

Forgreining á hættu vegna goss á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja

Frummat á áhrifum hraunrennslis og
öskufalls í Heimaey

Melissa Anne Pfeffer, Sara Barsotti, Bergrún Arna Óladóttir, Esther Hlíðar Jensen, Emmanuel Pierre Pagneux, Bogi Brynjar Björnsson, Guðrún Jóhannesdóttir, Ármann Höskuldsson, Laura Sandri, Jacopo Selva, Simone Tarquini, Mattia de' Michieli Vitturi, Ingibjörg Jónsdóttir, Davíð Egilson, Sigrún Karlsdóttir, Matthew J. Roberts, Kristín Vogfjörð

Forgreining á hættu vegna goss á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja

Frummat á áhrifum hraunrennslis og öskufalls í Heimaey

Melissa Anne Pfeffer¹, Sara Barsotti¹, Bergrún Arna Óladóttir^{1,3}, Esther Hlíðar Jensen¹, Emmanuel Pierre Pagneux^{1,7}, Bogi Brynjar Björnsson¹, Guðrún Jóhannesdóttir², Ármann Höskuldsson³, Laura Sandri⁴, Jacopo Selva⁴, Simone Tarquini⁵, Mattia de' Michieli Vitturi⁵, Ingibjörg Jónsdóttir⁶, Davíð Egilson¹, Sigrún Karlsdóttir¹, Matthew J. Roberts¹, Kristín S. Vogfjörð¹

¹ Veðurstofa Íslands

² Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra

³ Jarðvísindastofnun Háskólans

⁴ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Bologna

⁵ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Pisa

⁶ Jarðvísindadeild Háskóla Íslands

⁷ Landbúnaðarháskóli Íslands

Skýrsla nr. VÍ 2021-003	Dags. Maí 2021	ISSN 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Forgreining á hættu vegna goss á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja Frummat á áhrifum hraunrennslis og öskufalls í Heimaey			Upplag: 20 Fjöldi síðna: 60 Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir
Höfundar: Melissa Anne Pfeffer, Sara Barsotti, Bergrún A. Óladóttir, Esther Hlíðar Jensen, Emmanuel Pierre Pagneux, Bogi Brynjar Björnsson, Guðrún Jóhannesdóttir, Ármann Höskuldsson, Laura Sandri, Jacopo Selva, Simone Tarquini, Mattia de Michieli Vitturi, Ingibjörg Jónsdóttir, Davíð Egilson, Sigrún Karlsdóttir, Matthew J. Roberts, Kristín S. Vogfjörð			Verkefnisstjóri: Bergrún A. Óladóttir Verknúmer: 3721-0-0004
Gerð skýrslu/verkstig: Uppfært í desember 2021			Málsnúmer: 2018-0172
Unnið fyrir/styrkt af: Ofanflóðasjóð og Alþjóðaflugmálastofnunina ICAO			
Samvinnuaðilar: Almennavarnadeild ríkislögreglustjóra, Jarðvísindastofnun Háskólans (JHÍ), Háskóli Íslands, Istituto Nazionale di Geofisica E Vulcanologia (INGV), Verkís			
Útdráttur: Hér eru kynntar fyrstu niðurstöður langtímahættumats sem unnið hefur verið fyrir eldstöðvakerfi Vestmannaeyja með áherslu á innviði Heimaeyjar. Langtímahættumat nýtist við skipulagsmál á tímum þegar engin merki eru um virkni. Farið er yfir niðurstöður hermána á rennslis hrauna og gjóskufalli frá gosum með uppkomu á mismunandi stöðum innan kerfisins til að meta vá af þeirra völdum og áhrif á samfélagið sé engum mótvægisáðgerðum beitt. Eldstöðvakerfi Vestmannaeyja er að stórum hluta neðansjávar og því er erfiðara að rannsaka það en mörg önnur kerfi landsins. Jarðfræði kerfisins er lítt þekkt og gosiðni innan kerfisins lítil miðað við mörg önnur kerfi á Austurgosbeltinu. Nærri allir innviðir Heimaeyjar geta orðið fyrir hrauni úr hraungosi með upptök á eyjunni. Mótvægisáðgerðir eru mjög mikilvægar og gagnlegt að byggja á reynslu frá gosinu 1973. Æskilegt er að skipulag svæðisins helgist af því að draga úr athöfnum og uppbyggingu á svæðum sem líklegust eru til að verða fyrir hrauni og gjóskufalli. Þær frumniðurstöður langtímahættumatsins sem eru kynntar hér eru fyrsti hluti hættumats sem er mikilvægt að uppfæra reglulega, sérstaklega þegar þekking á jarðfræði svæðis eykst, s.s. aldur og rúmmál jarðmyndana, en vegna lítillar þekkingar á aldri jarðmyndana er vægi aldurs hverfandi í þessari útgáfu. Þegar ásættanleg áhætta af völdum eldvirkni verður lagalega skilgreind verður einnig þörf á að uppfæra verkið.			
Lykilorð: Eldgosahættumat, Vestmannaeyjar, Heimaey, hraunrennslis, gjóskufall		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:	
		Undirskrift verkefnisstjóra:	
		Yfirfarið: SG	

Efnisyfirlit

Myndaskrá	6
Töfluskrá.....	7
Ágrip.....	8
1 Inngangur	9
1.1 Um hættumat og áhættumat — kynning á verkefninu GOSVÁ.....	10
1.1.1 Skilgreiningar hugtaka.....	12
1.2 Afmörkun verkefnis	14
1.3 Þættir verkefnis.....	15
2 Vestmannaeyjar, jarðfræði og gossaga	15
2.1 Eldstöðvakerfið Vestmannaeyjar.....	15
2.2 Gossaga	16
2.2.1 Söguleg gossaga Vestmannaeyja	16
2.2.2 Forsöguleg gossaga Vestmannaeyja	18
2.3 Framvinda í Surtseyjar- og Eldfellsgosi.....	19
2.3.1 Surtseyjargos 1963–1967.....	19
2.3.2 Eldfell 23. janúar til 3. júlí 1973.....	20
2.3.3 Atburðarás út frá skjálftagögnum, hvað sást?.....	22
2.3.4 Núverandi virkni og eftirlit.....	23
2.3.5 Eldgosavá í Vestmannaeyjum.....	24
2.3.6 Ríkjandi vindafar í Vestmannaeyjum og áhrif á gjóskudreifingu.....	26
2.3.7 Fyrirboðar	26
2.3.8 Atburðagreining.....	26
3 Aðferðir.....	27
3.1 Landhæðargögn og dýptarmælingar umhverfis Heimaey	27
3.2 Möguleg staðsetning framtíðargosopa á Vestmannaeyjakerfinu.....	28
3.3 Hraunrennslislíkön	28
3.3.1 Skilgreining gosopa og ákvörðun sviðsmynda	30
3.4 Hermun gjóskufalls	31
3.5 Tjónnæmi og efnahagsleg áhrif.....	33
4 Niðurstöður og umræður.....	34
4.1 Nýtt rúmmálsmat Eldfellsgossins 1973.....	34
4.2 Staðsetning framtíðar gosopa	34
4.3 Hraunrennslí á Heimaey.....	37
4.4 Gjóskufall á innviði í Heimaey	41

4.4.1	Vegir og flugbrautir	43
4.4.2	Burðarþol húspaka	44
4.5	Tjónnæmi og efnahagsleg áhrif á Heimaey	45
5	Áhrif eldgoss sem á sér stað á Heimaey	48
5.1	Möguleg efnahagsáhrif	48
5.2	Mat á því hve útsett íbúar og ferðamenn eru fyrir hættu	49
6	Viðbúnaður og mótvægisáðgerðir	50
6.1	Viðhald minninga og þekkingaröflun í samfélagi	50
6.2	Eftirlit og stjórn aðgerða	50
6.2.1	Viðbragðsáætlun Veðurstofu Íslands	51
6.2.2	Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra	51
6.2.3	Viðbragðsaðilar í Vestmannaeyjum	51
6.3	Viðbragðsáætlun	52
6.4	Mótvægisáðgerðir	52
7	Samantekt	53
7.1	Helstu niðurstöður	53
7.2	Ábendingar og næstu skref	54
8	Þakkarorð	55
9	Heimildaskrá	56
	Vefsíður	60

Myndaskrá

Mynd 1.	Flæðirit yfir áhætturammann sýnir tengsl hugtaka og grófa skilgreiningu þeirra.	11
Mynd 2.	Efsta mynd: Ísland, gosbelti og helstu eldstöðvakerfi	17
Mynd 3.	Skipting gosmyndana á Vestmannaeyjakerfinu í aldursbil.	18
Mynd 4.	Jafnþykktarlínur uppsafnaðrar gjóskuþykktar í Eldfellsgosinu 1973	21
Mynd 5.	Tíðni vindátta og vindhraði nærri Eldfelli á tíu ára tímabili frá 1980–1991	25
Mynd 6.	Atburðagreining Vestmannaeyja gefur yfirlit yfir goshegðun eldstöðvakerfisins	27
Mynd 7.	Punktur sýna staðsetningu jafndreifðra ímyndaðra gosopa á Heimaey sem notuð eru við hraunhermun.	31
Mynd 8.	Dýptarmælingar og yfirborðslögun lands innan eldstöðvakerfis Vestmannaeyja.	35
Mynd 9.	Gróft mat á líkum á opnun gosopa á Vestmannaeyjakerfinu;	36
Mynd 10.	Niðurstöður stakrar sviðsmyndar úr MrLavaLoba.	38

Mynd 11. Líkindakort þess að svæði á Heimaey verði fyrir hrauni úr litlu, miðlungs og stóru gosi með upptök á Heimaey	39
Mynd 12. Landfræðileg afmörkun gosopa sem mynda hraun sem getur haft áhrif á mismunandi svæði.....	41
Mynd 13. Svæði á Heimaey sem eru útsett fyrir gjóskufalli	41
Mynd 14. Þær sviðsmyndir úr hópi um 400 hermana sem sýna annars vegar verstu mögulegu aðstæður m.t.t. gjóskufalls í miðbæ Vestmannaeyjabæjar og hins vegar bestu aðstæður	42
Mynd 15. Líkur á að þurr gjóska (finni en 6,4 cm) úr meðalstóru sex daga gosi í Eldfelli og Surtsey nái 0,1–0,5 cm þykkt á Heimaey	43
Mynd 16. Líkur á að þyngd þurrar gjósku og vatnsmettaðrar gjósku úr meðalstóru sex daga gosi í Eldfelli nái 588 kg/m ² en það er burðarþol um helming húsþaka í Vestmannaeyjum .	44
Mynd 17. Metið efnahagslegt tjón á innviðum við mismunandi áhættuviðmið (5–40%) vegna breytilegra gosstærða hraungosa og gjóskugoss.....	47

Töfluskrá

Tafla 1. Hugtök um áhættumat og notkun þeirra.....	12
Tafla 2. Stærðir valinna hrauna sem runnið hafa á Vestmannaeyjakerfinu.....	19
Tafla 3. Viðmiðunargildi í fyrirfram skilgreindum sviðsmyndum hraunhermana.	30
Tafla 4. Kennistærðir Eldfellsgossins 1973 og niðurstöður hermana.....	33

Ágrip

Hér eru kynntar fyrstu niðurstöður langtímahættumats sem unnið hefur verið fyrir eldstöðvakerfi Vestmannaeyja með áherslu á innviði Heimaeyjar, einu byggðu eyju Vestmannaeyjakerfisins. Langtímahættumat nýtist við skipulagsmál á tímum þegar engin merki eru um virkni. Í þessari skýrslu er farið yfir niðurstöður hermana á rennsli hrauna og gjóskufalli frá gosum með uppkomu á mismunandi stöðum innan kerfisins til að meta vá af þeirra völdum og áhrif þeirra á samfélagið sé engum mótvægisáðgerðum beitt. Þar sem eldstöðvakerfi Vestmannaeyja er að stórum hluta neðansjávar er erfiðara að rannsaka það en mörg önnur kerfi landsins og jarðfræði kerfisins í heild er í raun lítt þekkt. Þekkt gosiðni á kerfinu er lítil miðað við mörg önnur kerfi á Austurgosbeltinu. Samkvæmt niðurstöðum eru líkur á opnun gosops á Heimaey 3–8% sé allt kerfið skilgreint sem möguleg gosupptök. Á sama hátt má segja að 92–97% líkur séu á að ekki gjósi á Heimaey næst þegar gýs á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja. Þegar gosupptök eru skilgreind einungis á Heimaey eru Vestmannaeyjabær og hafnarsvæðið á norðurhluta Heimaeyjar þau svæði sem oftast verða fyrir hermdu rennsli hrauns úr miðlungs og stórum flæðigosum. Nærri allir innviðir Heimaeyjar geta orðið fyrir hrauni úr stóru hraungosi með upptök á eyjunni. Verði meðalstórt gjóskugos á eða við Heimaey sem stendur í a.m.k. sex daga og vindar blása yfir byggðina er helmingur þaka íbúðarhúsa Vestmannaeyjabæjar líklegur til að láta undan gjóskubunga sé gjóskan blaut. Mótvægisáðgerðir eru mjög mikilvægar og gott er að byggja á reynslu frá gosinu 1973. Mikilvægt er að sjá til þess að íbúar og gestir þekki sögu svæðisins og möguleikann á eldsumbrotum. Æskilegt er að skipulag svæðisins helgist af því að draga úr athöfnum og uppbyggingu á þeim svæðum sem líklegust eru til að verða fyrir hrauni og gjóskufalli. Þær frumniðurstöður langtímahættumatsins sem eru kynntar hér eru fyrsti hluti hættumats sem er mikilvægt að uppfæra reglulega, sérstaklega þegar þekking á jarðfræði svæðis eykst, s.s. aldur og rúmmál jarðmyndana, en vegna lítillar þekkingar á aldri jarðmyndana er vægi aldurs hverfandi í eftirfarandi útgáfu. Þegar ásættanleg áhætta af völdum eldvirkni verður lagalega skilgreind verður einnig þörf á að uppfæra verkið.

1 Inngangur

Ísland er eitt eldvirkasta svæði jarðarinnar og hér gýs að meðaltali á fimm ára fresti (Sigurður Þórarinnsson & Kristján Sæmundsson, 1979; Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2008). Gerð kviku og aðstæður við gosop stjórna gosháttum og því hvort gos verður sprengigos eða flæðigos. Flest gos á Íslandi eru gjóskumyndandi sprengigos (t.d. Guðrún Larsen & Jón Eiríksson, 2008) enda eru margar íslenskar eldstöðvar huldar jöklum og samspil vatns og kviku eykur sprengivirkni. Einnig eru neðansjávargos þekkt við Íslandsstrendur sem sum hver þróast úr sprengigosi yfir í flæðigos þegar þau brjótast upp fyrir sjávarborð. Þrátt fyrir mikinn fjölda íslenskra sprengigosa eru einkennisgos landsins basísk flæðigos sem mynda hraun og byggja landið upp að stærstum hluta (t.d. Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2008) eins og glögglega má sjá í fjöllum m.a. á Austfjörðum og Vestfjörðum.

Hluti af því að búa í návígi við virkar eldstöðvar er að gera sér grein fyrir hættunni sem því fylgir. Með þekkingu á náttúruvá mismunandi svæða má undirbúa samfélög og draga úr tjóni t.d. í gegnum skipulagsmál og með góðum viðbragðsáætlunum. Flest virkustu eldstöðvakerfi landsins eru fjærri mannabyggð en þó eru nokkrir þéttbýlisstaðir í töluverðu návígi við virkar eldstöðvar s.s. á Reykjanesi þar sem Grindavík er byggð á hrauni frá eldstöðvakerfinu Reykjanesi og byggð frá höfuðborgarsvæðinu stendur á hraunum frá Krýsuvík og Brennisteinsfjöllum. Einnig eru nokkrir þéttbýliskjarnar í nágrenni Snæfellsjökuls, Reykjahlíð er á áhrifasvæði Kröflu og Vík í Mýrdal er nærri Kötlu. Mesta nálægð byggðar við eldstöð er þó án nokkurs vafa í Vestmannaeyjum þar sem Vestmannaeyjabær stendur á virkri eldstöð.

Heildarfjöldi gosa á Vestmannaeyjakerfinu er ekki þekktur en gosvirkni Vestmannaeyja virðist lotubundin þar sem þúsundir ára geta liðið án nokkurrar eldvirkni. Þegar goslotur hefjast virðast nokkur gos tilheyra hverri lotu (Sveinn P. Jakobsson, 1979) og hvert gos getur staðið í mánuði eða ár en goslotur geta staðið í áratugi upp í aldir (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003). Á 20. öld gaus tvisvar á Vestmannaeyjakerfinu sem er þó yfirleitt rólegt í samanburði við virkustu eldstöðvakerfi landsins. Fyrri gosið hófst neðansjávar í nóvember 1963 en í því gosi myndaðist Surtsey, sem er yngsta eyja við Íslandsstrendur. Gosið byrjaði sem neðansjávargos, varð svo sprengigos og þróaðist í flæðigos þegar gosop hafði byggt sig upp fyrir sjávarmál. Í gosinu mynduðust einnig eyjarnar Jólnir og Syrtlingur en Atlantshafsaldan braut þær fljótt niður (t.d. Sigurður Þórarinnsson, 1966; 1969). Seinna gosið olli mun meiri vá en þá gaus á Heimaey; gossprungu opnaðist 200 m frá byggð, Eldfell myndaðist og Heimaey stækkaði um þriðjung. Heimaey var rýmd fyrstu gosnóttina en um 5300 íbúar voru fluttir af heimilum sínum upp á land og fengu flestir ekki að snúa aftur heim fyrr en að gosi loknu. Mikið eignatjón varð í gosinu.

Vestmannaeyjagösin voru blandgos en í slíkum gosum myndast bæði hraun og gjóska sem endurspeglar breytilega ógn sem stafar af mismunandi gosháttum. Hraungos eru í fæstum tilfellum lífshættuleg þar sem rennslishraði hrauna frá gosstöðvum er oftast ekki meiri en svo að hægt er að forða sér. Hins vegar getur orðið algjör eyðilegging á því sem á vegi hrauna verður og eitruð eldfjallagös sem losna úr kvikunni geta ógnað heilsu og lífi bæði manna og dýra. Ógn af völdum sprengigosa er annars konar; gjóska berst undan vindi og veldur mismiklum óþægindum eftir magni. Gjóska fellur til jarðar og þar sem gjóskufall verður þykkt getur það skaðað eða drepit gróður og jafnvel valdið hruni mannvirkja ef þungi gjóskunnar fer yfir burðarþol þeirra. Mjög fingerð gjóska getur haft slæm heilsufarsleg áhrif á menn og búsmala og hún getur einnig valdið tjóni á vélum og tækjum og þar með valdið töfum á flugsamgöngum. Verði efnisframleiðsla í sprengigosi svo mikil að gosmökkur nái ekki að rísa

getur mökkurinn fallið og flætt lárétt frá gosstöðvum í svokölluðu gjóskuflóði en slík fyrirbæri valda mikilli eyðileggingu. Til að draga úr hættu af völdum eldgosa er mikilvægt að eftirlit með eldstöðvum sé gott svo hægt sé að rýma hættusvæði, helst með nokkrum fyrirvara.

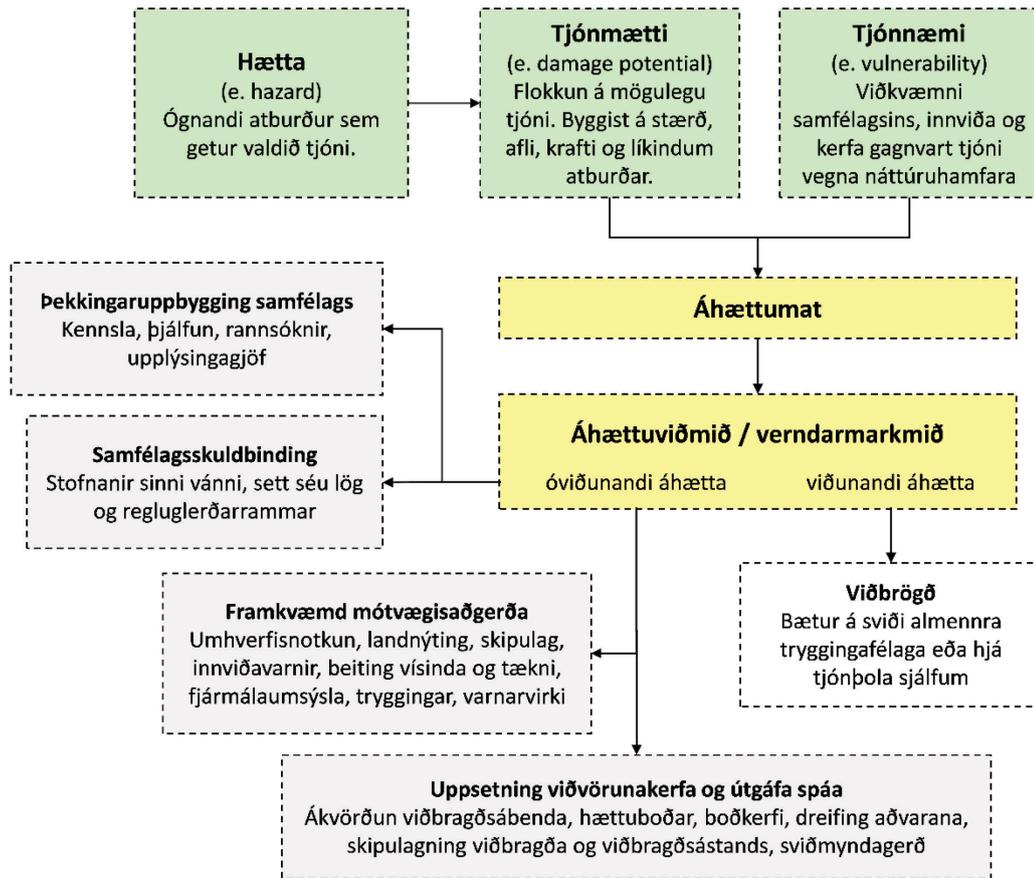
Þó að erfitt sé að spá fyrir um upphaf eldgosa gera þau oft og tíðum boð á undan sér s.s. með aukinni jarðskjálftavirkni, landrasi, gasútstreymi og/eða breytingum á jarðhitavirkni. Því er mikilvægt að hafa gott, óslitið eftirlit með virkum eldstöðvum og framkvæma nákvæmar mælingar á ferlum sem þeim tengjast svo hægt sé að koma auga á hægfare breytingar sem á eldstöðvum verða í undanfara gosa. Í sumum tilfellum sést aukinn órói í eldstöð þó ekki fyrir en klukkustundum eða mínútum fyrir gos og ef túlkun atburðarásar tekst vel má spá fyrir um upphaf goss eins og gert var fyrir upphaf Heklugossins þann 26. febrúar árið 2000. Veðurstofa Íslands sér um vöktun íslenskra eldstöðva og rekur net mælitækja s.s. jarðskjálfta- og GPS mæla, en notar jafnframt gögn frá samstarfsaðilum við vöktunina.

1.1 Um hættumat og áhættumat — kynning á verkefninu GOSVÁ

Hættumat er mat á hættu eða ógn sem stafar af vó, t.d. náttúruvá eins og fjallað er um hér, og getur verið skaðlegt fólki og/eða valdið tjóni (t.d. Bobrowsky, 2013). Við gerð áhættumats er horft til þess hvaða líkur eru á að atburður eigi sér stað og mögulegum skaða sem hann getur valdið samfélaginu, þ.e.a.s. mikilvægum innviðum, umhverfi, eignatjóni og manntjóni. Með öðrum orðum er í áhættumati lagt mat á líkindi þess að hætta skapist og hverjar afleiðingar hennar verða.

Verkefnið sem hér er kynnt, Forgreining á hættu vegna goss á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja – Frummat á áhrifum hraunrennslis og öskufalls í Heimaey, er hluti af verkefni um heildar-áhættumat vegna eldgosa á Íslandi sem hlotið hefur yfirheitið GOSVÁ. GOSVÁ er samvinnuverkefni helstu fag- og ábyrgðaraðila sem að verkefninu koma, Veðurstofu Íslands, Jarðvísindastofnunar Háskólans, Landgræðslunnar, Vegagerðarinnar og Almannavarnadeildar ríkislögreglustjóra, og er það leitt af Veðurstofu Íslands. Viðfangsefni GOSVÁr eru margþætt og spanna allt frá grunnrannsóknum á eðli eldstöðva og þeim ferlum sem eiga sér stað í eldgosum, til áhrifa eldgosa á einstaklinga og samfélög. Þrátt fyrir hagstæða staðsetningu virkustu eldstöðva landsins m.t.t. byggðar þá eru nokkur svæði útsett fyrir eldfjallavá s.s. Vestmannaeyjar og Grindavík. Niðurstöður verkefnisins má nýta við forvarnaaðgerðir, en draga má verulega úr afleiðingum náttúruvár með skynsamlegu skipulagi, og við gerð viðbragðsáætlana um hvernig skuli bregðast við náttúruvá af völdum eldgosa.

GOSVÁ er styrkt af Ofanflóðasjóði og stofnunum og fyrirtækjum innan orku- og samgöngu-geirans. Má þar nefna Alþjóðaflugmálastofnunina (ICAO – International Civil Aviation Organization), Vegagerðina, Landsvirkjun, Landsnet og HS Orku, en að auki hafa innlendir og erlendir rannsóknarsjóðir styrkt einstaka þætti verksins. Vinna hófst við GOSVÁr-verkefnið árið 2012 en það er langtímaverkefni og gert er ráð fyrir að það taki allt að 20 ár að ljúka því. Niðurstöður einstakra verkefna GOSVÁr má t.d. nálgast á Íslenskri eldfjallavefsjá, www.islenskeldfjoll.is/, en uppsetning vefsíðunnar og samantekt þess efnis sem á henni er var eitt fyrsta verkefni GOSVÁr.



Mynd 1. Flæðirit yfir áhætturammann sýnir tengsl hugtaka og grófa skilgreiningu þeirra. Frekari skilgreiningu má sjá í töflu 1 (upprunaleg mynd frá Trausta Jónssyni, 2002, uppfærð af Magnúsi Tuma Guðmundssyni o.fl., 2016).

Ísland er aðili að Sendai rammaáætluninni sem er alþjóðleg áætlun á vegum Skrifstofu Sameinuðu þjóðanna (UNDRR; United Nations Office for Disaster Risk Reduction, sjá www.undrr.org) um kerfisbundinn úrdrátt áhættu og tjónnæmis samfélaga vegna hamfara. Sendai rammaáætlunin er mikilvægur þáttur í heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna, sem eru m.a. að draga úr eða koma í veg fyrir hamfarir af völdum náttúruvár með vinnu að áhættumati og mótvægisáðgerðum (t.d. skynsömu skipulagi). Veðurstofa Íslands hefur unnið að áhættumati í núverandi mynd fyrir ofanflóð frá árinu 1996 eða í kjölfar mannskæðra snjóflóða árið 1995. Aðferðafræði sem fylgt hefur verið við ofanflóðaáhættumat er nýtt í GOSVÁr verkefninu en hún byggir á áhætturamma Sameinuðu þjóðanna. Flæðirit yfir áhætturammann er sýnt á mynd 1 og skilgreiningar hugtaka sem notuð eru í eftirfarandi skrifum má sjá í töflu 1.

1.1.1 Skilgreiningar hugtaka

Skilgreiningar helstu hugtaka er viðkoma hættumati eru í töflu 1 og byggjast á orðasafni almannavarna.

Tafla 1. Hugtök um áhættumat og notkun þeirra. Skilgreiningar byggja á orðasafni almannavarna (www.almannavarnir.is/almannavarnir/hugtok/). Þýðingar byggja að hluta á vinnu Trausta Jónssonar (2002).

Áfallaþol (e. resilience)
Geta kerfis, eða samfélags, sem stendur andspænis hættu, til þess að forðast, draga úr, eða komast yfir áföll vegna hvers konar vár, með viðbúnaði jafnt með fyrirbyggjandi aðgerðum sem og viðbrögðum. (e. resilience). Áfallaþol einnig nefnt viðnámsþróttur/þol/seigla, segir til um möguleika samfélags til að takast á við, jafna sig á og komast yfir hamfarir með viðbúnaði t.d. spám um náttúruhamfarir, innviðum almannavarna, tryggingum og varnaraðgerðum t.d. varnargörðum.
Áhætta (e. risk)
Það tjón sem ákveðin ógn veldur á ákveðnu svæði/yfir ákveðið viðmiðunartímabil vegna samspils tjónmættis og tjónnæmis. Áhættan er samspil á ógn, vörnum og veikleikum. Einnig er tekið tillit til þess hve útsett fólk, eignir, innviðir geta verið fyrir hættunni.
Áhættumat (e. risk assesement)
Heildarferli sem felur í sér að finna, átta sig á og lýsa, og gera sér grein fyrir áhættu. Ákvörðun umfangs og eðlis áhættu eða áhættuþátta (afleiðingar og líkur) og samanburður á niðurstöðum við áhættuviðmið til að ákvarða hvort áhættan og/eða umfang hennar sé ásættanlegt eða þolanlegt. Ferli til að meta eðli og umfang.
Áhættuviðmið (e. critical risk)
Viðmið sem eru sett um ásættanlega áhættu og endurspeglar gildi, stefnu og markmið.
Ásættanleg áhætta(e. acceptable risk)
Sú áhætta sem samfélag telur ásættanlega miðað við félags-, efnahags-, stjórn mála-, menningar-, tækni- og umhverfislegar aðstæður á hverjum stað og tíma. Gjarnan sett sem viðmið í reglugerðir og staðla.
Hætta (e. hazard)
Fyrirbæri, efni, mannlegar gjörðir eða ástand sem getur valdið skaða, svo sem dauða, meiðslum, heilsutapi, eignaspjöllum, tapi á lífsviðurværi, skerðingu nauðsynlegrar þjónustu, félagslegum eða efnahagslegum óstöðugleika eða umhverfisspjöllum.
Hættumat (e. hazard assessment)
Tilgreina, meta og flokka mögulegar hættur sem eru fyrir hendi við skilgreindar aðstæður eða kennistærðir. Áhættugreiningar og áhættumat byggjast á hættumati. Hættumat á náttúruhamförum og umfangi þeirra, einnig mat á öðrum hættum t.d. tæknivá, stríðsástandi o.s.frv. Hugtakið er mikið notað hér á landi, en er ekki skilgreint sérstaklega í orðalista Sameinuðu þjóðanna og Alþjóða veðurfræðistofnunarinnar (www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction).
Jarðvía/eldfjallavá (e. volcanic hazard)
Jarðfræðilegt ferli eða fyrirbæri sem getur valdið tjóni á fólki, eignum, lífsviðurværi, þjónustu og efnahag. Ásamt því að valda truflun og umhverfistjóni.

Langtímahættumat/langtímavá (e. long-term hazard assessment)
Langtímahættumat er metið með líkankeyrslum byggðum á þeim upplýsingum sem til eru um hegðun eldstöðvar og eldstöðvakerfis (sögulegar og jarðfræðilegar). Langtímagreining er unnin þegar eldstöðvakerfi sýnir engin merki um virkni og nýtist í skipulagsvinnu og við gerð/uppfærslur viðbragðsáætlana. Í langtímahættumati eru líklegar atburðarásir skilgreindar.
Mikilvægir innviðir (e. critical infrastructure)
Ómissandi innviðir samfélagsins, s.s. vegir, veitukerfi, brýr, sjúkrahús, skólar, lögregla, stjórnsýsla, o.s.frv. Það er innviðir sem eru nauðsynlegir til að tryggja eðlilegan gang samfélaga bæði félags- og fjárhagslega.
Mótvægisáðgerðir (e. mitigation measures)
Áðgerðir sem miða að því að milda, draga úr eða koma í veg fyrir, að almenningur, eignir, umhverfi eða samfélag verði fyrir skaða vegna hamfara af völdum náttúrunnar eða af mannlegum toga. Það er hægt að gera t.d. með reglugerðum eða með fræðslu um hvernig er hægt að haga ákveðnum hlutum. Varnaráðgerðir á borð við varnargarða vegna snjóflóða- eða flóðahættu eru einnig dæmi um mótvægisáðgerðir til að draga úr hættu og varna skaða eða tjóni.
Skammtímahættumat/bráðavá (e. short-term hazard assessment)
Skammtímahættumat byggir á langtímahættumati auk nýrra upplýsinga um eldstöð, jafnvel rauntímaupplýsinga sem berast í gegnum eftirlitskerfi eldfjallavöktunar. Skammtímahættumat er unnið þegar virkni af hvaða tegund sem er (landris, jarðskjálftar, aukið gasútstreymi, o.s.frv.) hefst í eldstöð/eldstöðvakerfi. Skammtímahættumat er notað til að spá frekar fyrir um hvaða fyrirfram skilgreind atburðarás úr langtímahættumati er líklegust m.v. þær upplýsingar sem liggja fyrir um atburð s.s. um staðsetningu gosuppkomu, gosgerð o.s.frv.
Tjónmætti (e. damage potential)
Flokkun á hversu miklar skemmdir/tjón getur orðið vegna náttúruváratburðar. Byggist á stærð, afli og krafti náttúruváratburðar og hversu mikil líkindi eru á því að hann eigi sér stað, óháð því hvort byggð eða mannvirki séu til staðar. Tjónmætti getur verið háð tilvist varnavirkja, t.d. varnargarða sem bægja flóðum frá byggð.
Berskjöldun/tjónnæmi (e. vulnerability)
Berskjöldun/veikleiki/tjónnæmi. Einkenni og aðstæður samfélags, innviða og kerfa, sem gerir það viðkvæmt á einhvern hátt gagnvart vá af hvaða tagi sem hún er (e.vulnerability) stundum kallað tjónnæmi. Viðkvæmni samfélagsins, innviða og kerfa gagnvart tjóni sem hlýst t.d. af náttúruhamförum. Tjónið getur verið m.a. manntjón, slys, eignatjón og samfélagslegs eðlis. Tjónnæmið er á sama hátt og tjónmættið háð mótvægisáðgerðum t.d. varnargörðum. Breytingar á skipulagi byggðar og byggingarlagi, viðbragðsáætlanir, viðbúnaður og fræðsla geta lækkað berskjöldun/tjónnæmi.
Útsett/ur (e. exposure)
Fólk, eignir, innviðir geta orðið fyrir hættu/vá sem veldur tjóni/skaða, eru útsettir fyrir hættunni.

1.2 Afmörkun verkefnis

Árið 2011 unnu almannavarnanefnd Vestmannaeyja og Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra að skýrslu um hættu, áhættu og áfallapol í umdæmi lögreglustjórans í Vestmannaeyjum (Guðrún Jóhannesdóttir & Lögreglustjórinn í Vestmannaeyjum, 2011). Meginniðurstöður þeirrar skýrslu voru vöntun á rannsóknum á jarðfræði Vestmannaeyjakerfisins og útgefnu efni fyrir almenning sérstaklega í kjölfar Surtseyjar- og Eldfellsgosanna. Kallað var eftir gerð viðbragðsáætlunar sem hægt væri að fylgja færi að gjósa í Vestmannaeyjum. Þessu kalli var svarað í janúar 2017 þegar viðbragðsáætlun vegna eldgosa í Vestmannaeyjum var birt en hún var unnin af Lögreglustjóranum í Vestmannaeyjum, Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra og almannavarnanefnd Vestmannaeyja (2017).

Hér er gerð grein fyrir frumniðurstöðum verkefnis *Forgreining á hættu vegna goss á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja — Frummat á áhrifum hraunrennslis og öskufalls í Heimaey*. Lögð er áhersla á langtímahættumat og sérstaklega er horft til innviða samfélagsins á Heimaey, einu byggðu eyju innan eldstöðvakerfisins. Frumhættumat hefur verið unnið út frá líkankeyrslum, tjónmætti hrauns og gjóskufalls verið metið og tjónnæmi innviða skoðað, einkum íbúðarhúsa m.t.t gjóskufalls. Vegna takmarkaðrar þekkingar á aldri gosmyndanna innan eldstöðvakerfis Vestmannaeyja hefur ekki verið lagt mat á líkur þess hvenær næst muni gjósa eins og oftast er gert í langtímahættumati en hættumatið byggir á þeirri þekkingu sem er til staðar í dag og þarfnast reglulegrar uppfærslu, sérstaklega þegar frekari upplýsingar liggja fyrir um jarðfræði eldstöðvakerfisins. Mikilvægt er að þau gögn sem hér eru kynnt séu í sífelldri endurskoðun og að niðurstöður séu uppfærðar ef og þegar frekari upplýsingar um eldstöðvakerfið og hegðun þess liggja fyrir. Enn á eftir að kanna til hlítar afleiðingar fleiri þátta eldgosa, s.s. gasmengun og íkveikjuhættu af völdum hraunbomba, og fara nánar út í tjónnæmi þ.m.t. manntjón og efnahagslegt tjón. Rétt er að geta þess að áhættuviðmið vegna eldgosa hafa ekki verið sett, en formleg vinna við skilgreiningu þeirra hófst í umhverfis- og auðlindaráðuneytinu í ársbyrjun 2016. Þegar niðurstöður þeirrar vinnu liggja fyrir verða komnar forsendur til að ljúka áhættumati.

Þrátt fyrir að megináhersla þessa verkefnis sé á langtímahættumat, þar sem líklegar atburðarásir eru skilgreindar, gefa niðurstöður vísbendingu um umfang tjónmættis vegna bæði hrauns og gjóskufalls. Því má nýta niðurstöður við framtíðar skipulag og frekari vinnu við viðbragðsáætlanir. Hins vegar er mikilvægt að hafa í huga að þegar eldstöð sýnir merki um hugsanleg eldsumbrot er unnið eftir öðru vinnulagi sem nefnist skammtímahættumat (short-term hazard assessment). Þá er stuðst við niðurstöður langtímahættumats auk gagna úr eftirlitskerfi, mögulegum sviðsmyndum eldsumbrota er fækkað og hættumatskort eru uppfærð samkvæmt raun- tímaupplýsingum. Nýjar upplýsingar sem unnar eru í skammtímahættumati nýtast því enn betur við gerð viðbragðsáætlana. Eftirfarandi samantekt byggir á ítarlegri skýrslu um sama efni sem rituð var á ensku: *An initial volcanic hazard assessment of the Vestmannaeyjar Volcanic System: Impacts of lava flow and tephra deposit on Heimaey*, og er gefið út af Veðurstofu Íslands (Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Sé frekari útskýringa á fræðilegum forsendum eða aðferðum þörf er áhugasömum bent á frumskýrsluna. Það er von höfunda að þessi skýrsla komi íbúum Vestmannaeyja að gagni og að vinnan sem hér er kynnt leggi grunn að hættu- og áhættumati fyrir önnur þéttbýlissvæði sem eru í nágrenni við virkar eldstöðvar á Íslandi.

1.3 Þættir verkefnis

Verkefnið skiptist í þrjá þætti, sá fyrsti er samantekt upplýsinga (jarðfræðilegra og sögulegra) um þekkt gos á Vestmannaeyjaeldstöðvakerfinu (2. kafli). Við gerð langtímahættumats er mikilvægt að þekkja jarðfræði svæðisins og þá vá sem að svæðinu steðjar (Pallister o.fl., 2019). Í öðrum þætti eru upplýsingar um þekkt gos notuð í líkankeyrslur til að herma hraunflæði og gjóskufall framtíðar gosa á Heimaey og kortlagning svæða á eyjunni sem eru útsett fyrir rennsli hrauns og gjóskufalli opnast gosop á mismunandi stöðum er kynnt (3.–5. kafli). Í þriðja þætti verkefnisins er farið yfir áhrif eldgosa á innviði samfélagsins í Heimaey. Mikilvægir innviðir í Heimaey eru íbúðarhús, samfélagslega mikilvægar byggingar s.s. skólar og sjúkrahús, vegir, raforkuferfi, höfnin og flugvöllurinn. Að lokum er farið yfir viðbúnað og mótvægisáðgerðir (6. kafli), helstu niðurstöður verkefnisins eru teknar saman og tillögur gefnar að áframhaldandi vinnu (7. Kafli). Sex viðaukar fylgja ensku útgáfu skýrslunnar en enginn þeirra fylgir íslensku útgáfunni.

2 Vestmannaeyjar, jarðfræði og gossaga

Í þessum kafla verður farið yfir jarðfræði og uppbyggingu eldstöðvakerfis Vestmannaeyja (kafli 2.1) og þekkta gossögu þess (kafli 2.2). Einnig verður farið í stuttu máli yfir framvindu í Surtseyjar- og Heimaeyjargosunum (kafli 2.3), núverandi virkni og eftirlit (kafli 2.4), eldgosavá í Vestmannaeyjum (kafli 2.5) og ríkjandi veðurfar sem hefur áhrif á gjóskudreifingu (kafli 2.6). Ljóst er að þar sem eldstöðvakerfið er að miklu leyti neðansjávar eru margir þættir í sögu þess enn óþekktir og því eru óvissuþættir margir.

2.1 Eldstöðvakerfið Vestmannaeyjar

Eldvirkni á Íslandi er óvenjumikil miðað við úthafshrygg vegna samspils við möttulstrók undir landinu (t.d. Kristján Sæmundsson, 1974; Vink, 1984; White o.fl., 1995; Wolfe o.fl., 1997). Eldvirkni Atlantshafshryggjarins fylgir Reykjanesgosbeltinu, Vestur- og Norðurgosbeltinu en þau tengjast um Suðurlandsbrotabeltið. Austurgosbeltið er framsækið rekbelti (t.d. Meyer o.fl., 1985) sem teygir sig í suðvestur út frá meintri miðju Íslands möttulstróksins (Wolfe o.fl., 1997; Mynd 2). Austurgosbeltið er eldvirkasta svæði Íslands og eldstöðvakerfið Vestmannaeyjar er eitt níu eldstöðvakerfa gosbeltisins. Gosbeltið einkennist af rektengdum fyrirbærum í norðri (s.s. sigdölum og misgengjum) en þegar sunnar dregur minnkar rekið og syðst á gosbeltinu, í nágrenni Vestmannaeyja, eru engin merki um virkt rek. Vestmannaeyjakerfið hefur hvorki vel skilgreinda megineldstöð né sprungusveim en hefur einkenni eldstöðvakerfis í mótun (s.s. stuttar gossprungur; t.d. Þorvaldur Þórðarson & Guðrún Larsen, 2007). Allar gosmyndanir kerfisins standa á hrygg með stefnuna NA-SV sem hefur hlaðist upp á undanförunum 70–120 þúsund árum (Ármann Höskuldsson o.fl., 2013). Hryggurinn teygir sig 32 km til norðausturs frá Surtsey, gegnum Álinn og svo 5 km til norðurs í gegnum Heimaey (Mynd 2). Eldvirkni hefur verið mest í grennd við Heimaey, Surtsey og Geirfuglasker og upphleðsla gosefna hefur verið mest á og við Heimaey. Fjöldi eyja og skerja er á reiki sem stjórnast af því hvernig skilgreiningum er háttað þegar talið er (15–18 eyjar og u.þ.b. 45–70 sker og neðansjávarhólar) en áætlað er að öll formin séu mynduð við eldsumbrot á síðustu 14–20 þúsund árum (Sveinn P. Jakobsson, 1968, 1979; Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2005) þó svo að töluverð óvissa fylgi aldri.

Eldvirkni á Vestmannaeyjakerfinu virðist hafa verið lítil í samanburði við virkustu kerfi Austurgosbeltisins, Grímsvötn og Bárðarbungu, en hún er lotubundin með löngum goshléum

án nokkurra eldsumbrota. Þó verður að hafa í huga að vegna staðsetningar kerfisins suður af suðurströnd landsins er í raun ekki eins mikið vitað um jarðfræði og virkni kerfisins og þeirra kerfa sem eru að fullu á landi. Kvikuframleiðsla kerfisins virðist fremur lítil í samanburði við önnur kerfi gosbeltisins en sú kvika sem myndast í eldstöðvakerfinu er alkalísk og þróaðasta bergtegundin sem fundist hefur er múgearít. Hvorki hefur myndast dasít né ríólít sem samræmist ungum aldri eldstöðvakerfisins (<100 þúsund ára; t.d. Sveinn P. Jakobsson, 1979). Vestmannaeyjar eru að mestu myndaðar úr móbergi og bólstrabergi en að auki er hraun í Heimaey og Surtsey.

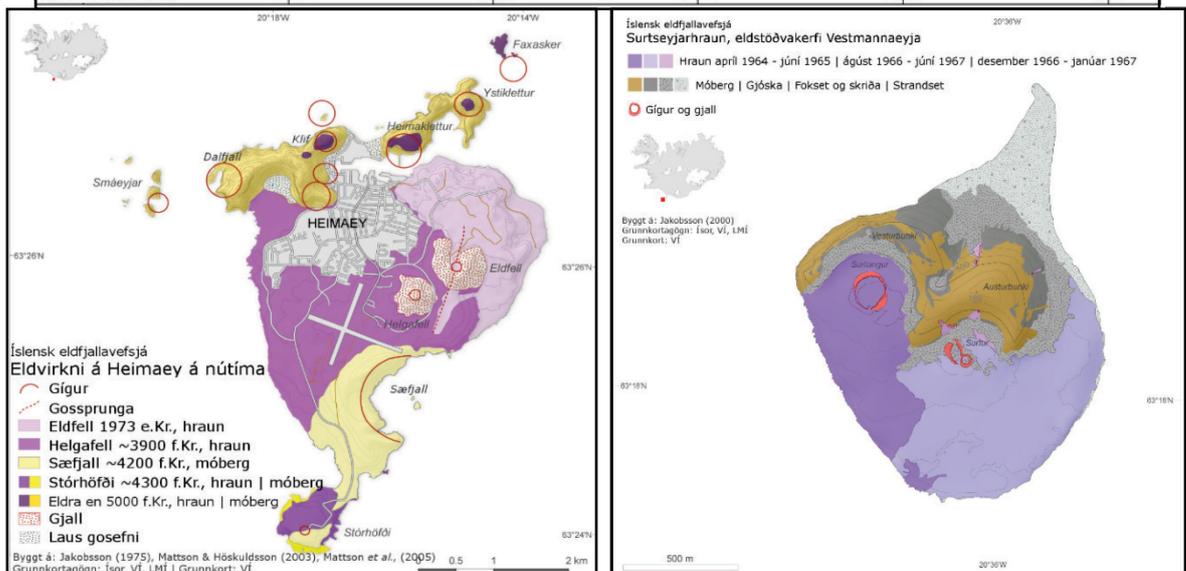
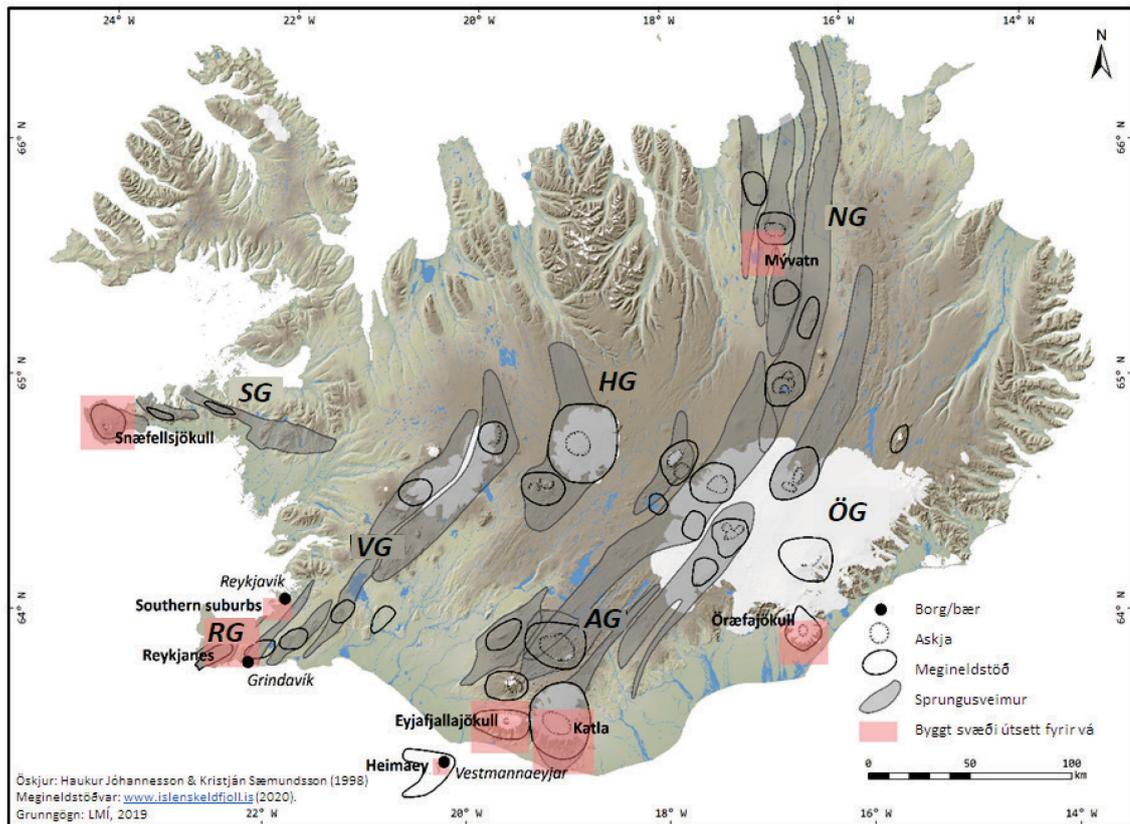
2.2 Gossaga

Gossögu er oft skipt í tvo kafla, sögulegan og forsögulegan. Á sögulegum tíma, eða eftir landnám árið ~870, má nálgast upplýsingar um gossögu í ýmiskonar rituðum heimildum til viðbótar við jarðfræðilega könnun en eðli málsins samkvæmt verða heimildir stopullir er aftar dregur í tíma. Þekking á forsögulegum tíma byggir einungis á þeim upplýsingum sem hægt er að nálgast með jarðfræðilegum athugunum en eins og á sögulegum tíma eru til minni upplýsingar um eldri atburði m.a. vegna þess að yngri gossefni hylja þau eldri.

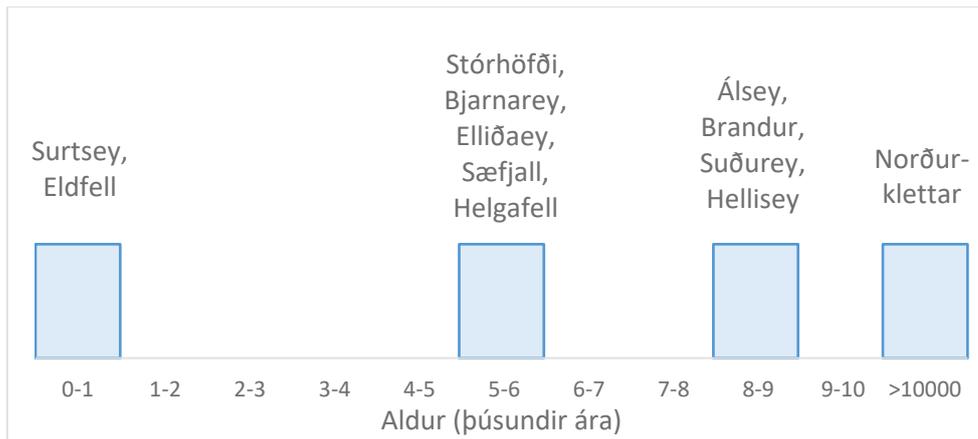
Heildarfjöldi gosa á Vestmannaeyjakerfinu er ekki þekktur. Gosvirkni Vestmannaeyja virðist lotubundin þar sem þúsundir ára geta liðið án nokkurrar eldvirkni en þegar goslotur hefjast virðast nokkur gos tilheyrja hverri lotu (Sveinn P. Jakobsson, 1979). Í upphafi gosa opnast löng gossprungu (km) en fljótlega (klukkustundir til dagar) dregst virknin saman (í tugi til hundruði metra) og gosvirkni einskorðast við fá gosop. Hvert gos getur staðið í mánuði eða ár og goslotur geta staðið í áratugi upp í aldir (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003). Jarðfræðikort af Heimaey og Surtsey má sjá á mynd 2.

2.2.1 Söguleg gossaga Vestmannaeyja

Yngsta goslota Vestmannaeyjakerfisins er söguleg og vel í minnum manna en í henni eru tvö vel þekkt gos, Surtseyjargosið 1963–1967 og Eldfellsgosið 1973. Tvö önnur söguleg gos hafa verið tengd Vestmannaeyjakerfinu. Af þeim eru óljósar sagnir en hugsanlega marka þessi gos upphaf yngstu goslotu Vestmannaeyja. Í ágúst og september árið 1896, um það leyti sem Suðurlandsskjálftar gengu yfir, sást logi upp úr hafinu, sem virtist vera sunnan við Hellisey (Sigurður Þórarinnsson, 1965). Heimildir um þetta gos eru fáar og ekki hefur tekist að staðsetja gosstöðvarnar en stungið hefur verið upp á að þær hafi verið við Geirfuglasker (Haukur Jóhannesson, 1983). Fátæklegar heimildir eru líka til um gos í október og nóvember árið 1637 sem hefur hugsanlega tekið sig aftur upp fyrstu mánuði ársins 1638 (Haukur Jóhannesson, 1983). Vera má að einhverjir þeirra smáhóla sem finnast á sjávarbotninn suðvestur af Heimaey hafi myndast í þessum gosum (Haukur Jóhannesson, 1983). Hugsanlega er yngstu goslotu Vestmannaeyja lokið.



Mynd 2. Efsta mynd: Ísland, gosbelti og helstu eldstöðvakerfi. Þau byggðu svæði sem eru útsett fyrir eldfjallavá eru rauðmerkt. AG: Austurgosbelti; NG: Norðurgosbelti; VG: Vesturgosbelti; ÖG: Öræfajökulsgosbelti; SG: Snæfellsnesgosbelti; HG: Hofsjökulsgosbelti (kort, Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998; Þorvaldur Þórðarson & Guðrún Larsen, 2007). Eldstöðvakerfi Vestmannaeyja er hér skeifulaga í samræmi við kort Hauks Jóhannessonar og Kristjáns Sæmundssonar (1998) sem fylgir grynningum umhverfis eyjarnar en dreifing gamalla neðansjávargíga sem sjást á botngögnum virðist ekki endurspeglu þetta form (sjá nánar í texta). Neðri mynd vinstri: Jarðfræðikort Heimaeyjar (www.islenskeldfjoll.is). Neðri mynd hægri: Jarðfræðikort Surtseyjar (www.islenskeldfjoll.is).



Mynd 3. Skipting gosmyndana á Vestmannaeyjakerfinu í aldursbil.

2.2.2 Forsöguleg gossaga Vestmannaeyja

Norðurklettur (Blátindur, Dalbjallshryggur, Há, Klif, Heimaklettur, Miðklettur og Ystiklettur) mynda elsta hluta Heimaeyjar en aldur þessara jarðmyndana er umdeildur, frá ~40 þúsund (Ingvar A. Sigurðsson & Sveinn P. Jakobsson, 2009) til ~10 þúsund ára (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003) en hér er yngri aldurinn notaður. Samkvæmt gjóskulagarrannsóknum hefur næsta gosskeið átt sér stað fyrir um átta þúsund árum þegar Álsey, Brandur, Suðurey og Hellisey mynduðust (Sveinn P. Jakobsson, 1979). Svo virðist hafa verið kyrrt þar til fyrir um fimm til sex þúsund árum þegar öflugt gosskeið átti sér stað en þá mynduðust Stórhöfði, Bjarnarey, Elliðaey, Sæfjall (stundum nefnt Sæfell í heimildum) og Helgafell.

Sæfjall hefur verið aldursákvarðað um 6200 ára út frá geislakolsgreiningum á mó og aldur Stórhöfða er talinn um hundrað árum eldri (Guðmundur Kjartansson, 1966). Gjóskulagarrannsóknir benda til þess að Bjarnarey og Elliðaey séu af mjög svipuðum aldri og Stórhöfði og Sæfjall (Sveinn P. Jakobsson, 1979) og gróf aldursgreining á Helgafelli með geislavirku ójafnvægi ^{226}Ra og ^{230}Th bendir til að það hafi myndast fyrir um 5900 árum (Olgeir Sigmarsson, 1996). Helgafellshraun tengdi Stórhöfða, Sæfjall og Dalbjall og myndaði Heimaey.

Erfitt er að segja til um hvort gosop flytjist kerfisbundið til með tíma en þó má sjá að Norðurklettur mynduðustu líklega í einni lotu. Fyrir um átta þúsund árum hefur mikil eldvirkni átt sér stað suðvestur af Heimaey og gosskeiðið fyrir fimm til sex þúsund árum hefur teygst sig frá Stórhöfða norður í Elliðaey. Síðasta goslotu hófst svo á suðvestur enda kerfisins og endaði í Heimaey.

Í raun er lítið vitað um stærðir gosa á Vestmannaeyjakerfinu og magn gosefna sem myndast í hverju gosi eða hverri goslotu en rúmmál hrauns í gosinu sem kennt er við Helgafell er áætlað $0,65 \text{ km}^3$ og magn hrauns í Eldfellsgosinu hefur verið metið $0,27 \text{ km}^3$ (sjá töflu 2). Heildarmagn gosefna í Surtseyjargosinu er metið $1-1,2 \text{ km}^3$ en megnið var á formi gjósku (Sigurður Þórarinnsson, 1969; Þorvaldur Þórðarson, 2000).

2.3 Framvinda í Surtseyjar- og Eldfellsgosi

2.3.1 Surtseyjargos 1963–1967

Surtseyjargosið er fyrsta og eina gos sinnar tegundar sem Íslenskir vísindamenn hafa getað fylgst grannt með. Það hófst sem neðansjávargos og stóð með stuttum hléum í um þrjú og hálf ár, og er þar með lengsta sögulega eldgos landsins. Í Surtseyjargosinu gaus á nokkrum gosprungum en einungis Surtsey stendur ofansjávar í dag sem er að hluta því að þakka að hraun fór að flæða þegar gosop hafði byggst upp og náði að einangra gosstöðvar frá sjó.

Neðansjávargosið hófst í nóvembermánuði 1963 tæpum 20 km suðvestur af Heimaey á svæði þar sem sjávardýpi var 130 m. Gosið hófst öllum að óvörum enda voru gosstöðvar fjarri öllum þekktum sögulegum gosstöðvum síns tíma. Sjómenn á línubátum Ísleifi II frá Vestmannaeyjum urðu gossins fyrst varir þann 14. nóvember en óútskýrð brennisteinslykt fannst tveimur til þremur dögum fyrr í Heimaey og í Vík í Mýrdal og degi fyrir gosuppkomu úr sjó mældist yfirborðshiti sjávar á afmörkuðu svæði nærri gosstöðvum rúmlega 2°C hærrí en annars mældist (Sigurður Þórarinnsson, 1966). Þetta bendir til þess að gosið hafi byrjað einhverjum dögum áður en þess varð fyrst vart, en Sigurður Þórarinnsson (1966) stakk upp á að opnun gossprungunnar á sjávarbotni mætti tengja við jarðhræringar sem jarðskjálftamælir á Kirkjubæjarklaustri nam viku fyrir uppkomu gossins úr hafi.

Tafla 2. Stærðir valinna hrauna sem runnið hafa á Vestmannaeyjakerfinu.

Gos	Dags/ár goss	Lengd goss (mán.)	Rúmmál hrauns (km ³)	Rúmmál reiknað sem fast berg (km ³)	Þykkt (m)	Lengd (km)	Rennslishraði* (km ³ /mán.)	Heimildir
Eldfell	23.1.-28.6.1973	5,1	0,27	0,24 [^]	9–100	3,7	0,04	A, B, C, D, E
Surtsey (Surtur II)	4.4.1964–17.5.1965	13,5		0,3	max 100	?	>0,02	F, G
Surtsey (Surtur I)	19.8.1966–5.6.1967	9,5		0,1	max 70	?	>0,02	F, G
Helgafell	5900 BP	11,5	0,65	0,59 [^]	3–50	6,5	<0,06	B, F, H
Klifið		?	0,01	0,009 [^]	?	?	?	B

Heimildir: A: Sveinn P. Jakobsson o.fl., 1973; Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003; C: Sigurður Þórarinnsson o.fl., 1973; D: Williams & Moore, 1976; E: Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020; F: Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2005; G: Þorvaldur Þórðarson, 2000; H: Olgeir Sigmarsson, 1996.

*Uppgefinn rennslishraði er meðaltal sem byggir á heildarrúmmáli og heildartíma goss. Stakar mælingar á rennslishraða hrauna eru mun hærrí, sem dæmi má nefna að hraunrennslí mældist frá 5,3–99,4 m³/s á mismunandi tímum í Eldfellsgosinu 1973 (Williams & Moore, 1976).

[^]Við útreikning rúmmáls sem fasts bergs er holrými í hraunum áætlað 10% eins og mælt var í Helgafellshrauninu (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003).

Hér á eftir fer grófur útdráttur úr Surtseyjarannálum Sigurðar Þórarinssonar (1966, 1969). Á fyrsta degi Surtseyjargoss sást að það gaus á þremur stöðum en lengd gossprungu í upphafi var áætluð 300–400 m. Strax degi eftir að goss varð vart hafði myndast sporöskjulöguð eyja, 400–500 m löng og 8–10 m há og gosmökkur var 8–9 km hár en hann varð aldrei hærri en það. Með tíma breyttist lögun eyjarinnar og hún varð hóflaga og að lokum dropalaga. Gígurinn sem fyrstur myndaðist fékk nafnið Surtur (eldri eða Surtur I) en virkni hætti í honum 31. janúar 1964. Virknin færðist í tvo gíga norðvestur í Surtsey, annar gaus gjalli, vikri og ösku en í hinum var hraunstrókvirkni. Frá 7. febrúar 1964 var einungis einn virkur gígur og hann nefndist Surtur yngri (einnig Surtungur eða Surtur II). Samtímis sprengigosinu í Surti eldri frá árslokum 1963 og fyrstu daga ársins 1964 gaus einnig neðansjávar 2,5 km austnorðaustur af Surtsey og þá myndaðist hryggurinn Surtla sem náði aldrei að byggjast upp fyrir sjávarmál.

Þann 4. apríl 1964 hófst flæðigos úr Surti yngri en þar með var Surtsey tryggt langlífi, rennslis-hraði hrauns úr gígnum mældist ~20 m/sek þann 22. apríl þegar hraunrennsli var í hámarki en þetta hraun var að nokkru leyti úfið apalhraun. Um þriggja mánaða hlé varð á hraunrennsli úr Surti yngri frá apríllokum til júlíbyrjunar 1964 en líklegt er að þann tíma hafi verið neðansjávar-virkni suðvestur af eyjunni. Hraunið sem rann frá júlíbyrjun 1964 var að mestu helluhraun.

Þann 17. maí 1965 hætti hraunrennsli í Surtsey en greinileg eldvirkni var austnorðaustur af eyinni og þar byggðist eyjan Syrtlingur upp á næstu vikum sem varð haföldunni að bráð í október 1965. Í desember 1965 varð eldsumbrota vart suðvestur af Surtsey og eyja, Jólnir, tók að byggjast þar upp en virkni var í Jólni fram í ágúst 1966. Jólnir varð haföldunni að bráð líkt og Syrtlingur og var horfin í september 1966. Töluvert gjóskufall varð í Surtsey úr gosunum í Syrtlingi og Jólni. Á meðan Syrtlingur og Jólnir mynduðust gaus á fleiri neðansjávargosopum sem náðu ekki að byggja sig upp fyrir sjávarmál og mynda eyjar.

Þann 19. ágúst 1966 hófst aftur hraunrennsli úr Surti eldri á Surtsey eftir um 2,5 árs hlé en þá gaus úr um 150 m langri gossprungu sem lengdist til norðurs næstu mánuði og náði mest um 500 m lengd. Þann 5. júní 1967 sást hraun síðast renna í Surtsey og lauk þar með Surtseyjargosi.

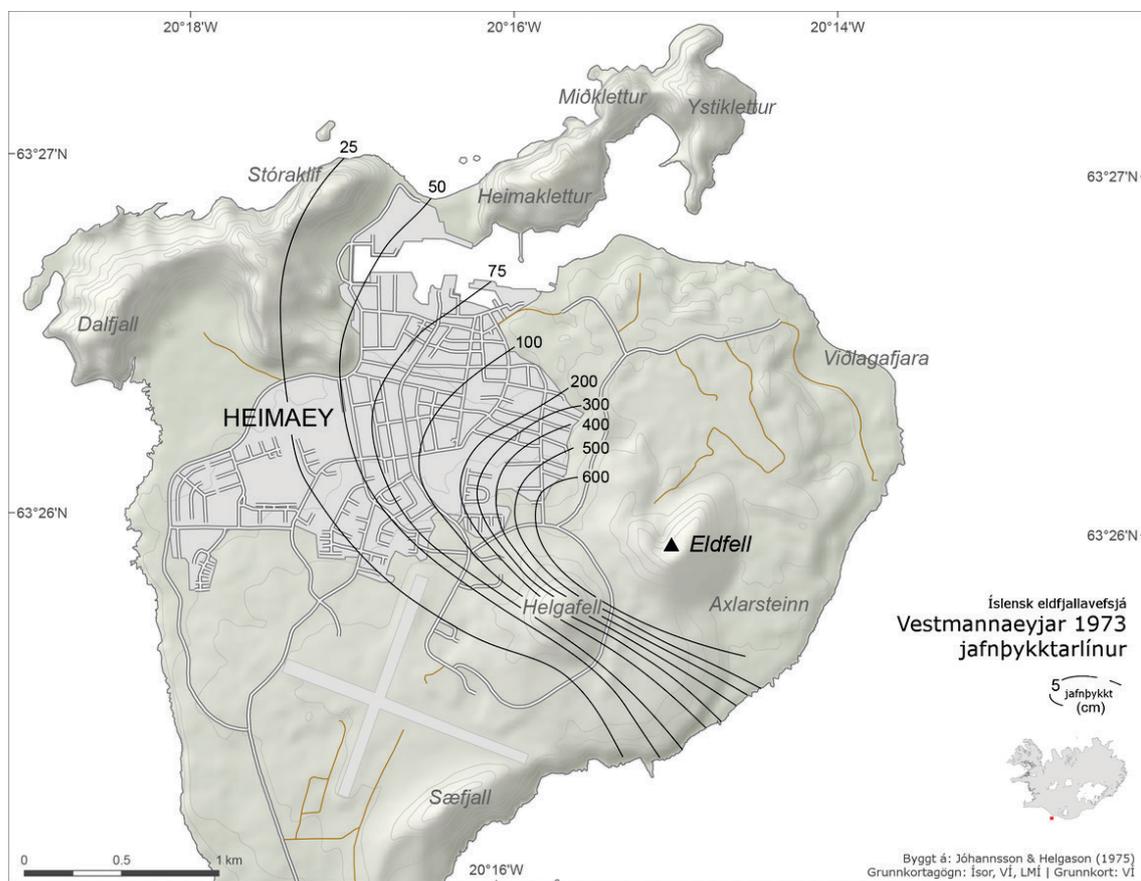
Í Surtseyjargosinu gaus á nokkrum gossprungum sem eru hluti af sama sprungukerfi. Heildar-rúmmál gjóska og hrauns sem myndaðist í Surtseyjargosinu er áætlað 1,0–1,2 km³ þar af um 70% gjóska (Sigurður Þórarinsson, 1969; Þorvaldur Þórðarson, 2000; Mynd 2). Surtseyjargosið var blandgos þar sem bæði sprengigos og flæðigos áttu sér stað en efnasamsetning gosefna var létt alkalísk (Sigurður Þórarinsson o.fl., 1964; Sigurður Steinþórsson, 1966; Ármann Höskuldsson o.fl., 2013). Tíu árum seinna gaus á Heimaey en kvikan sem þar kom upp er bergfræðilega skyld Surtseyjarkvikunni. Því er talið að Surtseyjarkvika hafi þróast neðanjarðar í 10 ár og komið svo upp til yfirborðs í Eldfellsgosinu 1973 (Olgeir Sigmarsson, 1996).

2.3.2 Eldfell 23. janúar til 3. júlí 1973

Gos hófst öllum að óvörum í Heimaey kl. 1:55 þann 23. janúar 1973 þegar ~2 km löng gos-sprungu opnaðist um 200 metra frá bæjarmörkunum (t.d. Oddur Sigurðsson, 1974; Ármann Höskuldsson o.fl., 2013). Snarpur jarðskjálftakippur fannst kl. 1:40 og um 15 mínútum seinna sást fyrst til elds en upphaflega héldu sjónarvottar að kviknað væri í íbúðarhúsum. Um 20 mínútum eftir að elds varð fyrst vart var gossprungan orðin um 1,5 km löng en hún náði mest um 3 km lengd og náði stranda á milli austan við Helgafell. Upp úr gossprungunni risu 50–60 aðgreinanlegir kvikustrókar, flestir 40–130 m háir en sumir náðu 150 m hæð (Sigurður Þórarinsson, 1977). Tólf tímum eftir upphaf goss hafði virk gossprungu dregist saman í 600 m og á fyrstu dögnum dróst hún enn frekar saman í nokkur misöflug gosop sem mynduðu litlar gígkeilur. Í mars var virknin einungis bundin við gíginn sem síðar fékk nafnið Eldfell. Í gosinu

gaus aðallega ofansjávar en þó opnuðust gosop í sjó við báða enda gossprungunnar og jafnvel er talið að lítið neðansjávargos hafi átt sér stað milli lands og Eyja tengt Eldfellsgosinu þar sem misjafna mældist á sjávarbotni (Sigurður Þórarinnsson, 1977).

Í upphafi rann hraun til austurs úr gossprungunni en framleiðsla gosefna í upphafi var metin um 100 og allt upp í 500 m³/sek sem dvínaði hratt fyrstu dagana og var orðið 5 m³/sek á síðasta degi gossins seint í júní 1973 (t.d. Morgan, 2000). Efnasamsetning hraunsins var alkalísk af mugarít-hawaít gerð (Sveinn P. Jakobsson, 1979) og rennslishiði þess var um 990°C (lágmarkshiti; Ármann Höskuldsson o.fl., 2013) en slíkt hraun er fremur þykkfljótandi sem útskýrir hversu háir jaðrar þess urðu. Hraunið ógnaði bænum ekki fyrir en í febrúar þegar flæðið fór að stefna til norðvesturs. Varnargarðar voru reistir úr gjósku og gjalli til að verja byggðina fyrir hraunflæði (Birgir Jónsson, 1992) og eins var vatni dælt á jaðarinn til að kæla hann og reyna að draga úr rennslisraða hraunsins. Þessar varnaraðgerðir höfðu jákvæð áhrif og töfðu hraunrennslí. Þrátt fyrir þær rann hraun inn í og yfir hluta bæjarins í nokkrum áhlaupum fram í apríl og olli miklu tjóni, en Eldfellshraun þekja alls 3,3 km².



Mynd 4. Jafnþykktarlínur uppsafnaðrar gjóskuþykktar í Eldfellsgosinu 1973 (Davíð Egilson, 1974). Mælingar voru gerðar frá 26. janúar til 26. febrúar. Áætlað er að um 75% þeirrar gjósku sem féll á Vestmannaeyjabæ hafi fallið á fyrstu tveimur vikum gossins eða frá 23. janúar til 2. febrúar og eftir 26. febrúar var viðbót það lítil að hún var óveruleg. Jafnþykktarlínur gjósku sem mældar voru fyrsta mánuð gossins sýna því raunverulega mynd af þykkt gjóskufalls í Eldfellsgosinu 1973 þó um lágmarkstölur sé að ræða. Ástæða þess að jafnþykktarlínur eru ekki teiknaðar austan til á Heimaey er sú að þar er nýtt land sem myndaðist í gosinu 1973. Mynd af www.islenskeldfjoll.is.

Gosmökkur hlaðinn gjósku reis í um 9 km hæð á fyrstu dögnum en varð aldrei hærri. Gjóska sligaði hús og þök hrundu undan þunga hennar, hús grófust algjörlega í gjósku þegar leið á gos en gjóskuþykkt náði víða 4 metrum (Oddur Sigurðsson, 1974) og allt að 6 m austast í bænum (Birgir Jónsson, 1992). Þrír fjórðu hlutar þeirrar gjósku sem féllu í gosinu mynduðust á fyrstu tveimur vikum gossins, eða frá 23. janúar til 2. febrúar. Gjóskufall var svo lítið eftir 26. febrúar að viðbótin var ekki mælanleg (Mynd 4) þrátt fyrir að gjóska í mjög litlu magni hafi myndast af og til fram til 26. júní (Óskar J. Sigurðsson, 1973) en mögulega var mesti hluti þeirrar gjósku endurfluttur frekar en nýmyndaður. Í heildina skemmdust >400 byggingar af völdum hraunflæðis og gjóskufalls í gosinu (t.d. Ármann Höskuldsson o.fl., 2013). Heimaey stækkaði um þriðjung eða 2,2 km² en heildarrúmmál gosefna var metið um 0,25 km³ en um 10% þess var gjóska (t.d. Williams & Moore, 1976). Í gosinu urðu svo til allir innviðir Heimaeyjar fyrir tjóni ýmist af völdum hrauns eða gjósku s.s. íbúðarhús, vegir, raforkumannvirki, vatnsból og fiskvinnsla.

Hættan sem steðjaði að Vestmannaeyjabæ af völdum gossins var í raun þríþætt:

1. Mesta hættan með tilliti til innviða stafaði af hraunflæði en hraunið vægði engu sem á vegi þess varð. Reynt var að verja byggðina og höfnina með byggingu varnargarða og kælingu hraunjaðra en hraunið byggði sig ýmist upp fyrir jaðrana eða þungi þess braut þá og hraunið gekk fram í áköfum framrásum. Þrátt fyrir það tókst að bjarga höfninni eins og frægt er orðið.
2. Hætta af völdum gjóskufalls. Gjóska getur verið skaðleg öndunarfærum manna og dýra og gjóskubungi getur sligað húspök. Á meðan á gosinu stóð var reynt að koma í veg fyrir fall þaka með því að sópa gjósku af þeim og með styrkingu þeirra innan frá en endurtekið var farið inn í hús og þau styrkt til að halda meiri þunga en upphafleg hönnun gerði ráð fyrir. Hraunbombur eru hluti gjóskufalls en allt upp í 25 kg bombur köstuðust 1 km frá gosstöðvum og brutu stundum glugga og/eða þök húsa sem fyrir urðu. Kjarni bombanna var oft glóandi og þegar þær lentu áttu þær til að brotna og kveikja í því sem nærri þeim var sem í sumum tilfellum voru innanstokksmunir húsa (Morgan, 2000). Fljótlega eftir upphaf goss var búið að byrgja alla glugga í bænum til að draga úr tjóni af völdum hraunbomba.
3. Gasmengun nálægt upptökum eldgosa getur verið mikil og lífhættuleg. Gasmengun varð töluverð í Eldfellsgosinu og um tíma var hluti bæjarins lokaður þegar gas lagðist í lægðir og drap smá dýr. Björgunarsveitarmenn þurftu að varast lægðir og tryggja góða loftræstingu þegar farið var inn í hús til að styrkja þau. Eina dauðsfallið sem varð í gosinu var af völdum gasmengunar.

Í eftirfarandi skrifum er ýmist vísað til þessa goss sem Eldfellsgoss eða Heimaeyjargoss.

2.3.3 Atburðarás út frá skjálftagögnum, hvað sást?

Surtsey: Jarðskjálftamælir á Kirkjubæjarklaustri sýndi hræringar viku áður en Surtseyjargossins varð vart sem ef til vill er hægt að setja í samband við upphaf þess (Sigurður Þórarinsson, 1966).

Eldfell: Sérkennileg skjálftahrina sást á mælum í Mýrdal og Laugarvatni að kvöldi 21. janúar 1973 og alls mældust yfir 200 kippir til kl. 10 þann 22. janúar (Páll Einarsson & Sveinbjörn Björnsson, 1987). Gæslumenn mælanna töldu að skjálftahrinan væri fyrirboði eldsumbrota þó ekki væri hægt að staðsetja upptök hennar (Oddur Sigurðsson, 1974). Seinna sást sama hrina á skjálftalínuriti frá mæli á Valahnjúkum (Oddur Sigurðsson, 1974; Ármann Höskuldsson o.fl.,

2013). Skjálftarnir fundust ekki í Vestmannaeyjum fyrr en um kl. 22 að kvöldi 22. janúar vegna þess hve djúpir þeir voru en upptök þeirra voru á 15–25 km dýpi (Páll Einarsson & Sveinbjörn Björnsson, 1987). Nákvæmni staðsetningar skjálftanna sem fundin er út frá dreifingu mældra skjálfta í aðdraganda gossinns og fyrstu klukkutímanna eftir að það hófst er léleg (Kristín S. Vogfjörð, munnleg heimild). Að auki fundust skjálftar í Heimaey rétt fyrir upphaf goss.

Nokkur skjálftavirkni fylgdi Eldfellsgosinu sjálfu en það dró úr henni samhliða gosákafanum. Að meðaltali mældust um fjórir kippir á dag í febrúar, þrír á dag í mars og ekki nema einn á dag í maí. Að gosi loknu dó skjálftavirkni svo til alveg út (Páll Einarsson & Sveinbjörn Björnsson, 1987).

2.3.4 Núverandi virkni og eftirlit

SIL jarðskjálftakerfi Veðurstofunnar hefur verið í gangi síðustu þrjú áratugina og í því má sjá að á ári hverju verða að meðaltali tveir skjálftar á um 15 km dýpi undir Heimaey og rúmlega fjórir undir Surtsey (Kristín S. Vogfjörð, munnleg heimild). Þetta eru einu staðirnir á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja þar sem teljandi jarðskjálftar eiga sér stað.

Frá árinu 2000 hefur verið jarðskjálftamælir í Heimaey, staðsettur í móberginu við Skiphella, í námunda við Sprönguna. Undirlag mælisins er gott og fyrstu árin mældust á hann góð gögn frá jarðskjálftum undir Heimaey og Surtsey. Um 50 þeirra eru við Heimaey og flestir á um 15 km dýpi. Staðsetning flestra þessara skjálfta er vestan Heimaeyjar í námunda við Smáeyjar, eða vestan við jarðskjálftamælinn. Nánari greining skjálftaritanna frá mælinum gefur hins vegar til kynna að bylgjurnar komi að austan og eru líkleg upptök undir gossprungunni frá 1973. Ástæða þessarar 4–5 km hliðrunar skjálftanna til vesturs er líklega mismunandi bylgjuhraði í jarðskorpunni til vesturs og austurs frá Heimaey, en skjálftarnir eru staðsettir út frá mælingum á ferðatíma jarðskjálftabylgna í fjölda mælistöðva á Suðurlandi. Til að veða á móti þessari hliðrun má reyna að setja fleiri mæla austan Heimaeyjar.

Aukin umsvif við malbikunarstöðina og í Friðarhöfn hafa valdið miklum og síauknum hávaða á jarðskjálftamælinum við Skiphella og hefur því verið leitað að betri staðsetningu fyrir hann í nokkur ár. Í október 2012 var mælirinn færður sunnar á eyjuna, að vestanverðri flugbrautinni og rekinn þar í rúm fjögur ár. Sá staður reyndist ekki vel og var mælirinn þá fluttur aftur í gömlu holuna við Skiphella í mars 2017, á meðan áfram var leitað að betri mælistað. Þá um haustið var viðbótarmælir settur sunnar á Heimaey, í móbergið í Sæfjalli og annar í Bjarnarey, austan Heimaeyjar og eru þeir þar enn. Undirlag mælisins í Bjarnarey reyndist ekki nógu gott og því var enn einni jarðskjálftamælistöð komið upp í Elliðaey haustið 2019 og mun hún hugsanlega taka við af mælistöðinni í Bjarnarey. Rekstur flestra þessara mælistöðva er tímabundinn, eða þangað til einn til tveir góðir framtíðarmælistaðir finnast á Heimaey og einn í útey. Síðan í september 2017 hefur eldstöðvakerfi Vestmannaeyja því verið vaktað samfelld með þremur tímabundnum jarðskjálftamælistöðvum (tveim á Heimaey og einni í Bjarnarey), og samfelldum GPS mælingum á einni stöð (á Heimaey).

Auk þessara tilrauna með fastamælistöðvar var rannsóknaverkefni í gangi á tímabilinu október 2017 – mars 2019, þar sem Háskólinn í Bergen í samstarfi við Veðurstofu Íslands setti tímabundið upp net fimm jarðskjálftamæla á Heimaey (á Nýjabæjarbraut, í Ofanleiti, á golfvællinum, í Eldhrauni og í Stórhöfða). Markmið verkefnisins var að mæla skjálfta undir Heimaey og staðfesta að þeir væru í raun undir gossprungunni frá 1973, en ekki vestan Heimaeyjar og þannig hjálpa til við að meta hvernig auka megi nákvæmni í staðsetningu skjálfta undir Heimaey og bæta vöktun í eldstöðvakerfi Vestmannaeyja. Engir skjálftar mældust undir Heimaey allan þann tíma sem mælanetið var rekið og er það næstlengsta tímabil

án skjálfta síðan SIL kerfið var sett í gang árið 1991. Gögnin hjálpa þó til við að meta hvar best væri að staðsetja jarðskjálftamæla.

Ljóst er að það er samhljómur um að koma upp varanlegu vöktunarkerfi með aðkomu Veðurstofunnar og hagaðila. Brýnt er að finna sem allra fyrst ásættanlega staðsetningu jarðskjálftamæla til að koma vöktuninni í varanlegt horf. Enn eru í gangi athuganir sem miða að því að finna ákjósanlega staðsetningu jarðskjálftamæla til þess að hækka vöktunarstig svæðisins en endanlegar niðurstöður liggja ekki fyrir við ritun þessarar skýrslu. Í lok árs 2021 verður lögð fram áætlun með helstu vörðum við að koma upp varanlegu vöktunarkerfi en hafa þarf í huga að tímasetningar geta raskast þar sem lítil jarðskjálftavirkni innan eldstöðvakerfisins lengir tímann til að finna ásættanlegar staðsetningar fyrir mæla.

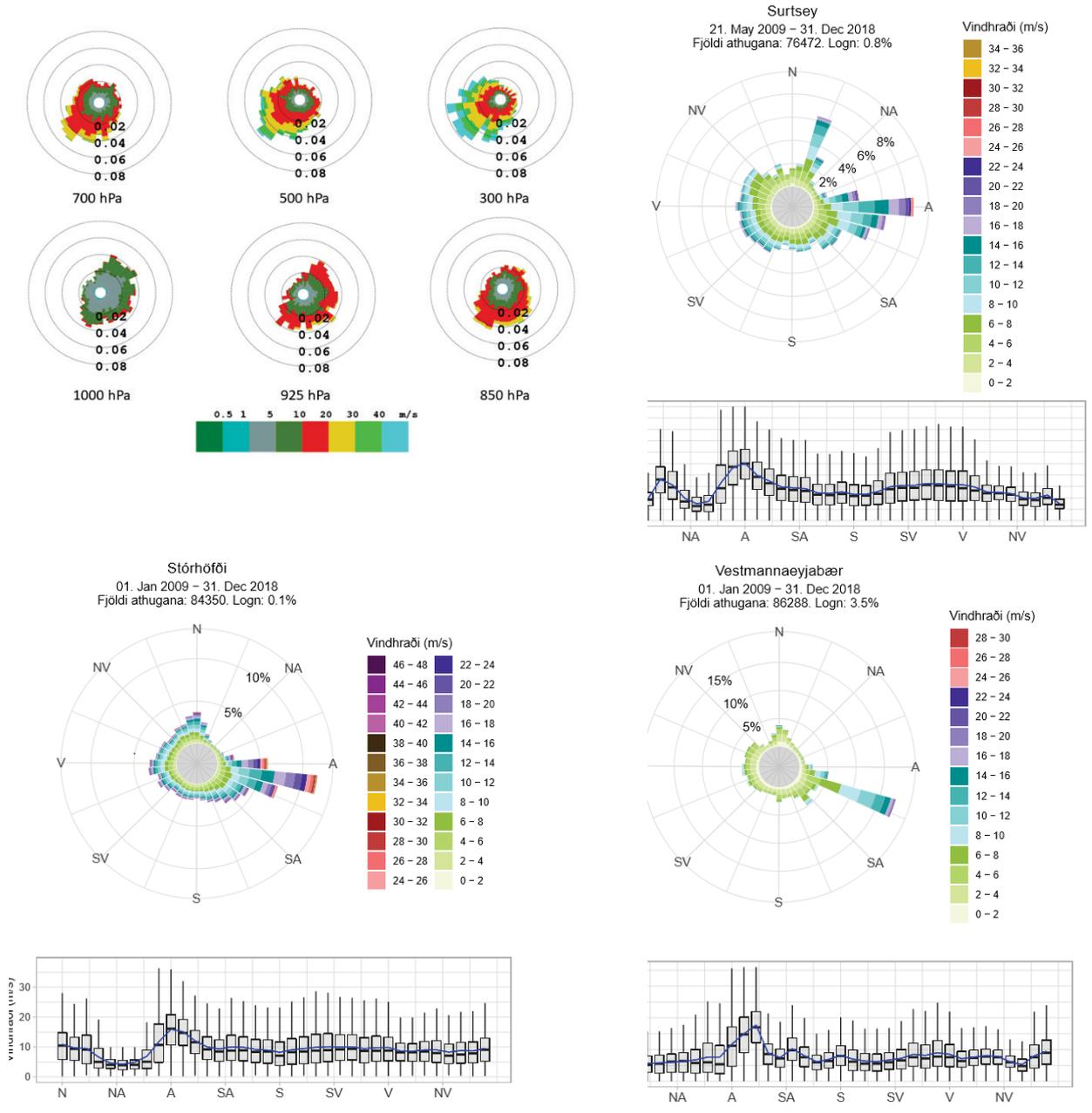
Veðurstofa Íslands fer reglulega í ferðir til að mæla samsetningu gastegunda á háhitasvæðinu í Eldfelli og Surtsey. Mælingarnar sýna að uppruni gasa er ekki tengdur kviku. Enn fremur sýna eftirlitskerfi Veðurstofunnar hvorki landris né landsig í Vestmannaeyjum.

Náttúruvársérfræðingar Veðurstofu Íslands halda úti sólarhringsvöktun á náttúruvá á Íslandi. Eftirlit er með síritandi eftirlitsmælum og bráðabirgðastaðsetningar jarðskjálfta eru tiltækar um tveimur mínútum eftir skjálftaupphaf. Sé þörf á nákvæmari staðsetningu skjálfta eru þær yfirfarnar og tiltækar innan nokkurra mínútna eða klukkustunda. Fari óróahrina í gang eru jarðeðlisfræðingar og jarðfræðingar Veðurstofunnar og Jarðvísindastofnunnar Háskólans til taks og unnið er eftir vel skilgreindum verklagsreglum.

2.3.5 Eldgosavá í Vestmannaeyjum

Nærtækasta eldgosavá í Vestmannaeyjum er af völdum gosa með upptök í eyjunum og nágrenni þeirra en þar skiptir gerð goss (neðansjávar eða landgos, þunn- eða seigfljótandi hraungos, sprengigos) og kraftur (framleiðsla gosefna á tímaeiningu) miklu máli. Helsta hættan stafar af hrauni í nágrenni við byggð, gjóskufall (þ.m.t. hraunbombur) og eittraðar gastegundir en varhugaverðar eldingar geta einnig myndast. Mikil gasmengun getur fylgt hraungosum og bæði andrúmsloft og vatn getur mengast. Gas losnar úr kvikunni í gosi og úr hrauni þegar það kólnar og einnig geta ákveðin gös myndast þegar kvika og vatn/sjór mætast. Um þessar mundir er unnið að því að nýta dreifilíkan fyrir þung gös (Burton o.fl., 2017) til að spá fyrir um hvar eldfjallagas mun safnast fyrir í framtíðar gosum og vert er að vinna hættumat af völdum gasmengunar fyrir Vestmannaeyjar í nálægri framtíð. Hér verður einungis fjallað um vá af völdum hrauns og gjósku.

Gjóskufall fylgir sprengigosum en með aukinni nálægð við gosstöðvar verður meiri hætta á grófu gjóskufalli s.s. stórum og þungum hraunbombum. Með auknum krafti í gosum eykst vá af þeirra völdum. Í neðansjávargosum skiptir dýpi niður á gosop miklu máli en þegar gosop hefur byggt sig upp á <10 m vatnsdýpi getur gjóskumyndun orðið álíka og í gosi sem á sér stað ofansjávar (Tonini o.fl., 2015) en hæð gosmakkar tengdu slíku gosi nær mest ~9–12 km hæð (Þorbjörn Sigurgeirsson, 1965; Sigurður Þórarinnsson o.fl., 1973). Nái gígur að byggja sig upp og einangra gosrásina frá vatni minnkar gjóskumyndun og því getur gos sem hefst sem neðansjávargos þróast yfir í sprengigos og áfram yfir í hraunstrókavirkni og/eða hreint hraungos. Hlutfall hrauns og gjósku sem myndast í gosum á Vestmannaeyjakerfinu stjórnast af því hve lengi gos stendur. Því lengur sem ofansjávargos stendur þeim mun meira hraun myndast. Hraun geta valdið gjöreyðingu, lokað vegum, valdið skemmdum á rafmagnsstaurum og sliti á línun, auk þess að hafa mikil áhrif á vatnsból og vatnsbúskap. Renni hraun að innviðum (eða yfir þá) getur það valdið miklu tjóni en hraunaváin er mismikil eftir staðsetningu.



Mynd 5. Uppi til vinstri: Tíðni vindáttá og vindhraði nærri Eldfelli á tíu ára tímabili frá 1980–1991 (ECMWF, 2011). Sex mismundi þrýstingsbil frá 1000–300 hPa (eða milli-börum) en 1000 hPa jafnast á við ~100 m h.y.s., 925 hPa ~750 m h.y.s., 850 hPa ~1500 m h.y.s., 700 hPa ~3000 m h.y.s., 500 hPa ~5600 m h.y.s. og 300 hPa jafnast á við ~9000 m h.y.s sem er á við hæsta gosmökk í Eldfellsgosinu (t.d. Sigurður Þórarinsson, 1973). Aðrar myndir sýna vindrósir ríkjandi vindáttá í 10 m y.s. Litur táknar vindhraða sem er einnig sýndur fyrir neðan hverja vindrósi (veðurgögn Veðurstofu Íslands árin 2009–2018). Uppi til hægri: Í Surtsey. Niðri til vinstri: Á Stórhöfða. Niðri til hægri: Í Vestmannaeyjabæ.

Gjósकुfall frá öðrum íslenskum eldstöðvum getur einnig valdið vá á Heimaey en áhrif þess eru minni en af völdum goss á Vestmannaeyjakerfinu. Eins geta flóðbylgjur (tsunami) myndast í kjölfar jökulhlaupa frá Kötlu og jarðskjálfta og skolið á Vestmannaeyjum. Ekki er gert ráð fyrir að miklar lóðréttar hreyfingar verði í skjálftum á Reykjaneshrygg og því þyrfti jarðskjálfti að hrista niður stóra óstöðuga setbunka til að orsaka flóðbylgju.

2.3.6 Ríkjandi vindafar í Vestmannaeyjum og áhrif á gjóskudreifingu

Dreifing gjósku í andrúmslofti stjórnast af ríkjandi vindátt hverju sinni. Til að átta sig á mögulegu gjóskufalli og hvaða svæði geta orðið fyrir áhrifum þarf því að skoða ríkjandi vindáttir umhverfis eldstöðvar. Vindáttir eru breytilegar með hæð og geta því borið gjósku úr sama gosi til mismunandi átta (Mynd 5, uppi t.v.) og eins eykst vindstyrkur með hæð.

Veðurmælingar eru gerðar á tveimur stöðum á Heimaey, á Stórhöfða (118 m y.s.) og í Vestmannaeyjabæ (40 m y.s.) og að auki eru veðurmælingar gerðar í Surtsey (Mynd 5). Langalgengast er að vindar blási úr austri og suðaustri í Heimaey og nær öll hvassviðri koma úr þeirri átt, einkum þegar djúpar lögðir koma upp að landinu úr suðri. Aðrar vindáttir eru mun sjaldgæfari en á sumrin verður vestlæg átt, samsíða suðurströnd Íslands, algengari en annars. Norðanáttir eru aftur á móti nokkuð tíðari yfir kaldari tíma árs. Norðaustanáttir eru mjög fátíðar en hér gætir skjóls frá hálendi Eyjafjalla- og Mýrdalsjökuls. Í Vestmannaeyjabæ er vindhraði almennt lægri en mælist á Stórhöfða en vindáttir eru nokkuð svipaðar þó meginvindáttin sé aðeins suðlægari þar en á Stórhöfða. Vindhraði í Surtsey mælist mitt á milli Vestmannaeyjabæjar og Stórhöfða en ríkjandi vindáttir eru svipaðar þar sem austlæggar áttir eru langalgengastar (Guðrún Nína Petersen, munnleg heimild).

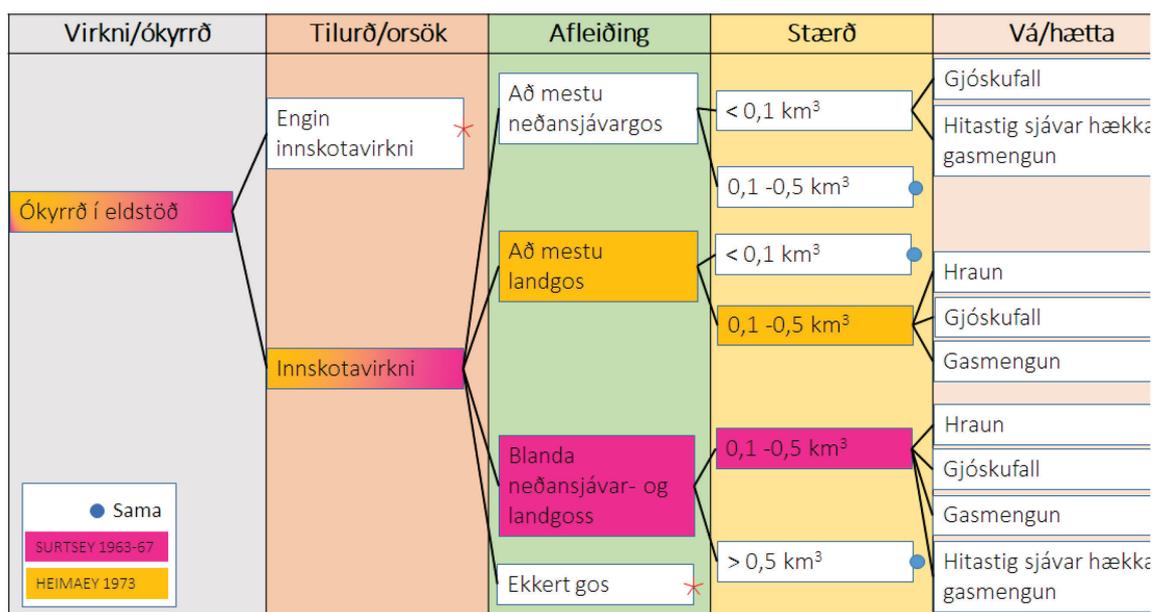
2.3.7 Fyrirboðar

Aukin skjálftavirkni átti sér stað fyrir bæði Surtseyjar og Eldfellsgosin og með nútíma-skjálftaefirliti má gera ráð fyrir að skjálftar greinist fyrir eldsumbrot og verði fyrirboðar eldgoss.

2.3.8 Atburðagreining

Atburðagreining (e. event tree) er undirstöðuatriði hættumats til lengri tíma lítið. Þar er gefið yfirlit um mögulega hegðun eldstöðvar og mögulegar afleiðingar þess að eldstöð bæri á sér eru settar fram á myndrænan hátt (Newhall & Hoblitt, 2002). Atburðagreining er yfirleitt byggð upp sem rökræn atburðarás, mótuð eins og greinar á tré sem samsvara ólíkri en mögulegri eldvirkni. Sjónrænt útlit atburðagreiningar er gagnlegt þegar ólíkir fasar eldgoss eru skoðaðir, allt frá óróastigi til staðfestrar hættu sem stafar af eldgosi. Atburðagreining byggir á þekkingu á hegðun eldstöðvar en gert er ráð fyrir að framtíðar virkni verði lík því sem þekkt er úr fortíð. Jafnframt er gert ráð fyrir þeim möguleika að virkni geti orðið álík og þekkist úr öðrum sambærilegum eldstöðvum.

Atburðagreining fyrir eldstöðvakerfi Vestmannaeyja sýnir möguleg atburði frá því að kerfið sýnir merki um óróleika þar til atburður á sér stað. Óróleiki getur stafað af kvikuinnskoti sem getur ýmist storknað í jarðskorpunni eða brotið sér leið til yfirborðs og valdið neðansjávargosi, eða komið til yfirborðs ofansjávar og valdið hraungosi. Stærð og lengd goss stjórnar hvaða gosefni myndast. Fleiri atburðir eru mögulegir (Mynd 6) en Surtseyjar- og Eldfellsgosin eru sérstaklega merkt. Atburðagreiningin er ekki endanleg og næsta skref er að bæta við skilyrtum líkindum allra möguleika samkvæmt niðurstöðu sérfræðinga.



Mynd 6. Atburðagreining (e. event tree) Vestmannaeyja gefur yfirlit yfir goshegðun eldstöðvakerfisins (Ármann Höskuldsson, 2015). Skipting gosa eftir stærð er sú sama og hefur verið skilgreind á vefsíðu Íslenskrar eldfjallavefsjár (www.islenskeldfjoll.is). Bláu punktarnir tákna að búist sé við sömu afleiðingum og í atburði að ofan. Hegðun í Surts-eyjargosi 1963–1967 og Eldfellsgosi 1973 er sýnd með bleiku og gulu.

3 Aðferðir

Í þessum kafla verður farið yfir þá aðferðafræði sem beitt var við úrlausn verkefnis og hermun hraunflæðis- og gjóskufalls sem byggir á þekkingu á eldri gosum. Stuðst var við fyrirfram skilgreindar stærðir atburða sem byggja á jarðsögu Vestmannaeyja en þær voru ýmist metnar út frá rauntímamælingum (sbr. Eldfell) eða út frá jarðfræðilegri könnun (sbr. Helgafell; kaflar 3.1–3.4). Forsendur sem notaðar eru við mat á efnahagslegum áhrifum eldgoss á Heimaey eru kynntar (kafla 3.5). Ef þörf er á frekari útskýringum á þeirri aðferðafræði sem hér er beitt er vísað á frumritið og viðauka sem því fylgja (Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020).

3.1 Landhæðargögn og dýptarmælingar umhverfis Heimaey

Hluti af því að keyra hraunflæðilíkan og spá fyrir um hvert hraun renna er að skilgreina vel það undirlag sem hraunin renna yfir. Stafrænt hæðarlíkan af yfirborði Heimaeyjar og sjávarbotni Vestmannaeyjakerfisins var því útbúið og notað við hraunhermanir. Auk þess var það notað til að ákvarða staðsetningar gamalla gíga, fjölda skerja og neðansjávarhóla sem talin eru hafa myndast við eldsumbrot (sjá Viðauka A, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Til að ákvarða hvort formin væru mynduð við eldsumbrot eður ei var stuðst við lögum þeirra, hæð þeirra yfir umhverfi sínu og þau útrænu öfl sem verkað hafa á þau. Þekkingu á jarðfræðilegri myndunar-sögu svæðisins, sjávarstöðubreytingum síðustu 20 þúsund ára og túlkun á því hvaða kraftar hafa sorfið gígana (sjávarrof, jökulrof) má nota til að áætla aldur gosopa gróflaga (Ármann Höskuldsson o.fl., 2009; D, Melissa A. Pfeffer o.fl. 2020). Ísbreiðan frá hámarki síðasta jökul-skeiðs hörfaði af svæðinu fyrir um 18 til 20 þús. árum (Ármann Höskuldsson o.fl., 2009) og sjávarstaða hefur breyst á þessum tíma þannig að t.d. gosefni sem aðeins myndast ofansjávar (móberg, gjall, hraun) finnast nú neðansjávar og öfugt.

Stafræna hæðarlíkanið var einnig notað til að endurreikna rúmmál hrauns sem myndaðist í Eldfellsgosinu 1973 með samanburði við hæðarlíkan og dýptarmælingar frá því fyrir gos.

3.2 Möguleg staðsetning framtíðargosopa á Vestmannaeyjakerfinu

Hvorki er vitað hvenær né hvar næst gýs á Vestmannaeyjakerfinu en staðsetning gosupptaka er lykilatriði í hættumati vegna eldgosa. Vegna óvissu í aldri gosmyndana var ekki reynt að meta líkur á því hvenær næst mun gjósa en líkur á opnun gosopa má meta með tölfræðilegum aðferðum út frá þekktri jarðfræði og jarðsögu svæða (t.d. Selva o.fl., 2012). Hér voru þrjár aðferðir notaðar til að meta líkur á gosupptakastað. Allar nálganirnar gera ráð fyrir að næsta gosop opnast innan þess svæðis sem unnið er með, sem í þessu tilfelli er sá hluti Vestmannaeyjakerfisins sem hefur verið dýptarmældur (þ.e. gert er ráð fyrir að 100% líkur séu á að næst gjósi innan þess svæðis) og möskvastærð reiknins var ákveðin 400m x 400m til að tryggja nægilega gagnaupplausn.

Fyrsta aðferðin gefur öllum gosopum jafnt vægi. Önnur aðferðin byggir á normaldreifingu staðsetningu gosopa umhverfis bestu línu sem dregin er gegnum öll þekkt gosop (sjá skilgreiningu gosopa í kafla 3.1) og staðalfrávik er reiknað út frá fjarlægð þekktra gosopa frá bestu línu. Þessi aðferð verður héðan í frá nefnd Gaussísk líkindi til samræmis við þá tölfræðilegu aðferð sem beitt er. Þannig eru mestar líkur á að næst gjósi á línunni sjálfri og líkur á opnun gosopa minnkar eftir því sem fjær dregur. Í tilfelli Vestmannaeyja skilgreinir besta línunni ríkjandi stefnu eldstöðvakerfisins og liggur í gegnum Surtsey og Heimaey. Þriðja aðferðin byggir á normaldreifingu umhverfis einstök gosop að teknu tilliti til fjarlægðar í næsta þekktu gosop og fylgir aðferðafræði Martin o.fl. (2004). Þar er gengið út frá þeirri forsendu að hægt sé að segja til um staðsetningu næsta gosops út frá staðsetningu fyrri gosopa. Þessi aðferð tekur hvorki tillit til sprungustefnu eldstöðvakerfisins né aldurs gosopa heldur aðeins staðsetningar þeirra. Eins og í Gaussísku líkindunum er hér einnig notuð normaldreifing en í þetta sinn eru líkur á opnun gosopa normaldreifðar umhverfis hvert gosop og samanlagðar líkur, að teknu tilliti til fjarlægðar milli gosopa, eru reiknaðar. Normaldreifðu líkurnar frá hverju gosopi eru lagðar saman til að fá heildarlíkur á opnun gosopa á hverjum stað fyrir sig. Lögum normaldreifingarinnar ræðst af svokölluðum jöfnunarstuðli (e. smoothing factor) sem er ákveðinn með það fyrir sjónum að niðurstöður módelisins séu sem líkastar raunverulegum þekktum niðurstöðum. Því minni sem jöfnunarstuðullinn er því meiri verða líkur þess að gosop opnast nærri þekktum gosopum og því stærri sem hann er þeim einsleitara verður líkanið. Þessi aðferð er héðan í frá nefnd Kernel líkindi til samræmis við tölfræðilega aðferð sem beitt er. Þar sem aldur gosopa er lítt þekktur var honum ekki gefið vægi í líkindareikningum þess hvar líklegast er að næst muni gjósa. Frekari útskýring á aðferðunum tveimur má nálgast í frumskýrslunni (Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020).

3.3 Hraunrennislíkön

Útbreiðsla hrauna á Heimaey er auðkennd í purpurarauðum lit á mynd 2 og þar má sjá að Heimaey er að mestu byggð upp af hraunum og gosefnum en aðeins lítill hluti eyjarinnar er myndaður af öðrum lausum jarðefnum. Því má segja, einfaldlega með því að horfa á jarðfræðikort af Heimaey, að hraun hafi runnið nánast um alla eyjuna og í raun er erfitt að útiloka að ekki geti opnast gosop nánast hvar sem er, enda er Heimaey hluti af megineldstöð í mótun. Þó er hægt að leggja mat á hættu af völdum hrauns með því að áætla tíðni hraunrennislis á tiltekin svæði. Framtíðarhættu má skoða með spám um hraunrennislis í eldgosum framtíðarinnar sem byggist á magni gosefna úr þekktum eldri gosum (Tafla 2).

Fjöldi líkana sem byggjast á tölfræðilegri greiningu eru notuð til þess að samþætta þekkingu á fyrri eldvirkni og spá um möguleg áhrif komandi eldgosa (t.d. Favalli o.fl., 2009a, 2009b; Capello o.fl., 2016; Cordonnier o.fl., 2016; Dietterich o.fl., 2017). Eftir skoðun hraunflæðilíkana var ákveðið að nota líkindafræðilegt líkan, MrLavaLoba (de' Michieli Vitturi & Tarquini, 2018) til þess að herma flæði hrauns úr gosum á Heimaey og endanlega þykkt þeirra. MrLavaLoba var upphaflega þróað til að herma flæði bæði apal- og helluhrauna úr Etnu og á Havái. Vel skilgreint landslag og endanlegt rúmmál hrauns eru undirstöðuatriði þess að hægt sé að keyra líkanið (sjá Viðauka B, Melissa A. Pfeffer o.fl. 2020).

Líkanið metur líkur á stefnu og magni hrauns frá fyrirfram skilgreindum gosopum út frá því landslagi sem hraunið rennur yfir og er vel til þess fallið að herma hraunflæði í aflíðandi landslagi. Líkanið tekur auk þess tillit til breytinga sem verða á landslagi vegna uppbyggingar hrauns (s.s. breytingu á flæði við myndun hraunrásar og við uppbyggingu hraunjaðra). Því hentar líkanið vel til hermunar rennslis hrauns á Heimaey með það markmið að áætla hvar mestar líkur er á hrauni. Líkanið var prófað á gögnum úr Holuhraungosinu 2014–2015 (Tarquini o.fl., 2018), sem myndaði margskonar hraunmyndanir (Pedersen o.fl., 2017), og Eldfellsgosinu 1973. Hraunflæðihermanir líkansins stóðust samanburð við raungögn og líkanið kom því vel út úr þeim prófunum.

Líkanið er ekki hannað til að fylgjast með breytingum hraunrennslis með tíma, hvorki í útbreiðslu né rennslisraða. Að sama skapi tekur það ekki tillit til samspils kviku og sjávar og því gerir MrLavaLoba í raun ráð fyrir að hraun sem rennur í sjó út af Heimaey renni á þurru landi með auknum halla. Líkanið tekur ekki tillit til sjávarkælingar og þeirra breytinga á rennslisáttum sem verða við að hraun flæði í vatn og því má gera ráð fyrir að hraun sem hermd eru utan Heimaeyjar verði þykkari og styttri en líkaniðurstöður sýna. Þess ber þó að geta að þegar flæði hrauns úr Eldfelli var hermt yfir yfirborð þess tíma (fyrir 1973) var módelið stillt á þann hátt að niðurstöður hraunflæðihermunar samræmdust raunverulegri útbreiðslu og þykkt hraunsins (Viðauki B, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Því má segja að líkanið taki í raun óbeint tillit til þeirra breytinga sem verða á rennslisáttum hraunsins þegar kvikan flæðir út í sjó. Þrátt fyrir það hefur verið ákveðið að sýna einungis niðurstöður líkansins á landi. MrLavaLoba líkanið styðst ekki við hitastig, efnasamsetningu eða seigju þeirrar kviku sem látin er flæða úr gosopi og hefur engan innbyggðan tímaþátt (s.s. breytingu á hraða flæðis). Þar af leiðandi hentar líkanið vel til að meta langtímavá og mögulegt fjárhagstjón, eins og unnið er með hér, en illa við gerð viðbragðsáætlana og fyrstu rýmingaáætlana sem unnar eru á tímabilum þegar lítil sem engin virkni er í eldstöðvakerfum. Þó hefur sýnt sig að líkanið má nota til að spá fyrir um rennslisleiðir hrauna nokkra daga fram í tímann með nákvæmri stillingu þess út frá upplýsingum um framgang í stöku gosi en líkanið hefur verið notað í gosi á Fagradalsfjalli sem hófst 19. mars 2021.

Öll hermun var framkvæmd samkvæmt þremur fyrirfram skilgreindum sviðsmyndum sem sýndu lítið, miðlungs og stórt eldgos á Heimaey til að fá innsýn í hegðun og áhrif misstórra hraungosa. Þrjú þekkt gos úr jarðsögu Heimaeyjar voru notuð sem fyrirmyndir sviðsmyndanna, gosið sem myndaði Klifið er fyrirmynd lítils goss, Eldfellsgosið fyrirmynd miðlungs goss og Helgafell fyrirmynd stórs goss (Tafla 3).

Tafla 3. Viðmiðunargildi í fyrirfram skilgreindum sviðsmyndum hraunhermana. Flokkun sviðsmynda er sú sama og á vefsíðunni Íslensk eldfjallavefsjá (www.islenskeldfjoll.is).

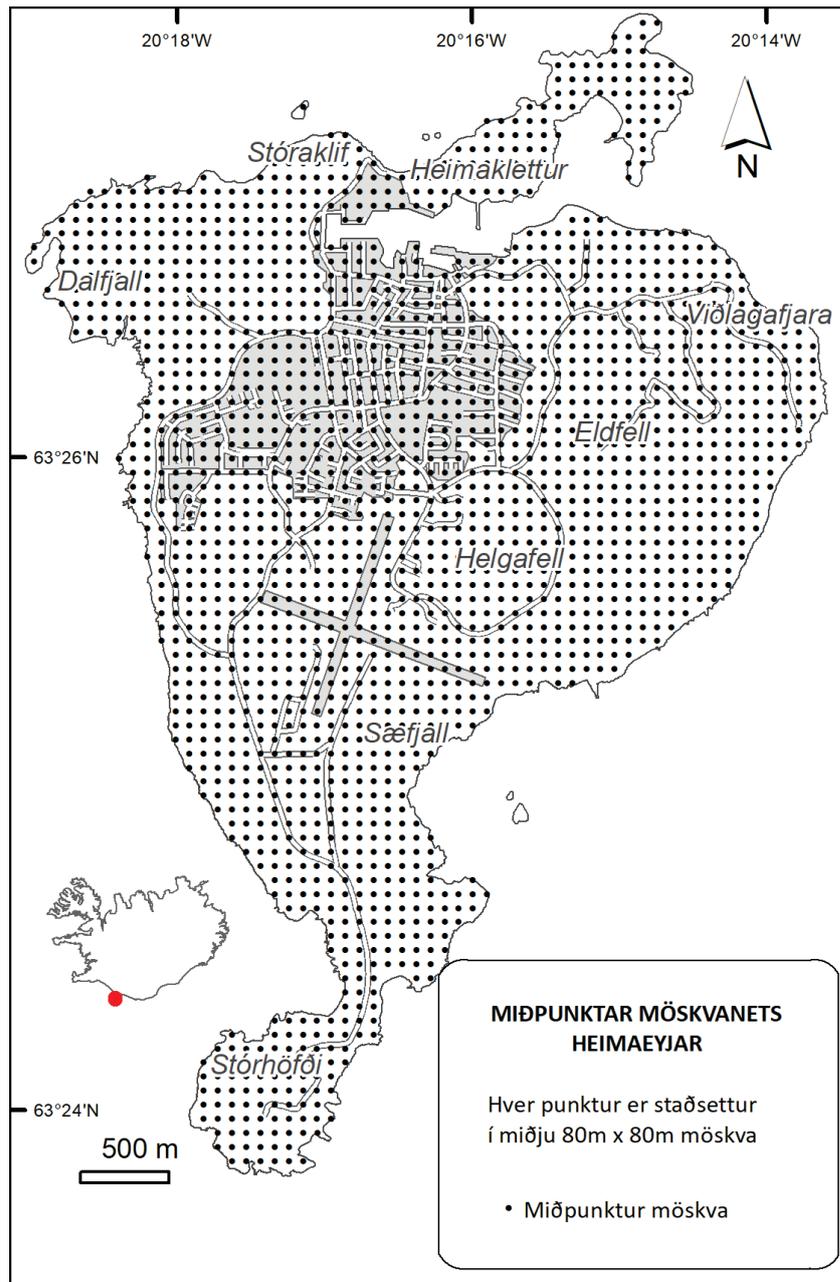
Sviðsmynd	Þykkt [m]			Lengd [km]	Rúmmál [km ³]	Uppgefið rúmmál í Íslensku eldfjallavefsjónni ¹ [km ³]
	Lítill	Meðalstór	Stór			
Lítið gos	6	26	53	0,6	0,01 ²	<0,1
Miðlungs gos	14	47	94	1,6	0,13 ³	0,1–0,5
Stórt gos	10	56	149	3,3	0,65 ⁴	> 0,5

¹Rúmmál gjósku og hrauns (Ármann Höskuldsson 2015).
²Fyrirmynd lítills goss er Klifið (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003).
³Fyrirmynd miðlungs goss er Eldfell 1973 (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 1973).
⁴Fyrirmynd stórs goss er Helgafell 5900 BP (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003).

3.3.1 Skilgreining gosopa og ákvörðun sviðsmynda

Hraunhermun var einungis gerð frá gosopum á Heimaey þar sem MrLavaLoba líkanið vinnur ekki úr þeim fjölmörgu þáttum sem hafa áhrif á kviku þegar gýs neðansjávar eða þeim breytingum sem verða á rennsliseiginleikum þegar hraun flæðir í sjó. Í raun getur neðansjávargos nærri Heimaey byggt sig upp og valdið hraunflæði á Heimaey en sú sviðsmynd er ekki hluti þess hættumats sem hér er kynnt. Þrátt fyrir að líklegast sé að næst þegar gos hefst á Heimaey opnast gossprungu eins og gerðist í Surtseyjar og Eldfellsgosunum var ákveðið að herma einungis hraunflæði frá afmörkuðum gosopum vegna þess að líklegt er að virkni dragist fljótt saman í afmarkaða gíga. Einu áhrifin sem þetta hefur á niðurstöður eru að hermd hraunþykkt við gosop er líklega ofmetin. Eyjunni var skipt upp í 80m x 80m möskva, til að fá nægilega upplausn til að sjá mun á hraunflæði frá gosopum, og gosop voru staðsett í miðju hvers möskva. Þannig voru 2000 möguleg gosop ákvörðuð á Heimaey (Mynd 7). Hraun úr gosum af þremur stærðum (Tafla 3) var hermt úr hverju þeirra með MrLavaLoba líkaninu til að meta hvaða svæði á Heimaey eru útsett fyrir hrauni. Í raun má segja að eitt og sama hraunið (af þremur mismunandi stærðum) sé hermt frá 2000 gosopum. Alls voru keyrðar um 6000 hermanir og tíðni hraunrennslis inn í hvern möskva í öllum hermunum er notuð til að reikna líkindi þess að svæðið verði fyrir áhrifum hrauns. Niðurstöður eru gefnar á líkindakortum sem sýna hvernig vá af völdum eldgosa breytist með stærð gosa og staðsetningu gosopa. Hvorki tímaþáttur né líkur á hvar næst muni gjósa fylgir hraunhermunum.

Út frá niðurstöðum hraunhermana voru þau gosop sem mynda hraunflæði úr misstórum gosum sem geta haft áhrif á hafnarsvæðið, flugvöllinn og miðbæinn landfræðilega afmörkuð.



Mynd 7. Punktar sýna staðsetningu jafndreifðra ímyndaðra gosopa á Heimaey sem notuð eru við hraunhermun. Hver punktur er staðsettur í miðju 80m x 80m flatar og það hversu oft hraun flæðir inn í hvern skilgreindan ferning, að hluta eða öllu leyti, ræður hversu mikið svæði eru útsett fyrir rennsli hrauns.

3.4 Hermun gjóskufalls

Gjóska á við um öll gosefni sem berast í lofti frá gosupptökum. Smæstu gjóskukornin (<2 mm í þvermál) kallast aska en við ákveðin skilyrði getur aska verið í andrúmslofti í daga eða vikur og flust langar vegalengdir. Við notkun líkans til að skoða gjóskudreifingu þarf sérstök inngangsskilyrði fyrir hverja hermun svo hægt sé að auðkenna þá eldgosasviðsmynd sem verið er að herma. Hæð gosmakkar, magn gosefna, kornastærðir og þvermál gosops (svokallaðar

kennistærðir eldgosa) hafa mikil áhrif á gjóskudreifingu og eru því mikilvæg fyrir hermun hennar.

Líkanið VOL-CALPUFF var þróað til þess að herma sértæka eldgosaferla, svo sem hvernig gosmökkur rís og hvernig gosefni finni en 6,4 cm losna úr honum (Barsotti o.fl., 2008). Líkanið notar gögn úr veðurlíkönnum og skilar greiningu á gjóskudreifingu að teknu tilliti til ýmissa veðureiginleika sem geta haft áhrif á gjóskufall s.s. staðbundinna vindhviða og úrkomu. Kennistærðir og veðurskilyrði eldgosa framtíðarinnar eru ekki þekkt en með því að skoða fjölmargar mögulegar sviðsmyndir má sjá hvar mestar líkur eru á gjóskufalli og meta þá óvissu sem fylgir líkanreikningum. VOL-CALPUFF líkanið hefur verið notað til að herma gjóskudreifingu úr þekktum gosum s.s. Eyjafjallajökulsgosinu frá 2010 (Spinetti o.fl., 2013) og Grímsvatnagosinu 2011 (Barsotti, óbirt gögn). Það er einnig notað í GOSVÁr verkefninu Sprengigösa á Íslandi við gerð hættumats vegna gjóskufalls frá Heklu, Kötlu og Örafajökli (Barsotti o.fl., 2020). Líkanið hermir ekki fall gjósku stærra en 6,4 cm, s.s. hraunbombur, þar sem falleiginleikar hennar eru aðrir en finkorna gjósku.

VOL-CALPUFF líkanið var keyrt með veðurgögnum frá endurgreiningu Reiknimiðstöðvar evrópskra veðurstofa (ECMWF), ERA-Interim, fyrir 10 ára tímabil frá 1980–1991 (ECMWF, 2011; Mynd 5) og var stillt til að herma meðalstór gos annars vegar úr Eldfelli (gosstöðvar á Heimaey) og hins vegar úr Surtsey (gosstöðvar fjærri Heimaey). Hver hermun náði yfir sex daga og stuðst var við kennistærðir og kornastærð sem mæld var í Eldfellsgosinu 1973 (Davið Egilson, 1974; Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020, Viðauki C). Sömu kennistærðir voru notaðar við hermun gosa úr bæði Eldfelli og Surtsey, eðlisþyngd gjósku var 533 kg/m^3 (Self o.fl., 1974), þvermál gosops á bilinu 6–50 m, hitastig kviku í gosopi 1028°C og útstreymishraði gosefna á bilinu 90–150 m/s (Tafla 4). Líkanið skilar magni miðað við þurra gjósku reiknað í gjóskumagni sem fellur á ákveðinn flöt (kg/m^2) á tímaeiningu og eðlisþyngd gjósku er svo notuð til að reikna gjóskumagnið yfir í þykkt gjóskulags. Eldgosið í Eldfelli 1973 var notað til að stilla líkanið svo að það gæfi niðurstöður sem allra líkastar raunverulegum mælingum og þar sem gjóskumyndun var breytileg með tíma 1973 var líkanið stillt til að herma gjóskudreifingu úr gosi með ójöfnu flæði gosefna. Til að fá tölfræðilega réttar niðurstöður þurfti að gera um 400 keyrslur á gjóskudreifingu.

Eftir hermun gosa, úr Eldfelli annars vegar og Surtsey hins vegar, var farið yfir hvaða svæði á Heimaey geta verið útsett fyrir gjóskufalli efnis finna en 6,4 cm. Sama verklag var notað og við mat á svæðum sem geta verið útsett fyrir hraunflæði, þ.e. niðurstöður allra gjóskudreifingarhermana voru lagðar saman og tíðni gjóskufalls innan fyrirfram ákveðinna möskva (50m x 50m) sýnir það svæði sem er útsett fyrir gjóskufalli. Líkur þess að þykkt gjóskufalls yrði 0,1–0,5 cm voru sérstaklega skoðaðar en við þá þykkt er talið að hemlunarviðnám í þurri gjósku á malbikuðum vegum verði hættulegt (Blake o.fl., 2017) en nær allir vegir á Heimaey eru malbikaðir. Líkur þess að þungi gjósku á byggingum, annars vegar alveg þurrar (1000 kg/m^3) og hins vegar vatnsmettaðrar (1600 kg/m^3 miðað við 60% holrými), næði 588 kg/m^2 voru einnig skoðaðar en við þá þyngd er áætlað að um helmingur húspaka í bænum gefi sig undan gjóskupunga (sjá Viðauka E, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Burðarþol húsa í Vestmannaeyjum er breytilegt, sum hús þola minna og önnur meira en meðalþungann sem notaður var við líkindaútreikninga. Veður í gjóskufalli og stuttu eftir það stjórnar miklu um það hversu blaut gjóska verður og hefur því áhrif á hversu mikill þungi leggst yfir nærliggjandi svæði. Ekki var metin hættu sem stafar af íkveikjum af völdum hraunbomba í þessum verkhluta.

Tafla 4. Kennistærðir Eldfellsgossins 1973 og niðurstöður hermana. Kennistærðir Eldfellsgossins eru gefnar í efri röð. Neðri röð sýnir annars vegar gildi sem notuð voru í VOL-CALPUFF líkanið til að herma gjóskudreifingu og -fall úr meðalstóru gosi (feitlettrað) og hins vegar niðurstöður líkankeyrslna.

	Mesta hæð gosmakkar [km]	Magn gosefna finni en 6,4 cm [kg]	Eðlisþyngd gjósku [kg/m ³]	Þvermál gosops [m]	Hitastig kviku í gosopi [°C]	Útstreymishraði [m/s]
Eldfellsgos 1973 ¹	2,7 ^A ; 4,8 ^B ; 5,8 ^B ; 6,7 ^B ; 9 ^D	1,1*10 ^{10E}	533 ^F	20 ^G	1055 ^C	92,5 ^F –157 ^G
Hermun meðalstórs goss ²	0,6; 4,7; 7,1; <1	5,2*10 ¹⁰	533	6–50	1028	90–150

Heimildir: A: Óskar J. Sigurðsson, 1973; B: Flosi Hrafn Sigurðsson, 1973; C: Sveinn P. Jakobsson o.fl., 1973; D: Sigurður Þórarinnsson, 1973; E: Williams & Moore 1976; F: Self o.fl., 1974; G: Blackburn o.fl., 1976.

¹Mesta goshæð var mæld 13. mars (2,7 km), 24. janúar (4,8 km), 25. janúar (5,8 km; 6,7 km; 9 km)

²Ármann Höskuldsson (2015) álitur ólíklegt að lítið gos á landi eigi sér stað og gerir ráð fyrir að hæð gosmakkar í meðalstóru slíku gosi verði innan við 4 km og innan við 10 km í stóru gosi.

3.5 Tjónnæmi og efnahagsleg áhrif

Mikilvægir innviðir á Heimaey eru rafmagns- og vatnsveitur, sjúkrahús, fyrirtæki og aðrar byggingar í samfélagsþjónustu, höfnin, vegir, flugvöllurinn og íbúðarhús. Tegund innviða var skilgreind skv. staðli IST120:2012 (Íslenskir staðlar). Staðsetning mikilvægra innviða samfélagsins á Heimaey, tegundir þeirra og verðmæti skv. brunatryggingu, er skráð hjá Þjóðskrá Íslands og tjónnæmi innviða af völdum hrauns og gjóskufalls var áætlað út frá fyrirbyggjandi upplýsingum. Mögulegt efnahagslegt tjón í Heimaey af völdum eldsumbrota er metið út frá niðurstöðum um svæði sem geta verið útsett fyrir hraunflæði og gjóskufalli. Við mat á efnahagslegu tjóni var einnig stuðst við breytilegar líkur á því hvar gosop mun næst opnast skv. þeim aðferðum sem lýst var í kafla 3.2.

Áhættuviðmið fyrir landið hafa ekki verið lagalega skilgreind þó svo formleg vinna við skilgreiningu þeirra sé hafin. Áhættuviðmið er það tjón sem samfélag telur viðunandi miðað við félags-, efnahags-, stjórn mála-, menningar-, tækni- og umhverfislegar aðstæður á hverjum stað (Tafla 1). Því var efnahagslegt tjón innviða í Vestmannaeyjum metið miðað við breytileg áhættuviðmið frá 5–40% án nokkurra mildandi inngripa. Efnahagstjón sem miðar við að viðunandi áhættuviðmið sé 5% tekur því tillit til tjóns á innviðum þar sem líkankeyrslur gefa $\geq 5\%$ líkur á hraunflæði og/eða gjóskufalli sem veldur falli húspaka vegna þyngdarálags. Sé áhættuviðmið sett í 40% er efnahagstjón reiknað á innviðum þar sem líkankeyrslur gefa $\geq 40\%$ líkur á hraunflæði og/eða gjóskufalli sem veldur falli húspaka vegna þyngdarálags. Sýnilegt efnahagslegt tjón verður því minna eftir því sem áhættuviðmið eru skilgreind hærri. Þar sem burðarþol annarra innviða en íbúðarhúsa hefur ekki verið metið er hér einungis tekið tillit til efnahagstjóns íbúðarhúsa við mat tjóns vegna gjóskufalls, en í þeim liggur um 64% fjárhagslegs gildis innviða Heimaeyjar (72 af alls um 110 milljörðum skv. verðgildi nóvembermánaðar 2017) en við útreikninga á efnahagslegu tjóni af völdum hrauns er gert ráð fyrir að hraun geti skaðað alla innviði.

4 Niðurstöður og umræður

Í þessum kafla verður farið yfir niðurstöður verkefnisins. Fyrst er farið yfir nýtt rúmmálsmat á gosefnum úr Eldfellsgosinu 1973 (kafla 4.1) og líkindakort staðsetningar framtíðar gosopa (kafla 4.2). Því næst er farið yfir hraunhermanir (kafla 4.3) og niðurstöður gjóskufallshermunar (kafla 4.4) og að lokum er tjón tengt eldgosavá í Heimaey metið (kafla 4.5). Mikilvægt er að hafa í huga að þó líkön sýni litlar líkur á atburði er ekki ómögulegt að hann muni engu að síður eiga sér stað.

4.1 Nýtt rúmmálsmat Eldfellsgossins 1973

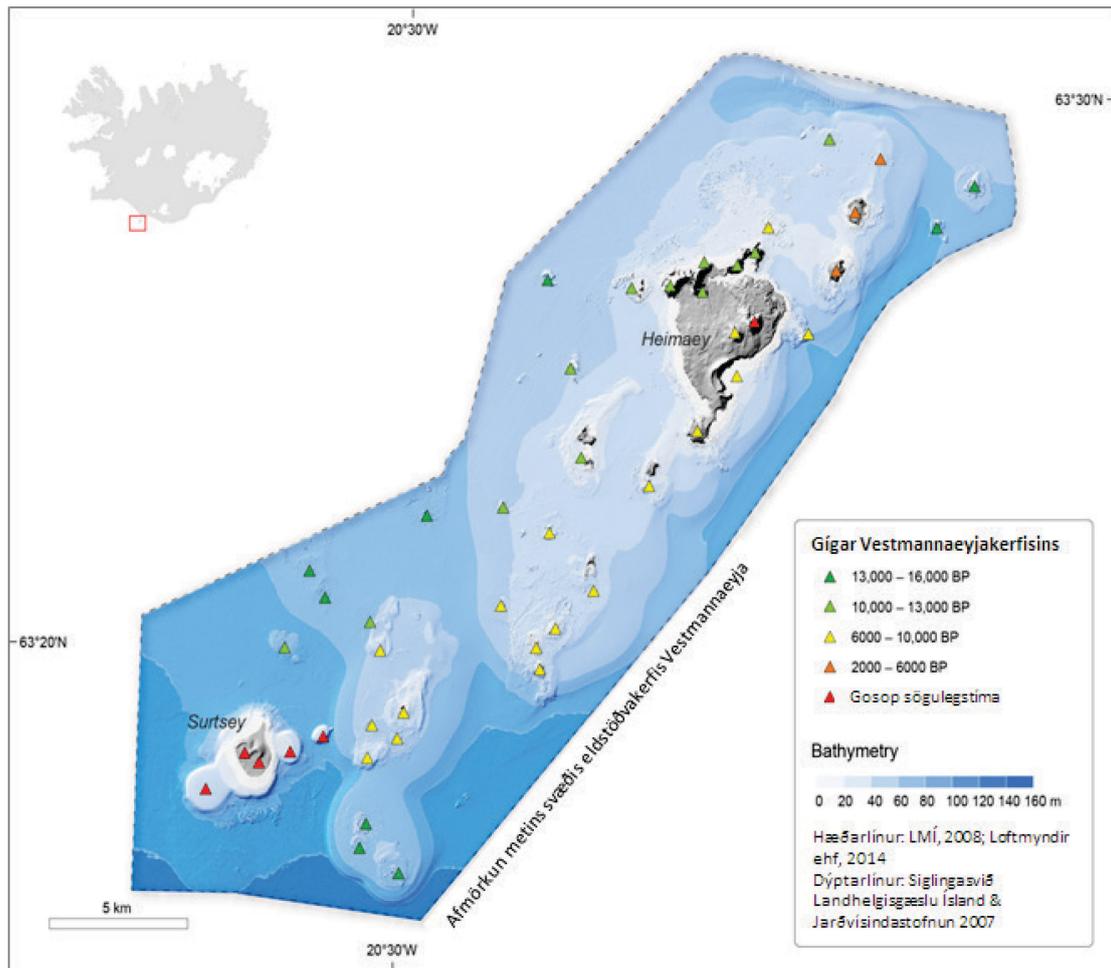
Samanburður nýs hæðarlíkans yfirborðs lands og sjávar við Vestmanneyjar og eldra líkans sýnir að rúmmál hrauns sem myndaðist í Eldfellsgosinu hefur verið vanmetið en samkvæmt nýjum gögnum sem hér er unnið með hafa myndast $0,27 \text{ km}^3$ af hrauni í gosinu eða $0,24 \text{ km}^3$ reiknað sem fast berg sé holrými áætlað 10% eins og áætlað var í Helgafellshrauninu (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003). Fyrri rúmmálsáætlanir gáfu $0,13 \text{ km}^3$ (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 1973) og $0,23 \text{ km}^3$ (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003). Tölurnar sýna hversu mikil óvissa fylgir rúmmálsmati hrauna (sjá töflu 2).

4.2 Staðsetning framtíðar gosopa

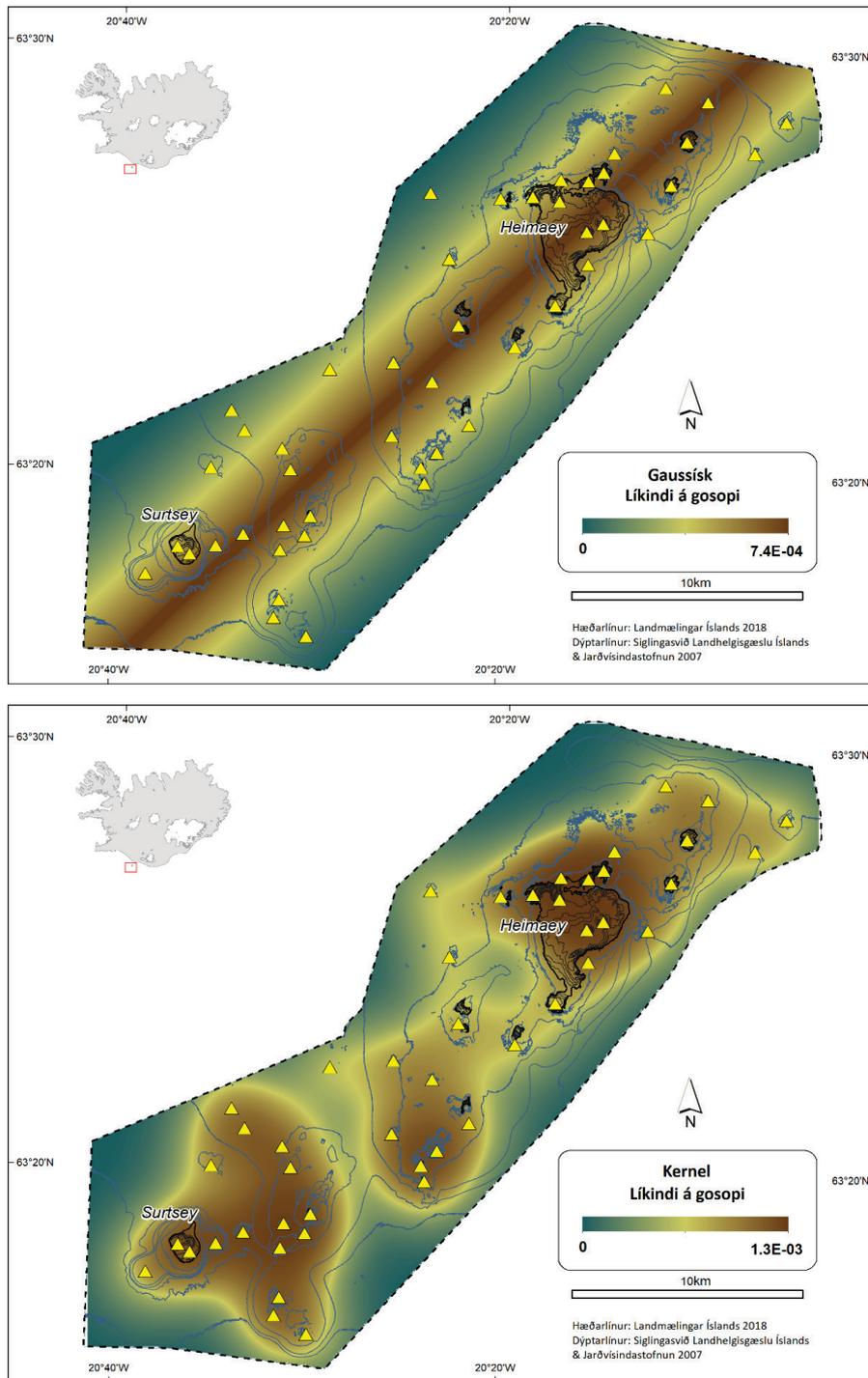
Talning landforma sem eru mynduð í eldsumbrotum út frá nýju hæðarlíkani af yfirborði lands og sjávarbotns við Vestmannaeyjar gaf 47 gosop innan skilgreinds svæðis (Mynd 8) en vitanlega er mögulegt að eldri gosop hafi rofist í burtu eða séu hulin yngri gosopum og sjáist því ekki.

Tvær tölfræðilegar aðferðir voru notaðar til að meta líkur á hvar gosop geta opnast innan Vestmannaeyjakerfisins út frá staðsetningum þekktra gosopa, Gaussísk og Kernel líkindi og að auki var öllum gosopum gefið jafnt vægi (sjá kafla 3.2). Í Gaussískum líkindum skilgreinir ríkjandi stefna eldstöðvakerfis Vestmannaeyja bestu línu í gegnum þekkt gosop og staðalfrávik frá þekktum gosopum (Mynd 8) er 2,5 km. Mestar líkur eru því á að ný gosop opnist á eða við bestu línuna og líkur á opnun gosops minnka eftir því sem fjær dregur (Mynd 9, efri). Þetta samrýmist þeirri athugun að eyjar og sker sem standa hærra en yfirborð sjávar, eru nálægt eða á bestu línunni en hafa ber í huga að eldri gosop geta hafa rofist niður og/eða eru líklega hulin gosopum yngri gosa (sjá Viðauka D, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Þó svo gossprungur hafi opnast samsíða bestu línunni (s.s. Elliðaey, Bjarnarey og Surtsey; Sveinn P. Jakobsson, 1968) hafa einnig opnast þrepstiga gossprungur skáhallt á línuna (s.s. Surtur II og gossprungur sem mynduðu Norðurkletta; Sveinn P. Jakobsson, 1968). Við mat á líkum þess hvar gosop geta opnast með Gaussísku aðferðinni var hvorki tekið tillit til aukinna líka á gosum á þessum þrepstiga sprungum né þess möguleika að Heimaey sé að þróast yfir í megineldstöð og kalli því á aukna eldvirkni (Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003).

Í Kernal líkindum er staðsetning þekktra gosopa grunnur líkindaútreikninga á opnun nýrra gosopa (sjá kafla 3.2) og lögun normaldreifingar umhverfis þau er reiknuð út frá jöfnunarstuðlinum 1,5 sem var stilltur sjónrænt til að fá sem besta upplausn í líkanið að teknu tilliti til þekktra gosopa. Með þessari aðferð afmarkast þrjú svæði innan Vestmannaeyjakerfisins þar sem meiri líkur er á að gosop opnist í framtíðinni, á Heimaey og suðaustur af henni, á svæði frá Hellisey til Súlnaskers og norðvestur af því og á svæði umhverfis Surtsey og suðaustur af henni (Mynd 9, neðri).



Mynd 8. Dýptarmælingar og yfirborðslögun lands innan eldstöðvakerfis Vestmannaeyja. Greinanleg gosop eru merkt með þríhyrningi og gróflega metinn aldur þeirra tilgreindur með lit (sjá frekari umfjöllun um skilgreiningu gosopa í kafla 3.1). Gögn um dýptarmælingar og yfirborðslögun eru frá Íslenskum orkurannsóknum (2008), og Siglingasviði Landhelgisgæslu Íslands og Jarðvísindastofnun Háskólans (2007). Hæðarlinur koma frá Landmælingum Íslands (2008) og Loftmyndum ehf (2014).



Mynd 9. Gróft mat á likum á opnun gosopa á Vestmannaeyjakerfinu; heildarlíkur á opnun gosops innan kerfisins eru 100%. Efri: Niðurstöður aðferðar sem byggir á ríkjandi stefnu gossprungna og dreifingu gosopa umhverfis bestu línu (frekari umfjöllun sjá kafla 3.2 og 4.2), nefnt Gaussíks líkindi eftir tölfræðilegri úrvinnslu. Neðri: Niðurstöður úr líkani Martin o.fl. (2004) sem tekur einungis tillit til staðsetningar þekktra gosopa þ.e. normaldreifingu umhverfis einstök þekkt gosop, nefnt Kernel líkindi eftir tölfræðilegri úrvinnslu. Líkanið sýnir þrjú afmörkuð svæði innan Vestmannaeyjakerfisins þar sem meiri líkur eru á að gosop opnast í framtíðinni (frekari umfjöllun sjá kafla 3.2 og 4.2). Hæðarlinur frá Landmælingum Íslands, 2018; dýptarlinur frá Siglingasviði Landhelgisgæslu Íslands og Jarðvísindastofnun Háskólans, 2007.

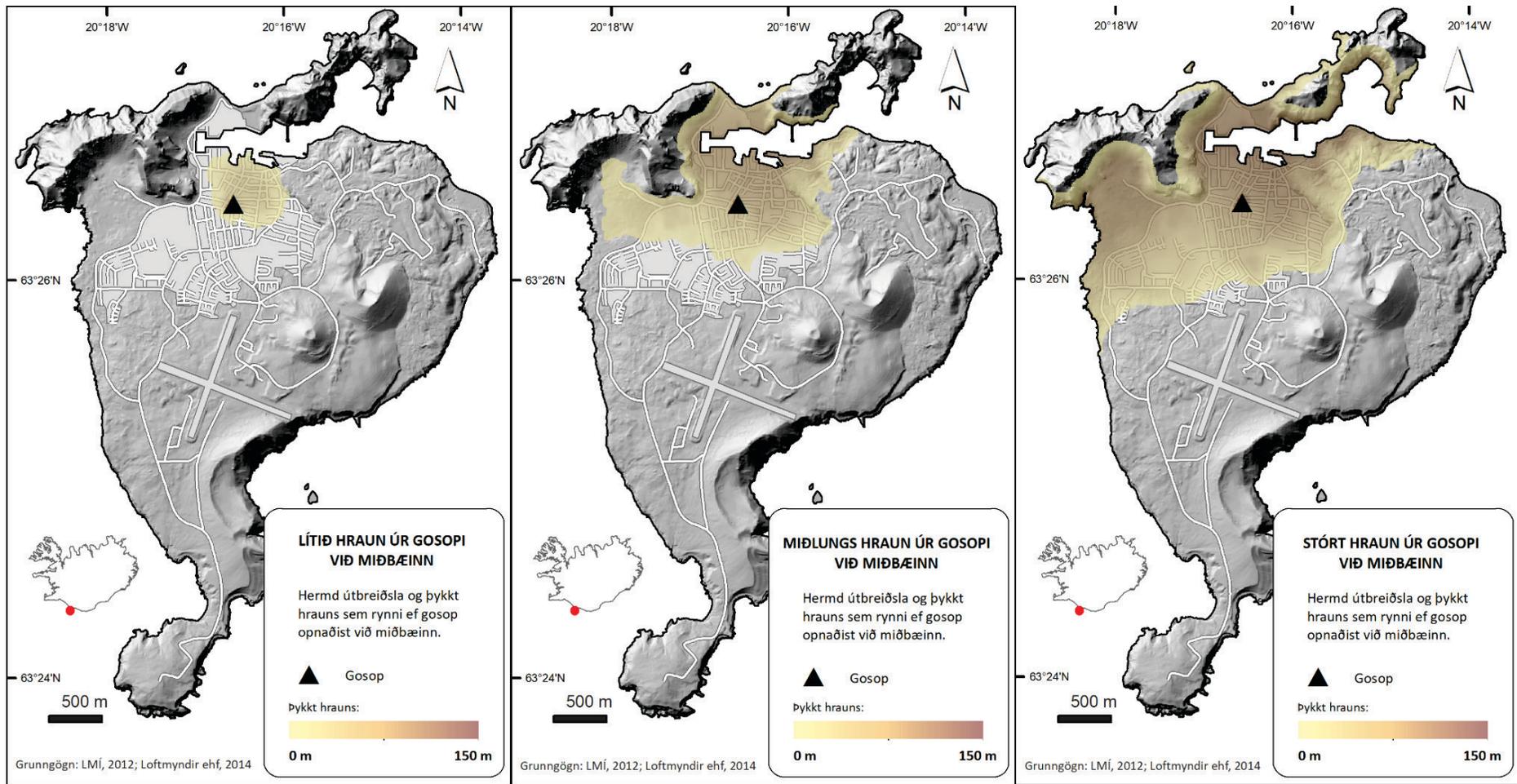
Bæði Gaussian og Kernel líkönin sýna trúverðuga spá um hvar næst opnist gosop. Ekki er hægt að segja til um hvort líkanið er nákvæmara þannig að bæði líkönin eru notuð við útreikninga á mögulegum áhrifum af framtíðar gosi. Að auki eru möguleg áhrif reiknuð án þess að gefa gosopum mismunandi vægi. Samkvæmt Gaussíska líkaninu (normaldreifingu umhverfis bestu línu; Mynd 9 efri) eru 5% líkur á að næsta gos á Vestmannaeyjakerfinu muni eiga sér stað á Heimaey en sé stuðst við Kernel módelið (Martin o.fl. 2004; Mynd 9 neðri) hækka líkurnar á gosi í Heimaey í 8%. Þar sem Heimaey er 3% af Vestmannaeyjakerfinu (eins og það er skilgreint hér) eru 3% líkur á að næst opnist gosop á eyjunni sé öllu kerfinu gefnar jafnar líkur. Því má segja að 3–8% líkur séu á að næsta gos á Vestmannaeyjakerfinu verði á Heimaey en hér hefur ekki verið tekið tillit til þess að hugsanlega er megineldstöð í þróun umhverfis Heimaey (Þorvaldur Þórðarson & Guðrún Larsen, 2007) sem myndi auka líkur á gosum þar. Að sama skapi má segja að 92–97% líkur séu á að næst þegar gýs á Vestmannaeyjakerfinu muni ekki gjósa á Heimaey. Engin tilraun er gerð til að meta hvenær næst muni gjósa á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja en mikilvægt er að fá betri hugmynd um aldur gosopa til að vinna slíka tölfræði (sjá umræðu í kafla 3.2).

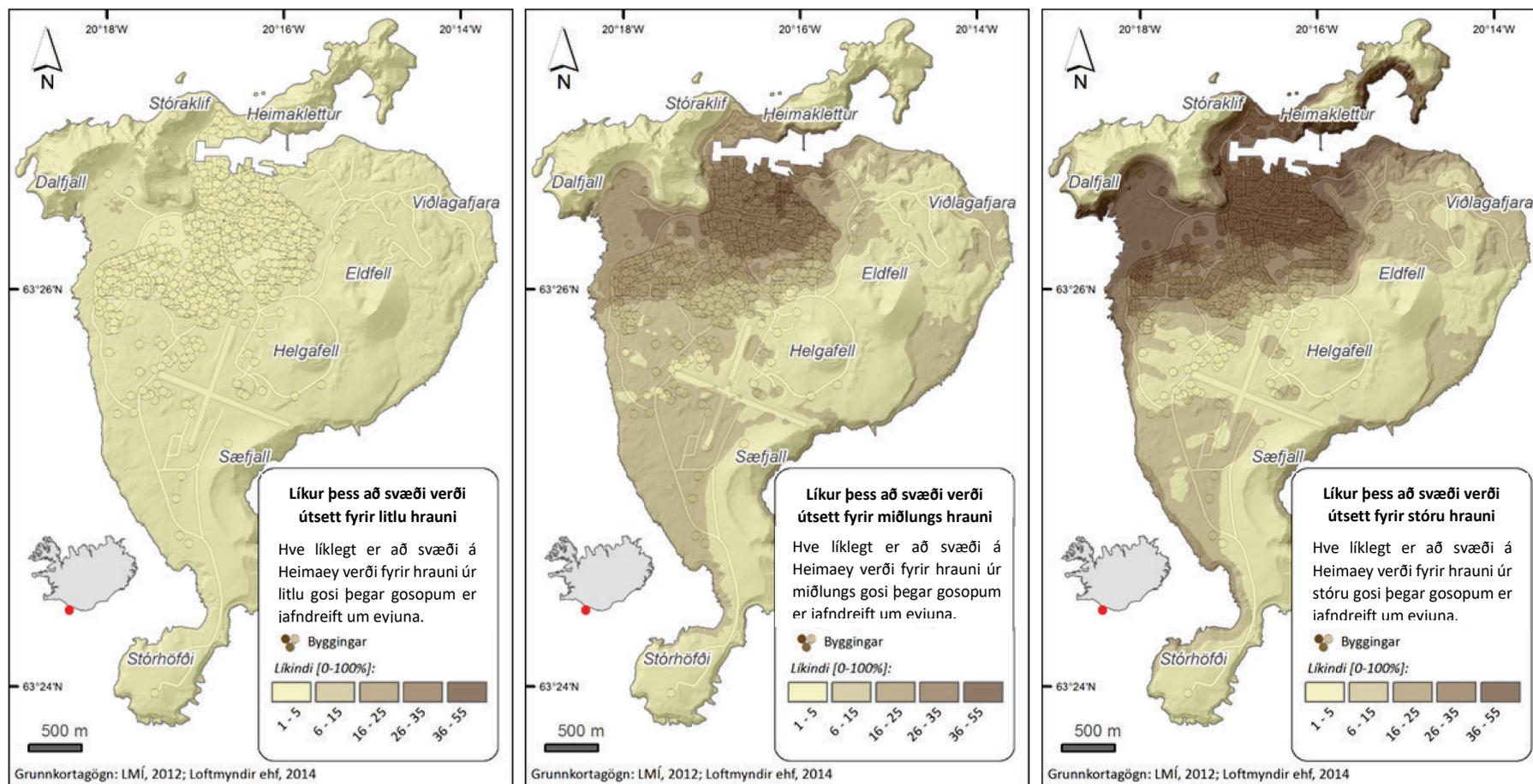
4.3 Hraunrennsli á Heimaey

Hermun hrauns með MrLavaLoba var einungis keyrð úr gosopum á Heimaey, engar hermanir voru gerðar úr gosopum annars staðar á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja. Niðurstöður sem hér eru sýndar byggja á alls um 6000 hraunhermunum úr þremur stærðum gosa (sjá töflu 3) frá ímynduðum jafndreifðum gosopum á Heimaey (alls 2000 talsins; sjá kafla 3.3) án nokkurs líkindamats á hvar á Heimaey gosop opnast næst. Niðurstöður sýna einungis útbreiðslu hrauna á landi þar sem MrLavaLoba er ekki hannað til að herma breytilega rennslishætti þegar hraun rennur í sjó. Mynd 10 er dæmi um staka sviðsmynd úr MrLavaLoba en þar má sjá hraunhermun frá gosopi sem opnast í miðbæ Vestmannaeyjabæjar. Kæmi til þess myndi jafnvel lítið hraun valda töluverðu tjóni, miðlungs hraun færi yfir stærstan hluta bæjarins og stórt hraun myndi litlu vægja.

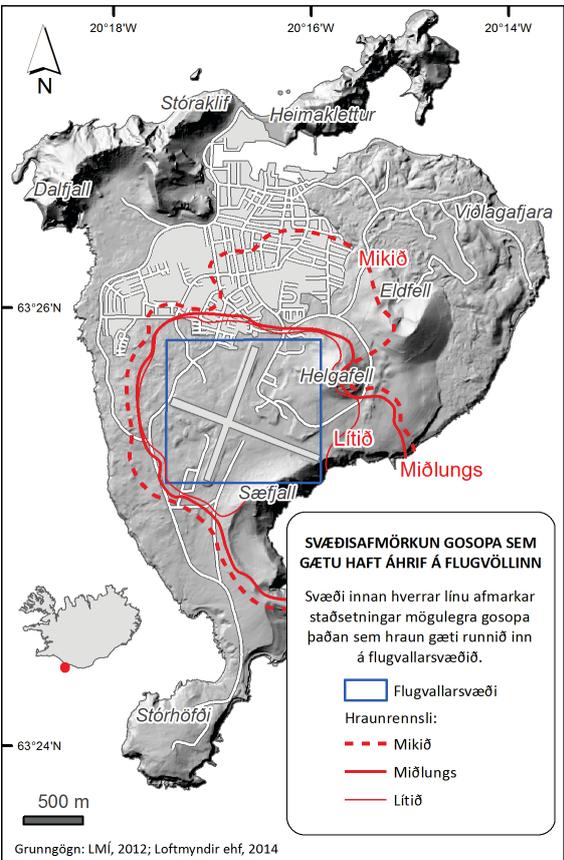
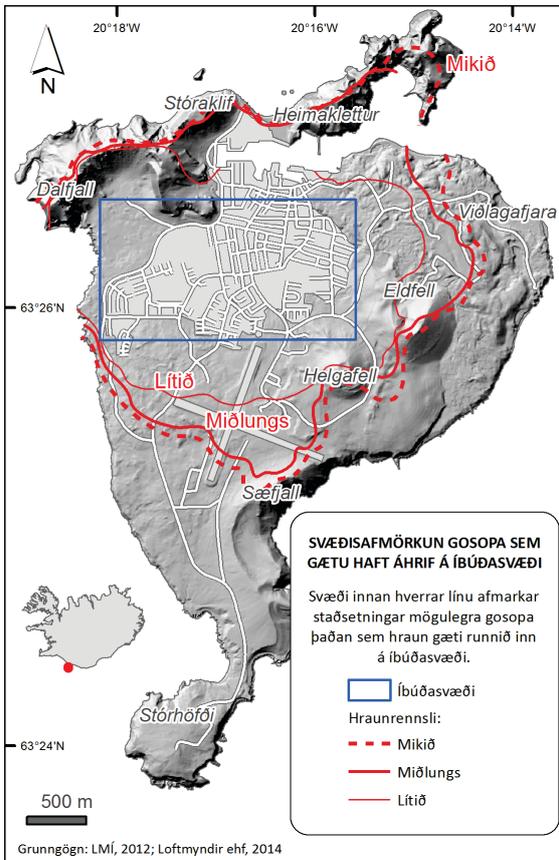
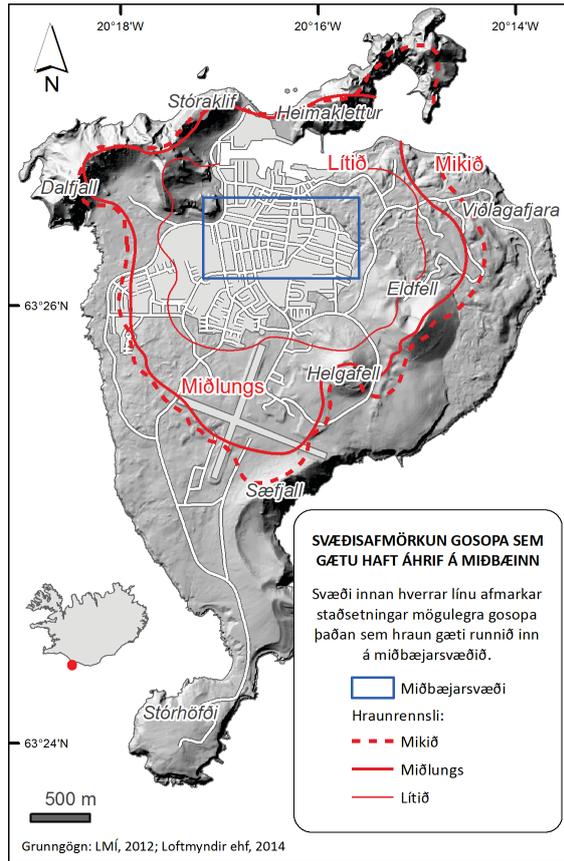
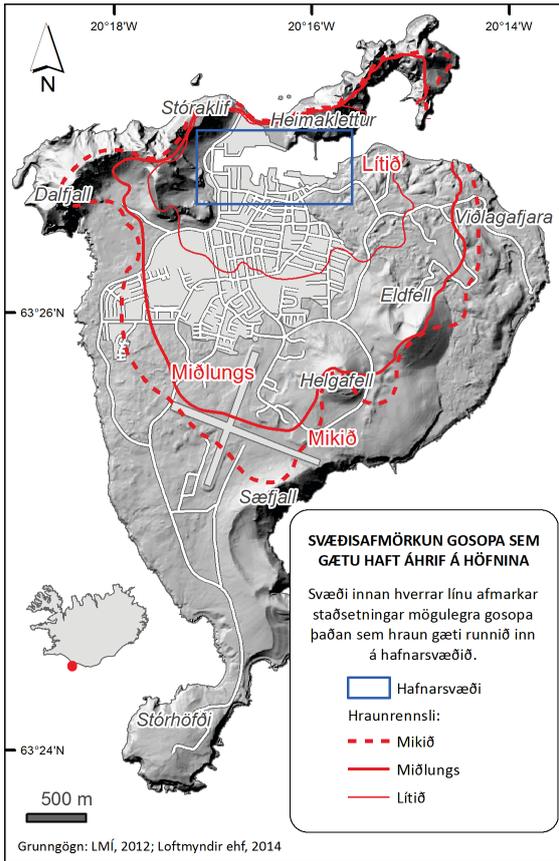
Með því að leggja saman niðurstöður allra hraunhermana og skoða tíðni hraunflæðis inn í hvern skilgreindan möskva fást líkur þess að hraun renni inn á svæðin, eða hvaða svæði eru útsett fyrir hraunrennsli, burt séð frá því hvar gosop er staðsett (Mynd 11). Með stækkandi gosi aukast líkur á að svæði verði fyrir hrauni um alla Heimaey. Án þess að meta á nokkurn hátt hvar mestar líkur eru á að næst opnist gosop á Heimaey sést að jafnar líkur, 1–5%, eru á að öll Heimaey verði fyrir áhrifum af völdum lítills hraungoss. Með stækkandi gosi aukast líkur á að Vestmannaeyjabær og hafnarsvæðið verði fyrir hraunflæði en 26–55% líkur eru á að miðbær Vestmannaeyjabæjar verði fyrir áhrifum af hraunflæði í miðlungsstóru hraungosi og verði gos sem myndar stórt hraun stækkar svæðið innan bæjarmarka sem verður fyrir áhrifum hrauns.

Mikilvægustu svæði Heimaeyjar m.t.t. innviða er þéttbýlið, höfnin og flugvöllurinn. Út frá niðurstöðum MrLavaLoba líkansins voru þau gosop sem mynda lítil, miðlungs og stór hraun sem hafa áhrif á þessi svæði landfræðilega afmörkuð (Mynd 12). Mjög gróflega má segja að höfnin og þéttbýlið verður fyrir áhrifum frá stórum gosum ef gosop opnast í innan við 1,2 km rás frá Landakirkju (nákvæma afmörkun má sjá á mynd 12). Staðsetning gosopa sem mynda stór hraun sem hafa áhrif á flugvöllinn eru hins vegar staðsett í 900–1800 m rás frá miðju flugvallarins (sjá nákvæma afmörkun á mynd 12). Af ofangreindu má sjá að þéttbýlið og svæðið í kringum höfnina er mest útsetta svæði Heimaeyjar m.t.t. hrauns og þar er tjónnæmi einnig mest. Með stækkandi hraungosi aukast líkur á að stærra svæði verði fyrir áhrifum hrauns. Suðausturhluti eyjarinnar er í minnstri hættu.





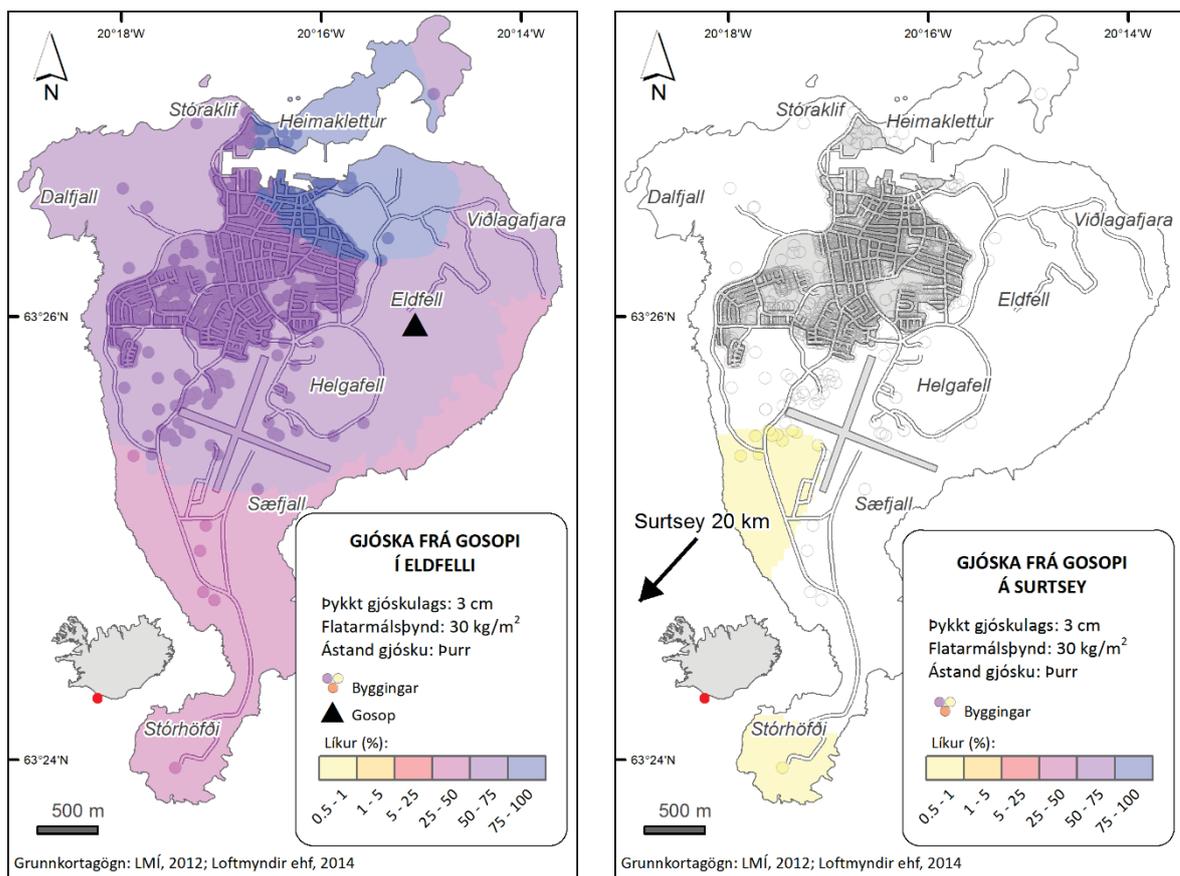
Mynd 11. Líkindakort þess að svæði á Heimaey verði fyrir hrauni úr litlu (vinstri), miðlungs (miðja) og stóru (hægri) gosi með upptök á Heimaey (sjá töflu 3). Niðurstöður hraunhermana sýna að norðurhluti Heimaeyjar er mest útsettur fyrir hraunum úr miðlungs og stórum hraungosum. Ef lítið hraungos á sér stað úr einhverju þeirra 2000 gosopa sem skilgreind voru (sjá mynd 7) eru 1–5% líkur á að hraun fari inn í miðbæ Vestmannaeyjabæjar. Ef hraungos er miðlungs stórt aukast líkur upp í 26–35% og þær verða mestar 36–55% á afmörkuðu svæði í stóru gosi.



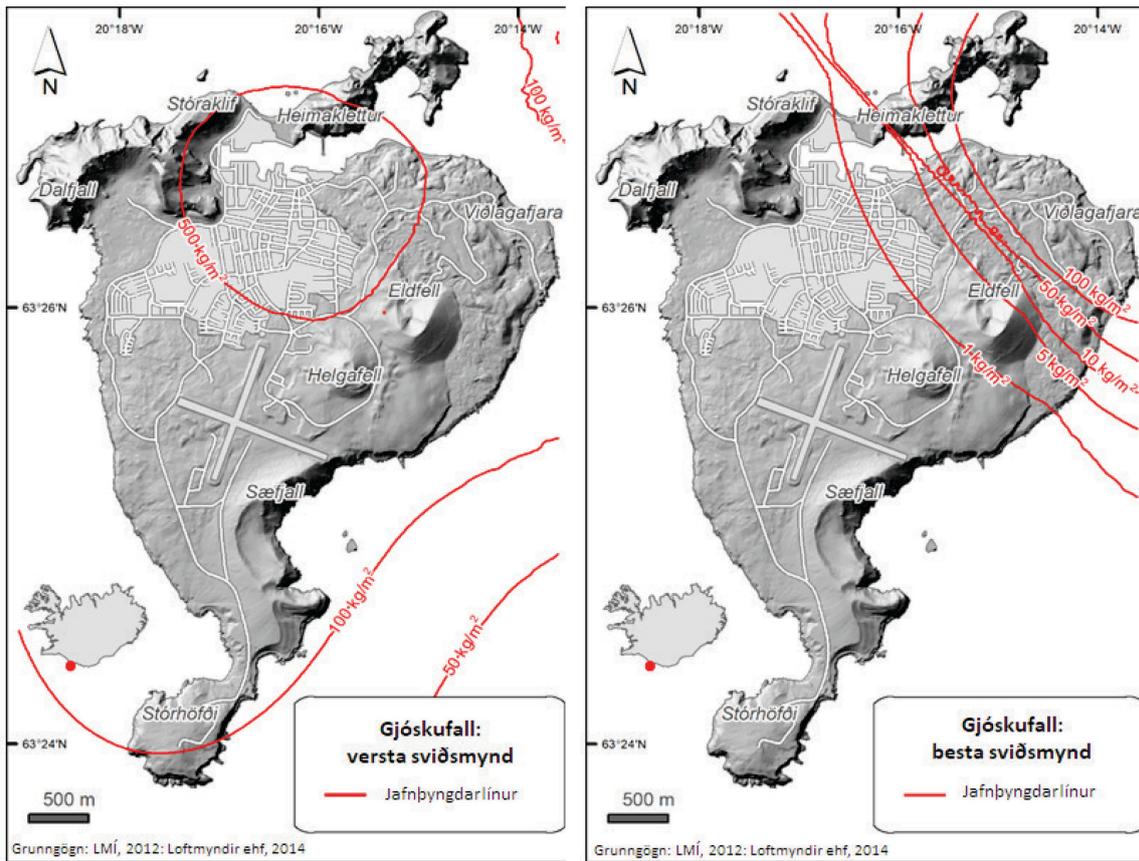
Mynd 12. Landfræðileg afmörkun gosopa (rauðar línur) sem mynda hraun sem getur haft áhrif á mismunandi svæði (afmörkuð með bláum kassa). Fjögur svæði voru skoðuð: Hafnarsvæði (uppi til vinstri), miðbær (uppi til hægri), þéttbýli (niðri til vinstri) og flugvallarsvæði (niðri til hægri). Tegund rauðrar línu táknar fyrirfram ákveðna gosstærð (sjá töflu 3). Ef hraungos hefst á gosopi sem staðsett er utan rauðra lína benda hraunhermanir til að hraun renni ekki inn á afmörkuð svæði.

4.4 Gjóskufall á innviði í Heimaey

Gjóska og gjóskufall geta haft alvarleg áhrif á grunngerð samfélags og daglega þjónustu sem samfélagið reidir sig á bæði félagslega og efnahagslega. Hér er athygli beint að vá sem stafar af gjóskufalli og getur valdið mikilli röskun meðal íbúa staðarins. Ekki er fjallað um keðjuverkun þar sem tjón hefur áhrif á einn þátt samfélagsins sem truflar aðra þætti þess og veldur því að meiri upplausn getur skapast.

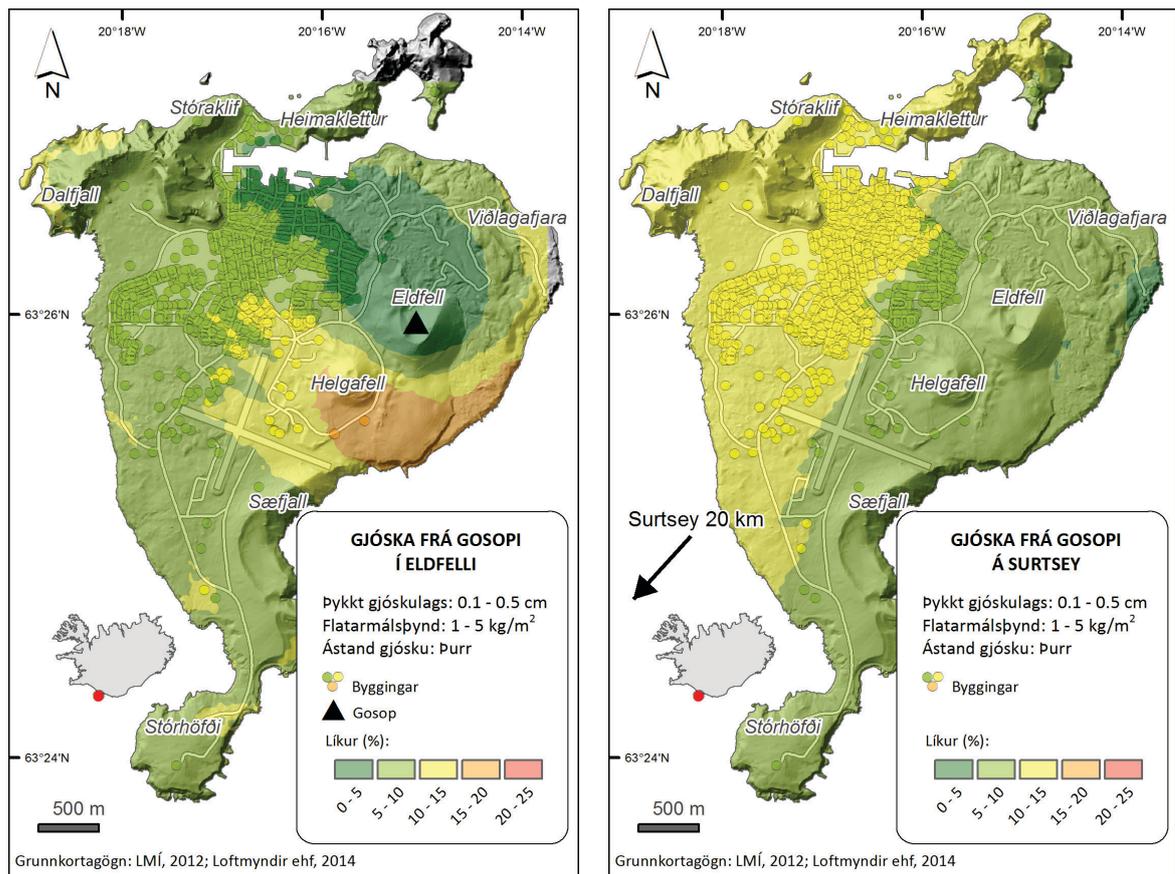


Mynd 13. Svæði á Heimaey sem eru útsett fyrir gjóskufalli (gosefnis finna en 6,4 cm) úr sex daga löngu meðalstóru gosi í Eldfelli (vinstra megin) og Surtsey (hægra megin). Likur þess að 30 kg/m² af gjósku leggist yfir Heimaey eru reiknaðar (samsvarandi þriggja cm þykku gjóskulagi sé reiknað með eðlisþyngd gjósku 1000 kg/m³). VOLCALPUFF gjóskudreifingarlíkanið er notað við útreikninga og notuð eru veðurgögn frá tíu ára tímabili 1980–1991 (sjá texta).



Mynd 14. Þær sviðsmyndir úr hópi um 400 hermanna sem sýna annars vegar verstu mögulegu aðstæður m.t.t. gjósukufalls í miðbæ Vestmannaeyjabæjar (vinstra megin) og hins vegar bestu aðstæður (hægra megin). Sé miðað við eðlisþyngd gjósku 1000 kg/m^3 er 500 kg/m^2 samsvarandi 50 cm þykkri gjósku. Í báðum tilfellum er hermt sex daga langt meðalstórt gos með upptök í Eldfelli en sviðsmyndirnar sýna mismunandi veðuráðstæður (sjá texta).

Eins og fram kemur í kafla 3.4 notar VOL-CALPUFF reiknilíkanið veðurgögn yfir tíu ára tímabil, þ.e. 1980–1991. Af u.þ.b. 400 hermum gjóskudreifingar úr gosopi á Eldfelli mynduðust verstu aðstæður m.t.t. gjósukufalls á Vestmannaeyjabæ við veðurfarsaðstæður sem áttu sér stað á sex daga tímabili frá og með 2. september 1984. Þá blés vindur úr norðri og austri og austlægar áttir voru ríkjandi allt upp í 15 km hæð. Við sambærilegar aðstæður leggst skv. niðurstöðum hermanna um 500 kg/m^2 af gjósku yfir miðbæinn og hafnarsvæðið (Mynd 14, t.v.) sem samsvarar um 50 cm þykku gjóskulagi (m.v. eðlisþyngd gjósku 1000 kg/m^3). Að sama skapi hófust bestu mögulegu hermdu veðurfarsaðstæður 9. janúar 1984 en þá blésu vindar ofan 5 km hæðar úr vestri og suðvestri og gjósukufall innan bæjarmarka Vestmannaeyjabæjar var innan við 5 kg/m^2 sem samsvarar minna en 0,5 cm þykkri gjósku (Mynd 14 hægra megin). Vindstyrkur við verstu aðstæður m.t.t. gjósukufalls á Vestmannaeyjabæ var mun lægri (10 m/s í 5 km hæð) en við bestu aðstæður (30 m/s í 5 km hæð). Vindátt og vindstyrkur hafa því mikil áhrif á gjósukufall og afleiðingar þess þegar gosupptök eru eins nærri byggð og raunin er á Heimaey. Í hæglatís veðri getur gjósukufall í nágrenni eldstupptaka orðið mikið en séu vindátt og vindstyrkur hagstæð á meðan gosi stendur getur bærinn sloppið við teljandi gjósukufall.

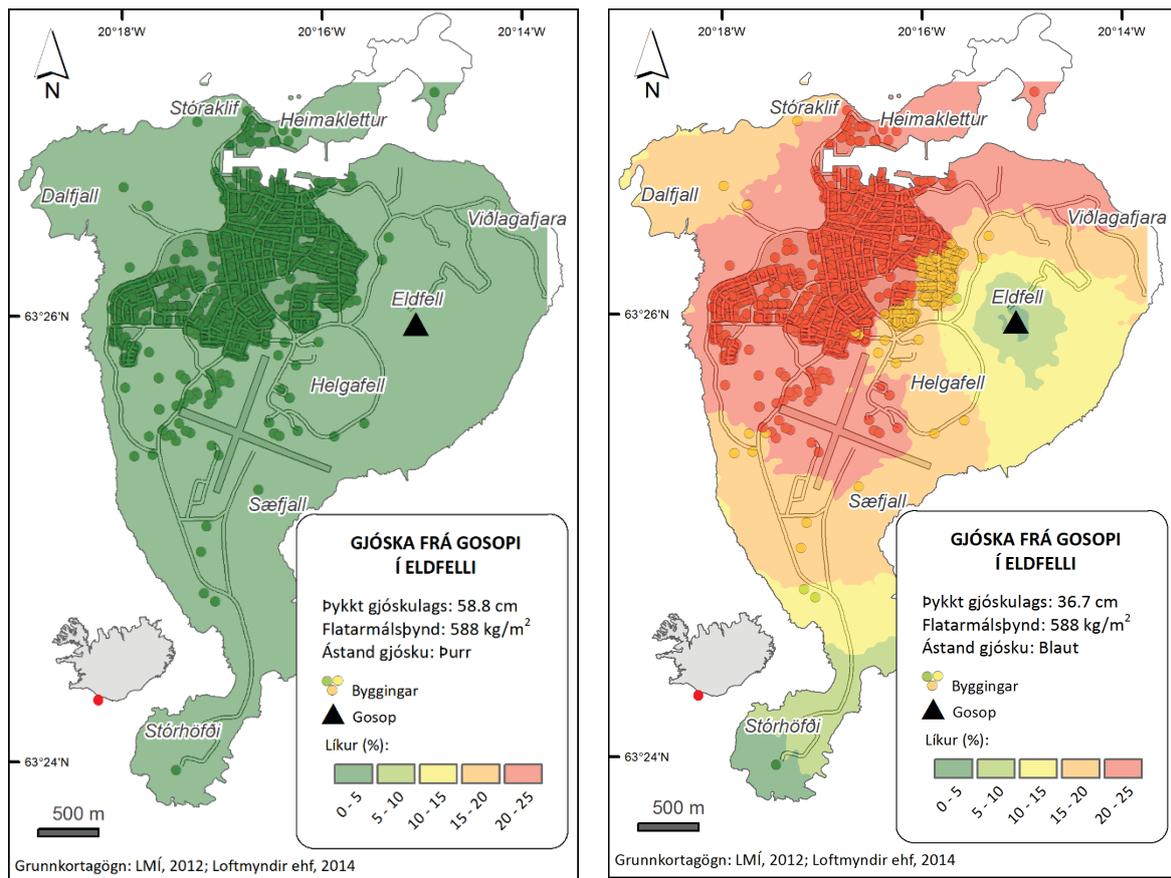


Mynd 15. Líkur á að þurr gjóska (finni en 6,4 cm) úr meðalstóru sex daga gosi í Eldfelli (vinstra megin) og Surtsey (hægra megin) nái 0,1–0,5 cm þykkt á Heimaey (eðlisþynd gjósku 1000 kg/m³). Sú þykkt er talin skapa hættuástand vegna hemlunarviðnáms á malbikuðum vegum (sjá texta). Byggingar eru sýndar með sterkari litum.

Hæð gosmakkar hefur töluverð áhrif á hvert gjóska dreifist því vindáttir og vindstyrkur breytast með hæð (Mynd 5 uppi til vinstri) en sky. úttekt á þeim 10 ára (1980–1991) veðurgögnum sem hér eru notuð (ECMWF, 2011) má sjá að í um 100 m hæð yfir sjávarmáli (1000 hPa) er vindstyrkur lægri en í meiri hæð og ríkjandi vindáttir eru úr austri. Í um 1500 m hæð (850 hPa) eru ríkjandi vindáttir úr SSV og í um 9000 m hæð (300 hPa) eru vindáttir enn vestlægari (sjá mynd 5 uppi til vinstri). Vindstyrkur eykst með hæð. Sé einungis horft á þessa þætti er því líklegra að vindur beri gjóska með upptök í Eldfelli frá Heimaey þegar gosmökkur er hærri en ef gosmökkur er lægri aukast líkur á að vindur beri gjóska yfir Vestmannaeyjabæ.

4.4.1 Vegir og flugbrautir

Gjóska á vegum og flugbrautum getur dregið úr núningsmótstöðu, gert vegamerkingar óskýrar, stíflað loftinntakssíur í flugvélum og takmarkað skyggni. Tilraunir sýna að gjóskuþykkt, raki, samsetning og kornastærðadreifing hefur áhrif á hemlunarviðnám. Þegar þurr gjóskulag liggur á malbikuðum vegum verður það hættulegt við 0,1–0,5 cm þykkt (Blake o.fl., 2017). Áhrifin á hemlunarviðnám á malbikuðum flugbrautum eru talin minni en á vegum, en gjóska skapar einnig hættu á flugvöllum vegna verra skyggis, truflana á rafmagns- og samskiptakerfi, röskunar flugvallarþjónustu og tjóns á mannvirkjum og flugvélum (Guffanti o.fl., 2009).



Mynd 16. Líkur á að þyngd þurrar gjósku (vinstra megin) og vatnsmettaðrar gjósku (miðað við 60% holrými; hægra megin), úr meðalstóru sex daga gosi í Eldfelli nái 588 kg/m² en það er burðarþol um helmingis húspaka í Vestmannaeyjum (sjá kafla 3.4). Byggingar eru sýndar með sterkari litum.

Ef gos hefst í Eldfelli eru 0–25% líkur á að 0,1–0,5 cm þykkt gjóskulag (efni finna en 6,4 cm) falli á Heimaey. Líkurnar eru mestar 20–25% sunnan og suðaustan við Helgafell (Mynd 15 vinstra megin) en þar liggur einungis einn vegur, hluti hringvegjar umhverfis Helgafell. Líkur á 0,1–0,5 cm þykku gjóskulagi (efni finna en 6,4 cm) á Heimaey úr gosi í Surtsey eru 0–15%, mestar vestan megin á eyjunni og minnstar 0–5% alveg austast (Mynd 15 hægra megin). Á flestum vegum og flugbrautunum á Heimaey eru því meira en 5% líkur á að gjóska nái þeirri þykkt sem hefur áhrif á hendlunarvegalegd hvort sem gýs í Eldfelli eða í Surtsey (Mynd 15). Þetta bendir til þess að gera þurfi ráð fyrir skertri hendlunarvegalegd á vegum á Heimaey í öllum gosum í Vestmannaeyjakerfinu, óháð staðsetningu gosops. Slík hætta gæti einnig skapast vegna gosa annarra eldstöðva á landi (s.s. Kötlu eða Heklu) en líkur á því hafa ekki verið metnar.

4.4.2 Burðarþol húspaka

Búast má við að helmingur þaka íbúðarhúsa á Heimaey hrynji leggist gjóska sem nær 588 kg/m² á húspök (sjá kafla 3.4). Á mynd 16 eru birtar líkur á því að þyngd gjósku, annars vegar þurrar (vinstra megin), og hins vegar fullkomlega vatnsmettaðrar (hægra megin), fari yfir þessi mörk í meðalstóru sex daga gosi í Eldfelli. Líkur á að þyngd þurrar gjósku fari yfir þessi hættumörk

eru afar litlar eða 0–5% um alla Heimaey (Mynd 16 t.v.). Hins vegar eykst þungi þegar gjóska blotnar og þá getur þyngd hennar og regnvatns skapað hættu á að gjóska sligi mannvirki. Yfir 5% líkur eru á því að vatnsmettuð gjóska stofni mannvirkjum á Heimaey í hættu (Mynd 16, hægra megin) en mestar eru líkurnar norðvestan til á eyinni. Meðalstórt gos í Surtsey virðist samkvæmt líkaninu ekki stofna íbúðarhúsum í hættu vegna þyngdarálags. Við hönnun mannvirkja er mikilvægt að muna að burðarþol þarf að standast álag frá rakamettaðri gjósku.

4.5 Tjónnæmi og efnahagsleg áhrif á Heimaey

Tegund eldsumbrota sem eiga sér stað hafa mikil áhrif á hve mikið efnahagslegt tjón verður af völdum eldgoss (sjá Viðauka F, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Gert er ráð fyrir að hraun valdi gjöreyðingu á innviðum sem þau renna að eða yfir en gjóskufall er aðeins talið ógna íbúðarhúsum ef þungi þess fer yfir ákveðin mörk (588 kg/m², sjá kafla 3.4 og Viðauka E, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Við mat á efnahagslegu tjóni voru notaðar þrjár aðferðir við mat á líkum á hvar gosop muni opnast á Heimaey og voru líkurnar metnar á bilinu 3–8% eftir því hvaða aðferð var notuð (kafla 4.2).

Í upphafi árs 2021, hefur ekki verið skilgreint eða tekin ákvörðun um hver ásættanleg áhætta er hér á landi vegna eldgosa, né hvernig hún skal reiknuð og til hvaða þátta hún tekur til. Í þessari skýrslu voru skoðuð mismunandi viðmið til að átta sig á hver efnahagsáhrif geta verið. Séu áhættuviðmið lág (t.d. 5%) er andvirði allra innviða sem $\geq 5\%$ líkur eru á að verði fyrir eyðileggingu reiknað og því er metið efnahagslegt tjón mikið. Séu áhættuviðmið há (t.d. 40%) er andvirði allra innviða sem $\geq 40\%$ líkur eru á að verði fyrir eyðileggingu reiknað og því lækkar metið efnahagslegt tjón.

Inni í mati á tjóni af völdum gjóskufalls, eru einungis íbúðarhús en heildarverðmæti þeirra er metið um 72 milljarðar ISK (á verðgildi nóvembermánaðar 2017), þar sem burðarþol annarra innviða hefur ekki verið metið og líklegt er að áhersla verði fljótt sett á að verja þau s.s. með því að ryðja gjósku af þökum þeirra. Inni í tjónmati af völdum hraunflæðis eru allir innviðir Heimaeyjar (um 110 milljarðar á verðgildi nóvembermánaðar 2017).

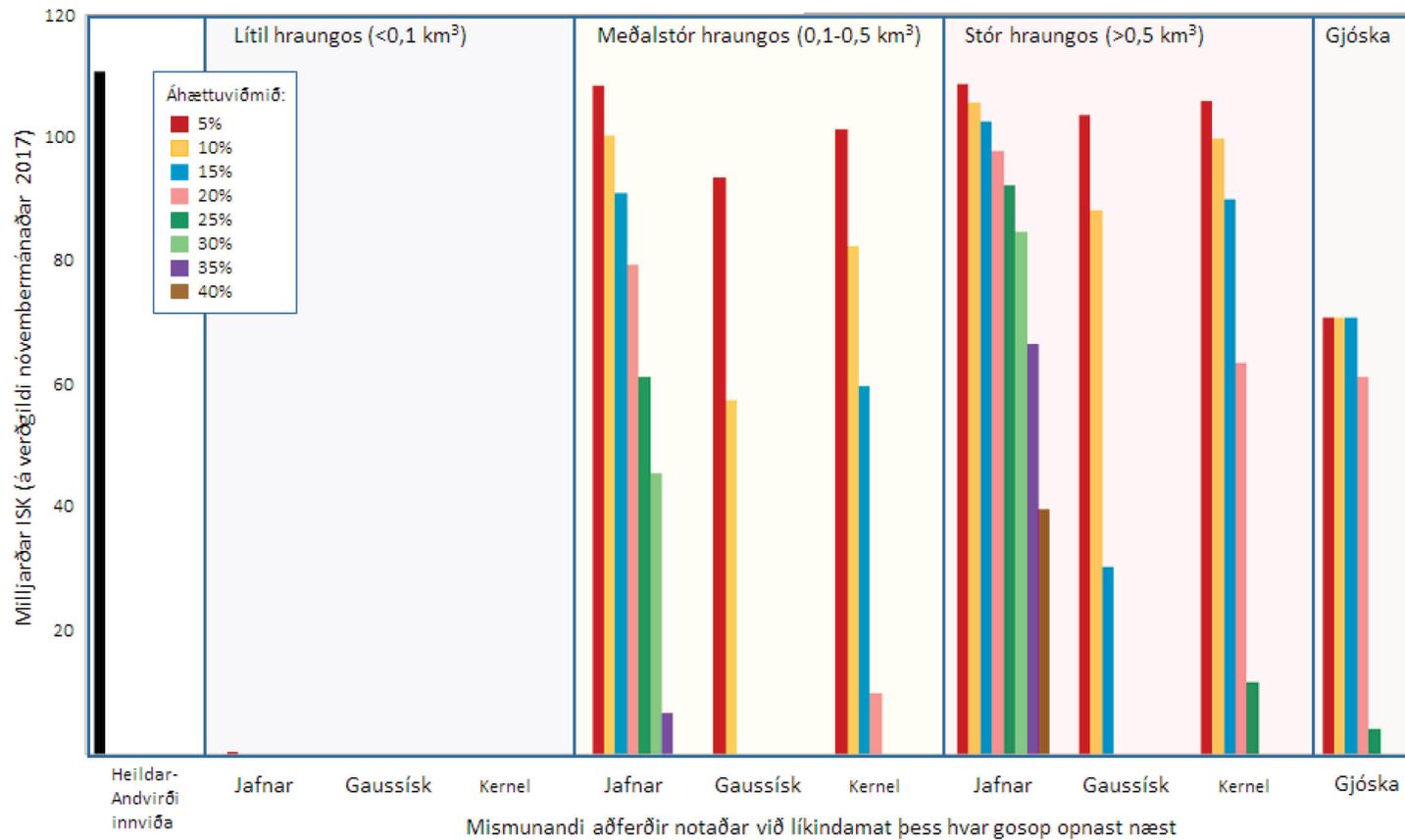
Byggðin og hafnarsvæðið er það svæði sem er mest útsett fyrir efnahagslegu tjóni. Niðurstöður sýna að meðalstór og stór hraungos valda mestu efnahagslegu tjóni, sé öllum gosopum gefið sama vægi (Mynd 17). Við 5% áhættuviðmið er tiltölulega lítill munur á efnahagslegu tjóni af völdum meðalstórs og stórs hraungoss og litlu skiptir hvaða aðferð er notuð við að gefa opnun gosopa vægi. Hins vegar stjórnar staðsetning gosupptaka lítills hraungoss algjörlega hvaða svæði eru útsett og þar með mati efnahagslegs tjóns. Hér hefur efnahagslegt tjón af völdum lítilla hrauna verið metið um 65 milljónir ISK sem er of lítið til að það sjáist á Mynd 17. Áhugavert er að skoða hvernig mat á efnahagslegu tjóni breytist með mati á vægi opunar gosopa en þegar öll gosop hafa sama vægi reiknast tjónið mest (Mynd 17). Við að gefa mismunandi gosupptökum mismunandi vægi gjörbreytist mat á efnahagslegu tjóni eins og glögglega sést við 15% áhættuviðmið (Mynd 17) en þar er reiknað tjón hverfandi sé vægi gosopa reiknað með normaldreifingu umhverfis bestu línu (Gaussísk) en sé öllum gosopum gefið sama vægi (Jafnar) er tjónið metið í kringum 90 milljarðar. Sú aðferð sem notuð er við að gefa mögulegum gosopum vægi hefur meiri áhrif á mat á efnahagslegum afleiðingum goss í Heimaey en stærð gosa.

Við 5% áhættuviðmið eru nærri öll íbúðarhús útsett fyrir tjóni af völdum blautrar gjósku úr meðalstóru gjósku myndandi gosi og nánast allir innviðir eru útsettir fyrir tjóni af völdum stórs hraungoss (94% innviða). Hæsta áætlaða tjónið við 25% áhættuviðmið er af völdum meðalstórs

og stórs hraungoss þar sem öll gosop hafa sama vægi. Flugvöllurinn fellur ekki innan tjónasvæðis þegar áhættuviðmið eru sett 25% eða hærri enda er hann ekki á eins útsettu svæði. Tjón á spítalanum fer ekki að reiknast með fyrir en við 25% áhættuviðmið og hærra í meðalstóru og stóru hraungosi þar sem gosop hafa jafnt vægi.

Þegar áhættuviðmið fyrir landið hafa verið lagalega skilgreind verður ekki þörf á að skoða efnahagslegt tjón við mismunandi áhættuviðmið heldur verður nóg að einbeita sér að mati á tjóni við lagalega skilgreint áhættuviðmið.

Metið efnahagslegt tjón innviða við mismunandi áhættuviðmið og breytilegt vægi gosopa



Mynd 17. Metið efnahagslegt tjón á innviðum við mismunandi áhættuviðmið (5–40%) vegna breytilegra gosstærða hraungosa og gjóskugoss. Svarta súlan sýnir heildarandvirði innviða á Heimaey (miðað við verðgildi nóvembermánaðar 2017). Litur súlnanna sýnir mat efnahagslegs tjóns á innviðum við mismunandi áhættuviðmið, rauðar súlur sýna metið tjón við 5% áhættuviðmið, gular við 10%, bláar við 15%, bleikar við 20%, dökk grænar við 25%, ljósgrænar við 30%, fjólubláar við 35% og brúnar súlur sýna metið tjón við 40% áhættuviðmið. Við 5% áhættuviðmið reiknast efnahagslegt tjón á öllum innviðum sem hafa $\geq 5\%$ líkur á að verða fyrir tjóni inn í heildartjónatöluna en við 40% reiknast efnahagslegt tjón innviða sem $\geq 40\%$ líkur eru á að verði fyrir tjóni. Niðurstöður eru sýndar fyrir misstór hraungos (sjá töflu 3) og þrjár mismunandi aðferðir við mat á líkum þess hvar gosop opnast næst. Jafnt: jafnt vægi gosopa; Gaussísk: á við um normaldreifingu gosopa umhverfis bestu línu í gegnum eldstöðvakerfi Vestmannaeyja; Kernel: á við um normaldreifingu gosopa umhverfis stök gosop innan eldstöðvakerfis Vestmannaeyja (sjá kafla 3.2).

5 Áhrif eldgoss sem á sér stað á Heimaey

Í köflum hér að framan hefur verið farið í gegnum vág af völdum hrauns og gjóskufalls á Heimaey. Þrátt fyrir að gostíðni sé ekki há í Vestmannaeyjum miðað við virkustu eldstöðva-kerfi landsins eru gosstöðvar mjög nærri byggð og því mikilvægt að þekkja yfirvofandi vág eins vel og kostur er. Sú þekking er forsenda þess að skipulagsyfirköld, vöktunaraðilar og almanna- varnaryfirköld geti tekið ákvarðanir sem byggja á áreiðanlegri þekkingu og brugðist á réttan hátt við þeim aðstæðum sem upp koma. Í undanfara bæði Surtseyjar- og Eldfellsgoss mældust jarðskjálftar þó svo að þeir hafi ekki verið greindir og túlkaðir sem goshyrirboðar á sínum tíma en með öflugra eftirlitsneti má ætla að hyrirboðar eldgoss á Heimaey mælist fyrr og verði túlkaðir sem slíkir. Líklegast er að þegar eldgos hefst verði um sprungugos að ræða og að löng sprunga muni opnast á skömmum tíma líkt og í Eldfellsgosinu þrátt fyrir að virkni muni að öllum líkindum dragast saman á einn eða fáa staði á næstu dögum eftir upphaf goss.

5.1 Möguleg efnahagsáhrif

Í samantekt um efnahagslegt tjón af völdum náttúruvárs á Íslandi síðustu tvær aldir sést að uppreiknað tjón af völdum Eldfellsgossins 1973 er tæplega 38 milljarðar ISK (320 milljónir evra miðað við gengi apríl mánaðar ársins 2017; Tómas Jóhannesson, 2017) sem er hliðstætt um 60% af landsframleiðslu (Tómas Jóhannesson, 2017). Hér eru líkindi þess að breytileg svæði verði fyrir tjóni af völdum eldgosa og að þyngd gjósku fari yfir burðarþol íbúðarhúsa í Heimaey notuð til að meta hvert efnahagslegt tjón getur orðið ef eldsumbrot hefjast á Heimaey (sjá Viðauka E, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020).

Af þeim sviðsmyndum sem hér hafa verið metnar og miðað við þau viðmið sem hér hafa verið notuð (sjá kafla 3.5, 4.5 og Viðauka E, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020) eru mestu efnahagslegu áhrifin af völdum meðalstórra og stórra hraungosa sem geta gjöreytt því sem þau fara yfir og vegna gjóskufalls vatnsmettaðrar gjósku úr meðalstóru gosi í Eldfelli (sjá mynd 17) en útreikningar og líkanreikningar sýna að þyngdarálag gjósku getur farið yfir burðarþol íbúðar- húsa. Samkvæmt þeim forsendum sem hér eru notaðar verður þurr gjóska ekki nægilega þung til að skapa hættu á skemmdum húsa. Sömu forsendur sýna að meðalstórt gjóskumyndandi gos í Surtsey hafi ekki merkjanleg efnahagsleg áhrif á Heimaey þar sem þungi gjósku sem sest á mannvirki fer ekki umfram burðarþol íbúðarhúsa. Sé litið til efnahagstjóns af völdum hrauna geta aðeins meðalstór og stór gos á Heimaey framleitt svo mikið hraun að það valdi umtals- verðu efnahagslegu tjóni. Mögulegt tjón af hrauni úr litlu gosi er of bundið við ákveðin svæði til að hægt sé að fara yfir þau mörk á tölfræðilega marktækan hátt miðað við þau mörk um efnahagslegt tjón sem hér er gengið út frá. Augljóslega vex möguleiki á tjóni með stærð eldgoss.

Efnahagslegt tjónnæmi er mest þar sem byggð á eyjunni er þéttust þ.e. á norður hluta eyjunnar og við höfnina en þar eru íbúðarhús landfræðilega dreifð. Ef miðað er við 5% áhættuviðmið eru nærri öll íbúðarhús útsett fyrir því að burðarþol þeirra þoli ekki þunga vatnsmett- aðrar gjósku sem fallið getur á þau úr meðalstóru sex daga löngu gosi úr Eldfelli. Við sama áhættuviðmið eru >90% innviða útsett fyrir eyðileggingu af völdum stórs hraungoss á Heimaey. Flugvöllurinn og flugvallarmannvirki eru þó vel staðsett á Heimaey og þau eru ekki eins útsett og innviðir við höfnina eða í íbúðarbyggðinni og séu áhættuviðmið sett við 25% verður ekki metið efnahagslegt tjón á flugvöllinum. Þar sem flugvöllurinn er sunnarlega á eyjunni er hann eina mannvirkið sem er með meira efnahagslegt tjónnæmi vegna þyngdarálags gjósku en vegna hrauns.

5.2 Mat á því hve útsett íbúar og ferðamenn eru fyrir hættu

Íbúar Vestmannaeyja voru 4408 hinn 1. október 2021 (Þjóðskrá Íslands, 2021). Árið 2016 heimsóttu alls 152 þúsund manns Vestmannaeyjar, 54 þúsund íslenskir ferðamenn og 98 þúsund erlendir ferðamenn að undanskildum erlendum farþegum á skemmtiferðaskipum sem áætlað er að hafi verið 17–18 þúsund (Rögnvaldur Guðmundsson, 2016). Heildarfjöldi ferðamanna á eyjunum hefur vaxið á hverju ári síðan 2004 og aukning milli árana 2015 og 2016 var 39 þúsund gestir (úr 113 þúsund árið 2015 í 152 þúsund árið 2016).

Bæði árstíða- og dægursveiflu gætir í fjölda ferðamanna í Heimaey. Fjöldi ferðamanna er mestur yfir sumartímam (Rögnvaldur Guðmundsson, 2016, 2018) en þá koma flestir erlendir gestir en minni árstíðasveiflu gætir í komu Íslendinga enda eru meiri líkur á að þeir séu að heimsækja ættingja og vini. Dægursveiflu gætir þar sem farþegar á skemmtiferðaskipum dvelja aðeins á Heimaey yfir daginn og það sama á við um 69% annarra erlendra gesta. Flestir innlendir gestir (65%) gista í eyjunni og stærsti hluti þeirra dvelur í a.m.k. fjórar nætur (Rögnvaldur Guðmundsson, 2016). Til viðbótar við eðlilegan ferðamannafjölda kemur verulegur fjöldi íslenskra ferðamanna til Heimaeyjar fjórar helgar hvers sumars, á Þjóðhátíð um Verslunarmannahelgi (~18.000 gestir), á fótboltamót fyrir stúlkur (Pæjumót ~3.000 gestir) og drengi (Orkumót ~3.000 gestir) og á Goslokahátíð (~5–6.000 gestir) þegar goslokum Eldfellsgossins 1973 er fagnað (Íris Róbertsdóttir munnleg heimild, 2021). Sjómenn og farandverkafólk hefur ólíka viðveru á Heimaey en talið er að þar geti verið um 150 manns að ræða. Af þessu sést að fjöldi fólks sem getur þurft að flytja á brott frá Heimaey í eldgosi er afar mismunandi og breytilegur eftir árstíð og tíma dags.

Fjöldi fólks sem væri útsett fyrir hraun- og gjóskuvá ef til goss á Heimaey kæmi er mikilli óvissu háður þar sem mjög breytilegt er hve margir eru í Eyjum hverju sinni. Í júlí má gera ráð fyrir um 30% viðbót við íbúafjölda, og jafnvel upp í 50% á stökum dögum að undanskildum stórum ferðamannahelgum þegar hlutfallið getur verið enn hærra. Mjög mikilvægt er að gera ráð fyrir þeim möguleika að eldfjallavá geti skolið á þegar mjög margir gestir eru í Eyjum (t.d. á Þjóðhátíð) og í hvernig veðri sem er. Við gerð viðbragðsáætlana fyrir Heimaey þarf því að taka tillit til breytilegs mannfjölda á ólíkum árstímum og ólíkum tímum sólarhrings og að hægt sé að flytja fólk hratt og örugglega úr eyjunni á skömmum tíma. Stutt viðdvöl flestra erlendra ferðamanna takmarkar möguleika á að upplýsa þá um viðbrögð við eldfjallavá af hvaða tagi sem er.

6 Viðbúnaður og mótvægisáðgerðir

Eldfellsgosið 1973 er skólabókardæmi um þá vá sem stafar af því að búa í miklu nágrenni við virka eldstöð og þær áðgerðir sem nota má til að draga úr áhrifum þess. Mikið efnahagslegt tjón varð í gosinu en sem betur fer varð aðeins eitt dauðsfall af völdum gossins og það má þakka vel heppnaðri rýmingu eyjarinnar fyrstu gosnóttina þrátt fyrir að engar formlegar rýmingaráætlanir væru til en árið 1963, væntanlega í kjölfar Surtseyjargoss, var unnin greining á getu fiskiskipaflota Vestmannaeyja vegna rýminga. Samkvæmt þeirri greiningu var áætlunin að flytja alla eyjaskeggja burt ef til goss kæmi. Slík áætlun var hins vegar aldrei kláruð (Víðir Reynisson munnleg heimild, 2021). Skjóta rýmingu eyjarinnar má að vissu leyti þakka slæmu veðri daginn áður því allur fiskifloti Vestmannaeyja lá í höfn og tæplega 5300 íbúar Heimaeyjar voru fluttir með um 60 skipum upp á fastalandið á nokkrum klukkustundum. Íbúar Heimaeyjar og sjálfbóðaliðar sem komu út í eyjuna á meðan gosið stóð yfir voru útsettir fyrir gasmengun, gjóskufalli þ.m.t. hraunbombum, og rennandi hrauni. Margir íbúar sneru aftur heim að gosi loknu og hófu uppbyggingu Vestmannaeyjabæjar þó að íbúafjöldi hafi aldrei orðið samur og fyrir gos. Áfallahjálp var engin í og eftir Eldfellsgosið 1973 en í dag er slík aðstoð í boði fyrir þá sem á henni þurfa að halda.

6.1 Viðhald minninga og þekkingaröflun í samfélagi

Surtseyjar gosið árin 1963–1967 opnaði hvorki augu íbúa Vestmannaeyja né vísindamanna nægilega fyrir þeirri áhættu sem var til staðar á Heimaey og Eldfellsgosið sem hófst tíu árum seinna kom í raun öllum að óvörum. Þegar litið er til baka er ljóst að fyrirboðar voru fyrir upphaf gossins á formi jarðskjálfta þrátt fyrir að þeir hafi ekki verið túlkaðir sem slíkir á sínum tíma. Í dag er málum öðruvísi farið og íbúar Heimaeyjar eru meðvitaðir um þá hættu sem því fylgir að búa í nágrenni virkrar eldstöðvar og almannavarnanefnd Vestmannaeyja leggur mikla áherslu á að íbúar og gestir viti hvar hægt er að sækja sér upplýsingar um hvað skal gera ef eldgos eða önnur náttúruvá er yfirvofandi, hvernig á að undirbúa rýmingu og hvernig rýming fer fram en þær upplýsingar eru aðgengilegar í Viðbragðsáætlun vegna eldgoss í Vestmannaeyjum sem gefin var út af Lögreglustjóranum í Vestmannaeyjum og almannavarnanefnd Vestmannaeyja árið 2017.

Minningum um eldgosinu og þær hamfarir sem áttu sér stað árið 1973 er haldið á lofti í Vestmannaeyjum með Goslokahátíð sem haldin er í byrjun júlí ár hvert til að minna íbúa á hvað gerðist og á sama tíma hvað getur gerst í þeirra næsta nágrenni. Árið 2014 var opnað safn minninganna um eldgos í Vestmannaeyjum, Eldheimar, en þar er miðlað fróðleik um Heimaeyjar- og Surtseyjargosin og skyggst er inn í mannlíf og umhverfi í Vestmannaeyjum fyrir gos, hvernig íbúar tókust á við náttúruöflin og hvernig bærinn var byggður upp aftur í kjölfar goss.

6.2 Eftirlit og stjórn aðgerða

Margir koma að eftirliti og stjórn aðgerða í aðdraganda og yfirstandandi eldgosavá og hafa mismunandi hlutverk og ábyrgðir. Hér verður stiklað á stóru um viðbúnað og mótvægisáðgerðir. Veðurstofa Íslands sér um eftirlit með náttúruvá. Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra getur kallað eftir upplýsingum frá Vísindaráði almannavarna, sem er óformlegur samráðsvettvangur Almannavarnadeildar ríkislögreglustjóra og vísindasamfélagsins skipað þeim vísindamönnum sem hafa sérþekkingu á því máli sem er til umræðu hverju sinni áður en

ákvarðanir eru teknar. Í almannavarnaáðgerðum fer lögreglustjóri með stjórn aðgerða en samhæfing og yfirstjórn fer fram í Samhæfingar- og stjórnstöð (lög um almannavarnir 82/2008)

6.2.1 Viðbragðsáætlun Veðurstofu Íslands

Veðurstofa Íslands annast rauntímavöktun á jarðskjálftum, eldgosum, kvikuhreyfingum og jökulhlaupum með rekstri landsnets jarðskjálfta- og GPS mæla og sendir út viðvaranir um þessa þætti. Mánaðarlega stendur Veðurstofan fyrir eldgosaaæfingum þar sem viðbrögð stofnunarinnar við gosi eru yfirfarin þ.m.t. upplýsingagjöf til samstarfsstofnanna. Þegar eftirlitsgögn benda til þess að eldgos sé væntanlegt er mikilvægt að upplýsa almannavarnir, Vegagerðina, orkufyrirtæki, almenning í landinu, flugmálayfirvöld héraðs (Isavia) og bresku veðurstofuna sem sér um spár fyrir öskudreifingu í háloftum (London VAAC) um yfirvofandi vá. Sama á við þegar eldgos hefst.

Veðurstofan kemur upplýsingum á framfæri í aðdraganda og yfirstandandi eldgosavá í gegnum heimasíðu stofnunarinnar, samfélagsmiðla og fjölmiðla. Veðurstofan og almannavarnir eru vel tengdar og reglulega eru haldnir Vísindaráðsfundir almannavarna þar sem sérfræðingar frá mismunandi stofnunum koma saman og fara yfir fyrirliggjandi gögn og mögulega framvindu atburða miðað við þær upplýsingar sem liggja fyrir á hverjum tímapunkti.

6.2.2 Almennavarnadeild ríkislögreglustjóra

Almannavarnir voru fyrst stofnaðar árið 1962 með það fyrir augum að koma í veg fyrir tjón almennings af hernaðarvöldum. Fimm árum seinna var viðbrögðum við náttúruhamförum bætt inn í hlutverk almannavarna og árið 1972 voru fyrstu þrjár neyðaráætlanirnar sem unnar voru tilbúnar. Heimaey var ekki hluti þeirra. Eldgosið í Heimaey reyndi því verulega á almannavarnastarf á Íslandi og undirstrikaði nauðsyn þess (www.almannavarnir.is/almannavarnir/sagan). Í dag ber ríkislögreglustjóraembættið ábyrgð á almannavarnarmálum og viðbragðsáætlunum á Íslandi og Almennavarnadeild ríkislögreglustjóra sér um almennan rekstur almannavarna héraðs. Almennavarnanefndir eru starfandi um land allt og lögreglustjórar svæðanna eiga sæti í þeim.

Samkvæmt 2. grein laga um almannavarnir sem tóku gildi 19. júní 2008 (82/2008) er hlutverk almannavarna „að undirbúa, skipuleggja og framkvæma ráðstafanir sem miða að því að koma í veg fyrir og takmarka, eftir því sem unnt er, að almenningur verði fyrir líkams- og heilsutjóni, eða umhverfi eða eignir verði fyrir tjóni, af völdum náttúruhamfara eða af mannavöldum“.

Almannavarnir vinna að viðbragðs- og rýmingaráætlunum með vísindasamfélaginu og heimamönnum til að draga úr tjóni þegar náttúruvá skellur á. Mikilvægt er að upplýsa samfélög um mögulega náttúruvá og viðbrögð svo vel gangi að takast á við þær aðstæður sem upp koma.

6.2.3 Viðbragðsaðilar í Vestmannaeyjum

Almannavarnir: Almennavarnir virkja samhæfingastöð sem tryggir aðstoð milli umdæma og samhæfingu á landsvísu. Almennavarnir hafa gert samning við björgunarsveitir og Rauða krossinn um aðstoð í yfirvofandi eða yfirstandandi neyðarástandi.

Lögregla: Ein lögreglustöð er í Heimaey sem er starfsstöð lögregluliðs Vestmannaeyja.

Slökkvilið: Ein starfsstöð slökkviliðs er í Heimaey en um 30 manna hlutastarfandi lið reynslumikilla manna er til taks.

Heilbrigðisstofnun Suðurlands: Eitt sjúkrahús er í Heimaey mannað læknum og hjúkrunarfræðingum, sjúkraflutningar eru á höndum heilbrigðisstofnunarinnar.

Björgunarsveitir: Í Björgunarfélagi Vestmannaeyja eru 30 sjálfboðaliðar en á landsvísu eru um 100 björgunarsveitir á vegum Landsbjargar og þúsundir sjálfboðaliða sem þjálfaðir eru að takast á við hvers konar neyðarástand bæði á sjó og landi. Kæmi til eldgoss í Heimaey yrðu björgunarsveitir á landsvísu kallaðar út.

Rauði krossinn: Rauða kross deild Vestmannaeyja sér um fjöldahjálparstöð sem staðsett er í húsi Rauða krossins og þar starfa sjálfboðaliðar á þeirra vegum. Í fjöldahjálparstöð er hægt að fá fæði, klæði, upplýsingar og áfallahjálparstöð.

6.3 Viðbragðsáætlun

Viðbragðsáætlun vegna eldgoss í Vestmannaeyjum var unnin og gefin út af Lögreglustjóranum í Vestmannaeyjum, Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra og almannavarnanefnd Vestmannaeyja (2017). Markmið viðbragðsáætlunar er að tryggja fumlauð viðbrögð íbúa og viðbragðsaðila við eldgosi öllum til hjálpar. Í viðbragðsáætluninni er skilgreint hver fer með aðgerðastjórn og á hvers höndum fyrirfram skilgreind verkefni eru. Viðbragðsáætlunin getur verið virkjuð annars vegar af Lögreglustjóranum í Vestmannaeyjum og hins vegar af Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra en Neyðarlínan 112 annast boðun hennar skv. almannavarnastigi sem ákveðið er af virkjunaraðilum. Almannavarnastigin eru þrjú, óvissustig, hættustig og neyðarstig en hvert þeirra er virkjað fer eftir upplýsingum frá Vísindaráði almannavarna eða öðrum áreiðanlegum upplýsingum. Ef til rýmingar kemur er ábyrgð á höndum sömu aðila og við virkjun viðbragðsáætlunar. Viðbragðsáætlunina skal æfa reglulega og hún skal yfirfarin og uppfærð á fjögurra ára fresti en bæði áhættuminnkun og mótvægisáðgerðir vegna náttúruvár verður að uppfæra reglulega.

6.4 Mótvægisáðgerðir

Mikilvægt er að hanna og byggja mannvirki í Heimaey með tilliti til þeirrar eldfjallavár sem er til staðar til að draga úr tjóni af völdum hrauns og gjóskufalls. Eðlilegt er að styðjast við hættumat við skipulagningu framtíðar byggðar. Komi til gjóskufalls er eðlilegt að reyna að hreinsa gjósku af þökum og að auka burðargetu þaka þeirra húsa sem ekki þola 588 kg/m^2 (sjá kafla 3.4 og Viðauka E, Melissa A. Pfeffer o.fl., 2020). Komi til hraungoss eru meiri líkur en minni á að hraun valdi tjóni á innviðum á norður hluta Heimaeyjar og þá má aftur reyna að verja byggð með byggingu hraunvarnagarða (t.d. leiðigarðar) og kælingu virks hraunjaðars eins og gert var árið 1973. Mikilvægustu mótvægisáðgerðir vegna eldfjallavár á Heimaey eru án efa fræðsla samfélagsins um mögulega vá. Þær hættumatsupplýsingar sem hér hafa verið kynntar má nota í mótvægisáðgerðum en hvernig það er gert og hvenær er alfarið á höndum stjórnvalda sem einnig geta kallað eftir auknum upplýsingum úr hættumatsverkefnum.

7 Samantekt

Fyrsti áfangi í forgreiningu á eldgosum sem geta valdið miklu eignatjóni á innviði samfélagsins á Heimaey hefur verið unninn út frá þekktri jarðfræði svæðisins og með keyrslu hrauna- og gjóskudreifingarlíkana með áherslu á langtímahættumat. Mikilvægt er að þau gögn sem hér eru kynnt séu í sífelltri endurskoðun og að niðurstöður séu uppfærðar ef og þegar frekari upplýsingar um eldstöðvakerfið og hegðun þess liggja fyrir. Ef aukin virkni bendir til yfirvofandi eldgoss í Vestmannaeyjum verða líkön sem hér hafa verið notuð keyrð með nýjum upplýsingum og sértækari sviðsmyndir skoðaðar.

7.1 Helstu niðurstöður

Gostíðni á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja er lág í samanburði við virkustu kerfi landsins. Tölfræðilegar aðferðir voru notaðar til að meta líkur á opnun nýrra gosopa í Vestmannaeyjakerfinu út frá þekktri jarðfræði og jarðsögu svæðisins. Líkindi þess hvar næst mun gjósa á Heimaey voru metin: 1) Út frá jöfnum líkum opnun gosopa innan kerfisins í heild, 2) út frá dreifingu umhverfis bestu línu í gegnum þekkt gosop (Gaussian) og 3) út frá dreifingu umhverfis þekkt gosop (Kernel). Þessar breytilegu líkur voru notaðar við mat á efnahagslegu tjóni innviða Heimaeyjar af völdum hrauns. Niðurstöður benda til að 3–8% líkur séu á að næsta gos á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja verði á Heimaey eða, þvert á móti, að 92–97% líkur séu á því að ekki gjósi á Heimaey. Í líkindaútreikningi var ekki gert ráð fyrir auknum líkum á opnun gosopa á eða við Heimaey þó svo að upphleðsla gosefna hafi verið mikil þar. Aldri gosopa var ekki gefið vægi við líkindareikninga og ekki var reynt að meta líkur á hvenær næst mun gjósa á eldstöðvakerfinu.

Til að herma hraunflæði á sem bestan hátt var útbúið nýtt stafrænt hæðarlíkan fyrir Vestmannaeyjar og nágrenni með samsetningu hæðarlíkans af Heimaey og sjávarbotninum umhverfis þær. Alls sjást 47 landform á nýja hæðarlíkaninu sem tengdar eru eldvirkni á eldstöðvakerfi Vestmannaeyja. Nýja hæðarlíkanið var notað til að endurreikna rúmmál þess hrauns sem myndaðist í Eldfellsgosinu frá janúar til júlí 1973 og rúmmálið er nú metið 0,27 km³ eða 0,24 km³ reiknað sem jafngildi fasts bergs. Áður hefur rúmmál hraunsins verið metið 0,13 og 0,23 km³ (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 1973; Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson, 2003).

Hraunhermanir voru keyrðar fyrir þrjár stærðir hraungosa, lítil, miðlungs og stór og gjóskudreifing var hermd úr meðalstóru sex daga gosi annars vegar með upptök í Eldfelli og hins vegar í Surtsey. Landfræðilegur breytileiki fyrir útsett svæði er meiri eftir því sem gos eru minni, þar sem stærri gos þekja stærra svæði. Hefjist hraungos á Heimaey er norðurhluti eyjarinnar mest útsettur fyrir hraunflæði, þar með talið þéttbyggðasta svæði Heimaeyjar og umhverfi hafnarinnar. Minnstar líkur eru á að suður og austur hluti Heimaeyjar verði fyrir hrauni. Nærri allir innviðir Heimaeyjar eru útsettir fyrir rennandi hrauni úr stóru hraungosi.

Líkankeyrslur gjóskufalls frá sex daga löngu gosi með upptök í Eldfelli sýna að >50% líkur eru á að 3 cm þykkt gjóskulag (gjóska finni en 6,4 cm) falli á Vestmannaeyjabæ. Líkurnar á sömu gjóskuþykkt í bænum frá gosupptökum í Surtsey eru hverfandi. Líkankeyrslur gjóskufalls með upptök í Surtsey eða Eldfelli sýna að >5% líkur séu á að gjóskuþykkt nái 0,1–0,5 cm (gjóska finni en 6,4 cm) á Heimaey en sú þykkt hefur teljandi áhrif á hemlunarvegalengd bifreiða á vegum og flugbrautum. Sömu aðstæður geta skapast verði Heimaey fyrir gjóskufalli frá öðrum íslenskum eldstöðvum.

Mestar líkur eru á efnahagslegu tjóni á norðurhluta eyjarinnar vegna gjóskufalls frá Eldfelli. Meðalburðarþol íbúðarhúsa í Heimaey er metið 588 kg/m² og nái gjóska þeirri þyngd má búast við að þök helmings byggðarinnar standist ekki álagið og falli. Niðurstöður gjóskudreifingarhermunar úr meðalstóru gosi með upptök í Eldfelli benda til þess að ólíklegt sé að gjóskuþyngd þurrar gjósku fari yfir meðalburðarþol. Sé hins vegar úrkoma á sama tíma og gjóskufall eða rigni á gjóskuna eykst þyngd hennar og um leið hætta á að byggingar láti undan álagi. Líkur þess að nærri öll íbúðarhús verði fyrir meiri gjóskupunga en burðarþol þolir í meðalstóru gosi úr Eldfelli eru um 15% ef gjóskan er blaut. Gjóskufall úr meðalstóru sex daga gosi með upptök í Surtsey er ekki talið ógna íbúðarhúsum.

Efnahagsleg áhrif eru metin mest af völdum meðalstórs og stórs hraungoss en vægi þess hvar gosop opnast hefur mikil áhrif á mat efnahagslegra áhrifa og eins hefur skilgreining á áhættuviðmiðum mikil áhrif. Í upphafi árs 2021, hefur ekki verið skilgreint eða tekin ákvörðun um hver áhættuviðmið eru hér á landi vegna eldgosa. Skoðuð voru mismunandi viðmið og sé ásættanleg áhætta skilgreind við 40% er efnahagslegt tjón einungis skilgreint af völdum stórs hraungoss þar sem vægi gosopa er jafnt. Í því mati sem hér er birt hefur ekki verið tekið tillit til neinna mildandi aðgerða, s.s. þess að gjósku væri sópað af þökum eða reynt væri að stjórna hraunflæði, sem nýttust vel í Eldfellsgosinu 1973.

Fólksfjöldi í Heimaey er mjög breytilegur eftir tíma dags og árstíðum. Margir innlendir og erlendir ferðamenn heimsækja eyjuna, flestir yfir sumarhelming ársins og að auki getur fólksfjöldi allt að fimmfaldast á nokkrum stórum viðburðum yfir sumartímamann. Viðbragðsaðilar verða að gera ráð fyrir þessum breytileika í fjölda við gerð rýmingaráætlana. Ákjósanlegast væri að rýmingu væri lokið fyrir upphaf goss eða í versta falli á upphafsklukkustundum þess.

Góð og skjót samskipti eru á milli Veðurstofu Íslands, sem hefur sólarhrings eftirlit með náttúruvá, þ.m.t. jarðskjálftum sem geta verið fyrirboðar eldgosa, og Almannavarnadeildar ríkislögreglustjóra sem kemur upplýsingum til viðbragðsaðila á Heimaey. Ef gosrói hefst eru náttúruvársérfræðingar Veðurstofunnar á vakt allan sólarhringinn. Hefjist gos með litlum fyrirvara fylgja náttúruvársérfræðingar fyrirfram skilgreindum verkferlum.

Þær mildandi aðgerðir sem framkvæmdar voru í Eldfellsgosinu 1973 (s.s. að sópa gjósku af húspökum og styrkja hús innan frá) reyndust mjög vel og mælt er með að gert sé ráð fyrir þeim í framtíðarviðbrögðum við eldgosi í Heimaey.

7.2 Ábendingar og næstu skref

Margskonar eldgosavá getur skapast við eldsumbrot í eldstöðvakerfi Vestmannaeyja en hér hefur verið unnið með hættumat af völdum hrauns og gjóskufalls. Í framhaldi væri æskilegt að:

- vinna hraunhermanir út frá upptökum úr mislöngum gossprungum
- stefna að því að keyra hraunlíkön sem fela í sér tímaþátt fyrir ákveðnar sviðsmyndir svo hægt sé að vinna nákvæmari viðbragðs og rýmingaráætlanir út frá fyrirfram skilgreindum tímaramma og skilgreina rýmingarleiðir á betri hátt
- vinna mat á burðarþoli annarra mikilvægra innviða en íbúðarhúsa
- vinna hættumat vegna gasmengunar en í Eldfellsgosinu varð mannfall vegna gaseitrunar
- vinna hættumat vegna hraunbomba en mikil vá skapaðist í Eldfellsgosinu vegna hraunbomba sem féllu á Vestmannaeyjabæ

- setja meiri vinnu í að meta aldur eldri gosopa til þess að öðlast betra mat á því hvar er líklegast að næst opnast gosop innan eldstöðvakerfi Vestmannaeyja
- kanna samfélagsleg áhrif þess að mikilvægir innviðir, s.s. höfnin eða sjúkrahús, skemmist eða eyðileggist í eldgosi.

Enn fremur er mikilvægt að:

- finna varanlega staði fyrir jarðskjálftamæla á og/eða í nágrenni Heimaeyjar
- viðhalda rauntíma vöktun á jarðskjálftavirkni
- halda áfram árlegum mælingum á gasútstreymi í Heimaey

Almennt má segja að það að búa í nágrenni við virka eldstöð er vandasamt og geti verið áhættusamt. Því er mikilvægt að stjórnendur, viðbragðsaðilar og íbúar geri sér fullkomlega grein fyrir þeirri vá sem að samfélaginu getur stafað og undirbúi viðbrögð við henni. Brýnt er að draga úr vá með uppbyggingu á þekkingu á vánni í samfélögum sem útsett eru og í gegnum skipulagsmál sé það mögulegt t.d. með því að forðast uppbyggingu á svæðum sem eru útsett fyrir náttúruvá og reyna að auka landfræðilega dreifingu samfélagslegra mikilvægra innviða.

Í lokin má benda á að ef lagaleg áhættuviðmið verða skilgreind þarf að endurskoða og uppfæra efnahagsleg áhrif af völdum eldgoss í Heimaey.

8 Þakkarorð

Það hefur verið áskorun og lærdómsríkt ferli að vinna forgreiningu hættumats í Vestmannaeyjum og á Heimaey. Margir hafa lagt hönd á plóginn en við viljum sérstaklega þakka Kristjáni Sæmundssyni sem kom með mikilvægar ábendingar og leiðsögn í upphafi verkefnisins, Guðrúnu Nínu Petersen sem tók saman veðurfarsupplýsingar fyrir Heimaey og Surtsey, Verkís fyrir verktakavinnu í sambandi við burðarþol íbúðarhúsa og Sigurlaugu Gunnlaugsdóttur fyrir sinn hluta þýðingar úr frumskýrslu. Stýrihópi verkefnisins er þakkað þeirra framlag. Yfirlesarar ensku frumskýrslunnar voru Haraldur Sigurðsson og Heather Wright, Jórunn Harðardóttir las yfir íslensku útgáfuna og þökkum við þeim góðar ráðleggingar og lagfæringar. Síðast en ekki síst þökkum við almannavarnanefnd Vestmannaeyja, með Grími Hergeirssyni og Írisi Róbertsdóttur í fararbroddi, fyrir góðar ábendingar sem og Víði Reynissyni fyrir lokayfirlestur skýrslunnar.

9 Heimildaskrá

- Ármann Höskuldsson (2015). Vestmannaeyjar. Í: Bergrún A. Óladóttir, Guðrún Larsen, Magnús T. Guðmundsson (ritstj.) *Íslensk eldfjallavefsjá*. Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra. Sótt á www.islenskeldfjoll.is/?volcano=VES
- Ármann Höskuldsson, Richard Hey, Árni Þór Vésteinsson & Einar Kjartansson (2009). Þróun eldvirkni við Vestmannaeyjar síðustu 20 þúsund ár. Í *Sjór og sjávarlífverur*, ráðstefna haldin 20.–21. febrúar 2009. Reykjavík: Hafrannsóknastofnun, *Hafrannsóknir*, 143, bls. 19
- Ármann Höskuldsson, Einar Kjartansson, Árni Þór Vésteinsson, Sigurður Steinþórsson & Oddur Sigurðsson (2013). Eldstöðvar í sjó. Í: Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson, Bjarni Bessason (ritstj.). *Náttúruvá á Íslandi — Eldgos og jarðskjálftar*. Reykjavík: Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan
- 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., 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
- Birgir Jónsson (1992). *The role of man-made dykes in diverting lavaflows. Case study; the Heimaey eruption 1973*. Í ágripshefti ráðstefnunnar International Conference on Preparedness and Mitigation for Natural Disasters. 28-29 May 1992, Reykjavík, Iceland
- Blackburn E.A., Wilson L. & Sparks R.S.J. (1976). Mechanisms and dynamics of strombolian activity. *Journal of the Geological Society*, 132(4), 429–440. doi:10.1144/gsjgs.132.4.0429.
- Blake D., 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
- Bobrowsky, P.T. (ed.) (2013). *Encyclopedia of Natural Hazards*. Dordrecht, New York: Springer.
- Burton R.R., Dudhia J., Gadian A.M. & Mobbs S.D. (2017). The use of a numerical weather prediction model to simulate the release of a dense gas with an application to the Lake Nyos disaster of 1986: Simulating the release of a dense gas. *Meteorological Applications*, 24(1), 43–51. doi:10.1002/met.1603
- Capello A., Ganci G., Calvari S., Pérez N.M., Hernández P.A., Silva S.V., Cabral J. & Del Negro C. (2016). Lava flow hazard modelling during the 2014–2015 Fogo eruption, Cape Verde. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 2290–2303. doi.org/10.1002/2015JB012666
- Cordonnier B., Lev E. & Garel F. (2016). Benchmarking lava-flow models. *Geol. Soc. Lond Spec. Publ.* 426(1), 425–445. doi: 10.1144/SP426.7.
- Davíð Egilson (1974). *Athuganir á gjallfalli í Heimeyjargosi 1973* (óbirt fjórða árs ritgerð). Háskóli Íslands
- 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
- Dietterich H.R., Lev E., Chen J., Richardson, J.A. & Cashman, K.V. (2017). Benchmarking computational fluid dynamics models of lava flow simulation for hazard assessment, forecasting, and risk management. *J. Appl. Volcanol.* 6: 9. doi.org/10.1186/s13617-017-0061-x
- 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

- Favalli M., Mazzarini F., Pareschi M.T. & Boschi E. (2009a). Topographic control on lava flow paths at Mount Etna (Italy): implications for hazard assessment. *J. Geophys. Res.* 114, F1 doi.org/10.1029/2007JF000918
- Favalli M., Tarquini S., Fornaciai A. & Boschi E. (2009b). A new approach to risk assessment of lava flow at Mount Etna. *Geology* 37:1111–1114. doi.org/10.1029/2004GL021718
- Flooi H. Sigurðsson (1973). *Global Volcanism Program Bulletin Report*. Smithsonian Institution. Sótt á: http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=372010#bgvn_197301
- Guðmundur Kjartansson (1966). Nokkrar nýjar C-14 aldursákvarðanir. *Náttúrufræðingurinn* 36:126–141
- Guðrún Jóhannesdóttir & Lögreglustjórinn í Vestmannaeyjum (2011). Áhættuskoðun almannavarna í umdæmi lögreglustjórans í Vestmannaeyjum. Í: Guðrún Jóhannesdóttir (ritstj.) *Áhættuskoðun Almanna- og borgaravarna 2008–2011*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórinn almannavarnadeild. Sótt á www.almannavarnir.is/utgefing-efni/?wpdmc=ahaettuskodun-almannavarna-2011
- Guðrún Larsen & Jón Eiríksson (2008). Late Quaternary terrestrial tephrochronology of Iceland: frequency of explosive eruptions, type and volume of tephra deposits. *Journal of Quaternary Science*, 23(2), 109–120. doi.org/10.1002/jqs.1129
- Guffanti M., Mayberry G.C., Casadevall T.J. & Wunderman R. (2009). Volcanic hazards to airports. *Natural Hazards*, 51(2), 287–302. doi:10.1007/s11069-008-9254-2
- Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson (2003). Geology of the Heimaey volcanic centre, south Iceland: early evolution of a central volcano in a propagating rift? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 127:55–71. doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00178-1
- Hannes B. Mattsson & Ármann Höskuldsson (2005). Eruption reconstruction, formation of flow-lobe tumuli and eruption duration in the 5900 BP Helgafell lava field (Heimaey), south Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(1–2), 157–172. doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.04.001
- Haukur Jóhannesson (1983). Eldgos við Vestmannaeyjar 1637–38. *Náttúrufræðingurinn* 52(1–4), 33–36
- Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson (1998). *Jarðfræðikort af Íslandi 1:500 000* Jarðgrunnur: Reykjavík: Náttúrufræðastofnun Íslands. Ingvar Atli Sigurðsson & Sveinn P. Jakobsson (2009). Jarðsaga Vestmannaeyja. Í: Guðjón Ármann Eyjólfsson (ritstj.) *Ferðafélags Íslands árbók 2010/9 Vestmannaeyjar*. Reykjavík
- Ingvar Atli Sigurðsson & Sveinn P. Jakobsson (2009). Jarðsaga Vestmannaeyja. Í *Vestmannaeyjar*. Sótt á https://nattsud.is/skrar/file/Jardsaga_Vestmannaeyja_heimildir.pdf
- Íslenskir staðlar (2012). IST-120-2012. Sótt á: www.stadlar.is/stadlabudin/vara/?ProductName=IST-120-2012.
- Íslenskar orkurannsóknir (2008). *Landlíkan ÍSOR*, Greinargerð ÍSOR-08022, Skúli Víkingsson, 01.02.2008
- Kristján Sæmundsson (1974). Evolution of the axial rifting zone in northern Iceland and the Tjörnes Fracture Zone. *GSA Bulletin*, 85(4), 495–504
- Landmælingar Íslands (2008, 2012 & 2018). IS 50V Hæðargögn, notkunarfyrir skv. 31.gr. upplýsingalaga nr. 140/2021 og lögum um landmælingar og grunnkortagerð nr. 103/2006, fyrir gjaldfrjáls gögn frá Landmælingum Íslands
- Lofmyndir (2014). Eins metra hæðarlíkan af Heimaey, gögn afhent Vestmannaeyjabæ 2014
- Lög um almannavarnir nr. 82/2008
- Lögreglustjórinn í Vestmannaeyjum, almannavarnanefnd Vestmannaeyja, Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra (2017). Viðbragðsáætlun vegna eldgoss í Vestmannaeyjum. Í: *Viðbragðsáætlun Almanna- og borgaravarna*. Sótt á www.almannavarnir.is/utgefing-efni/vidbragdsaaetlun-vegna-eldgoss-i-vestmannaeyjum-utgafa-1-0-23-01-2017/?wpdmdl=22104

- Magnús Tumi Guðmundsson, Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Ásdís Helgadóttir, Sigrún Karlsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Þórdís Högnadóttir & Ágúst Gunnar Gylfason (2016). *Jökulhlaup í Öraefum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli*. Reykjavík: Jarðvísindastofnun Háskólans, Veðurstofa Íslands, Ríkislögreglustjóri. 63 bls.
- Martin A.J., Umeda K., Connor C.B., Weller J.N., Zhao D. & Takahashi M. (2004). Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc, Japan: Bayesian inference of volcanism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B10). doi:10.1029/2004JB003201
- Melissa A. Pfeffer, Sara Barsotti, Esther Hlíðar Jensen, Emmanuel Pierre Pagneux, Bogi Brynjar Björnsson, Guðrún Jóhannesdóttir, Ármann Höskuldsson, Laura Sandri, Jacopo Selva, Simone Tarquini, Mattia de' Michieli Vitturi, Ingibjörg Jónsdóttir, Davíð Egilson, Sigrún Karlsdóttir, Bergrún A. Óladóttir, Matthew J. Roberts, Kristín S. Vogfjörð & Jörunn Harðardóttir (2020). *An Initial Volcanic Hazard Assessment of the Vestmannaeyjar Volcanic System: Impacts of Lava Flow and Tephra Deposit on Heimaey* Skýrsla VÍ 2020-011. Reykjavík: Veðurstofa Íslands
- Meyer P.S., Sigurdsson H. & Schilling J.G. (1985). Petrological and geochemical variations along Iceland's Neovolcanic zones. *JGR* 90:10043–10072. doi.org/10.1029/JB090iB12p10043.
- Morgan A.V. (2000). The Eldfell eruption, Iceland: a 25-year retrospective. *Geoscience Canada* 27, 11–18. doi:10.12789/gsc.v27i1.4030
- Newhall C. & Hoblitt R. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 64(1), 3–20. doi:10.1007/s004450100173
- Páll Einarsson & Sveinbjörn Björnsson (1987). Jarðskjálftamælingar á Raunvísindastofnun Háskólans. Í Þorsteinn I. Sigfússon (ritstj.) *Í hlutarins eðli – afmælisrit til heiðurs Þorbirni Sigurgeirssyni prófessor*. Reykjavík: Menningarsjóður, bls. 251–278.
- Pedersen, G.B.M., A. Höskuldsson, T. Dürig, T. Thordarson, I. Jónsdóttir, M.S. Riishuus, B.V. Óskarsson, S. Dumont, E. Magnusson, M.T. Gudmundsson, F. Sigmundsson, V.J.P.B. Drouin, C. Gallagher, R. Askew, J. Guðnason, W.M. Moreland, P. Nikkola, H. I. Reynolds & J. Schmith (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. doi:https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.02.02
- Oddur Sigurðsson (1974). Jarðeldar á Heimaey 1973. *Týli* 4, 5–26
- Olgeir Sigmarsson (1996). Short magma chamber residence time at an Icelandic volcano inferred from U-series disequilibria. *Nature*, 382, 440
- Óskar J. Sigurðsson (1973). *Dagbækur Óskars J. Sigurðssonar*. Stórhöfði: Veðurstofa Íslands (óbirtar dagbækur veðurathugunarmanna)
- Rögnvaldur Guðmundsson (2016). *Ferðamenn og íbúar í Vestmannaeyjum 2016 – samanburður við 2012*. (Samantekt unnin fyrir Vestmannaeyjabæ) Hafnarfjörður: Rannsóknir og ráðgjöf ferðaþjónustunnar ehf. 58 bls.
- Rögnvaldur Guðmundsson (2018). *Ferðamenn í Vestmannaeyjum 2004-2018*. (Samantekt unnin fyrir Þekkingarsetur Vestmannaeyja) Hafnarfjörður: Rannsóknir og ráðgjöf ferðaþjónustunnar ehf. 10 bls.
- Self S., Sparks R.S.J., Booth, B. & Walker, G.P.L. (1974). The 1973 Heimaey Strombolian Scoria deposit, Iceland. *Geological Magazine*, 111(06), 539. doi:10.1017/S0016756800041583
- Selva J., Orsi G., Di Vito M.A., Marzocchi W. & Sandri L. (2012). Probability hazard map for future vent opening at the Campi Flegrei caldera, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 74(2), 497–510. doi:10.1007/s00445-011-0528-2
- Siglingasvið Landhelgisgæslu Íslands & Jarðvísindastofnun Háskólans (2007). *Dýptarlínur*
- Sigurður Steinþórsson (1966). Petrography and chemistry. *Surtsey Research Progress Report II*: 77–85

- Sigurður Þórarinnsson (1965). Neðansjávargos við Ísland. *Náttúrufræðingurinn* 35, 49–72
- Sigurður Þórarinnsson (1966). Sitt af hverju um Surtseyjargosið. *Náttúrufræðingurinn* 35, 153–181
- Sigurður Þórarinnsson (1969). Síðustu þættir Eyjaelda. *Náttúrufræðingurinn* 38, 113–135
- Sigurður Þórarinnsson (1973). *Global Volcanism Program Bulletin Report*. Smithsonian Institution. Sótt á: volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=372010#bgvn_197301
- Sigurður Þórarinnsson (1977). Gossprungukerfið í Heimaeyjargosinu. *Náttúrufræðingurinn* 47:1–7
- Sigurður Þórarinnsson & Kristján Sæmundsson, Eldvirkni síðan sögur hófust, *Jökull* 29(1), 89–32
- Sigurður Þórarinnsson, Sigurður Steinþórsson, Þorleifur Einarsson, Hrefna Kristmannsdóttir & Niels Óskarsson (1973). The Eruption on Heimaey, Iceland. *Nature*, 241(5389), 372–375. doi:10.1038/241372a0
- Sigurður Þórarinnsson, Þorleifur Einarsson, Guðmundur E. Sigvaldason & G. Elísson, G. (1964). The submarine eruption off the Vestmann Islands, 1963–64. *Bull. Volcanol.* 27, 435–445. doi.org/10.1007/BF02597544
- Spinetti C., Barsotti S., Neri A., Buongiorno M.F., Doumaz F., & Nannipieri L. (2013). Investigation of the complex dynamics and structure of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash cloud using multispectral images and numerical simulations: 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash cloud. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4729–4747. doi:10.1002/jgrd.50328
- Sveinn P. Jakobsson (1968). The Geology and Petrology of the Vestmann Islands. A Preliminary report. *Surtsey Research Progress Report IV*.
- Sveinn P. Jakobsson (1979). Petrology of Recent basalts of the Eastern Volcanic Zone, Iceland. *Acta Naturalia Islandica* 26
- Sveinn P. Jakobsson, Pedersen A. K., Rönsbo, J. G. & Melchior Larsen L. (1973). Petrology of mugearite-hawaiite: Early extrusives in the 1973 Heimaey eruption, Iceland. *Lithos*, 6(2), 203–214. doi:10.1016/0024-4937(73)90065-0
- Tómas Jóhannesson (2017). Risk management in avalanche-prone areas in Iceland (revised). *Visionen im Lawinenschutz / Avalanche Protection - Visions*, 179, 86–97
- Trausti Jónsson (2002). *Hættumat og hlutverk Veðurstofunnar í ljósi hættumatsramma Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar*. Greinargerð 02021. Reykjavík: Veðurstofa Íslands
- Tarquini S., de' Michieli Vitturi M., Jensen E., Pedersen G., Barsotti S., Coppola D., & Pfeffer M. (2018). Modeling lava flow propagation over a flat landscape by using MrLavaLoba: the case of the 2014–2015 eruption at Holuhraun, Iceland. *Annals of Geophysics*, 61(Vol 61 (2018)). doi:10.4401/ag-7812
- Tonini R., Sandri L., Costa A. & Selva J. (2015). Brief Communication: The effect of submerged vents on probabilistic hazard assessment for tephra fallout. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(3), 409–415. doi:10.5194/nhess-15-409-2015
- Vink G.E. (1984). A hotspot model for Iceland and the Vøring Plateau. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 89 (B12), 9949–9959. doi.org/10.1029/JB089iB12p09949
- Williams R.S. & Moore J.G. (1976). Man Against Volcano: The Eruption on Heimaey, Vestmannaeyjar, Iceland (önnur útgáfa). *U.S. Geological Survey*. Sótt á: <https://pubs.usgs.gov/gip/heimaey/heimaey.pdf>
- White, R.S., Brown, J.W. & Smallwood, J.R. (1995). The temperature of the Iceland Mantle plume and the origin of outward-propagating V-shaped ridges. *J. Geol. Soc* 152, 1039–1045. doi.org/10.1144/GSL.JGS.1995.152.01.26
- Wolfe C.J., Bjarnason I.T., VanDecar J.C. & Solomon S.C. (1997). Seismic structure of the Iceland mantle plume. *Nature* 385(6613):245–247. doi.org/10.1038/385245a0.
- Þorbjörn Sigurgeirsson (1965). Some geophysical measurements and observations in Surtsey 1963–1964. *Surtsey Research Progress Report I*, 63–67

- Þorvaldur Þórðarson (2000). Physical volcanology of lava flows on Surtsey, Iceland: A preliminary report. *Surtsey Research* 11:109–126
- Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson (2008). Postglacial volcanism in Iceland, *Jökull* 58 (1), 197-228
- Þorvaldur Þórðarson & Guðrún Larsen (2007). Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history. *Journal of Geodynamics* 43, 118–152. doi.org/10.1016/j.jog.2006.09.005

Vefsíður

Almannavarnir: www.almannavarnir.is

Íslensk eldfjallavefsjá: www.islenskeldfjoll.is

Orðalisti Sameinuðu þjóðanna: www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction

Orðasafn almannavarna (2017–2018): www.almannavarnir.is/almannavarnir/hugtok

Þjóðskrá Íslands: www.skra.is