

# Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat fyrir niðurdælingu CO<sub>2</sub> á Hellisheiði Grunnástand og hugsanlegar breytingar

Egill Árni Guðnason  
Þorbjörg Ágústsdóttir  
Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir  
Iwona Monika Galeczka  
Auður Agla Óladóttir  
Ásdís Benediktsdóttir  
Gunnlaugur M. Einarsson

Unnið fyrir Carbfix ohf.

ÍSLENSKAR ORKURANNSÓKNIR  
Kópavogur: Orkuhúsið, Urðarhvarfi 8, 203 Kóp. – Sími: 528 1500  
Akureyri: Rangárvöllum, P.O. Box 30, 602 Ak. – Sími: 528 1500  
isor@isor.is – www.isor.is

Skýrsla nr. ÍSOR-2022/030	Dags. September 2022	Dreifing <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat fyrir niðurdælingu CO <sub>2</sub> á Hellisheiði - Grunnástand og hugsanlegar breytingar		Upplag 1
		Fjöldi síðna 77
Höfundar Egill Árni Guðnason, Þorbjörg Ágústsdóttir, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Iwona Monika Galeczka, Auður Agla Óladóttir, Ásdís Benediktsdóttir og Gunnlaugur M. Einarsson		Verkefnisstjóri Sveinborg H. Gunnarsdóttir
Gerð skýrslu / Verkstig		Verknúmer 22-0097
Unnið fyrir Carbfix ohf.		
Samvinnuaðilar		
Útdráttur <p>Hengilssvæðið er virkt jarðhita- og jarðskjálftasvæði sökum staðsetningar þess á þrípunktum þar sem mætast þrjú gos- og brotabelti. Orka náttúrunnar nýtir jarðhitann til þess að framleiða heitt vatn og rafmagn, á Nesjavöllum síðan 1990 og á Hellisheiði síðan 2006, og er mestu umframjarðhitavatni á þessum svæðum dælt aftur niður fyrir grunnvatnskerfið og í jarðhitageymi.</p> <p>Árið 2012 var gerð fyrsta tilraunaniðurdæling Carbfix ohf. á koldíoxíði (CO<sub>2</sub>) uppleystu í vatni í borholur í Þrengslum. Nú er uppleystu CO<sub>2</sub> dælt niður í djúpkerfi Húsmúla og Gráuhnúka. Carbfix ohf. áformar nú aukna niðurdælingu á CO<sub>2</sub> uppleystu í vatni í borholur á Hellisheiði á þrennan hátt, þ.e. með i) viðbót á CO<sub>2</sub> í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi Húsmúla, ii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í „millikerfi“ í Jarðhitagarði ON og iii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í „millikerfi“ á núverandi niðurrenslissvæðum í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka.</p> <p>Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir grunnástandi geymslusvæðisins út frá fyrirliggjandi gögnum um yfirborðsjarðfræði og jarðfræði berggrunnnsins, eðlis- og efnaeiginleika berggrunnns, grunnvatns og jarðhitavökva, skilvirkni steindabindingar, jarðskjálftavirkni á svæðinu, ásamt niðurdælingar- og borholugögnum. Að auki er mat lagt á þau hugsanlegu áhrif sem framkvæmd Carbfix kann að hafa á jarðskjálftavirkni á svæðinu.</p>		
Lykilorð Koldíoxíð, CO <sub>2</sub> , niðurdæling, borholur, millikerfi, jarðskjálftar, jarðfræði, efnafræði, steindabinding, Carbfix, ÍSOR		Undirskrift verkefnisstjóra <i>Sveinborg H. Gunnarsdóttir</i>
		Yfirfarið Steinunn Hauksdóttir





# Efnisyfirlit

<b>1 Samantekt</b> .....	<b>9</b>
1.1 Samantekt á jarðfræði svæðisins og eðlis- og efnaeiginleikum berggrunnins.....	9
1.2 Samantekt á efnasamsetningu vökva og skilvirkni steindabindinga í geymslu- geyminum .....	10
1.3 Samantekt á náttúrulegu flæði CO <sub>2</sub> um yfirborð.....	11
1.4 Samantekt á jarðskjálftavirkni .....	12
<b>2 Inngangur</b> .....	<b>15</b>
<b>3 Áhrifasvæði niðurdælingar og jarðfræðilegt grunnástand</b> .....	<b>16</b>
3.1 Yfirborðsjarðfræði .....	18
3.2 Jarðfræði, eðlis- og efnaeiginleikar berggrunnins.....	21
<b>4 Grunnupplýsingar um efnasamsetningu vökva í geymslugeymi fyrir, á meðan og eftir niðurdælingu gass</b> .....	<b>31</b>
4.1 Prengsli .....	31
4.2 Húsmúli og Skarðsmýrarfjall .....	34
<b>5 Skilvirkni steindabindingar CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð</b> .....	<b>37</b>
<b>7 Grunnupplýsingar um jarðskjálftavirkni</b> .....	<b>43</b>
7.1 Jarðskjálftaefirlit og vöktun .....	43
7.2 Náttúruleg jarðskjálftavirkni á Hengilssvæði .....	43
7.3 Áhrif vinnslu á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði.....	50
7.4 Áhrif niðurdælingar á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði.....	53
<b>8 Dæmi um jarðskjálftavirkni af öðrum svæðum</b> .....	<b>62</b>
8.1 Nesjavellir .....	62
8.2 Peistareykir.....	63
8.3 Framrás kvikuganga .....	65
<b>9 Hugsanlegar breytingar á jarðskjálftavirkni</b> .....	<b>67</b>
9.1 Hætta á jarðskjálftavirkni tengd niðurdælingu CO <sub>2</sub> .....	67
9.2 Áhrifasvæði áætlaðrar niðurdælingar.....	69
<b>10 Heimildaskrá</b> .....	<b>71</b>

## Töflur

Tafla 1. Meðalefnasamsetning fersks basaltglers innan Hengilskerfisins .....	20
Tafla 2. Yfirlit yfir hitaháðar ummyndunarsteindir í háhitakerfum á Íslandi og það hitabil sem þær myndast við .....	24
Tafla 3. Efnasamsetning vökva í geymslugeymi fyrir CO <sub>2</sub> -gasblönduðu niðurdælinguna og meðan á fasa I og II stóð í niðurdælingunni .....	33
Tafla 4. Flokkar yfirborðsgerðar, fjöldi mælipunkta í hverjum flokki og CO <sub>2</sub> -flæði (ppm/sek.).....	42

## Myndir

Mynd 1. Yfirlitskort sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar CO <sub>2</sub> á yfirborði og neðanjarðar, auk lóða Jarðhitagarðs ON .....	17
Mynd 2. Jarðfræðikort sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar, auk lóða Jarðhitagarðs ON .....	19
Mynd 3. Kortlagðar sprungur í Húsmúla .....	21
Mynd 4. Þversnið frá vestri til austurs sýnir jarðlög á Gráuhnúkasvæðinu .....	25
Mynd 5. Þversnið frá Sleggjubeinsskarði í NA til SV yfir í Gráuhnúka .....	26
Mynd 6. Þversnið frá NV til SA um Jarðhitagarð ON sýnir jarðlög og ummyndarbelti .....	27
Mynd 7. Þversnið frá NV til SA um Jarðhitagarð ON sýnir berghita og ummyndunarbelti .....	28
Mynd 8. Jarðlög, ummyndun og berghiti í niðurdælingar-, vatnstöku- og eftirlitsholum í Þrengslum .....	29
Mynd 9. Þversnið frá NV til SA úr Þrengslum yfir í Gráuhnúka sýnir móberg, hraunlög og ummyndunarbelti .....	29
Mynd 10. Berghitalíkan, ummyndunarbelti og 10 Ohm-m yfirborð á NA-SV þversniði frá Þrengslum yfir í Gráuhnúka .....	30
Mynd 11. Sýrustig, kísill og katjónir í niðurdælingarholunni HN-2, í grunnvatnsholunni HN-1 og í vinnsluholunum HN-4, HK-7b, HK-12, HK-13, HK-25, HK-26, HK-31 og HK-34. ....	32
Mynd 12. Anjónir og snefilefni í niðurdælingarholunni HN-2, í grunnvatnsholunni HN-1 og í vinnsluholunum HN-4, HK-7b, HK-12, HK-13, HK-25, HK-26, HK-31 og HK-34 .....	33
Mynd 13. pH- og DIC-styrkur í geymslugeyminum við holu HN-4 fyrir, á meðan og eftir niðurdælingu á CO <sub>2</sub> og gasblöndu .....	34
Mynd 14. Sýrustig og styrkur efna í vökva geymslugeymis í vöktunarholum HE-31, HE-44 og HE-48 fyrir og meðan á niðurdælingu stóð .....	35
Mynd 15. Gasflæðimælir og hitamælir á yfirborði .....	38
Mynd 16. Áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar .....	39
Mynd 17. Hálfjálfoirk greining á yfirborðsgerð á áhrifasvæði neðanjarðar .....	40
Mynd 18. Reiknað meðalgildi CO <sub>2</sub> -flæðis í hverjum flokki á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar .....	41
Mynd 19. Staðsetning jarðskjálfta úr jarðskjálftamælaneti VÍ árin 1995–2006 á Hengilssvæðinu ....	45
Mynd 20. Afstæð staðsetning jarðskjálfta úr jarðskjálftamælaneti VÍ árin 1997–2001 á Hengilssvæðinu .....	46
Mynd 21. Yfirlitsmynd sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar .....	48
Mynd 22. Afstæð staðsetning 23.060 yfirfarinna jarðskjálfta á Hengilssvæðinu frá 2016 til 2022 ....	49
Mynd 23. Nærmynd af Hellisheiði: Afstæð staðsetning jarðskjálfta á Hellisheiði 2016–2022 .....	51
Mynd 24. Afstæð staðsetning jarðskjálfta í Hverahlíð á tímabilinu 2016–2022 .....	53
Mynd 25. Jarðskjálftavirkni í Gráuhnúkum eins og hún mælist á SIL-jarðskjálftamælaneti VÍ frá upphafi mælinga árið 1995 og á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 .....	54
Mynd 26. Afstæð staðsetning jarðskjálfta í Gráuhnúkum á tímabilinu 2016–2022 .....	55
Mynd 27. Jarðskjálftavirkni í Húsmúla eins og hún mælist á SIL-jarðskjálftamælaneti VÍ frá upphafi mælinga árið 1995 og á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 .....	57
Mynd 28. Afstæð staðsetning jarðskjálfta í Húsmúla á tímabilinu 2016–2022 .....	58
Mynd 29. Jarðskjálftavirkni í Sleggjubeinsdal eins og hún mælist á SIL-jarðskjálftamælaneti VÍ frá upphafi mælinga árið 1995 og á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 .....	59

Mynd 30. Jarðskjálftavirkni í Þrengslum eins og hún mælist á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 og á meðan tilraunaniðurdælingu í Þrengslum stóð.....	60
Mynd 31. Jarðskjálftavirkni norður af Skarðsmýrarfjalli eins og hún mælist á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016.....	61
Mynd 32. Jarðskjálftavirkni vestur af Hverahlíð eins og hún mælist á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016.....	61
Mynd 33. Afstæð staðsetning jarðskjálfta á Nesjavöllum á tímabilinu 2016–2022 .....	63
Mynd 34. Jarðskjálftavirkni á Þeistareykjum frá nóvember 2020 til október 2021, á korti og dýptarsniðum .....	64
Mynd 35. Afstæð staðsetning jarðskjálfta sem sýna á korti hvernig kvikugangurinn frá kvikuhólfi Bárðarbungu ferðaðist undan jöklinum til norðausturs .....	66
Mynd 36. Jarðskjálftavirknin í eldstöðvakerfi Fagradalsfjalls í aðdraganda eldgossins í Geldingadölum.....	66



# 1 Samantekt

Carbfix ohf. áformar aukna niðurdælingu á CO<sub>2</sub> í borholur á Hellisheiði á þrennan hátt, þ.e. með i) viðbót á CO<sub>2</sub> í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi í Húsmúla, ii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í „millikerfi“ í Jarðhitagarði ON og iii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi á núverandi niðurrenslissvæðum, s.s. í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka. Framkvæmdin er háð lögum um umhverfismat framkvæmda og áætlana nr. 111/2021 og er þessi sérfræðiskýrsla, um grunnástand geymslusvæðisins, og hugsanlegar breytingar sem framkvæmdinni fylgja, unnin að beiðni Carbfix í samræmi við áðurnefnd lög.

Í skýrslunni er grunnástandi geymslusvæðisins gerð skil út frá fyrirbyggjandi gögnum um yfirborðsjarðfræði og jarðfræði berggrunnins, eðlis- og efnaeiginleika berggrunn, grunnvatns og jarðhitavökva, skilvirkni steindabindingar, náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð, jarðskjálftavirkni á svæðinu, ásamt niðurdælingar- og borholugögnum. Auk þess er mat lagt á þau hugsanlegu áhrif sem framkvæmd Carbfix kann að hafa á jarðskjálftavirkni á svæðinu.

## 1.1 Samantekt á jarðfræði svæðisins og eðlis- og efnaeiginleikum berggrunnins

Helstu áhrifaþættir sem jarðfræði svæðisins hefur á verkefnið snúast um nálægð við megineldstöðina Hengil og staðsetningu á þrípunkti þar sem mætast þrjú gos- og brotabelti, Reykjaneskaginn, Vesturgosbeltið og Suðurlandsbrotabeltið. Hér er samantekt á helstu þáttum sem varða jarðfræði svæðisins, og mikilvægustu eðlis- og efnaeiginleikar berggrunnins tíundaðir.

- Á yfirborði áhrifasvæðis fyrirhugaðrar niðurdælingar, og í nágrenni þess, eru móbergshryggir í stefnu ~N°30 áberandi sem og hraunlög frá nútíma.
- Mest finnst af ólivín-þóleíiti innan Hengilskerfisins, en þóleíit og pikrít finnst á stöku stað á yfirborði og í borholum. Allt berg í Hengilskerfinu tilheyrir þóleítsku bergroðinni. Þróðra berg finnst helst sem innskot í borholum.
- Móbergsmýndanir á svæðinu eru breytilegar á margan hátt, svo sem í kristöllum, ásýnd, útbreiðslu, lekt og poruhluta. Erfitt getur verið að rekja mýndanir á milli borholna.
- Móbergsmýndanir eru meira áberandi í berggrunninum þar sem móbergshryggir eru á yfirborði en á láglandi svæðum, sem bendir til þess að þau svæði hafi lengi verið hálend. Til að mynda er móberg nær allsráðandi í holum sem fara undir Skarðsmýrarfjall, Reykjafell og Gráuhnúka. Í holu HN-2, sem er úti á sléttunni vestan við Gráuhnúka, er t.d. meira um hraunlög en í nálægum holum sem stefna til austurs undir Gráuhnúka.
- Frumsteindir bergsins eru ólivín, plagíóklas, pýroxen og Fe-Ti oxíð. Grunnmassinn er oft glerjaður. Tvígildar katjónir eru í miklu magni í fersku basalti en að meðaltali eru 6 mól af tvígildum katjónum til staðar fyrir hvert 1 kg af bergi í geymslugeyminum í Þrengslum.
- Almennt minnkar lekt og poruhlutfall móbergs með aukinni ummyndun. Gler í móbergi gerir það að verkum að það er viðkvæmt fyrir ummyndun og oft er grunnstætt móberg smektít-zeólíta ummyndað. Það getur þá virkað sem stemmir (e. barrier) á flæði eða lok á geymslugeymi.

- Í Húsmúla stjórn sprungur að miklu leyti flæði í djúpa geymslugeyminum. Sprungustefnur hafa verið flokkaðar í þrennt; NA-lægar sprungur sem sjá má á yfirborði í Húsmúla leiða almennt vökva vel, N-S sprungur leiða vökva inn á NA-lægar sprungur og VNV-ASA sprungur eru stemmar á flæði. Til að geta hermt flæði vökva vel er nauðsynlegt að taka tillit til fleiri þátta eins og berggerðar, ummyndunar og poruhluta.
- Úti á sléttunni í Jarðhitagarði ON vestan við Hellisheiðarvirkjun hafa engar sprungur verið kortlagðar, enda nýlegt hraun á yfirborði. Það útilokar þó ekki sprungur í berggrunninum og hafa tvö misgengi úr Húsmúla og vesturhlíðum Sleggjubeinsdals verið rakin með nokkurri vissu með þyngdarmælingum til suðurs í átt að Litla-Reykjafelli og Reykjafelli.
- Jarðlög í geymslugeyminum (350–750 m) í Jarðhitagarði ON skiptast í móberg efst (niður á um 400 m dýpi) og taka svo hraunlög við þar fyrir neðan. Lekt er aðallega bundin við mót mismunandi hraunlaga og móbergseininga. Gera má ráð fyrir að ummyndun jarðlaganna sé innan smektít-zeólítabeltisins en gæti náð inn í blandlagsbeltið.
- Jarðlög í geymslugeyminum í Þrengslum skiptast í móberg efst (niður á um 400 m dýpi) og taka svo hraunlög við þar fyrir neðan. Lekt er aðallega bundin við mót mismunandi hraunlaga og móbergseininga. Aðeins dýpra er niður á ummyndun í Þrengslum en í Jarðhitagarði ON og má gera ráð fyrir að aðeins verði vart við smektít-zeólíta ummyndun.

## 1.2 Samantekt á efnasamsetningu vökva og skilvirkni steindabindinga í geymslugeyminum

Geymslusvæðið sjálft, þ.e. áhrifasvæði fyrirhugaðrar niðurdælingar Carbfix ohf. neðanjarðar, afmarkast gróflega af Húsmúla og Skarðsmýrarfjalli í norðri og Þrengslum í suðri. Árið 2012 fór fram tilraunaniðurdæling á CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S sem var uppleyst í vatni og dælt niður í geymslugeymi Carbfix í Þrengslum, þ.e. í millikerfið, og frá árinu 2014 hefur CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S frá Hellisheiðarvirkjun verið uppleyst í vatni og dælt niður í Carbfix2-geymslugeymi í Húsmúla, þ.e. í djúpkerfið.

### Efnasamsetning vökva:

- **Þrengsli:** Grunnvatnskerfið í Þrengslum skiptist í tvennt en þétt móbergsmyndun skilur á milli efri og neðri hluta kerfisins. Sjáanlegar breytingar urðu á efnasamsetningu vökva í Þrengslum þegar CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S var dælt niður til tilraunar í neðri hluta kerfisins, þ.e. í millikerfið. Sýru- og mettunarstig vökva lækkaði skömmu eftir að niðurdæling á CO<sub>2</sub> hófst en 6–8 vikum seinna tók það að hækka aftur. Þegar tilraunaniðurdælingu lauk færðist efnasamsetning vökvans aftur nálægt þeim bakgrunnsgildum sem mældust fyrir niðurdælingu.
- **Húsmúli og Skarðsmýrarfjall:** Engar breytingar urðu á sýrustigi vökvans í geymslugeyminum á meðan þriggja ára ferilefnavöktun stóð yfir en hitastig lækkaði lítillaga. Mest mældist af tvígildu katjóninni kalsíum en magnið minnkaði er leið á niðurdælingartímabilið. Á sama tíma hækkaði bakgrunnsgildi uppleysts CO<sub>2</sub> í vökva vöktunarholnanna. Eftir þrjú og hálf ár af niðurdælingu á CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S uppleystu í vatni hefur lekt í niðurdælingarholum ekki minnkað.

### Skilvirkni steindabindinga:

- Sýnt hefur verið fram á að skilvirkni steindabindingar er mikil við hitastig < 170°C. Því eru millikerfi eins og Carbfix áformar að dæla niður í mjög hentug fyrir niðurdælingu á uppleystu CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S í vatni þar sem hiti er frá ~50°C á ~300 m dýpi og allt að ~200°C á um og yfir ~700 m dýpi. Að auki inniheldur millikerfið meira af fersku basalti, sem hentar vel til steinrenningar á CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S.
- CO<sub>2</sub>-niðurdælingin í Carbfix og Carbfix2, þ.e. í Þrengslum annars vegar og Húsmúla og Skarðsmýrarfjalli hins vegar, sýndi fram á hraða myndun karbónatsteinda og súlfíða. Í millikerfi Þrengsla var skilvirkni steindabindingar reiknuð sem 95% af niðurdældu CO<sub>2</sub> á meðan skilvirkni steindabindingar var reiknuð sem 60% af niðurdældu CO<sub>2</sub> í djúpkerfi Húsmúla og Skarðsmýrarfjalls. Þessi skilvirkni steindabindinga er metin út frá gögnum sem safnað er úr vöktunarholunum en gert er ráð fyrir að steindabindingin nái til stærra svæðis en vöktunarholurnar ná til.
- Skilvirkni steindabindingar jókst úr 50% í 60% í geymslugeyminum í Húsmúla þegar magn uppleysts CO<sub>2</sub> í niðurrennslisvökva var tvöfaldað. Ástæðan er talin vera lækkað sýrustig niðurdælingarvökvans og þar með meiri uppleysing bergs, sem leiðir af sér aukið framboð tvígilda katjóna.
- Viðbúið er að viðbót á CO<sub>2</sub> í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi Húsmúla, eins og Carbfix áformar, gæti aukið magn CO<sub>2</sub> í jarðhitavökva geymslugeymisins vegna minnkaðrar skilvirkni steindabindingar í djúpkerfinu. Þetta gæti því haft áhrif á framleiðslueiginleika þess jarðhitavökva sem nýttur er til vinnslu og gæti sömuleiðis aukið flæði CO<sub>2</sub> í vinnsluholum.

### 1.3 Samantekt á náttúrulegu flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð

Náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð frá jarðhitasvæðum fer fram með tvennum hætti; annars vegar sem streymi frá takmörkuðum uppsprettum, s.s. hverum, gufuaugum o.fl., og hins vegar sem flæði í gegnum jarðveg. Þegar dæla á niður uppleystu CO<sub>2</sub> í vatni til steinrenningar í geymslugeymi er nauðsynlegt að þekkja náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð á áhrifasvæði fyrirhugaðrar niðurdælingar til þess að þekkja grunnástandið áður en niðurdæling hefst. Þegar svo niðurdæling á CO<sub>2</sub> hefst eru gasflæðimælingar endurteknar og þannig er fylgst með því hvort flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð hafi aukist á áhrifasvæðinu.

Gasflæðimælingar á fyrirhuguðu áhrifasvæði niðurdælingar Carbfix hafa að hluta til þegar verið gerðar og má því leiða að því líkum að þær séu til vitnis um náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð þ.a. grunnástandið er þekkt. Þær niðurstöður sem liggja fyrir eru hins vegar ekki frá mælingum sem voru gerðar á sama tíma; fyrstu mælingar voru í Þrengslum árið 2008 og nýjustu mælingar á áhrifasvæði Carbfix eru frá árinu 2022. Mælipunktarnir eru 682 talsins og sýna langflestir gildi sem flokkast sem bakgrunnsgildi, eða gildi þar sem jarðhitaáhrifa gætir ekki. Niðurstöður mælinganna hafa verið notaðar til að tengja saman bakgrunnsgildi mælinga við yfirborðsgerð á áhrifasvæðinu og flokkunin yfirferð á allt svæðið. Þannig var bakgrunnsgildi flæði alls áhrifasvæðisins metið og nýtist sem grunnmæligildi fyrir vöktunarmælingar á CO<sub>2</sub>-flæði til yfirborðs.

## 1.4 Samantekt á jarðskjálftavirkni

Hengilssvæðið er náttúrulega virkt jarðskjálftasvæði sökum staðsetningar þess á þrípunkt Reykjanesskagans, Vesturgosbeltisins og Suðurlandsbrotabeltisins. Jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu, og þar með á fyrirhuguðu áhrifasvæði niðurdælingar Carbfix á Hellisheiði, hefur verið samfellt vöktuð frá árinu 1995, fyrst með SIL-landsneti jarðskjálftamæla Veðurstofu Íslands frá árinu 1995, og svo frá árinu 2016 með staðbundnu 10 mæla jarðskjálftamælaneti Orku náttúrunnar og ÍSOR. Á árunum 2018 til 2021 var svo rekið tímabundið þétt jarðskjálftamælanet á Hengilssvæðinu, sem hluti af Evrópuverkefni COSEISMIQ, þegar 23 jarðskjálftamælum var bætt við núverandi vöktunarkerfi og samanstóð jarðskjálftamælanetið á Hengilssvæðinu því af 37 jarðskjálftamælum á þeim tíma.

Jarðskjálftavirkni sem mælist á Hengilssvæðinu öllu er talin vera af þrennum toga, þ.e. i) af náttúrulegum orsökum, ii) örvuð vegna vinnslu jarðhita og iii) örvuð vegna niðurdælingar vatns. Náttúruleg jarðskjálftavirkni getur orsakast af tektónískum hreyfingum, spennubreytingum vegna landhæðarbreytinga eða ferla í jarðhitakerfunum, og mælist hún víðs vegar í þyrpingum á Hengilssvæðinu. Truflun á náttúrulegu spennuástandi í bergi, t.d. vegna þrýstilækkunar í jarðhitakerfinu og suðu af völdum vinnslu, eða vegna niðurdælingar vatns, getur sömuleiðis leitt til þess að spennuorka, sem bundin er í berginu, losni í örvuðum jarðskjálfta. Frá því að vinnsla jarðhita og niðurdæling hófst hefur örvuð jarðskjálftavirkni mælst víðs vegar í þyrpingum á Hengilssvæðinu.

Frá upphafi mælinga er náttúruleg jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu að mestu bundin við tvær stórar hrínur árin 1952–1955 og 1994–1998. Seinni hrinan, sem er betur skráð en sú fyrri, er talin hafa orsakast af spennubreytingum vegna kvikuinnskots í Grensdalseldstöðinni. Jarðskjálftavirkni í hrínunni mældist í þyrpingum og á sprungum víðs vegar um Hengilssvæðið, þó fyrst og fremst á norðausturhluta þess og allt suður á Bakkasvæðið í Ölfusi. Miðað við fyrirliggjandi gögn og rannsóknir er ljóst að náttúruleg jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu á sér stað í þyrpingum og á virkum sprungum víðs vegar um Hengilssvæðið frekar en að vera jafndreifð um svæðið. Almennt er talið að mörk deigu og brotgjörnu jarðskorpunnar á Hengilssvæðinu liggi á um 5–7 km dýpi og virðast jarðskjálftar hvelfast dýpra til suðurs og norðurs af Hellisheiði. Sú jarðskjálftavirkni sem talin er stafa af náttúrulegum orsökum á sér stað í dýpri hluta brotgjörnu jarðskorpunnar, eða frá um 2 km niður á 7 km dýpi.

Áhrif vinnslu á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði er mjög mismunandi eftir svæðum, líklegast fyrst og fremst vegna mismunandi svæðisbundins spennuástands. Þannig virðist vinnsla á aðalvinnslusvæði Hellisheiðarvirkjunar, þ.e. innan sprungusveims Hengilssvæðisins frá Skarðsmýrarfjalli í norðri suður að Þjóðvegi 1 á Hellisheiði, hafa lítil sem engin áhrif á jarðskjálftavirkni þrátt fyrir þann mikla niðurdrátt og vinnslu sem þar á sér stað. Leiða má að því líkum að meiri lekt og lægra spennuástand innan sprungusveimsins, en við jaðra hans, sé þess valdandi að áhrif vinnslu á jarðskjálftavirkni á þessu svæði séu hverfandi. Ólíka sögu er að segja af Hverahlíð, sem er rétt austan við sprungusveim Hengilssvæðisins, en þar virðist þrýstilækkun og niðurdráttur í jarðhitakerfinu í kjölfar þess að vinnsla hófst árið 2016 hafa þau áhrif að gufupúði hefur myndast. Þannig hófst jarðskjálftavirkni í Hverahlíð samhliða vinnslunni og virðist því örvuð af vinnslunni. Talið er að jarðskjálftarnir einskorðist við gufupúða sem hefur myndast, þ.e. afmarki það svæði þar sem massataka á sér stað, en virknin einkennist af dreifðri smáskjálftavirkni sem virðist ekki raða sér á virkar sprungur.



Áhrif niðurdælingar á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði er að sama skapi mjög mismunandi eftir svæðum. Núverandi niðurdælingarsvæði eru í Gráuhnúkum, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Skarðsmýrarfjalli og Hverahlíð, auk þess sem dælt hefur verið niður í grunnar holur í Þrengslum um tveggja ára skeið. Niðurdæling í holur sem boraðar eru innan sprungusveims Hengilssvæðisins, þ.e. í Gráuhnúkum, á Skarðsmýrarfjalli og í Hverahlíð, virðist ekki örva jarðskjálftavirkni nema upp að litlu marki. Leiða má að því líkum að lægra spennuástand innan sprungusveimsins sé þess valdandi að áhrif niðurdælingar á jarðskjálftavirkni á þessu svæði séu hverfandi, líkt og með áhrif vinnslu. Hins vegar er spennuástand utan sprungusveimsins, og við jaðra hans, væntanlega hærra, og því krítiskara og viðkvæmara fyrir niðurdælingu vatns. Dæmi þess til sönnunar eru frá Húsmúla, eins og frægt er orðið, og í Sleggjubeinsdal upp að vissu marki. Í Húsmúla fylgdi allmikil örvuð jarðskjálftavirkni upphafi niðurdælingar í september 2011 og náði hún hámarki um mánuði síðar þegar tveir stærstu jarðskjálftarnir, um 4 M<sub>L</sub> að stærð, urðu. Eftir að þessu hámarki var náð var dregið úr heildarmagni niðurdælingar og minnkaði jarðskjálftavirkni að sama skapi. Vísbendingar eru um að niðurdæling í Húsmúla hafi nú losað um mestu mismunaspennuna og að nokkurs konar vökva- og þrýstjafnvægi sé að komast þar á. Árið 2014 var CO<sub>2</sub> í fyrsta skipti leyst upp í niðurdælingarvatni í Húsmúla en sú breyting á efnasamsetningu vökvans olli ekki aukningu í jarðskjálftavirkni.

Carbfix áformar, eins og áður segir, aukna niðurdælingu á CO<sub>2</sub> í borholur á Hellisheiði á þrennan hátt. Niðurstöður frummats á jarðskjálftahættu vegna þessara áforma eru á eftirfarandi leið:

- Í ljósi fyrirbyggjandi gagna er niðurstaða frummats fyrir aukið magn af uppleystu CO<sub>2</sub> í núverandi niðurdælingu í djúperfi Húsmúla, skv. reglum Orkustofnunar (nr. OS-2016-R01-01) að svæðið falli áfram undir 3. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að hætta sé á finnanlegri jarðskjálftavirkni. Ætla má að jarðskjálftavirkni verði þó aldrei jafnmikil og í upphafi niðurdælingar árið 2011 sökum þess að stöðug niðurdæling hefur leyst út svæðisbundna spennu jafnóðum og eru líkur á stórum jarðskjálfta (> 3 M<sub>L</sub>) sömuleiðis minni.
- Í ljósi fyrirbyggjandi gagna er niðurstaða frummats fyrir niðurdælingu í nýjar, grynri holur í „millikerfi“ í Jarðhitagarði ON, skv. reglum Orkustofnunar (nr. OS-2016-R01-01) að svæðið falli undir 2. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni sé óveruleg. Almenn er ekki talið að grunn niðurdæling í millikerfi á jarðhitasvæðum valdi örvaðri jarðskjálftavirkni enda sé ekki beint þrýstisamband milli millikerfisins og jarðhitakerfisins þar sem bergspenna er hærri og jarðskorpan er nógu sterk til að brotna í jarðskjálfta. Dæmi þessu til staðfestingar eru um grunna niðurdælingu í Þrengslum, á Nesjavöllum og Þeistareykjum, ásamt dæmum um framrás kvikuganga, en þessi dæmi sýna öll að jarðskorpan í efstu ~2 km í gosbeltinu á Íslandi sé almennt of veik til þess að brotna í jarðskjálftum. Hafa ber í huga að misgengi úr Húsmúla annars vegar og vesturhlíðum Sleggjubeinsdals hins vegar hafa verið rakin með þyngdarmælingum til suðurs í átt að Litla-Reykjafelli og Reykjafelli. Sú jarðskjálftavirkni sem mælst hefur á 1–3 km dýpi innan Jarðhitagarðs ON frá 2016, sem líklega er örvuð vegna djúprar niðurdælingar í Húsmúla, fellur innan þess svæðis sem þessi tvö misgengi afmarka og því er ráðlegt að auka niðurdælingu í litlum skrefum og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar þegar i) boranir hefjast, ii) þegar niðurdæling hefst og iii) þegar magn niðurdælingar er aukið.

- Í ljósi fyrirbyggjandi gagna er niðurstaða frummati fyrir niðurdælingu í nýjar, gynnri holur í millikerfi á núverandi niðurrennsliðsvæðum, s.s. í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka, skv. reglum Orkustofnunar (nr. OS-2016-R01-01) að svæðin falli undir 2. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni sé óveruleg. Rökstuðningur er sá sami og á við frummat fyrir niðurdælingu í nýjar, gynnri holur í millikerfi í Jarðhitagarði ON. Ráðlegt er að auka niðurdælingu í litlum skrefum og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar þegar i) boranir hefjast, ii) þegar niðurdæling hefst og iii) þegar magn niðurdælingar er aukið.

Áhrifasvæði áætlaðrar niðurdælingar Carbfix á jarðskjálftavirkni kemur líklega til með að afmarkast af Húsmúla í norðri, Skarðsmýrarfjalli og Lakahnúkum í austri, Stóra-Meitli í suðri og Svínahrauni í vestri, líkt og sýnt er á mynd 21 í þessari skýrslu. Mat á áhrifasvæðinu er byggt á fyrirbyggjandi gögnum um jarðskjálftavirkni en líklegt er talið að raunverulegt áhrifasvæði komi til með að verða minna að flatarmáli.

## 2 Inngangur

Eldstöðvakerfi Hengils er eitt af sex virkum eldstöðvakerfum Reykjanesskaga en síðasta eldgos innan kerfisins varð fyrir um 1900 árum (Kristján Sæmundsson og Magnús Á. Sigurgeirsson, 2013). Hengilskerfið er staðsett á svokölluðum þrípunkti þar sem mætast þrjú gos- og brotabelti, Reykjanesskaginn, Vesturgosbeltið og Suðurlandsbrotabeltið. Hengils-svæðið er því náttúrulega virkt jarðskjálftasvæði en að auki mælist þar jarðskjálftavirkni af völdum vinnslu og niðurdælingar jarðhitavökva. Víða má sjá jarðhita á yfirborði á Hengils-svæðinu og hefur hann verið rannsakaður síðan um miðbik síðustu aldar. Jarðhitinn er nýttur til raforku- og heitavatnsframleiðslu í virkjunum á Nesjavöllum og Hellisheiði. Þá hafa undanfarinn áratug farið fram tilraunir með niðurdælingu koldíoxíðs (CO<sub>2</sub>) í jarðlög til förgunar með steinrenningu. Þessar tilraunir hafa gefið góða raun og hefur Carbfix ohf. nú uppi áform um aukna niðurdælingu á Hellisheiði.

Þessi skýrsla er unnin að beiðni Carbfix ohf. vegna umhverfismats niðurdælingar CO<sub>2</sub> á Hellisheiði, í samræmi við lög nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana. Í umhverfismatinu þarf að gera grein fyrir og meta áhrif framkvæmdarinnar á geymslugeyminn og jarðskjálftavirkni á svæðinu og fól Carbfix Mannviti að hafa umsjón með umhverfismatinu. Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir grunnástandi geymslusvæðisins út frá fyrirbyggjandi gögnum um yfirborðsjarðfræði og jarðfræði berggrunnins, eðlis- og efnaeiginleika berggrunns, grunnvatns og jarðhitavökva, skilvirkni steindabindingar, jarðskjálftavirkni á svæðinu, ásamt niðurdælingar- og borholugögnum. Að auki er mat lagt á þau hugsanlegu áhrif sem framkvæmd Carbfix kann að hafa á jarðskjálftavirkni á svæðinu en möguleg náttúruvá á fyrirhuguðum geymslusvæðum Carbfix á Hellisheiði tengist fyrst og fremst jarðskjálftum.

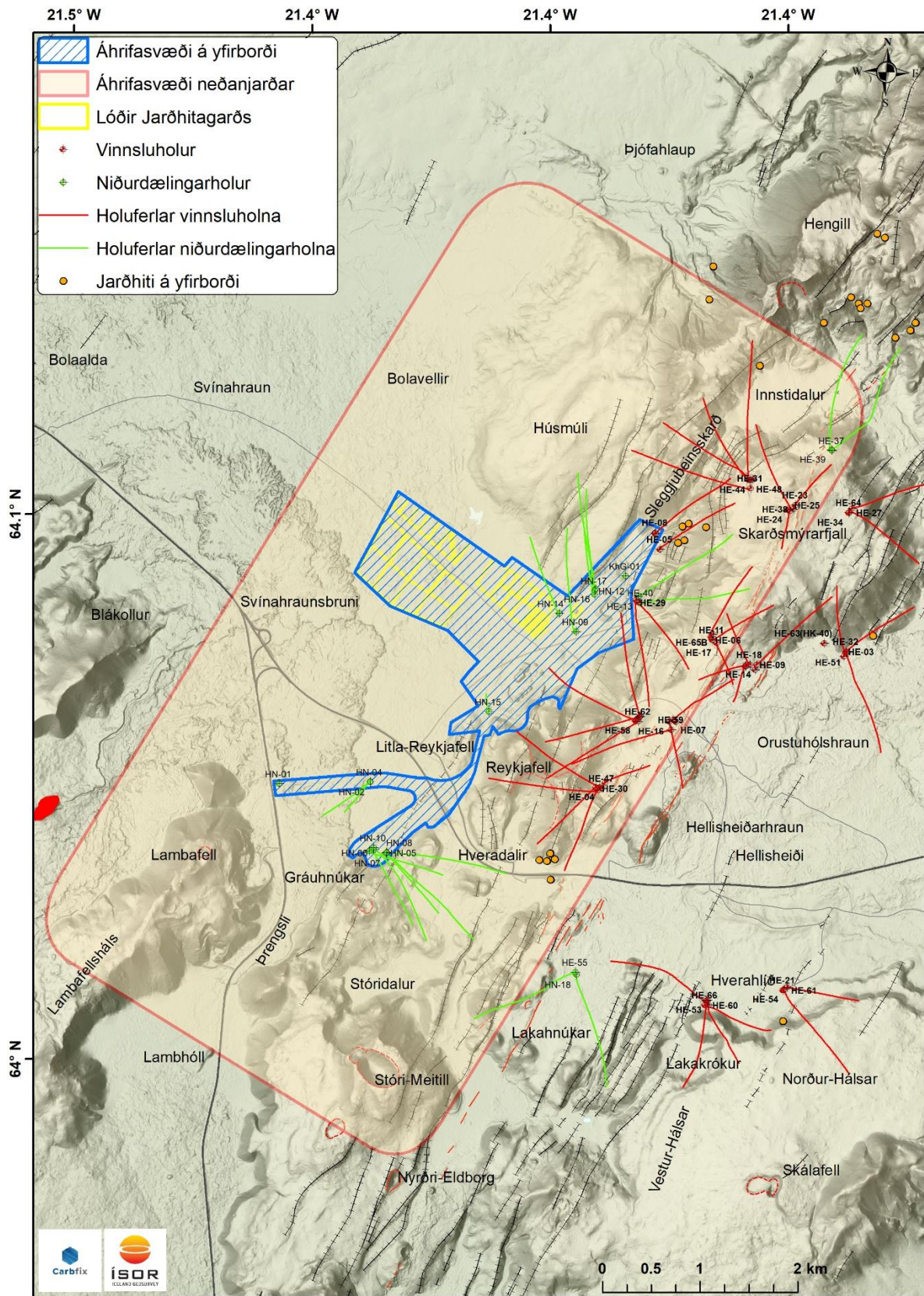
Carbfix-tæknin hefur verið þróuð á Hellisheiði frá árinu 2011 þegar fyrsta tilraunaniðurdælingin á CO<sub>2</sub> átti sér stað í Þrengslum. Snemma árs 2012 var á geymslusvæðinu í Þrengslum sýnt fram á hraðari steinrenningu en áður hafði verið talið mögulegt en yfir 95% af 175 tonnum af CO<sub>2</sub> sem dælt var niður í tilraunaskyni hafði steinrunnið innan tveggja ára (Sandra Snæbjörnsdóttir o.fl., 2018b). Síðan þá hefur CO<sub>2</sub> verið dælt niður í tilraunaskyni sem hluti af rekstri Hellisheiðarvirkjunar. Niðurdæling frá hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjun í niðurdælingarholu á geymslusvæðinu við Húsmúla hófst árið 2014 og var þá um 4.000 tonnum af CO<sub>2</sub> dælt niður á ári og um 2.500 tonnum af H<sub>2</sub>S. Niðurdæling frá Hellisheiðarvirkjun hefur verið augin í skrefum frá 2014 og nemur nú um 12.000 tonnum af CO<sub>2</sub> og um 5.000 tonnum af H<sub>2</sub>S á ári, eða um 33% af CO<sub>2</sub> og um 75% af H<sub>2</sub>S-losun virkjunarinnar. Árið 2017 hófst tilraunaniðurdæling í Húsmúla á allt að 50 tonnum af CO<sub>2</sub> sem fangað var beint úr andrúmslofti. Afköst lofthreinsiversins eru um 4.000 tonn af CO<sub>2</sub> á ári og er því dælt niður í borholur í Gráuhnúkum.

### 3 Áhrifasvæði niðurdælingar og jarðfræðilegt grunnástand

Svæði þar sem mannvirki og starfsemi Carbfix vegna niðurdælingar CO<sub>2</sub> verða staðsett, þ.e. áhrifasvæði á yfirborði, er á vesturhluta iðnaðarsvæðisins á Hellsheiði og afmarkast á yfirborði af niðurdælingarsvæði í Þrengslum, Jarðhitagarði Orku náttúrunnar (ON) og niðurdælingarsvæði ON í Húsmúla, og er alls 4 km<sup>2</sup>. Niðurdælingar- og geymslusvæðið sjálft, þ.e. áhrifasvæði fyrirhugaðrar niðurdælingar neðanjarðar, kemur hins vegar til með að ná yfir stærra landfræðilegt svæði undir yfirborði og miðast því athugunarsvæði tengt grunnástandi og mati á umhverfisáhrifum fyrirhugaðrar framkvæmdar við stærra landfræðilegt svæði en framkvæmdasvæðið á yfirborði (mynd 1).

Jarðfræði, jarðhnik, efnasamsetning og lekt jarðlaga á Hengilssvæðinu mótast af þeim flóknu aðstæðum sem skapast á þessum svokallaða þrípunkti þar sem mætast Reykjanesskaginn, Vesturgosbeltið og Suðurlandsbrotabeltið. Hér verður gerð grein fyrir aðstæðum í einfaldaðri mynd með sérstöku tilliti til verkefnisins sem um ræðir, þ.e. niðurdælingu CO<sub>2</sub> og mögulegum umhverfisáhrifum hennar. Ýmsar rannsóknir hafa verið gerðar á svæðinu, m.a. í tengslum við jarðhitánýtingu, auk niðurdælingar og steinrenningar CO<sub>2</sub> neðanjarðar.

Í þessum kafla er yfirborðsjarðfræði svæðisins lýst, þ.e. jarðlögum, sprungum og jarðhita-ummerkjum. Þá er jarðfræði berggrunnsins lýst, þ.e. jarðlagamyndunum, ummyndun, sprungum og vatnsæðum. Einnig er gert grein fyrir eðlis- og efnaeiginleikum berggrunnsins. Gagna á svæðinu hefur í gegnum tíðina verið aflað með yfirborðsrannsóknum eins og jarðfræðikortlagningu, auk jarðeðlisfræðilegra mælinga eins og jarðskjálfta- og viðnámsmælinga. Þá hefur mikið magn gagna safnast við boranir, m.a. borsvarf og mælingar sem hafa verið gerðar í borholum. Eftirlitsmælingar í borholum gefa til að mynda upplýsingar um flæði vökva í grunnvatns- og jarðhitakerfinu. Bergsýni og vökvar úr borholum hafa verið efnagreind og líkanreikningar gerðir til að herma aðstæður sem skapast við niðurdælingu.



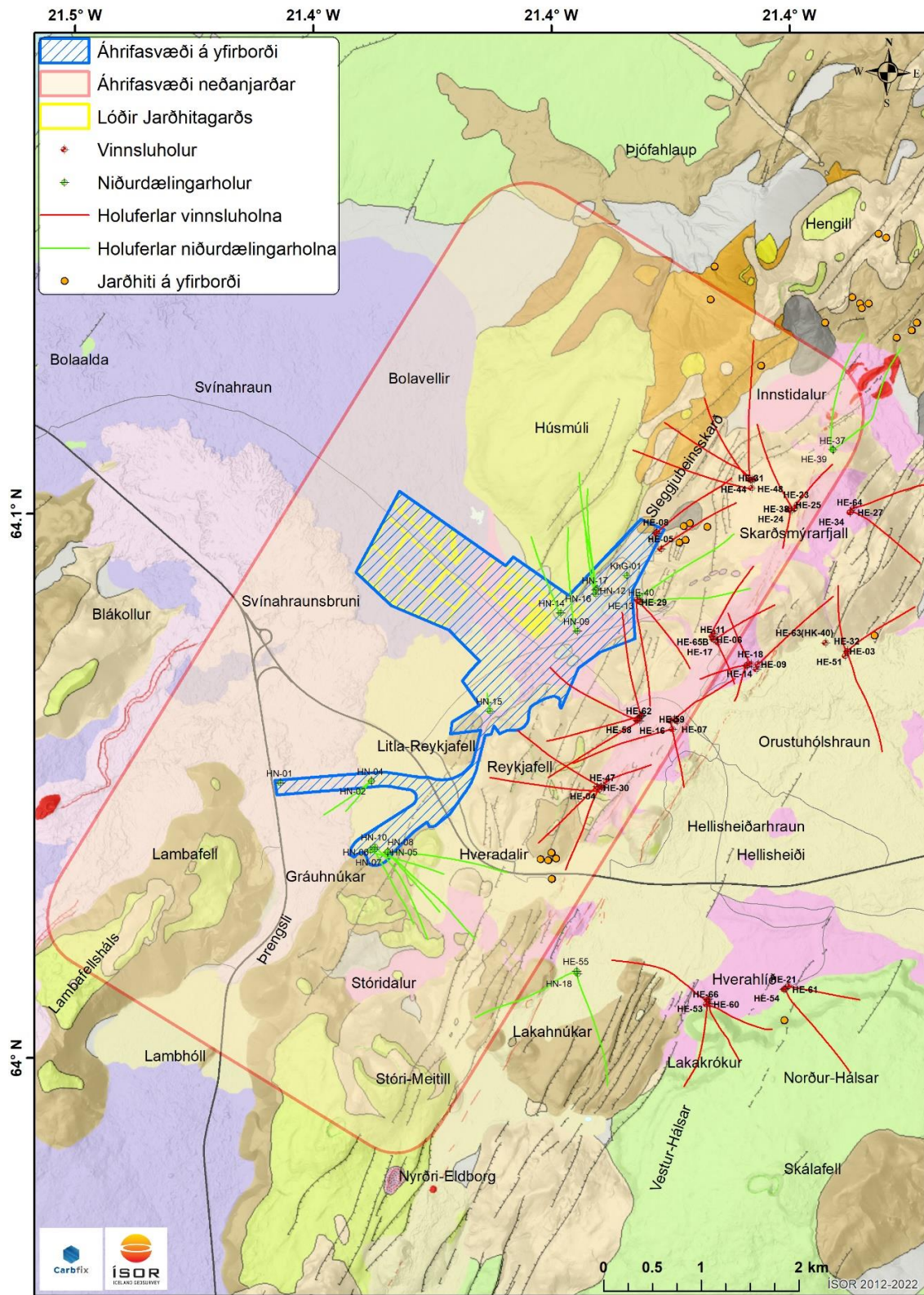
**Mynd 1.** Yfirlitskort sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar CO<sub>2</sub> á yfirborði og neðanjarðar, auk lóða Jarðhitagarðs ON. Holutoppar og holuferlar vinnslu- og niðurdælingarholna eru í rauðum og grænum lit. Jarðhiti á yfirborði er sýndur með appelsínugulum punktum, ásamt kortlögðum sprungum, misgengjum og gossprungum (byggt á jarðfræðikorti Kristjáns Sæmundssonar o.fl., 2016).

### 3.1 Yfirborðsjarðfræði

Hengilskerfið samanstendur af megineldstöð, sprungusveim og sigdæld sem liggur með NNA stefnu, u.þ.b. 60–100 km leið frá Selvogi í suðvestri til norðausturs í átt að Langjökli. Breidd sprungusveimsins um Hengil er um 5 km en um 10 km um Þingvallavatn (Kristján Sæmundsson, 1992). Þróað berg er að finna á nokkrum stöðum í Henglinum, og einnig háhitakerfi, en slíkt einkennir megineldstöðvar. Tilvist grunnstæðs kvikuhólfs undir Hengli hefur ekki verið staðfest. Nýlegar jarðeðlisfræðilegar mælingar hafa sýnt djúpstætt lágviðnámslag undir Hengli (Arnar Már Vilhjálmsson o.fl., 2019) og almennt er talið að mörk deigu og brotgjörnu jarðskorpunnar liggi á 5–7 km dýpi undir Hengilssvæðinu (Ka Lok Li o.fl., 2019; Anne Obermann o.fl., 2022).

Áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði er staðsett á vesturjaðri sprungusveims Hengils, frá Húsmúla í norðri og suður í Þrengsli (mynd 2). Landslagið til austurs einkennist af móbergs-hryggjum sem hlaðist hafa upp á jökulskeiðum og liggja þeir nokkurn veginn í NNA-stefnu, nálægt því þvert á rekstefnu. Á láglandi eru nútímahraun sem runnið hafa eftir að jökla leysti. Austan áhrifasvæðisins og ofar á Hellisheiði má sjá gossprungur og gíga frá nútíma. Þaðan hafa Hellisheiðarhraunin fjögur, A, B, C og D, runnið (mynd 2). Hellisheiðarhraun A (10.000 ára) sést hér og þar á Hellisheiði en stærsti flákinn er á Hellisheiði, og liggur upp að Hverahlíð. Á áhrifasvæðinu eru Hellisheiðarhraun B/C, sem eru um 5700 ára gömul, og þar er einnig að finna Hellisheiðarhraun D sem er um 1800 ára (John Sinton o.fl., 2005). Leitahraun (5200 ára) er umfangsmikið dyngjuhraun sem liggur innan áhrifasvæðisins í norðvestri og þekur stórt svæði norðan, vestan og sunnan til við svæðið. Þá teygir áhrifasvæðið sig inn í Svínahraunsbuna (öðru nafni Kristnitökuhraun, sem er 1000 ára) í suðvestri. Húsmúli er grágrytisdyngja frá lokum síðasta hlýskeiðs en norðanvert í henni glittir í bólstrabergssökkul (Helgi Torfason o.fl., 1983). Á norðurhluta áhrifasvæðisins má finna setlög sem eru tilkomin vegna framburðar úr ám og lækjum.





**Mynd 2.** Jarðfræðikort sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar, auk lóða Jarðhitagarðs ON. Holutoppar og holuferlar vinnslu- og niðurdælingarholna eru í rauðum og grænum lit. Jarðhiti á yfirborði er sýndur með appelsínugulum punktum. Dökkbrúnir og ljósbrúnir flákar tákna móberg og fjólubláir, bleikir og grænir tákna hraun. Svartar, mjóar línur tákna sprungur og misgengi og rauðar línur tákna gossprungur (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016).

Bergið í Hengilskerfinu tilheyrir þóleiðsku berggröðinni sem almennt einkennist af frekar háu magni af Fe og Ti en litlu magni af Al og Ca (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008). Meðalefnasamsetning fersks basalts innan Hengilssvæðisins er sýnd í töflu 1. Ólivín-þóleiit er langalgengasta berggerð Hengilskerfisins en pikrít og þóleiit finnast líka (allt basalt). Grunnmassi ólivín-þóleiits samanstendur af eftirfarandi steindum: ólivín, plagióklas, pýroxen og Fe-Ti oxíð. Grunnmassinn er oft glerjaður, sérstaklega í hraðkældum hraunlagakarga og í móbergsmýndunum. Algengt er að sjá stóra plagióklasdila í ólivín-þóleiitinu en einnig sjást stundum minni ólivíndílar. Þróaðra berg finnst í vestanverðum Hengli en einnig í borholum sem innskot þótt innskot séu oftast af basaltsamsetningu.

**Tafla 1.** Meðalefnasamsetning fersks basaltglers innan Hengilskerfisins. Efnahlutföll eru gefin í wt%. (Reidar G. Trønnes, 1990). Hópaskipting endurspeglar þróun kviku frá frumstæðri kviku (hópur 1) í þróaðri kviku (hópur 4).

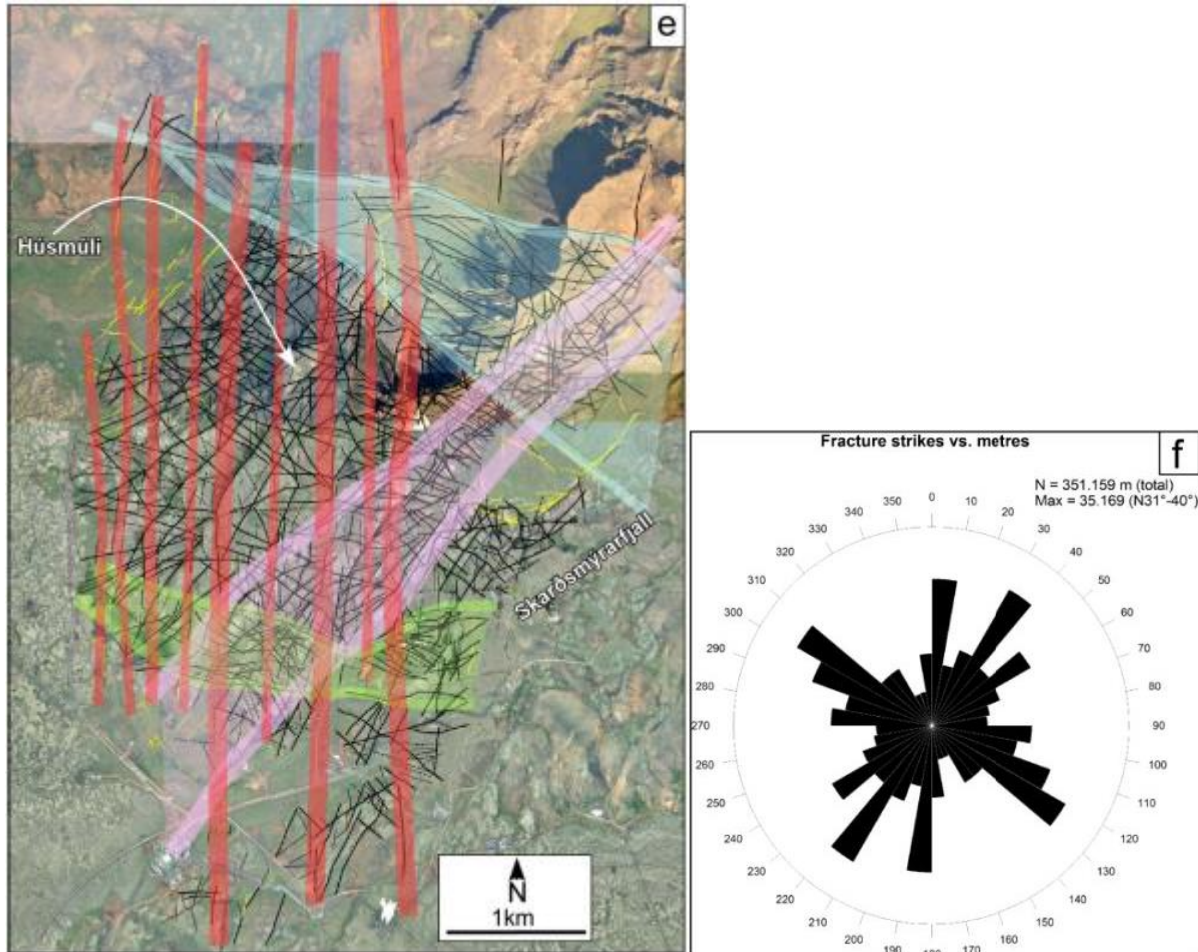
	Hópur 1 (6 sýni)	Hópur 2 (88 sýni)	Hópur 3 (6 sýni)	Hópur 4 (3 sýni)
SiO <sub>2</sub>	48.4	48.6	50.1	52.7
TiO <sub>2</sub>	0.86	2.11	2.98	2.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.1	14.0	13.4	13.2
FeO	9.12	12.1	13.9	13.7
MnO	0.18	0.20	0.27	0.24
MgO	9.29	6.85	4.86	3.78
CaO	15.3	12.2	9.61	8.26
Na <sub>2</sub> O	1.71	2.50	2.84	2.95
K <sub>2</sub> O	0.01	0.30	0.68	0.81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.24	0.60	0.78

Hengilssvæðið er, eins og áður segir, staðsett á þrípunkti og er jarðhnik á svæðinu undir áhrifum rek- og sniðgengishreyfinga Reykjanesskaga, Vesturgosbeltisins og Suðurlandsbrotabeltisins. Áhrifin koma fram í flóknari sprungustefnum á yfirborði en t.d. má sjá á Reykjanesskaga. Þær sprungur og misgengi sem eru hvað mest áberandi á Hengilssvæðinu eru með NNA-stefnu (~N30°) en þær orsakast af gliðnunarhreyfingum (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Í Reykjafelli og Stóra-Meitli, rétt austan fyrirhugaðs áhrifasvæðis á yfirborði, má sjá áberandi misgengi með þessa sömu stefnu en það svæði hefur verið kallað „mini-graben“ (Björn S. Harðarson o.fl., 2015). Norðan fyrirhugaðs áhrifasvæðis á yfirborði er Húsmúli en þar má sjá stórar sprungur og misgengi á yfirborði. Mest áberandi eru sprungur með NNA-stefnu tengdar gliðnun en þá hafa einnig verið kortlagðar sprungur tengdar hreyfingum Suðurlandsbrotabeltisins en þær eru með stefnur N-S, ANA, VNV, NV og A-V (mynd 3) (Maryam Khodayar o.fl., 2015).

Sprungur og misgengi hafa mikil áhrif á lekt jarðlaga og því er þýðingarmikið að þekkja legu þeirra fyrir nýtingu jarðhitasvæða. Fyrstu niðurstöður ferilefnaprófana í Húsmúla virtust sýna flæði um sprungur með NNA-stefnu (Bjarni R. Kristjánsson, 2016) en nánari niðurstöður líkanreikninga sýndu að flæðisleiðir stjórnað að öllum líkindum af flóknum sprungukerfum sem geta verið mjög staðbundin (Sandra Snæbjörnsdóttir o.fl., 2018b). Þó er ljóst að niðurdælingarholur í Húsmúla skera misgengi sem á yfirborði hafa NNA-stefnu. Gögn úr þessum borholum, ásamt þeim áhrifum sem niðurdæling hefur haft á jarðskjálftavirkni, sýna að lekt um þessi misgengi er mikil.



Á Hengilssvæðinu má víða finna ummerki um jarðhita á yfirborði (mynd 2). Dæmi um ummerki eru t.d. hverahrúður og ummyndun, heit jörð, leir og gufuhverir. Innan áhrifa-svæðisins á yfirborði eru þó ekki mikil greinanleg ummerki, fyrir utan gufu og leirhverir innst inni í Sleggjubeinsdal.



**Mynd 3.** Kortlagðar sprungur í Húsmúla í tengslum við rannsókn á flæðisleiðum niðurdælingarvököva (vinstri mynd). Svartar línur eru sprungur kortlagðar út frá loftmyndum. Breiðar, litaðar línur sýna kortlögð veikleikabelti. Á mynd til hægri er sprungurós sem sýnir þær sprungustefnur sem hafa verið kortlagðar í Húsmúla (Maryam Khodayar o.fl., 2015).

### 3.2 Jarðfræði, eðlis- og efnaeiginleikar berggrunnnsins

Kortlagning berggrunnnsins er mun flóknari en kortlagning yfirborðsins að því leyti að gögn eru takmarkaðri. Þannig eru helstu gögn sem gagnast við kortlagningu jarðlaga í berggrunni Hengilssvæðisins borholugögn. Einnig hefur verið notast við jarðeðlisfræðilegar mælingar eins og viðnáms- og jarðskjálftamælingar. Hér er farið almennt yfir jarðfræði, eðlis- og efnaeiginleika berggrunnnsins.

Við boranir á háhitaholum fyrir Orku náttúrunnar (ON) hefur verið safnað ítarlegum gögnum úr borholum á meðan borverki stendur og í kjölfar þeirra. Á grundvelli greininga á borsvarfi (bæði með vísja og þunnisneiðum) liggja fyrir jarðlagasúlur úr öllum vinnslu- og niðurdælingarholum sem hafa verið boraðar á Hellisheiði en þessar lýsingar má finna í fjölda

áfangaskýrslna sem gerðar hafa verið í tengslum við boranir. Nákvæmar jarðlagalýsingar hafa svo verið einfaldaðar og jarðlagamyndanir skilgreindar sem oft er hægt að tengja á milli holna á grundvelli einkenna þeirra. Niðurstöður slíkra rannsókna hafa svo verið settar fram í jarðlagasniðum. Á grundvelli þessara sömu gagna hefur ummyndun berggrunnins verið kortlögð.

Ýmis gögn sem safnað er í borverki geta gefið vísbendingar um lekastaði/æðar í holum og er stundum hægt að tengja þá við jarðlagamót eða sprungur sem skera jarðlagastaflann. Þetta eru ekki bara þýðingarmikil gögn fyrir jarðhitarannsóknir heldur einnig mikilvæg gögn með tilliti til niðurdælingar og steinrenningu á CO<sub>2</sub>.

Borholugögn eru þó ákveðnum takmörkunum háð. Borholur eru t.d. ekki dreifðar um allt svæðið heldur boraðar í ákveðnum tilgangi á sérstaklega völdum stöðum. Grunnvatns- og eftirlitsholur á svæðinu eru oftast í mesta lagi 100 m djúpar og ná því aðeins rétt ofan í grunnvatnskerfið. Háhitaholur eru oftast boraðar með borleðju á dýptarbilinu ~300–800 m. Borleðjan hjálpar til þess að þetta holuna á lekastöðum en það veldur því að lekastaðirnir koma síður fram í borun eða mælingum eins og þeir myndu annars gera ef borað væri með vatni. Vitneskjan um lekastaði í háhitaholum er því aðallega neðan ~800 m dýpis.

Jarðeðlisfræðilegar mælingar eins og viðnámsmælingar eru gerðar í ákveðnum punktum eða línunum og ná þannig oft yfir nokkuð stórt svæði. Þá gefa jarðskjálftar upplýsingar um virkar sprungur og sprungusvæði. Hugmyndalíkön eru svo gerð byggð á niðurstöðum jarðeðlisfræðilegra mælinga. Saman með jarðfræðilegri vitneskju úr borholum má því nota jarðeðlisfræðilegar rannsóknir til þess að kortleggja berggrunninn.

Þó efnasamsetning fersks basalts í Hengilskerfinu sé frekar einsleit þá er kristöllun myndana, ásýnd þeirra og útbreiðsla mjög fjölbreytileg. Það helgast af mismunandi myndunarumhverfi, þ.e. hvort til verði hraun eða móberg.

Þegar basaltkvika storknar á yfirborði sem hraun er yfirborð hraunsins glerríkt, þar sem það storknar hratt, en kjarni þess kristallaður. Við afgösun kvikunnar myndast holrými (porur) í berginu. Kjarni hrauna er oftast þéttur en holrýmin aukast er nær dregur yfirborði. Porurnar eru smáar (<mm) og eru tengdar enn smærri göngum sem vatn leikur um. Með tíma og auknum hita geta porurnar smám saman fyllst af ummyndunarsteindum sem falla út úr vökvanum.

Móberg myndast við eldgos undir jökli en ásýnd þess og eðliseiginleikar eru margbreytilegir og helgast af því hversu mikill þrýstingur vatns/íssúlu var við eldgos. Bólstraberg má oft finna neðarlega í móbergsmyndunum en það myndast við háan vatnsþrýsting. Það hefur einkenni sveipi/bólstra sem eru kristallaðir og þéttir í miðjunni en eru glerjaðir og jafnvel poróttir að utan. Túff og breksía hafa myndast þegar vatnsþrýstingur hefur minnkað í eldgosum og eru í eðli sínu samlímd, glerjuð bergbrot (Sveinn P. Jakobsson og Magnús T. Guðmundsson, 2012). Ferskar túffmyndanir og breksíur geta verið nokkuð poróttar en við ummyndun minnkar poruhlutfall og lekt sömuleiðis. Vegna eðlis móbergsmýndana (breytileg kristöllun og staðbundin útbreiðsla) getur verið erfitt að tengja þær saman á milli borholna.

Ummyndun er það ferli sem á sér stað þegar berg breytir um ásýnd og efnasamsetningu vegna áhrifa hita og vatns. Ummerki um þetta ferli má sjá á yfirborði á jarðhitasvæðum en það á sér líka stað í berggrunninum og er sérstaklega öflugt á jarðhitasvæðum. Nokkrir þættir hafa áhrif á ummyndun en lekt bergsins er einn af þeim mikilvægari. Berg sem er þétt í sér og vatn hefur ekki aðgang að ummyndast síður og á lengri tíma en lekt berg. Almenn er þó gert ráð fyrir að

vökvi og steindir í jarðhitakerfum nálgist jafnvægi og eru líkanreikningar gerðir á þeim forsendum.

Ummyndun berggrunnsins hefur verið kortlögð með skoðun á borsvarfi (í víðsjá og þunn-sneið), XRD-leirgreiningum, ýmsum efnagreiningum og með viðnámsmælingum bæði á yfirborði og í borholum. Ummyndunarstig bergs og gerð ummyndunarsteinda hefur verið kortlögð á Hengilssvæðinu. Ummyndun eykst almennt með dýpi og er vitnisburður um hækkandi hita með dýpi. Ummyndunarsteindir sem bæði geta myndast við umbreytingu á frumsteindum bergsins sem og við að falla út í porum og sprungum bergsins geta gefið til kynna það hitastig sem ríkti er steindirnar féllu út (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979) (tafla 2).

Ummyndun er oft skipt upp í ummyndarbelti sem öll hafa einkennandi hitaháðar ummyndunarsteindir. Beltin og ummyndunarhitastigið eru eftirfarandi: zeólíta-smektítbelti (<200°C), blandlagsbelti (200–230°C), klórít-epídót belt (230–280°) og aktínólítbelti (>280°C).

Fyrstu ummerki um ummyndun eru þegar leirsteindin smektít, zeólítar og kalsedón taka að sjást í berginu. Við hækkandi hita fer kvars að myndast (>180°C). Þegar hitastigið er um og yfir 200°C þá breytist leirinn, smektít og klórít rugla saman reytum og úr verður blandlagsleir. Við enn herra hitastig (>230–250°C) verður leirinn að klóríti og epídót myndast ásamt steindum eins og prehnít og wollastónít. Þegar komið er á enn meira dýpi (>280°C) og bergið almennt orðið mikið ummyndað má gera ráð fyrir að aktínólít sé farið að sjást.

Kalsít er ein algengasta ummyndunarsteindin en hún myndast við hita lægri en 300°C. Hefðbundnar vinnsluholur á Hellsheiði eru fóðraðar af niður í klórít-epídót beltíð. Innan þessa verkefnis er fyrirhugað að bora grynnri niðurdælingarholur (<750 m) sem myndu ná niður í zeólíta-smektítbeltið (<200°C).

Ítarlegar rannsóknir hafa verið gerðar á steindasamsetningu ummyndaðs ólivín-þóleiíts á Nesjavöllum (úr borsvarfi) og efnasamsetningu þeirra steinda (Maud J. Smit, 2021; Diego Toro, 2021). Þessar ítarlegu efnagreiningar ríma vel við niðurstöður rannsókna á ummynduðu basalti af sunnanverðu Hengilssvæðinu.

Hitamælingar í borholum eru meðal annars notaðar til þess að áætla berghita í þeim og í jarðhita- og niðurdælingargeyminum. Berghiti er sá hiti sem talinn er hafa ríkt áður en vinnsla eða niðurdæling hófst. Mismunandi ummyndunarsteindir myndast við mismunandi berghita, t.d. þarf berghiti að vera a.m.k. 180°C til þess að kvars myndist. Þó að berghiti lækki eru efnahvörf það hæg að steind eins og kvars leysist ekki upp heldur gætu mögulega aðrar steindir fallið út á yfirborði hennar. Ummyndunarsteind getur því verið til marks um hærri eða lægri berghita en ríkir í jarðhitakerfinu í dag, með öðrum orðum verið vottur um kólnun eða hitnun á svæðinu.

**Tafla 2.** Yfirlit yfir hitaháðar ummyndunarsteindir í háhitakerfum á Íslandi og það hitabil sem þær myndast við (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979; Hjalti Franzson, 1998).

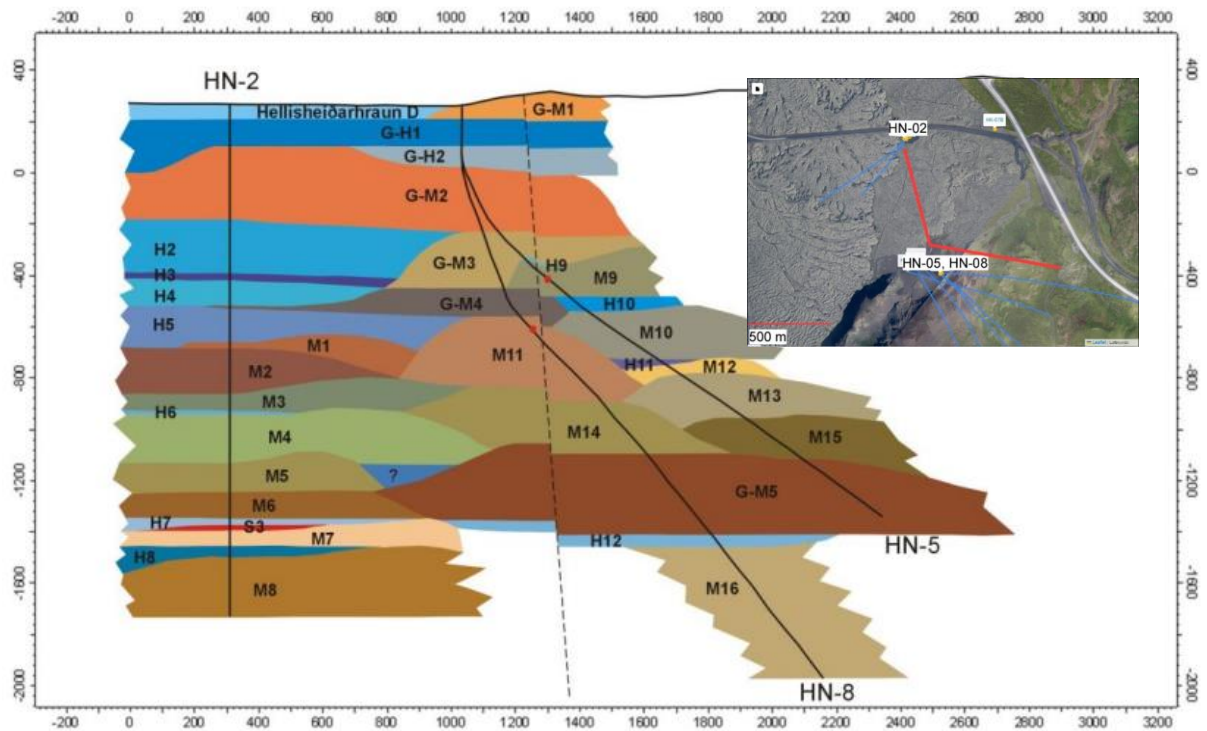
Steindir	Lágmarkshitastig (°C)	Hámarkshitastig (°C)
Zeólítar	40	120
Laumontít	120	180
Kvars	180	> 300
Wairakít	200	
Smektít		< 200
MLC	200	230
Klórít	230	> 300
Kalsít	50-100	280-300
Prehnít	240	> 300
Epídót	230-250	> 300
Wollastónít	260	> 300
Aktínólít	280	> 300
Kalsít hverfur	> ~300	

Það eru nokkrir þættir sem hafa áhrif á lekt í basaltstafla, m.a. poruhluti, tengingar pora, smásæjar sprungur (e. micro fractures), sprungur og ummyndun. Rannsóknir á niðurdælingarsvæðinu í Húsmúla hafa sýnt að sprungur hafa mikil áhrif á lektina í niðurdælingargeyminum (Maryam Khodayar o.fl., 2015). Til að herma flæði í geymslugeyminum er þó nauðsynlegt að taka til greina fleiri þætti eins og berggerð, ummyndun, smásæjar sprungur og porur (Thomas M.P. Ratouis o.fl., 2019; 2022).

Kristöllun móbergs er mjög breytileg og rannsóknir hafa sýnt að lekt og poruhluti er einnig mismikill. Móberg er að uppistöðu basaltgler sem er mjög hvarfgjarnt, næmt fyrir vatni og hita og ummyndast fljótt við slíkar aðstæður. Alla jafna minnkar poruhluti og lekt í móbergi með aukinni ummyndun. Ferskt móberg hefur mælst með 57% poruhluta og lekt upp á  $6,4 \cdot 10^3$  mD en mikið ummyndað móberg hefur mælst með 14% poruhluta og lekt upp á  $10^{-3}$  mD (Frolova o.fl., 2004). Ummyndaðar móbergsmýndanir eða einingar virka oft á tíðum sem lok á jarðhitakerfi þar sem lektin er takmörkuð.

### Jarðlög og ummyndun í nágrenni áhrifasvæðisins

Almennt má segja að jarðlagastaflinn á sunnanverðu Hengilssvæðinu einkennist af móbergsmýndunum og stöku hraunlagasýrpum inni á milli. Það er mjög mismunandi hversu mikið af hraunlögum er að finna í berggrunninum en kortlagning hefur sýnt að undir helstu móbergshryggjum er jafnframt hátt hlutfall móbergs á móti hraunlögum. Til dæmis er í berggrunni Skarðsmýrarfjalls og Reykjafells aðeins að finna móbergsmýndanir, sem bendir til þess að þessi svæði hafi lengi verið hálend og undir jökli (Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2018a; Sveinborg H. Gunnarsdóttir, 2012). Sama á við um nágrenni Lambafells í Þrengslum og Gráuhnúka (Helga M. Helgadóttir, 2011; Helgi A. Alfredsson, 2013). Á milli jökulskeiða hafa hraun runnið frá hálendi og hlaðist upp í lægðum og dölum á láglandi. Vesturhluti Gráuhnúkasvæðisins hefur t.d. verið láglandur ef marka má hátt hlutfall hraunlaga miðað við móberg (mynd 45).



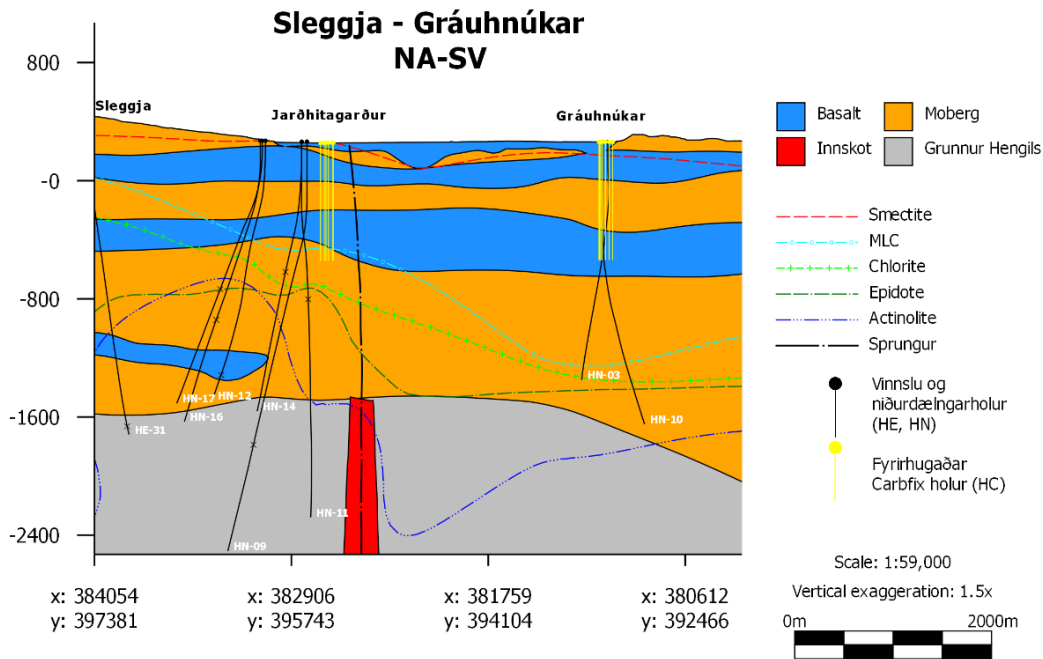
**Mynd 4.** Þversnið frá vestri til austurs sýnir jarðlög á Gráuhnúkasvæðinu. Móbergsmýndanir eru brúnar og hraunlög blá (Helga M. Helgadóttir, 2011). Vestanvert á svæðinu má sjá herra hlutfall hraunlaga í berggrunninum en austan til á svæðinu. Það er vísbending um að Gráuhnúkar hafi lengi verið hálendir. Staðsetning þversniðs er sýnt með rauðri línu á innfelli myndinni, ásamt þjóðvegi nr. 1.

Undir móbergsmýndunum sem almennt er að finna í berggrunninum tekur við hraunlagasyrpa, ummyndað, kristallað berg sem er talið hafa verið til staðar áður en eldvirkni hófst í megineldstöðinni Hengli fyrir um 400.000 árum (mynd 5). Dýpst er á þennan sökkul Hengils á Gráuhnúkasvæðinu, um 2000 m undir sjávarmáli, en norðar, t.d. í Sleggjubeinsdal, er grynna, eða um 900 m. Líklegt er talið að þessi hraunlagasyrpa sé upprunnin í megineldstöðinni Grendal nálægt Hveragerði (Hjalti Franzson o.fl., 2005).

Innskotaberg er ekki haft með á þessum sniðum en það fer oft að sjást frá 500 m dýpi undir sjávarmáli. Hlutfall þess eykst svo jafnt og þétt og á 2000 m dýpi er það orðið mjög algengt. (Hjalti Franzson, 2010). Þar sem borað hefur verið nálægt gossprungum sem sjást á yfirborði er oft grynna á innskotaberg og hlutfall þess herra.

Vatnsæðar í borholum finnast oft á mörkum jarðlagaeininga, t.d. á milli hraunlaga eða á mörkum móbergs og hrauns (Helga M. Helgadóttir o.fl., 2010). Þá hafa vatnsæðar einnig verið tengdar við staðsetningu innskota og sprungna.





**Mynd 5.** Þversnið frá Sleggjubeinsskarði í NA til SV yfir í Gráuhnúka. Svartar línur tákna djúpar borholur innan 100 m frá þversniðinu. Gular línur eru fyrirhugaðar niðurdælingarholur í Jarðhitagarði ON og í Gráuhnúkum.

### Jarðlaga og ummyndunarlíkön af áhrifasvæðinu

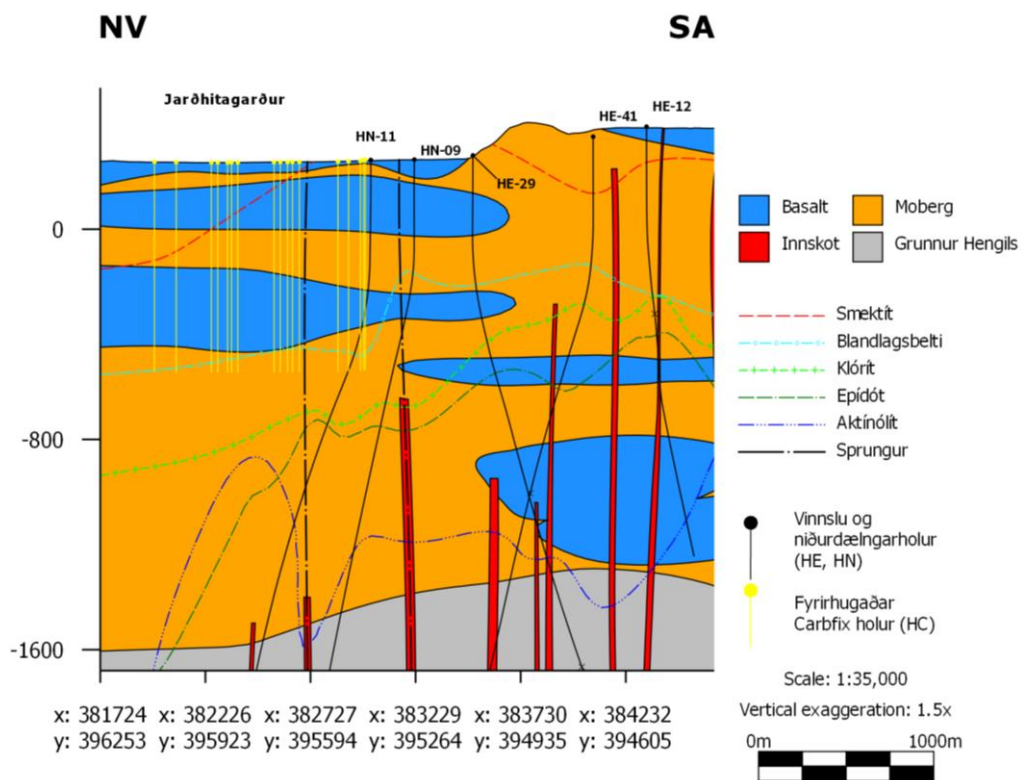
Þó að það sé ekki margar djúpar holur innan fyrirhugaðs áhrifasvæðis niðurdælingar á yfirborði er hægt með upplýsingum úr nálægum borholum og tengingum þeirra á milli að leiða líkum að því hvernig jarðlögum og ummyndun er háttað á svæðinu. Jarðlaga- og ummyndunarlíkön af áhrifasvæði niðurdælingar hafa verið byggð á gögnum úr þessum borholum.

Á norðurhluta áhrifasvæðisins (í kringum Jarðhitagarð ON) eru nokkrar djúpar niðurdælingarholur (HN-9, HN-11, HN-12, HN-14, HN-15, HN-16, HN-17 og KhG-1) (mynd 1). Engin þeirra er innan fyrirhugaðs Jarðhitagarðs en holur HN-9, HN-11, HN-14 og HN-16 eru allar í hnapp á norðurjaðri svæðisins. Holur HN-11 og HN-14 stefna í V og NV átt, út á sléttuna. Í öllum holunum eru móbergsmýndanir ríkjandi (mynd 6). Kortlagning sýnir neðri mörk Húsmúlasyrpunnar (hraunlög) nokkuð greinilega á um 250 m mældu dýpi nyrst á svæðinu. Húsmúlasyrpan þynnist er sunnar dregur og það dýpkar lítið eitt niður á neðri mörkin eins og sést í holu HN-15 (Guðmundur H. Guðfinnsson o.fl., 2010a). Þar fyrir neðan, í holum HN-11 og HN-14, taka við móbergsmýndanir niður á um 2000 m dýpi sem er nokkuð athyglisvert þar sem a.m.k. tvær áberandi hraunlagasyrpur sjást í t.d. holum HN-9 og HN-16 (Guðmundur H. Guðfinnsson o.fl., 2010b). Þá er í holu HN-15, sem er suðvestan við virkjunina og er 1000 m djúp, hraunlagamyndun á 498–726 m dýpi (Guðmundur H. Guðfinnsson o.fl., 2010a).

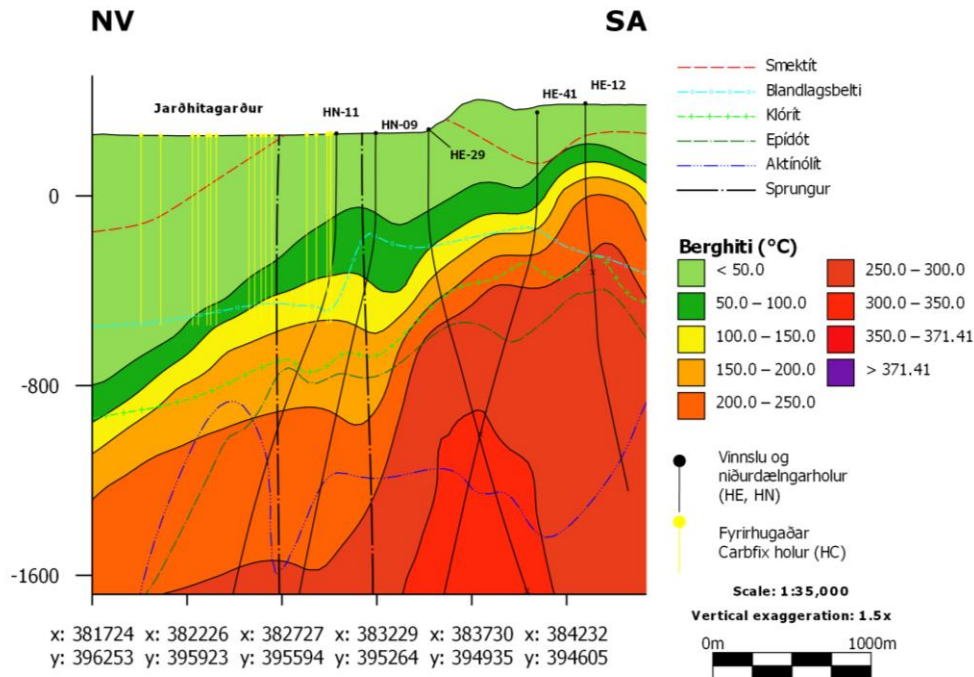
Engar stórar sprungur eru þekktar á yfirborði í Jarðhitagarði ON. Stóru SV-NA misgengin sem sjást á yfirborði í Húsmúla hverfa í hrauninu sunnan hans. Tvö misgengi úr Húsmúla annars vegar og vesturhlíðum Sleggjubeinsdals hins vegar hafa þó verið rakin með nokkurri vissu með þyngdarmælingum til suðurs í átt að Litla-Reykjafelli og Reykjafelli (Arnar Már Vilhjálmsson og Ingvar Þór Magnússon, 2010a, 2010b). Mælingar í holum, ferilefnapróf og

líkanreikningar hafa staðfest að þessi misgengi eru mikilvæg fyrir lekt á svæðinu, eins og hefur t.d. sést í niðurdælingarholum HN-16 og HN-17, og djúpum eftirlitsholum á Skarðsmýrarfjalli (Thomas M.P. Ratouis o.fl., 2022). Þar sem allar þessar holur eru fóðraðar niður á a.m.k. 750 m dýpi er mælanleg lekt í þeim aðeins neðan þess dýpis.

Holurnar sem ráðgert er að bora í Jarðhitagarði ON verða í mesta lagi 750 m djúpar og fóðraðar niður á 350 m dýpi. Geymslugeymirinn nær því frá 350 m niður í 750 m undir yfirborði. Jarðlagalíkan af geymslugeyminum sýnir móbergsmýndun á ~250–400 m dýpi (mynd 6) en líklegt er að þessi móbergsmýndun virki sem lok eða stemmir (e. barrier) á millikerfið sem dæla á niður í. Þar fyrir neðan taka hraunlög við sem ná niður fyrir botn niðurdælingaholna. Lektin í geymslugeyminum er líklega að mestu bundin við lagmót mismunandi jarðlagamyndana og eininga. Mót hraunlaga eru glerjuð og vanalega gropin og vel lek. Á 350–750 m dýpi er að öllum líkindum smektít-zeólíta ummyndun ríkjandi og miðað við berghitalíkan gæti hitinn á ~500 m dýpi verið 30–60°C (mynd 7).



**Mynd 6.** Þversnið frá NV til SA um Jarðhitagarð ON sýnir jarðlög (móberg=appelsínugult, hraunlög=blátt) og ummyndarbelti (smektít, blandlagsbelti (MLC), klórít, epidót og aktínólít). Nokkrar nálægar, djúpar holur eru sýndar með svörtum, breiðum línum en gular línur tákna mögulegar, fyrirhugaðar 500 m djúpar holur í Jarðhitagarði ON.



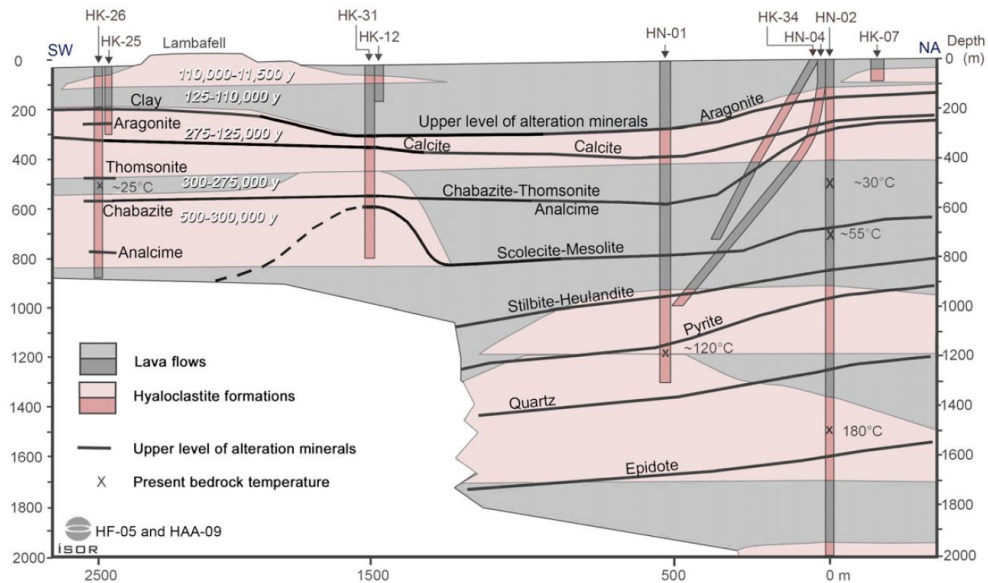
**Mynd 7.** Þversnið frá NV til SA um Jarðhitagarð ON sýnir berghita, sem er túlkaður m.a. út frá hitamælingum í djúpum borholum, og ummyndunarbelti (smektít, blandlagsbelti (MLC), klórít, epidót og aktínólít). Nokkrar nálægar, djúpar holur eru sýndar með svörtum, breiðum línunum en gular línur tákna mögulegar, fyrirhugaðar 500 m djúpar holur í Jarðhitagarði ON.

Fyrirhugað áhrifasvæði niðurdælingar sunnan Þjóðveggar 1 teygir sig frá vestanverðum Gráuhnúkum út á sléttuna og að veginum um Þrengsli (mynd 1). Á svæðinu eru nokkrar djúpar borholur; HN-1, HN-2, HN-4, HN-5, HN-6, HN-7, HN-9 og HN-10. Fyrstu niðurdælingartilraunir á CO<sub>2</sub> á vegum Carbfix fóru fram í holu HN-2 í Þrengslum og í tengslum við þær tilraunir var berggrunnurinn kortlagður nokkuð ítarlega.

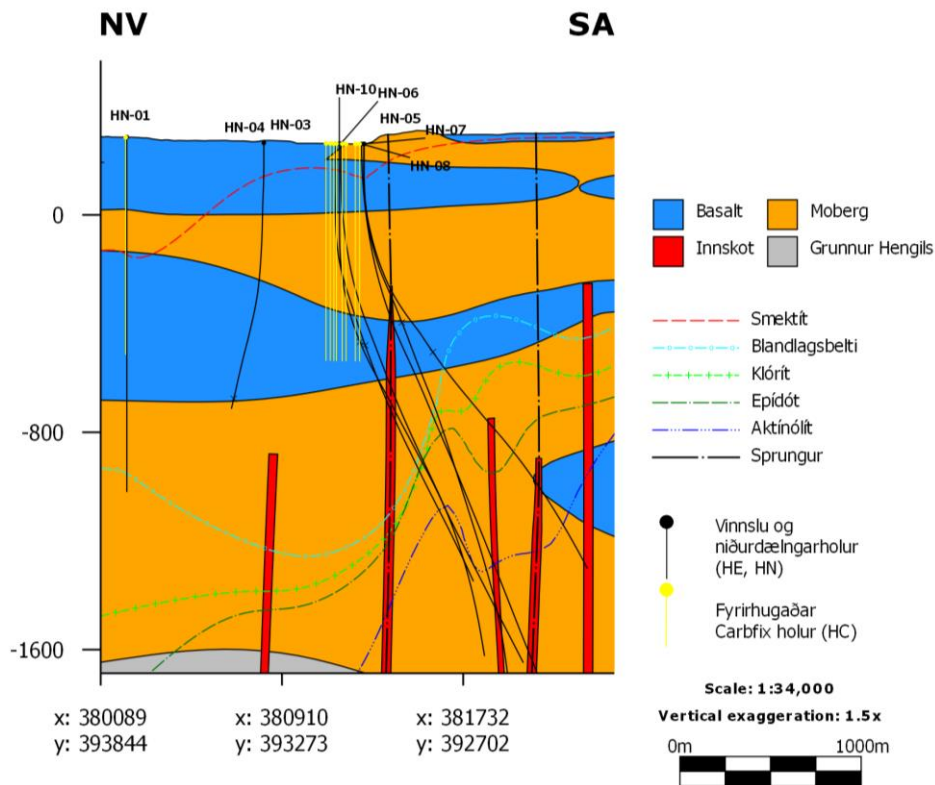
Líkt og annars staðar í nágrenninu skiptast á hraun og móbergsmýndanir í berggrunninum í Gráuhnúkum og Þrengslum. Ef horft er á efstu 1000 m í holum HN-2 og HN-4 eru hraunlög í efstu ~150 m þar sem móbergsmýndanir taka svo við niður á ~400 m dýpi. Þar tekur við hraunlagasyrpa sem er um 500 m þykk þar til komið er aftur inn í móberg (Helgi A. Alfreðsson o.fl., 2013) (mynd 8). Í holum HN-5 og HN-8, sem eru boraðar austur undir Gráuhnúka, er nánast aðeins að finna móberg utan hraunlaga í efstu 200 m (Helga M. Helgadóttir, 2011) (mynd 9).

Í tengslum við niðurdælingu á CO<sub>2</sub> hafa verið gerðar ýmsar rannsóknir, m.a. á gerð og efnasamsetningu bergsins, og leysni og útfellingahraða steinda sem er að finna í jarðlögum borholna í Þrengslum. Móbergsmýndun á ~150–400 m dýpi í Þrengslum virkar sem lok eða stemmir á millikerfið þar sem geymslugeymirinn er. Ummyndun móbergsmýndunarinnar er einkennandi fyrir smektít-zeólíta beltið og er þar að finna smektít, kalsít, Ca-ríka zeólíta og illa kristölluð járnhýdroxíð. Aðalgeymslugeymirinn er hraunlagamyndun á 400–800 m dýpi en aðalæðin í holu HN-2 er á 530 m dýpi. Mæling á glæðitapi (e. loss of ignition) bendir til þess að 40–80% af móberginu í lokinu sé ferskt en 80% af hraunlagamynduninni sé fersk. Ástæða þess er að basaltgler er mjög hvarfgjarnt en móbergið er að stórum hluta basaltgler. Bergið í geymslugeyminum er ríkt af tvígildum katjónum en að meðaltali eru 6 mól af tvígildum katjónum til staðar fyrir hvert 1 kg af bergi (Helgi A. Alfreðsson o.fl., 2013).



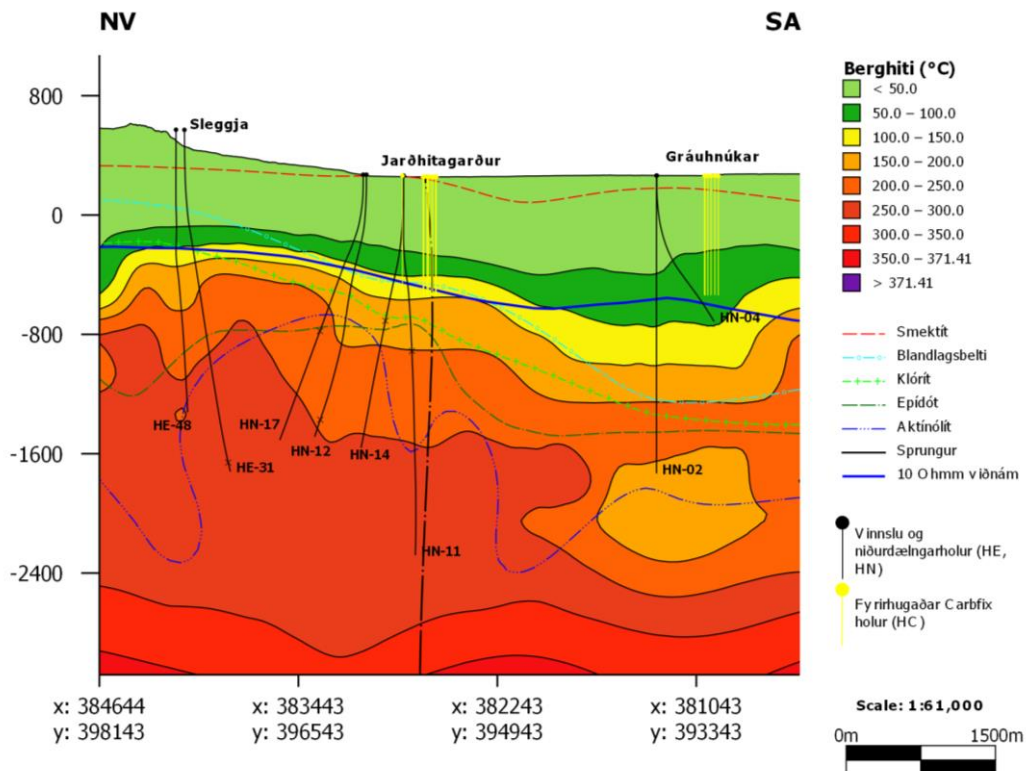


**Mynd 8.** Jarðlög, ummyndun og berghiti í niðurdælingar-, vatnstöku- og eftirlitsholum í Þrengslum. HN-2 er niðurdælingarhola, HN-1 er grunnvatnshola, HK-34, HK-31, HK-25, HK-7b, HK-12 og HK-25 eru vatnstökuholur. Berghiti er 30°C í HN-2 á 500 m dýpi. HK-34 og HN-4 hafa verið notaðar sem vöktunarholur (Helgi A. Alfreðsson o.fl., 2013).



**Mynd 9.** Þversnið frá NV til SA úr Þrengslum yfir í Gráuhnúka sýnir móberg (appelsínugult), hraunlög (blátt) og ummyndunarbelti (smektít, blandlagsbelti (MLC), klórít, epídót og aktínólít). Nokkrar nálægar, djúpar holur í innan við 100 m fjarlægð frá þversniðinu eru sýndar með svörtum, breiðum línum en gular línur tákna mögulegar, fyrirhugaðar 500 m djúpar holur í Þrengslum.

Eins og sjá má á mynd 10 er töluvert dýpra niður á blandlagsleir í Gráuhnúkum og Þrengslum en í Húsmúla. Komið er inn í blandlagsbeltið á ~500 m dýpi í Húsmúla en á um 900 m dýpi í vestanverðum Gráuhnúkum. Berghitinn lækkar að sama skapi frá Húsmúla suður í Þrengsli. Túlkun á 10 Ohm-m yfirborði úr viðnámsmælingum ber nokkuð vel saman við dýpi niður á blandlagsbeltið ef frá er talið svæðið frá vestanverðum Gráuhnúkum í átt að Þrengslum (Ásdís Benediktsdóttir, 2022). Í borholum á þessu svæði má sjá að það dýpkar hratt á ummyndun en að sama skapi er nokkuð langt í næstu viðnámsmælingar. Borholugögn gefa því betri mynd af ummyndun á þessu svæði en viðnámsmælingar.



**Mynd 10.** Berghitalíkan, ummyndunarbelti og 10 Ohm-m yfirborð á NA-SV þversniði frá Þrengslum yfir í Gráuhnúka. Svartar línur tákna djúpar borholur innan 100 m frá þversniðinu. Gular línur eru fyrirhugaðar niðurdælingarholur í Jarðhitagarði ON og í Gráuhnúkum (innan við 200 m frá þversniði).

## 4 Grunnupplýsingar um efnasamsetningu vökva í geymslu- geymi fyrir, á meðan og eftir niðurdælingu gass

### 4.1 Þrengsli

Rannsóknir sýna að grunnvatnskerfið í Þrengslum skiptist í efri og neðri hluta sem afmarkast af þéttu móbergslagi. Holur HK-7b, HK-12, HK-13 og HK-25 draga vatn úr efra kerfinu á meðan dýpri holurnar HN-1, HN-2, HN-4 og HK-26 og HK-34 eru tengdar neðra kerfinu (t.d. Helgi A. Alfreðsson o.fl., 2013). Myndir 11 og 12 sýna efnastyrk vökva úr þessum holum fyrir niðurdælingu. Sýrustig (pH) og styrkur uppleystra gastegunda, t.d. CO<sub>2</sub> og súrefnis (O<sub>2</sub>), benda til þess að efra kerfið sé tengt andrúmslofti en það neðra einangrað (Helgi A. Alfreðsson o.fl., 2013; Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2017).

Hitastig vökvans í geymslugeyminum við holu HN-4 er á bilinu 15–35 °C og pH gildi er frá 8,4–9,8. Bakgrunnsgildi uppleysts CO<sub>2</sub> (DIC) er 1,3–1,4 mmól/L. Vökvinn er yfirmettaður með tilliti til Ca-zeólíta, analísíms, Ca–Mg–Fe smektíts, kalsíts og aragóníts og sum sýni eru yfirmettuð með tilliti til dólómíts og Fe–Mg karbónata.

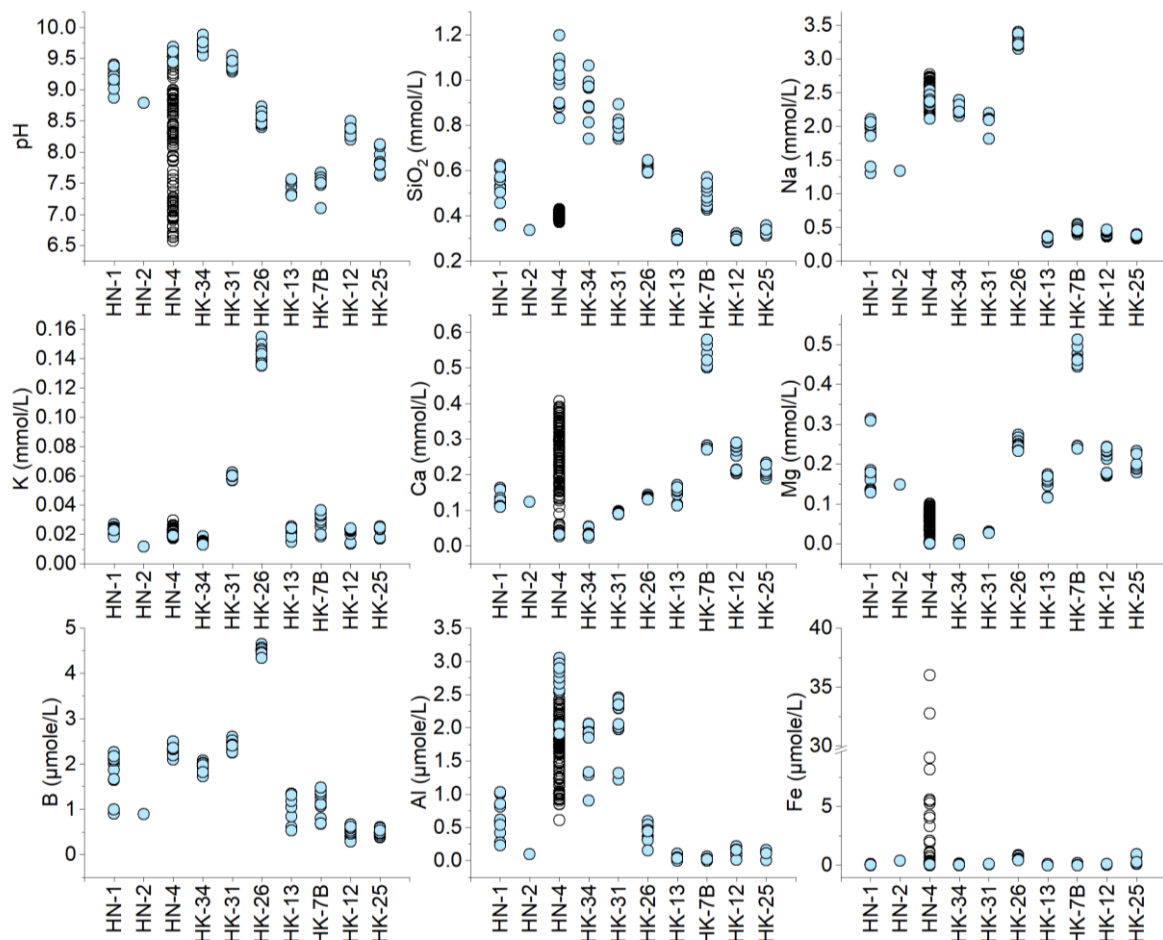
Í niðurdælingartilraunum árið 2012 var 175 tonnum af CO<sub>2</sub> dælt niður á tímabilinu janúar til mars (fasi I) og 83 tonnum af blöndu af 75% CO<sub>2</sub> og 25% H<sub>2</sub>S á tímabilinu júní til ágúst sama ár (fasi II). Mæld pH- og DIC-gildi fyrir, á meðan og eftir niðurdælingu CO<sub>2</sub> eru sýnd í töflu 3 og á mynd 13 og er skipt upp í fasa I og II. Við niðurdælingu lækkaði sýrustig vökvans í holu HN-4 (35°C) úr 9,6 í u.þ.b. 7 og fór síðan yfir 9 eftir að niðurdælingu lauk. Lægsta pH-gildið mældist 6,6 í fasa I, um 50 dögum eftir að niðurdæling hófst, og á sama tíma mældist hæsta DIC-gildið 4,4 mmól/L. Svipað mynstur kom fram í fasa II af niðurdælingunni; pH-gildið lækkaði um tveimur vikum eftir að niðurdæling hófst en lægsta pH 7,1 var mælt á sama tíma og hæsta DIC-gildið, 3,3 mmól/L.

Styrkur tvígildra katjóna (kalsíum (Ca), magnesíum (Mg) og járn (Fe)) hækkaði hratt í bæði skiptin þegar niðurdæling fór fram í holu HN-4, sem bendir til uppleysingar bergs, og minnkaði smám saman á næstu vikum og mánuðum sem bendir til að þær hafi fallið út, mögulega sem karbónatsteindir.

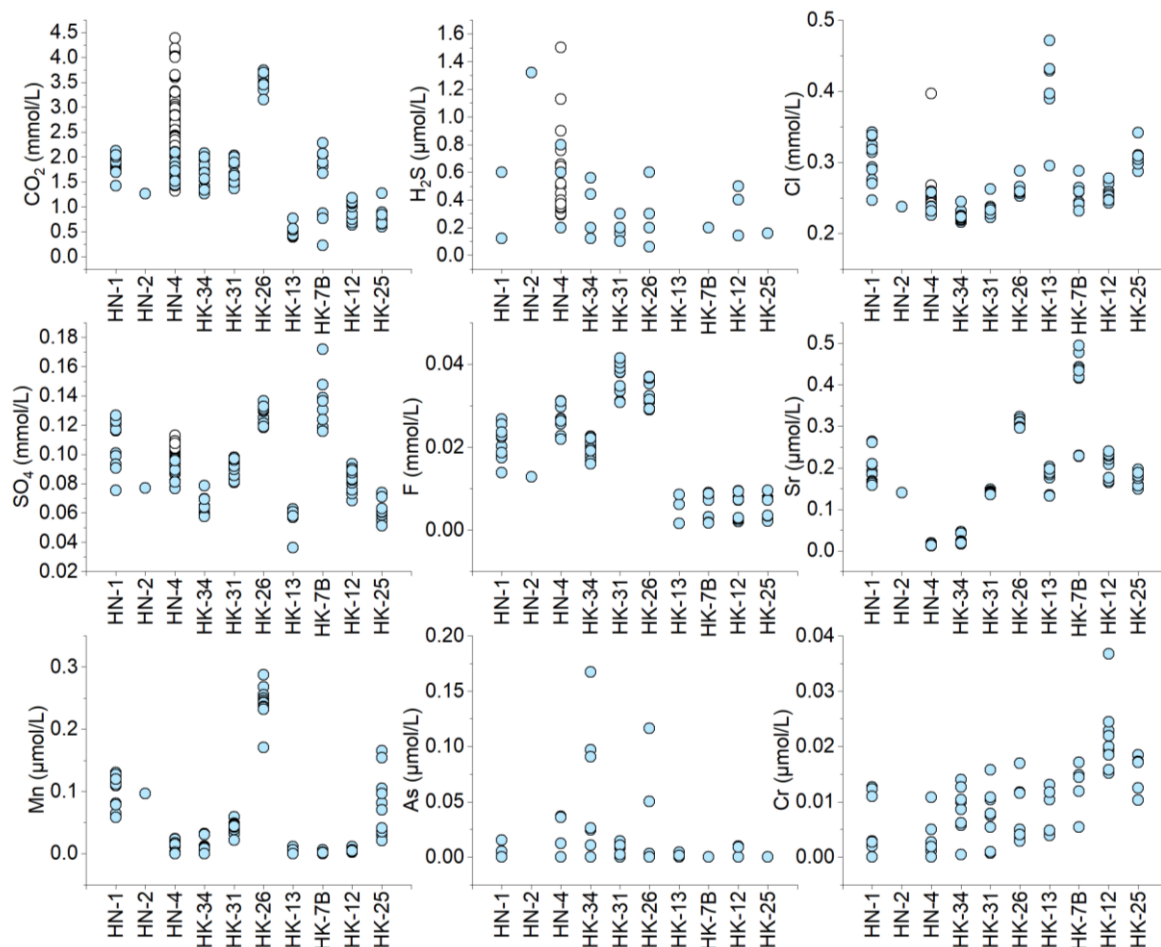
Þetta er í samræmi við útreikninga sem sýndu að vökvinn í holu HN-4 var mjög undir-  
mettaður með tilliti til kalsíts rétt eftir að niðurdæling hófst, samhliða lækkun á pH undir 8. Vökvasýnin náðu svo kalsítmettun nokkrum vikum eftir að niðurdælingu var hætt og pH vökvans hafði aukist í >8 (Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2017). Almenn þróun var lækkun á mettnarstigi vökvans rétt eftir niðurdælingu og aukning 6–8 vikum seinna. Styrkur uppleystra efna og mettnarstig lækkaði skömmu eftir að niðurdæling CO<sub>2</sub> hófst en eftir að niðurdælingu var hætt mældust gildi svipuð þeim bakgrunnsgildum sem mældust fyrir niðurdælingu.

Niðurstöður ferilefnaprófana benda til steinrenningar á CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S sem dælt var niður í geymslugeymi í Þrengslum. Sýnt hefur verið fram á að 95% af því CO<sub>2</sub> sem dælt var niður hafi steinrunnið innan tveggja ára (Juerg Matter o.fl., 2016). Þegar pH er lágt losnar Mg og Fe helst úr kristölluðu basalti vegna hærri leysnihraða ólivíns og í minna mæli pýroxens, samanborið við plagíóklas og basaltgler. Þess vegna myndast síderít (FeCO<sub>3</sub>) og Fe–Mg karbónöt fremur en kalsít á frumstigi steindabindingar.

Steindirnar myndast í eftirfarandi röð: síderít við pH < 5, Mg-Fe-karbónat og Ca-Mg-Fe-karbónat við pH > 5 og kalsít við hærra pH. Aðrar steindir sem myndast með karbónötunum eru Al- og Fe-hydroxíð, kalsedón, og zeólítar og smektít við hækkað pH. Niðurstöður líkanagerðar benda til þess að kjöraðstæður fyrir CO<sub>2</sub>-steindabindingu við 20–50°C sé við pH frá 5,2 til 6,5. Við hærra pH fara zeólítar og smektít að myndast og keppa við karbónöt um katjónir og porur í berginu.



**Mynd 11.** Sýrustig, kísill og katjónir í niðurdælingarholunni HN-2, í grunnvatnsholunni HN-1 og í vinnsluholunum HN-4, HK-7b, HK-12, HK-13, HK-25, HK-26, HK-31 og HK-34. Holur HK-34 og HN-4 hafa verið notaðar sem vöktunarholur. Bakgrunnssamsetning fyrir fasa I og II af niðurdælingartilraunum á CO<sub>2</sub> og gasblöndu er táknuð með bláum hringjum og efnasamsetning vökva í geymslugeymi á meðan niðurdælingu stendur er táknuð með hvítum hringjum (Helgi Alfredsson o.fl., 2013).

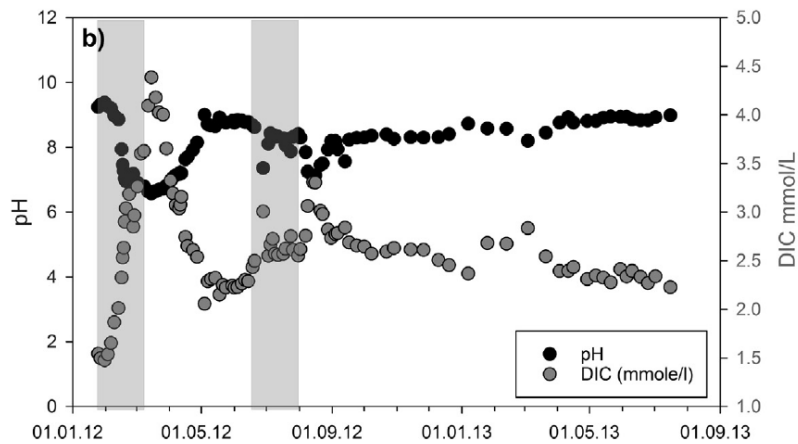


**Mynd 12.** Anjónir og snefilefni í niðurdælingarholunni HN-2, í grunnvatnsholunni HN-1 og í vinnsluholunum HN-4, HK-7b, HK-12, HK-13, HK- 25, HK-26, HK-31 og HK-34. Holur HK-34 og HN-4 hafa verið notaðar sem vöktunarholur. Bakgrunnssamsetning fyrir fasa I og II af niðurdælingartilraunum á CO<sub>2</sub> og gasblöndu er táknuð með bláum hringjum og efnasamsetning vökva í geymslugeymi á meðan niðurdælingu stendur er táknuð með hvítum hringjum (Helgi A. Alfredsson o.fl., 2013).

**Tafla 3.** Efnasamsetning vökva í geymslugeymi fyrir CO<sub>2</sub>-gasblönduðu niðurdælinguna (bakgrunnsgildi) og meðan á fasa I og II stóð í niðurdælingunni (Helgi A. Alfredsson o.fl., 2013; Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2017).

	Bakgrunnsgildi HN-4	Prengsli HN-4 (2012)		Fasi II	
		Niðurdælingarvökvi	HN-4	Niðurdælingarvökvi	HN-4
Magn af Niðurdældu gasi (t)		175		73 <sup>1</sup>	
pH <i>in situ</i>	9,5-9,6	3,85	6,6	4,03	7,1
DIC (mmól)	1,3-1,4	823	4,4	430	3,3

<sup>1</sup>mmól% 75 fyrir CO<sub>2</sub>, 24 fyrir H<sub>2</sub>S, 1 fyrir H<sub>2</sub>



**Mynd 13.** pH- og DIC-styrkur í geymslugeyminum við holu HN-4 fyrir, á meðan og eftir niðurdælingu á CO<sub>2</sub> og gasblöndu. Tímasetning niðurdælingar er táknuð með gráum súlum (Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2017).

## 4.2 Húsmúli og Skarðsmýrarfjall

Frá árinu 2014 hefur Carbfix dælt niður CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S frá Hellisheiðarvirkjun í niðurdælingarholur við Húsmúla, nánar tiltekið á svokölluðu Carbfix2-svæði. Geymslugeymirinn í Húsmúla er á meira en 1300 m dýpi þar sem hitastig vökvans er >250°C. Við þessar aðstæður eru helstu ummyndunarsteindir klórít, epidót og prehnít. Aktínólít myndast í kringum 280°C. Aðrar algengar steindir í geymslugeymi við Húsmúla eru wollastónít, wairakít, albít, kalsít, pýrít og pýrrhotít. Að auki er kvars til staðar við >180°C (Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2018b).

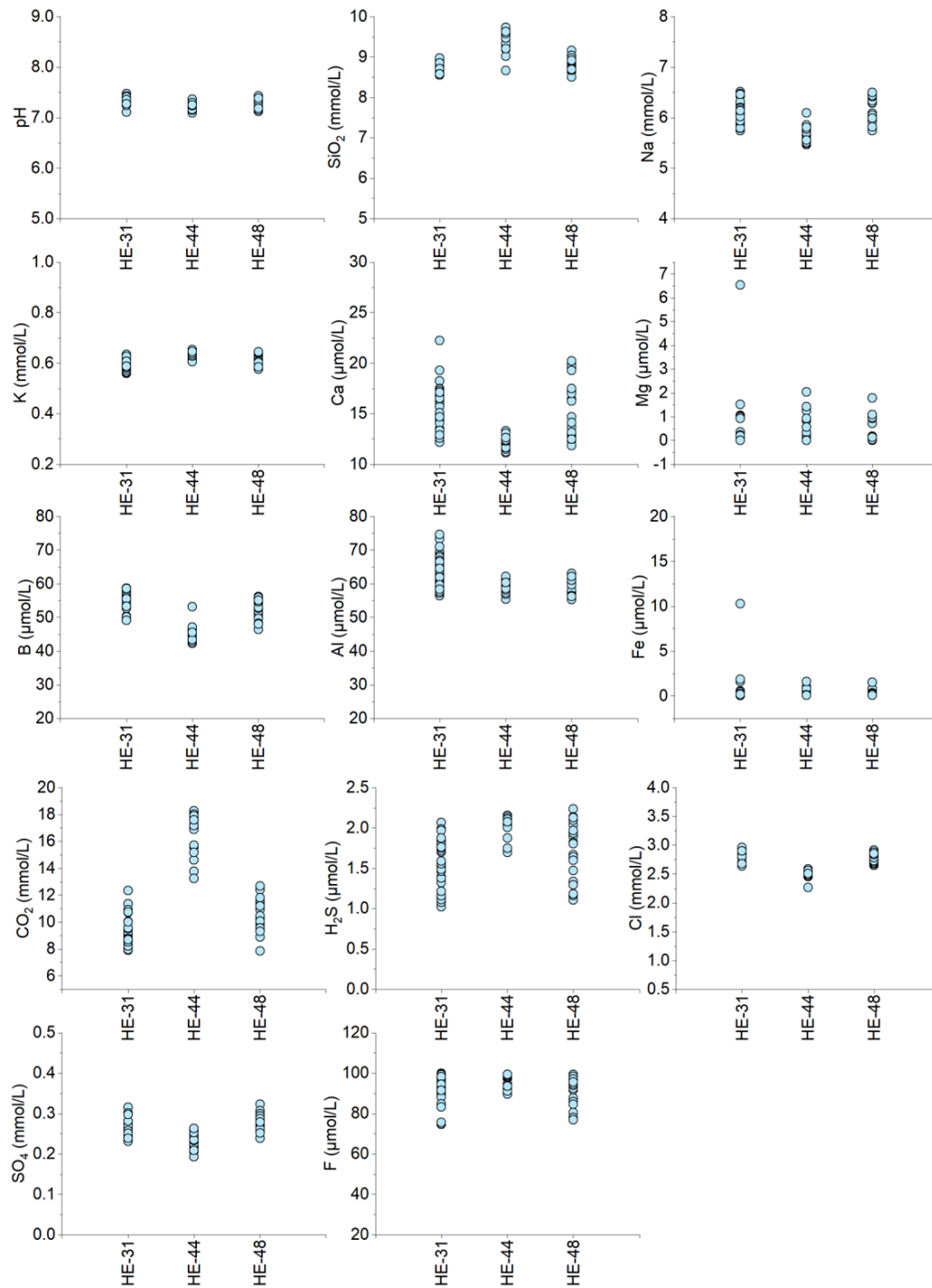
Í fyrsta fasa niðurdælingarinnar (2014–2016) voru um 6000 tonn af CO<sub>2</sub> á ári og um 2500 tonn af H<sub>2</sub>S á ári leyst upp í þéttivatni og dælt niður í niðurdælingarholur HN-14 og HN-16. Magn uppleysts CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S í þéttivatninu var svo tvöfaldað árið 2016.

Þrjár vinnsluholur á Skarðsmýrarfjalli, holur HE-31, HE-48 og HE-4, eru notaðar sem vöktunarholur. Þessar holur eru í 984, 1356 og 1482 m fjarlægð frá niðurdælingarholu HN-16. Vökvablandan sem dælt var niður samanstóð af 70% skiljuvatni og 30% þéttivatni með uppleystri gasblöndu. Sýrustig (pH-gildi) vökvablöndunnar var að meðaltali 4,7–5,4, DIC var 31–51 mM og uppleystur brennisteinn (DS) 22–31 mM. Á meðan niðurdælingu stóð var ferilefnum dælt niður í holu HN-16. Þeirra varð vart í holum HE-31, HE-48 og HE-4, 15, 30 og 94 dögum eftir niðurdælingu.

Hér á eftir eru kynntar niðurstöður ferilefnavöktunar í þessum holum á árunum 2014–2017. Heildarlýsingu á efnasamsetningu djúpvökvans í vinnsluborholum á þessum árum má sjá í grein Deirdre E. Clark o.fl. (2020). Sýrustig vökva í geymslugeyminum í vöktunarholunum breyttist ekki á meðan niðurdælingunni stóð en hitastig lækkaði lítillega. Sýrustig djúpvökvans var 7,0–7,5 við 260–277°C, DIC-styrkur var reiknaður 8–18 mmól/L og HS var um 2 mmól/L. Af þremur helstu tvígildu katjónunum var Ca með hæsta styrkinn og styrkur Fe og Mg nálægt eða við greiningarmörk. Lækkun var á Ca- og Al-styrk í holum HE-31 og HE-48 og á sama tíma sást hæg aukning á DIC, sem og enn minni aukning á HS með tímanum. Niðurstöður úr holu HE-44 sýna lágmarksbreytingu í DS-styrk (uppleystum brennisteini) en minnkun á DIC (uppleystu kolefni) eftir niðurdælingu. Minnst varð vart við breytingar á uppleystum styrk fyrir og meðan á niðurdælingu í holu HE-44 stóð, enda er hún staðsett fjærst niðurdælingarholunum (mynd 14).



Vökvi í geymslugeyminum var nálægt því að vera mettaður með tilliti til plagióklass og klínópýroxens og mettunarstig breyttist ekki mikið á árunum 2014–2017. Kalsít var stöðugt við metnun eða yfirmettað í vöktunarholuvökvum. Bæði CO<sub>2</sub>- og H<sub>2</sub>S-hlutaprýstingur (*p*CO<sub>2</sub>, *p*H<sub>2</sub>S) hækkaði þegar niðurdælingarvökvi kom fyrst fram í tveimur vöktunarholum. Útreikningar á massajafnvægi sýna að yfir 60% af niðurdældu CO<sub>2</sub> og yfir 85% af H<sub>2</sub>S hafi steinrunnið eftir fjóra mánuði.



**Mynd 14.** Sýrustig og styrkur efna í vökva geymslugeymis í vöktunarholum HE-31, HE-44 og HE-48 fyrir og meðan á niðurdælingu stóð (Deirdre E. Clark o.fl., 2020).

## 5 Skilvirkni steindabindingar CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S

CO<sub>2</sub>- og H<sub>2</sub>S-niðurdælingin í Carbfix og Carbfix2 sýndi fram á hraða myndun karbónatsteinda og súlfíða. Í geymslugeyminum á niðurdælingarsvæði Carbfix í Þrengslum voru yfir 95% af því CO<sub>2</sub> sem dælt var niður bundin í steindum innan tveggja ára (Juerg Matter o.fl., 2016; Pogge von Strandmann o.fl., 2019). Í geymslugeyminum á Carbfix2-niðurdælingarsvæðinu í Húsmúla var yfir 60% af CO<sub>2</sub> og 85% af H<sub>2</sub>S sem dælt var niður bundið í steindum eftir 4 mánaða niðurdælingu (Deirdre E. Clark o.fl., 2020).

Lykilþættir sem stjórna hraða steindabindingar á CO<sub>2</sub> eru 1) leysnihraði og útfellingarhraði steinda, sem er meðal annars háður hitastigi og sýrustigi, og 2) magn zeólíta og leirsteinda sem myndast í háum *p*CO<sub>2</sub> vökva. Matylda Hermanska o.fl. (2022) lýsa leysnihraða sílikata, þar á meðal kvarsí og öðrum SiO<sub>2</sub> fjölbrigðum, feldspars, pýroxenum, amfiból, basaltgleri og ólívínunum sem hægt er að nota til að meta hvarfgirni þessara steinda. Ca losun frá berginu í vökvafasa er hugsanlegur takmarkandi þáttur fyrir myndun kalsíts. Tvöföldun á magni CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S sem dælt var niður í niðurdælingarholur við Húsmúla lækkaði sýrustig niðurdælingarvatnsins sem leiddi til þess að magn katjóna til steinrenningar CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S jókst, og við það jókst skilvirkni steindabindingarinnar. Chiara Marieni o.fl. (2021) sýndu að hærra hitastig í geymslugeymi en 260°C er ekki ákjósanlegt fyrir steinrenningu CO<sub>2</sub> vegna samkeppni kalsíts og annarra steinda á borð við epidót og prehnít um Ca. Niðurstöður sýndu að meira en 80% af niðurdældu CO<sub>2</sub> voru bundin við Ca og Fe karbónöt við hitastig ≤170°C. Þessar niðurstöður benda til þess að skilvirkni steindabindingar er hvað mest þegar CO<sub>2</sub> er dælt í kaldari vatnskerfi eða í útjaðri jarðhitakerfis. Að auki hjálpar náttúruleg jarðskjálftavirkni og varma- og vatnsrofsvirkni (e. thermo or hydro fracturing) við að viðhalda langtímalekt í jarðhitageyminum. Það er vegna þess að niðurdælingarvökvinn er kaldari en jarðhitavatn í jarðhitageyminum. Athyglisvert er að lektin í niðurdælingarholunum í Húsmúla hefur haldist stöðug allan rannsóknartímann (2014–2017) sem staðfestir að lekt í geymslugeyminum hefur ekki orðið fyrir áhrifum af 3,5 ára niðurdælingu og steinrenningu CO<sub>2</sub> (Deirdre E. Clark o.fl., 2020).

Skilvirkni steinrenningar við niðurdælingu getur minnkað vegna minni hvarfgirni steinda í geymslugeyminum með tíma. Þetta hefur komið fram í leysnitilaunum. Hvarfgirni basalts er mikil vegna mikils yfirborðs hvarfgjarnra steinda (t.d., Iwona Galeczka o.fl., 2014) en aðgengi yfirborðsins minnkar með tíma eftir því sem það verður sléttara við lengri uppleysingu.

Minnkuð skilvirkni steindabindinga með aukinni CO<sub>2</sub>-niðurdælingu gæti aukið CO<sub>2</sub> í djúpa vökvanum. Þetta hefur áhrif á framleiðslueiginleika vinnsluvökva og gæti aukið flæði CO<sub>2</sub> í vinnsluholum. Iwona Galeczka o.fl. (2022) sýndu að ef niðurdælt CO<sub>2</sub> steinrennur ekki eykst *p*CO<sub>2</sub> í jarðhitageyminum.



## 6 Náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð

Náttúrulegt flæði CO<sub>2</sub> um yfirborð frá jarðhitasvæðum fer fram með tvennum hætti. Annars vegar er um að ræða streymi frá afmörkuðum uppsprettum, s.s. hverum, gufuaugum, gufuhituðum tjörnum og leirhverum. Hins vegar er um að ræða flæði CO<sub>2</sub> í gegnum jarðveg (e. diffuse degassing). Magnbundnar mælingar á flæði CO<sub>2</sub> um jarðveg eru tiltölulega auðveldar í framkvæmd en krefjast nokkurs tækjabúnaðar. Við slíkar mælingar eru oftast notuð svokölluð lokuð hólfi sem eru útbúin með ljósgleypnimæli á innrauðu sviði (e. IR spectrophotometer). Hólfíð er lagt ofan á jarðveginn, þannig að það sé þétt ofan á honum, og styrkur CO<sub>2</sub> inni í hólfinu ( $C_{CO_2}$ ) er mældur stöðugt sem fall af tíma ( $t$ ) (mynd 15). Þessi mæling gefur hraðann á aukningu styrks CO<sub>2</sub> í hólfinu ( $dC_{CO_2}/dt$ ) og er hún notuð ásamt rúmmáli hólfisins ( $V$ ) og botnflatarmáli ( $A$ ) þess, til þess að reikna flæði CO<sub>2</sub> um jarðveg á flatarmálseiningu ( $\phi_{CO_2}$ ) samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$\phi_{CO_2} = \frac{PV}{RTA} \frac{dC_{CO_2}}{dt}$$

Þar sem  $P$  er þrýstingur,  $R$  er gasfastinn og  $T$  er hitastig í gráðum Kelvin. Einstakar mælingar af þessu tagi taka ekki langan tíma, ~2–3 mínútur, en ef meta á heildarflæði CO<sub>2</sub> á tilteknu svæði þarf að gera margar punktmælingar á svæðinu sem síðan eru notaðar til að reikna jafnflæðislínur yfir svæðið. Út frá jafnflæðislínunum má reikna meðalgildi fyrir útstreymið fyrir viðkomandi svæði og þar með heildarflæði CO<sub>2</sub> frá svæðinu.

Á svæðum þar sem áhrifa jarðhita gætir ekki er einnig stöðugt útstreymi um yfirborð jarðar af CO<sub>2</sub> vegna lífvirkni og rotnunar. Hægt er að mæla þetta útstreymi með sömu aðferðum og lýst var hér að framan. Magn þess CO<sub>2</sub> sem berst í andrúmsloft um jarðveg á þennan hátt er vissulega mjög háð jarðvegsgerð en magnið er ætíð um einni til þremur stærðargráðum minna en það sem þekkist frá jarðhitasvæðum og því er nokkuð auðvelt, með hjálp tölfraðilegra aðferða, að greina á milli CO<sub>2</sub>-flæðis sem orsakast af jarðhitavirkni annars vegar og þess CO<sub>2</sub>-flæðis sem orsakast af lífvirkni hins vegar.

Þegar dæla á CO<sub>2</sub> í borholur til steinrenningar í geymslugeymi og hafa eftirlit með því er nauðsynlegt að þekkja náttúrulegt streymi CO<sub>2</sub> um jarðveg á áhrifasvæði niðurdælingar. Það er gert með því að mæla flæðið með gasflæðimælingum og kortleggja þannig náttúrulega streymið áður en niðurdæling hefst. Þegar svo niðurdæling á CO<sub>2</sub> hefst eru gasflæðimælingar endurteknar og þannig er fylgst með því hvort CO<sub>2</sub>-flæði um jarðveg aukist á áhrifasvæðinu. Verði vart við mikla aukningu á CO<sub>2</sub>-flæði á áhrifasvæðinu bendir það til þess að CO<sub>2</sub> hafi ekki haldist uppleyst í niðurdælingarvökvanum og ekki náð að steinrennast eins og ráðgert er.

Niðurdælingin er hönnuð þannig að CO<sub>2</sub> er uppleyst í vatni og dælt niður undir þrýstingi á nægilegt dýpi í fóðraða borholu. Aðstæður niðurdælingar hafa áður verið reiknaðar og hermdar til að tryggja að CO<sub>2</sub> haldist uppleyst og flæði út í jarðlög þar sem það hvarfast og steinrennur frekar en að losna úr upplausn og streyma til yfirborðs. CO<sub>2</sub> leki til yfirborðs vegna misheppnaðrar niðurdælingar hefur aldrei greinst á Íslandi, né aukning á CO<sub>2</sub>-flæði vegna niðurdælingar.



**Mynd 15.** Gasflæðimælir og hitamælir á yfirborði.

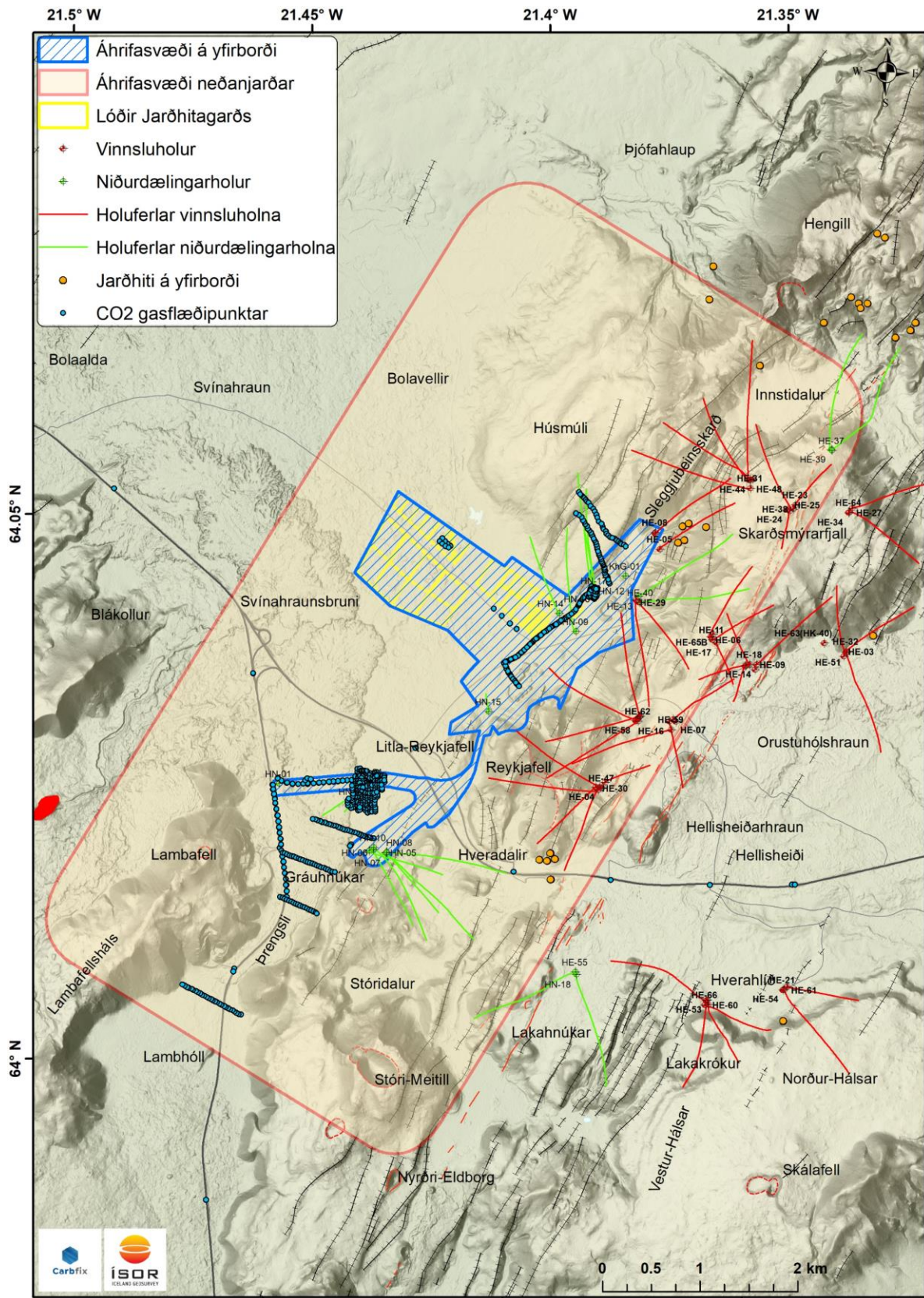
Gerðar hafa verið gasflæðimælingar á áhrifasvæðinu áður en niðurdæling  $\text{CO}_2$  hófst (mynd 16). Má leiða líkum að því að þær séu til vitnis um náttúrulegt flæði  $\text{CO}_2$ . Á áhrifasvæðinu gætir ekki jarðhitaáhrifa á yfirborði nema á jaðarsvæðum (mynd 17). Því er viðbúið að mæld gildi séu bakgrunnsgildi þar sem  $\text{CO}_2$ -flæðið um yfirborð orsakast einungis af lífvirkni. Mælingar sem til eru voru ekki allar gerðar á sama tíma en fyrstu mælingar voru gerðar í Þrengslum árið 2008 og þær allra nýjustu árið 2022 á fyrirhuguðu borsvæði Mammoth (mynd 18) (Gunnlaugur M. Einarsson o.fl. 2009; Gunnlaugur M. Einarsson o.fl., 2010; Sigurður Reynir Gíslason o.fl., 2010; Sýlvía R. Guðjónsdóttir o.fl., 2014).

Innan GECCO H2020 rannsóknarverkefnisins var unnið að því að þróa aðferðir til þess að nota fjarkönnun til að styðja við mat á flæði  $\text{CO}_2$  um jarðveg. Þá var beitt þeirri nálgun að bakgrunnsgildi  $\text{CO}_2$ -flæðis um jarðveg sé sambærilegt innan sömu landgerðar þar sem jarðhitaáhrifa gætir ekki. Með því að kortleggja landgerðir af fjarkönnunargögnum og mæla gasflæði á völdum stöðum sem endurspeglar þá landgerð má heimfæra bakgrunnsgildi gasflæðis yfir á stærra svæði (Gunnlaugur M. Einarsson o.fl., 2020). Áhrifasvæði niðurdælingarsvæðisins við Hellisheiðarvirkjun er töluvert stórt, eða um  $43 \text{ km}^2$ , og illframkvæmanlegt að mæla svo stórt svæði á þéttu mælineti. Þegar um slíkar aðstæður er að ræða er mögulegt að grípa til notkunar fjarkönnunar með stuðningi frá mælingum í mörkinni.

Farið var í mæliferð upp á Hellisheiði og gasflæði mælt. Svæðið er að stórum hluta nokkuð torfært en mikið er um mosavaxið hraun. Leitast var við að mæla gasflæði á þeim mismunandi jarðvegsgerðum sem þarna er að finna og leitað að frávikum í jarðvegsgerð til að unnt væri að mæla í slíkum blettum og greina frávik í koldíoxíðflæði (mynd 18). Til viðbótar voru þegar til 682 gasflæðimælipunktur á áhrifasvæði niðurdælingarsvæðisins við Hellisheiðarvirkjun sem mældir hafa verið til að sýna bakgrunnsgildi á svæðinu í tengslum við fyrri Carbfix-verkefni. Meðalgasflæði í öllu þessu punktastafi er  $1,35 \text{ ppm/sek.}$  og hæsta gildi sem er skráð er  $43,6 \text{ ppm/sek.}$  í einum punkti sem sýnir enga fylgni við aðrar mælingar í nágrenninu. Hæstu gildum í mæligögnum er sleppt í þessari úrvinnslu.

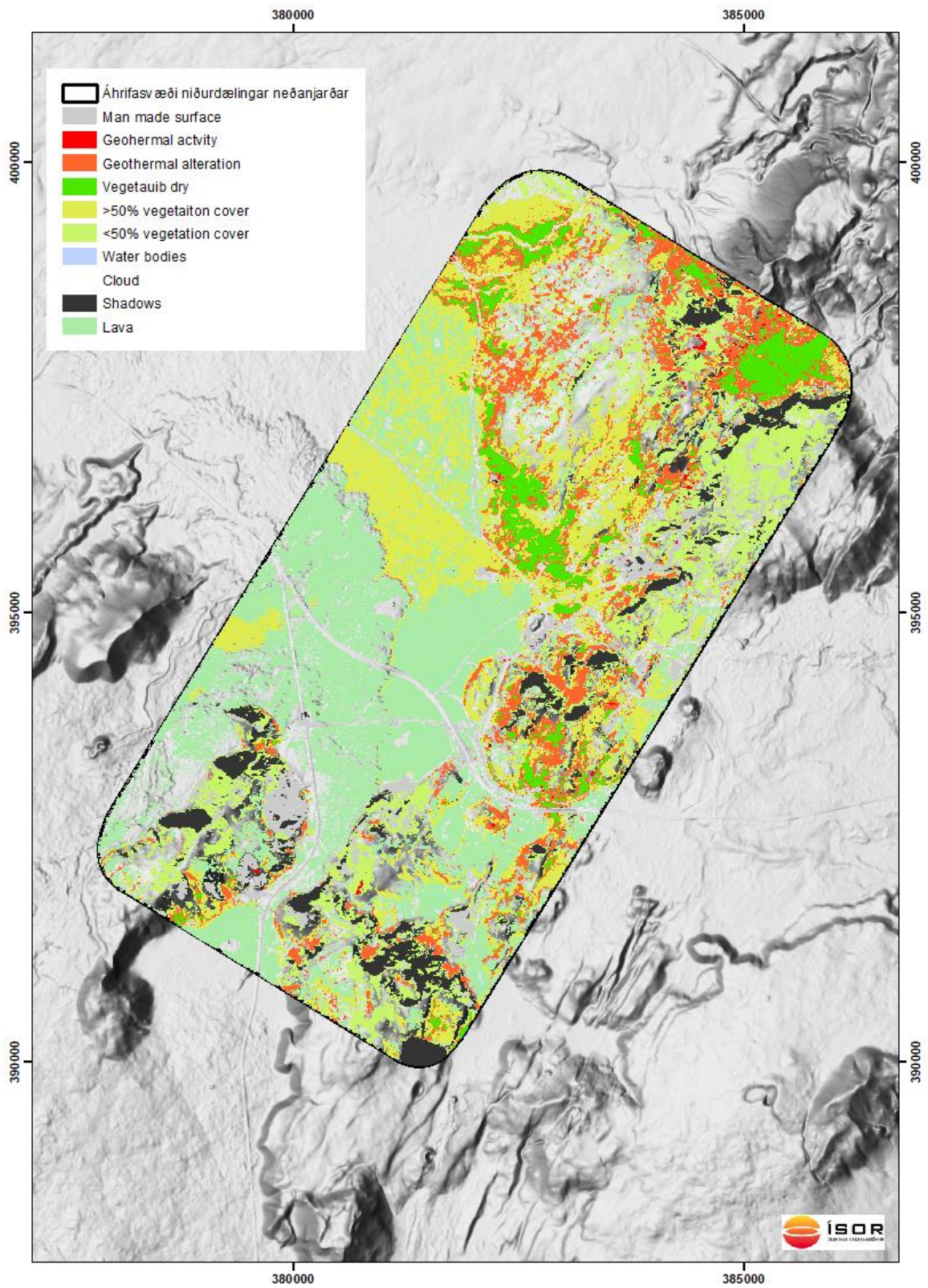
Yfirborðsgerð á áhrifasvæðinu var flokkuð út frá Sentinel-2 gervihnattamynd frá 8. ágúst 2019 í 10 flokka með hálsjálfrávikum aðferðum. Þar eru myndeiningar flokkaðar af notanda út frá gögnum í hárra upplausn á litlu svæði og í þessu tilfelli var notast við lofthitamyndir sem aflað var með dróna á Nesjavöllum. Sú flokkun er svo yfirfærð yfir á stærra svæði, í þessu tilfelli allan myndflöt gervihnattamyndarinnar. Mynd 1717 sýnir þessa landflokkuð á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar.





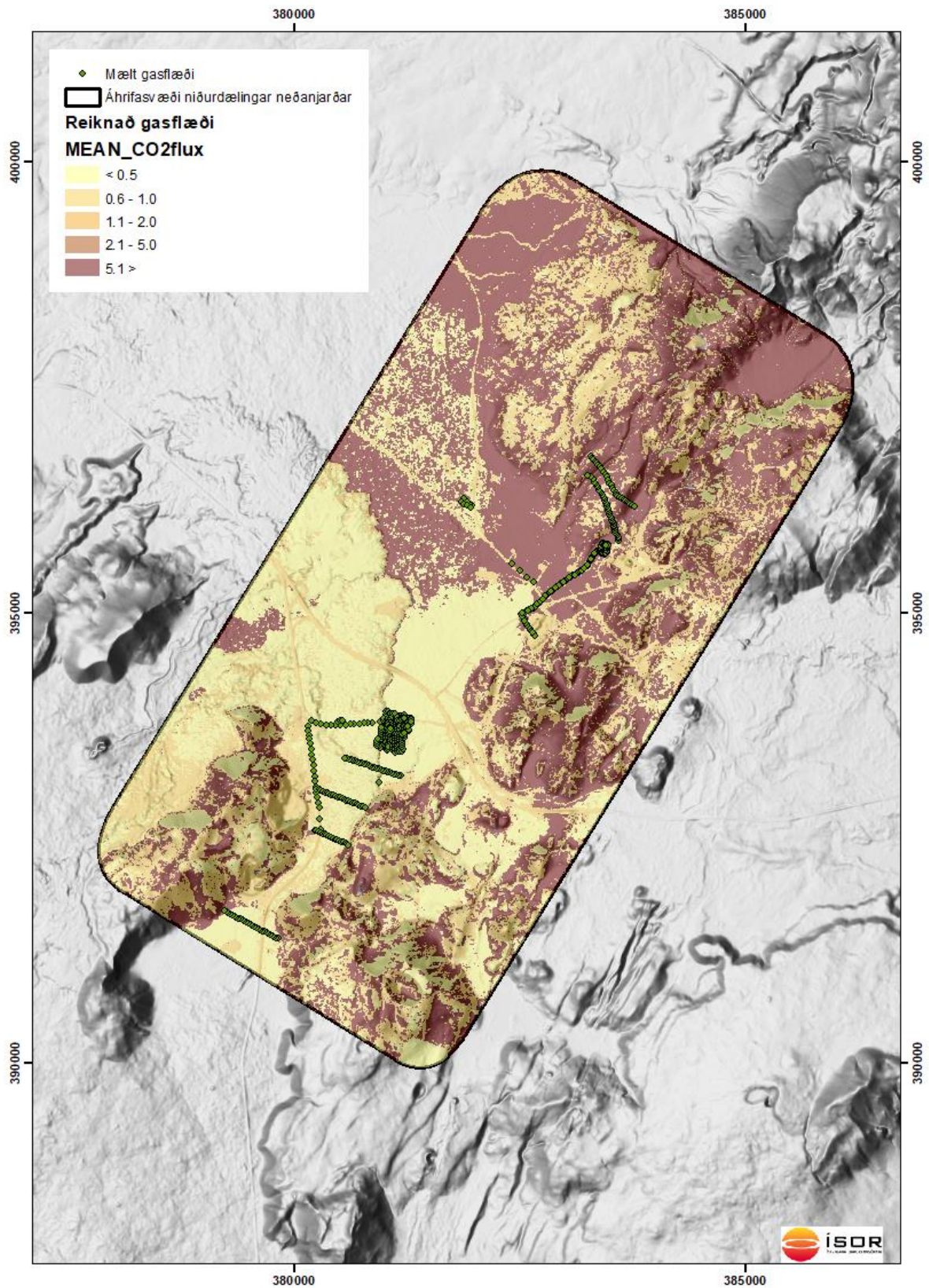
Mynd 16. Áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar, ásamt lóðum Jarðhitagarðs ON, vinnsluholum (rauðar), niðurdælingarholum (grænar), jarðhiti á yfirborði (appelsínugulir punktar) og mælipunktum CO<sub>2</sub>-gasflæðis og hitamælinga (bláir punktar).





Mynd 17. Hálfsvæðisgreining á yfirborðsgerð á áhrifasvæði neðanjarðar, byggð á gervihnattamyndum og lofthitamynd.





Mynd 18. Reiknað meðalgildi CO<sub>2</sub>-flæðis í hverjum flokki á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar.

Tafla 4 sýnir flokka yfirborðsgerðar auk hæstu og lægstu gilda, meðalgildis, fjölda punkta og staðalfráviks af mældu flæði CO<sub>2</sub> í ppm/sek. í hverjum flokki. Almennt eru gildin mjög lág og hæstu gildin eru einstakir punktar, eða eru þannig staðsettir að gildin benda til frávika í skráningu eða staðbundinnar jarðhitavirkni.

**Tafla 4.** Flokkar yfirborðsgerðar, fjöldi mælipunkta í hverjum flokki og CO<sub>2</sub>-flæði (ppm/sek.).

Flokkur	Fjöldi mælipunkta	Lægsta CO <sub>2</sub> -flæði	Hæsta CO <sub>2</sub> -flæði	Meðaltals CO <sub>2</sub> -flæði	Staðalfrávik
Manngert yfirborð	145	-0,9	1,27	0,1	0,23
Jarðhitaummyndun	4	-1,3	1,66	-0,08	1,25
<50% gróður	17	-1,92	1,74	0,21	1,01
>50% gróður	6	-1,24	1,44	0,4	0,99
Ský	96	-0,4	0,96	0,17	0,17
Skuggi	4	-0,9	1,97	0,31	1,35
Hraun	234	0,01	1,37	0,2	0,16

Ljóst er að notkun fjarkönnunar til að meta flæði CO<sub>2</sub> til yfirborðs kemur ekki í staðinn fyrir mælingar í mörkinni ef leggja á nákvæmt mat á flæðið. En þegar verið er að meta bakgrunnsgildi á víðfeðmum svæðum þar sem jarðvegsgerð er einsleit og jarðhitaáhrifa gætur lítt er aðferðafræðin talin gefa ásættanlegar niðurstöður. Vissulega eru bæði jarðhitafyrirbæri innan svæðisins sem skoðað var og ummyndun til staðar á yfirborði en það er undanskilið í þessari greiningu þar sem slík svæði er að finna ofan við grunnvatnsflæðistefnu á svæðinu.

## 7 Grunnupplýsingar um jarðskjálftavirkni

Jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði fyrirhugaðrar niðurdælingar Carbfix á Hellisheiði hefur verið samfelld vöktuð frá árinu 1995 og við þetta mat er stuðst við öll jarðskjálftagögn sem fyrir liggja.

Nákvæmni í staðsetningu jarðskjálfta er mjög háð því hversu margir jarðskjálftamælar voru í rekstri á Hengilssvæðinu á hverjum tíma fyrir sig. Þannig hefur fjöldi og þéttleiki jarðskjálftamæla, auk rúmfræðilegrar hönnunar á uppsetningu jarðskjálftamælanetsins, mest um næmni jarðskjálftamælanets og nákvæmni í staðsetningu jarðskjálfta að segja, þar sem fleiri vel staðsettir jarðskjálftamælar tryggja betri upplausn. Nákvæmni í staðsetningu jarðskjálfta er sömu-leiðis háð hraðalíkani og ákvörðun á komutíma jarðskjálftabylgna. Þegar jarðskjálftamælar eru nálægt upptökum jarðskjálfta, og ákvörðun á komutíma jarðskjálftabylgna (P- og S-fasar) er örugg, er ákvörðun um staðsetningu og dýpi mun minna háð staðbundnum óreglum í jarðskorpunni og frávikum frá hraðalíkani en annars.

Að auki er nákvæmni í staðsetningum jarðskjálfta háð úrvinnsluaðferðum. Hefðbundin aðferð notar einungis komutíma P- og S-bylgna á hverjum jarðskjálftamæli til þess að reikna út staðsetningu hvers jarðskjálfta og getur staðsetningarskekkjan hlaupið á nokkur hundruðum metra upp í nokkra kílómetra, allt eftir aðstæðum. Afstæð staðsetning jarðskjálfta byggist hins vegar á því að ferðatímamismunur jarðskjálftabylgna frá nálægum jarðskjálftum sé vegna mismunandi staðsetningar og er staðsetningarskekkjan sem fæst með þessari aðferð yfirleitt mun minni en með hefðbundinni aðferð, frá nokkrum tugum upp í hundruð metra.

### 7.1 Jarðskjálftaefirlit og vöktun

Til eru jarðskjálftagögn frá i) Veðurstofu Íslands (VÍ), sem rekið hefur fjóra jarðskjálftamæla í minna en 20 km fjarlægð frá Hengli síðan 1995, ii) Íslenskum orkurannsóknum (ÍSOR), sem rekið hafa 10 jarðskjálftamæla á Hengilssvæðinu fyrir hönd Orku náttúrunnar (ON) síðan 2016, og iii) gagna sem aflað var í rannsóknarverkefninu COSEISMIQ á árunum 2018–2021, þegar rekið var tímabundið, þétt jarðskjálftamælanet 23 jarðskjálftamæla á Hengilssvæðinu í samstarfi ÍSOR, ETH frá Zürich í Sviss, DIAS frá Dublin í Írlandi og ON, og samanstóð því mælanetið af 37 jarðskjálftamælum á því fjögurra ára tímabili.

### 7.2 Náttúruleg jarðskjálftavirkni á Hengilssvæði

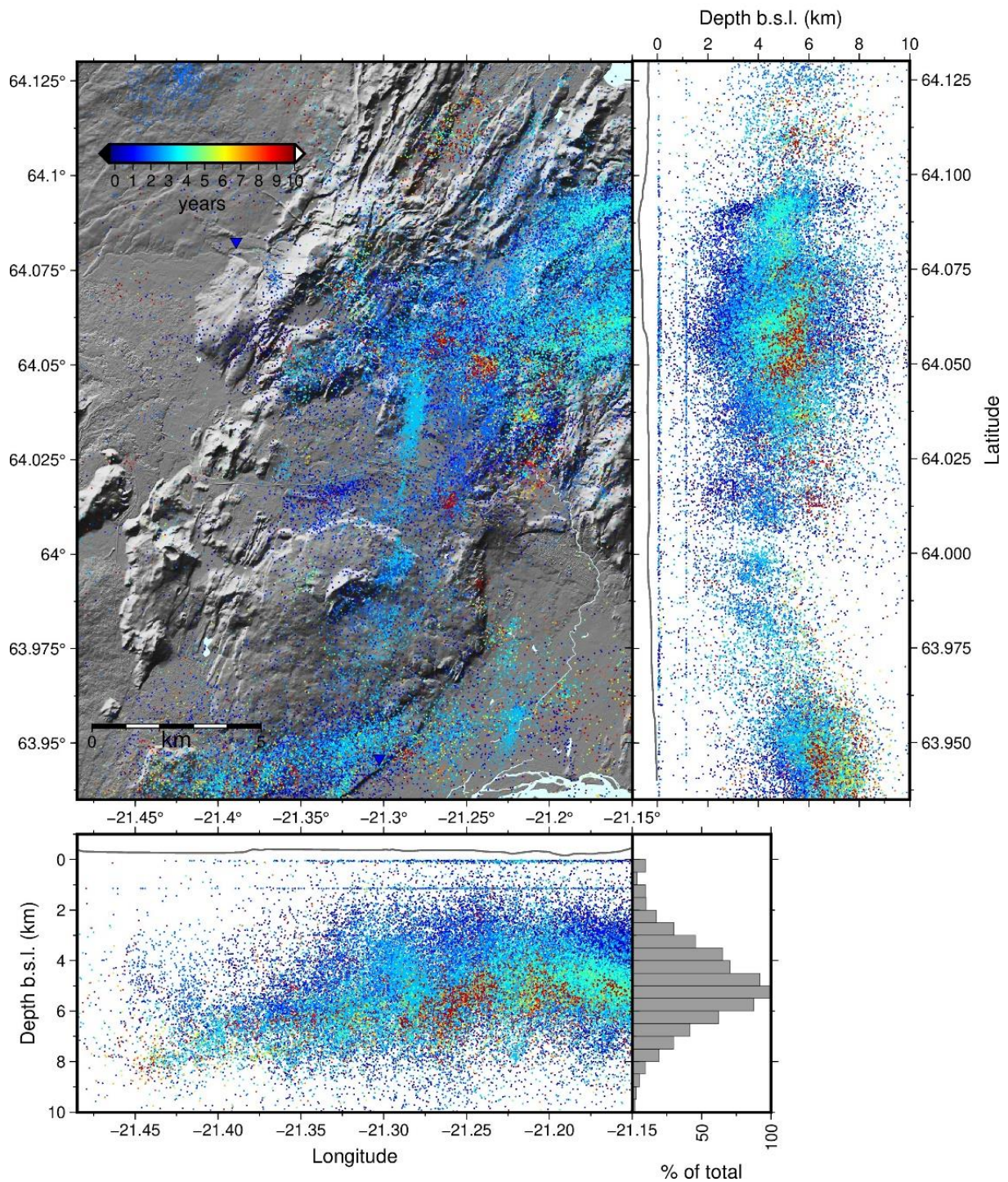
Jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu öllu er talin vera af þrennum toga; i) náttúruleg jarðskjálftavirkni og svo örвуð jarðskjálftavirkni af völdum ii) vinnslu annars vegar (kafla 7.3) og iii) niðurdælingar hins vegar (kafla 7.4).

Frá því að jarðskjálftamælar komu til sögunnar hafa orðið tvær stórar jarðskjálftahrinur á Hengilssvæðinu, þ.e. á árunum 1952–1955 og 1994–1998. Seinni hrinan á árunum 1994–1998 er betur skráð en sú fyrri en hún er skráð af jarðskjálftamælaneti VÍ sem þá var nýuppsett og lýsti jarðskjálftavirknin upp brot og misgengi á Hengilssvæðinu með NNA-SSV og ANA-VSV stefnur, sem er í samræmi við ríkjandi sprungustefnur á yfirborði (myndir 19 og 20). Alls voru staðsettir yfir 80.000 smáskjálftar á hrinutímabilinu og voru tveir stærstu jarðskjálftarnir um 5 að stærð (Amy E. Clifton o.fl., 2002; Gunnar Þorbergsson og Guðmundur H. Vigfússon, 1998; Kristín Vogfjörð o.fl., 2012). Talið er að hrinan hafi orsakast af landrisi, líklegast vegna kvikuinnskots eða aukins þrýstings í kvikuhólfi á 5–7 km dýpi, með rismiðju undir Dalafelli í Grensdalseldstöðinni, þ.e. austur af Reykjadal og norður af Hveragerði (mynd 20) (Gunnar

Þorbergsson og Guðmundur H. Vigfússon, 1998; Freysteinn Sigmundsson o.fl., 1997; Kurt L. Feigl o.fl., 2000). Talið er að landrasið hafið valdið spennubreytingum í jarðskorpunni sem leiddu til fjölda gíkkskjálfta (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 1997), í líkingu við það sem síðar hefur sést, til að mynda eftir stóra Suðurlandsskjálfta og nú síðast í yfirstandandi umbrotum á Reykjanesskaganum.

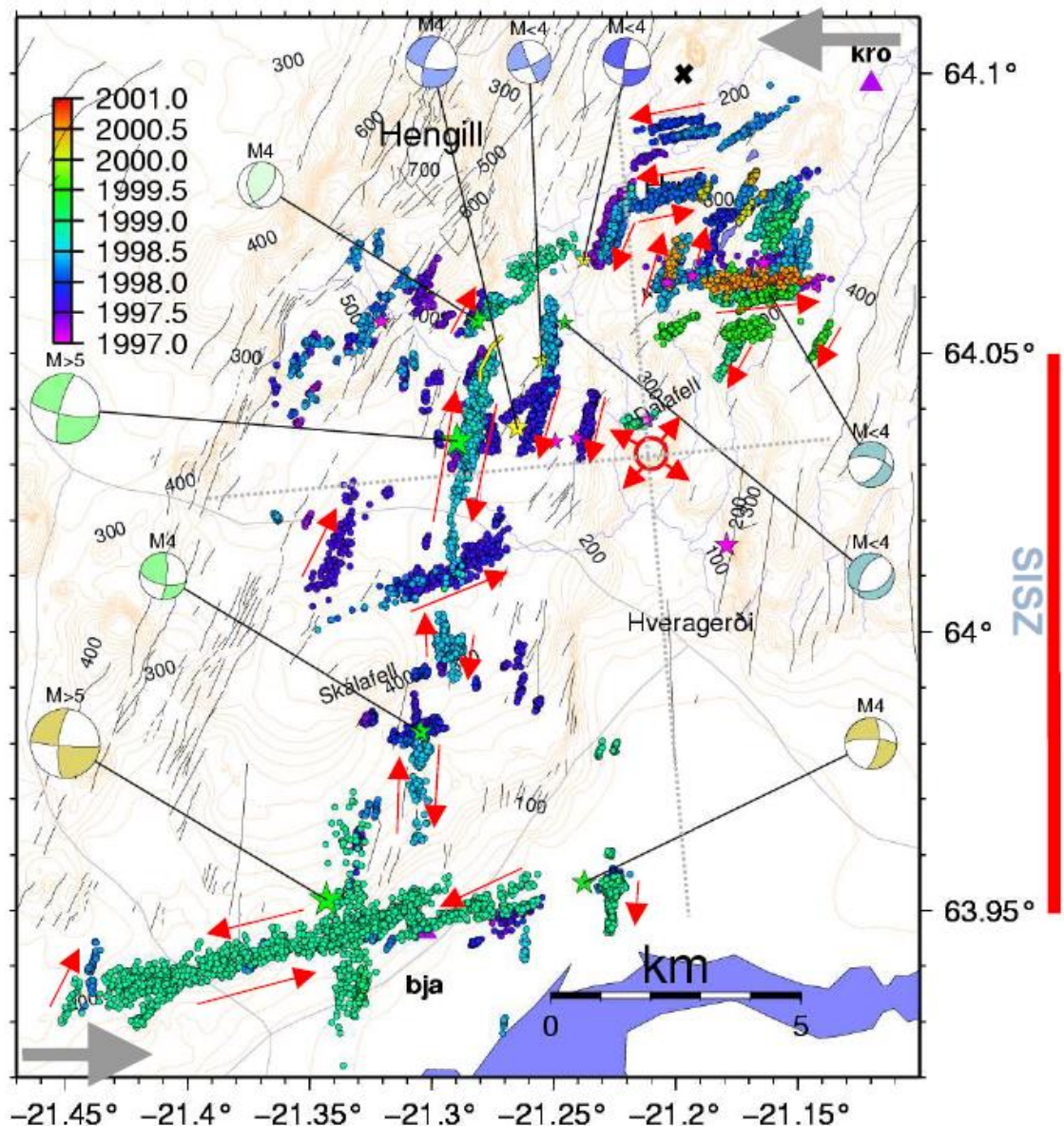
Mynd 19 sýnir staðsetningu jarðskjálfta úr jarðskjálftamælaneti VÍ á árunum 1995–2006, þ.e. frá því að jarðskjálftamælanet VÍ var sett upp og þar til vinnsla hófst á Hellisheiði. Jarðskjálftavirknin á þessu tímabili er mest á norðaustanverðu Hengilssvæðinu, aðallega á sprungum með ANA-VSV stefnu, sem og til suðurs á Bakkasvæðið í Ölfusi, og svo á N-S misgengjum þar á milli. Meginhluti virkninnar á þessu tímabili er bundinn við hrinuna árin 1994–1998 (bláir litir). Þrátt fyrir takmarkaða upplausn í staðsetningu jarðskjálfta á svæðinu á þessum tíma má sjá að virknin virðist raða sér á virkar sprungur og/eða sprungusvæði. Þetta sést vel á mynd 20 af afstæðri staðsetningu jarðskjálfta á árunum 1997–2001 á Hengilssvæðinu, sem lýsa upp virkar sprungur og misgengi sem falla vel við þekktar sprungur og sprungustefnur á yfirborði (Kristín Vogfjörð o.fl., 2012).





**Mynd 19.** Staðsetning jarðskjálfta úr jarðskjálftamælaneti VÍ árin 1995–2006 á Hengilssvæðinu, þ.e. áður en vinnsla hófst á Hellisheiði. Jarðskjálftar eru litaðir eftir ári og jarðskjálftamælar VÍ eru táknaðir með bláum þríhyrningi. Upplausn staðsetningar jarðskjálfta á þessu tímabili er mjög takmörkuð vegna fárra og fjarlæggra jarðskjálftamæla en þó sést að jarðskjálftavirknin er mest á norðaustanverðri Hellisheiði, á Bakkasvæðinu í Ölfusi og á N-S misgengjum á milli þessara svæða, en dýptarákvörðunin er ónákvæm.





**Mynd 20.** Afstæð staðsetning jarðskjálfta úr jarðskjálftamælaneti VÍ ári 1997–2001 á Hengilssvæðinu (Kristín Vogfjörð o.fl., 2012). Jarðskjálftar eru litaðir eftir tíma og eru stærstu jarðskjálftarnir sýndir með stjörnum ásamt brotlausn þeirra. Myndin gefur góða hugmynd um náttúrulega jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu áður en vinnsla hófst á Hellisheiði árið 2006. Rismiðjan undir Dalafelli í jarðskjálftahrinunni á árunum 1994–1998 er merkt með rauðum örvahring.

Einföld greining á jarðskjálftagögnum VÍ á Hengilssvæðinu sýnir að utan stærstu hrinutímabila á það sem talin er vera náttúruleg jarðskjálftavirkni sér stað í þyrpingum og á virkum sprungum (mynd 20). Vert er að hafa í huga að jarðskjálftastaðsetning VÍ í láréttu plani eru nákvæmari en dýptarákvörðunin, þ.e. í lóðrétu plani, sökum fárra og fjarlæggra jarðskjálftamæla. Margir hafa rannsakað alla eða a.m.k. hluta 1994–1998 hrinunnar (t.d. Kristín Vogfjörð o.fl., 2012; Steinunn S. Jakobsdóttir, 2008; Amy E. Clifton o.fl., 2002; Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl., 1998) og ber þeim öllum saman um að jarðskjálftavirknin á þessu tímabili eigi sér stað í þyrpingum og/eða á sprungum frekar en að vera jafndreifð um svæðið. Eldri rannsókn á smærra gagnasetti, frá því áður en vinnsla og boranir hófust á Hellisheiði, gefur sömu mynd,

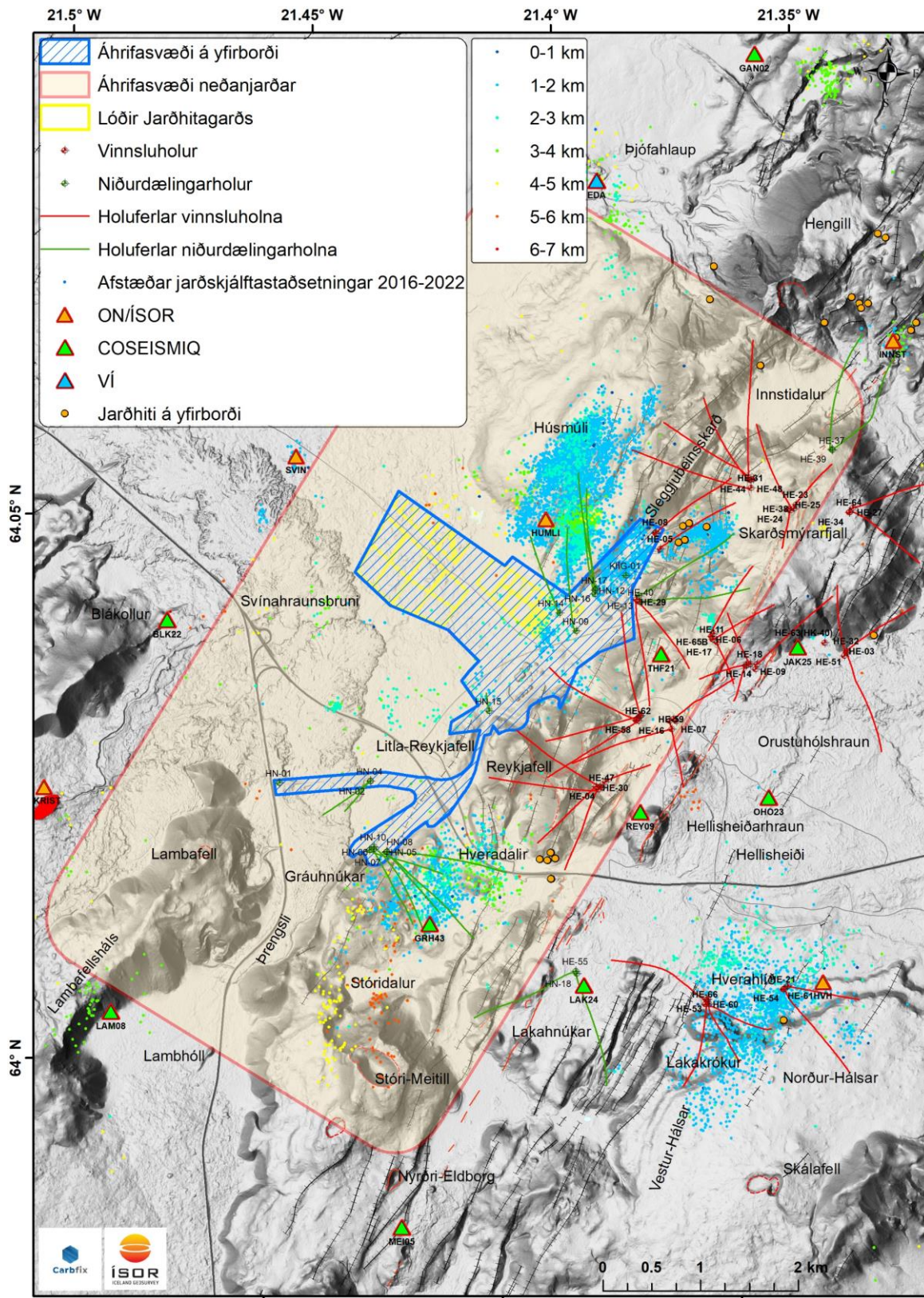
þ.e. að náttúruleg jarðskjálftavirkni virðist eiga sér stað í aðskildum þyrpingum á Hengilssvæðinu (Gillian R. Foulger, 1984, 1988). Þetta sést sömuleiðis vel á mynd 20 (Kristín Vogfjörð o.fl., 2012). Talsvert nákvæmari niðurstöður staðsetningar jarðskjálfta á Hengilssvæðinu, sérstaklega m.t.t. dýpis, fengust með COSEISMIQ-jarðskjálftamælanetinu sem rekið var á árunum 2018–2021 og er þéttasta mælanetið sem rekið hefur verið til þessa á Hengilssvæðinu (mynd 21). Mikilvægt er að hafa í huga að nýjar þyrpingar hafa nú myndast þar sem vinnsla og niðurdæling hefur haft áhrif á jarðskjálftavirkni (kaflar 7.3 og 7.4).

Almennt er talið að mörk deigu og brotgjörnu jarðskorpunnar á Hengilssvæðinu liggi á um 5–7 km dýpi, ef tekið er mið af afstæðri staðsetningu jarðskjálfta úr jarðskjálftamælaneti VÍ (Ka Lok Li o.fl., 2019) ásamt fleiri nýlegri rannsóknum (Anne Obermann o.fl., 2022). Gögn úr jarðskjálftamælaneti ON/ÍSOR sýna svipaðar niðurstöður um mörk deigu og brotgjörnu jarðskorpunnar og sjá má greinilega á mynd 22 að jarðskjálftar hvelfast dýpra til suðurs og norðurs af Hellisheiði. Grynntu jarðskjálftarnir eru staðsettir í jaðri sprungusveimsins á 0,5–1 km dýpi.

Ótrufluð svæði á Hengilssvæðinu af völdum vinnslu eða niðurdælingar eru Mosfellsheiði, Hrómundartindur-Ölkelduháls og svæðið norður af Bakka í Ölfusi. Á þessum svæðum má því gera ráð fyrir að jarðskjálftavirkni sem mælist sé eingöngu af náttúrulegum orsökum. Hafa ber í huga að náttúruleg jarðskjálftavirkni getur verið breytileg í tíma og rúmi og getur ýmist komið í hrinum eða orsakast af spennubreytingum vegna landriss eða landsigs. Vert er að nefna að fleiri tímabil landriss og landsigs hafa mælst á svipuðum slóðum og landrisið árin 1993–1999 í Grensdalseldstöðinni sem olli stóru hrinunni 1994–1998 (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 1997; Kurt L. Feigl o.fl., 2000). Árin 2006–2017 var svæðið að síga og dragast saman en árin 2017–2018 varð nýtt landris sem ekki er ljóst hvað olli en mestar líkur eru taldar á kviku-tengdum atburðum (kvika eða kvikugas) því upptökin voru samkvæmt líkönum á því dýpi sem almennt eru talin mörk brotgjörnu og deigu jarðskorpunnar á þessu svæði (Cecile Ducrocq o.fl., 2021).

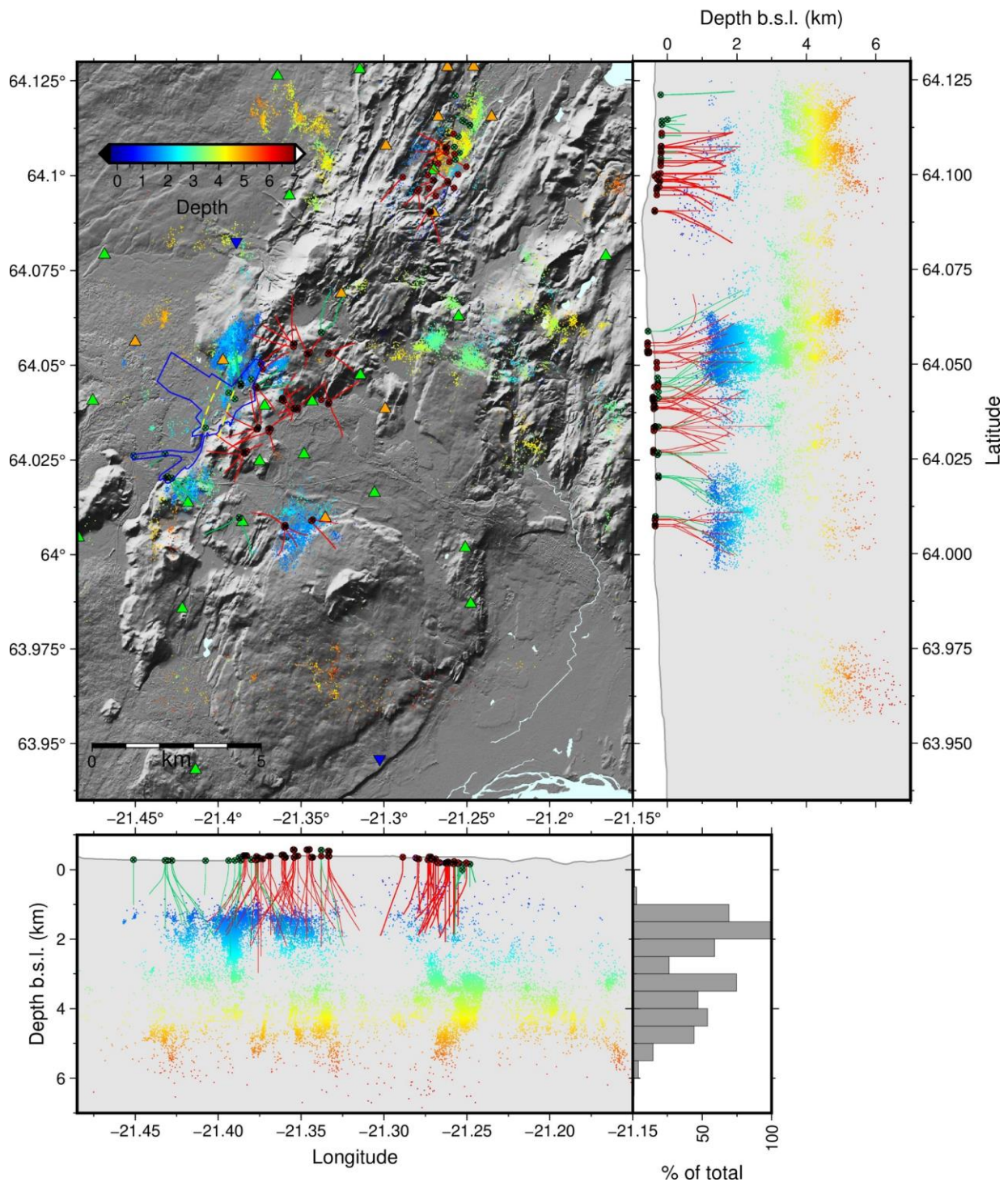
Mynd 22 sýnir vel hvernig jarðskjálftadreifingin á Hengilssvæðinu birtist í þyrpingum þar sem jarðskjálftarnir eru litaðir eftir dýpi. Ef dýptarsniðin eru skoðuð er greinilegt að virknin á helstu vinnslu- og niðurdælingarsvæðunum er töluvert grynri en annars staðar, eða á minna en ~2 km dýpi. Sú jarðskjálftavirkni sem talin er stafa af náttúrulegum orsökum hvort sem það er vegna tektónískra hreyfinga eða ferla í jarðhitakerfunum, mælist yfirleitt dýpra, eða á um 2–7 km dýpi. Þannig er örvuð jarðskjálftavirkni talin vera virkni sem á sér stað á minna en ~2,5 km dýpi, þar sem sú virkni á sér nær eingöngu stað á svæðum sem teljast til vinnslu- og niðurdælingarsvæða (mynd 23), og þar er dýpi jarðskjálftanna svipað og dýpi borholnanna. Enn hefur vísindamönnum ekki tekist að greina í sundur örvaða jarðskjálfta frá náttúrulegum jarðskjálftum með tíðnigreiningu á bylgjuformum jarðskjálfta, eða annarri sambærilegri tækni. Nánar verður fjallað um þessi áhrif vinnslu og niðurdælingar á jarðskjálftavirkni í næstu köflum (kaflar 7.3 og 7.4).





**Mynd 21.** Yfirlitsmynd sem sýnir áhrifsvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar, ásamt lóðum Jarðhitagarðs ON, vinnsluholum (rauðar), niðurdælingarholum (grænar) og jarðhita á yfirborði (appelsínugulir punktar). Afstæð staðsetning jarðskjálfta á tímabilinu 2016–2022 er sýnd með punktum og er litakóðuð eftir dýpi, og þríhyrningar sýna jarðskjálftamælistöðvar ON/ÍSOR (appelsínugular), COSEISMIQ (grænar) og VÍ (bláar).





**Mynd 22.** Afstæð staðsetning 23.060 yfirfarinna jarðskjálfta á Hengilssvæðinu frá 2016 til 2022, reiknuð með jarðskjálftastöðvum úr jarðskjálftamælanetum ON/ÍSOR (okt. 2016 til sept. 2018, og sept. 2021 til júní 2022) og COSEISMIQ (okt. 2018 til ágúst 2022), auk nálægra stöðva úr jarðskjálftamælaneti VÍ. Sjá má afstæða staðsetningu alls 18.576 jarðskjálfta en reikningum voru sett ströng skilyrði um m.a. 8 bylgjufasa (P og S) á ON/ÍSOR-tímabilinu og 10 fasa á COSEISMIQ-tímabilinu að lágmarki, og bil milli jarðskjálftastöðva var  $< 180^\circ$  (e. azimuthal gap). ON/ÍSOR-jarðskjálftastöðvar eru sýndar sem appelsínugulir þríhyrningar, COSEISMIQ eru grænir og VÍ bláir. Sýndar eru allar borholur, ásamt holuferlum, sem nýttar voru til vinnslu (rauður) og niðurdælingu (grænn) árið 2020.

### 7.3 Áhrif vinnslu á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði

Á virkum jarðhita- og jarðskjálftasvæðum líkt og Hellisheiði er bergspenna mismunandi eftir áttum og spennuorka hleðst upp með tíma uns bergið brestur í jarðskjálfta. Truflun á þessu spennuástandi, t.d. vegna þrýstilækkunar í jarðhitakerfinu og suðu af völdum vinnslu, getur þannig örvað jarðskjálftavirkni. Þrýstilækkun og niðurdráttur getur valdið slíkum fasa-breytingum í jarðhitakerfinu að gufupúði myndast, sem getur stækkað með tíma við sambærilega eða aukna vinnslu úr jarðhitakerfinu. Eftir því sem gufupúðinn stækkar má búast við því að örvuðum jarðskjálftum fjölgi í takt við stærð gufupúðans.

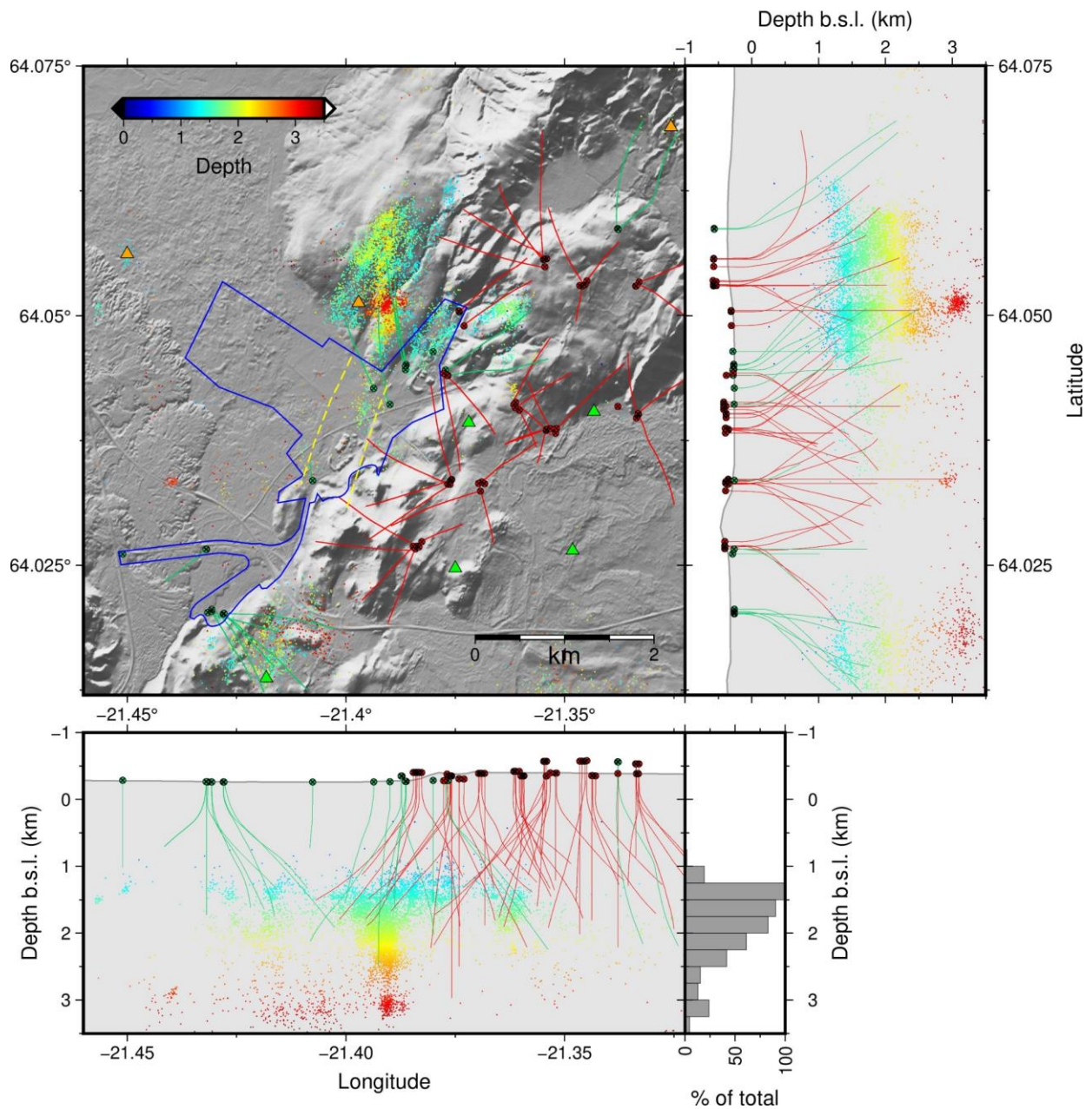
Þó dæmi um áhrif vinnslu séu færri en dæmi um áhrif niurdælingar á jarðskjálftavirkni eru þó til dæmi bæði hérlendis og erlendis frá, t.d. frá Kröflu (Egill Árni Guðnason o.fl., 2021), Hverahlíð (Sigríður Kristjánsdóttir o.fl., 2019) og Reykjanesi (Egill Árni Guðnason o.fl., 2020). Af þekktum dæmum eru þó örvaðir jarðskjálftar af völdum vinnslu yfirleitt minni en af völdum niurdælingar. Til vinnslusvæða á Hengilssvæðinu öllu teljast Hellisheiði, Hverahlíð og Nesjavellir en í þessum kafla eru tekin dæmi um áhrif vinnslu á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði og í Hverahlíð.

#### Hellisheiði

Vinnslusvæðið á Hellisheiði afmarkast gróflega af Innstadal í norðri og Hverahlíð í suðri (myndir 1 og 2). Vinnsla hófst þegar Hellisheiðarvirkjun var gangsett árið 2006 og liggur aðalvinnslusvæðið frá Skarðsmýrarfjalli í norðri og innan sprungusveims Hengilssvæðisins til suðurs að Þjóðvegi 1 á Hellisheiði en að auki fer fram vinnsla í Hverahlíð sunnan Þjóðvegarins þar sem öflugustu holur landsins eru (kafla 8.3). Árið 2020 voru alls 46 holur tengdar Hellisheiðarvirkjun og voru 44 þeirra í nýtingu einhvern tíma ársins (Ingvi Gunnarsson o.fl., 2021). Niurdælingarsvæðin eru svo flest á jöðrum sprungusveimsins og aðalvinnslusvæðisins, eins og nánar er fjallað um í kafla 7.4.

Á mynd 22 má sjá að jarðskjálftar á Hengilssvæðinu öllu eru flestir á 0-6 km dýpi en mesti þéttleikinn á Hellisheiði er á 1,5–2,5 km dýpi (mynd 23), eða á dýptarbili flestra borholna. Á mynd 23 sést einnig að jarðskjálftadreifingin á Hellisheiði er nokkuð tvískipt í dýpi, grynri virkni er á 1–2,5 km dýpi og dýpri virkni á 4–6 km dýpi. Talið er að grynri virkni sé að miklu leyti örvuð af hvoru tveggja niurdælingu og vinnslu en sú dýpri sé náttúruleg virkni af völdum jarðskorpuhreyfinga og ferla í jarðhitakerfinu (t.d. Anne Obermann o.fl., 2022).

Niðurdráttur mælist í vinnsluholum á öllu vinnslusvæðinu á Hellisheiði, þ.e. frá norðanverðu Skarðsmýrarfjalli til Hverahlíðar. Mestur er niðurdrátturinn í gosreininni þar sem gosið hefur endurtekið síðastliðin 10.000 ár, þ.e. í miðju vinnslusvæðisins, milli holna HE-4 og HE-9, þar sem vinnslan er mest og hefur varað hvað lengst (mynd 1) (Ingvi Gunnarsson o.fl., 2021). Nokkur aflögun hefur mælst á um 7 km löngu svæði mesta niðurdráttar með GPS og gervitunglagögnum (InSAR) sem rekja má til grunnstæðra ferla á minna en 3 km dýpi (Daniel Juncu o.fl., 2017; 2020; Cecile Ducrocq o.fl., 2020, 2021). Engin sérstök jarðskjálftavirkni virðist þó örvuð á aðalvinnslusvæðinu, þ.e. innan sprungusveimsins frá Skarðsmýrarfjalli suður að Þjóðvegi, þrátt fyrir þennan mikla niðurdrátt og vinnslu á meðan mikil jarðskjálftavirkni mælist á niurdælingarsvæðunum sem eru í jaðri sprungusveimsins og í Hverahlíð (kaflar 7.3 og 7.4). Því má leiða að því líkum að meiri lekt og lægra spennuástand innan sprungusveimsins, en við jaðra hans, sé þess valdandi að áhrif vinnslu á jarðskjálftavirkni á þessu svæði sé lítil sem engin.



**Mynd 23.** Nærmynd af Hellisheiði: Afstæð staðsetning jarðskjálfta á Hellisheiði á tímabilinu 2016–2022 fyrir sömu skilyrði og á mynd 22. Útmörk áhrifsvæðis á yfirborði eru skilgreind með blárri línu og jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi. ON/ÍSOR-jarðskjálftastöðvar eru sýndar sem appelsínugulir þríhyrningar, COSEISMIQ eru grænir og VÍ bláir. Sýndar eru allar borholur, ásamt holuferlum, sem nýttar voru til vinnslu (rauður) og niðurdælingar (grænn) árið 2020. Gular punktalínur sýna áætlaða legu misgengja sem kortlögð voru með þyngdarmælingum (Arnar Már Vilhjálmsson og Ingvar Þór Magnússon, 2010a, 2010b).



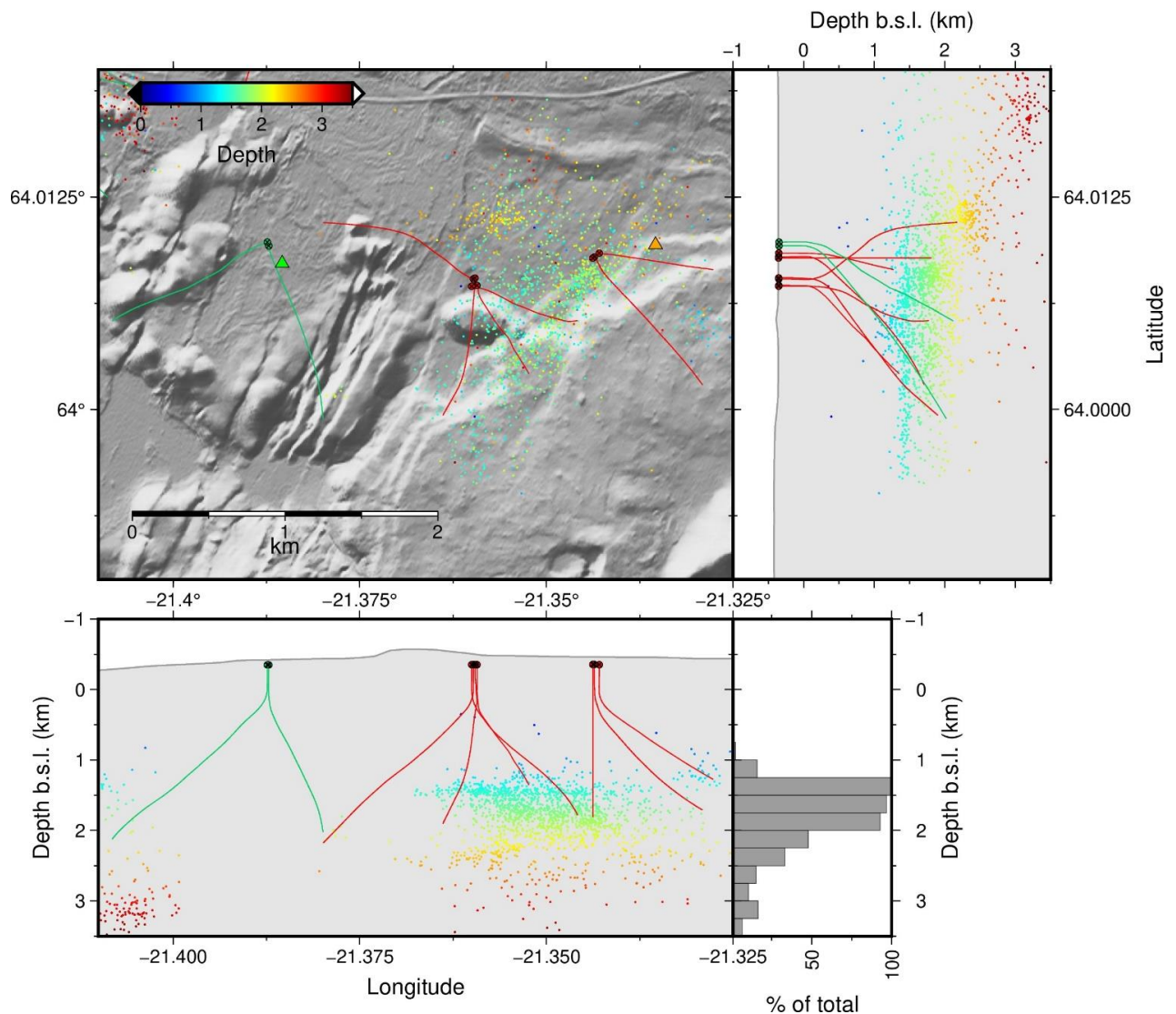
## Hverahlíð

Jarðhitasvæðið í Hverahlíð var fyrst nýtt til orkuöflunar í janúar árið 2016 en þar eru öflugustu vinnsluholur landsins. Þó nokkur jarðskjálftavirkni mældist á Hverahlíðarsvæðinu í jarðskjálftahrinunni á Hengilssvæðinu árin 1994–1998 (Kristín Vogfjörð o.fl., 2012) en frá því að hrinunni lauk og fram til þess tíma er vinnsla hófst var svæðið jarðskjálftalaust. Jarðskjálftavirkni í Hverahlíð jókst samhliða vinnslunni og frá 2016 til 2019 voru rúmlega 1.000 jarðskjálftar staðsettir á svæðinu (Sigríður Kristjánsdóttir o.fl., 2019).

Jarðskjálftavirknin er bundin við vinnslusvæðið í Hverahlíð á 1,5–2,5 km dýpi (mynd 24). Mesti þéttleikinn er á 1,5–2,0 km dýpi, sem er u.þ.b. sama dýpi og flestar vinnsluholur ná til á svæðinu. Þannig má ætla að jarðskjálftavirknin sé fyrst og fremst örвуð af völdum vinnslunnar. Jarðskjálftavirknin einkennist af dreifðri virkni lítilla jarðskjálfta (< 1 M<sub>L</sub>) í einni þyrpingu og virðist ekki raða sér á fleti eða virkar sprungur. Einstaka litlar hrinur eiga sér stað en mest hafa mælst 15 skjálftar á dag (Sigríður Kristjánsdóttir o.fl., 2019; Anne Obermann o.fl., 2022).

Jarðskjálftavirknin í Hverahlíð einskorðast við svæðið þar sem grynnt er niður á efri mörk lágviðnámskápunnar og talið er að jarðskjálftarnir endurspegli því svæðið þar sem massataka á sér stað (Sigríður Kristjánsdóttir o.fl., 2019). Þar er bæði góð lekt og hár hiti. Sameiginleg túlkun á jarðskjálfta- og viðnámsgögnum gefur til kynna svæði í Hverahlíð, afmarkað af lágviðnámskápu og háviðnámskjarna undir henni, þar sem suða af völdum vinnslu og þrýstilækkunar í jarðhitakerfinu á sér stað, en tvær vinnsluholnanna í Hverahlíð, HE-60 og HE-61, eru þær öflugustu á landinu (Ingvi Gunnarsson o.fl., 2021). Nokkuð minni niðurdráttur mælist í Hverahlíð en annars staðar á Hellisheiði, enda er vinnslusagan þar öllu styttri, og sömu sögu er að segja um landsig (Cecile Ducrocq o.fl., 2020).

Þrýstilækkun og niðurdráttur í kjölfar vinnslu í Hverahlíð hefur valdið slíkum fasabreytingum að gufupúði hefur myndast. Með tíð og tíma má gera ráð fyrir að gufupúðinn stækki miðað við sambærilega eða aukna vinnslu úr jarðhitakerfinu. Talið er að jarðskjálftavirknin í Hverahlíð einskorðist við gufupúðann, þ.e. afmarki það svæði þar sem massatakan á sér stað, og sé því af völdum suðu í jarðhitakerfinu (Sigríður Kristjánsdóttir o.fl., 2019). Miðað við fyrirbyggjandi gögn má gera ráð fyrir því að jarðskjálftavirkni vaxi eitthvað í takt við stærð gufupúðans en líklegt er að jarðskjálftar verði yfirleitt smáir, eða minni en 3 M<sub>L</sub> að stærð, sé tekið mið af gögnum úr Hverahlíð og öðrum dæmum um örvaða jarðskjálftavirkni af völdum vinnslu á Íslandi, þ.e. frá Reykjanesi (Egill Árni Guðnason o.fl., 2020) og Kröflu (Egill Árni Guðnason o.fl., 2021). Niðurstöður um lágan S-bylgjuhraða sem hvelfist niður undir Hverahlíð, á sama stað og reiknað gufuhlutfall er í hámarki, styður líka þá kenningu (Pilar Sánchez-Pastor o.fl., 2021).



**Mynd 24.** Afstæð staðsetning jarðskjálfta í Hverahlíð á tímabilinu 2016–2022. Jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi og dýptarsnið ná aðeins niður á 3,5 km dýpi. Vinnsluholur og holuferlar eru sýndar með rauðum lit en niðurdælingarholur og holuferlar með grænum lit.

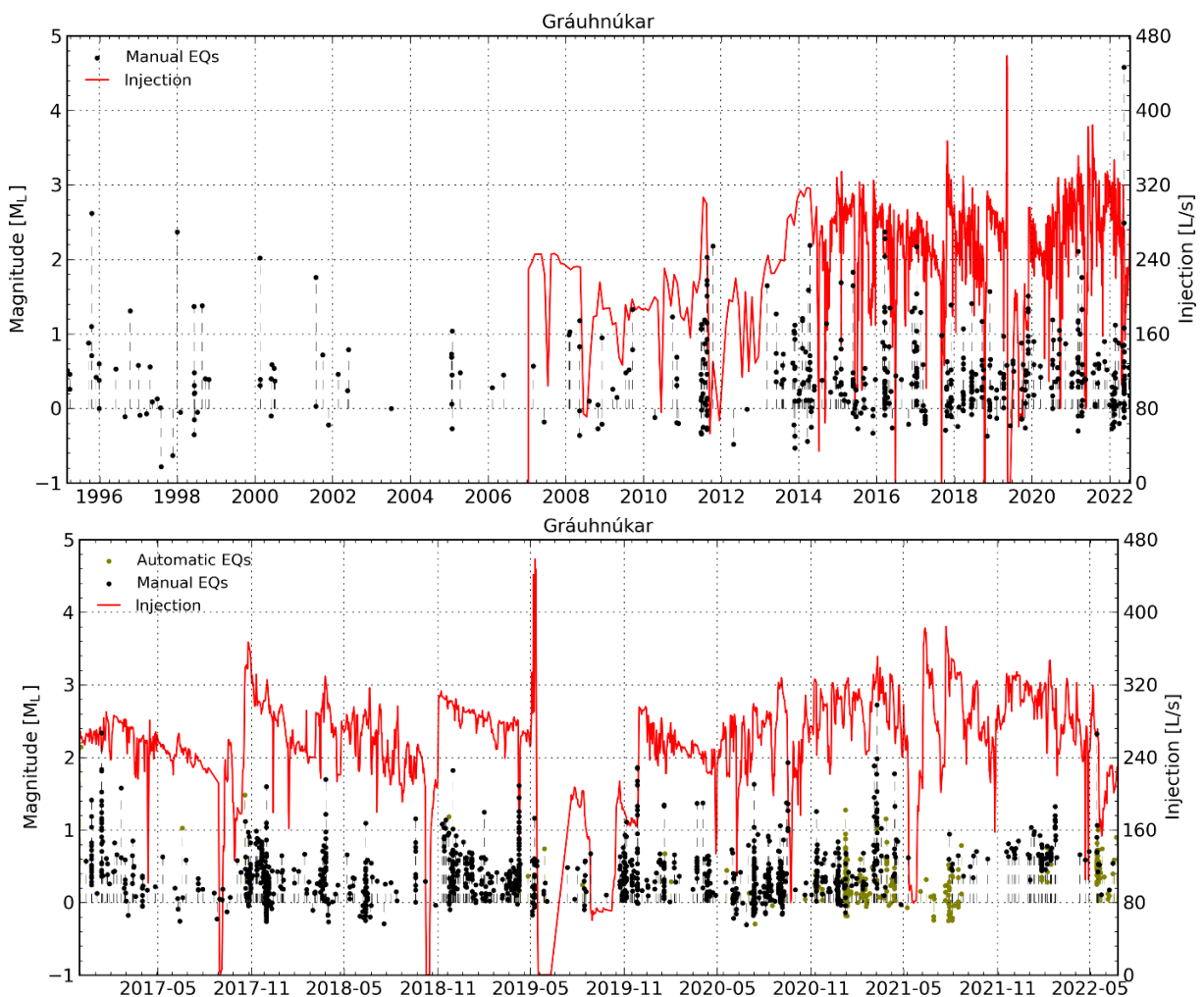
## 7.4 Áhrif niðurdælingar á jarðskjálftavirkni á Hellsheiði

Fjöldmörg dæmi eru um að niðurdæling vatns geti örvað jarðskjálftavirkni, bæði hérlendis og erlendis. Líkt og nefnt var í kafla 7.3 hleðst spennuorka í bergi upp með tíma og því getur truflun á þessu spennuástandi með niðurdælingu vatns flýtt fyrir jarðskjálfta sem í vændum var en vatnið eykur þrýsting og kælir sprungufleti, sem auðveldar hreyfingu þeirra og getur þannig leitt til þess að spennuorkan, sem bundin er í berginu, losni í jarðskjálfta. Dæmi líkt og frá Húsmúla sýna að slíkir örvaðir jarðskjálftar geta orðið allt að því eins stórir og stærstu jarðskjálftar á viðkomandi svæði sé nægilega miklu magni vatns dælt niður undir háum þrýstingi (Bjarni Bessason o.fl., 2012; Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021). Í þessum kafla eru áhrif niðurdælingar á jarðskjálftavirkni á Hellsheiði skoðuð, þ.e. í Gráuhnúkum, Húsmúla, Sleggju-beinsdal, Þrengslum, Skarðsmýrarfjalli og Hverahlíð.

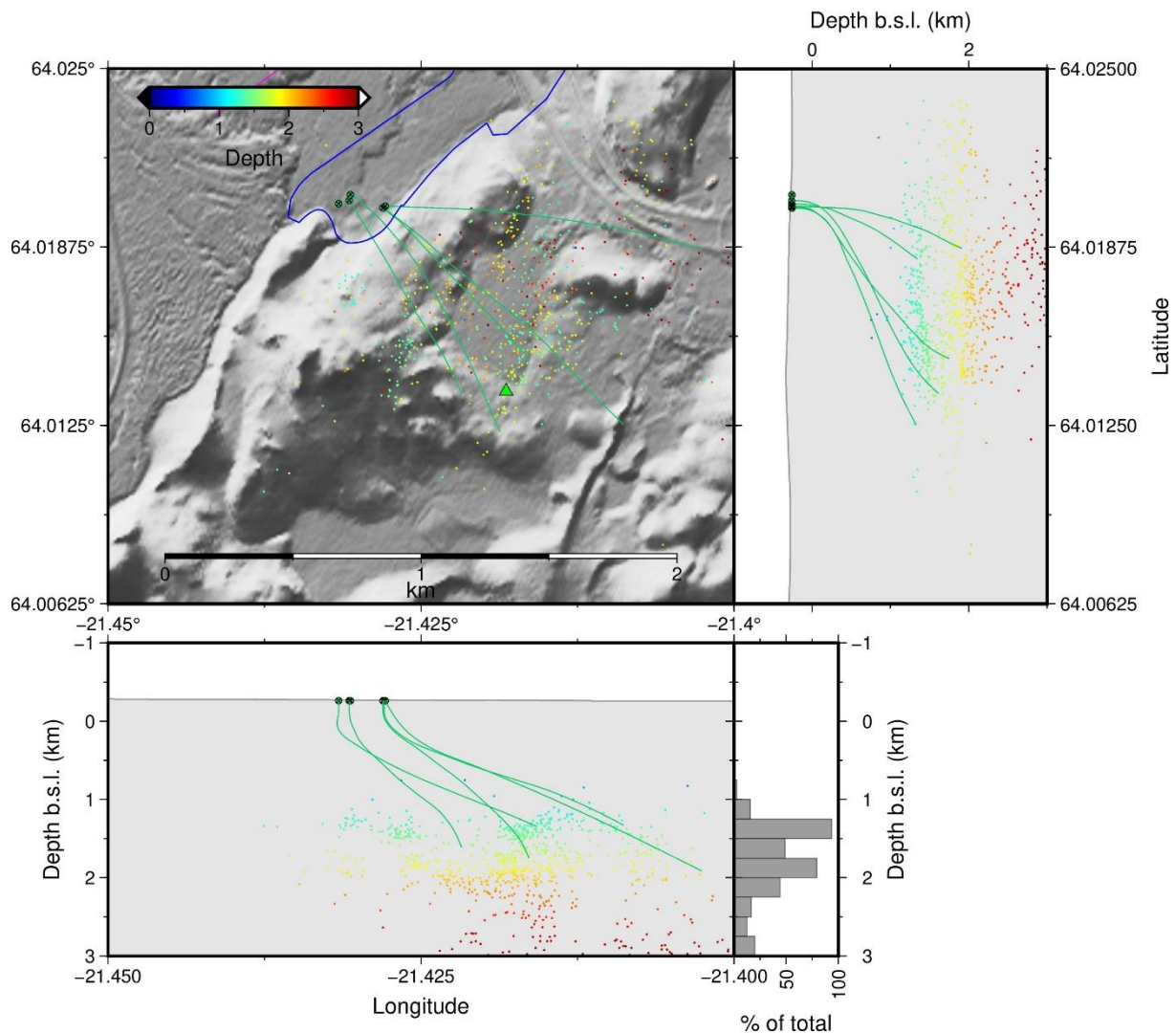
## Gráuhnúkar

Upphaflegt niðurdælingarsvæði Orku náttúrunnar við Gráuhnúka var tekið í notkun árið 2007. Ekki greindist aukin jarðskjálftavirkni þegar niðurdælingarsvæðið var tekið í notkun, eins og sjá má á mynd 25, en tekið skal fram að á þeim tíma og fram til ársins 2016 er aðeins hægt að styðjast við gögn úr jarðskjálftamælaneti VÍ sem ekki er víst að hafi næga næmni til að staðsetja litla, örvaða jarðskjálfta ( $< 2 M_L$ ) á þessu svæði.

Frá árinu 2007 er dælt niður í niðurdælingarholur HN-3, HN-5, HN-6, HN-7, HN-8 og HN-10 í Gráuhnúkum, sem eru á bilinu 1,8–2,6 km djúpar og eru allar stefnuboraðar til suðausturs inn í sprungusveim Hengilssvæðisins, þar sem siggengi eru ríkjandi og því líkur á að togspennur séu ráðandi (mynd 1). Eins og sést á mynd 25 mældist lítil jarðskjálftavirkni í Gráuhnúkum áður en að niðurdæling hófst. Dæmi eru um að breytingar í niðurrennsli hafi valdið örvaðri jarðskjálftavirkni í Gráuhnúkum og þótt jarðskjálftavirkni sé hrinukennd eru hrinurnar vægar og jarðskjálftar litlir ( $< 2 M_L$ ) (mynd 26) (Sigríður Kristjánsdóttir og Kristján Ágústsson, 2017).



**Mynd 25.** Jarðskjálftavirkni í Gráuhnúkum eins og hún mælist á SIL-jarðskjálftamælaneti VÍ frá upphafi mælinga árið 1995 (efri) og á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 (neðri). Stærð jarðskjálfta ( $M_L$ ) er teiknuð sem fall af tíma og rauð lína sýnir heildar-niðurdælingu í holur HN-3, HN-5, HN-6, HN-7, HN-8 og HN-10. Svartir punktar tákna handvirkir yfirfarna jarðskjálfta og grænbrúnir punktar tákna sjálfvirkir staðsetta jarðskjálfta.



**Mynd 26.** Afstæð staðsetning jarðskjálfta í Gráuhnúkum á tímabilinu 2016–2022. Jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi og niðurdælingarholur og holuferlar í Gráuhnúkum eru sýndir með grænum lit.

### Húsmúli

Nokkurrar smáskjálftavirkni varð vart þegar niðurdælingarholurnar á Húsmúlasvæðinu, HN-9, HN-12, HN-14, HN-16 og HN-17, voru boraðar og prófaðar á árunum 2007–2011 (sjá mynd 1) (Kristján Ágústsson o.fl., 2015; Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021). Niðurdælingarholurnar eru allar á bilinu 1,9–3 km djúpar. Það er algengt að jarðskjálftavirkni mælist samhliða borun, þá fyrst og fremst þegar borinn hittir á vel vatnsleiðandi jarðlög og skoltap verður í holunni. Smáskjálftavirknin sem mældist samhliða borun og prófun þessara holna var því talin góðs viti og til marks um að borholur hefðu hitt á vel vatnsleiðandi jarðlög.

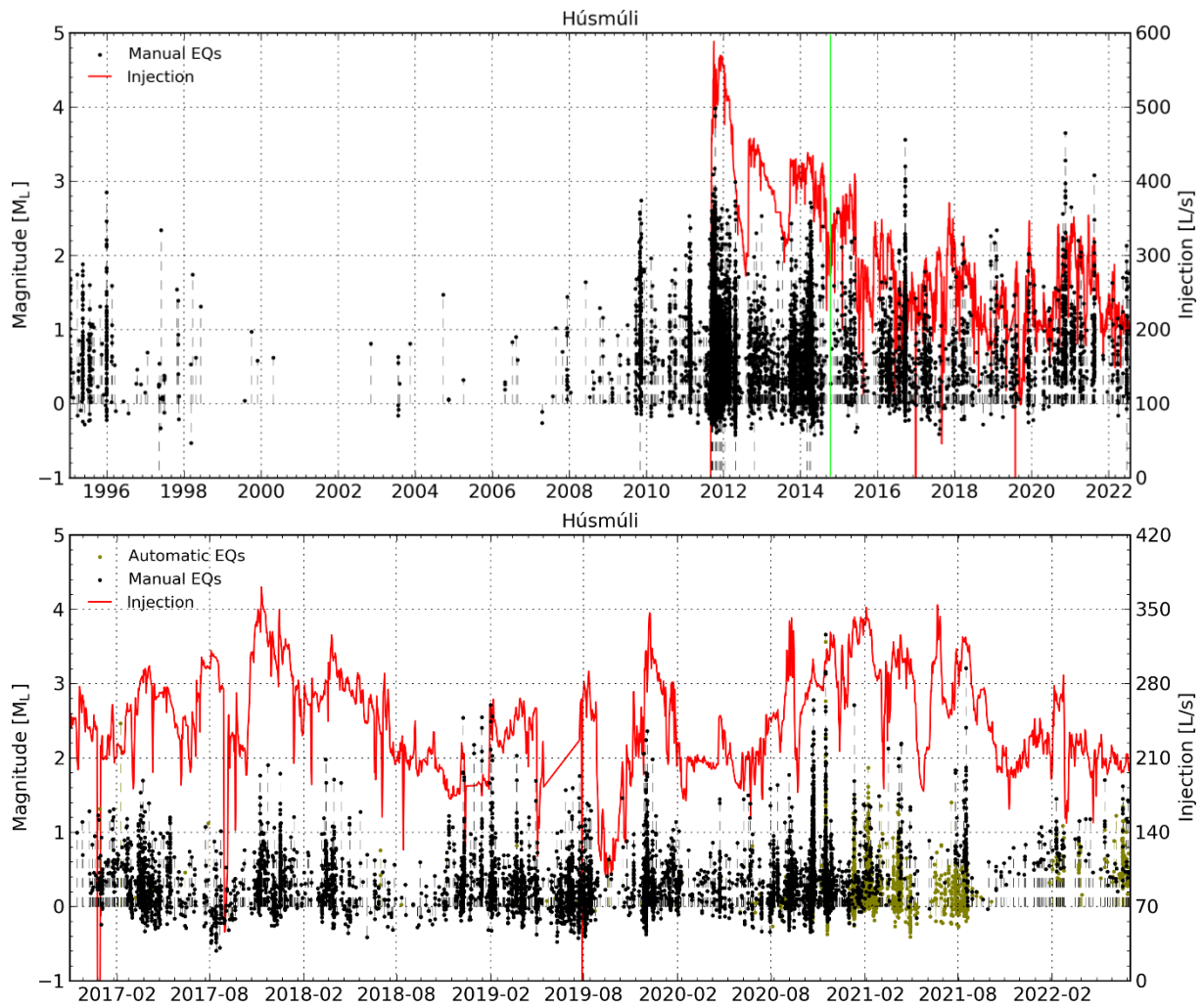
Niðurdæling á affallsvatni frá Hellisheiðarvirkjun hófst svo við Húsmúla í byrjun september 2011 þegar niðurdælingarveitan var tekin í gagnið. Allmikil örвуð jarðskjálftavirkni fylgdi gangsetningunni og jókst jarðskjálftavirknin jafnt og þétt uns hún náði hámarki í október sama ár þegar tveir stærstu jarðskjálftarnir náðu 3,8 og 4,0  $M_L$  að stærð. Eftir að þessu hámarki var náð var dregið úr magni niðurdælingar og minnkaði jarðskjálftavirkni að sama skapi (Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021). Hrinur urðu sjaldnar og voru minni og vægari en fyrstu mánuðina. Mjög staðbundin aflögun hefur fylgt niðurdælingunni í Húsmúla en í upphafi mældist landris

líklega vegna aukins þoruþrýstings af völdum niðurdælingarinnar og fram til ársins 2019 hafa orðið þrjár lotur þar sem land rís og sigur svo á milli (Daniel Juncu o.fl., 2017; 2020; Cecile Ducrocq o.fl., 2020).

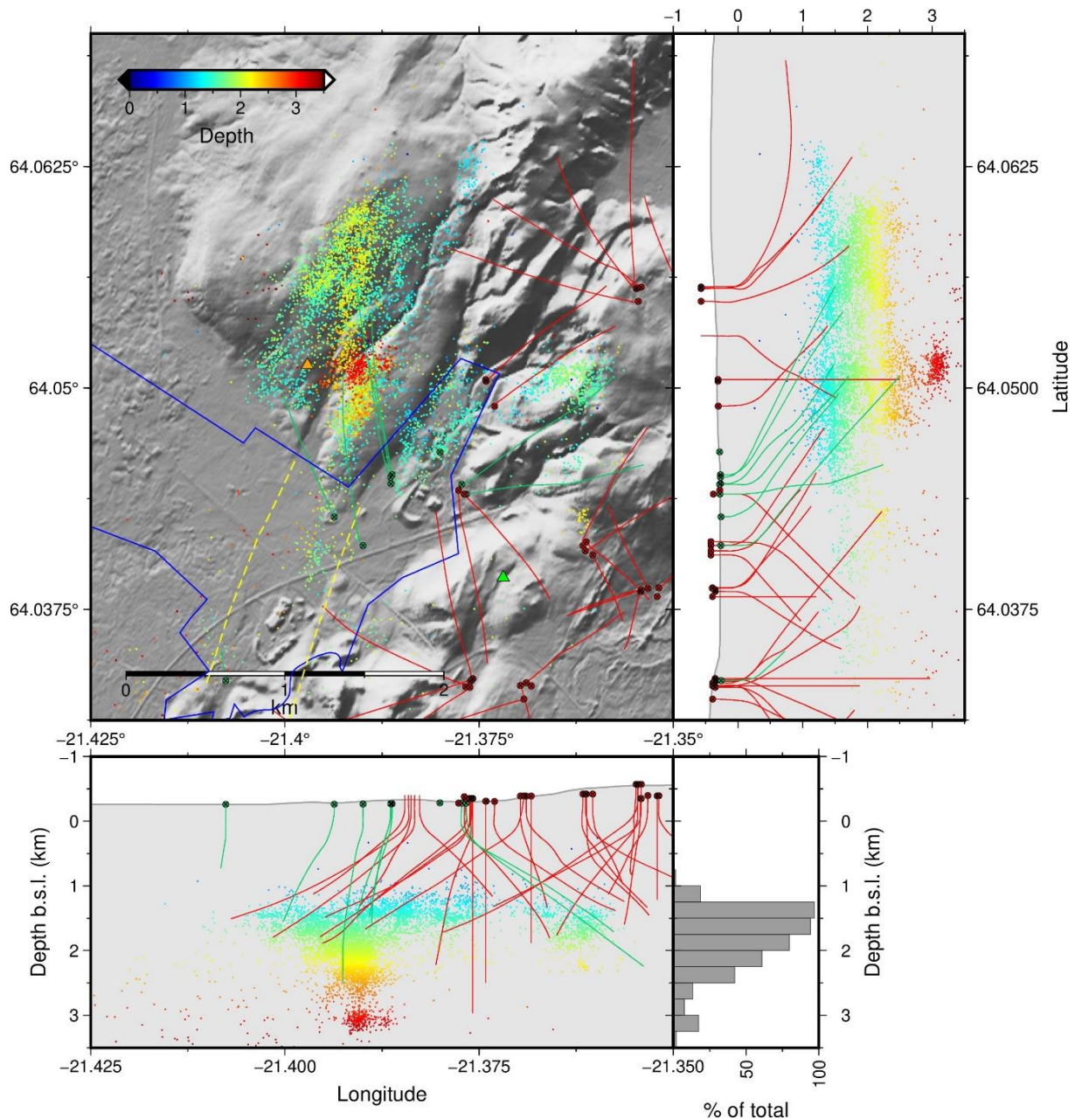
Á undanförunum 11 árum hefur ON unnið samkvæmt verklagi um niðurdælingu og reglum Orkustofnunar, OS-2016-R01-01, um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar vökva í jörðu um borholur. Það miðar að því að gera ekki skyndilegar breytingar á niðurdælingu, og minnka þannig hættu á örvaðri jarðskjálftavirkni. Nokkuð vel hefur til tekist við Húsmúla því þótt jarðskjálftavirkni mælist ennþá í einstaka hrinum hefur virknin minnkað með tímanum, hrinur verða sjaldnar og eru minni og vægari en í upphafi (myndir 27 og 28). Þetta er skýr vísbending um að niðurdælingin hafi losað um mestu mismunaspennuna við Húsmúla og að nokkurs konar vökva- og þrýstijafnvægi sé að komast þar á. Náttúruleg spennusöfnun á svæðinu er auk þess hægari sökum þess að stöðug niðurdæling leysir spennuna út jafnóðum og eru því minni líkur á stórum skjálfta (> 3 ML) (Sigríður Kristjánsdóttir og Kristján Ágústsson, 2017). Brotlausnir benda til þess að örvuð jarðskjálftavirkni í Húsmúla eigi sér fyrst og fremst stað á sniðgengjum, líkt og á þeim misgengjum sem algeng eru í skjálftabelti Suðurlands (Bjarni Bessason o.fl., 2012).

Í lok apríl árið 2014 varð sú breyting á niðurdælingu í Húsmúla að CO<sub>2</sub> var í fyrsta skipti leyst upp í niðurdælingarvatninu. Sú breyting á efnasamsetningu vökvans olli ekki aukningu í jarðskjálftavirkni en gögn benda frekar til þess að örvuð jarðskjálftavirkni hafi mögulega minnkað í kjölfarið, ef eitthvað er (Carbfix, 2020; Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021). Græn lína á mynd 27 (efri mynd) markar upphaf leysni CO<sub>2</sub> í niðurdælingarvatni í Húsmúla.





**Mynd 27.** Jarðskjálftavirkni í Húsmúla eins og hún mælist á SIL-jarðskjálftamælaneti VÍ frá upphafi mælinga árið 1995 (efri) og á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 (nedri). Stærð jarðskjálfta ( $M_L$ ) er teiknuð sem fall af tíma og rauð lína sýnir heildarniðurdælingu í holur HN-9, HN-12, HN-14, HN-16 og HN-17. Svartir punktar tákna handvirkt yfirfarna jarðskjálfta og grænbrúnir punktar tákna sjálfvirkt staðsetta jarðskjálfta. Græn lína á efri mynd tákna upphaf  $CO_2$ -leysni í niðurdælingarvatni í Húsmúla.



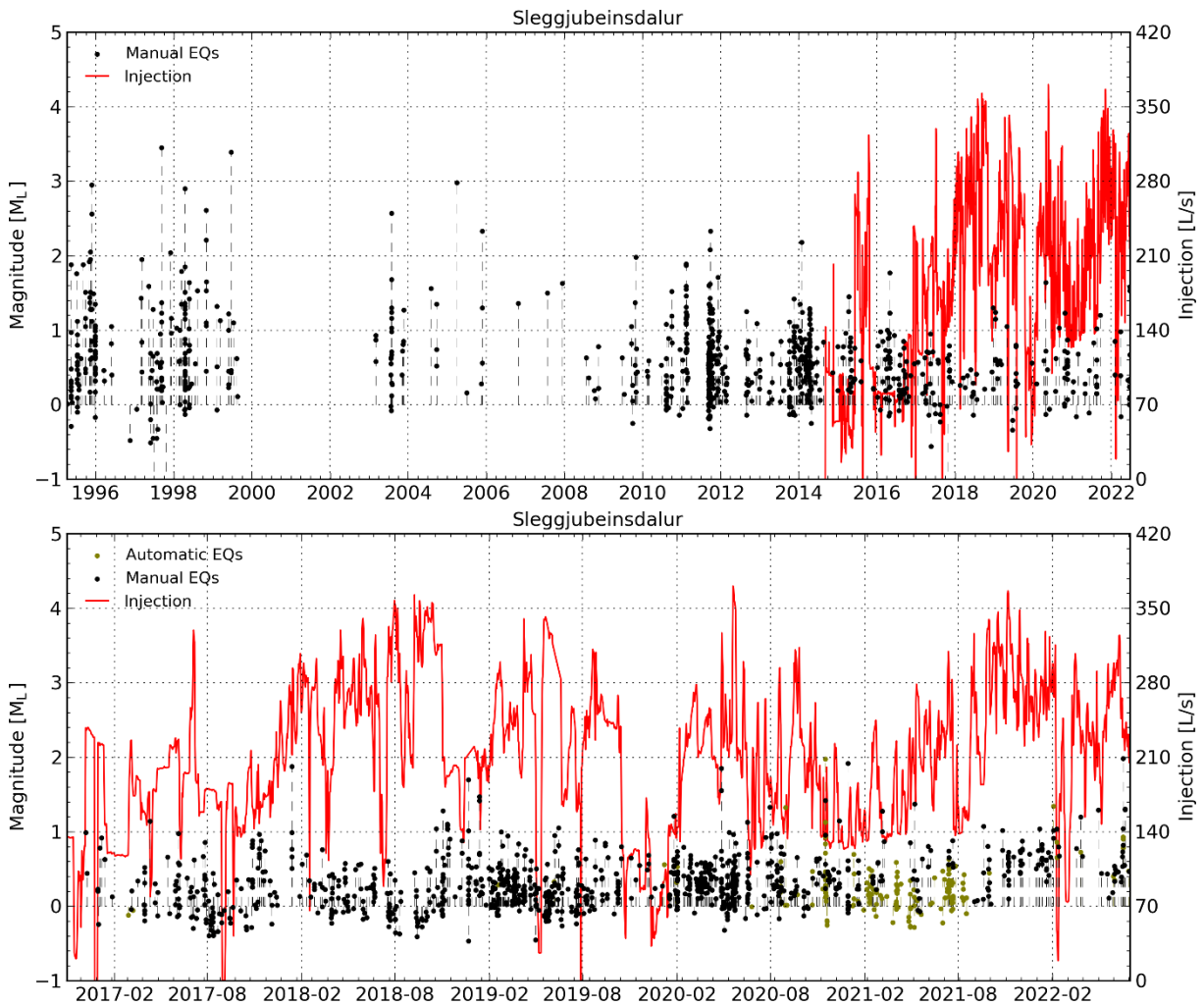
**Mynd 28.** Afstæð staðsetning jarðskjálfta í Húsmúla á tímabilinu 2016–2022. Útmörk áhrifasvæðis á yfirborði eru skilgreind með blárri línu og jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi. Sýndar eru allar borholur, ásamt holuferlum, sem nýttar voru til vinnslu (rauður) og niðurdælingar (grænn) árið 2020. Gular punktalínur sýna áætlaða legu misgengja sem kortlögð voru með þyngdar-mælingum (Arnar Már Vilhjálmsson og Ingvar Þór Magnússon, 2010a, 2010b).

### Sleggjubeinsdalur

Í Sleggjubeinsdal, rétt austan við Húsmúla, eru þrjár holur sem upphaflega voru boraðar sem vinnsluholur en hafa síðar betur nýst sem niðurdælingarholur. Þetta eru holur HE-13 og HE-40 sem voru stefnuboraðar úr Sleggjubeinsdal til austurs, og eru 2,4 og 2,8 km djúpar, og hola KhG-1 sem er lóðrétt og 1,8 km djúp (mynd 1). Niðurdæling hófst í holur HE-13 og HE-40 í september 2014 og í holu KhG-1 í desember 2016.



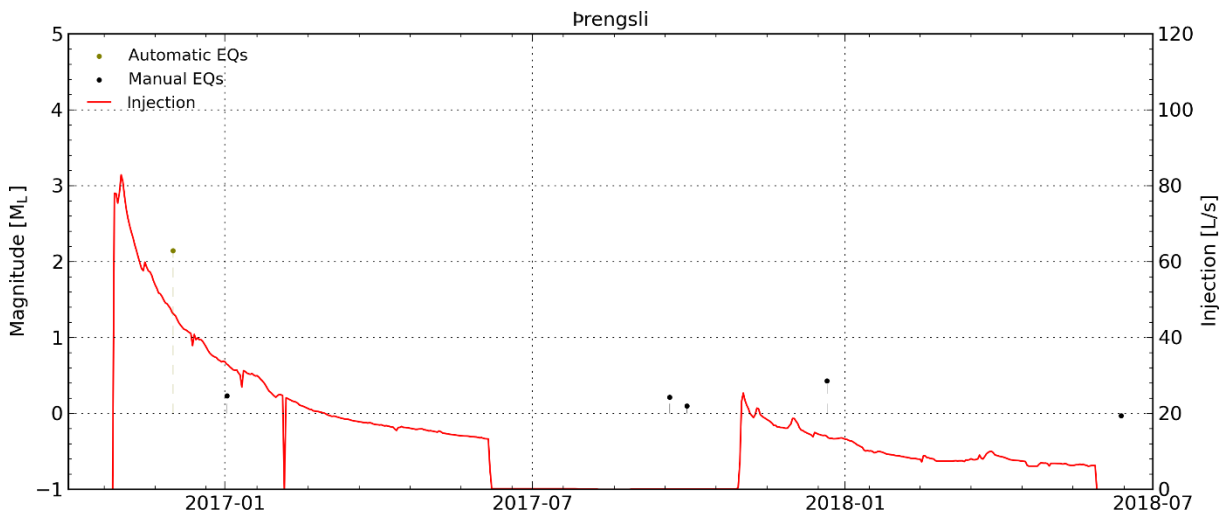
Af mynd 29 að dæma var áhrifasvæði niðurdælingar í Sleggjubeinsdal virkt jarðskjálftasvæði áður en að niðurdæling hófst og svo virðist sem dregið hafi úr jarðskjálftavirkni eftir að niðurdæling hófst, ef eitthvað er. Þótt miklu magni sé dælt niður virðist spennuástand í bergi töluvert frábrugðið og ekki jafn viðkvæmt fyrir niðurdælingu vökva og í Húsmúla þótt stutt sé á milli þessara svæða. Jarðskjálftavirkni sem mælist á svæðinu einkennist af nokkuð jafndreifðri virkni smáskjálfta ( $< 1 M_L$ ) í tíma og ekki er augljós fylgni með breytingum í niðurdælingarmagni (mynd 29). Vert er að nefna að aflögunarmerkið sem mælist í Húsmúla teygir sig að einhverju leyti líka yfir í Sleggjubeinsdal (Daniel Juncu o.fl., 2017; 2020; Cecile Ducrocq o.fl., 2020).



**Mynd 29.** Jarðskjálftavirkni í Sleggjubeinsdal eins og hún mælist á SIL-jarðskjálftamælaneti VÍ frá upphafi mælinga árið 1995 (efri) og á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 (neðri). Stærð jarðskjálfta ( $M_L$ ) er teiknuð sem fall af tíma og rauð lína sýnir heildar-niðurdælingu í holur HE-13, HE-40 og KhG-1. Svartir punktar tákna handvirkir yfirfarna jarðskjálfta og grænbrúnir punktar tákna sjálfvirkir staðsetta jarðskjálfta.

## Þrengsli

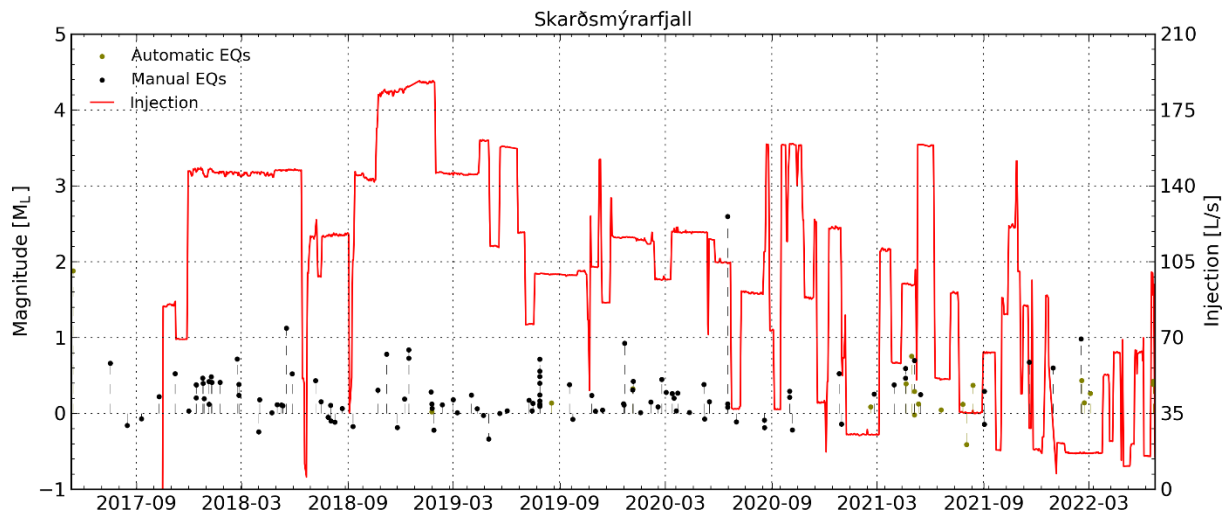
Í Þrengslum fór fram tilraunaniðurdæling á skiljuvatni ofan í holur HN-1, HN-2, HN-4 og HK-34, sem hófst síðla hausts 2016 og lauk um mitt ár 2018, en holurnar eru allar tiltölulega grunnar, eða á bilinu 800–2000 m (mynd 1). Framkvæmd niðurdælingarinnar var á þann veg að mestu magni var dælt niður í upphafi og dregið var úr niðurdælingunni með tíma. Þessi tilraun örvaði ekki neina jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði niðurdælingarinnar í Þrengslum, eins og sést á mynd 30.



**Mynd 30.** Jarðskjálftavirkni í Þrengslum eins og hún mælist á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016 og á meðan tilraunaniðurdælingu í Þrengslum stóð. Stærð jarðskjálfta ( $M_L$ ) er teiknuð sem fall af tíma og rauð lína sýnir heildarniðurdælingu í holur HN-1, HN-2, HN-4 og HK-34.

## Skarðsmýrarfjall

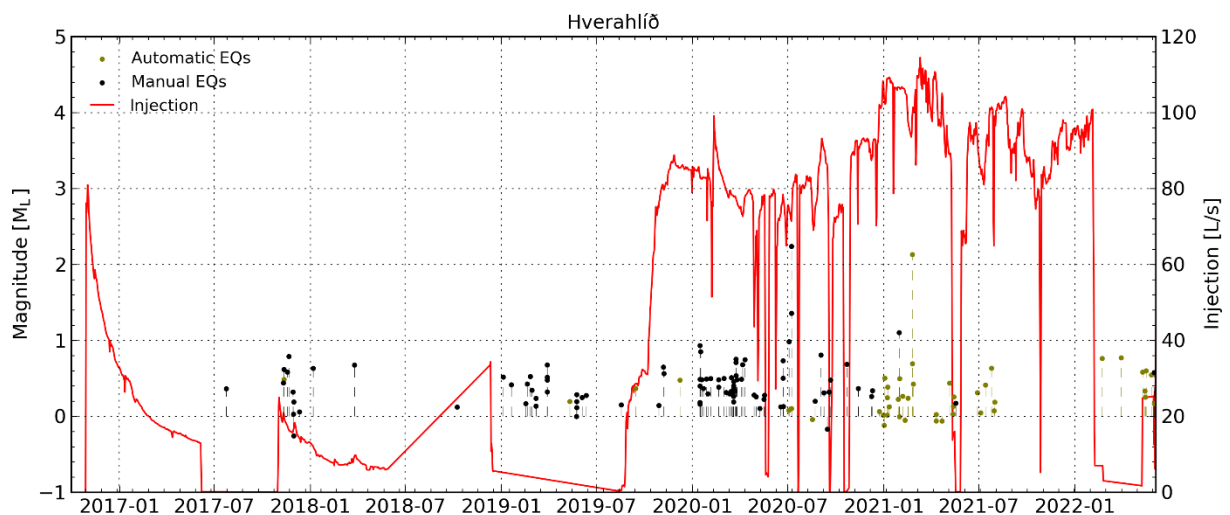
Dælt hefur verið niður í tvær holur á þessu svæði sem upphaflega voru boraðar sem vinnsluholur en hafa síðar betur nýst sem niðurdælingarholur. Þetta eru holur HE-37 og HE-39 sem stefnuboraðar voru af Skarðsmýrarfjalli til norðurs og eru báðar 3,1 km djúpar (mynd 1). Niðurdæling hófst í holurnar í október 2017 og frá þeim tíma hefur mælst jarðskjálftavirkni á því svæði sem ætla má að yrði fyrir áhrifum af niðurdælingunni. Því má leiða að því líkum að jarðskjálftavirknin sem mælst hefur sé örvuð af niðurdælingunni. Jarðskjálftavirknin er þó lítilsháttar, þ.e. jarðskjálftar flestir litlir ( $< 1 M_L$ ), dreifðir í tíma og ekki augljós fylgni með breytingum í niðurdælingarmagni (mynd 31).



**Mynd 31.** Jarðskjálftavirkni norður af Skarðsmýrarfjalli eins og hún mælist á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016. Stærð jarðskjálfta ( $M_L$ ) er teiknuð sem fall af tíma og rauð lína sýnir heildarniðurdælingu í holur HE-37 og HE-39.

### Hverahlíð

Í Hverahlíð hefur verið dælt niður í holur HE-55 og HN-18 frá upphafi árs 2016. Hóla HE-55 er stefnuboruð til suðvesturs frá borplani við Lakahnúka, inn í sprungusveim Hengils-svæðisins, líkt og niðurdælingarholurnar í Gráuhnúkum, og niður á tæplega 2,8 km dýpi. Hóla HN-18 er stefnuboruð til suðsuðausturs í átt að samsíða sprungum vestan Hverahlíðar og niður á 2,7 km dýpi (mynd 1). Niðurdæling í þessar holur hefur ekki augljóslega örvað jarðskjálftavirkni á því svæði sem ætla má að yrði fyrir áhrifum af niðurdælingunni, eins og sést á mynd 32. Jarðskjálftavirknin sem hefur mælist á svæðinu er lítil og dreifð bæði í tíma og rúmi svo ekki er hægt að tengja hana við niðurdælingu eða breytingar í niðurdælingu með óyggjandi hætti.



**Mynd 32.** Jarðskjálftavirkni vestur af Hverahlíð eins og hún mælist á jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR frá október 2016. Stærð jarðskjálfta ( $M_L$ ) er teiknuð sem fall af tíma og rauð lína sýnir heildarniðurdælingu í holur HE-55 og HN-18.

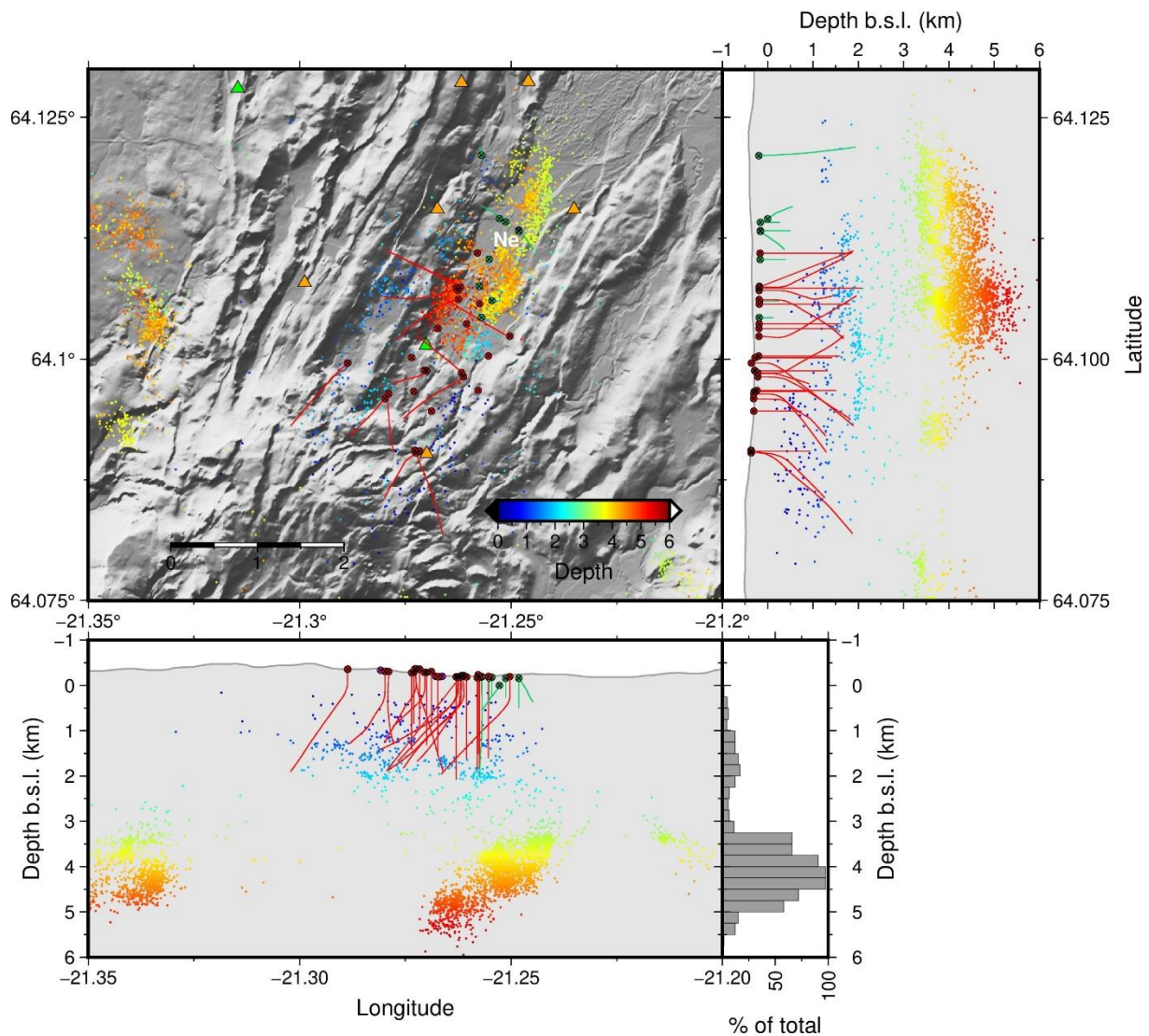
## 8 Dæmi um jarðskjálftavirkni af öðrum svæðum

Í þessum kafla eru tekin dæmi um annars vegar áhrif grunnrar niðurdælingar í „millikerfi“ á i) Nesjavöllum og ii) Þeistareykjum, og iii) hins vegar tvö nýleg dæmi um jarðskjálftavirkni í tengslum við framrás kvikuganga á Íslandi. Þessi dæmi eru tekin til þess að skoða annars vegar áhrif sambærilegrar grunnrar niðurdælingar í millikerfi á jarðskjálftavirkni, líkt og Carbfix áformar, og hins vegar áhrif umbrota eins og innskotavirkni kviku á jarðskjálftavirkni í efstu jarðlögum jarðskorpunnar þegar kvika treður sér til yfirborðs í eldgosi.

### 8.1 Nesjavellir

Grunn niðurdæling í millikerfi Nesjavalla á sér stað í holum NN-1, NN-2, NN-3, NN-4, NN-5, NN-6, NN-7 og NN-9 sem flestar eru boraðar lóðrétt í Nesjavalladalnum og eru á bilinu 300–660 m djúpar (mynd 33). Niðurdæling í þessar grunnu holur hófst í litlum mæli árið 2002 en niðurdæling jókst árið 2006 og jókst svo enn frekar árið 2016. Niðurdæling í þessar grunnu holur hefur ekki valdið neinni örvaðri jarðskjálftavirkni í efstu ~2 km af jarðlögum Nesjavalladalsins, eins og sést á mynd 33, þó svo að miklu vatnsmagni hafi verið dælt í holurnar á tímabilinu, eða hátt í 400 L/s að meðaltali frá árinu 2016. Því má með nokkuð óbyggjandi hætti ætla að ekki sé þrýstisamband milli grunns millikerfis og dýpra jarðhitakerfis Nesjavalla sem er með virkum jarðskjálftasprungum á ~3–6 km dýpi.

Á Nesjavöllum hófst að auki djúp niðurdæling u.þ.b. ári síðar, þ.e. síðla hausts 2018. Dælt hefur verið að meðaltali um 60–80 L/s niður í holu NJ-18 sem er norðarlega í Nesjavalladalnum og stefnuboruð til norðurs niður á rúmlega 2,1 km dýpi. Ekki hefur orðið vart við neina örvaða jarðskjálftavirkni síðan sú niðurdæling hófst, eins og sést á mynd 33.



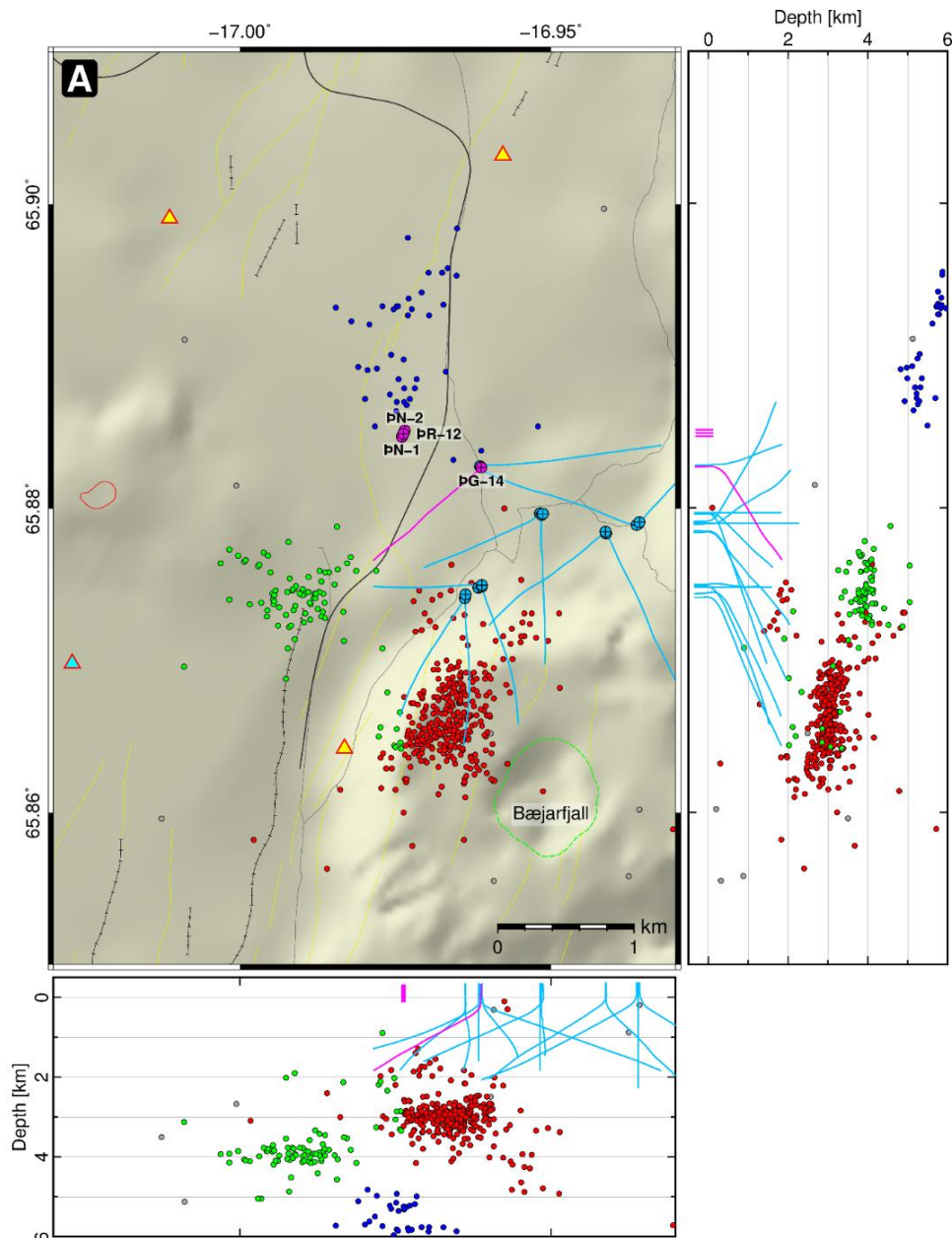
**Mynd 33.** Afstæð staðsetning jarðskjálfta á Nesjavöllum á tímabilinu 2016–2022. Jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi og sýndar eru allar borholur, ásamt holuferlum, sem nýttar voru til vinnslu (rauður) og niðurdælingar (grænn) árið 2020.

## 8.2 Þeistareykir

Á Þeistareykjum voru boraðar þrjár grunnar niðurdælingarholur árið 2014, holur ÞN-1, ÞN-2 og ÞR-12, rétt norður af vinnslusvæði virkjunarinnar (mynd 34). Holurnar eru allar lóðrétt boraðar innan sprungusveims Þeistareykja, niður á ~400 m dýpi. Þeistareykjavirkjun var gangsett árið 2017 og niðurdæling í holurnar þrjár hófst haustið 2018. Töluverðu vatnsmagni er dælt niður í holurnar, eða hátt í 150–200 L/s samtals að jafnaði (Egill Árni Guðnason o.fl., 2021). Frá því að niðurdæling hófst hefur jarðskjálftavirkni á Þeistareykjum verið vöktuð með jarðskjálftamælaneti Landsvirkjunar og ÍSOR en engin örvuð jarðskjálftavirkni hefur mælst í efstu ~2 km af jarðlögum Þeistareykjasvæðisins á þessum tíma og má því ætla, með óyggjandi hætti, að engin hætta á örvaðri jarðskjálftavirkni stafi af svo grunnri niðurdælingu á Þeistareykjum. Hins vegar hefur land sigið mjög staðbundið, um 10–15 mm/ári, á litlu svæði umhverfis niðurdælingarholurnar frá því að niðurdæling hófst árið 2018 (Vincent Drouin, 2021).



Í þessu samhengi er lagt til að vel sé fylgst með landhæðarbreytingum og aflögun á áhrifa-svæði Carbfix á yfirborði (mynd 21) með InSAR-mælingum. Dæmi frá Þeistareykjum sýnir að grunn niðurdæling getur orsakað staðbundna aflögun umhverfis niðurdælingarholurnar og niðurdæling í djúpkerfi Húsmúla hefur sömuleiðis valdið aflögun. Eftirlit með InSAR-mælingum getur því mögulega sagt til um áhrif niðurdælingarinnar á spennubreytingar í jarðskorpunni.



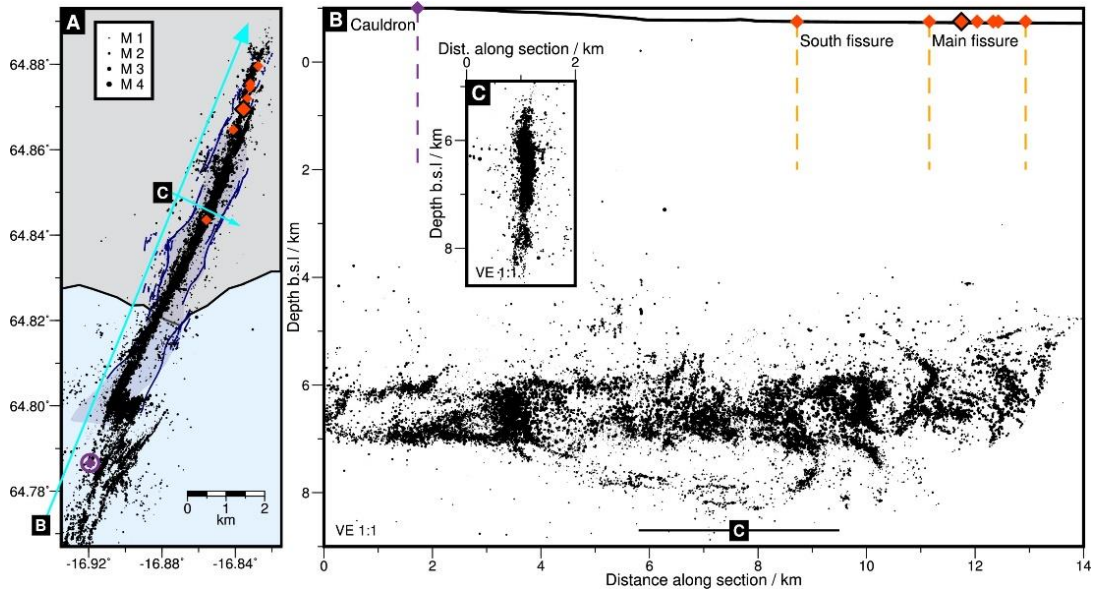
**Mynd 34.** Jarðskjálftavirkni á Þeistareykjum frá nóvember 2020 til október 2021, á korti og dýptar-sniðum (Egill Árni Guðnason o.fl., 2021). Niðurdælingarholur PN-1, PN-2 og PR-12 eru í fjólubláum lit, bæði holutoppar og holuferlar.

### 8.3 Framrás kvikuganga

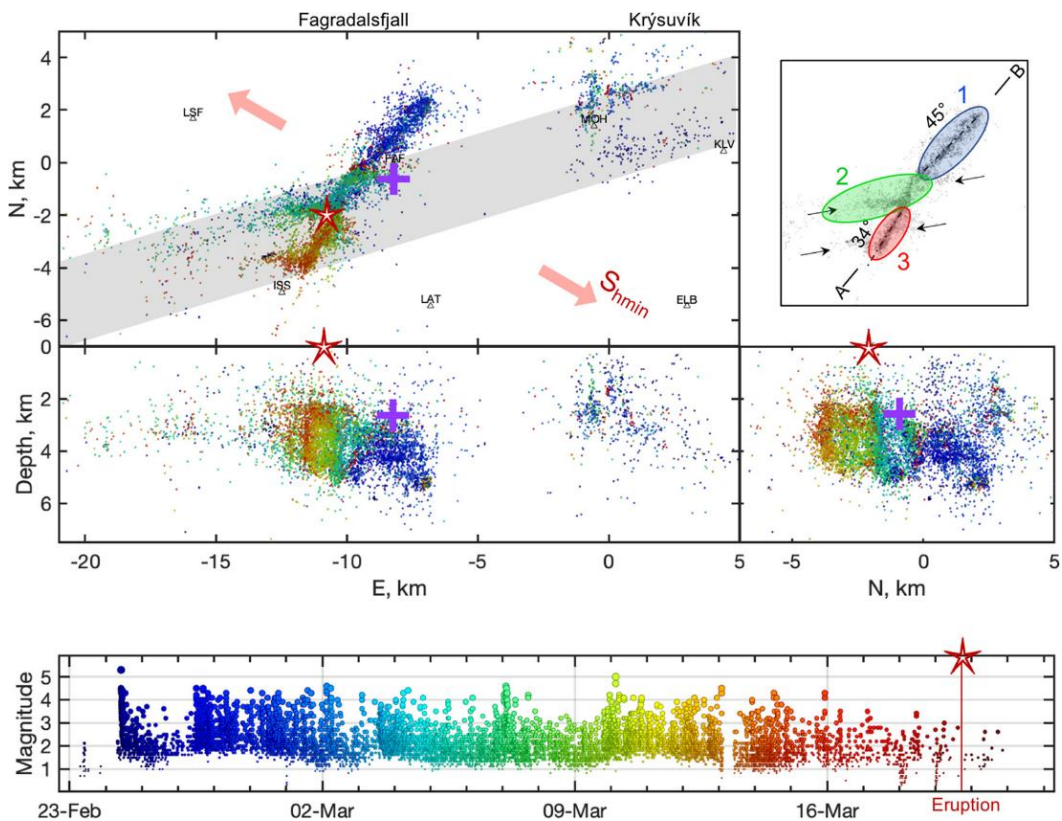
Tvö nýleg dæmi eru um jarðskjálftavirkni af völdum framrás kvikuganga, þ.e. um ferlið þegar kvika brýtur sér leið um hinn brotgjarna efri hluta jarðskorpunnar áður en hún nær til yfirborðs í eldgos; annars vegar frá eldgosinu í Holuhrauni árið 2014 og hins vegar frá eldgosinu í Geldingadölum árið 2021. Bæði dæmin benda til þess að almennt sé spennuástand í efstu nokkrum kílómetrum jarðskorpunnar á þá leið að jarðskorpan sé ekki nógu sterk til þess að brotna í jarðskjálftum, líkt og dæmi um áhrif grunnrar niðurdælingar á jarðskjálftavirkni benda til. Í efstu kílómetrunum virðist aflögun vegna kvikugangsins fara fram sem átakalaus gliðnun þannig að jarðskjálftavirkni tengd framrás kvikuganga virðist fyrst og fremst bundin við það dýpi þar sem styrkur og spenna bergsins er hvað mest. Það er þó mismunandi eftir svæðum hversu þykkur þessi efri hluti jarðskorpunnar er sem brotnar ekki í jarðskjálftum, eins og dæmin í þessum kafla sýna.

Árið 2014 ferðaðist kvika í kvikugangi frá kvikuhólfi Bárðarbungu í Vatnajökli um 46 km leið í berggrunni undir jöklinum uns hún braust til yfirborðs í eldgos í Holuhrauni norðan jökulsins. Jarðskjálftavirkni í tengslum við framrás þessa kvikugangs var að mestu bundin við 5–7 km dýpi alla þessa 46 km leið. Engin grunnstæð jarðskjálftavirkni mældist áður en kvikan braut sér leið til yfirborðs, jafnvel þó að mikill sigdalur hafi myndast fyrir ofan kvikuganginn þegar hann nálgadist yfirborð norðan jökulsins (Þorbjörg Ágústsdóttir o.fl., 2016; Jennifer Woods o.fl., 2019) (mynd 35). Að auki má nefna að svæðið var á sama tíma vel vaktað með þéttu, staðbundnu jarðskjálftamælaneti.

Árið 2021, í kjölfar mikilla umbrota á Reykjanesskaga í tæp tvö ár, ferðaðist kvika frá miklu dýpi, 15–20 km, neðan Fagradalsfjalls og upp í hinn brotgjarna efri hluta jarðskorpunnar innan eldstöðvakerfis Fagradalsfjalls. Þegar upp í efri hlutann var komið ferðaðist kvikan fram og til baka í kvikugangi innan eldstöðvakerfisins, bæði til norðausturs og suðvesturs, áður en kvikan braut sér leið til yfirborðs í Geldingadölum (Tomas Fischer o.fl., 2022) (mynd 36). Í þessu tilfalli var jarðskjálftavirkni í tengslum við framrás kvikugangsins að mestu bundin við 2–6 km dýpi en nær engin grunnstæð jarðskjálftavirkni mældist ofan við 2 km dýpi. Þetta bendir til þess að efstu 2 km jarðskorpunnar á Reykjanesskaganum séu almennt ekki nógu sterkir til að aflagast eða brotna í jarðskjálftum, heldur er jarðskorpan efst þess í stað veik og brotin þannig að kvikan getur brotið sér leið til yfirborðs án þess að því fylgi grunnstæðir jarðskjálftar.



**Mynd 35.** Afstæð staðsetning jarðskjálfta (svartir punktar) sem sýna á korti (A) hvernig kvikugangurinn frá kvikuhólfi Bárðarbungu ferðaðist undan jöklinum til norðausturs þar sem kvikan braut sér leið til yfirborðs í Holuhrauni (rauðir tíglar) (Jennifer Woods o.fl., 2019). Á dýptarsniðinu (B) sést vel hvernig engin grunnstæð jarðskjálftavirkni mældist áður en kvikan braut sér leið til yfirborðs norðan jökulsins, heldur er virknin að mestu bundin við 5–7 km dýpi.



**Mynd 36.** Jarðskjálftavirknin í eldstöðvakerfi Fagradalsfjalls í aðdraganda eldgossins í Geldingadölum, þ.e. frá 23. febrúar til 22. mars 2021 (Tomas Fischer o.fl., 2022). Jarðskjálftarnir eru sýndir á korti og á dýptarsniðum og eru litaðir eftir tíma. Á dýptarsniðum sést vel hvernig engin grunnstæð jarðskjálftavirkni mældist áður en kvikan braut sér leið til yfirborðs í Geldingadölum (rauð stjarna), heldur er virknin að mestu bundin við 2–6 km dýpi.

## 9 Hugsanlegar breytingar á jarðskjálftavirkni

Frummat þetta er unnið í samræmi við reglur Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur (OS-2016-R01-01). Lagt er mat á það hversu líklegt er að jarðskjálftavirkni fylgi i) viðbót á CO<sub>2</sub> í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi í Húsmúla, ii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í „millikerfi“ í Jarðhitagarði ON og iii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi á núverandi niðurrensslissvæðum, s.s. í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka.

### 9.1 Hætta á jarðskjálftavirkni tengd niðurdælingu CO<sub>2</sub>

#### Núverandi niðurdæling í djúpkerfi Húsmúla

Það er þekkt að örvuð jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar geti bæði tengst heildarmagni niðurdælingar og að snöggar breytingar á niðurdælingu geti valdið jarðskjálftum. Þegar uppsöfnuð niðurdæling (holur HN-9, HN-12, HN-14, HN-16 og HN-17) og uppsöfnuð jarðskjálftavirkni í Húsmúla er skoðuð má sjá að samband er á milli heildarmagns niðurdælingarvökvans og jarðskjálftaútlausnar (Sigríður Kristjánsdóttir og Kristján Ágústsson, 2017; Carbfix, 2020; Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021). Í niðurstöðu frummats á jarðskjálftahættu vegna breytinga á niðurdælingu í Húsmúla frá 2017 segir að svæðið falli undir 3. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að losun kunni að leiða af sér aukna jarðskjálftavirkni og að hún verði finnanleg á yfirborði. Í frummatinu var talið ráðlegt að auka niðurdælingu í litlum skrefum með hóflegri þrýsti-aukningu í hverju skrefi og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni þegar magn niðurdælingar fer umfram það sem áður hefur verið dælt í holurnar (Sigríður Kristjánsdóttir og Kristján Ágústsson, 2017).

Árið 2016 var CO<sub>2</sub> í fyrsta skipti leyst upp í niðurdælingarvatninu í Húsmúla. Sú breyting á efnasamsetningu vökvans olli ekki aukningu í jarðskjálftavirkni og benda gögn frekar til þess að örvuð jarðskjálftavirkni hafi minnkað í kjölfarið, ef eitthvað er (Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021). Í núverandi sviðsmynd er ekki gert ráð fyrir að auka heildarmagn núverandi niðurdælingar í djúpkerfi Húsmúla, heldur er einungis gert ráð fyrir að auka magn af uppleystu CO<sub>2</sub> í niðurdælingarvatninu.

Í ljósi fyrirbyggjandi gagna er niðurstaða þessa frummats fyrir aukið magn af uppleystu CO<sub>2</sub> í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi Húsmúla, skv. reglum Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð vegna losunar á vökva í jörðu um borholur (nr. OS-2016-R01-01) að svæðið falli áfram undir 3. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að hætta sé á finnanlegri jarðskjálftavirkni. Þó má ætla að jarðskjálftavirkni verði aldrei jafnmikil og hún var í upphafi niðurdælingar árið 2011 sökum þess að skýr vísbinding er um að niðurdæling hafi losað um mestu mismunaspennuna í Húsmúla. Með tíð og tíma hefur örvuð jarðskjálftavirkni minnkað, hrinur verða sjaldnar og eru minni og vægari en í upphafi (myndir 27 og 28). Auk þess má gera ráð fyrir að náttúruleg spennusöfnun á svæðinu sé hægari sökum þess að stöðug niðurdæling leysir spennuna út jafnóðum og eru því minni líkur á stórum jarðskjálfta (> 3 M<sub>L</sub>). Áfram er ráðlegt að fylgjast vel með jarðskjálftavirkni ef heildarmagn niðurdælingar fer umfram það sem áður hefur verið dælt í holurnar en svæðið er nú þegar vakt af staðbundnu jarðskjálftamælaneti ON og ÍSOR, auk nærliggjandi jarðskjálftamæla VÍ.



## Niðurdæling í „millikerfi“ í Jarðhitagarði ON

Í núverandi sviðsmynd eru áform um að boraðar verði nýjar, grunnar borholur í Jarðhitagarði ON fyrir niðurdælingu á uppleystu CO<sub>2</sub> í vatni. Gert er ráð fyrir að holurnar verði fóðraðar niður á ~300 m dýpi, og að þær verði ekki dýpri en 800 m. Með því að bora svo grunnt verður dælt niður í svokallað millikerfi, þ.e. neðan grunnvatnskerfisins en ofan jarðhitakerfisins. Dýpi á grunnvatnsborð á þessu svæði er um 50–100 m og neðan kalda grunnvatnskerfisins er þétt móbergslag á um 300 m dýpi sem virkar sem nokkurs konar þakberg milli kalda grunnvatnskerfisins og millikerfisins. Í millikerfinu gætir jarðhitaáhrifa og er hiti frá ~50°C og allt að ~200°C á um og yfir ~700 m dýpi þar sem háhitaummyndunar fer að gæta og skilgreind efri mörk jarðhitakerfisins liggja. Þessi neðri mörk millikerfisins og efri mörk jarðhitakerfisins í Jarðhitagarði ON ákvarðast fyrst og fremst út frá viðnámsmælingum, þ.e. af efri hluta lágviðnámskápu jarðhitakerfisins.

Almennt er ekki talið að grunn niðurdæling í millikerfi á jarðhitasvæðum, eins og Carbfix áformar, valdi örvaðri jarðskjálftavirkni, enda er ekki beint þrýstisamband milli grunnvatns- og millikerfisins og jarðhitakerfisins þar sem hitastig, þrýstingur og bergspenna er hærri og jarðskorpan er nógu sterk til þess að brotna í jarðskjálftum. Þrjú dæmi þessu til staðfestingar eru um grunna niðurdælingu í millikerfi sem ekki hefur valdið örvaðri jarðskjálftavirkni, i) frá grunnu niðurdælingarsvæði Carbfix í Prengslum (kafla 7.4), ii) grunnu niðurdælingarsvæði ON á Nesjavöllum (kafla 8.1), iii) og grunnu niðurdælingarsvæði Landsvirkjunar á Þeistareykjum (kafla 8.2). Þessu enn frekar til staðfestingar eru nýleg dæmi um framrás kvikuganga á Íslandi, í Holuhrauni 2014 og í Geldingadölum 2021, sem benda til þess að almennt sé spennuástand í efstu kílómetrum jarðskorpannar á þá leið að jarðskorpan sé ekki nógu sterk til þess að brotna í jarðskjálftum (kafla 8.3).

Kortlagðar sprungur og misgengi í Húsmúla einskorðast við Húsmúladyngjuna sjálfa en eru hulin hraunum þegar komið er niður á sléttuna sunnan Húsmúla og vestan Hellisheiðarvirkjunar, þ.e. inn í Jarðhitagarð ON (Kristján Sæmundsson o.fl., 2016). Af þeim sökum eru engar sprungur og misgengi kortlögð innan Jarðhitagarðs ON. Árið 2010 var gerð tilraun til þess að rekja tvö þessara misgengja sem kortlögð eru í Húsmúla og vestan í Sleggjubeinsdal til suðurs með þyngdarmælingum (Arnar Már Vilhjálmsson og Ingvar Þór Magnússon, 2010a, 2010b). Mælt var þétt á fimm mælinúm með stefnu NV-SA, þvert á ríkjandi sprungustefnu á svæðinu. Fyrsta mælinúmið var rétt sunnan Húsmúla og var mælinúmið svo nokkuð jafndreift til suðurs, þannig að síðustu tvær lágur rétt sunnan Hellisheiðarvirkjunar. Þyngdarfrávik beggja misgengja voru skýrust í líkönum á nyrstu mælinúmi rétt sunnan Húsmúla. Framhald misgengisins í Sleggjubeinsdal var svo með góðu móti hægt að rekja með þyngdarmælingum áfram til suðurs í átt að misgengi sem sést á yfirborði í vestanverðu Reykjafelli. Framhald vestara misgengisins í Húsmúla sást sem skýr þyngdarfrávik í nyrstu þremur mælinúmi en frávik voru daufari í syðstu mælinúmi tveimur. Það virðist þó stefna til suðurs í átt að misgengi sem sést á yfirborði í Litla-Reykjafelli.

Áætluð lega þessara misgengja er teiknuð sem gular punktalínur á myndir 22, 23 og 28. Af þessari tilraun að dæma má því leiða að því líkum að sprungur og misgengi í Húsmúla teygji sig áfram til suðurs, inn í Jarðhitagarð ON. Þessi áætlaða lega misgengjanna tveggja er sömuleiðis studd með sprungukortlagningu Maryam Khodayar o.fl. (2015) í Húsmúla (sjá mynd 3). Út frá þeim rannsóknum sem fyrir liggja er erfitt að segja til um hvort mögulega dýpki niður á misgengin eftir því sem sunnar dregur. Jarðskjálftavirkni, sem mælst hefur innan Jarðhitagarðs ON (myndir 22, 23 og 28), er mjög líklega örðuð vegna djúprar niðurdælingar í Húsmúla og því líklega tengt öðru eða báðum þessara misgengja sem kortlögð voru

með þyngdarmælingum. Alls hafa um 430 jarðskjálftar verið staðsettir á þessu svæði innan Jarðhitagarðsins frá desember 2016 til maí 2022 og eru þeir flestir á 1–3,5 km dýpi.

Í ljósi fyrirbyggjandi gagna er niðurstaða þessa frummats fyrir niurdælingu í millikerfi í Jarðhitagarði ON, skv. reglum Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð vegna losunar á vökva í jörðu um borholur (nr. OS-2016-R01-01), að svæðið falli undir 2. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni sé óveruleg. Ráðlegt er að auka niurdælingu í litlum skrefum og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni þegar i) boranir hefjast, ii) þegar niurdæling hefst og iii) þegar magn niurdælingar er aukið.

### **Niurdæling í önnur „millikerfi“**

Í núverandi sviðsmynd eru einnig áform um að boraðar verði nýjar, grunnar borholur á núverandi niurrensslissvæðum, s.s. í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka, fyrir niurdælingu á uppleystu CO<sub>2</sub> í vatni. Líkt og í Jarðhitagarði ON er gert ráð fyrir að holurnar verði fóðraðar niður á ~300 m dýpi og að þær verði ekki dýpri en 800 m. Holurnar verða þannig hannaðar fyrir niurdælingu í millikerfið og hafi því hvorki áhrif á kalt grunnvatn né háhitanytingu á svæðinu.

Almennt er ekki talið að grunn niurdæling í millikerfi á jarðhitasvæðum, eins og Carbfix áformar, valdi örvaðri jarðskjálftavirkni, enda er ekki beint þrýstisamband milli grunnvatns- og millikerfisins og jarðhitakerfisins, eins og dæmin hér á undan sýna. Spennuástand í bergi er mismunandi á núverandi niurrensslissvæðum, eins og sést glöggt á því hversu viðkvæm þau eru fyrir áhrifum niurdælingar vatns á jarðskjálftavirkni. Þannig hefur djúp niurdæling örvað jarðskjálftavirkni í Sleggjubeinsdal, Húsmúla og Gráuhnúkum (kafla 7.4) upp að mismiklu marki, á meðan grunn tilraunaniurdæling í holur í Þrengslum örvaði ekki jarðskjálftavirkni á svæðinu (kafla 7.4).

Í ljósi fyrirbyggjandi gagna er niðurstaða þessa frummats fyrir niurdælingu í millikerfi í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka, skv. reglum Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð vegna losunar á vökva í jörðu um borholur (nr. OS-2016-R01-01) að svæðin falli undir 2. lið í 4. gr. reglnanna, þ.e. að hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni sé óveruleg. Ráðlegt er að auka niurdælingu í litlum skrefum og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni þegar i) boranir hefjast, ii) þegar niurdæling hefst og iii) þegar magn niurdælingar er aukið.

## **9.2 Áhrifasvæði áætlaðrar niurdælingar**

Áhrifasvæði áætlaðrar niurdælingar Carbfix á CO<sub>2</sub> uppleystu í vatni á jarðskjálftavirkni neðanjarðar, þ.e. niurdælingar- og geymslusvæðið sjálf, kemur til með að ná yfir stærra landfræðilegt svæði undir yfirborði en áhrifasvæði framkvæmda á yfirborði. Miðast því athugasvæði tengt frummati á jarðskjálftahættu vegna fyrirhugaðrar framkvæmdar við áhrifasvæðið neðanjarðar.

Ef til finnanlegrar jarðskjálftavirkni kemur vegna i) viðbótar á CO<sub>2</sub> í núverandi niurdælingu í djúpkerfi í Húsmúla, ii) niurdælingar í nýjar, grynri holur í millikerfi í Jarðhitagarði ON og iii) niurdælingar í nýjar, grynri holur í millikerfi á núverandi niurrensslissvæðum, s.s. í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka, má gera ráð fyrir að áhrifasvæðið stefni u.þ.b. N-S til NNA-SSV, og afmarkist gróflega af Húsmúla í norðri, Skarðsmýrarfjalli og Lakahnúkum í austri, Stóra-Meitli og Lambafelli í suðri og Svínahrauni/Svínahraunsbruna í vestri (mynd 21). Þetta mat er byggt á fyrirbyggjandi gögnum um örvaða jarðskjálftavirkni og hvernig hún hefur teygst sig í tíma og rúmi. Líklegt er að raunverulegt áhrifasvæði komi til með að verða minna að flatarmáli.

Líkur á stórum jarðskjálfta (> 3 M<sub>L</sub>) innan áhrifasvæðisins eru minni en áður, eins og áður var greint frá, sökum þess að stöðug niðurdæling í til að mynda Gráuhnúkum og Húsmúla hefur leyst mestu spennuna út jafnóðum en miðað við fyrirbyggjandi þekkingu á því hvernig jarðskjálftabylgjur dvína með fjarlægð frá upptakastað sínum má gera ráð fyrir að minnsti jarðskjálfti sem næmt fólk í hvíld í Hveragerði (næsti þéttbýlisstaður) geti fundið sé af stærð 2,5 M<sub>L</sub> eða stærri (Gunnar Geir Pétursson og Kristín S. Vogfjörð, 2009).

Til þess að bæta næmni núverandi jarðskjálftamælanets ON/ÍSOR og VÍ á áhrifasvæðinu, og minnka bil (e. azimuthal gap) á milli jarðskjálftamæla, er lagt til að bæta við einum jarðskjálftamæli á vestanverðu svæðinu, þ.e. vestur af Jarðhitagarði ON. Til þess væri hægt að nýta eldra fónstæði frá jarðskjálftastöð SVIN úr ON/ÍSOR-jarðskjálftamælanetinu sem nú er ekki í nýtingu og er staðsett vestan við Jarðhitagarð ON. Eins og stendur eru næstu jarðskjálftamælar í nágrenni við framkvæmdasvæðið í Húsmúla (ON/ÍSOR), í Kristnitökuhrauni vestur af Lambafelli (ON/ÍSOR), Lakahnúkum (ON/ÍSOR) og í Engidal (VÍ).

## 10 Heimildaskrá

- Anne Obermann, Sin-Mei Wu, Þorbjörg Ágústsdóttir, Alejandro Duran, Tobias Diehl, Pilar Sánchez-Pastor, Sigríður Kristjánsdóttir, Vala Hjörleifsdóttir, Stefan Wiemer og Gylfi Páll Hersir (2022). *Seismicity and 3-D body-wave velocity models across the Hengill geothermal area, SW Iceland*. *Frontiers in Geosciences*, section Solid Earth Geophysics, Women in Seismology, í útgáfu.
- Amy E. Clifton, Freysteinn Sigmundsson, Kurt L. Feigl, Gunnar B. Guðmundsson og Þóra Árnadóttir (2002). Surface effects of faulting and deformation resulting from magma accumulation at the Hengill triple junction, SW Iceland, 1994-1998. *Journal of Volcanology and Geothermal Res.*, Vol. 115, 233-255. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00319-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00319-5).
- Arnar Már Vilhjálmsson og Ingvar Þór Magnússon (2010a). *Tilraun til að rekja misgengi við Hellisheiðarvirkjun með þyngdarmælingum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-10010, 14 bls.
- Arnar Már Vilhjálmsson og Ingvar Þór Magnússon (2010b). *Framhald þyngdarmælinga við Hellisheiðarvirkjun til ákvörðunar á legu misgengis*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-10064, 14 bls.
- Arnar Már Vilhjálmsson, Ásdís Benediktsdóttir og Knútur Árnason (2019). *Nesjavellir og Þverárdalur. Einvið túlkun viðnámsgagna og þrívíð fyrir Nesjavallasvæðið*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/062, 14 bls.
- Ásdís Benediktsdóttir (2022). *Dýpi á 10 Ohm-m yfirborð út frá TEM mælingum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR minnisblað.
- Bjarni Bessason, Eyþór H. Ólafsson, Gunnar Gunnarsson, Ólafur G. Flóvenz, Steinunn S. Jakobsdóttir, Sveinbjörn Björnsson og Þóra Árnadóttir (2012). *Verklag vegna örvaðrar skjálftavirkni í jarðhitakerfum*. Orkuveita Reykjavíkur, OR-2012-24, 108 bls.
- Bjarni R. Kristjánsson, Gudni Axelsson, Gunnar Gunnarsson, Ingvi Gunnarsson og Finnboði Óskarsson (2016). Comprehensive Tracer Testing in the Hellisheidi Geothermal Field in SW-Iceland. *PROCEEDINGS, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 22–24, 2016*.
- Björn S. Harðarson, Sigurður G. Kristinsson, Ragna Karlsdóttir og Gunnlaugur M. Einarsson (2015). Geothermal Implications of Rift Zone Mini-Grabens – Geological and Geophysical Structure of the Reykjafell Mini-Graben, Hengill Geothermal Field, SW Iceland. *GRC Transactions*, Vol. 39.
- Carbfix (2020). *Carbfix Deliverable D3.4: Report on Induced Seismicity*.
- Cecile Ducrocq, Halldór Geirsson, Þóra Árnadóttir, Daniel Juncu, Bjarni Reykr Kristjánsson, Sigrún Tómasdóttir og Gunnar Gunnarsson (2020). Temporal Variations in Ground Deformation Caused by Geothermal Processes in the Hengill Area, SW Iceland, During 2009-2019. *World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavík, Ísland*.
- Cecile Ducrocq, Halldór Geirsson, Þóra Árnadóttir, Daniel Juncu, Vincent Drouin, Gunnar Gunnarsson, Bjarni Reykr Kristjánsson, Freysteinn Sigmundsson, Sigrún Hreinsdóttir, Sigrún Tómasdóttir og Hanna Blanck (2021). Inflation-deflation episodes in the Hengill and Hrómundartindur volcanic complexes, SW Iceland. *Frontiers in Earth Science*, 915. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.725109>.



- Chiara Marieni, Martin Voigt, Deirdre E. Clark, Sigurður R. Gíslason og Eric H. Oelkers (2021). *Mineralization potential of water-dissolved CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S injected into basalts as function of temperature: freshwater versus seawater*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 109: 103357.
- Daniel Juncu, Þóra Árnadóttir, Andy Hooper og Gunnar Gunnarsson (2017). Anthropogenic and natural ground deformation in the Hengill geothermal area, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1), 692–709. <https://doi.org/10.1002/2016JB013626>.
- Daniel Juncu, Þóra Árnadóttir, Halldór Geirsson, Gunnar B. Guðmundsson, Björn Lund, Gunnar Gunnarsson, Andy Hooper, Sigrún Hreinsdóttir og Karolina Michalczewska (2020). Injection-induced surface deformation and seismicity at the Hellisheidi geothermal field, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, p. 106337. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.019>.
- Deirdre E. Clark, Eric H. Oelkers, Ingvi Gunnarsson, Bergur Sigfusson, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Edda S. Aradóttir og Sigurður R. Gíslason (2020). Carbfix2: CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Mineralization During 3.5 Years of Continuous Injection into Basaltic Rocks at More Than 250°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 279, 45–66. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.03.039>.
- Diego Toro (2021). *The litho geochemistry of the high-temperature geothermal field at Nesjavellir, SW Iceland – Implications to mass movement in the Icelandic crust*. MS-ritgerð, jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 118 bls.
- Egill Árni Guðnason, Rike Köpke, Emmanuel Gaucher, Kristján Ágústsson, Steinþór Níelsson og Thomas Kohl (2020). Seismic Monitoring During Drilling and Stimulation of Well RN-15/IDDP-2 in Reykjanes, SW-Iceland. *World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavík, Ísland*.
- Egill Árni Guðnason, Rögnvaldur Líndal Magnússon, Arnar Már Vilhjálmsson, Þorbjörg Ágústsdóttir og Karl Gunnarsson (2021). *Seismic Monitoring in Krafla, Þeistareykir and Námafjall. November 2020 to October 2021*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2021/049, LV-2021-053, 56 bls.
- Freysteinn Sigmundsson, Páll Einarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Gillian R. Foulger, K. M. Hodgkinson og Gunnar Þorbergsson (1997). The 1994–1995 seismicity and deformation at the Hengill triple junction, Iceland: Triggering of earthquakes by minor magma injection in a zone of horizontal shear stress. *Journal of Geophys. Res.: Solid Earth*, Vol. 102 (B7), 15151–15161. <https://doi.org/10.1029/97JB00892>.
- Frolova, J., Franzson, H., Ladygin, V., Sigurdsson, O., Stefansson, V., og Shustrov, V. (2004). Porosity and permeability of hyaloclastite tuffs, Iceland. *Proceedings of International Geothermal Workshop IGW2004*.
- Gillian R. Foulger (1984). *The Hengill Geothermal Area: Seismological Studies 1978–1984*. Orkustofnun, OS-84073/JHD-12, 198 bls.
- Gillian R. Foulger (1988). *Hengill triple junction, SW Iceland 1. Tectonic structure and the spatial and temporal distribution of local earthquakes*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 93 (B11), 13493–13506. <https://doi.org/10.1029/JB093iB11p13493>.
- Guðmundur H. Guðfinnsson, Björn S. Harðarson og Halldór Ingólfsson (2010a). *Kolviðarhóll – Hóla HN-15. Forborun, 1. og 2. áfangi: Borun fyrir yfirborðs- og öryggisfóðringu í 87 m, vinnslufóðrinug í 408 m og vinnsluhluta í 1024 m dýpi*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/059, 46 bls.

- Guðmundur H. Guðfinnsson, Helga M. Helgadóttir, Christa Feucht og Halldór Ingólfsson (2010b). *Húsmúli – Hóla HN-16. Forborun, 1. og 2. áfangi: Borun fyrir yfirborðsfóðringu í 95 m, vinnslufóðringu í 660 m og vinnsluhluta í 2204 m dýpi*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/069, 63 bls.
- Gunnar Geir Pétursson og Kristín S. Vogfjörð (2009). *Attenuation relations for near- and farfield peak ground motion (PGV, PGA) and new magnitude estimates for large earthquakes in SW-Iceland*. Veðurstofa Íslands, VÍ 2009-12, 43 bls.
- Gunnar Þorbergsson og Guðmundur H. Vigfússon (1998). *Nesjavallaveita. Fallmælingar og GPS-mælingar á Hengilssvæði 1998*. Orkustofnun, OS-98060, 37 bls.
- Gunnlaugur M. Einarsson, Daði Þorbjörnsson, Ester Inga Eyjólfsdóttir og Þráinn Friðriksson (2009). *CO<sub>2</sub> Flux in Threngsli. Base line measurements around well HN-4, September 2009*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-09083, 8 bls.
- Gunnlaugur M. Einarsson, Serhat Akin, Matteo Lelli, Stefanie Erstling, Tobias B. Weisenberger, Taylan Akin, Ilaria Baneschi, Ali Baser, Selcuk Erol, Felix Jagert, Glódís Guðgeirsdóttir, Isabella Nardini, Mathias Nehler, Auður A. Óladóttir, Brunella Raco, Onder Saracoglu, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, Unnur Þorsteinsdóttir (2020). *Baseline data collection for CO<sub>2</sub> flux, soil temperature, gas sampling, groundwater chemistry and development of remote sensing methods at the GECO demo sites*. CECO H2020.
- Gunnlaugur M. Einarsson, Sigurður G. Kristinsson, Guðjón Eyjólfur Ólafsson, Þráinn Friðriksson (2010). *CO<sub>2</sub> Flux in Threngsli. Base line measurements around well HN-4, March and April 2010*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-10046, 8 bls.
- Helga M. Helgadóttir (2011). *Berggrunnur og jarðhitaummyndun Gráuhmúkakerfis á sunnanverðu Hengilssvæðinu*. Meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 185 bls.
- Helga M. Helgadóttir, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Steinþór Níelsson, Sveinborg H. Gunnarsdóttir, Theódóra Matthíasdóttir, Björn S. Harðarson, Gunnlaugur M. Einarsson and Hjalti Franzson (2010). *Geology and hydrothermal alteration in the reservoir of the Hellisheiði high temperature system, SW-Iceland*. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indónesía*.
- Helgi A. Alfreðsson, Eric H. Oelkers, Björn S. Harðarson, Hjalti Franzson, Einar Gunnlaugsson og Sigurður R. Gíslason (2013). *The geology and water chemistry of the Hellisheiði, SW-Iceland carbon storage site*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 12, 399–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.11.019>.
- Helgi Torfason, Gylfi P. Hersir, Kristján Sæmundsson, Gunnar V. Johnsen, Einar Gunnlaugsson (1983). *Vestur-Hengill: yfirborðsrannsóknir jarðhitasvæðisins*. Orkustofnun, OS-83119/JHD-22.
- Hjalti Franzson (1998). *Reservoir geology of the Nesjavellir high-temperature field in SW Iceland*. *Proceedings of the 19th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference, Manila, Philippines, 5-6th 1998*, 13–20.
- Hjalti Franzson, Bjarni Reykr Kristjánsson, Gunnar Gunnarsson, Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, Benedikt Steingrímsson og Gestur Gíslason (2005). *The Hengill geothermal system. Development of a conceptual geothermal model*. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*.

- Hrefna Kristmannsdóttir (1979). Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100–300°C. *International Clay conference 1978*. Mortland and Farmer (eds.). Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam, 277–288.
- Ingví Gunnarsson, Pálmar Sigurðsson, Gunnar Gunnarsson, og Þorsteinn Ari Þorgeirsson (2021). *Hellisheiði – Hverahlíð. Vinnsluskýrsla 2020. Afl, vatnsborð, vinnsla, efnafræði – Yfirlit yfir rannsóknir*. Orka náttúrunnar, ON-2021-017.
- Iwona Galeczka, Domenik Wolff-Boenisch, Eric H. Oelkers og Sigurdur R. Gislason (2014). An Experimental Study of Basaltic Glass–H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> Interaction at 22 and 50°C: Implications for Subsurface Storage of CO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 12, 123–45. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.044>.
- Iwona Galeczka, Andri Stefánsson, Barbara I. Kleine, Jóhann Gunnarsson-Robin, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, Bergur Sigfússon, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Tobias B. Weisenberger, and Eric H. Oelkers (2022). A Pre-Injection Assessment of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Mineralization Reactions at the Nesjavellir (Iceland) Geothermal Storage Site. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 115, 103610. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103610>.
- Jennifer Woods, Tom Winder, Robert S. White og Bryndís Brandsdóttir (2019). Evolution of a lateral dike intrusion revealed by relatively-relocated dike-induced earthquakes: The 2014–15 Bárðarbunga–Holuhraun rifting event, Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 53–63, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.032>.
- John Sinton, Karl Grönvold og Kristján Sæmundsson (2005). Postglacial eruptive history of the Western Volcanic Zone, Iceland. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q12009, doi:10.1029/2005GC001021.
- Juerg Matter, Martin Stute, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Eric H. Oelkers, Sigurdur R. Gislason, Edda S. Aradóttir, Bergur Sigfússon o.fl. (2016). Rapid Carbon Mineralization for Permanent Disposal of Anthropogenic Carbon Dioxide Emissions. *Science* 352, no. 6291, 1312–14. DOI: [10.1126/science.aad8132](https://doi.org/10.1126/science.aad8132).
- Ka Lok Li, Claudia Abril, Ólafur Guðmundsson og Gunnar B. Guðmundsson (2019). Seismicity of the Hengill area, SW Iceland: Details revealed by catalog relocation and collapsing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 376, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.008>.
- Kristín Vogfjörð, Sigurlaug Hjaltadóttir, Einar Kjartansson, Pétursson G. G., Sveinbjörnsson, H., Sigþrúður Ármannsdóttir og Gunnar B. Guðmundsson (2012). *Seismic activity in the Hengill region. Seminar on Deep Roots of Geothermal systems*, GEORG, 2012.
- Kristján Ágústsson, Sigríður Kristjánsdóttir, Ólafur G. Flóvenz og Ólafur Guðmundsson (2015). Induced seismic activity during drilling of injection wells at the Hellisheiði power plant, SW Iceland. *World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Ástralíu*.
- Kristján Sæmundsson (1992). Geology of the Thingvallavatn Area. *Oikos*, 64, (1/2), 40–68.
- Kristján Sæmundsson og Magnús Á. Sigurgeirsson (2013). Reykjanesskagi. Í: Júlíus Sólnes. *Náttúruvá á Íslandi. Eldgos og jarðskjálftar*. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 379–401.
- Kristján Sæmundsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Árni Hjartarson, Ingibjörg Kaldal, Sigurður G. Kristinsson og Skúli Víkingsson (2016). *Jarðfræðikort af Suðvesturlandi, 1:100.000 (2. útg.)*. Íslenskar orkurannsóknir.

- Kurt L. Feigl, Jérôme Gasperi, Freysteinn Sigmundsson og Alexis Rigo (2000). Crustal deformation near Hengill volcano, Iceland 1993-1998: Coupling between magmatic activity and faulting inferred from elastic modelling of satellite radar interferograms. *Journal of Geophys. Res.: Solid Earth*, Vol. 105 (B11), 25655–25670. <https://doi.org/10.1029/2000JB900209>.
- Maryam Khodayar, Guðni Axelsson og Benedikt Steingrímsson (2015). *Potential Structural Flow Paths for Tracers and Source Faults of Earthquakes at Húsmúli Hengill, South Iceland*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2015/035, 40 bls.
- Matylda Hermanska, Martin J. Voigt, Chiara Marieni, Julien Declercq og Eric H. Oelkers (2022). A Comprehensive and Internally Consistent Mineral Dissolution Rate Database: Part I: Primary Silicate Minerals and Glasses. *Chemical Geology* 597, 120807. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120807>.
- Maud J. Smit (2021). *Constraining the carbon and sulfur budget, flux, and natural sequestration for the Nesjavellir high-temperature geothermal field, SW-Iceland*. MS-ritgerð, jarvísindadeild, Háskóli Íslands, 81 bls.
- Pilar Sánchez-Pastor, Anne Obermann, Tomas Reinsch, Þorbjörg Ágústsdóttir, Gunnar Gunnarsson, Sigrún Tómasdóttir, Vala Hjörleifsdóttir, Gylfi Páll Hersir, Kristján Ágústsson og Stefan Wiemer (2021). Imaging high-temperature geothermal reservoirs with ambient seismic noise tomography, a case study of the Hengill geothermal field, SW Iceland. *Geothermics*, Vol. 96. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102207>.
- Pogge von Strandmann, P.A.E., Burton, K.W., Snæbjörnsdóttir, S.O. et al. (2019). Rapid CO<sub>2</sub> mineralisation into calcite at the CarbFix storage site quantified using calcium isotopes. *Nature Communications* 10, 1983.
- Reglur um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur nr. OS-2016-R01-01*. Orkustofnun.
- Reidar G. Trønnes (1990). Basaltic melt evolution of the Hengill volcanic system, SW Iceland, and evidence for clinopyroxene assimilation in primitive tholeiitic magmas. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990.
- Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Eric H. Oelkers, Kiflom Mesfin, Edda Sif Aradóttir, Knud Dideriksen, Ingvi Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Juerg M. Matter, Martin Stute og Sigurdur R. Gislason (2017). The Chemistry and Saturation States of Subsurface Fluids During the in Situ Mineralisation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S at the Carbfix Site in Sw-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 58, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.01.007>.
- Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Sigrún Tómasdóttir, Bergur Sigfússon, Edda Sif Aradóttir, Gunnar Gunnarsson, Auli Niemi, Farzad Basirat, Benoît Dessirier, Sigurdur R. Gislason, Eric H. Oelkers og Hjalti Franzson (2018a). The geology and hydrology of the CarbFix2 site, SW-Iceland. *Energy Procedia*, Volume 146, 146-157, ISSN 1876-6102 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.019>.
- Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Sigurdur R. Gislason, Iwona M. Galeczka og Eric H. Oelkers (2018b). Reaction Path Modelling of in-Situ Mineralisation of CO<sub>2</sub> at the Carbfix Site at Hellisheidi, Sw-Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 220, 348–66. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.09.053>.



- Sigríður Kristjánsdóttir og Kristján Ágústsson (2017). *Frummat vegna breytinga á niðurdælingu í Gráuhnúkum og Húsmúla*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-17041.
- Sigríður Kristjánsdóttir, Egill Árni Guðnason, Kristján Ágústsson og Þorbjörg Ágústsdóttir (2019). *Hverahlíð Hengill area: Detailed Analyses of Seismic Activity from December 2016 to December 2019*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/051, 54 bls.
- Sigurður Reynir Gíslason, Domenik Wolff-Boenisch, Andri Stefansson, Eric H. Oelkers, Einar Gunnlaugsson, Hólmfríður Sigurdardóttir, Bergur Sigfusson, Wallace S. Broecker, Juerg M. Matter, Martin Stute, Gudni Axelsson, Þráinn Fridriksson (2010). Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. *International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 4, Issue 3*, 2010, 537–545.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Þóra Árnadóttir, Kristján Ágústsson, Þórunn Skaftadóttir, Gunnar B. Guðmundsson og Grímur Björnsson (1998). *Skjálftahrina í Ölfusi í nóvember 1998*. Veðurstofa Íslands, VÍ-G98046-JA09.
- Sveinborg H. Gunnarsdóttir (2012). *Jarðfræði og ummyndun í nágrenni Reykjafells á Hellisheiði*. Meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 217 bls.
- Sveinn P. Jakobsson og Magnús T. Guðmundsson (2012). Móbergsmyndunin og gos undir jöklum. *Náttúrufræðingurinn*, 82 (1–4), 113–125.
- Sveinn P. Jakobsson, Kristján Jónasson og Ingvar A. Sigurðsson (2008). The three igneous rock series of Iceland. *Jökull*, 58, 117–138.
- Steinunn S. Jakobsdóttir (2008). Seismicity in Iceland: 1994–2007. *Jökull*, 58, 75–100.
- Sylvía Rakel Guðjónsdóttir, Þráinn Friðriksson og Auður Agla Óladóttir (2014). *Gasflæðimælingar á yfirborði vegna niðurdælingar H<sub>2</sub>S og CO<sub>2</sub> í holu HN-16*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-14037, 16 bls.
- Thomas M.P. Ratouis, Sandra O. Snæbjörnsdóttir, Gunnar Gunnarsson, Ingvi Gunnarsson, Bjarni R. Kristjánsson og Edda S.P. Aradóttir (2019). Modelling the Complex Structural Features Controlling Fluid Flow at the CarbFix2 Reinjection Site, Hellisheiði Geothermal Power Plant, SW-Iceland. *Proceedings, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11–13, 2019* SGP-TR-214.
- Thomas M.P. Ratouis, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Martin J. Voigt, Bergur Sigfusson, Gunnar Gunnarsson, Edda S. Aradóttir og Vala Hjörleifsdóttir (2022). Carbfix 2: A transport model of long-term CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S injection into basaltic rocks at Hellisheiði, SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 114*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103586>.
- Tomas Fischer, Pavla Hrubcova, Ali Salama, Jana Doubravová, Þorbjörg Ágústsdóttir, Egill Árni Guðnason, Josef Horálek og Gylfi Páll Hersir (2022). Swarm seismicity illuminates stress transfer prior to the 2021 Fagradalsfjall eruption in Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 594. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117685>.
- Vala Hjörleifsdóttir, Garðar Ingvarsson, Thomas Ratouis, Gunnar Gunnarsson, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir og Bergur Sigfusson (2021). *10 years of induced earthquakes in the Húsmúli CO<sub>2</sub> injection site, Hellisheiði, Iceland*. SEG Global Meeting, 96–100.
- Vincent Drouin (2021). *InSAR Monitoring of Krafla, Bjarnarflag and Þeistareykir Geothermal Areas. 2021 Update*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2021/045, LV-2021-050, 19 bls.

Þorbjörg Ágústsdóttir, Jennifer Woods, Tim Greenfield, Robert G. Green, Robert S. White, Tom Winder, Bryndís Brandsdóttir, Sveinbjörn Steinhórsson og Heidi Soosalu (2016). Strike-slip faulting during the 2014 Bárðarbunga-Holuhraun dike intrusion, central Iceland. *Geophysical Research Letters*, 43(4), 1495–1503, <https://doi.org/10.1002/2015GL067423>.