleg eldfjall, Snæfellsjökull. Á miðju nesinu er lítið og máttlaust kerfi kennt við Helgrindur (stundum Lýsuhól). Austasta kerfið er kennt við Ljósufjöll (Mynd 1). Í Ljósufjöllum hefur virkni þess verið mest. Út frá þeim liggja gosreinar í VNV og ASA, alls um 90 km langar, frá Berserkjahrauni í vestri til Grábrókar í Norðurárdal í austri. Gosreinin til vesturs er mjó, víðast minna en 5 km breið, en austurreinin dreifir meira úr sér og er allt að 15 km breið.

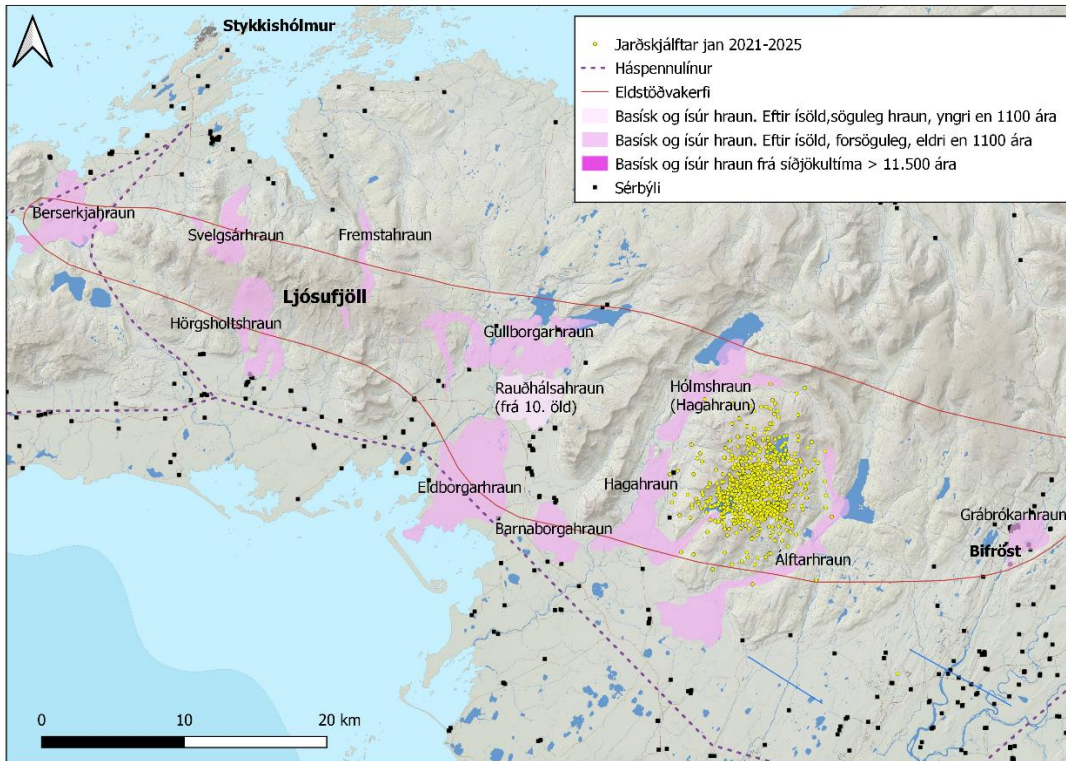


Mynd 1. Upptök skjálfta á Vesturlandi. Sýndir eru skjálftar á tímabilinu 2021-2025 (janúar) og skjálftar sumarið 1974 (gulir, úr grein eftir Einarsson et al. 1977). Virkar sprungur samkvæmt Hjartardóttur et al. (2016). Rauði ferillinn umlykur eldstöðvarkerfi Ljósufjalla. Kort: Ásta Rut Hjartardóttir.

Gosstöðvar

Megineldstöð eldstöðvarkerfisins er í Ljósufjöllum. Þar hefur hlaðist upp myndarleg eldkeila úr kísilríku bergi. Borin hafa verið kennsl á a.m.k. 13 gosmyndanir (Flude et al. 2008) sem flokkast allt frá trakíti yfir í alkalískt rýólít og kómentít. Aldur hefur verið ákvarðaður með Ar-Ar greiningu og liggur á bilinu 45-680 þúsund ár. Ekki eru óyggjandi vísbendingar um súr gos á Nútíma.

Gosvirkni í Ljósufjallakerfinu á Nútíma (eftir ísöld) einkennist af basískum flæðigosum frá stuttum gossprungum með VNV-ASA stefnu (mynd 2). Á svæðinu austan Ljósufjalla má greina a.m.k. 15 gosmyndanir frá Nútíma, sjá yfirlit í Töflu 1. Í töflunni er áætluð lengd



Mynd 2. Hraun frá Nútíma, upptakasvæði skjálftanna við Grjótárvatn og afstaða til innviða og byggðar. Kort: Ásta Rut Hjartardóttir.

gossprungna og ágiskanir á lengd hrauna sem frá þeim hefur komið. Ekki er reynt að meta flatarmál eða rúmmál hraunanna. Gosstöðvarnar eru flestar í dölum þar sem yfirborðið stendur lægst. Víðast er gosvirknin mest í einum gíg en nokkrir minni gígar raða sér á stutta gossprungu út frá honum (sjá dæmi frá upptökum Álftárhrauns sunnan Sandvatns á mynd 3). Nokkurs hugmyndaleysis gætir í nafngiftum á þessum gosstöðvum. Rauðhálsar og Rauðakúlur eru til dæmis á nokkrum stöðum. Hraun hafa runnið frá gosstöðvunum en ekkert þeirra er stórt. Stærst þeirra er Eldborgarhraunið í Hnappadal. Það hefur runnið lengst um 7 km frá upptökum. Hraun sem runnið hafa eftir þröngum dölum hafa sum runnið lengri leið, t. d. Álftárhraun frá Rauðakúlu í Hraundal, um 10 km niður á láglendið framan við Grímstaðamúla. Í Hítardal hefur runnið Hagahraun frá Hróbjörgum um 9 km leið niður á láglendið framan við Fagraskógarfjall. Önnur þekkt hraun, t.d. frá Grábrók í Norðurárdal og Gullborgarhraun í Hnappadal eru flest talsvert styttri. Aðeins eitt þessara gosa er frá sögulegum tíma. Það er gosið við Rauðháls (eða Rauðhálsa) í Hnappadal sem tímasett hefur verið á tíundu öld (Haukur Jóhannesson, 1977). Allar eru gossprungurnar stuttar. Sú lengsta er 1400 m, allar aðrar eru einn kílómetri eða styttri.

Tafla 1: Gosstöðvar frá Nútíma í austanverðu eldstöðvarkerfi Ljósufjalla (ekki tæmandi)

| Heiti | Breidd N gráður | Lengd V gráður | Lengd gossprungu | Lengsta hraun |
|-------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Grábrók | 64,771 | 21,538 | 900 m | 3,8 km |
| Gígar í Kvígindisdal | 64,813 | 21,828 | 700 m | 5 km |
| Rauðakúla Hraundal | 64,752 | 21,868 | 900 m | 10 km |
| Rauðhálsar Grjótá | 64,774 | 21,992 | 700 m | 6 km |
| Rauðakúla Hítardal | 64,846 | 22,014 | 100 m | - |
| við Hróbjörg í Hítardal | 64,812 | 22,064 | 100 m | 9,3 km |

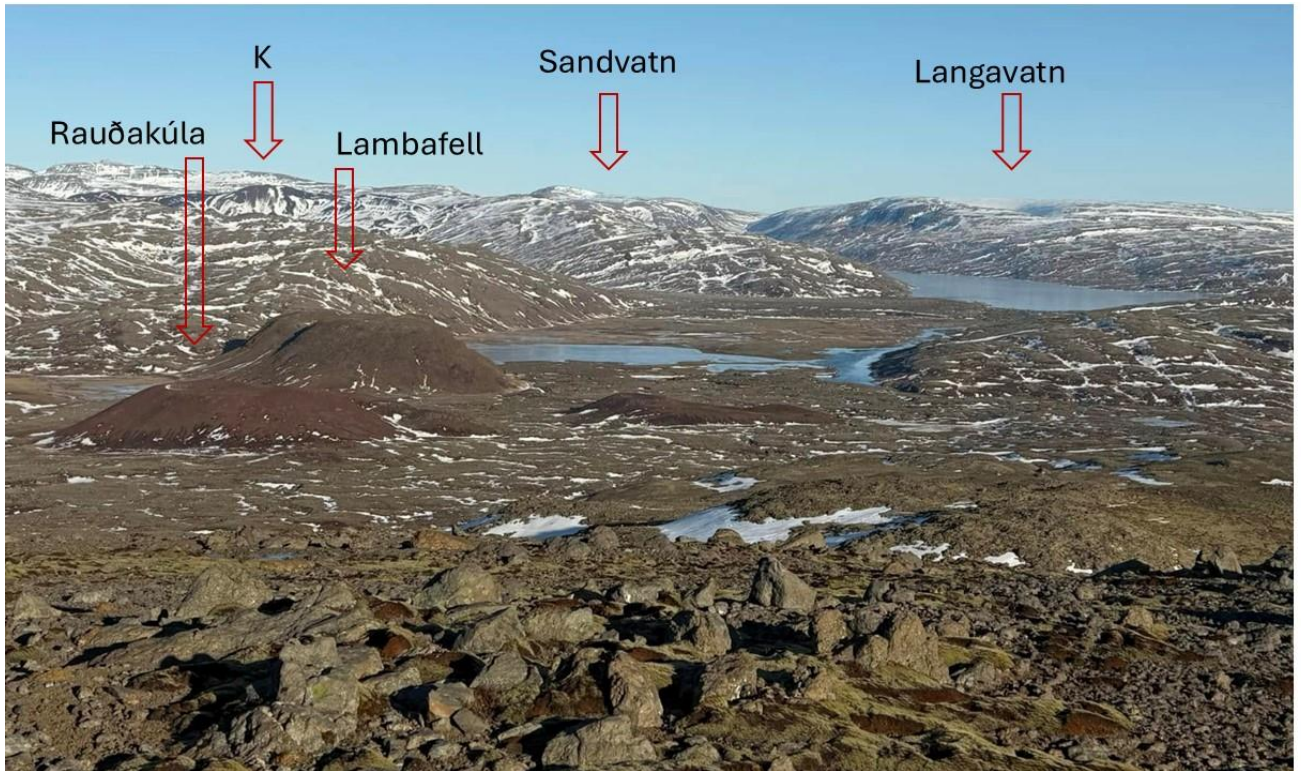
| | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Gígar í Þórarinsdal | 64,856 | 21,927 | 800 m | 9,2 km |
| Gígar við Hítarvatn | 64,865 | 21,954 | 900 m | 1,6 km |
| Barnaborg | 64,769 | 22,221 | 300 m | 2,7 km |
| Eldborg | 64,796 | 22,321 | 600 m | 7 km |
| Rauðháls | 64,850 | 22,228 | 400 m | 3,7 km |
| Gullborg | 64,872 | 22,226 | 100 m | 4 km |
| Syðri Rauðamelskúllur | 64,871 | 22,293 | 1000 m | 1,5 km |
| Ytri Rauðamelskúllur | 64,876 | 22,344 | 100 m | 1,4 km |
| Gígar ofan Gráborga | 64,894 | 22,410 | 1400 m | 7,8 km |

Eldvirknin er þó ekki bundin við Nútímann því ekki færri en 15 gosmyndanir má finna á sama svæði þar sem gosið hefur undir jökli Ísaldar. Það eru móbergsmýndanir en bera að öðru leyti svipuð einkenni. Dæmi um slíkar myndanir eru í Töflu 2. Lengd gossprungna er hér öllu óvissari en í Töflu 1, en gefur þó vissa hugmynd um stærð þessara myndana. Hafa ber í huga að Ísaldarjökullinn hefur farið óblíðum höndum um þessar myndanir og vafalítið borið talsvert af gosefnum burt frá upptakastað þeirra. Listinn í Töflu 2 er langt frá því tæmandi. Fleiri myndanir er að finna á kortum Hauks Jóhannessonar (1994, 2013) og ekki er vafi á því að frekari rannsóknir munu leiða í ljós margar gosmyndanir frá Ísöld til viðbótar.

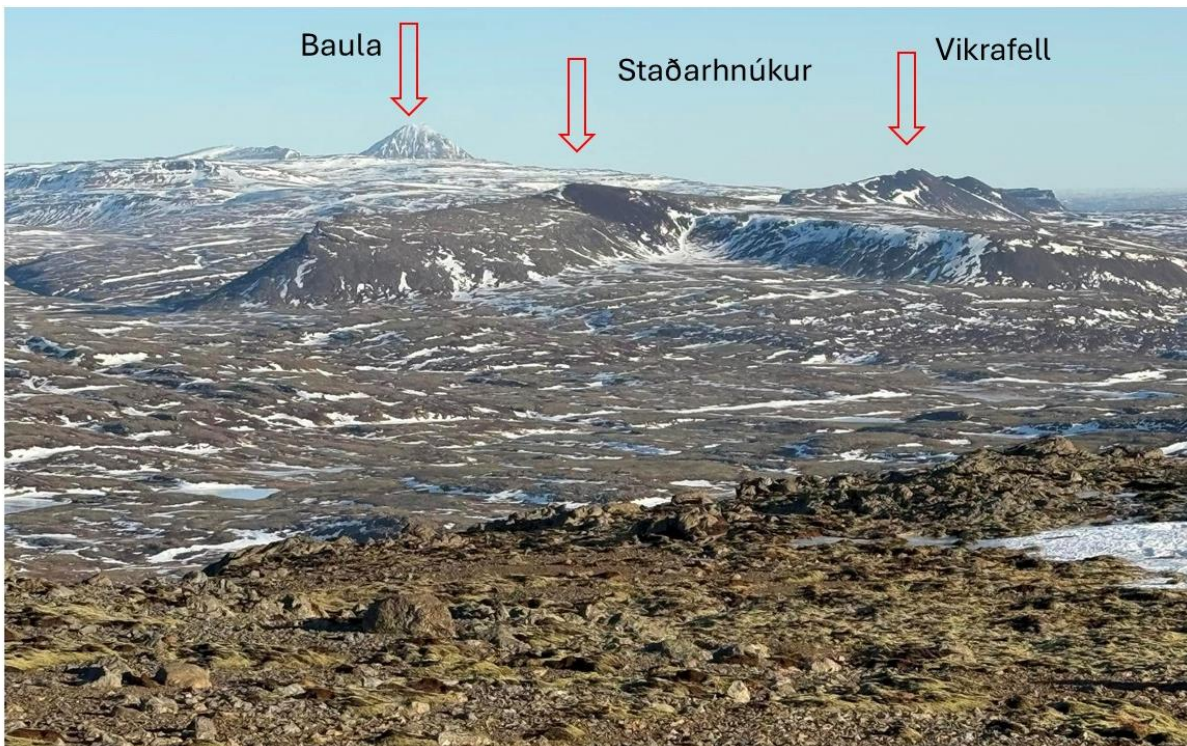
Tafla 2: Gosstöðvar frá Ísöld í austanverðu eldstöðvarkerfi Ljósufjalla (ekki tæmandi)

| Heiti | Breidd N gráður | Lengd V gráður | Lengd gossprungu | |
|----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| Vikrafell | 64,777 | 21,643 | 1300 m | Mynd xx |
| Staðarhnúkur | 64,767 | 21,746 | 1600 m | Mynd xx |
| Lambafell v. Sandvatn | 64,760 | 21,860 | 400 m | Mynd xx-1 |
| Kúfusandur | 64,808 | 21,910 | 2400 m | |
| Rauðhálsar Hraundal | 64,745 | 21,890 | 700 m | |
| Miðmorgunsbungur | 64,747 | 21,914 | 800 m | |
| Háleiksvatn NA | 64,829 | 21,859 | 1900 m | |
| Efst í Kvígindisdal | 64,823 | 21,833 | 1300 m | Mynd xx-1 |
| Tindaborg | 64,762 | 21,980 | 900 m | |
| Hróbjörg í Hítardal | 64,817 | 22,071 | 700 m | |
| Svörtutindar við Hnappadal | 64,846 | 22,199 | 600 m | |
| Fossabjörg Hítardal | 64,847 | 21,992 | 1000 m | |
| Hrafnatindar | 64,846 | 22,200 | 900 m | |
| Klifsandur | 64,866 | 22,048 | 2200 m | |
| Sandfell v. Hlíðarvatn | 64,897 | 22,116 | 1000 m | |
| Foxufell v. Hítarvatn | 64,881 | 21,937 | 1300 m | |

Gosmyndunin frá Staðarhnúk er athyglisverð. Þar hefur runnið hraun sem væntanlega þýðir að jökull hefur verið þunnur þegar þarna gaus, sjá mynd 4. Hraunbunkinn er um hundrað metra þykkur og hefur væntanlega fyllt geil í jöklinum. Hraunið hefur síðar orðið fyrir jökulrofi. Hraunbunkinn hylur miklu eldri berggrunn sem er mjög sprunginn. Bunkinn er hins vegar nánast ósprunginn, sem merkir að gömlu misgengin hafa lítið sem ekkert bætt á sér síðan þetta gos varð á Ísöldinni.



Mynd 3. Gosstöðvar við Sandvatn og Langavatn frá Nútíma (Rauðakúla við Sandvatn) og ísöld (K, efst í Kvígindisdal og Lambafell). Mynd: Gerhild Hammer.



Mynd 4. Yfirlitsmynd yfir gosmyndanir austan Langavatns: Baula af óræðum aldri, Staðarhnúkur og Vikrafell frá ísöld. Hraunbunkinn frá Staðarhnúk sést hægra megin við hnúkinn og ber í Vikrafell. Mynd: Gerhild Hammer.

Gervigos

Stöðuvötn eru nokkuð algeng á upptakasvæði skjálftanna. Flest þeirra eru orðin til við það að gosstöðvar á botni dalanna stífla ár og mynda vatnsuppistöður. Þetta á við um öll stærstu vötnin, Langavatn, Grjótárvatn, Háleiksvatn og Sandvatn. Þetta hefur einnig í för með sér að miklar líkur eru á því að nýtt hraun muni komast í snertingu við vatn þegar það tekur að renna eftir dalbotnum. Á svæðinu má finna litla gjallgíga sem virðast hafa myndast við samspil hrauns og vatns, til dæmis norðaustan Sandvatns, sunnan Hítarvatns og við Syðri Rauðamelskúlu í Hnappadal. Þessar myndanir eru þó allar frekar litlar og öskumyndun virðist ekki hafa verið veruleg í tengslum við þær.

Skriður

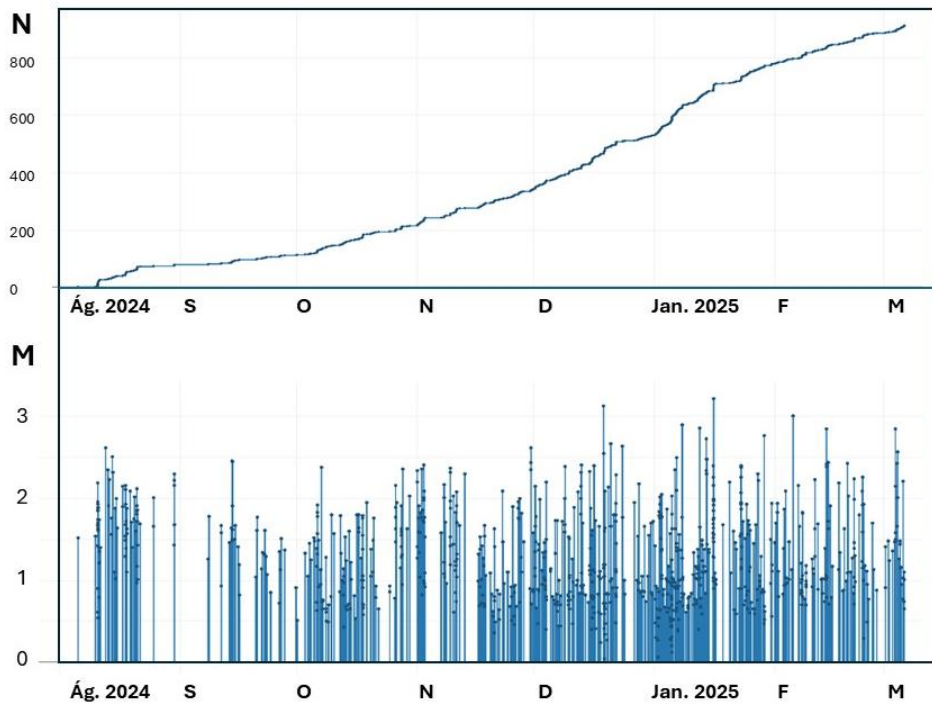
Landslag á upptakasvæðinu einkennist af tiltölulega bröttum fjöllum, kröppum dölum og sprungnum berggrunni. Þessi landform bjóða upp á tíð skriðuföll og sér þess merki á nokkrum stöðum. Ein stærsta skriða sem fallið hefur á síðustu áratugum á Íslandi féll í Hítardal í júlí 2018 (Dabiri et al. 2020). Stórar skriður má meðal annars sjá suðaustan Hítarvatns, í Langavatnsdal og Hafradal norðan Langavatns, úr Moldarnúpi norðaustan Langavatns og við Hraunsnef í Norðurárdal. Ekki er vitað hvort allar þessar stóru skriður tengjast öðrum umbrotum, svo sem jarðskjálftum eða kvikuinnskotum. Gera verður ráð fyrir að umbrot, eldgos eða sprunguhreyfingar geti hrundið af stað skriðum úr bröttum hlíðum. Skriðan 2018 virðist þó ekki tengjast öðrum umbrotum.

Skjálftavirkni

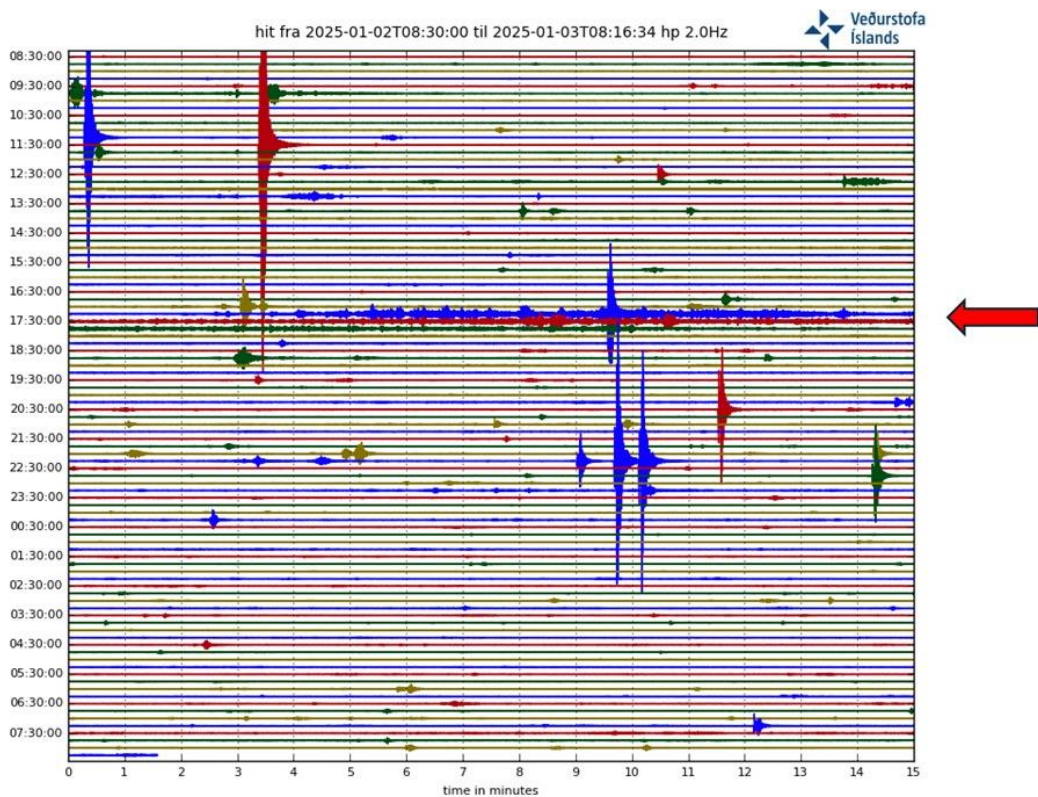
Á kortinu á mynd 1 koma fram tvær þyrpingar innflekaskjálfta á tímabilinu 2021-2025. Önnur er þyrpingin við Grjótárvatn en hin er í Þóreyjartungum norðan Lundarreykjadal. Skjálftarnir þar á heiðinni vestan Oks urðu næstum allir í afmarkaðri hrinu skjálfta í janúar-febrúar 2022. Dýpi skjálftaupptakanna er á bilinu 0-16 km. Flestir eru raunar á bilinu 0-7 km og líklegt verður að telja að dreifingin þar fyrir neðan stafi af ónákvæmni staðsetninganna. Til samanburðar má einnig taka kröftuga hrinu sem varð norðan Hvítársíðu á tímabilinu 1973-1974. Stærsti skjálftinn var um 5,5 að stærð og olli nokkru tjóni. Gerð var sérstök rannsókn á skjálftunum með færanlegum skjálftamælum sumarið 1974 og leiddi hún í ljós að þeir áttu upptök á 0-10 dýpi og stöfuðu af siggengishreyfingum (Einarsson et al. 1977; Páll Einarsson, 1989, 2021). Upptök vel staðsettra skjálfta úr hrinunni eru sýnd á mynd 1 með gulum punktum. Jarðskorpan reyndist vera undir N-S láréttri togspennu á þessu svæði. Ekki sást þess merki að hraunkvika kæmi þar við sögu.

Yfirstandandi hrina við Grjótárvatn hagar sér allt öðruvísi en hrinurnar hér á undan. Hún byrjaði árið 2021, hélt áfram 2022, 2023 og fram eftir ári 2024 en sótti svo í sig veðrið í ágúst það ár og hefur farið sívaxandi síðan (sjá mynd 5), bæði hvað fjölda skjálfta snertir og útleyst skjálftavægi. Dýpi skjálftanna hefur verið á þröngu dýptarbili 15-20 km. Skjálftarnir eru ekki stórir, sá stærsti fram til þessa var af stærðinni 3,2. Hrinan hefur hins vegar verið mjög samfelld síðan í ágúst, varla liðið dagur án mælanlegra skjálfta.

Auk stakra skjálfta í hrinunni hefur á síðustu mánuðum orðið vart við stuttar hviður af samfelldum óróa, sjá mynd 6. Sumar hviðanna hafa yfirbragð runu af litlum skjálftum sem koma svo þétt að ekki verður kyrrt á milli. Aðrar eru samfelldari og líkjast mjög atburðum sem stundum mælast á undan eldgosum.



Mynd 5. Línurit sem sýnir gang skjálftavirkninnar við Grjótárvatn síðan í byrjun ágúst 2024. *N* er uppsafnaður fjöldi staðsettra skjálfta, *M* er stærð skjálfta.



Mynd 6. Tromlurit frá skjálftamælinum í Hítardal fyrir sólarhringinn 2.-3. janúar 2025. Á skjálftaritinu má sjá marga jarðskjálfta auk óróahviðu (rauð ör) sem hófst klukkan 17:17 og stóð í meira en 40 mínútur. Marga styttri slíkar hviður hafa mælst. Hviðurnar koma einnig fram á skjálftamælinum að Ásbjarnarstöðum í 25 km fjarlægð frá upptakasvæðinu.

Um dýpi skjálftaupptakanna

Langflestir jarðskjálftar á Íslandi er tengdir flekaskilunum sem ganga gegnum landið og stafa af spennu í jarðskorpunni sem safnast upp vegna færslu flekanna út frá skilunum (Einarsson, 1991). Í efri hluta jarðskorpunnar er brotstyrkur bergsins með þeim hætti að bergið brestur við ákveðin brotmörk, það myndast sprunga eða gömul sprunga hrekkur til og sprungubarmarnir ganga á víxl. Við þetta myndast skjálftabylgja sem breiðist út frá brotinu og við skynjum sem jarðskjálfta. Þetta kallast stökk hegðun. Brotstyrkurinn er háður ytra ástandi efnisins, s.s. þrýstingi, hita og aflögunarhraða. Einnig kemur vökvaprýstingur við sögu. Áhrif hita og þrýstings koma fram í því að bergið verður linara með auknu dýpi og það hættir að brotna en hnígur þess í stað með jöfnum hraða. Við þann aflögunarhraða sem stafar af flekahreyfingunum verða því ekki jarðskjálftar í neðri hluta jarðskorpunnar. Bergið hnígur en safnar ekki spennu. Þessi hnigmörk jarðskorpunnar eru háð hita og því aldri jarðskorpunnar. Talsvert hefur verið fjallað um þessi mörk milli hnígandi og stökkrar jarðskorpu, enda stjórna þau hámarksdýpi jarðskjálfta sem tengja má flekareki. Á fráreksbeltum eins og á Reykjaneskaga, Hengilssvæðinu, Öskjussvæðinu og við Kröflu virðast þau liggja á 7-9 km dýpi (sjá t.d. Klein o. fl. 1973, 1977; Foulger 1988; Stefánsson et al., 1993; Soosalu o.fl. 2009; Einarsson og Brandsdóttir 2021). Helsta reynsla af innflekaskjálftum, þ.e. skjálftum sem ekki eru á flekaskilum, fékkst í Borgarfjarðar-skjálftunum 1974 sem lýst er hér að ofan (Einarsson et al., 1977; Einarsson, 1989; Páll Einarsson, 2021). Skjálftarnir áttu upptök í Pverárhlið og norðan Hvítársíðu og stóðu með mismiklum ákafa í meira en ár. Dýpi upptakanna dreifðist á bilið 0-10 km. Stærsti skjálftinn var af stærðinni 5,5. Engin merki sáust um kvikuhreyfingar.

Fyrstu vísbendingar um skjálftaupptök dýpra en að ofan greinir komu í tengslum við gosið í Heimaey 1973. Með skjálftamælum sem settir voru upp eftir gosbyrjunina mátti staðsetja upptökina með nokkurri nákvæmni og reyndust svo til allir skjálftarnir eiga upptök á 15-25 km dýpi undir Heimaey (Björnsson and Einarsson, 1974), þ.e. talsvert undir hnigmörkum við venjulegan aflögunarhraða. Þetta mátti skýra með því að aflögunarhraði í tengslum við kvikuhreyfingar sé hærri og því geti bergið verið stökkt við hærri hita en ella.

Við ítarlegar skjálftamælingar á svæðinu umhverfis Öskju á fyrsta áratug þessarar aldar komu svipaðar niðurstöður í ljós (Soosalu et al., 2009; Green et al., 2014; White et al., 2011). Greina mátti skjálfta sem tengdust flekahreyfingum og reyndust þeir eiga upptök á 0-8 km dýpi, en auk þeirra komu fram skjálftaþyrpingar á miklu meira dýpi, allt að 34 km dýpi, og hefur helsta skýringin verið talin sú að þeir standi í sambandi við hraðari aflögun í tengslum við kvikuhreyfingar. Frekari staðfesting fékkst svo með skjálftahrinu undir Upptyppingum austan Öskju sem stóð 2007-2008. Skjálftarnir teiknuðu upp hallandi flöt á 15-25 km dýpi og fylldi þessum skjálftum landris í samræmi við að hallandi gangur hefði myndast þar (Hooper et al., 2011; Jakobsdóttir et al., 2008).

Hefur eitthvað svipað gerst áður?

Ekki eru öruggar heimildir fyrir því að svipuð skjálftahrina hafi orðið á undanförunum áratugum á þessu svæði. Fyrir 1952 var einungis einn skjálftamælir á landinu og því ekki hægt að staðsetja upptök skjálfta með neinni nákvæmni (Eysteinn Tryggvason 1978; Einarsson and Jakobsson, 2020). Eftir að mælum fjölgaði um 1960 var hægt að staðsetja upptök út frá mælingum en þó tæplega með nægilegri nákvæmni til að greina á milli einstakra líklegra upptaksvæða, t.d. Langjökuls eða uppsveita Borgarfjarðar, þar sem skjálftar eru tíðari (Einarsson, 1989).

Ein tiltekin skjálftahrina gæti hugsanlega hafa átt upptök innan Ljósufjallakerfisins. Í febrúar árið 1938 fundust allmargir minni háttar kippir á Vesturlandi, Helgafellssveit og Akranesi. Dagana 10.-11. febrúar mældust í Reykjavík um 40 skjálftar og virtust þeir vera í 75-80 km fjarlægð (Eysteinn Tryggvason, 1978; Einarsson, 1989). Tólf skjálftar voru af stærðinni 4 eða stærri, tveir stærstu um 5 ¹/₄. Þessir skjálftar eru umtalsvert stærri en nokkuð sem gerst hefur í yfirstandandi skjálftahrinu við Grjótárvatn. Hegðun hrinunnar 1938 er einnig talsvert frábrugðin og minnir meira á hrinur sem stundum verða á Langjökulssvæðinu í Vesturgosbeltinu.

Þróun virkninnar, sviðsmyndir

Yfirlit sviðsmynda:

- A. Dregur úr skjálftavirkninni án frekari tíðinda.
- B. Skjálftavirknin heldur áfram og fer jafnvel vaxandi. Kvika leitar upp í efri hluta skorpunnar og myndar gang án þess að ná til yfirborðs.
 - B1 Kvika leitar nánast lóðrétt upp í skorpuna. Staðbundin aflögun mælist á upptakasvæðinu.
 - B2 Kvika leitar til hliðar. Kvikuhlaup í ríkjandi sprungustefnu, ASA. Siggengi gætu verið virk, með sigdalsmyndun. Hugsanleg en ekki sérlega líkleg sviðsmynd.
- C. Skjálftavirkni heldur áfram og kvika leitar til yfirborðs. Eldgos brýst út.
 - C1 Eldgos kemur upp á vatnasviði Hítardals (Þórarinsdals)
 - C2 Eldgos kemur upp á vatnasviði Grjótárdals
 - C3 Eldgos kemur upp á vatnasviði Hraundals
 - C4 Eldgos kemur upp innan vatnasviðs Langár í Grenjadal.

Skýringar sviðsmynda:

- A. Mörg dæmi eru um það að skjálftavirkni hefjist á eldvirku svæði, haldi áfram um skeið og hætti svo án þess að til frekari tíðinda dragi. Nærtæk dæmi eru frá Örafajökli 2017-2018, Torfajökli 2019, og Kötlu flest ár. Skjálftana er erfitt að skýra nema með færslu kviku í eða undir jarðskorpunni, en rúmmál hennar eða þrýstingur nær aldrei því marki að hún fari á flakk og brjóti sér leið.
- B. Jafnvel þó kvika fari á flakk og myndi gang eða innskot í jarðskorpunni eða möttlinum undir henni er engan veginn víst að hún nái til yfirborðs og fódri eldgos. Nokkur dæmi eru um slík kvikuinnskot án goss í yfirstandandi umbrotum á Reykjanesskaga og svipaðri umbrotahrinu í eldstöðvarkerfi Kröflu 1975-1984 (Sigmundsson et al. 2024; Páll Einarsson, 1991; Einarsson and Brandsdóttir, 2021). Einnig má nefna ganginn sem myndaðist á 12-20 km dýpi undir Upptyppingum austan Öskju á tímabilinu 2007-2008. Honum fylgdi mælanleg aflögun á yfirborði (Hooper et al. 2011). Efni í hann virtist koma að neðan því engin aflögun mældist í nærliggjandi megineldstöðvum, Öskju eða Kverkfjöllum, sem tengja mætti myndun hans. Einnig mætti nefna lagganga sem mynduðust með tilheyrandi skjálftahrinum undir Eyjafjallajökli 1994 og 1999 (Pedersen and Sigmundsson, 2004, 2006). Svipaðir atburðir 2009 og 2010 leiddu síðan til eldgosanna 2010 (Sigmundsson et al. 2010).
- C. Ef gangur byrjar að myndast út frá núverandi meintu kvikusöfnunarsvæði á 15-20 km dýpi þá er líklegast að hann ferðist með litlum halla til yfirborðs. Lárétt útbreiðsla í stíl

Kröflu eða Bárðarbungu er ekki útilokuð en í ljósi þess að upptakasvæðið er ekki á flekaskilum er hún varla líkleg. Vísendingar eru þó um að siggengi hafi verið virk í tengslum við tvo gosstaði, í Rauðamelsfjalli og austan Grábrókar. Ef til goss kemur er þó erfitt að segja fyrir um líklegan gosstað. Upptakasvæði kvikunnar er nokkuð umfangsmikið og ekki má miklu muna í halla gangsins um það hvar hann nær yfirborði. Allir fyrri gosstaðir á þessu gosbelti eru á stuttum gossprungum í dalbotnum. Upptakasvæðið er einnig fjöllótt og sundurskorið af dölum. Hugsanlegar sviðsmyndir goss á svæðinu eru því fjölbreytilegar og erfitt að greina líkur fyrir hverri þeirra, sjá mynd 7. Þessar eru helstar (ágískaðar tölur um líkur í svígum):

C1 (20%) Gos kemur upp á nyrsta hluta upptakasvæðisins, innan vatnasviðs Hítardals. Hraun frá gosstöðvunum gæti runnið niður Þórarinsdal eða Stefningardal og niður í Hítardal. Hraun gæti komist í snertingu við vatn í viðkomandi ám, en einnig í Hítarvatni með tilheyrandi sprengivirkni og öskumyndun. Ekki er útilokað að hraun renni að nýja stöðuvatninu neðst í dalnum ofan við skriðuna úr Fagraskógarfjalli 2018.

C2 (50%) Gos kemur upp um miðbik upptakasvæðisins, innan vatnasviðs Grjótárdals. Hraun rynni þá niður eftir Grjótá og gæti runnið í Grjótárvatn eða Háleiksvatn, hugsanlega niður í Hítardal.

C3 (20%) Gos kemur upp sunnarlega á upptakasvæðinu, innan vatnasviðs Hraundals (Melsár). Hraun gæti runnið niður Hraundal og niður á láglandið framan við Grímsstaðamúla. Vötn gætu orðið fyrir áhrifum, s.s. Skýjadalstjörn og Sandvatn.

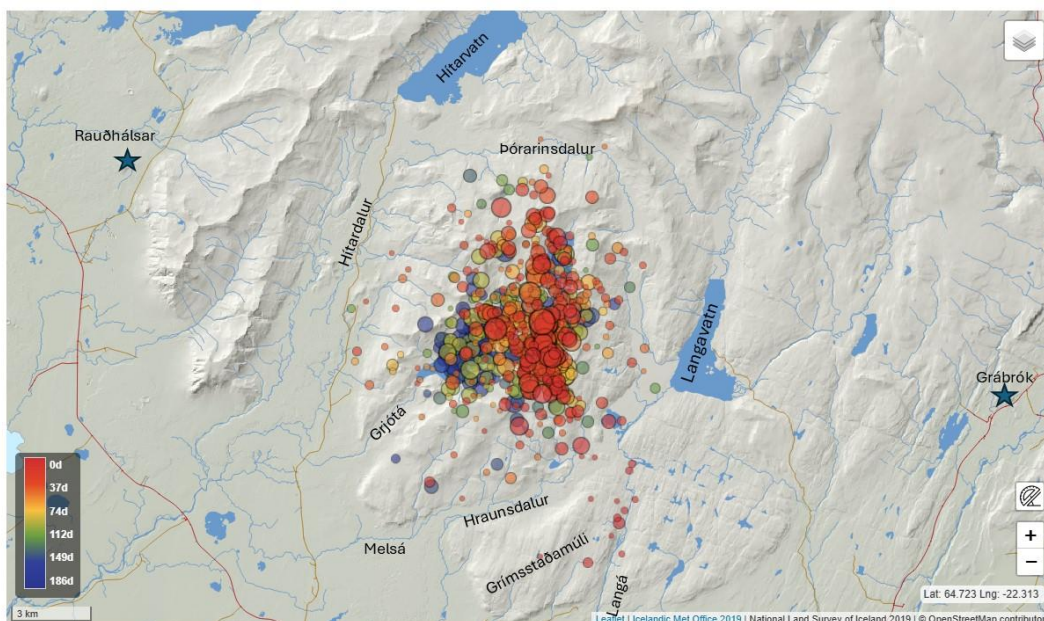
C4 (10%) Gos kemur upp syðst á upptakasvæðinu, innan vatnasviðs Grenjadals (Langár). Hraun gæti runnið niður þröngan dalinn og breiðst út á láglandinu framan við Grímsstaðamúla.

Aðrar sviðsmyndir

Spurningar vakna um það hvort líklegt sé að virknin breiðist út til nærliggjandi svæða. Eldvirka svæðið við Grjótárvatn er hluti af eldstöðvarkerfi Ljósufjalla, em aftur er hluti af eldgosabelti Snæfellsness. Er þessi svæði í hættu?

Tvö atriði skipta hér máli. Í fyrsta lagi er virknin sem nú hefur mælst mjög staðbundin. Engin merki eru um að hún hafi breiðst teljandi út á þeim tíma sem liðinn er. Í öðru lagi er Snæfellsnesbeltið ekki á flekaskilum. Eldvirknin tengist því ekki flekahreyfingum beint. Líkurnar á því að umbrot á einum stað svæðisins hleypi af stað umbrotum á öðrum hlutum þess eru því ekki sérlega miklar. Á hinn bóginn verður að viðurkennast að eðli Snæfellsnesbeltisins er illa þekkt. Ekki er til að dreifa kenningu um það sem er almennt viðurkennd. Ekki er því hægt að hafna því alfarið að umbrotin geti breiðst út.

Upptakasvæðið er fjallent og skriðuföll því nokkuð tíð. Í fersku minni er skriðan mikla sem féll úr Fagraskógarfjalli niður í Hítardal 7. júlí árið 2018 og stíflaði Hítará. Engir jarðskjálftar voru tengdir þessari skriðu. Það verður hins vegar að taka þann möguleika með í reikninginn, ef skjálftavirkni vex, að þeir geti hrundið af stað skriðum, einnig ef til eldsumbrota kemur.



Mynd 7. Kort sem sýnir afstöðu skjálftaþyrpingarinnar til landslags. Líklegir upptakastaðir eldgosa eru í dölum og hraun frá þeim gosum munu renna niður dalina. Ef gos verður innan skjálftaþyrpingarinnar er líklegt að hraun renni niður Hítardal, Grjótárdal, Hraundal eða Langá (Grenjadal).

Forboðatími eldgosa

Ef takast á að gefa út viðvörðun um yfirvofandi eldgos getur það skipt sköpum hver forboðatími gossin er, þ. e. tíminn sem líður frá því að fyrstu vísbendingar koma fram um það að kvika sé komin á hreyfingu og þangað til gos hefst. Rannsóknir á forboðatíma gosa á Íslandi hafa leitt í ljós að þessi tími er mjög mislangur, bæði ef borin eru saman mismunandi eldstöðvarkerfi og einnig fyrir hvert eldstöðvarkerfi fyrir sig. Forboðatími allra eldgosa á tímabilinu 1970–2014 var á bilinu 15 mínútur til 13 dagar (Einarsson, 2018). Stysti tíminn var á undan gosinu í Kröflu 1975 en sá lengsti á undan Holuhraungosinu frá Bárðarbungu 2014. Fyrir öll Kröflugosin níu á árunum 1975–1984 voru forboðatímarnir á bilinu 15 mínútur til 7 klukkustundir. Hekla sker sig nokkuð úr í hópi íslenskra eldstöðva. Forboðatímar hennar í gosunum 1970, 1980, 1991 og 2000 voru á bilinu 23–79 mínútur. Það er athyglisvert því dýpi niður á upptakastað kvikunnar virðist tiltölulega mikið, 15–20 km (Soosalu and Einarsson, 2004; Ofeigsson et al., 2011; Geirsson et al., 2012). Eldgosin á Reykjanesskaga undanfarin fjögur ár sýna einnig mikla dreifingu. Gosin þrjú í Fagradalskerfinu 2021, 2022 og 2023 höfðu langan forboðatíma, 23, 4 og 6 daga. Gosin frá Svartsengiskerfinu, á hinn bóginn, höfðu mun styttri forboðatíma, frá 30 mínútum og upp í 5 klukkustundir (Parks et al. 2024). Ef til vill er gosið í Heimaey 1973 nánasta hliðstæða við hugsanlegt eldgos við Grjótárvatn. Kvikan undir Heimaey kom líklega af 15–25 km dýpi og forboðatíminn var 30 klukkustundir (Björnsson and Einarsson, 1974). Það er því ljóst að mikil óvissa er um það hvort langur tími gefst til að gefa út viðvörðun um yfirvofandi gos við Grjótárvatn.

Niðurstöður

Skjálftavirkni sem mælst hefur undanfarin fjögur ár á svæði við Grjótárvatn, Háleiksvatn og Langavatn á Mýrum hefur farið vaxandi síðan í ágúst 2024. Ekki er vitað með vissu um sambærilega virkni á þessu svæði síðan mælingar hófust um miðja síðustu öld. Svæðið er innan eldstöðvarkerfis Ljósufjalla, eitt þriggja virkra eldstöðvarkerfa gosbeltis sem kennt er við Snæfellsnes. Síðasta gos á þessu beltum var á tíundu öld. Upptakasvæði skjálftanna er mjög

þröngt, innan við 15 km í þvermál, og langflestir skjálftanna, ef ekki allir, eiga upptök á 15-20 km dýpi, þ.e. talsvert undir þeim mörkum þar sem hegðun jarðskorpunnar hættir að vera stökk og verður hnígandi vegna hækkandi hita og þrýstings með dýpi. Dýpið er helsta vísbending um það að skjálftarnir tengist kvikuhreyfingum en ekki flekahreyfingum. Auk skjálftanna hafa á síðustu mánuðum mælst stuttar óróahviður, sem einnig rennir stöðum undir hugmyndir um kvikuhreyfingar. Ýmis rök hníga því að því að búast megi við því að komið geti til eldgosavirkni í framhaldi þessara viðburða. Fyrri eldgos á þessum hluta Ljósufjallakerfisins eru fremur lítil hraungos, frá einum eða fleiri gígum sem raða sér á stuttar gossprungur með ASA-VNV stefnu. Gosstöðvarnar eru flestar í dalbotnum og hraunin hafa runnið eftir dölum, stundum alveg niður á láglendið á Mýrum. Lengsta fjarlægð sem hraun hafa runnið er 10 km. Ekki eru þekkt nein ummerki eftir meiri háttar hamfarir tengdar þessum gosum. Hraun eru þó líkleg til að komast í snertingu við vatn, bæði ár og stöðuvötn, sem gæti leitt til sprengivirkni, en öll ummerki um slíkt eru minni háttar. Byggt á reynslu af eldgosum og eldfjallavöktun hér á landi undanfarna áratugi má setja fram nokkrar sviðsmyndir um líklegt framhald atburðarásarinnar. Í fyrsta lagi gæti kvikuvirknin hætt án frekari atburða. Í öðru lagi gæti áframhald kvikusöfnunar leitt til kvikuhlaups, þ.e. að kvika leitaði eftir sprungum og myndaði kvikugang án þess að komast til yfirborðs. Í þriðja lagi gæti kvikugangur leitað til yfirborðs og hleypt upp gosi. Hraun frá slíku gosi mun renna eftir þeim dal sem næstur er, jafnvel allt niður á láglendið fyrir framan fjöllin. Þarna má greina fjórar mismunandi sviðsmyndir, allt eftir því innan hvaða vatnasviðs gosið kæmi upp, Hítardals, Grjótár, Hraundals eða Grenjadals. Líklegt er að eldgos eigi sér mælanlegan aðdraganda. Reynsla frá eldgosum síðustu áratuga bendir til þess að hann geti verið mjög breytilegur, á bilinu fáeinir klukkutímar til allmargir dagar. Settar eru fram tillögur um aukið jarðvísindalegt eftirlit með svæðinu til að auka líkur á því að unnt verði að gefa út áreiðanlegar viðvaranir ef til eldgoss kemur. Einnig er mælt með því að rannsóknir verði auknar á bergfræðilegum eiginleikum og gossögu svæðisins. Þá er lögð áhersla á að íbúar svæðisins fái tækifæri til að fylgjast með rannsóknum og eftirliti með virkninni.

Tillögur um eftirlit og rannsóknir

- A. Kortlagning hrauna og gosstöðva frá ísöld og Nútíma á austanverðu Ljósufjallakerfinu. Ákvörðun á flatarmáli og rúmmáli gosefna.
- B. Aldursákvörðun á gosum á austanverðu Ljósufjallakerfinu. Leita þarf að álitlegum stöðum til öskulagarannsókna og kolefnisgreininga. Vænlegt kann að vera í þessu skyni að bora í setlög á botnum stöðuvatna á svæðinu.
- C. Bæta þarf við net skjálftamæla á svæðinu, að lágmarki fjórar stöðvar þyrftu að vera innan 20 km fjarlægðar frá miðju skjálftaþyrpingarinnar.
- D. Bæta þarf við net aflögunarmælinga (GPS og hallamælingar með sískráningu) á upptakasvæðinu og umhverfis það. Mælibúnaður þarf að miðast við að atburðarás getur verið hröð í aðdraganda gosa á svæðinu.

- E. Efla þarf kynningu og upplýsingagjöf til íbúa um ástand svæðisins og þróun þess. Gera þarf áætlanir um viðbrögð við mismunandi sviðsmyndum og kynna þær.
- F. Bergefnagreining á gosmyndunum á Nútíma. Gera þarf kerfisbundna rannsókn á bergfræðilegri gerð gosbeltisins á Snæfellsnesi.
- G. Hermun á hraunflæði frá gosum samkvæmt sviðsmyndum C1-C4. Brýnt er að afla skilnings á líklegum rennlisleiðum hrauna sem upp kunna að koma í framhaldi yfirstandandi atburðarásar.
- H. Afla grunnupplýsinga um gasútstreymi á upptakasvæði skjálftanna, athuga til dæmis ölkeldur, fréttir að óvenjulegum skepnu- eða fugladauða.

Heimildir

Björnsson, S and P Einarsson (1974). Seismicity of Iceland, in: Geodynamics of Iceland and the North Atlantic Area (Leó Kristjánsson ed.), Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 225-239.

Dabiri Z, Hölbling D, Abad L, Helgason JK, Sæmundsson Þ & Tiede D (2020). Assessment of landslide-induced geomorphological changes in Hítardalur Valley, Iceland, using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. Appl. Sci. 10:5848; doi:10.3390/app10175848

Einarsson, P (1989). Intraplate earthquakes in Iceland. In: Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound (Eds. S Gregersen and PW Basham). Kluwer Acad. Publ., p 329-344.

Einarsson, P (1991). Earthquakes and present-day tectonism in Iceland. Tectonophysics, 189, 261-279, 1991. [doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90501-I](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90501-I)

Einarsson, P (2008). Plate boundaries, rifts and transforms in Iceland. Jökull, 58, 35-58.

Einarsson, P (2018). Short-term seismic precursors to Icelandic eruptions 1973-2014. Frontiers in Earth Science, Volcanology, Research Topic: Towards Improved Forecasting of Volcanic Eruptions. Vol. 6, Doi: [10.3389/feart.2018.00045](https://doi.org/10.3389/feart.2018.00045)

Einarsson P, and B Brandsdóttir (2021). Seismicity of the Northern Volcanic Zone of Iceland. Frontiers in Earth Sciences. 9:628967. Doi: [10.3389/feart.628967](https://doi.org/10.3389/feart.628967).

Einarsson P, FW Klein and S Björnsson (1977). The Borgarfjörður earthquakes in West Iceland 1974. Bull. Seism. Soc. Am., 67:187-208.

- Einarsson P. and K Sæmundsson (1987). Earthquake epicenters 1982-1985 and volcanic systems in Iceland. In Þ.I.Sigfússon, ed. *Í hlutarins eðli*, Festschrift for Þorbjörn Sigurgeirsson. Menningarsjóður, Reykjavík (map).
- Einarsson P and S Jakobsson (2020). The analog seismogram archives of Iceland. *Jökull* 70: 57-72.
- Eysteinn Tryggvason (1978). Jarðskjálftar á Íslandi 1930-1939. Raunvísindastofnun Háskólans, Skýrsla RH-78-21. 92 bls.
- Flude S, Burgess R, and McGarvie DW (2008). Silicic volcanism at Ljósufjöll, Iceland: insight into evolution and eruptive history from Ar-Ar dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 169:154-175.
- Foulger, GR (1988). Hengill Triple Junction, SW Iceland 1: Tectonic structure and the spatial and temporal distribution of local earthquakes. *J. Geophys. Res.* 93:13493-13506.
- Geirsson H, LaFemina P, Arnadóttir Th, Sturkell E, Sigmundsson F, Travis M, Schmidt P, Lund B, Hreinsdóttir S, Bennett R (2012). Volcano deformation at active plate boundaries: deep magma accumulation at Hekla volcano and plate boundary deformation in south Iceland. *Journal of Geophysical Research* 117, B11409. <http://dx.doi.org/10.1029/2012JB009400>
- Green RG, RS White, T Greenfield (2014). Motion in the north Iceland volcanic rift zone accommodated by bookshelf faulting. *Nat. Geosci.* 7:29-33. DOI: [10.1038/ngeo2012](https://doi.org/10.1038/ngeo2012)
- Haukur Jóhannesson (1977). Þar var ei bærinn, sem nú er borgin. *Náttúrufræðingurinn* 47: 129-141.
- Haukur Jóhannesson (1982a). Yfirlit um jarðfræði Snæfellsness. *Árbók Ferðafélags Íslands* 1982. Bls. 151-174.
- Haukur Jóhannesson (1982b). Kvarter eldvirkni á Vesturlandi. In: Þórarinsdóttir H., Óskarsson Ó.H., Steinþórsson S. & Einarsson Þ. (eds.). *Eldur er í norðri*. Sögufélagið. Reykjavík. Bls. 129-137.
- Haukur Jóhannesson (1994). *Geological map of Iceland, sheet 2, 1: 250 000*. West-Iceland, second edition. Icelandic Museum of Natural History and Iceland Geodetic Survey, Reykjavík.
- Haukur Jóhannesson (2013). Snæfellsnes. Kafli í: Náttúruvá (ritstj. Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason). Háskólaútgáfan 2013, bls. 367-377.
- Hjartardóttir ÁR, P Einarsson, SG Björgvinsdóttir (2016). Fissure swarms and fracture systems within the Western Volcanic Zone, Iceland – effects of spreading rates. *Journal of Structural Geology* 91:39-53. Doi: 10.1016/j.jsg.2016.08.007.

Hooper A, BG Ofeigsson, F Sigmundsson, B Lund, H Geirsson, P Einarsson, E Sturkell (2011). Increased capture of magma in the crust promoted by ice-cap retreat in Iceland. *Nature Geoscience*, 4 (11):783-786, doi: 10.1038/NGEO1269.

Ingi Þ. Bjarnason (1997). Eldhjarta Íslands. Leitin að jarðfræðilegri uppsprettu landsins. *Náttúrufræðingurinn* 67:77-83.

Jakobsdóttir S, MJ Roberts, GB Guðmundsson, H Geirsson, R Slunga (2008). Earthquake swarms at Upptyppingar, north-east Iceland: A sign of magma intrusion? *Studia Geophysica et Geodaetica* 52:513-528.

Jakobsson SP (1979). Outline of the Petrology of Iceland. *Jökull* 29:57-73.

Klein F W, P Einarsson and M Wyss (1973). Microearthquakes on the Mid-Atlantic plate boundary on the Reykjanes Peninsula in Iceland, *J. Geophys. Res.*, 78:5084-5099.

Klein, FW, P Einarsson, and M Wyss (1977). The Reykjanes Peninsula, Iceland earthquake swarm of September 1972 and its tectonic significance, *J. Geophys Res.*, 82:865-888.

Ofeigsson BG, Hooper A, Sigmundsson F, Sturkell E, Grapenthin R (2011). Deep magma storage at Hekla volcano, Iceland, revealed by InSAR time series analysis. *Journal of Geophysical Research* 116, B05401. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JB007576>

Páll Einarsson (1991). Umbrotin við Kröflu 1975-1989, í: *Náttúra Mývatns*, (ritstj. Árni Einarsson og Arnþór Garðarsson), Hið Íslenska Náttúrufræðifélag, bls. 97-139.

Páll Einarsson (2021). Jarðskjálftarnir í Borgarfirði 1974. *Borgfirðingabók*, Sögufélag Borgarfjarðar, p. 7-19.

Parks M, Drouin V, Sigmundsson F, Hjartardóttir ÁR, Geirsson H, Pedersen GBM, Belart JMC, Barsotti S, Lanzi C, Vogfjord K, Hooper A, Ofeigsson BG, Hreinsdóttir S, Gestsson EB, Thrastarson RH, Einarsson P, Tolpekin V, Rotheram-Clarke D, Gunnarsson SR, Oskarsson B, Pinel V (2025) 2023-2024 inflation- deflation cycles at Svartsengi and repeated dike injections and eruptions at the Sundhnúkur crater row, Reykjanes Peninsula, Iceland. In press *EPSL*, 2025.

Pedersen R & Sigmundsson F (2004). InSAR based sill model links spatially offset areas of deformation and seismicity for the 1994 unrest episode at Eyjafjallajökull volcano, Iceland. *Geophys. Res. Lett.* 31: L14610, doi:10.1029/2004GL020368.

Pedersen R & Sigmundsson F (2006). Temporal development of the 1999 intrusive episode in the Eyjafjallajökull volcano, Iceland, derived from InSAR images. *Bull. Volcanol.* 68:377–393.

Sigmundsson F, S Hreinsdóttir, A Hooper, Th Árnadóttir, R Pedersen, MJ Roberts, N Óskarsson, A Auriac, J Decriem, P Einarsson, H Geirsson, M Hensch, BG Ófeigsson, E Sturkell, H Sveinbjörnsson, KL Feigl (2010). Intrusion triggering of the 2010 Eyjafjallajökull explosive eruption. *Nature*, 468:426-430.

Sigmundsson F, M Parks, H Geirsson, A Hooper, V Drouin, KS Vogfjörð, BG Ófeigsson, SHM Greiner, Y Yang, C Lanzi, GP de Pascale, K Jónsdóttir, S Hreinsdóttir, V Tolpekin, HM Friðriksdóttir, P Einarsson, S Barsotti (2024). Fracturing and tectonic stress drives ultrarapid magma flow into dikes. *Science*, 10.1126/science.adn2838.

Soosalu H., P Einarsson (2004). Seismic constraints on magma chambers at Hekla and Torfajökull volcanoes, Iceland. *Bull. Volcanol.* 66:276-286.
DOI 10.1007/s00445-003-0310-1.

Soosalu H, AJ Key, RS White, C Knox, P Einarsson, SS Jakobsdóttir (2009). Lower-crustal earthquakes caused by magma movement beneath Askja volcano on the north Iceland rift, *Bull. Volcanol.* 72:55-62. Doi: 10.1007/s00445-009-0297-3

Stefánsson R, R Böðvarsson, R Slunga, P Einarsson, S Jakobsdóttir, H Bungum, S Gregersen, J Havskov, J Hjelme, H Korhonen (1993). Earthquake prediction research in the South Iceland seismic zone and the SIL project. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 83:696-716.

Sæmundsson, K (1979). Outline of the geology of Iceland. *Jökull* 29:7-28.

White, RS, J Drew, HR Martens, J Key, H Soosalu, SS Jakobsdóttir (2011) Dynamics of dyke intrusion in the mid-crust of Iceland. *Earth and Planetary Science Letters* 304:300-312.
doi:10.1016/j.epsl.2011.02.038

Wolfe CJ, I Th Bjarnason, JC VanDecar & SC Solomon (1997). Seismic structure of the Iceland mantle plume. *Nature* 385:245-247.