

Náttúruvá á höfuðborgarsvæðinu

Eldsumbrot, jarðskjálftar og sprunguhreyfingar

Yfirlit

Ásta Rut Hjartardóttir
Bergrún Arna Óladóttir

Skýrsla

VÍ 2024-003

Náttúruvá á höfuðborgarsvæðinu
Eldsumbrot, jarðskjálftar og sprunguhreyfingar. Yfirlit

Höfundar	Ásta Rut Hjartardóttir, Bergrún Arna Óladóttir
Unnið fyrir	Umhverfis-, orku og loftslagsráðuneytið
Samvinnuaðilar	Sveitarfélög á höfuðborgarsvæðinu
Gerð skýrslu/verkstig	Hluti verkefnisins: Áhættumat vegna eldgosa og annarrar jarðrænnar náttúruvár fyrir Reykjanesskaga
Verkefnisstjóri	Guðmundur Jósefsson
Yfirfarið af	Jórunn Harðardóttir
Samþykkt af	Matthew J. Roberts, framkvæmdastjóri Þjónustu og Rannsóknasviðs VÍ

Veðurstofa Íslands / Icelandic Meteorological Office

Númer	VÍ 2024-003
ISSN	1670-8261
Dagsetning	Mars 2025
Dreifing	Opin
Fjöldi síðna	49
Upplag	Rafræn útgáfa
Verknúmer	3721-0-0019
Málsnúmer	2024-0135
DOI númer	10.33112/VI2024032

Ágrip

Nýtt gosskeið er hafið á Reykjanesskaga með endurteknum gosum í Fagradalsfjalli og á Sundhnúksgígaröðinni. Sagan segir okkur að á gosskeiðum Reykjanesskagans virkjast flest eldstöðvakerfi hans. Því þurfa samfélög á höfuðborgarsvæðinu að aðlagast nýjum veruleika og undirbúa sig til að takast á við afleiðingar eldgosa í nágrenni sínu. Veðurstofa Íslands vinnur nú að hættu- og áhættumati fyrir Reykjanesskaga og er höfuðborgarsvæðið í forgangi innan þess verkefnis. Eldvirkni í nágrenni höfuðborgarsvæðisins og ýmis konar náttúruvá henni tengd getur haft töluverð áhrif á höfuðborgarsvæðinu, sérstaklega í austur- og suðurhlutum þess þar sem þeir liggja nær eldvirkum svæðum. Auk þess getur eldvirkni utan borgarmarka haft mikil áhrif á lífæðar höfuðborgarsvæðisins og þar með á samfélagið allt. Þessi vá getur verið af ýmsum toga en áhersla er á að meta hættu og áhættu af völdum jarðskjálfta, sprungna, hraunrennslis, gasmengunar, vatnsmengunar og gjóskufalls. Hér er farið gróflega yfir jarðfræði höfuðborgarsvæðisins og gefið yfirlit yfir helstu eldfjallavá sem getur stafað að höfuðborgarsvæðinu vegna eldsumbrota á Reykjanesskaga. Auk þess hafa verið sett fram dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir sem hægt væri að grípa til en jafnframt er minnt á sviðsábyrgðarreglu úr 2. gr. almannavarnalaga nr. 82/2008. Skýrsla þessi veitir því fræðilegan bakgrunn, en hraunhermanir og aðrar niðurstöður hættu- og áhættumatsins munu birtast í öðrum skýrslum.

Lykilorð: Höfuðborgarsvæðið, Reykjavík, Kópavogur, Hafnarfjörður, Garðabær, Mosfellsbær, Seltjarnarnes, jarðfræði, eldfjallavá, sprungur, jarðskjálftar, hraun, gasmengun, gjóska, gróðureldar.

Abstract

A new eruption period has begun on the Reykjanes Peninsula with repeated eruptions in Fagradalsfjall and in the Sundhnúksgrígar crater row. During eruption periods of the Reykjanes peninsula, most of its volcanic systems become activated. Therefore, communities in the capital area need to prepare to deal with the consequences of volcanic eruptions in their vicinity. The Icelandic Meteorological Office is currently working on a risk and hazard assessment for the Reykjanes Peninsula where the capital area is a priority. Volcanic activity in the vicinity of the capital area and various natural hazards related to it can have a considerable impact, especially in the eastern and southern parts as they are closer to volcanic areas. In addition, volcanic activity outside the city limits can have a major impact on the important infrastructure of the capital area and thus on society as a whole. These hazards can be of various kinds, but emphasis is placed on assessing the risk and hazard caused by earthquakes, fractures, lava flow, gas pollution, water pollution and tephra fall. A rough overview of the geology of the capital area and its main volcanic hazards is presented here. In addition, examples of possible mitigation measures are given, but Article 2 of the Civil Protection Act No. 82/2008 clearly states that stakeholders are responsible for mitigation actions of their infrastructure and systems. This report therefore provides a theoretical background, but lava simulations and other results of the hazard and risk assessment will be presented in individual reports.

Keywords: Capital area, Reykjavík, Kópavogur, Hafnarfjörður, Garðabær, Mosfellsbær, Seltjarnarnes, geology, volcanic hazards, fissures and fractures, earthquakes, lava, volcanic gases, tephra, wildfires.

Samantekt

Höfuðborgarsvæðið samanstendur af sjö sveitarfélögum, Mosfellsbær, Reykjavík, Kópavogur, Seltjarnarnes, Garðabær, Hafnarfjörður og Kjósarhreppur. Eldvirkni í nágrenni höfuðborgarsvæðisins og ýmis konar náttúruvá henni tengd getur haft töluverð áhrif á höfuðborgarsvæðinu, sérstaklega í austur- og suðurhlutum þess þar sem þeir liggja nær eldvirkum svæðum. Þessi vá getur verið af ýmsum toga.

Fyrst ber að nefna hraunrennsli, en hættan á að hraun renni í byggð er mest við suðurhluta höfuðborgarsvæðisins, til að mynda við Vellina í Hafnarfirði. Ekki er útilokað að hraun renni norðar, t.d. niður Elliðaárdal í Reykjavík. Sömuleiðis geta eldfjallagös valdið töluverðum usla og spillt loftgæðum, jafnvel á stórum landsvæðum. Þau geta stigið upp frá virkum gosgígum og hraunbreiðum og dreifst með vindum yfir stór svæði, en einnig geta varhugaverðar gastegundir myndast þar sem hraun rennur út í sjó. Hraun getur einnig kveikt gróðurelda sem þarf að taka alvarlega enda er töluvert gróðurlendi umhverfis og í höfuðborgarlandinu.

Sprunguhreyfingar gætu átt sér stað innan byggðar á höfuðborgarsvæðinu, sér í lagi innan Urriðaholts í Garðabæ, í austurhluta Kópavogs, í Norðlingaholti og jafnvel í Grafarholti í Reykjavík, þó að þar megi telja líkurnar á sprunguhreyfingum vera mun minni en í byggðum sem staðsettar eru sunnar. Smávægilegar sprunguhreyfingar eru heldur ekki útilokaðar á öðrum svæðum, t.d. í Árbænum.

Jarðskjálftar á Reykjanesskaga og á Suðurlandsbrotabeltinu geta haft áhrif á höfuðborgarsvæðinu. Skjálftar á Reykjanesskaga eru taldir verða mest 6,5 stig að stærð en Suðurlands-skjálftar geta orðið stærri. Skjálftar af þessari stærð geta valdið tjóni á höfuðborgarsvæðinu, sérstaklega á innbúi, en byggingar eiga skv. byggingarreglugerð að þola töluvert álag vegna jarðskjálfta. Eldri byggðir höfuðborgarsvæðisins eru að jafnaði lengra frá skjálftasvæðum og nýrri hús nær skjálftasvæðum eru byggð eftir strangari byggingarreglum sem verður til þess að hætta á tjóni af völdum jarðskjálfta er svipuð innan höfuðborgarsvæðisins.

Gjóskufall á höfuðborgarsvæðinu getur t.d. dregið verulega úr skyggni, og þar með haft áhrif á umferð og flugsamgöngur, og valdið vandræðum í fráveitukerfum. Gjóska getur myndast vegna eldgoss undir vatni (t.d. Kleifarvatni) eða sjó úti fyrir Reykjanesskaga og sömuleiðis getur gjóska borist yfir höfuðborgarsvæðið frá fjarlægari eldstöðvum eins og Heklu og Kötlu.

Til viðbótar við byggðir höfuðborgarsvæðisins þarf að skoða áhrif náttúruvár á innviðina sem þeim tengjast. Kaldavatnsöflun höfuðborgarsvæðisins fer að mestu fram innan sprungusveims Krýsuvíkur, þar sem hætta er á sprunguhreyfingum, eldgosum og jafnvel gróðureldum þeim tengdum. Borholurnar og lagnir þeim tengdar eru þó dreifðar um töluvert stórt svæði, sem minnkar líkur á að öll kerfin gefi sig í einu.

Um helmingur heits vatns sem nýtt er á höfuðborgarsvæðinu kemur frá borholum innan þess, í Laugarnesi, Elliðaárdal og í Mosfellssveit. Þessi svæði eru öll utan eldvirkra svæða. Hinn helmingurinn kemur úr virkjunum sem staðsettar eru í megineldstöðinni Hengli.

Virkjanirnar geta því orðið fyrir áhrifum af völdum eldvirkni. Lagnir frá virkjunum í Hengli liggja sömuleiðis yfir sprungusveima Brennisteinsfjalla og Krýsuvíkur. Rafmagnsstrengir liggja á sama hátt yfir sprungusveima Brennisteinsfjalla, Krýsuvíkur, og Hengils.

Mikilvægt er að höfuðborgarsvæðið og innviðir þess séu tilbúin til að takast á við náttúruvá af völdum eldvirkni. Gliðnunaratburðir og kvikugangar geta farið af stað, sem og önnur umbrot innan eldstöðvakerfa í nágrenni höfuðborgarsvæðisins. Á sama tíma er mikilvægt að hafa í huga að þegar og ef slíkt gerist, þá þýðir það ekki sjálfkrafa að miklar hreyfingar yrðu á öllum sprungum, eða að hraun eða gasútstreymi myndu valda miklum usla. Nauðsynlegt er þó að höfuðborgarbúar og rekstraraðilar innviða höfuðborgarsvæðisins séu tilbúin til að takast á við þær áskoranir sem slíkir atburðir gætu valdið.

Efnisyfirlit

Ágrip	2
Abstract	3
Samantekt	4
Myndaskrá	8
Töfluskrá	8
1 Inngangur	9
2 Jarðfræðilegt umhverfi höfuðborgarsvæðisins	10
2.1 Reykjanesskagi	10
2.2 Berggrunnur höfuðborgarsvæðisins og mótun hans	15
3 Hraun	18
3.1 Hraun innan höfuðborgarsvæðisins frá kerfi Krýsuvíkur	19
3.2 Hraun innan höfuðborgarsvæðisins frá kerfi Brennisteinsfjalla	20
4 Sprungur	21
4.1 Tegundir sprungna og mismunandi áhrif þeirra	21
4.2 Sprungusveimur Krýsuvíkur	22
4.2.1 Hreyfingar á sprungum innan sprungusveims Krýsuvíkur	23
4.2.2 Önnur aflögun innan sprungusveims Krýsuvíkur	23
5 Jarðskjálftar	24
5.1 Hvaða skjálftar geta haft áhrif á höfuðborgarsvæðið?	24
5.1.1 Sniðgengisskjálftar	24
5.1.2 Skjálftar innan sprungusveima	25
6 Jarðhitasvæði í nágrenni höfuðborgarsvæðisins	26
7 Gasmengun	28
8 Grunnvatn við höfuðborgarsvæðið	29
9 Náttúruvá – áhrif á höfuðborgarsvæðið	31
9.1 Sprunguhreyfingar	31
9.1.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	34
9.2 Jarðskjálftar	35
9.2.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	35
9.3 Hraunrennsli	36
9.3.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	37
9.4 Gasmengun á höfuðborgarsvæðinu	37

9.4.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	38
9.5 Mengun í grunnvatnsbólum.....	38
9.5.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	39
9.6 Gjóskufall.....	39
9.6.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	40
9.7 Gróðureldar.....	40
9.7.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir	41
Lokaorð	42
Heimildir.....	43

Myndaskrá

Mynd 1. Flekaskil Evrasíu- og Norður-Ameríkuflekanna. Mörk höfuðborgarsvæðisins	11
Mynd 2. Yfirlit athugunarsvæðis	12
Mynd 3. Þekkt gosskeið á Reykjanesskaga	15
Mynd 4. Jarðfræðikort af Reykjanesskaga og höfuðborgarsvæðinu	17
Mynd 5. Hraun frá núverandi gosskeiði og gosskeiðinu þar á undan	18
Mynd 6. Dæmi um sniðgengishreyfingu.....	21
Mynd 7. Einfölduð þversnið sem sýna myndun togsprungna, siggengja og sigdala	22
Mynd 8. Jarðskjálftar á Reykjanesskaga frá janúar 2004 til október 2024	25
Mynd 9. Lághitavatns- og kaldavatnsvinnsla við höfuðborgarsvæðið	27
Mynd 10. Vatnaskil grunnvatnsstrauma og reiknað grunnvatnsrennsli í nágrenni höfuðborgarsvæðisins	30
Mynd 11. Ummerki um sprungur	32
Mynd 12 Skógur og kjarrlendi í nágrenni höfuðborgarsvæðisins	41

Töfluskrá

Tafla 1. Gos á Reykjanesskaga á núverandi gosskeiði	19
---	----

1 Inngangur

Í kjölfar aukinnar eldvirkni á Reykjanesskaga og mikilla jarðhræringa í og umhverfis Grindavík í nóvember 2023, var kallað eftir uppfærðu hættu- og áhættumati vegna eldgosavár fyrir allan Reykjanesskaga. Veðurstofa Íslands, fyrir hönd íslenskra stjórnvalda, vinnur nú að slíku hættu- og áhættumati. Verkefnið hófst formlega 1. mars 2024 og er áætlað að því ljúki um mitt ár 2026. Áhersluatriði verkefnisins eru hætta og áhætta af völdum jarðskjálfta, sprungna, hraunrennslis, gasmengunar, vatnsmengunar og gjóskufalls.

Gefið er yfirlit yfir jarðfræði höfuðborgarsvæðisins og svæðið sett í samhengi við jarðfræðilegt umhverfi á Reykjanesskaga. Jarðfræði höfuðborgarsvæðisins er fjölbreytt og innan þess má finna jarðlög frá mismunandi jarðsögutímabilum en berggrunnurinn er að mestu leyti gömul hraun en yngstu hraun eru mynduð í sögulegum sprungugosum. Einnig er að finna móberg, sjávarset, árset, vatnaset og jökulberg af mismunandi aldri (t.d. Árni Hjartarson, 2005). Höfuðborgarsvæðið er nokkuð vel staðsett m.t.t. auðlinda og náttúruvár, en nálægð við flekamót Evrasíu- og Ameríkuflekanna veldur því að jarðhræringar og eldgos geta haft áhrif á svæðinu. Engar þekktar gossprungur eru innan núverandi byggðar höfuðborgarsvæðisins en byggt hefur verið á nokkrum nútímahraunum sem eru upprunnin innan eldstöðvakerfa Krýsuvíkur og Brennisteinsfjalla.

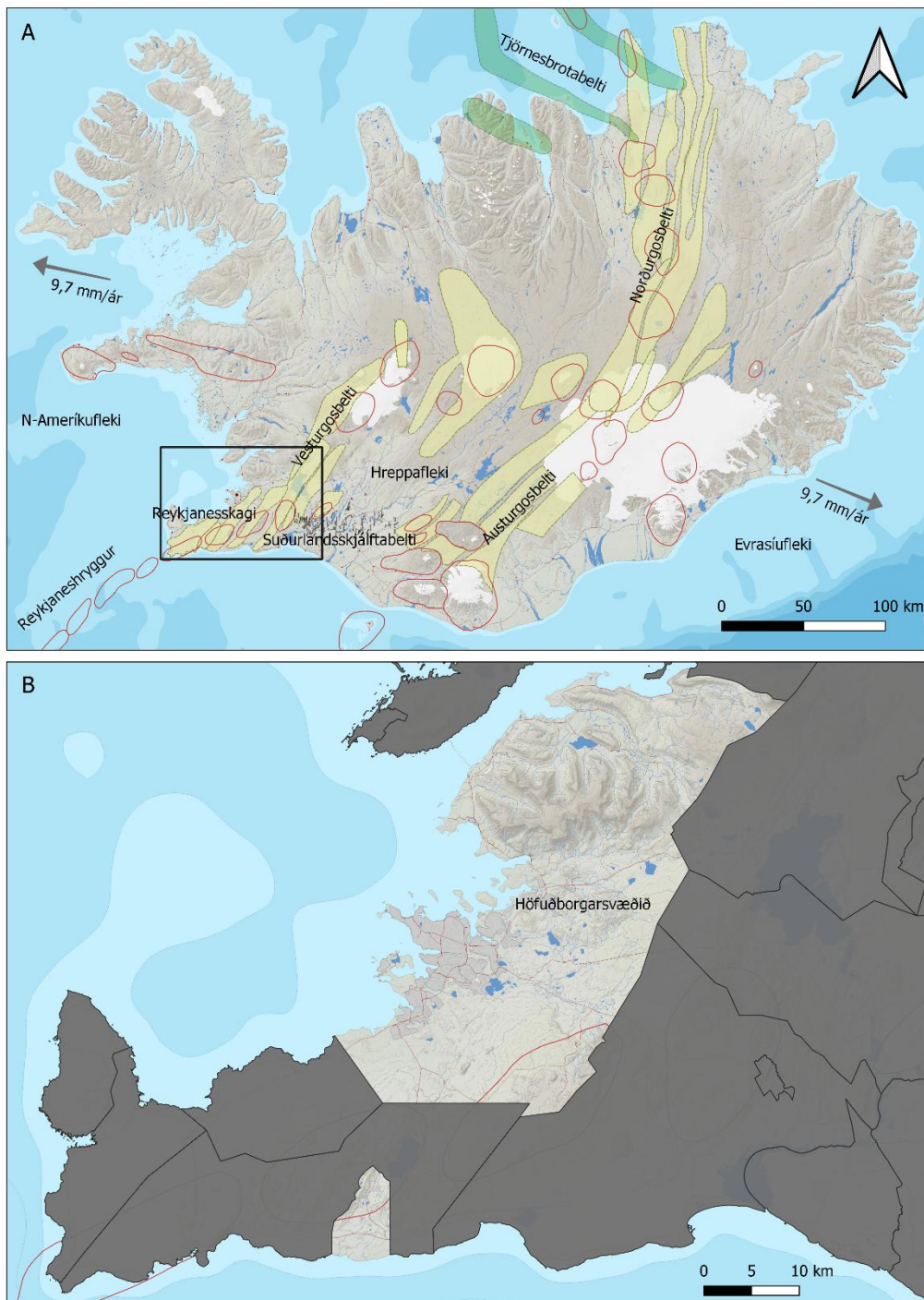
Nú er unnið að gerð hættu- og áhættumats vegna jarðskjálfta, eldgosa og annarrar jarðrænnar náttúruvár fyrir höfuðborgarsvæðið og allan Reykjanesskaga og þessi samantekt er hluti þess verkefnis. Hér er gefið yfirlit yfir stöðu þekkingar og vá á höfuðborgarsvæðinu sem getur stafað af eldvirkni. Unnið verður með hrauna-, sprungu-, jarðskjálfta-, gasmengunar- og gjóskufallsvá. Gert er ráð fyrir að sérstakar skýrslur muni fylgja hverri vá, þær munu verða gefnar út á næstu mánuðum en verkinu í heild á að ljúka árið 2026. Ekki verður unnið með vá af völdum flóðbylgna, skotbomba, eldinga, flóða eða annarra þátta sem rekja má til eldgosa á svæðinu eða annars staðar.

2 Jarðfræðilegt umhverfi höfuðborgarsvæðisins

2.1 Reykjanesskagi

Ísland er á Norður-Atlantshafshryggnum, flekaskilum Evrasíu- og Norður-Ameríkuflekanna, en undir landinu er einnig umfangsmikill heitur reitur sem veldur mikilli staðbundinni eldvirkni. Ísland er því einn fárra staða á jörðinni þar sem flekaskil á úthafshrygg eru yfir sjávarmáli og þessi samverkun heits reits og flekaskila gerir Ísland að virkasta eldfjalla- og jarðskjálftasvæði í norðanverðri Evrópu. Úthafshryggurinn kallast Reykjaneshryggur þar sem hann gengur á land við suðvesturhorn Reykjaness, og Kolbeinseyjarhryggur þar sem hann gengur af landi út frá miðju Norðurlandi. Höggun (tektóník) Reykjanesskagans er flókin vegna samspils hjáreks og fráreks Evrasíu- og N-Ameríkuflekanna (sjá t.d. Sigrún Hreinsdóttir o.fl., 2001; Clifton & Kattenhorn, 2006; Kristján Sæmundsson & Magnús Á Sigurgeirsson, 2013) (Mynd 1). Birtingarmyndir fráreks flekanna tveggja á landi eru nefnd rekbelti, frárekinu fylgir mikil eldvirkni og því er að jafnaði einnig talað um rekbeltin sem gosbelti.

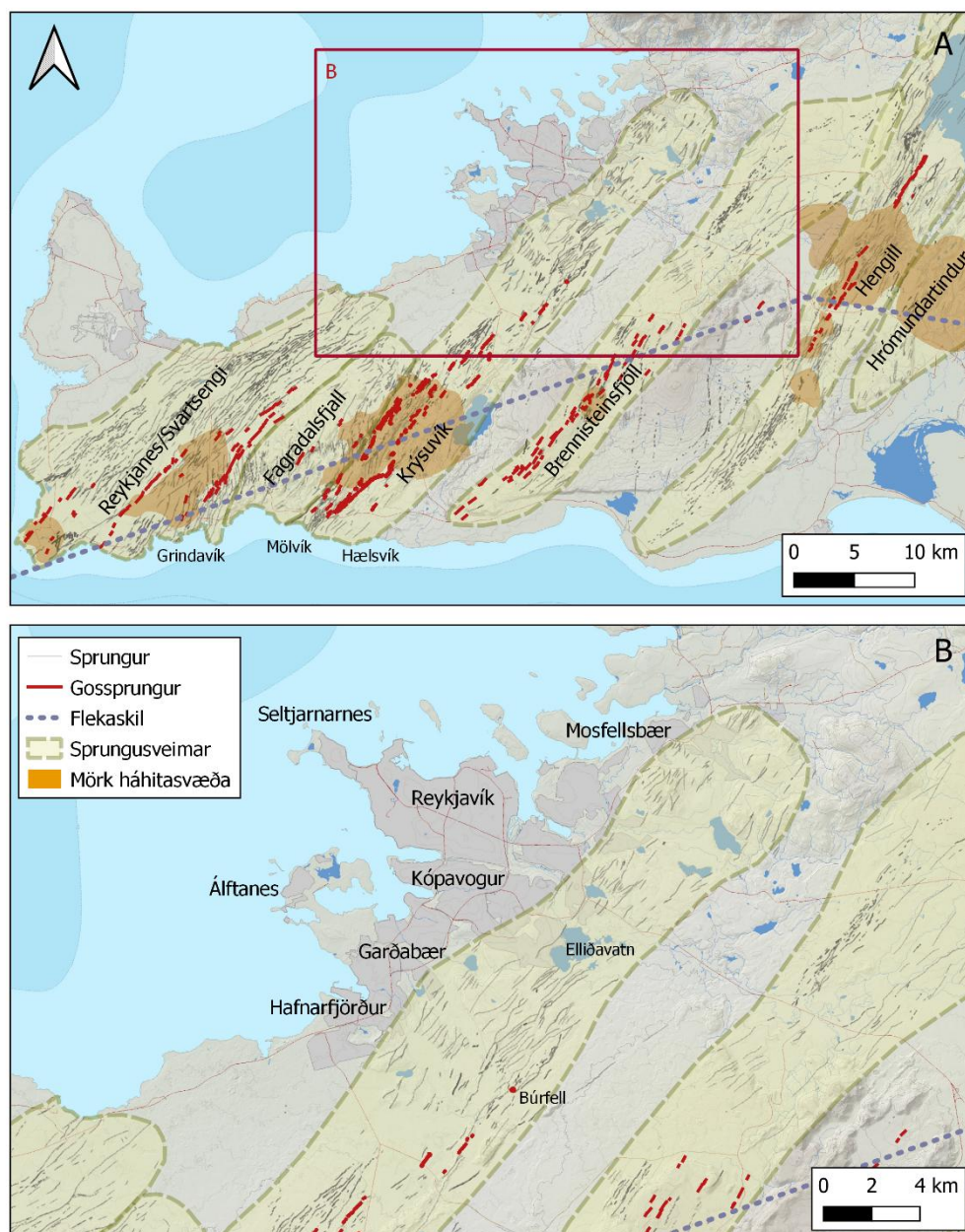
Í gegnum jarðsögu Íslands hafa rekbelti hliðrast til vegna tengingar þeirra við heita reitinn. Við slíka hliðrun hafa myndast tvö stór þverbrotabelti þar sem hjárek Evrasíu- og Norður-Ameríkuflekanna á sér stað, annars vegar Tjörnesbrotabeltið, á og undan Norðurlandi, og hins vegar brotabelti Suðurlands og Reykjaness. Þessi þverbrotabelti eru virkustu jarðskjálftasvæði landsins og á þeim verða stærstu jarðskjálftarnir. Ummerki hjáreks á Reykjanesi eru ógreinileg og eru eflaust að miklu leyti hulin hraunum, en koma fram sem minniháttar skástígar gjár eða hnikunarlínur á yfirborði sem liggja norður-suður, og slík ummerki má rekja eftir Reykjanesskaga frá austri til vesturs (Páll Einarsson, 2014; Sigrún Hreinsdóttir o.fl., 2001; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013; Louis Steigerwald o.fl., 2020). Ummerki fráreks á Reykjanesi koma greinilega fram sem móbergshryggir, gígar og gígaraðir, gjár og misgengi að mestu með NA-SV stefnu.



Mynd 1. (A) Á Íslandi liggja flekaskil Evrasíu- og Norður-Ameríuflekanna um Reykjanesfjallgarð, Reykjanesfjallgarð, suður- og miðhluta landsins og norðausturhluta landsins. Rauðar línur sýna megineldstöðvar, gul svæði sprungusveima, græn svæði Tjörnesbrotabeltið og svartar línur sýna staðsetningu sprungna á Suðurlands-skjálftabeltinu (Páll Einarsson & Kristján Sæmundsson, 1987). Gráar örvar tákna flekarekið milli Norður-Ameríku og Evrasíuflekans, 9,7 mm í hvora átt, alls tæplega 2 cm á ári (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2020). (B) Óskyggð svæði sýna mörk höfuðborgarsvæðisins.

(A) The plate boundary between the Eurasian and the North American plates lies across Iceland, through the Reykjanes peninsula, the southern, central and northeastern parts of the country. Red lines indicate location of central volcanoes,

yellow areas represent fissure swarms, green areas indicate the Tjörnes Fracture Zone and black lines represent the South Iceland Seismic Zone (Páll Einarsson & Kristján Sæmundsson, 1987). Grey arrows represent the plate drift between the two plates, 9.7 mm in each direction or a total of ~2 cm per year (Freysteinn Sigmundsson et al., 2020). (B) Unshaded areas show the extent of the capital area (unshaded areas).



Mynd 2. Yfirlit athugunarsvæðis. (A) Útlínur sprungusveima á Reykjanesskaga. Gossprungur eru merktar rauðar en aðrar sprungur eru gráar. Lega flekaskila Evrasíu- og Norður-Ameríkuflekanna er sýnd með grárri brotalínu. Brún svæði afmarka mörk háhitasvæða. Rauður ferhyrningur afmarkar svæði sem nánar er skoðað á mynd B. (B) Sprungur og gossprungur í nágrenni við höfuðborgarsvæðið. Sprungur og gossprungur eru frá Clifton og Kattenhorn (2006), Ducrocq o.fl. (2024), Páli Einarssyni o.fl. (2018, 2020), Steigerwald o.fl. (2020), Kjartani Thors (1992) og jarðfræðikorti ÍSOR (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Flekaskil (skv. mælingum af gervitunglamyndum, Interferometric synthetic aperture radar, InSAR) eru frá Vincent Drouin og Freysteini Sigmundssyni (2019). Útmörk háhitasvæða eru frá ÍSOR, og

bakgrunnsgögn eru frá Landmælingum Íslands (nú hluti Náttúrufræðistofnunar Íslands).

Overview of the observation area. (A) Outline of fissure swarms on the Reykjanes Peninsula. Eruptive fissures are marked red, other fissures are grey. The position of the plate boundary of the Eurasian and North American plates is shown by a gray dashed line. Brown areas delimit boundaries of high-temperature areas. A red rectangle delimits an area that is examined in more detail in Figure B. (B) Fractures and eruptive fissures in the vicinity of the capital area. The fractures and eruptive fissures are from Clifton and Kattenhorn (2006), Ducrocq et al. (2024), Páll Einarsson o.fl. (2018, 2020), Steigerwald et al. (2020), Kjartan Thors (1992) and the geological map of ÍSOR (K. Sæmundsson et al., 2016a). Plate boundaries (according to measurements from Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR, satellite images) are from Vincent Drouin and Freysteinn Sigmundsson (2019). The boundaries of high-temperature areas are from ÍSOR, and background data are from the National Land Survey of Iceland (now part of the Icelandic Institute of Natural History).

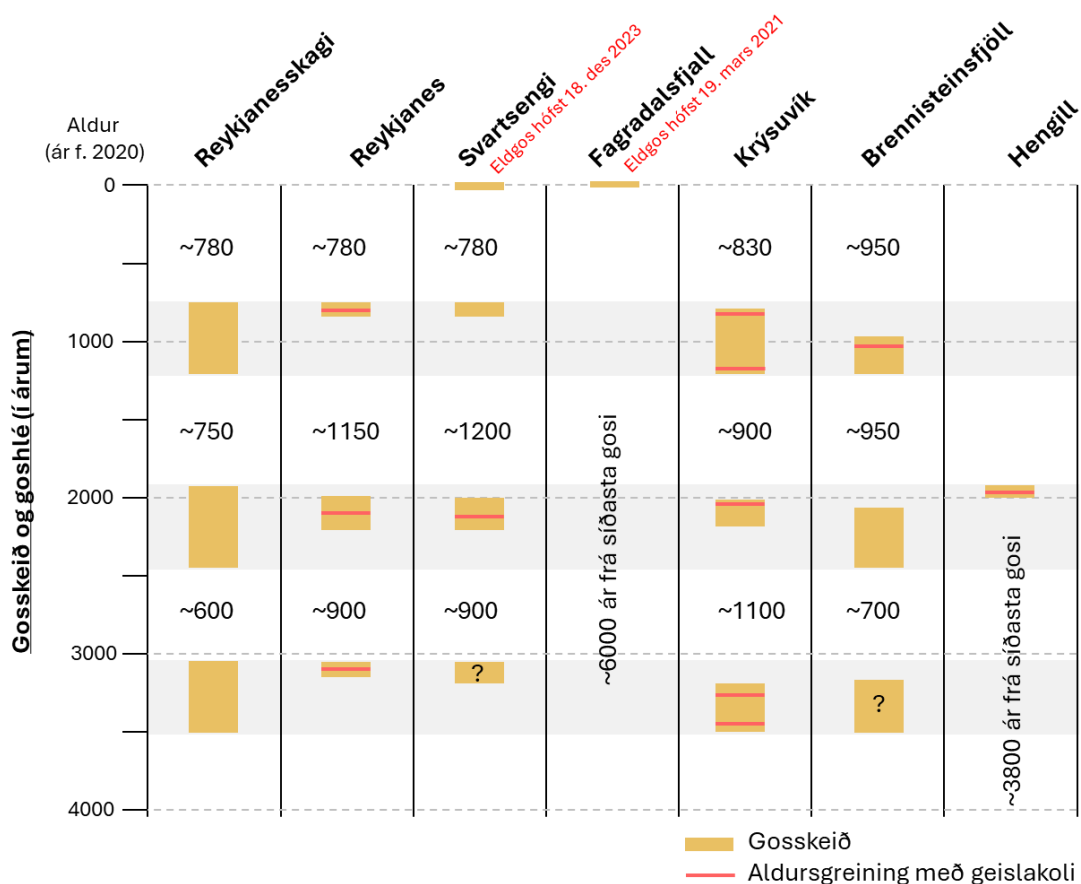
Grágrýtissyrpur sem mynduðust á hlýskeiðum ísaldar eru elstu hlutar Reykjanesskaga. Grágrýtið myndaðist í dyngjugosum sem voru virk um margra ára eða áratuga skeið á hlýskeiðum ísaldar. Ísaldarjökullinn hefur síðan máð út flestar ójöfnur og yfirborðseinken ni hraunanna. Á jökulskeiðum ísaldar mynduðust móbergshryggir og -stapar við gos undir jökli og þessi móbergsfjöll, t.d. Keilir og Stóra-Skógfell, mynda næstelsta hluta bergrunns skagans. Eftir að ísa leysti af Reykjanesskaganum, líklegast að mestu fyrir um 14 þúsund árum (t.d. Kristján Sæmundsson, 1995; Hreggviður Norðdahl & Halldór G. Pétursson, 2005), hafa dyngjugos og sprungugos myndað yfirborðshraun. Elstu dyngjurnar sem mynduðust eftir að ísa leysti eru Práinsskjöldur (um 14 þúsund ára, $\sim 5 \text{ km}^3$) og Sandfellshæð (um 13,6 þúsund ára, $\sim 6 \text{ km}^3$). Alls eru þekkt um 20 dyngjugos á Reykjanesskaga, þar af 12 frá því ísa leysti (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Um fjórðungur skagans er þakinn hraunum úr sprungugosum.

Innan gosbelta liggja eldstöðvakerfi sem samanstanda af megineldstöð og/eða sprungusveimi (Kristján Sæmundsson, 1979). Eldstöðvakerfi Reykjanesskaga eru Reykjanes, Svartsengi, Fagradalsfjall, Krýsuvík og Brennisteinsfjöll, og liggja þau skástíga á skaganum frá vestri til austurs (Mynd 2). Hengill er næsta kerfi til austurs og er stundum talið með eldstöðvakerfum Reykjanesskaga en kerfið liggur eftir Vesturgosbeltinu sem nær allt frá Heiðinni há og norður fyrir Langjökul. Eldstöðvakerfin eru 5–15 km breið og 30–50 km löng, en ekkert þeirra hefur skilgreinda megineldstöð. Öll sýna þau mesta framleiðni þar sem sprungusveimarnir þvera flekaskilin og þar eru jarðhitakerfi svæðanna. Öll kerfin nema Fagradalsfjall hafa þróuð háhitakerfi (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Flæðigos eru einkennisgos kerfanna en gos á eldstöðvakerfi Reykjaness geta einnig átt sér stað í sjó. A.m.k. sex slíkra er getið á tímabilinu 1210–1240 e. Kr. (Magnús Á. Sigurgeirsson, 1995) og þeim gosum getur fylgt mikið gjóskufall.

Töluverð þekking er á virkni Reykjanesskagans síðustu ~ 4000 ár sem bendir til þess að þar skiptist á gosskeið sem virðast standa í nokkur hundruð ár (400–500 ár), þar sem kvikutengd gliðunartímabil og/eða eldvirkni sem einkennist af flæðigosum gengur yfir NA-SV stefnandi eldstöðvakerfin, og hins vegar lengri tímabil goshléa (600–800 ár) þar sem jarðskjálftavirkni þverbrotabeltis Reykjaness er ríkjandi (sjá t.d. Sveinbjörn Björnsson o.fl.,

2020; Sigrún Hreinsdóttir o.fl., 2001; Kristján Sæmundsson & Magnús Á Sigurgeirsson, 2013). Sé horft á virkni stakra eldstöðvakerfa á skaganum má sjá að goshlé þeirra eru mun lengri, eða að meðaltali um 1000 ár. Svo virðist sem goslotur eða eldar gangi yfir öll kerfi Reykjanesskagans á svipuðum tíma (Mynd 3).

Á fyrri þremur gosskeiðum sem átt hafa sér stað á Reykjanesskaga (síðustu 3500 árin: um og eftir landnám; fyrir um 2000–2500 árum; og fyrir 3000–3500 árum) eru vísbendingar um að virkni hafi hafist austan til á skaganum og svo flust vestar. Eldstöðvakerfi Brennisteinsfjalla virðist hafa tilhneigingu til að hefja virkni, Krýsuvíkur kerfið fylgir svo í kjölfar þess, þá Svartsengi og loks Reykjanes (Kristján Sæmundsson o.fl., 2020; Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson, 2006; Kristján Sæmundsson & Magnús Á Sigurgeirsson, 2013). Á síðasta gosskeiði (u.þ.b. 800–1240 e.Kr) gaus á fjórum af fimm eldstöðvakerfum Reykjanesskagans (Mynd 3) og fluttist gosvirkni milli eldstöðvakerfa með 30–150 ára millibili (Kristján Sæmundsson & Magnús Á Sigurgeirsson, 2013). Nýtt gosskeið hófst á Reykjanesskaga með gosi í Fagradalsfjalli í mars árið 2021. Þá sannaðist enn og aftur að þrátt fyrir að ákveðin mynstur séu sjáanleg í virkni og hegðun eldstöðva eru þau langt í frá ófrávíkjanleg. Athyglisvert er að á síðustu þremur gosskeiðunum urðu sprungusveimar Reykjaness/Svartsengis, Krýsuvíkur og Brennisteinsfjalla virkir, en eldstöðvakerfið við Fagradalsfjall varð ekki virkt. Sprungusveimur Hengils varð virkur í gosskeiðinu fyrir um 2000 árum, en annars ekki á þessu tímabili (Kristján Sæmundsson o.fl., 2020).



Mynd 3. Þekkt gosskeið á Reykjanesskaga. Lítillega uppfærð mynd (Kristján Sæmundsson o.fl., 2020; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013, Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson, 2006).

Eruptive periods of Reykjanesskagi. Modified from Kristján Sæmundsson et al., 2020; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013, Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson, 2006.

Gos á Reykjanesskaga hafa verið flokkuð í stærðarflokka eftir magni gosefna, sem að langstærstum hluta eru hraun, á þann hátt að hraun sem eru innan við $0,1 \text{ km}^3$ flokkast sem lítil, hraun sem eru á bilinu $0,1\text{--}0,5 \text{ km}^3$ eru talin meðalstór og stór hraun eru þau sem eru yfir $0,5 \text{ km}^3$ (Magnús Á. Sigurgeirsson & Sigmundur Einarsson, 2019). Þegar Krýsuvíkureldar (1151–1188 e.Kr) og Reykjaneseldar (1210–1240 e.Kr) áttu sér stað mynduðu stök gos innan goslotunnar annars vegar $<0,1 \text{ km}^3$ af gosefnum, og hins vegar gosefni á bilinu $0,1$ til $0,5 \text{ km}^3$. Flest sprungugos á Reykjanesskaga eru innan við $0,2 \text{ km}^3$, þau stærstu $0,4\text{--}0,5 \text{ km}^3$ og lengst hafa þau runnið um 15 km frá upptökum (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013).

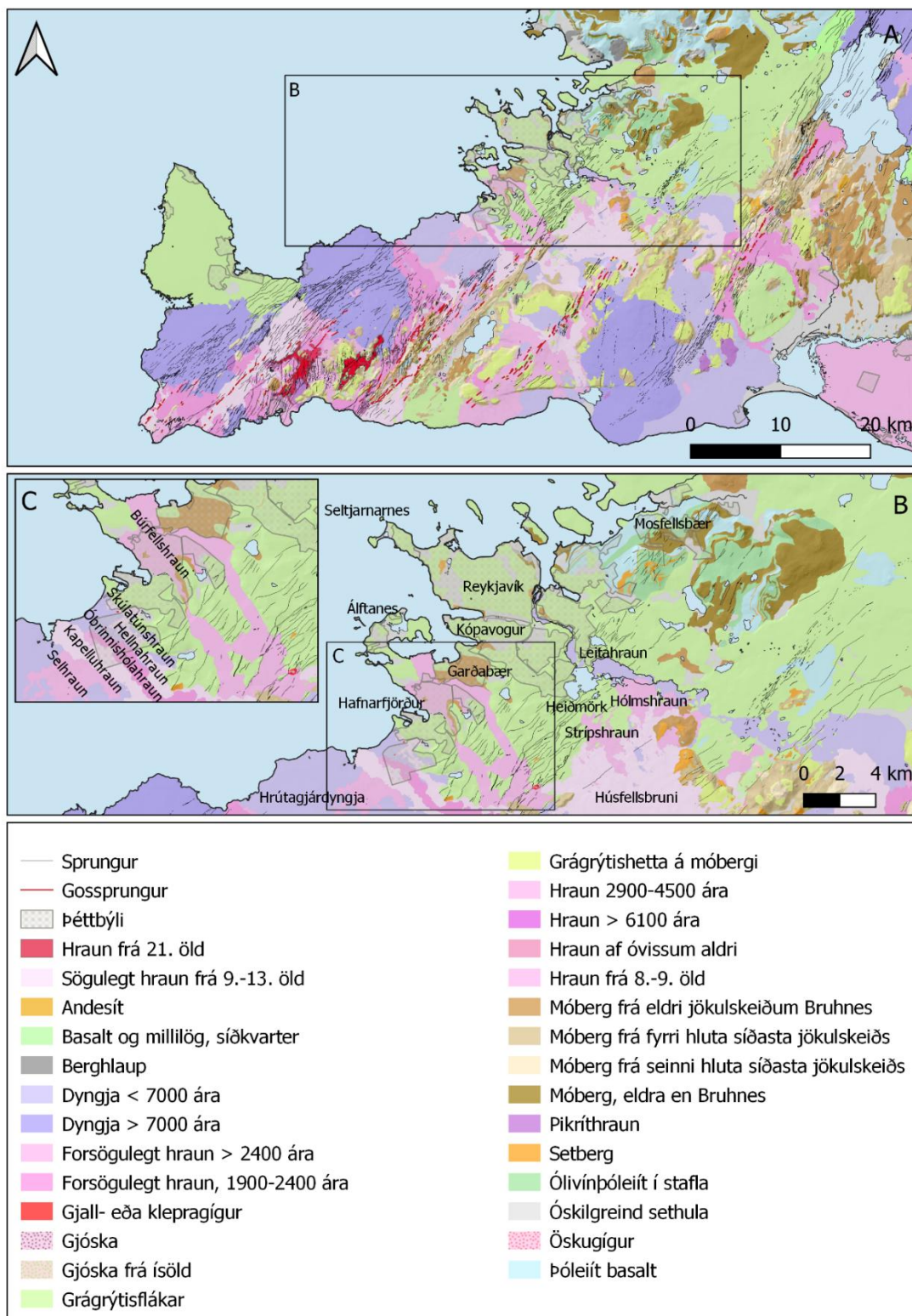
Þau eldstöðvakerfi sem eru líklegust til að hafa bein áhrif á höfuðborgarsvæðinu eru Krýsuvík og Brennisteinsfjöll en byggðir eru innan sprungusveims Krýsuvíkur og söguleg hraun frá þessum tveimur kerfum eru innan marka núverandi höfuðborgarsvæðis. Á síðustu þremur gosskeiðunum, á árunum um og eftir landnám, fyrir um 2000–2500 árum og 3000–3500 árum, gaus innan beggja eldstöðvakerfa (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013).

2.2 Berggrunnur höfuðborgarsvæðisins og mótun hans

Eldur og ís hafa mótað landslag höfuðborgarsvæðisins. Eldgos hafa byggt upp landið með víðfeðmum hraunum sem hafa runnið um þurrlendi á hlýskeiðum og byggt upp móbergs-hryggi og -stapa á kuldaskiðum. Jöklar ísaldar hafa sorfið landslagið með framskiði og hopi á víxl í gegnum árpúsundin auk þess sem jökullinn hefur sett af sér jökulberg á ýmsum stöðum. Breytileg sjávarstaða í gegnum árpúsundin veldur því að sjávarset finnst í berggrunni höfuðborgarsvæðisins auk vatna- og straumvatnaset.

Eitt elsta berg höfuðborgarsvæðisins er svokallað Viðeyjarberg, bæði móberg og innskotsberg, sem finnst í Viðey, Geldinganesi, Gufunesi og út með Sundahöfn en það er upprunnið í útkulnaðri megineldstöð sem ýmist hefur verið kennd við Viðey eða Kjalarnes og var virk fyrir um 2 milljónum ára (Haukur Jóhannesson o.fl., 1988, Ingvar B. Friðleifsson, 1985). Þetta berg er orðið vel holufyllt og þétt og lekt þess er því lítil. Ofan á bergið frá þessari eldstöð leggjast setlög kölluð Elliðavogslögin sem finnast frá Kjalarnesi suður á Álftanes. Þau eru a.m.k. 1 milljón árum yngri en Viðeyjarbergið og innihalda sjávarset, strandset, jökulberg og þurrlendisset s.s. mó (t.d. Árni Hjartarson, 1981). Eftir myndun Elliðavogslaganna hófst mikil eldvirkni á núverandi höfuðborgarsvæði eða í nágrenni þess og myndaði Reykjavíkurgrágrýtið svonefnda sem er berggrunnurinn undir meirihluta höfuðborgarsvæðisins. Reykjavíkurgrágrýtið er uppbyggt af hraunum frá mismunandi eldstöðvum og af mismunandi aldri en langflest þeirra eru dyngjuhraun þó svo að stöku sprunguhraun finnist í hraunstaflanum. Inn í hraunstaflann tvinnast jökulberg, vatnaset og forn jarðvegur.

Reykjavíkurgrágrýtið er lítið ummyndað og svo til ekkert holufyllt og lekt þess er því mikil. Fjölbreytilegar jökulmenjar má finna á Reykjavíkurgrágrýtinu s.s. jökulrispur og hvalbök sem sýna skriðstefnu jökulsins sem gekk yfir það. Fossvogslögin eru vel þekkt setlög frá ísaldarlokum sem liggja ofan á Reykjavíkurgrágrýtinu og mynduðust þegar sjórinn fylgdi á eftir hörfandi ísaldarjöklinum inn til landsins (Áslaug Geirsdóttir & Jón Eiríksson, 1994).



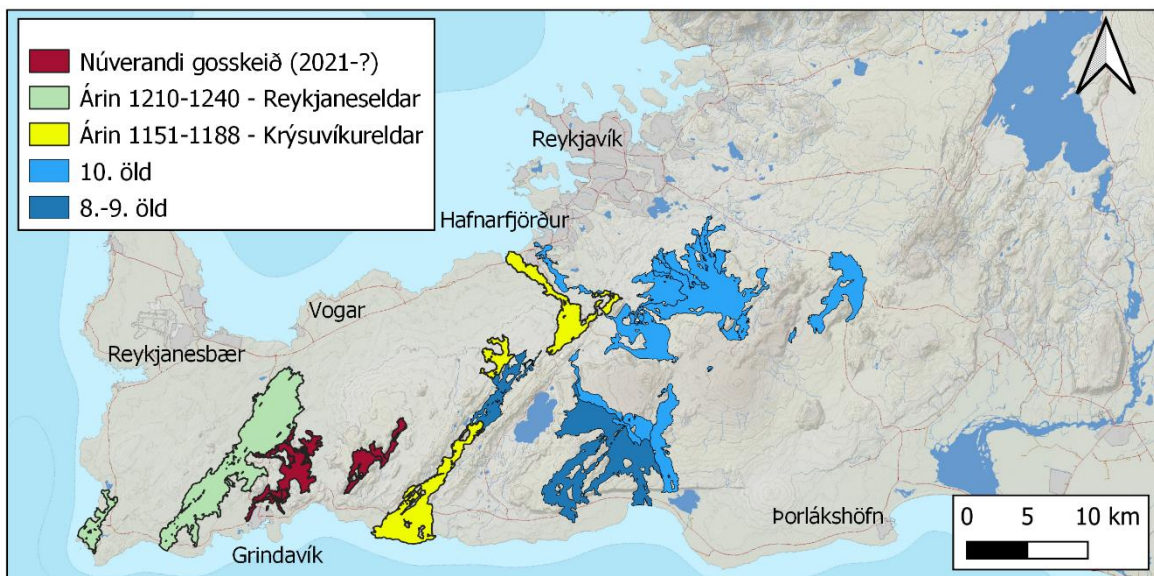
Mynd 4. (A) Jarðfræðikort af Reykjanesskaga og (B) höfuðborgarsvæðinu, ásamt nærmynd af svæðinu við Hafnarfjörð og Garðabæ (C) þar sem hraun hafa ítrekað runnið á undanförunum árpúsundum. Gögn um hraun og jarðlög eru frá ÍSOR (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Sprungur og gossprungur eru frá Clifton og Kattenhorn (2006), Ducrocq o.fl. (2024), Páli Einarssyni o.fl. (2018, 2020), Steigerwald o.fl. (2020), Kjartani Thors (1992) og ÍSOR (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Bakgrunnsgögn (þéttbýli og vatnafar) eru frá Landmælingum Íslands (nú hluti Náttúrufræðistofnunar Íslands).

(A) Geological map of the Reykjanes Peninsula and (B) the capital area, along with a close-up of the area around Hafnarfjörður and Garðabær (C) where lava has repeatedly flowed. Data from ÍSOR (K. Sæmundsson et al., 2016a). Fractures and eruptive fissures are from Clifton and Kattenhorn (2006), Ducrocq et al. (2024), Páll Einarsson et al. (2018, 2020), Steigerwald et al. (2020), Kjartan Thors (1992) and ÍSOR (Kristján Sæmundsson et al., 2016). Background data (urban areas and hydrology) are from the National Land Survey of Iceland (now part of the Icelandic Institute of Natural History).

3 Hraun

Hraun sem myndast hafa eftir að jökla leysti á Reykjanesskaga (t.d. Kristján Sæmundsson, 1995; Hreggviður Norðdahl & Halldór G. Pétursson, 2005), hylja stóran hluta skagans (Mynd 4). Þó svo að gossprungur séu algengari á miðjum og sunnanverðum Reykjanesskaga hafa hraun náð til sjávar bæði á norðan- og sunnanverðum skaganum. Um er að ræða bæði hraun sem renna frá gossprungum innan sprungusveima og dyngjuhraun sem runnið hafa úr stökum gosopum.

Ef litið er á hraun sem myndast hafa á sögulegum tíma eða síðustu rúmlega 1000 árin (Mynd 5) má sjá að mismunandi svæði á Reykjanesskaga hafa verið virk á mismunandi tímabilum. Umbrotatímabil byrjaði um landnám þegar þónokkur eldgos áttu upptök sín innan sprungusveims Brennisteinsfjalla, austarlega á Reykjanesskaga (8.–10. öld, Mynd 5). Eftir því sem leið á umbrotatímabilið færðist virknin til vesturs, fyrst í sprungusveim Krýsuvíkur (Krýsuvíkureldar, Mynd 5), en síðan vestur í Eldvörp og að Reykjanestá (Reykjaneseldar). Athyglisvert er að eldgos núverandi gosskeiðs (þ.e. frá árinu 2021 til ritunar skýrslu) eru upprunnin við Fagradalsfjall og í Sundhnúksgíggaröðinni á svæðum sem ekki voru virk á síðasta gosskeiði.



Mynd 5. Hraun frá núverandi gosskeiði (rauð þekja, virkni frá mars 2021 til byrjunar september 2024) og gosskeiðinu þar á undan (græn, gul, ljósblá og blá þekja, virkni frá 8.–13. aldar). Síðasta gosskeið hófst um svipað leyti og landnám Íslands. Upplýsingar um aldur og hraunþekjur eru frá ÍSOR (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Bakgrunnsgögn eru frá Landmælingum Íslands (nú hluti Náttúrufræðistofnunar Íslands).

Lava from the current eruption period (red layer, activity from March 2021 to the beginning of September 2024) and the eruption period before that (green, yellow, light blue and blue layers, activity from the 8th–13th centuries). The last eruption period began around the same time as the settlement of Iceland. Information on age and lava flows is from ÍSOR (Kristján Sæmundsson et al., 2016). Background data is from the National Land Survey of Iceland (now part of the Icelandic Institute of Natural History).

Frá upphafi yfirstandandi umbrotahrinu á Reykjanesskaga hefur, við útgáfu þessarar skýrslu, gosið í tveimur skilgreindum eldstöðvakerfum á Reykjanesskaga, þrisvar sinnum í Fagradalsfjalli og sjö sinnum í Svartsengi (Tafla 1). Fyrsta gosið í Fagradalsfjalli var stærst og flokkast sem meðalstórt gos. Næstu tvö gos í Fagradalsfjalli flokkast bæði sem lítil gos en hraunin lögðust upp að, og að hluta yfir, fyrri hraunbreiður. Í október árið 2023 hófust mikil umbrot í eldstöðvakerfi Svartsengis og við ritun þessarar skýrslu (desember 2024) hefur gosið sjö sinnum á Sundhnúksígáaröðinni. Fyrstu gosin sex flokkast öll til lítilla gosa (Tafla 1) en heildarrúmmál hraunanna er þó komið yfir 0,1 km³ og samanlagt hraunmagn sem hefur myndast er því komið í flokk meðalstórra hrauna. Færa má rök fyrir því að án þeirrar nákvæmu vitneskju sem við höfum um tilurð hraunanna frá Fagradalsfjalli og Sundhnúksígáum (s.s. nákvæmt upphaf og endir), væru hraunbreiðurnar tvær eflaust skilgreindar sem afurð tveggja eldgosa í stað tíu vegna þess að hraunin fléttast saman og liggja hvert ofan á öðru. Þetta er gott að hafa í huga þegar stærðir hrauna af mismunandi aldri eru bornar saman.

Tafla 1. Gos á núverandi gosskeiði innan eldstöðvakerfa Fagradalsfjalls og Svartsengis á Reykjanesskaga. Flatarmál og rúmmálstölur eru allar frá myndmælingateymi Náttúrufræðistofnunar (áður Náttúrufræðistofnunar Íslands og Landmælinga).

Eruptions on the Reykjanes peninsula during the current eruptive period. The data on area and volume of the lava flows are provided by the photogrammetry team of the Natural Science Institute of Iceland (formerly Icelandic Institute of Natural history and the National Land Survey of Iceland).

Kerfi	Staðsetning	Dags.	Lengd (dagar/klst)	Flatarmál (km ²)	Rúmmál (km ³)
Svartsengi	Sundhnúksígá	20.11.-8.12.2024	18	9,0	0,049 ^a
Svartsengi	Sundhnúksígá	22.8.-5.9.2024	14 dagar	15,8	0,061
Svartsengi	Sundhnúksígá	29.5.-22.6.2024	23 dagar	9,3	0,045
Svartsengi	Sundhnúksígá	16.3.-8.5.2024	53 dagar	6,2	0,035
Svartsengi	Sundhnúksígá	8.2.-9.2.2024	~26 klst	4,0	0,013
Svartsengi	Hagafell	14.1.-16.1.2024	~41 klst	0,7	0,002
Svartsengi	Sundhnúksígá	18.12.-21.12.2023	~55-57 klst	3,4	0,012
Fagradalsfj	Litli-Hrútur	10.7.-5.8.2023	26 dagar	1,5	0,015
Fagradalsfj	Meradalir	3.8.-27.8.2022	18 dagar	1,3	0,011
Fagradalsfj	Geldingadalir	19.3.-18.9.2021	182 dagar	4,9	0,15

Hraun innan og í nágrenni höfuðborgarsvæðisins á sér mestmegnis upptök í eldstöðvakerfi Krýsuvíkur. Þó eru undantekningar þar á, þar sem hraun frá kerfi Brennisteinsfjalla hefur einnig runnið innan marka núverandi höfuðborgarsvæðis (Mynd 1B, Mynd 4).

3.1 Hraun innan höfuðborgarsvæðisins frá kerfi Krýsuvíkur

Nyrsta hraunið frá eldstöðvakerfi Krýsuvíkur er Búrfellshraun (Mynd 4c). Það rann fyrir um 7300 árum og náði inn á svæði þar sem hluti Garðabæjar og Hafnarfjarðar liggur nú, ásamt því að teygja sig út að Álfanesi (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Við Ásvallahverfið í

Hafnarfirði hefur hraun runnið þónokkrum sinnum yfir svæði þar sem nú er byggð (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Þetta gerðist a.m.k. árið 1151 þegar Kapelluhraun rann og þegar Óbrinnishólahraun myndaðist fyrir um 2100 árum síðan. Rétt við jaðar byggðarinnar má einnig finna Selhraun (eldra en 2400 ára), hið 4000–4500 ára Geldingahraun (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016) og hraun frá Hrútagjárdyngju (um 7000 ára). Því er ljóst að hraun hafa runnið um svæðið a.m.k. 5 sinnum á síðustu 7000 árum og þar með að hraun geta runnið þar á ný, sérstaklega þar sem nýtt umbrotatímabil er hafið á Reykjanesskaga.

3.2 Hraun innan höfuðborgarsvæðisins frá kerfi Brennisteinsfjalla

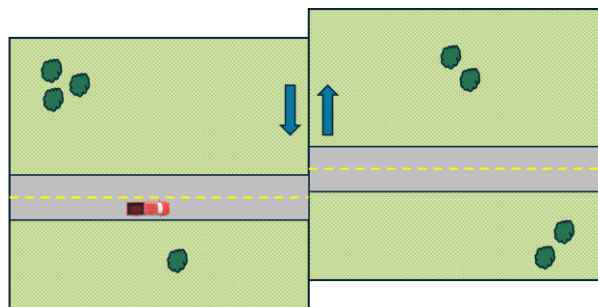
Nyrsta hraunið frá eldstöðvakerfi Brennisteinsfjalla er Leitahraun (Mynd 4c) en það er talið hafa runnið fyrir um 5200 árum og er flokkað sem dyngjugos (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Hraunið á upptök austan Bláfjalla og Vífilfells og hefur runnið langa leið, hátt í 30 km, þar til framrás þess stöðvaðist á Geirsnefi neðst í Elliðaárdalnum (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Á leið sinni rann það yfir votlendi í nágrenni Elliðavatns sem olli sprengivirkni og gervígígamyndun við Rauðhóla (t.d. Bruno o.fl., 2004). Hraun frá eldstöðvakerfi Brennisteinsfjalla fléttast við hraun frá Krýsuvíkurkerfinu við Ásvallahverfið syðst í Hafnarfirði, en í kringum árið 950 rann Hellnahraun, einnig nefnt Tvíbollahraun. Auk þess hefur Skúlatúnshraun (sem er yngra en 7000 ára) runnið svipaða leið, en töluverður hluti byggðarinnar stendur á því hrauni. Önnur hraun innan eldstöðvakerfis Brennisteinsfjalla hafa ekki náð eins langt. Um árið 950, rétt eftir landnám Íslands, runnu þó Húsfellsbrunahraunin. Þau runnu að jaðri Heiðmerkur þar sem í dag eru ýmis mannvirki sem notuð eru til kaldavatnstöku fyrir höfuðborgarsvæðið.

4 Sprungur

4.1 Tegundir sprungna og mismunandi áhrif þeirra

Á Reykjanesskaga finnast sprungur af tvennum toga. Annars vegar sprungur sem tengjast sprungusveimum en hins vegar sniðgengissprungur (t.d. Clifton & Kattenhorn, 2006; Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð, 2006). Hegðun þessara sprungutegunda er nokkuð ólík.

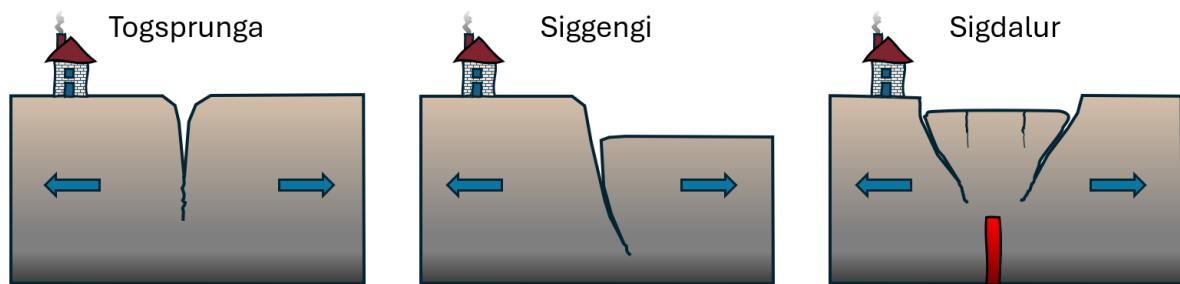
Sniðgengin á Reykjanesskaga (Mynd 6) eru sprungur sem stefna yfirleitt í N-S áttir, þótt einstöku sinnum megi sjá svokölluð vensluð sniðgengi, en þau stefna í ANA-VSV áttir. Þau eru staðsett á sunnanverðum eða miðjum Reykjanesskaga. Á þessum sprungum verða stærstu jarðskjálftar sem eiga upptök sín á skaganum. Sniðgengissprungur eru ekki taldar eiga sér bein tengsl við kvikuinnskot, en þó hafa dæmi sýnt að kvika getur nýtt sér veikleika eftir sniðgengissprungum, og jafnvel gosið upp um þær (Ásta Rut Hjartardóttir o.fl., 2023). Einnig geta kvikuinnskot á Reykjanesskaga valdið miklum spennubreytingum þannig að sniðgengin gefa sig og valda jarðskjálftum (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2022).



Mynd 6. Sniðgengishreyfing verður þegar sprunguveggir hreyfast lárétt meðfram hvor öðrum. Á myndinni sést hvernig vegur hefur færst til við sniðgengishreyfingu.

Strike-slip movement occurs when fracture walls move horizontally along each other. The picture shows how the road has shifted during the strike-slip movement.

Sprungur í sprungusveimum Reykjanesskaga stefna alla jafna í norðaustlægar áttir og eru yfirleitt togsprungur eða siggengi (Mynd 7). Innan sprungusveima finnast einnig gossprungur með sömu stefnu (Clifton & Kattenhorn, 2006). Rannsóknir á sprungusveimum á eldvirkum svæðum benda til að þeir verði aðallega virkir þegar kvikuinnskot eiga sér stað, en að þess á milli séu hreyfingar á sprungum innan þeirra litlar (Ásta Rut Hjartardóttir o.fl., 2012; Kristján Sæmundsson, 1992; Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2015, 2024; Margrét Traustadóttir, 2013). Þegar grunn gangainnaskot eiga sér stað geta myndast sigdalir fyrir ofan þau. Sprungur myndast mest á jöðrum sigdalanna, en einnig innan þeirra og jafnvel í kringum þá. Gossprungur eru oft staðsettar í miðju sigdala eða í jöðrum þeirra en gossprungur myndast þegar kvika nær til yfirborðs og eldgos á sér stað. Þetta mynstur er þó ekki algilt og verður oft flóknara á Reykjanesi, þar sem kvikan nýtir sér einnig sniðgengissprungur sem skera svæðin eins og nefnt hefur verið.



Mynd 7. Einfölduð þversnið sem sýna myndun togsprungna, siggengja og sigdala. Bláar örvar sýna gliðnun jarðskorpunnar, kvikugangur (sem oft tengist myndun sigdala) er sýndur rauður á lit. Ef hann nær upp á yfirborð verður eldgos og gossprunga myndast. Togsprungur geta opnast, en engin lóðrétt færsla verður á landinu í kring. Þegar siggengi myndast lækkar landið öðrum megin. Siggengi myndast í jöðrum sigdala, en togsprungur geta myndast innan þeirra eða í nágrenninu.

Simplified cross-sections showing the formation of tensile fractures (togsprunga), normal faults (siggengi) and grabens (sigdalur). Blue arrows show the extension of the earth's crust, magmatic dike intrusion is shown in red (often associated with the formation of grabens). If magmatic dike reaches the surface, an eruption occurs and an eruptive fissure is formed. Tensile fractures can open without vertical movement on the surrounding land. When a normal fault is formed, the land descends on one side. Normal faults form at the edges of grabens, but tensile fractures can form within them or nearby.

4.2 Sprungusveimur Krýsuvíkur

Sprungusveimur Krýsuvíkur er eini sprungusveimurinn sem nær inn á höfuðborgarsvæðið og er hann um 50 km langur (Mynd 2). Í suðri nær hann út í sjó á svæðinu milli Mölvíkur og Hælsvíkur, en virðist deyja þar út. Nyrsti hluti sprungusveimsins nær að austurhluta höfuðborgarsvæðisins. Hann liggur að Urriðaholti í Garðabæ, í Hvarfahverfið í Kópavogi og undir Norðlingaholt í Reykjavík. Sömuleiðis eru ummerki um hann í Grafarholti í Reykjavík og í Mosfellsbæ (Páll Einarsson o.fl., 2018). Minni ummerki eru um virkni á sprungusveiminum á síðustu árbúsundum norðan Búrfellsgjár. Í Búrfellsgjá má sjá gapandi gjár og skýr siggengi, á meðan sprungur norðarlega í sprungusveiminum eru rofnari og oftast einungis sýnilegar sem aflíðandi brekkur í landslaginu. Margar sprungnanna afmarka sigdali en þá má finna í einhverri mynd innan flestra hluta sprungusveimsins, til dæmis er talið að Elliðavatn liggi í sigdæld (Páll Einarsson o.fl., 2018).

Gossprungur og gígar sem myndast hafa eftir að jökla leysti af Reykjanesskaga finnast í sunnanverðum og miðjum sprungusveiminum. Nyrsti gígurinn (Búrfell), sem myndaði Búrfellshraun, er í um 5 km fjarlægð frá þéttbýli höfuðborgarsvæðisins (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Þetta eru sömuleiðis þau svæði þar sem hefðbundnar sprungur líta út fyrir að vera yngri og virkari. Eldvirknin innan sprungusveimsins gefur einnig til kynna að syðri hlutar sprungusveimsins hafi verið virkari en nyrsti hluti hans. Það er í samræmi við staðsetningu flekaskilanna; gossprungum fækkar eftir því sem fjarlægðin frá sjálfum flekaskilunum eykst (Mynd 2). Síðast gaus innan sprungusveims Krýsuvíkur í svokölluðum Krýsuvíkureldum á árunum 1151–1188 þegar Ögmundarhraun, Lækjavallahraun, Kapelluhraun og Mávahlíðarhraun mynduðust (Sigmundur Einarsson o.fl., 1991). Athyglisvert er að á síðustu gosskeiðum gaus í öllum tilfellum innan sprungusveims

Krýsuvíkur (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013).

4.2.1 Hreyfingar á sprungum innan sprungusveims Krýsuvíkur

Þær mælingar sem gerðar hafa verið á sprungum innan sprungusveimsins benda til að alla jafna séu litlar hreyfingar á þeim. Hallamælilína yfir sprungur í Búrfellsgjá gefur til kynna að sigdalurinn þar hafi einungis hreyfst um 0,06 mm á ári á milli áranna 1980 og 2012, og um 0,081 mm á ári milli áranna 1967 og 1980 (Margrét Traustadóttir, 2013b; Eysteinn Tryggvason, 1968). Mælilínan var mæld á ný sumarið 2024, þær niðurstöður verða væntanlega birtar vorið 2025. Athyglisvert er að á bylgjuvígmyndum (InSAR) frá árunum 2020 og 2021 sjást hreyfingar á sprungum innan sprungusveimsins í tengslum við kvikuganga undir Fagradalsfjalli (Ducrocq o.fl., 2024). Þrátt fyrir að um smávægilegar hreyfingar sé að ræða þá eru þær áhugaverðar, sérstaklega í ljósi þess að kvikugangurinn undir Fagradalsfjalli var hluti af öðru eldstöðvakerfi. Þó má benda á að Fagradalsfjall hefur í gegnum tíðina ýmist verið skilgreint sem sjálfstætt eldstöðvakerfi eða hluti af kerfi Krýsuvíkur. Á sömu myndum sáust svipaðar hreyfingar á sprungum innan Grindavíkur sem síðar hreyfðust mikið í atburðunum sem hófust 10. nóvember 2023. Þá er talið að kvikugangur hafi myndast undir Sundhnúksgígum og náð undir Grindavík (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2024). Hreyfingarnar hafa þó einnig verið túlkaðar sem einungis tektónískur atburður (De Pascale et al., 2024).

4.2.2 Önnur aflögun innan sprungusveims Krýsuvíkur

Landris hefur nokkrum sinnum mælst innan sprungusveims Krýsuvíkur. Árið 2009 varð landris á jarðhitasvæði Krýsuvíkur, en landið seig aftur. Árið 2010 endurtók leikurinn sig með landrisi sem náði hámarki seinni hluta árs 2011. Aftur seig landið, en þó má greina lítil ristímabil inni á milli þess sem landið seig. Árið 2010 var hraði landrissins sem svarar meira en 50 mm á ári. Útreikningar benda til þess að landris þetta hafi átt sér upptök á um 4–5 km dýpi undir Sveifluhálsi (Sylvía Rakef Guðjónsdóttir o.fl., 2020; K. Michalczevska o.fl., 2012). Töluverð aukning á jarðskjálftavirkni mældist samfara þessu (Michalczevska o.fl., 2012). Landris, með upptök innan sprungusveims Krýsuvíkur, átti sér enn fremur stað árið 2020. Eftir það hafa landhæðarbreytingar mælst innan sprungusveimsins, en ekki er búið að skera úr um hvort þær eigi sér upptök innan sprungusveimsins, eða hvort þær tengist umbrotum vestar á skaganum, þ.e. kvikuinnskotum og eldgosum við Fagradalsfjall og Sundhnúksgíga (Benedikt Ófeigsson, munnleg heimild). Ástæður landhæðarbreytinganna í sprungusveimi Krýsuvíkur eru óljósar, en tilgátur eru um að annað hvort hafi verið um kviku- eða gassöfnun að ræða (Gylfi Páll Hersir o.fl., 2013).

5 Jarðskjálftar

Jarðskjálftavirkni á Reykjanesi má skipta í tvo grunnflokka: 1) jarðskjálftar á norður-suður sniðgengjum brotabeltisins og 2) jarðskjálftar sem eiga sér stað á suðvestur-norðaustur siggengis- og togsprungum tengdir eldvirkni og kvikuhreyfingum. Sannfærandi rök hafa verið sett fram á undanförunum árum fyrir því að hið vel þekkt Suðurlandsskjálftabelti sem einkennist af „bókahillutektóník“, þ.e.a.s stuttum og lóðréttum sniðgengjum sem liggja norður-suður og eru samsíða frá austri til vesturs, sé í raun samfelld vestur af láglandi Suðurlands og út allan Reykjanesskagann (Páll Einarsson, 2014). Það er vel þekkt að jarðskjálftar á siggengis- og togsprungum verða ekki eins stórir og þeir geta orðið á sniðgengjum og jarðskjálftavá stafar einkum, og nær einvörðungu, frá jarðskjálftum á sniðgengjum brotabeltisins. Þó skal tekið fram að færslur geta orðið á siggengjum og togsprungum sprungusveima eldstöðvakerfa í gliðnunarátburðum á eldvirkum tímabilum vegna kvikuinnskota. Nákvæmt yfirlit yfir jarðskjálfta við höfuðborgarsvæðið má nálgast í skýrslu Benedikts Halldórssonar (Benedik Halldórsson & Kowsari, 2024), en hér verður gefið stutt yfirlit.

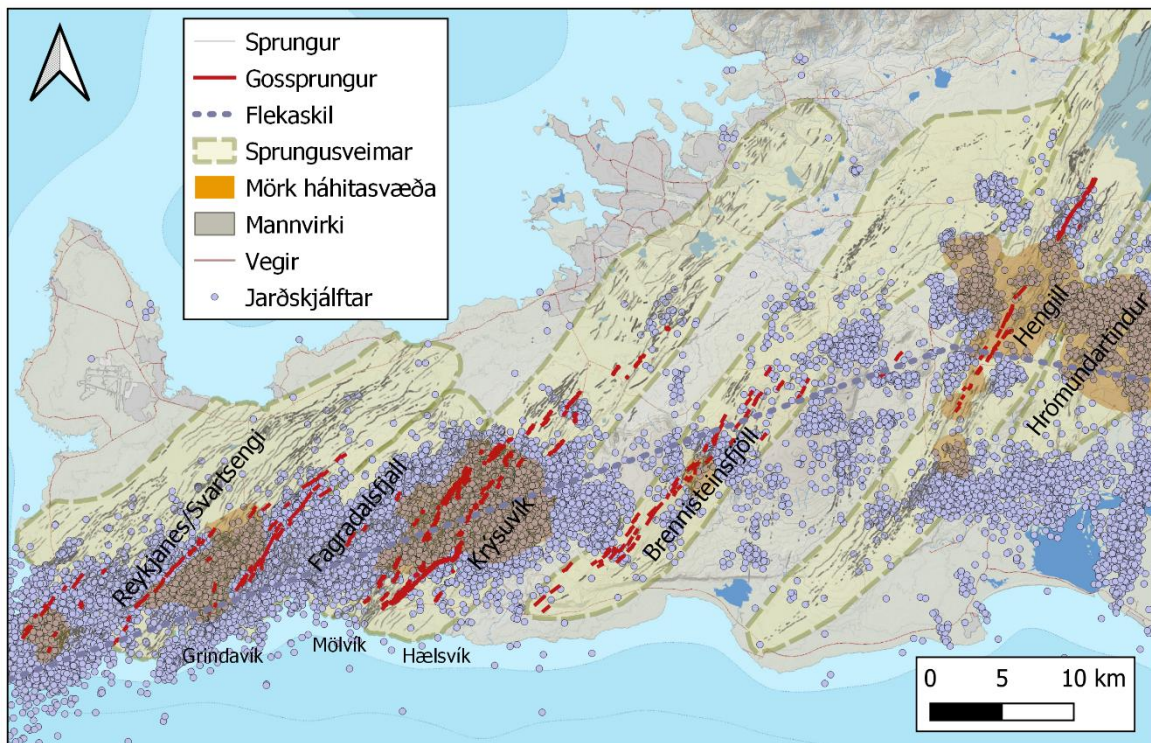
5.1 Hvaða skjálftar geta haft áhrif á höfuðborgarsvæðið?

Jarðskjálftar sem eiga upptök sín í nágrenni höfuðborgarsvæðisins verða oftast á sniðgengjum eða innan sprungusveima. Sjaldgæft er að svokallaðir innflekaskjálftar mælist, en það eru þeir skjálftar sem verða utan flekaskila og sprungusvæða tengdum þeim.

5.1.1 Sniðgengisskjálftar

Stærstu jarðskjálftar á Reykjanesskaga eru taldir verða allt að 6,5 stig að stærð, en mælingar hafa sýnt að þeir eiga sér upptök á sniðgengjum. Hámarks skjálftastærð er talin minnka frá austri til vesturs, en á vesturenda skagans eru þeir taldir verða að hámarki 5,5 stig að stærð. Stærstu skjálftar síðustu áratuga eru taldir hafa átt upptök sín á sniðgengjum í nágrenni Brennisteinsfjalla. Árið 1968 varð skjálfti upp á 6,1 stig, og árið 1929 varð skjálfti upp á 6,4 stig (Sveinbjörn Björnsson o.fl., 2020; Kristján Jónasson o.fl., 2021). Þetta olli smávægilegum skemmdum á höfuðborgarsvæðinu, árið 1929 sprakk og tæmdist t.d. sundlaugin í Laugardal í Reykjavík og skorsteinar á húsum hrundu (Jarðskjálftar um allt Suðvesturland', 1929).

Suðurlandsskjálftar eiga upptök sín á sniðgengjum á Suðurlandsskjálftabeltinu, svæði sem nær um það bil frá Hveragerði til Heklu. Þeir eiga sér upptök fjær höfuðborgarsvæðinu, en geta aftur á móti orðið stærri heldur en skjálftar á Reykjanesskaganum og því haft víðtækari áhrif. Dæmi um slíkt sáust árin 2000 og 2008 þegar skjálftar upp á 6,3–6,5 stig urðu með upptök á Suðurlandi (Póra Árnadóttir o.fl., 2005; Ragnar Sigbjörnsson o.fl., 2009). Þeir skjálftar fundust vel á höfuðborgarsvæðinu, þótt engar teljanlegar skemmdir hafi átt sér stað á því svæði.



Mynd 8. Jarðskjálftar (stærð >1) á Reykjanesskaga frá janúar 2004 til október 2024. Á kortinu sést að jarðskjálftar eru algengastir á miðjum og sunnanverðum Reykjanesskaga, nær flekaskilunum. Á síðari hluta tímabilsins urðu mikil umbrot á Reykjanesskaga, til dæmis ítrekuð kvikuinnskot inn í sprungusveima Fagradalsfjalls og syðri hluta Reykjaness/Svartsengis. Jarðskjálftarnir eru úr gagnasafni Veðurstofunnar. Sjá upplýsingar um uppruna gagna, annarra en jarðskjálfta, á Mynd 2.

Earthquakes larger than M1 on the Reykjanes peninsula from January 2004 to October 2024. Earthquakes are most common in the middle and southern part of the Reykjanes peninsula, closer to the plate boundary. During the latter part of the period, there was increased activity on the Reykjanes Peninsula with repeated magma intrusions into the fissure swarms of Fagradalsfjall and the southern part of Reykjaness/Svartsengi. Data on earthquakes is from the Icelandic Met Office's database. Information on the source of other data see Figure 2.

5.1.2 Skjálftar innan sprungusveima

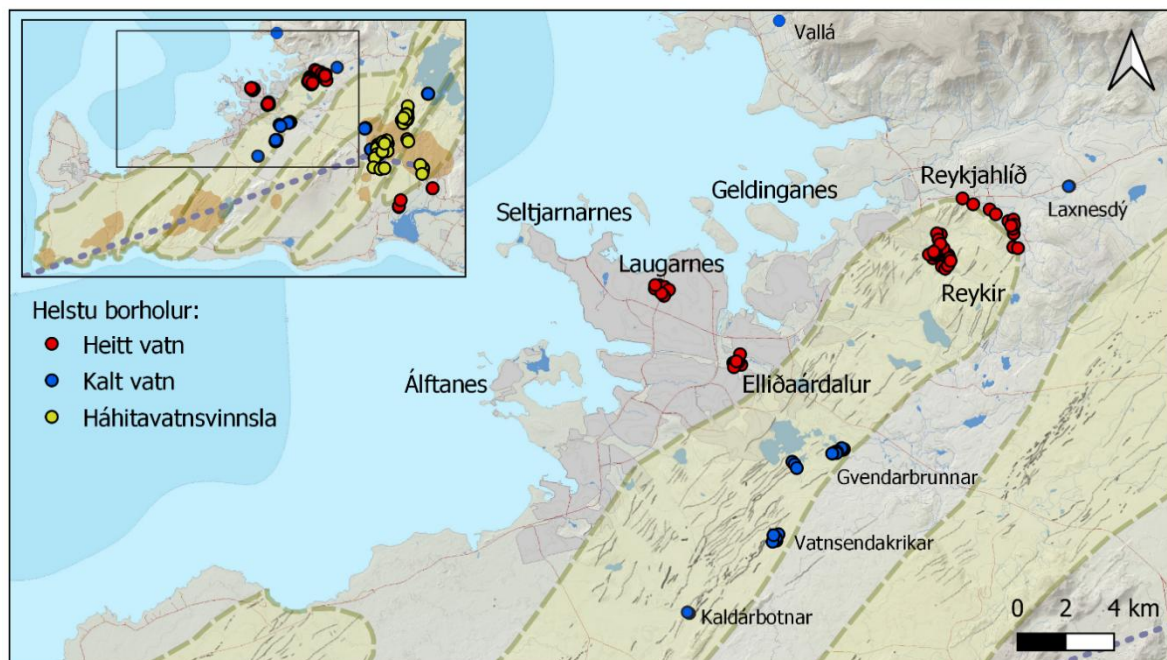
Jarðskjálftar á Reykjanesskaga eru tíðari í nágrenni sjálfra flekaskilanna heldur en fjær. Skjálftar innan sprungusveima eru einnig algengir við háhitasvæði. Athyglisvert er að jarðskjálftar eru sjaldgæfir innan stórs hluta sprungusveima, til dæmis sprungusveims Krýsuvíkur. Frekar fátítt er að skjálftar verði innan norðurhluta hans (Mynd 8). Þetta er í samræmi við mælingar og rannsóknir á öðrum sprungusveimum, þar sem jarðskjálftar utan miðju eldstöðvakerfanna verða aðallega í tengslum við myndun kvikuganga og færslu þeirra neðanjarðar innan sprungusveima (Páll Einarsson, 1991; Ásta Rut Hjartardóttir o.fl., 2012; Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2015, 2022; Woods o.fl., 2019).

6 Jarðhitasvæði í nágrenni höfuðborgarsvæðisins

Jarðhitasvæðum er gjarnan skipt í tvennt, lághitasvæði og háhitasvæði. Eiginleikar þessara svæða eru töluvert ólíkir. Þau eru skilgreind á þann veg að lághitasvæði eru með lægri en 150°C hita á eins kílómetra dýpi, á meðan háhitasvæði eru með meira en 200°C hita á sama dýpi (Guðni Axelsson o.fl., 2010; Gunnar Böðvarsson, 1961; Ingvar Birgir Friðleifsson, 1979). Háhitasvæði eru staðsett á eða nærri eldvirkum svæðum landsins, þar sem hættan á eldgosum getur verið töluverð, enda er varminn í háhitakerfunum tilkominn vegna endurtekinna kvikuinnskota í eldstöðvarkerfunum og sprungusveimum þeirra. Lághitasvæði finnast aftur á móti á svæðum utan virkra eldstöðvakerfa. Ástæða þeirra er talin vera sú að jarðskorpa Íslands sé ung og vegna þessa óvanalega heit. Jarðhitavökvi hitnar á miklu dýpi, sprungur leiða hann á minna dýpi þar sem heitu jarðhitavatni er dælt upp í gegnum borholur (Guðni Axelsson o.fl., 2010).

Engin háhitasvæði eru innan höfuðborgarsvæðisins en háhitasvæði í Krýsuvík og Hengli eru þau sem næst liggja. Lítið háhitakerfi sést sömuleiðis í sunnanverðum sprungusveimi Brennisteinsfjalla. Háhitakerfi Hengils, t.d. á Nesjavöllum, Hellisheiði, Ölkelduhálsi og í Hverahlíð, er þó mikilvægt höfuðborgarsvæðinu þar sem það er nýtt bæði til raforkuframleiðslu og til húshitunar.

Lághitakerfi eru víða virk innan höfuðborgarsvæðisins, og þrjú þeirra hafa verið nýtt í áratugi til húshitunar (Mynd 9). Árið 1930 hófst vinnsla úr lághitakerfinu í Laugarnesi og árið 1943 var lögð heitavatnsleiðsla frá Reykjum í Mosfellssveit til Reykjavíkur. Árið 1968 hófst svo vinnsla úr lághitakerfinu í Elliðaárdal (Einar Gunnlaugsson o.fl., 2000). Sömuleiðis finnst lághitasvæði á Seltjarnarnesi og í Reykjahlíð í Mosfellssveit. Á síðustu árum hafa kannanir staðið yfir á öðrum lághitasvæðum á höfuðborgarsvæðinu, í Geldinganesi, á Kjalarnesi og á Álftanesi.



Mynd 9. Lághitavatns- og kaldavatnsvinnsla við höfuðborgarsvæðið. Háhitavatnsvinnsla er tengd háhitasvæðum en heitavatnsöflun fyrir höfuðborgarsvæðið tengist einnig lághitasvæðum. Kalt vatn er að mestu tekið úr sprungusveimi Krýsuvíkur. Upplýsingar um önnur gögn á kortinu má finna á Mynd 2.

Low-temperature geothermal- and cold water production in the capital area. High-temperature geothermal production is connected to high-temperature areas outside of the capital area, but hot water generation is also connected to low-temperature areas. Cold water is mostly taken from the Krýsuvík fissure swarm. Information about other data on the map, see Figure 2.

7 Gasmengun

Mengunar af völdum eldfjallagasa verður vart í andrúmslofti, sem efnamengun á jörðu og gasið getur mengað bæði yfirborðsvatn og grunnvatn. Efnasamsetning kviku sem losar eldfjallagös stjórnar samsetningu þeirra en almennt má segja að basísk kvika (heit) hafi lítið magn uppleystra lofttegunda en súr kvika (kaldari) mikið magn. Því fylgir almennt séð meiri mengun súrum gosum en basískum (Níels Óskarsson, 2013). Stærð gosa (þ.e. magn þeirrar kviku sem losar eldfjallagös) og tímalengd hefur einnig áhrif og oft standa basísk gos mun lengur en súr. Vatn er langstærsti hluti eldfjallagasa en auk þess myndast t.d. vetni (H_2), koltvíoxíð (CO_2), kolsýringur (CO) og brennisteinstvíoxíð (SO_2) auk brennisteinsvetnis (H_2S), metangass (CH_4), klórsýru (HCl) og flúorsýru (HF).

Eldfjallagös eru flest hættuleg lífríki en utanaðkomandi aðstæður ráða hvort hættumörkum er náð. Mengun af völdum eldfjallagasa hefur bein áhrif á loftgæði auk þess að geta valdið breytingum á loftslagi (t.d. Robock, 2000; Þorvaldur Þórðarson & Self, 2003). Eldfjallagös geta þannig haft áhrif á heilsu manna og dýra (t.d. Hansell o.fl., 2006; Schmidt o.fl., 2011), gróður og vatnsgæði. Helstu áhrif SO_2 á heilsu manna eru erting í augum, hálsi og öndunarfærum og í háum styrk getur fólk fundið fyrir öndunarörðugleikum (www.ust.is/loft/loftgaedi/loftmengun-i-eldgosum). Gasmengun í lofti hefur sem slík ekki teljandi áhrif á innviði en mikilvægt er að huga að áhrifum langvarandi gasmengunar á endingartíma mikilvægra innviða s.s. rafmagnsmastra og -lína og vatnsleiðslna (t.d. vegna áhrifa tæringar; sjá t.d. Wilson G., o.fl., 2012, Wilson o.fl., 2012; Stewart o.fl., 2019).

Megnið af eldfjallagösum losnar í gíg (t.d. Delmelle & Stix, 2000) en gös halda einnig áfram að losna úr hrauni á meðan það kólnar (Simmons o.fl., 2017). Eldfjallagös rísa með gosmekki í andrúmslofti og veður stjórnar miklu um það hvar áhrifa þeirra og mengunar gætir. Oft verður mestu gasmengunar vart fjarri gosstöðvum m.a. vegna þess að heit gösin rísa frá gosstöðvum og falla ekki til jarðar fyrr en þau hafa kólnað. Ávallt verður að hafa í huga að sum eldfjallagös eru eðlisþyngri en andrúmsloft og þau geta því rutt andrúmslofti frá sér og fyllt lægðir í landslagi og myndað þar lífshættulegar aðstæður, sér í lagi þegar þau kólna. Brennisteinstvíoxíð (SO_2) er hvarfgjarn efni og hvarfast við efni í andrúmsloftinu og myndar brennisteinssýru (SO_3) sem síðan hvarfast við vatn og myndar brennisteinsýruagnir sem eru helsta ástæða fyrir súru regni. Súrt regn getur valdið gróðurskemmdum og eyðingu skóga auk skemmda á byggingum og öðrum mannvirkjum. Vindur og rigning þynna og flytja gas á brott og rigning minnkar magn gasa í andrúmslofti en getur á sama tíma aukið styrk efna í grunnvatni. Þegar hraun renna í sjó getur myndast hvít móða (e. Lava Haze eða Laze) sem er að mestu úr gufu, súru gasi (HCl) og örsmáum gjóskuögnum en móðan hefur ertandi áhrif á augu, lungu og húð og getur jafnvel verið banvæn (Neal & Anderson, 2020).

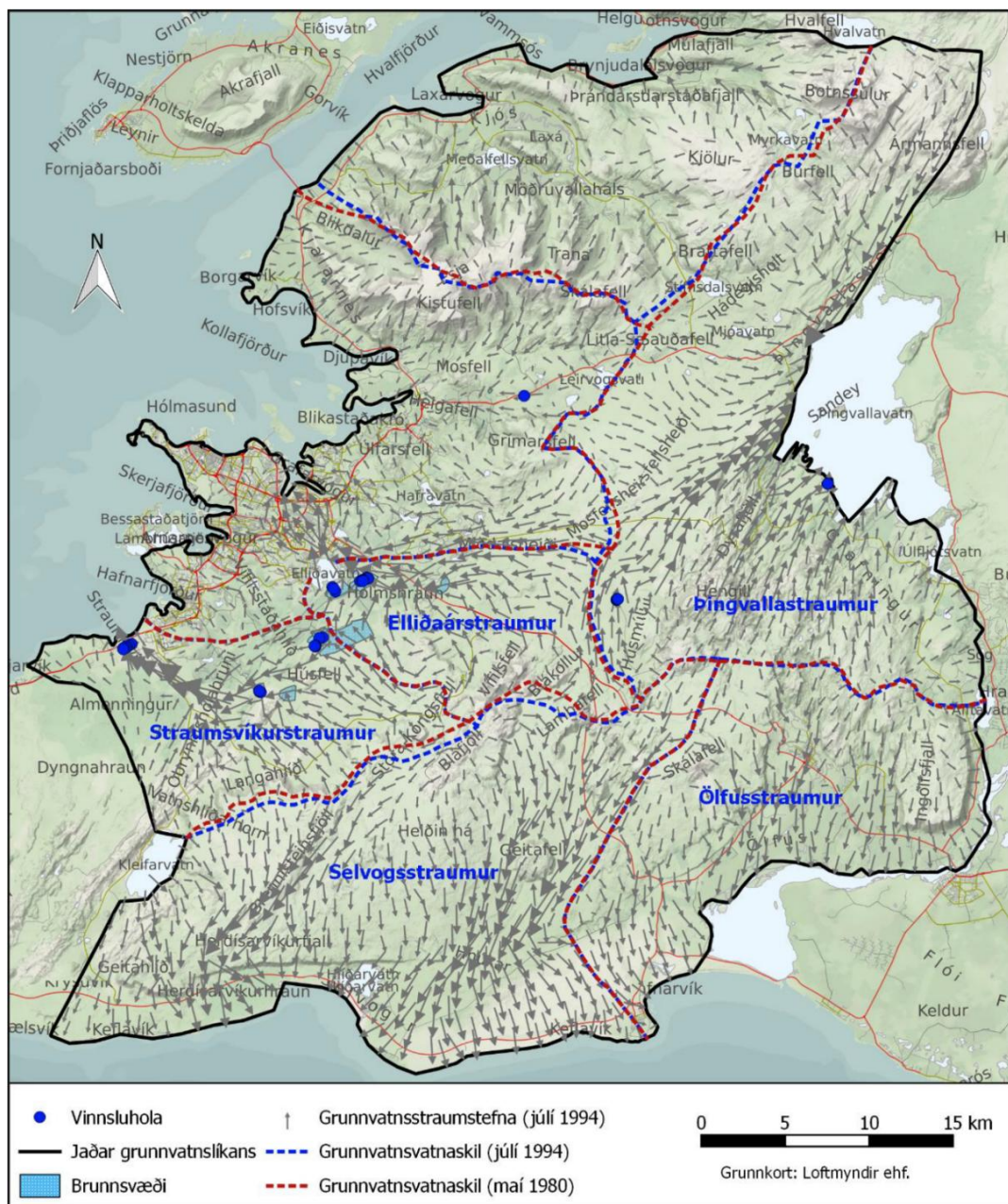
8 Grunnvatn við höfuðborgarsvæðið

Grunnvatn er skilgreint sem það vatn sem fyllir allar glufur í jörðu neðan grunnvatnsflatar. Yfirborðsvatn seitlar í gegnum jarðlög og hreinsast á leið sinni niður í grunnvatnið og því er grunnvatn ferskt og gott. Grunnvatn streymir undan halla eins og annað vatn, og myndar neðanjarðar grunnvatnsstrauma í jarðskorpunni frá fjalllendi til sjávar. Þar sem grunnvatnsborð sker yfirborð jarðar myndast lindir og jafnvel stöðuvötn sbr. Grænavatn við Krýsuvík og Pingvallavatn. Berggrunnur og lekt hans stjórna hvar grunnvatn er að finna og hvert það streymir. Hraun á höfuðborgarsvæðinu eru gropin og lek og það sama má segja um Reykjavíkurgrágrýtið þó það sé þéttara en yngri hraunin. Úrkoma á því greiða leið niður í grunnvatnið hvort sem um er að ræða beina úrkomu eða snjóbráð. Hitastig grunnvatnsins eru um 3-4 °C (Freysteinn Sigurðsson, 2007).

Drykkjarvatn á höfuðborgarsvæðinu fæst frá grunnvatnsstraumum úr fjalllendinu suður, austur og norðan við höfuðborgarsvæðið. Helstu straumar sem liggja til höfuðborgarsvæðisins eru Elliðaárstraumur, en hann liggur frá svæðinu nærri Vífilsfelli og Straumsvíkurstraumur sem liggur sunnan Elliðaárstraums frá svæðinu við Lönguhlíð og Stóra Kóngsfell. Þriðji straumurinn nær yfir stórt svæði og liggur norðan Elliðaárstraumsins. Hann rennur frá suðurhluta Esjunnar og vesturhluta Mosfellsheiðar í átt til höfuðborgarinnar (Mynd 10). Mikið grunnvatn er á svæðinu og sterkir straumar en mikið grunnvatn rennur til sjávar í Hraunavík og Straumsvík sunnan Hafnarfjarðar. Allt yfirborðsvatn af Reykjaneskaga rennur til sjávar sem grunnvatn en Hafnarfjarðarlækur er syðsti lækurinn sem fellur til sjávar í Faxaflóa (Árni Hjartarson, 2007).

Þar sem grunnvatnsstraumarnir skera sprungusveim Krýsuvíkur rennur vatnið um sprungur. Þar er vatninu dælt upp; í Gvendarbrunnum, við Jaðar og Myllulæk, í Vatnsenda-krikum og Kaldárbotnum. Sömuleiðis fær Mosfellsbær drykkjarvatn frá Laxnesdýi og byggðin á Kjalarnesi frá Vallá. Þessu vatni er síðan dælt um leiðslur til höfuðborgarsvæðisins. Borholur þessar liggja innan allra þriggja grunnvatnsstrauma sem renna til höfuðborgarsvæðisins. Verði mikil hreyfing á sprungum geta grunnvatnsstraumar raskast.

Neysluvatn á höfuðborgarsvæðinu er gott enda er mikil úrkoma og gegnumstreymi vatns er hratt (Páll Stefánsson, 2007). Allt drykkjarvatn höfuðborgarsvæðisins kemur úr lokuðum borholum en árið 1984 var síðasta opna vatnsbólið tekið úr notkun (t.d. Páll Stefánsson, 2004). Með lokun kerfa dregur úr líkum á mengun drykkjarvatns. Til að koma enn frekar í veg fyrir mengun grunnvatns og tryggja öruggt neysluvatn til höfuðborgarsvæðisins eru skilgreind vatnsverndarsvæði en það teygir sig yfir mörg sveitarfélög.



Mynd 10. Vatnaskil grunnvatnsstrauma og reiknað grunnvatnsrennsli í nágrenni höfuðborgarsvæðisins. Myndin er tekin úr skýrslu verkfræðistofunnar Vatnaskila: Höfuðborgarsvæði, árleg endurskoðun rennslislíkans, frá árinu 2018 og birt hér með leyfi verkkaupa, Samtaka sveitarfélaga á höfuðborgarsvæðinu.

Groundwater divide and calculated groundwater flow in the vicinity of the capital area. Picture is taken from the report: Capital Area, annual review of flow model (Verkfræðistofan Vatnaskil, 2018) and published here with permission.

9 Náttúruvá - áhrif á höfuðborgarsvæðið

Náttúruvá er margslungin og höfuðborgarsvæðið er á margan hátt vel staðsett með tilliti til náttúruvár. Hvorki snjóflóð né skriðuföll ógna byggð þó að hætta sé á ofanflóðum á frístundasvæðum höfuðborgarbúa t.d. í Bláfjöllum og Esju (t.d. Jón Kristinn Helgason o.fl., 2014). Miðað við landið allt er veðurtengd vá fremur lítil þó vissulega geti veður orðið slæmt eins og Básendaflóðið árið 1799 (t.d. Gísli Viggósson o.fl., 2016) og Engihjallaveðrið í febrúar 1981 sanna. Fáar ár renna um svæðið og því er flóðahætta heilt yfir ekki mikil en ekki má gleyma miklum flóðum í Elliðaám árið 1968 (Elliðaárnar skaðræðisfljót, 1968). Töluverð byggð er við sjávarströndina og þarf að taka vá af völdum sjávarflóða alvarlega (t.d. Halldór Björnsson o.fl., 2022). Síðustu 800 árin hefur mjög lítil eldfjallavá steðjað að höfuðborgarsvæðinu og þróun byggðar hefur tekið mið af því.

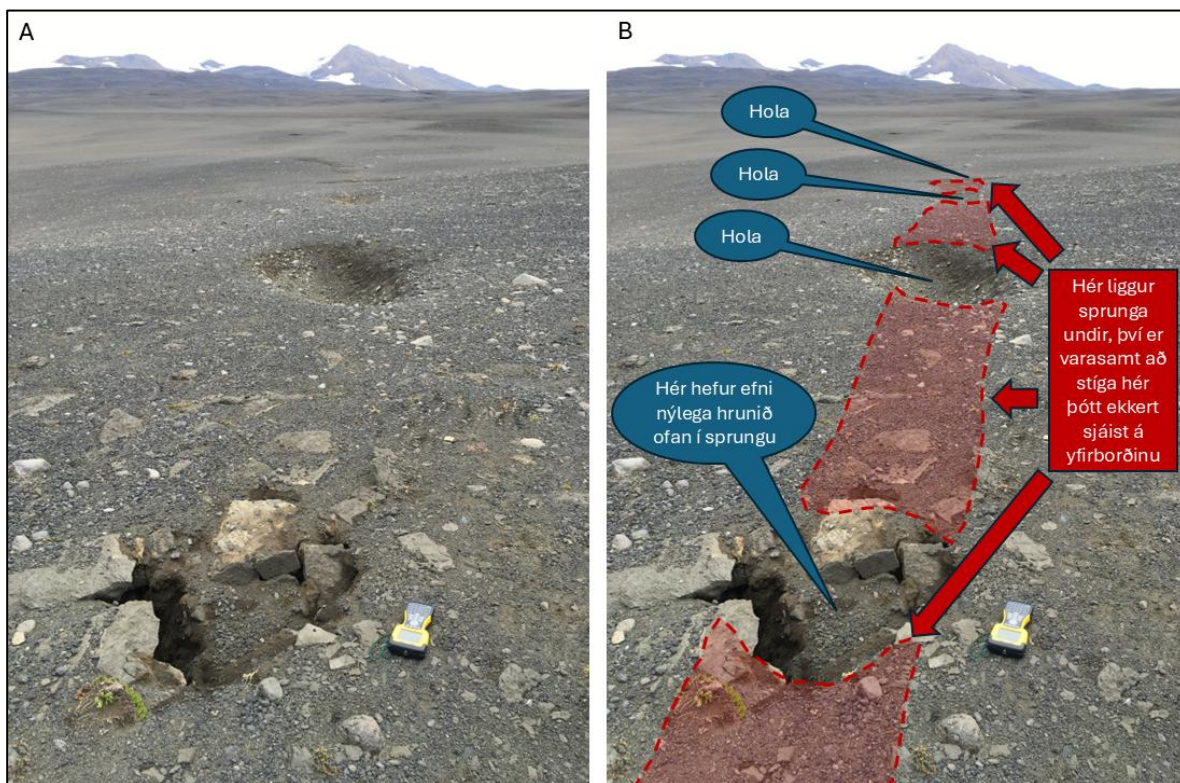
Eldfjallavá er samheiti yfir þá vá sem hlýst af eldvirkni, kvikuhreyfingum í jarðskorpunni og eldsumbrotum, s.s. sprunguhreyfingar, jarðskjálftar, hraunrennsli, gasmengun, gjóskufall, gjóskuflóð og gushlaup, eldingar í gosmekki, eðjuflóð, jökulhlaup og jafnvel flóðbylgjur. Hér verður nánar fjallað um helstu náttúruvá af völdum eldvirkni sem getur haft áhrif á höfuðborgarsvæðið og dæmi gefin um mögulegar mótvægisáðgerðir sem hægt væri að grípa til ef slíkir atburðir byrjuðu. Dæmin eru alls ekki tæmandi, enda hafa rekstraraðilar innviða oft meiri innsýn í það til hvaða mótvægisáðgerða er heppilegast að grípa í hvert sinn. Auk þess er sviðsábyrgðarreglan samkvæmt 2. gr. laga um almannavarnir nr. 82/2008 ráðandi, þ.e. „sá aðili sem fer venjulega með stjórn tiltekins sviðs samfélagsins eða tiltekins svæðis eða umdæmis skal skipuleggja viðbrögð og koma að stjórn áðgerða þegar hættu ber að garði“ (Stefna stjórnvalda í almannavarna- og öryggismálum ríkisins, 2013).

9.1 Sprunguhreyfingar

Ein mesta hættan sem stafar af sprungum er vegna þess hve viðsjárverðar þær eru. Oft sjást þær á yfirborði, en algengt er að einungis hluti þeirra sjáist. Þær geta verið margir tugir metra að dýpt og því getur verið lífshættulegt að falla í þær og gæta þarf fyllsta öryggis í nágrenni þeirra. Nokkur atriði má nota til viðmiðunar, sérstaklega á þeim svæðum þar sem laus jarðlög geta hulið sprungur:

Ef ummerki sjást um sprunguhreyfingar á tveimur stöðum í framhaldi hvor af öðrum má ætla að sprunga liggi líka undir þar á milli þó hún sjáist ekki á yfirborði, og því hættulegt að stíga þar (Mynd 11). Þannig er gott að líta til hægri og vinstri þegar gengið er um landslag þar sem hætta er á falli í sprungur. Ef sprunga eða umrót í tengslum við sprunguhreyfingar sést til hliðar er hætta á að sprungan liggi lengra neðanjarðar.

Smávægileg ummerki um nýleg jarðsig, holur eða slíkt geta verið ummerki um undirliggjandi sprungur, og því er sömuleiðis hættulegt að stíga þar. Mikilvægt er að hafa í huga að þessi ummerki geta verið mjög smávægileg og því þarf að horfa vel á landslagið.



Mynd 11. Stundum sjást einungis slitrótt ummerki um sprungur á yfirborði. Mynd A sýnir ummerkin á yfirborði, mynd B er með skýringum. Hér sjást holur í jörðinni, en engin önnur greinileg ummerki um sprungu sjást á milli holanna (rauðu svæðin). Holurnar liggja í röð, og nýlega hefur jarðvegur fallið ofan í eina þeirra. Hinar eru aðeins eldri. Þarna eru því ummerki um að undir liggí sprunga, og því getur verið varasamt að stíga á svæðið á milli holanna, þ.e. svæðið sem lítað er rautt á mynd B.

Sometimes only sporadic traces of cracks are visible on the surface. Figure A shows the traces on the surface, Figure B has explanations. The only signs of a subsurface fissure can i.e. be holes that form a line with or any deformation between them (red areas). Recently soil has fallen into one of the holes where as other holes are a little older. It can be dangerous to step on the area between the holes (red area in fig B) as the soil covers a subsurface fissure.

Þegar kvika er á ferð neðanjarðar í jarðskorpunni geta orðið hreyfingar á sprungum á yfirborði, og nýjar jafnvel myndast. Þetta á sérstaklega við þegar kvikugangar myndast. Sprungurnar geta verið hluti af sigdal, þar sem landsvæði sígur, en jaðrar þess rísa þótt í smærri skala sé. Þess háttar hreyfingar geta haft margs konar áhrif á mannvirki og innviði:

- Hús og önnur mannvirki sem byggð eru þvert yfir sprungur geta skemmst og orðið fyrir miklu tjóni:

Hús á Íslandi eru byggð samkvæmt stöðlum til að lágmarka skemmdir vegna jarðskjálfta, þ.e. vegna hristingsins sem af þeim verður, en þau eru yfirleitt ekki byggð til að þola sprunguhreyfingar undir stoðum þeirra. Samkvæmt Skipulagsreglugerð (nr. 90/2013) er óheimilt að byggja á sprungum, en þó virðist hafa orðið misbrestur á að því hafi alltaf verið fylgt hér á landi. Því er ekki útilokað að tjón gæti orðið á einhverjum húsum á höfuðborgarsvæðinu ef til umbrota kemur innan sprungusveims Krýsuvíkur (sjá t.d. Mynd 2B). Ekki er vitað til þess að hús á

höfuðborgarsvæðinu séu byggð á sniðgengjum, og því ólíklegt að slíkar sprunguhreyfingar valdi tjóni á húsum.

- Önnur mannvirki sem þvera sprungur, svo sem vegir, gangstéttir, vatnslagnir, fráveitulagnir, rafmagnsstrengir, gagnastrengir o.fl. gætu sömuleiðis orðið fyrir tjóni.

- Kaldavatnsöflun:

Neysluvatn höfuðborgarsvæðisins er að mestu tekið úr sprungum innan sprungusveims Krýsuvíkur. Óljóst er hvort og þá hvaða áhrif það hefur á neysluvatnið ef kvikugangur myndast innan sprungusveimsins og miklar sprunguhreyfingar verða. Á þetta hefur ekki reynt hingað til á Íslandi, hvorki á árunum 1975–1984 þegar Kröflueldar stóðu yfir, né frá árinu 2021 til dagsins í dag þegar umbrot á Reykjanesi hafa átt sér stað. Í báðum tilfellum var neysluvatnið tekið frá öðrum svæðum en þeim þar sem miklar sprunguhreyfingar áttu sér stað. Þó má hugsa sér að áhrifin vegna sprunguhreyfinga geti stafað af ólíkum þáttum:

- Skemmdum á borholum og lögnum
- Breytingum á þrýstingi í borholum
- Skemmdir vegna landssigs, t.d. ef mannvirki lenda undir vatni

- Breytingar á landhæð, t.d. vegna myndunar sigdals:

Nokkur þekkt dæmi eru um myndun sigdala, bæði hérlandis og erlendis. Þá hefur land sigið, oft um 1–5 metra, en algengast er þó að sigið sé minna en 2–3 metrar (Abdallah o.fl., 1979; De Pascale o.fl., 2024; Ásta Rut Hjartardóttir o.fl., 2012; Ásta Rut Hjartardóttir o.fl., 2016; Kristján Sæmundsson, 1992; Oddur Sigurðsson, 1980; Wright o.fl., 2006). Lengd sigsvæðisins getur verið tugir kílómetra (Hollingsworth o.fl., 2012), og breidd sigsvæðisins er einnig töluvert breytileg. Tveimur dögum áður en eldgos hófst í Holuhrauni árið 2014 sáust ummerki um nýjan sigdal sem var einungis um 250–450 m breiður (Ásta Rut Hjartardóttir o.fl., 2016), en talið er að myndun mjórra sigdala geti þýtt að grunnt sé á kviku (Rubin, 1992). Breiðari sigdalir hafa einnig sést, t.d. tæplega 5 km breiður sigdalur sem myndaðist í norðurhluta sprungusveims Kröflu í Kelduhverfi þegar Kröflueldar og umbrot þeim tengdum áttu sér stað (Oddur Sigurðsson, 1980). Sigdalurinn var einungis um 1 km breiður þar sem eldgos áttu sér stað í Kröflu, en breikkaði til norðurs (Hollingsworth o.fl., 2012).

Myndun og hreyfing á sigdölum getur valdið því að landsvæði fara undir vatn. Eitt þekktasta dæmið er Skjálftavatn í Kelduhverfi, sem myndaðist árið 1976 eftir að sigdalur myndaðist. Sömuleiðis hafa tjarnir vestan Grindavíkur stækkað töluvert í þeim atburðum sem hófust í október 2023 og eru ekki enn yfirstaðnir þegar þetta er skrifað (desember 2024). Elliðavatn er innan sprungusveims Krýsuvíkur. Ef land sígur þar gætu mannvirki í nágrenninu átt á hættu að fara undir vatn. Þetta gildir sömuleiðis um önnur mannvirki, svo sem vegna vatnsveitu, sem staðsett eru í Heiðmörk, þ.e. ef þau eru í lítilli hæð yfir grunnvatnsborði. Þó má nefna til mótvægis að Elliðavatn er að hluta til uppistöðulón, hækkun vegna stíflugerðar var

um 1 m eftir byggingu stíflu 1924 (t.d. Árni Hjartarson, 1998; Jórunn Harðardóttir o.fl., 2002) og því möguleiki á að lækka vatnsborð að einhverju leyti.

9.1.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir

Margt má gera til þess að lágmarka hættu og tjón vegna sprunguhreyfinga. Slíkar aðgerðir má hafa í huga bæði þegar og eftir að byggð er skipulögð, og þegar þörf er á að umgangast sprungur.

Líkt og með aðrar tegundir náttúruvár er það alltaf matsatriði hvað er ásættanleg áhætta varðandi byggingar á sprungusvæðum. Mikilvægast er að byggja ekki hús þvert yfir sprungur, enda eru þær veikleiki og tilhneigingin er sú að á umbrotatímabilum hreyfast gömlu sprungurnar aftur, þótt ekki megi útiloka að nýjar myndist líka. Ef ákveðið er að byggja á sprungusvæðum er því mikilvægt að skipuleggja byggð með tilliti til þess, og huga sérstaklega að lögnum og strengjum þar sem þau þvera sprungur og hanna innviðina á þann hátt að þeir þoli hreyfingu sprungna a.m.k. upp að vissu marki.

Sömuleiðis verður að huga að því að byggð innan svæða sem geta sigið (sigdalir) lendi ekki undir vatni ef slíkir atburðir gerast. Slíkt mat má gera með því að athuga á hvaða dýpi grunnvatnsborð er á svæðinu. Þar sem vitað er að sigdalir síga yfirleitt ekki mikið meira en 1–6 metra í hvert sinn, má meta hver ásættanlegur hæðarmunur er frá vatnsborði þannig að öruggt sé að byggja með tilliti til þessa.

Ein mesta hættan vegna sprunguhreyfinga er sú að fólk falli í sprungur. Til þess að lágmarka þá hættu má gera tvennt:

1. Koma í veg fyrir að börn og aðrir sem ekki hafa þekkingu til séu í nágrenni við sprungurnar ef ekki er búið að verja þær þannig að ekki sé hætt á falli í þær.
2. Koma í veg fyrir óþarfa umgengni við óvarðar sprungur, og fræða þá sem þurfa að umgangast sprungurnar um það hvernig best sé að haga sér í nágrenni þeirra (eins og lýst er hér fyrir ofan).

Ef þörf er á að fólk fari um hættuleg sprungusvæði er mikilvægt að það sé tryggt, t.d. í línur, en þó þarf að hafa í huga að ekki sé hætt á að línurnar höggvist í sundur vegna grjóts ef manneskja fellur í sprungu, þ.e. línan þarf að vera sæmilega strekkt. Þetta er einnig nauðsynlegt til að koma í veg fyrir að einstaklingurinn falli langt niður í sprunguna. Sömuleiðis þarf einstaklingurinn og samferðafólk hans að kunna að bjarga sér ef upp kemur sú staða að manneskja falli í sprungu.

Varðandi sprunguhreyfingar í nágrenni vatnsveitna (t.d. í Gvendarbrunnum, Kaldárbotnum og Vatnsendakrikum) er mikilvægt að hugað sé að mögulegum skemmdum sem orðið geta á borholum vegna sprunguhreyfinga. Einnig er mikilvægt að huga að vatnslögnum sem þvera sprungur, enda geta þær skemmst við sprunguhreyfingar. Hringtenging vatnsveitna getur verið gagnleg þar sem vatnsveiturnar gætu þá nýst þrátt fyrir að stakar lagnir gefi sig.

Ef í harðbakkann slær eru til áætlanir um að flytja kalt vatn um heitavatsleiðslur frá Hellisheiðarvirkjun. Þær leiðslur þvera þó nyrsta hluta sprungusveims Krýsuvíkur, og því ekki útilokað að sprunguhreyfingar verði þar sem þær liggja. Mikilvægt er fyrir vatnsveitur

á höfuðborgarsvæðinu að skoða fýsileika samtengingar á veitunum til að tryggja rekstraröryggi á svæðinu.

9.2 Jarðskjálftar

Byggingar á Íslandi eiga skv. byggingareglugerðum að þola töluvert álag vegna jarðskjálfta. Þá er átt við hristing vegna jarðskjálfta, ekki þær sprunguhreyfingar sem mynda skjálftana, um þær var rætt í kaflanum hér á undan. Nánar er fjallað um hættu vegna jarðskjálfta í skýrslu Benedikts Halldórssonar og Milad Kowsari (2024) og unnið er að því að meta áhættu þeim tengdum. Jarðskjálftavirkni getur átt sér ólíkar birtingamyndir:

- Jarðskjálftar vegna hreyfinga á sniðgengissprungum
Þetta eru skjálftar sem geta líklega orðið allt að 6,5 stig að stærð, með upptök á sunnanverðum eða miðjum Reykjanesskaga. Hristingur af þeirra völdum gætu valdið töluverðu tjóni á höfuðborgarsvæðinu, sérstaklega á innbúi. Sömuleiðis gætu mannvirki orðið fyrir einhverju tjóni. Hættan á tjóni virðist vera svipuð á mismunandi stöðum innan höfuðborgarsvæðisins. Eystri byggðir borgarinnar liggja nær skjálftasvæðunum, en húsinn þar eru að jafnaði nýlegri og þola því jarðskjálfta betur en hús í vesturhluta borgarinnar sem eru oft eldri, en fjær skjálftasvæðum (Benedikt Halldórsson & Milad Kowsari, 2024). Skjálftavirkni sem stafar af einstaka sniðgengisskjálfta byrjar oft með stórum jarðskjálfta, en eftirskjálftarnir verða færri og smærri eftir því sem tíminn líður.
- Jarðskjálftar vegna gangainnskots
Gangainnskot eins og áttu sér stað í Kröflu árin 1975–1984, Bárðarbungu árið 2014, Fagradalsfjalli 2021–2023 og í Sundhnúkagígum sem hófst árið 2023, valda mikilli jarðskjálftavirkni. Slík skjálftavirkni einkennist af stöðugum smátitringi með stærri skjálftum inn á milli. Virknin er oftast samfelld og getur varað í margar klukkustundir eða daga. Slík jarðskjálftavirkni getur þannig verið til töluverðs ama fyrir íbúa svæða í nágrenninu. Yfirleitt verða skjálftar vegna slíkra gangainnskota ekki mikið stærri en 5,5 að stærð. Töluvert tjón á innbúi getur þó átt sér stað vegna skjálftavirkinnar. Mestu áhrifin á höfuðborgarsvæðinu yrðu ef kvikugangur gengi inn í norðurhluta sprungusveims Krýsuvíkur, sérstaklega í austurhluta borgarinnar í nágrenni þess svæðis þar sem sprungusveimurinn liggur. Þó myndu jarðskjálftar einnig finnast vel ef kvikugangar færu af stað í öðrum nálægum sprungusveimum, þó er ólíklegt að tjón yrði á höfuðborgarsvæðinu vegna þeirra.
- Innflekaskjálftar
Jarðskjálftar sem verða utan skilgreindra eldstöðvakerfa og skjálftabelta kallast innflekaskjálftar. Þetta eru sjaldgæfir skjálftar. Ólíklegt er að slíkur skjálfti yrði af þeirri stærðargráðu að hann myndi valda tjóni á höfuðborgarsvæðinu.

9.2.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir

Mikilvægt er að fylgja byggingareglugerðum þannig að hús og önnur mannvirki þoli þá jarðskjálfta sem geta orðið hér á landi. Eins mætti meta hvort hús og mannvirki sem þegar

hafa verið reist standist kröfur núverandi byggingarreglugerðar og hvort nauðsynlegt sé að styrkja þau. Þetta á við um allar byggingar en þó sérstaklega um samfélagslega mikilvæga innviði s.s. spítala, hjúkrunarheimili, skóla, íþróttamannvirki og aðra staði sem hugsanlega yrðu nýttir sem fjöldahálparstöðvar.

Einstaklingar geta einnig gert ýmislegt til þess að koma í veg fyrir skaða og slys. Á vefsíðu Almannavarna (www.almannavarnir.is) má finna upplýsingar um það hvernig gera megi ráðstafanir til að lágmarka tjón vegna jarðskjálfta. Þar má nefna að festa húsgögn og léttari muni, hafa þunga muni ekki ofarlega í hillum, setja öryggislæsingar á skápa og að festa myndir og ljósakrónur í lokaðar lykkjur. Jarðskjálftar geta sömuleiðis valdið miklu grjóthruni, og því ber að varast að vera í fjalllendi þegar mikil jarðskjálftavirkni gengur yfir.

9.3 Hraunrennsli

Hætta af völdum hraunrennslis inn á höfuðborgarsvæðið með tilliti til mannlífa er tiltölulega lítil þar sem í flestum tilfellum væri nægur tími til að rýma byggð svæði. Hins vegar gæti tjón á byggingum og innviðum orðið gífurlegt, eða jafnvel gjöreyðilegging, ef hraun rynni að eða yfir innviði á svæðinu (t.d. Daníel Páll Jónasson, 2012). Eins getur hraunrennsli utan höfuðborgarsvæðisins tjónað lífæðar þess, t.d. vatnslagnir og rafmagns-innviði, sem gæti haft mikil áhrif á höfuðborgarsvæðinu. Að vetri til væru áhrif enn meiri þar sem hitaveita gæti laskast mikið. Vegir til og frá höfuðborgarsvæðinu geta lokast a.m.k. tímabundið, en þær lokanir þurfa ekki að vera langar eins og sannast hefur í atburðum ársins 2024 umhverfis Grindavík þar sem nýir vegir hafa verið lagðir yfir hraun nokkrum dögum eftir að það rann. Hraungosum fylgir töluverð gasmengun (t.d. SO₂, CO₂, CO, H₂S) sem getur haft áhrif á heilsu manna og dýra og hraunrennsli getur kveikt gróður enda en frekar verður fjallað um þessar hættur hér eftir.

Þegar hraun rennur yfir blaut svæði, s.s. mýri, árfarvegi eða tjarnir, getur vatn sem ekki gufar strax upp vegna snertingar við heitt hraunið festst undir hrauninu. Ef hraunstraumur heldur áfram að renna yfir svæðið þykknar hraunið og þyngd þess þrýstir á vatn í undirlagi hraunsins. Vatnið kemst þá í snertingu við heitt hraunið og myndar gufu. Ef gufuprýstingur undir hrauninu verður nægilegur til að yfirstíga álagsþrýsting hraunsins sprengir gufan sér leið upp í gegnum hraunið og myndar gervígíggagos (t.d. Ármann Höskuldsson, 2003). Í útjaðri höfuðborgarsvæðisins er töluvert af smávötnum þar sem ekki er hægt að útiloka gervígíggamyndun renni hraun yfir þau.

Nái hraun að ganga í sjó fram við höfuðborgarsvæðið er líklegt að mikil eyðilegging hafi þegar átt sér stað í farvegi hraunsins en þar sem hraun gengur í sjó getur skapast staðbundin hætta vegna snöggrar kælingar hraunsins og snöggsuðu sjávar. Gufumekkir sem myndast geta innihaldið saltsýru og gjóskukorn sem myndast við sundrun kvikunnar í snertingu við kaldan sjóinn. Þegar hraun gengur í sjó getur auk þess myndast hraunkeila (e. lava delta) þar sem eðlispungt hraun byggist upp ofan á óstöðugt eðlisléttara sjávarset í mismiklum halla. Aðalhættan sem stafar af hrauni sem gengur í sjó verður ef sjávarsetið lætur undan þunga hraunsins og hraunkeilan hrynur. Þá á sjór jafnvel greiðan aðgang inn í kvikuaðfærslukerfi hraunsins sem aftur getur leitt af sér öflugar sprengingar og gjóskumyndun. Því er mjög varhugavert að ganga út á hraunkeilur þar sem þær ganga í sjó

fram. Nærri hraunkeilum geta öldur orðið heitar, jafnvel nægilega til að brenna illilega (<https://www.usgs.gov/observatories/hvo/science/lava-entering-ocean>).

9.3.1 Dæmi um mögulegar mótvægisáðgerðir

Mikilvæg mótvægisáðgerð er að upplýsa íbúa um æskileg viðbrögð við hraunrennsli, eiga góðar viðbragðsáætlanir og rýmingaráætlanir sem íbúar þekkja. Hönnun og bygging mannvirkja þarf að taka tillit til þeirrar eldfjallavár sem til staðar er á hverjum stað og eins er eðlilegt að styðjast við hættumat við skipulagningu framtíðar byggðar. Mjög mikilvægt er að þekkja þá staði þar sem hraunrennsli er líklegt og reyna eftir fremsta megni að leggja lagnir og veitukerfi á stöðum sem eru ólíklegri til að verða fyrir hraunrennsli. Þar sem ekki er hjá því komist að byggja mikilvæga innviði á líklegum hraunrennissvæðum þarf að reyna að verja innviðina á sem allra bestan hátt (t.d. Dóra Hjálmarsdóttir, 2022, MB-8 og MB-9). Einnig er mikilvægt að til sé efni til þess að gera við þær leiðslur og lagnir sem skemmst geta vegna hraunrennslis. Sömuleiðis er áriðandi að viðbragðsaðilar hafi mannafla og tæki til að bregðast hratt við til að lágmarka afleitt tjón.

Mikilvægt er að fleiri en ein leið sé fær út úr hverfum og bæjarfélögum þar sem hraunavá er fyrirsjáanleg. Hringtenging vatnsveitna getur verið gagnleg þar sem vatnsveiturnar gætu þá nýst þrátt fyrir að stakar lagnir gefi sig. Mikilvægt er fyrir vatnsveitur á höfuðborgarsvæðinu að skoða fýsileika samtengingar á veitunum til að tryggja rekstraröryggi vatnsveitna á svæðinu.

Nú er komin töluverð reynsla af vörnum innviða fyrir hraunrennsli en varnargarðar af mismunandi gerðum hafa verið reistir umhverfis Svartsengi og Grindavík frá því í nóvember 2023 með það fyrir augum að bægja frá hraunrennsli. Þegar hraun hefur runnið upp að varnargörðum þarf að endurmeta varnargildi þeirra og eftir atvikum hækka þá ef mögulegt er. Hafa ber í huga að jafnvel þó hraunvarnargarðar séu byggðir er ekki hægt að treysta því að þeir komi í veg fyrir tjón af völdum hraunrennslis, þeir geta einungis skapað viðbragðstíma sem stundum er nægur ef gos hættir áður en hraun flæðir yfir þá. Í atburðunum umhverfis Grindavík hefur gossprungu opnast í gegnum varnargarð (janúar 2024) og hraun hefur náð að skriða yfir varnargarða (austan Grindavíkur í apríl og norðaustan við Svartsengi í júní 2024) en engin merki eru um að garðarnir hafi ekki staðist það álag sem þeir hafa orðið fyrir. Í júní 2024 var prófað að hægja á hraunrennsli með því að kæla hraun sem skreið yfir varnargarð norðaustan Svartsengis með vatnsdælingu með það fyrir augum að öðlast reynslu á slíkum nauðungarvarnaraðgerðum. Í nóvember 2024 var hraunkæling aftur notuð með það fyrir augum að styrkja hraunkant sem myndaðist þegar hraun rann meðfram hraunvarnargörðum norðan Bláa lónsins. Mikill lærdómur hefur fengist af þessum prufukælingum sem mun nýtast í næstu atburðum.

9.4 Gasmengun á höfuðborgarsvæðinu

Hætta af völdum gasmengunar á höfuðborgarsvæðinu fer eftir magni eldfjallagasa sem losna frá gíg í hverjum atburði, veðri og árstíð. Þær aðstæður geta myndast þar sem sterkur upphafsfasí goss fer saman við þær veðurfarsaðstæður að gasmengun leggst yfir höfuðborgarsvæðið í háum styrk. Á höfuðborgarsvæðinu eru spítalar og hjúkrunarheimili

þar sem veikasta fólk samfélagsins heldur til og afleiðingar gasmengunar geta því orðið miklar. Aðal gasmengun frá upphafsfasa er af völdum SO_2 en það gas hvarfast við súrefni og myndar SO_4 og getur komið aftur yfir höfuðborgarsvæðis í þroskuðum gosmekki sem gosmóða. Þá er frekar um mengun af völdum SO_4 en SO_2 að ræða. Sólarljós flýtir breytingu SO_2 í SO_4 svo minni líkur eru á gosmóðu þegar eldgos verða að vetri til. Frekari rannsókna er þörf á mælingu og áhrifum SO_4 .

9.4.1 Dæmi um mögulegar mótvægisáðgerðir

Gasmengun hefur ekki teljandi áhrif á innviði, a.m.k. ekki í stuttan tíma og hér hefur ekki verið farið yfir áhrif varanlegrar gasmengunar af völdum eldvirkni á innviði (svo sem tæringu rafmagnsinnviða). Mikilvægt er að vakta loftgæði á svæðum þar sem talið er að gasmengun geti átt sér stað. Loftgæðamælar Umhverfisstofnunnar eru víða á höfuðborgarsvæðinu. Þeir eru ýmist gasmælar sem mæla styrk eldfjallagasa m.a. SO_2 eða svifryksmælar sem mæla m.a. styrk gosmóðu (SO_4) og reyk vegna gróðurelda. Ef styrkur SO_2 og/eða gosmóðu fer yfir viss mörk er mikilvægt að fylgja viðbragðásætlun Sóttvarnalæknis, Umhverfisstofnunnar, Vinnueftirlitsins og almannavarnardeild ríkislögreglustjóra. Þar er ráðlagt að forðast áreynslu utandyra, loka gluggum o.s.frv. (<https://loftgaedi.is>). Gasmengun er tímabundinn atburður og vindar eru oftast fljótir að feykja henni í burtu. Því er oftast best að sitja mikla gasmengun af sér innandyra frekar en að reyna að komast úr henni á meðan á henni stendur. Áðstæður eru breytilegar milli atburða og því þarf að takast á við hvern atburð fyrir sig.

9.5 Mengun í grunnvatnsbólum

Ef til eldsumbrota og/eða töluverðra sprunguhreyfinga kemur í nágrenni vatnsbóla höfuðborgarsvæðisins þarf að huga sérstaklega að vatnsgæðum drykkjarvatns höfuðborgarbúa. Mengun í drykkjarvatninu gæti komið til vegna ólíkra þátta, til dæmis vegna:

- kvikugasa neðanjarðar
- sprunguhreyfinga
- efnamengunar ofanjarðar frá eldgosi
- efnamengunar ofanjarðar vegna gróðurelda

Höfuðborgarsvæðið virðist þó vera vel sett hvað varðar vatnsmagn. Veitur sjá stórum hluta höfuðborgarbúa fyrir vatni, þar á meðal flestum Reykvíkingum, Mosfellsbæingum og Seltirningum. Þær eru með borholur á tveimur svæðum í Heiðmörk; í Vatnsendakrikum og á svæðinu við Gvendarbrunna (á því svæði eru þær einnig með borholur við Jaðar og Myllulækjartjörn) (Mynd 9). Ef annað svæðið dytti út, væri hægt að auka dælingu úr hinu svæðinu tímabundið til að anna vatnspörf fyrir þann hluta höfuðborgarsvæðisins sem Veitur þjóna. Fjarlægð milli vatnsveitukerfa minnkar þó líkur á að þau myndu öll gefa sig í einu ef til sprunguhreyfinga og/eða eldvirkni kæmi í sprungusveim Krýsuvíkur. Borholur Mosfellsbæjar eru í Laxnesdýi og Veitur eru með vatnsból á Völlum á Kjalarnesi. Laxnesdý og Vellir eru sérstaklega vel sett, enda eru þau vatnsból utan sprungusveimsins og í mestri fjarlægð frá svæðinu þar sem eldvirkni getur átt sér stað. Vatnsveita Hafnarfjarðar er með

borholur í Kaldárseli, Vatnsveita Kópavogs nýtir borholur í Vatnsendakrika í Heiðmörk og veitir auk þess vatni til vatnsveitu Garðabæjar.

9.5.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir

Eldfjallagas getur haft áhrif á heilsu og mikilvægt er að vakta sérstaklega álag vegna mögulegra áhrifa á vatnsból. Ef vatn með háum styrk málmsambanda eða flúors kemst í grunnvatn sem notað er til mann- og/eða dýraeldis getur það valdið alvarlegu heilsutjóni. Mælingar á úrkomu gefa vísbendingar um þau efni sem mikilvægast er að vakta. Vöktun stöðuvatna er mikilvæg í þessu samhengi en þau geta gefið skýrar vísbendingar um hækkun mengandi efna sem borist gætu í neysluvatn á svæðinu. Vatnsveitur á höfuðborgarsvæðinu mæla leiðni, pH og einnig ýmis efnasambönd á sínu svæði. Mikilvægt er að samræma vöktun út frá þeim gögnum sem safnast og meta mikilvægustu efnin sem stjórna gæði neysluvatns. Sjá þarf til þess að grunnildi efnasambanda í vatni séu þekkt svo mengunaráhrif af völdum eldfjallagasa greinist sem fyrst.

Hringtenging vatnsveitna getur verið gagnleg þar sem vatnsveiturnar gætu þá nýst þrátt fyrir að stakar lagnir gefi sig. Ef í harðbakkann slær eru til áætlanir um að flytja kalt vatn um heitavatsleiðslur frá Hellisheiðarvirkjun. Þær leiðslur þvera þó nyrsta hluta sprungusveims Krýsuvíkur, og því ekki útilokað að sprunguhreyfingar verði þar sem þær liggja. Mikilvægt er fyrir vatnsveitur á höfuðborgarsvæðinu að skoða fýsileika samtengingar á veitunum til að tryggja rekstraröryggi vatnsveitna á svæðinu.

Einnig er mikilvægt að til sé efni til þess að gera við þær leiðslur og lagnir sem skemmst geta vegna sprunguhreyfinga og annarrar náttúruvár.

9.6 Gjóskufall

Gjóskufall er fremur til ama í starfsemi og daglegu lífi en að það hafi mikil áhrif á inniviði sem slíka þó að gjóskufall í mjög miklu magni geti ógnað burðarþoli mannvirkja. Gjóskufall hefur mikil áhrif á skyggni og getur jafnvel lamað daglega starfsemi. Það sást t.d. í Eyjafjallajökuls- og Grímsvatnagosum árin 2010 og 2011 þegar kolniðamyrt varð um miðjan dag sem olli m.a. því að starfsfólk komst ekki til vinnu. Gjóskufall spillir loftgæðum, ertir augu og getur stíflað loftsíur og jafnvel fráveitukerfi. Gjóska getur tjónað flugvéla-hreyfla sem og aðrar vélar. Sölt sem loða við gjóskukorn geta valdið skammhlaupum í tengivirkjum og valdið mengun á jörðu sem og í vatni. Enn og aftur má grípa til lærdóms sem hefur fengist af atburðum á Reykjanesskaga en gjóskufall varð í Reykjanesbæ í lok ágúst 2024 þegar nornahár féllu og fylltu síur í sundlaug Keflavíkur. Magn þeirrar gjósku sem þar féll var þó óverulegt.

Eldstöðvakerfi nærri höfuðborgarsvæðinu eru ekki líkleg til að valda teljandi gjóskufalli þar sem einkennisgos þeirra eru hraungos með mjög staðbundnu gjóskufalli. Fá gjóskulög eru varðveitt á höfuðborgarsvæðinu sem segir okkur að teljandi gjóskufall verður einungis í undantekningaratvikum. Þó má benda á að ólíklegt er að fyrirnefnt gjóskufall í Reykjanesbæ varðveitist sem gjóskulag í jarðvegi til framtíðar. Því er líklegt að aðrir slíkir óverulegir atburðir hafi átt sér stað í fyrndinni þó að ummerki þeirra séu ekki varðveitt.

Eldstöðvakerfi fjarri höfuðborginni sem eru þekkt fyrir sprengigos og gjóskuframleiðslu (s.s. Hekla og Katla) geta valdið gjóskufalli á höfuðborgarsvæðinu séu vindáttir óhagstæðar. Gjóska frá Kötlugosum árin 920 og 1500 finnst nærri höfuðborgarsvæðinu en gjóskulögin eru innan við 1 cm á þykkt (t.d. Guðrún Larsen, 2000). Starfsemi og innviðir höfuðborgarsvæðisins myndu þó finna töluvert fyrir gjóskufalli sem myndar 1 cm þykkt gjóskulag. Flatarmál höfuðborgarsvæðisins er um 1000 km² og ef 1 cm þykkt gjóskulag legðist jafnt yfir allt svæðið þyrfti að takast á við 10 milljón m³ af gjósku á svæðinu. Til viðmiðunar tekur 50 m laugin í sundlaug Kópavogs um 1700 m³ og efnið gæti því fyllt hana tæplega 5900 sinnum. Gjóskufall gæti því haft töluverð áhrif á starfsemi höfuðborgarsvæðisins. Komi til gjóskufalls á höfuðborgarsvæðinu er viðbúið að skyggni verði slæmt og umferð myndi raskast töluvert en gjóska minnkar viðnám vega og hylur vegmerkingar. Gjóskufall gæti einnig haft töluverð áhrif á fráveitukerfi borgarinnar og jafnvel stíflað þau að hluta. Gjóskufall er þó líklegra til að valda skammtímaáhrifum á höfuðborgarsvæðinu.

9.6.1 Dæmi um mögulegar mótvægisaðgerðir

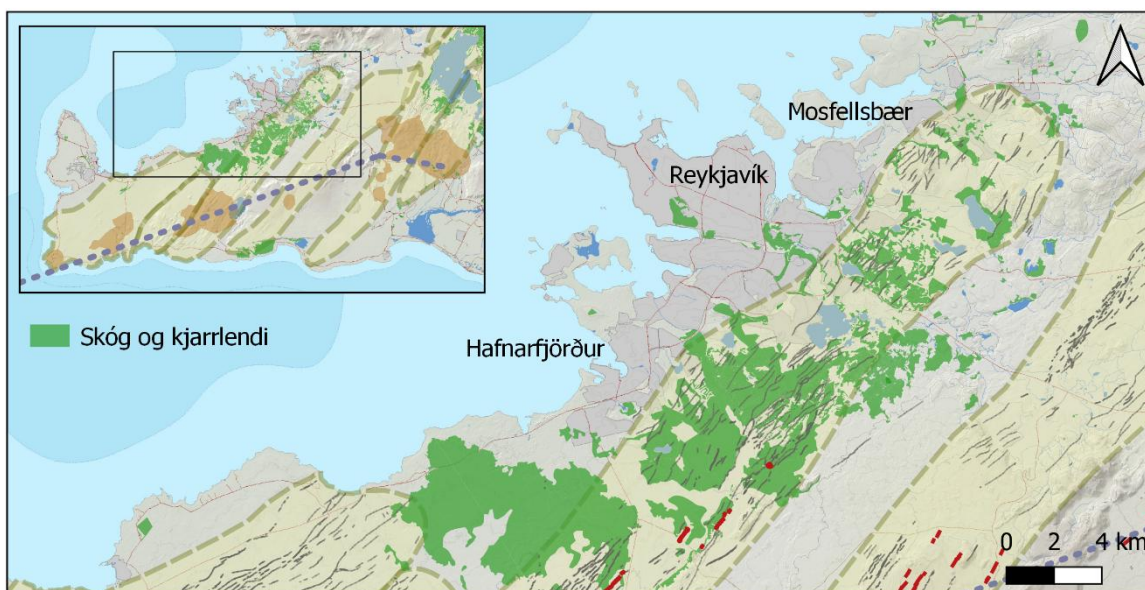
Gjóskufall vegna neðansjávargoss út af Reykjanestá hefur verið hermt (Bergrún A. Óladóttir o.fl. 2023) og niðurstöður benda til þess að magn gjósku hefði ekki áhrif á burðarþol bygginga á Reykjanesskaga. Engu að síður er eðlilegt að fylgjast með gjóskuþykkt á þökum ef til gjóskufalls kemur og ef hún nálgast burðarþol bygginga er æskilegt að hreinsa þök eða styrkja þau. Mikilvægt er að hreinsa götur og þau svæði sem verða fyrir gjóskufalli eins mikið og mögulegt er eftir atvikum á meðan á gjóskufalli stendur eða skömmu eftir að því lýkur til að koma í veg fyrir að fráveitukerfi stíflist. Fylgjast þarf með loftsíum þar sem viðkvæm starfsemi á sér stað s.s. á sjúkrahúsum. Gjóska getur haft áhrif á aksturskilyrði bæði á vegum og á flugbrautum, svo huga þarf að hreinsun þeirra. Tilfok gjósku eftir að gjóskufalli líkur getur einnig dregið mjög úr skyggni og akstursskilyrðum, því er eðlilegt að reyna að þrífa vegi og rykbinda gjósku þar sem hún er þykkust næst vegum. Á meðan gjóskufalli stendur er æskilegt að hafa rykgrímur þurfi fólk nauðsynlega að vera utandyra.

9.7 Gróðureldar

Gróðureldar eru afleidd vá af hraunrennsli og gjóskufalli sem þarf að taka alvarlega eins og sést hefur í umbrotum Reykjanesskaga síðustu ára. Þar sem hraun rennur um gróið land getur hitinn frá hraunjöðrum valdið íkveikjum og glóandi gjóska sem fellur á gróið land getur einnig valdið íkveikjum ef gróður er nægilega þurr. Þeir eldar sem kvikna út frá hraunjöðrum fylgja útbreiðslu hrauns en þeir eldar sem kvikna af völdum glóandi gjósku hafa óreglulegri dreifingu og geta ýmist valdið staðbundnum blettóttum brunasvæðum eða samfelldum stærri svæðum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 27.11.2024). Í fyrsta gosinu í Fagradalsfjalli (2021) bar meira á eldum sem kviknuðu út frá gjósku en hrauninu sjálfu. Í gosinu við Litla-Hrút (sumar 2023) var mosi mjög þurr og stór mosavaxin svæði brunnu út frá hraunjaðri. Veður og rakastig gróðurs (t.d. þurrka- eða rigningartíð) hefur mikil áhrif á gróðurelda en vindur getur ýft upp glóð. Mismikill eldsmatur er í gróðri; lyng og grös brenna frekar á meðan glóð lifir frekar í mosa. Í reyk frá gróðureldum er kolmónoxíð sem er skaðlegt og í sumum tilfellum getur reykur frá gróðureldum verið jafn skaðlegur og jafnvel skaðlegri en mengun af völdum eldfjallagasa frá gosupptökum og hrauni. Vert er að fara

sérstaklega varlega þar sem saman kemur mengun frá yfirstandandi eldgosí og afleiddum gróðureldum.

Höfuðborgarsvæðið er stundum nefnt af gárungum sem einn af stærstu skógum landsins og í Heiðmörk og Elliðaárdal eru víða skógar. Athyglisvert er að mun meira af skóg- og kjarlendi finnst á norðurhluta sprungusveims Krýsuvíkur, þ.e. í nágrenni höfuðborgarsvæðisins, en öðrum sprungusveimum Reykjaness, þar sem ýmist má finna lággróður eða nánast engan gróður (Mynd 12). Því gæti verið hætt á umfangsmeiri gróðureldum í tengslum við eldgos á mið- eða norðurhluta sprungusveims Krýsuvíkur en sést hafa í gosum síðustu ára innan annarra sprungusveima Reykjanesskaga. Því má ekki gleyma vá af völdum gróðurelda á höfuðborgarsvæðinu og tilheyrandi loftmengun út frá þeim en mengun getur mögulega einnig haft áhrif á drykkjarvatn.



Mynd 12 Skógur og kjarlendi í nágrenni höfuðborgarsvæðisins. Gróðurpekja frá Landi og skógi.

Vegetation cover close to the capital area (Data from Land and Forest Iceland).

9.7.1 Dæmi um mögulegar mótvægisáðgerðir

Við skipulag svæðis þarf að passa að nóg sé af náttúrulegum varnalínum s.s. vötnum, ám, mýrum, vegum, stígum o.s.frv. svo hólfun sé til staðar til að koma í veg fyrir að stór svæði geti brunnið. Tryggja þarf aðgengi til slökkvistarfa þar sem gróður liggur upp að byggð. Hættulegustu skógar m.t.t. gróðurelda eru illa grisjaðir gamlir skógar því þar er mikið af gömlum og þurrum greinum sem brenna vel. Lauftré brenna verr en barrtré og því er ákjósanlegt að hafa blandaða skóga nærri byggð (Brunamálastofnun, 27.11.2024).

Lokaorð

Íslensk stjórnvöld kölluðu eftir uppfærðu hættu- og áhættumati vegna eldgosavár fyrir Reykjanesskaga í kjölfar umbrota umhverfis Grindavík í nóvember 2023. Veðurstofa Íslands vinnur nú að slíku hættu- og áhættumati og er áætlað að því ljúki um mitt ár 2026. Áhersluatriði verkefnisins eru hætta og áhætta af völdum jarðskjálfta, sprungna, hraunrennslis, gasmengunar, vatnsmengunar og gjóskufalls. Hér hefur verið gefið yfirlit yfir helstu eldfjallavá sem stafað getur að höfuðborgarsvæðinu. Því til stuðnings verða í framhaldi keyrð ýmiskonar líkön og greiningar gerðar til að kortleggja berskjölduð svæði og meta áhættu. Skýrslur verða gefnar út með niðurstöðum þessara athuganna.

Höfuðborgarsvæðið er vel staðsett m.t.t. náttúruvár og eldfjallavá hefur verið hverfandi síðustu 800 árin. Þar sem nýtt gosskeið er hafið á Reykjanesskaga þurfa samfélög á höfuðborgarsvæðinu að aðlagast nýjum veruleika og undirbúa sig til að takast á við afleiðingar eldgosa í nágrenni sínu. Farið hefur verið gróflega yfir jarðfræði höfuðborgarsvæðisins og helstu eldfjallavá sem getur stafað að höfuðborgarsvæðinu vegna elds-umbrota á Reykjanesskaga og fjarlægari eldstöðvakerfum. Auk þess hafa verið sett fram dæmi um mögulegar mótvægisáðgerðir sem hægt væri að grípa til en jafnframt er minnt á sviðsábyrgðarreglu úr 2. gr. almannavarnalaga nr. 82/2008, þ.e. „sá aðili sem fer venjulega með stjórn tiltekins sviðs samfélagsins eða tiltekins svæðis eða umdæmis skal skipuleggja viðbrögð og koma að stjórn aðgerða þegar hættu ber að garði“ (Stefna stjórnvalda í almannavarna- og öryggismálum ríkisins, 2013).

Lágmarka má tjón af völdum náttúruhamfara með góðum undirbúningi og skipulagi, enda getur bæði jarðfræðileg þekking og líkanagerð gefið til kynna hvaða svæði eru viðkvæmari en önnur hvað varðar náttúruvá af völdum eldsumbrota, jarðskjálfta og sprunguhreyfinga. Það má t.d. velja framtíðar byggingasvæði þar sem minni líkur eru á tjóni af völdum náttúruhamfara, eða ákveða hvers konar starfsemi fer fram á slíkum svæðum. Sömuleiðis má undirbúa og verja innviði sem nauðsynlega þurfa að vera staðsettir á svæðum þar sem meiri hætta er á tjóni, eða gera áætlanir sem taka til þess hvað gera þarf ef innviðirnir verða fyrir tjóni af völdum náttúruhamfara. Áhættumatið sem skýrsla þessi er hluti af er unnið í góðu samstarfi við sveitarfélög, veitufyrirtæki, Vegagerðina og fleiri aðila sem hag geta haft af vinnu þessari. Markmiðið er að samfélagið sé sem best undirbúið þegar eldsumbrot eða önnur náttúruvá eiga sér stað í nágrenni höfuðborgarsvæðisins, og á Reykjanesskaganum í heild sinni.

Heimildir

- Abdallah, A., V. Courtillot, M. Kasser, A. Y. Ledain, J. C. Lepine, B. Robineau, J. C. Ruegg, P. Tapponnier & A. Tarantola. (1979). Relevance of Afar seismicity and volcanism to the mechanics of accreting plate boundaries. *Nature*, 282(5734), 17–23. <https://doi.org/10.1038/282017a0>
- Ármann Höskuldsson. (2003). „Hvernig myndast gervíggar?“ *Vísindavefurinn*, 8. október 2003. Sótt 27. nóvember 2024. <https://visindavefur.is/svar.php?id=3789>.
- Árni Hjartarson. (1981). Síðkvarteri jarðlagastaflinn í Reykjavík og nágrenni. *Náttúrufræðingurinn*, 50(2), 108–117. <https://timarit.is/page/4259932#page/n29/mode/2up>
- Árni Hjartarson. (1998). *Elliðaárdalur: land og saga*. Mál og Mynd.
- Árni Hjartarson. (2005). *Jarðgöng á höfuðborgarsvæði* (Greinargerð 05163). ÍSOR. [https://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/JardgongRvk/\\$file/Jar%F0g%F6ng_Rvk.pdf](https://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/JardgongRvk/$file/Jar%F0g%F6ng_Rvk.pdf)
- Árni Hjartarson. (2007). *Höfuðborgarjarðfræði. Vötn og vatnasvið á höfuðborgarsvæðinu – ástand og horfur*. Málþing haldið í Reykjavík 30. mars 2007.
- Áslaug Geirsdóttir & Jón Eiríksson. (1994). Sedimentary facies and environmental history of the Late-glacial glaciomarine Fossvogur sediments in Reykjavík, Iceland. *Boreas*, 23(2), 164–176. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1994.tb00597.x>
- Ásta Rut Hjartardóttir, Páll Einarsson, Bramham, E. & Wright, T.J. (2012). The Krafla fissure swarm, Iceland and its formation by rifting events. *Bulletin of Volcanology*, 74(9), 2139–2153. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0659-0>
- Ásta Rut Hjartardóttir, Páll Einarsson, Magnús Tumi Guðmundsson, & Þórdís Högnadóttir. (2016). Fracture movements and graben subsidence during the 2014 Bárðarbunga dike intrusion in Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310, 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.12.002>
- Ásta Rut Hjartardóttir, Tobias Dürig, Michelle Parks, Vincent Drouin, Vigfús Eyjólfsson, Hannah Reynolds, Páll Einarsson, Esther Hlíðar Jensen, Birgir Vilhelm Óskarsson, Joaquín M. C. Belart, Joël Ruch, Nils B. Gies, & Gro B.M. Pedersen, G.B.M. (2023). Pre-existing fractures and eruptive vent openings during the 2021 Fagradalsfjall eruption, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 85(10), 56. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01670-z>
- Benedikt Halldórsson & Kowsari, M. (2024). *Greining skjálftavárlíkinda fyrir höfuðborgarsvæðið* (Skýrsla 2024–002). Veðurstofa Íslands.
- Brunamálastofnun. (á.á.). *Gróðureldar*. Sótt 27.11.2024 af https://www.brunabot.is/forvarnir_grodueldar.pdf.
- Bruno, B.C., Fagents, S.A., Thordarson, T., Baloga, S.M. & Pilger, E. (2004). Clustering within rootless cone groups on Iceland and Mars: Effect of nonrandom processes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109(E7), 2004JE002273. <https://doi.org/10.1029/2004JE002273>
- Clifton, A., & Kattenhorn, S.A. (2006). Structural architecture of a highly oblique divergent plate boundary segment. *Tectonophysics*, 419(1–4), 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.016>

- Daníel Páll Jónasson. (2012). Hraunflæði á höfuðborgarsvæðinu. *Saga hraunflæðis á svæðinu á nútíma og kortlagning mögulegra farvega til byggða*. Óbirt BS ritgerð. Háskóli Íslands.
- De Pascale, G.P., Fischer, T.J., Moreland, W.M., Halldór Geirsson, Hrubcová, P., Drouin, V., Forester, D., Payet--Clerc, Brum Da Silveira, D., Vlček, J., Benedikt G. Ófeigsson, Ármann Höskuldsson, Helga Kristín Torfadóttir, Iðunn Kara Valdimarsdóttir, Birta Dís Jónsdóttir Blöndal, Ingibjörg Jónsdóttir, Sigurjón Jónsson & Thor Thordarson. (2024). On the Move: 2023 Observations on Real Time Graben Formation, Grindavík, Iceland. *Geophysical Research Letters*, 51(14), e2024GL110150. <https://doi.org/10.1029/2024GL110150>
- Delmelle, P. & Stix, J. (2000). Volcanic gases. Í Haraldur Sigurðsson, Houghton B., Rymer H., Stix J. & McNutt S. (ritstj.), *Encyclopedia of Volcanoes* (pp.803-816). Academic Press, London.
- Dóra Hjálmarsdóttir. (2022). Varnir mikilvægra Innviða á Reykjanesi gegn hraunflæði. Samantekt. Minnisblöð 1–32, mismunandi höfundar. Vinnuhópur Varnir mikilvægra innviða. Unnið af Verkís fyrir Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra.
- Drouin, V. & Freysteinn Sigmundsson (2019). Countrywide observations of plate spreading and glacial isostatic adjustment in Iceland inferred by sentinel-1 radar interferometry, 2015–2018. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 8046–8055. <https://doi.org/10.1029/2019GL082629>
- Ducrocq, C., Þóra Árnadóttir, Páll Einarsson, Sigurjón Jónsson, Vincent Drouin, Halldór Geirsson, & Ásta Rut Hjartardóttir (2024). Widespread fracture movements during a volcano-tectonic unrest: the Reykjanes Peninsula, Iceland, from 2019–2021 TerraSAR-X interferometry. *Bulletin of Volcanology*, 86(2), 14. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01699-0>
- Elliðaárnar skaðræðisfljót (1968, 28. febrúar). *Morgunblaðið*, bls. 1. <https://timarit.is/page/1392331#page/n0/mode/2up>
- Einar Gunnlaugsson, Gestur Gíslason, Grétar Ivarsson & Snorri Pall Kjaran. (2000). Low temperature geothermal fields utilized for district heating in Reykjavik, Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 2000* 74. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0436.PDF>
- Eysteinn Tryggvason. (1968). Measurement of surface deformation in Iceland by precision leveling. *Journal of Geophysical Research*, 73(22), 7039–7050. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB073i022p07039>
- Freysteinn Sigmundsson, Hooper, A., Sigrún Hreinsdóttir, Kristín S. Vogfjörð, Benedikt G. Ófeigsson, Elías Rafn Heimisson, Dumont, S., Parks, M., Spaans, K., Gunnar B. Guðmundsson, Drouin, V., Þóra Árnadóttir, Kristin Jónsdóttir, Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Hildur Maria Friðriksdóttir, Hensch, M., Páll Einarsson, Eyjólfur Magnússon, ... Eva P.S. Eibl. (2015). Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bardarbunga volcanic system, Iceland. *Nature*, 517(7533), 191–195. <https://doi.org/10.1038/nature14111>
- Freysteinn Sigmundsson, Parks, M., Hooper, A., Halldór Geirsson, Kristín S. Vogfjörð, Drouin, V., Benedikt G. Ófeigsson, Sigrún Hreinsdóttir, Sigurlaug Hjaltadóttir, Kristín Jónsdóttir, Páll Einarsson, Barsotti, S., Horálek, J. & Þorbjörg Ágústsdóttir. (2022).

- Deformation and seismicity decline before the 2021 Fagradalsfjall eruption. *Nature*, 1–6 523–528. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05083-4>
- Freysteinn Sigmundsson, Parks, M, Halldór Geirsson, Hooper, A, Drouin, V., Kristín S. Vogfjörð, Benedikt G. Ófeigsson, Greiner, S.H.M., Yilin Yang, Lanzi, C., De Pascale, G.P., Kristín Jónsdóttir, Sigrún Hreinsdóttir, Tolpekin, V., Hildur María Friðriksdóttir, Páll Einarsson, & Barsotti, S. (2024). Fracturing and tectonic stress drive ultrarapid magma flow into dikes. *Science*, 383(6688), 1228–1235. <https://doi.org/10.1126/science.adn2838>
- Freysteinn Sigmundsson, Páll Einarsson, Ásta Rut Hjartardóttir, Drouin, V., Kristín Jónsdóttir, Þóra Árnadóttir, Halldór Geirsson, Sigrún Hreinsdóttir, Siqi Li, & Benedikt Gunnar Ófeigsson. (2020). Geodynamics of Iceland and the signatures of plate spreading. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106436. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.014>
- Freysteinn Sigurðsson. (2007). *Vatnafar á höfuðborgarsvæðinu. Vötn og vatnasvið á höfuðborgarsvæðinu – ástand og horfur*. Málþing haldið í Reykjavík 30. mars 2007.
- Gísli Viggósson, Jónas Elíasson, Sigurður Sigurðarson. (2016). *Ákvörðun á flóðhæð í Básendaflóði*. Vegagerðin. <https://wp-beta.vegagerdin.is/wp-content/uploads/2023/07/akvordun-a-flodhaed-basendaflods.pdf>
- Guðni Axelsson, Einar Gunnlaugsson, Þorgils Jónasson & Magnús Ólafsson. (2010). Low-temperature geothermal utilization in Iceland – Decades of experience. *Geothermics*, 39(4), 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.002>
- Gunnar Böðvarsson. (1961). Physical characteristics of natural heat resources in Iceland. *Jökull*. 11. www.osti.gov/etdeweb/biblio/5201928
- Gylfi Páll Hersir, Knútur Árnason, & Arnar Már Vilhjálmsson. (2013). 3D inversion of magnetotelluric (MT) resistivity data from Krýsuvík high temperature geothermal area in SW Iceland. *Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 14. georg.cluster.is/wp-content/uploads/2016/12/3d-inversion-of-magnetotelluric-mt-resistivity-data-from-krysuvik-high-temperature-geothermal-area-in-sw-iceland.pdf
- Halldór Björnsson, Guðrún Elín Jóhannsdóttir, Angel Ruiz Angulo, Kevin Dubois & Emil Snorri Árnason. (2022). *Mat á endurkomautíma óveðursflóða reiknað með Delft3D-FM*. (Skýrsla 2022-009). Veðurstofa Íslands. https://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2022/Ovedursflod_Skyrsla_VI2022-009.pdf
- Hansell A.L., Horwell C.J., Oppenheimer C. (2006). The Health Hazards of Volcanoes and Geothermal areas. *Occup Environ Med*, 63, 149–156. doi.org/10.1136/oem.2005.022459
- Haukur Jóhannesson, Kristbjörn Egilsson & Ævar Petersen. (1988). *Náttúrufar Viðeyjar*. Náttúrufraeðistofnun Íslands: Reykjavík. https://utgafa.ni.is/skyrslur/1988/NI-Natturufar_Videy_1988.pdf
- Hollingsworth, J., Leprince, S., Ayoub, F. & Avouac, J.P. (2012). Deformation during the 1975–1984 Krafla rifting crisis, NE Iceland, measured from historical optical imagery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B11). <https://doi.org/10.1029/2012JB009140>

- Hreggviður Norðdahl & Halldór G. Pétursson. (2005). Relative sea-level changes in Iceland: new aspects of the Weichselian deglaciation of Iceland. Í *Iceland - Modern Processes and Past Environments* (bls. 25-78). Elsevier
- Ingvar B. Friðleifsson. (1979). Geothermal activity in Iceland. *Jökull* 29(29) www.osti.gov/etdeweb/biblio/5856259
- Ingvar B. Friðleifsson. (1985). Jarðsaga Esju og nágrennis. *Árbók Ferðafélags Íslands*, 1985. Ferðafélag Íslands.
- Orkuveitan. (á.á.). *Hvað ef það gýs nær höfuðborgarsvæðinu?*. Sótt á <https://orkuveitan.is/um-or/fyrir-fjolmidla/frettir/hvad-ef-thad-gys-naer-hofudborgarsvaedinu>
- Jarðskjálftar um allt Suðvesturland (1929, 29. júlí). *Ísafold - Vikublað Morgunblaðsins*, bls. 2–3. timarit.is/page/3954685?iabr=on#page/n0/mode/2up/search/Jar%C3%B0skj%C3%A1lfar%20um%20allt%20Su%C3%B0vesturland
- Jón Kristinn Helgason, Tómas Jóhannesson, Árni Hjartarson & Halldór G. Pétursson. (2014). *Ofanflóðahættumat fyrir Kjalarnes neðan Esjuhlíða. DRÖG með tillögu að hættumatskorti*. (Skýrsla VÍ 2014-004). Veðurstofa Íslands.
- Jórunn Harðardóttir, Sverrir Óskar Elefsen, Jóna Finndís Jónsdóttir, Helga P. Finndóttir, Svava Björk Þorláksdóttir. (2002). Mælingar á dýpi, straumum, botngerð og gróðurþekju í Elliðavatni. Skýrsla OS2002/050). Orkustofnun.
- Kjartan Thors. (1992). Bedrock, sediments, and faults in Thingvallavatn. *Oikos*, 69–79. <https://doi.org/10.2307/3545043>
- Kristján Jónasson, Bjarni Bessason, Á. Helgadóttir, Páll Einarsson, G. B. Guðmundsson, Bryndís Brandsdóttir, Kristín S. Vogfjörð, & Kristín Jónsdóttir. (2021). A harmonised instrumental earthquake catalogue for Iceland and the northern Mid-Atlantic Ridge. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(7), 2197–2214. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2197-2021>
- Kristján Sæmundsson. (1979). Outline of the geology of Iceland. *Jökull*, 29, 7–28. <https://jokull.jorfi.is/articles/jokull1979.29/jokull1979.29.007.pdf>
- Kristján Sæmundsson. (1992). Geology of the Thingvallavatn area. *Oikos*, 64(1–2), 40–68. <https://doi.org/10.2307/3545042>
- Kristján Sæmundsson. (1995). Um aldur stóru dyngnanna á utanverðum Reyjanesskaga. Í Björn Hróarsson, Dagur Jónsson & Sigurður Sveinn Jónsson (ritnefnd). *Eyjar í Eldhafi*. Reykjavík, Skákaprent.
- Kristján Sæmundsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Árni Hjartarson, Ingibjörg Kaldal, Sigurður G. Kristinsson, & Skúli Víkingsson. (2016). *Jarðfræðikort af Suðvesturlandi 1:100 000* (2. útg.) [kort]. Íslenskar orkurannsóknir.
- Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson. (2006). *Varðar líkur á hraunrennsli og öskufalli milli Hafnarfjarðar og Keflavíkur*. (Greinagerð 06006). Unnið fyrir Samráðsnefnd um úttekt á Reykjavíkurlugvelli. ÍSOR.
- Kristján Sæmundsson, & Magnús Á. Sigurgeirsson. (2013). Reykjanesskagi. Í Júlíus Sólmes, Freysteinn Sigmundsson, & Bjarni Bessason (ritstj.), *Náttúruvá* (bls. 379–401). Viðlagatrygging Íslands/ Háskólaútgáfan.
- Kristján Sæmundsson, Magnús Á. Sigurgeirsson & Guðmundur Ómar Friðleifsson. (2020). Geology and structure of the Reykjanes volcanic system, Iceland. *Journal of*

- Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106501.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.022>
- Lög um almannavarnir nr. 82/2008.
- Magnús Á. Sigurgeirsson. (1995). Yngra-Stampgosið á Reykjanesi. *Náttúrufræðingurinn*, 64(3), 211–230. <https://timarit.is/page/4274012#page/n48/mode/2up>
- Magnús Á. Sigurgeirsson, Sigmundur Einarsson. (2019). Reykjanes og Svartsengi. Í Bergrún Arna Óladóttir, Guðrún Larsen & Magnús Tumi Guðmundsson. *Íslensk eldfjallavefsjá*. Veðurstofa Íslands, Háskóli Íslands og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra. Sótt af <https://islenskeldfjoll.is/?volcano=REY>
- Margrét Traustadóttir. (2013). *Hallamælingar í Búrfellsgjá sumarið 2012*. BS ritgerð, Háskóli Íslands. <http://hdl.handle.net/1946/15226>
- Michalczevska, K., Sigrún Hreinsdóttir, Þóra Árnadóttir, Sigurlaug Hjaltadóttir, Þorbjörg Ágústsdóttir, Magnús T. Guðmundsson, Halldór Geirsson, Freysteinn Sigmundsson & Gunnar Guðmundsson. (2012). Inflation and deflation episodes in the Krisuvik volcanic system. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2012*, V33A-2843. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012AGUFM.V33A2843M/abstract>
- Náttúrufræðistofnun Íslands. (á.á). *Gróðureldar við gosstöðvar við Fagradalsfjall*. Sótt 27.11.2024 af <https://www.ni.is/is/rannsoknir/vokun-og-rannsoknir/grodueldar/grodueldar-vid-fagradalsfjall>
- Neal, C.A., Anderson K.R. (2020). Preliminary Analyses of Volcanic Hazards at Kilauea Volcano, Hawaii, 2017–2018. *USGS Open File Report 2020–1001*. U.S. Department of the Interior. <https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20201002>
- Oddur Sigurðsson. (1980). Surface deformation of the Krafla fissure swarm in two rifting events. *Journal of Geophysics – Zeitschrift Fur Geophysik*, 47(1–3), 154–159. <https://journal.geophysicsjournal.com/JofG/article/view/83>
- Páll Einarsson. (1991). Umbrotin við Kröflu 1975–1989. Í Arnþór Garðarsson & Árni Einarsson (ritstj.), *Náttúra Mývatns* (bls. 97–139). Hið íslenska náttúrufræðifélag.
- Páll Einarsson. (2014). Mechanisms of Earthquakes in Iceland. Í: Beer, M, Kouglioumtzoglou, I.A., Patelli, E., & Au, I.S.-K. (ritstj.), *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 1–15). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_298-1
- Páll Einarsson, Ásta Rut Hjartardóttir, Sigrún Hreinsdóttir, & Páll Imsland. (2020). The structure of seismogenic strike-slip faults in the eastern part of the Reykjanes Peninsula Oblique Rift, SW Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106372. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.029>
- Páll Einarsson, Haukur Jóhannesson, & Ásta Rut Hjartardóttir. (2018). Bergsprungur og byggingar á höfuðborgarsvæðinu. *Verktækni–Tímarit VFÍ*, bls, 21–25.
- Páll Einarsson, & Kristján Sæmundsson. (1987). *Earthquake Epicenters 1982–1985 and Volcanic Systems in Iceland: Upptok Jardskjálfta 1982–1985 Og Eldstodvakerfi a Islandi*. Menningarsjóður.
- Páll Stefánsson. (2004). *Framkvæmd vatnsverndar og stjórnun vatnsauðlindar á höfuðborgarsvæðinu*. Orkuveita Reykjavíkur.
- Páll Stefánsson. (2007). *Verndun vatnsgæða – vatnsverndarflokkun. Vötn og vatnasvið á höfuðborgarsvæðinu – ástand og horfur*. Málþing haldið í Reykjavík 30. Mars 2007.

- Ragnar Sigbjörnsson, Jónas Þór Snæbjörnsson, Higgins, S.M., Benedikt Halldórsson & Símon Ólafsson. (2009). A note on the Mw6.3 earthquake in Iceland on 29 May 2008 at 15:45 UTC. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1), 113–126. <https://doi.org/10.1007/s10518-008-9087-0>
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of geophysics*, 38(2), 191–219. <https://doi.org/10.1029/1998RG000054>
- Rubin, A.M. (1992). Dike-induced faulting and graben subsidence in volcanic rift zones. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 97(B2), 1839–1858. <https://doi.org/10.1029/91JB02170>
- Schmidt A., Ostro B., Carslaw K.S., Wilson M., Thordarson Th., Mann G.W., Simmons A.J. (2011). Excess mortality in Europe following a future Laki-style Icelandic eruption. *PNAS*, 108, 38. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1108569108>
- Sigmundur Einarsson, Haukur Jóhannesson, Árni Erla Sveinbjörnsdóttir. (1991). Krísuvíkureldar II. Kapelluhraun og gátan um aldur Hellnahrauns. *Jökull* 41, 61–80. <https://jokull.jorfi.is/articles/jokull1991.41/jokull1991.41.061.pdf>
- Sigrún Hreinsdóttir, Páll Einarsson, & Freysteinn Sigmundsson. (2001). Crustal deformation at the oblique spreading Reykjanes Peninsula, SW Iceland: GPS measurements from 1993 to 1998. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B7), 13803–13816. <https://doi.org/10.1029/2001JB000428>
- Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð. (2006). *Kortlagning sprungna í Fagradalsfjalli á Reykjanesskaga með smáskjálftum*. (Greinargerð 06001). Veðurstofa Íslands VÍ-ES-01 janúar 2006. <https://m.vedur.is/media/vedurstofan/utgafa/greinargerdir/2006/06001.pdf>
- Simmons, I.C., Pfeffer, M.A., Calder, E.S., Galle, B., Arellano, S., Coppola, D., Barsotti, S. (2017). Extended SO₂ outgassing from the 2014–2015 Holuhraun lava flow field, Iceland. *Bulletin of Volcanology* 79. 79. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1160-6>
- Skipulagsreglugerð 90/2013. <https://www.reglugerd.is/reglugerdir/eftir-raduneytum/umhverfisraduneyti/nr/18558>
- Stefna stjórnvalda í almannavarna- og öryggismálum ríkisins (2013). Innanríkisráðuneytið. <https://www.stjornarradid.is/media/innanrikisraduneyti-media/media/frettir-2013/Almannavarnaskýrsla---drog-ThJH---HThG-THOS.pdf>
- Stewart C, Smid E., Charlton D, Leonard GS, Tomašek I, Wilson T.M., Talbot N. (2019). Preparing for a sustained volcanic degassing episode in Auckland. Lower Hutt (NZ): *GNS Science*. 41 p. (GNS Science report; 2019/58). doi:10.21420/4NKW-TR68.
- Sylvía Rakeł Guðjónsdóttir, Evgenia Ilyinskaya, Sigrún Hreinsdóttir, Baldur Bergsson, Melissa Anne Pfeffer, Karolina Michalczywska, Alessandro Aiuppa & Auður Agla Óladóttir. (2020). Gas emissions and crustal deformation from the Krýsuvík high temperature geothermal system, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106350.
- Steigerwald, L, Páll Einarsson & Ásta Rut Hjartardóttir. (2020). Fault kinematics at the Hengill Triple Junction, SW-Iceland, derived from surface fracture pattern. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.017>

- Sveinbjörn Björnsson, Páll Einarsson, Helga Tulinius, & Ásta Rut Hjartardóttir. (2020). Seismicity of the Reykjanes Peninsula 1971–1976. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.026>
- Verkfræðistofan Vatnaskil. (2018). Höfuðborgarsvæði. Árleg endurskoðun rennslislíkans. Framgangur endurskoðunar 2018. Skýrsla nr. 18.11.
- Wilson, G., Wilson, T., Cole, J., Oze, C. (2012). Vulnerability of laptop computers to volcanic ash and gas. *Nat Hazards* 63. 711–736. doi: 10.1007/s11069-012-0176-7
- Woods, J., Winder, T., White, R.S. & Bryndís Brandsdóttir. (2019). Evolution of a lateral dike intrusion revealed by relatively-relocated dike-induced earthquakes: The 2014–15 Bárðarbunga–Holuhraun rifting event, Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.032>
- Wright, T.J., Ebinger, C., Biggs, J., Ayele, A., Yirgu, G., Keir, D. & Stork, A. (2006). Magma-maintained rift segmentation at continental rupture in the 2005 Afar dyking episode. *Nature*, 442(7100), 291–294. <https://doi.org/10.1038/nature04978>
- Póra Árnadóttir, Sigurjón Jónsson, Pollitz, F.F., Jiang, W. & Feigl, K.L. (2005). Postseismic deformation following the June 2000 earthquake sequence in the south Iceland seismic zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 110(B12). onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JB003701/full
- Porvaldur Þórðarson & Self S. (2003). Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: A review and reassessment. *Journal of Geophysical research* 108, <https://doi.org/10.1029/2001JD002042>