

Hvassahraun

Hættumat vegna eldgosa og jarðskjálfta

Bergrún Arna Óladóttir, Benedikt Halldórsson, Melissa A. Pfeffer,
Sara Barsotti, Bogi B. Björnsson

Hvassahraun

Hættumat vegna eldgosu og jarðskjálfta

Bergrún Arna Óladóttir, Benedikt Halldórsson, Melissa A. Pfeffer,
Sara Barsotti, Bogi B. Björnsson.

LYKILSÍÐA

Skýrsla nr. VI 2023-001	Dags. Maí 2023	ISSN 1670-8261	Dreifing: Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu: Hvassahraun Hættumat vegna eldgosa og jarðskjálfta		Upplag: Rafræn útgáfa Fjöldi síðna: 56 Framkvæmdastjóri sviðs: Matthew J. Roberts	
Höfundar: Bergrún Arna Óladóttir, Benedikt Halldórsson, Melissa A. Pfeffer, Sara Barsotti, Bogi B. Björnsson		Verkefnisstjóri: Bergrún Arna Óladóttir Verknúmer: 3721-0-0015	
Gerð skýrslu/verkstígr:		Málsnúmer: 2019-0177	
Unnið fyrir: Innviðaráðuneytið			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Unnið hefur verið hættumat vegna eldgosa og jarðskjálfta fyrir Hvassahraun, á 25 km ² svæði umhverfis mögulegt flugvallarstæði. Hættumatið nær yfir hraun, jarðskjálfta, gasmengun og gjóskufall. Hraunflæði var hermt út frá eldvirkni í nærliggjandi eldstöðvakerfum en gos á eldstöðvakerfi Krýsuvíkur er líklegast til að hafa áhrif á athugunarsvæðinu. Um 2 km eru frá suðurhluta athugunarsvæðisins að svæði sem er talið líklegur upptakastaður framtíðargosa. Áhrif jarðskjálfta hafa verið metin fyrir svæðið í formi nýs hættumats vegna jarðskjálfta á þverbrotabelti Reykjaness og Suðurlands. Niðurstöður matsins eru að meðalgildi lárétrar hönnunarhröðunar fyrir Hvassahraun er 0,24 g (10% líkur á 50 árum). Þetta gildi er hærra en núgildandi hönnunarhröðun sem er á bilinu 0,15–0,20 g en þó áþekkt sé tekið tillit til óvissu. Gasmengun var hermd en líklegast er að hún valdi ekki miklum usla á athugunarsvæðinu. Þó sýna hermanir að þær aðstæður geti skapast að loftgæði verði mjög óholl og jafnvel að gasstyrkur fari yfir hættumörk. Gjóskufall var hermt frá stökum gosopum. Líklegast er að gjóskufall valdi einungis skammvinnum áhrifum á athugunarsvæðinu í Hvassahrauni. Gjóska hefur mest áhrif þegar hún fellur upprunalega til jarðar en eftir gjóskufall getur gjóskufok haft slæm áhrif á loftgæði og skyggni í langan tíma.			
Lykilorð: Hættumat, Hvassahraun, Reykjanesskagi, , hraun, jarðskjálftar, skjálftavárlikindi, gasmengun, gjóska, líkanhermanir		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:	
		Undirskrift verkefnisstjóra:	
		Yfirfarið af:	

Efnisyfirlit

Ágrip	7
Abstract	8
1 Inngangur	9
2 Jarðfræði Reykjanesskaga – yfirlit	10
3 Afmörkun verkefnis	13
3.1 Staðsetning eldvirkni	14
3.2 Staðsetningar jarðskjálfta	15
4 Hraun	18
4.1 Hraunvá og þekkt hraun á rannsóknarsvæðinu	18
4.2 Forsendur og aðferðir líkanhermana	19
4.3 Afmörkun gosupptaka sem gætu veitt hrauni inn á athugunarsvæði	20
4.4 Niðurstöður hraunhermana	22
5 Jarðskjálftar	25
5.1 Jarðskjálftavá og válíkendi	25
5.2 Jarðskjálftasprungulíkan	25
5.3 Jarðskjálftavirknilíkan	26
5.4 Dvínun jarðskjálftahreyfinga	27
5.5 Niðurstöður	29
6 Gasmengun	33
6.1 Gasvá og áhrif gasmengunar	33
6.2 Forsendur og aðferðir líkanhermana	34
6.3 Niðurstöður gashermana	37
7 Gjóska	42
7.1 Gjóskufallsvá	42
7.2 Forsendur og aðferðir líkanhermana	42
7.3 Niðurstöður gjóskuhermana	44
8 Samantekt	48
9 Heimildir	51

Myndaskrá

Mynd 1. Yfirlit rannsóknarsvæðis	12
Mynd 2. Yfirlit eldfjallavár sem talin er geta haft áhrif á mögulegt flugvallarstæði í Hvassahrauni	13
Mynd 3. Myndræn framsetning á afstæðum reikningslegum líkum á gosupptökum umhverfis athugunarsvæðið.	16
Mynd 4. Afstaða mögulegs flugvallarstæðis í Hvassahrauni og helstu þéttbýliskjarna á Suðvesturlandi til þekktrar jarðskjálftavirkni og staðsetninga jarðskjálftasprungna á brotabelti Suðurlands og Reykjaness	17
Mynd 5. Net hermigosupptaka hraungosa sem hermd eru frá hverri sviðsmynd	20
Mynd 6. Landfræðileg afmörkun gosupptaka þaðan sem hraun geta flætt inn á athugunarsvæðið í Hvassahrauni.....	21
Mynd 7. Stök sviðsmynd hermds meðalstórs goss ($0,3 \text{ km}^3$) með stutta rennislengd	22
Mynd 8. Útlínur allra hraunhermana sem veita hrauni inn á athugunarsvæði í Hvassahrauni og hafa gosupptök innan líklegs upptakasvæðis.....	24
Mynd 9. Sex dæmi um raungerðar slembistaðsetningar stærstu þvergangja á brotabeltum Suðurlands og Reykjaness samkvæmt nýju þrívíðu líkani af þvergangjakerfi brotabeltanna.....	26
Mynd 10. Jarðskjálftavirkniferlar Suðvesturlands sem sýna árlega tíðni jarðskjálfta stærri en jarðskjálftastærð M_w	27
Mynd 11. Ferlar sem sýna dvínun hámarksgildis hröðunar með fjarlægð (RJB) frá jarðskjálftum af stærðunum $M_w 5.2$, 6.4 og 7.2	28
Mynd 12. Hermd gerviskjálftaskrá 5000 ára tímabils með slembivali á staðsetningum norður-suður þvergangja á brotabelti Suðurlands og Reykjaness.....	29
Mynd 13. Myndræn framsetning á skjálftavárlíkindum fyrir Hvassahraun.....	31
Mynd 14. Yfirlit yfir hermigosprungur sem notaðar voru í CALPUFF líkanið við hermun gasdreifingar og styrk gasmengunar við jörðu.....	35
Mynd 15. Dæmi um niðurstöðu stakrar keyrslu CALPUFF líkansins.....	36
Mynd 16. Yfirlit yfir meðhöndlun heildargagnasafns gasmengunargagna. Líklegasti gasstyrkur er fundinn út frá miðgildi og mesti gasstyrkur út frá hæsta gildi heildargagnasafns.	37
Mynd 17. Líkur á að klukkustundar styrkur SO_2 mengunar við jörðu nái eða fari yfir vinnuverndarmörk ($2600 \mu\text{g}/\text{m}^3$).....	38
Mynd 18. Hæstu gildi líklegasta gasstyrks SO_2 mengunar við jörðu innan athugunarsvæðis í Hvassahrauni.....	40
Mynd 19. Dæmi um gjóskuþykknunarhraða á athugunarsvæði í Hvassahrauni.....	44
Mynd 20. Reiknaðar líkur þess að 1 mm þykkt gjóskulag myndist á athugunarsvæðinu frá mismunandi eldstöðvakerfum og misstórum gosum frá þeim	45
Mynd 21. Hættumatskort sem sýnir líkindi gjóskufalls í mismiklu magni frá gosi sem myndar $0,1 \text{ km}^3$ af gjósku í löngu gosi með upptök $1,5 \text{ km}$ suðvestur af Reykjanestá.....	46
Mynd 22. Hættumatskort sem sýnir líkindi gjóskufalls í mismiklu magni frá gosi sem myndar $0,2 \text{ km}^3$ af gjósku í gosi sem stendur í 8 klst. með upptök í Snæfellsjökli.	46

Mynd 23. Yfirlit helstu sviðsmynda hraunflæðis m.t.t. athugunarsvæðisins í Hvassahrauni, að því gefnu að gos eigi sér stað.	49
Mynd 24. Yfirlit helstu sviðsmynda gasmengunar m.t.t. athugunarsvæðisins í Hvassahrauni, að því gefnu að gos eigi sér stað.	50
Mynd 25. Yfirlit helstu sviðsmynda gjóskufalls m.t.t. athugunarsvæðisins í Hvassahrauni, að því gefnu að gos eigi sér stað.	50

Töfluskrá

Tafla 1. Vægi flokka sem notað var við líkindaútreikning á staðsetningu framtíðargosopa með MatHaz kóðanum.....	15
Tafla 2. Yfirlit hrauna sem eru innan athugunarsvæðis í Hvassahrauni, metinn aldur, flatarmál, rúmmál, þykkt og rennislengd þeirra.	18
Tafla 3. Yfirlit sviðsmynda sem hermdar voru með hraunhermunarlíkaninu MrLavaLoba.....	19
Tafla 4. Gróf skipting brotabeltis Suðurlands (SISZ) og Reykjanes (RPOR) eftir hámarksdýpt jarðskjálfta (W_{max}) og hámarks jarðskjálftastærða (M_w)	25
Tafla 5. Gildi láréttar hámarkshröðunar í einingu þyngdarhröðunar jarðar í Hvassahrauni sem talið er að verði farið yfir á ákveðnum meðalendurkomutíma.....	32
Tafla 6. Lýsing á loftgæðum og áhrifum SO_2 á heilsufar miðað við styrk í 10–15 mínútur	33
Tafla 7. Yfirlit sviðsmynda sem voru hermdar með CALPUFF líkaninu	35
Tafla 8. Klukkustundar gildi SO_2 styrks af völdum eldgosa með mikið og meðal flæði	39
Tafla 9. Upphafsforsendur og kennistærðir sem notaðar eru við hermun gjóskudreifingar	43

Ágrip

Unnið hefur verið hættumat vegna eldgosa og jarðskjálfta fyrir Hvassahraun, á 25 km² svæði umhverfis mögulegt flugvallarstaði. Hættumatið nær yfir hraun, jarðskjálfta, gasmengun og gjóskufall. Ekki er tekið tillit til flóðbylgna, skotbomba, eldinga eða annarra þátta sem rekja má til eldgosa á svæðinu eða annars staðar.

Hraunflæði var hermt út frá eldvirkni í nærliggjandi eldstöðvakerfum, Reykjanesi-Svartsengi, Fagradalsfjalli og Krýsuvík. Áhrif jarðskjálfta hafa verið metin fyrir svæðið í formi nýs hættumats vegna jarðskjálfta á þverbrotabelti Reykjanes og Suðurlands. Gasmengun var hermd frá Reykjanesi-Svartsengi, Krýsuvík og Brennisteinsfjöllum og gjóskufall var hermt frá stökum gosopum innan eldstöðvakerfa Reykjanes, Heklu, Kötlu, Snæfellsjökuls og Örafajökuls.

Sé horft á staðsetningu athugunarsvæðis má færa rök fyrir því að hverfandi líkur séu á að þar opnist gosop, enda er það staðsett norðan megin á skaganum þar sem engin gosop eru þekkt. Engu að síður eru innan við 2 km frá útmörkum athugunarsvæðisins að þekktum gosupptakasvæðum innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur og innan við 5 km að Trölladyngju sem er talin vera líklegt gosupptakasvæði enda er þar töluvert magn þekktra gíga og gossprungna.

Hversu víðtæk áhrif hraun hefur stjórnast af stærð þess. Einungis um 2 km eru frá suðurhluta athugunarsvæðisins að svæði innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur sem er talið líklegur upptakastaður framtíðargosa. Eigi gos sér stað á þessu svæði benda niðurstöður til þess að líklegt sé að hluti athugunarsvæðisins verði fyrir hrauni. Ólíklegt er að hraun renni yfir Reykjanesbrautina á þessu svæði en það er þó ekki útilokað.

Skjálftavárlíkindi hafa verið metin fyrir staðsetningu athugunarsvæðisins í Hvassahrauni fyrir upptakasvæði jarðskjálfta á þverbrotabelti Reykjanes og Suðurlands, en á því beltinu verða stærstu jarðskjálftar á svæðinu. Notað var nýtt líkan af sprungukerfi brotabeltisins sem tekur tillit til þess að hámarksstærðir jarðskjálfta eru breytilegar eftir staðsetningu á brotabeltinu, ásamt nýjum líkönum af dvínun jarðskjálftahreyfinga með fjarlægð frá upptökum. Niðurstöður matsins eru þær að meðalgildi láréttar hönnunarhröðunar fyrir Hvassahraun er 0,24 g (10% líkur á 50 árum). Þetta gildi er herra en þó sambærilegt við núgildandi hönnunarhröðun sem er á bilinu 0,15–0,20 g en þó áþekkt sé tekið tillit til óvissu.

Líklegast er að gasmengun valdi ekki miklum usla á athugunarsvæði þó að gasmengunar hermanir sýni að þær aðstæður geti skapast að loftgæði verði mjög óholl af völdum SO₂ og jafnvel að gasstyrkur fari langt yfir hættumörk. Veður hefur mikil áhrif á hve mikillar mengunar verður vart og hvar, en vindur flytur gas frá upptökum og mestu gasmengunar, utan gosstöðvanna sjálfra, getur orðið vart fjærri upptökum. Mesta vá stafar af gosi með mikið flæði SO₂ frá Brennisteinsfjöllum og gosi með meðalflæði sem myndar lágan gosmökk á eldstöðvakerfi Krýsuvíkur.

Gjóska myndast í flestum eldgosum á Íslandi þótt hún sé aðeins örlítill hluti af hraungosum af þeirri gerð sem einkenna gosvirkni á Reykjaneskaga. Sprengivirkni er lítil sem engin í eldstöðvakerfum Reykjaneskagans en gjóskufall er þekkt frá neðansjávargosum suðvestan undan ströndum Reykjanesáar. Líklegast er að gjóskufall valdi einungis skammvinnu áhrifum á athugunarsvæðið í Hvassahrauni. Mesta vá samkvæmt niðurstöðum þeirra hermana sem framkvæmdar hafa verið stafar af gosi með upptök SV af Reykjanesá sem myndar lágan gosmökk. Gjóska hefur mest áhrif þegar hún fellur upprunalega til jarðar en eftir gjóskufall getur endurflutningur gjósku haft slæm áhrif á loftgæði og skyggni í langan tíma.

Abstract

An earthquake and volcanic hazard assessment for the 25 km² area around a possible future airport area at Hvassahraun has been completed. The hazards considered include lava, earthquakes, gas pollution and tephra fall. Other hazards that could impact the area due to an eruption such as tsunami, lava bombs, lightning and other phenomena have not been included.

Numerical simulations have been made of hazards originating from nearby volcanic and tectonic systems. Lava flows were modeled from Reykjanesi-Svartsengi, Fagradalsfjall and Krýsuvík. The probability of an earthquake impacting the area from the Suðurland transverse fault zone that connects Reykjanes and the Western volcanic zone was assessed. Gas pollution was modeled from Reykjanesi-Svartsengi, Krýsuvík and Brennisteinsfjöll; and tephra fall was modeled from Reykjanes, Hekla, Katla, Snæfellsjökull and Öräfajökull.

The possible airport area is on the north side of the peninsula, and as such, it appears to be very unlikely that an eruption should start there. However, the south and southeastern edges of the area of interest around the possible airport is less than 2 km from a part of the Krýsuvík volcanic system that is considered to be a likely site of future eruptions.

The model results show that an eruption from this part of the Krýsuvík volcanic system represents the greatest hazard with regards to lava inundation. The likelihood for the area of interest to be inundated by lava grows as the volume of a modeled lava flow increases. It is found to be unlikely that lava would flow over Reykjanesbraut in the area of interest, but it is possible.

A probabilistic seismic hazard assessment has been carried out for Hvassahraun. The basis of the assessment is a new earthquake fault system model of the transform South Iceland and Reykjanes Peninsula transform zone, on which the largest earthquakes in the region take place. The fault system model explicitly accounts for the systematic spatial variation of maximum earthquake magnitudes along the transform zone. Moreover, new empirical models of seismic ground motion scaling with earthquake magnitude and distance from the earthquake faults were used in the assessment. The results show that the mean horizontal design acceleration is 0,24 of the acceleration of gravity, (10% probability of exceedance in 50 years). The results are higher, albeit comparable when accounting for uncertainty, than the horizontal design accelerations according to the current building standard which are in the range of 0,15–0,20.

It is most likely that volcanic SO₂ pollution would have little impact on the possible airport area. However, some simulations show the possibility for SO₂ air pollution to reach dangerous levels well above the health limits. Weather has a big impact on when, where, and how much air pollution is experienced. As wind transports gases from an eruption, high concentrations of gases at ground level can be experienced a significant distance away from an eruption as the gases are transported downward from their emission height. Amongst the scenarios modeled within this work, two show the greatest hazard with regards to SO₂ pollution. These are a high emission rate eruption from Brennisteinsfjöll or a moderate emission rate eruption from Krýsuvík during weather conditions that lead to a low-lying eruption cloud.

Tephra can be produced by eruptions from most Icelandic volcanic systems, but it is a relatively rare product from eruptions of the Reykjanes peninsula. Tephra has though been produced by submarine eruptions southwest of the Reykjanes peninsula. According to the simulations, such a submarine eruption with a low eruption cloud would be anticipated to be the greatest hazard to the area of interest with regards to tephra. Tephra from eruptions at great distances can also impact the proposed area, but all simulations included in this report indicate only minor problems at the possible airport area in Hvassahraun.

1 Inngangur

Innanlandsflugvöllur hefur verið starfræktur í einhverri mynd í Vatnsmýri í um 80 ár. Hann er vel staðsettur m.t.t. flugsamgangna en flugvallarsvæðið er einnig mjög verðmætt byggingarland. Því hefur verið unnið að því í alllangan tíma að finna innanlandsflugi annan stað innan höfuðborgarsvæðisins. Úttekt á 15 mögulegum staðsetningum á suðvesturhorni landsins var gerð á árunum 2005–2007 (Helgi Hallgrímsson o.fl., 2007). Í tengslum við þá úttekt unnu Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson (2006) álit á líkum á hraunrennsli og öskufalli milli Hafnarfjarðar og Keflavíkur. Í skýrslunni er farið yfir jarðfræði svæðisins, gossögu og hrauntegundir, líklegar rennislísiðir framtíðar hrauna eru nefndar og gerð er tilraun til að setja hlutfallslegar líkur á hvar og hvenær næst muni gjósa, þó að skýrt sé tekið fram að „skekkjumörk eru óhóflega mikil reikningslega séð og ekki gefin upp, þannig að segja má að hér sé um ígrundaða ágiskun að ræða“ (Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson, 2006).

Árið 2013 gerðu ríki, Reykjavíkurborg og Icelandair Group með sér samkomulag um innanlandsflug þar sem m.a. kemur fram að aðilar fullkanni aðra flugvallarkosti til reksturs innanlandsflugvallar en afrakstur þeirrar vinnu var birtur í skýrslu um flugvallarkosti á höfuðborgarsvæðinu sem út kom í júní 2015 (Ragna Árnadóttir o.fl., 2015). Í henni voru skilyrði þrengd og einungis unnið með fimm svæði sem nefnd voru í úttektinni 2005–2007 (Bessastaðanes, Hólmsheiði, Hvassahraun og Löngusker auk breyttrar útfærslu á flugvelli í Vatnsmýri). Kristján Sæmundsson og Magnús Á. Sigurgeirsson (2015) unnu skýrslu um athugun á flugvallarkostum í tengslum við þessa vinnu og fara í henni yfir áhættuþætti tengda sprunguhreyfingum og hraunrennsli annars vegar í Hvassahrauni og hins vegar á Hólmsheiði. Eins og í fyrri skýrslu var óskað eftir að reynt yrði að svara spurningum á borð við hvenær mun gjósa og hvert munu hraun renna, en til viðbótar er farið yfir hvort sprungur og/eða misgengi séu líkleg til að valda vandræðum á mögulegum flugvallarkostum. Í skýrslunni eru líklegustu rennislísiðir hrauna inn á Hvassahraunssvæði merktar á kort og tekið fram að mögulegum flugvallarkosti gæti stafað ógn af hraunum sem kæmu upp í eldstöðvakerfi Krýsuvíkur, milli Trölladyngju og Mávahlíða. Miðað við þekkta gossögu eldstöðvakerfa Reykjanesskagans síðustu u.þ.b. 4000 ár var talið líklegast að næsta gosskeið myndi hefjast í Brennisteinsfjöllum og sá möguleiki nefndur, sem þekktur er, að virkni hefjist á svipuðum tíma í Krýsuvíkurkerfinu. Talið var líklegt að aldir liðu þar til Krýsuvíkurkerfið rumski næst (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2015). Nú er hins vegar ljóst að nýtt gosskeið hófst á Reykjanesskaga með eldgosi í Fagradalsfjalli en það kerfi gaus síðast fyrir um 6000 árum og fellur því ekki innan þess tímaramma sem er hvað best þekktur í gossögu skagans.

Eldsuppkomunæmi Reykjanesskaga hefur verið metið og notað til að velja uppkomu hrauna í úttekt á Náttúru- og eldgosavá í sveitarfélaginu Vogum (Ármann Höskuldsson o.fl., 2022) en mögulegt flugvallarsvæði í Hvassahrauni er innan Voga. Líkankeyrslur voru nýttar til að meta hversu líkleg svæði eru til að verða fyrir hraunflæði frá þessum völdu svæðum og niðurstöður notaðar til að skipta sveitarfélaginu upp í fimm hættusvæði. Ekki var lagt mat á hvenær næst muni gjósa á Reykjanesskaga.

Nú er unnið að könnun á hagkvæmni þess að byggja upp innanlandsflugvöll í svonefndu Hvassahrauni, á norðanverðri Hrótagárdyngju austan við Afstapahraun og því er unnið hættumat vegna eldgosa og jarðskjálfta fyrir svæðið. Samhliða því er unnið að úttekt á veðri á svæðinu (Guðrún Nína Petersen o.fl., í vinnslu).

2 Jarðfræði Reykjanesskaga – yfirlit

Ísland er eyja í Norður-Atlantshafi sem hefur risið úr hafi vegna umfangsmikils möttulstróks sem bæði orsakar mikla staðbundna eldvirkni og lyftir úthafsskorpunni sem myndar hafsbótinn. Í gegnum Ísland liggur einnig Mið-Atlantshafshryggurinn, flekaskil Evrasíu- og Norður-Ameríku-flekanna. Ísland er því einn fárra staða á jörðinni þar sem úthafshryggur liggur yfir sjávarmáli og þessi samverkun möttulstróks og úthafshryggjar gerir Ísland að virkasta eldfjalla- og jarðskjálftasvæði í norðanverðri Evrópu. Úthafshryggurinn liggur að landinu við suðvesturhorn Reykjaness, kallast þar Reykjaneshryggur, og út frá miðju Norðurlandi þar sem Kolbeinseyjarhryggur liggur. Birtingarmyndir fráreks úthafshryggjarins á landi eru nefnd rekbelti en frárekinu fylgir mikil eldvirkni og því er að jafnaði einnig talað um þau sem gosbelti. Innan gosbeltanna liggja eldstöðvakerfi sem samanstanda af megineldstöð og/eða sprungusveimi (Kristján Sæmundsson, 1979). Í gegnum jarðfræðilega sögu Íslands hafa rekbelti hliðrast til vegna tengingar þeirra við miðju möttulstróks Íslands sem talin er vera undir norðvestanverðum Vatnajökli. Við slíka hliðrun hafa myndast tvö stór þverbrotabelti þar sem hjárek Evrasíu og Norður-Ameríku-flekanna á sér stað, annars vegar Tjörnes brotabeltið, á og undan Norðurlandi, og hins vegar brotabelti Suðurlands og Reykjaness. Þessi þverbrotabelti eru virkustu jarðskjálftasvæði landsins og á þeim verða stærstu jarðskjálftar á Íslandi.

Höggun (tektóník) Reykjanesskagans er flókin vegna samspils gliðnunarbelteis, af völdum flekareks, og þverbrotabeltis sem tengir Reykjaneshrygg við Austurgosbeltið (sjá t.d. Sigrún Hreinsdóttir, o.fl. 2001; Clifton & Kattenhorn, 2006; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013; Mynd 1). Ummerki gliðunar á Reykjanesi eru greinileg og koma fram sem NA-SV liggjandi gígar og gígaraðir, gjár og misgengi, og móbergshryggir. Ummerki þverbrotabeltisins á Reykjanesi eru ógreinilegri og 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 (Sigrún Hreinsdóttir o.fl., 2001; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013; Páll Einarsson, 2014; Steigervald o.fl., 2020).

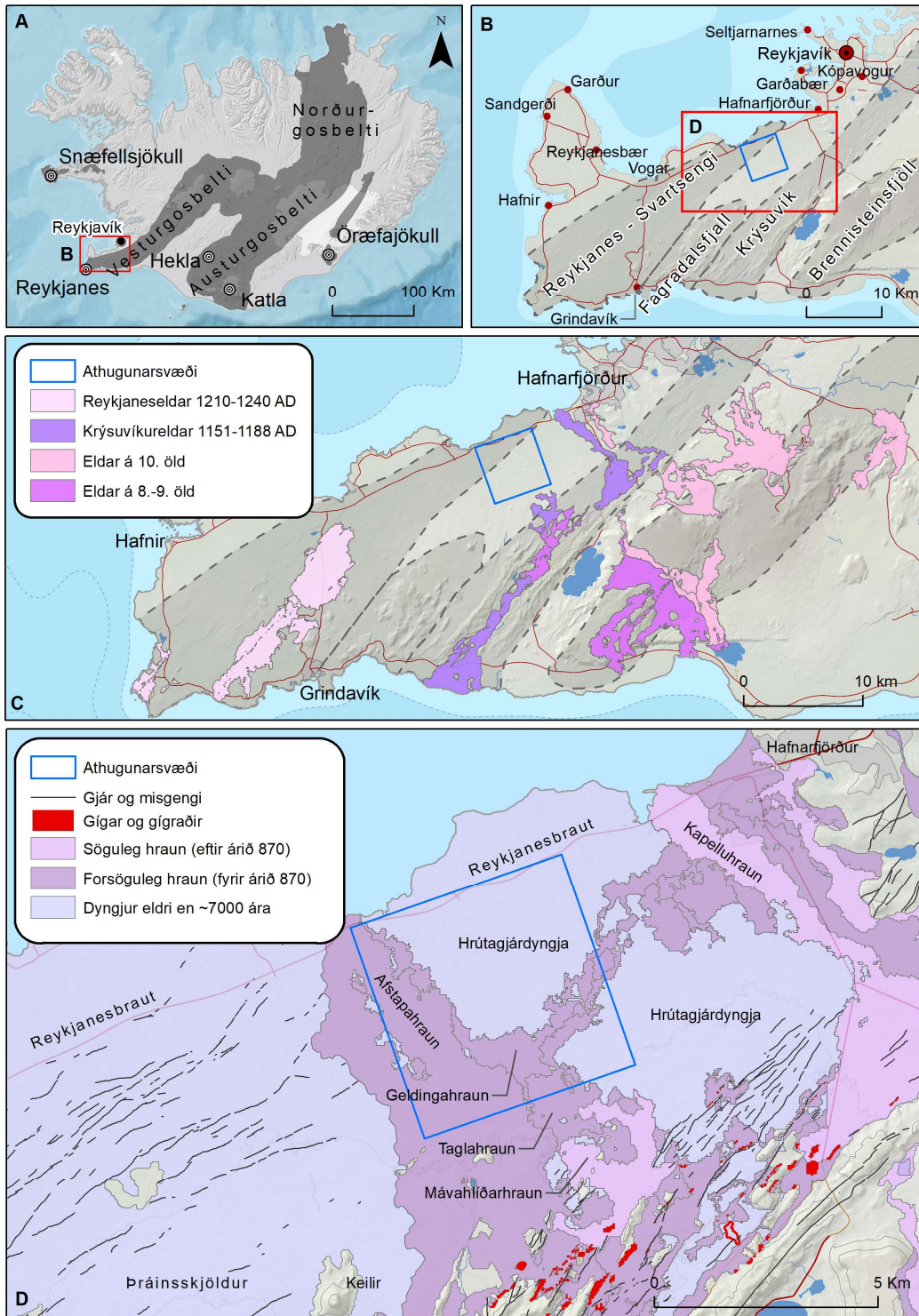
Eldstöðvakerfi Reykjanesskaga eru Reykjanes, Svartsengi, Fagradalsfjall, Krýsuvík og Brennisteinsfjöll, og liggja þau skástíga á skaganum frá vestri til austurs. Hengill er næsta kerfi til austurs og kerfið er stundum talið með eldstöðvakerfum Reykjanesskaga en það liggur eftir Vesturgosbeltinu sem liggur allt frá Heiðinni háu og til Langjökuls. 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 en kerfin hafa öll þróuð háhitakerfi nema Fagradalsfjall (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Í ljósi þess að gosvirkni hófst á Reykjanesskaga með gosi í Fagradalsfjalli árið 2021 eftir um 800 ára langt goshlé á skaganum er tekið fram að Fagradalsfjall hefur ýmist verið skilgreint sem sérstakt kerfi eða hluti af kerfi Krýsuvíkur, en í þessari umfjöllun er það talið vera sjálfstætt kerfi.

Töluverð þekking er á virkni Reykjanesskagans síðustu 4000 ár sem bendir til þess að þar skiptis á gosskeið sem virðast standa í nokkur hundruð ár (400–500 ár), þar sem kvikutengd gliðnunar-tímabil og/eða eldvirkni sem einkennist af flæðigosum gengur yfir NA-SV stefnandi eldstöðvakerfin, og hins vegar mun lengri tímabil goshléa (600–800 ár) þar sem jarðskjálftavirkni þverbrotabeltisins er ríkjandi (sjá t.d. Sigrún Hreinsdóttir o.fl., 2001; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013; Sveinbjörn Björnsson o.fl., 2020). Sé horft á þekktu 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. Síðustu 3500 árin eru vísbendingar um að virkni hefjist austan til á skaganum og flytjist svo vestar, þ.e.

eldstöðvakerfi Brennisteinsfjalla virðist hafa tilhneigingu til að hefja virkni, Krýsuvíkur kerfið fylgir svo í kjölfar þess, þá Svartsengi og loks Reykjanes (Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson, 2006; Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2015; Kristján Sæmundsson, o.fl. 2018). Þegar gos hófst í Fagradalsfjalli í mars 2021 sannaðist enn og aftur að þrátt fyrir að ákveðin mynstur séu sjáanleg í virkni og hegðun eldstöðva eru þau langt í frá ófrávíkjanleg. Á síðasta gosskeiði (u.þ.b. 800–1240 e.kr) gaus á fjórum af fimm eldstöðvakerfum Reykjaneskagans (Mynd 1) og fluttist gosvirkni milli eldstöðvakerfa með 30–150 ára millibili (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Flæðigos eru einkennisgos kerfanna en gos geta einnig átt sér stað í sjó á eldstöðvakerfi Reykjanes en þeim gosum getur fylgt gjóskufall. A.m.k. sex slíkra er getið á tímabilinu 1210–1240 e. Kr. (Magnús Á. Sigurgeirsson, 1995).

Gos á Reykjaneskaga hafa verið flokkuð í stærðarflokka eftir magni gosefna þannig að lítil gos mynda $<0,1 \text{ km}^3$, meðalstór $0,1\text{--}0,5 \text{ km}^3$ og stór $>0,5 \text{ km}^3$ (Magnús Á. Sigurgeirsson & Sigmundur Einarsson, 2019). Þegar Krýsuvíkureldar (1155–1188 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 gosgosefni á bilinu $0,1$ til $0,5 \text{ km}^3$. Flest hraun á Reykjaneskaga 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).

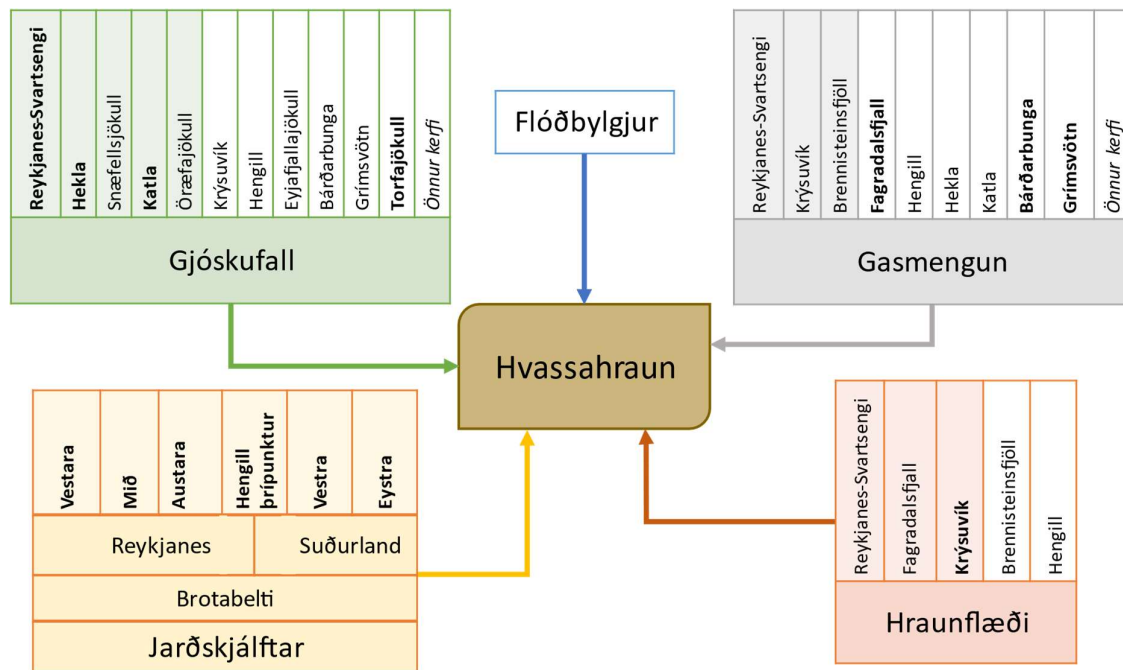
Athugunarsvæðið í Hvassahrauni er að mestu utan skilgreindra eldstöðvakerfa en norðvestur horn svæðisins liggur nálægt eða innan nyrsta hluta Svartsengis kerfisins (Mynd 1b). Mjög lítið er um yfirborðssprungur á svæðinu, en í Þráinsskildi suðvestan við svæðið er mikið af sjáanlegum yfirborðssprungum (Mynd 1c). Því er mögulegt að Hrutagjárdyngja og yngri hraun hylji eldri undirliggjandi sprungur á rannsóknarsvæðinu. Þau hraun sem eru á svæðinu eru öll upprunnin í eldstöðvakerfi Krýsuvíkur sem liggur sunnan við athugunarsvæðið. Svæðið liggur einnig utan þess svæðis sem afmarkast af smáskjálftavirkni á flekaskilunum, en miðlína þeirra er talin liggja u.þ.b. VSV-ANA eftir sunnanverðum Reykjaneskaga. Þá er einnig talið að norður-suður þvergengi brotabeltis Reykjanes liggja samhverft um miðlínu flekaskilanna og séu nálægt fyrirhuguðu svæði en nái ekki inn á það.



Mynd 1. Yfirlit rannsóknarsvæðis. A) Ísland og staðsetning helstu gosbelta landsins. Gjóskudreifing hefur verið hermd fyrir gosupptök í svörtu punktum. Það sem merkt er Reykjanes er neðansjávar hermigosop staðsett um 1,5 km suðvestur af Reykjanestá. Raudur ferhyrningur afmarkar svæði sem betur er skoðað á mynd B. B) Staðsetning athugunarsvæðisins Hvassahrauns (blár ferhyrningur) á Reykjanesskaga og útlínur eldstöðvakerfa í nágrenni sem gætu haft áhrif á svæðið með gasmengun og/eða hraunflæði. Raudí ferhyrningurinn afmarkar það svæði sem sýnt er á mynd D. C) Hraun sem mynduðust á síðasta gosskeiði Reykjanesskaga sem stóð frá ~800–1240. D) Athugunarsvæðið Hvassahraun (blár ferhyrningur) og hraun sem runnið hafa á svæðinu.

3 Afmörkun verkefnis

Lagt var upp með að skoða áhrif vegna eldgosa á 25 km² svæði umhverfis mögulegt flugvallarstæði sem talað er um sem Hvassahraun og jarðskjálfta á brotabelti Reykjaness og Suðurlands. Langtímahættumat svæðis nýtist við skipulag þess og byggir á sviðsmyndum mögulegra atburða út frá upplýsingum á virkni og hegðun þeirra eldstöðvakerfa sem geta haft áhrif. Þegar virkni fer að mælast í grennd við svæðið tekur skammtímahættumat yfir en það byggir á grunni langtímahættumats að viðbættum öllum nýjustu upplýsingum sem liggja fyrir hverju sinni. Skammtímahættumat gerir kleift að þrengja svæði eldsuppkomu, draga úr fjölda mögulegra sviðsmynda eldgosavár og þar með nýtist það við gerð betur afmarkaðrar viðbragðsáætlunar vegna yfirvofandi atburðar. Hraunflæði, gasmengun, gjóskufall og jarðskjálftar eru allt dæmi um eldfjalla- og jarðskjálftavá sem getur stafað að athugunarsvæði í Hvassahrauni og langtímahættumat svæðisins af völdum þessarar náttúrvár hefur verið unnið (Mynd 2). Hraunflæði hefur verið hermt út frá eldvirkni í nærliggjandi eldstöðvakerfum, Reykjanesi-Svartsengi, Fagradalsfjalli og Krýsuvík, gasmengun hermd frá Reykjanesi-Svartsengi, Krýsuvík og Brennisteinsfjöllum og gjóskufall hefur verið hermt frá stökum gosopum innan eldstöðvakerfa Reykjaness, Heklu, Kötlu, Snæfellsjökuls og Örfæfajökuls. Áhrif jarðskjálfta hafa verið metin fyrir svæðið í formi nýs hættumats vegna jarðskjálfta á þverbrotabelti Reykjaness og Suðurlands. Ekki er tekið tillit til flóðbylgna, skotbomba, eldinga eða annarra þátta sem rekja má til eldgosa á svæðinu eða annars staðar.



Mynd 2. Yfirlit eldfjallavár sem talin er geta haft áhrif á mögulegt flugvallarstæði í Hvassahrauni. Líkanhermanir hafa verið gerðar fyrir skyggð eldstöðvakerfi innan hvarrar vategundar (gjóskufall, gasmengun, jarðskjálftar og hraunflæði) og þau kerfi sem vitað er að hafi haft áhrif á eða í grennd við svæðið eru feitletruð. Önnur kerfi sem gætu haft áhrif en hafa ekki verið skoðuð með líkanhermunum eru tilgreind.

Framsetning niðurstaðna í þessari skýrslu er mismunandi eftir ólíkri stöðu þekkingar á þeirri náttúruvá sem um ræðir. Þar hefur mikil áhrif tíðni þeirra atburða og sá tímaskali sem um ræðir. Þannig er mikill munur á tíðni eldgosavár á Reykjanesi og sterkra jarðskjálfta á brotabelti Suðvesturlands. Jarðeldar á Reykjanesskaga eru afar sjaldgæfir og óvissa hvers liðar í þeirri atburðarás (ef gos verður, hvar verður það, hversu stórt, hversu langt, áhrif landslags, veðurs, o.s.frv.) sem þarf til þess að tiltekin áhrif verði á tilteknum stað er talin vera það mikil (sjá t.d. Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson, 2006) að draga má í efa áreiðanleika reikningslegs mats á slíkum náttúruvárlíkindum. Af þeim sökum eru niðurstöður hættumats m.t.t. áhrifa hraunflæðis, gjóskufalls og gasmengunar í þessari skýrslu settar fram í formi sviðsmynda sem byggðar eru á forsendum sem mótast af ígrunduðu mati á afstæðum mun á því hversu líklegar eða ólíklegar þær eru. Hvað jarðskjálftavá varðar þá eru jarðskjálftar á brotabeltinu af þeirri stærð sem hefur áhrif á innviði mun algengari en eldgos (sjá Kristján Jónasson o.fl., 2021). Sett hefur verið fram sprungulíkan af brotabeltinu þar sem stærðir, staðsetningar og jarðskjálftavirkni sprungna eru hermdar og eru í samræmi við skjálftaskrá svæðisins (Bayat o.fl., 2022a,b). Stærðir og óvissa á yfirborðshreyfingum jarðskjálfta, sér í lagi fjarri upptökunum, eru tiltölulega vel ákvarðaðar (t.d., Kowsari o.fl., 2020; Rahpeyma o.fl., 2023). Af þeim sökum er sett fram reikningslegt mat á skjálftavárlíkindum ásamt óvissu.

Að lokum skal tekið fram að forsendur í þessari skýrslu eru byggðar á stöðu þekkingar áður en eldvirkni gerði vart við sig á ný á Reykjanesskaga og gosin í Fagradalsfjalli árið 2021 og 2022 áttu sér stað. Þær forsendur gera ráð fyrir því að afar langur tími (600–800 ár) líði á milli tiltölulega styttri (400–500 ár) tímabila eldvirkni á Reykjanesskaga. Á milli tímabila eldvirkni er jarðskjálftavirkni á brotabeltinu ráðandi.

3.1 Staðsetning eldvirkni

Án þekktra gosupptaka er erfitt að skilgreina að og frá hvaða svæðum vá stafar, en eitt það flóknasta við gerð langtímahættumats er einmitt að spá fyrir um staðsetningu gosupptaka. Þegar atburður fer í gang geta rauntímagögn úr eftirlitskerfi eldstöðva þrengt upptakasvæði. Við útreikning á líkum á opnun gosopa eða gosupptökum var MatHaz kóðinn (Bertini o.fl., 2019) notaður og stuðst var við jarðfræðigögn af kortavefsja ÍSOR (<https://www.isor.is/jardfraedikort-kortavefsja>).

Jarðfræðimenjar voru flokkaðar í gossprungur og gíga, höggunarsprungur og jarðhitasvæði og hver flokkur fékk ákveðið vægi í samræmi við mikilvægi þeirra þegar kemur að upptökum eldgos (Tafla 1) án þess þó að gefa aldri vægi. Líkur á opnun gosopa voru metnar fyrir allan Reykjanesskagann vestan Hengils, út frá þekktum yfirborðsgögnum, en gögn frá eldstöðvakerfum Reykjaness-Svartsengis, Fagradalsfjalls, Krýsuvíkur og Brennisteinsfjalla voru notuð til að fá heildstæða mynd af skaganum (Mynd 3).

Tafla 1. Vægi flokka sem notað var við líkindaútreikning á staðsetningu framtíðargosopa með MatHaz kóðanum. Vægi sem hér er notað byggir á sérfræðimati sem sett var fram í meistara-ritgerð Þóru Bjargar Andrésdóttur (2018) en þó án vægis aldurs gíga og gossprungna.

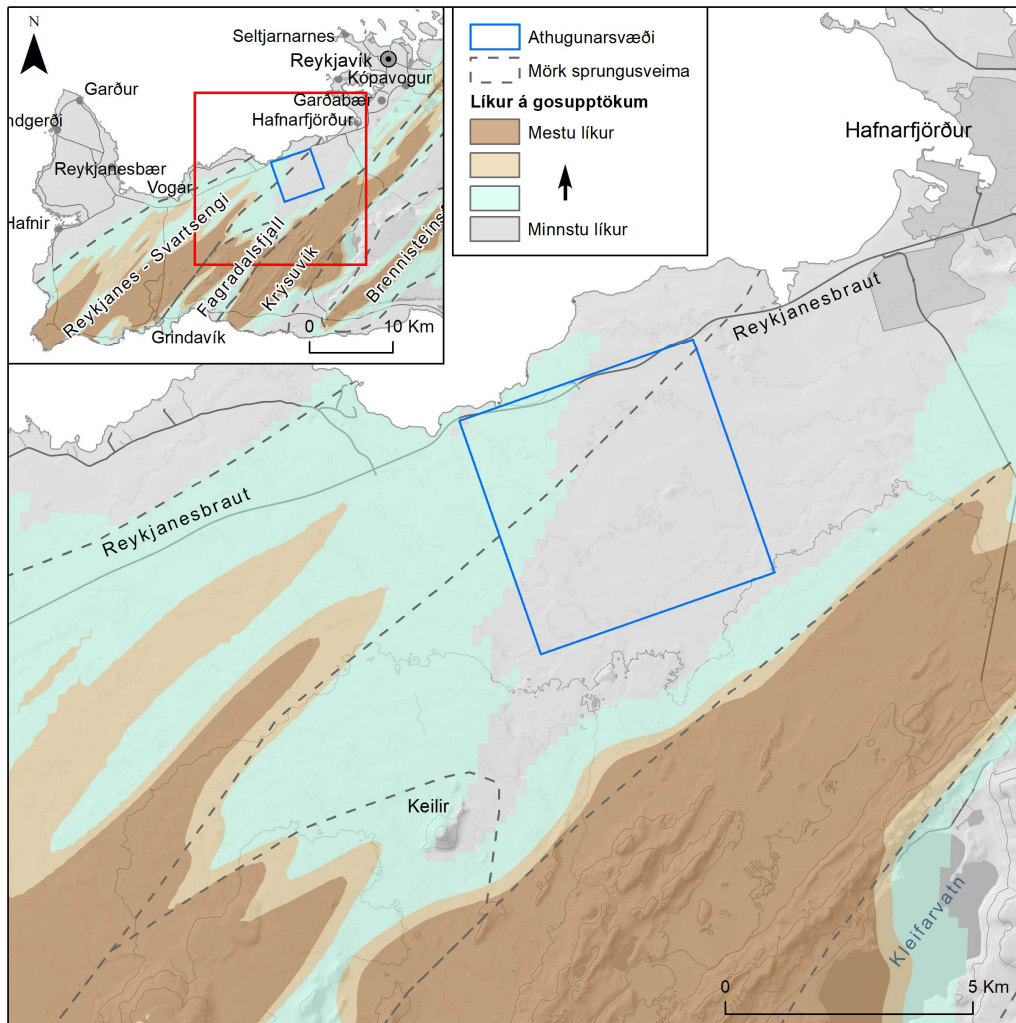
Flokkur	Vægi (%)
Gossprungur og gígar	66
Höggunarsprungur (NA-SV stefna)	17
Jarðhitasvæði	14
Höggunarsprungur (N-S stefna)	2
Aðrar sprungur	1
Summa	100

Líkanútreikningar sýna að mestar líkur eru á að gosop opnist sunnan til á Reykjaneskaganum enda eru öll þekkt gosop þeim megin á skaganum. Í raun væri hægt að draga línu eftir endilöngum skaganum sem fylgir í meginatriðum norðurmörkum fjallgarðanna sem aðskilur svæði þekktra gosopa og þess sem hefur engin sjáanleg gosop. Sé horft á staðsetningu athugunarsvæðisins má færa rök fyrir því að mjög litlar og jafnvel hverfandi líkur séu á að þar opnist gosop (grænt og grátt á Mynd 3) enda er það staðsett norðan megin á skaganum þar sem engin þekkt gosop eru staðsett. Engu að síður eru innan við 2 km frá útmörkum athugunarsvæðisins að líklegum gosupptaka-svæðum (dökkbrúnt á Mynd 3) innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur og innan við 5 km að Trölladyngju sem er talin vera líklegt gosupptakasvæði. Áður hefur verið metið hvar á Reykjanes-skaga líklegast er að eldur komi upp í framtíðinni (Ármann Höskuldsson o.fl., 2018a). Þar sést að líklegir eldsuppkomustaðir eru afmarkaðir innan skilgreindra og Hvassahraunssvæðið er talið ólíklegt eldsuppkomusvæði.

3.2 Staðsetningar jarðskjálfta

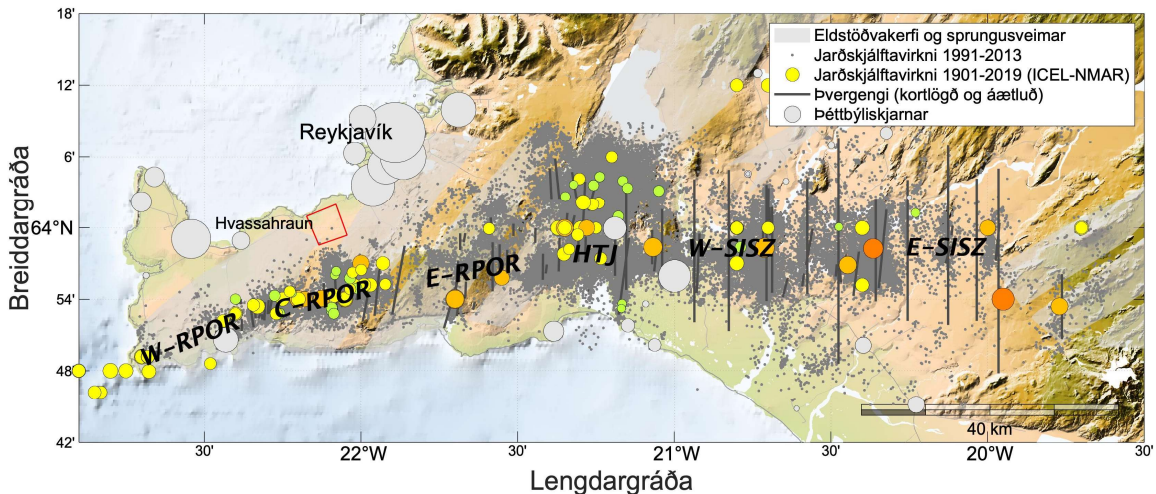
Jarðfræði Reykjanes er best þekkt fyrir þau eldstöðvakerfi og tilheyrandi sprungusveima þeirra sem liggja frá suðvestri til norðausturs. Reykjaneskagi er afar virkt jarðskjálftasvæði eins og Mynd 4 gefur til kynna þar sem dreifing mældra jarðskjálfta á brotabeltum Suðurlands og Reykjanes er sýnd. Jarðskjálftamiðjur smáskjálfta sem mældir voru á árunum 1991–2013 (Panzera o.fl., 2016) eru sýndar sem gráir punktar sem sums staðar liggja það þétt að þeir mynda samfelld grá svæði. Lituðu hringirnir eru jarðskjálftamiðjur stærri jarðskjálfta á árunum 1901–2019 (Jarðskjálftaskrá Íslands og norðurhluta Mið-Atlantshafshryggjarins, ICEL-NMAR; Kristján Jónasson o.fl., 2021). Myndin sýnir einnig afstöðu virkninnar til helstu þéttbýliskjarna á Suðvesturlandi, sem og skiptingu brotabeltisins í sex svæði, en í grófum atriðum er gerður greinarmunur á vestari, mið og eystri hluta brota- og gliðnunarbeltis Reykjanes (W, C og E-RPOR; Reykjanes Peninsula Oblique Rift zone) og vestari og eystri hluta brotabeltis Suðurlands (W og E-SISZ; South Iceland Seismic Zone). Þar á milli er þrípunktur Reykjanes, Vesturgosbeltisins og Suðurlandsbrotabeltisins, kenndur við Hengil (HTJ; Hengill Triple Junction).

Jarðskjálftavirkni á Reykjanesi má skipta í tvo grunnflokka: Jarðskjálftar sem eiga sér stað á suðvestur-norðaustur siggengissprungum tengdir eldvirkni og kvikuhreyfingum, og jarðskjálftar á norður-suður þvergengjum brotabeltisins. Sannfærandi rök hafa verið sett fram á undanförunum árum fyrir því að hið vel þekkt þverbrotabelti Suðurlands sem einkennist af „bókahillutektóník“, þ.e.a.s stuttum og lóðréttum þvergengjum sem liggja norður-suður og eru samsíða frá austri



Mynd 3. Myndræn framsetning á afstæðum reikningslegum líkum á gosupptökum umhverfis athugunarsvæðið (blár ferningur) skv. MatHaz kóðanum. Þekktar gossprungur hafa mest vægi í matinu en yngir gosefni geta hulið eldri gosop og því er langt í frá útiloka að gosupptök verði utan líklegustu svæða. Mestar afstæðar líkur eru sýndar með dökkbrúnum lit (efstu 33% líkindadreifingar), þá ljósbrúnn (bilið frá efstu 33% niður í 50% líkindadreifingarinnar), grænn (neðstu 50% líkindadreifingar) og forsendan að engar eða hverfandi líkur séu á opnun gosopa eru sýndar með gráum svæðum (MatHaz módel gefur engar líkur). Lítil mynd í vinstra horni sýnir samsvarandi líkur á öllum Reykjanesskaganum.

til vesturs, sé í raun samfelld vestur af láglendi Suðurlands og út allan Reykjanesskagann (Páll Einarsson, 2014; Páll Einarsson o.fl., 2020; Steigerwald o.fl., 2020). Af þeirri ástæðu er jarðskjálftavirkni stærra svæðis en Reykjaness sýnd á Mynd 4, sem sýnir einnig af sömu ástæðu yfirborðskortlagningar þvergensja (Páll Einarsson o.fl., 2020; Steigerwald o.fl., 2020), ofanvörp þvergenssprungna skv. afstæðri kortlagningu á jarðskjálftahrinum (Sigurlaug Hjaltadóttir, 2009), og áætlað umfang og staðsetningar stórra Suðurlandsskjálfta frá 1706 (Roth, 2004). Þá síðastnefndu má þekkja á myndinni út frá beinum og löngum línun sem liggja frá suðri til norðurs og tákna gróft mat á staðsetningum og lengdum jarðskjálftasprungna Suðurlandsskjálfta. Myndin gefur þannig til kynna að jarðskjálftavirkni og sprungumyndum á brotabeltinu virðist vera afmörkuð við þau svæði sem dreifing smáskjálfta og staðsetningar jarðskjálftasprungna sýna.



Mynd 4. Afstaða mögulegs flugvallarstæðis í Hvassahrauni og helstu þéttbýliskjarna á Suðvesturlandi til þekkrar jarðskjálftavirkni og staðsetninga jarðskjálftasprungna á brotabelti Suðurlands og Reykjaness. Smáskjálftaskrá árána 1991–2013 er sýnd með dökkgráum punktum sem stundum mynda samfelld grá svæði, ICEL-NMAR jarðskjálftaskrá helstu jarðskjálfta frá 1901–2019 er sýnd með lituðum hringjum (gulir, grænir, appelsínugulir) og helstu þéttbýliskjarnar eru sýndir með ljósgráum skífum. Stærð hringjanna gefur til kynna afstæðan stærðarmun þess sem sýnt er. Staðsetningar brotabeltissprungna helstu jarðskjálfta eru sýndar með heildregnum svörtum línum. RPOR: Reykjanes Peninsula Oblique Rif, SISZ: South Iceland Seismic Zone. Sjá texta varðandi merkingu skammstafana sem tilgreina svæðaskiptingu brotabeltisins.

Það er vel þekkt að jarðskjálftar á siggengissprungum verða ekki eins stórir og þeir geta orðið á þvergengjum. Að auki er lágmarksstærð jarðskjálfta sem notuð er í formlegu mati á jarðskjálftavá jafnan skilgreind í kringum vægisstærð (M_w) 4.5–5. Þetta stærðarbil er svipað sterkustu jarðskjálftum sem gera má ráð fyrir að geti orðið á siggengissprungum á gosbeltunum. Því er ljóst að á síðustu öldum hafa jarðskjálftar á brotabeltinu átt yfirgnæfandi þátt í að losa spennu vegna plötuhræfinga á rekbeltunum sitt hvoru megin við brotabeltin (Páll Einarsson, 2008, 2014; Steigerwald o.fl., 2020; Páll Einarsson o.fl., 2020) en landrek á Mið-Atlantshafshryggnum er talið vera stöðugt í tíma og er u.þ.b. 19 mm á ári í stefnu VNV-ASA (Sigrún Hreinsdóttir o.fl., 2001). Því má gera ráð fyrir því að jarðskjálftavá stafi einkum, og nær einvörðungu, frá jarðskjálftum á þvergengjum brotabeltisins. Gert er ráð fyrir þeirri forsendu í greiningu skjálftavárlíkinda fyrir Hvassahraun. Þó skal tekið fram að færslur á siggengjum sprungusveima eldstöðvakerfa geta orðið í gliðnunarátburðum á eldvirkum tímabilum vegna kvikuinnskota.

4 Hraun

4.1 Hraunvá og þekkt hraun á rannsóknarsvæðinu

Áhætta af völdum hraunrennslis er sjaldnast mikil m.t.t. mannlífa en er að sama skapi mikil fyrir alla innviði sem eru staðsettir á áhrifasvæði hrauns. Hraun geta valdið gjöreyðingu, lokað vegum, valdið skemmdum á rafmagnsstaurum og sliti á línum. Renni hraun að innviðum (eða yfir þá) getur það valdið miklu tjóni en hraunvái er mismikil eftir staðsetningum. Hraungosum fylgir töluverð gasmengun (t.d. SO₂, CO₂, CO, H₂S).

Athugunarsvæðið í Hvassahrauni er byggt upp af hraunum líkt og Reykjaneskaginn allur og öll eru þau upprunnin á sprungusveimum eldstöðvakerfis Krýsuvíkur (Tafla 2). Elsta sjáanlega hraunið og það sem þekur mestan hluta svæðisins er Hrótagjárdyngja (Mynd 1). Aldur dyngjuhraunsins hefur verið metinn meiri en 7000 ára og rúmmál þess um 3,2 km³ (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Geldingahraun, öðru nafni Eldra Afstapahraun, liggur ofan á hrauni Hrótagjárdyngju. Það er talið um 5000 ára gamalt og er að líkindum að mestu hulið af bæði Taglahrauni (~4000) og Afstapahrauni, en hluti þess sést austan megin við Afstapahraun. Afstapahraun er um 2000 ára gamalt og samanstendur af Dyngnahrauni, Skolahrauni, Katlahrauni, Leggjabrjótshrauni og Skollahrauni og nær til sjávar bæði norðan og sunnan megin á Reykjaneskaga en mesta hraunrennsli til norðurs hefur verið úr 2–3 nyrstu gígunum. Öll hraunin sem hér hafa verið nefnd og flæða til norðurs virðast hafa fylgt lægð á mótum dyngjuhraunanna úr Þráinsskildi og Hrótagjárdyngju.

Sveitafélaginu Vogum hefur verið skipt upp í hættusvæði eftir niðurstöðum hraunhermana frá völdum svæðum (Ármann Höskuldsson o.fl., 2022). Athugunarsvæðið í Hvassahrauni lendir innan Voga og innan þess eru öll hættusvæðin fimm sem skilgreind eru en samkvæmt niðurstöðum er suðurhluti svæðisins og sá vestasti lenda innan hættusvæða 4 og 5 (Ármann Höskuldsson o.fl., 2022).

Tafla 2. Yfirlit hrauna sem eru innan athugunarsvæðis í Hvassahrauni, metinn aldur, flatarmál, rúmmál, þykkt og rennislengd þeirra.

Hraun/dyngja	Aldur	Flatarmál (km ²)	Rúmmál (km ³)	Þykkt (m)	Rennislengd (km)	Heimildir
Afstapahraun	~2000	22	0,44	20	~10–12	1, 2
Taglahraun	~4000	0,5	0,05	10	~6	1
Geldingahraun/Eldra Afstapahraun	~5000	12	0,24	20	~6–8	1
Hrótagjárdyngja	>7000	80	3,2	40	~12	3

1: Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson 2015; 2: Jón Jónsson 1978; 3: Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013.

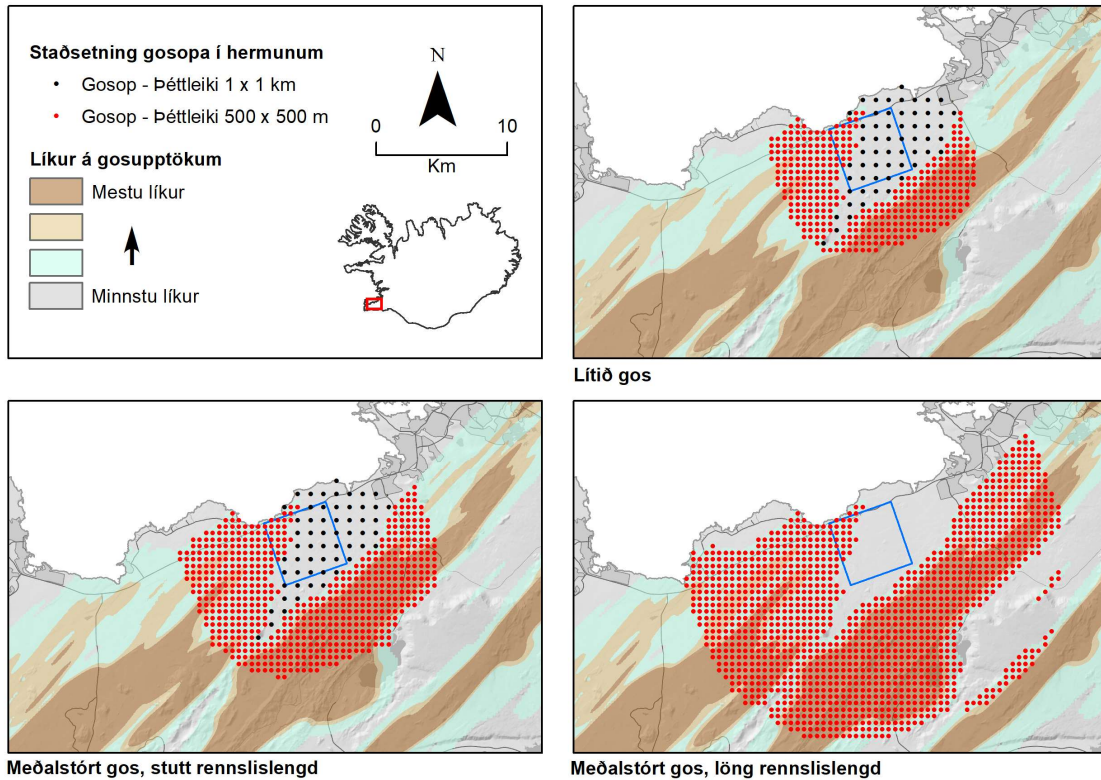
4.2 Forsendur og aðferðir líkanhermana

Við útreikning á líkum á opnun gosopa var líkanið MatHaz (Bertini o.fl., 2019) notað (sjá kafla 3.1). Áhugasömum er bent á að kynna sér líkanið frekar í grein Bertin o.fl. (2019) þar sem kóðinn er birtur og virkni hans vandlega útskýrð skref fyrir skref. Niðurstöður mats á líkum á opnun gosopa voru notaðar til að afmarka upptakasvæði hraunhermana. Hraunhermanir voru síðan gerðar frá neti hermigosupptaka (Mynd 5) með 500 m millibili dreift um svæði þar sem MatHaz líkanið gaf einhverjar líkur á opnun gosopa (grænt, ljósbrúnt og brúnt á Mynd 3). Auk þess voru hermanir úr öðrum verkefnum notaðar á þeim svæðum þar sem hverfandi líkur eru á að gosop opnist samkvæmt MatHaz niðurstöðum (grátt á Mynd 3). Þær hermanir voru gerðar frá strjálra neti hermigosupptaka eða með 1 km millibili fyrir lítil gos og meðalstór með stutta rennislengd.

Hraunhermunarlíkanið MrLavaLoba (de'Michieli Vitturi & Tarquini, 2018) var notað til að herma hraunflæði með það fyrir augum að meta hvaða svæði innan athugunarsvæðisins eru líkleg til að verða fyrir hrauni ef hraungos hefst í nágrenni þess. Líkanið hermir útbreiðslu hrauna að teknu tilliti til þeirra breytinga sem verða á landslagi við hraunrennsli og er því vel til fallið að herma hraunflæði á aflíðandi landi eins og á Reykjaneskaga. Lítil gos ($0,02 \text{ km}^3$) voru hermd frá þeim hermigosopum sem eru í innan við 5 km fjarlægð frá útmörkum athugunarsvæðis, meðalstór gos með stutta rennislengd ($0,3 \text{ km}^3$ og líklega rennislengd um 5 km) í innan við 7 km fjarlægð frá útmörkum og meðalstór gos með langa rennislengd ($0,3 \text{ km}^3$ og líkleg rennislengd um 10 km) voru hermd frá hermigosopum sem eru í innan við 12 km fjarlægð frá útmörkum athugunarsvæðis (Mynd 5, Tafla 3).

Tafla 3. Yfirlit sviðsmynda sem hermdar voru með hraunhermunarlíkaninu MrLavaLoba.

	Lítið gos	Meðalstórt gos – stutt	Meðalstórt gos – langt
Fyrirmynd	Illahraun	Arnarseturshraun	Arnarseturshraun (km^3), Kapelluhraun (km)
Rúmmál (km^3)	0,02	0,3	0,3
Rennislengd (km)		~5	~10
Net hermigosopa (möskvastærð í km) með einhverjar MatHaz líkur á opnun gosopa (grænt, ljósbrúnt og brún Mynd 3)	0,5	0,5	0,5
Net hermigosopa (möskvastærð í km) með hverfandi MatHaz líkur á opnun gosopa (grátt Mynd 3)	1	1	Ekki hermt
Fjöldi hermigosopa innan 0,5 km möskvastærðar nets	371	619	1329
Mesta fjarlægð hermigosopa að útmörkum athugunarsvæðis (km)	5	7	12

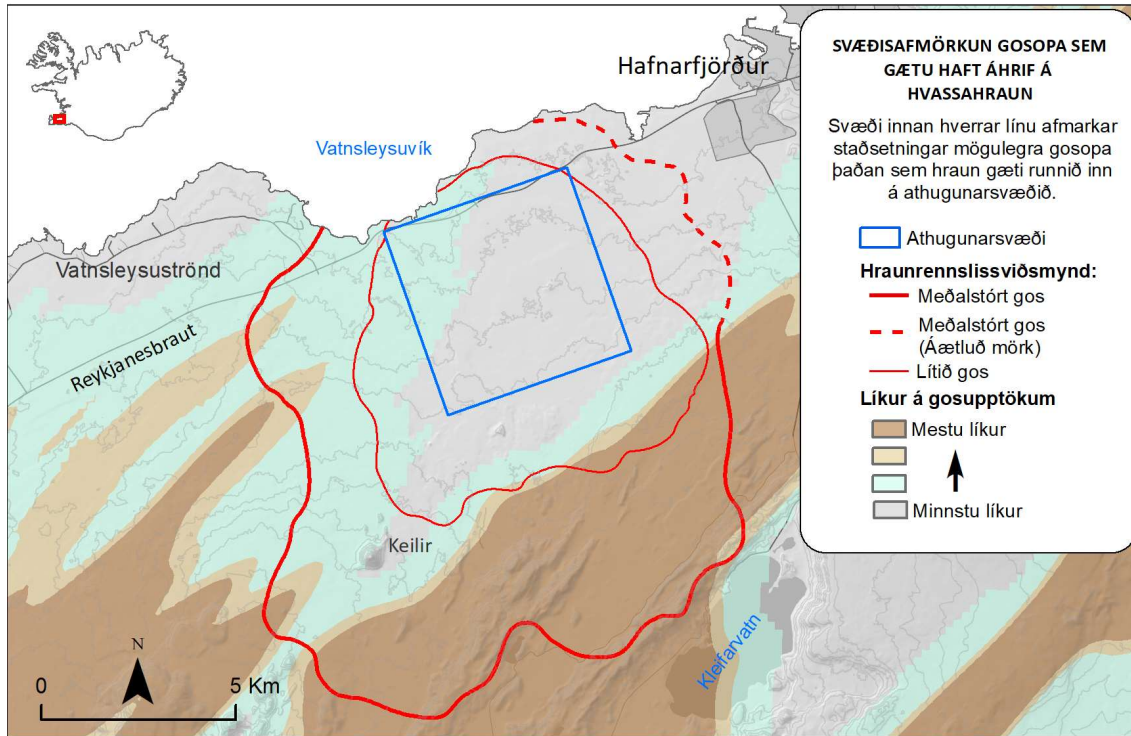


Mynd 5. Net hermigosupptaka hraungosa sem hermd eru frá hverri sviðsmynd, lítið gos, meðalstórt gos með stuttri rennislengd og meðalstórt gos með langri rennislengd (sjá Tafla 3). 500 m net hermiosupptaka er sýnt með rauðum punktum og fylgir þeim svæðum þar sem niðurstöður MatHaz kóðans gefa líkur á opnun gosopa (brúnn, ljósbrúnn og grænn litur á Mynd 3). Hermanir frá 1 km neti hermiosupptaka (svartir punktar) úr öðrum verkefnum voru notaðar á þeim svæðum sem niðurstöður MatHaz kóðans gefa engar eða hverfandi líkur á opnun gosopa en slíkar hermanir voru ekki gerðar fyrir meðalstór gos með langa rennislengd.

4.3 Afmörkun gosupptaka sem gætu veitt hrauni inn á athugunarsvæði

Niðurstöður hraunhermana (Tafla 3) voru notaðar til að afmarka upptakasvæði sem veita hrauni inn á athugunarsvæðið umhverfis mögulegt flugvallarstæði í Hvassahrauni (Mynd 6). Til að gosupptök lentu innan afmörkunar var nægilegt að örlítill hluti hermds hraunflæðis kæmist inn á athugunarsvæðið. Afmörkun gosopa var annars vegar gerð fyrir lítil gos ($0,02 \text{ km}^3$; fin rauð lína Mynd 6) og hins vegar fyrir meðalstór gos ($0,3 \text{ km}^3$; breið rauð lína Mynd 6) en svæðisafmörkun meðalstórra gosa byggir á niðurstöðum bæði hermanna með stutta og langa rennislengd (sbr. Tafla 3). Með öðrum orðum þá afmarka rauðu línurnar á Mynd 6 svæði þaðan sem gosupptök geta veitt hrauni inn á athugunarsvæðin skv. niðurstöðum hraunhermana.

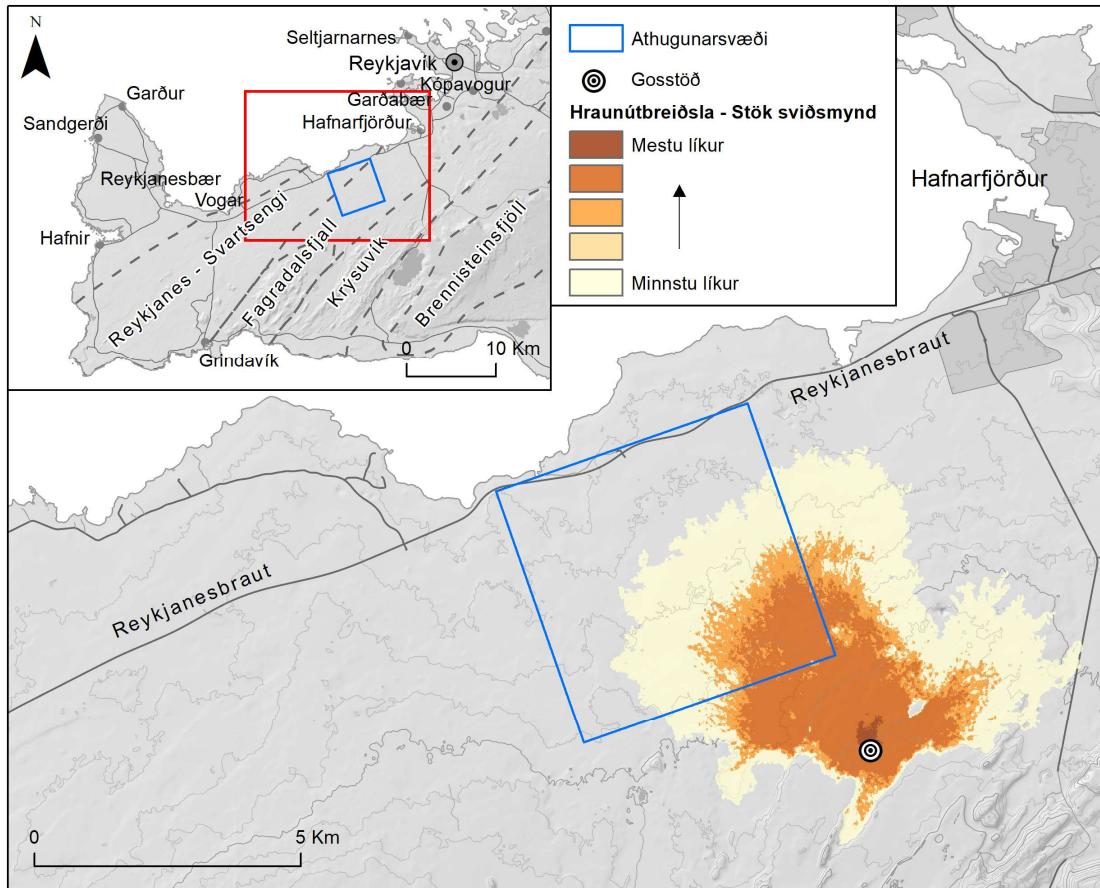
Á Mynd 6 sést að niðurstöður hermanna lítilla gosa ($0,02 \text{ km}^3$) benda til að gosupptök í yfir $\sim 2 \text{ km}$ fjarlægð frá suður mörkum athugunarsvæðis koma hrauni ekki inn á athugunarsvæðið. Aðeins lítill hluti afmarkaða svæðisins sunnan við athugunarsvæðið er talinn líklegur til gosupptaka (sýnt með brúnum lit á Mynd 3 og Mynd 6). Meginhalli landslags á svæðinu er til norðnorðvesturs sem veldur því að hraun með gosupptök austan og vestan við athugunarsvæðið renna frekar meðfram athugunarsvæðinu en inn á það. Þetta skýrir hvers vegna mun styttra er að útmörkum svæðisins sem afmarkar möguleg gosupptök austan, vestan og norðan við athugunarsvæðið en sunnan þess. Á þessum svæðum eru einnig minni líkur á gosupptökum (sjá Mynd 3).



Mynd 6. Landfræðileg afmörkun gosupptaka (rauðar línur) þaðan sem hraun geta flætt inn á athugunarsvæðið í Hvasahrauni. Rauð breið lína afmarkar hermiupptök meðalstórra hrauna ($0,3 \text{ km}^3$) með bæði stutta og langa rennslislengd (~ 5 og 10 km) sem geta veitt hrauni inn á athugunarsvæði og rauð mjó lína afmarkar á sama hátt hermiupptök lítilla hrauna ($0,02 \text{ km}^3$). Grár, grænn, ljósbrúnn og brúnn litur táknar auknar líkur á gosupptökum þar sem brúnn sýnir mestar líkur og grár hverfandi líkur (sbr. Mynd 3). Líklegast er að hraun með upptök innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur hafi áhrif á athugunarsvæðið.

Niðurstöður hermanna meðalstórra hrauna og svæðisafmörkun gosupptaka sem hafa áhrif á athugunarsvæði í Hvasahrauni sýna að gosop upp í u.þ.b. 8 km fjarlægð frá útmörkum suðurhluta athugunarsvæðis geta myndað hraun sem rennur inn á svæðið (Mynd 6). Töluverður hluti þeirra gosupptaka sem afmarkast á þennan hátt eru innan svæðisins suður og suðsuðaustan við athugunarsvæðið sem sýnir mestar líkur á gosupptökum (dökkbrúnt svæði á Mynd 3, Mynd 6). Meginhalli landslags hefur sömu áhrif á meðalstór hraun og þau litlu og því er á sama hátt styttra frá athugunarsvæðinu að útmörkum svæðisafmörkunar gosupptaka meðalstórra gosa vestan, austan og norðan athugunarsvæðisins en sunnan þess. Norðaustur hluti svæðisafmörkunar er dregin með brottinni línu þar sem hermanir meðalstórra gosa með langa rennslislengd voru ekki framkvæmdar frá 1 km neti hermigosopa (Tafla 3, Mynd 5).

Til glöggvunar sýnir Mynd 7 niðurstöðu stakrar hermunar MrLavaLoba líkansins á meðalstóru gosi ($0,3 \text{ km}^3$) með stutta rennslislengd ($\sim 5 \text{ km}$) með upptök innan líklegs upptakasvæðis (dökkbrúna svæðið á Mynd 3) á eldstöðvakerfi Krýsuvíkur. Eftir því sem litur er ljósari eru minni líkur á að hraun renni um svæðið miðað við þær upptakaforsendur sem notaðar eru (Tafla 3). Niðurstöður þessarar hermunar sýna að í þessu staka tilfalli er suðaustur horn athugunarsvæðisins í mestri hættu af því að verða fyrir hraunflæði.



Mynd 7. Stök sviðsmynd hermds meðalstórs goss ($0,3 \text{ km}^3$) með stutta rennislengd (5 km, sjá texta). Upptök sviðsmyndar eru milli Einihlíða og Markhelluhóls (svartur og hvítur hringur), innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur á svæði þar sem gosupptök eru líkleg skv. niðurstöðum MatHaz líkansins (brúnn litur á Mynd 3 og Mynd 6). Dekksti litur sýnir hvar mestar líkur eru á að hraun renni frá þessum upptökum, ljósari litur táknar minni líkur.

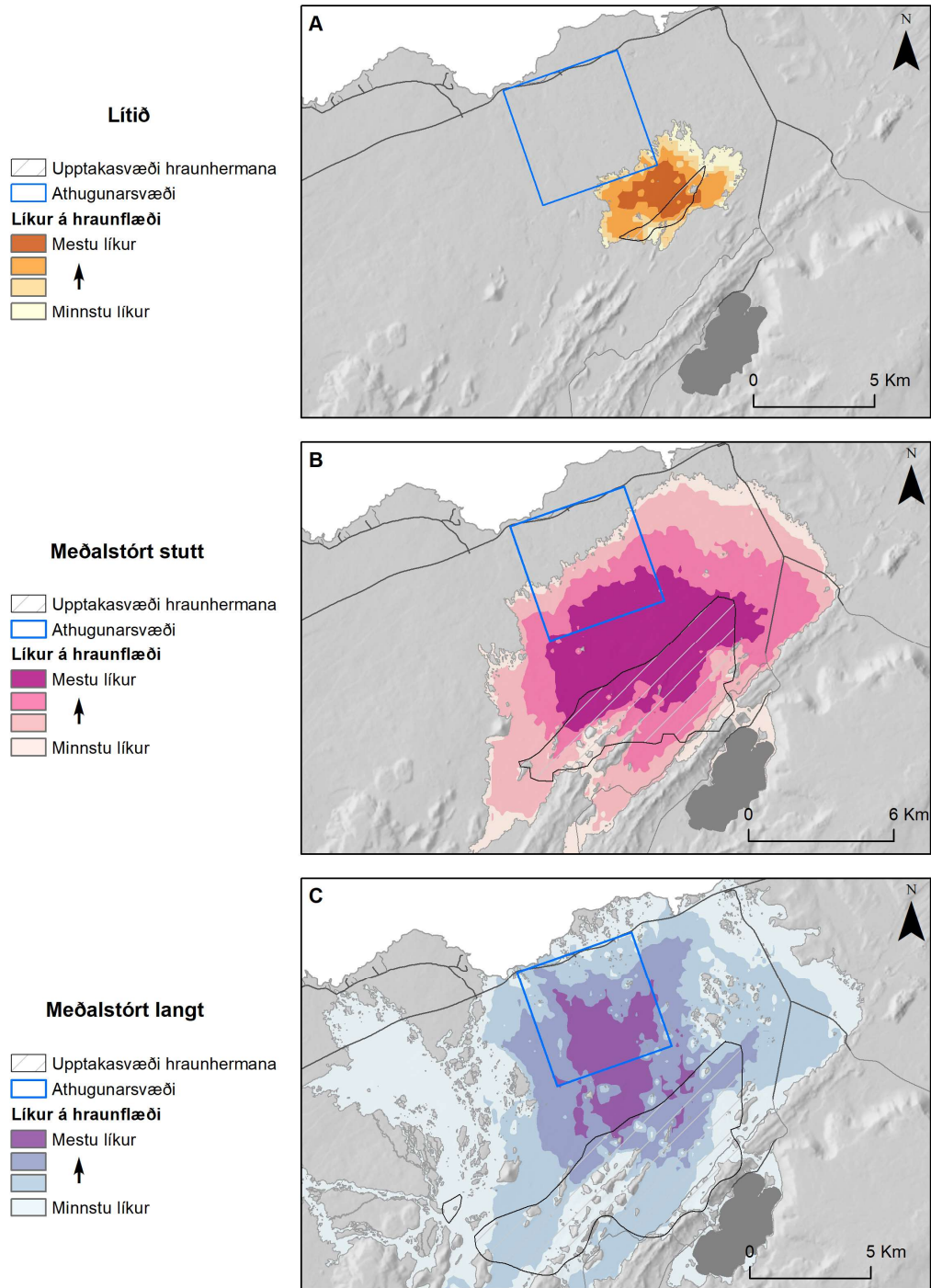
4.4 Niðurstöður hraunhermana

Með því að setja saman allar hermanir frá neti hermiupptaka hraunflæðis má sjá hvaða svæði eru líkleg til að verða fyrir hraunflæði. Mismunandi sviðsmyndir voru hermdar (Tafla 3) og hermi-gosop sem komu hrauni inn á athugunarsvæðið voru afmörkuð (Mynd 6). Innan afmörkuðu svæðanna var í framhaldi einungis unnið með hermanir frá líklegum gosupptökum skv. Mynd 3 (þ.e. unnið með dökkbrúnt svæði sem afmarkast með rauðum línunum á Mynd 6) en útlínur hraunhermana frá líklegasta gosupptakasvæðinu eru sýnar á Mynd 8 auk þess sem líkur á hraunflæði innan svæðisins eru gefnar. Eftirfarandi umræða á einungis við niðurstöður hraunhermana með gosupptök innan þessa afmarkaða svæðis.

Miðað við ofangefnar forsendur má sjá að athugunarsvæðið í Hvassahrauni er ekki útsett fyrir hraunflæði lítilla gosa ($0,02 \text{ km}^3$; Mynd 8a) en suðaustur horn svæðisins er þó berskjaldað. Við sömu skoðun meðalstórra gosa með stutta rennislengd ($0,3 \text{ km}^3$; Mynd 8b) sést að suður hluti athugunarsvæðisins er líklegastur til að verða fyrir hraunflæði en norðurhlutinn helst hraunlaus. Meðalstórt gos með langa rennislengd (Mynd 8v) er sú sviðsmynd sem hefur mesta land-

fræðilega dreifingu samkvæmt hermunum. Allt athugunarsvæðið getur orðið fyrir slíku hrauni en mestar líkur eru á að hraun renni um suðurhlutann og miðju svæðisins. Þar sem sama rúmmál er hermt í meðalstóru gosunum verða hermd hraun með stutta rennislengd þykkari en þau sem hermd eru með langa rennislengd og þau fara því fyrr að byggja upp eigið landslag sem stjórnar rennsli þeirra. Hermdu hraunin með langri rennislengd fylgja því upphafslandslagi lengur sem skýrir mestar líkur á hraunflæði inn í lægstu svæði athugunarsvæðisins. Miðað við þau hraun sem þekkt eru á Reykjaneskaganum eru líklegustu sviðsmyndirnar taldar vera lítið til meðalstórt gos með stutta rennislengd.

Hversu víðtæk áhrif hraun hefur stjórnast af stærð þess. Samkvæmt niðurstöðum hraunhermana getur mögulegt flugvallarstæði í Hvassahrauni lent undir hrauni (Mynd 8). Einungis ~2 km eru frá suðurhluta athugunarsvæðisins að svæði innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur sem fellur innan efstu 33% líkindadreifingar m.t.t. gosupptaka (dökkbrún svæði á Mynd 3). Eigi gos sér stað á þessu svæði benda niðurstöður til þess að líklegt sé að hluti athugunarsvæðisins verði fyrir hrauni, en hve stór hluti þess stjórnast af endanlegri stærð og rennislengd hrauns. Ólíklegt er að hraun renni yfir Reykjanesbrautina á þessu svæði en það er þó ekki útilokað. Í gosi í Fagradalsfjalli árið 2021 voru gerðar tilraunir með hraunvarnargarða sem mótvægisáðgerðir og lesa má um þær tilraunir í minnisblöðum vinnuhóps um varnir mikilvægra innviða (Dóra Hjálmarsdóttir, 2022; og minnisblöð).



Mynd 8. Útlínur allra hraunhermana sem veita hrauni inn á athugunarsvæði í Hvasshrauni og hafa gosupptök innan líklegs upptakasvæðis (þ.e. hermanir frá dökkbrúnu svæði sem afmarkast með rauðum línunum á Mynd 6). Litur táknar líkur á hraunflæði innan svæðis, sjá litaskala vinstra megin við myndir. A) Lítið gos ($0,02 \text{ km}^3$). B) Meðalstórt gos með stutta rennislengd ($0,3 \text{ km}^3$, 5 km). C) Meðalstórt gos með stutta rennislengd ($0,3 \text{ km}^3$, 10 km). Vert er að árétta að útlínur sýna útlínur fjölda hraunhermana (sjá Töflu 3) en tákna á engan hátt hraun sem myndast í stöku gosi.

5 Jarðskjálftar

5.1 Jarðskjálftavá og válíkindi

Jarðskjálftavá á Íslandi er hæst á þverbrotabeltum landsins því þar verða stærstu jarðskjálftarnir eins og sögulegar heimildir, mælingar og rannsóknir vitna um. Þar sem jarðskjálftavá og innviðir nútíma samfélags fara saman myndast áhætta vegna jarðskjálfta sem draga þarf úr eftir markvissum og kerfisbundnum leiðum. Grundvallandi aðferð í því sambandi er jarðskjálftahönnun mannvirkja samkvæmt byggingarstöðlum og er Eurocode 8 Evrópustaðallinn í gildi fyrir Ísland. Beiting hans á Íslandi byggir á Þjóðarskjali Íslands fyrir hönnunarstaðalinn (en: Icelandic National Annex to Eurocode 8). Þjóðarskjalið er skjálftavárlíkindakort (en: probabilistic seismic hazard map) fyrir Ísland og tilgreinir líkur á því að lárétt hröðun yfirborðs jarðar í jarðskjálfta fari yfir ákveðið gildi á 50 ára tímabili. Þjóðarskjalið var fyrst gefið út árið 2002 þegar staðallinn tók gildi og endurskoðað eftir jarðskjálftann í Ölfusi 2008 (Staðlaráð Íslands, 2002; 2009).

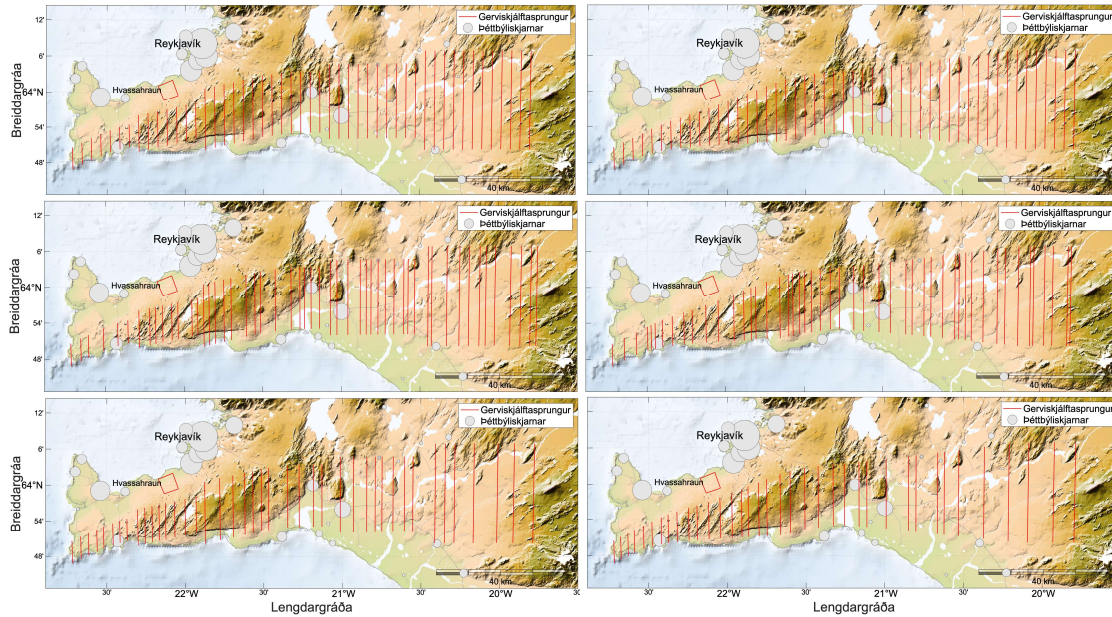
Þekking á þeim þáttum sem liggja til grundvallar greiningu skjálftavárlíkinda hefur aukist gríðarlega á síðustu árum. Þessir þættir eru meginleg framsetning á staðsetningum þeirra jarðskjálftasprungna sem hafa mest áhrif á válíkindin, jarðskjálftavirkni þeirra og ný líkön fyrir dvínun jarðskjálftahreyfinga með fjarlægð út frá tiltekinni jarðskjálftastærð. Í þessum kafla verður farið yfir stöðu þekkingar, auk þess sem nýjar niðurstöður og líkön verða kynnt í talsvert meiri smáatriðum en almennt er gert. Hin nýju líkön verða í framhaldinu lögð til grundvallar nýju mati á skjálftavárlíkindum (en: probabilistic seismic hazard assessment) fyrir mögulegt flugvallarstæði í Hvassahrauni

5.2 Jarðskjálftasprungulíkan

Dreifing mældra jarðskjálfta á brotabeltum Suðurlands og Reykjaness ásamt staðsetningum og umfangi jarðskjálftasprungna er sýnd á Mynd 4. Frá vestri til austurs virðist virkni afmarka svæði sem er tiltölulega mjótt (í norður-suður stefnu) vestast á Reykjanesi en breiðast til austurs og er breiðast austast á láglandi Suðurlands. Heimildir um sögulega jarðskjálfta og jarðskjálftaskrár sýna að jarðskjálftar verða stærstir austast á brotabelti Suðurlands og hafa tilhneigingu til að vera minni eftir því sem vestar dregur (Ingi Þ. Bjarnason o.fl., 1993; Ambraseys & Sigbjörnsson, 2000; Bellou o.fl., 2005; Panzera o.fl., 2016; Kristján Jónasson o.fl., 2021). Það er í samræmi við kortlagðar og áætlaðar sprungulengdir sem sýndar eru á Mynd 4. Út frá því er brotabeltinu hér skipti í svæði eftir hámarksstærðum jarðskjálfta og hámarksbreidd jarðskjálftasprungna á þvergangjum (Mynd 4, Tafla 4) (Bayat o.fl., 2022a,b).

Tafla 4. Gróf skipting brotabeltis Suðurlands (SISZ) og Reykjaness (RPOR) eftir hámarksdýpt jarðskjálfta (W_{max}) og hámarks jarðskjálftastærða (M_w). Svæðaskiptingin er sýnd á Mynd 4 og útskýrðar í texta hjá mynd.

Svæði	W-RPOR	C-RPOR	E-RPOR	HTJ	W-SISZ	E-SISZ
$M_{w,max}$	~5.5	~6	~6.5	~6.5	~6.7	~7
W_{max} (km)	~5	~6	~9	~9	~11	~15

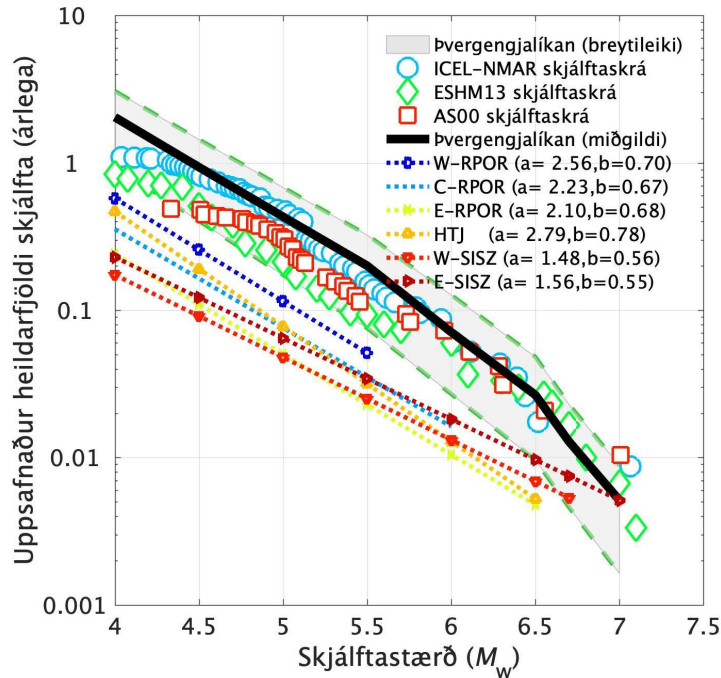


Mynd 9. Sex dæmi um raungerðar slembistaðsetningar stærstu þvergengja á brotabeltum Suðurlands og Reykjaness samkvæmt nýju þrívíðu líkani af þvergengjakerfi brotabeltanna (Bayat o.fl., 2022a,b). Mismunandi forsendur valda mun á slembistaðsetningunum sem eru sýndar. Vinstra megin er gert ráð fyrir skörpum skilum í hámarksstærðum jarðskjálfta og þar með sprungulengda á milli svæða, hægra megin er gert ráð fyrir aflíðandi breytingum í hámarksstærðum eftir beltinu. Efst eru slembistaðsetningar skilgreindar með 3 km bili á milli hermispungna, í miðjunni er bil á milli sprungna háð slembivali á bilinu 1–5 km, og neðst er svipað slembival gert þar sem minnsta mögulega bili á milli sprungna er 2 km, og mesta bil vex frá 3–8 km stöðugt frá vestri til austurs.

Þróað hefur verið nýtt líkan af þvergengjum brotabeltis Suðurlands og Reykjaness sem leyfir ofangreindan breytileika á hámarks jarðskjálftastærð eftir staðsetningu innan brotabeltisins (Benedikt Halldorsson o.fl., 2022; Bayat o.fl., 2022a,b). Líkanið er hér notað til þess að herma staðsetningar jarðskjálftasprungna á brotabeltinu og sýnir Mynd 9 slembiúrtök slíkra staðsetninga út frá mismunandi forsendum um skil á milli svæða og fjarlægðir á milli sprungna (d). Sérhvert úrtak hefur þá eiginleika líkansins sem að ofan hafa verið tíundaðir og er ekkert þeirra talið vera líklegra en annað.

5.3 Jarðskjálftavirknilíkan

Jarðskjálftavirkni svæðis er jafnan reiknuð út frá sögulegri jarðskjálftaskrá, eins og venjan er í hefðbundnu mati á skjálftavárlikindum, þrátt fyrir þær óvissur og takmarkanir sem slíkar jarðskjálftaskrár geta haft (Kramer, 1996; McGuire, 2004; Baker o.fl., 2021). Út frá jarðskjálftaskránni er reiknuð út tíðni jarðskjálfta stærri en ákveðin stærð sem fall af jarðskjálftastærð. Slíkt líkan er jafnan nefnt Gutenberg-Richter (GR) líkan og er það sýnt á Mynd 10 fyrir þrjár jarðskjálftaskrár fyrir Suðvesturland. Um er að ræða nýju ICEL-NMAR skjálftaskrána frá 1901–2019 (bláir hringir; Kristján Jónasson o.fl., 2021), jarðskjálftaskrá frá 1900–1995 (AS00, rauðir ferningar; Ambraseys & Sigbjörnsson, 2000) og jarðskjálftaskrá frá 1706 til 2006 (ESHM13, grænir tíglar; Grünthal o.fl., 2013; Stucchi o.fl., 2013) sem notuð var í samræmdu evrópsku mati á skjálftavárlikindum. Þessar jarðskjálftaskrár gefa til kynna svipaða jarðskjálftavirkni svæðisins í heild en gefa mun óskýrari mynd sé horft til einstakra svæða innan þverbrotabeltisins.



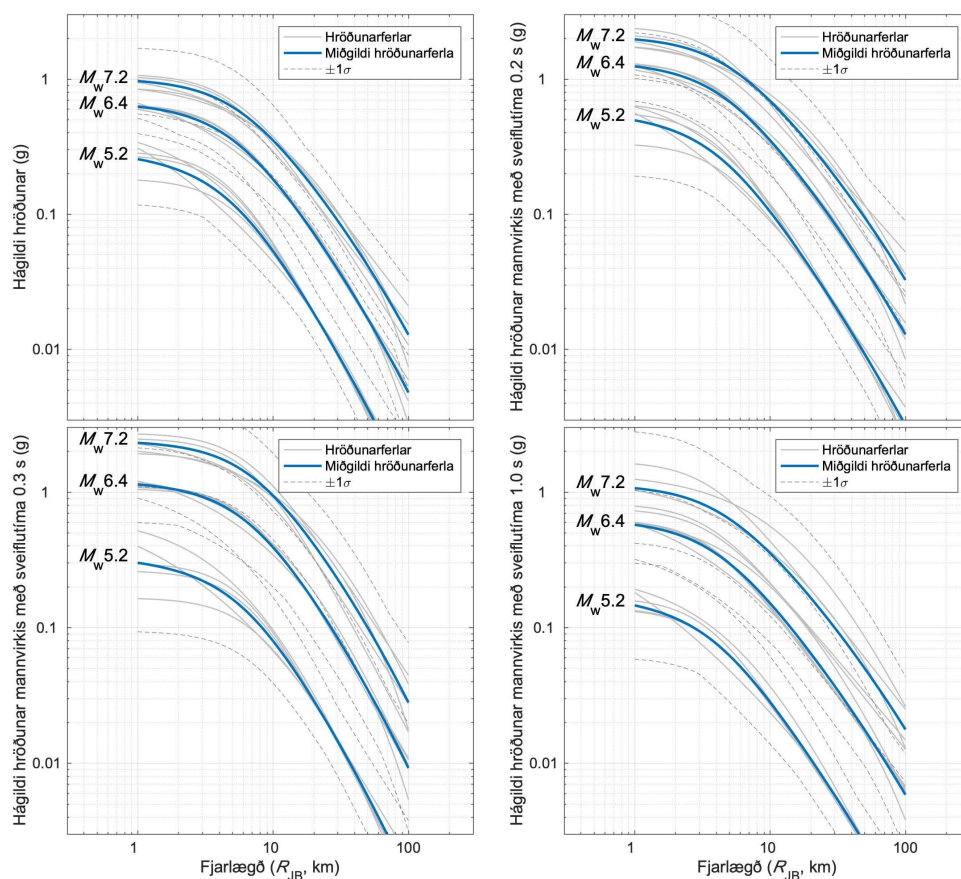
Mynd 10. Jarðskjálftavirkniferlar, oft kenndir við Gutenberg-Richter, sem sýna árlega tíðni jarðskjálfta á Suðvesturlandi stærri en jarðskjálftastærð M_w . Heildarjarðskjálftavirkni brotabeltisins út frá þremur sögulegum jarðskjálftaskráum er sýnd: ICEL-NMAR (bláir hringir), skjálftaskrá sem lá til grundvallar Evrópumatinu 2013 (ESHM13, grænir tíglar), og fyrri skjálftaskrá (AS00, rauðir ferningar), sjá heimildir í texta. Jarðskjálftavirkni hvers svæðis brotabeltisins (Mynd 4, Tafla 4) út frá hinu nýja sprungulíkani er sýnd með brotalínunum og táknum. Heildarjarðskjálftavirkni brotabeltisins út frá hinu nýja sprungulíkani er sýnd sem svört heildregin lína (miðgildi) og er reiknaður breytileiki gildisins táknaður með gráu svæði og grænum brotalínunum.

Jarðskjálftasprungulíkanið er hins vegar ekki háð slíkum annmörkum og út frá því má reikna bæði svæðisbundna (sbr. Mynd 4, Tafla 4) jarðskjálftavirkni og heildarjarðskjálftavirkni brotabeltisins alls (Bayat o.fl., 2022a,b). Á Mynd 10 sýna punktalínur hin svæðisbundnu GR-líkön, og heildarvirkni líkansins er sýnd með svartri heildreginni línu þar sem grátt svæði undir línunni gefur til kynna óvissu hennar. Með því að skoða innra samræmi í heildarvirkni hins nýja jarðskjálftasprungulíkans og virkni út frá sögulegum jarðskjálftaskráum (hringir, ferningar og tíglar á Mynd 10) sést að hið nýja líkan útskýrir jarðskjálftasögu suðvesturhorns Íslands. Þetta samræmi staðfestir notagildi hins nýja líkans til þess að lýsa formlega jarðskjálftavirkni brotabeltis Suðurlands og Reykjaness bæði í tíma og rúmi til langs tíma, en slík virkni liggur einmitt til grundvallar formlegu mati á skjálftavárlíkendum.

5.4 Dvínun jarðskjálftahreyfinga

Jarðskjálftahreyfingar á yfirborði jarðar dvína með aukinni fjarlægð frá sprungunni sem hrökk í jarðskjálftanum (Lee o.fl., 2003). Líkön sem formgera þessa lýsingu eru einfaldlega nefnd dvínunarlíkingar. Mælingar á sterkum jarðskjálftum sem nota þarf til áreiðanlegrar kvörðunar dvínunar jarðskjálftahreyfinga hafa verið af afar takmörkuðum mæli frá því að mælingar hófust á

Íslandi með hraðamælakerfi Veðurstofunnar (Stefánsson o.fl., 1993; Bødvarson & Lund, 2003) og hröðunarmælakerfi Háskólans (Sigbjörnsson o.fl., 2014). Þrátt fyrir að fjórir jarðskjálftar hafi orðið á brotabelti Suðurlands á tímabilinu, sá stærsti M_w 6.5, þá gerir einstaklega hröð dvínun jarðskjálftahreyfinga á Íslandi það að verkum að erfitt er að meta kvörðun hreyfinga umfram þær stærðir og upp að jarðskjálftastærðum sem talið er fullvíst að hafi bæði orðið (og geti orðið) á brotabeltunum ($\sim M_w$ 7). Til viðbótar hafa þær dvínunarlíkingar sem notaðar hafa verið í fyrri mötum á skjálftavárlíkendum verið á reikningslegu formi sem ekki er lengur viðurkennt til notkunar á slíku mati skv. alþjóðlegum niðurstöðum (Cotton o.fl., 2006; Bommer o.fl., 2010). Nýlega hefur verið ráðin bót á þessum annmörkum (Kowsari o.fl., 2019; 2020). Á Mynd 11 eru sýndir ferlar nýrra dvínunarlíkana fyrir jarðskjálfta á brotabelti Íslands fyrir þrjár mismunandi jarðskjálftastærðir M_w 5.2, 6.4 og 7.2. Af ferlunum má lesa, fyrir gefna fjarlægð frá Hvassahrauni í jarðskjálftasprungu þar sem skjálfti af gefinni stærð verður, hágildi þeirrar hröðunar sem búast má við í Hvassahrauni.

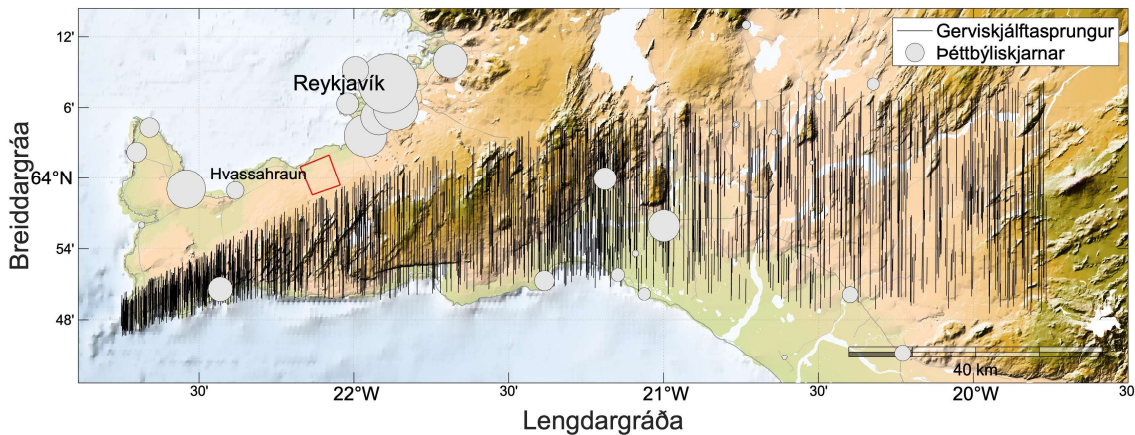


Mynd 11. Ferlar sem sýna dvínun hámarksgildis hröðunar með fjarlægð (R_{JB}) frá jarðskjálftum af stærðunum M_w 5.2, 6.4 og 7.2. Gráar þunnar línur sýna gildi ólíkra en nýrra líkana og bláar þykkar línur sýna meðalgildi þeirra. Ferlarnir gilda fyrir hágildi hröðunar yfirborðs jarðar (efst t.v.) og hinar sýna hágildi hröðunar mannvirkja með sveiflutímana 0.2 s, 0.3 s og 1 s (efst t.h. og neðstu myndir). Gráu strikalinurnar tákna staðalfrávik í kringum miðgildin.

5.5 Niðurstöður

Hefðbundið mat á skjálftavárlíkindum hefur jafnan verið metið með McGuire-Cornell aðferðinni (Cornell, 1968). Á undanförunum áratug hefur hins vegar svokölluð Monte Carlo hermun á gerviskjálftaskrá rutt sér til rúms alþjóðlega í mati á skjálftavárlíkindum (Atkinson, 2012). Sú aðferðafræði hefur beinni eðlisfræðilega skírskotun til líkindafræðilegs mats á þeim hröðunargildum sem sérhver staður kann að verða fyrir vegna jarðskjálftavirkni á tilteknu svæði. Því ber að halda til haga að Monte Carlo aðferðir hafa verið notaðar til að meta skjálftavárlíkindi á Íslandi talsvert lengur en á alþjóðlegum vettvangi (Solnes o.fl., 1994; Sigbjörnsson o.fl., 1995; Solnes & Halldorsson 1996).

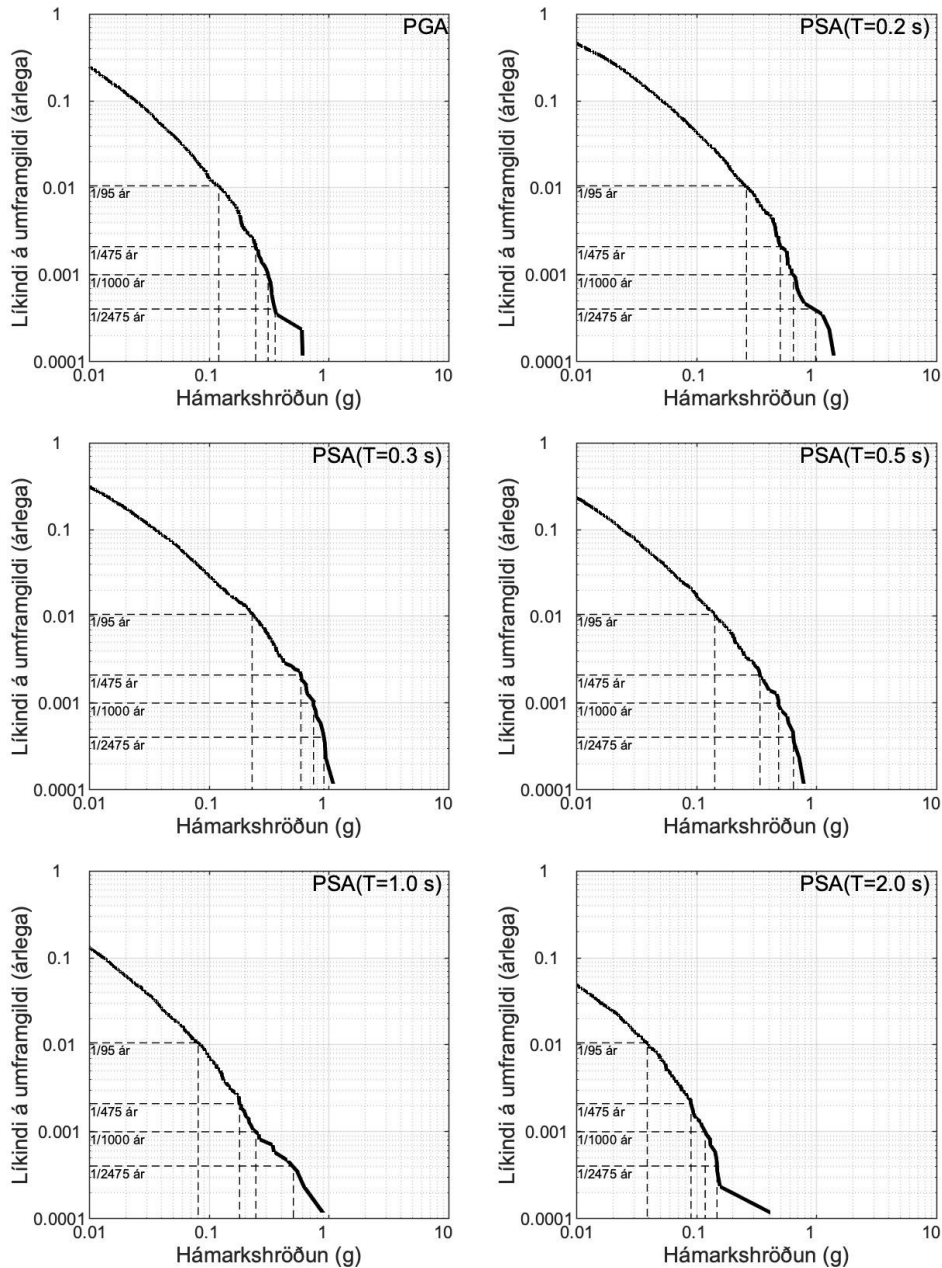
Á grundvelli hins nýja líkans af jarðskjálftum á þvergangjum brotabeltis Suðurlands og Reykjaness má þannig herma gerviskjálftaskrá til langs tíma sem er lýsandi fyrir jarðskjálftavirkni svæðisins. Dæmi um slíka gerviskjálftaskrá má sjá á Mynd 12 fyrir 5000 ára tímabil með slembivali á staðsetningum jarðskjálfta, sem er þó í fullu samræmi við hið nýja líkan. Um er að ræða ~1700 staka gerviskjálfta á stærðarbilinu M_w 5–7.2, sem nær yfir þær jarðskjálftastærðir sem mest áhrif hafa á samfélag nútímans og innviði þess. Til samanburðar má nefna að hermd gerviskjálftaskrá fyrir 500 ár hefur um 220 gerviskjálfta af stærðinni 5 eða meira, og fyrir 5000 ár með lágmarksstærð 4 er um að ræða um 8500 gerviskjálfta. Fyrir hvern gerviskjálfta þarf að beita dvínunarlíkingunum til þess að meta hámarksgildi hröðunar á sérhverjum stað þar sem meta á skjálftavárlíkindin. Hámarksshröðun er síðan metin fyrir tiltekinn stað út frá stærð gerviskjálftans og fjarlægð staðarins í gervisprunguna. Einnig er hermdur breytileikinn í hámarksshröðuninni út frá óvissumati þeirrar dvínunarlíkingar sem notuð er. Niðurstaðan er sett fram sem ferill skjálftavárlíkinda sem sýnir árleg líkindi á því að lárétt hámarksshröðun fari yfir ákveðið gildi. Mynd 13 sýnir skjálftavárlíkindaferla (en: seismic hazard curves) fyrir Hvassahraun miðað við þær forsendur sem tíundaðar hafa verið hér að ofan.



Mynd 12. Hermd gerviskjálftaskrá 5000 ára tímabils með slembivali á staðsetningum norður-suður þvergangja á brotabelti Suðurlands og Reykjaness skv. hinu nýja líkani. Gervisprungurnar eru táknaðar með svörtum heildregnum línur sem tákna umfang gerviskjálfta á stærðarbilinu M_w 5–7.2. Minnstu skjálftarnir verða á syðstu sprungunum o.s.frv.

Skjálftavárlíkindaferlarnir eru settir fram sem árlegar líkur á umframgildi hámarkshröðunar í einingunni g , sem er þyngdarhröðun jarðar ($g=9,81 \text{ m/s}^2$). Ferlarnir eru settir fram fyrir hámarks-
hröðun yfirborðs jarðar (en: PGA, peak ground acceleration) annars vegar, og hins vegar fyrir hámarkshröðun svörunar mannvirkis (en: PSA, pseudo-acceleration response spectrum) sem nálgæð er sem einnar frelsisgráðu sveiflukerfi (en: single degree-of-freedom system) sem hefur mismunandi eiginsveiflutíma (en: natural period of oscillation) T upp á 0,2, 0,3, 0,5, 1,0 og 2,0 sekúndur, hvort um sig. Árlegar líkur á umframgildi hámarkshröðunar eru teiknaðar á y -ás, og eru þær líkur merktar sérstaklega sem samsvara mismunandi endurkomutíma þ.e.a.s. mismunandi lengd tímabila sem jafnan eru notuð til viðmiðunar í jarðskjálftaverkfræði. Algengust þeirra eru 475 og 2475 ára endurkomutímar sem jafngilda því að 10% og 2% líkur á 50 ára tímabili, hvort fyrir sig, séu á því að farið verði yfir hámarksgildi hröðunar sem þeim samsvara (sjá strikálínur á Mynd 13). Fyrra gildið er jafnan notað sem viðmið hönnunarhröðunar fyrir almenn mannvirki á meðan síðara gildið er jafnan notað fyrir mikilvægari mannvirki (European Committee for Standardization 2004). Tafla 5 sýnir töluleg gildi láréttar hámarkshröðunar fyrir þær árlegu líkur sem sýndar eru með strikálínunum á Mynd 13.

Á þeirri mynd sem sýnir skjálftavárlíkindaferil fyrir hámarkshröðun yfirborðs jarðar, PGA, gefur að líta strikálínu fyrir 475 ára endurkomutíma. Tilsvareandi hámarkshröðun er síðan lesin út frá lóðréttu strikálínunni og í því tilfelli sýnir gildið 0,24 g . Tafla 5 sýnir þetta gildi í fyrstu línu, ásamt þeim sem svara til annarra endurkomutíma sem gefnir eru til kynna á myndinni fyrir PGA. Samsvarandi er gert fyrir gildi hámarkshröðunar svörunar mannvirkja fyrir mismunandi endurkomutíma. Þannig gefa niðurstöður nýs hættumats með nýjum líkönum og nýjum aðferðum að fyrir Hvassahraun eru 10% líkur á að grunnhröðun fari yfir 0,24 g á 50 ára tímabili, en 2% líkur á að hún fari yfir 0,35 g á sama tímabili. Með öðrum orðum, þá er hágildi grunnhröðunar fyrir hönnun almennra mannvirkja í Hvassahrauni metin um 0,24 g og fyrir mikilvægari mannvirki um 0,35 g með 50 ára endurkomutíma. Niðurstöðurnar eru sýndar sem meðaltöl, en tekið skal fram að sá hluti óvissunnar sem frá dvínunarlíkingunum stafar hefur verið metinn bæði í fjar sviði og nærsviði jarðskjálfta á brotabeltinu, ásamt þeim skjálftastærðum og fjarlægðum frá sprungum sem hafa mest áhrif á jarðskjálftavá. Þær niðurstöður sýna að stærð óvissunnar fyrir PGA sé 0.05–0.1 og um tvöfalt það fyrir PSA fyrir þá sveiflutíma sem sýndir eru, og að jarðskjálftar af stærðinni ~6 í fjarlægð meira en ~3–5 km frá upptakasprungum hafi mest áhrif á matið (Kowsari o.fl., 2022). Í ljósi þess skal hafa í huga að samkvæmt núgildandi þjóðarskjali Íslands fyrir Evrópustaðalinn (Standards Council of Iceland / Staðlaráð Íslands (SI) & Halldorsson, 2010) er hágildi grunnhröðunar í Hvassahrauni metið á bilinu 0,15–0,20 g með 50 ára endurkomutíma.



Mynd 13. Myndræn framsetning á skjálftavárlíkendum fyrir Hvasshraun. Sýnd eru árleg líkindi þess að lárétt hámarkshröðun yfirborðs jarðar (PGA) eða hámarkshröðun láréttar svörunar mannvirkis (PSA) sem hefur eiginsveiflutíma T vegna jarðskjálfta fari yfir ákveðið meðalgildi hröðunar. Láréttar strikalínur sýna mismunandi gildi árlegra líkinda sem gjarnan eru notuð í greiningu skjálftavárlíkinda, en hinar lóðréttu sýna samsvarandi hámarkshröðun (Tafla 5).

Tafla 5. Gildi lárétrrar hámarkshröðunar í einingu þyngdarhröðunar jarðar (g , $g=9.81 \text{ m/s}^2$) í Hvassahrauni sem talið er að verði farið yfir á ákveðnum meðalendurkomutíma (95, 475, 1000 og 2475 árum). Endurkomutíminn 475 ár jafngildir 10% líkum á 50 árum, sem dæmi. PGA táknar hámarkshröðun yfirborðs jarðar, og $PSA(T)$ táknar hámarkshröðun svörunar mannvirkis með eiginsveiflutíma T .

	95 ár	475 ár	1000 ár	2475 ár
PGA	0,12	0,24	0,31	0,35
PSA(0.2)	0,26	0,50	0,64	0,98
PSA(0.3)	0,23	0,58	0,74	0,91
PSA(0.5)	0,14	0,34	0,48	0,64
PSA(1.0)	0,08	0,18	0,25	0,50
PSA(2.0)	0,04	0,09	0,12	0,15

Til þess að setja niðurstöðurnar í samhengi má nefna að í núgildandi staðli er hönnunarhröðun á Suðurlandi 0,5 g , þar sem jarðskjálftavá er hvað hæst. Mikill meirihluti bygginga á Suðurlandi var byggður skv. eldri byggingarstöðlum (Íslenskur staðall, ÍST13) þar sem miðað var við hönnunarhröðun upp á 0,20 g og jafnvel lægri gildi fyrir hús byggð fyrir 1974. Sem dæmi má nefna að gildi hámarkshröðunar í Hveragerði í jarðskjálftanum í Ölfusi þann 29. maí 2008, sem var af stærðinni M_w 6,3 með upptök á milli Hveragerðis og Selfoss, mældust á milli 0,4 og 0,9 g , eða 2–5 sinnum hærri en hönnunarhröðun flestra bygginga. Þrátt fyrir lága hönnunarhröðun og há hröðunargildi sem hafa mælst í Suðurlandsskjálftunum þremur 17. og 20. júní 2000 (stærð M_w 6,4 og 6,5 á miðju Suðurlandi) og 29. maí 2008 þá urðu skemmdir á burðarvirkjum bygginga mun minni en búast hefði mátt við. Ástæða minni skemmda er m.a. talin vera sú að hefðbundin íslensk byggingargerð í formi lágreistra húsa úr járnbentri steypu eða timbri og með léttum þökum hafi talsverðan styrk umfram þann sem hefðbundin jarðskjálftahönnun bygginga krefst (Sigbjörnsson o.fl., 2009).

Að ofangreindu má telja fullvíst að hönnunarhröðun í Hvassahrauni sé afar viðráðanleg í nútíma mannvirkjahönnun, hvort sem um ræðir gildi skv. núgildandi Þjóðarskjali eða hærri gildi samkvæmt því mati á skjálftavárlíkindum sem hér hefur verið fram sett.

Tekið skal fram að matið sem hér er sýnt hefur verið reiknað út fyrir staðbundna jarðfræði bergs líkt og venjan er. Núverandi mat má þó bæta t.d. með því að beita nýjum dvínunarlíkningum fyrir staðbundna jarðfræði hrauna á nútíma (Rahpeyma o.fl., 2022) og leggja formlegt mat á óvissu válíkindanna með nýjustu aðferðum. Þó er talið fullvíst að meðalgildi niðurstöðu skjálftavárlíkinda (Tafla 5) muni breytast lítið við það, sér í lagi m.v. stærð óvissunnar (Kowsari o.fl., 2022).

6 Gasmengun

6.1 Gasvá og áhrif gasmengunar

Mengunar af völdum eldfjallagasa verður vart í andrúmslofti en efnasamsetning kviku sem losar eldfjallagös stjórnar samsetningu þeirra. Megnið af eldfjallagösum losnar í gíg (t.d. Delmelle og Stix, 2000) og myndar gasmengun sem rís í andrúmslofti en gös halda einnig áfram að losna úr hrauni á meðan það kólnar þó í litlu mæli sé (Simmons o.fl., 2017). Veður hefur mikil áhrif á hve mikillar mengunar verður vart og hvar, en vindur flytur gas frá upptökum og oft verður mestu gasmengunar, utan gosstöðvanna sjálfra, vart fjærri þeim m.a. vegna þess að heit gösin rísa frá gosstöðvum og hníga ekki til jarðar fyrr en þau hafa kólnað.

Mengun af völdum eldfjallagasa hefur bein áhrif á loftgæði og getur haft áhrif á heilsu manna og dýra, gróður og vatnsgæði (t.d. Hansell o.fl., 2006; Schmidt o.fl., 2011). Helstu áhrif SO₂ á heilsu manna eru erting í augum, hálsi og öndunarferum 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. hverskonar rafeindabúnaðs, rafmagnsmastra og -lína og vatnsleiðslna (t.d. vegna áhrifa tæringar; sjá t.d. Wilson G. o.fl., 2012; Wilson T. o.fl., 2012; Stewart o.fl., 2019).

Tafla 6 Lýsing á loftgæðum og áhrifum SO₂ á heilsufar miðað við styrk í 10–15 mínútur. Áhrif loftmengunar á heilsu eru háð þeim tíma sem fólk dvelur í menguninni. Heilsuverndarmörk fyrir klukkutíma eru 350 µg/m³ og heilsuverndarmörk fyrir sólarhring 125 µg/m³. Sjá nánar á vef Umhverfisstofnunar (www.ust.is/loft/loftgaedi/loftmengun-i-eldgosum/) en þar má einnig sjá ráðleggingar um viðbrögð.

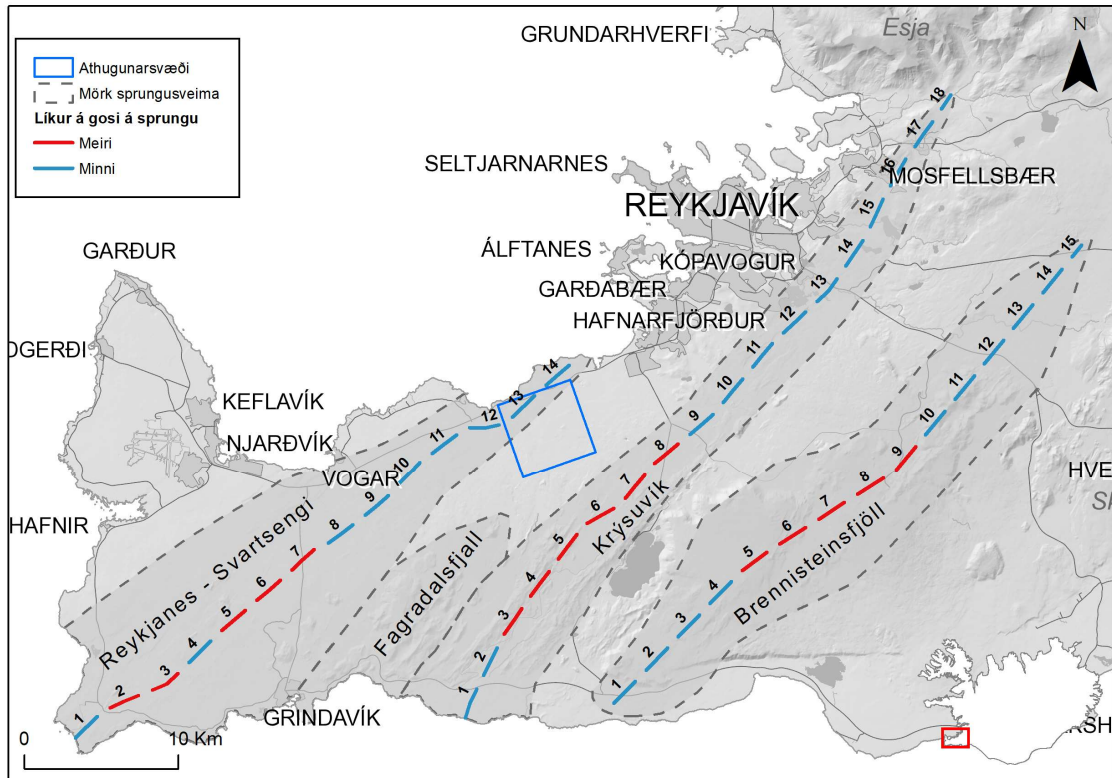
Styrkur SO ₂ í 10–15 mín		Lýsingar á loftgæðum og áhrifum á fólk
µg/m ³	ppm	
		Góð
0–350	0–0,1	Yfirlétt engin áhrif á heilsufar.
		Sæmileg
350–600	0,1–0,2	Getur valdið óþægindum frá öndunarferum hjá viðkvæmum einstaklingum.
		Óholl fyrir viðkvæma
600–2600	0,2–1,0	Einkenni frá öndunarferum líkleg hjá viðkvæmum einstaklingum. Lítil vandamál hjá heilbrigðum.
2600	1,0	Vinnuverndarmörk í 15 mín.
		Óholl
2600–9000	1,0–3,0	Einkenni frá öndunarferum líkleg hjá öllum einstaklingum, einkum einstaklingum með undirliggjandi öndunarfærasjúkdóma.
		Mjög óholl
9000–14000	3,0–5,0	Allir líklegir til að finna fyrir miðlungs- eða alvarlegum einkennum frá öndunarferum.
		Hættuástand
>14000	>5,0	Alvarleg einkenni frá öndunarferum líkleg

Þegar hraungos eru í gangi eru keyrðar daglegar SO₂ dreifingarspár sem byggja á veðurspám og metinni losun SO₂ frá gíg. Spárnar eru aðgengilegar á <https://dispersion.vedur.is>. Aðvaranir eru gefnar út ef þriggja klukkustunda meðaltal mældra SO₂ gilda á vöktunarstöðum fer yfir 500 µg/m³ eða 10 mínútna meðaltal fer yfir 9000 µg/m³ skv. tilkynningarskyldu vegna mengunar (reglugerð 920/2016). Hingað til hafa aðvaranir sem tengjast gasdreifingarspám ekki verið gefnar út að öðru leiti en því að spá fyrir um hvar mengunar verður vart.

6.2 Forsendur og aðferðir líkanhermana

Dreifing SO₂ sem losnar úr gíg í hraungosum og rís með gosmekki er hermd með líkaninu CALPUFF (Scire o.fl., 1990, 2000; Barsotti, 2020). Líkanið var notað til að gefa út klukkustundaspár SO₂ dreifingar og líkleg klukkustundagildi mengunar við jörðu þrjá sólarhringa fram í tímann í gosunum í Fagradalsfjalli árin 2021 og 2022. Samanburður á dreifingarspám og raunmælingum bendir til að líkanið standi sig vel í dreifingarhlutanum (Whitty, 2022) en spáður styrkleiki reyndist oft ofmetinn og því er mikilvægt að halda áfram þróun á gasdreifingarlíkönum svo hægt sé að bæta spár um styrkleika gasmengunar. Á meðan gasdreifingarlíkön spá ekki nógu vel fyrir um styrkleika mengunar er mikilvægt að loftgæðimælingar í rauntíma séu notaðar með gasdreifingarspám til að fá réttar upplýsingar um styrk mengunar en þær mælingar eru aðgengilegar á vefsíðu Umhverfisstofnunar, www.loftgaedi.is.

Gasdreifing var hermd frá 2 km löngum hermigossprungum, jafndreifðum með 1 km millibili eftir endilöngum miðlínunum eldstöðvakerfa Reykjanes-Svartsengis, Krýsuvíkur og Brennisteinsfjalla (Mynd 14). Annars vegar var meðalflæði SO₂ hermt (270 kg/s) og hins vegar mikið flæði (1900 kg/s; Tafla 7) en gasmælingar í gosinu í Fagradalsfjalli sýndu mun minna útstreymi SO₂ en hér var hermt. Mælt flæði í gosinu árið 2021 var oftast á bilinu 0–100 (kg/s) og meðaltalsflæði þá 6 mánuði sem gosið stóð var 60 kg/s þó að einstaka daga mældist SO₂ útstreymi allt að 400 kg/s (Pfeffer o.fl., 2022). CALPUFF líkanið gerir ráð fyrir stöðugri losun gass en eins og sást í gosunum í Fagradalsfjalli getur gaslosun í gíg verið mjög mismunandi á meðan á gosi stendur. Veðurgögn frá endurgreiningu Reiknimiðstöðvar evrópskra veðurstofa (ECMWF) sem kallast ERA-Interim voru notuð við hermanir en þau fela í sér tíðni vindátta og vindhraða í mismunandi hæð yfir sjávarmáli yfir Reykjaneskaga auk upplýsinga um hita og úrkomu. Unnið var með veður frá tíu ára tímabili eða frá 1981–1990 (ECMWF, 2011).



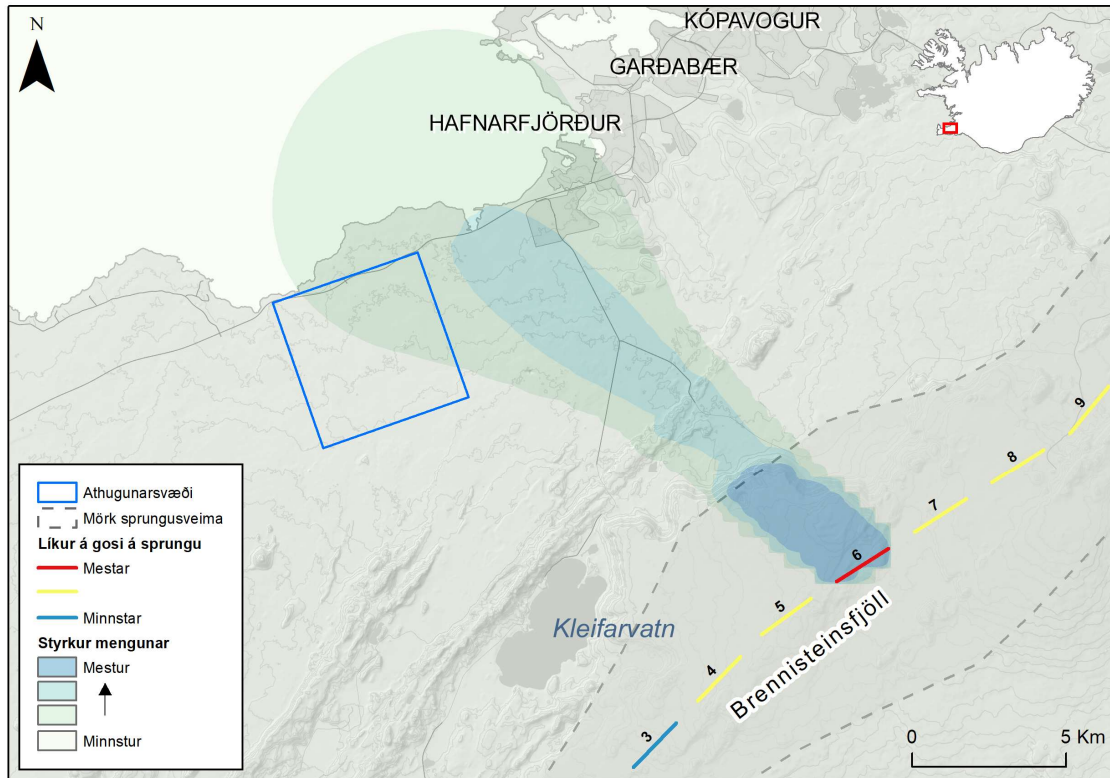
Mynd 14. Yfirlit yfir hermiggosprungur sem notaðar voru í CALPUFF líkanið við hermun gasdreifingar og styrk gasmengunar við jörðu. Likur á gosupptökum voru dregnar saman í miðlinu kerfanna með því að leggja saman MatHaz likur (Mynd 3) hornrétt á hverja hermiggosprungu innan hvers eldstöðvakerfis, rautt táknar mestar likur og blátt minnstar.

Tafla 7. Yfirlit sviðsmynda sem voru hermdar með CALPUFF líkaninu.

Sviðsmynd	Hermt gasflæði (kg/s)*	Hæð gasmakkar (km)	Heildar fjöldi hermana	Eldstöðvakerfi
Meðalgasflæði	270	2	94000	Rey-Sva, Krý, Bren
Mikið gasflæði	1900	4	94000	Rey-Sva, Krý, Bren

*Reiknað út frá metinni losun SO₂ úr kviku í Holuhraunsgosinu 2014–2015 (0,2090g SO₂/100g kviku; Bali o.fl., 2018) og metnum útstreymishraða kviku frá gosstöðvum (130–910 tonn/s; Pedersen o.fl., 2017 sé miðað við eðlisþyngd kviku 2600 kg/m³).

Alls voru gerðar 2000 hermanir frá hverri sprungu innan eldstöðvakerfanna þriggja til að ganga úr skugga um að breytileiki í veðri fái nægt vægi í niðurstöðum og að þær verði tölfræðilega marktækar. Augljóst er að breytileg hæð gosmakka sem hermdir eru í mismunandi vindstyrk og -stefnu, sem auk þess breytist með hæð yfir landi, kallar á fjöldamarga möguleika á gasdreifingu umhverfis upptakasvæði og nágrenni þess. Dæmi um niðurstöðu stakrar hermunar má sjá á Mynd 15.



Mynd 15. Dæmi um niðurstöðu stakrar keyrslu CALPUFF líkansins. Hér er sýndur styrkur gasmengunar við jörðu frá gosi á gossprungu nr. 6 innan eldstöðvakerfis Brennisteinsfjalla með SO_2 flæði 270 kg/s sem samsvarar 2 km háum gosmökk. Litur á gossprungum táknar samandregnar reiknaðar líkur á að gossprungu muni gjósa innan Brennisteinsfjalla skv. niðurstöðum MatHaz kóðans. Mestar líkur á gasmengun skv. þessari keyrslu eru norðvestan við gossprunguna og líkur á gasmengun dvina með fjarlægð. Þó er ekki útilokað að hluti athugunarsvæðisins í Hvassahrauni (blái ferhyrningurinn) verði fyrir gasmengun.

Niðurstöður allra hermanna innan hvers kerfis voru teknar saman og hermumum frá hverri gossprungu var gefið vægi út frá því hve líklegar þær eru til að gjósa (Mynd 14). Vægi gossprungna í miðlínu kerfanna byggir á samandregnum MatHaz líkum (Mynd 3) hornrétt á hverja gossprungu innan hvers eldstöðvakerfis fyrir sig. Út frá þessum gögnum voru reiknaðar afstæðar líkur á að gasmengun við jörðu næði eða færi yfir gasstyrkinn $2600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sem samsvarar vinnuverndarmörkum í 15 mínútur (Tafla 6).

Auk þess að draga saman upplýsingar á líkum þess að ákveðnum gasstyrk verði náð, á athugunarsvæði í Hvassahrauni, var líklegasti og hæsti styrkur hermdrar gasmengunar skoðaður. Til þess var heildargagnasafnið (þ.e. allar niðurstöður allra hermanna frá öllum gossprungum innan eldstöðvakerfanna þriggja) meðhöndlað tölfræðilega á tvennan hátt með því að draga fram: 1) miðgildi mengunarstyrks á athugunarsvæðinu frá hverri gossprungu en það táknar líklegasta styrkinn og 2) hæsta gildi mengunarstyrks frá hverri sprungu en það táknar mesta mögulega styrk mengunar (eða dekkstu sviðsmyndir). Gossprungurnar hafa ekki allar sama vægi (eru ekki jafn líklegar til að gjósa) og því var líklegasti og mesti gasstyrkur einnig skoðaður einungis frá líklegustu gosupptökum hvers kerfis (rauðar sprungur á Mynd 14). Gildi líklegasta og mesta hermda gasstyrks sem ættaður er einungis frá þeim gosupptökum sem eru líklegust til að gjósa eru þau gildi sem verða að teljast líklegust til að myndast. Héðan í frá verður vísað í þessar fjórar forsendur:

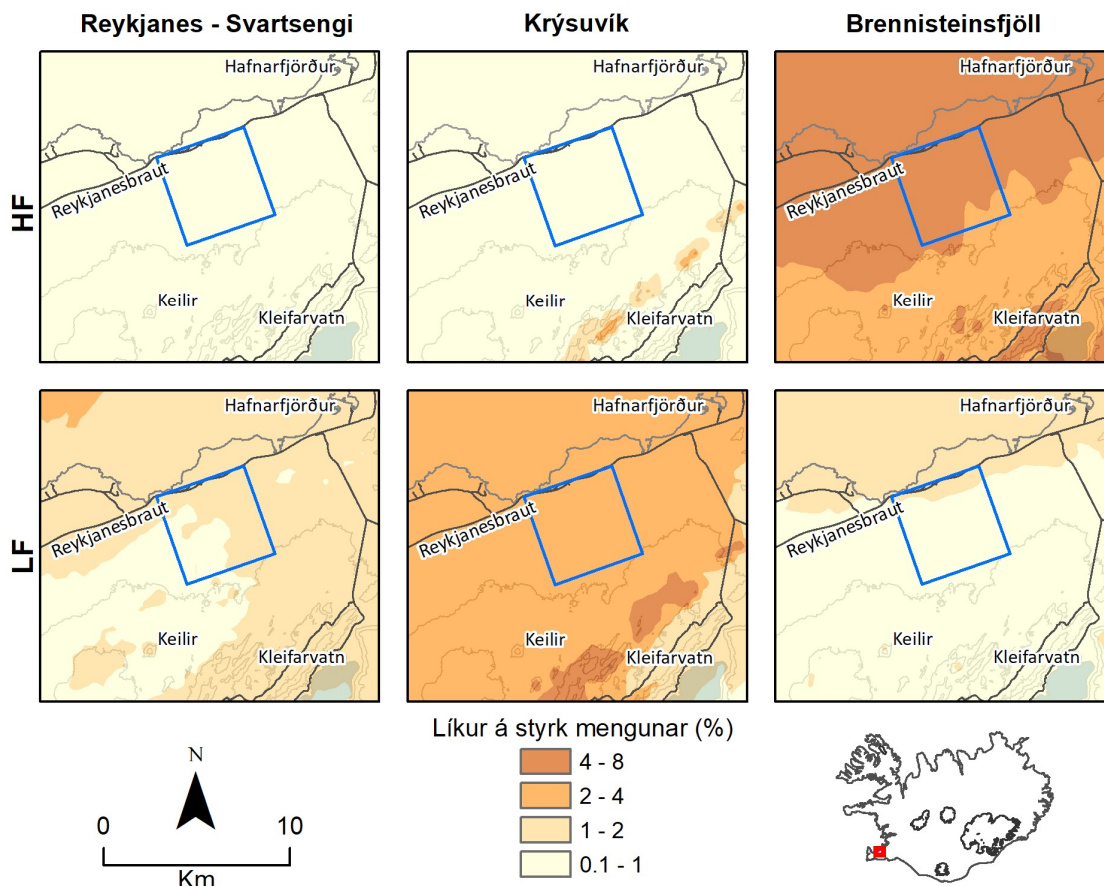
- 1: líklegasti gasstyrkur (miðgildi) frá líklegustu gosupptökum (rauðar sprungur Mynd 14)
- 2: líklegasti gasstyrkur (miðgildi) frá öllum gosupptökum (rauðar og bláar sprungur Mynd 14)
- 3: mesti gasstyrkur (hæsta gildi) frá líklegustu gosupptökum (rauðar sprungur Mynd 14)
- 4: mesti gasstyrkur (hæsta gildi) frá öllum gosupptökum (rauðar og bláar sprungur Mynd 14)

Gosprungur í gagnasafni Tölfræðileg úttekt á gagnasafni	Líklegustugosprungur (Rauðar Mynd 9)	Allar gosprungur (Rauðar og bláar Mynd 9)
Miðgildi	1. Líklegasti gasstyrkur (miðgildi) frá líklegustu gosupptökum	2. Líklegasti gasstyrkur (miðgildi) frá öllum gosupptökum
Hæsta gildi	3. Mesti gasstyrkur (hæsta gildi) frá líklegustu gosupptökum	4. Mesti gasstyrkur (hæsta gildi) frá öllum gosupptökum

Mynd 16. Yfirlit yfir meðhöndlun heildargagnasafns gasmengunargagna. Líklegasti gasstyrkur er fundinn út frá miðgildi og mesti gasstyrkur út frá hæsta gildi heildargagnasafns.

6.3 Niðurstöður gashermana

Út frá þeim hermunum sem gerðar voru frá hverju eldstöðvakerfi fyrir sig og vægi hvernar gossprungu (sbr. hve líklegar þær eru til að gjósa skv. MatHaz niðurstöðum) hafa líkur verið reiknaðar á að klukkustundarstyrkur gasmengunar nái eða fari yfir vinnuverndarmörk ($2600 \mu\text{g}/\text{m}^3$) á athugunarsvæði í Hvassahrauni (Mynd 17) að því gefnu að það gjósi í viðkomandi eldstöðvakerfi. Við þennan gasstyrk eru einkenni líkleg frá öndunarfærum hjá viðkvæmum einstaklingum en hann veldur litlum vandamálum hjá heilbrigðum einstaklingum en engu að síður er ráðlegt að slökkva á loftræstingu og forðast áreynslu utandyra (www.ust.is/loft/loftgaedi/loftmengun-i-eldgosum/). Að því gefnu að það gjósi á miðlínunum eldstöðvakerfa Reykjanes-Svartsengis, Krýsuvíkur eða Brennisteinsfjalla, hvort sem er gosi með mikla (1900 kg/s) eða meðallosun (270 kg/s) SO_2 , eru litlar líkur á að klukkustundar styrkur gasmengunar í Hvassahrauni fari yfir vinnuverndarmörk. Líkurnar eru mestar 4–8% þegar mikil gaslosun (1900 kg/s) verður frá eldstöðvakerfi Brennisteinsfjalla. Gjósi á miðlínu Krýsuvíkurkerfisins eru 2–4% líkur á að vinnuverndarmörkum sé náð frá gosi með meðallosun (270 kg/s). Í öðrum tilfellum eru innan við 2% líkur á að gasmengun fari yfir vinnuverndarmörk (Mynd 17).



Mynd 17. Líkur á að klukkustundar styrkur SO_2 mengunar við jörðu nái eða fari yfir vinnuverndarmörk ($2600 \mu g/m^3$), annars vegar af völdum mikillar losunar (HF, 1900 kg/s) og hins vegar meðallosunar SO_2 í gíg (LF, 270 kg/s). Niðurstöður eru sýndar frá hverju eldstöðvakerfi fyrir sig og búið er að taka tillit til mismunandi vægis gossprungna (sbr. Mynd 3 og Mynd 14).

Líklegustu og mestu gildi gasmengunar (Forsendur 1–2 og 3–4 sbr. Mynd 16) stjórnast af staðsetningu upptaka og vægi þeirra m.t.t. athugunarsvæðis, hæð hermids gosmakkar og ríkjandi veðrum. Spönn líklegasta mengunarstyrks innan athugunarsvæðisins sýnir lægsta og hæsta miðgildisstyrk stakra gossprungna innan hvers eldstöðvakerfis (Tafla 8) og á sama hátt sýnir spönn mestu gasmengunar lægsta og hæsta styrk mestu mengunar frá öllum gossprungum innan hvers eldstöðvakerfis (bláar og rauðar). Gildi líklegasta gasstyrks á athugunarsvæði í Hvassahrauni benda til sémilegra loftgæða upp í hættuástand en þau eru oftast óholl fyrir viðkvæma (Tafla 8; Forsendur 1 og 2). Ef horft er til mesta hermda gasstyrks eru loftgæði oftast yfir hættuástandi (Tafla 8; Forsendur 3 og 4). Þetta sýnir að líklegast er að hægt sé að takast á við gasmengun á athugunarsvæðinu en þó er greinilegt að aðstæður geta skapast þar sem gasmengun verður mjög mikil, veldur alvarlegum einkennum frá öndunarfærum og fer jafnvel yfir lífshættulegan styrk ($260.000 \mu g/m^3$).

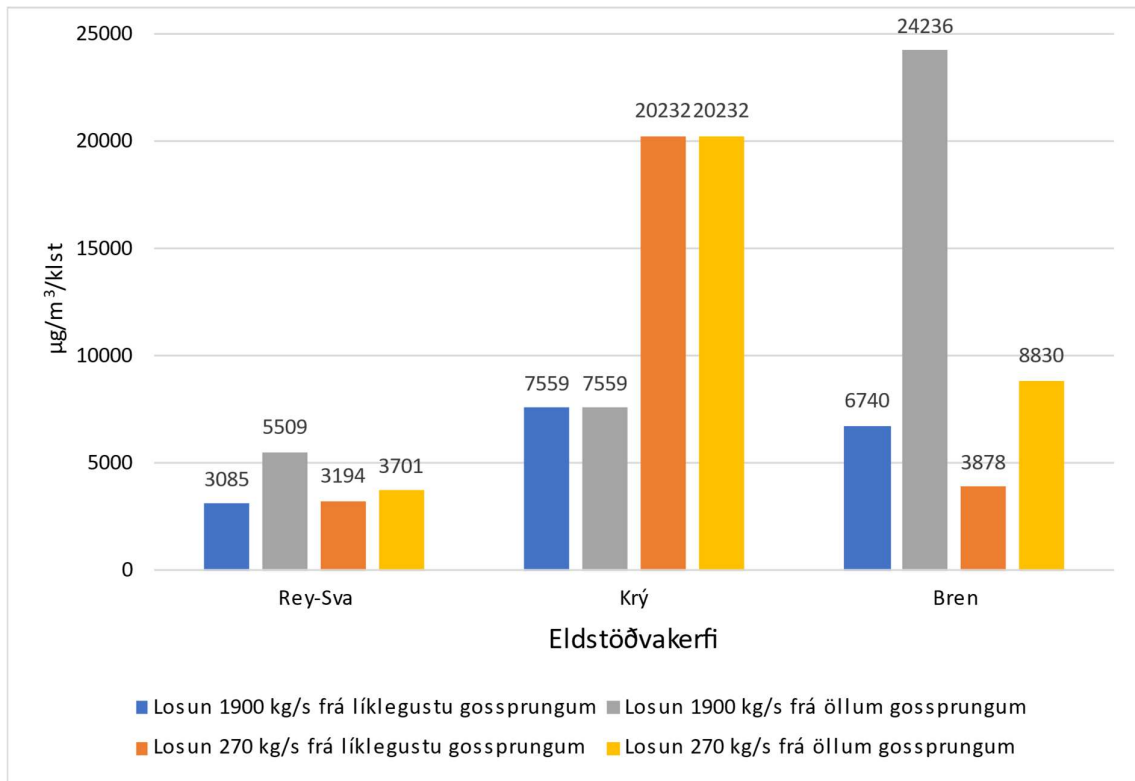
Tafla 8. Klukkustundar gildi SO₂ styrks (µg/m³) afvöldum eldgosa með mikið (1900 kg/s efri tafla) og meðal flæði (270 kg/s; neðri tafla) SO₂. Gefin er spönn líklegasta (miðgildi) og mesta (hæsta gildi) gasstyrks annars vegar frá líklegustu gossprungum til þess að gjósa skv. MatHaz niðurstöðum (Forsendur 1 og 3 Mynd 16) og hins vegar frá öllum gossprungum (Forsendur 2 og 4 Mynd 16). Spönn líklegasta styrks sýnir lægsta og hæsta styrk miðgildis frá öllum sprungum innan hvers eldstöðvakerfis og spönn mesta styrks sýnir á sama hátt lægsta og hæsta styrk hæstu gilda frá öllum gossprungum. Feitletruð gildi eru sýnd á súluriti á Mynd 18. Litir tákna mengunarþröskulda sbr. Tafla 6.

Mikið flæði SO₂ (1900 kg/s)

		Gossprungurí gagnasetti					
		Líklegustu			Allar		
Tölfræðileg úttekt á gagnasafni	Miðgildi	Eldstöðv a-kerfi	1. Lægsta gildi (µg/m ³)	1. Hæsta gildi (µg/m ³)	2. Lægsta gildi (µg/m ³)	2. Hæsta gildi (µg/m ³)	
		Rey-Sva	778	3085	434	5509	
		Krý	741	7559	741	7559	
		Bren	1557	6740	1557	24236	
	Hæsta gildi	Eldstöðv a-kerfi	3. Lægsta gildi (µg/m ³)	3. Hæsta gildi (µg/m ³)	4. Lægsta gildi (µg/m ³)	4. Hæsta gildi (µg/m ³)	
		Rey-Sva	5327	87468	578	801833	
		Krý	10743	516524	10743	560954	
		Bren	16484	76651	16484	292918	

Meðalflæði SO₂ (270 kg/s)

		Gossprungurí gagnasetti					
		Líklegustu			Allar		
Tölfræðileg úttekt á gagnasafni	Miðgildi	Eldstöðv a-kerfi	1. Lægsta gildi (µg/m ³)	1. Hæsta gildi (µg/m ³)	2. Lægsta gildi (µg/m ³)	2. Hæsta gildi (µg/m ³)	
		Rey-Sva	933	3194	608	3701	
		Krý	1291	20232	1291	20232	
		Bren	986	3878	986	8830	
	Hæsta gildi	Eldstöðv a-kerfi	3. Lægsta gildi (µg/m ³)	3. Hæsta gildi (µg/m ³)	4. Lægsta gildi (µg/m ³)	4. Hæsta gildi (µg/m ³)	
		Rey-Sva	7109	17684	2666	66347	
		Krý	7452	190085	7452	190085	
		Bren	5234	22086	5234	53623	



Mynd 18. Hæstu gildi líklegasta gasstyrks SO_2 mengunar við jörðu innan athugunarsvæðis í Hvassahrauni (sbr. feitletraðar tölur, Talfa 8). Byggt á niðurstöðum gasdreifingarlíkansins CALPUFF þar sem annars vegar var hermd mikil gaslosun (1900 kg/s; bláar og gráar súlur) og hins vegar meðallosun (270 kg/s; appelsínugular og gular súlur) frá eldstöðvakerfum Reykjaness-Svartsengis (Rey-Sva), Krýsuvíkur (Krý) og Brennisteinsfjalla (Bren).

Á Mynd 18 er sýndur hæsti líklegi styrkur SO_2 frá hverju eldstöðvakerfi annars vegar frá gosum með mikla losun (1900 kg/s; gráar súlur) og hins vegar með meðallosun (270 kg/s; gular súlur) auk þess sem sami styrkur er sýndur einungis frá þeim gossprungum sem eru líklegastar til að gjósa skv. MatHaz niðurstöðum (Mynd 3 og Mynd 14; 1900 kg/s losun sýnd með bláum súlum og 270 kg/s losun með appelsínugulum súlum (sjá gildi, Tafla 8).

Gos á eldstöðvakerfi Reykjaness-Svartsengis hefur ekki teljandi áhrif á athugunarsvæði í Hvassahrauni enda eru þær gossprungur sem líklegastar eru til að gjósa í töluverðri fjarlægð frá athugunarsvæðinu. Líklegasti gasstyrkur frá hermdum gosum á kerfinu er á bilinu 3000–5500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tafla 8 og Mynd 18) sem er aðeins ofan við vinnuverndarmörk en þá teljast loftgæði óholl. Það gildi hermist frá gossprungu nr. 12 sem er alveg við norðvestur hluta athugunarsvæðisins og er talin ólíkleg til að gjósa (Mynd 14).

Gos á eldstöðvakerfi Krýsuvíkur er líklegra til að valda gasmengun sem veldur usla á athugunarsvæðinu en gos á Reykjanesi-Svartsengi enda eru þær gossprungur sem eru líklegastar til að gjósa staðsettar næst athugunarsvæðinu (Mynd 14) sem veldur því að styrkur mengunar verður meiri. Hermanir frá líklegustu gosupptökum benda til gasstyrks á bilinu 7500–20000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Mynd 18; Tafla 8). Þessi gildi eru talin óholl til mjög óholl (skil milli flokka við 9000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) og eru allir líklegir til að finna fyrir miðlungs eða alvarlegum einkennum frá öndunarfærum við þennan styrk. Þegar styrkur SO_2 er kominn yfir 14000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ er komið hættuástand og alvarleg einkenni frá öndunarfærum eru líkleg (www.ust.is/loft/loftgaedi/loftmengun-i-eldgosum/). Vegna nálægðar

athugunarsvæðisins við gosupptök Krýsuvíkurkerfisins veldur gos með meðalflæði SO₂ frá gíg (270 kg/s) og lágum gosmekki meiri gasmengun á athugunarsvæðinu en gos með mikið flæði (1900 kg/s) og háan gosmökk þar sem hærri gosmökkur veldur því að gasið ferðast lengra í burtu áður en það hnígur til jarðar.

Brennisteinsfjöll eru í meiri fjarlægð frá athugunarsvæðinu í Hvassahrauni og hæstu hermdu gildi gasstyrks á athugunarsvæðinu eiga uppruna þar (Mynd 18; Tafla 8) en þegar allar gossprungur eru skoðaðar eru gildin á bilinu ~9000–24000 µg/m³ sem fer langt yfir hættumörk. Þessi styrkur næst í gosum með miklu SO₂ flæði (1900 kg/s) frá gíg á gossprungum 1 og 2. Þegar einungis líklegustu gossprungur eru skoðaðar er hermdur gasstyrkur á bilinu ~3800–6700 (Tafla 8) sem fellur undir óholl loftgæði en allir eru líklegir til að finna fyrir einkennum frá öndunarferum og fólki er ráðlagt að halda sig innandyrna, loka gluggum og slökkva á loftræstingu (www.ust.is/loft/loftgaedi/loftmengun-i-eldgosum).

Þegar farið er yfir niðurstöður gasmengunarhermana er gos innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur með upptök í kringum Trölladyngju (á gossprungum 5 og 6, Mynd 14) og meðalgasflæði eða lágan gosmökk líklegast til að valda gasmengun á athugunarsvæðinu í Hvassahrauni. Gos á þessum slóðum gefa hæsta mengunarstyrk frá gossprungum sem auk þess eru taldar líklegar til að gjósa (Mynd 14). Mesti gasstyrkur (forsendur 3 og 4 Mynd 16) sýnir þó að gos frá öllum kerfum geta valdið gasmengun með styrk sem fer langt yfir hættumörk (>14.000 µg/m³; Tafla 8) en hæstu hermdu gildi fara yfir 800 þúsund µg/m³.

Í framhaldi hermana er vert að nefna að raunmælingar á 10 mín meðaltalsmengunarstyrk nærri gosupptökum í Fagradalsfjalli árið 2021 (<1 km frá upptökum) sýndu gasstyrk SO₂ upp í 20.000 en í 10–12 km fjarlægð mældist mengun 1500–2500 µg/m³ (óholl fyrir viðkvæma; Tafla 8); Barsotti o.fl. 2023). Styrkur í 10–12 km fjarlægð er gefinn því það er sambærileg fjarlægð og er frá norðaustur mörkum eldstöðvakerfis Fagradalsfjalls að útmörkum athugunarsvæðisins í Hvassahrauni. Í Holuhraungosinu 2014–2015 mældust 50.000 µg/m³ með stakri handmælingu en í 10–14 km fjarlægð frá upptökum mældist 10.000 µg/m³ (mjög óholl; Tafla 8). Nærri upptökum hafa því mælst mengunargildi yfir hættumörkum (Barsotti o.fl. 2023 og óbirt gögn úr gagnagrunni Veðurstofu Íslands).

Líklegast er að gasmengun valdi ekki miklum usla á athugunarsvæðinu (innan við 8% líkur á að gasmengun fari yfir vinnuverndarmörk, Mynd 17) þó að þær aðstæður geti skapast að loftgæði verði mjög óholl og jafnvel að gasstyrkur fari langt yfir hættumörk (Tafla 8). Mesta váttafar af gosi með meðalflæði (270 kg/s) sem myndar lágan gosmökk á eldstöðvakerfi Krýsuvíkur enda er það næst athugunarsvæðinu auk þess sem hluti kerfisins sem er líklegur til að gjósa er í mikilli nálægð við svæðið. Með það í huga þarf að hanna mannvirki á þann hátt að hægt sé að loka gluggum og slökkva á loftræstingu með litlum fyrirvara og sjá til þess að starfsfólk sem vinna utandyra komist í skjól innan dyra eða út af menguðum svæðum sem fyrst. Gott samráð er milli fagstofnana og viðbragðsaðila s.s. VÍ, Embætti landlæknis, Umhverfisstofnunar og almannavarna og á heimasíðum þeirra má finna leiðbeiningar við viðbrögð við gasmengun og mótvægisáðgerðir til að draga úr heilsufarslegum áhrifum hennar (t.d. <https://ust.is/loft/eldgos/leidbeiningar-a-timum-eldgosa/>, <https://www.almannavarnir.is/natturuva/so2-mengun-vegan-eldgosa/>, <https://island.is/vidbunadur-gegn-va/eldgos>).

7 Gjóska

7.1 Gjóskufallsvá

Gjóska myndast í flestum eldgosum á Íslandi þótt hún sé aðeins örlítill hluti af hraungosum af þeirri gerð sem er einkennandi á Reykjaneseskaga. Gjóska getur flust langar vegalengdir frá gosupptökum og því getur gjóskufall frá eldstöðvum í tuga og hundraða kílómetra fjarlægð valdið usla. Þannig stafar mesta vá af völdum gjóskufalls ekki endilega frá þeim eldstöðvakerfum sem eru næst athugunarstað. Virkustu eldstöðvakerfi landsins, Grímsvötn, Bárðarbunga, Hekla og Katla hafa öll gosið sprengigosum sem hafa dreift gjósku um stóran hluta landsins og tvö þeirra, Katla og Hekla, hafa myndað gjóskulög sem varðveitast á Reykjaneseskaga. Yngsta lagið, og það eina sögulega frá kerfunum tveimur, er frá Kötlugosi sem átti sér stað árið 1500 (rúmmál nýfallinnar gjósku $0,5 \text{ km}^3$, Guðrún Larsen, 2000, 2010) en fjögur önnur Kötulög finnast á skaganum, öll eldri en 2000 ára (Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Tvö þeirra eru fremur þunn líkt og K-1500 en hin tvö töluvert þykkari þannig að líklegast hafa þau öll myndað svipað eða meira gjóskumagn en K-1500 (t.d. Bryndís Róbertsdóttir, 1992; Helgi Torfason og Magnús Á. Sigurgeirsson, 2001). Þrjú Heklulög finnast, öll eldri en 1400 ára. Rúmmálsmat hefur verið gert fyrir tvö þessara laga, Hekla-A myndaði um $0,5 \text{ km}^3$ af nýfallinni gjósku og hið vel þekkta Hekla-4 um 10 km^3 . Sú hluti svokallaðs Landnámslags sem myndaðist í Torfajökli árið 877 finnst einnig á skaganum en gjóskumagn þess hefur verið metið $0,4 \text{ km}^3$ (Guðrún Larsen o.fl. 1999). Sprengivirkni er lítil sem engin í eldstöðvakerfum Reykjaneseskagans en gjóskufall er þekkt frá neðansjávargosum suðvestan undan ströndum Reykjanestáar (t.d. Magnús Á. Sigurgeirsson, 1995a) en gjóska frá gosi í sjó úti fyrir Reykjanesi lagðist yfir allan Reykjaneseskagann í Reykjaneseldum árið 1226 en gjóskulagið kallast Miðaldalagið (Magnús Á. Sigurgeirsson, 1992). Áhrif gjósku geta verið töluverð þótt í litlu magni sé en gjóska spillir loftgæðum, hefur áhrif á flugstarfsemi í lofti og á landi, dregur úr skyggni og breytir aksturs-skilyrðum á vegum, getur valdið mengun í vatnsbólum og gróðri og haft áhrif á rafmagnsinnviði auk þess sem þungi gjósku getur sligað þök og veggj. Gjóska hefur mest áhrif þegar hún fellur upprunalega til jarðar en eftir gjóskufall getur gjóskufok haft slæm áhrif á loftgæði og skyggni í langan tíma.

7.2 Forsendur og aðferðir líkanhermana

Við hermanir gjóskudreifingar hefur líkanið VOL-CALPUFF verið notað (Barsotti o.fl., 2008) en það er í raun viðbót við CALPUFF líkanið sem notað er við gasdreifingarhermanir. Með viðbótinni er föstum efnunum bætt við og skoðað hvernig gosmökkur rís og hvernig gosefni finni en 6,4 cm losna úr honum. Til að keyra VOL-CALPUFF líkanið þarf að skilgreina kennistærðir goss sem hermt er s.s. hæð gosmakkar, magn gosefna og kornastærðadreifingu.

Gjóskudreifing hefur verið hermd frá fimm eldstöðvakerfum, Heklu, Kötlu, Snæfellsjökli, Örafajökli og Reykjanesi (sjá Mynd 1a). Gos frá þessum eldstöðvakerfum voru hermd þar sem þau hafa öll valdið gjóskufalli og gætu þar af leiðandi haft áhrif á athugunarsvæðið í Hvassahrauni í framtíðargosum. Mismunandi forsendur eru notaðar fyrir hermun frá hverju eldstöðvakerfi, Heklugosið árið 1980 er fyrirmynd Hekluhermunar en það er fremur lítið gos ($0,06 \text{ km}^3$) og er hugsað sem fyrirmynd Heklugosa með um 10 ára endurkomutíma og endurspeglar því ekki verstu sviðsmyndir Heklugosa (sbr. stærðir Heklu A og Heklu-4 sem hafa verið metin $0,5$ og 10 km^3). Kötlugosið árið 1918 er fyrirmynd Kötluhermana en það er gos sem hefur 50–100 ára endurkomutíma og stórgosið í Örafajökli árið 1362 er fyrirmynd Örafajökulshermana en

endurkomu tími slíks goss er um 500–1000 ár. Miðaldalagið er fyrirmynd hermunar sprengigoss suðvestan við Reykjanestá en lítið er vitað um gosin sem mynduðu gjóskulög úr Snæfellsjökli en hér er notast við áætlað stærðarbil þeirra (Tafla 9). Sömu veðurgögn voru notuð og við gasmengunarhermanir, ERA-Interim frá 1981–1990 (ECMWF, 2011).

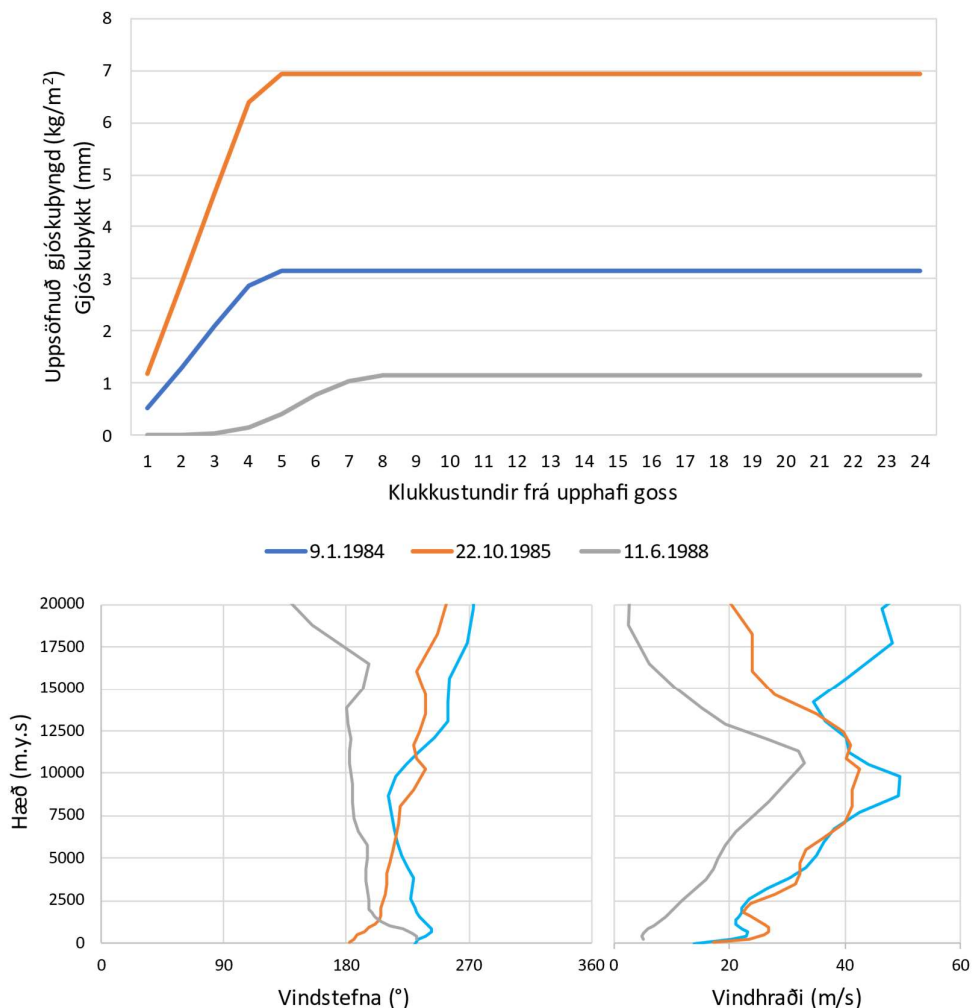
Líkanið vinnur með ákveðið magn gjósku og því skiptir lengd hermds goss töluverðu máli. Til að láta gos af sömu stærð, þ.e. sama magn gosefna, standa mislengi þarf afl þess að vera breytilegt sem skilar sér í misháum gosmekki. Ef allt gjóskumagn er látið myndast á stuttum tíma þarf kraftur gossins að vera meiri og þ.a.l. verður gosmökkur hærri, en ef gjóskumagnið er látið myndast á löngum tíma er kraftur goss minni og gosmökkur þ.a.l. lægri. Gos af sömu stærð voru hermd í mislangan tíma frá Reykjanesi (0,1 km³ látinn myndast á annars vegar 4 klst og hins vegar 72 klst) og frá Snæfellsjökli (0,2 km³ látnir myndast á 1 og 8 klst og 0,5 km³ látnir myndast á 2 og 19 klst; Tafla 9) og því fengust niðurstöður frá mismunandi gosum og gosmakkarhæð en héðan í frá er vísað til þessara gosa sem langra og stuttra gosa.

Tafla 9 Upphafsforsendur og kennistærðir sem notaðar eru við hermun gjóskudreifingar. Þær upphafsforsendur sem hafa mest áhrif á hermanir eru feitiletraðar.

Forsendur	Hekla	Reykjanes 1226		Snæfellsjökull				Katla	Öræfajökull
	1980	Langt	Stutt	Líklegt		Dekksta		1918	1362
				Stutt	Langt	Stutt	Langt		
Hæð gosmakkar (km)	~15	3-7	9-15	12	12	25	25	15	25-35
Rúmmál nýfallinnar gjósku (km ³)	~0,06	0,1 [*]	0,1 [*]	0,2	0,5	0,2	0,5	~0,7	~10
Lengd goss (klst)	2	72	4	~8	19	~1	~2	24	18-24
Radíus gosops (m)	45	10	25	50	50	85	85	35	300
Uppstreymishraði (exit velocity; m/s)	250	60	240	100	100	280	280	250	300
Magn vatnsgufu (wt%)	3	0,1	0,1	2,5	2,5	2,5	2,5	3	3
Hítastig kviku í gosopi (K)	1300	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Eðlisþyngd gjósku (kg/m ³)	1000	1000	1000	700	700	700	700	1000	1000
Þyngd gjósku (kg)	~3,9*10 ¹⁰	1*10 ¹¹	1*10 ¹¹	1,4*10 ¹¹	3,5*10 ¹¹	1,4*10 ¹¹	3,5*10 ¹¹	~4,9*10 ¹¹	~4,8*10 ¹²
Útstreymishraði (mass flow rate; kg/s)	7*10 ⁶	3,4*10 ⁵	8,5*10 ⁶	5,1*10 ⁶	5,1*10 ⁶	4,1*10 ⁷	4,1*10 ⁷	4,8*10 ⁶	4,2*10 ⁸
Heildarkornastærðardreifing (TGSD)	H-1991*	R-1226°	R-1226°	H-1104*	H-1104*	H-1104*	H-1104*	H-1991*	Tilbúin [†]
Lengd VOL-CALPUFF keyrslu (klst)	24	96	48	96	96	48	48	24	48
Fjöldi hermana	750	500	500	300	360	300	300	600	500

°Agnes Ösp Magnúsdóttir 2015; *Ármann Höskuldsson o.fl., 2018b; †Sara Barsotti o.fl., 2020.

Gerðar voru 300–750 hermanir frá hverjum upptakastað (Tafla 9) til að ganga úr skugga um að breytileiki í veðri fengi nægt vægi í niðurstöðum og að niðurstöður séu tölfræðilega marktækar. Dæmi um niðurstöðu stakra hermana sama gossins má sjá á Mynd 19 sem sýnir hve mikil áhrif veður hefur á dreifingu og uppsöfnun gjósku þar sem uppsöfnuð gjóskuþykkt er frá u.þ.b. 1 mm upp í 7 mm þykkt á mismunandi dagsetningum. Niðurstöður allra hermana frá hverju eldstöðvakerfi voru svo notaðar til að skoða hve líklegt er að gjóskufall hafi áhrif á athugunarsvæðið í Hvassahrauni.



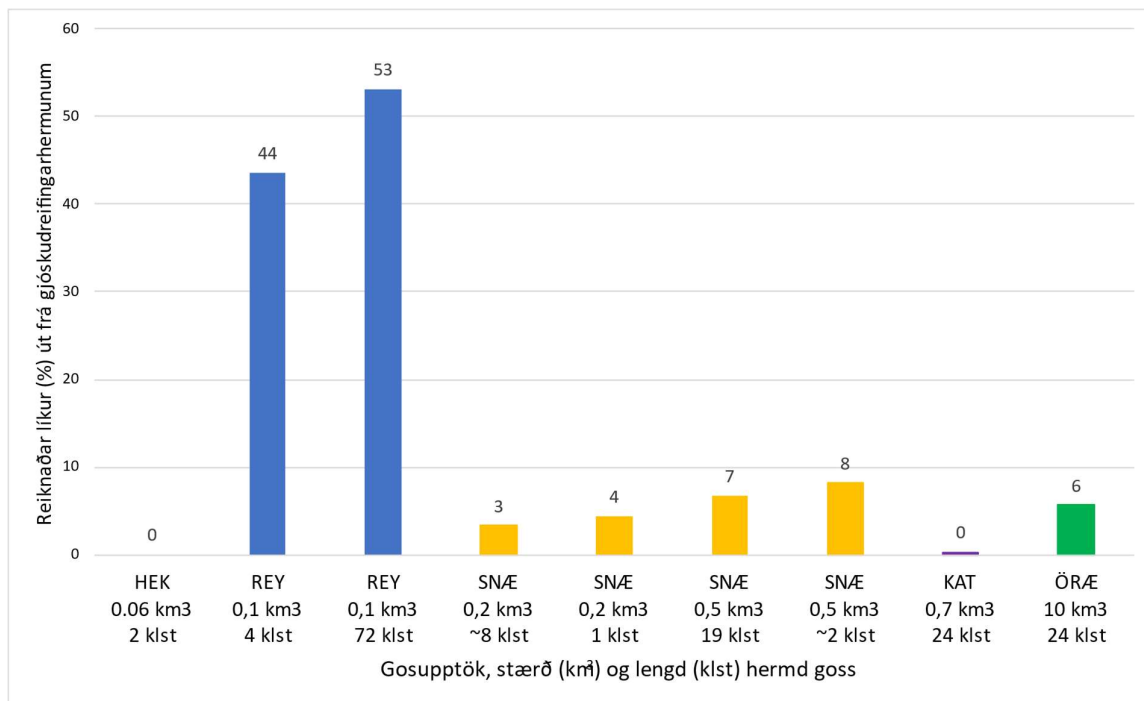
Mynd 19. Dæmi um gjóskupykkunarhraða á athugunarsvæði í Hvassahrauni. Veður stjórnar að miklu leyti hvert gjóska dreifist og áhrif þess á uppsafnaða gjóskupykktt/-þyngd sést vel á efri myndinni en línurnar þrjár tákna mismunandi daga (þann 9.1.1984, 22.10.1985 og 11.6.1998). Neðri myndirnar tvær sýna vindhraða og vindstefnu og breytingu þeirra með hæð yfir sjávarmáli. Núllpunktur á x-ási táknar upphaf goss. Hermt gos er af stærðinni $0,1 \text{ km}^3$ með gosupptökum um 1,5 km suðvestur af Reykjanestá.

7.3 Niðurstöður gjóskuhermana

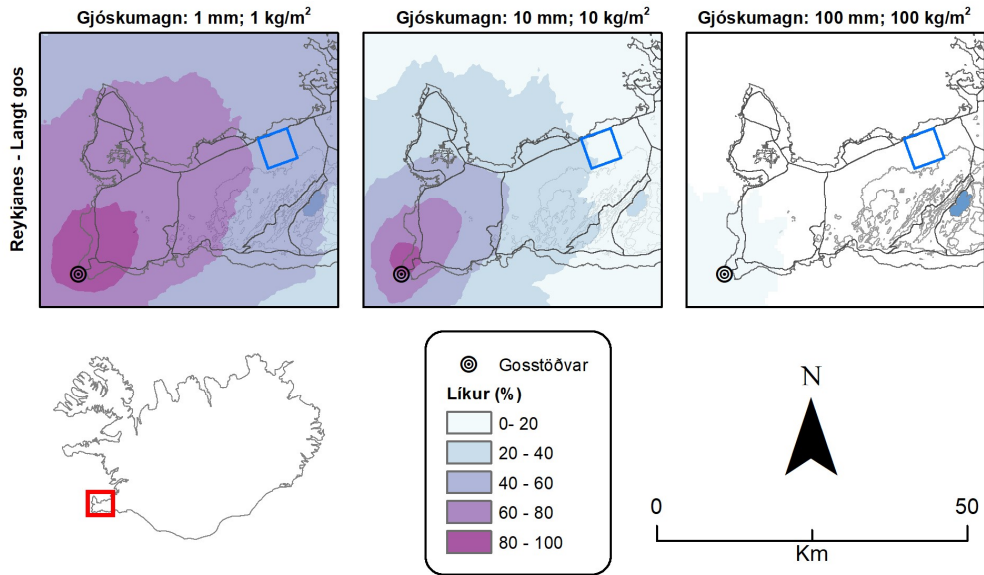
Hermd voru samtals níu misstór gos (Tafla 9) frá eldstöðvakerfunum fimm (Tafla 9) og því spilar bæði stærð hermdra gosa og fjarlægð frá athugunarstað (40–270 km) inn í niðurstöður. Eins mm þykkt gjóskulag dregur töluvert úr viðnámi vega og sérstaklega ef hún er tiltölulega gróf (Blake o.fl., 2017). Af þeim hermunum sem framkvæmdar voru eru mestar líkur á að $0,1 \text{ km}^3$ gos utan við Reykjanestá myndi 1 mm þykkt gjóskulag í Hvassahrauni (Mynd 20). Um helmingslíkur eru á því að sú sviðsmynd komi upp ef gjósa fer utan Reykjaness en líkur á þessu gjóskumagni eru meiri í hermunum frá löngu gosi (þ.e. þar sem lægri gosmökkur myndast, sjá umfjöllun í kafla 6.2) en í hermunum stutts goss. Þegar líkur á 10 mm þykku gjóskulagi frá gosi með upptök á sama

svæði eru skoðaðar sést að það eru allt að 20% líkur á að slíkt gerist (Mynd 21). Frá athugunarsvæði að upptakastað suðvestur af Reykjanestá eru um 40 km.

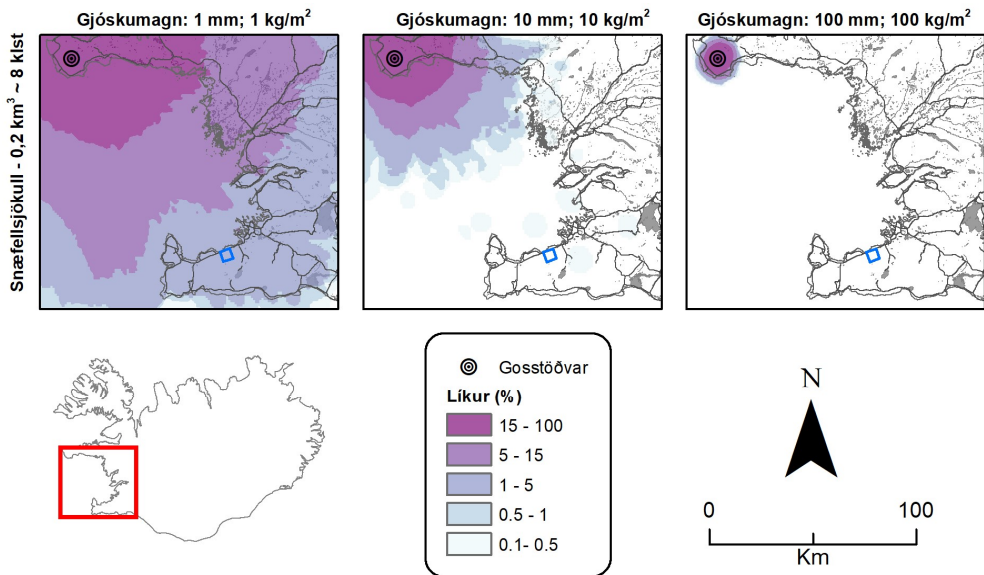
Tvær gosstærðir voru skoðaðar frá Snæfellsjökli, annars vegar 0,2 km³ og hins vegar 0,5 km³, eins voru bæði stutt og löng gos skoðuð fyrir báðar gosstærðir (Tafla 9). Snæfellsjökull er í um 120 km fjarlægð frá athugunarsvæði og stuttu gosin (þau sem ná að mynda hærri gosmökk í hermunum) eru örlítið líklegri til að mynda 1 mm þykkt gjóskulag á athugunarsvæðinu en hermd gos sem taka lengri tíma og mynda því lægri gosmökk fyrir sama magn gosefna (Mynd 20). Reiknaðar líkur á 1 mm þykku gjóskulagi frá Snæfellsjökli eru á bilinu ~3–8% og því þarf gjóskufall frá Snæfellsjökli ekki að koma á óvart í Hvassahrauni en hverfandi líkur eru á að gjóskufall nái 10 mm þykkt (Mynd 22). Tæplega 6% líkur eru á að gos í Öræfajökli af sömu stærð og störgosið árið 1362 myndi 1 mm þykkt gjóskulag í Hvassahrauni og séu líkur á 10 mm þykku gjóskulagi skoðaðar eru þær rúmlega 1%. Samkvæmt niðurstöðum hermana eru engar líkur á að Heklugos með endurkomutíma um 10 ár (0,06 km³ hermd stærð) valdi 1 mm þykku gjóskulagi á athugunarsvæðinu og mjög litlar líkur á að Kötlugos með 50–100 ára endurkomutíma myndi gjóskulag af þessari stærð. Þrátt fyrir þessar niðurstöður er vert að minna á að gjóska frá bæði Heklu og Kötlu finnst á Reykjanesskaga sbr. umfjöllun í kafla 7.1.



Mynd 20. Reiknaðar líkur þess að 1 mm þykkt gjóskulag myndist á athugunarsvæðinu frá mismunandi eldstöðvakerfum og misstórum gosum frá þeim. Fyrir gos á Reykjanes (REY) og í Snæfellsjökli (SNÆ) voru hermd mislönng gos með sama magn gosefna til að sjá mun á gjóskudreifingu með hæð gosmakkar (sjá texta). Líkleg stutt sviðsmyndin er þegar 0,2 km³ af gosefnum er látið myndast á 8 klst, líkleg löng sviðsmynd þegar 0,5 km³ af gosefnum er látið myndast á 19 klst, dekksta stutta sviðsmyndin er þegar 0,2 km³ af gosefnum er látið myndast á 1 klst og dekksta langa sviðsmyndin þegar 0,5 km³ af gosefnum er látið myndast á 2 klst (sjá Tafla 9). Aðrar skammstafanir eru HEK fyrir Hekla, KAT fyrir Katla og ÖRÆ fyrir Öræfajökull.



Mynd 21. Hættumatskort sem sýnir líkindi gjóskufalls í mismiklu magni, (1, 10 og 100 kg/m² sem samsvarar 1, 10 og 100 mm þykkri gjósku ef eðlisþyngdin er 1000 kg/m³) frá gosi sem myndar 0,1 km³ af gjósku í löngu gosi (Tafla 9) með upptök 1,5 km suðvestur af Reykjanestá.



Mynd 22. Hættumatskort sem sýnir líkindi gjóskufalls í mismiklu magni, (1, 10 og 100 kg/m² sem samsvarar 1, 10 og 100 mm þykkri gjósku ef eðlisþyngdin er 1000 kg/m³) frá gosi sem myndar 0,2 km³ af gjósku í gosi sem stendur í 8 klst. (Tafla 9) með upptök í Snæfellsjökli.

Hæstu gildi gjóskubýkktar sem fengust á athugunarsvæðinu í Hvassahrauni úr öllum hermunum gosa með upptök utan við Reykjanestá eru innan við 20 mm. Þetta gjóskumagn hefur ekki áhrif á burðarþol mannvirkja en jafnvel þótt hún væri fullkomlega rakamettuð er ólíklegt að þyngd hennar færi yfir 30 kg/m². Það hermda gjóskufall sem hér sést er ekki líklegt til að valda langvinnum áhrifum en 10–20 mm þykkt gjóskulag er sambærilegt 10–20 kg/m² og er því töluvert magn efnis. Það spillir loftgæðum og skyggni bæði á meðan gjóskufalli stendur og við endurflutning gjóskunnar og því er mikilvægt að huga að rykbindingu. Vert er að hafa í huga að tjón getur orðið á hreyflum flugvéla við 0,01–1 mg/m³ (Clarkson o.fl., 2016, Blake o.fl., 2018).

Líklegast er að gjóskufall valdi einungis skammvinnum áhrifum á athugunarsvæðið í Hvassahrauni. Mesta vá samkvæmt niðurstöðum þeirra hermana sem framkvæmdar hafa verið stafar af gosi með upptök suðvestur af Reykjanestá sem myndar lágan gosmökk (3–7 km). Viðbúið er að hreinsa þurfi flugbrautir og vegi og rykbinda að gjóskufalli loknu. Ólíklegt er að huga þurfi að hreinsun þaka til að koma í veg fyrir að þungi gjósku sligi byggingar. Gott samráð er milli fagstofnana og viðbragðsaðila s.s. VÍ, Embættis landlæknis, Umhverfisstofnunar og almannavarna og á heimasíðum þeirra má finna leiðbeiningar um viðbrögð við gjóskufalli og mótvægisáðgerðir til að draga úr heilsufarslegum áhrifum þess (t.d. <https://www.almannavarnir.is/natturuva/eldgos/vidbrogd/>, <https://www.almannavarnir.is/natturuva/oskufall/hreinsun-osku/>, <https://www.almannavarnir.is/natturuva/oskufall/>, <https://island.is/vidbunadur-gegn-va/eldgos/>).

8 Samantekt

Unnið hefur verið hættumat vegna eldgosa og jarðskjálfta fyrir Hvassahraun, á 25 km² svæði umhverfis athugunarsvæðið í Hvassahrauni á norðanverðum Reykjanesskaga. Hættumatið nær yfir hraun, jarðskjálfta, gasmengun og gjóskufall. Hraunflæði var hermt út frá eldvirkni í nærliggjandi eldstöðvakerfum, Reykjanesi-Svartsengi, Fagradalsfjalli og Krýsuvík. Áhrif jarðskjálfta hafa verið metin fyrir svæðið í formi nýs hættumats vegna jarðskjálfta á þverbrotabelti Reykjaness og Suðurlands. Gasmengun var hermd frá Reykjanesi-Svartsengi, Krýsuvík og Brennisteinsfjöllum og gjóskufall var hermt frá stökum gosopum innan eldstöðvakerfa Reykjaness, Heklu, Kötlu, Snæfellsjökuls og Örafajökuls. Ekki er tekið tillit til flóðbylgna, skotbomba, eldinga eða annarra þátta sem rekja má til eldgosa á svæðinu eða annars staðar.

Hættumat fyrir náttúruvá tengda eldvirkni er sett fram í formi sviðsmynda sem grundvallast á forsendum sem byggðar eru á ígrunduðu mati á afstæðum mun á því hversu líklegar eða ólíklegar þær eru. Hættumat fyrir jarðskjálfta er sett fram sem skjálftavarlíkendi fyrir mismunandi endurkomutíma lárétrar yfirborðshröðunar í jarðskjálftum á brotabeltinu. Ólík framsetning er einkum vegna munar á tímaskala og stærðum á óvissum tengdum þessum náttúruyfyrirbærunum, sér í lagi þegar um er að ræða flókna atburðarás. Í því sambandi má nefna að til þess að hraun hafi áhrif á athugunarsvæðið þarf gos að eiga sér stað á Reykjanesskaga, það þarf að eiga sér stað á þeim eldstöðvakerfum sem eru til athugunar í þessari greinargerð, sér í lagi kerfum Reykjaness, Fagradalsfjalls og Krýsuvíkur sem athugunarsvæðinu stafar mest vaf. Þá þarf staðsetning gosops að vera norðan vatnaskila til þess að landslag veiti hraunflæði í átt til norðurs. Að því gefnu þarf annaðhvort rúmmál gosfna að vera nægilega stórt eða tímalengd gos það mikil, nema hvoru tveggja sé, til þess að hraun nái að hafa áhrif á athugunarsvæðið. Í þessari atburðarás gætu síðan goshlé og breytingar á gosopum haft ófyrirsjáanleg áhrif. Þá hafa flestir ofangreindra þátta og samspil þeirra áhrif á sviðsmyndir gjóskufalls og gasmengunar. Þá er ekki hægt að útiloka að önnur vaf hafi áhrif, þó ekki sé tekið fram hér, s.s. gasmengun og gjóskufall frá öðrum eldstöðvakerfum en þau sem eru til athugunar í þessari greinargerð.

Samantekt helstu sviðsmynda hraunflæðis út frá staðsetningu athugunarsvæðisins gefur að líta á Mynd 23. Færa má rök fyrir því að hverfandi líkur séu á að innan athugunarsvæðisins opnist gosop, enda er það staðsett á norðanverðum Reykjanesskaga þar sem engin gosop eru þekkt. Engu að síður eru innan við 2 km frá útmörkum athugunarsvæðisins að þekktum gosupptakasvæðum innan eldstöðvakerfis Krýsuvíkur og innan við 5 km að Trölladyngju sem er talin vera líklegt gosupptakasvæði enda er þar töluvert magn þekktra gíga og gossprungna. Eigi gos sér stað á þessu svæði benda niðurstöður til þess að líklegt sé að hluti athugunarsvæðisins verði fyrir hrauni. Hversu víðtæk áhrif hraun hefur stjórnast af stærð þess. Ólíklegt er að hraun renni yfir Reykjanesbrautina á þessu svæði en það er þó ekki útilokað.

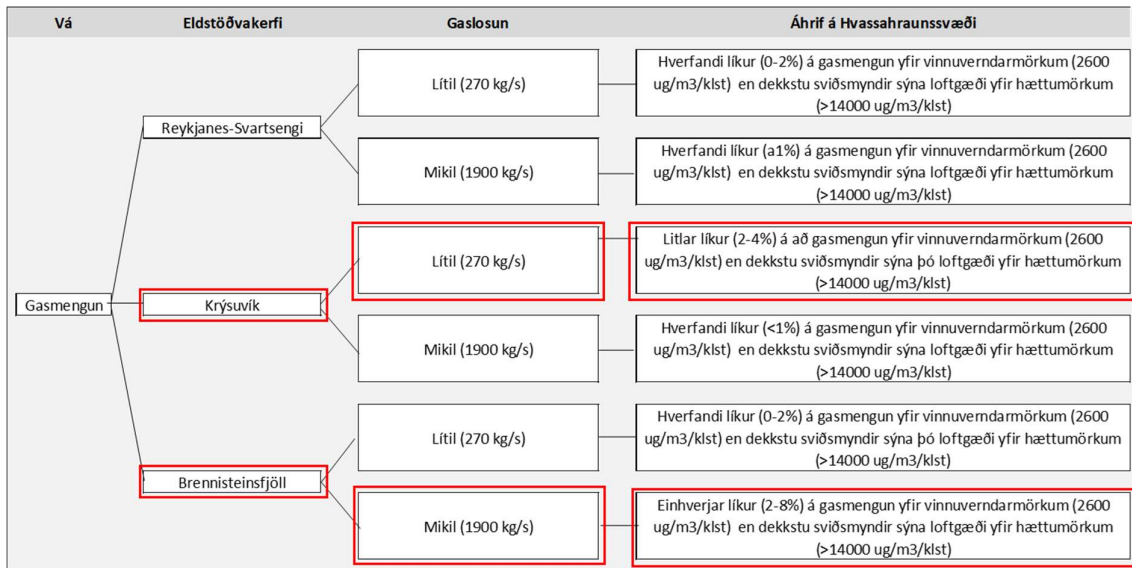
Samantekt helstu sviðsmynda gasmengunar út frá staðsetningu athugunarsvæðisins gefur að líta á Mynd 24. Líklegast er að gasmengun valdi ekki miklum usla á athugunarsvæðinu þó að gasmengunarhermanir sýni að þær aðstæður geti skapast að loftgæði verði mjög óholl af völdum SO₂ og jafnvel að gasstyrkur fari langt yfir hættumörk. Veður hefur mikil áhrif á hve mikillar mengunar verður vart og hvar. Vindur flytur gas frá upptökum og mestu gasmengunar, utan gosstöðvanna sjálfra, getur orðið vart fjærri upptökum. Miðað við þær sviðsmyndir sem hermdar hafa verið stafar mestri vaf af gosi með mikið flæði SO₂ frá Brennisteinsfjöllum og gosi með meðalflæði sem myndar lagan gosmökk á eldstöðvakerfi Krýsuvíkur.

Vá	Eldstöðvakerfi	Opnun gosopa	Hve stórt þarf gos að vera svo áhrifa gæti innan Hvassahraunssvæðis	Áhrif á Hvassahraunssvæði
Hraun	Reykjanes-Svartsengi	Ólíkleg - NA í kerfinu	Lítið-stórt	Hraun rennur að/yfir svæðið allt/að hluta. Hluti svæðis innan skilgreinds eldstöðvakerfis Svartsengis
		Líkleg - SV í kerfinu	Stórt	Lítill sem engin, hverfandi líkur á áhrifum vegna landslags
	Fagradalsfjall	Ólíkleg - NA í kerfinu	Meðalstórt-stórt	Hraun rennur að/yfir svæðið allt/að hluta. Um 4 km frá ytri mörkum áhrifasvæðis að NA mörkum kerfis
		Líkleg - SV í kerfinu	Stórt	Lítill sem engin, hverfandi líkur á áhrifum vegna landslags
	Krýsuvík	Ólíkleg - NA í kerfinu	Meðalstórt-stórt	Lítill sem engin, hverfandi líkur á áhrifum vegna landslags
		Líkleg - SV í kerfinu	Lítið-stórt	Hraun rennur að/yfir svæðið allt/að hluta. Innan við 3 km frá líklegu gosopnunasvæði innan eldstöðvakerfis að ytri mörkum áhrifasvæðis
	Brennisteinsfjöll	Ólíkleg - NA í kerfinu	Meðalstórt-stórt	Lítill sem engin, hverfandi líkur á áhrifum vegna landslags
		Líkleg - SV í kerfinu	Stórt	Lítill sem engin, hverfandi líkur á áhrifum vegna landslags

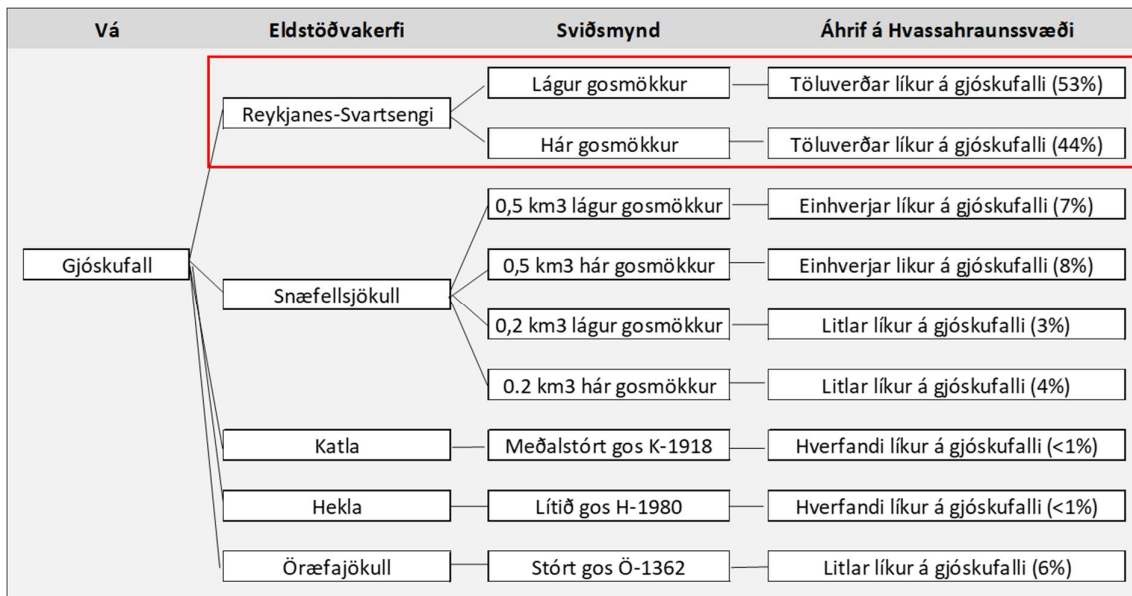
Mynd 23. Yfirlit helstu sviðsmynda hraunflæðis m.t.t. athugunarsvæðisins í Hvassahrauni, að því gefnu að gos eigi sér stað.

Samantekt helstu sviðsmynda gjóskufalls út frá staðsetningu athugunarsvæðisins gefur að líta á Mynd 25. Gjóska myndast í flestum eldgosum á Íslandi þótt hún sé aðeins örlítill hluti af hraungosum af þeirri gerð sem einkenna gosvirkni á Reykjaneskaga. Sprengivirkni er lítil sem engin í eldstöðvakerfum Reykjaneskagans en gjóskufall er þekkt frá neðansjávargosum suðvestan undan ströndum Reykjanestá. Líklegast er að gjóskufall valdi einungis skammvinnum áhrifum á athugunarsvæðið í Hvassahrauni. Mesta vá samkvæmt niðurstöðum þeirra hermana sem framkvæmdar hafa verið stafar af gosi með upptök SV af Reykjanestá sem myndar lágan gosmökk. Gjóska hefur mest áhrif þegar hún fellur upprunalega til jarðar en eftir gjóskufall getur gjóskufok haft slæm áhrif á loftgæði og skyggni í langan tíma.

Skjálftavárlíkindi hafa verið metin fyrir staðsetningu athugunarsvæðisins í Hvassahrauni fyrir upptakasvæði jarðskjálfta á þverbrotabelti Reykjanes og Suðurlands, en á því belti verða stærstu jarðskjálftar á svæðinu. Notað var nýtt líkan af sprungukerfi brotabeltisins sem hermír jarðskjálftavirkni þess til langs tíma, er í samræmi við jarðskjálftaskrá svæðisins og tekur einnig tillit til þess að hámarksstærðir jarðskjálfta eru breytilegar eftir staðsetningu á brotabeltinu. Einnig hafa ný líkön af stærð jarðskjálftahreyfinga með jarðskjálftastærð og fjarlægð frá upptökum verið notuð í matinu. Niðurstöður mats á skjálftavárlíkindum fyrir athugunarsvæðið í Hvassahrauni eru að meðalgildi láréttar hönnunarhröðunar er 0,24 g (10% líkur á 50 árum). Þetta gildi er hærra en hönnunarhröðun skv. núgildandi staðli sem er á bilinu 0,15–0,20 g en þó áþekkt sé tekið tillit til óvissu. Jarðskjálftar af stærðinni ~6 í meira en ~3–5 km fjarlægð frá upptakasprungunum eru taldir hafa mest áhrif á matið.



Mynd 24. Yfirlit helstu sviðsmynda gasmengunar m.t.t. athugunarsvæðisins í Hvassahrauni, að því gefnu að gos eigi sér stað.



Mynd 25. Yfirlit helstu sviðsmynda gjóskufalls m.t.t. athugunarsvæðisins í Hvassahrauni, að því gefnu að gos eigi sér stað.

9 Heimildir

- Agnes Ösp Magnúsdóttir (2015). Characteristics of the CE 1226 Medieval tephra layer from the Reykjanes volcanic system. Óbirt meistararitgerð. Háskóli Íslands.
- Ambraseys N.N., Sigbjörnsson R. (2000) Re-appraisal of the seismicity of Iceland. *Acta Polytechnica Scandinavica* 2000–003:1–184.
- Atkinson G.M. (2012). Integrating advances in ground-motion and seismic hazard analysis. In: *Proceedings of the 15th World conference on earthquake engineering*, Keynote/Invited lecture, Lisbon.
- Ármann Höskuldsson, Þorvaldur Þórðarson, Þóra Björg Andrésardóttir, Aufaristama M (2018a). *Náttúruvá á framkvæmdasvæði Suðurnesjalínu 2. Samanburður valkosta með tilliti til jarðhræringa*. Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, Háskóli Íslands.
- Ármann Höskuldsson, Janebo M., Thordarson Th., Andrésdóttir Þ.B., Jónsdóttir I., Guðnason J., Schmith J., Moreland W.M., Magnúsdóttir A.Ö. (2018b) *Total Grain-Size Distribution in Selected Icelandic Eruptions*. Jarðvísindastofnun Háskólans, Háskóli Íslands.
- Ármann Höskuldsson, Moreland W.M., Aufaristama M., Þorvaldur Þórðarson, Ingibjörg Jónsdóttir, Þóra B. Andrésardóttir (2022). *Náttúru og eldgosavá í Sveitarfélaginu Vogar. Mat á eldgosavá með tilliti til jarðhræringa á Reykjanesi 2021*. Jarðvísindastofnun, Háskóli Íslands.
- Baker J., Bradley B., Stafford P. (2021) *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bali E., Hartley M.E., Halldórsson S.A., Gudfinnsson G.H., Jakobsson S. (2018) Melt inclusion constraints on volatile systematics and degassing history of the 2014–2015 Holuhraun eruption, Iceland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173:9. doi.org/10.1007/s00410-017-1434-1.
- Barsotti S. (2020). Probabilistic hazard maps for operational use: the case of SO₂ air pollution during the Holuhraun eruption (Bárðarbunga, Iceland) in 2014–2015). *Bulletin of Volcanology*, 82, 56. doi.org/10.1007/s00445-020-01395-3.
- Barsotti S., Neri A. & Scire, J.S. (2008). The VOL-CALPUFF model for atmospheric ash dispersal: 1. Approach and physical formulation. *Journal of Geophysical Research*, 113(B3). doi:10.1029/2006JB004623.
- Barsotti S., Parks M., Pfeiffer M.A., Óladóttir B.A., Barnie T., Titos M.M., Jónsdóttir K., Pedersen G.B.M., Hjartardóttir Á.R., Stefánsdóttir G., Johannsson T, Arason Þ., Guðmundsson M.T., Oddsson B., Þrastarson R.H., Ófeigsson B.G., Vogfjörð K., Geirsson H., Hjörvar T., Löwis S, Petersen G.N., Sigurðsson E.M. (2023) The eruption in Fagradalsfjall (2021, Iceland): how the operational monitoring and the volcanic hazard assessment contributed to its safe access. *Natural Hazards*. doi.org/10.1007/s11069-022-05798-7.
- Barsotti S., Sigrún Karlsdóttir, Anna María Ágústsdóttir, Björn Oddsson, Íris Marelsdóttir, Þorvaldur Þórðarson, Þórólfur Guðnason & Bogi B. Björnsson (2020). *Preliminary tephra fallout hazard assessment for selected eruptive scenarios in Iceland*. Skýrsla VÍ 2020-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Bayat F., Halldorsson B., Kowsari M. (2022a) On the Calibration of a New Finite-fault Bookshelf Fault System Model for Southwest Iceland. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Earthquake and Engineering Seismology (3ECEES)*. Bucharest, Romania, p 8 (Paper No. 4353).
- Bayat F., Kowsari M., Halldorsson B. (2022b) A new 3-D finite-fault model of the Southwest Iceland bookshelf transform zone. *Geophysical Journal International*, 231, 1618–1633. doi.org/10.1093/gji/ggac272.

- Bellou M., Bergerat F., Angelier J., Homberg C. (2005) Geometry and segmentation mechanisms of the surface traces associated with the 1912 Selsund Earthquake, Southern Iceland. *Tectonophysics*, 404, 133–149.
- Benedikt Halldorsson B., Abril C., Bayat F., Kowsari M. (2022). On the Establishment of Physics-based Finite-fault Earthquake Source Models of the Transform Zones of Iceland. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Earthquake and Engineering Seismology (3ECEES). Bucharest, Romania, p 10 (Paper No. 7077).
- Bertin D., Lindsey J.M., Becerril L., Cronin S.J., Bertin L.J. (2019) MatHaz: a Matlab code to assist with probabilistic spatio-temporal volcanic hazard assessment in distributed volcanic fields. *Journal of Applied Volcanology*, 8, 4. doi.org/10.1186/s13617-019-0084-6.
- Blake D.M., Wilson T., Cole J., Deligne N., Lindsay J. (2017). Impact of Volcanic Ash on Road and Airfield Surface Skid Resistance. *Sustainability*, 9(8), 1389. doi:10.3390/su9081389.
- Blake D.M., Wilson T.M., Stewart C. (2018). Visibility in airborne volcanic ash: considerations for surface transportation using a laboratory-based method. *Nat Hazards*, 92, 381-413. doi.org/10.1007/s11069-018-3205-3.
- Bryndís Róbertsdóttir. (1992). Forsöguleg gjóskulög frá Kötlu, áður nefnd "Katla 5000". Jarðfræðafélag Íslands, Veggsþjaldaráðstefna, ágrip 8-9.
- Bödvarson R., Lund B. (2003). The SIL seismological data acquisition system—As operated in Iceland and in Sweden—. In: *Methods and Applications of Signal Processing in Seismic Network Operations*. Springer, pp 131–148.
- Bommer J.J., Douglas J., Scherbaum F., et al (2010). On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 81, 783–793.
- Clarkson R.J., Majewicz E.J., Mack P. (2016). A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, 230(12), 2274-2291.
- Clifton A.E., Kattenhorn S.A. (2006). Structural architecture of a highly oblique divergent plate boundary segment. *Tectonophysics*, 419, 27-40. doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.016.
- Cornell C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583–1606.
- Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*, 10, 137–156.
- Delmelle P., Stix J. (2000). Volcanic gases. In: Í: Haraldur Sigurðsson, Houghton B., Rymer H., Stix J., McNutt S. (ritstj). *Encyclopedia of Volcanoes (1st edition)*. Academic Press, London.
- de' Michieli Vitturi, M., Tarquini, S. (2018). MrLavaLoba: A new probabilistic model for the simulation of lava flows as a settling process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 323-334. doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.11.016.
- Dóra Hjálmarsdóttir (2022). *Varnir mikilvægra innviða á Reykjanesi gegn hraunflæði. Samantekt*. Verk unnið fyrir Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra og leitt af Verkis.
- ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast – Reiknimiðstöð evrópskra veðurstofa) (2011). The ERA-Interim reanalysis dataset, Copernicus Climate Change Service (C3S) www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim.
- European Committee for Standardization (2004). Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance - Part1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Standard.

- Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D. (2013) The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) for the time period 1900–2006 and its comparison to the European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC). *Journal of Seismology*, 17, 1339–1344.
- Guðrún Larsen (2000). Holocene eruptions within the Katla volcanic system, South Iceland: characteristics and environmental impact. *Jökull*, 49, 1-28.
- Guðrún Larsen (2010). Katla: tephrochronology and eruption history. *Devel Quat Sci*, 13, 23-49.
- Guðrún Larsen, Dugmore A., Newton A. (1999). Geochemistry of historical-age silicic tephras in Iceland. *The Holocene*, 9(4), 463-471.
- 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.
- Helgi Hallgrímsson, Björn Ársæll Pétursson, Sigurður Snævarr, Þorgeir Pálsson og Gunnar Torfason (2007). *Reykjavíkurlflugvöllur – úttekt á framtíðarstaðsetningu*. Samráðsnefnd samgönguráðuneytisins og Reykjavíkurborgar, 2007.
- Helgi Torfason & Magnús Á. Sigurgeirsson (2001). *Brennisteinsfjöll. Rannsóknir á jarðfræði svæðisins*. Orkustofnun. OS-2001/048.
- Hjaltadóttir S. (2009). Use of relatively located microearthquakes to map fault patterns and estimate the thickness of the brittle crust in Southwest Iceland. Sub-surface fault mapping in Southwest Iceland. Óbirt meistararitgerð. Háskóli Íslands..
- Ingi Þ. Bjarnason I.T., Cowie P., Anders M.H., et al (1993) The 1912 Iceland earthquake rupture: Growth and development of a nascent transform system. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 416–435.
- Kowsari M., Ghasemi S., Bayat F., Halldorsson B. (2022). A backbone seismic ground motion model for strike-slip earthquakes in Southwest Iceland and its implications for near-and far-field PSHA. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1–24. doi.org/10.1007/s10518-022-01556-z.
- Kowsari M., Halldorsson B., Hrafnkelsson B., et al (2019). Calibration of ground motion models to Icelandic peak ground acceleration data using Bayesian Markov Chain Monte Carlo simulation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 2841–2870. doi.org/10.1007/s10518-019-00569-5.
- Kowsari M., Sonnemann T., Halldorsson B., et al (2020). Bayesian Inference of Empirical Ground Motion Models to Pseudo-Spectral Accelerations of South Iceland Seismic Zone Earthquakes based on Informative Priors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, 106075. doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106075.
- Kramer S.L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, USA: New Jersey.
- Kristján Jónasson, Bjarni Bessason, Ásdís Helgadóttir, Páll Einarsson, Gunnar B. Guðmundsson, Bryndís Brandsdóttir, Kristín S. Vogfjörð, Kristín Jónsdóttir (2021). A harmonised instrumental earthquake catalogue for Iceland and the northern Mid-Atlantic Ridge. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2197-2214. doi.org/10.5194/nhess-21-2197-2021.
- Kristján Sæmundsson (1979). Outline of the geology of Iceland. (Yfirlit um jarðfræði Íslands). *Jökull*, 29, 7-28.
- Kristján Sæmundsson & Haukur Jóhannesson (2006). *Varðandi líkur á hraunrennsli og öskufalli milli Hafnarfjarðar og Keflavíkur*. Greinagerð ÍSOR-06006.
- Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson (2013). Reykjanesskagi. Í: Júlíus Sólmes, Freysteinn Sigmundsson, Bjarni Bessason (ritstj.): *Náttúruvá á Íslandi. Eldgos og Jarðskjálftar*. Reykjavík. Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan.
- Kristján Sæmundsson & Magnús Á. Sigurgeirsson (2015). *Flugvallarstæði með tilliti til sprunguvirkni og hraunrennslis*. Greinagerð ÍSOR -15008.

- 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. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.022
- Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P., Kisslinger C. (2003). *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*. Academic Press.
- Magnús Á. Sigurgeirsson. (1992). Gjósmyndanir á Reykjanesi. Óbirt meistarafréttir við Háskóla Íslands. Reykjavík. 114 bls.
- Magnús Á. Sigurgeirsson (1995). Yngra Stampagosið á Reykjanesi. *Náttúrufræðingurinn*, 64(3), 211-230.
- Magnús Á. Sigurgeirsson og Sigmundur Einarsson (15. nóvember 2019). Reykjanes og Svartsengi. Í: Bergrún Arna Óladóttir, Guðrún Larsen og Magnús Tumi Guðmundsson. *Íslensk eldfjallavefsjá*. Veðurstofa Íslands, Háskóli Íslands og Almannafræðingurinn. Ríkislögreglustjóra. Sótt af <http://islenskeldfjoll.is/?volcano=REY>.
- McGuire R.K. (2004) Seismic hazard and risk analysis. Earthquake engineering research institute.
- Panzer F., Zechar J.D., Vogfjörð K.S., Eberhard D.A.J. (2016). A Revised Earthquake Catalogue for South Iceland. *Pure Appl Geophys*, 173, 97–116. doi.org/10.1007/s00024-015-1115-9.
- Páll Einarsson (2008). Plate boundaries, rifts and transforms in Iceland. *Jökull*, 58, 35-58
- Páll Einarsson (2014). Mechanisms of Earthquakes in Iceland. In: Beer M, Kougioumtzoglou IA, Patelli E, Au IS-K (eds) *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 1–15.
- Páll Einarsson, Hjartardóttir Á.R., Hreinsdóttir S., Imsland P. (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. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.029.
- Pedersen G.B.M., Höskuldsson A., Dürig T., Thordarson Th., Jónsdóttir I., Riishuus M.S., Óskarsson B.V., Dumont S., Magnússon Ey., Guðmundsson M.T., Sigmundsson F., Drouin V.J.P.B., Gallagher C., Askew R., Gudnason J., Moreland W.M., Nikkola P., Reynolds H.I., Schmith J. and the IES eruption team (2017). Lava Field evolution and emplacement dynamics of the 2014-2015 basaltic fissure eruption at Holuhraun, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 340, 155-169.
- Pfeffer M.A., Arellano S., Petersen G.N., Barnie T., Barsotti S. (2022). SO₂ flux measurements during the 2021 eruption of Fagradalsfjall. 35th NGWM 2022 Reykjavík 11-13. May.
- Ragna Árnadóttir, Dagur B. Eggertsson, Matthías Sveinbjörnsson og Þorgerður Katrín Gunnarsdóttir (2015). *Flugvallarkostir á höfuðborgarsvæðinu. Sameiginleg athugun ríkis, Reykjavíkurborgar og Ícelandair group*. Skýrsla stýrihóps.
- Rahpeyma S., Halldorsson B., Hrafnkelsson B., Darzi A. (2022). New site amplification functions for key geological units in Iceland. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Earthquake and Engineering Seismology (3ECEES). Bucharest, Romania, p 8 (Paper No. 8382).
- Rahpeyma S., Halldorsson B., Hrafnkelsson B., Darzi A. (2023). Frequency-dependent site amplification functions for key geological units in Iceland from a Bayesian hierarchical model for earthquake strong-motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 168, 107823. doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107823.
- Reglugerð um brennisteinsdíoxíð, köfnunarefnisdíoxíð og köfnunarefnisoxíð, bensen, kolsýring, svifryk og blý í andrúmsloftinu, styrk ósons við yfirborð jarðar og um upplýsingar til almennings. reglugerð 920/2016 <https://island.is/reglugerdir/nr/0920-2016>, sótt á vefinn 17. mars 2023.

- Roth F. (2004). Stress Changes Modelled for the Sequence of Strong Earthquakes in the South Iceland Seismic Zone Since 1706. In: Fernández J (ed) *Geodetic and Geophysical Effects Associated with Seismic and Volcanic Hazards*. Birkhäuser, Basel, pp 1305–1327.
- 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. doi.org/10.1073/pnas.1108569108.
- Scire J.S., Strimaitis D.G., Yamartino R.J. (1990). Model formulation and user's guide for the CALPUFF dispersion model. *Sigma Research Corp*, Concord.
- Scire J.S., Strimaitis D.G., Yamartino R.J. (2000). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. *Earth Tech, Inc*, 521, pp.1-521.
- Sigbjörnsson R., Baldvinsson G.I., Thrainsson H. (1995). A stochastic simulation approach for assessment of seismic hazard maps in “*European Seismic Design Practice*.” Balkema, Rotterdam.
- Sigbjörnsson R., Ólafsson S., Rupakhety R., et al (2014). Strong-motion Monitoring and Accelerometric Recordings in Iceland. In: 2nd European Conference on Earthquake and Engineering Seismology (2ECEES). Istanbul, Turkey, 24-29 August, 2014, p Paper No. 2034.
- Sigbjörnsson R., Snæbjörnsson J.Th., Higgins S.M., et al (2009). A note on the Mw 6.3 earthquake in Iceland on 29 May 2008 at 15:45 UTC. *Bull Earthquake Eng*, 7, 113–126. doi.org/10.1007/s10518-008-9087-0.
- Sigrún Hreinsdóttir, Páll Einarsson & Freysteinn Sigmundsson (2001). Crustal deformation at the oblique spreading Reykjanes Peninsula, SW Iceland: GPS measurements from 1993-1998. *Journal of Geophysical Research* 106(B7), 13803-13816.
- 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. doi.org/10.1007/s00445-017-1160-6.
- Solnes J., Halldorsson B. (1996). Generation of synthetic earthquake catalogs: Applications in earthquake hazard and seismic risk assessment. In: Proceedings of the fifth international conference on seismic zonation (Nice, October 17-19, 1995). pp 1131–1140.
- Solnes J., Sigbjörnsson R., Halldorsson B. (1994). Assessment of Seismic Risk and Earthquake Hazard Based on Simulated and Upgraded Earthquake Catalogues. In: Proceedings of the 9th International Seminar on Earthquake Prognostics, San José, Costa Rica.
- Standards Council of Iceland / Staðlaráð Íslands (SI), Halldorsson P (2010). Icelandic National Annexes to Eurocodes. Staðlaráð Íslands, Reykjavík, Iceland.
- Stefánsson R., Böðvarsson R., Slunga R., et al (1993). Earthquake prediction research in the South Iceland seismic zone and the SIL project. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 696–716.
- Steigerwald L., Einarsson P., Hjartardóttir Á.R. (2020). Fault kinematics at the Hengill Triple Junction, SW-Iceland, derived from surface fracture pattern. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106439. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.017.
- Stewart C., Smid E., Charlton D., Leonard G.S., Tomasek I., Wilson T.M., Talbot N. (2019). *Preparing for a sustained volcanic degassing episode in Auckland*. GNS Science Report 2019/58.
- Stucchi M., Rovida A., Capera A.G., et al (2013). The SHARE European earthquake catalogue (SHEEC) 1000–1899. *Journal of Seismology*, 17, 523–544.
- 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.

- Whitty R.C.W. (2022) *Characterising downwind particulate and sulfur dioxide air pollution from volcanic emissions*. Unpublished PhD thesis. University of Leeds.
- Wilson G., Wilson T., Cole J., Oze C. (2012). Vulnerability of laptop computers to volcanic ash and gas. *Natural Hazards*, 63, 711-736. DOI: 10.1007/s11069-012-0176-7.
- Wilson T.M., Stewart C., Sword-Daniels V., Leonard G.S., Johnston D.M., Cole J.W., Wardman J., Wilson G., Barnard S.T. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth*, 45-46, 5-23.
- Þóra Björg Andrésdóttir (2018). Volcanic hazard and risk assessment at Reykjanes, vulnerability of infrastructure. Óbirt meistaráritgerð, Háskóli Íslands.